

Bezpieczeństwo szklanych barier w świetle norm i badań własnych

MARCIN KOZŁOWSKI*

Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

Streszczenie: Szkło jest coraz powszechniej stosowanym materiałem w nowoczesnej architekturze, wykorzystywanym nie tylko jako wypełnienie ram okiennych, ale również do budowy szklanych barier zabezpieczających użytkowników budynków przed upadkiem z wysokości. W artykule przedstawiono podstawowe wymagania stawiane szklanym barierom, ich klasyfikację oraz przegląd literatury i norm w zakresie obciążeń dynamicznych generowanych przez użytkowników budynków. W artykule przedstawiono również wybrane wyniki badań własnych szklanej balustrady poddanej uderzeniu dwuoponowego wahadła, zarówno w fazie sprężystej, jak również pokrytycznej. W analizach numerycznych, własnych uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników w zakresie maksymalnych wartości naprężeń w szkłe w porównaniu z wartościami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: szklane bariery, obciążenie dynamiczne, uderzenie ciałem miękkim, badania laboratoryjne, symulacje numeryczne.

1. Wprowadzenie

W ostatnich dekadach nastąpił znaczny wzrost zastosowania szkła konstrukcyjnego we współczesnej architekturze [1]. Ten trend dotyczy w szczególności elementów budynków, które odgrywają szczególną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa ich użytkownikom [2].

Głównym celem stosowania barier w budynkach jest ochrona użytkowników budynków przed upadkiem z wysokości. Elementy te są montowane w miejscach, gdzie występuje wyraźna różnica poziomów użytkowych między powierzchniami po obu stronach bariery [3]. Bariery muszą spełniać szereg wymagań. Pierwsze z nich dotyczy minimalnej wysokości, zależnej od przeznaczenia użytkowego obiektu budowlanego i miejsca zabudowania bariery. Kolejne wymaganie związane jest z minimalną nośnością, czyli bezpiecznym zachowaniem elementu pod obciążeniami statycznymi i dynamicznymi. Ostatnie dotyczy minimalnej sztywności, która jest związana z ograniczeniem nadmiernych ugięć i zapewnia funkcjonalność bariery i komfort użytkowników budynków.

Obciążenia działające na bariery są bezpośrednio związane z działalnością użytkowników budynków. Wśród nich można wyróżnić obciążenia statyczne związane z parciem tłumy oraz obciążenie wiatrem, jeśli bariera jest zainstalowana na zewnątrz budynku. Obciążenie związane z możliwością parcia tłumy (zależne od kategorii użytkowania powierzchni) jest

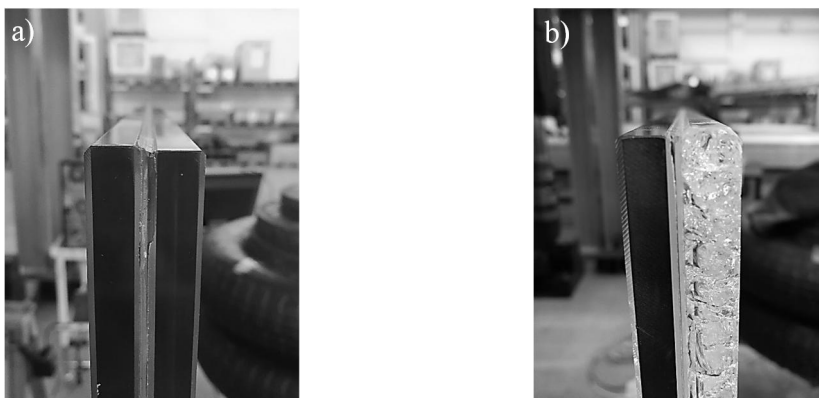
*Autor do korespondencji: marcin.kozlowski@polsl.pl

przykładane do elementu jako obciążenie liniowe, poziome, wzdłuż górnej krawędzi bariery na wysokości nie większej niż 1,2 m od powierzchni posadzki.

Oprócz obciążeń statycznych, bariera powinna również bezpiecznie przenosić obciążenia dynamiczne, które mogą wystąpić w czasie jej użytkowania. Rozróżnia się dwa rodzaje obciążeń dynamicznych: uderzenie ciałem miękkim, związane z uderzeniem człowieka w barierę oraz uderzenie ciałem twardym. Obciążenia dynamiczne są kluczowe i decydujące dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikom budynków i powinny być podstawowym elementem obliczeń statyczno-wytrzymałościowych barier zabezpieczających użytkowników budynków przed upadkiem z wysokości [4].

Szklane bariery powinny spełniać swoją funkcję w stanie niezarysowanym (rys. 1a), ale także w fazie pokrytycznej (rys. 1b) [3]. Do zarysowania tafli może dojść z wielu przyczyn, może być spowodowane przeciążeniem elementu, aktem wandalizmu lub przypadkowym uderzeniem twardym przedmiotem, jak również w skutek spontanicznego pęknięcia szkła hartowanego, spowodowanego inkluzją siarczku niklu [5].

Z powodu kruchego zniszczenia szkła ważne jest, aby w procesie projektowania uwzględnić, oprócz stanu granicznego nośności (SGN), zapewniającego bezpieczeństwo użytkowania i stanu granicznego użyteczności (SGU), związanego z estetyką i komfortem użytkowania, również dodatkowe stany graniczne. Odnoszą się one do pozasprężystego zakresu pracy elementu, czyli od momentu, kiedy tafla ulega zarysowaniu [6, 7]. Pierwszy z nich, tzw. stan graniczny zarysowania, odnosi się bezpośrednio do momentu i sposobu zarysowania elementu. Aby spełnić ten stan graniczny należy zapewnić, że zarysowanie jednej tafli lub całego elementu nie będzie stanowiło zagrożenia dla ludzi, którzy znajdują się w bezpośrednim jego sąsiedztwie oraz nie dojdzie do penetracji tafli przez ciało uderzające w element. Analizując ten stan graniczny należy zwrócić szczególną uwagę na zagadnienia dynamiczne, np. uderzenie ciałem miękkim i twardym. Drugi, tzw. stan graniczny zniszczenia, dotyczy pracy elementu od momentu jego zarysowania przez zdefiniowany czas, np. związany z ewakuacją użytkowników budynków lub wymianą elementu.



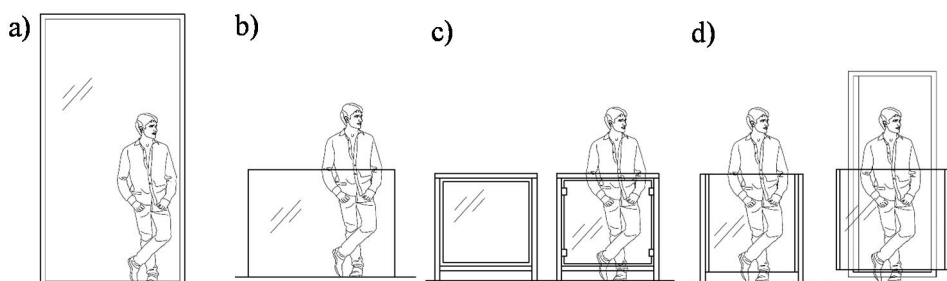
Rys. 1. Szkło laminowane: a) niezarysowane, b) zarysowane (jedna tafla).

W Europie do tej pory nie opracowano jednolitych przepisów zawierających metody i zasady projektowania konstrukcji wykonanych ze szkła budowlanego [2]. Począwszy od 1999 r. Europejski Komitet Normalizacyjny, w ramach Komitetu Technicznego CEN/TC 129 „Glass in Building”, pracował nad kolejnymi projektami dokumentów dotyczących projektowania elementów wykonanych ze szkła [8], co w 2020 r. zaowocowało publikacją normy PN-EN 16612:2020-03 [9]. Norma ta ma jednak zastosowanie tylko do szklanych elementów drugorzędnych (niekonstrukcyjnych), wypełniających, których

zadaniem jest jedynie przeniesienie np. obciążenia wiatrem na konstrukcję nośną, co znacznie ogranicza jej stosowalność. Należy zaznaczyć, że obecnie komisja CEN/TC 250/SC 11 „Structural glass” pracuje nad opracowaniem wspólnej normy do projektowania szkła dla wszystkich krajów członkowskich [10].

2. Klasyfikacja szklanych barier

Najpopularniejsza klasyfikacja szklanych barier została pierwotnie zawarta w przepisach niemieckich [11], a następnie zaadaptowana w normie DIN 18008-4 [12]. Przywołana klasyfikacja zależy od geometrii przegrody, sposobu jej zamocowania oraz funkcji w przenoszeniu obciążeń (element konstrukcyjny lub niekonstrukcyjny – wypełniający). W normie [12] zdefiniowano trzy główne klasy barier szklanych: Klasa A – bariery o pełnej wysokości (rys. 2a), Klasa B – wolnostojące szklane bariery (rys. 2b) oraz Klasa C – bariery stalowe z wypełnieniem szklanym (rys. 2c). Prawidłowa klasyfikacja bariery jest kluczowym zadaniem przy badaniu tego rodzaju elementów, ponieważ decyduje ona o wartości obciążenia dynamicznego [12].



Rys. 2. Klasyfikacja szklanych barier: a) klasa A, b) klasa B, c) klasa C, d) bariery niesklasyfikowane.

Bariery ochronne o pełnej wysokości (klasa A – rys. 2a) to przeszklenia pionowe mocowane liniowo lub punktowo, bez pochwytu przenoszącego obciążenie poziome. W przypadku zamontowania stalowego pochwytu przed barierą element taki zaliczany jest do klasy C [12]. Przegrody szklane wolnostojące (klasa B – rys. 2b) to elementy montowane bezpośrednio do konstrukcji wzdłuż jej dolnej krawędzi za pomocą mocowań liniowych lub punktowych. W przypadku tej klasy barier, szklana tafła stanowi pełnoprawny element konstrukcyjny przenoszący pełne obciążenie. W niektórych rozwiązaniach stosuje się stalowy pochwyty montowany na górnej krawędzi tafli, którego zadaniem jest ochrona wrażliwej części tafli, jak również przeniesienie obciążenia na sąsiednie panele w przypadku zarysowania szkła. Bariery klasyfikowane do klasy C (rys. 2c) stanowią wypełnienie ramy nośnej przenoszącej obciążenie poziome.

Należy podkreślić, że istnieją przegrody z wypełnieniami szklanymi, które nie jest prosto zakwalifikować do wyżej opisanych klas (rys. 2d). W takich rozwiązaniach elementy szklane montowane są między słupkami stalowymi, co pozornie może wskazywać na klasę C, jednak panele należy traktować jako elementy pierwszorzędne (konstrukcyjne) i zaklasyfikować do klasy B.

3. Obciążenia dynamiczne generowane przez użytkowników budynków

Zgodnie z zasadami mechaniki energia kinetyczna poruszającego się ciała jest funkcją jego prędkości i masy [13]. Należy jednak pamiętać, że podczas uderzenia ciała ludzkiego w przeszkodę w zdarzeniu bierze udział tylko 30–60% jego masy, co jest spowodowane

faktem, że ciało ludzkie nie jest idealnie sztywne i część energii zostaje rozproszona [14]. W przeszłości były prowadzone badania z ochotnikami mające na celu oszacowanie maksymalnej energii uderzenia, która może być wygenerowana przez poruszającego się człowieka. Nilsson [14] prowadził szerokie badania skupione na ocenie siły uderzenia związanej z różnymi rodzajami działalności człowieka. Badania polegały na opieraniu się, uderzaniu i kopaniu w szklaną taflę swobodnie podwieszoną do stropu. Po przeciwnej stronie tafli zamontowano szereg siłomierzy, mierzących reakcje poziome w czasie uderzenia. Głównym celem badań było określenie współczynników dynamicznych w odniesieniu do masy człowieka. W przypadku kopania stopą, parcia ciałem i pchnięcia drugiej osoby uzyskano odpowiednio współczynniki dynamiczne: 1,50, 3,90 i 4,10. Huber [15] prowadził podobne badania skupione na uderzeniu ramieniem w taflę szklaną podpartą wzdłuż wszystkich krawędzi. Autor uzyskał maksymalną siłę równą 2,2 kN. Interesujące wyniki badań można znaleźć również w publikacjach [4, 16–18].

Tablica 1 przedstawia porównanie energii uderzenia i odpowiadające im wysokości spadania normowego wahadła uwzględnione w normie DIN 18008-4 [12]. Dodatkowo, przedstawiono energię uderzenia obliczoną zgodnie z DIN 52337 [19] przy założeniu, że człowiek o masie 80 kg porusza się z maksymalną prędkością człowieka w pomieszczeniach (2,4 m/s) i 80% jego masy aktywnie uczestniczy w zderzeniu. Dla porównania w tabl. 1 podano również wyniki badań z ochotnikami.

Tablica 1. Porównanie energii uderzenia podanych przez normy

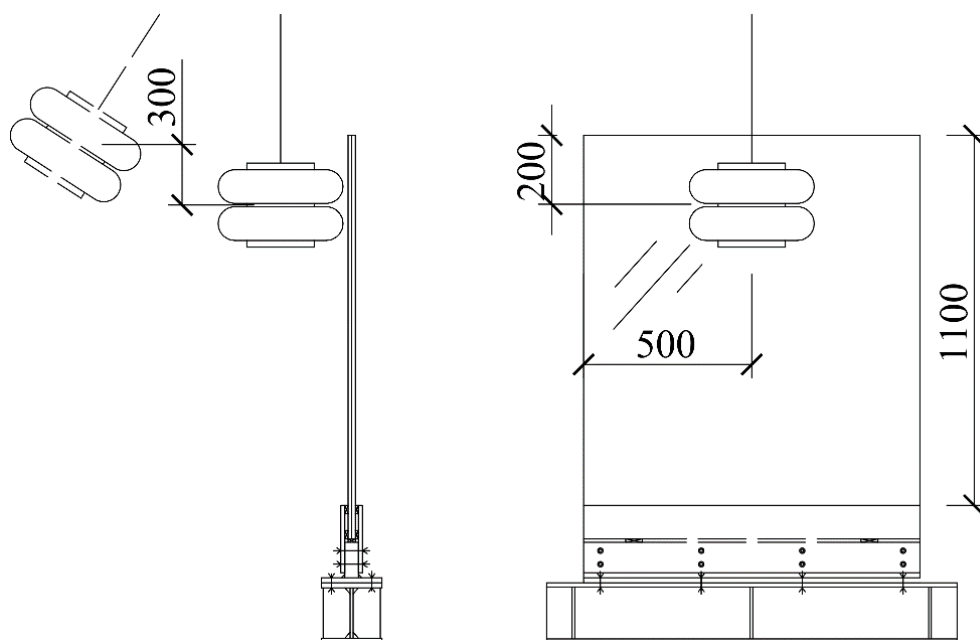
Źródło	Energia uderzenia [J]	Wysokość spadania wahadła 50 kg [m]
DIN 18008-4 [12]	93	190
	220	450
	589	1200
DIN 52337 [19]	138	281
Badania z ochotnikami [4, 18]	73–176	148–358

W Europie badania eksperymentalne i numeryczne dotyczące symulacji uderzenia człowieka w barierę prowadzi się za pomocą tzw. ciała miękkiego – dwuoponowego wahadła, którego model został zapożyczony z normy do klasyfikacji płaskich wyrobów szklanych [20]. Wahadło o masie 50 kg jest zbudowane z dwóch pneumatycznych opon oraz stalowego cylindra. W czasie badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych energia uderzenia kontrolowana jest przez wysokość spadania wahadła, która określona jest jako różnica wysokości środka ciężkości wahadła w stanie spoczynku (przed zwolnieniem) i w momencie uderzenia w element. W badaniach laboratoryjnych i numerycznych szklanych barier poddanych uderzeniu ciała miękkiego kluczowy jest wybór miejsca uderzenia wahadła. Norma [20] podaje zasady lokalizacji strefy uderzenia dla różnych klas barier i różnych sposobów mocowania tafli: odległość od mocowania (liniowego lub punktowego) ≥ 250 mm, odległość od poziomu posadzki ≥ 500 mm i ≤ 1500 mm, odległość od niepodpartej krawędzi tafli ≥ 100 mm.

4. Wybrane wyniki badań własnych

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań samonośnej szklanej balustrady, które były częścią badań własnych zrealizowanych w ramach projektu badawczego „Structural safety of glass components” (nr grantu 18–510) sfinansowanego przez fundację ÅForsk Foundation i zrealizowanego w Division of Structural Mechanics, Faculty of Engineering LTH, Lund University w Szwecji w latach 2017–2018 [21].

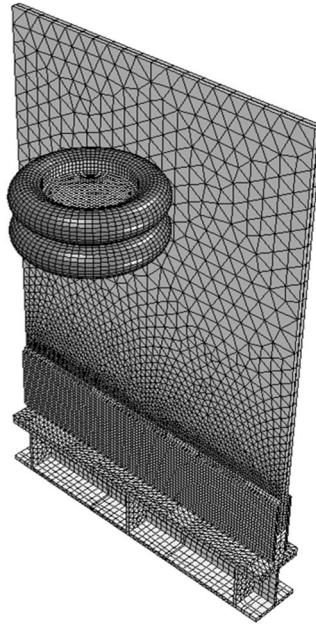
Rysunek 3 przedstawia stanowisko do badania samonośnej szklanej balustrady w schemacie wspornikowym, poddanej uderzeniu ciała miękkiego. Element badawczy o wymiarach 1000×1200 mm wykonany ze szkła laminowanego (dwie tafle o grubości 10 mm z folią PVB 1,52 mm) został zamocowany w stalowym uchwycie montażowym na głębokość 100 mm, zapewniając pełne usztywnienie elementu wzdłuż jego dolnej krawędzi. W czasie badań wahadło zwalniano z wysokości 300 mm, która odpowiada energii uderzenia 147,1 J. Wartość energii uderzenia jest bliska średniej wartości energii uderzenia wyznaczonej w badaniach eksperymentalnych z ochotnikami biegnącymi i uderzającymi w barierę [4, 18]. Element badano również w stanie pokrytycznym (z jedną tafłą zarysowaną zlokalizowaną po stronie wahadła), zwalniając wahadło ze zredukowanej wysokości (100 mm).



Rys. 3. Stanowisko badawcze do badania szklanej balustrady.

W celu walidacji modelu numerycznego, na próbce zamontowano szereg czujników mierzących wartości fizyczne w czasie uderzenia. W miejscu uderzenia, po przeciwnej stronie próbki w stosunku do lokalizacji wahadła, zamontowano akcelerometr mierzący przyspieszenie elementu, jak również dwa czujniki przemieszczenia zamontowane przy pionowych krawędziach bariery. Dodatkowo, w dolnej części próbki zamontowano dwa tensometry mierzące odkształcenia pionowe w szkłe po obu stronach balustrady.

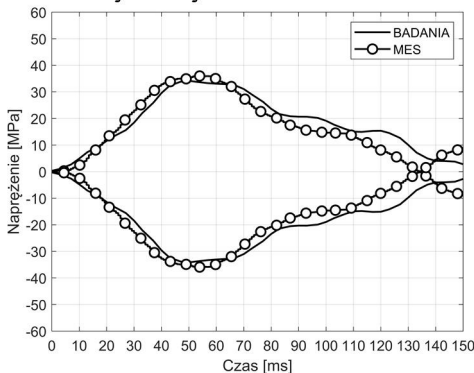
W ramach projektu badawczego opracowano model numeryczny w środowisku ABAQUS, który pozwala na symulację uderzenia ciała miękkiego w szklaną barierę (rys. 4). Symulacje były prowadzone przy wykorzystaniu solwera Implicit Dynamic [22]. W symulacjach zastosowano autorski, zwalidowany model dwuoponowego wahadła [2, 23]. Wahadłu nadano wstępną prędkość odpowiadającą swobodnemu spadkowi z wysokości 300 mm. Elementy szkła laminowanego, takie jak tafle szklane i warstwę folii zamodelowano za pomocą ośmiowzłowych elementów skończonych typu continuum shell [22]. Pozostałe elementy zamodelowano za pomocą elementów bryłowych. Szczegóły dotyczące parametrów materiałów i metodologii badań numerycznych podano w [2, 23].



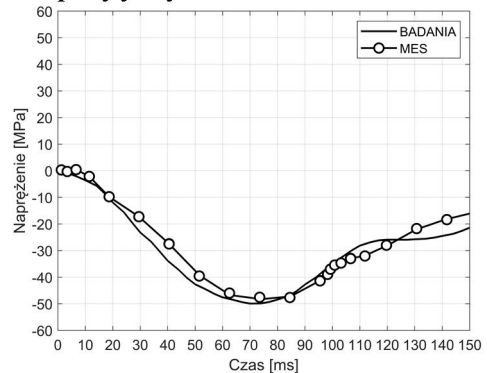
Rys. 4. Model numeryczny.

Rysunek 5 przedstawia porównanie wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych (średni przebieg dla 5 powtórzeń) i symulacji komputerowych dla uderzenia wahadłem w szklaną barierę, mierzonych w punkcie mocowania tensometru. Naprężenia obliczono na podstawie normowej wartości modułu Younga szkła równego 70 GPa [9]. W stanie pokrytycznym zarejestrowano tylko naprężenia po stronie przeciwnej do uderzenia, w czasie zarysowania jednej tafli tensometr uległ zniszczeniu. W analizach numerycznych uzyskano bardzo dobrą zgodność w zakresie maksymalnych wartości naprężeń w szkłe, w przypadku naprężeń rozciągających i ściskających różnica nie była większa niż 10%. Należy podkreślić, że uzyskane naprężenia dotyczą lokalizacji mocowania tensometru, globalne naprężenia główne, uzyskane w symulacjach, występują przy krawędzi stalowego mocowania i są o około 80% większe. Pozostałe wyniki badań podano w [2, 23].

Stan niezarysowany



Stan pokrytyczny



Rys. 5. Porównanie wyników z analiz numerycznych i badań eksperymentalnych.

Oprócz uderzenia ciałem miękkim, szklane balustrady w czasie użytkowania są również narażone na inne obciążenia dynamiczne, np. uderzenie kamieniem lub innym twardym przedmiotem, który może doprowadzić do zarysowania szkła. Obecnie, w ramach projektu badawczego „Innowacyjne rozwiązania dla szkła laminowanego mocowanego punktowo o zwiększonej nośności pokrytycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, prowadzone są badania i analizy numeryczne szklanych tafli poddanych uderzeniu kuli stalowej o różnej masie, zwalnianej z różnej wysokości spadania [24, 25]. Wstępne wyniki potwierdzają potencjał metod numerycznych skupionych na dynamicznych symulacjach zachowania tafli szkła poddanej uderzeniu ciała twardego.

5. Podsumowanie

Szkło jest coraz częściej stosowanym materiałem w budynkach głównie dzięki jego pożądanym cechom, takim jak przezierność, wysoka wytrzymałość, trwałość i odporność na czynniki środowiskowe. W ostatnich latach występuje silna tendencja odchodzenia od wykorzystania szkła jedynie jako wypełnienia konstrukcji stalowej, a coraz częściej stosuje się je jako samonośne bariery wykonane wyłącznie ze szkła. W tych rozwiązaniach szkło jest pełnoprawnym materiałem konstrukcyjnym, a szklana balustrada chroni użytkowników budynków przed upadkiem z wysokości. W takich rozwiązaniach bezpieczeństwo użytkowników jest bezpośrednio zależne od materiału kruchego, który jest różny od tradycyjnie stosowanych materiałów.

Obciążenia dynamiczne są decydujące dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników budynków i powinny być obowiązkowym etapem obliczeń statyczno-wytrzymałościowych takich elementów. Wiarygodny model numeryczny szklanej balustrady w zakresie uderzenia ciałem miękkim, będący przedmiotem niniejszego artykułu, pozwala na szeroką analizę zachowania bariery poddanej uderzeniu ciała miękkiego i lepsze rozpoznanie tego zjawiska.

Podziękowanie

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.

Literatura

1. Belis J., Louter C., Nielsen J.H., Schneider J.: Springer Handbook of Glass, Springer 2019.
2. Kozłowski M.: Balustrady szklane. Analizy doświadczalne i obliczeniowe, podstawy projektowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2019.
3. Pinto A., Reis L.: Barrier for buildings: analysis of mechanical resistance requirements, Procedia Structural Integrity 1, 2016, s. 281–288.
4. Schneider J.: Impact Loading on Glass Panes by Soft Body Impact – Theoretical Analysis and Experimental Verification, Proceedings of Glass Processing Days, Tampere, 2001, s. 682–687.
5. Karlsson S.: Spontaneous fracture in thermally strengthened glass – a review and outlook, Ceramics-Silikaty 61(3), 2017, s. 188–201.
6. Honfi D., Reith A., Gergely Vigh L., Stocker G.: Why glass structures fail? – Learning from failures of glass structures, Proceedings of Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference, 2014.
7. Lenk P., Honfi D.: Resilience, Damage Tolerance & Risk Analysis of a Structure Comprising Structural Glass, Proceedings of Engineered Transparency, International Conference at Glasstec, Düsseldorf, 2016.
8. Feldmann M., Kasper R., Di Biase P.: European Structural Design of Glass Components – Information on European standardization, Stahlbau 85, 2016, s. 219–229.

9. PN-EN 16612:2020-03 Szkło w budownictwie – Wyznaczanie metodą obliczeniową nośności normalnie obciążonych tafli szklanych, Polski Komitet Normalizacyjny.
10. Feldmann M., Di Biase P.: The CEN-TS Structuralal Glass – Design and Construction Rules as pre-standard for the Eurocode, Proceedings of Engineering Transparency, Duesseldorf, 2018, s. 90–98.
11. TRAV: Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (Przepisy techniczne dotyczące stosowania przeszklonych barier ochronnych), DIBt Communication 2/2003.
12. DIN 18008 – 4: 2013 Glass in Building – Design and construction rules – Part 4: Additional requirements for barrier glazing, DIN.
13. Nilsson L.: Impact Loads Produced by Human Motion, Part 1: Background and experimental investigation, Lund University, Lund, 1976.
14. Nilsson L.: Impact loads produced by human motion, Lund University, Lund 1982.
15. Huber K.: Entwicklung eines Stoßkörpers für Pendelschlagversuche (Opracowanie ciała miękkiego do prób udarowości), IFT Rosenheim Institut für Fenstertechnik Fenstertage 34867, 1995.
16. Wörner J., Schneider J.: Zwischenbericht zur Durchführung von Versuchen zum weichen Stoß mit dem Pendel nach DIN EN 12600 (Raport okresowy z wykonania testów miękkiego uderzenia wahadłem zgodnie z normą DIN EN 12600), Institut für Statik, Darmstadt (2000).
17. Bucak Ö.: Bauteilversuche zur Ermittlung der Schultersteifigkeit beim Anprall an Glas (Testy komponentów w celu określenia sztywności ciała podczas uderzenia w szkło), Fachhochschule München, 2004.
18. Schuler C., Koch S., Binder M., Bucak Ö.: Comparative studies to shock loads during the construction project Zoo Wuppertal, University of Applied Sciences Munich, 2005.
19. DIN 52337 Methods of testing flat glass for use in buildings; pendulum impact tests, DIN.
20. PN-EN 12600:2004 Szkło w budownictwie – Badanie wahadłem – Udarowa metoda badania i klasyfikacja szkła płaskiego, Polski Komitet Normalizacyjny.
21. Kozłowski M.: Structural safety of glass components, Lund University, 2020.
22. Simulia ABAQUS v. 6.14, Computer Software and Online Documentation, Dassault Systems: Providence, RI, USA, 2018.
23. Kozłowski M.: Experimental and numerical assessment of structural behaviour of laminated glass balustrade subjected to soft body impact, Composite Structures 111380, 2019.
24. Kozłowski M., Zemła K., Kosmal M.: Exploratory Finite Element Analysis of Monolithic Toughened Glass Panes Subjected to Hard-Body Impact, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1203, 022145, 2021.
25. Kozłowski M., Zemła K., Kosmal M., Kopyłow O.: Experimental and FE Study on Impact Strength of Toughened Glass–Retrospective Approach, Materials 14, 7658, 2021.

Safety of glass barriers in the light of standards and own experiments

Key words: glass barriers, dynamic load, soft body impact, experiments, numerical simulations