

**XXIV**XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009**awarie budowlane**

Dr hab. inż. EUGENIUSZ HOTAŁA, prof. PWr, *eugeniusz.hotala@pwr.wroc.pl*

Prof. dr hab. inż. KAZIMIERZ RYKALUK, *kazimierz.rykaluk@pwr.wroc.pl*

Dr inż. RAJMUND IGNATOWICZ, *rajmund.ignatowicz@pwr.wroc.pl*

Politechnika Wrocławska

AWARYJNE ZAGROŻENIE STALOWEJ KONSTRUKCJI DACHU HALI WIDOWISKOWO-SPORTOWEJ W SOPOCIE

FAILURE HAZARD OF STEEL ROOF STRUCTURE OVER THE SHOW-SPORTS HALL IN SOPOT

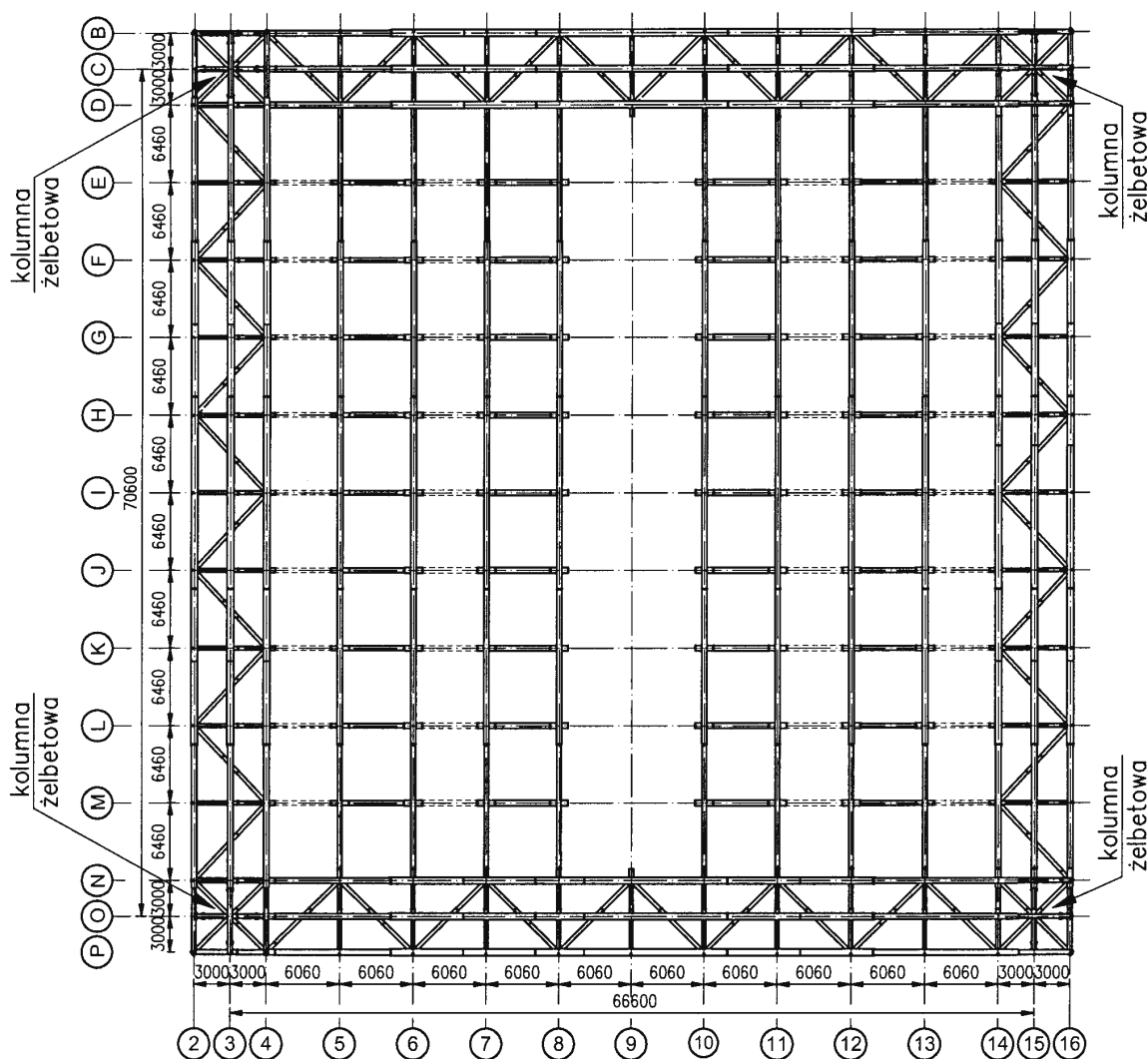
Streszczenie W końcowym etapie montażu stalowego, kratowego rusztu dachowego nad centralną częścią hali widowiskowo-sportowej stwierdzono różnorodne pęknięcia w około 65% węzłach. Powstałe zagrożenie awaryjne konstrukcji nośnej rusztu pojawiło się już podczas obciążenia ciężarem własnym. Uniemożliwiło to kontynuowanie dalszych prac montażowych. Obszerne analizy różnych czynników konstrukcyjnych, wykonawczych, transportowych i montażowych oraz badania metalograficzne i defektoskopowe pozwoliły ustalić podstawowe przyczyny powstałego zagrożenia awaryjnego. Stwierdzono, że wadliwe rozwiązania konstrukcyjne węzłów kratownic i niewłaściwy podział konstrukcji na elementy wysyłkowe oraz niekorzystne oddziaływania transportowe i montażowe były głównymi przyczynami poważnych uszkodzeń konstrukcji dachowej i konieczności jej wzmocnienia.

Abstract At the final stage of assemblage of a steel truss grid over central part of the show-sport hall, the heterogeneous cracks have been observed at about 65% of nodes. Arised failure hazard of the grid structure appeared already under the dead load, and after this the assembling works were stopped. An extensive analysis of different factors like: construction, execution, transport and assemblage, supported by metallographic and ultrasonic tests, allowed to recognize the basic causes of the failure hazard. It was found that defective construction of the truss nodes, unproper division of the structure to field elements and the negative effect of the both transport and assemblage leaded mainly to serious damage of the roof structure and showed the necessity of its strengthening.

1. Wprowadzenie

Na granicy miast Gdańska i Sopotu wznoszona jest hala widowiskowo-sportowa, której centralna część ma stalową konstrukcję nośną dachu w postaci rusztu kratownicowego. Ten ruszt o rzucie prostokąta podparty jest na czterech narożnych podporach żelbetowych, a rozstaw osiowy podpór wynosi 66600×70600 mm. Rozstaw kratownic w jednym kierunku wynosi 6060 mm, a kierunku prostopadłym wynosi 6460 mm. Wysokość osiowa kratownic jest zmienna i wynosi 5600 – 5800 mm. Ogólny schemat konstrukcji rusztu dachowego tuż przed zamontowaniem ostatniej kratownicy w środkowej osi podłużnej nr 9 i elementów uzupełniających kratownice poprzeczne pokazano na rys. 1. We wszystkich kratownicach (oprócz stref podporowych) zastosowano wykratowanie typu N, ze ściskanymi słupkami i rozciąganymi krzyżulcami. Wszystkie pręty kratownic wykonane były z dwuteowników spawanych lub walcowanych. Dwuteowe krzyżulce i słupki były łączone do pasów dolnych

i górnych za pośrednictwem blach węzłowych i spawanych połączeń „widełkowych” (rys. 2), przy czym dla krzyżulców kratownic poprzecznych w wytwórni były przyspawane tylko blachy zakładkowe z otworami na śruby (rys. 2b).



Rys. 1. Schemat rusztu dachowego centralnej części hali w końcowej fazie montażu

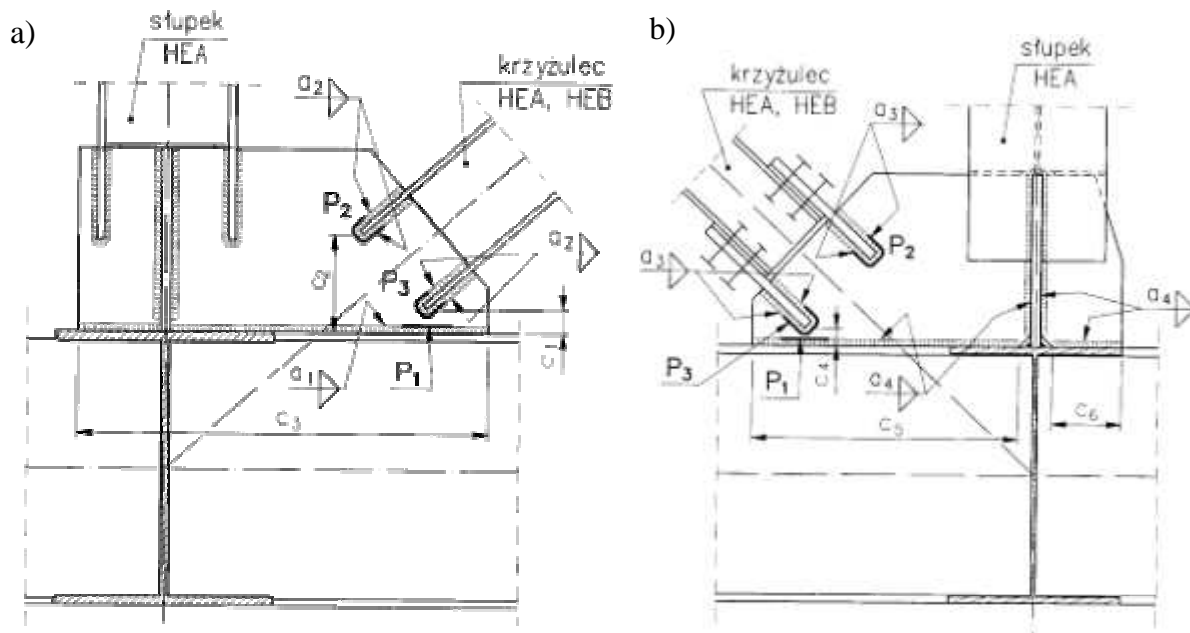
Po zakończeniu montażu kratownic rusztu dachowego zauważono przypadkowo kilka pęknięć blach węzłowych w strefach połączeń spawanych krzyżulców (rys. 2). Były to miejsca, gdzie podczas transportu i montażu zostały lokalnie uszkodzone grube powłoki antykorozyjne i ogniochronne. W takiej sytuacji wykonano badania magnetyczno-proszkowe spoin i blach, na początku w 172 węzłach. Stwierdzono pęknięcia o długości 10–150 mm w spoinach i blachach węzłowych w rejonach połączeń krzyżulców rozciąganych w ok. 65% badanych węzłów. Wtedy uznano, że konstrukcja dachu zagrożona jest runięciem, a dalsze kontynuowanie prac bez naprawy i wzmocnienia konstrukcji jest niemożliwe.

2. Rodzaj i zakres uszkodzeń stalowej konstrukcji dachowej hali

Po wykryciu pierwszych pęknięć blach węzłowych w rejonie spawanych połączeń „widełkowych” krzyżulców kratownic (rys. 3) wykonano I etap badań magnetyczno-proszkowych, który dotyczył 172 węzłów. Stwierdzono pęknięcia blach i spoin w miejscach oznaczonych na

rys. 2 jako: P1, P2, P3. Ogólne wyniki tych badań, wykonanych na zlecenie Wykonawcy obiektu, przedstawiono w tablicy 1.

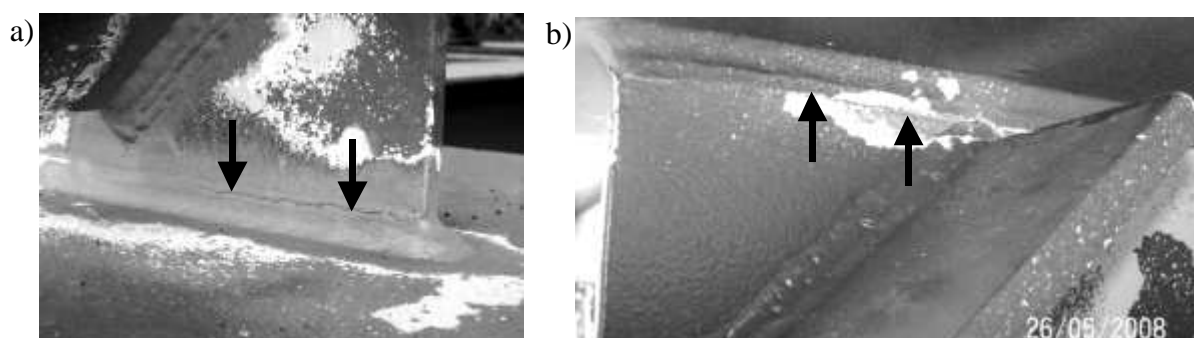
Analiza wyników wskazuje na to, że we wszystkich uszkodzonych węzłach występowały pęknięcia blach w miejscach P3 (rys. 2), a więc w strefach koncentracji spoin połączeń widelkowych krzyżulców i blach węzłowych z pasami dolnymi lub górnymi kratownic rusztu.



Rys. 2. Miejsca pęknięć blach węzłowych w kratownicach rusztu dachowego hali: a) kratownice w osiach 2 – 16, b) kratownice w osiach B – P (wg rys. 1)

Tablica. 1. Ogólne zestawienie wyników badań pęknięć blach węzłowych w kratownicach dachowych

Liczba zbadanych węzłów	Liczba węzłów z pęknięciami blach i spoin	Liczba pęknięć blach i spoin w miejscach pokazanych na rys. 2			Liczba pęknięć o długości większej niż 30 mm
		P1	P2	P3	
172	110	20	41	110	38



Rys. 3. Pęknięcia blach węzłowych w strefie P1 (wg rys. 2) przy pasie dolnym (a) i górnym (b) kratownicy

Skuteczność wszelkich napraw lub wzmocnień poważnie uszkodzonej i zagrożonej awaryjnie konstrukcji uzależniona jest od obiektywnego ustalenia przyczyn wystąpienia uszkodzeń. W badanym przypadku Wykonawca obiektu rozpoczął poszukiwania przyczyn pęknięć blach w technologii wykonywania spoin i ich zbyt bliskiej odległości w rejonach P1

i P3 (rys. 2). Zastosowana stal S355J2 na blachy węzłowe o grubości 16 – 18 mm oraz dwuteowe krzyżulce walcowane była stalą o równoważniku węgla $C_E = 0,39 - 0,41$, a więc bliskim granicy C_E dla stali trudnospalalnych. Wytwórnia konstrukcji stalowych, zgodnie z wewnętrzną instrukcją, nie stosowała wstępnego podgrzewania elementów analizowanych kratownic ze stali S355J2.

Badania twardości Vickersa w SWC złączy spawanych, przeprowadzone niezależnie w Politechnice Wrocławskiej, w Politechnice Gdańskiej i w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach wykazały, że największa twardość wyniosła 310 HV10 i nie przekroczyła wartości dopuszczalnej 350 HV10. Nie można zatem jednoznacznie stwierdzić, że powstałe pęknięcia mają charakter pęknięć zimnych. Tak więc autorzy niniejszej pracy uznali, że technologia i warunki spawania konstrukcji rusztu dachowego w wytworni nie mogły więc być jedyną i podstawową przyczyną powstałych pęknięć blach węzłowych. Podjęto więc próbę zbadania wpływu innych czynników na powstałe uszkodzenia blach węzłowych, a podstawowe wyniki tych badań przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

3. Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych na powstałe uszkodzenia

Pęknięcia blach węzłowych i spoin w kratowych konstrukcjach stalowych nie są wcale rzadkim zjawiskiem. Awarie i uszkodzenia takich konstrukcji opisane są m.in. w [1], [2], [3], [4]. Przypadki kruchych pęknięć blach węzłowych są częste tam, gdzie występuje zbyt mała odległość Δ między spoinami (na rys. 2, $\Delta = c_1, c_2, c_4$). Następuje wtedy interferencja pól naprężeń własnych z obydwu spoin, a tym samym wzrost kruchości blachy [1].

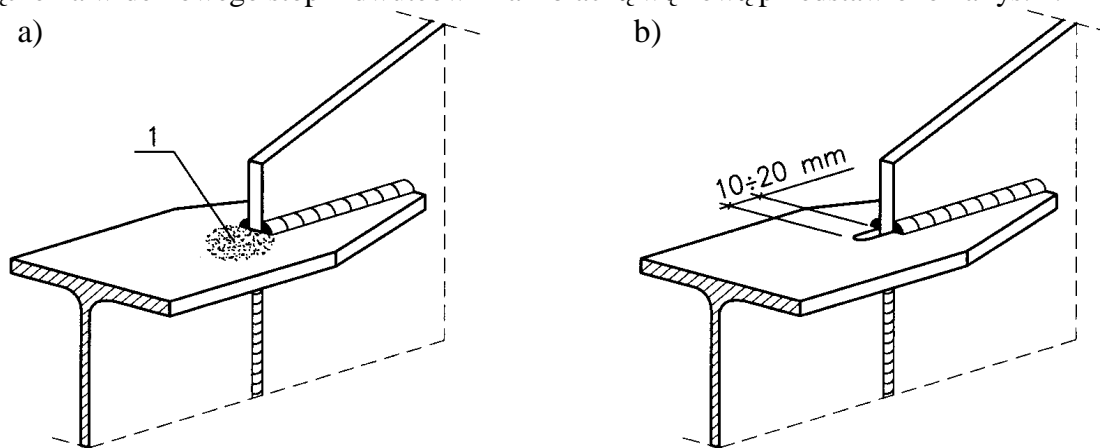
Wiadomo jest, że dość skutecznym zabiegiem eliminującym pęknięcia kruche blach węzłowych kratownic jest zachowanie takiego odstępów Δ między najbliższymi spoinami, aby nie wystąpiła w nich interferencja pól naprężeń własnych, spawalniczych. W polskiej normie projektowania konstrukcji stalowych [5] nie ma wyraźnie określonych minimalnych odległości Δ między spoinami, oprócz normy [6], dotyczących konstrukcji mostowych. Intensywne badania wpływu odległości pomiędzy spoinami Δ na kruche pęknięcia blach węzłowych prowadzone były w połowie ubiegłego wieku. Uznano wtedy, że podstawowym parametrem, decydującym o minimalnej odległości między spoinami Δ , jest grubość t blachy węzłowej. Grubość ta generuje zarówno ilość ciepła wprowadzanego w złącze spawane, czyli wartość naprężeń spawalniczych, jak i przestrzenność stanu naprężenia. Na podstawie tych badań ustalono w normie [7] następujący warunek na minimalne odległości spoin c w blachach węzłowych:

$$(6t - 20) \text{ mm} \leq c \leq 80 \text{ mm} \quad (1)$$

W wielu węzłach kratownic analizowanego rusztu dachowego spoiny w blachach węzłowych położone były bardzo blisko siebie (rys. 3), a odległości c_1 i c_4 (rys. 2) wynosiły w rzeczywistości nierzadko 13 – 35 mm, a w dokumentacji warsztatowej wiele węzłów miało przewidziane odległości między spoinami w zakresie 25 – 40 mm. Dla zastosowanych blach o grubości $t = 18$ mm odległości c_1 oraz c_4 powinny wynosić wg (1) 80 mm. Tak więc zbyt bliskie położenie spoin było jedną z ważnych przyczyn licznych pęknięć blach węzłowych.

Nieuniknione naprężenia własne od spawania są naprężeniami rozciągającymi. Nie są one groźne dla blach węzłowych, gdy stal tych blach ma swobodę do wydłużeń plastycznych. Zastosowane połączenia widełkowe dwuteowych krzyżulców (rys. 2) stanowiły karby konstrukcyjne, ograniczające znacznie swobodę odkształceń plastycznych, szczególnie w miejscach oznaczonych jako P2 i P3 na rys. 2. Te miejsca są strefami o wysokiej koncentracji naprężeń (rys. 4a), gdyż nie wykonano tam szczeliny lub otworu odciążającego (rys. 4b), tak aby nie

wykonywać spoiny od czoła każdej z półek dwuteowego krzyżulca. Właściwe rozwiązanie połączenia widelkowego stopki dwuteownika z blachą węzłową przedstawiono na rys. 4.

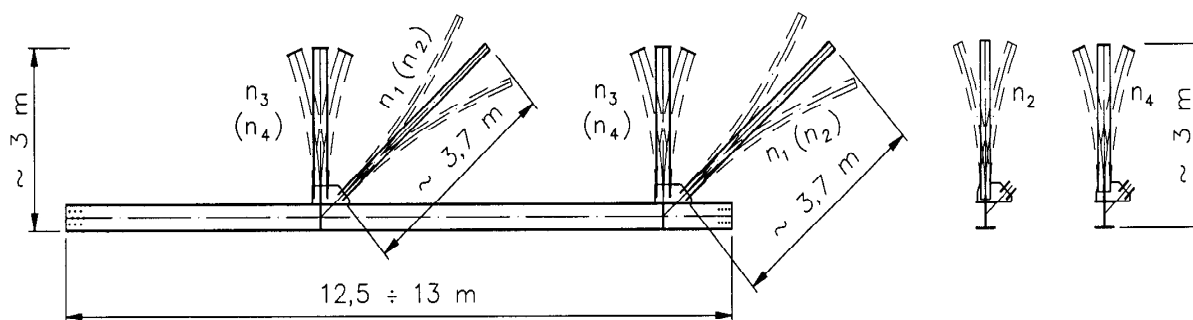


Rys. 4. Połączenia zakładkowe stopki dwuteownika z blachą węzłową: a) – ze strefą 1 o wysokiej koncentracji naprężeń, b) – ze zredukowaną koncentracją naprężeń

Norma [7] oraz inni autorzy [8] zalecają stosowanie spoin czołowych, zamiast spoin pachwinowych. W analizowanej konstrukcji stosowano spoiny pachwinowe, które stanowią znacznie bardziej niekorzystny karb konstrukcyjny w blachach niż w przypadku zastosowania spoin czołowych.

4. Wpływ transportu na powstałe uszkodzenia węzłów kratowej konstrukcji dachowej

Zastosowany w projekcie podział kratownic podłużnych na elementy wysyłkowe oraz konstrukcje połączeń montażowych elementów rusztu miały istotny wpływ na powstałe uszkodzenia. Elementy wysyłkowe kratownic podłużnych składały się z fragmentów pasów górnych lub dolnych oraz przyspawanych połówek słupków i krzyżulców (rys. 5, 6). Transport takich elementów bez usztywnienia wspornikowych elementów słupków i krzyżulców (rys. 6) był bardzo niekorzystny dla blach węzłowych, gdyż krzyżulce i słupki były narażone na drgania w płaszczyźnie i z płaszczyzny transportowanego elementu (rys. 5). Obliczona częstość drgań własnych krzyżulca z płaszczyzny kratownicy wynosiła $n_2 = 0,76$ Hz, zaś słupka $n_4 = 3,39$ Hz.



Rys. 5. Możliwe drgania słupków (n_3 , n_4) i krzyżulców (n_1 , n_2) elementów wysyłkowych kratownic

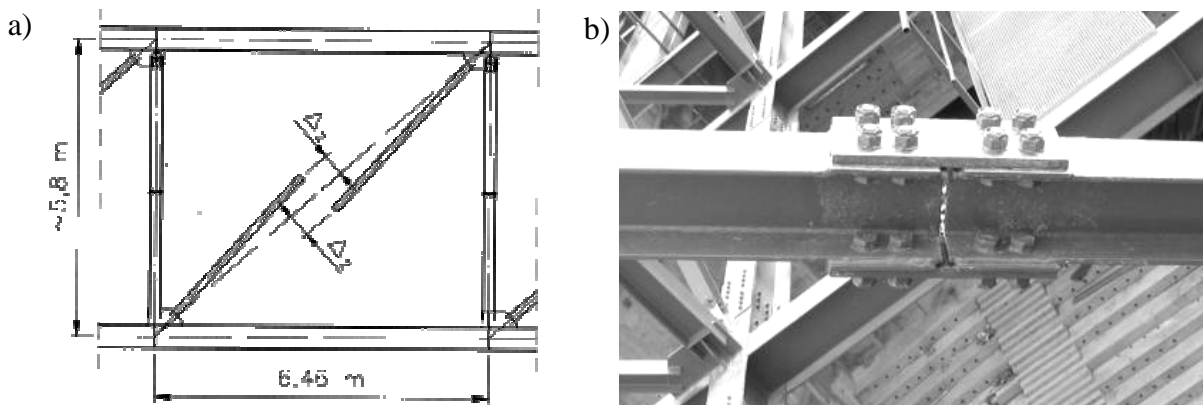
Podczas kilkunastogodzinnego transportu duża liczba cykli drgań rezonansowych mogła wywołać mikropęknięcia o charakterze zmęczeniowym nisko- lub wysokocyklowym, które mogły sprzyjać powstawaniu stwierdzonych pęknięć blach węzłowych i spoin w tych blachach.



Rys. 6. Transport elementów wysyłkowych kratownic podłużnych rusztu dachowego

5. Wpływ odchyłek wykonawczych i sposobu montażu na powstałe uszkodzenia

Zastosowany podział kratownic podłużnych na elementy wysyłkowe oraz nieuniknione odchyłki wykonawcze Δ_2 (rys. 7a) wymagał dociągania końcówek słupków i krzyżulców podczas wykonywania ich montażowych połączeń śrubowych.

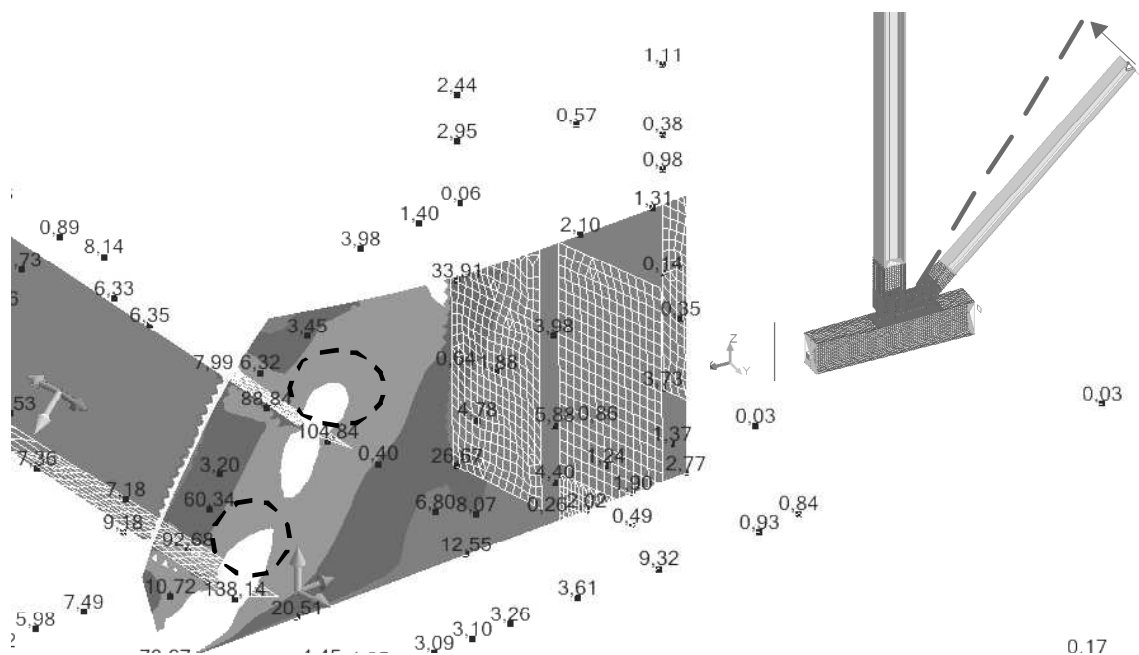


Rys. 7. Połączenie krzyżulca kratownicy podłużnej: a) odchyłki wykonawcze Δ_2 w płaszczyźnie kratownicy, b) widok śrubowego styku montażowego w środku krzyżulca po zakończeniu montażu

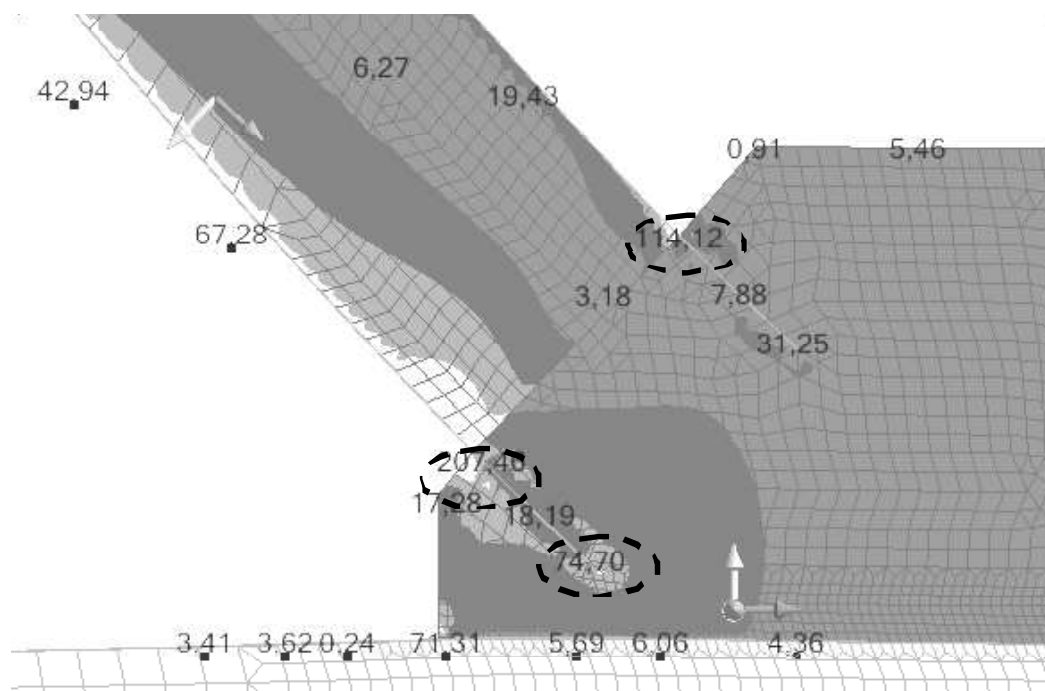
Wykonano analizy numeryczne MES spawanych węzłów kratownic podłużnych, uwzględniając nieuniknione wymuszenia montażowe krzyżulców w płaszczyźnie (rys. 7a) oraz z płaszczyzny kratownicy. Przyjęto niewielkie niedokładności wykonania $\Delta_2 = 10$ mm, zarówno w płaszczyźnie, jak i z płaszczyzny kratownicy. W przypadku likwidacji odchyłek wykonawczych z płaszczyzny kratownicy o wartości $\Delta_2 = 10$ mm koncentracje naprężeń w blasze węzłowej pokazano na rys. 8. Naprężenia zredukowane od takiego niewielkiego wymuszenia montażowego wynosiły na końcach połączeń widełkowych $\sigma_{red} = 104,8$ MPa oraz $\sigma_{red} = 138,1$ MPa (rys. 8). Naprężenia zredukowane od takiego samego wymuszenia montażowego w płaszczyźnie kratownicy pokazano na rys. 9. Wynosiły one $\sigma_{red} = 114,1$ MPa oraz $\sigma_{red} = 207,4$ MPa. Blachy węzłowe były więc bardzo wrażliwe nawet na niewielkie wymuszenia montażowe podczas łączenia krzyżulców kratownic podłużnych.

Biorąc pod uwagę naprężenia własne spawalnicze oraz naprężenia od niewielkich wymuszeń montażowych (rys. 8, 9) można stwierdzić, że suma tych naprężeń w warunkach

zahamowania zdolności materiału do odkształceń plastycznych była na tyle duża, aby wywołać stwierdzone pęknięcia blach węzłowych.



Rys. 8. Naprężenia zredukowane σ_{red} w blasze węzłowej od dociągania krzyżulca o 10 mm z płaszczyzny kraty



Rys. 9. Naprężenia zredukowane σ_{red} w blasze węzłowej od dociągania krzyżulca o 10 mm w płaszczyźnie kraty

Montaż całych, długich krzyżulców kratownic poprzecznych był bardzo utrudniony z uwagi na konieczność ich precyzyjnego wpasowywania jednocześnie pomiędzy blachy węzłowe (rys. 2b) w węzłach górnych i dolnych. Zróżnicowane ugięcia kratownic podłużnych (nie były stale podparte w czasie montażu) wymagały dość dużego podnoszenia niektórych kratownic, aby można było wpasować krzyżulce poprzeczne i wykonać ich połączenia śrubowe w węzłach.

Analizy wyężenia blach węzłowych tych krzyżulców wskutek takich wymuszeń Montażowych wykazały duże spiętrzenia naprężeń o wartościach podobnych do przedstawionych na rys. 8.

Zastosowana kolejność montażu (rys. 1 – najpierw sparowane kratownice podłużne, a później elementy kratownic poprzecznych) oraz brak stałego podparcia montażowego konstrukcji do czasu zakończenia montażu wszystkich elementów nośnych spowodowały, że dość duże obciążenie ciężarem własnym konstrukcji było przejmowane jedynie przez kratownice podłużne i obwodowe. Powstały więc większe od zakładanych ugięcia rusztu oraz znacznie większe obciążenie całkowite kratownic podłużnych.

6. Wnioski

W referacie przedstawiono główne przyczyny zaistnienia stanu awaryjnego stalowego rusztu kratowego dachu hali widowiskowo-sportowej. Pokazano, że tymi przyczynami były:

- niewłaściwe rozwiązania konstrukcyjne węzłów kratownic (ze strefami hamującymi zdolność stali do odkształceń plastycznych),
- nieodpowiednia postać elementów wysyłkowych (brak usztywnień na czas transportu i montażu),
- zła technologia montażu, wymuszająca m.in. duże naprężenia w węzłach kratownic.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski zdecydowano o przerwaniu prac montażowych i przystąpiono do opracowania projektu wzmocnień uszkodzonej konstrukcji dachowej.

Literatura

1. Rykaluk K.: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000.
2. Augustyn J., Śledziwski W.: Awaryjne konstrukcje stalowe, Arkady, Warszawa 1976.
3. Augustyn J., Śledziwski E.: Technologiczność konstrukcji spawanych, Arkady, Warszawa 1974.
4. Jeschke H.J.: Über verschiedene Arten des Anschweißens von Quersteifen an Kranbahnträgern, Der Stahlbau H. 9/1975, s. 286–287.
5. PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
6. PN-82/S-10052 Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Projektowanie.
7. SNiP II-23-81 Normy i przepisy dla budownictwa, rozdział 23: Konstrukcje stalowe, Strojizdat, Moskwa 1982 (w jęz. ros.).
8. Birulev V.V., Košin I.I., Krylov I.I., Silvestrov A.V.: Proektirovanie metalličeskich konstrukcji, Strojizdat, Leningrad 1990 (w jęz. ros.).