

Zbigniew RESPONDEK (orcid id: 0000-0003-0204-5061)
Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

OBCIĄŻENIA I UGIĘCIA W SZYBACH ZESPOLONYCH O ZRÓŻNICOWANEJ SZTYWNOŚCI SZYB SKŁADOWYCH

Analizowano wpływ zróżnicowania sztywności szyb składowych na obciążenia i ugięcia w zestawach zespolonych ze szczelnymi komorami. Przedstawiono przykłady obliczeniowe pracy szyb zespolonych obciążonych wpływami środowiskowymi. Wykazano, że zwiększenie sztywności szyb w zestawie skutkuje zmniejszeniem możliwości korzystnej kompensacji obciążeń klimatycznych ciśnieniem gazu w komorach. Może to wpływać niekorzystnie na maksymalne ugięcia szyb składowych zestawu, szczególnie w przypadku zróżnicowania ich sztywności.

Słowa kluczowe: szkło w budownictwie, szyby zespolone, obciążenia środowiskowe

WPROWADZENIE

Szyby zespolone składają się z dwóch lub więcej tafli szkła połączonych na obrzeżach ramkami dystansowymi. Przestrzeń między szybami składowymi tworzy szczelne komory, a zamknięty w niej gaz reaguje na ugięcie tych szyb spowodowane zmianami warunków pogodowych, zmieniając swoje ciśnienie - wpływa to na wypadkowe obciążenie eksploatacyjne każdej z szyb zestawu. Aktualne warunki pogodowe warunkują więc wartość obciążeń i ugięć szyb w danej chwili. Ugięcia te powodują między innymi zniekształcenie odbitego w szkłe obrazu, co pogarsza estetykę np. szklanych elewacji. Podejmowane są próby zastosowania urządzeń do wyrównywania ciśnień w trakcie eksploatacji szyb [1], tym niemniej wydaje się, że konstrukcje ze szczelnymi komorami będą jeszcze długo standardem, jeżeli chodzi o zewnętrzne przeszklenia w budynkach.

Wyznaczenie eksploatacyjnego ciśnienia gazu w komorze pozwala na obliczenie wypadkowego obciążenia każdej z szyb zestawu na zasadzie różnicy ciśnień. Odpowiedni model obliczeniowy dla tzw. małych ugięć (tzn. nie większych niż grubość szkła) dla szyby jednokomorowej przedstawiono m.in. w [2-4]. W artykule [5] model uogólniono na szyby wielokomorowe. Analizę wpływu sztywności szyb składowych zestawu na przekazywanie jednostkowego obciążenia w szybie jednokomorowej przedstawiono w artykule [6]. Wykazano, że w zestawie szyba sztywniejsza przyjmuje większe obciążenie niż mniej sztywna, nie analizowano jednak, jak obciążenia wypadkowe przekładają się na ugięcia szyb.

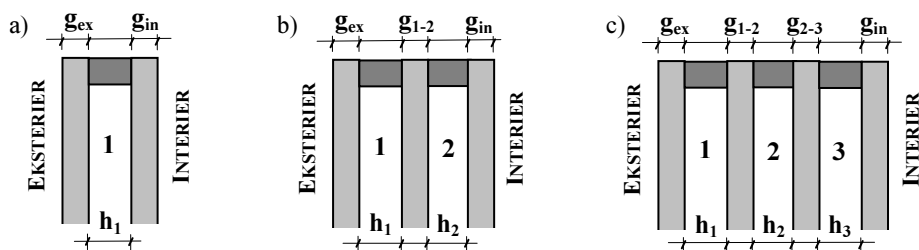
Celem przedstawionych badań modelowych jest określenie wpływu zróżnicowania sztywności szyb składowych na obciążenia i ugięcia w zestawach zespolonych,

w tym wielokomorowych. Problem jest istotny ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji - dzięki przeprowadzonej analizie możliwe jest wskazanie korzystnych i niekorzystnych układów tafli szkła tworzących zestaw.

1. METODYKA BADAŃ MODELOWYCH

Dla przedstawionych w artykule przykładów obliczeniowych przyjęto bazowy zestaw szyb zespolonych o następujących parametrach (rys. 1):

- liczba komór: 1, 2 lub 3;
- wymiary szyby zespolonej: $a \times b = 60 \times 120$ cm;
- grubość komór: $h_1 = h_2 = h_3 = 12$ mm;
- grubość szyb: $g_{ex} = g_{1-2} = g_{2-3} = g_{in} = 4$ mm;
- szyby składowe swobodnie podparte na obwodzie;
- parametry szkła przyjęto według normy [7]: moduł Younga $E = 70$ GPa, liczba Poissona $\nu = 0,2$;
- parametry początkowe gazu w komorach (przyjęty poziom odniesienia): ciśnienie $p_0 = 100$ kPa, temperatura $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (293,15 K).



Rys. 1. Oznaczenia w szybie bazowej: a) jednokomorowej, b) dwukomorowej, c) trójkomorowej

Zmianę sztywności szyb zestawu modelowano przez zwiększenie grubości wybranych tafli szkła do 8 mm. Obciążenia wypadkowe q [kN/m^2], obliczono według metodyki przedstawionej w [5]. Ugięcia w [mm] oszacowano przy założeniu liniowej zależności

$$w = \alpha_w \cdot \frac{q \cdot a^4}{D} \cdot 1000 \quad (1)$$

przy czym:

$$D = \frac{E \cdot g^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (2)$$

gdzie:

q - obciążenie wypadkowe działające na szybę [kN/m^2],

a - szerokość (krótszy wymiar) szyby [m],

α_w - współczynnik bezwymiarowy podawany w wielu publikacjach, np. [2],

D - sztywność płytowa szyby [kN·m],

g - grubość szyby [m],

E - moduł Younga [kPa],

ν - liczba Poissona.

Symbole oznaczające obciążenia wypadkowe i ugięcia uzupełniono indeksami oznaczającymi odpowiednią szybę zestawu - analogicznie jak na rysunku 1. Komory oznaczone indeksami 1, 2, 3 (rys. 1). Przyjęto, że obciążenia i ugięcia są dodatnie, jeżeli działają ze zwrotem w stronę interieru, to znaczy z lewej do prawej, jak pokazano na rysunku 1.

2. OBCIĄŻENIE ZMIANĄ CIŚNIENIA ATMOSFERYCZNEGO

Wyniki modelowych obliczeń obciążenia wypadkowego i ugięcia dla 16 przykładowych szyb zespolonych obciążonych spadkiem zewnętrznego ciśnienia atmosferycznego o 5 kPa, tzn. do wartości 95 kPa, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Obciążenia wypadkowe i ugięcia szyb w zestawach obciążonych spadkiem ciśnienia atmosferycznego o 5 kPa

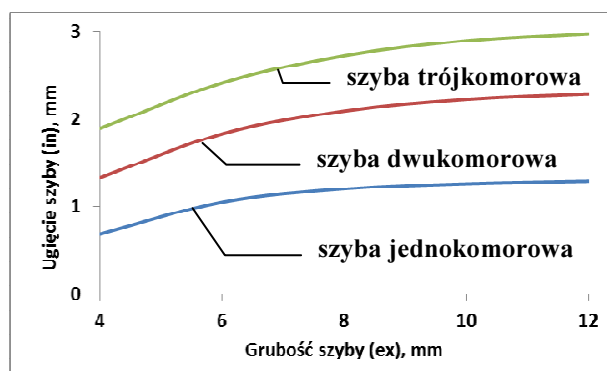
Lp.	Grubość szyby g [mm]				Obciążenie wypadkowe q [kN/m ² na szybę]				Ugięcie szyby w [mm]			
	ex	1-2	2-3	in	ex	1-2	2-3	in	ex	1-2	2-3	in
Szyba zespolona jednokomorowa												
1	4	–	–	4	–0,206	–	–	0,206	–0,69	–	–	0,69
2	8	–	–	4	–0,354	–	–	0,354	–0,15	–	–	1,20
3	8	–	–	8	–1,268	–	–	1,268	–0,53	–	–	0,53
Szyba zespolona dwukomorowa												
4	4	4	–	4	–0,394	0,000	–	0,394	–1,33	0,00	–	1,33
5	8	4	–	4	–0,863	0,245	–	0,618	–0,36	0,83	–	2,09
6	8	8	–	4	–1,454	0,950	–	0,504	–0,61	0,40	–	1,70
7	8	4	–	8	–2,014	0,000	–	2,014	–0,85	0,00	–	0,85
8	8	8	–	8	–2,014	0,000	–	2,014	–0,85	0,00	–	0,85
Szyba zespolona trójkomorowa												
9	4	4	4	4	–0,561	–0,182	0,182	0,561	–1,89	–0,61	0,61	1,89
10	8	4	4	4	–1,388	0,132	0,449	0,807	–0,59	0,45	1,52	2,72
11	4	8	4	4	–0,451	–0,489	0,284	0,655	–1,52	–0,21	0,96	2,21
12	8	4	4	8	–2,478	–0,100	0,100	2,478	–1,05	–0,34	0,34	1,05
13	8	4	8	4	–2,165	–0,033	1,618	0,580	–0,91	–0,11	0,68	1,96
14	8	8	4	4	–1,693	0,542	0,394	0,756	–0,71	0,23	1,33	2,55
15	8	8	8	4	–2,107	–0,159	1,679	0,587	–0,89	–0,07	0,71	1,98
16	8	8	8	8	–2,398	–0,651	0,651	2,398	–1,01	–0,27	0,27	1,01

Szyby zespolone poddane działaniu spadku zewnętrznego ciśnienia atmosferycznego przyjmują wypukłą formę ugięcia.

Na podstawie wyników analizy (tab. 1) stwierdza się, że zwiększenie sztywności wszystkich szyb danego zestawu prowadzi do zwiększenia wypadkowego obciążenia, działającego na szyby skrajne. Wynika to z faktu, że przy sztywniejszych szybach interakcja gazu, polegająca na częściowym niwelowaniu różnicy ciśnień między komorami a powietrzem zewnętrznym, jest mniejsza. Mimo zwiększenia obciążenia wypadkowego ugięcia szyb skrajnych są mniejsze, na przykład w zestawie trójkomorowym zwiększenie grubości szyb z 4 mm do 8 mm skutkuje zmniejszeniem maksymalnego ugięcia w zestawie z 1,89 mm do 1,01 mm. Można również zauważyć, że algebraiczna suma obciążeń w analizowanych zestawach zawsze wynosi 0, zmieniają się jednak bezwzględne wartości obciążeń działających na poszczególne szyby.

Zwiększenie liczby komór przy jednakowej grubości szkła skutkuje wydatnym zwiększeniem obciążenia wypadkowego szyb skrajnych i proporcjonalnym wzrostem ich ugięcia. Na przykład przy grubości szyb 4 mm maksymalne ugięcie dla zestawu jednokomorowego wynosi 0,69 mm, a w zestawie trójkomorowym 1,89 mm.

Analiza wykazała również, że zróżnicowanie sztywności szyb w zestawie jest niekorzystne z punktu widzenia maksymalnych ugięć szyb składowych. Najbardziej niekorzystnym układem jest zwiększenie grubości skrajnej szyby zestawu, w tym przypadku szyby (ex). Większa sztywność tej szyby powoduje zmniejszenie korzystnej interakcji gazu i przez to zwiększenie obciążenia i ugięcia niepogrubionej szyby usytuowanej po przeciwnej stronie zestawu (patrz poz. 5 i 10, tab. 1). Na przykład w zestawie o grubości szyb 4-4-4-4 maksymalne ugięcie wynosi 1,89 mm, a w zestawie 8-4-4-4 zwiększa się do 2,72 mm, czyli o 43,9%. Dokładniejszą analizę w tym względzie przedstawiono na rysunku 2, na którym analizowano wpływ zwiększenia grubości szyby (ex) na zwiększenie ugięcia szyby (in).



Rys. 2. Wpływ zmiany grubości szyby (ex) na ugięcie szyby (in) przy obciążeniu spadkiem ciśnienia atmosferycznego o 5 kPa

3. OBCIĄŻENIE ZMIANĄ TEMPERATURY GAZU W KOMORACH

Przeprowadzone przez autora obliczenia modelowe wykazały, że w przypadku obciążenia szyb zmianą temperatury gazu w komorach odniesioną do temperatury początkowej T_0 zmiana sztywności szyb składowych wpływa na obciążenia i ugięcia w zestawach szyb w sposób analogiczny jak w przypadku obciążenia zmianą ciśnienia atmosferycznego. Dodatkowym czynnikiem jest tutaj możliwość zróżnicowania temperatury eksploatacyjnej w każdej z komór. W tabeli 2 przedstawiono dla wybranych zestawów szyb obciążenia wypadkowe i ugięcia przy założeniu temperatury wnętrza 20°C , temperatury zewnętrznej -20°C i w przybliżeniu liniowej w grubości zestawu zmiany temperatury, to znaczy:

- dla szyby jednokomorowej $T_1 = 0^{\circ}\text{C}$,
- dla szyby dwukomorowej $T_1 = -10^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 10^{\circ}\text{C}$,
- dla szyby trójkomorowej $T_1 = -13,33^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 0^{\circ}\text{C}$, $T_3 = 13,33^{\circ}\text{C}$.

Tabela 2. Obciążenia wypadkowe i ugięcia szyb w zestawach obciążonych spadkiem temperatury w komorach (opis w tekście)

Lp.	Grubość szyby g [mm]				Obciążenie wypadkowe q [kN/m ² na szybę]				Ugięcie szyby w [mm]			
	ex	1-2	2-3	in	ex	1-2	2-3	in	ex	1-2	2-3	in
Szyba zespolona jednokomorowa												
1	4	–	–	4	0,269	–	–	-0,269	0,91	–	–	-0,91
2	8	–	–	4	0,464	–	–	-0,464	0,20	–	–	-1,57
3	8	–	–	8	1,703	–	–	-1,703	0,72	–	–	-0,72
Szyba zespolona dwukomorowa												
4	4	4	–	4	0,610	-0,182	–	-0,428	2,06	-0,62	–	-1,44
5	8	4	–	4	1,351	-0,567	–	-0,784	0,57	-1,91	–	-2,65
6	4	4	–	8	0,859	0,086	–	-0,944	2,90	0,29	–	-0,40
7	8	8	–	8	3,381	-1,259	–	-2,121	1,43	-0,53	–	-0,90
Szyba zespolona trójkomorowa												
8	4	4	4	4	0,924	0,061	-0,422	-0,563	3,12	0,21	-1,42	-1,90
9	8	4	4	4	2,334	-0,466	-0,880	-0,988	0,98	-1,57	-2,97	-3,34
10	4	4	4	8	1,180	0,336	-0,105	-1,411	3,98	1,13	-0,35	-0,60
11	8	4	4	8	3,752	-0,180	-0,458	-3,114	1,58	-0,61	-1,55	-1,31
12	8	8	8	8	4,464	-0,264	-2,056	-2,144	1,88	-0,11	-0,87	-0,90

Przedstawione wyniki wskazują, że zróżnicowanie temperatury eksploatacyjnej w komorach może w pewnych przypadkach być dodatkowym czynnikiem niekorzystnie wpływającym na obciążenia i ugięcia w szybach zespolonych. Na przykład zwiększenie liczby komór z jednej do trzech powoduje ponad 3-krotne zwiększenie maksymalnego ugięcia w szybie (poz. 1 i 8, tab. 2).

WNIOSKI

Przedstawione w artykule badania modelowe wykazały, że wpływ sztywności szyb składowych, a w szczególności jej zróżnicowania, na obciążenia i ugięcia w szybach zespolonych jest znaczący. Szyba zespolona ze szczelnymi komorami jest obciążona zmianami ciśnienia atmosferycznego i temperatury, ale interakcja gazu w komorach częściowo te obciążenia zmniejsza. Sztywniejsze szyby składowe są mniej podatne na ugięcia, co prowadzi do zmniejszenia tej interakcji, przez co obciążenia wypadkowe szyb są większe co do bezwzględnej wartości. W przypadku zwiększenia sztywności wszystkich szyb zestawu ich ugięcia zmniejszają się mimo większego obciążenia. Zróżnicowanie sztywności szyb w zestawie prowadzi do zróżnicowania obciążenia wypadkowego szyb składowych i zwiększenia ugięcia niektórych z tych szyb. Na przykład maksymalne ugięcia w zestawie szyb o grubościach 8-4-4-4 są znacznie większe od ugięć w zestawie 4-4-4-4.

LITERATURA

- [1] Rose A., Zmiana ciśnienia wewnątrz szyb zespolonych (IGU). Wyniki badań, praktyczna realizacja i perspektywy, Świat Szkła 2017, 1, 12-17.
- [2] Respondek Z., Modelowanie obciążeń klimatycznych szyb zespolonych, Część I, Świat Szkła 2004, 12, 22-27.
- [3] Obliczenia szyb zespolonych podpartych na krawędziach. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki nr 426/2007, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2007.
- [4] Piekarczyk A., Metoda projektowania szyb zespolonych, Świat Szkła 2008, 3, 16-20.
- [5] Respondek Z., Model obliczeniowy interakcji obciążeń w szybach zespolonych, Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym 2017, 1(19), 105-110.
- [6] Respondek Z., Interakcja obciążeń w układzie dwóch szyb o różnych sztywnościach połączonych szczelną warstwą gazową, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2010, Budownictwo nr 16, 169-173.
- [7] PN-EN 572-1+A1:2016-03 Szkło w budownictwie - Podstawowe wyroby ze szkła sodowo-wapniowo-krzemianowego. Część 1: Definicje oraz ogólne właściwości fizyczne i mechaniczne.

LOADS AND DEFLECTIONS IN INSULATING GLASS UNITS WITH DIFFERENTIATED STIFFNESS OF GLASS PANES

In the article, the impact of differentiation of glass panes stiffness on loads and deflections in insulating glass units with sealed glass spaces has been analysed. Calculative examples of glass units properties under environmental loads has been presented. It has been proven, that the increase of glass panes stiffness in the units results in the decrease of the possibilities of positive compensation of climatic loads by the pressure in the gas spaces. It may affect negatively the maximal glass panes deflections, especially, in case of differentiation of their stiffness.

Keywords: glass in building, insulating glass units, environmental loads