



BRONISŁAW GOSOWSKI, *bronislaw.gosowski@pwr.wroc.pl*
PAWEŁ LORKOWSKI, *pawel.lorkowski@pwr.wroc.pl*
MICHAŁ REDECKI, *michal.redecki@pwr.wroc.pl*
Politechnika Wrocławska

BŁĘDY NA ETAPIE PROJEKTOWANIA PRZYCZYNĄ STANU AWARYJNEGO ŚWIETLIKÓW HALI PRZEMYSŁOWEJ

DESIGN ERRORS AS A CAUSE OF EMERGENCY OF SKYLIGHTS IN INDUSTRIAL BUILDING

Streszczenie Przedstawiono wadliwą konstrukcję świetlików podłużnych hali przemysłowej, wykonanych z rur prostokątnych, czego efektem były pękające w nich szyby. Na podstawie analizy pracy statycznej świetlików jako konstrukcji przestrzennych, współpracujących z konstrukcją przekrycia, a także analizy zachowania się węzłów z wykorzystaniem MES, wyjaśniono przyczynę pęknięcia szyb w świetlikach. Referat zakończono wnioskami i zaleceniami odnośnie do naprawy i poprawnego konstruowania tego typu świetlików.

Abstract The faulty design of longitudinal skylights made of rectangular hollow sections have been presented as a cause of breaking of glass installed in them. On the base of spatial static analysis of skylights and covering interaction, and also the joints behaviour executed by FEM, the reason for breaking of glass has been explained. Conclusions and recommendations regarding the repair and proper construction of this type of skylights have been given at the end.

1. Wstęp

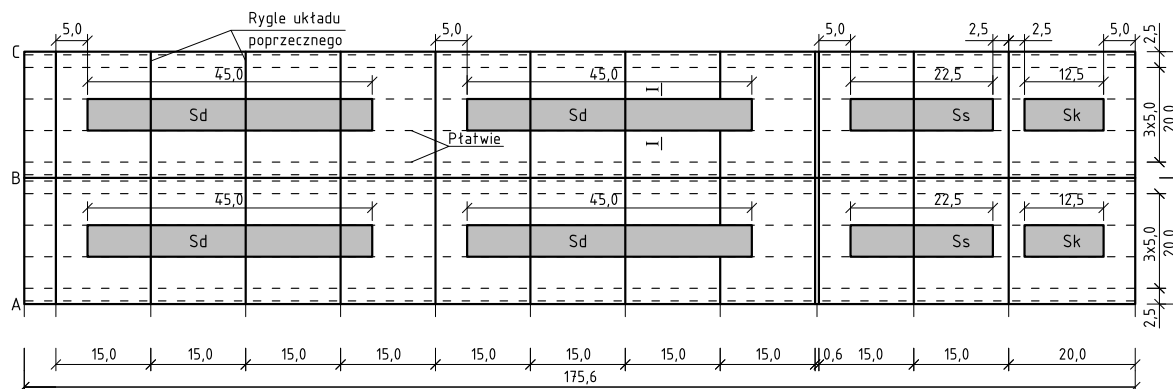
Na przykładzie zrealizowanego, wadliwego rozwiązania konstrukcji świetlików podłużnych hali przemysłowej, omówiono błędy popełnione na etapie projektowania, których konsekwencją było pęknięcie szyb świetlików w trakcie eksploatacji hali przemysłowej. Popełnione błędy dotyczyły zarówno przyjęcia zbyt uproszczonego modelu obliczeniowego konstrukcji nośnej świetlików, jak i wadliwego skonstruowania połączeń ich elementów wykonanych z rur prostokątnych. Przeprowadzone analizy wykazały zasadność zastrzeżeń odnośnie do projektu konstrukcji przedmiotowych świetlików. Referat zakończono wnioskami i zaleceniami odnośnie do naprawy i poprawnego konstruowania tego typu świetlików.

2. Opis konstrukcji stalowej hali i jej świetlików

Przedmiotowa hala produkcyjna to obiekt o rzucie prostokąta, o wymiarach w osiach słupów: długość ok. 175,6 m i szerokość 40 m (rys. 1). Na długości hala podzielona jest przerwą dylatacyjną (0,6 m) na dwa nierówne segmenty. Pierwszy o długości ok. 125 m, a drugi – 50 m. W kierunku poprzecznym hala miała dwie nawy, o osiach słupów A, B, C, o rozpiętości w osiach słupów po 20 m. Dach nad każdą z naw wykonany jest w kierunku szerokości jako dwuspadowy z okapami i koszami w osiach słupów układów poprzecznych.

Wysokość hali ponad poziom terenu wynosi w strefie okapów i koszy ok. 8 m, a w kalenicach, w których wykonano odcinkowe świetliki podłużne – ok. 12 m.

Konstrukcja stalowa hali zrealizowana jest z ramowych, blachownicowych układów poprzecznych, o rozpiętościach naw równych 20 m, rozstawionych co 15,0 m. Inaczej rozwiązano tylko układy poprzeczne przydylatacyjne (o słupach co 5 m i ryglach wykonanych z elementów walcowanych) i końcowy, który umieszczono ponadto w większej odległości od układów pośrednich (20,0 m). Na ryglach ram oparto jednoprzęsłowe, kratownicowe płatwie o rozpiętości dostosowanej do rozstawu układów poprzecznych (15 lub 20 m), rozmieszczone na dachu co ok. 2,5 m lub 5,0 m (rys. 1).



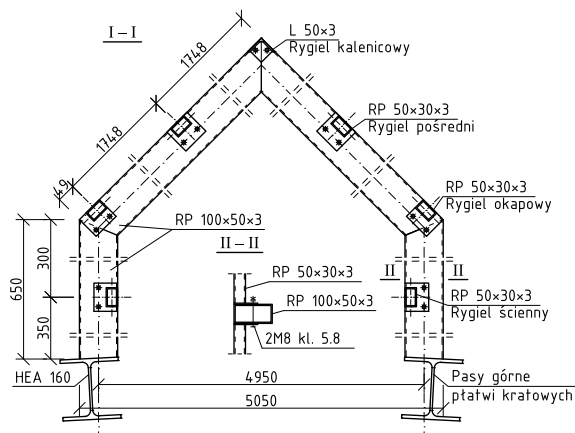
Rys. 1. Rozmieszczenie świetlików: długich (Sd), średnich (Ss) i krótkich (Sk) na dachu hali

Płatwie kratownicowe o rozpiętości zarówno 15 m, jak i 20 m wykonano w trzech wersjach konstrukcyjnych, jako: podświetlikowe, pośrednie i koszowe (okapowe), różniące się między sobą wymiarami pasa górnego i wysokością. Płatwie koszowe (okapowe) i pośrednie rozstawione są co ok. 2,5 m, a ich pasy górne połączone stężeniem połaciowym podłużnym. Płatwie podświetlikowe znajdują się natomiast w odległościach co 5,0 m i stanowią między innymi konstrukcję wsporczą dla rozstawionych w odstępach co ok. 1,2÷1,25 m ram poprzecznych trójkątnych świetlików podłużnych, odcinkowych, zlokalizowanych w kalenicy każdej z naw. Długości świetlików wykonanych wzdłuż hali są zróżnicowane (rys. 1). Na początku hali mamy dwa świetliki o długości po ok. 45 m (Sd), a dalej świetliki o długościach ok. 22,5 i 12,5 m (Ss i Sk).

Konstrukcja nośna świetlików została zaprojektowana i wykonana w zasadzie z rur prostokątnych. Ramy poprzeczne świetlików z rur 100×50×3 mm, rozstawione wzdłuż płatwi podświetlikowych co 1,2÷1,25 m, połączone zostały w ścianach bocznych ryglami wykonanymi z rur 50×30×3 mm, a w kalenicy z giętego kątownika 50×50×4 mm (rys. 2 i 3). Oszklenie świetlików wykonane jest w postaci szyb zespolonych o konfiguracji: wewnętrzna szyba zbrojona o grubości 6 mm, pustka 12 mm wypełniona argonem i zewnętrzna szyba matowa o grubości 5 mm. Wymiary szyb zespolonych wynoszą w przybliżeniu 1,2×1,75 m i są dostosowane do rozstawu ram i rygli świetlika, do których są mocowane. Świetliki zaprojektowano i wykonano bez stężeń w oszklonych połaciach, których zadaniem jest zapewnienie geometrycznej niezmienności konstrukcji świetlików na długości.

Dach hali wykonano jako ocieplony na blachach trapezowych EKO 135/0,88 (dwi- lub trzyprzęsłowych), opartych na kratownicowych płatwiach. Izolację termiczną stanowi wełna mineralna, na której wykonano pokrycie dachowe z dwóch warstw papy zgrzewalnej. Zewnętrzne ściany podłużne hali wykonano natomiast jako bezryglowe z paneli ściennych mocowanych do dwuteowych słupów pośrednich, rozmieszczonych między słupami układów

poprzecznych co 5,0 m. Izolację termiczną ścian wykonano z wełny mineralnej, a ich warstwę elewacyjną z blachy trapezowej, mocowanej do paneli ściennych.

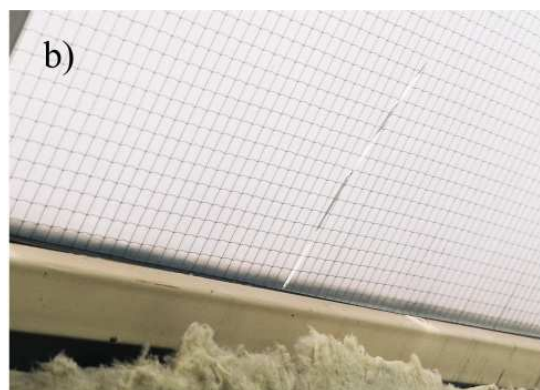


Rys. 2. Przekrój poprzeczny konstrukcji świetlika



Rys. 3. Widok świetlika od wnętrza hali

Pęknięte szyby świetlików występowały prawie wyłącznie w świetlikach o długości 45 m, przy czym było ich więcej w nawie B-C hali. Popękane były tylko szyby wewnętrzne, wykonane ze szkła zbrojonego. Pęknięcia przebiegały z reguły pionowo i obejmowały w zasadzie tylko dolne pasy oszklenia świetlików (rys. 4). Najczęściej były to pęknięcia na całą wysokość oszklenia. W kilku przypadkach można było zaobserwować pęknięcia krótsze, które zaczynały się zwykle na poziomie rygla okapowego świetlika i rozwijały w górę. Na długości świetlików pęknięcia były zlokalizowane w strefach nad ryglami układów poprzecznych oraz w połowie rozpiętości płatwi kratowych.



Rys. 4. Szczegóły pękniętych szyb świetlika: a) nad rygłem 7, b) nad rygłem 8

W wybranych miejscach zostały wykonane odkrywki, polegające na zdemontowaniu blach stanowiących wewnętrzną obudowę ścian świetlika. Wytypowano do tego w nawie B-C hali trzy miejsca. Dwa z nich nad ryglami układów poprzecznych 7 i 8, gdzie były pęknięte szyby, a jedno w połowie między wymienionymi układami, nad którym nie było pękniętych szyb. Rysunek 3 przedstawia typowy widok obudowy wewnętrznej ścian świetlika. Widoczne jest na nim wyraźne sfalowanie blachy obudowy, które jest ściśle związane z rozstawem ram poprzecznych świetlika. Takie zachowanie się blach powodowane jest przez rygle ścienne świetlika, które są wyginane w kierunku na zewnątrz hali. Blacha, która jest przymocowana do rygli w połowie ich długości, jest wciągana przez rygle w kierunku grubości ściany.



Rys. 5. Stan połączenia rygla okapowego z ramą



Rys. 6. Połączenie słupka rami z płatwią

Na rysunku 5 i 6 pokazano wybrane szczegóły rozwiązania stalowej konstrukcji nośnej świetlika. Rysunek 5 przedstawia widok doczołowego połączenia na dwie śruby M8 kl. 5.8, rygli okapowych z ramą poprzeczną świetlika. Tylko rygle w ścianie pionowej wyrównane są do lica wewnętrznego ram poprzecznych świetlika. Pozostałe rygle wyrównane są natomiast do lica zewnętrznego tych ram. We wszystkich przypadkach widoczny jest brak pełnego przylegania blachy czołowej rygla do rury, z której wykonane są rami poprzeczne. W kilku miejscach stwierdzono, że nakrętki śrub M8 są odkręcone do tego stopnia, że utworzyły się kilkumilimetrowe szczeliny (rys. 5), a blachy czołowe w tych miejscach są wygięte w sposób trwały (plastycznie).

Przeprowadzone podczas wizji lokalnej pomiary strzałek wygięcia rygli okapowych, a także wbudowanych w ścianie pionowej, wykazały, że rygle te w przeważającej większości przypadków są sprężyste lub trwale wygięte. Jedynie rygle, w których poluzowane były połączenia z ramami świetlika (rys. 5), sprawiały wrażenie prostych. Inne rygle okapowe miały wyraźne strzałki wygięcia w kierunku do wnętrza hali, a rygle ścienne – strzałki skierowane przeciwnie (w kierunku na zewnątrz hali). Wartości tych strzałek zdecydowanie różniły się od siebie, w zależności od miejsca wbudowania rygli na długości świetlika. W przypadku rygli świetlika położonych w strefach nad ryglami układów poprzecznych hali, strzałki te wynosiły od 3 do 3,5 mm, a w ryglach znajdujących się nad połową rozpiętości płatwi – tylko 2 do 2,5 mm. Należy dodać, że w przypadku rygli, które miały poluzowane nakrętki w połączeniach śrubowych (rys. 5), po dokręceniu nakrętek następowało zamknięcie styków, ale równocześnie wyraźnie zwiększała się strzałka ich wygięcia.

Na rysunku 6 pokazano szczegół połączenia ram poprzecznych świetlika, z pasem górnym płatwi podświetlikowej (rys. 2). Połączenia te zostały wykonane niezgodnie z projektem jako spawane, na spoiny pachwinowe o grubości około 3 mm, wzdłuż linii kontaktu rury z półką dwuteownika. Mimo dość krótkiego okresu eksploatacji konstrukcji, w strefach połączeń widoczny jest rozwój procesów korozyjnych. Świadczy to o wykraplaniu się wilgoci wewnątrz rury, która nie została szczelnie zamknięta, a także o niezbyt starannym zabezpieczeniu w tych miejscach stali przed korozją.

Podsumowując, należy stwierdzić co następuje:

- rami poprzeczne świetlika, skonstruowane z rur prostokątnych 100×50×3 mm, zostały połączone z pasami górnymi płatwi kratowych spoinami pachwinowymi o grubości ok. 3 mm, wykonanymi wzdłuż linii kontaktu rur z półkami dwuteowników HEA 160,
- rygle świetlika, skonstruowane z rur prostokątnych 50×30×3 mm, połączone są z ramami poprzecznymi doczołowo za pomocą dwóch śrub M8 kl. 5.8, umieszczonych na bardzo dużym mimośrodku względem osi pionowej rygli,

- stan konstrukcji stalowej świetlika wskazuje, że pracuje ona w kierunku długości hali jako konstrukcja przestrzenna; świadczą o tym: deformacje blach czołowych w połączeniach rygli z ramami, odkręcanie się w tych połączeniach nakrętek i strzałki wygięcia rygli,
- w świetlikach pękają szyby wewnętrzne (zbrojone), zlokalizowane w zasadzie w dolnych pasach oszklenia,
- pęknięcia szyb występują głównie w świetlikach długich, są z reguły pionowe i zaczynają się od rygli okapowych,
- na długości świetlików pęknięcia szyb zlokalizowane są nad ryglami układów poprzecznych hali, a także w połowie odległości między tymi układami.

3. Analiza świetlików jako konstrukcji przestrzennych

Obliczenia świetlika w projekcie ograniczono do rozpatrzenia układu poprzecznego jako dwuprzegubowej ramy płaskiej podpartej niepodatnie na płatwiach, a także rygli świetlika jako prętów swobodnie podpartych, zginanych wyłącznie obciążeniem poprzecznym.

Chcąc uwzględnić rzeczywistą pracę statyczną świetlików, zmodelowano je w programie Robot Structural Analysis [1] jako konstrukcje przestrzenne. Rozpatrywano przy tym konstrukcje złożone z ram poprzecznych świetlików, które połączone są między sobą ryglami, współpracujących z kratowymi płatwiami podświetlikowymi. Analizie poddano świetliki o długości 45 m, których konstrukcja przechodzi nieprzerwanie nad trzema ryglami układów poprzecznych hali (3 do 5 i 7 do 9, rozstawionych co 15 m). W przypadku świetlika długiego zadanie (model obliczeniowy) nazwano Sd. Model ten to konstrukcja przestrzenna, która ma 426 węzłów i 499 prętów w sumie podzielonych na 785 elementów skończonych.

W analizach skupiono się głównie nad ustaleniem wpływu pracy przestrzennej konstrukcji świetlików na wytyżenie jej elementów składowych. Powyższe nie było uwzględniane podczas projektowania świetlików. W związku z tym obciążenie analizowanych konstrukcji przestrzennych przykładano jako odpowiednie obciążenie równomiernie rozłożone wzdłuż płatwi podświetlikowych. Rozpatrywano przy tym następujące obciążenia ustalone dla hali, zgodnie z obowiązującymi normami, na poziomie obliczeniowym: stałe – 3,72 kN/m, śniegiem – 5,36 kN/m, ssaniem wiatru – 2,10 kN/m, a także łączne (stałe i śnieg) – 9,08 kN/m. Powyższe obciążenia przykładano jako jednakowe do obu płatwi. Przeanalizowano ponadto przypadek niesymetrycznego obciążenia ssaniem wiatru, w którym płatwie modelu przestrzennego obciążone były różnie: jedna – 1,70 kN/m, a druga – 0,83 kN/m. Obciążenia jednak z udziałem ssania wiatru w analizowanym zagadnieniu nie były tak istotne, jak te, które podano wyżej pismem wytłuszczonym. Należy w tym miejscu podkreślić, że maksymalne ugięcia płatwi od obciążeń obliczeniowych rozważanych konstrukcji wynoszą 30,33 mm, co jest bliskie ugięciom granicznym wynoszącym $1500/500 = 3,0$ cm.

W rozważanym modelu przestrzennym jako pierwszy analizowano świetlik w wersji zrealizowanej na obiekcie (oznaczono go cyfrą 1). Dalsze analizy świetlika dotyczyły konstrukcji zmodyfikowanej (model z cyfrą 2), w której wprowadzono dylatacje nad ryglami układów poprzecznych hali oraz usztywnienie węzłów ściskanych w strefie środkowej płatwi.

Wybrane wyniki analiz statycznych przestrzennych konstrukcji świetlików zestawiono w tablicach 1 i 2. W tablicy 1 podano dla poszczególnych modeli obliczeniowych maksymalne siły podłużne (ściskające i rozciągające) w ryglach świetlików, a także skutki jakie one wywołują. Będą to mianowicie naprężenia zginające i strzałki wygięcia zgodne z tymi, o których mówiono w rozdz. 2. Obliczono je dla elementów ściskanych lub rozciąganych mimośrodowo, zgodnie z teorią II rzędu. W tablicy 2 podano natomiast w podobnym układzie maksymalne momenty zginające, powstające w miejscu połączenia słupów ram poprzecznych

świetlików z płatwiami, oraz odpowiadające im naprężenia normalne w przekrojach. Zestawione wyniki, z których najgorsze zapisano tłustym drukiem, stanowią potwierdzenie sugestii, odnośnie do przyczyny pęknięcia szyb świetlików. Sytuacja z jaką mamy do czynienia w przypadku modeli oznaczonych cyfrą 1, jest niedopuszczalna i wymaga interwencji. Wytyżenie rygli świetlików wskutek obciążenia stałego (tabl. 1) oraz dodatkowy wpływ obciążenia niedużym śniegiem lub wiatrem, z których to ostatnie ma charakter dynamiczny, wyjaśnia stan konstrukcji świetlików opisany w rozdz. 2 oraz powoduje pęknięcie szyb w świetlikach. Warto w tym miejscu dodać, że graniczne ugięcie rygli świetlików (od obciążeń charakterystycznych) nie powinno przekraczać około $1250/500 = 2,5$ mm.

Tablica 1. Wytyżenie rygli wskutek pracy przestrzennej świetlików

Model obliczeniowy	Obciążenie obliczeniowe	Maksymalne siły podłużne w ryglach: rozciągające (+), ściskające (-) [kN]			Maksymalne naprężenia normalne w ryglach σ [MPa] i ich ugięcia f [mm]			
		ściennych	okapowych	pośrednich	ściennych		okapowych	
					σ	f	σ	f
Sd1	stałe	7,01	1,22	0,08	89,0	4,19	14,5	0,67
		-9,03	-3,69	-0,04	62,8	2,38	24,3	0,90
	śniegiem	10,10	1,76	0,11	133,7	6,32	20,8	0,98
Sd2	stałe	-13,02	-5,31	-0,06	94,9	3,65	36,3	2,04
		17,11	2,98	0,19	252,0	11,9	35,8	1,69
	łącznie	-22,05	-9,00	-0,10	181,1	7,18	62,4	2,37
Sd2	stałe	2,27	1,19	0,12	27,0	1,27	13,9	0,66
		-9,14	-3,30	-0,13	21,7	-0,0	7,84	-0,0
	śniegiem	3,27	1,71	0,17	39,6	1,86	20,1	0,95
Sd2	stałe	-13,17	-4,75	-0,19	31,3	-0,0	11,3	-0,0
		5,53	2,90	0,29	68,7	3,24	34,8	1,64
	łącznie	-22,30	-8,05	-0,32	53,0	-0,0	19,1	-0,0

Tablica 2. Wytyżenie ram świetlików w miejscu połączenia ich słupów z płatwiami

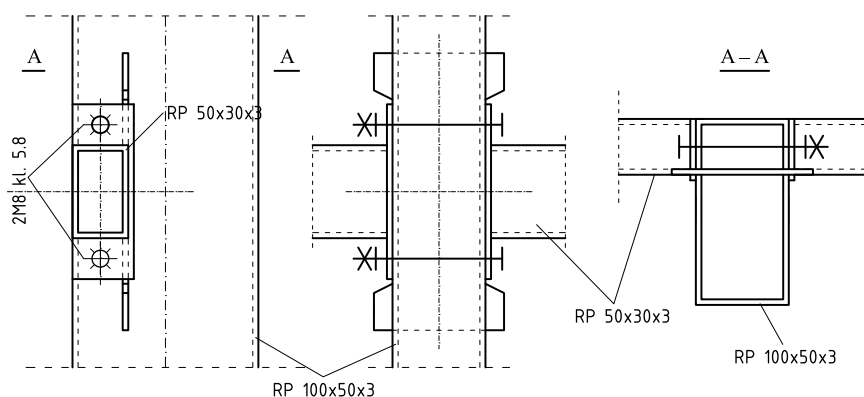
Model obliczeniowy	Obciążenie obliczeniowe	Maksymalny moment zginający w połączeniu [kNm]	Maksymalne naprężenia σ [MPa]
Sd1	stałe	2,00	138
	śniegiem	2,87	199
	łącznie	4,87	338
Sd2	stałe	1,76	122
	śniegiem	2,54	176
	łącznie	4,29	298

W modelu oznaczonym cyfrą 2 odpowiednie konstrukcje przestrzenne świetlików zostały m.in. zdylatowane nad ryglami układów poprzecznych hal. Wyeliminowano w ten sposób duże siły rozciągające w ryglach świetlików, powstające nad ryglami układów poprzecznych, oraz zmniejszono wytyżenie ramek wskutek połączenia z płatwiami. Odbywa się to kosztem zwiększenia sił ściskających w ryglach świetlika, które osiągają wartości maksymalne w połowie rozpiętości płatwi. Aby zmniejszyć wpływ zginania rygli świetlika pod wpływem tych sił, niezbędna jest korekta doczołowych połączeń rurowych rygli i ram konstrukcji świetlika, w celu zmniejszenia w nich efektu podatności. Osiągnięto w ten sposób zmniejszenie mimośrodowość podczas przekazywania przez rurowe słupy ram sił ściskających powstających w ryglach.

Podobne analizy świetlików jako konstrukcji przestrzennych przeprowadzono programem SOFiSTiK [2]. Otrzymano podobne wyniki jak w modelu z Robotą, przy czym siły podłużne w ryglach były nieco mniejsze. Obszerniejsze wyniki tych analiz zostaną przedstawione podczas konferencji.

4. Zachowanie się węzłów w ujęciu MES

Przeprowadzone analizy statyczne świetlików jako konstrukcji przestrzennych nie uwzględniały rzeczywistego zachowania się niewłaściwie skonstruowanych węzłów śrubowych zrealizowanych w konstrukcji stalowej świetlików. Chcąc to zilustrować posłużono się metodą elementów skończonych. Skorzystano z programu ABAQUS 6.11 [3]. Jeden z takich węzłów przy połączeniu rygli ściennych zamodelowano za pomocą elementów prostopadłościennych, ośmiowęzłowych, ze zredukowanym całkowaniem (C3D8R). Maksymalne wymiary elementów skończonych w planie wynosiły 5 lub 10 mm, a ich grubość była równa 1,5 lub 3 mm. Modele numeryczne wykonano dla połączeń w dwóch wersjach: zrealizowanej (rys. 2) i zalecanej. Połączenia w wersji zalecanej zostały skonstruowane tak, aby wyeliminować mimośrodowość w przypadku zarówno rozciągania, jak i ściskania rygli świetlika. To pierwsze daje się łatwo osiągnąć przez umieszczenie śrub M8 w osi rygli, co wymaga zastosowania blach czołowych o innym kształcie. Chcąc osiągnąć podobny efekt w przypadku ściskania rygli, niezbędne jest zastosowanie wewnątrz rury dodatkowych elementów dystansowych, zapewniających stałą odległość między jej ściankami. Węzeł w wersji zalecanej pokazano na rys. 7.

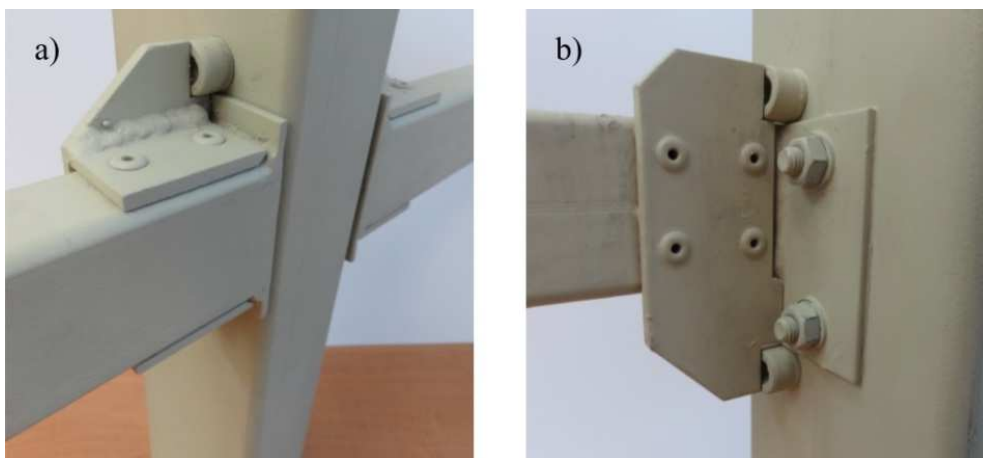


Rys. 7. Połączenie rygli z ramą świetlika w wersji zalecanej

Przeprowadzone analizy numeryczne węzłów w wersji zrealizowanej w omawianej hali potwierdzają, że rygle świetlików w przypadku zarówno ściskania, jak i rozciągania będą zginane, powodując pękanie szyb świetlika. Nie obserwuje się tego w przypadku węzłów wykonanych w wersji zalecanej. Wyniki odpowiednich analiz numerycznych zostaną przedstawione podczas konferencji.

Rozwiązanie węzłów pokazane na rys. 7 nadaje się do zastosowania na etapie wykonania konstrukcji stalowej. Chcąc je wdrożyć w omawianej konstrukcji należałoby w zasadzie zdemontować świetliki. Można tego uniknąć wykonując usztywnienie węzłów z ryglami ściskanymi tak jak na rys. 8, z równoczesnym zdylatowaniem świetlików w strefach nad układami poprzecznymi hali, gdzie mamy do czynienia z ryglami poddanymi rozciąganiu. To ostatnie zrealizowano przez wymianę śrub M8 na dłuższe i zastosowanie podkładek sprężystych. Dodatkową zaletą tego rozwiązania była możliwość wykonania bez zastosowania spawania. W trakcie prac połączenia dodatkowych elementów wykonano z wykorzystaniem stalowych

nitów jednostronnych [4] oraz nitonakrętek. Więcej szczegółów na ten temat zostanie przedstawionych podczas konferencji.



Rys. 8. Połączenie ściskanych rygli ściennych (a), okapowych (b) z ramą świetlika w wersji wdrożonej

5. Wnioski i zalecenia

Przyczyną pęknięcia szyb w świetlikach omawianej hali, są zbyt duże wygięcia ich rygli podłużnych, w efekcie przestrzennej pracy statycznej konstrukcji świetlików, współpracujących z konstrukcją przekrycia hali przy przenoszeniu obciążeń. Powyższe jest skutkiem niewłaściwego skonstruowania świetlików, co omówiono w rozdz. 2.

Wyginające się pod wpływem obciążenia przekrycia hali rygle świetlików, do których przymocowane są szyby zespolone, przekazują na nie część momentów zginających. Ponieważ są to momenty wywołujące rozciąganie po stronie szyb wewnętrznych, pękają właśnie szyby zbrojone.

W rozdziale 4 przedstawiono propozycje odnośnie do zakresu prac naprawczych, jakie należy przeprowadzić w obrębie świetlików, aby usunąć przyczynę pęknięcia w nich szyb. Prace te obejmują wykonanie dylatacji w konstrukcji nośnej świetlików nad ryglami układów poprzecznych hali, a także korektę połączeń elementów ram poprzecznych i rygli świetlika wykonanych z rur prostokątnych.

Dylatacje powinny być wykonane w świetlikach, których konstrukcja nośna przechodzi w sposób ciągły nad ryglami układów poprzecznych hali. Dotyczy to więc świetlików długich i średnich. Korekta natomiast połączeń elementów ram poprzecznych i rygli świetlików powinna być przeprowadzona we wszystkich świetlikach (także w świetlikach krótkich).

Literatura

1. Autodesk Robot Structural Analysis 2010, Podręcznik użytkownika, Autodesk 2010.
2. SOFiSTiK Manuals ver. 2012, SOFiSTiK AG, Oberschleissheim 2012.
3. ABAQUS 6.11 Online Documentation, Dassault Systèmes, 2011.
4. Gosowski B., Kubica E.: Badania laboratoryjne konstrukcji metalowych. Wydanie IV znowelizowane i rozszerzone, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012.