

prof. dr hab. inż. Marian Gwóźdź<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-9762-4279

dr hab. inż. Janusz Juraszek, prof. ATH<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-3771-2776

# Elementy niezawodności konstrukcji szklanych w dokumentach CEN

## *Elements of reliability of glass structures in documents of CEN*

DOI: 10.15199/33.2023.02.06

**Streszczenie.** Badania prowadzone w krajach Unii Europejskiej doprowadziły do sformułowania nowych zasad obliczeń konstrukcji szklanych zredagowanych w dokumentach roboczych CEN. Procedury obliczeniowe CEN wymagają weryfikacji krajowej. Artykuł ograniczono do analizy elementów niezawodności konstrukcji szklanych. Przeprowadzona weryfikacja wskazuje, że oceniane procedury w zakresie wymagań niezawodności są kompletne i w pełni zharmonizowane z Eurokodami.

**Słowa kluczowe:** szkło; niezawodność; wytrzymałość; modelowanie; płyty.

**Abstract.** The research conducted in the European Union countries led to the formulation of a new form of calculations for glass structures, formulated in CEN working documents. The CEN calculation procedures require national verification and this is the nature of the article, the scope of which is limited to the analysis of the reliability elements of glass structures. The performed verification shows that the assessed procedures in the scope of reliability requirements are complete and fully harmonized with the Eurocodes.

**Keywords:** glass; reliability; strength; modeling; plates.

W krajach Unii Europejskiej od wielu lat prowadzono badania naukowe [1 – 5], w wyniku których sformulowano nowe metody obliczania konstrukcji szklanych określone w dokumentach roboczych CEN/TC 250 N 1060 [6] i CNR-DT 210 [7]. Dokumenty te powstały w ramach prac Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego nad drugą edycją Eurokodów. Kontynuacja tych prac doprowadziła do zredagowania pre-normy CN/TS 19100 [8], która pod względem wymagań niezawodności konstrukcji szklanych jest w pełni zharmonizowana z wymiarowaniem konstrukcji budowlanych wg metody współczynników obciążenia i nośności, określonej w Eurokodzie PN-EN 1990. W weryfikacji krajowych metod obliczania konstrukcji szklanych wg rekomendacji CEN aktywnie uczestniczą ośrodki naukowe w Polsce.

W artykule przeanalizowano wybrane elementy niezawodności konstrukcji szklanych w kontekście metody stanów granicznych. Ma on przybliżyć projektantom tych konstrukcji podstawowe procedury obliczania wynikające z liniowego modelu zależności naprężenie  $\sigma$  – odkształcenie  $\epsilon$ .

### Niezawodność konstrukcji szklanych wg PN-EN 1990

Eurokod PN-EN 1990 jest wdrażany w Polsce od kilkunastu lat (formalnie od 2010 r.) i dlatego skoncentrowano się na specyficznych wymaganiach niezawodności konstrukcji szklanych, uwzględniających:

- **klasy konsekwencji zniszczenia (CC)** – w Eurokodzie 1990 wprowadzono pojęcie trójstopniowej klasy konsekwencji (CC – *consequences class*) oznaczonej symbolami CC1, CC2 i CC3. Klasy te zostały zdefiniowane w zależności od ryzyka zagrożenia życia i zdrowia ludzkiego oraz ekonomicznych konsekwencji zniszczenia konstrukcji lub braku jej przydatności do użytkowania. CC występują z odpowiednimi trzema klasami niezawodności konstrukcji (RC – *reliability class*) RC1, RC2 i RC3, w przypadku których w normie określono poziomy niezawodności i podano minimalne zalecane wartości wskaźnika niezawodności  $\beta$ , przypisane stanom granicznym nośności. Elementy szklane i aluminiowo-szklane budynków należą na ogół do klasy CC2 i dlatego różnicowanie niezawodności tych konstrukcji nie jest wymagane;

- **współczynniki obciążenia  $\gamma_F$**  – zaawansowana metoda probabilistycznej analizy niezawodności konstrukcji budowlanych FORM, zapisana w normie PN-EN 1990, rekomenduje wykorzysta-

nie wyspecyfikowanych wskaźników niezawodności  $\beta$  do kalibrowania wartości współczynników obciążenia  $\gamma_F$  i nośności  $\gamma_M$  zestawionych w odpowiednich częściach Eurokodów. Współczynniki  $\gamma_F$  podstawowych obciążeń stałych G i zmiennych Q są wyspecyfikowane w Załączniku A1 normy PN-EN 1990, zaś współczynniki nośności  $\gamma_M$  w poszczególnych częściach Eurokodów PN-EN 1992 + PN-EN 1999;

- **kategoria projektowego okresu użytkowania wg PN-EN 1990** – obciążenia zmienne Q uwzględnione w Eurokodzie 1991 zostały zdefiniowane jako wartości ekstremalne w okresie odniesienia  $T_d$ . Racjonalne projektowanie całego budynku i jego części wymaga zatem określenia projektowego okresu użytkowania konstrukcji  $T_d$ , czyli przedziału czasu, w którym konstrukcja lub jej część ma być użytkowana zgodnie z przeznaczeniem i przewidywanym utrzymaniem, bez potrzeby większych napraw. W normie PN-EN 1990 usystematyzowano podział projektowych okresów użytkowania na 5 kategorii, oznaczonych kolejnymi liczbami od 1 do 5. Konstrukcje aluminiowo-szklane, np. fasady, należą na ogół do kategorii 2, jako elementy wymieniane co 10 – 25 lat, a inne konstrukcje szklane mogą być zakwalifikowane do kategorii 2. lub 4. budynków eksploatowanych przez

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

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: jjuraszek@ath.bielsko.pl

okres 50 lat. Obciążenia klimatyczne  $Q_k$  – (śnieg  $S_k$ , wiatr  $W_k$ , temperatura  $T_k$ ) podane w Eurokodzie 1, w częściach 1-3, 1-4 i 1-5, to wartości maksymalne, występujące w pięćdziesięcioletnim okresie oddziaływań. W przypadku innego okresu użytkowania ( $T_d \neq 50$  lat), obciążenie charakterystyczne  $\eta_d Q_k$  należy zatem zredukować współczynnikiem  $\eta_d$  (tabela 1);

**Tabela 1. Wartości współczynników redukcyjnych w przypadku oddziaływań klimatycznych**

*Badania własne*  
Table 1. Values of reduction factors for climatic impacts *Own research*

Okres użytkowania $T_d$ [lata]	Współczynnik redukcji $\eta_d$ oddziaływanie			
	$S_k$	$W_k$	$T_{k,max}$	$T_{k,min}$
10	0,68	0,81	0,92	0,79
15	0,76	0,86	0,94	0,84
25	0,86	0,92	0,97	0,91
30	0,90	0,94	0,98	0,94
50	1,00	1,00	1,00	1,00

• **współczynniki nośności szkła  $\gamma_{MA}$  i  $\gamma_{MV}$**  – wymiarowanie konstrukcji budowlanych metodą współczynników obciążenia i nośności wg PN-EN 1990 definiuje wartość charakterystyczną wytrzymałości materiału jako kwantyl dolny na poziomie prawdopodobieństwa  $\omega = 5\%$ . W przypadku dużej próby statystycznej szkła płaskiego float (odprężonego, półhartowanego HSG lub hartowanego TTG) wytrzymałość charakterystyczną  $f_{b,k}$  opisuje zależność (por. norma PN-EN 1990:2004, wzór D. 1):

$$f_{b,k} = \bar{f}_{b,t} (1 - 1,64v_{fb}) = \bar{f}_{b,t} / \gamma_m \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{f}_{b,k}$  – wytrzymałość średnia w próbie czteropunktowego zginania szkła zwykłego względem włókna rozciąganego;  
 $v_{fb}$  – współczynnik zmienności (miara rozproszenia wyników wokół wartości średniej);  
 $\gamma_m$  – centralny współczynnik nośności (stosunek wytrzymałości średniej do wytrzymałości charakterystycznej).

Wartości charakterystyczne wytrzymałości szkła płaskiego zostały wyspecyfikowane przez Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) w odpowiednich europejskich normach wyrobów szklanych, np. PN-EN 12150-2 i przywołane w tabeli 2. Przytoczone dane pochodzą z badań statystycznych wytrzymałości szkła zrealizowanych w zagranicznych ośrodkach badawczych i dlatego wymagają kontrolnej weryfikacji krajowej.

**Tabela 2. Wytrzymałość charakterystyczna szkła ulepszanego termicznie lub chemicznie**

Table 2. Characteristic strength of thermally or chemically toughened glass

Rodzaj szkła	Wytrzymałość $f_{b,k}$ [MPa] szkła termicznie:	
	hartowanego	wzmocnionego
Float bezbarwne, barwne i powlekane	120	70
Float emaliowane	75	45
Walcowane wzorzyste i płaskie ciągnięte	80	55
inne technologie		
Chemicznie wzmocnione	float/ciągnięte	150
	wzorzyste	100
Warstwowe/warstwowe bezpieczne	nie podlega ocenie	

Badanie czteropunktowego zginania szkła wg normy europejskiej PN-EN 1288-3:2002 prowadzi się w maszynie wytrzymałościowej sterowanej elektronicznie, w której umieszcza się szybę o wymiarach 1100 x 360 mm na podporach z metalowymi wałkami, w rozstawie  $L_s = 1000$  mm. Takimi samymi dwoma wałkami w rozstawie  $L_b = 200$  mm próbka naciskana jest od góry, aż do zniszczenia. Na podstawie wartości odczytanej siły niszczącej  $F = F_u$  oraz grubości szkła  $h$ , oblicza się wytrzymałość szkła na zginanie ze wzoru:

$$\sigma_i = \pm \frac{M_{max}}{W} = \pm \frac{0,5 \cdot 0,4F}{0,36 \cdot h^2 / 6} = \pm \frac{F}{0,3h^2} \leq R_{u,i} \quad (2)$$

Napężenie na krawędzi ściskanej osiąga wartość  $\sigma_c = R_{u,c} = -F_u / 0,3 \cdot h^2$ , a na krawędzi rozciąganej  $\sigma_t = R_{u,t} = F_u / 0,3 \cdot h^2$ . Wytrzymałość szkła na ściskanie  $|R_{u,c}|$  jest dużo większa niż na rozciąganie  $R_{u,t}$ , a zatem wytrzymałość  $R_{u,t}$  determinuje

**Tabela 3. Wytrzymałość średnia i centralny współczynnik nośności szkła hartowanego otrzymane w próbach czteropunktowego zginania**

Table 3. Average strength and central coefficient of load-bearing capacity of tempered glass obtained in four-point bending tests

Grubość próbki $h$ [mm]	Rodzaj szkła					
	hartowane: $f_{b,k} = 120$ MPa			hartowane emaliowane: $f_{b,k} = 75$ MPa		
	liczba prób	$\bar{R}_{u,t}$ [MPa]	$\gamma_{m,exp} = \bar{R}_{u,t} / f_{b,k}$	liczba prób	$\bar{R}_{u,t}$ [MPa]	$\gamma_{m,exp} = \bar{R}_{u,t} / f_{b,k}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
3	37	180	1,500	72	148	1,973
4	447	189	1,575	190	144	1,920
5	186	176	1,467	10	101	–
6	169	174	1,450	10	111	–
8	77	189	1,575	–	–	–
10	46	172	1,433	–	–	–
12	22	164	1,367	–	–	–
15	40	185	1,542	–	–	–

nośność konstrukcji ze szkła. Wytrzymałość szkła na rozciąganie nie jest stałą wartością charakterystyczną tego materiału, ponieważ zależy m.in. od stanu powierzchni elementu szklanego, jego wielkości, historii obciążenia, naprężeń własnych oraz warunków pracy. Wytrzymałość szkła na zginanie poddane go obróbce polepszającej jego właściwości jest różna.

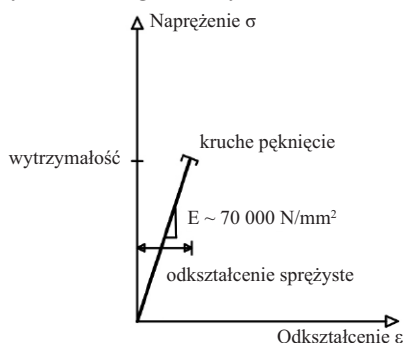
Mimo wielu nowoczesnych hut i zakładów przetwórstwa szkła zlokalizowanych w Polsce, opublikowane badania statystyczne wytrzymałości krajowych wyrobów ze szkła nie są liczne. Dostępne są wyniki badań Sieci Badawczej Łukasiewicz (Oddział Szkła w Krakowie), podane w tabeli 3. W kolumnach (3) i (6) zestawiono wytrzymałość średnią, otrzymaną w próbach czteropunktowego zginania o zróżnicowanej liczbie prób wg kolumn (2) i (5).

Uwzględniając normowe wartości charakterystyczne wytrzymałości szkła  $f_{b,k}$ , podano obliczone empiryczne wartości współczynników nośności, jakie wynikają z przywołanych badań laboratoryjnych. We współczesnej ofercie handlowej, wytrzymałość nominalna dostępnych wyrobów ze szkła płaskiego stosowanego w budownictwie spełnia postulat wytrzymałości charakterystycznej wg PN-EN 12150-2 o wartości:

- $f_{g,k} = 45$  MPa – szkło odprężone;
- $f_{b,k} = 70$  MPa – szkło półhartowane HSG;
- $f_{b,k} = 120$  MPa – szkło hartowane TTG.

Badania laboratoryjne wytrzymałości szkła uzasadniają model analityczny materiału, czyli liniowy wykres zależności napężenie  $\sigma$  – odkształcenie  $\epsilon$  po-

kazany na rysunku 1, o nominalnym module sprężystości podłużnej  $E = 70 \text{ GPa}$  [6]. Przekroje szklane o charakterystyce wg rysunku 1 nie są zdolne do przemian plastycznych i osiągają nośność sprężystą w stanie granicznym, a forma ich zniszczenia ma charakter kruchy. Jest to różnica w porównaniu z przekrojami metalowymi, które mogą osiągnąć plastyczny stan graniczny. Konsekwencją założeń modelowych wg rysunku 1 jest miarodajny w stanie granicznym nośności warunek wytrzymałości sprężystej wg wzoru (7). Rysunek 1 uzasadnia normową regułą zestawiania kombinacji oddziaływań stałych i zmiennych wg PN-EN 1990 (p. 6.5.3 normy), w stanach granicznych użytkowania w przypadku tzw. odwracalnych stanów granicznych.



Rys. 1. Liniowy model zależności naprężenie – odkształcenie [6]

Fig. 1. Linear model of the stress-strain relationship [6]

## Wytrzymałość konstrukcji szklanych

Wytrzymałość obliczeniowa szkła monolitycznego uwzględnia zarówno wpływ czynników technologicznych, jak i czasu oddziaływania obciążenia. Czynniki technologiczne to głównie kierunek wytwarzania oraz rodzaj wyrobu. Wzór na wytrzymałość obliczeniową szkła odprężonego float wg CEN [6] ma postać:

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} k_{\text{sp}} f_{\text{gk}}}{\gamma_{M,A}} \quad \text{dla } k_{\text{mod}} = 0,663 \cdot t^{-\frac{1}{16}} \quad (3)$$

gdzie:

$k_{\text{sp}}$  – współczynnik uwzględniający rodzaj wyrobu (w przypadku szkła płaskiego  $k_{\text{sp}} = 1$ );  
 $f_{\text{gk}} = 45 \text{ MPa}$  – wytrzymałość charakterystyczna szkła zwykłego float;

$\gamma_{M,A} = 1,8$  – współczynnik nośności;

$t$  – nominalny czas oddziaływania obciążenia t wg tabeli 4 (t wg wzoru (3) podano w h).

Wzór na wytrzymałość obliczeniową szkła float ulepszono cieplnie (harto-

wanego i półhartowanego) wg pre-normy [6] ma postać:

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} k_{\text{sp}} f_{\text{gk}}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v (f_{\text{bk}} - f_{\text{gk}})}{\gamma_{M,V}} \quad (4)$$

gdzie:

$k_{\text{mod}}$  – jak w (3), przy czym  $k_{\text{mod,min}} = 0,25$  oraz  $k_{\text{mod,max}} = 1,0$ ;

$k_v$  – współczynnik uwzględniający kierunek wytwarzania (najczęściej  $k_v = 1$ );

$f_{\text{b,k}}$  – wytrzymałość charakterystyczna szkła termicznie wzmocnionego (tabela 2);

$\gamma_{M,V} = 1,2$  – współczynnik nośności.

Dwa rodzaje oddziaływania wiatru wykazane w tabeli 4 opisują dwie sytuacje projektowe, które należy uwzględnić w obliczeniach statycznych. Sytuacja pierwsza uwzględnia wartości szczytowe ciśnienia prędkości wiatru, dla której współczynnik  $k_{\text{mod}} = 1$ , natomiast druga średnie ciśnienie prędkości wiatru oraz mnożnik  $k_{\text{mod}} = 0,72$ . Wartości szczytowe ciśnienia prędkości wiatru  $q_p$  (w porywach  $t = 3 \div 5 \text{ s}$ ) można wyznaczyć ze wzoru wg [7]:

$$q_p = q_b \left[ 1 + \frac{7}{\ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \cdot c_o} \right] \quad (5)$$

gdzie:

$q_b$  – średnie ciśnienie prędkości wiatru wg części 1-4 normy PN-EN 1991, przy czym  $q_b \leq q_p$ ;

$c_o$  – współczynnik orografii wg PN-EN 1991;

$z$  – wysokość nad poziomem gruntu;

$z_0$  – wymiar chropowatości wg PN-EN 1991.

Wpływ czasu oddziaływania obciążeń należy uwzględnić w stanach granicznych nośności elementów szklanych, różnicując wartości mnożnika  $k_{\text{mod}}$  we wzorach (3) lub (4) w zależności od rodzaju oddziaływania (tabela 4). Uwzględniając zasadę superpozycji wyteżenia szkła od poszczególnych oddziaływań  $Q_i$  (stałych G i zmiennych W, S, T, q), kryterium niezawodności (warunek wytrzymałości) można zapisać w postaci

$$\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{d,i}}{R_{d,i}} \leq 1,0 \quad (6)$$

gdzie:

Tabela 4. Nominalne wartości czasu trwania oddziaływania [6]

Table 4. Nominal values of the duration of impact [6]

Oddziaływanie	Charakter obciążenia	Czas nominalny t	Współczynnik $k_{\text{mod}}$
Wiatr W	porywy szczytowe 3 – 5 s	5 s	1,00
	porywy uśrednione 15 min	15 min	0,72
Śnieg S	maksimum sezonowe	3 miesiące	0,41
Termiczne T	maksimum dobowe	11 h	0,57
Użytkowe q	wartości szczytowe	30 s	0,89
Stałe G	permanentne	$T_d$ wg [2]	$0,663/t^{0,0625}$

$\sigma_{d,i}$  – naprężenia od poszczególnych obciążeń ( $\sigma_{d,G}, \sigma_{d,W}, \sigma_{d,S}, \sigma_{d,T}, \sigma_{d,q}$ );  
 $R_{d,i}$  – wytrzymałość szkła wg wzorów (3) lub (4) w przypadku wartości mnożnika  $k_{\text{mod}}$  wg tabeli 4.

Oszacowanie bezpieczne wg wzoru (6) daje warunek wytrzymałości:

$$\sigma_{\text{dmax}} \leq R_d \quad (7)$$

w przypadku wartości współczynnika redukcyjnego  $k_{\text{mod,min}} = 0,25$  przyjętej jednolicie dla wszystkich obciążeń  $Q_i$  uwzględnianych w kombinacji miarodajnej.

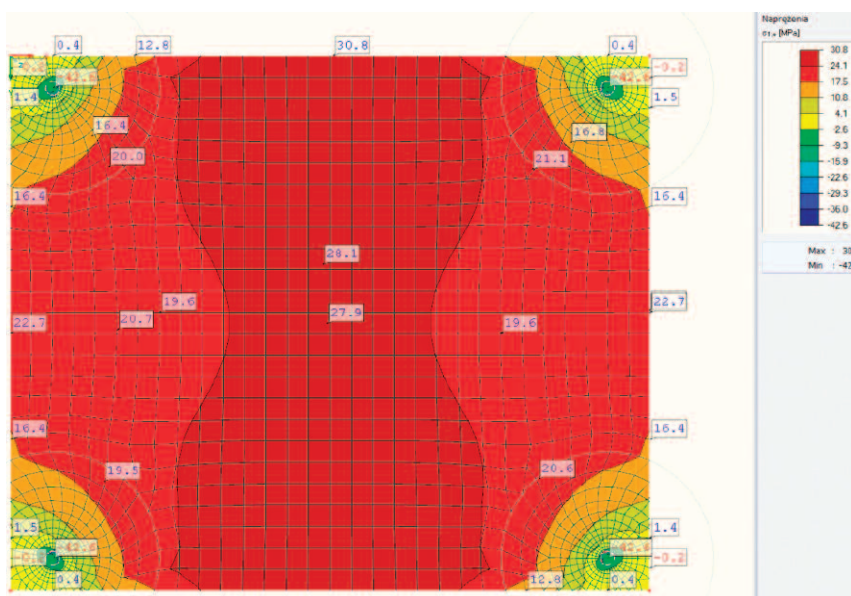
W celu zilustrowania procedury sprawdzania warunków wytrzymałości wg (6) lub (7) przedstawiono w skrócie obliczenia zadania budynku wykonanego ze szkła laminowanego o grubości warstw 8 mm w przypadku następujących danych: kategoria 3. projektowy okres użytkowania  $T_d = 25$  lat; wymiary płyty  $1,50 \times 1,25 \text{ m}$ ;  $t_{\text{eff},\sigma} = 1,24 \text{ cm}$  (por. [8]); ciężar własny  $g_k = 0,4 \text{ kN/m}^2$ ; obciążenie śniegiem  $s_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$  (uwzględniono  $\eta_d = 0,87$  wg tabeli 1); obciążenie wiatrem  $w_k = 0,133 \text{ kN/m}^2$  (uwzględniono  $\eta_d = 0,92$  wg tabeli 1). Zastosowano szkło hartowane TTG o wytrzymałości charakterystycznej  $f_{\text{b,k}} = 120 \text{ MPa}$  wg tabeli 2 (w przypadku szkła odprężonego  $45 \text{ MPa}$ ). Rezultatem modelowania komputerowego zginania płyty wg teorii nieliniowej, podpartej w czterech punktach jest mapa naprężeń głównych (rysunek 2), z której odczytano  $\sigma_{\text{max}} = 30,8 \text{ MPa}$ .

Ze względu na obciążenia wieloźródłowe osobno obliczono wytrzymałość szkła w przypadku ciężaru stałego G i oddziaływań klimatycznych S oraz W – wzór (4) i tabela 4:

$$R_d^G = \frac{0,25 \cdot 1,0 \cdot 45}{1,8} + \frac{1,0 \cdot (120 - 45)}{1,2} = 68,8 \text{ MPa}$$

$$R_d^S = \frac{0,41 \cdot 1,0 \cdot 45}{1,8} + \frac{1,0 \cdot (120 - 45)}{1,2} = 72,6 \text{ MPa}$$

$$R_d^W = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 45}{1,8} + \frac{1,0 \cdot (120 - 45)}{1,2} = 87,5 \text{ MPa}$$



Rys. 2. Mapa naprężeń głównych płyty podpartej w czterech punktach

Fig. 2. Map of the main stresses of the slab supported at four points

Badania własne  
Own research

Uwzględniając wyteżenia częściowe od poszczególnych obciążeń, w przypadku naprężenia ekstremalnego  $\sigma_{\max} = 30,8$  MPa obliczono:

$$\frac{\sigma_d^G}{R_d^G} = \frac{30,8}{68,8} \cdot \frac{1,35 \cdot 0,4}{3,74} = 0,065$$

$$\frac{\sigma_d^S}{R_d^S} = \frac{30,8}{72,6} \cdot \frac{1,50 \cdot 2,0}{3,74} = 0,340$$

$$\frac{\sigma_d^W}{R_d^W} = \frac{30,8}{87,5} \cdot \frac{1,50 \cdot 0,133}{3,74} = 0,019$$

Warunek wytrzymałości (6) zadaszienia ze szkła hartowanego TTG:  $0,065 + 0,340 + 0,019 = 0,424 < 1,000$  jest spełniony, podobnie warunek wg wzoru (7):  $30,8/68,8 = 0,448 < 1,000$ . Warunek wytrzymałości (6) jest spełniony także w przypadku szkła półhartowanego HSG, które ze względu na konieczność wiercenia otworów nie może być jednak zastosowane.

## Podsumowanie

Elementy niezawodności konstrukcji szklanych, takie jak współczynniki nośności  $\gamma_{M,A}$ ,  $\gamma_{M,V}$  i wytrzymałość nominalna  $f_{g,k}$ ,  $f_{b,k}$  można weryfikować, wykorzystując wyniki badań laboratoryjnych otrzymane w próbach czteropunktowego zginania. W artykule przedstawiono rezultaty fragmentarycznej weryfikacji, opartej na dostępnych krajowych badaniach statystycznych wytrzymałości szkła hartowanego wg Sieci Badawczej Łukasiewicz (Oddział Szkła w Krakowie)

(tabela 4). Opublikowane dane statystyczne nie są kompletne, ponieważ nie uwzględniają szkła zwykłego i półhartowanego. Ponadto w materiałach źródłowych nie opublikowano współczynników zmienności  $v_{ut}$  w przypadku poszczególnych prób (klas grubości badanych szyb). Można je oszacować ze wzoru (1), w którym dla znanej nominalnej wytrzymałości szkła wg CEN:  $f_{b,k} = 120$  MPa oraz wartości centralnych  $f_{b,t} = \bar{R}_{u,t}$  wg kolumny (3) otrzymujemy:  $v_u = 0,164 \div 0,222$ .

Inny wniosek, jaki wynika z przywołanych badań, to wyraźny „efekt skali”, czyli wpływ grubości szyb na ich wytrzymałość (kolumna (3):  $\max \bar{R}_{u,t} / \min \bar{R}_{u,t} = 189/164 = 1,15$ ). Efekt ten w rekomendacjach CEN [6, 8] nie jest uwzględniany, zatem wynik krajowy należy potwierdzić. Wobec wskazanych braków i wyrywkowego charakteru analizowanych badań, postuluje się kompleksową weryfikację statystyczną wytrzymałości krajowych wyrobów ze szkła zarówno odprężonego, jak i ulepszanego cieplnie. Szkło jest materiałem o właściwościach fizycznych odbiegających od innych, często stosowanych w budownictwie materiałów konstrukcyjnych, dlatego postulowane badania laboratoryjne należy starannie zaprojektować.

Szkło monolityczne odprężone można uznać za materiał izotropowy o wytrzymałości na rozciąganie poprawnie opisanej wzorem (3). Weryfikacja staty-

styczna takiej wytrzymałości, przeprowadzona w próbach czteropunktowego zginania, jest adekwatna do przyjętego modelu materiału wg rysunku 1. Szkło ulepszone cieplnie w procesie hartowania traci cechy izotropii, stając się układem hybrydowym o wyraźnie zróżnicowanej wytrzymałości warstw zewnętrznych i słabszej warstwie środkowej, co uwzględnia wzór (4). Prosta próba czteropunktowego zginania nie wystarcza do weryfikacji parametrów statystycznych nośności konstrukcji z takiego szkła. Problem można rozwiązać, wykorzystując do modelowania znane z teorii niezawodności funkcje argumentów losowych wytrzymałości szkła zwykłego  $R_1$  i hartowanego  $R_2$ .

Postulat kompleksowych badań statystycznych jest adresowany do jednostek atestujących wytrzymałość szkła w licznych krajowych hutach i zakładach przetwórstwa szkła, które posiadają odpowiednie protokoły z prób czteropunktowego zginania. Sprawą otwartą są warunki, na jakich producenci szkła w Polsce zgodzą się opublikować rezultaty własnej atestacji.

## Literatura

- [1] Feldmann M, Kasper R, Langosch K. Glass für tragende Bauteile. Werner Verlag 2012.
- [2] Feldmann M, Langosch K. Vereinfachte und einheitliche Stabilitätsnachweise für Bauteile aus Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas für Druck und Biegung. DAST- Forschungsprojekt Nr 15060/N, Germany 2009.
- [3] Feldmann M, Langosch K. Zum Biegeverhalten von VSG-Laminaten unter Quer- oder Längsbelastung. Stahlbau Spezial 2011: Glasbau – Glass in Building. Heft März. Ernst & Sohn Verlag 2011.
- [4] Galuppi, L. and Royer-Carfagni, G., The effective thickness of laminated glass plates. Journal of Mechanics of Materials and Structures. 2012; 7: 375 – 400.
- [5] Galuppi, L. and Royer-Carfagni, G., Effective thickness of laminated glass beams: New expression via a variational approach. Engineering Structures. 2012; 53-67.
- [6] CEN/TC 250 N 1060. (Feldmann M., Kasper R. i in.): Guidance for European structural design of glass components. JRC and Policy Reports. 2014.
- [7] CNR-DT 210/2013. Guide for the design. Construction and control of buildings with structural glass elements. National Research Council of Italy. 2013.
- [8] CEN/TS 19100-1:2021. Design of glass structures (Part 1: Basis of design and materials. Part 2: Design of out-of-plane loaded glass components. Part 3: Design of in-plane loaded glass components).

Przyjęto do druku: 20.12.2022 r.