

Stan przedawaryjny dźwigara kratowego usztywnionego blachą trapezową



dr inż.
JAN GIERCZAK
Politechnika Wroclawska,
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Katedra Konstrukcji Budowlanych
ORCID: 0000-0003-3219-1844



dr inż.
RAJMUND IGNATOWICZ
Politechnika Wroclawska,
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Katedra Konstrukcji Budowlanych
ORCID: 0000-0003-3663-0170



dr inż.
MACIEJ KOŻUCH,
Politechnika Wroclawska,
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Katedra Konstrukcji Budowlanych
ORCID: 0000-0002-1743-5233

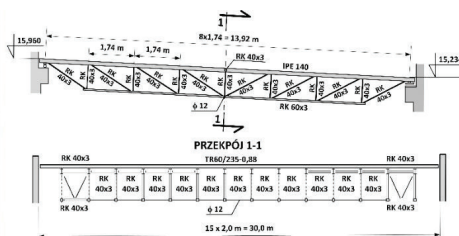
Artykuł przedstawia stan przedawaryjny dźwigara kratowego budynku maszynowni na terenie Zakładów Gospodarki Odpadami. Przeprowadzono dyskusję na temat zasadności zastosowania obudowy z blachy trapezowej jako elementu konstrukcyjnego.

Problematykę traktowania blachy trapezowej zarówno w charakterze obudowy, jak i elementu stężącego [1, 2, 3, 4], opisano na przykładzie budowy maszynowni w Zakładach Gospodarki Odpadami. Budynek wykonano jako konstrukcję ze ścianami żelbetowymi i dachem konstrukcji stalowej o następujących gabarytach: wysokość 16,0 m, szerokość 14,5 m i długość około 30,2 m. Na ścianach żelbetowych oparte są płatwie kratowe w układzie belek swobodnie podpartych, o rozpiętości 14,3 m. Na płatwiach kratowych oparta jest blacha trapezowa TR60/235-0,88 mm (rys. 1.). Według założeń projektowych blacha trapezowa stanowi usztywnienie pasa górnego dźwigara kratowego przez zastosowanie połączenia w każdej dolinie fałdy do pasa górnego kraty za pomocą wkrętów stalowych IMPAX 5,5 x 3,2 mm. Łączniki uszczelniające łączące poszczególne arkusze blachy trapezowej zostały przyjęte przez projektanta w rozstawie co 330 mm. Analizowane kraty wykonane są z profili IPE 140 (pas górny), z rury RK 60 x 3 (pas dolny), z RK 40 x 3 mm (słupki i krzyżulce).

Założenia projektowe i wykonawstwo

Projekt zakładał usztywnienie pasa górnego dźwigara kratowego blachą trapezową TR60/235-0,88. Blacha trapezowa miała być mocowana do pasa górnego w każdej dolinie fałdy wkrętami IMPAX 5,5 x 3,2. W dokumentacji projektowej nie zamieszczono obliczeń dotyczących doboru łączników głównych oraz informacji, czy zastosowano neoprenową uszczelkę w omawianych wkrętach. Nie podano i nie uwzględniono także łączników uszczelniających. W dokumentacji nie było komunikatu odnośnie do sposobu montażu krat wiotkich i ich dodatkowego usztywnienia na czas montażu celem umożliwienia właściwego zakotwienia wkrętów w pasie górnym dwuteownika dźwigara kratowego. W całym obiekcie, zgodnie z założeniami projektowymi, nie zastosowano stężeń połaciowych poprzecznych, ponieważ tę funkcję miała pełnić przepona z blachy trapezowej. W polach przedskrajnych zastosowano stężenie pionowe w środku rozpiętości dźwigara. Przez dalsze pola, na wysokości pasa górnego kra-

ty, zastosowano pręt w postaci rury RK 50/3, a na wysokości pasa dolnego kraty zastosowano cięgno z pręta o średnicy $\varnothing 12$ mm. Zgodnie z projektem blachę rozpatrywano jako belkę wieloprzęsłową podpartą na pasie górnym dźwigara kratowego. Podsumowując, można wymienić następujące niedociągnięcia na etapie projektowania: brak uwzględnienia łączników uszczelniających, brak obliczeń wymaganych przez [1, 2], brak wytycznych montażu oraz kolejności mocowania blachy do dźwigara kratowego (brak tymczasowych stężeń montażowych), zastosowanie dyskusyjnego rozwiązania stężeń pionowych z wiotkim prętem w poziomie pasa dolnego kraty (rys. 2.). W trakcie wizji lokalnych oraz przeprowadzanych badań stwierdzono szereg nieprawidłowości pogłębiających niedociągnięcia projektowe. Do głównych niedociągnięć możemy zaliczyć m.in. brak łączników głównych w każdej dolinie fałdy, liczne wkręty znajdujące się obok pasa górnego dźwigara oraz luźne cięgna stężeń w całej środkowej części. Zastosowane łączniki nie trafiały w pas górny krat. Łączniki $\varnothing 3,2$ mm były rozstawione nieregularnie od 200 do 430 mm (średnio co 250 mm). Brak łączników głównych w dolinach fałd spowodowany był przemieszczaniem się krat z płaszczyzny pod ciężarem własnym oraz obciążeniem montażowym z uwagi na wiotkość dźwigara kratowego i podatność jedyne go stężenia pionowego (brak naciągu cięgien dolnych). Przemieszczanie się boczne krat ze swojej płaszczyzny było spowodowane dużą smukłością pasa górnego (powyżej $\lambda > 250$) i brakiem stężeń [8].

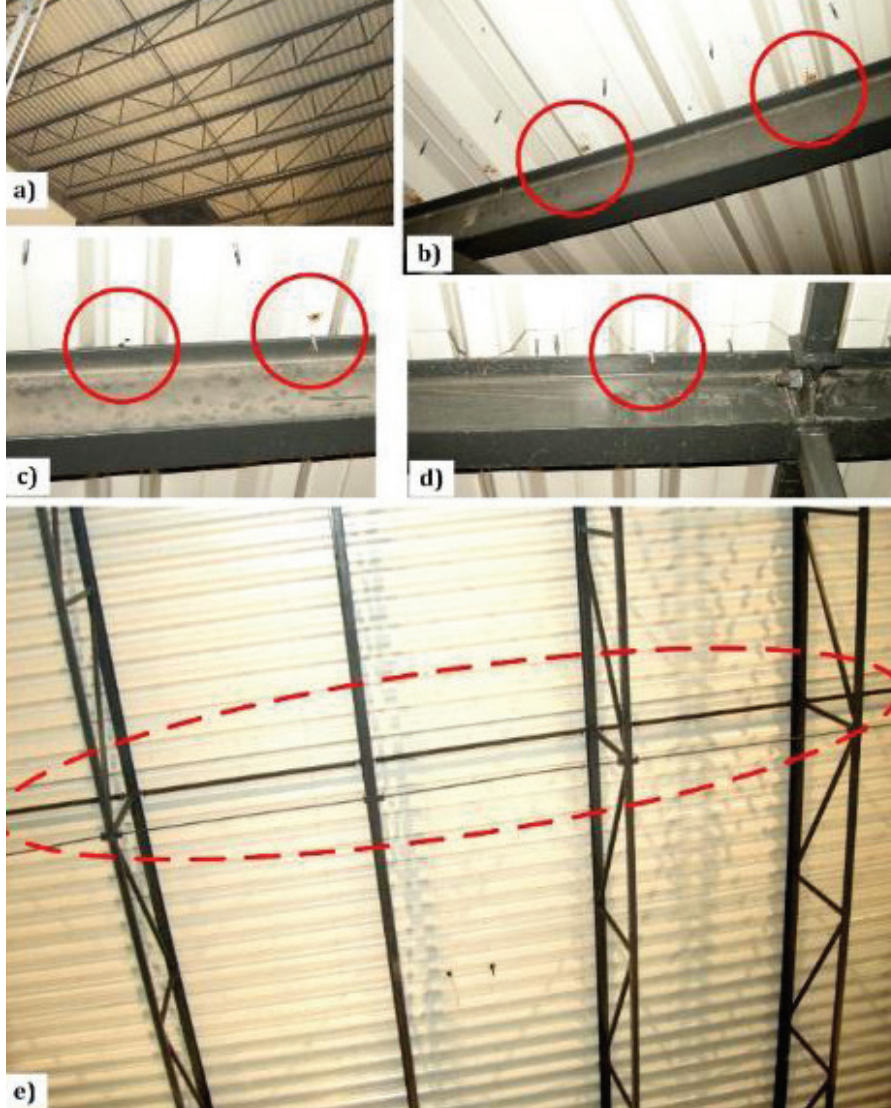


Rys. 1. Widok stalowej konstrukcji dachu. Przekrój poprzeczny i przekrój podłużny

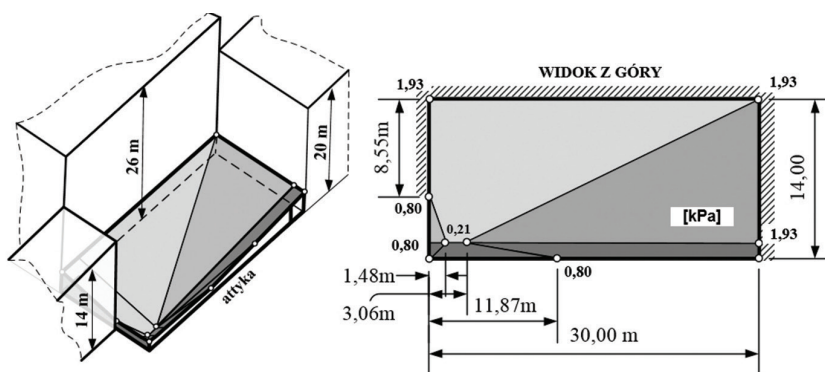
Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe

Po sprawdzeniu dokumentacji oraz wykonaniu inwentaryzacji w zakresie potrzebnym do obliczeń wykonano symulacje numeryczne [11, 12], odwzorowując warunki współpracy blachy trapezowej i dźwigara kratowego. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z wytycznymi [1, 2, 4, 5], posilując się literaturą [3] [4] [5]. W analizie uwzględniono rzeczywiste odchyłki oraz dodatkowo odchyłki dopuszczone przez normę [10]. Oszacowano obciążenia stałe wg [6] i najbardziej niekorzystne obciążenia klimatyczne wg [7], uwzględniając geometrię i lokalizację obiektu. Rozpatrywana konstrukcja przylegała do budynku wyższego (rys. 3.). Zgodnie z [7] oprócz trwałej i przejściowej sytuacji obliczeniowej rozpatrzono wyjątkową sytuację obliczeniową, wtedy gdy na dachu mogą się tworzyć zasy śnieżne (rys. 3.). Układ konstrukcyjny dachu składa się z dwóch głównych elementów wzajemnie współpracujących, tj. dźwigara kratowego wraz ze stężeniem pionowym oraz blachy fałdowej. Blacha trapezowa pełni rolę przepony, która przejmuje obciążenia poprzeczne i tarczowe z uwagi na stabilizację pasa górnego dźwigara. W celu oszacowania wyężenia przepony dachu oraz wyznaczenia współczynnika wybożeniowego pasa górnego dźwigara kratowego z uwzględnieniem podatności tarczy dachowej i montażowego stężenia międzywiązowego wykonano analizy obliczeniowe. Obliczenia numeryczne wykonano MES [11, 12] wg teorii II rzędu z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych ($2 \varnothing 3,5 \text{ cm}$). Na pierwszym etapie oszacowano podatność stężenia pionowego międzywiązowego z uwzględnieniem luźnych cięgien dolnych (rys. 4.). W tabeli. 1 przedstawiono podatności z uwagi na ścinanie przepony przy założeniu mocowania łączników co drugą dolinę fałdy [1, 9]. Wykonano kalibrację współczynnika podatności tarczy dachowej w płaszczyźnie prostopadłej do dźwigara kratowego w odniesieniu do stanu rzeczywistego i na tej podstawie wyznaczono współczynnik długości wybożeniowej oraz uwzględniono go w procedurze weryfikacji pasa górnego wg EC3 [8]. Na podstawie wykonanych obliczeń i literatury [2] otrzymano smukłość pasa górnego $\lambda_z = \sim 124$. Następnie wykonano weryfikację dla całości systemu konstrukcyjnego, uwzględniając podatność łączników uszczelniających.

Wykonano obliczenia z uwzględnieniem wpływu sztywności sprężystego podparcia pasa górnego na wartość siły krytycznej – rys. 7. Przy założeniu sztywności większej od 26 kN/m nośność elementu jest zapewniona, co wskazywałoby, że konstrukcja ma zachowaną stateczność (sztywność tarczy wynosi 158 kN/m). Należy pamiętać, że łączniki są rozmieszczone rzadziej, co diametralnie zmienia sytuację. Ponadto występują błędy mon-



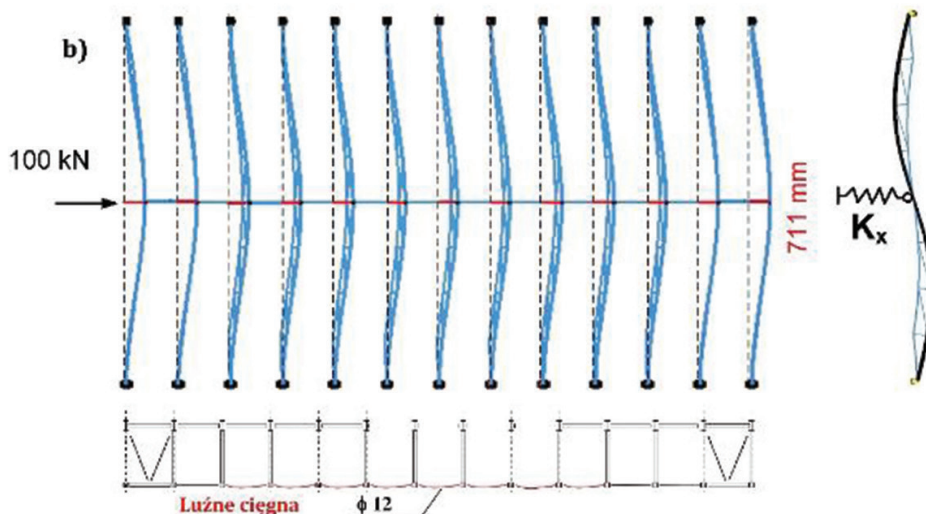
Rys. 2. Błędy wykonawcze: a) widok konstrukcji dachu od spodu, b, c, d) brak łącznika lub brak zakotwienia łącznika w pasie górnym dźwigara kratowego, e) luźne cięgna stężeń



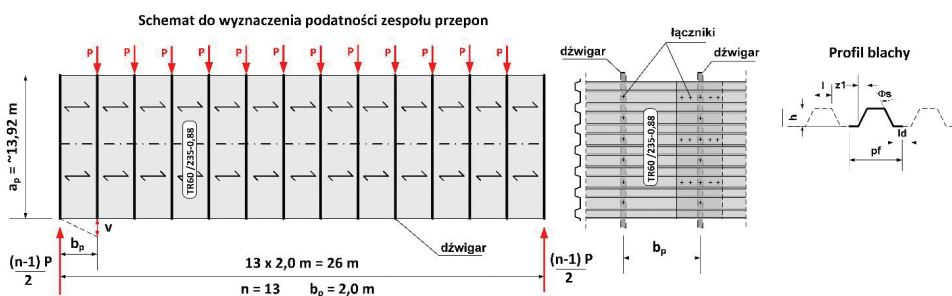
Rys. 3. Szkic obrazujący obwiednię obciążenia śniegiem z uwzględnieniem budynków sąsiadujących dla obciążenia śniegiem (zasy śnieżne)

Tabela 1. Składniki podatności przy ścinaniu dla rozpatrywanego przypadku przy założeniu mocowania co drugą fałdę wg [1,2].

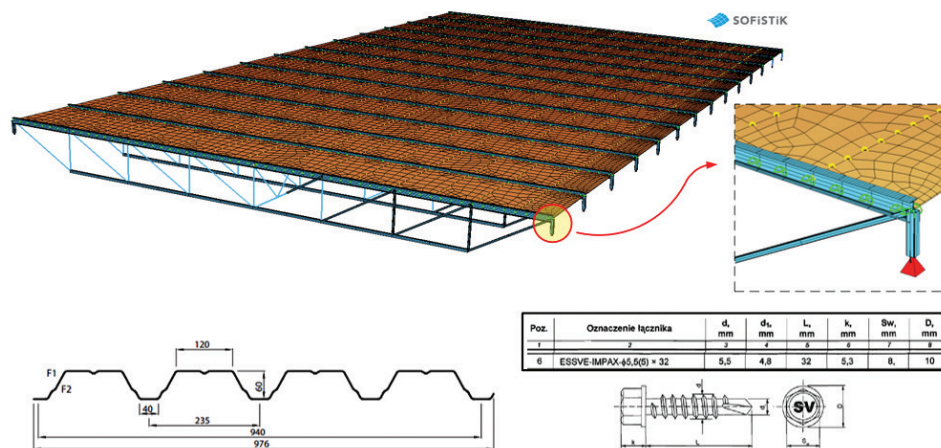
| Składnik podatności przy ścinaniu. Podatność wywołana przez: | | Składniki podatności |
|--|---|----------------------|
| Odkształcenie blachy | Spaczenie profilu blachy (mocowanie co druga fałda) $c_{1,1}$ | 5,656 [mm/kN] |
| | Odkształcenie postaciowe $c_{1,2}$ | 0,149 [mm/kN] |
| Odkształcenia łącznika | Głównego $c_{2,1}$ | 0,247 [mm/kN] |
| | Uszczelniającego $c_{2,2}$ | 0,269 [mm/kN] |
| | Połączenia dźwigara z podporą $c_{2,3}$ | brak podatności |
| Podatność łączna na ścinanie c | | 6,32105 [mm/kN] |
| Współczynnik sprężystości z uwagi na sztywność $K_x = 1/c$ | | 158,20 kN/m |



Rys. 4. Schemat do oszacowania sprężystości stężenia pionowego w dachu: a) widoczne luźne ciągnia dolne, b) schemat statyczny układu konstrukcyjnego dachu wraz z obliczonym przemieszczeniem



Rys. 5. Szkic tarczy dachowej jako elementu stężącego – podstawowy schemat geometryczny do wyznaczenia średniej podatności na ścinanie



Rys. 6. Ogólny model numeryczny dachu z uwzględnieniem więzi sprężystych w miejscu łączników

tażowe, polegające na braku napięcia cięgien dolnych stężenia pionowego, co czyni podparcie podatnym (rys. 4). Określenie sztywności podparcia bocznego z uwagi na tarczę z blachy fałdowej jest możliwe tylko dla rozstawu łączników nie większego niż co drugą dolinę fałdy [1, 2], tymczasem mamy do czynienia z rozstawami co trzecią lub co czwarta dolinę, czego nie regulują żadne przepisy.

Wykonano analizę stateczności dźwigara [8, 9] podpartego podatnie w miejscu stężenia oraz podpartego z boku, co wynika z podatności na ścinanie tarczy dachowej. Mocowanie rzadsze niż co drugą dolinę zmienia mechanizm zniszczenia tarczy z uwagi na duże odkształcenia konturu blachy między łącznikami, a to odpowiada około 5-krotnemu zwiększeniu podatności podparcia. Obliczenia wykonano dla obciążeń stałych oraz najbardziej niekorzystnego obciążenia śniegiem. Wyniki analizy przedstawiono na rys. 8.

Obliczenia wg PN-EN [8] wykazały, że zachodzi duże prawdopodobieństwo wystąpienia stanu przedawaryjnego konstrukcji. Otrzymano wyężenie pasa górnego z uwzględnieniem ściskania i zginania międzywęzłowego na poziomie 142%.

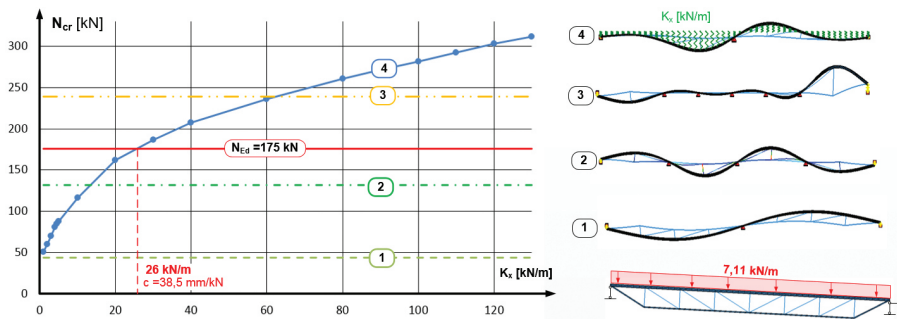
Podsumowanie

Przyczyną tej sytuacji był: brak projektu rozmieszczenia blach trapezowych, łączników uszczelniających, kolejności montowania łączników, brak wytycznych stabilizacji dźwigarów na czas montażu blachy, brak łączników głównych w każdej fałdzie. Projekt nie narzucił wykonawcy właściwego rozmieszczenia łączników zgodnie z wymogami dotyczącymi usztywnień z blach trapezowych. Przed przystąpieniem do montażu należało wykonać dodatkowe stężenia usztywniające pas górny. Brak tych usztywnień powodował niekontrolowane przemieszczenia z płaszczyzny krat pod obciążeniem montażowym (np. robotnikami). Dlatego stwierdzono brak trafienia łącznika w półkę górną pasa dźwigara kratowego. Na błędy projektowe nakładają się uchybienia wykonawstwa. Przede wszystkim brak połączeń blachy w każdej dolinie fałdy oraz niewłaściwe rozmieszczenie połączeń uszczelniających wzdłuż fałd. Podsumowując, można stwierdzić, że brak przyjętych łączników głównych i uszczelniających, brak dodatkowych stężeń i uszczelniających, brak dodatkowych stężeń krat na czas montażu oraz nieprzygotowanie planu usztywnienia dźwigarów przez blachę trapezową przyczyniły się do awarii dźwigara.

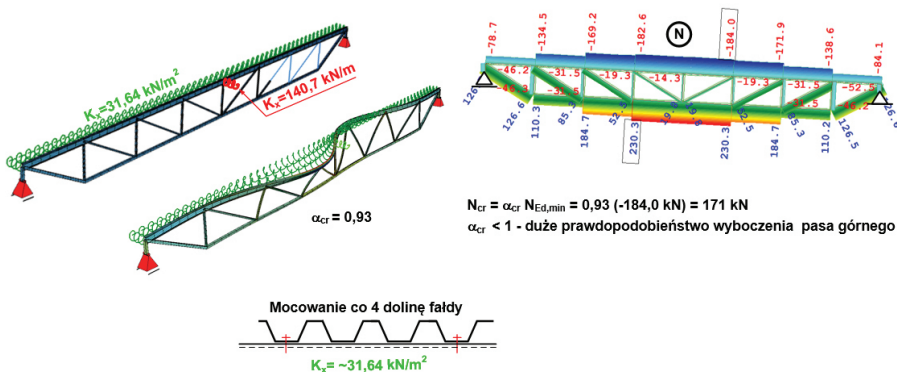
Wnioski i zalecenia

Na podstawie przeprowadzonych rozważań zasadności stosowania usztywnienia dźwigarów w dachach bezpłatwowych blachą trapezową nasuwają się następujące wnioski:

Dźwigary kratowe można zabezpieczyć przed wyoboczeniem blachą trapezową pod warunkiem spełnienia wszystkich zaleceń, np. wg wytycznych [1] odnośnie do doboru i roz-



Rys. 7. Wartość siły krytycznej dla pasa ściskanego w środku rozpiętości w zależności od sposobu podparcia



Rys. 8. Wyznaczenie siły krytycznej wybożenia pasa górnego dźwigara kratowego z uwzględnieniem rzeczywistej sztywności podparcia dla obliczeniowych sił osiowych

mieszczenia łączników oraz wykonania projektu montażu z dodatkowymi stężeniami na czas układania i mocowania blachy obudowy.

Dźwigary kratowe o smukłości pasa ściskanego powyżej 250 powinny być dodatkowo usztywnione na czas montażu w celu wyeliminowania sprężystego wychylenia kraty z płaszczyzny od obciążeń montażowych.

Zastąpienie tradycyjnych stężeń blachą trapezową zwiększa nakłady obliczeniowe, wprowadza dodatkowe ograniczenia wykonywania otworów technologicznych w tarczy, wydłuża czas montażu konstrukcji.

Literatura

- [1] European convention for constructional steel work ECCS – Technical Committee 7 – Thin-walled, Cold Formed Sheet Steel in, Building – Technical Working Group 7.5 – Practical Improvement of Design Procedures 1995.
- [2] Bródka J., Garmcarek R., Miłaczewski K., Blachy faldowe w budownictwie stalowym, Arkady 1999.
- [3] Biegus A. Podstawy projektowania i oddziaływania na konstrukcje budowlane, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2014.
- [4] Davies J.M., A general solution for the shear flexibility of profiled sheets, Thin-Walled Structures No 4, 1986, pp. 4-68.
- [5] Eslay I.T., McFarland D.E., Buckling of light-gauge corrugated metal shear diaphragms, October 1978. Structural Devison, 95, No ST7, p.1497-1516, July 1969.
- [6] PN-EN 1991-1-1:2004. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [7] PN-EN 1991-1-3:2005. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne. Obciążenia śniegiem.
- [8] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [9] PN-EN1993-1-3:2008 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [10] PN-EN 1090-2 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych. PKN, Warszawa 2009.
- [11] SOFISTIK 2020, Licencja: Stalbet Wielkopolska dr inż. Rajmund Ignatowicz.
- [12] RFEM DLUBAL, Licencja: Poltebud dr inż. Jan Gierczak.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8783

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Gierczak Jan, Ignatowicz Leszek Rajmund, Kożuch Maciej, 2020, Stan przedawaryjny dźwigara kratowego usztywnionego blachą trapezową. „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8783

Streszczenie: W artykule przedstawiono stan przedawaryjny dźwigara kratowego budynku maszynowni. Przeprowadzono dyskusję na temat zasadności zastosowania obudowy z blachy trapezowej jako elementu konstrukcyjnego. Rozważania te oparto na podstawie symulacji numerycznych wykonanych obliczeń wg literatury przedmiotu. W artykule sformułowano wymogi oraz opisano błędy wynikające z trudności poprawnego wykonywania usztywnień – przepon w postaci blachy trapezowej podczas realizacji.
Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, tarcza dachowa, stężenia, blacha faldowa, płatwie kratowe, stężenia

Abstract: Failure of a truss girder stiffened with trapezoidal steel sheeting

The article presents the pre-failure of the lattice girder of the engine room building. There was a discussion on the validity of using a trapezoidal sheet metal casing as a structural element. These article formulates additional requirements and describes errors resulting from the difficulty of correct execution of stiffeners.

Keywords: steel structures, roof plate, bracing, corrugated sheet, lattice purlins, bracing