

Badania przyczyn awaryjnego stanu technicznego płatwi hali stalowej Research of failure technical state of purlins in the steel hall

Antoni Biegus¹

¹ Katedra Konstrukcji Metalowych, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: antoni.biegus@pwr.wroc.pl

¹ Department of Metal Structures, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: antoni.biegus@pwr.wroc.pl

Streszczenie

W badanej hali stalowej przyjęto systemowe rozwiązanie płatwi z kształtowników Z (giętych z blach na zimno) oraz ich ściągów (z prętów pełnych). Okresowa kontrola stanu technicznego hali ujawniła deformacje, wygięcia i skręcenie płatwi oraz wybożenia ściągów. Stan techniczny konstrukcji wsporczej obudowy dachu był awaryjny. W pracy przedstawiono wyniki badań nośności i sztywności konstrukcji wsporczej obudowy dachu, których celem była identyfikacja przyczyn powstania jej destrukcji awaryjnej.

Abstract

In the examined steel hall, the system of purlins made of Z cold-formed profiles and bar ties has been used. A periodic inspection of the technical state of the hall reveals some deformations, bends and torsion of purlins and buckling of ties. The condition of the roof deck supporting structure posed an imminent failure hazard. The results of tests on the resistance and rigidity of the roof covering structure, carried out to clarify the causes of described state have been performed.

Słowa kluczowe: hala stalowa, platew Z gięta na zimno, zagrożenia awaryjne
Keywords: steel hall, Z cold-formed purlins, prior-failure state.

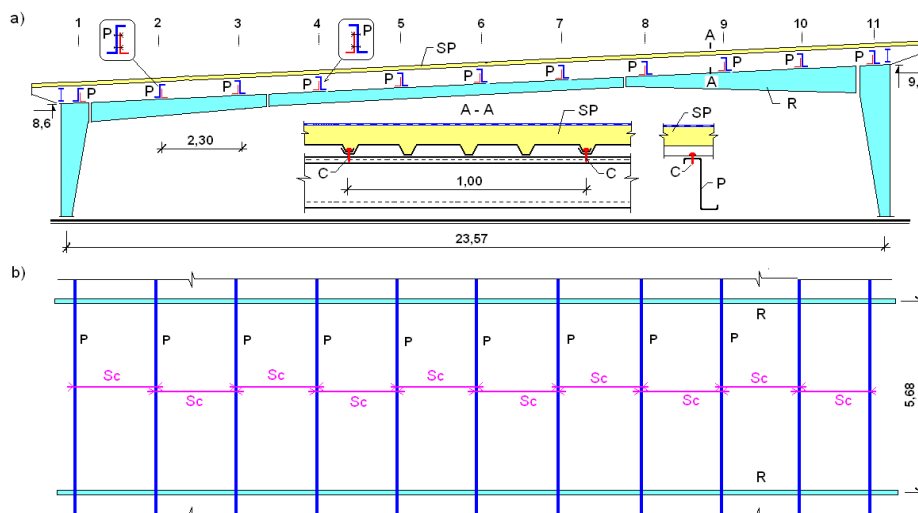
1. Opis wad i uszkodzeń konstrukcji wsporczej płyt dachowych

Badany budynek jest jednonawową halą stalową (rys. 1). Jej ustrojami nośnymi są pełnościenne ramy R. Płatwie P o przekroju Z (gięte na zimno BP/Z250×75×65×1,5) zaprojektowano jako wieloprzęsłowe, uciągane zakładkowo. W środku ich rozpiętości połączono je ściągami Sc, o przekroju z prętów ϕ 10 mm. Pokrycie dachu stanowią płyty warstwowe KS1000 Top-Dek, połączone z płatwiami P za pomocą tylko 2-ch śrub samowierzących C - ϕ 6,3 mm (ich rozstaw wynosił 1,0 m).

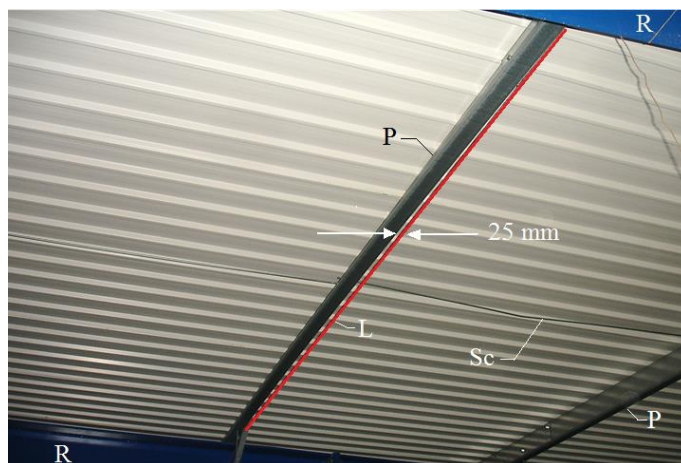
1. Describe of the defect and damages of the roof covering structures

The examined building is a one-nave steel hall (Fig. 1) made from solid frames R. The purlins P with Z cross-section (cold-formed; BP/Z250×75×65×1,5) have been design-ned as multi-span lapped system. In the midspan, the bar ties Sc, having cross section made up of ϕ 10 mm, have been applied.

The roof covering has been made of sandwich panels KS 100 Top-Dek, fixed to the purlins P by 2 self-drilling bolts C - ϕ 6,3 mm (the distance between fasteners was 1,0 m).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny (a) oraz schemat konstrukcji wsporczej obudowy dachu hali (b)
Fig. 1. Cross section (a) and schematic of roof deck supporting structure (b)



Rys. 2. Przykład wygiętej i skręconej płatwi P oraz wyboczonego ściągu Sc, L - linka
 Fig. 2. Example of curved and twisted P-purlin with buckled Sc-tie, L - cable

W trakcie kontroli stanu technicznego hali stwierdzono wygięcia i skręcenia płatwi P oraz ściągów Sc (rys. 2), co świadczyło o ich awaryjnym stanie technicznym. Pomiary prostoliniowości płatwi P wykazały, że ich poziome wygięcia wynosiły nawet $e = 25 \text{ mm}$ i były one większe o 317% od dopuszczalnych wg [4] $y_{ult} = \frac{1}{1000} \cdot 5680 \approx 6 \text{ mm} < e = 25 \text{ mm}$. Należy podkreślić, iż wygięcia i skręcenia płatwi P miały charakter trwałe i dotyczyły rozciąganej części ich przekrojów, co świadczyło o ich skręcaniu. Ponadto stwierdzono wyboczenia plastyczne 8 ściągów Sc (rys. 2 - można wnioskować, że były one ściskane) a także występowanie „poluzowanych” ściągów Sc. W połączeniach ściągów Sc z płatwiami P występowały odkształcenia plastyczne śródników płatwi P, o „głębokości” 10÷20 mm. Powstały one w wyniku dużych przemieszczeń poziomych wywołanych skręcaniem płatwi.

2. Analiza przyczyn awaryjnego stanu płatwi i ściągów

Nośności płatwi obliczono zakładając, że są one usztywnione „bocznie” przez połączenie ich półki górnej z tarczą z blachy fałdowej. Niestety tej bardzo ważnej informacji nie podano w opisie tablic nośności płatwi w katalogu producenta tych wyrobów. Gięty na zimno z blach kształtownik Z o niesymetrycznym przekroju otwartym i cienkich ściankach, wykazuje małą sztywność na skręcanie swobodne oraz znaczną wrażliwość na wyboczenie miejscowe i dystorsyjne. W konsekwencji tego jest elementem o bardzo małej nośności na zwichrzenie. By mógł być efektywnie stosowany jako element zginany, wymaga zabezpieczenia przed zwichrzeniem i skręcaniem [2], [3].

Pełne ciągłe stężenie „boczne” płatwi można uzyskać za pomocą m.in. blachy fałdowej, połączonej w sposób ciągły (gęsty) ich dolnymi fałdami z pasem górnym płatwi. Blacha fałdowa krępuje przemieszczenia liniowe i kątowe przylegającej stopki płatwi, co wydatnie podnosi jej nośność z warunku zwichrzenia. Zgodnie z [6] płatew w miejscu połączenia z blachą fałdową można uważać za stężoną w płaszczyźnie poszycia (zabezpieczoną przed zwichrzeniem) jeśli spełniony jest warunek

$$S_i \geq S_{\min} = \left(EI_{\omega} \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_y \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2}, \quad (1)$$

During the inspection both the bends and torsions of P-purlins and Sc-ties (Fig. 2) were found, indicating the state of emergency. The measurement of the P - purling has shown out of the straightness of about $e = 25 \text{ mm}$, i.e. 317% of ultimate value according to [4] $y_{ult} = \frac{1}{1000} \cdot 5680 \approx 6 \text{ mm} < e = 25 \text{ mm}$. It should be noted, that the permanent bends and torsion of P-purlins have occurred at the tensile portion of their cross-sections, what is characteristic for torsional type of deformation. Moreover, the yield buckling of 8 Sc-ties has been found (Fig. 2 - as for bars being under compression) as well as some loosened ties Sc. The joints between Sc-ties and P-purlins have been affected by yield deformations of 10÷20 mm of the depth, visible on the purlin's web and caused by significant horizontal displacements due to purlin's torsion.

2. Analysis of cause of the failure state of purlins and ties

Purlin load-bearing capacities were calculated assuming that they are laterally braced through the connection of their top flange with a plate made of box profile metal sheeting. Unfortunately, this critical piece of information was not included in the description of the purlin load-bearing capacity tables in the manufacturer catalogue. Cold-formed section Z, having an asymmetric open cross section and thin walls, shows low free torsion rigidity and high susceptibility to local and distortional buckling. As a result, it is a member with a very low warping capacity. In order for it to be effectively used as a bending member it needs to be protected against warping and torsion [2], [3].

Full continuous lateral bracing of the purlins can be obtained by means of, e.g., profiled sheets with their bottom waves continuously (densely) joined with the top flange of the purlins. Corrugated sheet constrains the linear and angular displacement of the adjoining flange, which considerably increases the load-bearing capacity of the purlins, stemming from the warping condition. According to [6], a purlin in the place where it is connected with profiled sheet can be regarded as braced (protected against warping) in the sheathing plane if the following condition is satisfied

gdzie: $S_i = S_1$ - sztywność postaciowa (na jednostkę długości belki) poszycia (tarczy) z blachy faldowej połączonej z płatwią (belką) w dolinie każdej faldy, która wynosi

$$S_i = S_1 = 1000\sqrt{t^3} \left(50 + 10\sqrt[3]{b_{\text{roof}}} \right) \frac{s}{h_w} \quad (2)$$

W (1) i (2) przyjęto oznaczenia wg [6]. W przypadku badanego dachu sztywność S_{min} płatwi P obliczona wg (1) wynosi $S_{\text{min}} = 2605 \text{ kNm/m}$.

Sztywność postaciowa S_1 tarczy z blachy okładziny wewnętrznej płyty warstwowej, jeśli byłaby ona połączona w każdej faldzie z płatwią P, obliczona ze wzoru (2) wynosi $S_1 = 8139 \text{ kNm/m} > S_{\text{min}} = 2605 \text{ kNm/m}$ - warunek (1) stężenia płatwi jest spełniony.

W badanej hali wymóg ten nie był spełniony, gdyż łączniki występowały tylko w co 5-tej faldzie (rys. 1; ich rozstaw wynosił 1,0 m). O wadze gęstości w/w połączeń w stężeniu płatwi świadczy fakt, że gdy jest ono w co 2-giej faldzie, to do obliczeń w (1) należy przyjąć aż 5-cio krotnie mniejszą sztywność postaciową poszycia [6]. W takim przypadku w badanej hali warunek stężenia płatwi P nie byłby spełniony, gdyż

$$S_2 = 0,2S_1 = 0,2 \cdot 8139 = 1628 \text{ kNm/m} < S_{\text{min}} = 2605 \text{ kNm/m} \quad (3)$$

Zidentyfikowany w badaniach identyfikacyjnych brak dostatecznie gęstego połączenia płatwi P z poszyciem sprawia, iż nie były one zabezpieczone przed zwichrzeniem i skręcaniem. Konsekwencją tego jest bardzo mała wytrzymałość płatwi P na zginanie i mała sztywność na przemieszczenia poziome, co tłumaczy ich wygięcia i skręcenia oraz wyboczenie plastyczne ściągów Sc. Obliczenia tych płatwi P, wykazały, że ich nośność od prognozowanych obciążeń jest przekroczona o 144%.

Wiotkie ściągi Sc nie spełniały zadania tężnika, gdyż nie ograniczały: przemieszczeń bocznych pasa dolnego płatwi i skręcania przekroju. Należało w strefach okapowej i kalenicowej dachu dać dodatkowe pręty skośne do osi płatwi, połączone z węzłami rygla ramy R. Ponadto punktowe „przytrzymanie” (gdyby zastosowano w/w pręty skośne) jakim jest ściągi Sc, nie stanowi ograniczenia na skręcanie płatwi. Tężnik międzypłatwiowy i jego połączenie z płatwią, muszą przenosić skręcanie stężanego elementu. Jego zadaniem jest m.in. zapobieganie wyboczeniu skrętnemu płatwi od ssania wiatru.

3. Uwagi wnioski końcowe oraz wytyczne naprawy konstrukcji wsporczej pokrycia dachowego

Zastosowane rozwiązania konstrukcyjne nie zapewniały płatwiom P dostatecznej sztywności na przemieszczenia w płaszczyźnie połączy dachu i ograniczenia obrotu ich przekrojów w przęśle i na podporze. Wady wynikają głównie z

- niedostatecznie gęstego połączenia dachowych płyt warstwowych z płatwiami P,
- braku połączeń podłużnych dachowych płyt warstwowych między sobą,
- zastosowania ściągów Sc, które nie ograniczają przemieszczeń bocznych i skręcania płatwi (brak prętów skośnych w systemie stężającym i tężników międzypłatwiowych).

Konsekwencją tego była ich bardzo mała wytrzymałość na zginanie i mała sztywność na przemieszczenia poziome - niedostateczna do przeniesienia prognozowanych obciążeń. Przekroczenie nośności płatwi, wynikające tylko z braku ich usztywnienia, wynosiło 144% i nie spełniały one wymagań wytrzymałościowych wg [5], [6].

where: $S_i = S_1$ – the shape rigidity (per beam unit length) of the sheathing (plate) made of profiled metal sheet joined with the purlin (beam) in the trough of each of the waves, amounting to

The symbols in (1) and (2) were adopted in accordance with [6]. In the case of the investigated roof, rigidity S_{min} of purlins P, calculated from (1), amounts to $S_{\text{min}} = 2605 \text{ kNm/m}$.

Shape rigidity S_1 of a plate made from the sandwich panel inner liner metal sheet, if the latter in each of its waves was joined with purlin P, calculated from formula (2) amounts to $S_1 = 8139 \text{ kNm/m} > S_{\text{min}} = 2605 \text{ kNm/m}$ - purlin bracing condition (1) is satisfied.

In the tested hall this condition was not fulfilled, because only each fifth fold was fixed (Fig. 1; the distance between fasteners was 1,0 m). The importance of connector spacing density for the bracing of the purlins is indicated by the fact that when a connector is in every other wave, then as much as fivefold lower shape rigidity of the decking needs to be assumed for the calculations using (1) [6]. In such a case, the purlin bracing condition would not be satisfied since

Because of the identified insufficiently dense spacing of the joints between purlins P and the roof decking the purlins were not protected against warping and torsion. As a result, purlins P had very low flexural rigidity and very low horizontal displacement rigidity, which explains their flexures and torsions and the plastic bucklings of ties Sc. The calculated resistance of such purlins was exceeded in comparison with predicted design loads of 144 %.

Flabby Sc-ties did not brace the purlins, allowing to both the side displacements of the purlin's bottom flange and to torsion of the cross section. As a proper protection, the additional angled ties should be applied in the ridge and eave region of the frame R rafter. Pointly arrested (in case of angled ties using) purlin is not protected against torsion. The bracing between purlins and their mutual connection has to transfer the torsion, e.g. to prevent torsional buckling of the purlin under wind suction.

3. Conclusions and guidelines for repairing roof deck supporting structure

The applied constructional solutions did not provide the both sufficient rigidity of the purlins in the roof plane and the reduction of torsion at the region of midspan and bearing cross-sections. Observed defects were mainly caused by:

- insufficiently dense sandwich roof panels to P-purlins connections,
- no longitudinal connections between sandwich roof panels,
- applying of Sc-ties, that did not reduce the side displacement and the purlins' torsion as well (the lack of angled ties and the proper bracings between purlins).

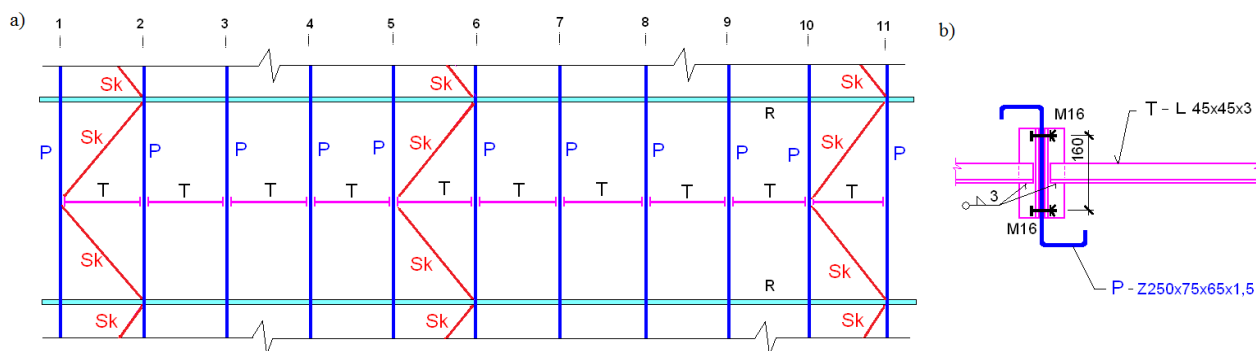
As a result, their bending strength and rigidity against horizontal displacements were very low - insufficient to carry the predicted loads. The exceedance of load capacity by the purlins, due to only the lack of their bracing amounted to 144% and the purlins did not meet the strength standards as specified in [5], [6].

W związku z niedostateczną nośnością zaproponowano naprawę i wzmocnienie konstrukcji wsporczej obudowy dachu badanej hali. Polega ona m.in. na skonstruowaniu skutecznego usztywnienia „bocznego” płatwi P, zarówno w płaszczyznach ich pasów górnych, jak i pasów dolnych, w wyniku m.in. „zagęszczenia” połączeń płyt warstwowych z płatwiami P oraz rekonstrukcji ich systemu stężającego (rys. 3).

W celu zapewnienia płatwiom P sztywności „bocznej” na przemieszczenia i zwiększenia ich sztywności na obrót, należy połączyć każdą dolinę fałdy blachy płyty warstwowej z półką górną płatwi (wtedy odległość łączników tych połączeń wynosi 200 mm). Ponadto należy połączyć krawędzie podłużne blach sąsiednich płyt warstwowych (połączenia między podłużnymi brzegami płyt). Odległość tych łączników nie może być większa niż 500 mm. Do ich wykonania można zastosować jednostronne nity stalowo-stalowe (Fe/Fe), o średnicy $\phi 6$.

Because of the inadequate load capacity it was proposed to repair and strengthen the supporting structure of the roof deck by constructing an effective lateral bracing for purlins P in their top and bottom flange planes through, among other things, the denser spacing of the joints between the sandwich panels and the remodelling of their bracing system (Fig. 3).

In order to ensure lateral rigidity of the purlins against displacements and to increase their rotational rigidity each wave trough of the sandwich panel steel sheet with the top flange of the purlins (then the interconnector distance will amount to 200 mm). In addition, the longitudinal edges of the steel sheets of neighbouring sandwich panels should be joined together (connectors between the longitudinal edges of the panels). The interconnector distance in this case should not be larger than 500 mm. Blind steel-steel (Fe/Fe) rivets with diameter $\phi 6$ can be used to make the joints.



Rys. 3. Zaproponowany system konstrukcyjny stężeń płatwi P: Sk – pręt skośny, T – międzypłatwiowy tężnik przeciwskrętny
Fig. 3. Proposed structural system of braces for purlins P: Sk – diagonal bar, T – antitorsional purlin brace

Zaproponowano zrekonstruować system stężenia płatwi P, który pokazano na rys. 3. Składa się on z tężników międzypłatwiowych T (ograniczających skręcanie przekrojów poprzecznych płatwi P) i prętów skośnych Sk (z prętów $\phi = 10$ mm). W polach 1-2, 10-11 i 5-6 należy dać dodatkowe pręty skośne Sk. Należy je połączyć w środku rozpiętości płatwi P z ich środkami oraz z węzłami rygla ramy R, w miejscach oparcia płatwi na ryglu ramy. Ich zadaniem konstrukcyjnym jest zmniejszenie poziomych przemieszczeń płatwi P. Zastosowane w badanej hali wiotkie ściągi Sc płatwi P zaproponowano zastąpić międzypłatwiowymi tężnikami przeciwskrętnymi T, o rozwiązaniu pokazanym na rys. 3b. Ich zadanie konstrukcyjne polega na skutecznym ograniczeniu skręcania przekrojów poprzecznych płatwi P.

It was proposed to remodel the system bracing purlins P, as shown in Fig. 3. The system consists of purlin braces T (limiting the torsion of the cross sections of purlins P) and diagonal solid bars Sk ($\phi = 10$ mm). In fields 1-2, 10-11 and 5-6 additional diagonal bars Sk should be introduced and connected at half of the span of purlins P with their web and with the nodes of the girt of frame R in the places where the purlins rest on the frame girt. Their structural function is to reduce the horizontal displacements of purlins P. It was proposed to replace the pliant ties Sc with antitorsional purlin braces T, as shown in Fig. 3b. Their structural function is to effectively limit the torsion of the cross sections of purlins P.

Literatura • References

- [1] Biegus A., (2013), *Przyczyny przedawaryjnego stanu technicznego płatwi hali stalowej*, Budownictwo i Architektura 12(2), s. 173-180.
- [2] Biegus A., (2003), *Stalowe budynki halowe*, Arkady, Warszawa.
- [3] Bródka J., Broniewicz M., Gizejowski M., (2006), *Kształtowniki gięte. Poradnik projektanta*, Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów.
- [4] PN-B-06200:2002 Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki wykonania i odbioru. Wymagania i badania.
- [5] PN-B-03207:2002 Konstrukcje stalowe. Konstrukcje z kształtowników i blach profilowanych na zimno. Projektowanie i wykonanie.
- [6] PN-EN 1993-1-3:2008 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.