

dr hab. inż. Janusz Juraszek, prof. ATH^{1*)}

ORCID: 0000-0003-3771-2776

dr inż. Piotr Woźniczka²⁾

ORCID: 0000-0002-5741-9526

mgr inż. Dawid Rusin³⁾

ORCID: 0000-0001-6311-3991

Badania eksperymentalne i symulacje komputerowe ściany osłonowej MB-SR50N HI obciążonej wiatrem

Experimental research and computer simulations of a wind-loaded MB-SR50N HI curtain wall

DOI: 10.15199/33.2022.09.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacji numerycznych MES ściany osłonowej MB-SR50N HI wykonanej z profili aluminiowych. Przeprowadzono badania polegające na obciążeniu wiatrem ściany osłonowej, zarówno ciśnieniem, jak i podciśnieniem o wartości 2400 Pa w specjalnej komorze badawczej. Wyznaczono wartości ugięć w wybranych punktach pomiarowych. Zbudowano model numeryczny ściany osłonowej za pomocą systemu MES Abaqus. Uwzględniono nieliniowość geometryczną oraz rzeczywiste obciążenie o wartościach analogicznych, jak w przypadku badań eksperymentalnych. Otrzymane wyniki symulacji numerycznych są porównywalne z rezultatami badań doświadczalnych. Badanie przemieszczeń i ugięć aluminiowo-szklanych ścian osłonowych ma istotne znaczenie z punktu widzenia ich bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

Słowa kluczowe: budownictwo; konstrukcje aluminiowo-szklane; FBG.

Abstract. This paper presents results of testing and numerical FEM simulations of the MB-SR50N HI curtain wall of aluminium profiles. Wind-load tests were carried out in a special testing chamber making it possible to load the curtain wall with pressure and partial vacuum of 2400 Pa. Values of deflection were determined in selected measuring points. A numerical model of the curtain wall was built using the Abaqus FEM system. Geometrical nonlinearity and the real load with values analogous to those obtained from experiments have been taken into account. The obtained results of numerical simulations are comparable with results of experimental research. The testing of displacements and deflections of aluminium-glass curtain walls is important from the point of view of their operational safety.

Keywords: civil engineering; aluminium-glass structures; FBG.

W przypadku komercyjnych budynków biurowych i usługowo-mieszkalnych dominują obiekty średniowysokie oraz wysokie. Od wielu lat standardem jest tworzenie konstrukcji praktycznie całkowicie przeszklonych, w których udział nieprzeziernych, murowanych ścian zewnętrznych oraz innych elementów przesłaniających światło (np. słupy czy rygle) jest niewielki. W związku z tym najczęściej wykorzystywanym rozwiązaniem są ściany aluminiowo-szklane. Jednym z możliwych do wykorzystania systemów jest MB-SR50N HI firmy Aluprof S.A., przeznaczony do konstruowania i wykonywania lekkich płaskich ścian osłonowych typu zawieszanego i wypełniającego oraz dachów, świetli-

ków i innych konstrukcji. Badanie obciążenia ściany osłonowej wiatrem przeprowadzono w centrum badań wyposażonym w komorę badawczą do badania właściwości fizycznych ścian osłonowych oraz systemów okiennie-drzwiowych. W komorze mogą być testowane obiekty o wysokości i szerokości 10 m. Metodę badania odkształceń i przemieszczeń za pomocą nowego rodzaju czujników światłowodowych z siatkami Bragga FBG, które mogą być implementowane w tego typu zagadnieniach, opisano w pracach [1, 2]. Informacje o konstrukcjach aluminiowych i aluminiowo-szklanych przedstawiono m.in. w [3, 4], a w [5] obszernie omówiono aktualny stan wiedzy dotyczący konstrukcyjnego wykorzystania szkła. Natomiast w [6] opisano metody badań oraz kryteria oceny sztyb zespolonych.

Przedmiot i metoda badań

Przedmiotem badań była ściana osłonowa MB-SR50N HI produkcji firmy Aluprof (fotografia 1). Badania były



Fot. 1. Stanowisko do badania systemowej ściany osłonowej

Fot. D. Rusin
Photo 1. Test stand for the system curtain wall

¹⁾ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej; Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

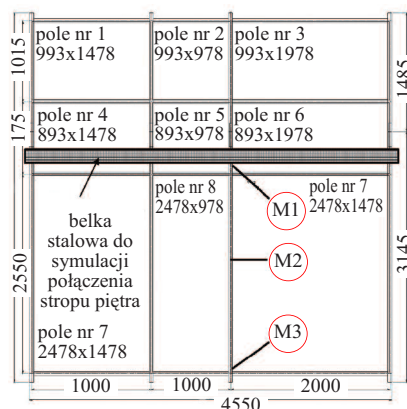
²⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

³⁾ Aluprof S.A.

^{*} Adres do korespondencji: jjuraszek@ath.bielsko.pl

prowadzone przez zespół firmy Aluprof. Rygle i słupy ściany wykonano z profili aluminiowych o wymiarach odpowiednio 145 x 50 mm i 150 x 50 mm, natomiast grubość ścianek wynosiła 2 – 4 mm. Zastosowano szyby zespolone 6 ESG/16/6 ESG oparte w sposób liniowy. Wykonano systemowe połączenia rygli ze słupami. Szczegółowe omówienie rozpatrywanego systemu przedstawiono w [3]. Jednym z najważniejszych kryteriów stawianych takiej konstrukcji jest jej odporność na obciążenie wiatrem. Wymaganie to jest szczegółowo opisane w punkcie 4.1 normy PN-EN 13830:2005 „Ściany osłonowe. Norma wyrobu”, gdzie ugięcie elementów ściany osłonowej (d) pomiędzy punktami podparcia lub zakotwienia (L) do konstrukcji budynku nie powinno przekraczać wartości $d \leq L/200$ lub 15 mm, w zależności od tego, co jest mniejsze. Schemat konstrukcji ściany przedstawiono na rysunku 1, a detal podparcia słupa na fotografii 2.

Maksymalne obciążenie wiatrem ściany osłonowej MB-SR50N HI założono na poziomie ± 2400 Pa. Przywołana norma PN-EN 13830:2005 podaje, że fakultatywnie można wykonać badanie pod zwiększonym obciążeniem, które wynosi 150% ciśnienia obliczeniowego, co w tym przypadku wynosi 3600 Pa. W przypadku omawianej ściany test ten przeprowadzono z wynikiem pozytywnym, ale nie zostało zapisane ugięcie, dlatego w dalszej części artykułu będzie



Rys. 1. Schemat konstrukcji ściany osłonowej (bez ramy stalowej stanowiska badawczego) oraz odpowiadająca mu lokalizacja punktów pomiarowych podczas badań

Fig. 1. Scheme of the curtain wall structure (without steel frame of the test stand) and location of measurement points during the test



Fot. 2. Detal podparcia słupa ściany na ramie stalowej mocowanej do stanowiska badawczego

Fot. D. Rusin
Photo 2. Detail of the curtain wall post resting on steel frame attached to the test stand

on pominięty. Zastosowana metoda badań jest dokładnie opisana w normie PN-EN 12179:2004 *Ściany osłonowe – Odporność na obciążenie wiatrem – Metoda badania*. Po zamontowaniu ściany osłonowej na stanowisku badawczym i przeprowadzeniu badania na przepuszczalność powietrza oraz wodoszczelność następuje montaż czujników ugięcia M1, M2 i M3 (rysunek 1):

- punkt pomiaru M1: słupek standardowy, górne połączenie (poniżej belki stalowej);
- punkt pomiaru M2: słupek standardowy, środek pola;
- punkt pomiaru M3: słupek standardowy, dolne połączenie.

Odległość pomiędzy punktami M1 a M3 wynosi 2820 mm.

Wyniki badań laboratoryjnych

Wyniki badań ugięcia w punktach M1, M2, M3 w teście obciążeniowym, w przypadku parcia wiatru polegającego na obciążaniu ściany osłonowej ciśnieniem próbnym w czterech etapach (np. 25, 50, 75 i 100%) przez minimalny okres 15 ± 5 s, przedstawiono w tabeli 1. Wyniki badania ugięć w punktach M1, M2, M3 w teście obciążeniowym podciśnieniowym, symulującym ssanie polegające na obciążaniu ściany osłonowej podciśnieniem próbnym w czterech etapach (np. 25, 50, 75 i 100%) przez minimalny okres 15 ± 5 s przedstawiono w tabeli 2.

Największa dopuszczalna wartość ugięcia wynosi $L/200$ lub 15 mm w za-

Tabela 1. Wyniki badania parcia wiatru
Table 1. Test results for wind pressure

Ugięcie czołowe w punktach M1-M3 [mm]					
% z P	25	50	75	100	odkształcenie utrzymujące się po 5 min
P [Pa]	600	1200	1800	2400	
M1 [mm]	-3,86	-7,95	-12,56	-16,4	-1,59
M2 [mm]	-4,76	-9,85	-15,73	-20,47	-1,66
M3 [mm]	-1,09	-2,38	-4,39	-6,15	-0,79
d [mm]	-2,29	-4,69	-7,26	-9,2	odkształcenie pierwotne $\geq 95\%$
L/d [1/...]	-1234	-602	-389	-307	

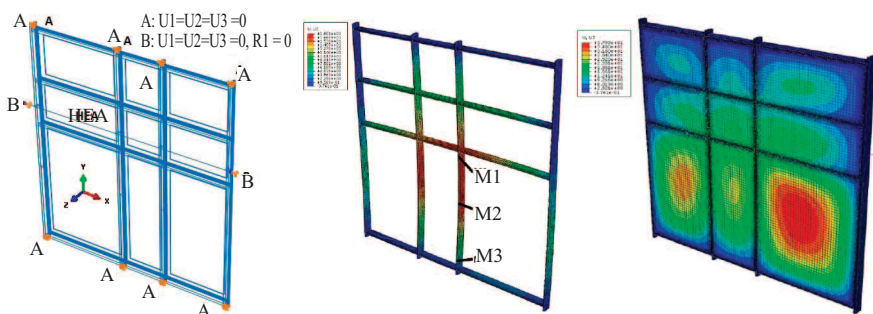
Tabela 2. Wyniki badania ssania wiatru
Table 2. Test results for wind suction

Ugięcie czołowe w punktach M1-M3 [mm]					
% z P	25	50	75	100	odkształcenie utrzymujące się po 5 min
P [Pa]	-600	-1200	-1800	-2400	
M1 [mm]	3,91	7,85	11,79	15,9	0,35
M2 [mm]	4,94	9,85	14,91	20,24	0,55
M3 [mm]	1,08	2,11	3,27	4,46	0,35
f [mm]	2,45	4,87	7,38	10,06	odkształcenie pierwotne $\geq 98\%$
L/d [1/...]	1153	579	382	280	

leżności od tego, która wartość jest mniejsza. Odległość między punktami M1 i M3 wynosiła 2820 mm, a dopuszczalne ugięcie $L/200$, czyli 14,1 mm. Jak widać w testach ściana osłonowa spełnia wymagania normy z zapasem wynoszącym ponad 50% w przypadku parcia i 40% ssania wiatru. Uszkodzeniu nie uległy także szyby zespolone (nie stwierdzono pęknięć).

Wyniki symulacji numerycznych

W przypadku rozpatrywanej aluminiowej ściany osłonowej opracowano model komputerowy (rysunek 2) za pomocą programu Abaqus [7]. Obliczenia prowadzono jako geometryczne nieliniowe. Równomiernie rozłożone obciążenie o wartościach analogicznych, jak w przypadku badań eksperymentalnych (parcie 0,6 – 2,4 kPa), przykładano dla każdego poziomu wartości w minimum czterech etapach. Profile aluminiowe i płyty szklane zamodelowano za pomo-



Rys. 2. Model komputerowy i wyniki obliczeń ugięcia ściany osłonowej Rys. P. Woźniczka
Fig. 2. Computer model and calculation results of the curtain wall deflection

ca standardowych czterowęzłowych elementów powłokowych (S4), natomiast uszczelki, materiały izolacyjne i listwy międzyszybowe za pomocą elementów bryłowych (C3D8R). W przypadku elementów powłokowych (profile aluminiowe) zastosowano siatkę elementów skończonych o wymiarach ok. 25 x 25 mm, a w przypadku szyb przyjęto z kolei wymiar siatki 50 x 50 mm. W wybranych fragmentach modelu (np. w miejscu kontaktu uszczelki z płytą szklaną) siatka została lokalnie zagęszczona do wymiaru 10 x 10 mm. W modelu komputerowym uwzględniono również pośrednie podparcie badanej aluminiowej ściany osłonowej za pomocą dwuteownika HEA140 (rysunek 2). W celu uproszczenia obliczeń dwuteownik został odwzorowany za pomocą elementów prętowych (B31). Należy podkreślić, że pominięcie podatności wspomnianego elementu zdecydowanie zaniżało wyniki przemieszczeń uzyskane za pomocą modelu komputerowego względem analogicznych wartości, których pomiar został wykonany podczas badań eksperymentalnych. W przypadku uszczelek wykonanych z EPDM wykorzystano hiperelastyczny model materiału (model Marlowa, analogicznie jak w [8]). W pozostałych przypadkach przyjęto model liniowo-sprężysty. Zestawienie podstawowych charakterystyk materiałowych zastosowanych w modelu komputerowym przedstawiono w tabeli 3. W celu uproszczenia modelu i przyspieszenia obliczeń pominięto łączniki oraz listwy dociskowe i maskujące. W tej sytuacji założono pełne zespolenie na powierzchni kontaktu elementów wykonanych z różnych materiałów. W modelu nie uwzględniono także sztywnej stalowej ramy stanowiska badawczego. Przyjęte warunki brze-

Tabela 3. Właściwości materiałów zastosowane w modelu komputerowym

Table 3. Properties of materials used in the computer model

Material	Moduł sprężystości [MPa]	Współczynnik Poissona	Ciężar objętościowy [kg/m ³]
Szkoło	70 000	0,22	2500
EPDM	6	0,4999	~ 1050
Aluminium	70 000	0,30	2700

gowe, zgodnie z badaniami eksperymentalnymi, przedstawiono na rysunku 2. Połączenie belki HEA ze słupkami zamodelowano jako przegubowe. Założono, że przyłożone do danej szyby obciążenie jest przekazywane przez powierzchnie kontaktu na listwy dystansowe i uszczelnienia wykonane z EPDM. W modelu wprowadzono także sztywne połączenie pomiędzy słupkami a ryglami. Nie uwzględniono imperfekcji materiałowych i geometrycznych. Wyniki badań doświadczalnych i symulacji numerycznych przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie wyników doświadczalnych i numerycznych f_{test} , f_{MES} – odpowiednio strzałka ugięcia z badań eksperymentalnych i modelu MES, $u_{M1,MES}$ – $u_{M3,MES}$ – przemieszczenia poziome na podstawie modelu MES odczytane w punktach M1 do M3
Table 4. Comparison of experimental and numerical results: f_{test} , f_{MES} – deflection from test and FEM model, respectively; $u_{M1,MES}$ – $u_{M3,MES}$ – horizontal displacement calculated in points M1 to M3 obtained with the FEM model

Poziom obciążenia [kPa]	f_{test} [mm]	f_{MES} [mm]	f_{MES}/f_{test}	$u_{M1,MES}$ [mm]	$u_{M2,MES}$ [mm]	$u_{M3,MES}$ [mm]
0,6	2,29	2,02	88,21%	3,60	4,37	1,08
1,2	4,69	4,12	87,8%	7,29	8,87	2,20
1,8	7,26	6,25	86,09%	11,04	13,43	3,33
2,4	9,2	8,37	91,0%	14,81	18,01	4,48

Wnioski

Rezultaty otrzymane za pomocą zaawansowanego modelu komputerowego należy uznać za zadowalające. W przypadku punktów pomiarowych M1 i M2 różnica między wartościami przemieszczeń poziomych wyznaczonych w programie Abaqus a wynikami badań eksperymentalnych wynosi 10 do maksymalnie 15% (punkt M2, poziom obciążenia

1,8 kPa). Zdecydowanie większe różnice odnotowano w przypadku punktu M3. Biorąc pod uwagę jego lokalizację (bezpośrednie sąsiedztwo dolnej podpory ściany osłonowej), przyczyn różnicowania wyników należy upatrywać w podatności dolnej belki krawdziowej stanowiska badawczego, a także w luzach występujących w połączeniach. Maksymalna wartość naprężeń głównych w płytach szklanych wyniosła 29,2 MPa i nie przekroczyła dopuszczalnej obliczeniowej wartości szkła hartowanego (ok. 80 MPa). W celu zwiększenia dokładności prowadzonych symulacji w dalszych pracach doświadczalnych proponuje się wyznaczenie wartości odkształceń ściany osłonowej w większej liczbie punktów, niż wynika z normy.

Literatura

- [1] Juraszek J. Fiber Bragg Sensors on Strain Analysis of Power Transmission Lines. Materials. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13071559>.
- [2] Juraszek J. Strain and Force Measurement in Wire Guide. Archives of Mining Sciences. 2018; 63: 321 – 334.
- [3] Gwóźdź M. Konstrukcje szklane i aluminiowo-szklane. Kraków. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej; 2020.
- [4] Gwóźdź M. Konstrukcje aluminiowe. Projektowanie według Eurokodu 9. Kraków. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej; 2014.
- [5] Józwick A. Introduction to structural design of glass according to current European standards, Archives of Civil Engineering, 2022; <https://doi.org/10.24425/ace.2022.140634>.

[6] Kosmal M, Kuśnierz A, Kozłowski M. Szkoło budowlane. Warszawa. Wydawnictwo Naukowe PWN; 2022.

[7] Dassault Systemes Simulia Inc., Abaqus Analysis User's Guide, USA, 2010.

[8] Gwóźdź M, Woźniczka P. New static analysis methods for plates made of monolithic and laminated glass, Archives of Civil Engineering. 2020; <https://doi.org/10.24425/ace.2020.135239>.
Badania opisane w artykule były prowadzone w ramach współpracy z firmą Aluprof S.A.

Przyjęto do druku: 3.08.2022 r.