

# Badanie nośności awaryjnej płyty szklanej mocowanej punktowo



dr inż.  
**MACIEJ CWYL**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
ORCID: 0000-0002-2894-7840



dr hab. inż.  
**MARCIN KOZŁOWSKI**  
Politechnika Śląska  
Wydział Budownictwa  
ORCID: 0000-0002-1698-023X



inż.  
**MACIEJ KWIATKOWSKI**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
ORCID: 0009-0002-9345-1662



inż.  
**DAMIAN KALITYŃSKI**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
ORCID: 0009-0001-0746-4903



**ŁUKASZ KRUK**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
ORCID: 0009-0005-1958-1751

W artykule omówiono badanie nośności awaryjnej laminowanej płyty szklanej mocowanej punktowo. Celem badania było sprawdzenie nośności płyty w sytuacji po zbitiu górnej tafli szkła.

Celem badania zaprezentowanego w artykule było sprawdzenie nośności awaryjnej laminowanej płyty szklanej mocowanej punktowo (po zbitiu górnej warstwy). Tego rodzaju uszkodzenia powodowane są wieloma czynnikami, takimi jak grad, spadające sople lodu, brak kompensacji wpływów termicznych, błędy projektowe czy błędy montażu i konserwacji. Interesującą obserwacją z prac eksperckich, która okazała się odpowiedzią na nieoczywiste zniszczenia szklanego zadaszania jednego z obiektów w Warszawie, okazało się zrzucanie kamieni przez ptaki uczące w ten sposób swoje młode rozbijania orzechów. Niestety takie praktyki tworzenia na szklanych zadaszaniach swoistych „poligonów szkoleniowych” przez ptaki mogą mieć dla obiektu fatalne skutki. Badania przeprowadzono w ramach działalności Koła Naukowego Konstrukcji Metalowych Politechniki Warszawskiej we współpracy z Politechniką Śląską.

W artykule przedstawiono również specyfikę procesu hartowania oraz laminacji tafli szklanych, które mają kluczowe znaczenie przy pracy oraz procesie zniszczenia analizowanych płyt szklanych.

## Proces hartowania

Badane tafle szklane składające się na płytę zostały na pierwszym etapie poddane procesowi hartowania (rys. 1.). Proces polega na podgrzaniu szkła do wysokiej temperatury, a następnie poddaniu go szybkiemu, kontrolowanemu studzeniu.

W procesie równomiernego podgrzewania tafli szkła uzyskuje taką samą temperaturę na zewnętrznych powierzchniach i w wewnętrznym przekroju. Proces ten nie powoduje powstawania naprężeń wewnętrznych w materiale. Po nagłym oziębieniu powierzchnia tafli szklanej została się, podczas gdy jej wnętrze jest jeszcze plastyczne. Przy dalszym postępującym ochładzaniu zstają się także wewnętrzne warstwy, które

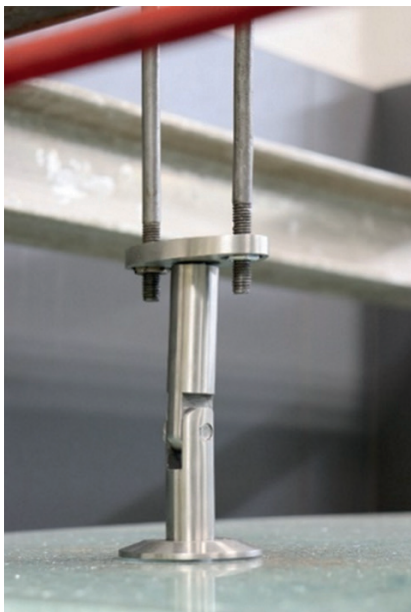
jednak nie ulegają tak silnemu skurczowi, gdyż zewnętrzne warstwy nie dają się już formować bez przyłożenia naprężeń. W wyniku tego procesu w wewnętrznych warstwach tafli, przy zahamowaniu możliwości kurczenia się, wywoływane są naprężenia rozciągające, a na zewnętrznych powierzchniach tafli szklanej z powodu równowagi sił wewnętrznych powstają duże naprężenia ściskające (rys. 2.) [1–2].

Szkło poddane omówionemu procesowi obróbki nazywamy hartowanym, a ze względu na proces jego zniszczenia uznajemy je za szkło bezpieczne – niszczące się poprzez rozpad na wiele drobnych, lekkich odtamków o tępych krawędziach (rys. 3. [3]).

Zaletą szkła hartowanego jest znacznie wyższy poziom wytrzymałości na zginanie w porównaniu do odprężonego szkła typu „float”. W stanie nieobciążonym, przy obydwu powierzchniach zewnętrznych, występują wysokie naprężenia ściskające, które pod wpływem obciążenia wywołującego zginanie



Fot. 1. Stanowisko badawcze



Fot. 2. Wieszak przegubowy



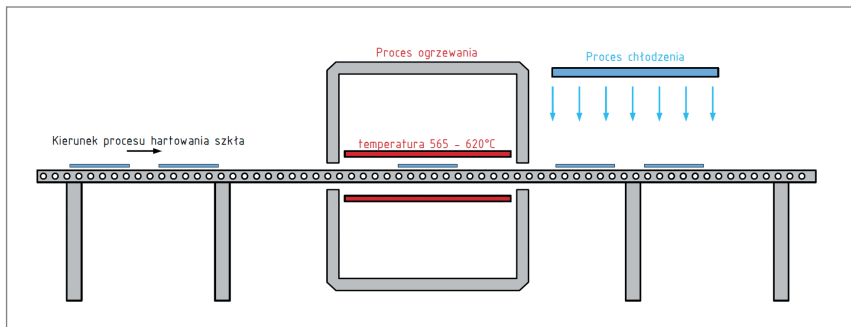
Fot. 3. Płyta szklana po zbitiu górnej tafli

są obniżane w strefie rozciągania, natomiast w strefie ściskania zwiększają się (rys. 4.). Wartość wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu szkła hartowanego może wynosić nawet 200 MPa [1].

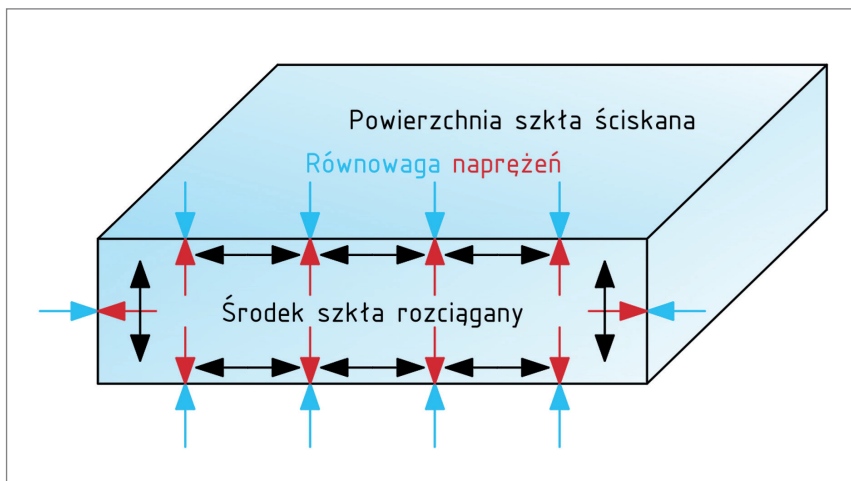
### Proces laminacji

Następnie wykorzystane w przedmiotowym badaniu hartowane tafle szklane poddane zostały procesowi laminacji (rys. 5. [4]). Badane płyty zostały zespolone za pomocą międzywarstwy z folii EVA.

Proces laminacji obejmuje oczyszczenie powierzchni szkła, nałożenie międzywarstwy z folii EVA oraz kolejnej warstwy szkła, a następnie podgrzanie, prasowanie i ściskanie powstałych pakietów w workach próżniowych w piecu do laminacji (rys. 6. [5]). W czasie tego procesu szklana płyta zostaje odpowiednio zespolona.



Rys. 1. Proces produkcji szkła hartowanego



Rys. 2. Schemat stanu naprężenia w szkłe hartowanym

### Etapy badania

Eksperyment zaplanowano w celu analizy nośności awaryjnej tafli mocowanej punktowo. Przeprowadzone badanie składało się z trzech etapów:

1. Obciążenie wstępne płyty siłą skupioną o wartości 1 kN.
2. Ponowne obciążenie płyty siłą 1 kN po zbitiu górnej warstwy.
3. Obciążenie płyty do całkowitego zniszczenia.

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w skonstruowanym na potrzeby analizy stanowisku badawczym w laboratorium Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Na betonowych słupkach wykonano ruszt metalowy, opierając aluminiowe dwuteowniki, na których z kolei oparto aluminiowe ceowniki, które zapewniły zamocowanie wieszaków – elementów umożliwiających punktowe połączenie szkła (fot. 1. i 2.). W miejscu połączeń płyta szklana była wzmocniona za pomocą właminowanych stalowych siatek [6]. Badania zostały przeprowadzone na jednej płycie szklanej o wymiarach 100 × 140 cm. Podczas badań wykonywano pomiary siły oraz przemieszczenia płyty szklanej w miejscu przyłożonego obciążenia. Grafikę obrazującą sposób podparcia płyty i kierunki przegubów wraz z ich umiejscowieniem pokazano na rys. 7.

Po obciążeniu wstępnym 1 kN zbito górną warstwę płyty, uderzając w krawędź górną

tafli szkła badanej płyty szklanej. Efekt został zobrazowany na fot. 3.

Następnie ponownie obciążono płytę siłą 1 kN.

Zarysowanie górnej warstwy płyty szklanej skutkowało uzyskaniem przeciwstrzałki ugięcia, spowodowanej dekompresją wysokich naprężeń wewnętrznych w szkłe hartowanym (rys. 8.).

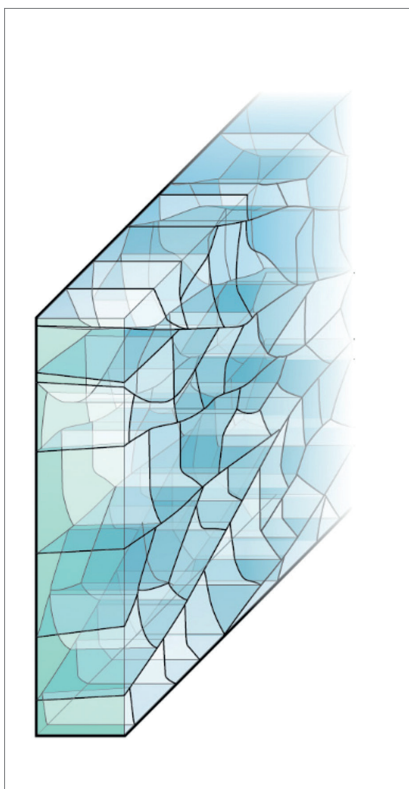
W zależności od materiału oraz sposobu wykonania międzywarstwy rozróżnia się odmienne rozkłady naprężeń w przekrojach laminowanych płyt szklanych – nośność zależy od zdolności międzywarstwy do przenoszenia naprężeń ścinających. Zdolność ta ma zasadniczy wpływ na rozkład naprężeń w przekroju (rys. 9. [7]). Pełna współpraca tafli szkła z międzywarstwą wykonaną z folii EVA umożliwia utrzymywanie równowagi naprężeń w zarysowanej płycie – folia utrzymuje wyodrębnione kryształki zbitej tafli szkła hartowanego.

Uzyskana przeciwstrzałka wynosiła aż 15 mm, co jest niespełna równoważne grubości badanej płyty szklanej.

Po zestawieniu wyników ugięcia płyt przed i po zbitiu górnej warstwy okazało się, że dzięki przeciwstrzałce i pomimo spadku sztywności przy takiej samej sile uzyskano mniejszą wartość ugięcia (bezwzględnej).

Zmiana liniowości wykresu pierwszego (rys. 10.) wynika z ptynięcia folii EVA, które pojawia się pod pewnym obciążeniem. Na





Rys. 3. Schemat zniszczenia hartowanej tafli szklanej [2]

wykresie drugim natomiast (rys. 11.) do wspomnianego zjawiska dochodzi wzajemne przemieszczanie się i miażdżenie miazgi szklanej (spękanej górnej warstwy).

Na kolejnym, ostatnim etapie badań obciążano płytę aż do momentu całkowitego zniszczenia (rys. 12.).

W rezultacie nośność płyty w pokrytycznej fazie (faza pracy awaryjnej ze zbitą górną taflą szkła) wyniosła aż 19,2 kN. Inicjacja zniszczenia nastąpiła w miejscach podparcia punktowego, gdzie występują koncentracje naprężeń w szkłe. Na podstawie wykresu można stwierdzić liniową zależność naprężeń od odkształceń badanej płyty szklanej.

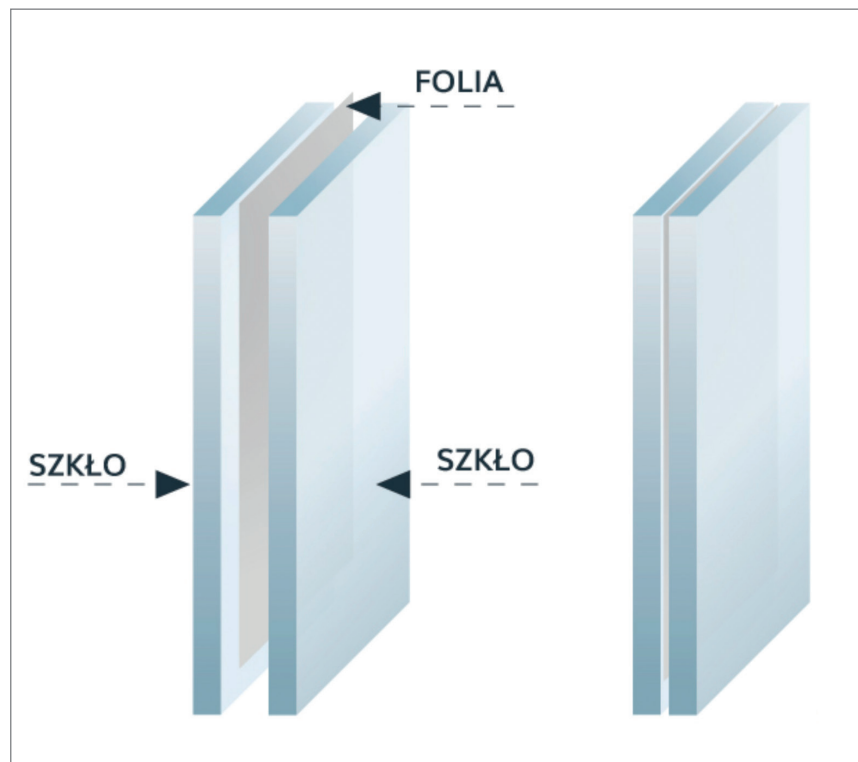
### Model MES

W ramach badań w programie Ansys Mechanical 2022 został opracowany model numeryczny (rys. 13.). Analiza jest oparta na elementach powłokowych o zdefiniowanym przekroju. Do zamodelowania współpracy tafli szklanych, folii oraz siatek stalowych wykorzystano specjalne elementy dostępne w programie Ansys, które służą do modelowania struktur warstwowych (ang. layered sections). Nie wprowadzono w modelu naprężeń własnych – zostały one uwzględnione przy określaniu maksymalnych dopuszczalnych naprężeń jako właściwości materiału podczas analizy wyników.

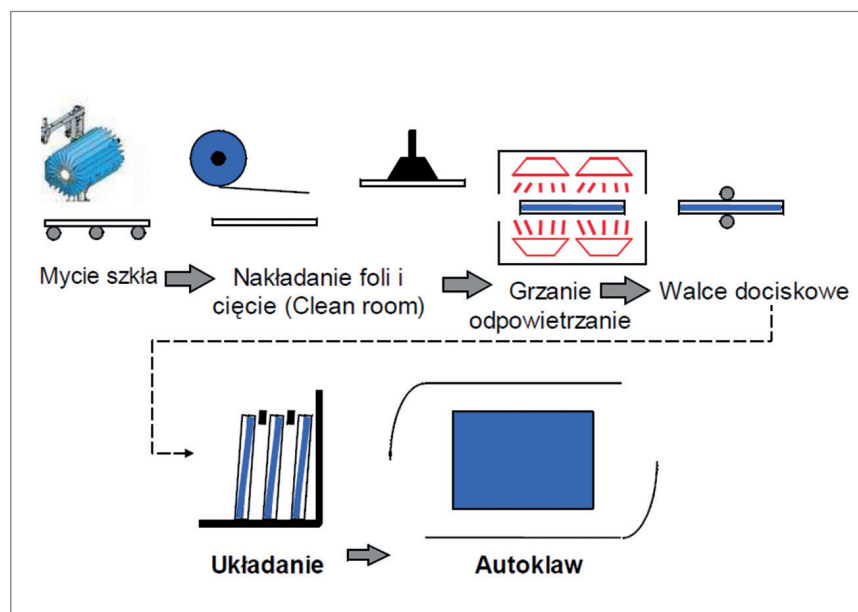
Przeprowadzono analizę liniową. Zdefiniowano dwa rodzaje przekrojów, aby uwzględnić różnicę między obszarem podparcia



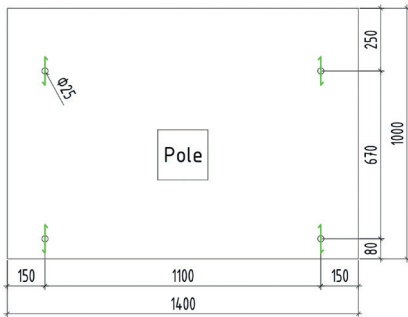
Rys. 4. Wykres naprężeń w szkłe hartowanym podczas zginania



Rys. 5. Schemat szkła laminowanego, <https://mojeszko.pl/szko-bezpieczne-laminowane/> [3]



Rys. 6. Proces produkcji szkła laminowanego [4]



Rys. 7. Schemat płyty [4]

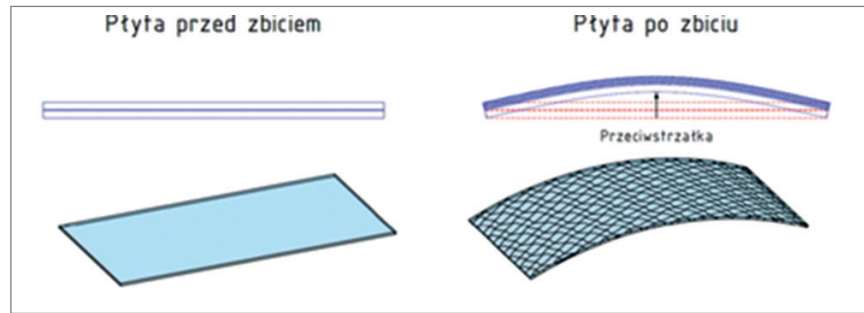
a pozostałym obszarem płyty. Płyta jest podparta w 4 miejscach na powierzchni odpowiadającej wymiarom rzeczywistych uchwytów (średnica podparcia to 55 mm). Maksymalny rozmiar elementu skończonego w obszarze płyty wynosi 10 mm, a w obszarach podparcia 1 mm. Została przeprowadzona analiza zbieżności, która potwierdziła, że przyjęte wymiary siatki są poprawne i nie wpływają na jakość rozwiązania. Obciążenie zostało przyłożone do płyty jako obciążenie równomierne rozłożone na polu w środku rozpiętości przęsta, o wymiarach 20 × 20 cm.

Geometria zamodelowanej płyty odpowiada geometrii płyty badanej (rys. 7). Przekrój podstawowy składa się z trzech warstw: szkło hartowane (8 mm) + 4x folia EVA (4 × 0,38 mm) + szkło hartowane (8 mm). W przekroju podporowym dodatkowo pomiędzy środkowymi warstwami folii umieszczona jest siatka wzmacniająca o średnicy 110 mm.

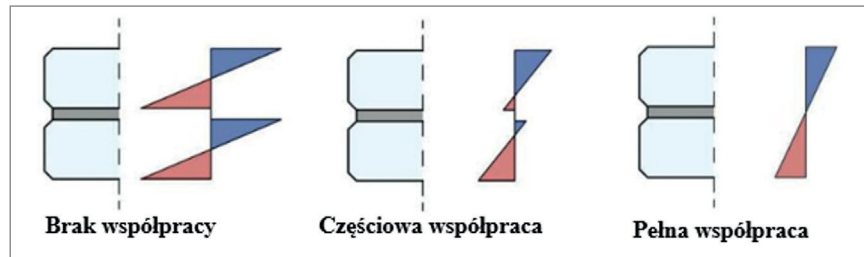
Materiały użyte w analizie MES to: szkło hartowane, folia EVA oraz siatka wzmacniająca położona w miejscu potąceń punktowych.

W fazie pokrytycznej siatka stalowa współpracuje z międzywarstwą, skutecznie rozmywając naprężenia na większą jej powierzchnię, tym samym pozwalając osiągnąć większą siłę. Zastosowanie właminowanych siatek stalowych znacznie zwiększa nośność płyt szklanych [8]. Parametry modelowanych materiałów zestawione w tabeli zostały przyjęte zgodnie z deklaracją producenta (tab. 1).

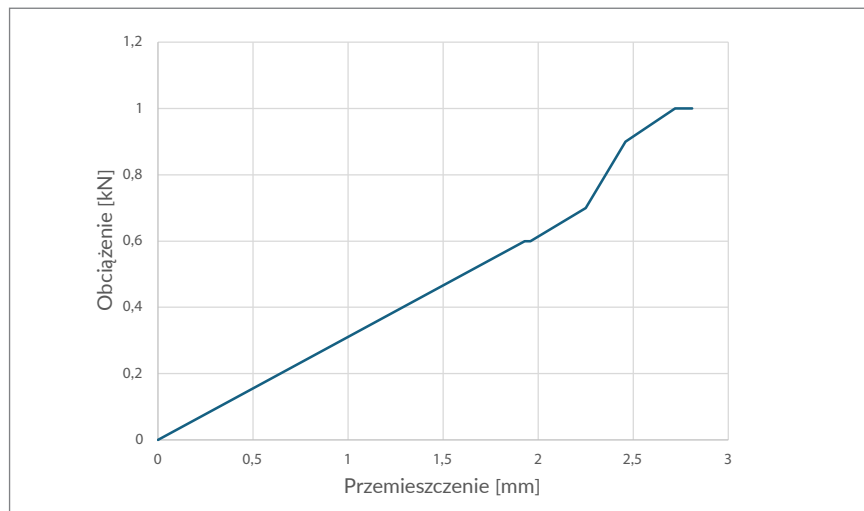
Zgodnie z oczekiwaniami maksymalne wartości naprężeń normalnych odnotowano w miejscach potąceń punktowych, co zgadza się z rezultatem przeprowadzonego badania laboratoryjnego – inicjacja zniszczenia nastąpiła w miejscu podparcia. Naprężenie wyczerpujące nośność płyty odnotowano na poziomie 70 MPa. W środku rozpiętości płyty zaobserwowano około 2 razy mniejsze naprężenia – na poziomie ok. 35 MPa. Na poniższych wykresach (rys. 14–17.) można zauważyć koncentrację naprężeń w miejscu potąceń. Obszar ten stanowi otoczenie największego zaburzenia równowagi w płycie, w którym nastąpiło zniszczenie badanej płyty.



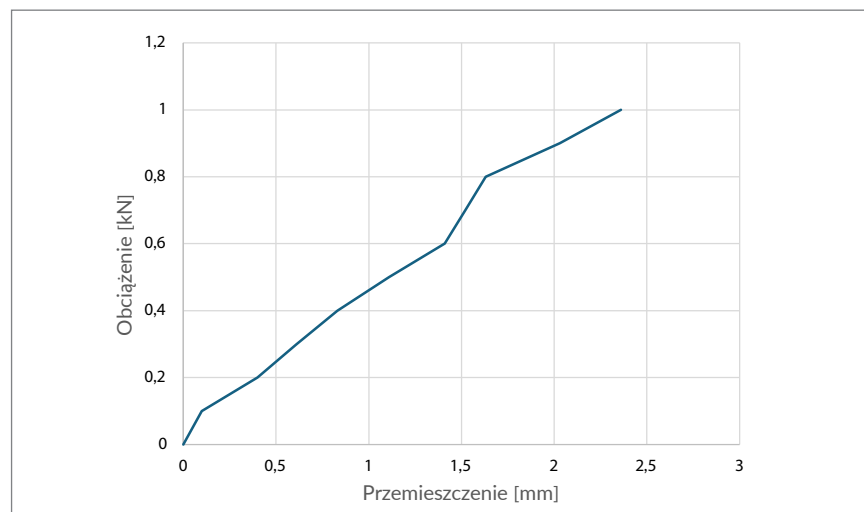
Rys. 8. Schemat wpływu zarysowania górnej warstwy płyty szklanej



Rys. 9. Wpływ współpracy międzywarstwy z taflami szkła na siły wewnętrzne w przekroju płyty ze szkła laminowanego [6]



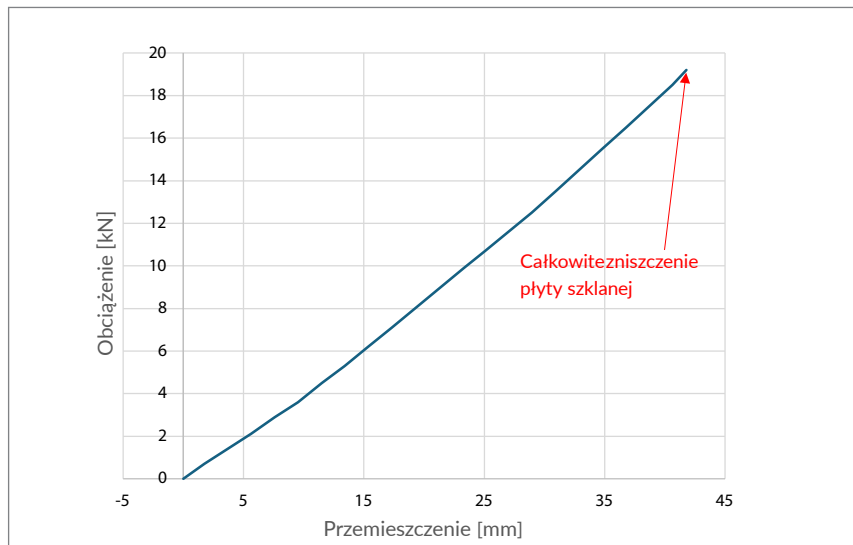
Rys. 10. Wykres zależności obciążenia i przemieszczenia płyty szklanej przed zbicim górnej tafli



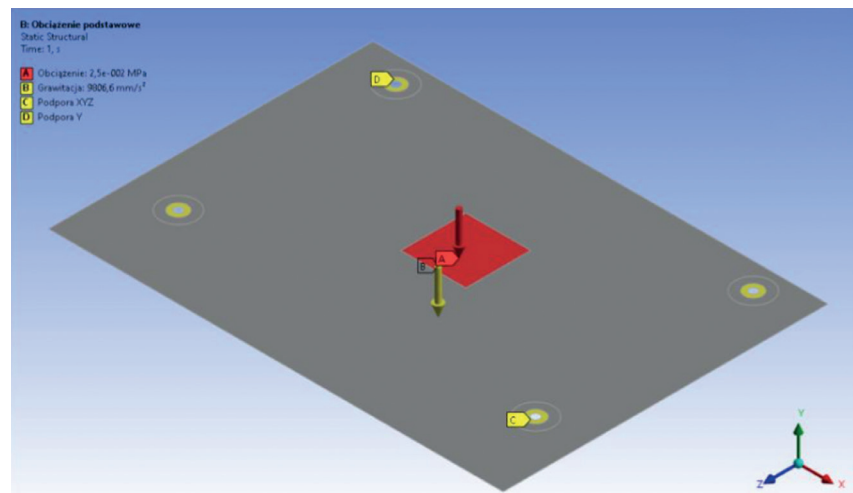
Rys. 11. Wykres zależności obciążenia i przemieszczenia płyty szklanej po zbicim górnej tafli

Tab.1. Parametry modelowanych materiałów.

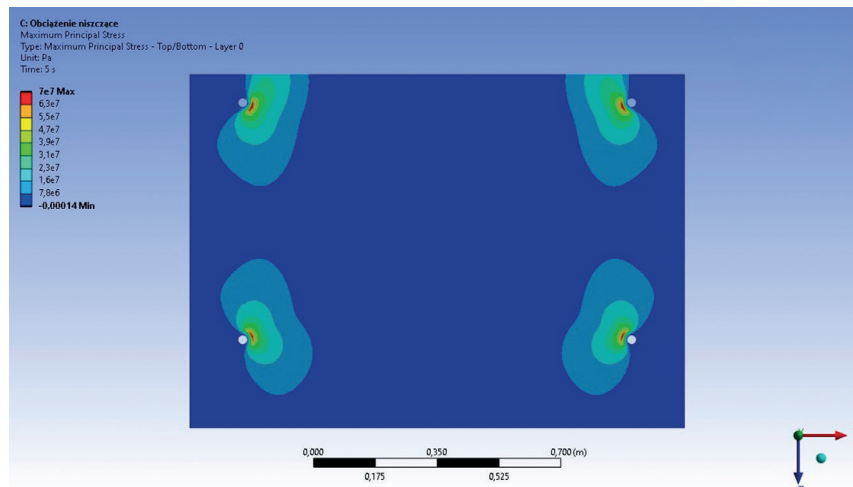
Lp.	Materiał	Gęstość $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Moduł Younga E [GPa]	Wsp. Poissona $\nu$ [-]
1.	szkło hartowane	2600	70	0,22
2.	folia VA	960	0,011	0,45
3.	siatka wzmacniająca	8300	110	0,34



Rys. 12. Wykres zależności obciążenia i przemieszczenia płyty szklanej do momentu zniszczenia



Rys. 13. Widok modelu



Rys. 14. Maksymalne naprężenia główne – górna tafla

Na wykresie (rys.18.) porównano wyniki analizy MES z wynikami badania laboratoryjnego. Rozbieżności wyników są rezultatem zbyt dużej sztywności modelu przygotowanego do analizy numerycznej. Różnice w sztywności mogą być skutkiem nieuwzględnienia w modelu spękanej górnej warstwy płyty. Dodatkowo złożone zagadnienia związane z ośrodkiem lepkoplastycznym folii oraz jej dużą ciągliwością powodują brak możliwości dokładnego odwzorowania jej w modelu numerycznym.

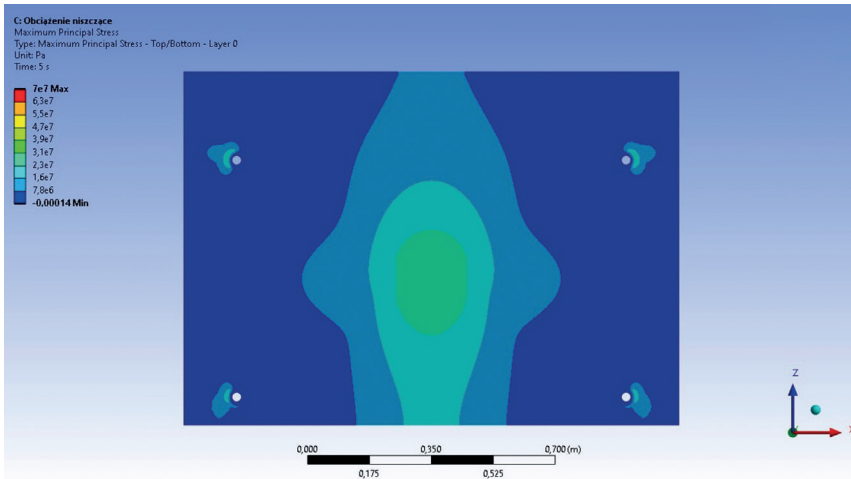
### Wnioski

Niespodziewanych przyczyn zniszczenia szklanych zadaszeń jest wiele, jednakże co istotne – zadaszanie ze szkła laminowanego o rozpatrywanym schemacie statycznym po zbitiu górnej warstwy i przy odpowiednio dobranej międzywarstwie nadal jest bezpieczne dla użytkowników (stłuczona warstwa po obciążeniu jest warstwą ściskaną). Przykładowo dla schematu wspornikowego powyższe stwierdzenie nie byłoby prawdziwe. Bezpieczeństwo zapewnienia międzywarstwą z folii EVA, biorąca czynny udział w przekazywaniu obciążeń. Stanowi to powód do braku obaw inwestorów czy zarządców obiektów wyposażonych w tego typu szklane zadaszania. W sytuacjach awaryjnych nie są oni zmuszeni do niezwłocznego wyłączenia obiektu z użytkowania. Płyta dalej jest zdolna do przenoszenia znacznych obciążeń, a proces wymiany elementu nie musi być gwałtowny i nieprzemysłany, a przez to obciążony wystąpieniem kolejnych, potęgujących się problemów i zagrożeń.

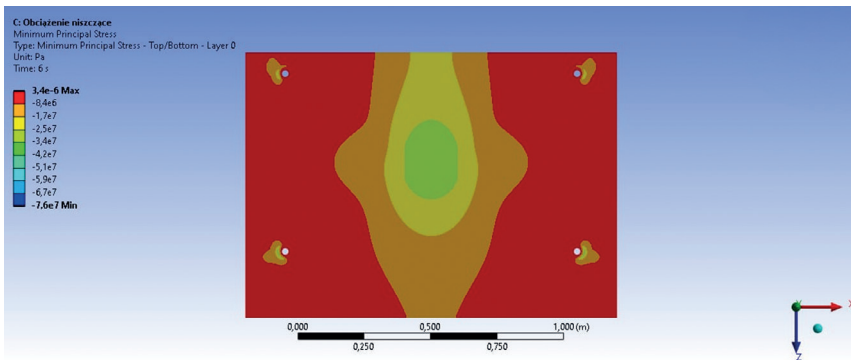
Laminowane płyty szklane i ich zachowanie się pod wpływem obciążeń nie zostały do tej pory szczegółowo opisane w dostępnej literaturze. Stanowi to kolejne nurtujące wyzwanie dla kadry inżynierskiej.

### BIBLIOGRAFIA

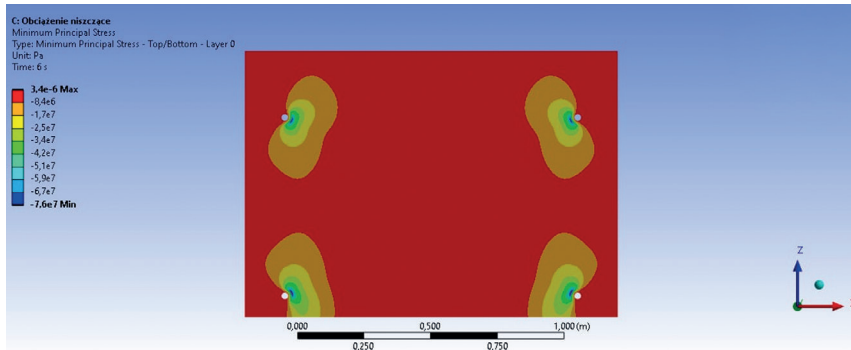
- [1] M. Kosmał, A. Kuśnierz, M. Kozłowski, Szkło budowlane, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2022.
- [2] M. Cwyl, E. Modzelewska, Analiza nośności wybranych typów tafli szklanych na podstawie badań laboratoryjnych oraz uproszczonych metod obliczeniowych, 2019, Przegląd Budowlany, Volume R. 90, nr 5.
- [3] <https://www.walker-hardware.com/What-is-The-Difference-Between-Tempered-glass-and-Laminated-glass.html>, data dostępu: 1.10.2024.
- [4] <https://mojeszklo.pl/szklo-bezpieczne-laminowane>, data dostępu: 1.10.2024.
- [5] <https://dubielvitrum.pl/pl/oferta/budowa-linii-do-produkcji-szkla-warstwowego.html>, data dostępu: 1.10.2024.
- [6] M. Kozłowski, D. Wasik, K. Zemta, 2022, Monotonic and Creep Studies on the Pull-Through Resistance of Laminated Glass with Locally Embedded Steel Mesh, Gliwice, DOI: 10.3390/ma15207083.
- [7] [https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-stress-distribution-due-to-coupling-effects-in-laminated-glass-schematic\\_fig3\\_330778461](https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-stress-distribution-due-to-coupling-effects-in-laminated-glass-schematic_fig3_330778461), data dostępu: 1.10.2024.
- [8] M. Kozłowski, D. Wasik, 2022, Wpływ lokalnego wzmocnienia na nośność pokrywczą szkła laminowanego mocowanego punkto-wo, Gliwice, DOI: 10.15199/33.2022.12.04.



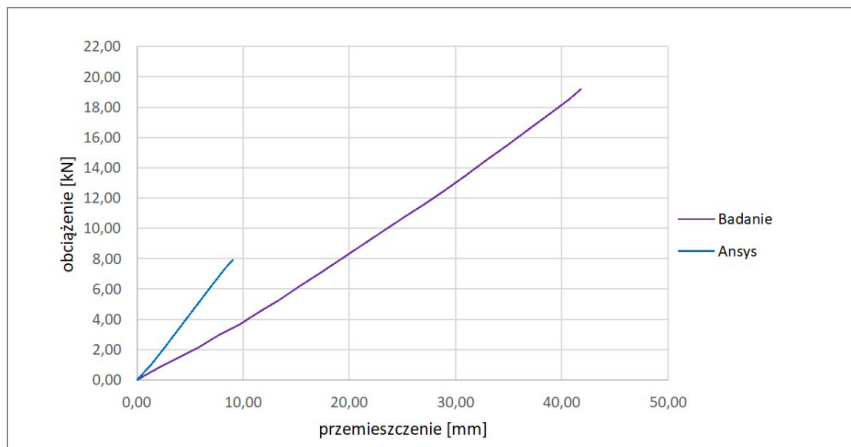
Rys. 15. Maksymalne naprężenia główne – dolna tafla



Rys. 16. Minimalne naprężenia główne – górna tafla



Rys. 17. Minimalne naprężenia główne – dolna tafla



Rys. 18. Porównanie wyników uzyskanych podczas badań laboratoryjnych i analizy numerycznej

DOI: 10.5604/01.3001.0054.8340

**PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA**

Cwyl Maciej, Kozłowski Marcin, Kwiatkowski Maciej, Kalityński Damian, Kruk Łukasz, 2024, Badanie nośności awaryjnej płyty szklanej mocowanej punktowo, „Builder” 12 (329). DOI: 10.5604/01.3001.0054.8340

**STRESZCZENIE:**

W artykule omówiono badanie nośności awaryjnej laminowanej płyty szklanej mocowanej punktowo. Celem badania było sprawdzenie nośności płyty w sytuacji po zbitiu górnej tafli szkła. Badanie obejmowało trzy etapy: obciążenie wstępne płyty, ponowne obciążenie po zbitiu górnej warstwy oraz obciążenie do momentu zniszczenia. Wyniki pokazały, że po zbitiu górnej tafli płyta nadal może przenosić obciążenia dzięki współpracy międzywarstwy z folii EVA z pozostałymi warstwami. Wnioski płynące z artykułu wskazują, że badany rodzaj płyty szklanej ze zbitą górną warstwą nadal jest bezpieczny dla użytkowników i może być eksploatowany bez potrzeby natychmiastowej wymiany. W artykule opisano również procesy technologiczne powstawania płyt szklanych, w tym hartowanie i laminację.

**SŁOWA KLUCZOWE:**

płyta szklana, szkło hartowane, szkło laminowane, struktury metalowo-szklane, wytrzymałość pokrytyczna

**ABSTRACT:**

**ANALYSIS OF ROBUSTNESS OF A POINT-FIXED GLASS PANEL.** The article discusses a test of the robustness of a point-fixed laminated glass plate. The purpose of the test was to check the load carrying capacity of the plate in an emergency situation, after the top sheet of glass was shattered. The test included three stages: preloading of the slab, reloading after the top layer was shattered and loading until failure. The results showed that after the top layer is broken, the panel can still carry the load due to the cooperation of the EVA foil interlayer with the other layers. The conclusions of the article indicate that a tested type of glass slab with a broken top layer is still safe for users and can be operated without the need for immediate replacement. The article also describes the technological processes of glass plate formation, including tempering and lamination.

**KEYWORDS:**

glass plate, tempered glass, laminated glass, metal and glass structures, post-critical strength