



ZAGROŻENIE AWARYJNE HALI STALOWEJ SPOWODOWANE KOROZJĄ JEJ OBUDOWY DACHOWEJ

ANTONI BIEGUS, *antoni.biegus@pwr.edu.pl*
Politechnika Wrocławska

Streszczenie: W referacie przedstawiono mechanizmy powstania uszkodzeń korozyjnych obudowy dachowej i ich wpływu na nośność oraz trwałość stalowej konstrukcji nośnej hali. Destrukcja korozyjna doprowadziła nie tylko do zmniejszenia nośności dachowych blach fałdowych, ale także spowodowała zagrozenie awaryjne płatwi, stężeń oraz rygli dachowych hali. Wykonano analizę zakresu i sposobu modernizacji obudowy dachu hali, a także określono warunki dalszego bezpiecznego użytkowania obiektu

Słowa kluczowe: hala stalowa, blacha fałdowa, płatew z kształtowników Z, korozja, zagrożenie awaryjne.

1. Wstęp

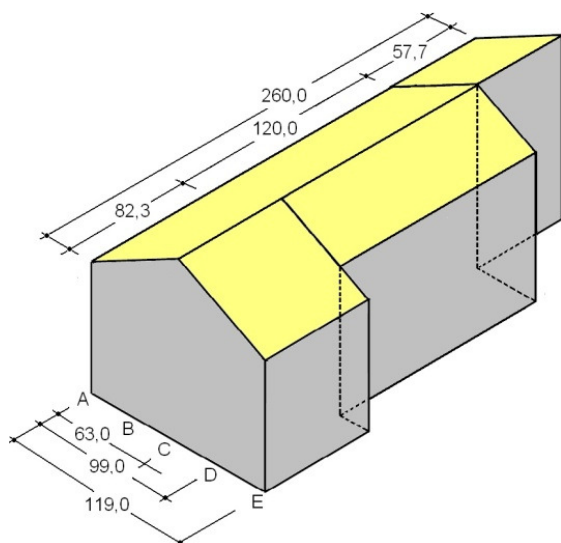
Badany budynek jest wielonawową, stalową halą produkcyjną ceramiki budowlanej o powierzchni około 23 000 m². Hala jest użytkowana od 8 lat. Występująca w niej intensywna destrukcja korozyjna zmniejszyła jej nośność i powstało zagrożenie awaryjne tego obiektu.

W hali znajduje się piec tunelowy, służący do produkcji ceramiki budowlanej, którego paliwem jest gaz ziemny. Z wnętrza hali pobierane jest powietrze do pieca i suszarni, w wyniku czego występuje w niej podciśnienie, nasilające się zwłaszcza w okresie zimowym, gdy wszystkie bramy wjazdowe są zamknięte. Na skutek nieszczelności pieca tunelowego oraz nadciśnienia, do wnętrza hali wydzielane są niewielkie ilości produktów spalania gazu ziemnego, zwłaszcza w obrębie „strefy gorącej pieca” o powierzchni około 500 m². W wyniku procesów technologicznych we wnętrzu hali panuje bardzo wysoka temperatura, którą oszacowano (pod dachem hali) na około 60°C. Następstwem wydzielania się agresywnych mediów technologicznych jest intensywna korozja stalowych słupów, rygli dachowych i ich zastrzałów, płatwi, świetlików oraz obudowy dachu z blach fałdowych [1].

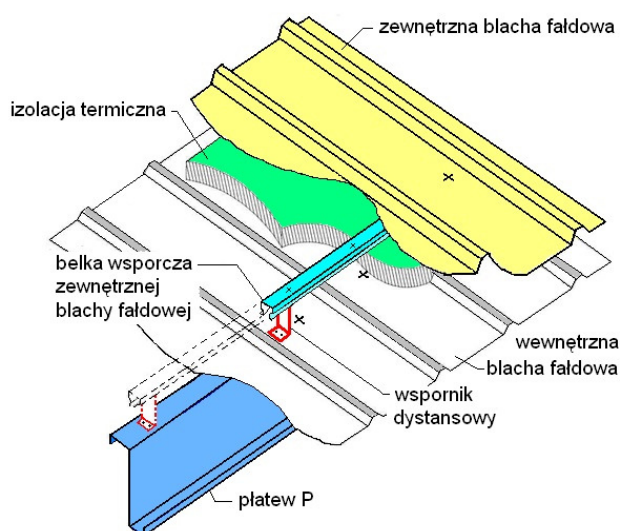
Korozja spowodowała m.in. perforację zewnętrznych blach fałdowych (obniżenie ich nośności), nieszczelności pokrycia dachowego i zamakanie izolacji termicznej dachu, a także uszkodzenia połączeń blach fałdowych z płatwiami. Uszkodzenie korozyjne tych połączeń sprawia, że płatwie nie są usztywnione i ich nośność jest niedostateczna do przeniesienia prognozowanych obciążeń. Równocześnie płatwie są częścią składową połaciowych stężeń poprzecznych dachu hali, a także wraz zastrzałami stanowią zabezpieczenie rygla dachowego przed zwichrzeniem. Zidentyfikowane uszkodzenia korozyjne wewnętrznych blach fałdowych, stanowią zagrożenie awaryjne konstrukcji nośnej hali.

2. Krótki opis konstrukcji hali

Ustrój nośny stalowej hali stanowią poprzeczne ramy pełnościennie (o przekrojach dwuteowych) oraz stężenia połaciowe poprzeczne i pionowe międzysłupowe. Rozstaw ram poprzecznych wynosi 12,0 m, a rozpiętości ich naw wynoszą: 29,0 m, 34,0 m, 36,0 m i 20,0 m. Długość najdłuższej nawy hali wynosi 260,0 m. Aksonometrię hali pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Aksonometria hali



Rys. 2. Konstrukcja obudowy dachu hali

Konstrukcję wsporczą pokrycia dachu hali stanowią płatwie P, o rozpiętości 12,0 m, w rozstawie co 1,5 m. Zaprojektowano je jako uciągane zakładkowo belki wieloprzęsłowe, z kształtowników Z, giętych na zimno z blach o grubości 2,67 mm. Wysokość środka płatwi P wynosi 254 mm, szerokość półek zaś wynosi 88,9 mm.

Konstrukcja obudowy dachu (rys. 2) składa się z wewnętrznej blachy fałdowej (usztyniającej „bocznice” i przeciwskrętnie płatwie P), izolacji termicznej z wełny mineralnej, belek konstrukcji wsporczej zewnętrznych blach fałdowych i zewnętrznej blachy fałdowej.

Wewnętrzne blachy fałdowe, o wysokości fałd 19 mm i grubości blachy 0,55 mm, połączono wkrętami samowiercącymi w każdej fałdzie z płatwiami P. Oprócz funkcji oparcia dla wełny mineralnej, spełniają one bardzo ważne zadanie konstrukcyjne usztynnienia płatwi P, tj. zabezpieczenie ich przed zwichrzeniem oraz skręcaniem.

Zewnętrzne blachy fałdowe (dachowe) o wysokości fałd 31,75 mm i grubości blachy 0,55 mm, spełniają zadanie płyty, która przejmuje obciążenia od śniegu i wiatru. Są one połączone wkrętami samowiercącymi do belek wsporczych zewnętrznych blach fałdowych.

3. Opis uszkodzeń obudowy dachu hali

W wyniku oddziaływania agresywnych mediów występujących w hali, skorodowaniu uległy wszystkie elementy ustroju nośnego hali (słupy, rygle dachowe, płatwie, rygle ścienne, stężenia). Szczególnie intensywnej korozji uległa konstrukcja części poddachowej hali w obrębie „strefy gorącej” pieca tunelowego, a także w strefach formowania się przyspieszonych strug przepływu powietrza, tj. bram, wrót, wentylacji.

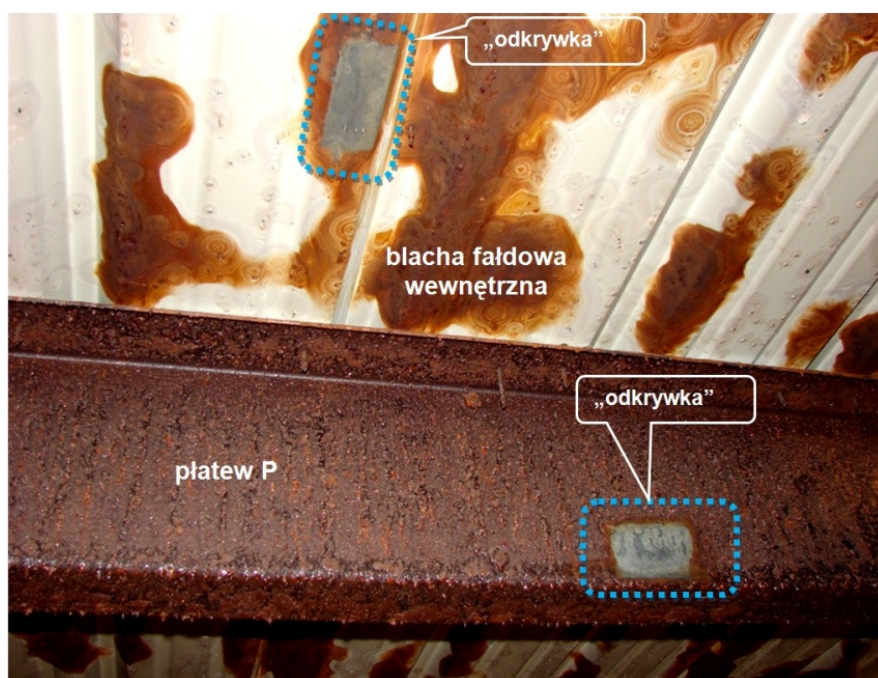
Przykład korozji płatwi P i wewnętrznych blach fałdowych pokazano na rys. 3 i 4.

Z wykonanych badań fizyko-chemicznych wynika, że gazy powstające przy wypalaniu ceramiki w piecu tunelowym, mają odczyn kwaśny, zbliżony do kwasu solnego. Reagują one z cynkiem tworząc charakterystyczny „nalot korozyjny”.

Wykonane „odkrywki” (pokazane na rys. 4) wykazały, że quasi produkty korozyjne występują tylko na elementach ocynkowanych. Nie są one ściśle związane z podłożem i tworzą jedynie rdzawy nalot oraz, że nastąpiło tylko powierzchowne uszkodzenie warstwy cynku zabezpieczającego antykorozyjnie stalowe elementy (np. płatwie P). Wniosek ten dotyczy również wewnętrznych blach fałdowych, które zostały zabezpieczone przed korozją w podwójny sposób, poprzez cynkowanie, a następnie powlekanie cienką warstwą PVC (25 μm).



Rys. 3. Widok skorodowanych płatwi P oraz blach fałdowych



Rys. 4. Widok odkrywek „korozji” płatwi i wewnętrznej blachy fałdowej

W miejscach, gdzie doszło do mechanicznego uszkodzenia lub mikropęknięć powłoki PVC powstały charakterystyczne, brązowe naloty produktów quasi korozji.

Badania wykazały jednak trwałe uszkodzenia korozyjne połączeń wewnętrznych blach fałdowych z płatwiami P. Stwierdzono występowanie licznych przekorodowań blachy fałdowej wokół rdzenia wkrętów samowiercących i ich „poluzowanie”. W tym stanie technicznym tych połączeń, wewnętrzna blacha fałdowa nie stanowi zakładanego w projekcie „bocznego” oraz przeciwskrętnego usztywnienia płatwi P.

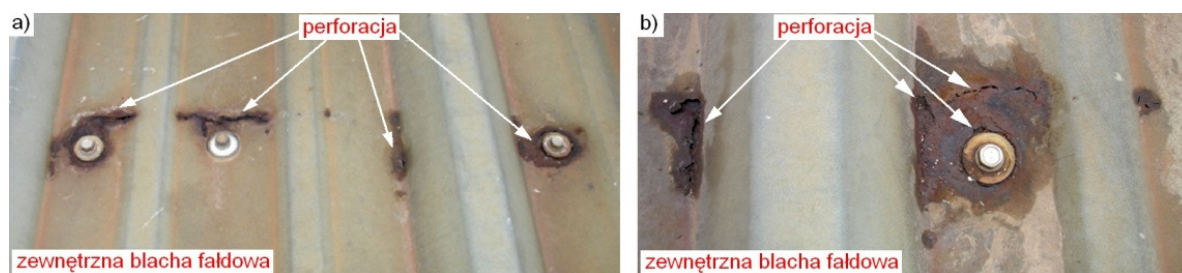
Wyjątkowo intensywnej destrukcji korozyjnej uległa obudowa dachu hali. Zniszczeniu uległy zarówno jej wewnętrzne blachy fałdowe, jak i zewnętrzne blachy fałdowe (rys. 5, 6),

a także konstrukcja wsporcza zewnętrznych blach fałdowych oraz izolacja termiczna z wełny mineralnej (rys. 5). W celu oceny stanu technicznego obudowy dachowej wykonano „odkrywkę” zewnętrznego poszycia dachu. Po miejscowym odsłonięciu zewnętrznej blachy fałdowej stwierdzono korozję wszystkich elementów stalowych konstrukcji obudowy tj. wewnętrznej blachy fałdowej, zewnętrznej blachy fałdowej oraz konstrukcji wsporczej zewnętrznych blach fałdowych, a także silne zawilgocenie wełny mineralnej. Widok skorodowanych elementów składowych obudowy dachowej pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Widok skorodowanej obudowy dachu w „odkrywce”

Na rys. 6 pokazano przykłady skorodowanych perforacyjnie zewnętrznych blach fałdowych oraz ich połączeń śrubowych. Należy zwrócić uwagę, że pokazane na rys. 6 uszkodzenia zewnętrznej blachy fałdowej „pokrywają” się z usytuowaniem belki (konstrukcji wsporczej zewnętrznej blachy fałdowej), na której się ona opiera (patrz rys. 5). Zewnętrzna blacha fałdowa, na skutek perforacji korozyjnych straciła lokalnie całkowicie swoją nośność. W tym stanie technicznym nie spełnia ona wymagań wytrzymałościowych wg [3]. Przyczyn tak zaawansowanej i intensywnej korozji należy upatrywać nie tylko w agresywności środowiska, a przede wszystkim w wadliwej konstrukcji obudowy dachu tj. braku paroizolacji i wentylacji oraz występowaniu mostków termicznych w tej przegrodzie. Spowodowały one zamknięcie wełny mineralnej i w konsekwencji przyspieszenie procesów korozyjnych.



Rys. 6. Uszkodzenia korozyjne zewnętrznej blachy fałdowej: a) korozja i perforacja „poprzeczna” i „podłużna” fałd, b) przekorodowana blacha w obrębie łba wkrętu samowiercącego

4. Analiza wpływu korozji wewnętrznych blach fałdowych na nośność konstrukcji hali

Obudowę dachu hali zaprojektowano bez właściwego uwzględnienia występujących w niej agresywnych, korozjogennych mediów emitowanych z pieca tunelowego oraz wysokiej temperatury pod dachem hali. Następstwem tych oddziaływań jest m.in. intensywna korozja wewnętrznych i zewnętrznych blach fałdowych, konstrukcji wsporczej zewnętrznych blach fałdowych, a także zawilgocenie izolacji termicznej oraz liczne perforacje i nieszczelności dachu. Spaliny gazu ziemnego zawierające m.in. związki siarki oraz kwasu solnego w temperaturze poniżej ich „punktu rosy” wykrapłają się. W wykroplonej, gorącej wodzie bardzo łatwo rozpuszczają się tlenki siarki, azotu, a także inne związki, powodując powstanie agresywnych kwasów, wywołujących wzmożoną korozję elementów stalowych. W zastosowanym rozwiązaniu obudowy dachu spaliny przedostają się w przestrzeń między wewnętrzną i zewnętrzną blachą fałdową. Wykraplanie się agresywnych mediów i korozja występuje szczególnie intensywnie w połączeniach i stykach, co ilustrują rys. 5 i 6 (w miejscach trudno dostępnych, szczelinach itp.). Należy zwrócić uwagę, że korozja w obrębie wkrętów samowiercących na dachu hali pokazana na rys. 6, jest wynikiem korozji półki górnej belki konstrukcji wsporczej zewnętrznych blach fałdowych, co pokazano na rys. 5. Ponadto na rys. 5 i 6a widać, że korozja wewnętrznej powierzchni zewnętrznej blachy fałdowej występuje tylko na powierzchni jej kontaktu z belką konstrukcji wsporczej. Tak więc destrukcja korozyjna wewnątrz obudowy dachu (rys. 5), skutkuje uszkodzeniem korozyjnym wsporników dystansowych, belek konstrukcji wsporczej zewnętrznych blach fałdowych i zewnętrznych blach fałdowych oraz ich połączeń. Ta korozja wynika też z braku paroizolacji oraz z faktu, że „nieodizolowane” termicznie wsporniki i belki konstrukcji wsporczej zewnętrznych blach fałdowych są mostkami termicznymi, na których wykrapłają się agresywne media, powodujące intensywną korozję obudowy dachowej.

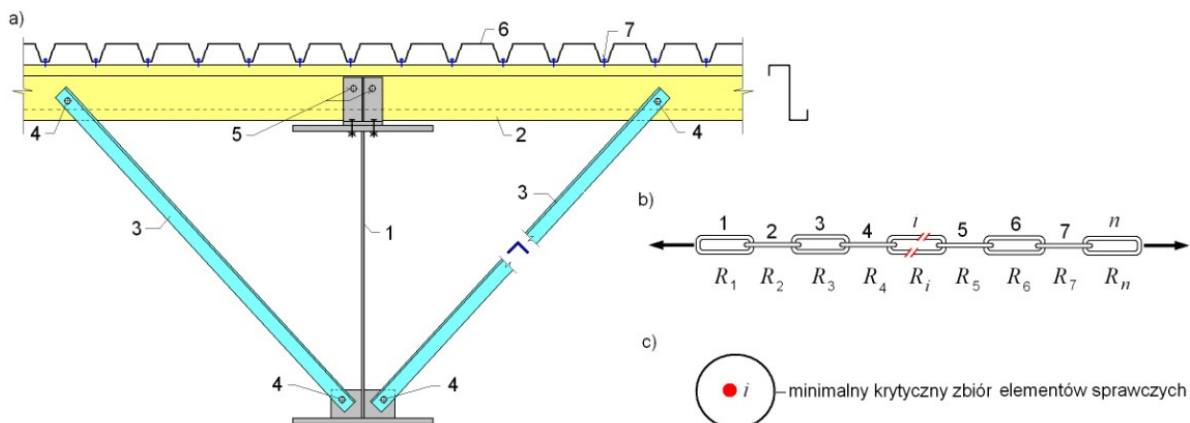
W analizowanej hali ocynkowanie blach fałdowych i powlekanie cienką warstwą PVC (25 μm) nie zabezpieczało jej skutecznie przed korozją. Cienka warstwa PVC pęka w trakcie obciążania i deformacji bardzo cienkich blach fałdowych (o grubości 0,55 mm) i „otwiera” czynnikom agresywnym bezpośredni dostęp do cynku. Dlatego wymieniając obudowę dachu na nową, zalecono zastosowanie blach fałdowych o podwyższonej odporności korozyjnej np. zabezpieczonych warstwą alucynku i powlekanych warstwą PVC o grubości 200 μm .

Jako wadliwe należy też uznać zastosowanie zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych blach fałdowych o grubości ścianek 0,55 mm. Ścianki tych blach fałdowych są o niedostatecznej sztywności i w trakcie użytkowania łatwo się odkształcają i deformują, co prowadzi m.in. do uszkodzeń zabezpieczeń antykorozyjnych. Minimalna grubość ścianek dachowych blach fałdowych nie powinna być mniejsza niż 0,70 mm [4].

Ze względu na projektowaną funkcję blach fałdowych i uwzględniany w obliczeniach zakres ich współdziałania z ustrojem nośnym wyróżnia się trzy ich klasy konstrukcyjne [3]. Konstrukcje, które projektuje się uwzględniając udział blach fałdowych w ocenie nośności i stateczności głównego ustroju nośnego (np. rygla dachowego, słupa) zalicza się do klasy konstrukcyjnej I. Jeśli usztywnienie z blach fałdowych uwzględnia się w ocenie nośności i stateczności pojedynczych elementów (np. płatwi, rygli ściennych) to są one klasy konstrukcyjnej II. Konstrukcje, które projektuje się zakładając, że blacha fałdowa przenosi obciążenia poprzeczne i przekazuje je na układ konstrukcyjny, zalicza się do klasy konstrukcyjnej III.

W badanej hali wewnętrzna blacha fałdowa klasy konstrukcyjnej II jest częścią składową jej ustroju nośnego (rys. 7a). Wewnętrzna blacha fałdowa 6 zapewnia niezbędną nośność oraz stateczność płatwiom 2 (gdy jest z nimi połączona łącznikami 7 w dolinie każdej fałdy). Z kolei płatwie 2 są elementem składowym poprzecznego stężenia połączeniowego układów poprzecznych hali, a także wraz z zastrzałami 3 stanowią boczne usztywnienie przed zwichrzeniem rygli

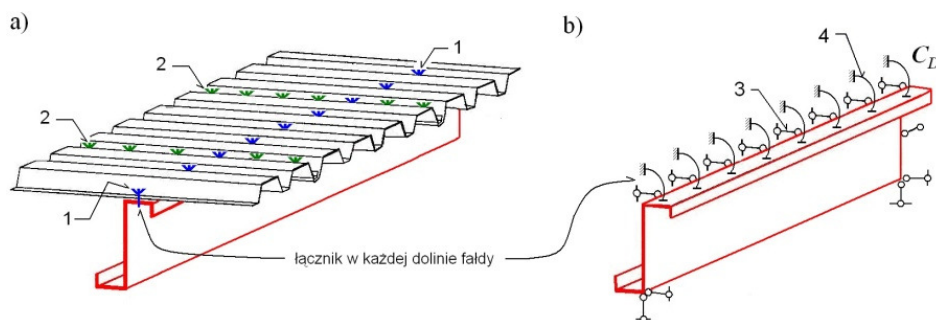
dachowych 1. W tym też sensie wewnętrzna blacha fałdowa 6 (podobnie jak stężenia prętowe) jest elementem głównego ustroju nośnego obiektu. Ten system konstrukcyjny hali jest o szeregowym modelu niezawodnościowym, którego schemat ideowy pokazano na rys. 7b [2]. W skład minimalnego krytycznego zbioru (MKZ) tego systemu konstrukcyjnego wchodzi jeden element sprawczy (rys. 7c). Znaczy to, że wyczerpanie nośności np. płatwi 2, lub blachy fałdowej 6, lub połączenia jej płatwią 7 (jak w badanym przypadku) itd. – prowadzi do geometrycznej zmienności całego systemu konstrukcyjnego hali (awarii).



Rys. 7. Schemat konstrukcji (a), jej model niezawodnościowy (b) i minimalny krytyczny zbiór elementów sprawczych (c): 1 – rygiel dachowy, 2 – płatew, 3 – zastrzał, 4 – połączenie zastrzału z płatwią lub ryglem, 5 – połączenie płatwi z ryglem, 6 – blacha fałdowa, 7 – połączenie blachy fałdowej z płatwią

O nośności szeregowego systemu konstrukcyjnego, decyduje wagowa nośność jego najsłabszego elementu sprawczego (najsłabszego ogniwa w łańcuchu – rys. 7b). Oczywiście jest iż awaria będzie generowana przez element sprawczy, w którym występuje największe wyężenie. W badanym przypadku jest to skorodowane połączenie 7, o niedostatecznej nośności.

Aby blachę fałdową można było uznać za usztywnienie tarczowo-płytowe (rys. 8) musi być ona połączona w sposób ciągły (gęsty) ich dolnymi fałdami z pasem górnym płatwi łącznikami 1 [3]. Ponadto należy zastosować łączniki wzdłużne 2, „zszywające” ze sobą sąsiednie arkusze blach fałdowych w odległości nie mniejszej niż 300 mm. Wówczas krępuje ona przemieszczenia liniowe (w płaszczyźnie połąci), a także kątowe przylegającego pasa górnego płatwi (rys. 8b). To skrępowanie wydatnie podnosi nośność płatwi z warunku zwichrzenia. Należy zwrócić uwagę, że jeśli blacha fałdowa jest połączona z pasem górnym płatwi w co drugiej fałdzie, to jej sztywność postaciowa maleje aż pięciokrotnie. Świadczy to o wadze gęstości ww. połączeń w ocenie usztywniania tarczowego z blach fałdowych.



Rys. 8. Schemat stężenia płatwi tarczą z blachy fałdowej: a) model fizyczny, b) model obliczeniowy; 1 – łącznik główny, 2 – łącznik wzdłużny, 3 – więź ograniczająca przemieszczenie boczne płatwi, 4 – więź ograniczająca skręcanie płatwi

Zadanie konstrukcyjne blach fałdowych jako usztywnienia i stężenia ustrój nośny, nakłada obowiązek szczególnie starannego wykonawstwa ich połączeń z stężanymi elementami prętowymi (np. płatwiami). Zgodnie z [4] jakość ich wykonania powinny podlegać kontroli i odbiorowi technicznemu (podobnie jak np. zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych).

W strefie „gorącej” hali stwierdzono korozyjne uszkodzenia połączeń wewnętrznych blach fałdowych z płatwiami P i w związku z tym nie stanowią one skutecznego, zakładanego w projekcie bocznego i przeciwskrętnego usztywnienia płatwi P. Z wykonanych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych wynika, że nośność niestężonych blachą fałdową płatwi P od prognozowanych obciążeń jest przekroczona o 156%, co stanowi zagrożenie awaryjne hali.

5. Analiza zakresu i sposobu modernizacji obudowy dachu hali

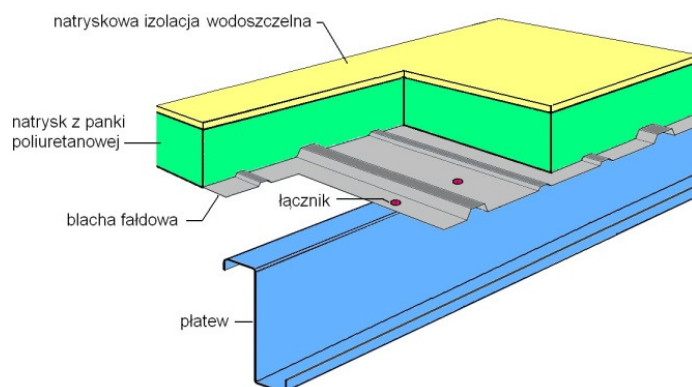
W związku z bardzo złym stanem technicznym i potrzebą remontu obudowy dachu hali, wykonano analizę zastosowania rozwiązań alternatywnych w stosunku do rozwiązania istniejącego. Z badań roli konstrukcyjnej i mechanizmu destrukcji korozyjnej obudowy dachu hali i wynika, że poprawne rozwiązanie powinno spełniać następujące kryteria (postulaty):

- 1) zapewnić usztywnienie „boczne” i przeciwskrętne płatwiom P,
- 2) w wewnętrznej konstrukcji obudowy dachu nie powinny znajdować się stalowe elementy (gdyż mogą one stanowić mostki termiczne inicjujące korozję),
- 3) ograniczyć, lub wyeliminować penetrację agresywnych mediów w obudowę dachu.

Uwzględniając m.in. powyższe postulaty poddano analizie stosowane i technicznie realne zamienne rozwiązania obudowy dachu hali. Z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji nośnej hali (jej nośność) jako imperatywny należy uznać postulat 1.

Analizowano zastosowanie płyt warstwowych na obudowę dachu hali. To rozwiązanie nie spełnia kryterium 1, gdyż płyty warstwowe są łączone do płatwi „długimi” wkrętami o dużej podatności, oraz ich krawędzie podłużne nie są łączone między sobą. Sprawia to, że płyty warstwowe nie mogą być uznane za usztywnienie płatwi P.

Rozpatrzono przejęcie obudowy dachu hali składającej się z wewnętrznej blachy fałdowej połączonej z płatwiami P (spełniającej zadanie usztywnienia płatwi oraz przenoszenia obciążeń od ciężaru własnego, śniegu i wiatru), paroizolacji (np. z folii PCV), termoizolacji (np. z styropianu, wełny mineralnej, natrysku pianki poliuretanowej) i izolacji przeciwwodnej (np. z papy bitumicznej, zbrojonej membrany dachowej, natryskowej izolacji wodoszczelnej). Na rys. 9 pokazano zaproponowaną obudowę dachu składającą się z blachy fałdowej (konstrukcyjnej), natrysku pianki poliuretanowej i natryskowej izolacji przeciwwodnej. Pianka poliuretanowa przylegając bezpośrednio do blachy fałdowej uszczelnia obudowę i ograniczy penetrację agresywnych mediów w obudowę dachu.



Rys. 9. Konstrukcja obudowy dachowej składająca się z blachy fałdowej i natrysków: pianki poliuretanowej oraz izolacji przeciwwodnej

6. Wnioski i uwagi końcowe

W projekcie obudowy dachu nie uwzględniono w sposób właściwy występujących w badanej hali oddziaływań technologicznych, tj. wydzielania się agresywnych korozyjnie mediów, wysokiej temperatury pod dachem hali, bardzo dużej wilgotności i braku właściwej wentylacji. Jako błędne należy też ocenić zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne obudowy dachowej tj. brak paraizolacji i brak wentylacji, występowanie mostków termicznych, przyjęcie zbyt cienkich ścianek (o grubości 0,55 mm) wewnętrznych oraz zewnętrznych blach fałdowych, a także ich niedostateczne zabezpieczenie antykorozyjne.

Blachy fałdowe klasy konstrukcyjnej I i II (gdzie uwzględnia się ich udział w ocenie wyężenia głównego ustroju nośnego lub pojedynczych prętów) są nie tylko płytą osłonową, przenoszącą obciążenia poprzeczne (m.in. od śniegu i wiatru), ale również tężnikiem tarczowo-płytowym tj. częścią składową ustroju nośnego obiektu, która zapewnia jemu niezbędną sztywność oraz stateczność. W tym też sensie (podobnie jak np. stężenia prętowe) może być ona elementem głównej konstrukcji nośnej obiektu.

Usztywniające ustrój nośny zadanie konstrukcyjne blach trapezowych nakłada obowiązek szczególnie starannego wykonawstwa ich połączeń z stęzanymi elementami. Jakość ich wykonania podlega kontroli i odbiorowi technicznemu [4] (podobnie jak np. zbrojenie w konstrukcjach żelbetowych). Ponadto w projektach takich obiektów powinny być oznaczone blachy fałdowe, które pełnią stężające zadanie konstrukcyjne. Dodatkowo w zrealizowanych dachach muszą być umieszczone tablice ostrzegawcze, informujące o zakazie ich modernizacji bez wykonania wcześniejszych sprawdzeń statyczno-wytrzymałościowych. Według [4] grubość ścianek blach fałdowych nie może być mniejsza niż 0,7 mm.

Literatura

1. Biegus A., Seidel W. Analiza stanu technicznego oraz remontu dachu i konstrukcji nośnej hali produkcyjnej ceramiki budowlanej, Firma „Wojciechowo”, Wrocław 2013.
2. Biegus A. Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1999.
3. PN-EN 1993-1-3: 2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno. PKN, Warszawa 2006.
4. PN-EN 1090-4 Execution of steel structures and aluminium structures. European Committee for Standardization, Brussels, 30.08.2013.

PRIOR-FAILURE STATE OF THE STEEL INDUSTRIAL BUILDING CAUSED BY CORROSION OF THE ROOF

Abstract: The mechanisms of corrosion damages formation in the roof covering and their effects on the resistance and durability of the steel structures of the industrial building have been presented. Corrosion destruction led only to reduction of the roof corrugated sheets, but also caused the prior-failure situations of purlins, bracings and the frame rafters. The range and ways of modernization of the roof covering has been analyzed and the conditions of continued safe use have been given.

Keywords: steel industrial building, corrugated sheet, Z cold-formed purlins, corrosion, prior-failure state.