

STAN AWARYJNY KONSTRUKCJI STALOWEJ HALI PRODUKCYJNEJ W PRZEMYSŁE MOTORYZACYJNYM

PAWEŁ BEDNAREK, *e-mail: pawel.bednarek@pwr.edu.pl*
Zakład Dynamiki Budowli, Politechnika Wrocławska

Streszczenie: Omówiono stan awaryjny konstrukcji stalowej wielkopowierzchniowej hali produkcyjnej o powierzchni około 2,5 ha znajdującej się w aktywnym ciągu technologicznym zakładu przemysłu motoryzacyjnego. Budowę przedmiotowego obiektu rozpoczęto w latach 40. XX wieku. Wielokrotne przebudowy i adaptacje pod zmieniające się uwarunkowania technologiczne oraz wieloletnie zaniedbania eksploatacyjne doprowadziły do stanu awaryjnego konstrukcji z dużym prawdopodobieństwem nagłego wystąpienia katastrofy budowlanej. Dokonano szczegółowej inwentaryzacji uszkodzeń. Zaproponowano adekwatne metody naprawy konstrukcji oraz wystosowano zalecenia odnośnie prawidłowego utrzymania obiektu.

Słowa kluczowe: budownictwo przemysłowe, konstrukcje stalowe, ustroje wielogłęziowe, imperfekcje geometryczne, stan awaryjny

1. Wprowadzenie

Zakłady produkcji przemysłowej to bardzo dynamiczne zmieniające się obiekty, które wymagają nieustannej modernizacji ze względu na ciągły proces wycofywania starych generacji produktów i wdrażania produkcji nowych elementów. Przy projektowaniu konstrukcji obiektów pełniących tę funkcję należy stosować rozwiązania, które umożliwią znaczne zwiększenie nośności ustroju w jak najprostszym sposobie oraz szeroko pojętą adaptację układu konstrukcyjnego do nowych warunków.

Szczególnie wymagającą w tym zakresie jest branża motoryzacyjna. W tej gałęzi przemysłu następuje częsta cykliczna zmiana profilu produkcji. Skutkiem tego procesu jest wysoka awaryjność obiektów budowlanych, które na skutek każdorazowej zmiany procesów produkcji wymagają głębokich modernizacji. Należy podkreślić fakt, iż branża samochodowa ma na rynku polskim coraz większe znaczenie. Z każdym rokiem w Polsce przybywa wytwórni o tym profilu produkcji.

Analizowany obiekt znajduje się w nieprzerwanej eksploatacji od prawie 80 lat. Od około 20 lat w rzeczonym budynku znajduje się wytwórnia części dla przemysłu samochodowego. W trakcie całego okresu użytkowania nastąpiło wiele awarii, które skumulowane znacznie zwiększają ryzyko wystąpienia katastrofy budowlanej.

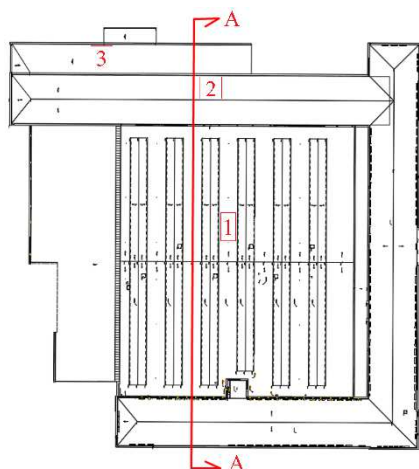
2. Opis rozwiązania konstrukcyjnego obiektu

Przedmiotową halę produkcyjną wzniesiono w latach 40. XX wieku. W obiekcie wydzielono dwa główne sektory:

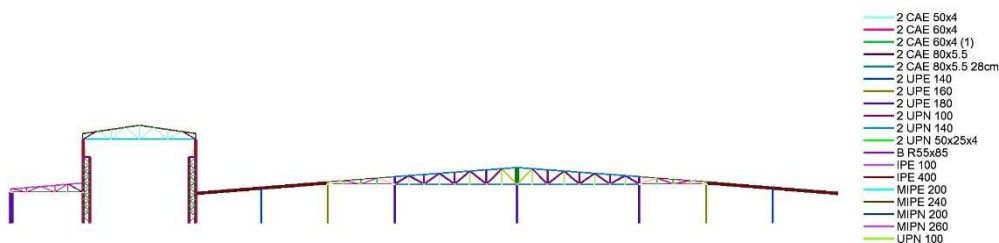
1. zaplecze administracyjno-socjalne wykonane w technologii ceglano-żelbetowej,
2. część produkcyjną wykonaną w technologii szkieletowej konstrukcji stalowej.

Część administracyjno-socjalna nie wchodzi w zakres niniejszego opracowania. Opracowanie jest skoncentrowane na analizie strefy produkcyjnej, która jest pod znacznym negatywnym oddziaływaniem prowadzonych w niej procesów technologicznych.

Układ konstrukcyjny szkieletu stalowego w części produkcyjnej jest niejednorodny. Składa się z wielonawowej części wzniesionej w pierwszym etapie realizacji (nr 1 na rys. 1) równoległe wraz z częścią ceglano-żelbetową oraz dwóch oddylatowanych części przyległych do pierwotnej bryły budynku, które powstały w kolejnych etapach realizacji inwestycji (nr 2, 3 na rys. 1), w trakcie wielokrotnych zmian funkcji obiektu. W sektorze produkcyjnym dominującym rozwiązaniem konstrukcyjnym są rzadko stosowane współcześnie słupy wielogałęziowe (osiowo i mimośrodowo ściskane) oraz wielogałęziowe dźwigary kratowe (jedno- lub wieloprzęsłowe).



Rys. 1. Rzut obiektu – przekrój przez część produkcyjną (1 – część pierwotna, 2, 3 – kolejne etapy realizacji obiektu)



Rys. 2. Schemat konstrukcyjny w przekroju poprzecznym A-A hali

3. Opis uszkodzeń głównej kratownicy nośnej

Na wstępie należy podkreślić, że obiekt zrealizowano w trakcie trwania II Wojny Światowej. Zgodnie z historycznymi zapiskami główną część prac budowlanych przeprowadzono z wykorzystaniem ludzi pracujących na przymusowych robotach w III Rzeszy. Po wykonaniu szczegółowej inwentaryzacji obiektu przystąpiono do wykonania obliczeń statycznych ustroju nośnego według aktualnie obowiązujących norm. Szczególnie problematyczne okazało się oszacowanie znacznych lokalnych obciążeń od instalacji technologicznych. Ostatecznie do analizy przyjęto wyłącznie obciążenia, których wielkość można określić deterministycznie w ujęciu obecnie obowiązujących przepisów, inwentaryzacji oraz literatury. Pomimo zaniżenia rzeczywistego poziomu obciążenia konstrukcji, ujawniono znaczne miejscowe przeciążenia konstrukcji nośnej.

Stal zastosowaną w konstrukcji zidentyfikowano poprzez pobranie próbek i badania wg [3]. Wykonano: testy wytrzymałościowe, próbę iskrową oraz określono równoważnik węgla. Badania sklasyfikowały stal jako obecnie szeroko stosowaną stal konstrukcyjną S235. Dla bezpieczeństwa przyjęto wytrzymałość obliczeniową stali $f_d = 215$ MPa.

Przekroje stalowe zastosowane w konstrukcji zweryfikowano na drodze pomiarów i porównania do wyrobów dostępnych w okresie wznoszenia obiektu [1, 2].

Należy podkreślić występowanie dodatkowego obciążenia wyjątkowego, które pojawia się okresowo na dachu na skutek przetarć kolan rur transportujących ścierniwo w instalacji piaskowania. Na drodze wizji lokalnej określono najczęstsze miejsca okresowego gromadzenia piasku kwarcowego na skutek awarii instalacji.

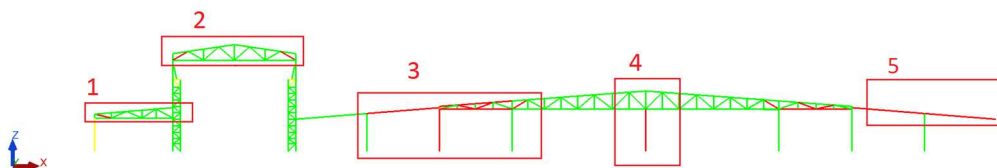
Założenia odnośnie obciążeń:

- ciężar własny konstrukcji stalowej,
- ciężar pokrycia wg [4]: płyty żużlobet. 8 cm (107 kg/m^2) + 6×papa (32 kg/m^2),
- obciążenia użytkowe dla powierzchni kategorii H zgodnie z PN-EN 1991-1-1,
- obciążenia klimatyczne zgodnie z EC 1991-1-3 oraz PN-EN 1991-1-4,
- obciążenie technologiczne hali (1) $20 \text{ kg/m}^2 = 0,2 \text{ kN/m}^2$,
- obciążenie technologiczne hali (3) $50 \text{ kg/m}^2 = 0,5 \text{ kN/m}^2$,
- obciążenie suwnicą 12,5 t oraz 25,0 t w hali(2),
- obciążenie 20 cm zaspy piasku na dachu w wybranych obszarach hali (1), ciężar piasku $1750 \text{ kg/m}^3 = 17,5 \text{ kN/m}^3$
- uwzględniono imperfekcje globalną za pomocą siły zgodnie z PN-EN 1993-1-1,
- uwzględniono imperfekcje lokalną za pomocą współczynnika wyboczeniowego zgodnie z PN-EN 1993-1-1,
- uwzględniono usunięcie suwnicy 3,5 t w strefie przebudówki po lewej stronie.

Założenia odnośnie modelu obliczeniowego:

- analiza prętowa 3D wyizolowanego układu poprzecznego,
- przyjęto do współpracy betonową część obiektu administracyjno-socjalnego,
- siły w prętach z przewiązkami zostały obliczone metodą analityczną zgodnie z PN-EN 1993-1-1,
- w modelu nie uwzględniono występowania powstałych w wyniku licznych uszkodzeń ponad-normatywnych imperfekcji słupów.

W rejonie, który zidentyfikowano jako najbardziej przeciążony z uwagi na znaczną ilość instalacji biegnących do pieca odlewniczego, stwierdzono widoczną gołym okiem globalną utratę stateczności pasa górnego z płaszczyzny głównej kratownicy nośnej. W modelu obliczeniowym zidentyfikowano odpowiadającą zaistniałej utracie stateczności ustroju skrętną formę wyboczeniową kratownicy powiązaną z wyboczeniem dolnego ściskanego pasa (nr 4 na rys. 3) występującą z mnożnikiem obciążenia krytycznego $\alpha_{cr} \cong 1,10$.



Rys. 3. Obszary niespełniające warunków stanów granicznych

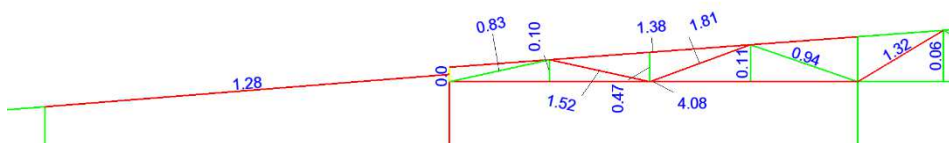
Domniemanie, autor projektu konstrukcji przedmiotowego obiektu dysponował przez lata wyłącznie uproszczonymi metodami obliczania ustrojów prętowych. Z tego powodu

prawidłowa identyfikacja wszystkich możliwych do zaistnienia mechanizmów zniszczenia głównego ustroju nośnego mogła być utrudniona.



Rys. 4. Widok znacznie przeciążonej kratownicy na skutek niezamierzonego w projekcie obciążenia podwieszonymi instalacjami technologicznymi (rejon nr 4 na rys. 3)

Główna kratownica nośna jest ustrojem kratowym o zmiennej wysokości. W rejonie o najmniejszej wysokości krzyżulce wykonstruowano pod niekorzystnymi ostrymi kątami $\alpha < 30^\circ$. Powoduje to znaczne przekroczenie wyłączenia w niektórych prętach nośnych.



Rys. 5. Przekroczenie warunków stanów granicznych wg PN-EN 1993-1-1 prętów kratownicy (obszar nr 3 na rys. 3)

Z uwagi na niewielką ilość dostępnego miejsca, możliwości technologiczne rozbudowy przekroju krzyżulców są znacznie ograniczone. Zalecanym sposobem wzmocnienia ustroju celem zapobieżenia możliwości wystąpienia awarii w przyszłości jest wykonanie tarczowych przepo. Metoda ta w połączeniu z nieznanym aktualnym stanem sił wewnętrznych w konstrukcji, nie pozwala jednak na jednoznaczne określenie nośności w sposób analityczny.

4. Opis uszkodzeń głównych słupów nośnych

W całym obiekcie mamy do czynienia z bardzo intensywnym natężeniem ruchu wózków widłowych, które gwarantują ciągłość cyklu technologicznego zakładu. Słupy hali skonstruowano jako wielogałęziowe o dużej smukłości, które z uwagi na swoją budowę są szczególnie narażone na występowanie dużych łukowych imperfekcji wykonawczych. Znaczna wrażliwość ustrojów wielogałęziowych na imperfekcje oraz notoryczne wieloletnie uderzenia

wózków widłowych spowodowały ponadnormatywną deformację niemalże wszystkich gałęzi słupów podpierających główną konstrukcję nośną dachu (rys. 6).



Rys. 6. Widok na znacznie zdeformowany słup podpierający ustrój dachowy

Można również zaobserwować pęknięcia spoin łączących przewiązki z gałęziami słupów w strefach przypodporowych (rys. 7).



Rys. 7. Nietechnologicznie wykonana przewiązka słupa z pękniętą spoiną

W trakcie przeprowadzonych pomiarów geodezyjnych imperfekcje łukowe oszacowano jako $e = \frac{1}{100} H$ w obu płaszczyznach zginania.

Założenia odnośnie obciążeń działających na słup:

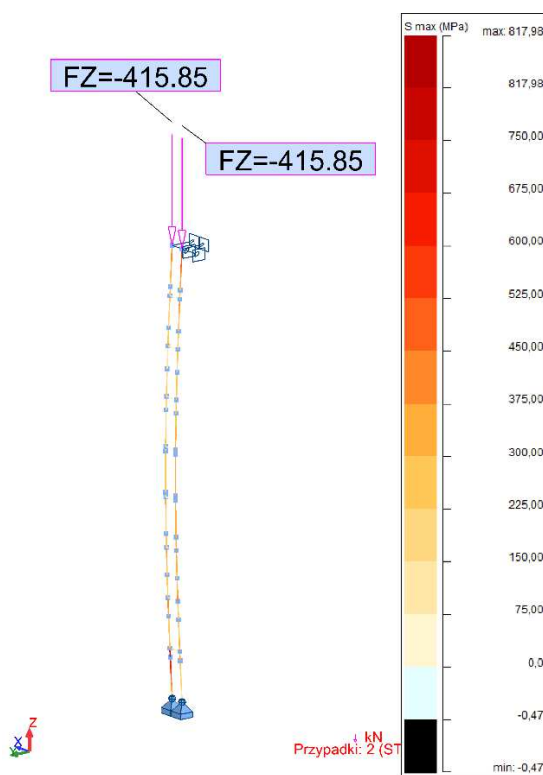
- uwzględniono imperfekcję lokalną poprzez wprowadzenie zdeformowanej geometrii modelu MES,

- współczynniki obciążeń w kombinacji obliczeniowej: stałe – 1,35; zmienne – 1,50.
- słup obciążono reakcją podporową uzyskaną w wyniku analizy globalnej układu poprzecznego.

Założenia odnośnie modelu obliczeniowego słupa:

- analizę słupa przeprowadzono zapewniając warunki brzegowe odpowiadające jego statycznej pracy w układzie konstrukcyjnym,
- słup analizowano jako wyizolowany z uwagi na konieczność dokładnego uwzględnienia imperfekcji łukowej, większej niż dopuszczalna normą PN-EN 1993-1-1 w zalecanej metodzie współczynnika χ .
- przekroje prętów przyjęto na podstawie dokumentacji inwentaryzacyjnej oraz wizji lokalnej,
- słup oparty przegubowo na fundamencie,
- model obliczeniowy zdefiniowano jako wstępnie zdeformowany pręt w obu płaszczyznach, maksymalną wstępną deformację przyjęto jako 1/100H,
- tężniki kratowe stabilizują położenie kratownicy w płaszczyźnie ustroju.

Mapa naprężeń (rys. 8) wskazuje na znaczne przeciążenie słupów wymagające natychmiastowej interwencji. Uwzględniając bardzo zły stan techniczny konstrukcji, jednym ze skutecznych sposobów naprawy jest np. obetonowanie w całości istniejących słupów. Rozwiązanie to pozwoli uodpornić konstrukcję na notoryczne uderzenia wózków widłowych. Należy mieć to na uwadze, gdyż systemy ochrony przeciw uderzeniom wózków widłowych (zarówno pasywne jak i aktywne) nie gwarantują całkowitego zabezpieczenia konstrukcji przed uszkodzeniami. Zaletą tego rozwiązania konstrukcyjnego jest również możliwość analitycznego określenia nośności projektowanego wzmocnienia.



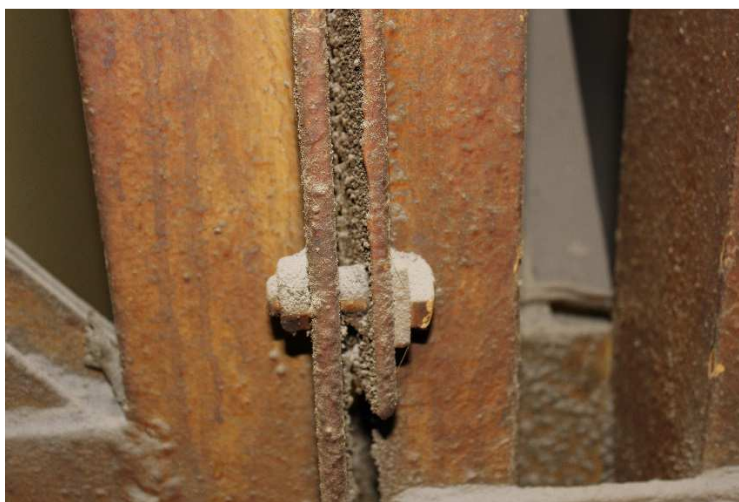
Rys. 8. Mapa naprężeń von Misesa w kombinacji oddziaływań ULS

Kolejnym uszkodzeniem występującym notorycznie na obszarze całego obiektu jest znaczne odkształcenia plastyczne śrub łączących kratownice nośne ze słupami jako konsekwencja jednostronnego rozwarcia styku ścinanego. Należy podkreślić, że poprzez przedmiotowe połączenia śrubowe przekazywane są wszystkie obciążenia z dachu na słupy. Są to zatem elementy kluczowe dla bezpieczeństwa całości konstrukcji.

Założenia odnośnie połączeń śrubowych:

- połączenie wykazuje wizualne objawy znacznego przeciążenia, występuje znaczne rozwarcie styku z jednej strony, co wyłącza połowę śrub z pracy na ścięcie (rys. 9),
- ilość czynnych śrub w połączeniu: $8 \times M20$,
- na drodze badań laboratoryjnych klasę śrub określono jako 4.6,
- nośność połączenia na ścięcie według PN-EN 1993-1-8:

$$F_{v,Rd} = 8 \cdot \frac{\pi \cdot (0,02m)^2}{4 \cdot 1,25} \cdot 400\,000\,kPa = 804\,kN \leq F_{v,Ed} = 832\,kN.$$



Rys. 9. Plastycznie ścięcie śrub w styku ścinanym

Obliczono, że nośność połączenia na ścięcie według PN-EN-1993-1-8 jest niespełniona. Wysoka niepewność oszacowania obciążeń wymusza konieczność zachowania szczególnej ostrożności. Nieprawidłowe postępowanie w trakcie naprawy połączeń może spowodować przeciążenie słupów sąsiednich.

Metoda naprawy powyższych uszkodzeń powinna obejmować w kolejności:

- podstemplowanie słupa z jak najmniejszym podniesieniem kratownicy nośnej,
- pojedynczą wymianę nieuszkodzonych śrub na łączniki o znanych parametrach,
- skasowanie rozwarcia styku podkładkami korygującymi bez usuwania starych łączników (wyfrezowane otwory umożliwiające ich ominięcie),
- wykonanie otworów pod nowe śruby.

Kolejna awaria dotyczy stężenia międzysłupowego w rejonie nr 2 na rys. 3. Uszkodzenie to powstało w trakcie II Wojny Światowej przez bombę lotniczą – niewybuch, który prawdopodobnie wpadł do wnętrza hali przez dach ostatecznie uszkadzając konstrukcję stężenia (rys. 10). Naprawę tego uszkodzenia należy przeprowadzić poprzez lokalną wymianę prętów, które uległy zniszczeniu.

Uszkodzenie to przypomina, że pomimo prowadzonej nowoczesnej produkcji przemysłowej mamy do czynienia z obiektem zabytkowym o bardzo długiej historii.



Rys. 10. Uszkodzenie konstrukcji stężenia międzysłupowego

5. Wnioski

Zakłady przemysłowe to obiekty wymagające specjalnego traktowania. Naprawa uszkodzeń w przedmiotowej hali produkcyjnej będzie długotrwałym i wieloetapowym procesem z uwagi na konieczność zapewnienia ciągłości produkcji zakładu.

Obiekty przemysłowe o tak dużych rozmiarach i wysokim stopniu narażenia na powstawanie uszkodzeń w trakcie normalnej eksploatacji powinny znajdować się pod szczególnym nadzorem budowlanym celem ciągłego monitoringu stanu technicznego konstrukcji oraz usuwania uszkodzeń na bieżąco.

Literatura

1. Bogucki W., Żybertowicz M., Tablice do projektowania konstrukcji metalowych., ARKADY Sp. z o.o., Warszawa 2007.
2. Czapliński K., Dawne wyroby ze stopów żelaza., Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne., Wrocław 2009.
3. Gosowski B., Kubica E., Badania laboratoryjne konstrukcji metalowych., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej., Wrocław 2012.
4. Meuś W., Przybylski M., Wiater W., Skórski A., Siwek W., Krakowiak S., Poradnik mistrza budownictwa wiejskiego., Wydawnictwo ARKADY, Warszawa 1967.

EMERGENCY CONDITION OF A STEEL STRUCTURE OF PRODUCTION HALL IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract: Emergency condition of a steel industrial structure is described in this paper. The floor area of the building is about 2,5 ha and it is a part of the manufacturing chain of an automotive factory. The main part of the building was erected in the 40's of the last century. Multiple modifications and adjustments made to meet different operation conditions led the structure to the critical state with a high probability of instant collapse. Detailed cataloging of the failures was performed and the adequate reparation methods were proposed.

Keywords: industrial engineering, steel structures, imperfection, failure