

Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne hal łukowych dla budownictwa rolniczego

Artur Piekarczuk

*Institut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji i Elementów Budowlanych,
e-mail: a.piekarczuk@itb.pl*

Streszczenie: W artykule zaprezentowano metody oceny nośności nowoczesnych konstrukcji hal łukowych stosowanych w budownictwie rolniczym. Cienkościenne łukowe blachy stalowe są proste w montażu, łatwe w eksploatacji i tańsze od tradycyjnych konstrukcji budynków rolniczych. Specyfika zadaszeń z cienkościennej blachy łukowej nastręcza jednak wiele problemów projektowych. Rozwiązanie tych problemów pozwoli na wznoszenie tanich i bezpiecznych budynków. W artykule przedstawiono normatywne metody projektowania, najczęstsze błędy projektowe oraz kierunki rozwoju metod projektowania wspomaganych badaniami.

Słowa kluczowe: zadaszenia łukowe, profilowane blachy stalowe, hale stalowe.

1. Wprowadzenie

Rozwój infrastruktury rolniczej w Polsce prowadzi do poszukiwania nowoczesnych, tanich i łatwych w eksploatacji budynków magazynowych i hal produkcyjnych. Wprowadzanie nowych, specjalistycznych produkcji i magazynowania produktów rolnych wymaga dostosowanych rozwiązań, które zastąpiłyby często wysłużone i niepraktyczne budynki rolnicze. Dotychczasowe budynki wznoszone były z zastosowaniem tradycyjnych technologii takich jak konstrukcje drewniane, betonowe i stalowe, które były kosztowe w budowie i utrzymaniu stanu technicznego. Obecnie coraz częściej poszukuje się rozwiązań tanich, łatwych w montażu i praktycznych w zastosowaniu. Wśród nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych pojawiających się obecnie w budownictwie istnieje system konstrukcyjny, który bazuje na łukowych konstrukcjach samonośnych wykonywanych z profilowanych blach stalowych systemu ABM 120 i ABM 240 [15]. Konstrukcje te mogą być wykorzystywane, jako samodzielne hale bądź mogą służyć do wykonywania dachów opartych na ścianach murowanych (rys.1), metalowych lub stalowych. Przykrycia tego typu zyskały popularność głównie za sprawą prostej konstrukcji, szybkiego montażu i stosunkowo niewielkich kosztów realizacji w porównaniu do budynków tradycyjnych. Samonośne przykrycia łukowe wykonywane są na miejscu w budowaniu przez mobilne walcarki, które formują z jednego arkusza blachy (o grubości od 0,7 do 1,5mm) metodą walcowania na zimno profile zakrzywione na planie łuku kołowego. Zakrzywione pojedyncze profile łączone są ze sobą przez zagniatanie krawędzi, tworząc powierzchnię zadaszenia.



Rys. 1. Hale łukowe systemu ABM 240 [15]

Technologia formowania blachy pozwala na wytworzenie łuku kołowego o promieniu od 12m do 30m. Formowanie w łuk kołowy realizowane jest przez skracanie środkowej i bocznych powierzchni profilu. Realizuje się to przez wykonanie przetłoczeń, co nadaje profilowi charakterystyczny kształt z falowanymi środnikami i półką dolną (rys.2).



Rys. 2. Zakrzywienie blach systemu ABM 240 (źródło: materiały archiwalne ITB)

Konstrukcje tego typu nastroczają jednak wiele problemów projektowych, gdyż wymagają uwzględnienia szeregu zagadnień związanych z profilami cienkościennymi oraz ich statecznością globalną i dystorsyjną. Sposób projektowania takich hal odbiega od powszechnie stosowanych metod opartych na normach dotyczących konstrukcji stalowych.

2. Normatywny stan wiedzy w zakresie projektowania

W zakresie projektowania elementów z profili cienkościennych istnieje szereg metod, które bazują na wytycznych normowych. Przekrycia w postaci łuków kołowych podpartych przegubowo narażone są na oddziaływanie ciężarem własnym i technologicznym, wiatrem, śniegiem oraz temperaturą. Obciążenia te definiowane są w normach przedmiotowych [4], [5], [6]. W wyniku oddziaływania obciążeń powstają siły wewnętrzne, z których najistotniejsze to ściskanie i zginanie. Siła ściskająca zmienia się nieznacznie na długości łuku natomiast momenty zginające przyjmują wartości zarówno dodatnie jak i ujemne. Udział sił ścinających jest nieznaczny, jednak w niektórych przypadkach nie należy go pomijać, zwłaszcza przy projektowaniu węzłów podporowych.

W przypadku łuków istotną rolę w wymiarowaniu według teorii I rzędu pełni współczynnik wybooczeniowy. Trudność w tym przypadku polega na tym, że normy [1], [2], i [3] nie podają wprost współczynników wybooczeniowych dla łuków kołowych, a bazują na zależnościach dotyczących prostych prętów ściskanych jednocześnie zginanych. Norma [1], zaleca sprawdzanie nośności przekroju ściskanego i zginanego jednokierunkowo wg zależności:

$$\frac{N}{\phi N_{Rc}} + \frac{\beta M}{\phi_L M_R} + \Delta \leq 1 \quad (1)$$

$$\frac{N}{\phi N_{Rc}} + \frac{\beta M}{\phi_L M_R} + \Delta \leq 1 \quad (2)$$

gdzie: N , M - obliczeniowe wartości siły ściskającej i momentu zginającego w ujęciu teorii I rzędu, N_{Rc} , M_R - nośności obliczeniowe przekroju na ściskanie i zginanie, ϕ - współczynnik wybooczeniowy, ϕ_L - współczynnik zwichrzenia, β - współczynnik uwzględniający warunki brzegowe i rozkłady momentów zginających na długości, λ - smukłość względna pręta.

Podobny sposób postępowania przy wymiarowaniu elementów ściskanych i zginanych jest przedstawiony w normie [2]. W normie tej do sprawdzenia nośności zaleca się stosować zależność:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + \frac{k_{yy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} \leq 1 \quad (3)$$

gdzie: N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ - obliczeniowe wartości siły ściskającej i momentu zginającego w ujęciu teorii I rzędu, N_{Rk} , $M_{y,Rk}$ - charakterystyczna nośności obliczeniowe przekroju na ściskanie i zginanie, χ_y - współczynnik wybożenia, χ_{LT} - współczynnik zwichrzenia, k_{yy} - współczynnik interakcji, γ_{M1} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa (wartość rekomendowana 1,0).

Norma [3] do wyznaczania nośności przekrojów ściskanych i zginanych podaje zależność:

$$\frac{N}{\phi N_{Rc}} + K_x \frac{M_x + \Delta M_x}{M_{Rcx}} \leq 1 \quad (4)$$

gdzie: N , M - obliczeniowe wartości siły ściskającej i momentu zginającego w ujęciu teorii I rzędu, N_{Rc} , M_{Rcx} - nośności obliczeniowe przy ściskaniu i zginaniu przekroju ustalone dla wskaźników wytrzymałości przekroju zastępczego odpowiadającego największym naprężeniom ściskającym od zginania względem osi x-x, ΔM_x - dodatkowy moment zginający, ϕ - współczynnik wybożenia wg [1].

W przypadku blach cienkościennych poddanych ściskaniu i zginaniu, istotnym zagadnieniem jest interakcja sił podłużnych i momentów zginających. W normie [7] podano alternatywną formułę interakcyjną wyrażoną zależnością:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1 \quad (5)$$

gdzie: $N_{b,Ed}$ - obliczeniowa nośność elementu na wybożenie, $M_{b,Ed}$ - obliczeniowa nośność elementu na zginanie, N_{Ed} - obliczeniowa siła podłużna, M_{Ed} - obliczeniowy moment zginający.

W obliczaniu nośności elementów łukowych można posługiwać się metodami uwzględniającymi teorię II rzędu. Wówczas zamiast kłopotliwego w ustaleniu współczynnika wybożenia należy wyznaczyć siły przekrojowe w ujęciu teorii II rzędu. Nośność w takim przypadku sprawdza się wg zależności:

$$\frac{N_{II}}{N_{Rc}} + \frac{M_{II}}{M_{Rc}} \leq 1 \quad (6)$$

gdzie: N_{Rc} , M_{Rc} - nośności obliczeniowe przekroju na ściskanie i zginanie, N_{II} , M_{II} - siła podłużna i moment zginający wyznaczone według teorii II rzędu.

Przedstawione wyżej metody sprawdzania nośności samonośnych przekryć łukowych, obejmują globalną utratę stateczności w ujęciu teorii I rzędu z uwzględnieniem współczynników wybożeniowych lub też w ujęciu teorii II rzędu z pominięciem tych współczynników.

Zagadnienia projektowania stanowiące rozwinięcie i uzupełnienie wyżej wymienionych metod projektowania konstrukcji z profili cienkościennych szczegółowo omawiane są w opracowaniach [8], [9], [10], [11] i [12].

2. Błędy projektowe

Ocena nośności i stateczności konstrukcji łukowej z blach cienkościennych wymaga posługiwania się wiedzą mało popularną wśród inżynierów. Wiedza ta dotyczy: mechaniki konstrukcji elementów łukowych, wymiarowania prętów cienkościennych oraz teorii metod numerycznych. Niektórzy projektanci nieświadomi są problemów związanych z wymienionymi wyżej zagadnieniami. Stąd też pojawiają się błędy projektowe, które mogą doprowadzać do awarii lub katastrof budowlanych (rys 3).



Rys. 3. Awaria przykrycia łukowego z blach cienkościennych systemu ABM 120 [16]

Obliczenia najczęściej wykonuje się przyjmując płaskie ustroje prętowe. Nie jest to zła koncepcja i choć mocno uproszczona, odpowiednio użyta, jest wystarczająca do wyznaczenia sił wewnętrznych i do zaprojektowania konstrukcji bez uwzględniania dystorsji.

Błędy wynikają głównie z nieprawidłowych założeń do projektowania. Najczęściej projektanci zaniedbują trzy podstawowe zagadnienia:

- 1) nieodpowiednia interpretacja założeń normowych w zakresie wyznaczania efektywnych charakterystyk geometrycznych,
- 2) zaniedbywanie współczynnika wybożenia,
- 3) nieodpowiednie wykorzystanie numerycznych metod obliczeń.

Odnośnie 1). Efektywne charakterystyki geometryczne [14] obliczane wg normy [3] lub [2] wyznaczone są przy założeniu, że ścianki przekroju są płaskie, co nie odpowiada rzeczywistości (patrz rys 2), poza tym przetłoczenia na ściankach profilu są skierowane w poprzek a nie wzdłuż osi profilu. W świadomości niektórych inżynierów przetłoczenie blachy oznacza jej wzmocnienie. Niestety w tym przypadku, przetłoczenie blachy w pewnych jej obszarach wcale nie jest wzmocnieniem.

Odnośnie 2). Zaniedbywanie lub zła interpretacja współczynnika wybożenia globalnego w analizie I rzędu [14] prowadzi do złego oszacowania nośności i stateczności konstrukcji. Wynika to z błahej przyczyny: konstruktorzy niekiedy myślą współczynniki wybożeniowe i przyjmują je jak dla prętów prostych zamiast łukowych lub też nie znają wartości współczynników dla prętów łukowych i pomijają je, zdając się na metody numeryczne i teorię II rzędu.

Odnośnie 3). Numeryczne metody obliczeń w tym metoda elementów skończonych jest znana i kontrolowana, jednak wykorzystanie metod numerycznych już nie jest kontrolowane, gdyż zależy od umiejętności użytkowników. Można przeprowadzać wymiarowanie konstrukcji w oparciu o siły wewnętrzne wyznaczone na podstawie analizy statycznej II rzędu wg zależności (6). W takim przypadku nie ma konieczności uwzględniania współczynnika wybożeniowego występującego w zależnościach (1), (3) i (4), gdyż teoria II rzędu zapewnia uwzględnienie niestateczności globalnej w wyznaczeniu sił wewnętrznych dla wytężonego przekroju. Jednak należy pamiętać o tym, że metody numeryczne wykorzystywane w niektórych programach komercyjnych mają pewne ograniczenia zwłaszcza dla obiektów łukowych. Dotyczy to przede wszystkim dyskretyzacji obiektu. Łuk dzielony jest na skończoną liczbę elementów. Jednak elementy te traktowane są jako pręty proste o związanych stopniach swobody w sąsiadujących ze sobą węzłach. Analiza II rzędu (w niektórych programach obliczeniowych) dotyczy prętów prostych, a nie zakrzywionych. Stąd, jak nie trudno się domyślić, nieświadomie użyta analiza II rzędu dla łuku dyskretyzowanego prętami prostymi, będzie dotyczyła poszczególnych prętów a nie łuku, jako obiektu docelowego. W wyniku takiej pomyłki, w obliczeniach statycznych uzyska się znaczne niedoszacowanie stateczności.

3. Problematyka projektowania

Oprócz metod normowych przedstawionych skrótowo w pkt 2, ciągle nierozpoznanym zjawiskiem pozostaje niestateczność dystorsyjna oraz wpływ jej interakcji z innymi formami utraty stateczności, która związana jest ze specyfiką kształtowania powierzchni blachy. Według autorów publikacji [8] „...niestateczność dystorsyjna związana jest z wygięciem na znacznie krótszych odcinkach, co skutkuje pojawieniem się półfal o znacznie mniejszych długościach między punktami zerowymi odkształconego po utracie stateczności fragmentu przekroju”. Takie zjawisko opisywane jest w literaturze w odniesieniu do prostych prętów ściskanych z profili zamkniętych lub otwartych o gładkich powierzchniach. W przypadku profilowanych blach stalowych wykorzystywanych do konstrukcji przykryć w technologii walcowania na zimno stosowanych w budownictwie rolniczym, podłużna oś profilu oparta jest na łuku kołowych w dodatku powierzchnie profilu są karbowane i zakrzywiane w planie (rys. 2). Taki kształt profilu determinowany jest technologią jego wykonania. Określenie charakteru dystorsji takiego przekroju dalece wybiega poza znane rozważania teoretyczne. Trudność w tym przypadku polega na opisie matematycznym powierzchni przekroju, ponieważ głębokość i charakter karbowania jest różny w zależności od grubości blach i promienia gięcia łukowego. Dlatego też podejmowane są próby empirycznego określenia zjawiska i porównanie wyników badań z wynikami obliczeń wykonanych według znanych metod. Przykładem takiego podejścia są badania opisane w artykule [13]. Autorzy tego artykułu wykonali obliczenia nośności przy ściskaniu osiowym i mimośrodowym fragmentów blach wykorzystując do tego celu metody numeryczne. Badania były wykonywane na 6 próbkach, z czego 3 poddawane były osiowemu ściskaniu a 3 kolejne ściskaniu mimośrodowemu przy różnym mimośrodku. W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano teoretyczne i badawcze wartości sił krytycznych. Wartości te różniły się od siebie od 8% do 24%, przy czym największą rozbieżność zanotowano dla przypadku mimośrodowego ściskania. Badania opisane w artykule [13] wykonane były na niewielkiej liczbie prób i bez szczegółowego opisu odkształceń występujących podczas obciążania. Stąd nie są jasno opisane zjawiska towarzyszące powstaniu dystorsji, a same wyniki badań w porównaniu z obliczeniami nie wykazują dobrej zbieżności zwłaszcza przy ściskaniu mimośrodowym. Wyniki pracy [13] można uznać za pilotażowe w tej dziedzinie, jednak niewystarczające do praktycznego zastosowania zwłaszcza, że dotyczą one jedynie zjawiska lokalnego jako pewnego rodzaju osobliwości konstrukcyjnej, a nie jego wpływu na globalną stateczność i nośność konstrukcji. Mając na uwadze zapotrzebowania w tej tematyce Instytut Techniki Budowlanej podjął prace badawcze mające na celu rozwiązanie nośności i stateczności samonośnych blach łukowych, które opisano w pkt . 5.

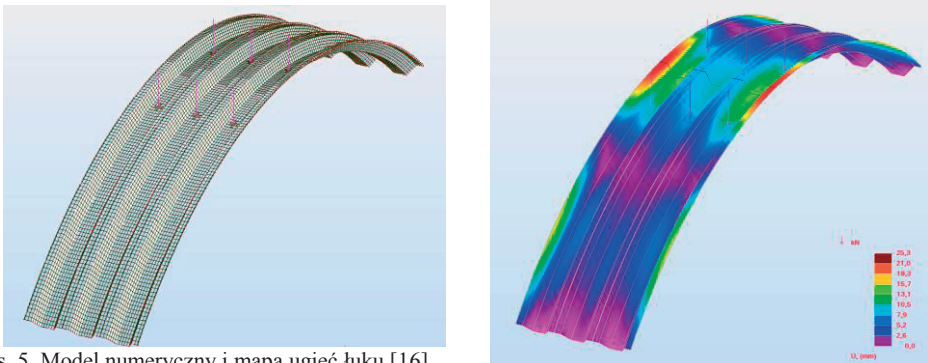
4. Badania w makroskali

W ramach badań realizowanych na potrzeby przemysłu, w Zakładzie Konstrukcji i Elementów Budowlanych ITB wykonywane były badania fragmentów zadaszeń łukowych z blach profilowanych w skali naturalnej (rys. 4). Badania miały na celu wyznaczenie nośności elementu. Element badawczy stanowił łuk kołowy składający się z trzech profili ABM 240 o rozpiętości 9,5m i wyniosłości 1,9m. Obciążenia realizowane były przez sześć sił skupionych przyłożonych do środków profili. Obciążenie przykładano cyklicznie w sekwencji: 0-5kN-0-10kN-0-15kN- do zniszczenia. Obciążenia szczytowe w każdej sekwencji utrzymywane były przez 15min. Kolejnym etapem analizy były obliczenia numeryczne odwzorowujące geometrię modelu, warunki podparcia i sekwencje obciążeń (rys. 5).

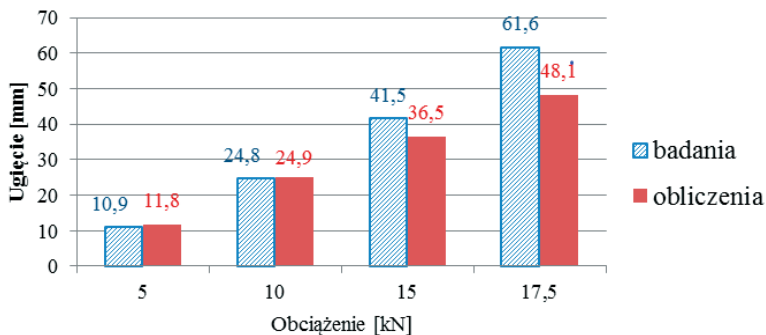


Rys. 4. Element badawczy zadaszenia łukowego ABM 240 [16]

Porównanie wyników badań i obliczeń w przypadku ugięcia mierzonego w środku łuku przedstawia rys.6.



Rys. 5. Model numeryczny i mapa ugięć łuku [16]



Rys. 6. Porównanie ugięć z badań i obliczeń [16]

Na dwóch pierwszych poziomach obciążeń, ugięcia z badań i obliczeń były niemal identyczne. Natomiast rozbieżności w górnych zakresach obciążeń i przy obciążeniu niszczącym wyniosły około 20%. Ugięcia z badań są większe w porównaniu z ugięciami uzyskanymi z obliczeń. Model numeryczny uwzględniał jedynie niestateczność globalną. Różnice w wynikach w górnym zakresie obciążeń wskazują na pojawienie się dystorsji, której zakres w tym przypadku nie był rozpoznany. Co ciekawe wyniki badań modelu w makroskali i wyniki badań [13] wskazują na rozbieżności rzędu 20%. Mimo, że badania dotyczyły jakościowo innych cech (siła krytyczna w badaniach [13] dla obciążenia mimośrodowego i ugięcie modelu w badaniach ITB przy interakcji ściskania ze zginaniem), to zarówno w jednym jak i drugim przypadku nie uwzględniano dystorsji w modelach obliczeniowych.

Postać utraty stateczności lokalnej w badaniach [13] i ITB były podobne (rys. 7)



a) Badania ITB [16]

b) badania wg [13]

Rys. 7. Postaci utraty stateczności lokalnej

Uzyskane wyniki badań wskazują jednoznacznie, że lokalna utrata stateczności ma istotny wpływ na nośność i stateczność konstrukcji łukowych z blach cienkościennych. Poszukiwanie rozwiązań stało się inspiracją do podjęcia szczegółowych badań i analiz w tym zakresie.

5. Dalsze prace

W ITB podjęto prace związane z rozwojem metod projektowania łukowych cienkościennych blach łukowych. Prace te uzyskały dofinansowanie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju i ujęte są w Programie Badań Stosowanych. Podstawowym kierunkiem prac jest opracowanie efektywnych metod obliczeń konstrukcji łukowych z profilowanych blach stalowych o różnych grubościach, rozpiętościach i promieniach gięcia. Efektywność metody obliczeń ma polegać na uzyskaniu metody obejmującej interakcję niestateczności globalnych i dystorsji w określaniu nośności i stateczności ustroju. W celu uzyskania danych do opracowania metody, zaplanowano szeroki program badań i obliczeń. Badania będą prowadzone trzyetapowo. W etapie pierwszym zostaną przeprowadzone badania mechanizmu powstawania niestateczności lokalnej na niewielkich próbkach blach. Drugi etap będzie dotyczył badań wpływu dystorsji na stateczność globalną i nośność elementów w skali naturalnej. W tym celu przeprowadzone zostaną badania laboratoryjne pełnowymiarowych modeli łuków. Trzeci etap badań będzie dotyczył obiektów in-situ. W tym przypadku testowane będą metody obliczeń opracowane na podstawie badań z poprzednich etapów na obiektach w pełnowymiarowej skali, obciążonych naturalnymi oddziaływaniami środowiskowymi. Obiekt będzie monitorowany w zakresie wielkości i rodzaju obciążeń oraz odpowiedzi konstrukcji. We wszystkich badaniach wykorzystane zostaną innowacyjne metody pomiarowe (np. metoda cyfrowej korelacji obrazu do pomiaru przemieszczeń i odkształceń 3D) oraz najnowocześniejsze numeryczne programy obliczeniowe.

6. Podsumowanie

Nowe rozwiązania konstrukcyjne mają szerokie możliwości stosowania w budownictwie w tym również rolniczym. Tanie, szybkie w montażu łatwe w użytkowaniu cienkościennie samonośne łukowe blachy stalowe stanowią ciekawą alternatywę dla tradycyjnego budownictwa rolniczego. Pomimo technicznych i ekonomicznych zalet stosowania takich rozwiązań, istnieją pewne niedogodności związane z projektowaniem. Usunięcie tych niedogodności jest zadaniem trudnym i czasochłonnym, ale koniecznym do zrealizowania.

Literatura

- 1 PN-B/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- 2 PN-EN 1993-1-1:2006. Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- 3 PN-B-03207:2002. Konstrukcje stalowe,. Konstrukcje z kształtowników i blach profilowanych na zimno. Projektowanie i wykonanie.
- 4 PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje . Część 1-1 Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynku.
- 5 PN-EN 1991-1-4:2004 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4 Oddziaływania ogólne. Oddziaływanie wiatru.
- 6 PN-EN 1991-1-3 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem.
- 7 PN-EN 1993-1-3 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3 Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- 8 Bródka J. Broniewicz M. Giżejowski M., . Kształtowniki gięte. Poradnik projektanta. Polskie wydawnictwo techniczne, Rzeszów 2006r.
- 9 Rakowski G., Solecki R. Pręty zakrzywione. Obliczenia statyczne. Wydawnictwo Arkady Warszawa 1965.
- 10 Biegus A. Nośność graniczna ściskanych blach fałdowych. Prace naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Serie: Monografie. Wrocław 1983.
- 11 Rykulak K. Zagadnienia stateczności konstrukcji metalowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2012r.
- 12 Biegus. A Nośność graniczna stalowych konstrukcji prętowych. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa – Wrocław 1997r.
- 13 Li-Li Wu, Xuan-Neng Gao, Young-Jiu Shi, Yuan-Qing Wang Theoretical nad Experimental Study on Interactive Local Buckling of Arch-shaped Corrugated Steel Roof. Steel Structural 6(2006) 45-54.
- 14 Biegus A. Kowal A. Katastrofa łukowej hali o konstrukcji z blach giętych na zimno. XXV Konferencja Naukowo – Techniczna Międzyzdroje Awarie Budowlane 766-772.
- 15 <http://www.weglopol.eu>
- 16 Prace badawcze realizowane w Instytucie Techniki Budowlanej .

Modern solutions of arch-shaped construction for agricultural building halls

Artur Piekarczuk

Abstract: The paper presents evaluation methods of arch-shaped corrugated steel roof capacity used in an agricultural construction. The arch-shaped corrugated steel roof is easy to install, to use and less expensive than the traditional construction of agricultural buildings. The specific of structure poses many design problems related to the local buckling of profiled sheets. The article presents normative design methods, the most common design errors, trends research methods and numerical calculations.

Keywords: Arch-shaped corrugated steel roof, profiled steel sheet, steel buildings, local buckling.