

Zbigniew RESPONDEK

Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

## ROZKŁAD OBCIĄŻEŃ ŚRODOWISKOWYCH W WIELOKOMOROWEJ SZYBIE ZESPOLONEJ

W artykule analizowano wpływ interakcji gazu w szczelnych komorach szyby zespolonej na przekazywanie obciążeń między szybami zestawu. Na podstawie ogólnego prawa gazowego zaproponowano model obliczeniowy do określania obciążeń na elementy wielokomorowej szyby zespolonej poddanej działaniu zmiennych czynników atmosferycznych (ciśnienie, temperatura) i obciążeń powierzchniowych. Przedstawiono przykład dystrybucji jednostkowego obciążenia powierzchniowego na szyby zestawu jako korzystny wpływ szczelności komory na przekazywanie obciążeń.

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

### WPROWADZENIE

Szyby zespolone są powszechnie stosowanym elementem zewnętrznych przegród budowlanych, takich jak okna i szklane elewacje. Ideą zastosowania szczelnej wypełnionej gazem komory w konstrukcji szyby zespolonej było polepszenie izolacyjności cieplnej tej przegrody. Szczelność komory ma również wpływ na mechaniczną pracę zestawu szyb. Zmienne czynniki atmosferyczne: ciśnienie powietrza, temperatura, wiatr itp. mają wpływ na parametry gazu w komorach szyby, co generuje obciążenia, które są charakterystyczne dla tego typu konstrukcji. Zamknięty w komorach gaz jest też czynnikiem wpływającym na wzajemne przekazywanie (interakcję) obciążeń między szybami zestawu. Obliczeniowy model rozkładu obciążeń środowiskowych w szybie jednokomorowej przedstawiono m.in. w pracach [1-5]. W artykule zaproponowano uogólniony model dla zestawu o dowolnej liczbie komór. Analizowane zagadnienie jest istotne zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji, jak i walorów estetycznych elewacji - nadmierne ugięcia mogą powodować zniekształcenie oglądanego w świetle odbitym obrazu.

### 1. OBCIĄŻENIA ŚRODOWISKOWE DZIAŁAJĄCE NA SZYBĘ ZESPOLONĄ

Wbudowana w konstrukcję szyba zespolona poddana jest obciążeniom środowiskowym, które powodują określone skutki w postaci odkształcenia składowych szklanych płyt zestawu. Ważnym czynnikiem są tutaj zmiany parametrów gazu

wypełniającego szczelne komory międzyszybowe. Zmiany te, wpływając na odkształcenie ograniczających je szyb, determinują wartość obciążenia działającego na te szyby. Podstawą analiz w tym zakresie jest założenie, że stan gazu w każdej z komór z wystarczającą dokładnością można opisać prawem gazowym adekwatnym dla typowych gazów wypełniających komory (powietrze, argon, ksenon)

$$\frac{p_0 \cdot v_0}{T_0} = \frac{p_e \cdot v_e}{T_e} = \text{const} \quad (1)$$

gdzie:

$p_0, T_0, v_0$  - parametry początkowe gazu w komorze: ciśnienie [kPa], temperatura [K], objętość komory [ $\text{m}^3$ ];

$p_e, T_e, v_e$  - parametry eksploatacyjne gazu w komorze: ciśnienie [kPa], temperatura [K], objętość komory [ $\text{m}^3$ ].

Parametry początkowe ciśnienia i temperatury mogą wynikać z technologicznych uwarunkowań zespalania zestawu w wytwórni lub - przy założeniu braku idealnej szczelności komory - być przyjęte jako uśrednione warunki eksploatacyjne.

Zmianę objętości komory spowodowaną obciążeniem eksploatacyjnym można określić przez scałkowanie funkcji ugięcia szyb ograniczających daną komorę. Założono, że wielkość ta nazwana objętością pola przemieszczenia [2, 5] w przypadku ugięć nie większych niż grubość szkła jest proporcjonalna do wypadkowego obciążenia szyby o indeksie  $i$ , wtedy

$$\Delta v_i = \pm \int_0^b \int_0^a w(x, y) dx dy = \pm \alpha_i \cdot q_i \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta v_i$  - objętość pola przemieszczenia komory spowodowana ugięciem jednej z szyb ograniczających tę komorę [ $\text{m}^3$ ];

$w(x, y)$  - funkcja ugięcia, m, wynikająca z teorii płyt, np. [6]; jest to zależność wartości ugięcia od współrzędnych  $(x, y)$  dowolnego punktu położonego na szklanej tafli o szerokości  $a$  i długości  $b$ ;

$\alpha_i$  - współczynnik proporcjonalności [ $\text{m}^3/\text{kN}$ ]; jest to objętość pola przemieszczenia przy jednostkowym obciążeniu wypadkowym szyb;

$q_i$  - wypadkowe obciążenie działające na szybę o indeksie  $i$  [ $\text{kN}/\text{m}^2$ ].

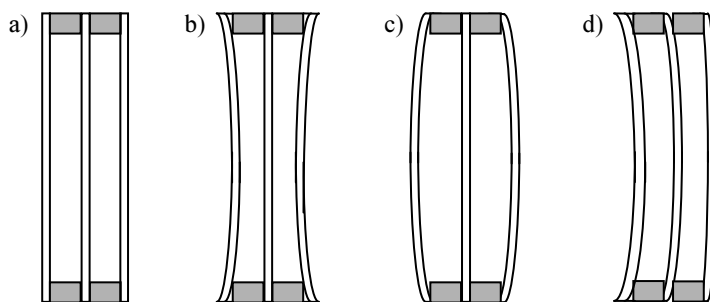
We wzorze (2) znaki należy dobrać tak, aby dodatnia wartość wskazywała na zwiększenie objętości komory. Eksploatacyjna objętość danej komory  $v_e$  jest więc algebraiczną sumą objętości początkowej  $v_0$  i objętości pól przemieszczenia szyb ograniczających tę komorę. Sposób określania wartości współczynników  $\alpha_i$  dla szyby swobodnie podpartej zaproponowano w artykułach [2, 5]. Wartości te są zależne od grubości szyb, ich wymiarów i cech materiałowych szkła.

Na szyby zespolone działają następujące obciążenia środowiskowe:

- zmiana zewnętrznego ciśnienia atmosferycznego i temperatury gazu w komorach - powoduje zmiany ciśnienia gazu zamkniętego w komorach i zmianę ich

objętości; przy wzroście ciśnienia zewnętrznego lub spadku temperatury gazu w komorze szyby zestawu przyjmują formę wklęsłą (rys. 1a, b), w przeciwnym wypadku są wypukłe (rys. 1c),

- obciążenia powierzchniowe związane np. z parciem lub ssaniem wiatru (rys. 1d) lub obciążeniem śniegiem - interakcja zmieniającego swoje parametry gazu w komorze sprawia, że obciążenie rozkłada się na wszystkie szyby zestawu, co korzystnie wpływa na rozkład maksymalnego naprężenia w zestawie; analizę tego wpływu przedstawiono w pkt. 3,
- zmiany temperatury w grubości płyty szklanej - skutkują ugięciem szyb, które ma wpływ na objętość pola przemieszczenia i generuje obciążenia; wpływ ten można wymodelować przez wprowadzenie zastępczego obciążenia powierzchniowego, co opisano w artykułach [2, 5].



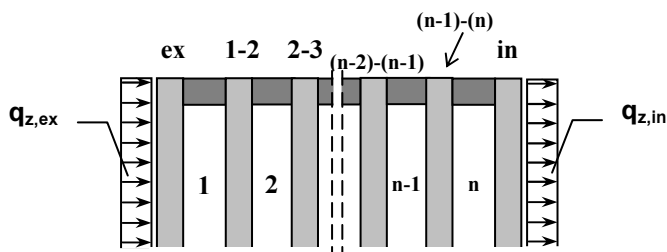
Rys. 1. Odształcenia w szybach zespolonych: a) zestaw nieobciążony, b) wzrost ciśnienia zewnętrznego lub spadek temperatury w komorach, c) spadek ciśnienia zewnętrznego lub wzrost temperatury w komorach, d) obciążenie parciem wiatru

## 2. MODEL OBLICZENIOWY ROZKŁADU OBCIĄŻEŃ W ZESTAWIE SZYB

Określenie wypadkowego obciążenia eksploatacyjnego dla każdej z szyb zestawu wielokomorowego jest możliwe po wyznaczeniu ciśnienia gazu w komorze przy danych wartościach obciążeń. Przyjęto następujące założenia:

- obciążony czynnikami środowiskowymi układ szyb pozostaje w równowadze, jeżeli w każdej z komór spełnione jest prawo gazowe (1) przy wynikających ze wzoru (2) objętościach pola przemieszczenia komór,
- parametry początkowe gazu w komorach  $p_0, T_0$  są znane i jednakowe dla wszystkich komór,
- pominięto obciążenie ciężarem własnym szyb (pionowa pozycja zestawu) i zmiany temperatury w grubości szkła.

W oznaczeniach parametrów komór i szyb tworzących zestaw użyto indeksów przedstawionych na rysunku 2. Indeksy  $ex$  i  $in$  dotyczą elementów zestawu i czynników działających odpowiednio: od strony powietrza zewnętrznego i od strony pomieszczenia. Przyjęto również, że na zestaw mogą działać zewnętrzne obciążenia powierzchniowe  $q_{z,ex}$  i  $q_{z,in}$ , których wartość jest dodatnia, jeżeli są zwrócone do wnętrza pomieszczenia (z lewej do prawej według układu jak na rys. 2).



Rys. 2. Oznaczenia indeksowe komór i szyb w zestawie n-komorowym

Na podstawie wzorów (1) i (2) możliwe jest sformułowanie dla każdej komory szyby n-komorowej równania stanu z niewiadomymi ciśnieniami eksploatacyjnymi gazów w komorach  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Po odpowiednich przekształceniach otrzymano:

– dla komory oznaczonej indeksem 1

$$(\alpha_{ex} + \alpha_{1-2}) \cdot p_1^2 - \alpha_{1-2} \cdot p_1 \cdot p_2 + (v_{01} - \alpha_{ex} \cdot c_{ex}) \cdot p_1 - p_0 \cdot v_{01} \cdot T_1/T_0 = 0 \quad (3)$$

– dla komór oznaczonych indeksem  $i = 2, \dots, (n-1)$

$$\begin{aligned} (\alpha_{(i-1)-i} + \alpha_{i-(i+1)}) \cdot p_i^2 - \alpha_{(i-1)-i} \cdot p_{(i-1)} \cdot p_i - \alpha_{i-(i+1)} \cdot p_i \cdot p_{(i+1)} + \\ + v_{0i} \cdot p_i - p_0 \cdot v_{0i} \cdot T_i/T_0 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

– dla komory oznaczonej indeksem n

$$(\alpha_{(n-1)-n} + \alpha_{in}) \cdot p_n^2 - \alpha_{(n-1)-n} \cdot p_{(n-1)} \cdot p_n + (v_{0n} - \alpha_{in} \cdot c_{in}) \cdot p_n - p_0 \cdot v_{0n} \cdot T_n/T_0 = 0 \quad (5)$$

gdzie:

$v_{01}, \dots, v_{0n}$  - objętości początkowe komór  $[m^3]$ ;

$T_1, \dots, T_n$  - średnie eksploatacyjne temperatury gazów w komorach  $[K]$ ;

$\alpha_{ex}, \alpha_{1-2}, \dots, \alpha_{(n-1)-n}, \alpha_{in}$  - współczynniki proporcjonalności dla szyb zestawu  $[m^5/kN]$ ;

$c_{ex} = p_{ex} + q_{z,ex}$ ;  $p_{ex}$  - eksploatacyjne ciśnienie powietrza zewnętrznego  $[kPa]$ ;

$c_{in} = p_{in} - q_{z,in}$ ;  $p_{in}$  - eksploatacyjne ciśnienie powietrza w pomieszczeniu  $[kPa]$ .

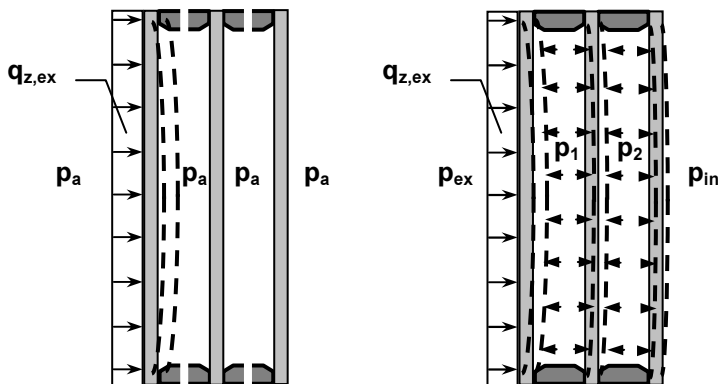
Pozostałe oznaczenia jak w tekście.

Równania stanu dla wszystkich komór w zestawie tworzą układ n równań kwadratowych, którego rozwiązanie pozwala na obliczenie eksploatacyjnych ciśnień gazów w komorach zestawu i rozwiązanie wielu zadań związanych z rozkładem obciążeń w szybach ze szczelnymi przestrzeniami gazowymi obciążonymi czynnikami środowiskowymi. Zasadne jest rozwiązanie powyższego układu numerycznie - jedynie w przypadku szyby jednokomorowej układ redukuje się do jednego równania kwadratowego, którego rozwiązanie można podać w postaci wzoru

$$p_1 = \frac{c_{ex} \cdot \alpha_{ex} + c_{in} \cdot \alpha_{in} - v_{01}}{2 \cdot (\alpha_{ex} + \alpha_{in})} + \sqrt{\left( \frac{c_{ex} \cdot \alpha_{ex} + c_{in} \cdot \alpha_{in} - v_{01}}{2 \cdot (\alpha_{ex} + \alpha_{in})} \right)^2 + \frac{p_0 \cdot v_{01} \cdot T_1}{(\alpha_{ex} + \alpha_{in}) \cdot T_0}} \quad (6)$$

### 3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY - DYSTRYBUCJA JEDNOSTKOWEGO OBCIĄŻENIA ZEWNĘTRZNEGO

W analizowanym przykładzie założono, że zestaw szyb jest obciążony zewnętrznym obciążeniem powierzchniowym  $q_{z,ex}$  o wartości  $1 \text{ kN/m}^2$ . W przypadku możliwości wyrównania ciśnień w komorach zestawu do wartości ciśnienia atmosferycznego  $p_a$  obciążona byłaby jedynie - pomijając efekty brzegowe, związane ze współpracą ramki dystansowej - zewnętrzna szyba zestawu (rys. 3a). W przypadku komór szczelnych (rys. 3b) zmiana objętości komory spowodowana odkształceniem szyby obciążonej powoduje zmianę ciśnienia gazu generującą dystrybucję obciążenia zewnętrznego na pozostałe szyby zestawu.



Rys. 3. Obciążenia i odkształcenia w szybie zespolonej:  
a) komory nieszczelne, b) komory szczelne

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń, wykonanych z wykorzystaniem modelu obliczeniowego z pkt. 2, dystrybucji obciążeń w przykładowym zestawie szyb. Przyjęto następujące parametry zestawu: liczba komór: od 1 do 3, wymiary komory  $60 \times 90 \times 0,16 \text{ cm}$ ,  $p_0 = 100 \text{ kPa}$ ,  $T_0 = 293,15 \text{ K}$ , przyjęto grubość szyb  $4 \text{ mm}$  oraz normowe [7] cechy materiałowe: moduł Younga  $E = 70 \text{ GPa}$ , współczynnik Poissona  $\nu = 0,2$ . Obciążenie wypadkowe poszczególnych szyb obliczono na zasadzie różnicy ciśnień pomiędzy komorami lub komorą a otoczeniem z uwzględnieniem ciśnienia równoważnego zewnętrznemu obciążeniu powierzchniowemu.

Tabela 1. Dystrybucja obciążenia zewnętrznego  $1 \text{ kN/m}^2$  na szyby zestawu

Rodzaj zestawu	Obciążenie wypadkowe [ $\text{kN/m}^2$ ] na szybę oznaczoną indeksem			
	ex	1-2	2-3	in
1-komorowy	0,534	–	–	0,466
2-komorowy	0,405	0,318	–	0,277
3-komorowy	0,355	0,261	0,205	0,179

Wyniki obliczeń wykazują, że przy wzroście liczby komór maksymalne obciążenie wypadkowe działające na zestaw szyb zmniejsza się, gdyż obciążenie zewnętrzne rozkłada się na większą liczbę płyt szklanych. Jest to przykład korzystnej dystrybucji obciążeń w zestawach szyb o szczelnych komorach.

## WNIOSKI

Zespolone szyby wielokomorowe są coraz częściej stosowane w praktyce. Zaproponowany w artykule model obliczeniowy, uwzględniający współpracę szczelnych komór wypełnionych gazem w przekazywaniu obciążeń, pozwala na określenie wypadkowego obciążenia składowych elementów zespolonego układu szyb, co zilustrowano przykładem obliczeniowym. Znajomość rozkładu obciążeń jest podstawą do określenia ugięcia, naprężenia i wyężenia w wielokomorowych szybach zespolonych o różnych parametrach geometrycznych (wymiary, grubości szyb i komór) i różnych cechach materiałowych, pracujących w określonych (lub uznanych za graniczne) warunkach środowiskowych.

## LITERATURA

- [1] Feldmeier F., Obciążenia temperaturowe zespolonych szyb izolacyjnych. Część I, Świat Szkła 1997, 6, Część II, Świat Szkła 1998, 1.
- [2] Respondek Z., Modelowanie obciążeń klimatycznych szyb zespolonych. Część I, Świat Szkła 2004, 12, Część II, Świat Szkła 2005, 1.
- [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.
- [5] Respondek Z., Model obliczeniowy interakcji obciążeń w szybach zespolonych, [w:] Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, pod red. T. Bobki, J. Rajczyka, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008, 270-280.
- [6] Timoszenko S., Woinowsky-Krieger S., Teoria płyt i powłok, Arkady, Warszawa 1962.
- [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.

### DISTRIBUTION OF ENVIRONMENTAL LOADS IN MULTI-CHAMBER INSULATING GLASS UNITS

**In the article impact of gas interaction in sealed chambers of an insulating glass unit on load transfer between glass panes has been analysed. On the basis of the law of ideal gases a calculation model for the determination of loads on elements of a multi-chamber insulating glass unit under the action of variable climatic factors (pressure, temperature) and surface loads has been proposed. An example of unitary surface load distribution on individual glass panes has been presented as a positive influence of chamber tightness on load transfer.**

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