

Wpływ obróbki cieplnej szkła i rodzaju zastosowanej międzywarstwy na wytrzymałość mechaniczną szyb laminowanych dla budownictwa

MGR INŻ. IWONA KOZUBEK, MGR INŻ. JACEK BRZEZICKI

INSTYTUT CERAMIKI I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH
ODDZIAŁ SZKŁA I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH W KRAKOWIE, ZAKŁAD TECHNOLOGII SZKŁA

Szkoło warstwowe, zwane również laminowanym, jest materiałem o bardzo szerokim zakresie stosowania. Stosuje się go do wytwarzania szyb samochodowych, oszkleń ochronnych o zwiększonej odporności na przebicie i rozbicie, oszkleń odpornych na ostrzał z broni palnej i o zwiększonej odporności na uderzenie fali detonacyjnej, ognioodpornych, do dekoracji wnętrz oraz w meblarstwie. Największy obszar użytkowania szkła tego typu stanowi budownictwo.

Ze szkła warstwowego wykonuje się elewacje budynków, ściany działowe, podłogi, schody, balustrady, przekrycia dachów, daszki, szyby i oszklenia izolujące cieplnie oraz akustycznie. Z uwagi na różnorodność zastosowań szkła warstwowego i związanej z tym różnorodności czynników oddziałujących (obciążenia zmienne, obciążenia stałe, wpływ środowiska), wyroby ze szkła warstwowego powinny charakteryzować się określonymi właściwościami.

Szkoło warstwowe to zestaw składający się z płyty szklanej połączonej z jedną lub wieloma płytami ze szkła lub tworzywa organicznego jedną lub wieloma międzywarstwami. Szkołem warstwowym bezpiecznym określa się szkło warstwowe, w którym – w przypadku rozbicia – międzywarstwa służy do utrzymywania fragmentów szkła, ogranicza wielkość powstałych otworów, zapewnia szcztłkową wytrzymałość oraz zmniejsza ryzyko zranienia lub skałeczenia. Międzywarstwa w szkło warstwowym jest materiałem działającym jak spoiwo i przekładka między warstwami szkła lub płytą z tworzywa organicznego. Może spełniać dodatkowe funkcje w gotowym wyrobie, np. wpływać na wytrzymałość na uderzenie, ognioodporność, izolację akustyczną, przepuszczalność światła (folie barwne).

Do produkcji szyb warstwowych i bezpiecznych szyb warstwowych stosuje się najczęściej następujące rodzaje szkielek:

- szkło float sodowo-wapniowo-krzemianowe o właściwościach wg PN-EN 572-1: 2012,
- termicznie hartowane bezpieczne szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe wg PN-EN 12150-1: 2002,
- termicznie wygrzewane, hartowane, bezpieczne szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe wg PN-EN 14179-1: 2008,
- termicznie wzmocnione szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe wg PN-EN 1863-1: 2012,
- termicznie hartowane bezpieczne szkło borokrzemianowe wg PN-EN 13024: 2012,
- chemicznie wzmocnione szkło sodowo-wapniowo-krzemianowe wg PN-EN 12337-1: 2004.

SŁOWA KLUCZOWE

szyby warstwowe, międzywarstwy, odporność na czteropunktowe zginanie

KEYWORDS

laminated glass, interlayer, four point bending resistance

Iwona Kozubek



Starszy specjalista i Kierownik ds. Jakości w Zakładzie Technologii Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Specjalizuje się w badaniach parametrów wytrzymałościowych

szkła budowlanego.
i.kozubek@icimb.pl

Jacek Brzezicki



Starszy specjalista w Zakładzie Technologii Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Specjalizuje się w badaniach opakowań szklanych, szkła budowlanego, tj. hartowanego bezpiecznego i ochronnego.

j.brzezicki@icimb.pl

STRESZCZENIE

W artykule scharakteryzowano rodzaje szkła i materiałów polimerowych, stosowanych do budowy szyb warstwowych i bezpiecznych szyb warstwowych. Przedstawiono porównawcze wyniki badań szkieł laminowanych różnych konstrukcji na czteropunktowe zginanie oraz badań wytrzymałości na uderzenie wahadłem i kulą. Opisano sposób wyznaczania grubości efektywnej szyb warstwowych, używanej do obliczeń wytrzymałości mechanicznej.

SUMMARY

Effect of heat treatment and the nature of the interlayer on the mechanical strength of laminated glass for building

The article described the types of glass and polymeric materials used for the construction of laminated glass and laminated safety glass. The paper presented comparative results of different designs of laminated glass on four point bending strength, pendulum impact and ball. The method of determining the effective thickness of laminated panes used for the calculations of mechanical strength was described.

Materiałami używanymi w charakterze międzywarstwy są:

- folia poliwinylbutyralowa (PVB) – polimer winylowy należący do polioctanów winylu; stanowi termoplast amorficzny. Zawiera dodatek plastyfikatorów wpływających na poprawę zdolności przylegania, pochłaniania wody i sprężystości oraz modyfikatorów – barwiących, blokujących promieniowanie UV. Folia PVB wykazuje wysoką przezroczystość i wytrzymałość na rozerwanie (w temperaturze 23°C – powyżej 20 MPa), wysoką odporność na promieniowanie; międzywarstwy z PVB mogą zmniejszyć przepuszczalność promieniowania UV do 1%. Wadę PVB stanowi wysoka higroskopijność i obniżenie parametrów wytrzymałościowych w podwyższonej temperaturze, co powoduje konieczność składowania w pomieszczeniach klimatyzowanych (temp. 5 °C, wilgotność względna poniżej 40%). Laminowanie folią PVB odbywa się w temperaturze ok. 115 °C, ciśnieniu 10 bar i wymaga oprzyrządowania w postaci autoklawu. Folia PVB może być stosowana z innymi międzywarstwami.

- folia EVA – kopolimer etylenu z octanem winylu, wytwarzana z tych składników w dowolnych proporcjach. Posiada wytrzymałość na rozerwanie 10-25 MPa, dobre właściwości kohezyjne i adhezyjne, dobrą odporność na promieniowanie. Używana powszechnie do okrywania ogniw w modułach fotowoltaicznych. Nie jest higroskopijna. Cechuje ją wysoka przezroczystość (91%). Laminowanie folią EVA odbywa się w piecach próżniowych w temperaturze ok. 140-155 °C i jest procesem tańszym w porównaniu z laminowaniem folią PVB. Folię EVA stosuje się do produkcji trój- i wielowarstwowych szyb bezpiecznych i ochronnych.

- żywice – przeważnie ciekłe poliuretany, rzadziej poliestry, utwardzane w wyniku reakcji chemicznej lub pod wpływem promieniowania UV. Ich wytrzymałość mechaniczna jest mniejsza niż wytrzymałość folii PVB i EVA. Są z powodzeniem stosowane do szyb wielowarstwowych w kombinacji z folią PVB, EVA i poliwęglanem; ich użycie nie wymaga urządzeń ciśnieniowych i wyższej temperatury.

- SGP – jonomer, pochodna etylenu i kwasu metakrylowego, stosowany jako międzywarstwa do produkcji szkła laminowanego o podwyższonych wymaganiach. Posiada pięć razy wyższą wytrzymałość na rozdarcie oraz stukrotnie wyższą sztywność od folii PVB, bardzo dobrą przyczepność do szkła pokrytego metalem.

Wytrzymałość mechaniczna szkieł laminowanych zależy od wytrzymałości szkła stosowanego do ich budowy, rodzaju międzywarstwy, prawidłowości przeprowadzenia procesu laminacji, obciążeń w trakcie eksploatacji.

Szkle charakteryzuje się bardzo dużą wytrzymałością na ściskanie i teoretycznie bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie. Z uwagi jednak na defekty powierzchni w postaci submikroskopowych pęknięć i odprysków wywołanych obróbką oraz oddziaływaniem środowiska, wytrzymałość na rozciąganie jest dużo mniejsza niż teoretyczna. Najważniejszą właściwością szkła poddawane obciążeniom mechanicznym w budynkach jest wytrzymałość na zginanie. Czynnikiem, które mają wpływ na ten rodzaj wytrzymałości są: stan powierzchni szkła, wielkość i czas trwania obciążenia, czas od ostatniej obróbki mechanicznej powierzchni oraz temperatura.

Stan powierzchni szkła określa rodzaj zastosowanej obróbki oraz występujące w nim naprężenia szczątkowe, np. w postaci wstępnych naprężeń wywołanych termicznie lub chemicznie – uzyskanych celowo oraz naprężenia szczątkowe niezamierzone. Istotnym czynnikiem jest środowisko, dlatego badanie wytrzymałości na zginanie powinno być przeprowadzane w warunkach wilgotności względnej 40-70%, w celu wyeliminowania tego oddziaływania i porównania wyników. Zmiany jednorodności lub grubości próbki wpływają na rozkład naprężenia zginającego co powoduje, że wytrzymałość na zginanie nie jest nigdy wartością dokładną. Dlatego, w niektórych przypadkach, lepszym określeniem jest równoważna wytrzymałość na

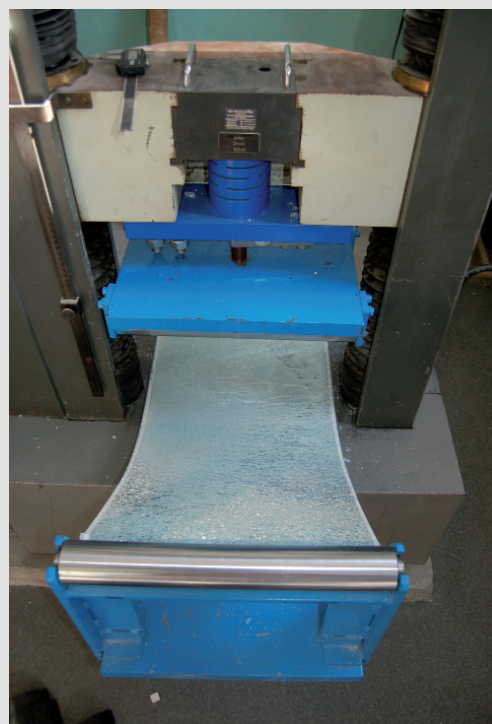
zginanie. W przypadku szkła warstwowego, w czasie badania zginania, w międzywarstwach sprężystych lub z tworzywa sztucznego powstają dodatkowe odkształcenia ścinające, co powoduje, że zmierzona wytrzymałość może być mniejsza od wytrzymałości litego szkła o tej samej grubości. Wytrzymałość szkła na zginanie charakteryzuje się dużą zmiennością wyników dla nominalnie identycznych próbek. Jej wartość może być podawana tylko jako wartość statystyczna, związana z określonym prawdopodobieństwem pęknięcia.

Wytrzymałość mechaniczną szkieł używanych do produkcji szkieł warstwowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyczne wartości wytrzymałości mechanicznej szkieł stosowanych w szybach warstwowych

Rodzaj szkła	Minimalna wartość wytrzymałości [N/mm ²]		
	Termicznie hartowane bezpieczne oraz wygrzewane termicznie hartowane bezpieczne	Termicznie wzmocnione	Chemicznie wzmocnione
Float	120	70	150
Szkle wzorzyste	90	55	100
Float	75	45	–
emaliowany (przy założeniu, że emaliowana powierzchnia jest rozciągana)			
Płaskie ciągnięte	90	55	150

Do oceny wytrzymałości szyb warstwowych o różnej budowie wykorzystano metodykę opisaną w PN-EN 1288-3: 2002. Próbkę szkła umieszczano w maszynie wytrzymałościowej na dwóch wałkach podporowych, znajdujących się w odległości 1 m od siebie, i obciążano wałkami zginającymi (umocowanymi w odległości 0,2 m od siebie) nad badaną płytą szkła (fot. 1).



Fot. 1. Badanie wytrzymałości szyby warstwowej na czteropunktowe zginanie

Szybkość przyrostu obciążenia wynosiła $2 \pm 0,4 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$, przy jednostajnie wzrastającym naprężeniu zginającym, aż do wystąpienia pęknięcia. Mierzono maksymalną siłę obciążającą próbkę, ugięcie oraz naprężenie zginające. Wytrzymałość na zginanie obliczono ze wzoru:

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

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

gdzie:

σ_{bG} – naprężenie zginające, wywołane ciężarem własnym próbki
 B – szerokość próbki
 F_{max} – siła maksymalna
 g – przyspieszenie grawitacyjne
 h – grubość próbki
 k – współczynnik wymiarowy
 L_s – odległość między liniami środkowymi wałków podporowych
 L_b – odległość między liniami środkowymi wałków zginających
 ρ – gęstość próbki

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie próbek szkieł warstwowych różnej konstrukcji

Budowa szkła warstwowego	Średnia wartość ugięcia [mm]	Średnia wartość naprężenia zginającego [N/mm ²]
2,1 mm float/1x0,38 mm folia PVB/2,1 mm float	24	41,6 (59,8)*
4 mm float hart/1 mm żywica Unilam/float hart	57	151,5 (205,0)*
4 mm float hart/2 × 0,38 mm folia EVA/4 mm float hart	63	165,8 (232,7)*
6 mm float hart/1,52 mm folia PVB/6 float hart	52	137,3 (184,7)*
6 mm float hart/1,52 mm folia SGP/6 float hart	42	187,5 (254,4)*
10 float hart/0,76 mm folia EVA/10 float hart	28	153,0 (206,5)*
10 mm float hart/1,52 mm folia EVA Safe/10 mm float/1,52 mm folia EVA Safe/10 float hart	26	92,0
10 mm float hart/0,38 mm folia PVB/10 mm float/0,38 mm folia PVB/10 mm float hart	30	103,0

Uwaga: Średnie wartości ugięcia i naprężenia zginającego, obliczono z dziesięciu wyników badań wytrzymałości na zginanie szyb warstwowych o tej samej konstrukcji i ich rzeczywistej grubości.

*W nawiasie podano wartość naprężenia zginającego obliczonego dla grubości efektywnej szyby laminowanej i wartości $\omega=0,3$.

Norma PN-EN ISO 12543-2: 2011 *Szkoło w budownictwie – Szkoło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe – Część 2 Bezpieczne szkło warstwowe*, oprócz odporności na uderzenie, nie określa innych właściwości mechanicznych laminatów. Metodykę obliczania ugięć i naprężeń zginających szyb laminowanych proponują projekty norm prEN 13474-3: 2009 oraz prEN 16612: 2013. W ww. projektach do wyznaczenia tych parametrów zastosowano tzw. grubość efektywną, uwzględniającą posiadanie przez międzywarstwę

określonej odporności na ścinanie, zależność plastycznych lub lepko-sprężystych właściwości międzywarstwy od temperatury i czasu trwania obciążenia. Grubość efektywna wyznaczana jest z różnych zależności. Zgodnie z prEN16612: 2013 do obliczania ugięcia przy zginaniu grubość efektywną oblicza się ze wzoru:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega \left(\sum_i h_k h_{m,k}^2 \right)}$$

gdzie:

ω – jest współczynnikiem przenoszenia ścinania międzywarstwy z prEN16613: 2013 [4]

h_k, h_j – grubości warstw szkła

$h_{m,k}, h_{m,j}$ – odległości środka warstwy szkła k, j od środka szyby laminowanej

natomiast do obliczania naprężenia przy zginaniu dla wybranej warstwy szkła szyby laminowanej, grubość efektywna wyznaczana jest ze wzoru:

$$h_{ef;\sigma;j} = \sqrt{\frac{(h_{ef;w})^3}{(h_j + 2\omega h_{m;j})}}$$

Współczynnik przenoszenia ścinania międzywarstwy ω ma wartość znajdującą się w przedziale od zera do jeden, przypisaną do wielu przypadków obciążenia, zgodnie z metodą badań i oceny zawartą w prEN16613: 2013 [4]. W przypadku nieprzenoszenia ścinania, wartość parametru ω wynosi zero; w przypadku pełnego przenoszenia ścinania – wartość jeden.

Z uwagi na obowiązujące przepisy dotyczące bezpieczeństwa oszkleń stosowanych w budownictwie, szkło budowlane poddaje się badaniom wytrzymałości na uderzenie wahadłem wg PN-EN 12600: 2004 *Szkoło w budownictwie. Badanie wahadłem. Udarowa metoda badania i klasyfikacja szkła płaskiego*. Próbki szkła o wymiarach $1938 \times 876 \text{ mm}$ poddaje się uderzeniom wahadła (opony z obciążnikiem o łącznej masie 50,0 kg). Wahadło odciąga się na określoną wysokość od osi prostopadłej do osi próbki przechodzącej przez jej środek, a następnie uderza w próbkę.

W zależności od wysokości uniesienia wahadła i skutków uderzenia wymaganej liczby próbek (4 sztuki), szkło kwalifikuje się do jednej z trzech klas wytrzymałości. Klasyfikację wyrobu szklanego przedstawia się następująco:

$$\alpha(\beta)\varphi$$

gdzie:

α – jest najwyższą wysokością spadania wahadła w danej klasie, przy której wyrób albo nie został rozbity, albo rozbił się bezpiecznie (wg wymagań punktu 4a lub 4b normy)

β – sposób pęknięcia

φ – jest najwyższą wysokością spadania wahadła w danej klasie, przy której wyrób albo nie został rozbity, albo rozbił się w sposób zgodny z wymaganiami punktu 4a normy

Bezpieczne szkło warstwowe powinno wykazywać co najmniej klasę 3B3, zgodnie z punktem 4 PN-EN ISO 12543-2: 2011. Wyniki badań oszkleń wg PN-EN 12600: 2004, oprócz informacji dotyczących bezpieczeństwa stosowania, dostarczają też wniosków dotyczących ich wytrzymałości mechanicznej na uderzenie.

W ramach pracy przeprowadzono badania porównawcze wytrzymałości na uderzenie wahadłem szyb laminowanych o różnych konstrukcjach. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałości szyb laminowanych o różnej konstrukcji na uderzenie wahadłem

Klasa wytrzymałości na uderzenie wahadłem wg PN-EN 12600: 2004		
Klasa 3B3	Klasa 2B2	Klasa 1B1
3 mm float/0,76 mm PVB/3 mm float	3 mm float/0,76 mm EVA HT/ 3 mm float	3 mm float/0,89 mm SGP/3 mm
3 mm float/2 × 0,38 PVB/3 mm float	3 mm float/0,76 PVB Saflex SC/3 mm float	3 mm float/2 × 0,38 mm PVB/3 float ornament
4 mm float/0,76 mm PVB/ 4 mm float ornament	3 mm/float 2 × 0,38 EVA/ 3 mm float	4 mm float/0,76 mm PVB/4 mm float
2,1 mm float/0,38 PVB/2,1 mm float	3 mm float/2 × 0,38 PVB/ 3 mm float	4 mm float/0,76 mm EVA/4 mm float
	4 mm float/1 mm żywica/ 4 mm float	4 mm float/2 × 0,38 mm EVA/4 mm float
		4 mm float/0,76 PVB/ 4 float ornam.
		4 mm float/0,89 mm SGP/4 mm float
		4 mm hart/2 × 0,38 PVB/4 floathart
		4 mm float/2 × 0,38 mm EVA/4 mm float
		4 mm float/0,38 mm/ 4 mm float
		5 mm float hart/1 mm żywica/ 5 mm float hart

Tabela 4. Wyniki badania wytrzymałości szyb laminowanych o różnej konstrukcji na uderzenie kulą o masie 4,11 kg

Budowa szyby	Klasa wytrzymałości
4 mm float/0,38 mm PVB/4 mm float	P1A
4 mm float/0,5 mm PVB akust./4 mm float	P1A
3 mm float/2 × 0,38 mm PVB/3 mm float	P2A
4 mm float/2 × 0,38 mm PVB/4 mm float	P2A
4 mm float/3 × 0,38 mm PVB/4 mm float	P3A
3 mm float/4 × 0,38 mm PVB/3 mm float	P4A
4 mm float/4 × 0,38 mm PVB/4 mm float	P4A
4 mm float/6 × 0,38 mm PVB/4 mm float	P5A
6 mm float/6 × 0,38 mm PVB/6 mm float	P5A

Wpływ budowy szyb na wytrzymałość mechaniczną, najbardziej widoczny jest na podstawie uzyskanych wyników badania wytrzymałości szyb laminowanych na uderzenie kulą o masie 4,11 kg wg metodyki p.8 PN-EN 356: 2000. Badanie to polegało na trzykrotnym uderzeniu próbek szyb o wymiarach 1100 × 900 mm tak, aby miejsca uderzenia tworzyły trójkąt równoboczny o długości boku 130 ± 20 mm wokół środka geometrycznego próbki, a jeden z boków trójkąta był równoległy do krótszego boku próbki z określonej wysokości: 1,5 m – klasa P1A; 3,0 m – klasa P2A; 6 m – klasa P3A i 9 m – klasa P4A i P5A. W przypadku klasy P5A procedurę powtarzano trzykrotnie. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 4.

Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń stwierdzono, że:

- zastosowanie do budowy szyb laminowanych szkła hartowanego zwiększa ich odporność na uderzenie wahadłem, podnosząc tym samym klasę bezpieczeństwa,
- w szybach ochronnych zwiększenie ilości międzywarstw powoduje zwiększenie klasy odporności na uderzenie kulą,
- przy zastosowaniu w charakterze międzywarstwy żywicy chemo utwardzalnej uzyskuje się porównywalną wytrzymałość ze szkłem warstwowym, zbudowanym z szyb o tej samej grubości i dwiema foliami,
- zastąpienie w konstrukcji szyby warstwowej folii PVB folią SGP, powoduje zwiększenie jej wytrzymałości mechanicznej,
- zastosowanie do obliczeń wytrzymałości na zginanie grubości efektywnej pakietu szkła laminowanego zamiast grubości rzeczywistej, znacznie zwiększa jej wartość.

Badanie wytrzymałości szkła warstwowego na uderzenie wahadłem, nie pozwala na liczbowe jej określenie i porównanie szyb o różnej konfiguracji, posiadających tę samą klasę wg PN-EN 12600.

Umożliwia natomiast wyciągnięcie wniosków odnośnie wytrzymałości folii, w przypadku szyb laminowanych o takiej samej ilości i grubości szyb składowych, jednakowej grubości folii ale o odmiennym składzie chemicznym folii.

Istotny wpływ na wytrzymałość mechaniczną szkła warstwowego, oprócz wytrzymałości folii stosowanej na międzywarstwę, ma przestrzeganie przez producentów reżimu technologicznego procesu laminacji.

Z uwagi na fakt, że szkło warstwowe poddawane jest często w czasie eksploatacji dużym obciążeniami, badania nad jego wytrzymałością mechaniczną powinny być kontynuowane.

LITERATURA:

- [1] PN-EN 1288-3: 2002 Szkló w budownictwie. Określenie wytrzymałości szkła na zginanie. Część 3: Badanie na próbkach podpartych na dwóch podporach (czteropunktowe zginanie)
- [2] 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
- [3] prEN 16612: 2013 Glass in building – Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing
- [4] prEN16613: 2013 Glass in building – Laminated glass and laminated safety glass – Determination of interlayer mechanical properties.