

dr hab. inż. Marcin Kozłowski, prof. PŚ¹⁾

ORCID: 0000-0002-1698-023X

mgr inż. Dominik Wasik^{1)*}

ORCID: 0000-0001-8654-4479

Wpływ lokalnego wzmocnienia na nośność pokrytyczną szkła laminowanego mocowanego punktowo

Effect of local reinforcement on the post-breakage load capacity of point-fixed laminated glass

DOI: 10.15199/33.2022.12.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu lokalnego wzmocnienia laminatu szklanego za pomocą stalowej siatki tkanej na nośność pokrytyczną elementu. Przebadano łącznie 16 próbek referencyjnych i wzmocnionych. W badaniach monotonicznych wykazano, że wzmocnienie korzystnie wpływa na nośność laminatów szklanych w fazie pokrytycznej. Zwiększa nośność pokrytyczną badanych próbek o 51, 117 i 166% odpowiednio w przypadku próbek z siatką o średnicy 75, 110 i 150 mm.

Słowa kluczowe: szkło laminowane; wzmocnienie; łącznik punktowy; nośność pokrytyczna.

Abstract. The article presents results of laboratory tests of point-fixed laminated glass samples with local reinforcement in the form of a steel woven mesh. A total of 16, reference and reinforced samples, were tested. It was found that the reinforcement has a positive effect on the post-breakage capacity of the laminated glass. Local reinforcement in the glass increases the post-breakage strength by 51, 117 and 166% for samples with a reinforcement diameter of 75, 110 and 150 mm, respectively.

Keywords: laminated glass; reinforcement point-fixing; post-breakage capacity.

Coraż częściej szkło jest stosowane nie tylko jako wypełnienie ram okiennych, ale także do budowy elementów konstrukcyjnych przenoszących obciążenia normowe [1]. Traktowanie szkła jako materiału konstrukcyjnego wymaga zastosowania w elementach tzw. szkła laminowanego, w którym dwie lub więcej tafli szkła jest trwale połączonych ze sobą międzywarstwą. Szkło laminowane jest nazywane szkłem bezpiecznym – tzw. VSG (niem. *Verbundsicherheitsglas*). Jest to podyktowane jego zachowaniem po zarysowaniu tafli, które różni się diametralnie od szkła monolitycznego. Wynika to z faktu, że folia znajdująca się pomiędzy taflami utrzymuje fragmenty szkła w przypadku ich zarysowania. W ten sposób możliwe jest uniknięcie ryzyka zranienia ludzi znajdujących się w pobliżu.

Szkło laminowane jest mocowane do konstrukcji budynku najczęściej za pomocą łączników punktowych [2]. W takim rozwiązaniu, w okolicach otworów wykonanych na potrzeby zamontowania

łącznika, występuje lokalna koncentracja naprężeń, co zmniejsza nośność laminatu [3, 4]. W efekcie element jest bardziej podatny na utratę nośności wskutek obciążeń zewnętrznych.

Elementy szklane mocowane punktowo skutecznie przenoszą obciążenia w stanie sprężystym, lecz optymalne zaprojektowanie i ocena właściwości użytkowych laminatów w stanie zarysowanym jest trudnym zadaniem dla projektantów [5]. Wynika to z faktu, że szkło laminowane po zarysowaniu jednej lub więcej tafli charakteryzuje się drastycznie mniejszą sztywnością, a tym samym niewielką nośnością pokrytyczną (awaryjną). Analiza laminatu szklanego w fazie pokrytycznej jest bardzo złożona, ponieważ nośność szczytkowa zależy w głównej mierze od wielkości siatki splekań tafli oraz parametrów międzywarstwy. Spadek nośności laminatu jest głównie związany z brakiem możliwości przeniesienia naprężeń rozciągających przez szkło zarysowane. W stanie zarysowanym, obciążenia zewnętrzne przenoszone są przez szkło znajdujące się w strefie ściskanej i folię, która pracuje na rozciąganie. Jak poka-

zują badania laboratoryjne, zarysowany obciążony element może po pewnym czasie zerwać się z podpór, stanowiąc zagrożenie dla użytkowników budynków [6].

W literaturze można znaleźć nieliczne przykłady wzmocnienia szkła laminowanego za pomocą innych materiałów, które aktywują się po jego zarysowaniu. Przykładem są badania czteropunktowego zginania laminowanej szklanej belki z prętami wykonanymi z GFRP, CFRP i stali, umieszczonymi w międzywarstwie przed procesem laminacji [7]. W przypadku tego typu wzmocnienia stwierdzono, że wkładki skutecznie wzmacniają nośność pokrytyczną belek, zapewniając ich ciągły sposób zniszczenia. Kolejnym przykładem jest wzmocnienie laminatów przez wlamowanie wkładek z GFRP w okolicy otworów [8]. W badaniach wykazano, że obciążenie niszczące łączy wzmocnionych za pomocą GFRP zwiększyło się ponaddwukrotnie w porównaniu z próbką referencyjną, lecz samo wzmocnienie nie zapewniło wzrostu siły rysującej testowanych próbek.

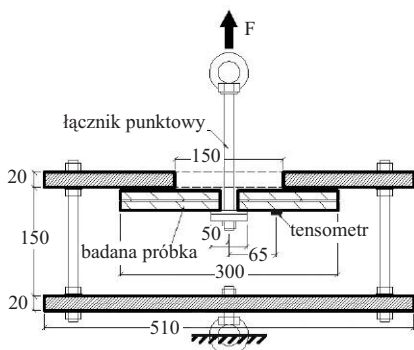
¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*} Adres do korespondencji: dominik.wasik@polsl.pl

Badania modelowe

W badaniach laboratoryjnych wykorzystano próbki ze szkła laminowanego, składające się z dwóch hartowanych tafli szkła o wymiarach 300×300 mm i grubości 8 mm z centralnie zlokalizowanym otworem $\varnothing 20$ mm. Jako międzywarstwę zastosowano dwie folie EVA CLEAR [9] o łącznej grubości 3,04 mm. Próbki referencyjne (REF) składały się wyłącznie z tafli szkła i międzywarstwy, natomiast w przypadku próbek wzmocnionych (R), przed procesem laminowania umieszczono centralnie siatkę plecioną ze stali nierdzewnej między dwiema warstwami folii. Siatka składała się z drutów o średnicy 0,35 mm w rozstawie 1×1 mm. Średnica powierzchni wzmocnienia wynosiła 75, 110 i 150 mm.

Celem badań było określenie, czy lokalne wzmocnienie laminatu za pomocą stalowej siatki tkanej korzystnie wpływa na nośność elementu w fazie sprężystej i pokrytycznej. Metoda została zaadaptowana z dokumentu EAD 090062-00-0404 [10], który dotyczy oceny zestawów do okładzin ścian zewnętrznych mocowanych mechanicznie. Stanowisko do badań przedstawiono na rysunku 1. Składało się z głowicy ciągnącej oraz podstawy z dwóch stalowych blach 510×510 mm o grubości 20 mm, połączonych ze sobą za pomocą czterech prętów gwintowanych $\varnothing 12$ mm. W dolnej podstawie wykonano centralnie otwór $\varnothing 14$ mm do zamontowania śruby oczkowej, którą następnie osadzono w stałych szczękach maszyny wytrzymałościowej. W górnej podstawie wykonano centralnie otwór $\varnothing 150$ mm, przez który mogła swobodnie



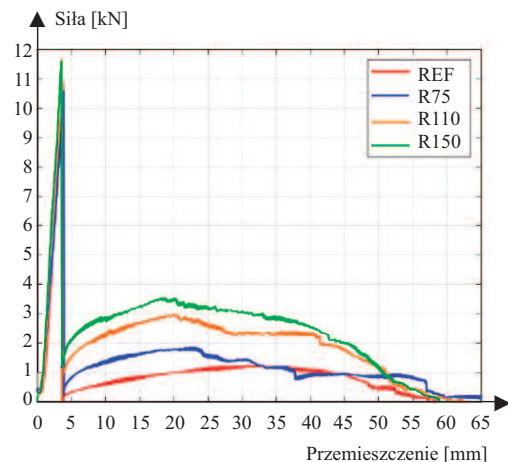
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego. Wymiary w mm

Fig. 1. Scheme of the test stand. Dimensions in mm

przejsć głowica ciągnąca, aż do całkowitego zniszczenia próbki. Średnicę otworu określono na podstawie badań wstępnych i literatury [11]. Głowica ciągnąca składała się z pręta gwintowanego $\varnothing 12$ mm, śruby oczkowej, którą osadzono w ruchomych szczękach maszyny wytrzymałościowej, a także stalowej blachy $\varnothing 50$ mm o grubości 10 mm do wywierania obciążenia na próbkę. Tak skonstruowana głowica miała za zadanie symulować łącznik punktowy do mocowania szkła. Aby uniknąć lokalnej koncentracji naprężeń na styku stal-szkło, które mogłyby prowadzić do przedwczesnego zarysowania szkła, zastosowano podkładki z politetrafluoroetyleny (PTFE) o grubości 5 mm. Prędkość obciążenia wywieranego na próbkę przez łącznik punktowy wynosiła 10 mm/min. Do systemu pomiarowego podłączono tensometr do pomiaru odkształcenia na powierzchni wybranych próbek, w odległości 65 mm od środka otworu na dolnej ich powierzchni. Wszystkie sygnały zbierano na zewnętrznym urządzeniu do akwizycji danych z prędkością próbkowania 100 Hz.

Wyniki badań

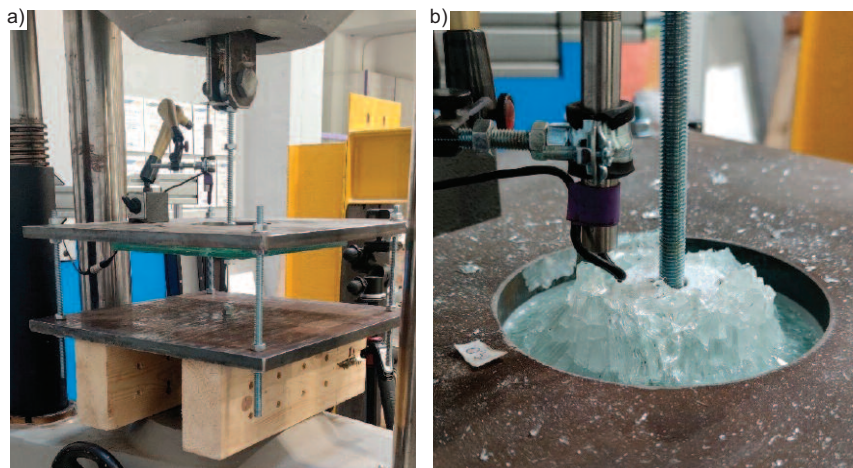
Przykładowy przebieg zależności siła-przemieszczenie czterech reprezentatywnych wyników z każdego rodzaju próbek, tj. REF, R75, R110 i R150 przedstawiono na rysunku 2. Wartość przemieszczeń globalnych (oś pozioma) pozyskano z maszyny wytrzymałościowej. Zaobserwowano charakterystyczne etapy mechanizmu zniszczenia badanych próbek. W pierwszej fazie zależność siła-przemieszczenie jest praktycznie liniowa aż do momentu, w którym naprężenia w szkłe osiągają wartość graniczną i szkło ulega zarysowaniu. Widoczny jest praktycznie brak wpływu wzmocnienia na sztywność początkową, jak również osiągnięcie maksymalnej wartości siły niszczącej – wszystkie próbki (referencyjne i wzmocnione) rysują się średnio przy wartości $F_{el, max} = 11,25 \pm 1,92$ kN. Brak wpływu siatki stalowej na wartość siły rysującej szkło ($F_{el, max}$) jest spowodowany znikomą sztywnością giętną wzmocnienia w porównaniu z taflą szklaną. Po zarysowaniu szkła następuje nagły spadek siły, co spowodowane jest dra-



Rys. 2. Zależność siła-przemieszczenie w przypadku wybranych próbek

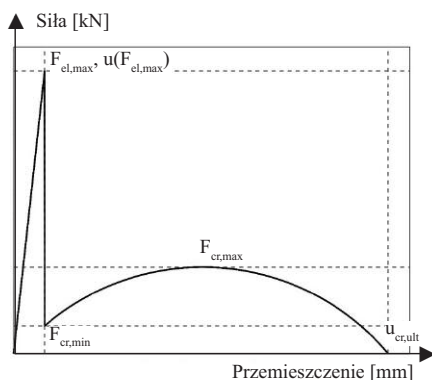
Fig. 2. Force-displacement history for selected samples

styczną utratą sztywności laminatu. W przypadku wszystkich rodzajów próbek jednocześnie pękały dwie tafle szkła. Po gwałtownym spadku siły aktywuje się międzywarstwa oraz siatka w przypadku próbek wzmocnionych, która we współpracy z zarysowanym szkłem znajdującym się w strefie ścisłej pozwala na przenoszenie przez próbkę obciążeń w ograniczonym zakresie. W przypadku próbek wzmocnionych osiągnięto różne wartości siły resztkowej ($F_{cr, min}$) – im większa średnica zbrojenia, tym większa wartość siły. W fazie pokrytycznej siła wzrasta, osiągając maksymalną wartość $F_{cr, max}$, po czym spada wraz z przyrostem przemieszczenia, aż do momentu zerwania międzywarstwy i całkowitego przejścia głowicy ciągnącej przez badaną próbkę. W przypadku wszystkich badanych próbek zaobserwowano wzrost siły po zarysowaniu szkła, natomiast wzmocnione próbki wykazały większą nośność pokrytyczną. Nie zaobserwowano różnicy wartości granicznego przemieszczenia przy zerwaniu, wszystkie próbki uległy całkowitemu zniszczeniu przy średniej wartości przemieszczenia tłka maszyny $u_{cr} = 62,97 \pm 3,45$ mm. Wskazuje to, że ostateczne zniszczenie jest związane z utratą nośności przez międzywarstwę, która pozwala na znacznie większe odkształcenia niż siatka wzmacniająca. Stanowisko badawcze oraz próbkę podczas badań przedstawiono na fotografii.



Stanowisko badawcze (a); deformacja próbki podczas badań (faza pokrytyczna) (b)
 Experimental test set-up (a); deformation of sample during tests (post-breakage phase) (b)

Model teoretyczny przebiegu badania, wraz z rozważanymi charakterystycznymi wartościami, przedstawiono na rysunku 3. Średnią wartość sił wraz z odchyleniami standardowymi zestawiono w tabeli. Na podstawie danych przedstawionych w tabeli określono efektywność zwiększenia nośności pokrytycznej szkła laminowanego za pomocą właminowanej siatki stalowej. Zaobserwowano widoczny wzrost wartości siły $F_{cr, min}$ poszczególnych rodzajów próbek wraz ze wzrostem średnicy zbrojenia siatki w porównaniu z próbkami referencyjnymi. W fazie pokrytycznej siatka stalowa współpracuje z międzywarstwą, skutecznie rozmywając naprę-

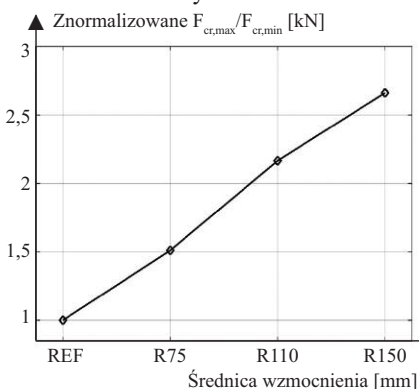


Rys. 3. Model teoretyczny zniszczenia
 Fig. 3. Theoretical model of the failure mechanism

Wyniki badań
 Test results

Nazwa próbki	$F_{el,max}$ [kN]	$F_{cr,min}$ [kN]	$F_{cr,max}$ [kN]
REF	11,86 ± 1,62	0,22 ± 0,08	1,39 ± 0,06
R75	11,59 ± 1,71	0,41 ± 0,16	2,10 ± 0,35
R110	10,09 ± 2,46	0,92 ± 0,12	3,01 ± 0,07
R150	11,48 ± 1,10	1,30 ± 0,06	3,70 ± 0,13

żenia na większą jej powierzchnię, tym samym pozwalając osiągnąć większą siłę. Wartość siły $F_{cr, min}$ próbek wzmocnionych, w stosunku do próbek referencyjnych, jest większa o 86, 318 i 491% odpowiednio dla średnicy wzmocnienia 75, 110 i 150 mm. W przypadku siły $F_{cr, max}$ zaobserwowano wzrost odpowiednio o 51, 117 i 166% w porównaniu z $F_{cr, min, REF}$ (dla wartości referencyjnej). Na rysunku 4 przedstawiono końcową zależność znormalizowanych wartości $F_{cr, max} / F_{cr, min, REF}$ (nośność pokrytyczna) w przypadku różnej średnicy wzmocnienia (tabela). Wyraźna tendencja wzrostowa na wykresie świadczy o korzystnym wpływie zastosowanego wzmocnienia na nośność pokrytyczną laminatów szklanych.



Rys. 4. Znormalizowana nośność pokrytyczna
 Fig. 4. Normalized values of the post-breakage load capacity

Podsumowanie

Zaobserwowano wzrost wartości siły po zarysowaniu wszystkich próbek szkła, a także przyrost maksymalnej siły w fazie pokrytycznej pracy. W przy-

padku próbek wzmocnionych siatką stalową stwierdzono zwiększenie nośności pokrytycznej wraz ze wzrostem średnicy wzmocnienia próbek. Wzrost wartości nośności pokrytycznej w stosunku do próbek referencyjnych wynosi 51, 117 i 166% odpowiednio w przypadku średnicy wzmocnienia 75, 110 i 150 mm. Inne konfiguracje wzmocnień stref przypodporowych laminatów szklanych wymagają dalszych badań i analiz.

Literatura

[1] Łagoda G, Łagoda M. Zastosowanie szkła w budownictwie infrastrukturalnym. Materiały Budowlane. 2015; <https://doi.org/10.15199/33.2015.07.22>.
 [2] Centalles X, Castro R, Cabeza LF. Experimental results of mechanical, adhesive, and laminated connections for laminated glass elements – A review. Engineering Structures. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.029>.
 [3] Bedon C, Santasiero M. Transparency in Structural Glass Systems Via Mechanical, Adhesive, and Laminated Connections – Existing Research and Developments. Advanced Engineering Materials. 2018; <https://doi.org/10.1002/adem.201700815>.
 [4] Quaglino V, Cattaneo S, Biolzi L. Numerical assessment of laminated cantilevered glass plates with point fixings. Glass Structures & Engineering. 2020; <https://doi.org/10.1007/s40940-020-00119-5>.
 [5] Kozłowski M. Balustrady szklane: Analizy doświadczalne i obliczeniowe, podstawy projektowania. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. 2019.
 [6] Stelzer I, Singh Rooprai M. Post Breakage Strength Testing for Overhead Laminated Glass. Challenging Glass 5 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. Ghent University, 2016.
 [7] Bedon C, Louter C. Structural glass beams with embedded GFRP, CFRP or steel reinforcement rods: Comparative experimental, analytical and numerical investigations. Journal of Building Engineering. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.12.008>.
 [8] Achintha M. Developments in GFRP Reinforced Bolted Joints in Glass. Challenging Glass 6 Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft University of Technology, May 2018.
 [9] Martin M. i in. Polymeric interlayer materials for laminated glass: A review. Construction and Building Materials. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116897>.
 [10] EAD 090062-00-0404 Kits for external wall claddings mechanically fixed. European Assessment Document, EOTA 2018.
 [11] Dispersyn J, Belis J, Sonck D. New glass design method for adhesive point-fixing applications. Structures and Buildings. 2015; <https://doi.org/10.1680/stbu.13.00103>.

Publikacja została zrealizowana w ramach projektu „Innowacyjne rozwiązania dla szkła laminowanego mocowanego punktowo o zwiększonej nośności pokrytycznej” (LIDER/34/0125/L-11/19/NCBR/2020) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER XI.

Przyjęto do druku: 08.11.2022 r.