

dr hab. inż. Witold Basiński^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-9306-4569
 mgr inż. Jakub Orzeł²⁾

Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych hali magazynowej na zużycie stali

The impact of design solutions on the steel consumption in storage hall

DOI: 10.15199/33.2022.02.01

Streszczenie. W artykule zaprezentowano analizę zużycia stali na konstrukcję typowej hali magazynowej o wymiarach 48 x 40 m. Przeanalizowano 13 różnych układów konstrukcyjnych, w których różnicowano schemat statyczny konstrukcji, stosując płatwie kratowe i gorącocalcowane uciągłone oraz dźwigary kratowe, pełnościennie i dźwigary o falistym środkniku. Wykazano różnice w całkowitym zużyciu stali, wskazano optymalne rozwiązanie oraz elementy konstrukcyjne mające największy wpływ na całkowitą masę konstrukcji.

Słowa kluczowe: układ konstrukcyjny; wiązary kratowe; blachownicice; dźwigary o falistym środkniku; profile zimmogięte.

Abstract. The article presents an analysis of steel consumption for the structure of a typical storage hall with dimensions of 48 x 40 m. Thirteen different structural systems were analyzed, in which the static scheme of the structure was differentiated, using lattice and hot-rolled continuous purlins as well as lattice girders, plate girders and girders with a corrugated web. Differences have been shown in the total consumption of steel, the optimal solution and structural elements having the greatest impact on the total weight of the structure were indicated.

Keywords: structural system; steel trusses; plate girders; girders with a corrugated web; cold-formed profiles.

Hale magazynowe stanowią przeważnie część kompleksu biurowo-magazynowego wraz z budynkami biurowymi dobudowywanymi bezpośrednio do nich lub w ich sąsiedztwie (fotografia). Projektuje się je pod kątem spełnienia wymagań dotyczących wielkości składowanego materiału. Istotnym elementem z punktu widzenia inwestora jest również koszt ich wykonania oraz eksploatacji.

Na zużycie stali jako głównego materiału konstrukcyjnego wpływa wiele czynników począwszy od lokalizacji obiektu w określonej strefie klimatycznej [12, 13], przez dobór właściwego schematu statycznego [4], zastosowanie odpowiednich materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych na elementy nośne (pokrycie, płatwie, dźwigary, słupy) [5], aż po właściwe wykorzystanie norm przedmiotowych do projektowania [3, 6, 8, 9, 10, 11]. Od wyboru rozwiązania zależy masa całkowita konstrukcji. Jako funkcję celu, czyli kryterium oceny konstrukcji, przyjęto zatem masę konstrukcji [2].



Widok analizowanej hali magazynowej z zapleczem biurowym
 Źródło: <http://spart.pl/2020-pluslogistics-radzionkow/>
 View of the analyzed storage hall with office facilities

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

²⁾ Absolwent Politechniki Śląskiej

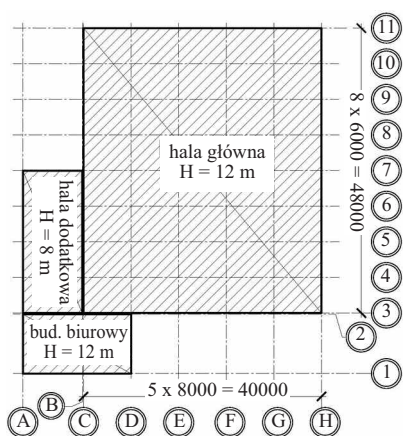
^{*} Adres do korespondencji: witold.basinski@polsl.pl

W artykule przedstawiono analizę zużycia stali na konstrukcję hali magazynowej o wymiarach 48 x 40 m [7]. Uwzględniono elementy, na które bezpośrednio wpływa się podczas projektowania, czyli dobór schematu statycznego oraz rozwiązania konstrukcyjne. Przeanalizowano 13 różnych wariantów, na podstawie których wykazano różnice w zużyciu stali na konstrukcję oraz elementy konstrukcyjne mające największy wpływ na całkowitą masę konstrukcji.

Analiza zużycia stali

Optymalizacja przestrzeni magazynowej często wymaga stosowania elementów konstrukcyjnych przekryć o dużej rozpiętości nawet do kilkudziesięciu metrów. Wiąże się to również z redukcją liczby słupów. Takie rozwiązania wpływają na wybór schematu statycznego konstrukcji oraz warunkują dobór elementów konstrukcyjnych połączeń dachowej. Najkorzystniejszy rozkład momentów uzyskuje się w przypadku ramy z węzłami sztywnymi, ale ze względu na częste stosowanie wiązarów kratowych, stosuje się ramy z ryglem opartym przegubowo na słupach. W przypadku wpływu eksploatacji górniczej wykonuje się schemat ramy trójprzegubowej, najmniej jednak korzystny ze względu na wartość momentów zginających. Wybór schematu statycznego należy uzupełnić o dobór rozstawu słupów głównych, płatwi oraz elementy stateczności konstrukcji.

Na zużycie stali wpływa dobór poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Na płatwie najczęściej stosowane są profile zimmogięte, gorącocalcowane lub rzadziej kratownicice, które można uzupełnić przez współpracę z blachą fałdową pokrycia. Dźwigary są wykonywane zazwyczaj jako kratowe lub pełnościennie. Ciekawą alternatywę stanowią profile o falistym środkniku [1, 6], które mogą być z powodzeniem stosowane na płatwie wysokie (od 333 mm), dźwigary oraz słupy, które przeważnie wykonuje się z profili gorącocalcowanych. Analizę zużycia stali na halę magazynową (rysunek 1) przeprowadzono w zależności od układu konstrukcyjnego. Analizowano sche-



Rys. 1. Schematyczny rzut analizowanej hali [5]
 Fig. 1. Schematic view of the analyzed hall [5]

mat statyczny konstrukcji w postaci ramy z rygłem opartym przegubowo na słupach oraz ramy z ryglami połączonymi sztywno ze słupami, wariantowanie stosowania płatwi kratowych i uciślonych gorącowańczonych oraz dźwigarów kratowych i pełnościennych. Stateczność konstrukcji zapewniono, stosując stężenia prętowe. Nie uwzględniono zużycia stali na budynki dodatkowe.

Przyjęto układ z płatwiami kratowymi opartymi przegubowo co 6 m na wiązarach dachowych, posadowionych przegubowo na słupach w rozstawie 8 m, które utwierdzono w fundamencie. W osiach 3 i 11 zastosowano słupy pośrednie w rozstawie 4 m, a w osiach skrajnych zamodelowano belki w celu zmniejszenia długości wybozeniowej słupów z płaszczyzny. W modelu uwzględniono ścianę w osi 7, pełniącą funkcję oddzielenia pożarowego dwóch części hali. Zamodelowano ją w postaci stężeń ściennych typu X. Przekrycie dachu wykonano z blachy fałdowej, a ścian z płyt warstwowych. Założono obciążenie ciężarem własnym, obciążenie stałe elementów pokrycia, obciążenie zastępcze od instalacji 0,5 kN/m² oraz użytkowe 0,4 kN/m². Hałę zlokalizowano w I strefie obciążenia wiatrem oraz II strefie obciążenia śniegiem. Jako obciążenie temperaturą przyjęto obciążenie wynikające z różnicy pomiędzy temperaturą w trakcie montażu konstrukcji ($T_1 = 8^\circ\text{C}$) oraz temperaturą panującą wewnątrz hali w okresie grzewczym ($T_2 = 23^\circ\text{C}$).

Do analizy przyjęto 13 różnych schematów konstrukcyjnych (tabela 1). Pierwszy schemat stanowił model podstawowy. W przypadku każdego układu wykonano obliczenia statyczne oraz wyznaczono siły wewnętrzne i na ich podstawie dobrano przekroje profili. Na rysunku 2 pokazano schemat konstrukcyjny nr 12 z dobranymi profilami elementów nośnych.

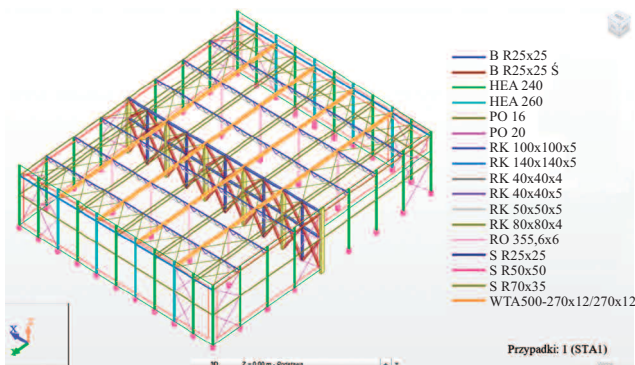
Analiza wyników

Zużycie stali na elementy główne zestawiono w tabeli 2. Największą masę konstrukcji uzyskano w przypadku schematu 3 – 69658 kg, a najmniejszą w układzie 10 – 56910 kg (średnia 62376 kg) przy wyteżeniu elementów na poziomie 80 – 90%. Zużycie stali w przeliczeniu na m² powierzchni hali wyniosło 30 – 36 kg, co jest ekonomicznie uzasadnione. Na rysunku 3 przedstawiono masę konstrukcji stalowej w poszczególnych układach konstrukcyjnych. **Najbardziej korzystny pod względem zużycia stali jest schemat 10.** Warto jednak nadmienić, że masa konstrukcji stalowej nie jest jedynym kryterium wyboru układu konstrukcyjnego. Ze względu na gabaryty fundamentów związane z utwierdzeniem słupów, nawet w kontekście pewnych oszczędności na sa-

Tabela 1. Cechy główne analizowanych układów konstrukcyjnych hali magazynowej

Table 1. Main features of the analyzed structural systems of the industrial hall

Nr schematu	Charakterystyka poszczególnych układów konstrukcyjnych
1	płatwie kratowe oparte przegubowo w rozstawie 6 m; wiązary kratowe oparte przegubowo w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
2	płatwie gorącowałcowane uciślone oparte przegubowo w rozstawie 6 m; wiązary kratowe oparte przegubowo w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
3	płatwie gorącowałcowane uciślone oparte przegubowo w rozstawie 4 m; wiązary kratowe oparte przegubowo w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
4	płatwie kratowe oparte przegubowo w rozstawie 6 m; blachownice oparte przegubowo w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
5	płatwie kratowe oparte przegubowo w rozstawie 6 m; blachownice połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
6	płatwie gorącowałcowane uciślone oparte przegubowo w rozstawie 6 m; blachownice połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
7	płatwie gorącowałcowane uciślone oparte przegubowo w rozstawie 4 m; blachownice połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
8	płatwie kratowe oparte przegubowo w rozstawie 6 m; blachownice połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne i pośrednie połączone przegubowo z fundamentem
9	płatwie gorącowałcowane uciślone oparte przegubowo w rozstawie 6 m; blachownice połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne i pośrednie połączone przegubowo z fundamentem
10	płatwie kratowe oparte przegubowo w rozstawie 6 m; dźwigary ze środkiem falistym połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
11	płatwie gorącowałcowane uciślone oparte przegubowo w rozstawie 6 m; dźwigary ze środkiem falistym połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne utwierdzone w fundamencie, pośrednie połączone przegubowo
12	płatwie kratowe oparte przegubowo w rozstawie 6 m; dźwigary ze środkiem falistym połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne i pośrednie połączone przegubowo z fundamentem
13	płatwie gorącowałcowane uciślone oparte przegubowo w rozstawie 6 m; dźwigary ze środkiem falistym połączone sztywno ze słupem w rozstawie 8 m; słupy główne i pośrednie połączone przegubowo z fundamentem



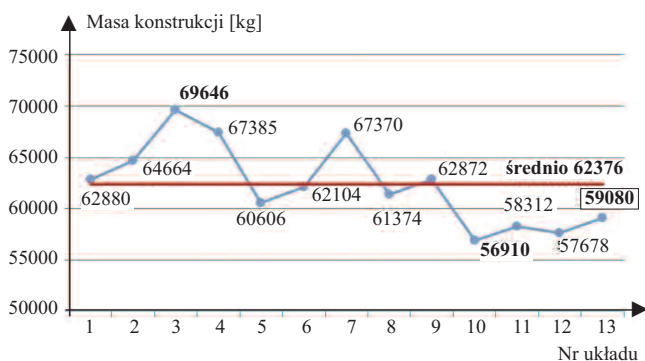
Rys. 2. Układ konstrukcyjny nr 10 analizowanej hali z dobranymi przekrojami prętów [7]

Fig. 2. Structural system no 10 of the analyzed hall with selected cross-sections of bars [7]

Tabela 2. Procentowe zestawienie zużycia stali na poszczególne elementy układów konstrukcyjnych hali

Table 2. Percentage statement of steel consumption for individual elements of the hall's structural systems

Nr układu	Płatwie	Dźwigary	Słupy główne	Belki skrajne	Słupy pośrednie	Tężniki	Masa [m ²]
1	0,10	0,27	0,18	0,03	0,29	0,14	33
2	0,16	0,26	0,17	0,03	0,29	0,10	34
3	0,18	0,23	0,16	0,02	0,34	0,07	36
4	0,10	0,31	0,16	0,02	0,28	0,13	35
5	0,11	0,25	0,17	0,03	0,30	0,14	32
6	0,16	0,25	0,16	0,03	0,29	0,10	32
7	0,18	0,21	0,15	0,02	0,35	0,07	35
8	0,11	0,25	0,18	0,03	0,30	0,14	32
9	0,16	0,24	0,18	0,03	0,29	0,10	33
10	0,11	0,20	0,18	0,03	0,32	0,15	30
11	0,17	0,20	0,18	0,03	0,31	0,11	30
12	0,11	0,20	0,19	0,03	0,32	0,15	30
13	0,17	0,19	0,19	0,03	0,31	0,11	31
Średnio	0,14	0,24	0,17	0,03	0,31	0,12	32



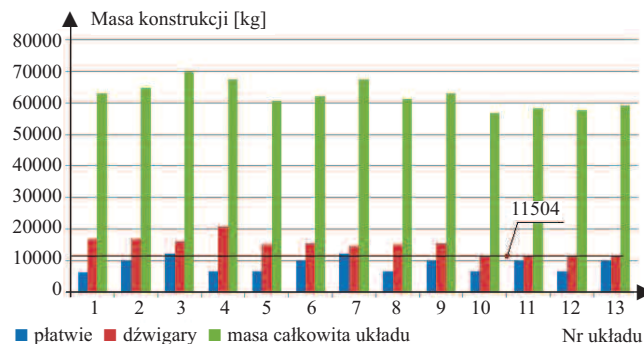
Rys. 3. Zużycie stali w poszczególnych układach konstrukcyjnych
Fig. 3. Steel consumption in individual structural systems

mych słupach, oraz optymalizację wykonawstwa przy produkcji płatwi, optymalnym wariantem jest układ konstrukcyjny nr 13 z gorącowalcowanymi płatwiami uciętymi i dźwigarami z falistym średnikiem połączonymi sztywno ze słupami, przy jednoczesnym przegubowym połączeniu słupów z fundamentem.

Znaczny wpływ na masę konstrukcji ma rodzaj dźwigarów, sposób ich zamocowania oraz płatwie. Udział pozostałych elementów konstrukcyjnych jest w zasadzie stały. Zamiana dźwigarów na profile ze średnikiem falistym spowodowała więc redukcję ich masy o 28% w porównaniu z wiązarami kratowymi. Udział dźwigarów i płatwi w całkowitej masie układu konstrukcyjnego pokazano na rysunku 4. Zaobserwowano wyraźny spadek masy dźwigarów po zastosowaniu profilu ze średnikiem falistym.

Wnioski

Zaprojektowanie konstrukcji wymaga sprawdzenia wielu kombinacji rozwiązań. Złożona weryfikacja wydłuża wprawdzie proces projektowania, ale zmniejszenie kosztu konstrukcji stalowej przynosi znaczne oszczędności dla inwestora. Dzięki włączeniu do analizy profili ze średnikiem falistym



Rys. 4. Udział dźwigarów i płatwi w masie poszczególnych układów konstrukcyjnych

Fig. 4. Share of girders and purlins in the mass of individual structural systems

wykazano, że są one znakomitą alternatywą dla powszechnie stosowanych blachownic oraz wiązarów kratowych. Analizowane układy konstrukcyjne z dźwigarami ze średnikiem falistym (układy 10 ÷ 13) okazały się optymalne pod względem zużycia materiału i proste w wykonaniu.

Mniejsze zużycie stali w procesie prefabrykacji konstrukcji stalowych w przypadku dźwigarów ze średnikiem falistym wynika z większych naprężeń krytycznych średnika falistego w stosunku do płaskiego o takich samych parametrach [1, 6]. Niewielka popularność profili ze średnikiem falistym jest spowodowana prawdopodobnie brakiem możliwości ich wymiarowania w powszechnie dostępnym oprogramowaniu oraz niewielkim doświadczeniem w projektowaniu.

Literatura

[1] Basiński W. 2018. „Shear buckling of plate girders with corrugated web restrained by end stiffeners”. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. Vol 62, No. 3: 757-771. <https://doi.org/10.3311/PPci.11554>.

[2] Kondracki S., T. Smolnicki. 2010. „Nowoczesne metody optymalizacji konstrukcji prętowych”. *Górnictwo Odkrywkowe*, R51 (4): 128 – 133.

[3] Kozłowski A. 2009. *Konstrukcje Stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.

[4] Lubiński M., A. Filipowicz, W. Żółtowski. 1986. *Konstrukcje Metalowe*. Warszawa. Arkady.

[5] Major M., P. Adamski. 2011. „Analiza porównawcza ekonomiczności wykonania przekryć stalowych hangarów lotniczych na przykładzie ramy kratownicowej i kratownicy łukowej”. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym* (8): 171 – 178.

[6] Mendera Z., K. Kuchta. 2002. *Profile z falistym średnikiem SIN. Zasady wymiarowania*. Kraków. Politechnika Krakowska.

[7] Orzeł J. 2021. *Analiza zużycia stali na konstrukcję hali magazynowej*. Praca magisterska. Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice.

[8] PN-EN-1990. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.

[9] PN-EN 1993-1-1:2003. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[10] PN-EN 1993-1-5:2008. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice.

[11] PN-EN 1993-1-3:2008. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.

[12] PN-EN 1991-1-3:2005. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem. PKN. Warszawa.

[13] PN-EN 1991-1-4:2008. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru. PKN. Warszawa.

Przyjęto do druku: 12.10.2021 r.