

Hala stalowa z suwnicami w układzie odwróconym Steel hall with overhead cranes in a reverse mode

Marcin Górecki¹, Małgorzata Snela²

^{1,2}*Katedra Konstrukcji Budowlanych,
Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
e-mail: m.gorecki@pollub.pl, m.snela@pollub.pl*

^{1,2}*Department of Building Structures
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Technological University of Lublin
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
e-mail: m.gorecki@pollub.pl, m.snela@pollub.pl*

Streszczenie

W artykule przedstawiono charakterystykę konstrukcji magazynowo-produkcyjnej dwunawowej hali stalowej. We wnętrzu hali wydzielono miejsce, w którym zaplanowano obsługę transportową z wykorzystaniem suwnic natorowych. Transport ten odbywa się w poprzek hali. Dodatkowo na jednym torze jezdny przewidziano pracę trzech suwnic. Przybliżono zalecenia konstrukcyjne znajdujące się w normie i sposoby przyjmowania obciążeń. Zaprezentowano metodę doboru jednoprzęsłowych belek podsuwnicowych i zalety stosowania tężników hamowniczych.

Abstract

This article presents a specification of a warehouse and production structure of a two-bay steel hall. Inside the hall, a separate space has been designed for transport purposes, making use of top running overhead cranes. The transport runs across the hall. Additionally, one of the crane runways is meant to accommodate three overhead cranes. The construction recommendations included in the applicable standard, and the methods of accommodating the loads required have been described in detail. The method of selecting single-span crane beams has been presented, along with the benefits of using brake bracings.

Słowa kluczowe: hala stalowa, konstrukcje stalowe, analiza statyczna, belka podsuwnicowa
Keywords: steel hall, steel structures, static analysis, crane beam

1. Wstęp

Prezentowana hala produkcyjna wraz z sąsiadującą halą magazynową i budynkiem biurowo-socjalny, położone są na działce zlokalizowanej w północno-wschodniej części Lublina. Znajdują się tam przemysłowe obszary obecnie przekształcone na tereny aktywności gospodarczej, usługi komercyjne, hale magazynowe z zapleczem biurowym itp. Na etapie koncepcji inwestor przedstawił swoje oczekiwania, według których przyszła zabudowa swoim charakterem wyraźnie musiała podnosić status miejsca. Jednocześnie z racji funkcji, obiekt należało kształtować według czysto funkcjonalnych założeń, nadając przy tym nowoczesnego, postindustrialnego wyrazu.

Ostatecznie, w celu spełnienia powyższych wymagań, podjęto decyzję o zastosowaniu stali jako materiału konstrukcyjnego hali w części głównej całego kompleksu. Halę zaprojektowano w układzie dwunawowym z trzema suwnicami poruszającymi się w kierunku poprzecznym hali.

2. Charakterystyka głównej konstrukcji nośnej

Kompleks budynków składa się z trzech części: hali głównej o powierzchni zabudowy ok. 3000 m² oraz dwóch przylegających budynków. Budynki przylegające znajdują się odpowiednio w narożu północno-zachodnim o powierzchni zabudowy 54,80 m² i południowo-wschodnim obiektu o powierzchni zabudowy 462,52 m². Z uwagi na wymiary 60 x 48 m w rzucie i wymagania eksploatacyjne, hala główna

1. Introduction

The production hall described, along with the adjacent warehouse and the office and social building, are situated on a plot located in the north-east of Lublin. The industrial land located there has been recently converted into an area housing economic activity, commercial services, warehouses with office facilities, and the like. At the conceptual stage, the investor presented his expectations, based on which the future facility was supposed to clearly enhance the status of the entire area. At the same time, given its underlying function, the facility had to be developed according to purely functional assumptions, as well as in line with modern, post-industrial trends.

Eventually, in order to satisfy the above requirements, it was decided that steel would be used as the building material for the main part of the entire complex. The hall was designed as a two-aisle structure, with three overhead cranes moving crosswise.

2. Specification of the principal load bearing structure

The buildings complex consists of three parts, i.e. the main hall with the gross covered area of around 3000 m², and two adjacent buildings. One of the adjacent buildings is situated in the north-western corner with the gross covered area of 54.80 m², and the other in the south-eastern corner of the plot, with the gross covered area of 462.52 m². Considering both the dimensions of 60 x 48 m in the plan view and the utility

została podzielona na trzy części: dwie nawy główne oraz nawę poprzeczną (rys. 1). Wymagany proces technologiczny wymusił konieczność podzielenia hali na dwie nawy o szerokości 24,0 m każda. Dzięki takiemu układowi uzyskano dwa rzędy słupów skrajnych i jeden rząd słupów środkowych wzdłuż hali głównej w rozstawie 6,0 m. Słupy wykonano z szerokostopowych dwuteowników walcowanych typu HEA sztywno zamocowanych w fundamentach. Na słupach stalowych, poprzez sztywne węzły, oparto konstrukcję dachu w formie stalowych dźwigarów kratownicowych. Pasy dźwigarów wykonano z dwuteowników typu HEA, natomiast słupki i krzyżulce stanowiły profile zamknięte o przekroju kwadratowym. Dźwigary kratowe wykonano w odcinkach o długości 8,86 i 14,86 m, łączone na budowie doczołowo na śruby o wysokiej wytrzymałości. Pokrycie dachu zaprojektowano z płyt warstwowych z rdzeniem z wełny mineralnej. Dostęp światła dziennego do wnętrza hali zapewniono poprzez okna znajdujące się w ścianach zewnętrznych, ale doświetlenie hali stanowią również poliwęglanowe płyty, wykonane w technologii wyciskania arkusza na wiele komór [1]. Układ naświetli dachowych i brak dostatecznej nośności płyt warstwowych wymusił oparcie pokrycia dachowego na płatwiach stalowych przymocowanych do pasów górnych dźwigarów kratowych.

W celu zapewnienia stateczności układu konstrukcyjnego zaprojektowano stężenia dachowe oraz ścienne. Sztywne stężenia ścienne i dachowe wykonano z kształtowników zamkniętych. W połąci dachu wykonano również stężenia wiotkie z prętów gładkich o średnicy 16 mm. Usztywnienie ścian wymagało zastosowania stężeń wiotkich z prętów o większej średnicy.

3. Charakterystyka części hali z torem jezdnym suwnic

We wschodniej części hali wydzielono powierzchnię o wymiarach 18,0 x 48,0 m, w obrębie której przewidziano zastosowanie transportu podpartego. Klasycznie tor jezdny suwnic projektuje się w postaci belek podsuwnicowych, które z kolei spoczywają na słupach. Z reguły są to słupy głównych układów nośnych lub niezależnych słupach tworzących niejako wewnętrzne estakady podsuwnicowe.

W przypadku omawianego obiektu, transport z wykorzystaniem suwnic odbywa się w poprzek hali. Projekt technologiczny przewidywał prace trzech suwnic: dwie jednodźwigarowe suwnice natorowe o udźwigu 5 ton każda i jedna suwnica z dwoma wózkami o udźwigu po 5 ton każdy. Rozpiętość dźwigara suwnicy to 18,0 m.

Założenia projektowe uwzględniały również możliwość pracy wszystkich trzech suwnic jako sprzęgniętych, czyli takich które mogą być eksploatowane przy wspólnym transporcie ciężaru. Zastosowany dwunawowy układ hali uniemożliwiał swobodną pracę trzech suwnic w poprzek hali. W celu uzyskania wolnej przestrzeni, na odcinku 18,0 m wzdłuż osi słupów międzynawowych, w końcowym odcinku obu naw hali, zaprojektowano stalowy dźwigar kratownicowy. Pozwoliło to na wyeliminowanie dwóch słupów wewnętrznych utrudniających pracę suwnic. Na dźwigarze tym oparto kratownice będące kontynuacją modularnego rozstawu kratownic dachowych. Pasy i krzyżulce głównego dźwigara kratownicowego nad suwnicami, wykonano z dwuteowników szerokostopowych.

Biorąc pod uwagę powyższe, należało zastosować nietypowe rozwiązanie, w którym poszczególne słupy podpierające belki podsuwnicowe przenoszą różne obciążenia.

requirements, the main hall was divided into three sections, i.e. two major aisles and a transept (Fig. 1). The technological process triggered the necessity to divide the hall into two 24.0-metre-wide aisles. Such a design resulted in the establishing of two rows of extreme columns and one row of latching pillars along the main hall, with the spacing of 6.0 m. The columns were made of hot-rolled steel H section beams of the HEA type, fixed in the foundations. The roof structure made of steel truss girders was supported on steel columns using rigid nodes. Girder fixings were made of HEA-type H sections while the columns and cross bracings formed closed square-section profiles. The truss girders were fixed along 8.86- and 14.86-metre-long sections, and connected through head connections, using high strength screws. The roof covering was designed using mineral wool composite panels. The sunlight enters the hall through the windows assembled in external walls, and an additional hall lighting was achieved using polycarbonate sheets made in the multi-chamber sheet pressing technology [1]. The system of transom windows, together with an insufficient load capacity of the composite panels, made it necessary to support the roof covering on steel purlins supported on the upper truss girders.

Roof and wall bracings were designed with a view to ensuring the stability of the entire construction system. Wall and roof bracings were made of hollow structural sections. Additionally, flexible bracings, made of smooth bars with the diameter of 16 mm, were placed on the roof sloping. Wall hardening required the use of flexible bracings made of bars with a larger diameter..

3. Specification of the hall section housing the crane runway

A separate area sized 18.0 x 48.0 m was designed in the eastern part of the hall, with a view to accommodating a supported transport system. A classic crane runway is designed using crane beams which rest on a number of columns. In principle, these form part of the main bearing systems, or act as a kind of internal crane overpasses.

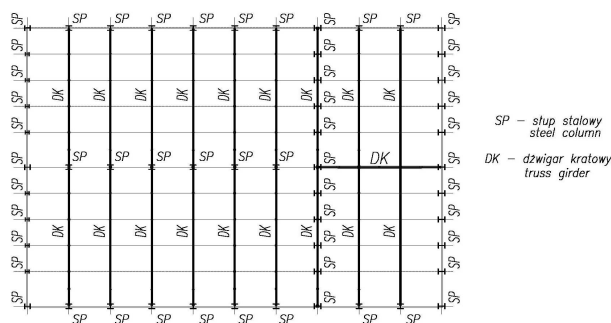
In the case described, the overhead crane transport runs across the hall. The technological design provides for the use of three cranes, i.e. two single-girder overhead travelling cranes with the load capacity of 5 tonnes each, and one double-girder crane with the load capacity of 5 tonnes on each girder. The girder span was set at 18.0 m.

The design also provides for the possibility of all three overhead cranes operating in a joint mode, i.e. in a joint load transport. The two-aisle hall structure would not allow for a free movement of three cranes across the hall. In order to obtain free space in the 18.0-metre-long section along the latching columns, a steel truss girder was designed in the final sections of both aisle. This allowed eliminating two internal poles that would inhibit crane movement. The crossbars forming the continuation of the modular roof truss system were supported on the constructed girder. The vertical members and cross bracings of the main truss girder above the cranes were all made of H sections.

Given the above assumptions, a customised solution had to be applied, in which individual columns supporting the crane beams could transport various loads. Some of them cooperate with the entire hall structure whereas others merely support the

Część z nich współpracuje z całą konstrukcją hali, inne natomiast stanowią jedynie podparcie dla suwnic. Najbardziej wyjątkowy słup, znajdujący się wewnątrz hali, przejmuje siły wewnętrzne generowane pracą suwnic, znaczne obciążenia pochodzące od konstrukcji dachu i obciążenia wywołane parciem i ssaniem wiatru na ściany zewnętrzne. Kumulacja tak dużej grupy obciążeń wywołana jest występowaniem znacznej liczby sztywnych węzłów. Słupy znajdujące się w płaszczyźnie ściany szczytowej oprócz obciążenia pochodzącego od pracy suwnic przenoszą również obciążenia dodatkowe, jakim jest obciążenie wiatrem.

Wytyczne zawarte w normie [2] wskazują, że w przypadku pionowych oddziaływań na belki podsuwnicowe, najniekorzystniejsze ustawienie suwnic występuje dla trzech suwnic poruszających się po jednym torze. Rozpatrując najniekorzystniejsze poziome oddziaływanie suwnic na belkę podsuwnicową, obciążenie generowane jest dla dwóch suwnic poruszających się po jednym torze. Według dostępnych źródeł [3], jeżeli suwnice mają pracować jako sprzęgnięte, siły wewnętrzne należy obliczać od oddziaływań pojedynczej suwnicy. W innym przypadku kiedy na torze pracuje kilka suwnic niezależnie, oddziaływanie pionowe i poziome należy uwzględniać od dwu suwnic pracujących obok siebie, wywołujących największe siły wewnętrzne [3].



Rys. 1. Rzut hali
Fig. 1. Hall plan

W omawianej hali dla torów jezdnych suwnic zastosowano schemat statyczny belki jednoprzęsłowej dla torów jezdnych suwnic. Słupy występujące w ścianie szczytowej, będące jednocześnie podporami dla belek podsuwnicowych rozmieszczone zostały w różnych odległościach - 6,0 i 4,5 m. Rozwiązanie to zostało podyktowane rozmieszczeniem otworów w ścianie szczytowej. Analiza rozmieszczenia kół suwnic wykazała, że najbardziej niekorzystna sytuacja występuje, gdy na jednej belce znajdują się dwie suwnice.

Wykorzystując metodę Culmana (rys. 2), wyznaczono położenie wypadkowej x oddziaływań pionowych kół suwnicy od środka długości przęsła belki dla suwnic o różnych udźwigach V_i i różnych rozstawach kół a_i :

$$x = [V_2(2c + a_2) - V_1 a_1] / 4(V_1 + V_2) \tag{1}$$

Takie ustawienie generuje momenty zginające i oddziaływanie podpór o wartościach:

$$M_y = [(V_1 + V_2) \cdot (l - 2x)^2] / 2l - V_1 a \tag{2}$$

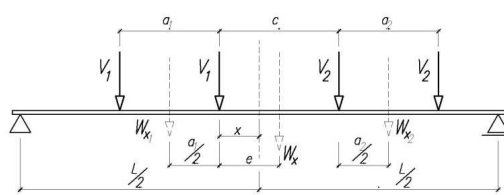
$$V_{A/B} = [(V_1 + V_2) \cdot (l \pm 2x)] / l \tag{3}$$

Dla odpowiadającego rozmieszczenia kół suwnicy w płaszczyźnie poziomej wyznaczono wartości momentów zginających M_z i sił ścinających $H_{A/B}$ powstających od ukosowania się suwnicy:

$$M_z = (W_z / 4) \cdot [l - 2e_z + (4x / l)] \cdot (e_z - x) \tag{4}$$

overhead cranes. The hardest pole, located inside the hall, takes up the internal forces generated by the cranes, along with the heavy loads coming from the roof structure and the loads resulting from the pressure and wind suction on the external walls. Such a load accumulation results from the use of numerous rigid nodes. The columns located along the end wall, apart from the crane operation loads, also transport additional loads, such as the wind load.

The provisions of the applicable standard [2] indicate that the most unfavourable crane position, as regards vertical impacts on crane beams, occurs for three cranes moving along the same runway. As regards the horizontal crane impacts on the crane beam, the most unfavourable load is generated for two cranes moving along the same runway. According to the available sources [3], if the cranes are supposed to work jointly, the internal forces should be calculated in relation to the impacts exerted by one crane. Alternatively, if several cranes operate along the same runway in an independent manner, the vertical and horizontal impact should be considered in relation to two cranes working side by side, and involving the largest internal forces [3].



Rys. 2. Rozmieszczenie kół dwóch suwnic wywołujących najniekorzystniejsze wartości momentów zginających [4]
Fig. 2. The layout of wheels for the two cranes causing the most disadvantageous bending moments [4]

A static scheme of a single-span crane beam along the crane runways was applied in the hall. The columns in the end wall, which also support the crane beams, were placed at various distances, i.e. 6.0 and 4.5 m. This solution was dictated by the openings location in the end wall. The analysis of the crane wheels position revealed that the most unfavourable situation would occur if two cranes were placed on one beam.

Making use of the Culman's method (Fig. 2), the position of the resultant x of the vertical impacts of the crane wheels from the centre of the beam span length was determined for the cranes showing various load capacities V_i and different axle tracks a_i :

Such a position leads to the following bending moments and bearing impacts:

For the corresponding horizontal location of crane wheels, the values of bending moments M_z and shearing forces $H_{A/B}$, caused by the crane chamfering, were determined as follows:

$$H_{AB} = (W_z / l) \cdot (l / 2 \pm x - e_z) \tag{5}$$

gdzie:

where:

$$e_z = (H_z \cdot x) / (H_1 + H_2) \tag{6}$$

H₁ – siła wywołująca ukosowanie o większej wartości

H₂ – siła wywołująca ukosowanie o mniejszej wartości

Uwzględniając niezbędną nośność na zmęczenie i wymagany moment bezwładności przekroju poprzecznego w płaszczyźnie pionowej z warunku ugięcia, przekrój belki podsuwnicowej zaprojektowano z kształtownika szerokostopowego HEB 340. Niestety dla belki o tak dobranym przekroju, ugięcia w płaszczyźnie poziomej przekraczały wartości dopuszczalne.

Ostatecznie podjęto decyzję o zastosowaniu tężnika hamownego pełnościennego wykonanego przez połączenie pasa górnego belki podsuwnicowej z pasem zewnętrznym będącym jednocześnie rygłem ściany zewnętrznej i rygłem łączącym słupy znajdujące się wewnątrz hali. Zasadniczą zaletą zastosowania tężnika hamownego jest ograniczenie klinowania się kół suwnic i zużywania się szyn. Wprowadzenie stężenia pełnościennego umożliwia pominięcie wpływu skręcania belki na jej nośność. Przy takim rozwiązaniu dopuszczalne jest także pominięcie w obliczeniach wpływu siły podłużnej wywołanej przyspieszeniem lub opóźnieniem jazdy suwnicy.

4. Podsumowanie

W chwili obecnej hala znajduje się w końcowej fazie realizacji (rys. 3). Dzięki zastosowanym rozwiązaniom konstrukcyjnym spełnione zostały cele postawione na etapie koncepcji obiektu.



Rys. 3. Hala w końcowym etapie budowy

Fig. 3. The final stage of the hall construction

Współcześnie projektowane hale produkcyjne czy magazynowe, poza ukontentowaniem wymagań technologicznych muszą spełniać wysoki poziom estetyczny. Konstruktorzy przy współpracy z architektami starają się spełniać oczekiwania inwestorów w zakresie ekonomii. Podczas projektowania nawet niestandardowych rozwiązań konstrukcyjnych, ważna jest delikatność konstrukcji, którą można zaprezentować przy zastosowaniu stali jako głównego materiału konstrukcyjnego.

H₁ – the force which causes chamfering of a higher value

H₂ – the force which causes chamfering of a lower value

Considering the necessary capacity in relation to fatigue, and the required moment of inertia of the vertical section in the bending condition, the crane beam intersection was designed using the HEB 340 bar. Unfortunately, the horizontal bends for the beam with such an intersection exceeded the admissible values.

It was eventually decided that a solid-web brake bracing would be used by connecting the upper crane beam fixing to the external flange which also acts as the external wall bracing and the spandrel beam joining the columns located inside the hall. The major benefits flowing from the brake bracing applied include limited chocking of the crane wheels and reduced tracks wear. The use of the solid-web bracing allows disregarding the impact of the beam veering on its load capacity. Such a solution also makes it possible to exclude the impact of the longitudinal force, caused by the acceleration or set-back in the overhead crane movement, from the calculations performed.

4. Summary

The hall has currently reached the final stage of construction (Fig. 3). Owing to the construction solutions applied, the objectives set at the conceptual stage have been accomplished

The contemporarily designed storage or production halls, apart from complying with technological requirements, must satisfy high aesthetic standards. Constructors, cooperating with architects, seek to meet the investors' expectations regarding building economy. Even when designing non-standard construction solutions, the structural delicacy is of great essence, and can be achieved by using steel as the major construction material.

Literatura • References

- [1] Balex Metal, (2011), *Balextherm MW-W-ST, MW-W-PLUS, MW-R. Płyty warstwowe z rdzeniem z wełny mineralnej. Katalog techniczny.*
- [2] PN-EN 1993-6:2009 *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 6: Konstrukcje wsporcze dźwignic.*
- [3] Żmuda J., (2013), *Konstrukcje wsporcze dźwignic*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [4] Żmuda J., (1997), *Projektowanie torów jezdnych suwnic i elektrowciągów*, Wydawnictwo TiT, Opole.