



LESŁAW NIEWIADOMSKI, *Leslaw.Niewiadomski@polsl.pl*
Politechnika Śląska

WADY STALOWEJ KONSTRUKCJI DACHU ZMODERNIZOWANEJ HALI PRZEMYSŁOWEJ

DEFECTS OF THE STEEL ROOF STRUCTURE OF THE MODERNIZED INDUSTRIAL BUILDING

Streszczenie W referacie przedstawiono wady konstrukcji dachu a w szczególności ponadnormatywne imperfekcje geometryczne (wygięcia poziome osi oraz skręcenia przekrojów poprzecznych) blachownicowych dźwigarów dachowych w hali przemysłowej. Podano modele obliczeniowe (w tym modele uproszczone), które mogą być zastosowane w ocenie nośności dźwigarów pełnościennych z imperfekcjami geometrycznymi.

Abstract The paper presents the defects of the roof structure, in particular the superstandard geometrical imperfections (lateral displacements of the axis and torsional displacements of cross-sections) of plain webbed roof girders in the industrial building. Exact and simplified calculation models are presented which can be applied in the assessment of the carrying capacity of the roof girders.

1. Wstęp

Konstrukcje budowlane oraz poszczególne ich części składowe nie są idealne, ale są w rzeczywistości obciążone niedoskonałościami i wadami początkowymi nazywanymi imperfekcjami. Przepisy (normy projektowania) określają dopuszczalne wartości imperfekcji i uwzględniają ich wpływ zarówno na nośność (stateczność) elementów konstrukcyjnych jak i całej konstrukcji.

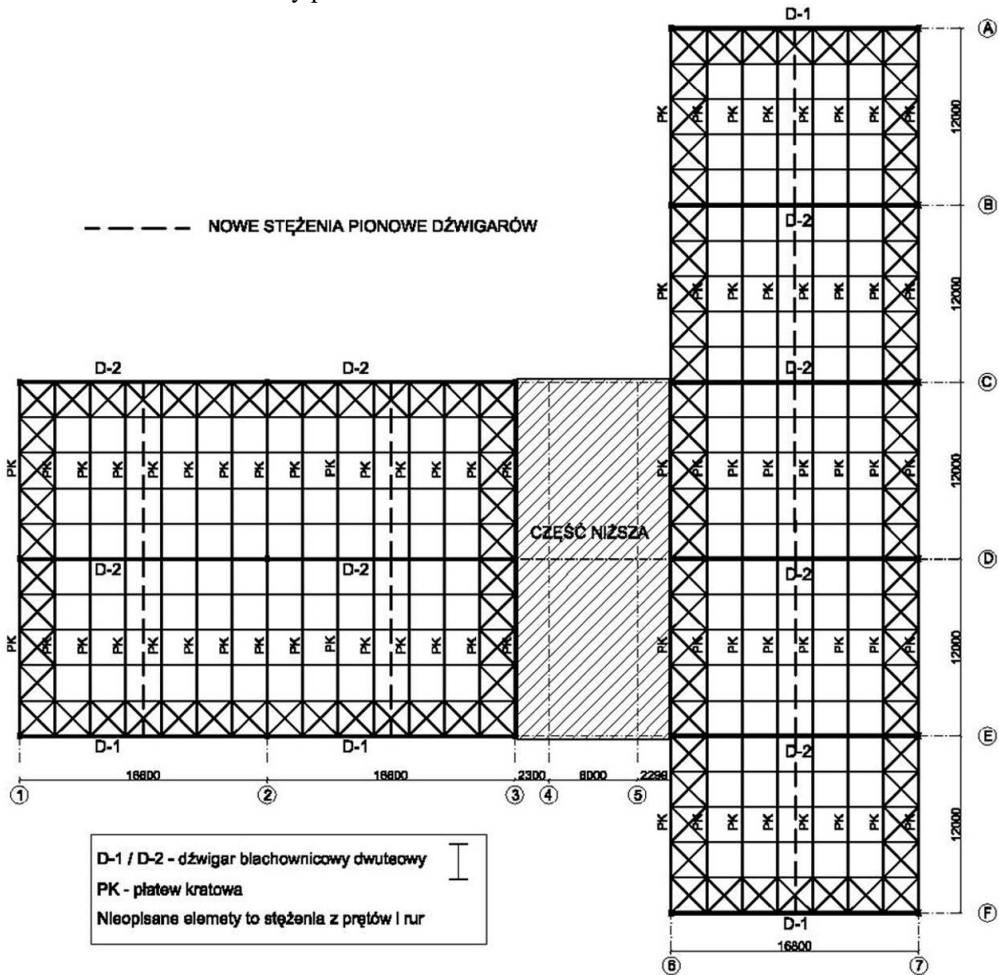
Zdarzają się jednak przypadki wystąpienia w zrealizowanym obiekcie imperfekcji geometrycznych takich jak wygięcia i skręcenia elementów o wartościach przekraczających, niekiedy znacznie, wartości normowe. W takich przypadkach, przed podjęciem decyzji dotyczących konkretnych zabiegów konstrukcyjnych, należy przeprowadzić analizę wpływu tych imperfekcji na stan naprężeń i przemieszczeń w elementach konstrukcji.

W referacie przedstawiono wady stalowej konstrukcji dachu zmodernizowanej hali przemysłowej ze szczególnym uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych pełnościennych dźwigarów dachowych oraz podano zalecenia mające na celu zapewnienie dalszej bezpiecznej eksploatacji obiektu. Podano też uwagi dotyczące obliczeń statycznych takich dźwigarów.

2. Opis konstrukcji hali

Hala składa się z trzech oddylatowanych od siebie segmentów. Segmentu dwunawowego o wymiarach osiowych 24,0×33,6 m, segmentu jednonawowego o wymiarach osiowych 16,8×60,0 m i segmentu niższego (łącznika) o wymiarach 9,6×24,0 m (rys. 1). Konstrukcję

nośną tworzą blachownicowe dwuteowe dźwigary dachowe o rozpiętości 16,8 m oparte przegubowo na utwierdzonych wspornikowo w fundamentach blachownicowych słupach o przekroju dwuteowym oraz płatwie kratowe o rozpiętości 12,0 m i rozstawie 2,4 m (rys. 2). Środniki dźwigarów wykonano z bl. 8×1000 mm, pasy dźwigarów wewnętrznych (D2) z bl. 14×200 mm a skrajnych (D1) z bl. 8×200 mm. Wysokość konstrukcji obu segmentów do spodu konstrukcji dachu wynosi 4,2 m. W konstrukcji dachu zastosowano poprzeczne i podłużne stężenia połączniowe typu X z prętów okrągłych oraz stężenia pionowe płatwi usytuowane w 3/5 ich długości. Stężenie pionowe dźwigarów blachownicowych tworzą płatwie umieszczone przy połowie rozpiętości dźwigarów oraz płatwie skrajne, których dolne pasy połączone z dolnymi pasami dźwigarów. Pokrycie dachu stanowi blacha trapezowa z izolacją termiczną i przeciwwodną. We fragmentach hali między osiami 1–2/C–E oraz 6–7/E–F zastosowano sufity powieszane.



Rys. 1. Rzut konstrukcji nośnej dachu hali

Całość konstrukcji stalowej wykonano w 1977 r. ze stali konstrukcyjnej St3S. W 2007 r. wykonano modernizację hali w ramach której wzmocniono dźwigary wewnętrzne poprzez przyspawanie w środku rozpiętości do pasów dolnych nakładki o długości 5,8 m i przekroju

20×240 mm oraz zaślepieno blachami duże otwory technologiczne o średnicy 700 mm w części środkowej i częściach przypodporowych dźwigarów.



Rys. 2. Widok konstrukcji dachowej od wnętrza obiektu

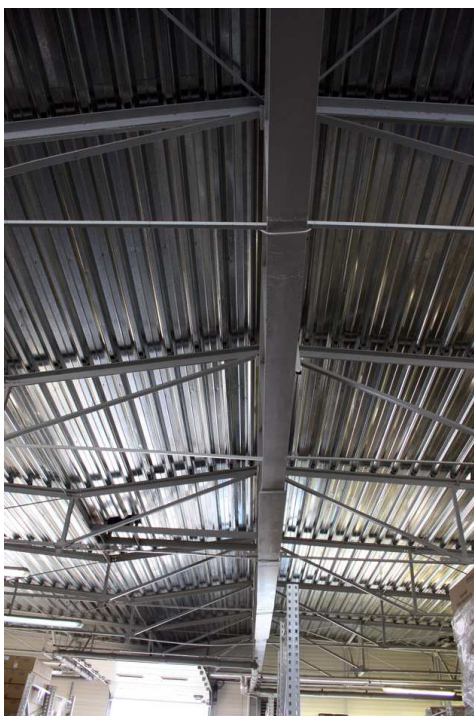
Wzmocniono pas górny (dospawano ceownik) oraz skrajny zastrzał płatwi kratowych. Wymieniono tężniki międzypłatwiowe (na konstrukcje z rur kwadratowych) na szerokości podłużnych stężeń połaciowych oraz wymieniono pręty stężeń połaciowych w polach krzyżowania się stężeń podłużnych i poprzecznych. Na całym dachu wymieniono blachę trapezową pokrycia na blachę T50/260/0,7 oraz izolację termiczną i przeciwwodną.

3. Stan techniczny konstrukcji nośnej dachu

Ogólny stan techniczny konstrukcji nośnej dachów hali budzi poważne zastrzeżenia. Jest to wynikiem przede wszystkim znacznych, wielokrotnie przekraczających wartości normowe, imperfekcji geometrycznych dźwigarów dachowych. Poważnym mankamentem jest brak pełnego oparcia i zamocowania na górnym pasie dźwigarów skrajnych płatwi kratowych, pełniących równocześnie rolę pionowych stężeń dźwigarów. Stwierdzono również m. in. brak oraz znaczne wygięcia niektórych prętów stężeń płatwi.

Wszystkie blachownicowe dźwigary dachowe wykazują znaczne ponadnormatywne wygięcia poziome i skręcenia przekrojów. W segmencie jednonawowym wszystkie dźwigary – oprócz jednego w osi E – wygięte są w tym samym kierunku, w stronę osi F (por. rys. 1). Wygięcia dolnych pasów tych dźwigarów w stosunku do osi teoretycznej wynoszą od 58 do 70 mm, pasów górnych od 5 do 40 mm, a maksymalne wzajemne przemieszczenie pasa dolnego względem górnego wynosi 57 mm (dźwigar w osi D/6–7, rys. 3 i 4). W segmencie dwunawowym dźwigary skrajne wygięte są do środka hali, a dźwigar środkowy wykazuje stosunkowo niewielkie wygięcia zmienne. Wygięcia dolnych pasów tych dźwigarów w stosunku do osi teoretycznej wynoszą od 5 do 94 mm, pasów górnych od 2 do 35 mm, a maksymalne wzajemne przemieszczenie pasa dolnego względem górnego wynosi 74 mm (dźwigar w osi E/2–3). Pomierzone przemieszczenia wielokrotnie przekraczają przemieszczenia dopuszczalne. Zgodnie z normą [2], dla dźwigarów zastosowanych w hali dopuszczalne wzajemne przemieszczenie górnego i dolnego pasa wynosi 10 mm (max z $h/100$ i 10 mm), a wygięcie boczne 22,4 mm ($l/750$).

Poważnym mankamentem, mającym wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji dachu (jej stateczność) jest brak pełnego oparcia i połączenia z dźwigarami górnych pasów wszystkich płatwi skrajnych – rys. 5; płatwie te przenoszą bowiem również siły będące wynikiem działania obciążeń pionowych na wygięte i skrzyżone dźwigary dachowe. Wadliwe (niepełne) oparcia zostały wykonane podczas wznoszenia hali, pomimo że projekt zawierał odpowiednie poprawne rozwiązanie. W niektórych płatwiach stwierdzono również niewielkie załamania osi rozciąganych krzyżulców z prętów okrągłych, będące uszkodzeniami mechanicznymi powstałymi podczas wieloletniej eksploatacji hali.



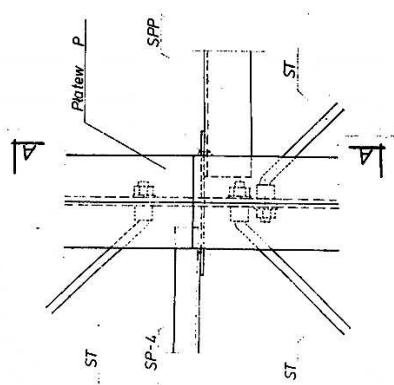
Rys. 3. Wygięcie dźwigara w osi D/6–7



Rys. 4. Skrzyżenie dźwigara w osi D/6–7



Rys. 5. Wadliwe oparcie płatwi skrajnych na dźwigarach dachowych



Rys. 6. Szczegół mocowania stężeń połączonych do płatwi

Dachowe stężenia połaciowe poprzeczne i podłużne wykonane z prętów okrągłych założone są w poziomie górnych pasów dźwigarów i płatwi. Zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne połączenia prętów z pasami płatwi nie pozwala na regulację napięcia prętów i nie powinno być stosowane w odpowiedzialnych połaciowych tężnikach poprzecznych (rys. 6). Pręty stężeń połaciowych w wielu przedziałach są nie napięte i wykrzywione. Bardzo duże wygięcia pochodzenia mechanicznego stwierdzono w prętach pośrednich (zwłaszcza dolnych) pionowych stężeń płatwi, a w niektórych miejscach stwierdzono wręcz ich brak. Stężenia pionowe płatwi w polach podłużnych stężeń połaciowych zostały wymienione na nowe podczas remontu hali w 2007 r. i są w dobrym stanie technicznym. W stężeniach pionowych dźwigarów stwierdzono brak paru prętów łączących pas dolny płatwi z pasem dźwigara dachowego oraz niewłaściwe wykonanie ich połączeń (na jedną zamiast dwóch śrub) spowodowane dużymi wygięciami bocznymi dźwigarów.

Odwodnienie dachu jest drożne. Na dachu widoczne są jednak zastoiny wody występujące w miejscach największych ugięć połaci dachowej (rys. 7). Jest to wynikiem braku okresowego czyszczenia wpustów dachowych z opadłych liści (rys. 8) oraz braku odpowiedniego wyprofilowania spadków poprzecznych połaci dachowej w kierunku wpustów.



Rys. 7. Zastoiny wody na dachu segmentu jednonawowego



Rys. 8. Nie czyszczone wpusty dachowe segmentu dwunawowego

4. Uwagi dotyczące obliczeń statycznych

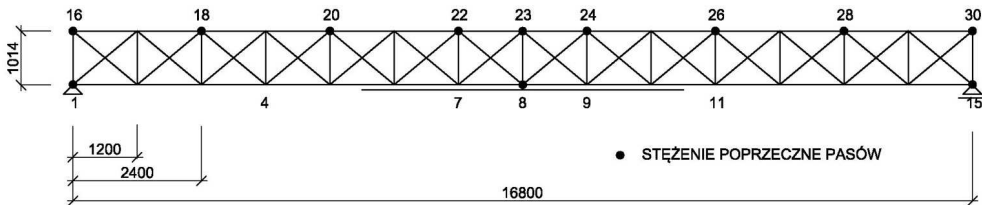
Obliczenie konstrukcji dachowej z uwzględnieniem imperfekcji wymaga użycia programu komputerowego obliczania przestrzennych konstrukcji prętowych wg teorii II rzędu, i zastąpienia elementów pełnościennych (pełnościennych dźwigarów dachowych i blachy trapezowej – jeśli przenosi ona siły w płaszczyźnie dachu, tzn. odgrywa rolę przepony) konstrukcją kratownicową.

Do dźwigarów pełnościennych można zastosować autorski model przestrzenny kratownicy zastępczej o odpowiednich cechach geometrycznych [3], [4], który w odróżnieniu od jednowymiarowego modelu prętowego umożliwia pełne ujęcie wpływu takich imperfekcji jak wygięcia i skręcenia elementów (rys. 9). Przekroje pasów w modelu dobiera się tak, aby moment bezwładności przekroju kratownicy był taki sam jak dźwigara blachowniowego. W celu uwzględnienia skręcania pasów na skręcanie dźwigara kratowego jako całości wprowadza się słupki w postaci cienkich żeber poprzecznych, zapewniające nieodkształcalność przekrojów poprzecznych w ich płaszczyznach zgodnie z I hipotezą teorii Własowa skręcania prętów cienkościennych o otwartym przekroju. Przekroje krzyżulców z rur okrągłych dobierane są z warunku równości odkształceń postaciowych średnika blachownicy i skratowania wiaźara kratowego. Natomiast w przypadku blachy trapezowej pełniącej rolę

przepony na ogół można ograniczyć się do modelu płaskiej kratownicy zastępczej o sztywności na ścinanie równej sztywności przepony.

Układ imperfekcji dźwigarów na długości rozpatrywanej hali ma charakter zbliżony do antysymetrycznego, co często ma miejsce w rzeczywistości. Przy równomiernie rozłożonym pionowym obciążeniu dachu (obciążenia stałe i obciążenie śniegiem) antysymetrycznym imperfekcjom odpowiada antysymetryczny układ sił wewnętrznych w konstrukcji dachu, co pozwala ograniczyć analizę statyczną do połowy hali. Maksymalne uproszczenie obliczeń uzyskuje się przy założeniu jednakowych imperfekcji we wszystkich dźwigarach.

Wprowadzając do modelu obliczeniowego konstrukcji dachu w miejsce dźwigarów pełnościennych i blachy trapezowej odpowiednie kratownice zastępcze otrzymuje się dla połowy przedmiotowej hali przestrzenny układ prętowy. W przypadku przyjęcia jednakowych imperfekcji we wszystkich dźwigarach obliczenia sprowadzają się do analizy odpowiednio poziomo podpartego pojedynczego dźwigara (jedno-dźwigarowy kratownicowy model obliczeniowy). Podparcie poziome górnego pasa i (poprzez elementy zastępujące tu tężniki pionowe) dolnego pasa – stanowi poprzeczny tężnik połączeniowy o zredukowanej sztywności (w stosunku obciążenia jednego do sumy obciążeń rozpatrywanych dźwigarów). Jeśli blacha trapezowa pełni rolę przepony należy kratownicę zastępczą połączyć w tym modelu równolegle z tężnikiem połączeniowym o zredukowanej sztywności. Obciążenie wiatrem tężnika połączeniowego należy przyjąć w kierunku zgodnym z kierunkiem działania na tężnik dźwigarów dachowych obciążonych imperfekcjami, a jego wartość należy zredukować w tym samym stosunku w jakim zredukowano sztywność tężnika połączeniowego.



Rys. 9. Model kratownicowy dźwigara dachowego z nowym stężeniem pionowym

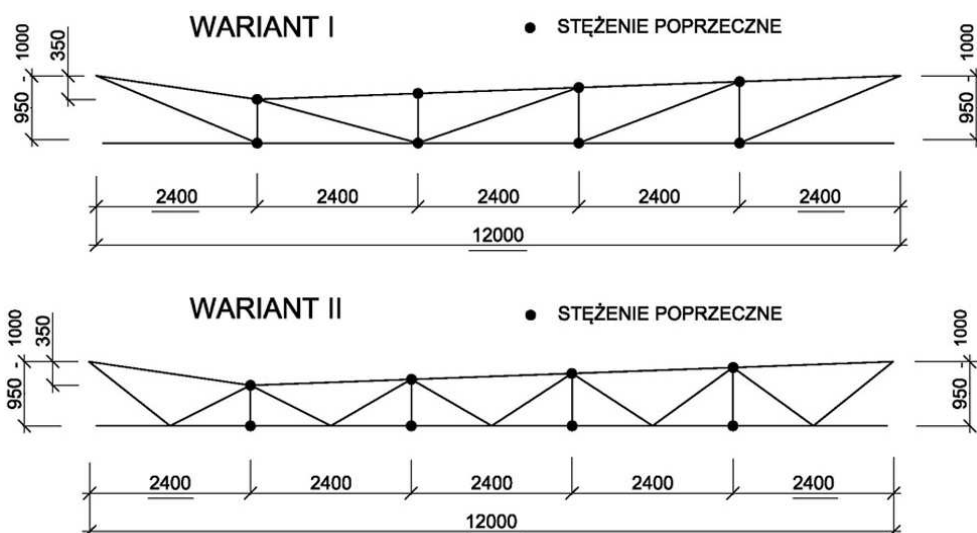
5. Zalecenia

Na podstawie przeprowadzonych oględzin, pomiarów oraz obliczeń, w których zastosowano jedno-dźwigarowy model obliczeniowy, sformułowano następujące zalecenia które należy wykonać w celu zapewnienia dalszej bezpiecznej eksploatacji dachu hali.

W konstrukcji dachu hali wprowadzono dodatkowe nowe stężenia pionowe dźwigarów w połowie ich rozpiętości (por. rys. 1) wykonane z rur kwadratowych, o zarysie geometrycznym nawiązującym do konstrukcji istniejących płatwi kratowych. Warianty możliwych rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiono na rys. 10.

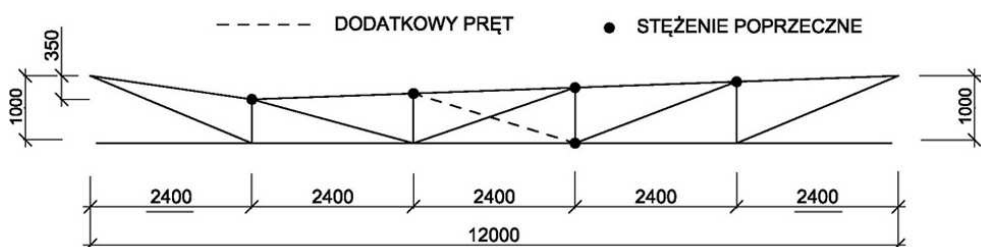
Wprowadzono dodatkowy krzyżulec w środkowym polu płatwi skrajnych pełniących również rolę pionowych stężeń dźwigarów dachowych (rys. 11), w osiach 1, 2, 3, 6 i 7.

Zalecono wykonanie prawidłowego oparcia i zamocowania skrajnych płatwi w osiach 1, 2, 3, 6 i 7 do górnych pasów dźwigarów, stosując dodatkowe wsporniki z blach o przekroju teowym, przyspawane do żeber podporowych dźwigarów.



Rys. 10. Nowe stężenie pionowe dźwigarów

W celu poziomego podparcia pasa dolnego dźwigarów skrajnych w osiach E/1–2 i E/2–3 w segmencie dwunawowym, połączono je z pasami dolnymi płatwi (jak w istniejącym stężeniu pionowym dźwigarów).



Rys. 11. Wzmocnienie płatwi skrajnych

Wprowadzono nowe skratowania (krzyżulce) w połączeniach stężeniach poprzecznych dźwigarów wzdłuż osi A, F i E/1–3 z prętów okrągłych napinanych śrubami rzymskimi, łączonych śrubami z blachami węzłowymi przyspawanymi do poziomych półek kątowników górnego pasa płatwi.

Zalecono uzupełnienie brakujących prętów łączących pasy dolne płatwi, będących zarazem istniejącymi pionowymi stężeniami dźwigarów, z dźwigarami oraz wymianę wszystkich wygiętych i załamanych prętów skratowań płatwi i stężeń pionowych płatwi.

W celu poprawienia odwodnienia dachu wskazano na możliwość wykonania odpowiednich przeciw spadków połaci dachowej w osiach wpustów dachowych, w kierunku tych wpustów.

6. Wnioski

Przeprowadzona ocena statyczno-wytrzymałościowa konstrukcji nośnej dachu hali pozwoliła na wprowadzenie zabiegów konstrukcyjnych umożliwiających dalszą bezpieczną

eksploatację obiektu. Zastosowanie w obliczeniach jedno-dźwigarowego przestrzennego modelu kratownicowego dźwigara pełnościennego oraz modelu kratownicowego przepony z blachy trapezowej pokrycia dachu pozwoliło w sposób prosty i dostatecznie dokładny ocenić nośność dźwigara pełnościennego obciążonego przestrzennymi imperfekcjami geometrycznymi, bez konieczności pracochłonnego modelowania całej konstrukcji dachu hali. Model ten można było zastosować w analizowanej hali do obliczeń pojedynczych wydzielonych dźwigarów dachowych ponieważ przebiegi poziomych przemieszczeń początkowych we wszystkich dźwigarach są podobne do siebie.

Jedno-dźwigarowy kratownicowy model obliczeniowy może być również zastosowany w obliczeniach projektowych pełnościennych dźwigarów dachowych i pokrycia z blach trapezowych, przy bezpośrednim uwzględnieniu imperfekcji normowych w postaci wstępnego wygięcia ściskanych pasów dźwigarów. Model normowy zakłada bowiem jednakowe wygięcia pasów dźwigarów dachowych, o strzałce wygięcia zależnej od ilości dźwigarów w konstrukcji dachu.

Literatura

1. PN-B-03200: 1990: Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
2. PN-B-06200:2002 Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki wykonania i odbioru. Wymagania podstawowe.
3. Niewiadomski L.: Wpływ nadmiernych imperfekcji geometrycznych na nośność stalowych dźwigarów dachowych budowanej hali, *Inżynieria i Budownictwo*, 5/2006.
4. Niewiadomski L.: Wpływ imperfekcji geometrycznych stalowych dźwigarów dachowych na stan naprężeń i przemieszczeń konstrukcji dachowej, Praca doktorska, Gliwice 2007.