

# Analiza nośności wybranych typów tafli szklanych na podstawie badań laboratoryjnych oraz uproszczonych metod obliczeniowych

Mgr inż. Ewa Modzelewska, dr inż. Maciej Cwyl, Wydział Inżynierii Lądowej, Zespół Konstrukcji Metalowych, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Przy projektowaniu metalowo-szklanych konstrukcji elewacji oraz dachów indywidualizuje się różne wartości wytrzymałości szkła ze względu na obróbkę termiczną. Obecne metody projektowania nie określają wpływu sposobu obróbki krawędzi ani w zestawieniach tabelarycznych charakterystyk szkła, ani w uproszczonych metodach obliczeniowych. Po wyprodukowaniu szyby o żądanym wymiarze należy poddać ją dodatkowej mechanicznej lub ręcznej obróbce na zimno. Te zabiegi technologiczne mają na celu zwiększenie funkcjonalności szyby, podkreślenie jej wyglądu oraz nadanie indywidualnych cech technicznych, niezbędnych do właściwego zastosowania elementu na obiekcie budowlanym. Głównymi procesami technologicznymi są: obróbka krawędzi, nawiercanie otworów i wykonanie wycięć, wycinanie kształtów, grawerowanie, piaskowanie itp. Obróbka krawędzi jest szczególnie ważna, gdyż bezpośrednio wpływa na wytrzymałość na zginanie tafli szkła bez zmiany jej gabarytów. Okazuje się, że uzyskanie większej nośności szklanej tafli można uzyskać nie tylko poprzez zwiększenie grubości, ale jedynie dzięki samej obróbce krawędzi. Ostatnio prezentowane prace naukowe zwracają uwagę na wpływ zarysowań przy określaniu nośności płyt szklanych. Nie ma natomiast dużej liczby prac, w których analizowane są mikrorysy powstające przy obróbce krawędzi tafli szklanych w odniesieniu do warunków nośności szkła.

## 2. Szkło jako materiał budowlany

### 2.1. Szkło float

Proces produkcji szyb float został wynaleziony w 1952 roku przez Sir Alastaira Pilkingtona. Był to przełomowy moment w świecie szkła, a jego efekty możemy dziś podziwiać. Float oznacza płynięcie i metoda ta polega na płynięciu masy szklanej w wysokiej temperaturze w basenie cynowym. Uzyskana w ten sposób tafła charakteryzuje się wysoką jakością oraz równą powierzchnią wolną od zniekształceń. Szerokie możliwości przetwarzania tego typu szkła pozwalają na

jego wykorzystanie zarówno jako materiału konstrukcyjnego, ochronnego, jak i dekoracyjnego.

### 2.2. Szkło hartowane

Typowa procedura otrzymywania szkła hartowanego (*Einscheiben-Sicherheits Glas*) polega na procesie nagrzewania tafli do wysokiej temperatury i gwałtownym jej schłodzeniu. Powoduje to wywołanie na powierzchni zewnętrznej naprężeń ściskających, a w rdzeniu płyty uzyskania naprężeń rozciągających. Dzięki temu uzyskuje się szkło kilkakrotnie bardziej wytrzymałe niż szkło float czy TVG (*Teilvorgespantes Glas* – szkło półhartowane). Główną zaletą szkła hartowanego jest fakt, że jest bezpiecznym wyrobem szklany. Oznacza to, że w przypadku pęknięcia materiał ten charakteryzuje się bardzo drobną siatką spękań, a odłamki szkła są nieostre. Dlatego wykorzystywane jest do produkcji elementów konstrukcyjnych i użytkowych, wymagających podwyższonych parametrów wytrzymałościowych przy zapewnieniu określonego poziomu bezpieczeństwa użytkowania. Poza hartowaniem termicznym stosowany jest również hart chemiczny polegający na wymianie jonów metali alkalicznych na jony o większych rozmiarach, na przykład jony potasu. Zabieg ten sprzyja powstawaniu napięć powierzchniowych. W tym procesie uzyskiwane jest szkło tzw. półhartowane. Ta metoda nie jest popularnym rozwiązaniem ze względów ekonomicznych.

Zarówno szkła ESG jak i TVG nie powinny być poddawane dalszej obróbce, takiej jak: cięcie, wiercenie, jakkolwiek obróbka krawędzi. Jedynie piaskowanie (mechaniczne matowienie) i wytrawianie kwasem (chemiczne matowienie) nie naruszy struktury powierzchniowej szkła i jest dopuszczalne. Jedną z niedoskonałości procesu produkcji szkła jest wytrącanie się siarczku niklu. Jest to szczególnie niebezpieczne w przypadku szkła hartowanego, gdyż tafła wolna od jakichkolwiek obciążeń zewnętrznych może spontanicznie pęknąć na skutek pęcznienia tych związków w masie szklanej. Podczas procesu nagrzewania szkła cząstka siarczku niklu zmienia swoją objętość. Taka szyba charakteryzuje się pęknięciami rozchodzącymi się w kształt „motyli skrzydeł”.

**Tabela 1.** Przybliżone właściwości mechaniczne szkła [2]

Właściwość	Symbol	Wielkość przybliżona		Badanie
		Szkło odprężone termicznie	Szkło hartowane termicznie	
Gęstość	$\rho$	$2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$		–
Gęstość dla szkła z siatką zbrojeniową	$\rho$	$2,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	–	–
Twardość wg skali Mohsa	–	5 – 6		wg PN-EN 101
Stopień twardości wg skali Knoop	HK 0,1/20	470 HK 0,1/20		wg DIN 52 333
Moduł elastyczności (statyczny)	$E_{\text{stat}}$	$7,3 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$	$7,0 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$	ustalony w oparciu o próbę ugięcia wg DIN 52 303 część 1
Liczba Poissona	$\nu$	0,23		–
Wytrzymałość na ściskanie	dB	700 – 900 $\text{N/mm}^2$		wg DIN 51 067 część 1

**Tabela 2.** Wartości minimalne odporności na zginanie szkła [2]

Wyrób szklany	Wartości minimalne wytrzymałości na zginanie [ $\text{N/mm}^2$ ]	Badanie
Szkło float	45	DIN 52 292 – R 400
Szkło okienne	45	DIN 52 292 – R 400
Szkło wzorzyste (ornamentowane)	25	DIN 52 292 – R 400
Szkło profilowane	45	DIN 53 303 część 2
Szkło float z siatką zbrojeniową	25	DIN 52 292 – R 400
Szkło wzorzyste z siatką zbrojeniową	25	DIN 52 292 – R 400
Szkło hartowane	120	DIN 52 303 - A
Szkło laminowane	Dla wartości wytrzymałości na zginanie obowiązują wartości odpowiadające użytemu rodzajowi szkła	

Wada ta nie dotyczy innych rodzajów szkła. Można ją wykrzyć poprzez przeprowadzenie testu HST (*Heat Soak Test*).

### 2.3. Obróbka krawędzi

Po uzyskaniu szyby o żądanym wymiarze należy poddać ją mechanicznej lub ręcznej obróbce na zimno. Ma to na celu zwiększenie funkcjonalności szyby, podkreślenie jej wyglądu oraz nadanie indywidualnych cech. Może to być zrobione poprzez obróbkę krawędzi, nawiercanie otworów i wykonanie wycięć, wycinanie kształtów, grawerowanie, piaskowanie itp. Obróbka krawędzi jest szczególnie ważna, gdyż wpływa na wytrzymałość na zginanie tafli szkła bez zmiany jej gabarytów. Istotną sprawą jest, aby wszelkie procesy obróbki szkła przeprowadzić przed procesem dodatkowej obróbki cieplnej.

Obróbka krawędzi szyby eliminuje nieregularności powstałe przy cięciu szkła. W przypadku obróbki standardowej można wyróżnić:

- krawędź zatępioną – ścięcie krawędzi oraz jej częściowe lub całkowite doszlifowanie;
- krawędź szlifowaną, przemysłową – doszlifowanie krawędzi na pełnym przekroju tafli w taki sposób, by nie zostały ślady cięcia na jej powierzchni;
- krawędź polerowaną – po wykonaniu satynowania zostaje przeprowadzone wygładzenie krawędzi do połysku;
- krawędź fazowaną – mocne ścięcie krawędzi.

### 2.4. Własności szkła

Właściwości chemiczne i fizyczne głównych wyrobów szklanych można uznać za niezmiennie w czasie. Szkło jest niewrażliwe na wpływ reakcji fotochemicznej, a właściwości spektralne, takie jak przepuszczalność energii słonecznej i światła nie ulegają zmianie pod wpływem pośredniego lub bezpośredniego promieniowania słonecznego. Powierzchnię szkła konstrukcyjnego można uznać za zupełnie niewrażliwą na wpływ środowiska naturalnego. Jako materiał podlega prawu Hooke'a. Jest kruche, nie wykazuje zjawiska pełzania ani odkształceń trwałych.

Jest to materiał amorficzny oraz izotropowy. Im większy udział fazy amorficznej w szkłe, tym jest ono mniej kruche, lecz również łatwiej topliwe i mętne. Szkło jest materiałem niepalnym i nie zapalającym się.

Podczas zginania próbki szkła jedna z jego powierzchni ulega ściskaniu, a druga rozciąganiu. Wytrzymałość ta jest zależna od grubości i rodzaju obróbki termicznej, a w przypadku tafli poddanej takiemu procesowi również od rodzaju obróbki krawędzi. Za odporność na zginanie uznaje się minimalne naprężenie ściskające przy poziomie ufności 0,95 skutkujące pęknięciem w 5%. Nośność na zginanie szkła float jest znacznie niższa niż szkła hartowanego. Wynika to z faktu wprowadzenia dużych naprężeń powierzchniowych podczas nagrzewania i schładzania szkła.

### 3. Badania wytrzymałości szkła – czteropunktowe zginanie

#### 3.1. Maszyna wytrzymałościowa oraz niezbędne urządzenia pomiarowe

Badanie przeprowadzono w oparciu o wytyczne zawarte w normie PN-EN 1288-3. W tej normie zawarto opis metody wyznaczania wytrzymałości na zginanie, włączając efekt brzegowy szkła płaskiego budowlanego.

Badanie wytrzymałości na zginanie należy wykonywać z zastosowaniem odpowiedniej maszyny wytrzymałościowej, charakteryzującej się poniższymi cechami:

- naprężenie powinno być przykładane do próbki w sposób równomierny, umożliwiając w ten sposób przekazanie płynnego nacisku od zera do maksymalnej siły, tak by zmniejszyć gwałtowny napór oraz precyzowanie szybkości jego przekazywania;
- maszyna powinna być wyposażona w urządzenie mierzące wartość przykładanego naprężenia z błędem granicznym  $\pm 2,0\%$  w granicach zakresu pomiarowego;
- wałki zginające i podporowe powinny być obrotowe oraz mieć długość nie mniejszą niż 365 mm i średnicę 50 mm. Ponadto wymagane są dodatkowe przyrządy pomiarowe umożliwiające:
- pomiar szerokości próbki z dokładnością do 1 mm;
- pomiar grubości próbki z dokładnością do 0,01 mm.

Powierzchnię szkła od zarysowań wałkami podporowymi i zginającymi chronią gumowe paski o grubości 3 mm i twardości  $40 \pm 10$  LRHD (zgodnie z ISO 48).

Zginanie próbki powinno odbywać się z szybkością  $(2 \pm 0,4)$  N/(mm<sup>2</sup>·s) przy zachowaniu jednostajnie wzrastającego obciążenia zginającego, aż do momentu uszkodzenia. Maksymalna siła powodująca zniszczenie próbki oraz czas przykładania obciążenia powinny zostać zmierzone i zanotowane.

#### 3.2. Stan, wymiary próbki i obróbka krawędzi

Do badania przygotowano próbki płaskie, a z obrzeżami odpowiadającymi końcowej obróbce zgodnie z przebiegiem procesu technologicznego produkcji płyt szklanych. Każda zamierzona zmiana próbki poprzez obróbkę krawędzi, mechaniczne uszkodzenie, wytrawianie, usunięcie powłoki ochronnej itp. powinny zakończyć się co najmniej 24 h przed planowanym badaniem. Przechowywanie próbek powinno odbyć się w środowisku badawczym przez co najmniej 4 h przed badaniem. Dodatkowo próbki powinny się okleić powłoką przylepną, utrzymującą popękane szkło, na powierzchni, która będzie znajdować się od strony wałków zginających.

Przez środowisko badawcze rozumie się pomieszczenie o temperaturze  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej zawartej w granicy między 40 a 70%. Temperatura powinna być utrzymywana podczas badania z dokładnością do  $1^\circ\text{C}$ . W ten sposób próbki są wolne od naprężeń termicznych.

Normowe wymiary próbek przeznaczonych do badania:

- długość próbki L:  $1100 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ,
- szerokość próbki B:  $360 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ,
- grubość próbki h: odchyłka grubości szkła w zakresie tolerancji.

Ustalenie wymiarów próbki powinno opierać się na średniej arytmetycznej co najmniej trzech pojedynczych pomiarów szerokości oraz co najmniej czterech pojedynczych pomiarów grubości z dokładnością do 0,05 mm. Pomiar grubości próbki powinien odbywać się w miejscu na zewnątrz dwóch wałków zginających, aby zapobiec ewentualnym uszkodzeniom badanej powierzchni oraz powinien objąć obydwie końce próbki.

#### 3.3. Obliczanie wytrzymałości na zginanie

Dla próbek o prostokątnym przekroju poprzecznym i w przypadku których początek pęknięcia rozpoczął się między wałkami zginającymi, zastosowano wzór do wyznaczenia określonego poziomu naprężenia:

$$\sigma_{bB} = k \left[ \frac{F_{\max} 3(L_s - L_b)}{2Bh^2} \right] + \sigma_{bG} \quad (1)$$

gdzie:

B – szerokość próbki,

$F_{\max}$  – siła maksymalna,

h – grubość próbki,

k – współczynnik wymiarowy,

$L_b$  – odległość między liniami środkowymi wałków podporowych,

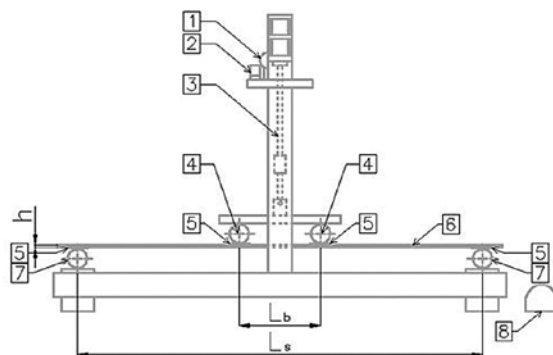
$L_s$  – odległość między liniami środkowymi wałków zginających,

$\sigma_{bG}$  – naprężenie zginające próbki wywołane ciężarem własnym próbki:

$$\sigma_{bG} = 3\rho g L_s^2 / 4h,$$

g – przyspieszenie grawitacyjne,

$\rho$  – gęstość próbki.



- 1 – Miernik CL 300, 2 – regulator przepływu szybkości opadania wałków zginających, 3 – tłok, 4 – wałki zginające  $\varnothing 50$  mm i długości min. 365 mm, 5 – gumowe paski o grubości 3 mm i twardości  $40 \pm 10$  LRHD, 6 – próbka szkła, 7 – wałki podporowe  $\varnothing 50$  mm i długości min. 365 mm, 8 – pedał sterujący,  
h – grubość próbki szkła,  
 $L_b = 200 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ,  $L_s = 1000 \pm 2 \text{ mm}$

Rys. 1. Schemat budowy maszyny wytrzymałościowej oraz poprawnego ułożenia próbki [9]

### 3.4. Przygotowanie próbek

#### Cięcie

Pierwszym krokiem było przygotowanie formatek szklanych o odpowiednich wymiarach. Wysoką precyzję i dokładność cięcia gwarantuje użycie do tej czynności zaprogramowanej maszyny, która w sposób automatyczny wyznacza, jak wyciąć formatki z arkusza, uzyskując jak najmniej odpadu. Nożyk nacina powierzchnię, by móc później w prosty sposób ułamać żądany format.

#### Obróbka krawędzi

Badanie wytrzymałości na zginanie szkła przeprowadzono na trzech rodzajach próbek w zależności od obróbki krawędzi. Wybrano odpowiednio:

- krawędź zatępioną;
- krawędź szlifowaną;
- krawędź szlifowaną i polerowaną.

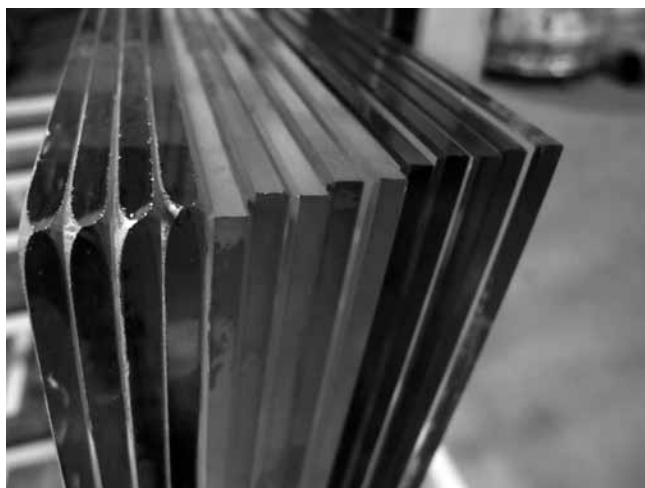
Krawędź zatępiona charakteryzuje się najmniejszą gładkością krawędzi. Jest to podstawowa obróbka przeprowadzana na taflach, które muszą zostać zahartowane, lecz nie muszą spełniać wyższych wymogów estetycznych dla krawędzi, na przykład szyby do pakietu okiennego. Konieczne jest przeprowadzenie przynajmniej tego zabiegu przed procesem hartowania, gdyż niespełnienie tego warunku często skutkuje rozbitciem się szyby podczas nagrzewania w piecu hartującym. Zatępienie wykonuje się ręcznie pod strumieniem wody.

Zarówno krawędź szlifowaną, jak i szlifowaną z polerem używa się, wykorzystując tę samą maszynę, zmieniając jedynie konfigurację tarcz do obróbki. Szyby przesuwane są za pomocą taśmy i utrzymywane w pionie dzięki rolkom znajdującym się za tylną powierzchnią szkła. Poddawana obróbce jest dolna krawędź. Dlatego całość trzeba powtórzyć tyle razy, ile krawędzi ma dana formatka, obracając za każdym razem innym brzegiem w dół. Maszyna składa się z 11 tarcz diamentowych. Pierwsze pięć są niezmiennie w każdym procesie obróbki krawędzi i odpowiadają za szlif (pierwsze trzy) i wprowadzenie skosów (następne dwie), zaś kolejne 6 to tarcze polerujące czoło i skosy, które włącza się w zależności od zapotrzebowania.

Różnice w wyglądzie formatek poddanych różnym rodzajom obróbki krawędzi są łatwe do wychwycenia, zwłaszcza gdy zestawimy je obok siebie (rys. 2).

#### Hartowanie

Hartowanie można przeprowadzić dopiero, gdy zakończono wszystkie procesy związane ze zmianą kształtu, wprowadzaniem otworów czy nacięć oraz obróbki krawędzi. Umyte próbki umieszcza się na wałkach przed komorą pieca. Próbki pogrupowano ze względu na rodzaj krawędzi i ponumerowano markerem odpornym na wysoką temperaturę. Szyby pozostające w ciągłym ruchu na wałkach nagrzewa się do temperatury 380°C w pierwszej komorze. Następnie



Rys. 2. Różnice w wyglądzie krawędzi szkła – od prawej: krawędź zatępiona, szlifowana, polerowana [7]



Rys. 3. Przejście rozgrzanych (czerwonych na krawędziach) próbek do komory chłodzącej [7]

przesuwane są one do komory umożliwiającej szybkie schłodzenie.

Podczas procesu nagrzewania uległa zniszczeniu próbka zatępiana umieszczona skrajnie w pierwszej linii wjazdu do komory pieca. Mogło to wynikać z niedokładnego zatępienia krawędzi lub nierównomiernego nagrzania szkła w piecu. Po wyjściu szyb z chłodni mają one temperaturę otoczenia i możliwe jest ich dalsze składowanie. Zgodnie z wymogami normy muszą one odpocząć przez minimum 24 h przed przeprowadzeniem badania, w tym przynajmniej 4 h w środowisku badawczym.

#### Zginanie próbek w maszynie wytrzymałościowej

Po przynajmniej 4 h przechowywania próbek w środowisku badawczym można było przejść do próby wytrzymałościowej. Podczas przeprowadzania badania należało utrzymać stałe warunki temperatury i wilgotności powietrza w celu uniknięcia naprężeń termicznych.

Badanie należało poprzedzić odpowiednim przygotowaniem i pomiarem próbek:

- skontrolowano jakość próbki i obróbki krawędzi;
- dokonano pomiaru szerokości jako średnią arytmetyczną z co najmniej trzech pojedynczych pomiarów z dokładnością do 1 mm;



Rys. 4. Miernik CL oraz maszyna wytrzymałościowa [7]



Rys. 5. Ugięta tafla [7]



Rys. 6. Siatka spękań szkła hartowanego utrzymująca się dzięki folii przyklejonej przed rozpoczęciem badania [7]

- dokonano pomiaru grubości jako średnią arytmetyczną z co najmniej czterech pojedynczych pomiarów z dokładnością do 0,05 mm, wybierając miejsca pomiarowe na zewnątrz od wałków zginających i objąć dwa końce próbki;

- naklejono taśmę samoprzylepną na całej powierzchni próbki od strony wałków zginających.

Niezbędny do wykonania badania był miernik CL 300. Urządzenie przylączy się do instalacji sprężonego powietrza o ciśnieniu 6–10 bar. Pedał uruchamia tłok wywierający nacisk na szybę i pomiar czasu. Na górnym wyświetlaczu miernika można obserwować bieżącą wartość mierzonej siły – wartość ta rośnie wraz z upływem czasu trwania pomiaru. Należy obserwować moment pęknięcia próbki. Nacisk tłoka wyłączy się automatycznie, a na wyświetlaczu miernika będzie możliwe odczytanie maksymalnego obciążenia  $F_{max}$  oraz czas trwania pomiaru w sekundach. Do oceny brane są tylko próbki z początkiem pęknięcia między wałkami zginającymi, a wynik można uznać za zgodny, gdy w przypadku bezbarwnego szkła float wartość naprężeń wyniesie nie mniej niż 120 N/mm<sup>2</sup>. Schemat zaprezentowano na rysunku 1.

### Metody obliczeniowe

Kolejno zebrano obciążenia z fasady aluminiowo-szklanej wieżowca, by porównać naprężenia efektywne występujące w tafli hartowanej takich samych wymiarów, jak tych poddanych niszczeniu, otrzymane za pomocą metody uproszczonej, jak i programu obliczeniowego Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018 z uwzględnieniem analizy liniowej i nieliniowej. Do obliczeń przyjęto szybę jednokomorową składającą się z laminatu po stronie wewnętrznej i pojedynczej tafli po stronie zewnętrznej, połączonych ciepłą ramką o grubości 16 mm dającą najlepsze efekty ze względu na termikę. Wszystkie tafle są szkłem hartowanym o wymiarach takich samych jak te użyte w badaniu. Do analizy wybrano wieżowców o parametrach typowych dla nowo powstających biurowców zlokalizowanych w Warszawie, w celu skonfrontowania przydatności różnych metod obliczeniowych w przypadku rzeczywistych obciążeń.

### Uproszczona metoda obliczeniowa – metoda współczynników

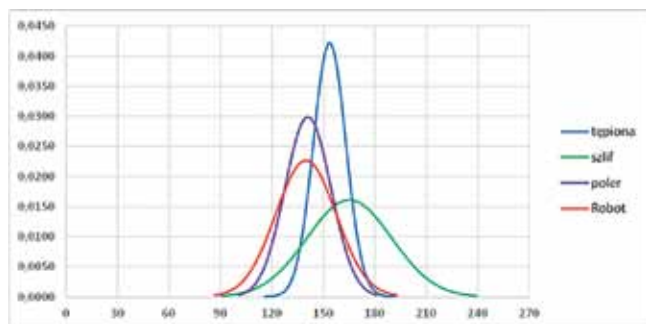
Przy założeniu nieliniowej analizy można zastosować metodę uproszczoną [4] do wyznaczania naprężeń efektywnych, wykorzystującą stabilizowane współczynniki. W przypadku rozpatrywanych tafli są to współczynniki  $k_{40}$  oraz  $k_{40}$  umożliwiające wyznaczenie naprężeń w szybie podpartej na czterech krawędziach w celu uzyskania maksymalnych wartości naprężeń i ugięcia. Aby dobrać współczynniki, wprowadza się obciążenie zastępcze i smukłość szklanej tafli wyrażone wzorami:

$$\tilde{p} = \left(\frac{a}{t}\right)^4 \cdot \frac{q}{E} \quad (2)$$

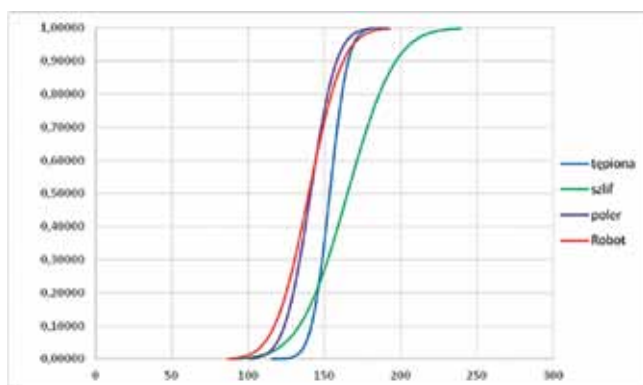
$$\lambda = \frac{a}{b} \quad (3)$$

gdzie:

a, b – wymiary tafli szkła w kierunku maksymalnych naprężeń (w zależności od schematu podparcia),



Rys. 7. Wartości średnie i rozkład otrzymanych wytrzymałości [7]



Rys. 8. Dystrybuanty próbek [7]

Tabela 3. Zestawienie wartości otrzymanych za pomocą metody uproszczonej

Wiatr działający na fasadę biurowca – wyniki metody uproszczonej							
Naprężenia [MPa]			Wyężenie [%]	Ugięcie [mm]			Wyężenie [%]
Maksymalne	Dopuszczalne			Maksymalne	Dopuszczalne		
K1SGN	24,33	50	48,65	K1SGU	0,369	3,6	10,25
K2SGN	23,32	50	46,63	K2SGU	0,351	3,6	9,75

Tabela 4. Zestawienie wartości otrzymanych za pomocą analizy liniowej w programie Robot

Wiatr działający na fasadę biurowca – wyniki analizy liniowej							
Naprężenia [MPa]			Wyężenie [%]	Ugięcie [mm]			Wyężenie [%]
Maksymalne	Dopuszczalne			Maksymalne	Dopuszczalne		
K1SGN	27,104	120	22,59	K1SGU	1,155	3,6	32,08
K2SGN	26,498	120	22,08	K2SGU	1,153	3,6	32,03

Tabela 5. Zestawienie wartości otrzymanych za pomocą analizy nieliniowej w programie Robot

Wiatr działający na fasadę biurowca – wyniki analizy nieliniowej							
Naprężenia [MPa]			Wyężenie [%]	Ugięcie [mm]			Wyężenie [%]
Maksymalne	Dopuszczalne			Maksymalne	Dopuszczalne		
K1SGN	20,434	120	17,03	K1SGU	1,073	3,6	29,81
K2SGN	26,312	120	21,93	K2SGU	1,071	3,6	29,75

$t$  – grubość tafli szkła,

$q$  – charakterystyczne obciążenie równomiernie rozłożone (wiatr, śnieg),

$E$  – moduł sprężystości podłużnej szkła.

Aby móc przeprowadzić obliczenia dla szyby laminowanej, należy w pierwszym etapie wyznaczyć efektywną grubość oszklenia oddzielnie dla naprężeń i ugięć. Następnie można wyznaczyć efektywne naprężenia i ugięcia, zgodnie z instrukcjami zamieszczonymi w powyższych punktach tej pracy w zależności od sposobu podparcia szyby.

#### 4. Rezultaty

Wykresy na rysunku 8 przedstawiają wartości średnie i rozkład wraz z dystrybuantami otrzymanych wytrzymałości próbek o krawędziach tępionych, szlifionych i polerowanych oraz wartości uzyskanych za pomocą programu obliczeniowego Robot Structural Analysis.

Wartości średnie i wartości nominalne:

- krawędź tępiona: 153,65 MPa; 138,11 MPa,
- krawędź szlifowana: 164,96 MPa; 124,33 MPa,

- krawędź polerowana: 140,86 MPa; 118,88 MPa,
- Program Robot: 139,71 MPa; 110,74 MPa.

#### 5. Podsumowanie

Zarówno badania w maszynie wytrzymałościowej, jak i wyniki programu obliczeniowego pokazały, że wszystkie próbki szklane po zahartowaniu osiągnęły wartość średnią wytrzymałości większą niż 120 MPa. Jednak należy uwzględnić, że minimalna charakterystyczna wytrzymałość na zginanie odpowiada 5% kwantylowi o 95% poziomie ufności. Te same próbki szklane obciążone w sposób odpowiadający obciążeniu maszyny wytrzymałościowej w programie Robot osiągnęły niższe wartości wytrzymałości niż faktyczne tafle szklane. Okazuje się, że najwyższą wytrzymałością na zginanie charakteryzuje się tafła o krawędzi szlifowanej, a najniższą – próbki o krawędzi polerowanej. Różne wartości wytrzymałości fizycznych próbek wynikają z różnych sposobów obróbki krawędzi i możliwych mikrorys powstających podczas tego procesu. Obróbka krawędzi szyby jest konieczna, by móc przeprowadzić proces jej hartowania: nie

jest możliwe zahartowanie szkła ciętego (natychmiastowe zniszczenie po schłodzeniu tafli) oraz nie spełniłoby wymogu bezpieczeństwa – szkło hartowane w momencie rozbicia nie może zranić (rozbicie się na małe odłamki o tępych krawędziach). Ze względów ekonomicznych najlepszym wyborem jest krawędź zatępiana, jednak w przypadku potrzeby osiągnięcia wyższej wytrzymałości i estetyki oszklenia zdecydowanie odpowiedniejsza jest krawędź szlifowana. Jest ona zalecana do przeszkleń strukturalnych, mocowanych punktowo i do wszelkich innych rozwiązań, gdzie krawędzie szkła są widoczne.

Następnie zebrano obciążenia działające na fasadę projektowanego biurowca. Metoda uproszczona polegająca na wyznaczeniu efektywnych naprężeń i ugięć tafli w szybie zespolonej opartej na obwodzie za pomocą współczynników tabelarycznych pokazała, że tafle takie, jak te badane w maszynie wytrzymałościowej mogą zostać wykorzystane w fasadzie aluminiowo-szklanej ryglowo-słupowej, gdyż spełniają warunki stanów granicznej nośności i użytkowalności. Uzyskane naprężenia porównywane są z wartością dopuszczalną 50 MPa, gdzie ta wartość oznacza naprężenia dopuszczalne szkła na rozciąganie przy zginaniu. Wartością zebranych obciążeń od oddziaływań na fasadę budynku obciążono również tafle, o parametrach normowych, w programie obliczeniowym. Uzyskane naprężenia porównano z wartością 120 MPa, która oznacza charakterystyczną ogólną wytrzymałość szkła hartowanego na zginanie. Przeprowadzono analizę liniową i nieliniową. Analiza nieliniowa jest uwzględniana w przypadku elementów charakteryzujących się ugięciem większym od swojej grubości, jakim z pewnością jest szklana tafla.

Wraz ze wzrostem obciążenia zwiększa się różnica wyników ugięć dla tych dwóch analiz – przy obciążeniu rzędu 1000 Pa wartość ugięcia w analizie liniowej jest dwa razy większa niż w analizie nieliniowej [13]. Dla ekonomicznego projektowania lepsza jest więc analiza nieliniowa.

Powyższe zestawienia pokazują, że metoda uproszczona pozwala jedynie na oszacowanie nośności szklanych tafli w sposób bezpieczny, gdyż otrzymano największą wartość

wytrzymałości w przypadku naprężeń i bardzo małą wartość ugięcia. To porównanie pokazuje, o ile większe naprężenie jest w stanie wytrzymać szklana tafla, jakie możliwości w projektowaniu daje nam szkło oraz dobrze obrazuje bezpieczne podejście obliczeniowe metody współczynników. W celu lepszej optymalizacji zastosowanego oszklenia lepiej jest zatem wybrać program obliczeniowy, a w szczególności analizę nieliniową, która w przypadku większych wartości obciążeń pozwoli uzyskać miarodajne wyniki.

**Autorzy dziękują firmie Starglass z Ostrołęki za możliwość przygotowania próbek oraz przeprowadzenia badań.**

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 12150-1 Szkło w budownictwie. Termiczne hartowanie bezpieczne szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe. Część 1. Definicje i opis
- [2] Glas Trösch GmbH-SANCO Beratung: Sanco Książka o szkle, wydanie 4, 2010
- [3] Heine Architekten: Przewodnik po szkle, 2006
- [4] Piekarczyk A., Elementy konstrukcyjne ze szkła budowlanego, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2013
- [5] Technische Regeln für die Verwendung von linien förmig gelagerten Verglasungen (TRLV)
- [6] PN-EN1288-3 Szkło w budownictwie – Określanie wytrzymałości szkła na zginanie – Część 3: Badanie na próbkach podpartych na dwóch podporach (czteropunktowe zginanie)
- [7] Materiały własne – badania wykonane w firmie Starglass 8–21.11.2017
- [8] Instrukcja przeprowadzania badania firmy Starglass: Optyczny pomiar naprężeń powierzchniowych szkła hartowanego – Laser GASP, wydanie A, Ostrołęka, 2008
- [9] Instrukcja przeprowadzania badania firmy Starglass: Badanie wytrzymałości szkła nazginanie, wydanie A, Ostrołęka, 2006
- [10] Corti R., Kaonpää A., Nikkilä A., Obróbka krawędzi a wytrzymałość na zginanie szkła poddanego 4-punktowemu obciążeniu symetrycznemu, Glass Processing Days 2005, Świat Szkła 5/2006
- [11] PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcje Część 1-4: Oddziaływania ogólne Oddziaływania wiatru
- [12] Żurański J., Gaczek M., Poradnik konstruktora. Obciążenie wiatrem budynków w ujęciu normy PN-EN1991-1-4:2008, Inżynieria i budownictwo 9/2010
- [13] Kozicka E., Dojlida D., Porównanie nośności przeszkleń obliczanych metodami analizy liniowej i nieliniowej, 64. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Krynica Zdrój, 2018

Politechnika Wrocławska oraz Polska Grupa IABSE organizują po raz pierwszy w Polsce  
**Symposium IABSE,**

które odbędzie się we Wrocławiu, w dniach 20-22 maja 2020 roku.

Tematem konferencji będzie **Synergia kultury i inżynierii – historia i wyzwania.**

Szczegółowe informacje na stronie: [www.iabse.org/wroclaw2020](http://www.iabse.org/wroclaw2020)

