

„Pięta Achillesa” samonośnych hal łukowych w technologii ABM

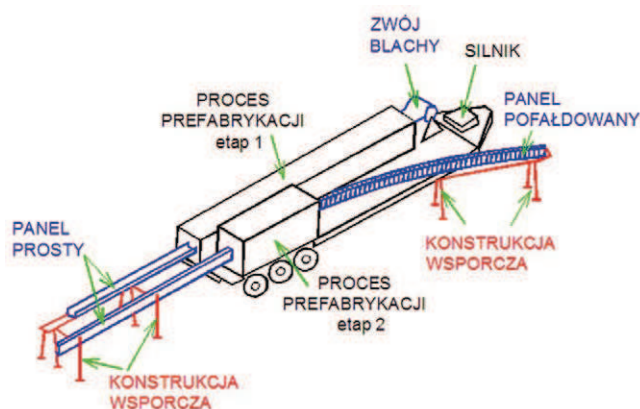
Dr hab. inż. Ryszard Walentyński, mgr inż. Robert Cybulski, mgr inż. Krzysztof Kozieł, Politechnika Śląska, Gliwice

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach nowoczesne konstrukcje budowlane stają się znacznie lżejsze aniżeli kilka lat temu. Bardzo często konstrukcje te są budowane przy użyciu, giętych na zimno, stalowych elementów konstrukcyjnych, które mają stosunkowo gładkie powierzchnie. Metody obliczeniowe dla tych przypadków są znane. Pojawia się pytanie: jak obliczać elementy cienkościenne z dużymi geometrycznymi imperfekcjami? Przykładem takich elementów konstrukcyjnych są panele ABM do budowy samonośnych hal i zadaszeń łukowych. Najprostszą metodą, lecz nie zawsze najtańszą, są badania laboratoryjne, które bardzo zwięźle są opisane w niniejszym artykule ze szczególnym wskazaniem na uzyskanie formy zniszczenia.

2. Opis technologii ABM

Tanie i szybkie rozwiązania dla budownictwa są zawsze bardzo pożądane, a szczególnie wtedy, gdy sytuacja gospodarcza jest nienajlepsza. Jednym z rozwiązań, które spełnia powyższe wymagania jest technologia ABM 120 i 240 (ang. Automatic Building Machine). Jest to przenośna fabryka używana do prefabrykacji i budowy łukowych hal i zadaszeń stalowych w oparciu



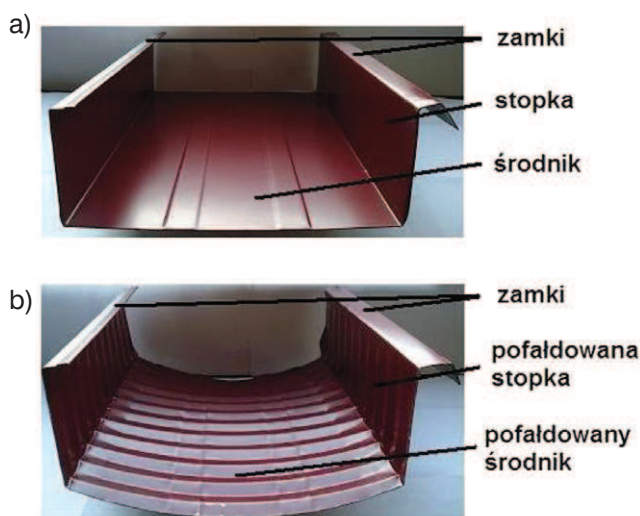
Rys. 2. Proces prefabrykacji

o samonośne panele o przekrojach przedstawionych na rysunku 1. Artykuł ten skupia się głównie na technologii ABM 120.

Technologia ta pochodzi z USA i należy do MIC Industries Inc. Była ona powszechnie używana przez amerykańską armię do budowy tymczasowych budynków, a w dzisiejszych czasach technologia ta stała się popularna w budownictwie cywilnym.

Maszyna służąca do prefabrykacji paneli jest umieszczona na przyczepie, tworząc „fabrykę na kółkach” i może być łatwo transportowana na każdą budowę. Po przywiezieniu na teren budowy urządzenia i kręgów blachy płaskiej, proces prefabrykacji może być wykonany przez niewielką grupę przeszkolonych monterów. W pierwszym etapie, z rolki blachy powstaje prosty panel o geometrii jak na rysunku 1a. Wysokość tego elementu wynosi 109 mm, a jego szerokość 304 mm. Panel ten jest docięty tak, aby osiągnąć potrzebną rozpiętość przyszłej konstrukcji łukowej. Następnie, prosty panel jest wyginany, tworząc łuk, a jego kształt zmienia się w skutek pofałdowania poprzecznego powierzchni dolnej i powierzchni bocznych (rys. 1b). Pofałdowany panel ma wysokość równą 130 mm, a jego szerokość zmienia się w niewielkim stopniu. Panele mogą mieć grubość do 1 mm. Proces prefabrykacji paneli jest przedstawiony na rysunku 2.

Docelowa geometria powstała w skutek głównego gięcia podłużnego – uzyskanego podczas tworzenia przekroju w etapie 1 i drugorzędowego gięcia poprzeczne-



Rys. 1. Panel ABM 120: a) prosty, b) pofałdowany

go – pofałdowania powierzchni uzyskanej w etapie 2. Stąd też, używana jest nazwa podwójnie giętych paneli cienkościennych. Nazwa ta, była po raz pierwszy użyta przez H. Manga w [1].

Kilka pojedynczych paneli jest ze sobą połączonych zgniatarką, następnie są one mocowane do zawiesia i transportowane do miejsca wznoszenia za pomocą dźwigu. Rysunek 3 przedstawia gotową halę wykonaną w technologii ABM 120 w Siemianowicach Śląskich, a poniżej samonośny dach, jako przekrycie sali gimnastycznej w Pawłowicach Śląskich. Dokładny opis i wykorzystanie omawianej technologii w kraju i na świecie przedstawiono w [2] i [3]. Proces budowy hal w systemie ABM 240 przedstawiono w [4] i nie jest omawiany w niniejszym artykule.



Rys. 3. Hala oraz zadaszenie w technologii ABM 120

Ze względu na pofałdowaną powierzchnię paneli ABM, wyznaczenie parametrów efektywnych przekroju poprzecznego według norm krajowych [a] oraz europejskich [b] jest niemożliwe. Normy te nie uwzględniają poprzecznych imperfekcji geometrycznych i przewidują procedury obliczeniowe tylko dla elementów cienkościennych o prostych ścianach (rys. 1a). Parametry efektywne przekroju są niezbędne przy projektowaniu konstrukcji z elementów giętych na zimno. Według wiedzy autorów, konstruktorzy nie uwzględniają pofałdowania powierzchni paneli (rys. 1b) co prowadzi do zawyżenia nośności elementów, z których projektowana jest hala. Takie uproszczone podejście analizowania konstrukcji w technologii ABM 120 zaprezentowano również w pracy [5].

Na Politechnice Śląskiej zostały wykonane przez autorów badania sztywności i nośności powłoki ABM 120 o grubości 1,0 mm wykonanej z blachy S280GD. Badania laboratoryjne składały się z wyznaczenia sztywności na zginanie i granicznego momentu zginającego oraz z wyznaczenia sztywności na ściskanie i granicznej siły ściskającej. Autorzy zauważyli, że mechanizm zniszczenia paneli powtarzał się i był związany z koincy-

dencją fałd poprzecznych. Zjawisko to nazwano „piętą Achillesa” systemu ABM. Artykuł ten ma na celu przedstawienie formy zniszczenia paneli ABM, a nie konkretnych wartości liczbowych uzyskanych z badań.

3. Badania laboratoryjne

3.1. Elementy zginane

Celem badania było określenie sztywności na zginanie powłoki oraz momentu zginającego, przy którym element ulega zniszczeniu. Badanie zostało przeprowadzone dla 2 wariantów położenia powłoki, jako łuk wypukły i wklęsły (rys. 4). Te dwa schematy są uwzględniane ze względu na różne przypadki obciążenia konstrukcji łukowych.

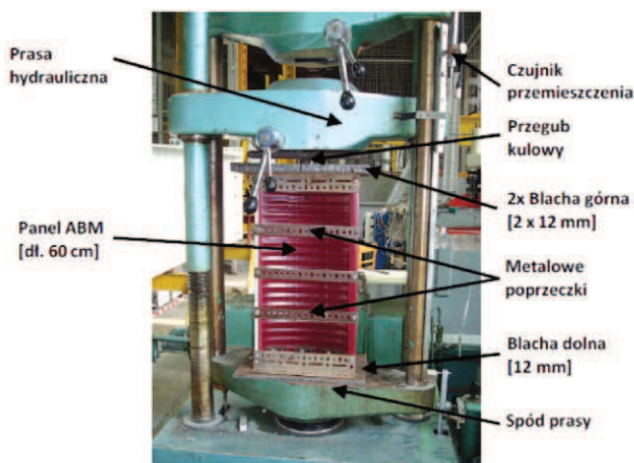


Rys. 4. Stanowisko badawcze dla elementów zginanych: a) łuk wypukły, b) łuk wklęsły

Schematem statycznym jest belka swobodnie poparta obciążona 2 siłami skupionymi w odległości $\sim 1/3$ rozpiętości od podpór. Rozpiętość badanych elementów wynosi $\sim 4,00$ m natomiast szerokość $\sim 1,80$ m, czyli jest to 6 paneli połączonych ze sobą. Obciążenie zostało przekazane równomiernie na każdy z paneli poprzez dodatkową konstrukcję stalową i deskę drewnianą. Siła została wygenerowana za pośrednictwem siłownika pneumatycznego ręcznego przymocowanego do ramy stalowej. Pomiar siły wykonany poprzez odczyty z siłomierza, pomiar ugięć poprzez czujniki zainstalowane w środku rozpiętości elementu, na podporze przesuwnej oraz czujniki kontrolne w wybranych miejscach. Badanie było prowadzone do zniszczenia elementu.

3.2. Elementy ściskane

W celu wyznaczenia sztywności osiowej panelu ABM, wykonano dziewięć próbek o długości $L=60$ cm, a następnie poddano je ściskaniu osiowemu w prasie hydraulicznej. Próbki te były przymocowane do blach o grubości 12 mm. Blacha dolna spoczywała na spodzie prasy hydraulicznej. Na blasze górnej położona została jeszcze jedna blacha o grubości 12 mm w celu zminimalizowania odkształceń niezwiązanych z elementem docelowym. Na podwójną blachę, prasa hydrauliczna przekazywała siłę poprzez przegub kulowy. Do elementu testowego przymocowano metalowe poprzeczki, które miały zapobiec utracie stateczności miejscowej poprzez zwichrzenie oraz rozchodzeniu się na boki ścian analizowanej próbki, co miało doprowadzić do zgodności badanej próbki z powłoką zabudowaną na obiekcie. Założono czujniki do pomiaru przemieszczenia osiowego oraz siły. Czujniki te, podłączone były do stanowiska komputerowego. Stanowisko badawcze przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Stanowisko badawcze dla elementów ściskanych

4. Formy zniszczenia badanych próbek oraz wnioski końcowe

Formy zniszczenia próbek przedstawia rysunek 6 i odpowiadają one następującym badaniom:

- badanie zginanych paneli ABM – łuk wypukły (rys. 4a),
- badanie zginanych paneli ABM – łuk wklęsły (rys. 4b),
- badanie ściskanego panelu ABM (rys. 5).

Na rysunku 6a stopka znajduje się w strefie ściskanej i jest narażona na zwichrzenie. Dodatkowo zamki łączące sąsiednie panele składające się z 4 warstw zagiętej blachy mają widoczną tendencję do rozwarstwienia się. W chwili zniszczenia stopki przechyliły się na bok powodując pofalowanie zamka. Zamek w momencie zniszczenia przechylił się tak, że jego swobodna krawędź



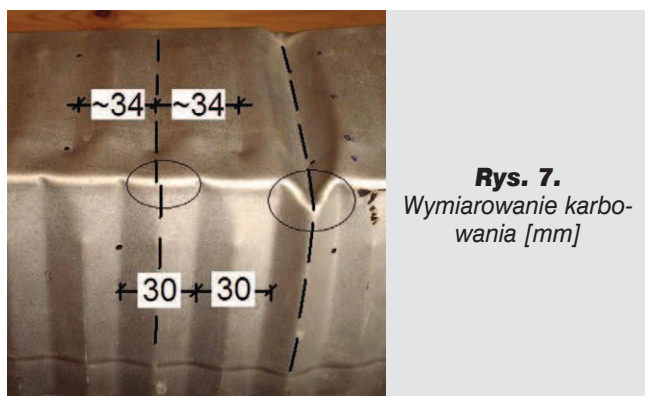
Rys. 6. Formy zniszczenia paneli ABM

przenosiła naprężenia ściskające, które spowodowały jego rozwarstwienie i zniszczenie. Taki schemat zniszczenia paneli został zaobserwowany podczas awarii hali łukowej w systemie ABM 120 w Gdańsku. Dokładny opis tej awarii przedstawiono w referacie [6]. Na rysunku 6b zniszczenie nastąpiło w wyniku „zmiążdżenia” narożnika. Zniszczenie (w strefie ściskanej) występuje w miejscach, gdzie poprzeczne falowanie ścianki pionowej i poziomej zachodzą na siebie w kierunku przeciwnym. Przykładowo fala ścianki bocznej skierowana do wewnątrz pokrywa się z zewnętrzną falą ścianki poziomej. W wyniku występowania poprzecznych przetłoczeń, postaci zniszczenia nie można zaklasyfikować do typowych przykładów zniszczenia konstrukcji cienkościennych. Po nałożeniu na siebie wykresów siła – ugięcie z przebiegu badań dla łuku wklęsłego i wypukłego, zauważono, że charakterystyki sztywności nieznacznie się różnią. W badaniu pierwszym (rys. 4a), gdzie swobodny zamek jest w strefie ściskanej i jest on powodem zniszczenia, sztywność jest większa i nie obserwuje się jej wyraźnego spadku wraz ze wzrostem obciążenia. W tym przypadku fałdowanie będące w strefie rozciąganej, zmniejsza się. W badaniu drugim (rys. 4b) w strefie ściskanej znajduje się znaczna część fałdowania (przede wszystkim cała półka dolna) wraz

ze wzrostem obciążenia, wysokość faldowania wzrasta i sztywność maleje. W badaniu tym można zaobserwować wyraźnie obszar nieliniowej zależności siły do ugięcia, natomiast w badaniu pierwszym, zależność ta jest prawie liniowa. Wykresy te nie są przedstawione w niniejszym artykule, ponieważ obecnie służą one do opracowania procedur obliczeniowych dla podwójnie giętych konstrukcji cienkościennych.

Przy ściskaniu osiowym próbek (rys. 6c) doszło do zniszczenia poprzez „zmiażdżenie” pofalowanych ścianek elementu. Zniszczenia te również występują w miejscach, gdzie poprzeczne faldowanie ścianki pionowej i poziomej zachodzą na siebie w kierunku przeciwnym.

Formy zniszczenia pokazane na rysunkach 6b i 6c powtarzały się dla każdego badania tego typu. Fałdy na ściankach bocznych (stopkach) mają rytm równy około 34,3 mm, a na blasze poprzecznej (środniku) 30 mm (rys. 7). Fałdy te pokrywają się co 480 mm.



Rys. 7.
Wymiarowanie karbowania [mm]

Miejsce to okazuje się najstabszym i każdorazowo zniszczenie inicjowane było w takim przekroju. Z tego powodu nazwano to zjawisko „piętą Achillesa” tego panelu. Gdyby można było zasugerować producentowi technologii ABM, aby faldowanie ścianki pionowej i poziomej nie pokrywały się w tej samej płaszczyźnie, to z przeprowadzonych symulacji komputerowych opisanych w [7] i [8] można wnioskować, że panele takie miałyby większą sztywność giętną i osiową. Dokładna analiza pofalowań powierzchni paneli ABM 120 i wpływu tego faldowania na jego sztywność i nośność była możliwa na podstawie przestrzennego skanowania optycznego powierzchni tych paneli. Metoda ta została przed-

stawiona w [9]. Podobne wnioski zostały przedstawione przez zagraniczne ośrodki naukowe, gdzie w [10] analizowano system ABM 240 oraz w [11] kanadyjski system samonośnych hal łukowych z podwójnie giętych paneli cienkościennych.

Projekt jest finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/N/ST8/03552. Współautor R. Cybulski jest Stypendystą w ramach projektu „DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Współautor K. Kozieł jest Stypendystą w ramach projektu „SWIFT (Stypendia Wspomagające Innowacyjne Forum Technologii)”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mang A. H., Finite element analysis of doubly corrugated shells. *Journal of the Structural Division*, nr 10/1976
- [2] Walentyński R., Design problems of cold formed lightweight ark structures. *Local seminar of IASS Polish Chapter*, 2004
- [3] Walentyński R., Cybulski R., Hale łukowe dla rolnictwa. *Agro hale*, nr 1/2012
- [4] Szymański J., Żala B., Majza M., Hale bez konstrukcji nośnej w technologii ABM. *Nowoczesne hale*, nr 6/2012
- [5] Kowal A., Dachy dużej rozpiętości z blachy faldowej w technologii ABM. *Materiały Budowlane*, nr 454/2010
- [6] Biegus A., Kowal A., Katastrofy hal o konstrukcji z blach giętych na zimno. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 10/2011
- [7] Walentyński R., Cybulski R., Kozieł K., Numerical models of ABM K-span steel arch panels. *Architecture, Civil Engineering, Environmental- ACEE*, nr 4/2011
- [8] Walentyński R., Sanchez R., Cybulski R., Linear buckling analysis with different ABM K-span arch panels. *Architecture, Civil Engineering, Environmental – ACEE*, nr 2/2012
- [9] Walentyński R., Cybulski R., Skanowanie optyczne paneli. *Nowoczesne Hale*, nr 4/2012
- [10] Wu L., Huan-Neng G., Theoretical and Experimental Study on Interactive Local Buckling of Arch-shaped Corrugated Steel Roof. *Steel Structures*, nr 6/2006
- [11] Lei X., Yanglin G., Ping G., Compressive tests of cold-formed steel curved panels. *Journal of Constructional Steel research*, nr 57/2001

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [a] PN-B-032007:2002. Konstrukcje stalowe – Konstrukcje z kształtowników i blach profilowanych na zimno – Projektowanie i wykonanie.
- [b] Eurokod 3: PN-EN 1993-1-3:2008. Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.

www.przegladbudowlany.pl/archiwum



Archiwum od ręki
archiwalne spisy treści
na stronach www