

Metody projektowania szkła budowlanego

DR INŻ. ARTUR PIEKARCZUK
INSTYTUT TECHNIKI BUDOWLANEJ
ZAKŁAD KONSTRUKCJI I ELEMENTÓW BUDOWLANYCH

W budownictwie szkło wykorzystywane jest powszechnie. Oprócz typowych zastosowań (np. przeszklenie okien) architekci realizują coraz odważniejsze pomysły, projektując elementy szklane wyposażenia, całkowicie przeszklone ściany osłonowe, zadaszenia, nawet elementy wsporcze w postaci żeber lub płatów. Przeszklenia osłonowe oraz wsporcze płatwie i żebra (zgodnie z PN-EN 13830:2005 [6]) nie wpływają na nośność i stateczność konstrukcji budynku. Elementy szklane wyposażenia wnętrz mają przeważnie charakter dekoracyjny, a niekiedy pełnią funkcję użytkową o określonych właściwościach (np. przeszklone drzwi).

Przeszklenie ściany osłonowe lub zadaszenia oddzielają wnętrza budynku od zewnętrznych warunków atmosferycznych. W związku z tym narażone są na zmienne i różnicowane oddziaływanie środowiska (wiatr, śnieg, temperatura). Aby takie elementy prawidłowo spełniały swoją funkcję w budynku, powinny być odpowiednio zaprojektowane. Proces projektowania wspomagany jest zazwyczaj przez zestaw norm, w chwili obecnej – Eurokodów (normy serii PN-EN). W przypadku konstrukcji stalowych, żelbetonowych czy drewnianych takie normy istnieją i są powszechnie wykorzystywane w projektowaniu. Inaczej jest w przypadku elementów ze szkła budowlanego.

Ciągle jeszcze nie ma jednolitych przepisów krajowych ani norm serii PN-EN, które jednoznacznie określają metody i zakres projektowania konstrukcji lub jej elementów ze szkła budowlanego w zakresie nośności i użyteczności. To właśnie następcza konstruktorom wielu problemów i stanowi potencjalne źródło błędów, które mogą prowadzić do powstawania awarii. W publikacjach zagranicznych pojawiło się kilka metod projektowania, stanowiących podstawę wiedzy w zakresie obliczeń wytrzymałościowych elementów ze szkła. Do znanych metod wymiarowania należą:

- metoda naprężeń dopuszczalnych (klasyczna metoda naprężeń liniowych częściowo wykorzystywana w niemieckich poradnikach technicznych TRLV),
- DELR (Damage Equivalent Load and Resistance – pierwsza metoda europejska bazująca na częściowych współczynnikach bezpieczeństwa),
- metoda Siberta (uwzględniająca dwukierunkowe zginanie),
- metoda Shena (uproszczona metoda DELR bazująca częściowo na kanadyjskiej normie CAN/CGSB 12.20-M89),
- projekt normy prEN 13474 (bazujący na metodach DELR oraz Shena i Sieberta),
- norma ASRME 1300 (amerykańska norma Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings ASTM E 1300-04, opierająca się na probabilistycznym modelu zniszczenia szkła),

SŁOWA KLUCZOWE

szkło, elementy szklane, obliczenia statyczne

KEYWORDS

glass, glass elements, static analysis

Artur Piekarczuk



Autor kilkudziesięciu opinii i ekspertyz dotyczących wyrobów i elementów budowlanych oraz ponad 50 publikacji w czasopismach technicznych krajowych i zagranicznych z zakresu oceny technicznej, badań i metod

obliczeń konstrukcji stalowych lekkich przegród budowlanych, szkła budowlanego oraz elementów i wyrobów budowlanych.

a.piekarczuk@itb.pl

STRESZCZENIE

Artykuł dotyczy zasad projektowania konstrukcji ze szkła budowlanego. Zestawiono najpopularniejsze metody projektowania oraz opisano metodę obliczania opartą na projektach norm europejskich. Artykuł zawiera autorskie komentarze dotyczące praktycznych aspektów projektowania.

SUMMARY

Design methods of building glass

The paper presents design rules of the glass structures. The article summarizes the most popular design methods and describes a calculation method based on the draft European standards. The article contains the author's comments on the practical aspects of the design.

- norma CAN/CGSB 12.20 (kanadyjska norma Structural Design of Glass for Buildings CAN/CGSB 12.20-M89).

Szczegółowy opis zestawionych wyżej metod wymiarowania przedstawia opracowanie [1]. Niniejszy artykuł jest prezentacją najpopularniejszej metody wymiarowania opartej na projekcie normy prEN 13474. W artykule zawarto również własny komentarz określający specyfikę projektowania szkła.

Sprawdzenie nośności elementów szklanych [2-3], polega na porównaniu naprężeń efektywnych ($\sigma_{eff,d}$) z naprężeniami dopuszczalnymi ($f_{g,d}$):

$$\sigma_{eff,d} \leq f_{g,d} \quad (1)$$

Naprężenia efektywne wyznaczane są dla najmniej korzystnej kombinacji obciążeń wg wzoru:

$$\sigma_{eff,d} = \left[\frac{1}{A} \int_A (\sigma_1(x,y))^\beta dx dy \right]^{1/\beta} \quad (2)$$

gdzie:

A – całkowita powierzchnia szklanej tafli,

$\sigma_1(x,y)$ – naprężenia główne od obciążeń zewnętrznych występujące w punkcie (x,y) na powierzchni płyty, co oznacza, że w przypadku szkła hartowanego naprężenia obliczane są niezależnie od naprężeń szcążkowych wynikających z procesu hartowania,

β – parametr rozkładu Weibulla, wyznaczony na podstawie badań próbek szklanych płyt ze sztucznie wytworzonymi (przez piaskowanie) powierzchniowymi uszkodzeniami (parametr $\beta=25$).

Efektywne naprężenia dopuszczalne zależą od rodzaju obciążeń, warunków podparcia i geometrii szyby. Naprężenia efektywne mogą być wyznaczone na podstawie obliczeń numerycznych z uwzględnieniem nieliniowej metody obliczeń. Należy tutaj zwrócić szczególną uwagę na to, że przyjęcie liniowej metody obliczeń, może prowadzić do poważnych błędów w przypadku dużych wymiarów elementów (powyżej 1,5×1,5 m) lub/i ugięć przekraczających grubość tafli szkła.

Stosując metodę numeryczną jako wynik obliczeń, uzyskuje się naprężenia główne wyznaczone z zależności:

$$S1 = \frac{S_{xx} + S_{yy}}{2} + \sqrt{\frac{(S_{xx} - S_{yy})^2}{4} + S_{xy}^2} \quad (3)$$

$$S2 = \frac{S_{xx} + S_{yy}}{2} - \sqrt{\frac{(S_{xx} - S_{yy})^2}{4} + S_{xy}^2} \quad (4)$$

przy czym $S1 > S2$

gdzie:

S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} – naprężenia wzdłuż kierunków przyjętego układu odniesienia X, Y, (zwykle wzdłuż i w poprzek krawędzi płyty) oraz wypadkowa XY.

Zakładając, że obliczenia dotyczą pełnego modelu z odwzorowanym podparciem i całkowitym obciążeniem przyjmuje się:

$$\sigma_{eff,d} = S1 \quad (5)$$

gdzie naprężenie S1 dotyczy maksymalnych naprężeń dla skrajnych (górnjej lub dolnej) płaszczyzn tafli szkła.

Dla typowych kształtów płyt oraz przy przegubowych warunkach podparcia naprężenia efektywne $\sigma_{eff,d}$ wyznacza się, stosując uproszczone metody, bazujące na stabilizowanych współczynnikach zależnych od sposobu podparcia i kształtu tafli szkła. Wadą

tej metody w porównaniu z metodą numeryczną jest jej ograniczenie do typowych kształtów i warunków podparcia. Przyjęto, że podparcie występuje wyłącznie w wariacie przegubowym i może być zlokalizowane, w przypadku płyt prostokątnych, na: 4, 3 lub 2 krawędziach. Uproszczone metody obliczeń różnią się od siebie w zależności od rodzaju elementu i sposobu jego podparcia.

Naprężenia dopuszczalne [3] wyznacza się wg zależności:

a) dla szkła float:

$$f_{g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} \cdot \gamma_n \quad (6)$$

b) dla szkła hartowanego i półhartowanego:

$$f_{g,d} = \left(k_{mod} \frac{f_{g,k}}{\gamma_M \cdot k_A} + \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_V} \right) \cdot \gamma_n \quad (7)$$

gdzie:

$f_{g,k}$ – charakterystyczna wytrzymałość niewzmocnionego szkła float (wg tabeli 1),

$f_{b,k}$ – charakterystyczna wytrzymałość szkła wzmocnionego termicznie (wg tabeli 1),

γ_V – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla naprężeń (wg tabeli 2),

γ_M – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla naprężeń powstałych w wyniku hartowania (wg tabeli 2),

γ_n – częściowy współczynnik bezpieczeństwa wg postanowień krajowych, w ogólnym przypadku $\gamma_n = 1,0$,

k_A – współczynnik efektu skali $k_A = A^{0,04}$,

A – powierzchnia oszklenia [m²],

k_{mod} – współczynnik zależny od czasu trwania obciążenia oraz warunków środowiskowych (wg tabeli 3).

Tabela 1. Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu szkła budowlanego [3]

Typ szkła	Sposób formowania	Oznaczenie	Wartość [N/mm ²]
Szkło float niewzmocniane	płaskie	$f_{g,k}$	45
Szkło hartowane (ESG) wzmocnienie termicznie	płaskie	$f_{b,k}$	120
	wzorzyste		90
	emaliowane		75
	półhartowane (TVG)		70
	wzorzyste		55
	emaliowane		45
Szkło wzmocniane chemicznie	płaskie		150

Tabela 2. Częściowe współczynniki bezpieczeństwa γ_M , γ_V [3]

Typ szkła	γ_M	γ_V
	hartowane termicznie	hartowane chemicznie
Float	1,8	2,3
Emaliowane	1,8	2,3
Wzorzyste i wzorzyste emaliowane	2,3	3,0
Szkło boro-krzemianowe	1,8	-

Tabela 3. Współczynnik k_{mod} [3]

Sposób oddziaływania	Przykład obciążenia	k_{mod}
Zmienne krótkotrwałe	wiatr, użytkowe	0,72
Zmienne długotrwałe	śnieg, temperatura	0,36
Stałe	ciężar własny	0,27

Wyznaczenie dopuszczalnych naprężeń ($f_{g,d}$) nie nastęrcza większych kłopotów, bowiem wystarczy zastosowanie przedstawionej wyżej zależności. Natomiast wyznaczenie naprężeń efektywnych ($\sigma_{eff,d}$) niekiedy sprawia trudności. Można tutaj posługiwać się metodami numerycznymi opartymi na metodzie elementów skończonych (MES). W takim przypadku przy uwzględnieniu właściwości materiałowych szkła i warunków brzegowych (podparcie, obciążenie) oraz odpowiedniej metody obliczeń (liniowa lub nieliniowa) uzyskuje się poprawne wyniki. Niestety komercyjne oprogramowanie MES jest kosztowne. Zamiast tego niekiedy wykorzystywane są metody tradycyjne, oparte na zależnościach matematycznych i współczynnikach tablicowych. Niektórzy konstruktorzy twierdzą, że przy obliczaniu naprężeń efektywnych ($\sigma_{eff,d}$) wystarczy skorzystać z powszechnie dostępnych poradników i tablic, oczywiście uwzględniając wcześniej odpowiedni moduł sprężystości podłużnej dla szkła $E=70\text{GPa}$. Jest to podejście błędne, ponieważ sztywność giętna płyty (D) – zależność (8) oraz momenty zginające (m_x, m_y) – zależność (9) i (10), oprócz grubości płyty i modułu E zależą od współczynnika Poissona (ν).

W ogólnie dostępnych tablicach zależności wyprowadzane są przeważnie dla płyt stalowych, gdzie współczynnik $\nu=0,3$, natomiast dla szkła współczynnik ten przyjmuje się od 0,2 do 0,23.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (8)$$

$$m_x = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

$$m_y = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (10)$$

Zatem naprężenia przy dwukierunkowym zginaniu od obciążeń powierzchniowych (wiatr, śnieg) przy małych ugięciach (analiza liniowa) dla płyty podpartej przegubowo na krawędziach wynoszą:

$$\sigma_{x,max} = \frac{6}{h^2} m_x \quad (11)$$

$$\sigma_{y,max} = \frac{6}{h^2} m_y \quad (12)$$

gdzie:

D – sztywność giętna,

E – moduł sprężystości podłużnej,

h – grubość płyty,

m_x, m_y – momenty zginające w kierunku x i prostopadle y ,

w – ugięcie płyty.

W ogólnie dostępnych tablicach to właśnie momenty zginające m_x oraz m_y stabilizowane są w zależności od poziomu obciążeń, geometrii płyt i warunków ich podparcia. Dlatego przy posługiwaniu się ogólnie dostępnymi tablicami należy pamiętać o założeniach, przy których zostały opracowane.

Inną niemniej ważną kwestią jest metoda obliczeń. W taflach szkła mamy do czynienia z płytami cienkimi, których ugięcia przy odpowiednim poziomie obciążeń są większe od grubości płyty. W takim przypadku do analizy powinny być przyjmowane nieliniowe metody obliczeń bazujące np. na metodzie Newtona-Raphsona, która iteracyjnie pozwala na wyznaczanie przybliżonej wartości pierwiastka funkcji (w tym przypadku ugięcia i jej drugiej pochodnej napięcia). Metody liniowe (klasyczne) przy dużych rozpiętościach i obciążeniach dają „zawyżone wyniki” nawet o kilkadziesiąt procent. Prowadzi to do znacznego „przesztymienia” oszkleń, co wiąże się z nadmiernym zużyciem materiału i masą całego pakietu oszkleń. Jako ciekawostkę godną uwagi, warto przytoczyć, że metody obliczeń naprężeń efektywnych ($\sigma_{eff,d}$) przedstawione w normie [2], a ściślej mówiąc - zależności matematyczne i współczynniki zestawione w tablicach uwzględniają już wyniki analiz nieliniowych. Problem z normą [2] polega na tym, że jest ona ciągle w fazie projektu, zatem jej dostępność i status formalny są znacznie ograniczone. Obecnie opracowywany jest projekt normy prEN 16612 [4] dotyczący obliczeń nośności i odkształcalności tafli szklanych przy oddziaływaniu obciążeń środowiskowych (wiatr, śnieg, temperatura). Norma ta częściowo bazuje na ogólnych postanowieniach projektów norm [2] i [3] z pewnymi zmianami, ale przede wszystkim zawiera regulacje dotyczące obciążeń oparte na Eurokodach. Dodatkowo wzbogacona jest o zasady obliczeń szyb zespolonych dwukomorowych. Niemal identyczny zakres dotyczący projektowania szkła zawiera projekt normy prEN 13474-3 [5]. W projekcie tej normy w porównaniu do prEN 16612 nie ujęto metod obliczeń szyb zespolonych dwukomorowych.

LITERATURA

- [1] Haldimann M., Luible A., Overland A.: Structural Use of Glass. Structural Engineering Documents 10. IABSE – AIPC-IVBH. ETH, Zurich 2008
- [2] prEN 13474-2:2000 Glass In building – Design of glass panes – Part 2 design for uniformal distributed load
- [3] prEN 13474-1 (1999) Glass in building – Design of glass panes – Part 1: General basis of design
- [4] prEN 16612:2013. Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing
- [5] prEN 13474-3:2009. Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing
- [6] PN-EN 13830:2005 Ściany osłonowe – norma wyrobu

Instytut Techniki Budowlanej przygotowuje do druku poradnik *Elementy konstrukcyjne ze szkła budowlanego*, autorstwa dr. inż. Artura Piekarczuka. Poradnik zostanie opublikowany w serii wydawnictw Instrukcje, Wytyczne, Poradniki na przełomie 2013/2014 r. W poradniku przedstawione są kryteria oceny, zasady doboru obciążeń, metody obliczeń elementów osłonowych ze szkła litego, klejonego, szyb zespolonych oraz metody obliczeń żeber i płatwi szklanych.