

Kamil DUBAŁA¹
Jacek SELEJDAK²

ANALIZA DWUWARSTWOWEJ POWŁOKI ŁUKOWEJ NA PRZYKŁADZIE PRZYKRYCIA HALI SPORTOWEJ

W artykule przedstawiono analizę dwuwarstwowej powłoki łukowej stanowiącej przykrycie hali sportowej. Przykrycie walcowe wykonano z blachy grubości 1 mm kształtowanej na zimno. Profil blachy składa się z dwóch średnic z górnym wygięciem poprzecznym połączonych u dołu z półką dolną. Przestrzeń dystansową między powłokami wypełniono dwiema warstwami wełny mineralnej. Dach opiera się przegubowo na żelbetowej konstrukcji wsporczej. Podparcie ciągłe zrealizowano za pomocą liniowego kątownika oporowego oraz blach nachylonych pod kątem 60 stopni. Analizę konstrukcji, wytrzymałościową i wyboczeniową, z uwzględnieniem nieliniowego zachowania materiału i możliwości utraty stateczności (GMNA) wykonano w programie ANSYS, w oparciu o model belkowy oraz powłokowy. Powłoki połączono ze sobą elementem podatnym o charakterystyce materiału przenoszącego tylko siły ściskające. Włączenie do współpracy powłoki dolnej z górną, odbywa się gdy materiał podatny (wełna mineralna), zostanie pod działaniem obciążenia ściśnięty o wartość przekraczającą 60 mm, zmienia się wówczas charakterystyka materiału, który z podatnego staje się bardzo sztywny. Obliczono długość wyboczeniową łuku kołowego przegubowo podpartego na obu końcach oraz określono wartość imperfekcji geometrycznych łuku. Konstrukcję obciążono zgodnie z wymaganiami aktualnych norm PN-EN i stworzono kombinacje obciążeń. Dla najbardziej niekorzystnego przypadku obciążeń przedstawiono ścieżki równowagi, zarówno dla modelu powłokowego jak i belkowego. Dla modelu belkowego pokazano ponadto wykres naprężeń Hubera-Misesa oraz wartości ugięć.

Słowa kluczowe: powłoka walcowa, stateczność przekroju, sztywność, nośność

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Kamil Dubała, Politechnika Częstochowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa; kdubala@bud.pcz.czyst.pl

² Jacek Selejdak, Politechnika Częstochowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa; jaceksel@poczta.onet.pl

1. Wprowadzenie

Przedmiotem analizy jest dwuwarstwowa powłoka łukowa stanowiąca konstrukcję dachu hali sportowej. Budynek hali sportowej z zapleczem wzniesiono w roku 2006 w oparciu o projekt budowlany zgodny z ówczesnie obowiązującymi normami. Eksploatacji obiektu przebiegała bezawaryjnie, po 9 latach użytkowania, podczas przeglądu technicznego hali stwierdzono zwiększone deformacje konstrukcji. Wykonano inwentaryzację sprawdzającą stan techniczny i wymiary konstrukcji oraz wykonano pomiary termowizyjne hali. Na tej podstawie stworzono model komputerowy konstrukcji, który poddano szczegółowej analizie w celu ustalenia przyczyn powstania deformacji oraz opracowaniu wniosków i zaleceń dotyczących dalszego użytkowania obiektu. Widok ogólny analizowanego budynku przedstawiono na fotografiach 1 i 2.



Fot. 1. Widok zewnętrzny obiektu

Fot. 1. Building exterior

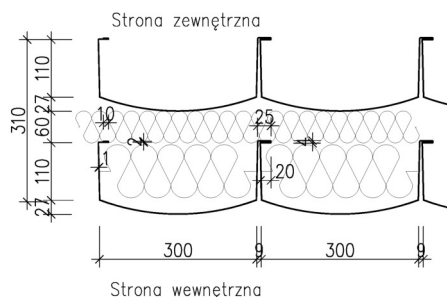


Fot. 2. Widok wewnętrzny obiektu

Fot. 2. Building interior

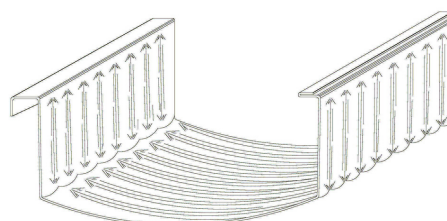
2. Opis konstrukcji

Dach hali sportowej wykonano w kształcie powłoki walcowej o promieniu łuku ok. 12,85 m. Podstawowe dane gabarytowe konstrukcji ustalone podczas inwentaryzacji: rozpiętość powłoki wewnętrznej 24,30 m, wzniosłość łuku powłoki wewnętrznej 8,65 m, rozpiętość powłoki zewnętrznej 24,70 m, wzniosłość powłoki zewnętrznej 8,85 m, długość budynku hali 42,00 m. Powłoki walcowe wykonane zostały z giętych na zimno kształtowników, ze stali S350 GD o granicy plastyczności $R_e = 350$ MPa, określonej na podstawie danych producenta blachy. Gięcie profilu odbywało się na placu budowy, z blachy ocynkowanej grubości 1 mm oraz szerokości pasa 600 mm. Blacha pokryta była powłoką poliesterową grubości 25 mikronów. Przekrój poprzeczny kształtownika przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny kształtownika

Fig. 1. Cross-section of the section



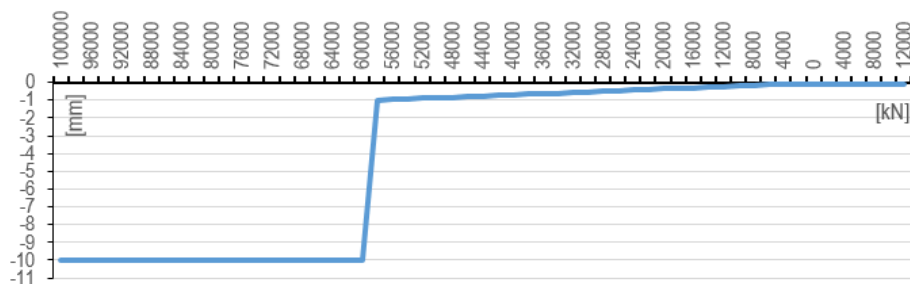
Rys. 2. Widok kształtownika

Fig. 2. Section view

Profil składa się z dwóch środników, które w górnej części wykształcone mają „zamki”, a u dołu połączone są półką. Zarówno półka jak i środniki posiadają faliste przetłoczenia poprzeczne prostopadłe do osi podłużnej elementu (rys. 2). Kształtownik profilowany jest bezpośrednio na placu budowy, a w trakcie łączenia sąsiednich elementów w powłokę, krawędzie „zamków” są zespalane poprzez zawalcowanie krawędzi profilu. Powłokę oparto na żelbetowej belce węzłowej za pomocą liniowego kątownika oporowego. Podstawa złożona jest z dwóch pochylonych pod kątem 60° ciągłych blach do których zamocowana jest powłoka górna i dolna z dystansem około 100 mm. Wolna przestrzeń między powłokami została wypełniona wełną mineralną w dwóch prostopadłych warstwach po 10 cm każda. Projekt budowlany zakładał zespolenie ze sobą powłoki dolnej i górnej za pomocą czterech łączników w postaci kantówek drewnianych o przekroju 10x10 cm. W celu sprawdzenia czy łączniki zostały faktycznie zabudowane w konstrukcji wykonano badanie kamerą termowizyjną, które nie potwierdziło tego faktu.

3. Model obliczeniowy

Model obiektu wykonano w programie ANSYS – jest to program oparty na metodzie elementów skończonych służący do analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji według teorii drugiego rzędu z uwzględnieniem dużych deformacji oraz zaawansowanych cech materiałowych. Umożliwia analizę wytrzymałościową i wyboczeniową z uwzględnieniem nieliniowego zachowania materiału i możliwości utraty stateczności (GMNA). Powłokę analizowano stosując model belkowy oraz powłokowy. Dwie powłoki z kształtowników zamodelowano jako dwie belki, górną i dolną, połączone ze sobą elementem podatnym – sprężyną, przenoszącą tylko siły ściskające. Łącznik sprężynowy ma za zadanie powiązać ze sobą dwie powłoki oraz odwzorować zachowanie wełny mineralnej stanowiącej wypełnienie pustki między powłokami. Przyjęto nieliniowy materiał sprężyny łącznikowej zgodnie z rysunkiem 3.

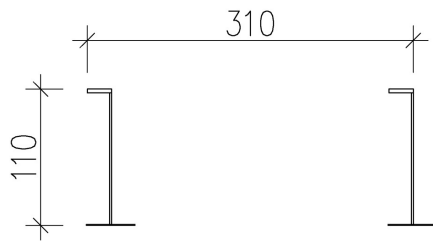


Rys. 3. Charakterystyka materiałowa sprężyny łącznikowej

Fig. 3. Material characteristics of the connection spring

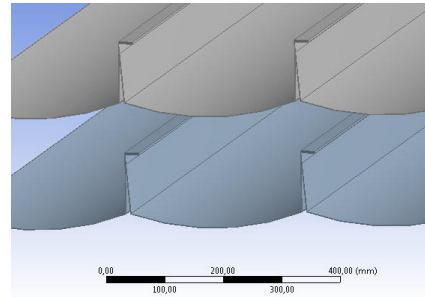
Zgodnie z rys. 3 łącznik sprężynowy nie przenosi żadnych obciążeń gdy jest rozciągany, w zakresie 0 – 60 mm sprężyna jest bardzo podatna, co odzwiercudnia możliwość ściśnięcia wełny mineralnej pod działaniem obciążenia, natomiast w zakresie przemieszczeń powyżej 60 mm sprężyna staje się bardzo sztywna i umożliwia współpracę powłoki górnej i dolnej. Dolna powłoka zaczyna współpracować z górną w przenoszeniu obciążeń dopiero gdy warstwa wełny mineralnej zostanie ściśnięta.

Zgodnie z teorią Wintera oraz założeniami normy [1] dolna półka przekroju cienkościennego powłoki nie uczestniczy w przenoszeniu obciążeń w płaszczyźnie łuku [3]. Podejście to jest korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji, gdyż w rzeczywistości półka dolna pracuje gdy jest rozciągana. Aby określić wpływ współpracy półki dolnej stworzono również model powłokowy. Wygięcie półki dolnej kształtownika w modelu powłokowym uwzględniono poprzez redukcję sztywności materiału półki w kierunku podłużnym i powiększoną sztywność w kierunku poprzecznym. Sztywność zwiększa się więc w przekroju prostokątnym do osi łuku. Zmiana ta nie ma wpływu na siły w płaszczyźnie ustroju i pozwala na zapewnienie stabilności poprzecznej łuku. Krawędź powłoki usztywniono podporami poprzecznymi w każdym węźle aby wyeliminować powstanie dystorsyjnego modelu zniszczenia [4]. Przekrój w modelu belkowym przyjęto jako złożony ze środniczki oraz górnej i dolnej półki na szerokości $15 \cdot t = 15 \text{ mm}$. Model belkowy oraz powłokowy pokazano na rysunku 4 i 5.



Rys. 4. Model belkowy

Fig. 4. Beam model



Rys. 5. Model powłokowy

Fig. 5. Shell model

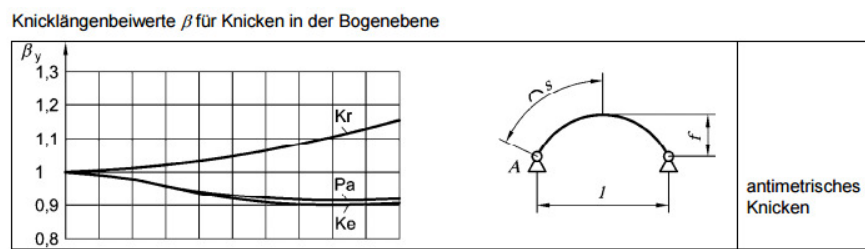
Stateczność konstrukcji zgodnie z [1] określa się poprzez przyjęcie wstępnej deformacji kształtu łuku. Wartość imprefekcji geometrycznej określa się na podstawie [1] zgodnie z tabelą 1. Dla konstrukcji wykonanych z przekrojów zimnogiętych przyjmuje się, zgodnie z tabelą 6.1 z [1], krzywą wyboczeniową „d” co odpowiada wartości 1/150. Kształt deformacji zakłada się zgodnie z kształtem pierwszej postaci wyboczeniowej układu.

Tabela 1. Wartości obliczeniowe wstępnych imperfekcji, na podstawie [1]

Table 1. The design values of the of initial imperfections, according to [1]

Krzywa wyboczeniowa wg tablicy 6.1	Analiza sprężysta e_0/L	Analiza plastyczna e_0/L
a0	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Długość wyboczeniową łuku określa się korzystając z ogólnej teorii stateczności oraz zaleceń zawartych w [2] zgodnie z rysunkiem 6.



Rys. 6. Wytyczne przyjmowania długości wyboczeniowej łuku, zgodnie z [2]

Fig. 6. The guidelines for the calculation of the buckling length of the arc, according to [2]

Zgodnie z wymaganiami zawartymi w [1] i [2] długość wyboczeniowa łuku kołowego w rozpatrywanej konstrukcji o stosunku $f/l = 8,85/24,70 = 0,36$, podpartego przegubowo na końcach wynosi:

$$l_0 = \beta \cdot \bar{s} = 1,10 \cdot \frac{31,60}{2} = 17,38m$$

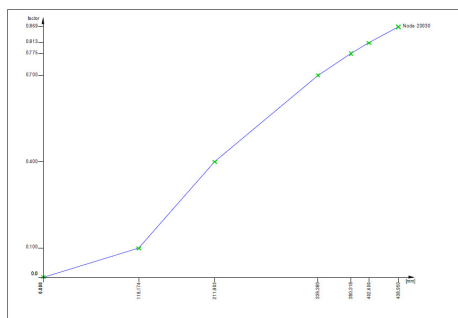
gdzie: β – współczynnik wyboczeniowy

\bar{s} – połowa długość łuku, zgodnie z rys. 6

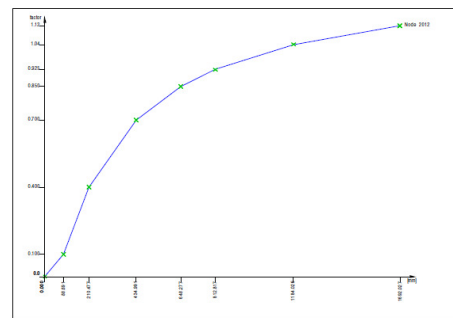
Zgodnie z zaleceniami [1] przyjęto geometryczną imperfekcję globalną konstrukcji jak dla przekroju klasy „d” równą: $l_0/150 = 17,38/150 = 0,115$ m. Analizowana konstrukcja zlokalizowana jest w II strefie obciążenia śniegiem i I strefie obciążenia wiatrem. Charakterystyczne wartości oddziaływań klimatycznych wynoszą odpowiednio, dla śniegu $s_k = 0,9$ kN/m², dla wiatru $q_k = 0,30$ kN/m². Zgodnie z normą [4], rysunek 5.6, określono współczynniki kształtu dachu dla dachu walcowego obciążonego śniegiem. Zgodnie z [5], rysunek 7.11, określono wartość współczynnika ciśnienia zewnętrznego dla dachu łukowego na planie prostokąta. Stworzono kombinacje obciążeń uwzględniając: ciężar własny, ciężar wełny mineralnej, śnieg symetryczny, śnieg asymetryczny, wiatr oraz imperfekcje geometryczne konstrukcji.

4. Wyniki analizy

Analizie poddano dwa modele konstrukcji – belkowy oraz powłokowy. Dla modelu powłokowego graniczne obciążenie ze względu na stateczność konstrukcji przedstawiono jako ścieżki równowagi dla narastającego obciążenia. Load factor 0,850 oznacza, że przy obciążeniu równym „0,850*obciążenie obliczeniowe” konstrukcja traci stateczność sprężystą. Na rysunku 7 i 8 przedstawiono wyniki dla najbardziej niekorzystnego układu obciążeń: Kombinacja 3 = {ciężar własny * 1,35 + ciężar wełny * 1,35 + śnieg niesymetryczny * 1,5 + imperfekcja}.

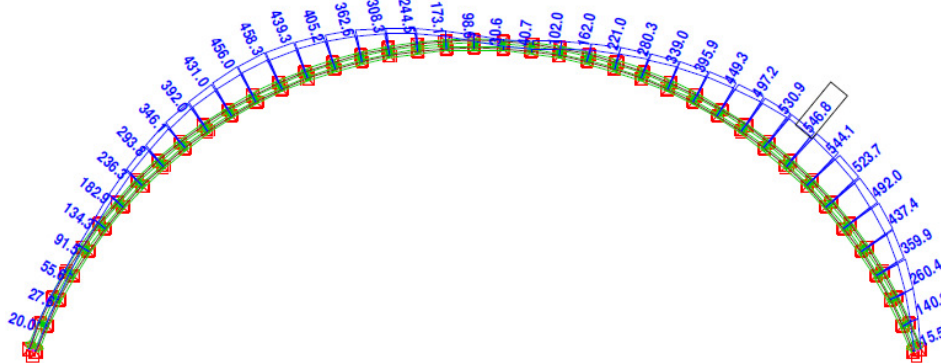


Rys. 7. Ścieżka równowagi model powłokowy
Fig. 7. Balance path shell model



Rys. 8. Ścieżka równowagi model belkowy
Fig. 8. Balance path beam model

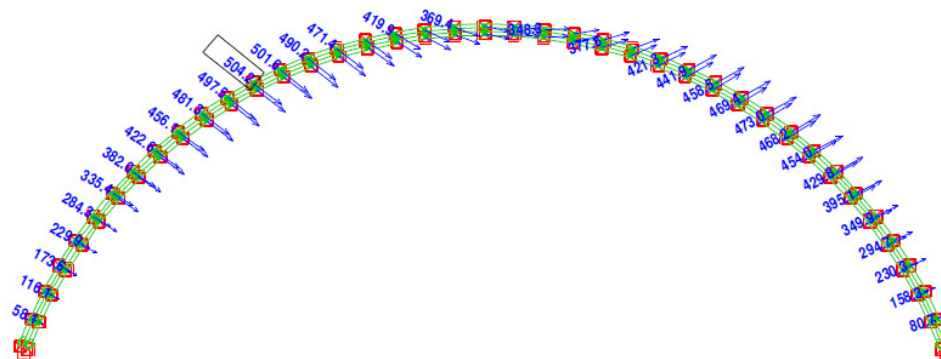
Na rysunku 9 przedstawiono naprężenia Hubera-Misesa dla modelu belkowego konstrukcji od kombinacji 3. Naprężenia w przekroju krytycznym wynoszą $\sigma_{\max} = 546,8$ MPa i są większe od granicy plastyczności stali S350 GD równej 350 MPa.



Rys. 9. Naprężenia Hubera-Misesa, w MPa

Fig. 9. Hubera-Mises stress, MPa

Rysunek 10 przedstawia ugięcia konstrukcji dla modelu belkowego od wartości charakterystycznych obciążeń w kombinacji 3.



Rys. 10. Ugięcie konstrukcji, w mm

Fig. 10. Structure deflection, mm

5. Wnioski

W pracy przeprowadzono analizę konstrukcji dachu na modelu powłokowym oraz belkowym. W obu modelach uzyskano zbieżność wyników. Na podstawie obliczeń można stwierdzić, że warunki nośności konstrukcji nie są spełnione dla obciążeń ustalonych według aktualnych norm PN-EN. W najbardziej niekorzystnej kombinacji obciążeń konstrukcja traci stateczność sprężystą przy obciążeniach

równych 0,85 obciążenia obliczeniowego. W modelu belkowym konstrukcja zachowuje stateczność ale naprężenia, przy obciążeniu równym 0,80 obciążenia obliczeniowego, przekraczają granice plastyczności stali. W kombinacji obciążeń bez śniegu konstrukcja w obu modelach zachowuje stateczność. Aby zapewnić spełnienie warunków stanów granicznych nośności konstrukcji, należy w warunkach zimowych monitorować grubość pokrywy śnieżnej zalegającej na dachu i w przypadku ukształtowania się zasy py śnieżnej na połaci dachu śnieg usunąć.

Literatura

- [1] 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.
- [2] DIN 18800-2:2008-11. Teil 2: Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken.
- [3] Biegus A.: Analiza statyczno-wytrzymałościowa łukowych blach fałdowych, Konstrukcje Stalowe nr 6/2003.
- [4] Biegus A.: Nośność graniczna ściskanych blach fałdowych, Prace Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Monografie nr 38/18, Wrocław 1983.
- [5] PN-EN 1991-1-3:2006 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.
- [6] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.

ANALYSIS A TWOLAYER ARC SHELL STRUCTURE BY THE CASE OF SPORT HALL ROOF

Summary

The article discusses the analysis a twolayer arc shell structure by the case of sport hall roof. Barrel-vault roof shell cylindrical made of cold-formed sheet thickness of 1 mm. Sheet metal profile consists of two webs with the upper bending section connected to the bottom of the bottom shelf. The space between the shells is filled with two layers of mineral wool. The roof is based on an articulated reinforced concrete structure. Continuous support realized by locking L-profile and the angle plates at an angle of 60 degrees. The structural analysis and buckling analysis taking account of non-linear material behaviour of the material and the possibility of loss of stability (GMNA) were performed in ANSYS based on the beam model and shell model. The shells were combined together by means receptive of the characteristics of the material transfer only compressive forces. The association of the shell bottom to the upper is carried out when the pliable material (mineral wool) is compressed under load value of greater than 60 mm, changing the characteristics of the material which is susceptible to be very rigid. Loading on structures as determined in accordance to the requirements of current Eurocode standards. For the worst case load shows the path of balance, both for the shell model and beam model. For beam model shows a graph Huber-Mises stress and the deflection.

Keywords: barrel-vault roofs, stability, stiffness, carrying capacity

Przesłano do redakcji: 05.01.2017 r.

Przyjęto do druku: 31.03.2017 r.