



Prof. dr hab. inż. Wojciech ŻÓŁTOWSKI, [w.zoltowski@il.pw.edu.pl](mailto:w.zoltowski@il.pw.edu.pl)  
Dr inż. Stanisław WIERZBICKI, [s-wierzbicki@wp.pl](mailto:s-wierzbicki@wp.pl)  
Mgr inż. Paweł KRÓL, [p.krol@il.pw.edu.pl](mailto:p.krol@il.pw.edu.pl)  
Mgr inż. Jan WITKOWSKI, [j.witkowski@il.pw.edu.pl](mailto:j.witkowski@il.pw.edu.pl)  
Politechnika Warszawska

## **BŁĘDNE ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE PRZYCZYNĄ AWARII KONSTRUKCJI HALI**

### **FALSE DISIGN-WORK ASSUMPTIONS AS THE MAIN REASON OF THE STRUCTURE BREAKDOWN**

**Streszczenie** Referat dotyczy awarii konstrukcji hali magazynowo-dystrybucyjnej o powierzchni około 9200 m<sup>2</sup>. Główną konstrukcją nośną obiektu w części, która uległa awarii stanowią, oparte na słupach żelbetowych, dźwigary kratowe przenoszące obciążenia z płatwi kratownicowych. 21.01.2006 roku nastąpiła awaria jednego z dźwigarów głównych polegająca na zniszczeniu węzła przy pasie górnym dźwigara co w efekcie doprowadziło do znacznego ugięcia (załamania) kratownicy, która pociągnęła jeden z podpierających ją słupów powodując jego znaczne wychylenie. Zmiana geometrii głównego układu nośnego doprowadziła do uszkodzenia płatwi opartych na dźwigarze oraz stężeń i blachy pokrycia dachu w obszarze awarii. Przeprowadzona ekspertyza techniczna zmierzająca do ustalenia przyczyn awarii ujawniła szereg wad konstrukcji, głównie o charakterze projektowym.

**Abstract** The paper is dedicated to the breakdown of the steel structure in one of the warehouse buildings in the distribution centre, that had place on 21<sup>st</sup> of January, 2006. An area of the described building is about 9200 m<sup>2</sup>. The main structure of the building, in the neighbourhood of the failure, comprises the set of steel truss roof purlins and truss-girders supported on the reinforced-concrete pillars. At the beginning of the 3<sup>rd</sup> decade of January one of the main roof truss-girders suddenly collapsed after the destruction of one of the joints, located in the level of the upper chord that resulted in significant bowing deflection of the roof-truss and visible horizontal displacement of supporting column. The sudden deformations and changes of the shape of the main roof structure caused the failure of the other constructional elements in the nearby area, as truss purlins, bracing system and trapezoidal roof sheeting. After some technical analyses led to find out the reasons of the structure breakdown, many designing mistakes and disadvantages were proved.

### **1. Ogólny opis konstrukcji obiektu**

Obiekt, w którym nastąpiła awaria jest budynkiem halowym składającym się z trzech prostokątnych brył, rozciągniętych wzdłuż jednego z boków. Całkowita długość kompleksu wynosi około 219 metrów, z czego około 159 m przypada na główną część środkową, zaś po 60 m na węższe, skrajne fragmenty budynków. Szerokość części centralnej, mierzona w osiach konstrukcji wynosi 42,0 metry, zaś jej wysokość mierzona w kalenicy wynosi 8,51 m w stosunku do poziomu posadzki w hali. Szerokość części skrajnych budynku, mierzona wg zasad podanych wyżej, wynosi 21,0 m, zaś jej wysokość w kalenicy 6,56 m.

Konstrukcję centralnej części budynku zaprojektowano w formie trójnawowego układu słupowo-wiązarowego, usytuowanego poprzecznie do podłużnej osi hali. Każda z trzech naw ma rozpiętość 14,0 m. Konstrukcję główną dachu stanowią trapezowe stalowe dźwigary kratowe, o pasie dolnym poziomym, zaprojektowane ze stali gatunku St3S. Dźwigary naw bocznych wykonano jako kratownice o pasach zbieżnych, w których pas górny odwzorowuje kąt pochylenia połaci dachowych, zaś dźwigar środkowy jest rozwiązaniem dwuspadowym, symetrycznym. Pasy dolne dźwigarów zaprojektowano z przekrojów zamkniętych, złożonych z dwóch kształtowników walcowanych na gorąco typu „C”, zaś pasy górne, krzyżulce i słupki – z profili zamkniętych kwadratowych, (rys.1). Połączenia prętów w węzłach wykonano jako spawane za pomocą spoin czołowych, bez użycia blach węzłowych. Dźwigary zaprojektowano jako swobodnie podparte na żelbetowych słupach, utwierdzonych w fundamentach. Typowy rozstaw głównych układów nośnych wynosi 14 metrów.



Rys. 1. Ogólny widok układu konstrukcyjnego

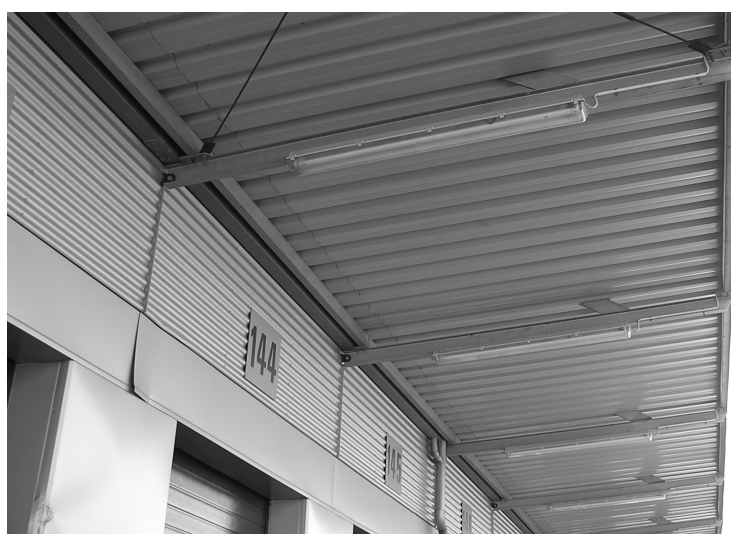
Pomiędzy wiązarami rozpięto jednoprzęsłowe płatwie kratowe wykonane w formie kratownic spawanych, w których wszystkie pręty zaprojektowano z profili zamkniętych o przekroju kwadratowym. W płatwi kalenicowej, ze względów konstrukcyjnych, pas górny płatwi zaprojektowano z dwóch ceowników C65. Połączenia prętów w węzłach wykonano jako spawane za pomocą spoin czołowych, generalnie bez użycia blach węzłowych. Jedynie w przypadku płatwi kalenicowej, w miejscach łączenia prętów skratowania z pasem górnym połączenia realizowano za pomocą spoin pachwinowych. Płatwie oparto na górnych pasach dźwigarów głównych, w co drugim węzle. Wzdłuż ścian podłużnych zmontowano belki krawędziowe wykonane z dwuteowników IPE120, pełniące równocześnie rolę płatwi okapowych. Na długości przybudówek biurowych, ze względu na brak słupków obudowy, zamiast belek walcowanych zaprojektowano kratownice z pasem górnym z IPE120.

Stabilność konstrukcji dachu, tak w kierunku poprzecznym jak i podłużnym, ma zapewniać układ połączeniowych stężeń obwodowych typu „X”, w których słupki zaprojektowano z profili zamkniętych 50x50x3, zaś krzyżulce z prętów  $\varnothing 12$ . Należy podkreślić fakt, niewłaściwego sposobu mocowania stężeń „na haczyk” na jednym z końców.

Dodatkowo, stateczność pasów dolnych dźwigarów miał zapewniać układ stężeń wykonanych z prętów okrągłych  $\varnothing 10$ , z nakrętkami napinającymi, łączących skrajne węzły dolnych pasów płatwi kratowych z dolnymi pasami dźwigarów głównych. W środkowej części budynku zastosowano stężenia połączeniowe poprzeczne o skratowaniu typu „X”.

Stateczność budynku, zgodnie z zamierzeniem projektanta, zapewniają słupy żelbetowe, utwierdzone w fundamentach. Dodatkowo, w ścianach podłużnych znajdują się rozbudowane układy słupowo-ryglowe, dostosowane do rozkładu i wymiarów doków rozładunkowych, stężone cięgnami linowymi w kilku miejscach na długości hali, powyżej poziomu nadproży bram.

Wzdłuż ścian bocznych, nad dokami rozładunkowymi, wykonano podwieszane daszki o konstrukcji stalowej i spadku ukształtowanym w kierunku do budynku. Konstrukcja daszków składa się z usytuowanych prostopadle do linii ściany belek nośnych z dwuteowników IPE120, podwieszonych w sposób przegubowy jednym końcem do słupów głównych hali lub słupków przybramowych z ceowników zimnogiętych 140x80x5, zaś na drugim końcu podwieszonych za pomocą sztywnego wieszaka z profilu zamkniętego o przekroju kwadratowym 70x70 mm, (rys. 2). Wzdłuż linii ściany oraz linii okapu zmontowano płatwie stalowe z ceowników C120E. Stężenia daszków wykonano jako cięgnowe z prętów  $\varnothing 10$ , z nakrętkami napinającymi.



Rys. 2. Fragment zadaszenia zewnętrznego

Konstrukcję dwóch skrajnych, symetrycznych części budynku zaprojektowano w formie jednonawowych ram o ryglach kratowych, usytuowanych poprzecznie do podłużnej osi hali. Rozpiętość ramy wynosi 21m. Konstrukcję główną dachu stanowią trapezowe stalowe dźwigary kratowe, o pasie dolnym poziomym, zaprojektowane ze stali gatunku St3S. Dźwigary zamocowano w sposób sztywny do stalowych słupów pełnościennych, zaprojektowanych z dwuteowników HE300B. Pasy górne i dolne dźwigarów oraz znacznie wyteżone słupki i krzyżulce zaprojektowano w formie przekrojów zamkniętych, złożonych z dwóch kształtowników walcowanych na gorąco typu „C”, pozostałe pręty skratowania – z profili zamkniętych kwadratowych. Połączenia prętów w węzłach wykonano jako spawane za pomocą spoin czołowych, bez użycia blach węzłowych. Z uwagi na możliwości transportowe, wiazary zaprojektowano jako scalane na placu budowy z dwóch części. Styk montażowy pomiędzy elementami dźwigara wykonano jako śrubowy, w którym części składowe słupka połączono ze sobą w sposób doczołowy, zaś pasy – w sposób nakładkowy. Słupy zamocowano do fundamentów w sposób przegubowy. Rozstaw ram nośnych wynosi 12 m.

Na dźwigarach oparte są jednoprzęsłowe płatwie kratowe, w których wszystkie pręty zaprojektowano z profili zamkniętych o przekroju kwadratowym. Pozostałe rozwiązania płatwi, stężeń, pokrycia i daszków zewnętrznych są analogiczne jak w środkowej części hali.

Na styku z wyższą, centralną częścią budynku zastosowano kratownicowe dźwigary dachowe, pełniące funkcję nośną zarówno dla wyższej, jak i dla niższej części hali.

## 2. Opis awarii i działań zapobiegawczych

Awaria konstrukcji dachu w hali głównej wystąpiła w dniu 21.01.2006r. Podstawowym objawem awarii było załamanie górnego pasa wiązara dachowego nawy bocznej w miejscu jego połączenia ze słupkiem, (rys.3).



Rys.3. Charakter uszkodzenia dźwigara głównego nawy bocznej

Załamanie to wywołane zostało plastycznymi deformacjami ścianek przekroju, wraz z pęknięciem jednej z nich oraz wciśnięciem słupka wiązara w pas górny, (rys. 4). Ugięcie kratownicy doprowadziło do znacznego (140mm) przemieszczenia wierzchołka słupa zewnętrznego do środka hali połączonego z obrotem dźwigara na głowicy słupa. Bezpośrednią konsekwencją było obniżenie linii podparcia płatwi kratowych opartych na dźwigarze, a w efekcie naruszenie geometrii płaszczyzny dachu i powstanie na jego powierzchni swoistej niecki. Nie doszło do przedarcia lub rozszczenia poszycia dachu,



Rys.4. Wciśnięcie słupka wiązara do wnętrza przekroju pasa górnego

dzięki czemu, po zastosowaniu odpowiednich działań zapobiegawczych, możliwe było przeciwdziałanie dalszym zniszczeniom lub uszkodzeniom konstrukcji i wewnętrznych elementów usytuowanych w hali. Zgodnie z informacjami uzyskanymi od Zleceniodawców, po awarii zorganizowano spotkanie osób związanych z obiektem, a więc przedstawiciele Właściciela i Użytkownika obiektu, przedstawiciele Wykonawców obiektu oraz Projektanta, w celu podjęcia niezbędnych działań zapobiegających dalszym zniszczeniom. Wtedy też

podjęto decyzję o natychmiastowym tymczasowym podparciu dźwigara za pomocą podpór modułowych, mającym zapobiec ewentualnemu postępowi uszkodzeń bądź wystąpieniu nowych. Niezwłocznie po zmontowaniu podpór tymczasowych, przystąpiono do usuwania śniegu z dachu, by doprowadzić do maksymalnego odciążenia konstrukcji – prace odśnieżające prowadzono także później, w trakcie występowania opadów śniegu.

Równoległe zlecono wykonanie projektu tymczasowej konstrukcji podpierającej, która miałaby przejąć zadania uszkodzonego dźwigara dachowego. Konstrukcję ramową, zaprojektowaną z dwuteowników szerokostopowych oparto bezpośrednio na posadzce hali. Układ ramowy zapewniał przejście obciążeń z płatwi kratowych, opartych na uszkodzonym dźwigarze i tym samym odciążenie dźwigara. Elementy górnych pasów płatwi na odcinku podparcia wzmocniono dodatkowo dwoma ceownikami, które miały zabezpieczyć pasy przed ewentualnym zniszczeniem, w przypadku postępującego załamania się geometrii dźwigara oraz jednocześnie zagwarantować efektywne podparcie płatwi już w momencie wykonywania ramy podporowej (rys. 5).



Rys.5. Lokalne wzmocnienie pasa górnego płatwi kratowej, w miejscu oparcia na ramie

Następnie, w celu dopuszczenia do ograniczonego użytkowania hali do czasu wykonania wzmocnień, przedstawiciele Użytkownika, Wykonawcy i Projektanta obiektu, w porozumieniu z autorami niniejszego referatu i ekspertyzy zdecydowali o zastosowaniu tymczasowych podpór (rys. 1) oraz zastrzałów w miejscach, gdzie nie było możliwe ustawienie podpór. Zabieg ten powiązany z bieżącym odśnieżaniem dachu miał na celu przeciwdziałanie ewentualnym uszkodzeniom konstrukcji w innych miejscach.

### 3. Ustalenie przyczyn awarii

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań stwierdzono, że bezpośrednią przyczyną awarii była znacznie przekroczona nośność pasa górnego dźwigara. Biorąc pod uwagę szacunkową, (określoną na podstawie dostarczonych przez Użytkownika fotografii oraz własnych obserwacji poczynionych kilka dni po awarii), ilość śniegu na dachu w trakcie awarii, która zdaniem autorów była nieco mniejsza niż norma dla tego regionu Polski stwierdzono, że nośność w pasie górnym była przekroczona prawie trzykrotnie. Stan ten połączony z dodatkowymi, także znacznie przekroczonymi, naprężeniami od słupka, zginającymi dolną ściankę pasa kratownicy, musiał doprowadzić do awarii, a tak długi okres bezawaryjnego użytkowania obiektu wynikał z braku większych opadów śniegu w ostatnich latach.

Tak duże przekroczenie nośności miało swoje przyczyny w kilku źródłach. Najważniejsze z nich to:

- niewłaściwy schemat statyczny dźwigara przyjęty przez projektanta. Na podstawie otrzymanych obliczeń statycznych stwierdzono, że w projekcie pierwotnym został przyjęty schemat statyczny kratownicy z podporami przegubowymi, ale nie przesuwными. Oparcie kratownic na słupach żelbetowych nie uzasadnia takiego schematu, a jego przyjęcie całkowicie zmieniło rozkład sił w prętach dźwigara – znacznie zmniejszając siły w pasie górnym. Już sama ta przyczyna mogła wystarczyć do wystąpienia awarii;
- niewłaściwe rozwiązanie węzła „słupek-pas górny”. Nośność połączenia słupka z pasem była niewystarczająca;
- mniejsza, niż to wynikało z projektu grubość ścianki pasa górnego kratownicy. Wg projektu miało to być 4mm, a w trakcie badań stwierdzono grubość o przedziale 3-3.1mm. Stwierdzono, co prawda, też wyższą niż projektowana wytrzymałość stali ale fakt ten nie równoważy w całości mniejszej grubości.

Gruntowna analiza obliczeniowa konstrukcji obiektu oraz przeprowadzona inwentaryzacja i badania materiałowe wykazały także szereg innych wad konstrukcji, głównie o charakterze projektowym. Najważniejsze z nich to:

- prawie trzykrotne przekroczenie nośności w pasie górnym dźwigarów nawy środkowej oraz niewystarczająca nośność niektórych węzłów;
- przekroczenia nośności w prętach i połączeniach dźwigarów kratowych naw bocznych;
- przekroczenia nośności w niektórych węzłach dźwigarów kratowych na styku środkowej i bocznych części hali;
- prawie 40% przekroczenia nośności w belkach walcowanych ścian szczytowych;
- ponad 30% przekroczenia nośności w pasach górnych płatwi kratowych, w miejscach braku ciągłych usztywnień blachą pokrycia (pod świetlikami);
- prawie 70% przekroczenia nośności w płatwiach kratowych zlokalizowanych w obszarach „koszy śniegowych” przy wyższych częściach budynków;
- ponad dwukrotne przekroczenia nośności w płatwiach ze ściągami o rozpiętości 5.25m zlokalizowanych w obszarach „koszy śniegowych”;
- znaczne (prawie 150%) przekroczenia nośności w belkach okapowych;
- przekroczenia nośności w słupkach i innych elementach obudowy, w szczególności tych przenoszących obciążenia od daszków;
- brak wystarczającej nośności i skuteczności stężeń połączeniowych.

#### **4. Prace naprawcze**

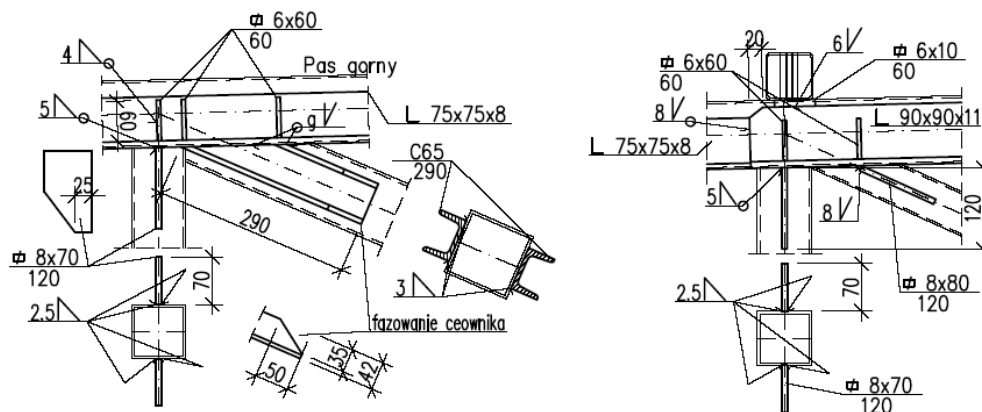
Wynikiem przeprowadzonej ekspertyzy było zalecenie szeregu prac naprawczych mających na celu doprowadzenie konstrukcji obiektu do stanu, w których spełnione byłyby SG nośności i użytkowania. Istotnym utrudnieniem dla Wykonawcy wzmocnień był fakt bardzo dużego zakresu wzmocnień oraz konieczność prowadzenia wszelkiego typu działań w określonych porach dnia, w których obiekt nie był intensywnie użytkowany. Ze względu na konieczność uwzględnienia w przenoszeniu obciążeń przekrojów wzmocnianych oraz profili wzmocniających, konieczne było wypieranie dźwigarów głównych i płatwi tak, aby w momencie wzmocniania nie występowały w nich większe naprężenia.

Najważniejsze, zrealizowane, zalecenia dotyczące koniecznych prac naprawczych:

- ugięty o 140mm słup żelbetowy, po zdemontowaniu uszkodzonego dźwigara powrócił do pierwotnego położenia, uznano więc, że zbrojenie nie uległo uszkodzeniu;
- uszkodzony dźwigar został wymieniony na analogiczny, ale o odpowiednio dobranych

przekrojach. Oparte na nim płatwie i mocowanie blachy pokrycia zostały naprawione;

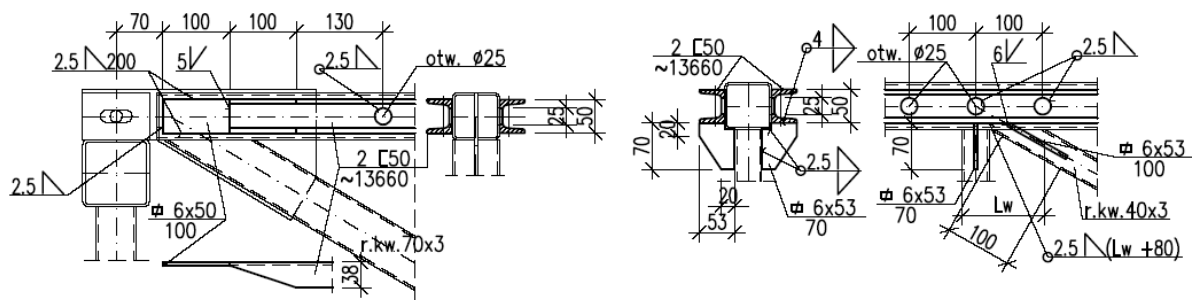
- w dźwigarach naw bocznych wyższej, (środkowej), części hali, wzmocnieniom podlegały pasy górne. Zastosowano tu kątowniki 90x90x11 i 75x75x8, a w dźwigarach znajdujących się w obszarach wpływu zwiększonego obciążenia śniegiem, tzw. „kosze śniegowe” zastosowano dodatkowo bl. 10x50 w środkowych przęsłach dźwigarów. W ww. dźwigarach wzmocnieniom podlegały również krzyżulce przypodporowe. Także znaczna część połączeń elementów skratowania z pasami wymagała wzmocnienia. Zastosowano tu różne, zależne od możliwości, rozwiązania – dodatkowe blachy węzłowe, ceowniki itp. (rys. 6). Wzmocniono też oparcie płatwi na pasach górnych dźwigarów;



Rys.6. Przykładowe wzmocnienia węzłów i pasa dźwigara

- dźwigary nawy środkowej wyższej części hali, wymagały wzmocnień w znacznym zakresie. Wzmocnieniom podlegały pasy górne wszystkich dźwigarów. Zastosowano tu kątowniki 75x75x8. Znaczna część połączeń elementów skratowania z pasami również wymagała wzmocnienia;
- dźwigary główne niższych (bocznych) części hali wzmocniono przez zastosowanie zastrzałów z 2C100 pomiędzy pasami dolnymi dźwigarów a słupami wraz ze wzmocnieniem mocowania pasów dolnych do słupów oraz dodatkowe żebra w miejscach styków montażowych pasów dolnych;
- w dźwigarach na styku wyższej i niższych części hali wzmocnieniom podlegały niektóre węzły. Przyjęto zastosowanie dodatkowych blach węzłowych dostosowanych do możliwości wykonawczych związanych z dostępem do poszczególnych węzłów;
- belki dachowe w ścianach szczytowych wzmocniono poprzez dospawanie do ich dolnych pasów 1/2 dwuteowników;
- w płatwiach zlokalizowanych w obszarach „worków śniegowych” wzmocniono pasy górne, pasy dolne i niektóre węzły. Pasy górne wzmocniono za pomocą 2 C50 spawanych do płatwi, a pasy dolne za pomocą 2 bl. 6x50. Wzmocnienia węzłów zaproponowano przy pomocy blach węzłowych, (rys. 7);
- w pozostałych płatwiach o rozpiętości 14m, zastosowano usztywnienia (stężenia) pasów górnych, mające na celu zmniejszenie długości wybożeniowych pod świetlikami,
- poprawiono oparcie płatwi na dźwigarach. W miejscach niewłaściwego oparcia zastosowano dodatkowe podpórki z płaskowników;
- w przypadku belek ze ściągiem zlokalizowanych w obszarze „kosza śniegowego” zastosowano wzmocnienie pasa górnego przez dospawanie 2 C50 oraz wzmocnienie ściągi polegające na dołożeniu dodatkowych prętów  $\varnothing 12$ . W innych tego typu belkach wzmocniono jedynie ściągi, przez dospawanie dodatkowego pręta  $\varnothing 12$ ;
- w występujących przy ścianach bocznych belkach okapowych (IPE120) zastosowano

wzmocnienie w postaci C80 przykręcanych do środników ww. elementów. Zadaniem wzmocnień jest przejście sił poziomych od obciążeń wiatrem i zadaszenia zewnętrznego;



Rys.7. Przykładowe wzmocnienia węzłów i pasa płatwi

- ze względu na brak wystarczającej nośności elementów obudowy (słupki i rygle) do przeniesienia obciążeń od zadaszenia i brak możliwości ich wzmocnienia, zdecydowano się na zastosowanie poziomych stężeń w płaszczyznach daszków, których zadaniem było przekazanie całości obciążeń poziomych na słupy główne hali. Dodatkowo wzmocniono krótkie rygle zimnogięte, do których były mocowane elementy daszków;
- cięgna stężeń połączonych usytuowane na obwodzie hali ( $\text{Ø}12$ ) wymieniono na pręty o większej nośności -  $\text{Ø}16$  i  $\text{Ø}20$  odpowiednio (bez zastosowania haków) zamocowane do konstrukcji dachu.

## 5. Wnioski

Najważniejsze wnioski wynikające z opisanej wyżej awarii:

1. Główną przyczyną awarii było przyjęcie niewłaściwego schematu statycznego. Ponieważ skutkowało to przyjęciem znacznie większego przekroju na pas dolny niż na pas górny jednoprzęsłowego, wolnopodpartego dźwigara, co było łatwe do wychwycenia w dowolnej fazie projektowania i wykonywania nawet przez mało doświadczonego inżyniera. Stąd wynika kolejny wniosek, że brak było odpowiedniej weryfikacji i nadzoru.
2. W rozwiązaniach konstrukcji kratownic pojawiły się, często ostatnio stosowane profile zamknięte. Właściwe skonstruowanie węzłów przy tego typu profilach wymaga nieco większej wiedzy, niż ta, którą można nabyć po przestudiowaniu PN-90/B-03200. Niestety, w tym przypadku, podobnie jak w innych znanych autorom referatu, wiedzy takiej zabrakło.
3. Po analizie konstrukcji ścian osłonowych hali, można odnieść wrażenie, że projektant zapomniał o mocowanych do delikatnych profili zimnogiętych, daszkach o dość dużym wysięgu.
4. W pierwotnym projekcie nie uwzględniono także efektu gromadzenia się śniegu przy wyższych częściach dachu.

## Literatura

1. „Ekspertyza techniczna dotycząca ustalenia przyczyn awarii dźwigara kratowego w hali .....” opracowana przez autorów niniejszego opracowania.
2. PN-80/B-02010 - Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem
3. PN-77/B-02011 - Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia wiatrem
4. PN-90/B-03200 - Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.