

EDYTA PIĘCIORAK*, MAREK PIEKARCZYK**

LEKKIE POKRYCIE DACHOWE Z IZOLACJĄ POD BLACHĄ TRAPEZOWĄ W ŚWIETLE NORMY EC-3

LIGHT ROOF COVERING WITH INSULATION UNDER TRAPEZOIDAL SHEETING. CALCULATIONS AFTER EC-3

Streszczenie

W artykule przeprowadzono analizę doświadczalną zachowania się pod obciążeniem grawitacyjnym zespołu elementów tworzących nowoczesne przekrycie dachowe, alternatywne do rozwiązań tradycyjnych. W modelu tradycyjnym pokrycie z blachy trapezowej zostało ułożone na konstrukcji wsporczej – płatwi w sposób bezpośredni, a w modelu z rozwiązaniem alternatywnym pomiędzy blachę trapezową a płatwie wstawiono warstwę izolacyjną z wełny mineralnej. Wyniki badań doświadczalnych wykazały doraźnie korzystny wpływ izolacji termicznej na nośność badanego (alternatywnego) typu pokrycia. Dane uzyskane eksperymentalnie i analitycznie wykazały natomiast, że nośności elementów pokrycia w przypadku rozwiązań z umieszczoną między nimi wełną mineralną mogą być wyznaczane w sposób bezpieczny z użyciem procedur podanych w EC-3 [10].

Słowa kluczowe: blacha trapezowa, płatwie zimnogięte, izolacja termiczna, lekkie pokrycie

Abstract

This paper presents experimental analysis of interacting elements forming the modern and traditional roof covering under gravity loading. The traditional model is consists of the trapezoid sheet fixed directly to the purlins. The alternative model is composed of the trapezoid sheet, roof purlins and additionally thermal insulation between them. The experimental results showed temporarily positive influence of the thermo-insulation on the carrying-capacity in case of the latter roof-covering. The results obtained in the experimental way and calculations showed that the carrying-capacities of roof-covering for thermo-insulation placed between the roof purlins and the trapezoid sheet would be designed safety according to the rules given by the EC-3 [10].

Keywords: trapezoid sheet, cold – formed purlins, thermal insulation, light covering

^{*} Dr inż. Edyta Pięciorak, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza.

^{**} Dr hab. inż. Marek Piekarczyk, prof. PK, Katedra Konstrukcji Metalowych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Płatwie z kształtowników giętych z blach na zimno o różnych przekrojach poprzecznych znajdują obecnie szerokie zastosowanie między innymi jako elementy podparcia pokryć z blach profilowanych [6, 7]. Blachy trapezowe mocowane w takim przypadku bezpośrednio do górnych stopek kształtowników przy spełnieniu stosownych wymogów EC-3 [10] w zakresie nośności i sztywności blachy trapezowej pozwalają na ogół zabezpieczyć płatwie dachowe przed utratą stateczności giętno-skrętnej [5]. Mamy wtedy do czynienia z nieocieplanym dachem płatwiowym, w którym występuje tylko jedna warstwa blachy – poszycie. Pokrycia dachowe zakładające użycie ocieplenia z miękkiej wełny mineralnej między blachą trapezową a płatwiami giętymi z blach na zimno stosowane są w ostatnich latach przez wiodące firmy z grupy wykonawców lekkich hal stalowych. Obecność elementu pośredniego w tego typu rozwiązaniach może wpływać na współpracę zespołu płatew – izolacja – blacha. Norma EC-3 [10] nie podaje wprost wytycznych odnośnie do projektowania tego typu rozwiązań, pozwala jednak na określenie nośności i sprawdzenie użytkowalności konstrukcji lub ich części na podstawie odpowiednich badań zgodnie z załącznikiem A tej normy [10]. Ocena wpływu warstwy izolacyjnej na stopień zabezpieczenia płatwi przez pokrycie blaszane przed zwichrzeniem oraz na pracę łączników, a tym samym na nośność całego przekrycia, była celem wykonanych w ramach pracy doktorskiej [8], a przedstawionych poniżej, badań doświadczalnych. Opierając się na procedurach normowych EC-3 [10], określono ze względu na SGN i SGU obciążenie graniczne dla badanych modeli doświadczalnych. Otrzymane wyniki analityczne zweryfikowano z danymi uzyskanymi podczas badań doświadczalnych.

2. Badania doświadczalne zespołu konstrukcyjnego pokrycia płatwiowego

2.1. Przedmiot badań

Badaniom poddano dwa modele stanowiące fragmenty konstrukcji dachu płatwiowego lekkich hal magazynowych, dobrane tak, aby uzyskać co najmniej jedno pełne pole oddziaływań między wolno podpartą płatwią a pokryciem blaszanym. W modelu BB pokazanym na rysunku 1 pokrycie z blachy trapezowej zostało przymocowane do konstrukcji wsporczej – płatwi w sposób bezpośredni, a w modelu BIB pokazanym na rysunku 2 pomiędzy blachę trapezową a płatwie wstawiono warstwę izolacyjną z wełny mineralnej. Elementy modeli dobrano na podstawie istniejących rozwiązań systemowych i obliczeń normowych [1, 9, 10] tak, aby możliwie dokładnie odwzorować ich rzeczywiste warunki pracy. Zastosowane elementy składowe (z wyjątkiem warstwy izolacyjnej), aparatura badawcza, sposób realizacji obciążenia były takie same zarówno dla modelu BB, jak i BIB.

2.2. Opis modelu badawczego

Płatwie pokrycia dachowego przyjęto z giętych z blach na zimno zetowników Z 250 o grubości 2 mm, wykonanych ze stali o podwyższonej wytrzymałości S350GD, ocynkowanych fabrycznie (Zn 275 g/m²).

Pokrycie dachowe wykonano z blachy trapezowej BTD 45/1000 o grubości 0,5 mm, wykonanej ze stali S280GD powleczonej po obu stronach poliestrem SP25.

Wolno podparte płatwie Z 250 przymocowane zostały przegubowo za pośrednictwem kątowników podporowych i dwóch śrub M16 (rys. 3) do pełniącego rolę rygla dwuteownika HEB 100 (2), zamocowanego do konstrukcji stendu (1) (rys. 4). Między ryglem z HEB 100 a dolną stopką płatwi pozostawiono prześwit (10 mm) zgodnie z technologią montażu dla płatwi.

Blachę trapezową BTD 45/1000 zamocowano do każdej płatwi wkrętami samowiercącymi OC-63038 (model BB) i OC-63045 (model BIB) z podkładką z EPDM w rozstawie co 333 mm. Arkusze blach trapezowych zamocowano między sobą na zakład wkrętami samowiercącymi OCW-48016 z podkładką z EPDM w rozstawie co 450 mm.











Rys. 3. Sposób ułożenia izolacji z wełny mineralnej Fig. 3. Application of thermal insulation



Izolację dachu stanowiła Uni-Mata Alu (mata z wełny mineralnej otrzymana z włókien szklanych) o grubości 100 mm, jednostronnie od spodu pokryta folią aluminiową, tworzącą dodatkowy ekran cieplny oraz pełniącą rolę paroizolacji. Maty izolacyjne w postaci pasków o szerokości 400 mm umieszczone zostały pomiędzy blachami trapezowymi a płatwiami dachowymi, tak jak to pokazano na rysunku 3. Przeprowadzono badania 8 próbek zastosowanej izolacji cieplnej, mające na celu określenie ich charakterystyk mechanicznych przy ściskaniu wg [3]. Średnia pomierzona w modelu grubość warstwy izolacyjnej między płatwią a blachą w otoczeniu łącznika mocującego blachę do płatwi i dalej na jej stopce była bliska zeru, natomiast w środku odcinka pomiędzy łącznikami wynosiła 6 mm. Pomiary ściśliwości wełny w modelu pozostały w dobrej zgodności z wynikami uzyskanymi podczas badania próbek przy ściskaniu dla siły F = 20 kN, wynikającej z technologii dokręcania łączników.

2.3. Realizacja obciążenia

Badane modele poddane zostały obciążeniom zewnętrznym działającym w dwóch kierunkach: pionowym i poziomym zgodnie z rysunkiem 4 i 5. Pomiaru wartości obciążenia dokonywano z użyciem czujników siły (9, 10). Obciążenie pionowe realizowane za pomocą siłownika hydraulicznego (7) przekazywane było na stalowy trawers IPE 240 długości 3 m (4), a następnie za pośrednictwem 8 dwuteowników IPE 140 długości 6 m każdy (3) na badany fragment pokrycia. Symulacja komputerowa potwierdziła dostateczną sztywność takiego rusztu belkowego dla przekazania obciążenia na blachę bez odkształceń samego rusztu. Obciążenie poziome realizowane również za pomocą siłownika hydraulicznego (8) przekazywane było na położoną centralnie belkę ceową z twardego drewna o długości 2 m (5), a z niej na model badawczy.

Obciążenie modelu wprowadzono, wzorując się na załączniku A4 normy [10] oraz pracy [4], które przewidują kilka etapów obciążania.

W pierwszym etapie model badawczy poddano badaniom wstępnym, polegającym na obciążaniu modelu do poziomu sumarycznego obciążenia charakterystycznego (V1 = 33 kN, H1 = 2,4 kN). Następnie model został odciążony. Wartość obciążenia dla tego etapu ustalono na podstawie analizy warunków stanu granicznego nośności i użytkowalności dla belki i blachy, obliczonych według przepisów normowych [10]. Warunkiem decydującym o przyjętym tu obciążeniu okazał się warunek użytkowalności płatwi (patrz: rozdział 3).

W drugim etapie, odpowiadającym badaniom odbiorczym (dopuszczającym), przyłożono obciążenie pionowe ustalone jako suma: $1,0 \times$ rzeczywisty ciężar własny, $1,15 \times$ pozostałe obciążenia stałe, $1,25 \times$ obciążenia zmienne (V2 = 38 kN, H2 = 2,9 kN). Obciążenie to zostało utrzymane przez godzinę, a następnie model został odciążony.

W trzecim etapie, odpowiadającym badaniom wytrzymałościowym dla blachy, przyłożono obciążenie aż do wartości równej obciążeniu charakterystycznemu, przyjętemu do badań wstępnych, zwiększonemu przez współczynnik bezpieczeństwa, tj. ostatecznie (V3 = 43 kN, H3 = 3,5 kN).

Czwarty etap badań polegał na dalszym obciążaniu modelu ponad wartość obliczeniową jak wyżej, aż do poziomu, przy którym model badawczy osiągnął nośność graniczną, tj. nie był zdolny do przeniesienia dalszego przyrostu obciążenia (V4 = 52 kN, H4 = 4 kN dla zespołu BB, V4 = 59 kN, H4 = 5 kN dla zespołu BIB). Wartość obciążenia poziomego ustalono za każdym razem jako: H = 1/10 V (bez uwzględnienia ciężaru własnego modelu i rusztu obciążającego równego 9,4 kN).



Rys. 4. Fragment konstrukcji dachu na stanowisku badawczym

Fig. 4. Test model on stand in the Institute of Building Materials and Structures (CUT)



Rys. 5. Sposób przyłożenia obciążenia poziomego

Fig. 5. Application of horizontal loading

2.4. Zakres pomiarów

W trakcie badań dokonano pomiarów:

- ugięć blachy trapezowej w punktach I, J, N, W w środku rozpiętości modelu oraz płatwi pośrodku ich długości w punktach A, K, E, S i przy podporach w punktach M, D, G i L, C, F (rys. 6),
- przemieszczenia poziomego dolnej stopki płatwi wewnętrznej (II) w środku jej rozpiętości w punkcie B, Q (rys. 6),
- odkształceń pasów T1, T2 i środnika R3 płatwi wewnętrznej (II) w środku jej rozpiętości oraz blachy trapezowej przy podporze pośredniej R5 i w punkcie o maksymalnym ugięciu w środku rozpiętości modelu R4 (rys. 7).



Rys. 6. Lokalizacja czujników zegarowych (kółka puste) i indukcyjnych (kółka pełne) Fig. 6. Placement of dial (empty dots) and induction (full dots) gauges



Rys. 7. Lokalizacja pojedynczych tensometrów (T) i rozet prostokątnych (R)

Fig. 7. Placement of a single resistance strain gauge (T) and rectangular rosettes (T)

2.5. Wyniki badań doświadczalnych

Pomiar ugięć blach i belek dla modelu BB i BIB ze względu na ryzyko uszkodzenia aparatury badawczej prowadzony był i rejestrowany do wartości obciążenia pionowego V = 49,60 kN i poziomego H = 3,90 kN.

W trakcie obciążania mierzonymi wielkościami były między innymi maksymalne ugięcie płatwi środkowej (II) w punkcie A oraz przemieszczenie poziome jej dolnej półki w punkcie B w środku rozpiętości. Na rysunku 8 przedstawiono ścieżki równowagi dla wyżej wspomnianych punktów, tj. zależności ugięcia od jednoparametrowego obciążenia V(H). Przeprowadzone badania umożliwiły również wyznaczenie i porównanie ścieżek równowagi V(H)-u dla blachy trapezowej m.in. w punkcie N, J przedstawionych na rysunku 9.

W ramach przeprowadzonego eksperymentu w trakcie realizacji obciażenia dokonano także wizualnej oceny stanu zniszczenia blachy, belek i łączników. Pierwsze wyraźne, lokalne, trwałe odkształcenia blachy trapezowej (zarówno dla modelu BB, jak i BIB) w postaci wybrzuszeń zauważono na podporze pośredniej dla sił V = 38 kN, H = 3 kN. Wraz ze wzrostem wartości sił V i H zaobserwowano lokalne wybrzuszenia półek ściskanych blach określanych w literaturze jako yield eye, rozpoczynające się w miejscu przyłożenia obciążenia (gdzie przekrój był jednocześnie wyteżony maksymalnym momentem zginającym i dociskiem). Wybrzuszenia te pojawiły się najpierw w skrajnych arkuszach blachy pod skrajnymi belkami podłużnymi (IPE 140) i postępowały wzdłuż nich do środka modelu (rys. 10). Dalszy przyrost obciążenia powodował powiększanie się wybrzuszenia półek blachy tak, że przy obciążeniu bliskim granicznemu wybrzuszeniu ulegały także środniki blachy w strefie docisku. Nie stwierdzono natomiast poważniejszych oznak trwałego zniszczenia belek mimo dużych przemieszczeń giętno-skrętnych. W trakcie eksperymentu przekroje poprzeczne belek uległy wprawdzie deformacji (od zginania i skręcania), ale zachowały charakter sprężysty. Nie dostrzeżono poważniejszych uszkodzeń łączników i otworów. Opisany powyżej sposób zniszczenia modeli przez wyraźne uplastycznienie się blachy trapezowej w strefie maksymalnych sił przekrojowych (rys. 10) zaobserwowano w obydwu badanych modelach z tą różnicą, że w przypadku zespołu BB rozwój lokalnych wybrzuszeń półek postępował gwałtowniej w stosunku do modelu BIB w związku z łagodzącą efekt zgniotu obecnością wełny mineralnej.



Rys. 8. Ścieżki równowagi statycznej dla belki II w punkcie A i B dla modelu BB i BIB Fig. 8. Paths of equilibrium for the II purlin in point A and B for the model BB and BIB



Rys. 9. Ścieżki równowagi statycznej dla blachy w punkcie W i J dla modelu BB i BIB Fig. 9. Paths of equilibrium for the sheet in point W and J for the model BB and BIB



Rys. 10. Forma zniszczenia badanych fragmentów pokrycia dachowego z izolacją Fig. 10. The mode of failure for the experimental model with insulation

2.6. Wnioski z badań doświadczalnych

Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały różnicę w nośności badanych modeli. Nośność modelu BIB równa 59 kN okazała się większa o około 7 kN (12%) od nośności modelu BB równej 52 kN. Należy wiązać to z nieco większym w modelu BIB wskaźnikiem zginania, wynikającym z przesunięcia się osi obojętnej układu BIB, skutkiem obecności izolacji w stosunku do modelu bez izolacji BB. Na podstawie wyników tych analiz można stwierdzić, iż obecność w modelu BIB izolacji termicznej umieszczonej między płatwiami zimnogiętymi a blachą fałdową nie powoduje obniżenia nośności pokrycia w warunkach obciążenia doraźnego (testowego). Nierozpoznany jest wpływ długotrwałej eksploatacji izolacji termicznej na pracę zespołu, ale w związku z dużą ściśliwością wełny mineralnej w otoczeniu łączników można wstępnie ocenić ten wpływ jako niewielki.

Izolacja termiczna z wełny mineralnej między płatwiami a blachą fałdową powoduje wyraźnie większe przemieszczenia poziome dolnej półki płatwi II w środku jej rozpiętości w punkcie B (patrz: rys. 9) w stosunku do modelu bez izolacji. Osłabia to pozytywny efekt wzrostu nośności modelu BIB opisany wcześniej. W związku z tym trzeba rozważyć zastosowanie podwieszeń lub systemu stężającego w płaszczyźnie dolnych półek płatwi. Przeprowadzona w trakcie realizacji eksperymentów wizualna ocena zachowania się belki II pod obciążeniem potwierdziła większe przemieszczenia poziome jej dolnego pasa. Nie zauważono wpływu izolacji termicznej na ugięcia pionowe płatwi II w środku jej rozpiętości w punkcie A (patrz: rys. 8) w stosunku do modelu BB.

Analiza wpływu wełny mineralnej na ugięcia pionowe blachy fałdowej wykazała do poziomu obciążenia pionowego V równego około 50 kN i poziomego H około 4 kN większe ugięcia blachy dla zespołu BIB w stosunku do zespołu BB. Porównując ścieżki równowagi statycznej obu badanych modeli (patrz: rys. 9), można jednak stwierdzić, iż pomimo mniejszych ugięć blachy w przypadku modelu BB tuż przed osiągnięciem wyżej wymienionego obciążenia pionowego i poziomego następował gwałtowny ich wzrost prowadzący do szybkiego zniszczenia blachy przy obciążeniu V = 52 kN (świadczy o tym zaokrąglony kształt krzywej równowagi statycznej), przy dalszym równym przyroście ugięć w modelu BIB (widocznym w postaci krzywej pochylonej, niezaokrąglonej). Wynikający z porównania ścieżek równowagi statycznej, a opisany powyżej sposób zachowania blachy fałdowej pod wzrastającym obciążeniem, pokrywał się z przeprowadzoną podczas badań doświadczalnych wizualną oceną jej zniszczenia.

Analiza wyników przedstawionych na rys. 8 wykazała większe o 5 mm przemieszczenie poziome płatwi w punkcie B dla modelu doświadczalnego w stosunku do modelu numerycznego BB. Dla rozważanych przypadków odnotowano natomiast zbliżone ugięcia w punkcie A. Ścieżki równowagi statycznej V(H) - v dla belki II w punkcie pomiarowym B w zakresie obciążenia od 9,4 kN (obciążenie ciężarem własnym) do 50 kN (odstawienie czujników) dobrze odwzorowywały ich zachowanie w stosunku do badań doświadczalnych zespołu BB.

3. Obliczenia analityczne

3.1. Wymiarowanie blachy trapezowej BTD 45/1000

Jednym z najprostszych sposobów doboru blach trapezowych jest wykorzystanie katalogów nośności opracowanych przez producentów tych blach. W katalogach do projektowania blach trapezowych podane są dopuszczalne równomiernie rozłożone obciążenia wyznaczone z przyjętych przez producentów warunków granicznych nośności i użytkowania. W tabeli 1 w kolumnach 4 i 5 przedstawiono wartości dopuszczalnego obciążenia poprzecznego, jakie może działać na zastosowaną w przedstawionych w rozdziale 2 badaniach doświadczalnych dwuprzęsłową blachę trapezową BTD 45/1000 w zastosowanym tu ułożeniu negatywowym [2]. Katalogi nośności maja jednakże charakter pomocniczy. W przedmiotowym zakresie projektowania pokryć z blach od 1 kwietnia 2010 r. obowiązuje norma europejska PN-EN -1993-1-3:2006 [10]. Wymiarowanie blachy trapezowej BTD 45/1000 ze względu na SGN i SGU przeprowadzono wg tych właśnie wytycznych. Do obliczeń przyjęto schemat belki dwuprzęsłowej jak na rysunku 11. Wyznaczenie przekroju współpracującego blachy trapezowej BTD 45/1000 przedstawiono w załączniku Z5 pracy [8]. Obliczenia przeprowadzono dla obciążenia granicznego blachy (zał. 6, 5 pracy [8]) wynikającego z katalogu nośności (patrz: tab. 1) wynoszącego 1,53 kN/m² oraz dla maksymalnej wartości obciążenia spełniającej warunki normy EC-3 [10] wynoszącego 2,39 kN/m². Obciażenia graniczne wyznaczane są w zależności od minimalnej szerokości oparcia blachy trapezowej na podporze. Dla wartości podanych w tab. 1 wynoszą odpowiednio dla podpory skrajnej 40 mm i pośredniej 80 mm.

Tabela 1

Grubość nominalna blachy t _{nom} [mm]	Ilość przęseł	Rozpiętość między podporami [m]	Graniczne obciążenie SGN [kN/m²]	Graniczne obciążenie SGU [kN/m²]
1	2	3	4	5
0,5	2	1,5	1,53	1,53

Wartość granicznego obciążenia dla blachy trapezowej BTD 45/1000 (negatyw) [2]

Do obliczeń przyjęto współczynnik sprężystości podłużnej E = 210 GPa oraz granicę plastyczności $f_{yb} = 280$ MPa. Wartości momentów oraz reakcji podpór (rys. 11) dla przyjętego układu belki dwuprzęsłowej dla obciążenia granicznego $q_d = 1,53$ kN/m² (wynikającego z katalogu nośności) wynoszą:

$$M = 0.24$$
 kNm, $M_{B} = 0.43$ kNm, $R_{A} = R_{C} = 0.86$ kN, $R_{B} = 2.87$ kN.

Wartości momentów oraz reakcji podpór dla przyjętego układu belki dwuprzęsłowej dla maksymalnej wartości obciążenia spełniającej warunki normy EC-3 $q_d = 2,39$ kN/m² wynoszą:

$$M = 0.33$$
 kNm, $M_{R} = 0.59$ kNm, $R_{A} = R_{C} = 1.34$ kN, $R_{R} = 4.48$ kN.



Rys. 11. Schemat statyczny i wykres momentów zginających dla blachy fałdowej BTD 45/1000

Fig. 11. Statical scheme and bending moment diagram for the trapezoid sheet BTD 45/1000

3.1.1. Warunki SGN i SGU dla maksymalnej wartości obciążenia spełniającej warunki normy EC-3 [10]

Warunki SGN dla przekroju przęsłowego:

Sprawdzenie warunku nośności przekroju przy zginaniu zgodnie z załącznikiem Z6.3 pracy [8]:

$$\frac{M_{yEd}}{M_{cyRd}} = \frac{0.33 \,\text{kNm}}{0.57 \,\text{kNm}} = 0.58 \le 1 \tag{1}$$

gdzie:

 $M_{_{YEd}}$ – maksymalny moment zginający przęsłowy od obciążenia q_d = 2,39 kN/m², $M_{_{cyRd}}$ – nośność przekroju przy zginaniu.

Sprawdzenie warunku nośności środnika pod działaniem reakcji skrajnej zgodnie z załącznikiem Z6.4 pracy [8]:

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{1,34\,\text{kN}}{3,36\,\text{kN}} = 0,40 \le 1$$
⁽²⁾

gdzie:

 $F_{_{Ed}}$ – siła poprzeczna na podporze skrajnej od obciążenia q_d = 2,39 kN/m², $R_{_{wRd}}$ – nośność poprzeczna środnika.

Warunki SGN dla przekroju nad podporą pośrednią:

Sprawdzenie warunku nośności przekroju przy zginaniu zgodnie z załącznikiem Z6.6 pracy [8]:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{cy.Rd}} = \frac{0,59 \,\text{kNm}}{0,79 \,\text{kNm}} = 0,75 \le 1$$
(3)

gdzie:

 $M_{_{yEd}}-$ maksymalny moment zginający podporowy od obciążenia q_d = 2,39 kN/m² , $M_{_{cyRd}}-$ nośność przekroju przy zginaniu.

Sprawdzenie warunku nośności środnika pod działaniem reakcji podporowej zgodnie z załącznikiem Z6.7 pracy [8]:

$$\frac{F_{Ed}}{R_{wRd}} = \frac{4,48 \,\mathrm{kN}}{8,59 \,\mathrm{kN}} = 0,50 \le 1 \tag{4}$$

gdzie:

 F_{Ed} – siła poprzeczna na podporze pośredniej od obciążenia $q_d = 2,39 \text{ kN/m}^2$,

 R_{wRd} – nośność poprzeczna środnika.

Sprawdzenie warunku nośności przekroju przy ścinaniu nad podporą pośrednią zgodnie z załącznikiem Z6.8 pracy [8]:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{bRd}} = \frac{1,82 \,\mathrm{kN}}{2,23 \,\mathrm{kN}} = 0,82 \le 1 \tag{5}$$

gdzie:

 F_{Ed} – siła poprzeczna nad podporą pośrednią od obciążenia $q_d = 2,39$ kN/m², R_{bRd} – nośność przekroju przy ścinaniu.

Sprawdzenie warunków nośności przekroju przy zginaniu i obciążeniu siłą skupioną zgodnie z załącznikiem Z6.9 pracy [8]:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{wRd}} = \frac{0,59\,\text{kNm}}{0,81\,\text{kNm}} + \frac{4,48\,\text{kN}}{8,59\,\text{kN}} = 1,249 \le 1,25 \tag{6}$$

Warunki SGU – sprawdzenie warunku ugięć

Sprawdzenie warunku ugięć zgodnie z załącznikiem Z6.10 pracy [8]:

$$w \le w_{\max} \tag{7}$$

$$w = 8,03 \,\mathrm{mm} < w_{\mathrm{max}} = 8,33 \,\mathrm{mm}$$
 (8)

gdzie:

w – ugięcie blachy,

 w_{max} – ugięcie graniczne dla blachy.

3.1.2. Warunki SGN i SGU dla obciążenia granicznego z katalogu nośności [2]

Warunki SGN dla przekroju przęsłowego:

Sprawdzenie warunku nośności przekroju przy zginaniu zgodnie z załącznikiem Z5.6 pracy [8]:

$$\frac{M_{yEd}}{M_{cvRd}} = \frac{0,24\,\text{kNm}}{0,57\,\text{kNm}} = 0,42 \le 1$$
(9)

gdzie:

 M_{yEd} – maksymalny moment zginający przęsłowy od obciążenia q_d = 1,53 kN/m²,

 \dot{M}_{cvRd} – nośność przekroju przy zginaniu.

Sprawdzenie warunku nośności środnika pod działaniem reakcji skrajnej zgodnie z załącznikiem Z5.7 pracy [8]:



92

$$\frac{F_{Ed}}{R_{wRd}} = \frac{0.86 \,\mathrm{kN}}{3.36 \,\mathrm{kN}} = 0.26 \le 1 \tag{10}$$

gdzie:

 F_{Ed} – siła poprzeczna na podporze skrajnej od obciążenia $q_d = 1,53$ kN/m², R_{wRd} – nośność poprzeczna środnika.

Warunki SGN dla przekroju nad podporą pośrednią:

Sprawdzenie warunku nośności przekroju przy zginaniu zgodnie z załącznikiem Z5.9 pracy [8]:

$$\frac{M_{yEd}}{M_{cvRd}} = \frac{0.43 \,\text{kNm}}{0.81 \,\text{kNm}} = 0.53 \le 1 \tag{11}$$

gdzie:

 M_{yEd} – maksymalny moment zginający podporowy od obciążenia $q_d = 1,53$ kN/m², \dot{M}_{cvRd} – nośność przekroju przy zginaniu.

Sprawdzenie warunku nośności środnika pod działaniem reakcji podporowej zgodnie z załącznikiem Z5.10 pracy [8]:

$$\frac{F_{Ed}}{R_{wRd}} = \frac{2,87\,\text{kN}}{8,59\,\text{kN}} = 0,33 \le 1 \tag{12}$$

gdzie:

 F_{Ed} – siła poprzeczna na podporze pośredniej od obciążenia $q_d = 1,53$ kN/m², R_{wRd}^{μ} – nośność poprzeczna środnika.

Sprawdzenie warunku nośności przekroju przy ścinaniu nad podporą pośrednią zgodnie z załącznikiem Z5.11 pracy [8]:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{bRd}} = \frac{1,43 \,\mathrm{kN}}{2,17 \,\mathrm{kN}} = 0,66 \le 1 \tag{13}$$

gdzie:

 V_{Ed} – siła poprzeczna nad podporą pośrednią od obciążenia q_d = 1,53 kN/m², V_{bRd} – nośność przekroju przy ścinaniu.

Sprawdzenie warunków nośności przekroju przy zginaniu i obciążeniu siłą skupioną zgodnie z załącznikiem Z5.12 pracy [8]:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cvRd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{wRd}} = \frac{0,43\,\text{kNm}}{0,81\,\text{kNm}} + \frac{2,87\,\text{kN}}{8,59\,\text{kN}} = 0,87 \le 1,25$$
(14)

Warunki SGU - sprawdzenie warunku ugięć

Sprawdzenie warunku ugięć zgodnie z załącznikiem Z5.13 pracy [8]:

$$w \le w_{\max}$$
 (15)

$$w = 3,95 \,\mathrm{mm} < w_{\mathrm{max}} = 10 \,\mathrm{mm}$$
 (16)

gdzie:

w – ugięcie blachy,

 $w_{\rm max}$ – ugięcie graniczne dla blachy.

3.2. Wymiarowanie płatwi Z 250

Do obliczeń przyjęto schemat płatwi wolnopodpartej jak na rysunku 12. Wyznaczenie przekroju współpracującego płatwi zetowej Z 250 przedstawiono w załączniku Z3 pracy [8]. Obliczenia przeprowadzono dla obciążenia granicznego blachy (zał. 4, 3 pracy [8]) wynikającego z katalogu nośności [2] (patrz: tabela 1) wynoszącego 1,53 kN/m² oraz dla maksymalnej wartości obciążenia spełniającej warunki normy EC-3 [10] wynoszącego 3,88 kN/m².

Założono, że pokrycie o charakterze tarczowym połączone z płatwią za pomocą wkrętów samowiercących zabezpiecza ją przed skręcaniem, a dalej, że sztywność giętna stężenia ciągłego z blachy fałdowej jest dostateczna do zabezpieczania pasa górnego płatwi przed zwichrzeniem i składowa obciążenia prostopadła do płaszczyzny środnika przejmowana jest przez tarczę poszycia, zaś płatew zginana jest tylko w płaszczyźnie środnika.

Do obliczeń przyjęto współczynnik sprężystości podłużnej E = 210 GPa oraz granicę plastyczności $f_{yb} = 350$ MPa. Wartości momentów oraz reakcji podpór (rys. 12) dla przyjętego układu belki jednoprzęsłowej dla obciążenia granicznego $q_d = 1,53$ kN/m² (wynikającego z katalogu nośności [2]) wynoszą:

$$M = 6,88$$
 kNm, $R_4 = 4,59$ kN.

Wartości momentów oraz reakcji podpór dla przyjętego układu belki jednoprzęsłowej dla maksymalnej wartości obciążenia spełniającej warunki normy EC-3 [10] q_d = 3,88 kN/m² wynoszą:

$$M = 17,46$$
 kNm, $R_{4} = 11,64$ kN.



Rys. 12. Schemat statyczny i wykres momentów dla płatwi zetowej Z 250

Fig. 12. Statical scheme and bending moment diagram for the zed purlin Z 250

3.2.1. Warunki SGN i SGU dla maksymalnej wartości obciążenia spełniającej warunki normy EC-3 [10]

Sprawdzenie warunku nośności przekroju płatwi stężonej poszyciem

Warunki nośności przekroju w pasie stężonym zgodnie z załącznikiem Z4.2 pracy [8]:

$$\frac{M_{yEd}}{W_{effy}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \le \frac{f_{yb}}{\gamma_{M_1}}$$
(17)

$$\frac{17,46 \text{ kNm}}{4,86 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} + 0 = 349 \text{ MPa} \le \frac{350 \text{ MPa}}{1,0} = 350 \text{ MPa}$$
(18)

gdzie:

 $M_{_{yEd}}~-~$ maksymalny moment zginający przęsłowy od obciążenia q_d = 3,88 kN/m², $N_{_{Ed}}~-~$ siła podłużna przyjęta 0, N_{Ed}

 W_{effy}^{La} – efektywny wskaźnik wytrzymałości, A_{eff} – efektywne pole przekroju,

- częściowy współczynnik bezpieczeństwa równy 1,0, γ_{M1}

- granica plastyczności równa 350 MPa. f_{yb}

Warunki nośności przekroju w pasie swobodnym zgodnie z załącznikiem Z4.2 pracy [8]:

$$\frac{M_{yEd}}{W_{effy}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \le \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}}$$
(19)

$$\frac{17,46 \,\text{kNm}}{4,86 \cdot 10^{-5} \,\text{m}^3} + 0 + 0 \le 349,31 \,\text{MPa} \le \frac{350 \,\text{MPa}}{1,0} = 350 \,\text{MPa}$$
(20)

gdzie:

 $M_{f_{zEd}}$ – moment zginający w pasie od obciążenia bocznego przyjęty 0 ze względu na to, że pas swobodny jest rozciągany,

 W_{fz} – wskaźnik wytrzymałości przekroju pasa brutto, łącznie ze współpracującą częścią środnika, względem osi z - z.

Warunki SGU - sprawdzenie warunku ugięć płatwi

Sprawdzenie warunku ugięć płatwi dla maksymalnego obciążenia spełniającego warunek ugięć równego 1,85 kN/m² zgodnie z załącznikiem Z4.3 pracy [8]:

$$w \le w_{\max}$$
 (21)

$$w = 33,29 \,\mathrm{mm} < w_{\mathrm{max}} = 33,33 \,\mathrm{mm}$$
 (22)

gdzie:

– ugięcie płatwi, W

 w_{max} – ugięcie graniczne dla płatwi.

3.2.2. Warunki SGN i SGU dla obciążenia granicznego z katalogów nośności [2]

Sprawdzenie warunku nośności przekroju płatwi stężonej poszyciem

Warunki nośności przekroju w pasie stężonym zgodnie z załącznikiem Z3.6 pracy [8]:

$$\frac{M_{yEd}}{W_{effy}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \le \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}}$$
(23)

$$\frac{6,89 \,\text{kNm}}{4,86 \cdot 10^{-5} \,\text{m}^3} + 0 = 141,69 \,\text{MPa} \le \frac{350 \,\text{MPa}}{1,0} = 350 \,\text{MPa}$$
(24)

gdzie:

 M_{vEd} – maksymalny moment zginający przęsłowy od obciążenia q_d = 1,53 kN/m², Warunki nośności przekroju w pasie swobodnym zgodnie z załącznikiem Z3.6 pracy [8]:

$$\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \le \frac{f_{yb}}{\gamma_M}$$
(25)

$$\frac{6,89 \,\text{kNm}}{4,86 \cdot 10^{-5} \,\text{m}^3} + 0 + 0 = 141,69 \,\text{MPa} \le \frac{350 \,\text{MPa}}{1,0} = 350 \,\text{MPa}$$
(26)

Warunki SGU – sprawdzenie warunku ugięć płatwi

Sprawdzenie warunku ugięć płatwi dla obciążenia przyjętego z katalogu nośności [2] równego $q_d = 1,53$ kN/m² zgodnie z załącznikiem Z3.8 pracy [8]:

$$w \le w_{\max}$$
 (27)

$$w = 26,61 \,\mathrm{mm} < w_{\mathrm{max}} = 33,33 \,\mathrm{mm}$$
 (28)

gdzie:

w – ugięcie płatwi,

 w_{max} – ugięcie graniczne dla płatwi.

4. Podsumowanie wyników badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych

Celem przeprowadzonych obliczeń analitycznych było wyznaczenie wartości obciążeń pionowych V dla poszczególnych etapów obciążania (patrz: rozdział 2.3. Realizacja obciążenia) modeli oraz porównanie otrzymanych wyników z wynikami badań doświadczalnych.

Sposób ustalania poszczególnych etapów realizacji obciążenia modelu przedstawiono w tabeli 2 (kolumna 5). W kolumnie 3 i 4 przedstawiono dla poszczególnych etapów badań odpowiednio wartości obciążeń pionowych V i odpowiadające im obciążenia równomiernie rozłożone q.

Wartość obciążenia charakterystycznego V dla badania wstępnego (wiersz 2) ustalono na podstawie analizy warunków SGN i SGU dla belki i blachy, obliczonych według przepisów normowych (patrz: rozdział 3). Warunkiem decydującym o przyjętym tu obciążeniu okazał się warunek ugięć płatwi (SGU) opisany jako warunek (22) niniejszej pracy.

Wartość obciążenia V dla badania odbiorczego (dopuszczającego) (wiersz 3) ustalono jako sumę (kolumna 5): 1,0 × rzeczywisty ciężar własny (9,4 kN) i 1,25 × obciążenia zmienne (obciążenie charakterystyczne pomniejszone o ciężar własny).

Wartość obciażenia obliczeniowego V dla badania wytrzymałościowego (wiersz 4) ustalono na podstawie warunków SGN dla blachy i belki obliczonych według przepisów normowych (patrz: rozdział 3). Warunkiem decydującym o przyjętym tu obciążeniu okazał się warunek nośności przekroju przy zginaniu i obciążeniu siłą skupioną nad podporą dla blachy trapezowej opisany jako warunek (6) niniejszej pracy. Obciążanie modeli ponad wartość obciążenia obliczeniowego doprowadziło do wyznaczenia wartości granicznych modeli BB i BIB przedstawionych w wierszach 5 i 6.

Lp.	Etapy obciążania wg zał. A4 [10]	Wartość obciążenia V(H) [kN]	Wartości obciążenia równomiernie rozłożonego q [kN/m²]	Sposób wyznaczania poszczególnych wartości obciążenia
1	2	3	4	5
2	Badania wstępne	33,0 (2,4)	1,85	SGN i SGU dla belki i blachy
3	Badania odbiorcze (dopuszczające)	38,0 (2,9)	2,11	Ciężar własny: 9,4 kN × 1.0 + Obc. zmienne: (33 kN – 9,4 kN) × 1.25
4	Badania wytrzymałościowe	43,0 (3,5)	2,39	Maksymalne obciążenie spełniające warunki SGN dla belki i blachy
5	Badania niszczące model BB	52,0 (4,0)	2,89	Obciążenia graniczne dla modelu BB
6	Badania niszczące Model BIB	59,0 (5,0)	3,28	Obciążenia graniczne dla modelu BIB

Wartość V dla poszczególnych etapów obciążania

W tabeli 3 przedstawiono wartości obciążeń granicznych (kolumny 3 i 4) uzyskane dla modeli BB i BIB na podstawie: katalogu nośności [2] (wiersz 2), procedur normowych EC-3 [10] (wiersz 3), badań doświadczalnych (wiersz 4 i 5). Zauważono zbieżność wartości wyznaczonych normowo i za pomocą katalogów nośności. Może wynikać to z faktu, że katalogi nośności tworzone są na podstawie nie tylko badań doświadczalnych, ale również przepisów normowych.

Duży zapas bezpieczeństwa należy tłumaczyć zastosowanymi w normach uproszczeniami, pozwalającymi w sposób prosty i bezpieczny obliczyć nośność elementów. Analiza obciążeń granicznych zawartych w tabeli 3 pozwala stwierdzić, że ze względu na wyniki badań doświadczalnych, które wykazały większą nośność modelu BIB w stosunku do BB, nośności elementów badanego pokrycia w przypadku rozwiązań z umieszczoną między nimi wełną mineralną mogą być wyznaczane również w sposób bezpieczny z użyciem procedur podanych w EC-3 [10].

Udział E. Pięciorak w tej publikacji miał miejsce w ramach projektu 11.11.100.197/AS (AGH).

97 Tabela 3

Lp.	Sposób wyznaczania obciążenia granicznego Vgr	Obciążenie graniczne Vgr [kN]	Obciążenie graniczne równomiernie rozłożone <i>q</i> gr [kN/m ²]
1	2	3	4
2	Katalog nośności [2] SGU, SGN BTD 45/100	27,5	1,53
3	Procedury normowe EC-3 [10] SGU Z250	33,0	1,85
4	Badania doświadczalne model BB	52,0	2,89
5	Badania doświadczalne model BIB	59,0	3,28

Wartości obciążeń granicznych uzyskane dla modeli BB i BIB

Literatura

- [1] Astron, Specyfikacja produktów Astron 10/2006 (PL 2007).
- [2] Balex Metal, Blachy trapezowe osłonowe i konstrukcyjne, Katalog techniczny.
- [3] EN 826:1996 Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Określanie zachowania przy ściskaniu.
- Biegus A., Mądry D., Badania doświadczalne nośności zginanych blach fałdowych, Inżynieria i Budownictwo Nr 5/2002.
- [5] Gosowski B., *Skręcanie i zginanie elementów konstrukcji metalowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [6] Kurzawa Z., Murkowski W., Rzeszut K., Nowe możliwości konstruowania lekkich hal stalowych z kształtowników zimnogiętych na przykładzie systemu z przekrojów "SIGMA", XLIV Konferencja Naukowa, Poznań–Krynica 1998.
- [7] Piekarczyk M., Pięciorak E., O zastosowaniach kształtowników profilowanych na zimno jako podstawowych elementów nośnych w halach, Inżynieria i Budownictwo, Nr 12/2005.
- [8] Pięciorak, E., Analiza współpracy blachy fałdowej z płatwiami zimnogiętymi, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2011.
- [9] Runkiewicz L., Wieczorek M., Gajdzicki M., Badania fragmentu konstrukcji nośnej pokrycia dachowego lekkich hal magazynowych systemu Remco, Inżynieria i Budownictwo, Nr 6/2007.
- [10] PN-EN 1993-1-3:2006. Eurokod 3 Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.