

PROBLEMY PROJEKTOWANIA PROFILOWANYCH POWŁOK ŁUKOWYCH

ARTUR PIEKARCZUK, *a.piekarczuk@itb.pl*
PRZEMYSŁAW WIĘCH
Instytut Techniki Budowlanej

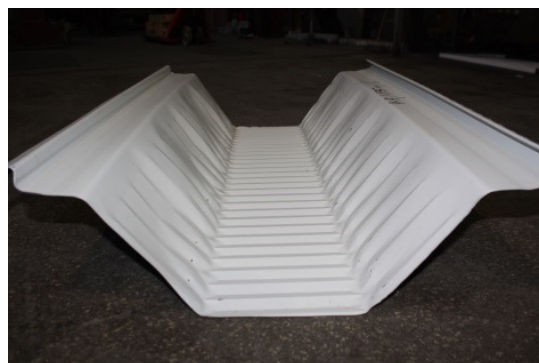
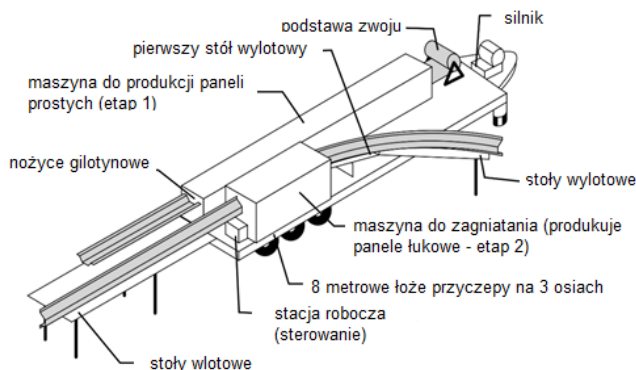
MAŁGOZRATA KUJAWIŃSKA
KRZYSZTOF MAŁOWANY
Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska

Streszczenie: System ABM służy do wykonywania samonośnych łukowych przykryć budynków użyteczności publicznej. Technologia produkcji powoduje powstawanie skomplikowanej geometrii kształtownika, w którym na ściankach środnika powstają głębokie przetłoczenia i falowania. Takie ukształtowanie geometrii profilu znacznie utrudnia projektowanie z wykorzystaniem dokumentów normatywnych. Brak odpowiednich metod obliczeń prowadzi do błędów projektowych i w konsekwencji do awarii budowlanych zadaszeń. W artykule przedstawiono metodykę określania nośności profilu ABM z wykorzystaniem numerycznych metod obliczeniowych wspomaganych badaniami laboratoryjnymi.

Słowa kluczowe: system ABM, cyfrowa korelacja obrazu, nośność, numeryczne metody obliczeń.

1. Opis systemu ABM

Technologia budowy samonośnych przekryć łukowych w systemie ABM (Automatic Buildings Machine) powstała w USA w latach siedemdziesiątych. Samonośne przekrycia łukowe wykonywane są na miejscu wbudowania przez mobilne walcarki, które formują metodą walcowania na zimno z jednego arkusza blachy (o grubości od 0,7 do 1,5 mm) zakrzywione pojedyncze segmenty (rys. 1). Technologia formowania łuku ABM nadaje segmentowi charakterystyczny kształt z falowanymi i karbowanymi środnikami (rys. 1). Pojedyncze segmenty łączone są ze sobą przez zagniatanie wolnych krawędzi półek.



Rys. 1. Schemat produkcji segmentów łukowych: a) schemat produkcji, b) wygląd profilu po uformowaniu

Pierwotnie zadaszewa wznoszone w tej technologii pełniły funkcje tymczasowe do zastosowań wojskowych i rolniczych. Przekrycia tego typu zyskały popularność głównie za sprawą

prostej konstrukcji, szybkiego montażu i stosunkowo niewielkich kosztów realizacji w porównaniu przekryć wznoszonych technologią tradycyjną. Obecnie przekrycia tego typu znajdują coraz szersze zastosowanie przy budowie obiektów użyteczności publicznej. W technologii tej wykonywane są łukowe przekrycia dachowe o rozpiętości od 6 m do 30 m i różnej wyniośłości. Przykładowy obiekt z zadaszeniem wykonanym w technologii w technologii ABM przedstawia rys. 2



Rys. 2. Hala sportowa z przykryciem w technologii ABM: a) widok z zewnątrz b) widok wnętrza hali

2. Problematyka projektowania. Aktualny stan wiedzy

Zadaszenia wykonywane są jako łuki kołowe dwuprzegubowe. Podstawowe obciążenia oddziaływujące na zadaszenia to ciężar własny, obciążenia technologiczne [6] oraz obciążenia środowiskowe (wiatr [1], śnieg [2]). Obciążenia te powodują powstawanie w konstrukcji sił wewnętrznych, tj. sił ściskających, ścinających i momentów zginających. Elementem nośnym jest kształtownik cienkościenny o smukłych ściankach odpowiadający 4 klasie przekroju wg PN-EN 1993-1-1 [3]. Do projektowania elementów nośnych z cienkościennymi blach stalowych wykorzystywane są normy PN-EN 1993-1-3 [4] oraz PN-B-03207:2002 [5]. W dokumentach tych przedstawione są ogólne zasady postępowania w przypadku przy wyznaczaniu nośności i stateczności, jednak nie dotyczą one elementów łukowych z karbowaną powierzchnią środkową. W związku z ograniczonym zakresem norm przedmiotowych występują niedogodności związane z interpretacją zagadnień projektowych. Problematykę wymiarowania cienkościennych zakrzywionych walcowo konstrukcji nośnych przedstawiano w opracowaniu [7]. Oprócz praktycznych porad związanych z projektowaniem na podstawie tematycznych dokumentów normatywnych [4, 5], autor opracowania wskazuje na konieczność uwzględniania w obliczeniach nieliniowości fizycznych i geometrycznych ustroju podając przy tym – jako jeden z efektywnych sposobów – analizę numeryczną. Wysokość karbowania i zakrzywiania powierzchni środkowej przekroju może być różne w zależności od promienia gięcia. Ukształtowanie geometrii przekroju ma bezpośredni wpływ na przebieg i charakter występowania niestateczności miejscowych. Analizę tego zjawiska przedstawiono w opracowaniu [8]. Praca dotyczyła profili cienkościennych zakrzywianych walcowo i karbowanych powierzchniach środkowych. Geometria przekroju poprzecznego tych kształtowników odbiega od przedstawianych w niniejszym artykule (niższy kształtownik z szerokim karbowanym środkiem), ale idea opracowania polega na porównaniu wyników obliczeń numerycznych kształtowników bez karbowania i z karbowaniem z wynikami obliczeń na podstawie normy PN-EN 1993-1-5 [6]. Obliczenia numeryczne kształtownika prostego niekarbowanego wykazały dobrą zgodność z wynikami uzyskanymi na podstawie normy PN-EN 1993-1-5 [6]. W kolejnym etapie przeprowadzono obliczenia numeryczne kształtowników zakrzywionych walcowo z karbowanymi powierzchniami środkowymi. Uzyskano znaczne niższe nośności w porównaniu do poprzednich obliczeń. Ten eksperyment potwierdza, że zakrzywione walcowo i karbowane powierzchnie

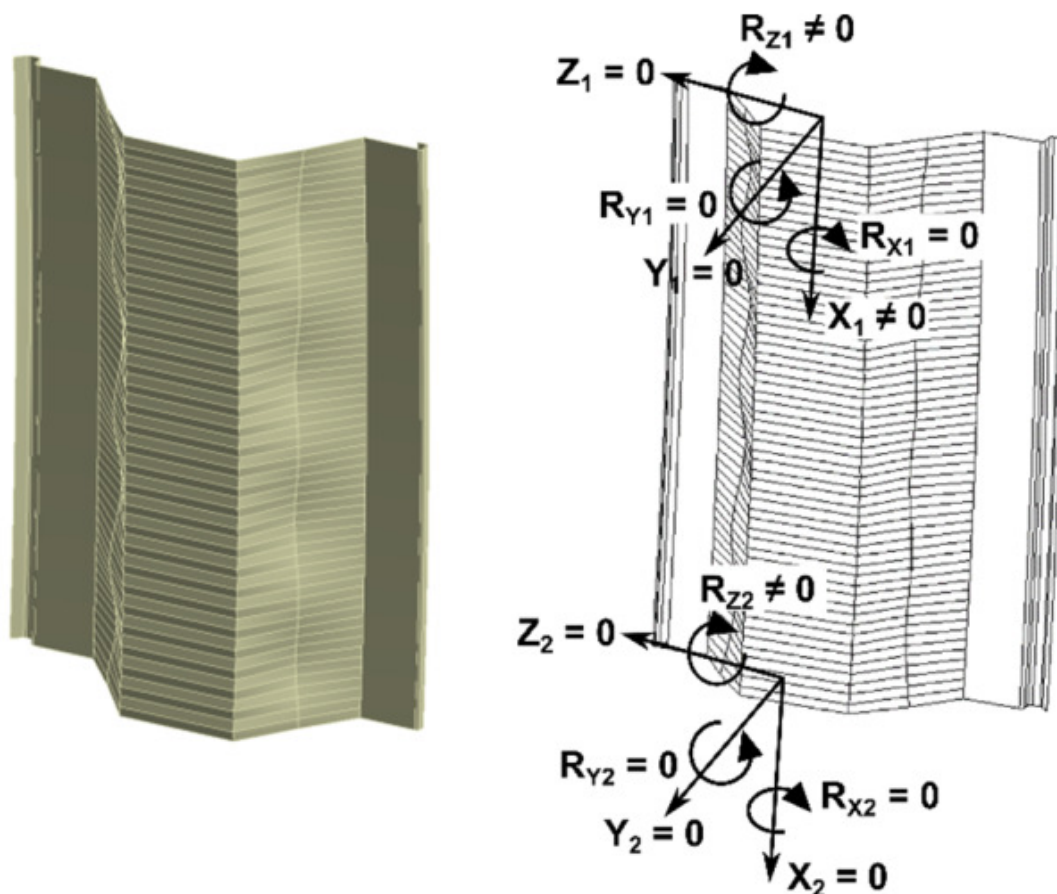
wprowadzają dodatkowe imperfekcje geometryczne, które wpływają na obniżenie nośności w porównaniu do obliczeń wykonywanych na podstawie normy PN-EN 1993-1-5 [6], jak również na podstawie obliczeń numerycznych nieuwzględniających karbowania. Zagadnienia związane z nośnością i statecznością łukowych blach karbowanych były również przedmiotem badań [9]. Autorzy tego artykułu wykonali obliczenia nośności przy ściskaniu osiowym i mimośrodowym fragmentów łukowych blach karbowanych wykorzystując do tego celu metody numeryczne, a następnie wykonano porównawcze badania laboratoryjne. Badania były wykonywane na 6 próbkach, z czego 3 poddawane były osiowemu ściskaniu a 3 kolejno 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. Wyniki pracy [9] wykazują znaczny wpływ ryflowania na warunki i sposób powstawania niestateczności lokalnych. Pilotażowe prace analityczno-badawcze dotyczące nośności i stateczności łukowych blach samonośnych były również prowadzone w Instytucie Techniki Budowlanej. Wyniki prac przedstawiono w artykule [10]. W zakresie realizowanych zadań wykonano badania pełnowymiarowego łukowego przekrycia o rozpiętości 12 m wykonanego z blach karbowanych przy oddziaływaniu symulowanego obciążenia śniegiem. Celem badania było wyznaczenie stateczności i nośności konstrukcji oraz porównanie wyników badań do wyników obliczeń uzyskanych metodą numeryczną. Wyniki pracy wskazują na silnie nieliniowe zależności dotyczące zarówno nośności jak i stateczności konstrukcji. W tym przypadku oprócz niestateczności lokalnych pod uwagę zostały wzięte również niestateczności globalne wynikające z wyboczenia łuku przy ściskaniu. Na podstawie porównania wyników badań z wynikami obliczeń wykazano, że wpływ lokalnej utraty stateczności silnie determinuje postać wyboczenia globalnego i w konsekwencji utratę nośności.

Opisane wyżej publikacje jednoznacznie wskazują, że kluczowym zagadnieniem determinującym nośność i stateczność samonośnych konstrukcji łukowych z blach karbowanych jest identyfikacja mechanizmu powstawania niestateczności w obszarze karbowania środków kształtownika. Jak wynika z opisanego wyżej stanu wiedzy, dokumenty normatywne [4, 5, 6] nie podają dostatecznie ścisłych rozwiązań przydatnych do analizy tego typu konstrukcji. Badania laboratoryjne są utrudnione, ponieważ – jak wykazano wcześniej – sposób karbowania powierzchni zależy od promienia gięcia i grubości blachy w związku z tym liczebność różnych rozwiązań jest znaczna, a badania każdego możliwego rozwiązania było by czasochłonne i kosztowne. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest wspomaganie analiz numerycznych metodami, które stanowiłyby alternatywę do obecnie stosowanych metod pomiarowych. W dalszej części artykułu zostanie przedstawiony proces kalibracji modelu numerycznego z wynikami badań na przykładzie wycinka profilu.

Badania i obliczenia realizowane są w Instytucie Techniki Budowlanej we współpracy z Politechniką Warszawską i przemysłem w ramach Programu Badań Stosowanych finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

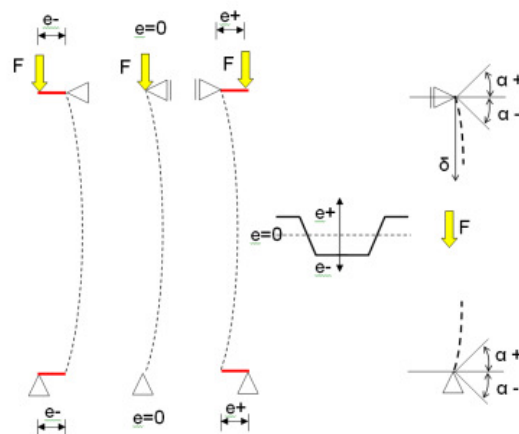
3. Kalibracja modelu numerycznego

Kalibrację modelu numerycznego wykonano przez porównanie wyników obliczeń z wynikami badań. Modele numeryczne wykonywane są w programie Ansys. Do porównania przyjęto model wycinka blachy długości 1,0 m o promieniu gięcia 18,0 m z blachy stalowej S320 i nominalnej grubości rdzenia 1,40 mm. Model zawiera karbowania powierzchni i również falowanie półek (rys. 2)



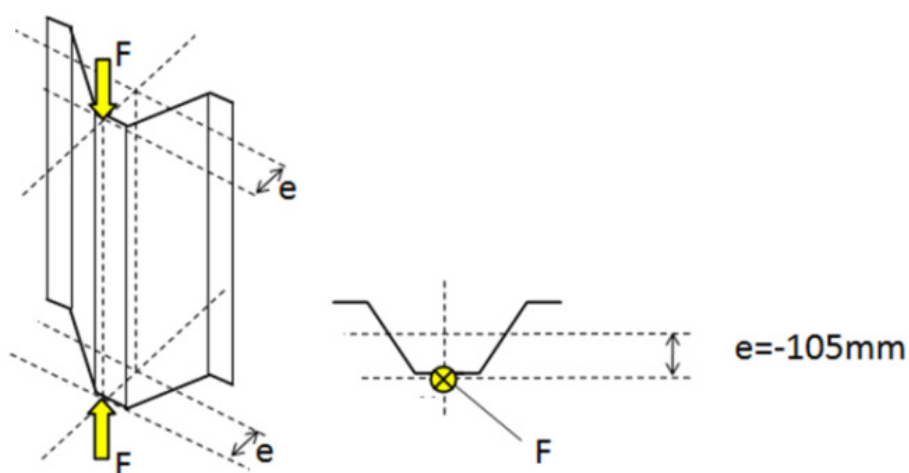
Rys. 2. Model numeryczny i warunki podparcia [13]: a) model elementu b) warunki podparcia

Warunki podparcia modelu przedstawiono na rys. 2a). Górne i dolne krawędzie modelu utwierdzone są na sztywnym zestawie podpór „remote displacement”. Dolna podpora ma możliwość obrotu wokół osi Z_2 , pozostałe stopnie swobody są odebrane. Górna podpora ma możliwość obrotu wokół osi Z_1 i przemieszczenia wzdłuż osi X_1 , pozostałe stopnie swobody są odebrane. Model materiału opracowano na podstawie badań wycinków blachy w statycznej próbie rozciągania. Badania wycinka profilu wykonano na prototypowym stanowisku (rys. 3a), które umożliwia osiowe i mimośrodowe ściskania próbki według schematu przedstawionego na rys. 3b. Linia przerywana na rys. 3b oznacza oś podłużną elementu. Mimośrodowość mogą mieć wartość dodatnią lub ujemną, co odwzorowuje odpowiednio ściskanie górnej lub dolnej półki przekroju. Element badawczy podparty jest przegubowo, co zapewnia swobodny obrót na podporach. Obciążenie realizowano za pośrednictwem siłowników hydraulicznych, pomiar siły wykonano siłomierzem sprzężonym z układem pomiarowym przemieszczeń. Pomiar przemieszczeń w funkcji siły realizowano w sposób ciągły aż do uszkodzenia próbki. Do pomiaru przemieszczeń zastosowano optyczną metodę cyfrowej korelacji obrazu (CKO) [11, 12]. Metoda (CKO) umożliwia pomiar i monitorowanie przemieszczeń i odkształceń obserwowanego obiektu w całym polu widzenia w dwóch lub trzech wymiarach. Metoda charakteryzuje się pomiarem bezstykowym, skalowalnością czułości i skalowalnością wymiarów pola pomiarowego. W badaniach fragmentów blach, stochastyczna struktura plamkowa nakładana jest na całą powierzchnię profilu. Pomiary wykonywane są dwoma kamerami w układzie odniesienia niezwiązanym z uchwytami. Pomiary przemieszczeń i odkształceń w funkcji obciążenia wykonywane są w dwóch kierunkach w płaszczyźnie średnika i półek kształtownika (X , Y) oraz w kierunku normalnym do tych płaszczyzn (Z) (wykres 1).



Rys. 3. Stanowisko do badań profilowanej blachy
a) widok stanowiska badawczego b) schemat obciążenia

Mimośród działania siły przyjęty do obliczeń wynosi 105mm i odpowiada on położeniu siły w odległości 15 mm od środka kształtownika (rys. 4).

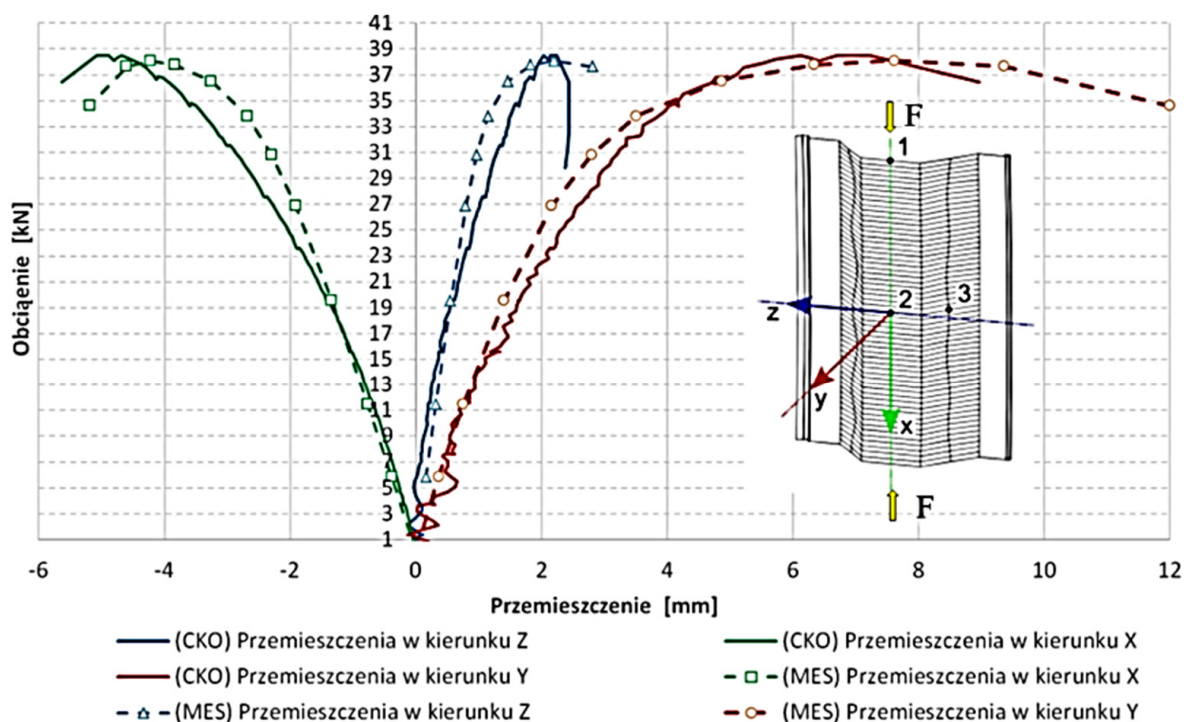


Rys. 4. Schemat obciążenia

Porównanie wyników badań i obliczeń przedstawiono na rys. 5. Przemieszczenia odczytywano dla punktów referencyjnych odpowiednio: u_x – przemieszczenie pionowe w płaszczyźnie punkcie, u_y – przemieszczenie z płaszczyzny w punkcie 2, u_z – przemieszczenie z płaszczyzny w punkcie 3. W tabeli 1 zestawiono porównanie wyników badań (CKO) i obliczeń (MES). Tabela zawiera maksymalną siłę przed uszkodzeniem próbki oraz odpowiadające jej przemieszczenia punktów referencyjnych.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań i obliczeń

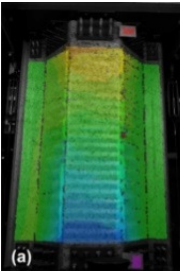
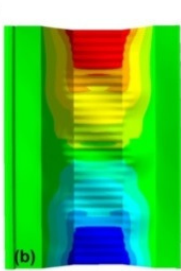
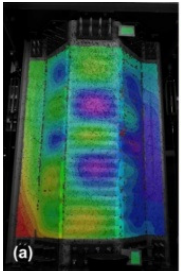
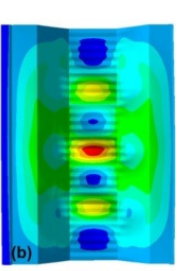
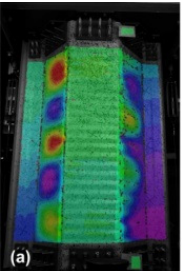
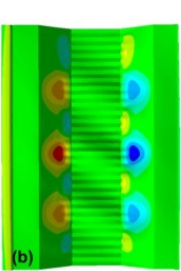
	Maksymalne obciążenie	Przemieszczenia przy maksymalnym obciążeniu		
	F_m [kN]	u_x [mm] punkt 1	u_y [mm] punkt 2	u_z [mm] punkt 3
Badania (CKO)	38,5	-4,69	7,23	2,24
Obliczenia (MES)	38,1	-4,21	7,61	2,20



Rys. 5. Porównanie wyników badań i obliczeń

W tabeli 2 przedstawiono graficzną prezentację wyników badań i obliczeń w postaci map przy szczytowej wartości obciążenia 38,5 kN. Mapy zestawiono parami dla odpowiedniego kierunku przemieszczeń. Mapa CKO prezentuje wynik badania, mapa MES wynik obliczeń numerycznych.

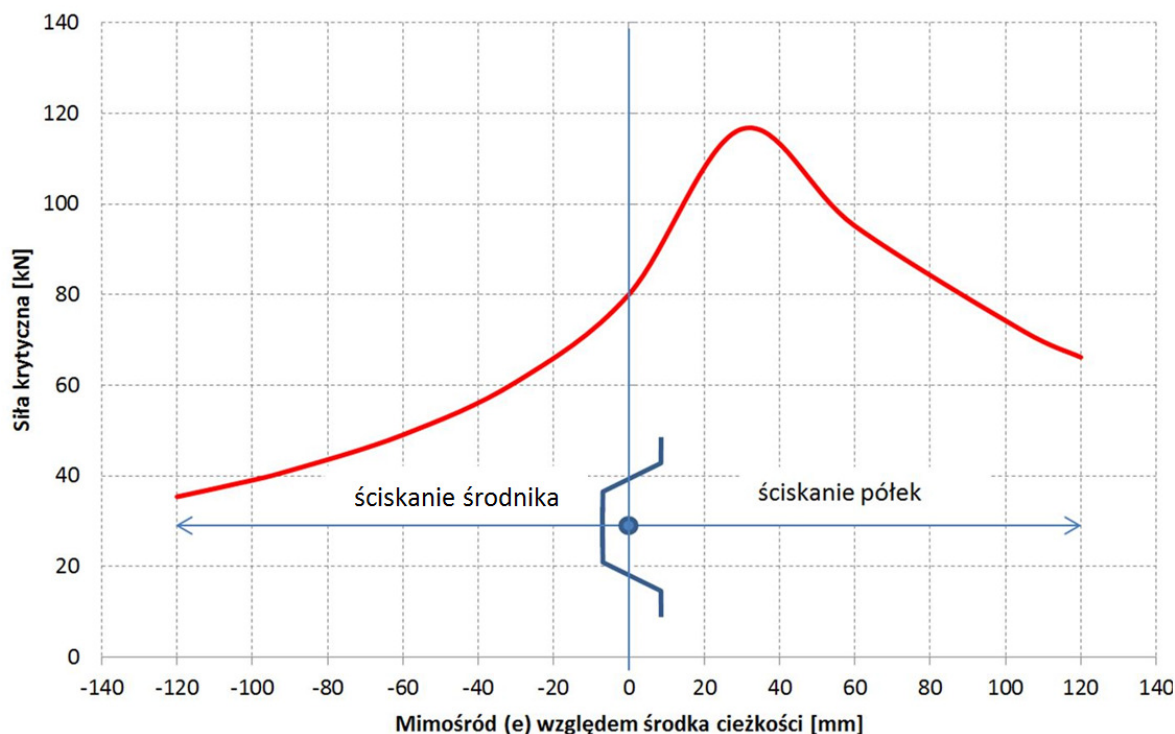
Tabela 2. Mapy przemieszczeń kierunkowych

Przemieszczenie u_x		Przemieszczenie u_y		Przemieszczenie u_z	
					
0,00 2,50 5,00 u_x [mm]		1,00 5,50 10,00 -1,07 3,27 7,61 u_y [mm]		-2,50 0,13 2,75 -2,62 -0,02 2,60 u_z [mm]	
CKO b) MES		CKO b) MES		CKO b) MES	

Błąd modelu MES w porównaniu do wyników obliczeń wynosi odpowiednio: 1% dla maksymalnej siły oraz od 2 do 10% dla przemieszczeń dla szczytowej wartości obciążenia. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że krzywe obciążenie – przemieszczenie uzyskane na podstawie obliczeń w porównaniu wyników uzyskanych w badaniu (wykres 1) mają bardzo zbliżony charakter. Podobną analizę wykonano dla ściskania osiowego i mimośrodowego. Wynik porównania był porównywalny z prezentowanym powyżej. Szczegółowe analizy prowadzące do kalibracji modeli numerycznych opisanego powyżej wycinka blachy profilowanej przedstawione są w opracowaniu [13].

4. Wyniki obliczeń i dalsze prace

Dalsze prace badawcze zostały zrealizowane wyłącznie na podstawie obliczeń z wykorzystaniem skalibrowanego modelu MES. Celem obliczeń było wyznaczenie maksymalnych obciążeń przy ściskaniu dla 12 różnych mimośrodków. Sześć wartości mimośrodu ujemnego (ściskanie środka), sześć dodatniego (ściskanie pól) oraz ściskanie osiowe (mimośród o zerowej wartości). Na podstawie obliczeń wyznaczono obciążenia krytyczne dla profilu o promieniu gięcia 18 m i z blachy gatunku S320 o grubości rdzenia 1,40 mm. Wyniki obliczeń zestawiono na rys. 6.



Rys. 6. Obwiednia siły krytycznej

Na wykresie 2 przedstawiono obwiednię siły krytycznej w zależności od mimośrodu działania siły ściskającej w przekroju profilu. Wykres nie zawiera wyników związanych ze zginaniem bez udziału siły ściskającej. Szczegółowe dane znajdują się w Instytucie Techniki Budowlanej [14]. W dalszej kolejności planowane są badania profili o różnych promieniach gięcia, różnych grubościach ścianki i wykonanych z różnych gatunków stali. Wyniki obliczeń zilustrowane na wykresie 2 dotyczą wyłącznie nośności przekroju pojedynczego profilu o odpowiednich parametrach kształtowania, gatunku stali oraz grubości rdzenia. Siły krytyczne dotyczą nośności profilu z uwzględnieniem przetłoczeń powierzchni bocznych wynikających z technologii produkcji. Przy dalszym projektowaniu zadaszeń z wykorzystaniem samonośnych blach profilowanych systemu ABM należy wziąć pod uwagę momenty zginające wywołane oddziaływaniem obciążeń oraz wyboczenie całej konstrukcji. Projektowanie z wykorzystaniem wyników prac badawczych określających nośność profilu karbowanego znacznie ułatwia prawidłową identyfikację nośności samonośnych konstrukcji z blach profilowanych.

Literatura

1. PN-EN 1991-1-4 Oddziaływania na konstrukcję. Część 1-4. Oddziaływania ogólne. Obciążenie wiatrem.

2. PN-EN 1991-1-3 Oddziaływania na konstrukcję. Część 1–3. Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem.
3. PN-EN 1993-1-1 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
4. PN-EN 1993-1-3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1–3. Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
5. PN-B-03207: 2002. Konstrukcje stalowe z kształtowników i blach profilowanych na zimno. Projektowanie i wykonanie.
6. PN-EN 1993-1-5 Projektowanie konstrukcji stalowych. Blachownice.
7. Biegus A., Analiza statyczna – wytrzymałościowa łukowych blach fałdowych. Konstrukcje stalowe, grudzień 2003.
8. Walentyński R., Cybulska M., Cybulski R., Influence of geometrical imperfections on the local stability of thin – walled elements. *Steel Structures. Theory and Applications*. Volue 3. 2013.
9. Li-Li Wu, Xuan-Neng Gao, Young-Jiu Shi, Yuan-Qing Wang Theoretical and Experimental Study on Interactive Local Buckling of Arch-shaped Corrugated Steel Roof. *Steel Structural* 6(2006) 45–54.
10. Piekarczyk A., Malesa M., Kujawinska M., Malowany K., Application of Hybrid FEM-DIC Method for Assessment of Low Cost Building Structures. *Experimental Mechanics* November 2012, Volume 52, Issue 9, pp 1297–1311.
11. Sutton M., Or teu J-J., Schreier H., Image Correlation for shape, motion and deformation measurements, Springer, 2009.
12. Malesa M., Malowany K., Tomczak U., Siwek B., Kujawińska M., Siemińska-Lewandowska A., “Application of 3d digital image correlation in maintenance and process control in industry,” *Computers in Industry*, vol. 64, no. 9, pp. 1301–1315, 2013.
13. Piekarczyk A., Malowany K., Więch P., Kujawinska M., Sulik P., “Stability and bearing capacity of arch-shaped corrugated shell elements: experimental and numerical study” *Bulletin of The Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* (w druku), March 2015.
14. Projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekt Badań Stosowanych, edycja 1 nr 177953. Opto-numeryczne metody badań i monitorowania nisko-kosztowych obiektów użyteczności publicznej z cienkościennych blach profilowanych.

DESIGN PROBLEMS OF ARCH-SHAPED CORRUGATED SHELL ELEMENTS

Abstract: The ABM is a system of erection of self-supporting arched roof structures. During the production process the profile of complex shape is created, with deep corrugation and wave like distortions to the shape of its walls. This kind of profile cross-section geometry makes calculations methods given in appropriate standards inadequate for their purpose. The lack of sufficient methods of analysis causes leads to erroneous estimation of load carrying capacity of considered roof structures and as a result to their failures. In the paper the design approach based on numerical and experimental results is presented.

Keywords: ABM system, digital image correlation, load carrying capacity, numerical calculation methods.