

Numeryczne modelowanie zjawiska kruchego zniszczenia szkła w hybrydowych belkach drewniano-szklanych

DR INŻ. MARCIN KOZŁOWSKI, DR HAB. INŻ. JACEK HULIMKA, PROF. POL. ŚL.
KATEDRA INŻYNIERII BUDOWLANEJ, POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wprowadzenie

Pomimo że szkło znane jest od tysięcy lat, dopiero od kilku dekad elementy wykonane z tego materiału są wykorzystywane jako nośne elementy konstrukcyjne, np. belki, ściany czy słupy w wielu realizacjach, takich jak dachy, fasady, ogrody zimowe, kładki dla pieszych oraz elementy przeszkleń jachtów morskich [1–6].

Szkło charakteryzuje się wieloma zaletami, m. in. przeziernością, wysoką wytrzymałością na ściskanie oraz trwałością [7]. Jednakże posiada ono także liczne wady. Do najważniejszych z nich można zaliczyć kruchość – po osiągnięciu wytrzymałości szkło pęka w ułamku sekundy, rozpadając się na wiele kawałków o ostrych krawędziach. W przeciwieństwie np. do stali, gdzie zniszczenie poprzedzone jest plastycznymi deformacjami, szkło pęka bez ostrzeżenia. Kolejną wadą jest ekstremalna wrażliwość szkła na koncentrację naprężeń, spowodowana niemożnością redystrybucji sił przez lokalne uplastycznienie materiału. Ponadto, ogromna dysproporcja w wytrzymałości szkła na ściskanie (800 MPa) i rozciąganie (60–100 MPa) nie pozwala na pełne wykorzystanie możliwości materiału, szczególnie w elementach zginanych, w których wartości naprężeń ściskających i rozciągających są podobne [7].

Tradycyjne podejście do projektowania szklanych belek polega głównie na wykorzystaniu szkła hartowanego (bardziej wytrzymałego niż szkło float), laminowaniu kilku tafli w celu minimalizacji prawdopodobieństwa całkowitego zniszczenia belki, wymiarowaniu z ekstremalnie wysokimi współczynnikami bezpieczeństwa oraz stosowaniu dodatkowych tafli w celu ochrony nośnego trzonu laminatu [7]. Konserwatywne techniki są jednak nieekonomiczne i nie wykorzystują w pełni własności wytrzymałościowych szkła.

Stosunkowo nowym pomysłem jest połączenie szkła z innymi materiałami, takimi jak stal, drewno, włókna węglowe, włókna szklane, a nawet beton sprężony [8–10]. Na szczególną uwagę zasługuje drewno, jest bowiem materiałem naturalnym, ekologicznym, o znanych własnościach mechanicznych, a zarazem dobrze przenoszącym naprężenia rozciągające. Poza tym, zwiększenie udziału drewna w zastosowaniach konstrukcyjnych wpisuje się w założenia redukcji emisji CO₂ przez kraje europejskie. Ponadto, pozostałe materiały są bardzo wrażliwe na działanie wysokich temperatur (np. w czasie pożaru), a alkaliczne właściwości betonu mogą powodować degradację szkła i w konsekwencji obniżenie jego wytrzymałości.

Kombinacja fizycznych właściwości szkła i drewna, idealnie wpisująca się w ideę zrównoważonego rozwoju, możliwość recyklingu oraz neutralność materiałów dla środowiska pozwala na szerokie zastosowanie kompozytów drewniano-szklanych w wielu realizacjach.

SŁOWA KLUCZOWE

szkło konstrukcyjne, belki drewniano-szklane, kruche pękanie szkła, numeryczne modelowanie

KEYWORDS

structural glass, timber-glass beams, glass cracking, numerical modelling

dr inż. Marcin Kozłowski



Asystent w Katedrze Inżynierii Budowlanej na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej, członek Polskiego Komitetu Normalizacyjnego ds. Szkła i ds. Projektowania konstrukcji budowlanych ze szkła. Krajowy reprezentant w europejskiej organizacji COST Action TU1403 – Adaptive Facades Network, członek Ogólnopolskiej Sekcji Przemysłu Szklarskiego. W pracy naukowej zajmuje się konstrukcjami szklanymi, hybrydami szklano-drewnianymi, lepko-sprężystymi cechami klejów konstrukcyjnych i modelowaniem zniszczenia kruchych materiałów. Posiada kilkuletnie doświadczenie w projektowaniu konstrukcji ze szkła w Polsce i zagranicą.

e-mail: marcin.kozlowski@polsl.pl

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia wyniki numerycznych analiz dotyczących modelowania kruchego zniszczenia szklanego środka hybrydowych belek drewniano-szklanych. Przedstawiono wpływ geometrii i wielkości elementów skończonych oraz wielkości energii pęknięcia na zachowanie hybrydowych belek pod obciążeniem statycznym. Wyniki badań niszczących posłużyły do walidacji finalnych modeli obliczeniowych.

SUMMARY

Numerical modelling of the phenomenon of brittle cracking in glass in timber-glass composite beams

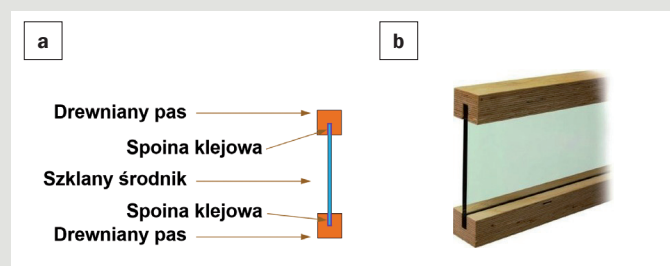
The paper presents results of numerical studies on modelling of brittle failure (cracking) of glass web in hybrid timber-glass beams. The influence of element geometry, element size and value of fracture energy on the structural performance were analyzed. Final numerical models were validated by comparing their results with the results of experimental studies.

Artykuł przedstawia wyniki analiz numerycznych hybrydowych belek drewniano-szklanych. Podaje on również podstawy metodologiczne symulacji oraz prezentuje walidację modeli za pomocą badań niszczących. Analizowano dwa typy elementów: belki o zmniejszonych wymiarach (dł. 1800 mm) oraz belki o rzeczywistych wymiarach (dł. 4800 mm). Do budowy belek o zmniejszonych wymiarach wykorzystano szkło float, natomiast w belkach o rzeczywistych wymiarach zastosowano dwa rodzaje szkła: float oraz póhartowane.

Hybrydowe belki drewniano-szklane

Stosowane powszechnie rozwiązania, polegające na wklejaniu szklanych tafli w drewnianą ramę, oparte są na założeniu, że szkło jedynie wypełnia element nośny i nie uczestniczy w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych (w swojej płaszczyźnie), a tylko przekazuje obciążenie wiatrem (działające prostopadle do jego powierzchni) na nośną drewnianą konstrukcję ramy.

W porównaniu do tradycyjnych rozwiązań, idea hybrydowych belek drewniano-szklanych polega na stworzeniu takiej kombinacji materiałów, aby połączenie ich własności stworzyło synergiczny, bezpieczny i przewidywalny element konstrukcyjny, w którym szklany środek oraz drewniane półki aktywnie uczestniczą w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych [11–15]. Atutem takiego rozwiązania, w przeciwieństwie do standardowych realizacji, jest wykorzystanie pojedynczej tafli szkła float, co znacznie ogranicza masę oraz cenę finalnego produktu.



Rys. 1. a) budowa hybrydowej belki drewniano-szklanej, b) prototyp.

Przekrój belki składa się ze szklanego środka i półek wykonanych z drewna litego lub klejonego (Rys. 1). Drewniane półki dobrze zabezpieczają belkę przez zwichrzeniem oraz chronią przed uszkodzeniem najbardziej wrażliwą część szklanego środka, a mianowicie jego krawędzie. Po osiągnięciu wytrzymałości przez szkło i powstaniu rys w rozciąganej strefie przekroju, drewniane półki w połączeniu z niezarysowaną (ściskaną) częścią przekroju są w stanie dalej przenosić obciążenie. Jest to pewna analogia do belek żelbetowych, w których nawet silne zarysowanie betonu w strefie rozciąganej nie powoduje zniszczenia lub wyraźnego obniżenia nośności.

Dlatego jedną z najważniejszych zalet takich belek jest ciągły proces zniszczenia i znaczna nośność poawaryjna po pojawieniu się pierwszej rysy w szkłe. Belka daje nam w ten sposób ostrzegawczy sygnał, że jest przeciążona, co pozwala na przedsięwzięcie środków zaradczych (np. tymczasowe podparcie elementu).

Hybrydowe belki drewniano-szklane mają szerokie zastosowanie. Mogą stanowić belki nośne szklanego przekroczenia, usztywniające zebra fasad, jak również główne ramy nośne ogrodów zimowych. Przykładowe możliwości ich zastosowania przedstawiono na Rys. 2.



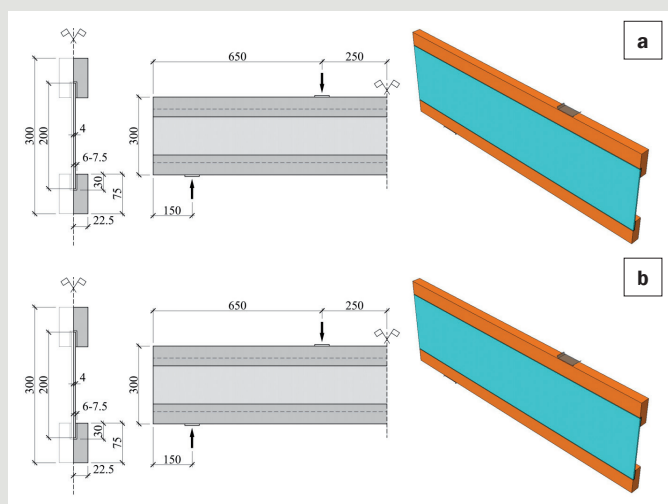
Rys. 2. Pilotażowy projekt zastosowania hybrydowych belek drewniano-szklanych jako elementów konstrukcyjnych dachu (na górze) oraz ogrodu zimowego (na dole); wizualizacja: A. Kozłowska, A. Klich.

Metodologia

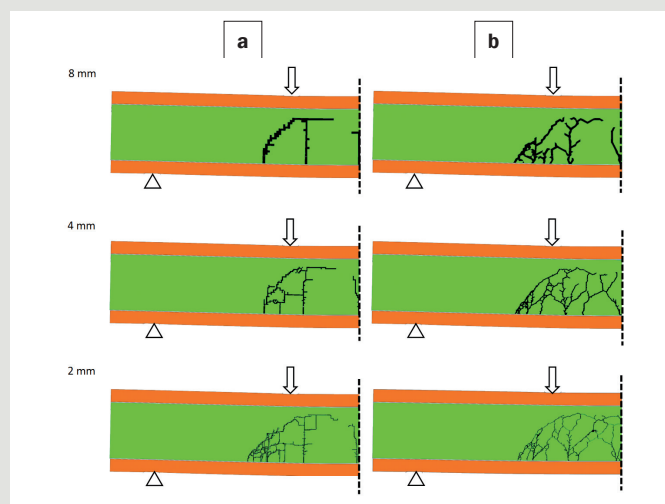
Do zbudowania modelu obliczeniowego hybrydowych belek drewniano-szklanych, uwzględniającego kruche zniszczenie szklanego środka, wykorzystano program Abaqus 6.12 [16]. Szkło zamodelowano jako materiał liniowo-sprężysty z parametrami podanymi w Tab. 1. Dodatkowo, w modelach numerycznych zastosowano model zniszczenia materiału – *brittle cracking*, przeznaczony do modelowania kruchego zniszczenia takich materiałów jak szkło, kruche skały, beton i materiały ceramiczne [16]. Do zobrazowania nieciągłości (rys) w elementach skończonych zastosowano rozmyty model zarysowań. W modelu zastosowano proste kryterium detekcji miejsc powstania zarysowań – rysy mogą powstać jedynie w elementach skończonych, w których naprężenia główne osiągną wytrzymałość szkła na rozciąganie ($f_t = 45$ MPa) uzyskaną z badań [11]. Samo powstanie rysy i jej propagacja oparte są na kryterium Hillerborga, który sformułował cechę materiału – energię pęknięcia. Jest to energia potrzebna do rozwarcia rysy o jednostkowej powierzchni w szczelinie typu I, w której naprężenia rozciągające są normalne do powierzchni rysy. W takim podejściu kruche zachowanie jest zdefiniowane jako relacja naprężenie – długość rozwarcia rysy. Po powstaniu rysy model zakłada liniową utratę wytrzymałości na rozciąganie wraz z rozwarciem szczeliny, aż do osiągnięcia rozwarcia krytycznego, w którym naprężenia maleją do zera. O ile inicjacja rysy oparta jest jedynie na szczelinie typu I, to zachowanie się elementów zarysowanych uwzględnia również szczelinę typu II (obciążoną w płaszczyźnie rysy). W modelu spadek sztywności poprzecznej jest zdefiniowany jako funkcja sztywności postaciowej G i uzależniony jest od tzw. *shear retention factor*, który z kolei zależy od rozwarcia rysy [16].

Pozostałe materiały zamodelowano jako liniowo-sprężyste z parametrami podanymi w Tab. 2 i 3, wyznaczonymi eksperymentalnie [11].

W celu zapewnienia quasi-statycznej analizy oraz uniknięcia znaczących sił bezwładności w module dynamicznym, jaki jest stosowany w analizie Explicit, należy zwrócić szczególną uwagę na



Rys. 3. Przekrój, widok i model hybrydowych belek o rozmiarach: a) zmniejszonych, b) rzeczywistych.



Rys. 5. Obraz spekań dla elementów skończonych o różnej wielkości i geometrii dla siatki: a) prostokątnej, b) trójkątnej.

Tab. 1. Parametry materiałowe szkła.

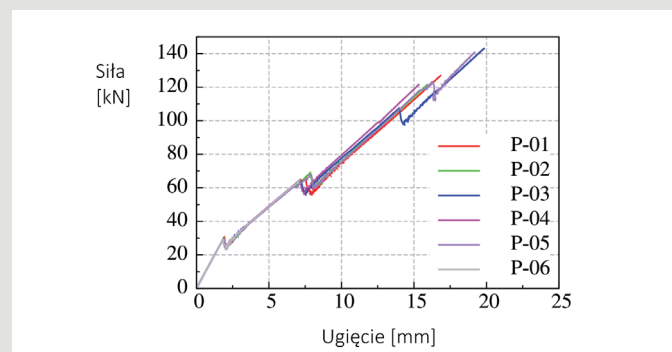
E [MPa]	ν [-]	f_t [MPa]	G_t [J/m ²]
70 000	0,23	45	3

Tab. 2. Parametry materiałowe drewna.

Typ	A	B
E_1 [MPa]	10 540	12 410
E_2 [MPa]	750	880
E_3 [MPa]	750	880
ν_{12} [-]	0,44	0,44
ν_{13} [-]	0,40	0,40
ν_{23} [-]	0,52	0,52
G_{12} [MPa]	930	1 090
G_{13} [MPa]	930	1 090
G_{23} [MPa]	120	140

Tab. 3. Parametry materiałowe klejów.

Rodzaj kleju	E [MPa]	ν [-]
Epoksydowy (E)	1 595	0,422
Akrylowy (A)	78,1	0,459
Silikon (S)	3,2	0,462



Rys. 4. Wyniki dla różnej geometrii oraz wielkości siatki elementów skończonych przy energii pęknięcia 3 J/m².

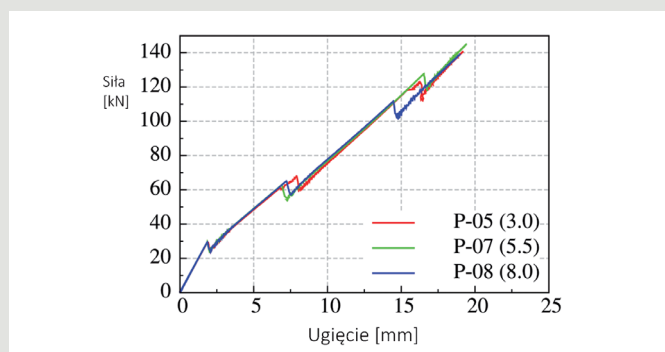
odpowiedni dobór czasu analizy. Nieodpowiednie bowiem dobranie jego czasu może skutkować nierealistycznymi efektami dynamicznymi (oscylacjami). W przedmiotowych modelach tak dobrano czas analizy, aby przez cały jej okres energia kinetyczna stanowiła mniej niż 5% energii wewnętrznej układu, zgodnie z [17].

Na potrzeby pracy zbudowano kilkanaście modeli numerycznych omówionych szczegółowo w [11]. Początkowo zamodelowano hybrydowe belki drewniano-szklane o zmniejszonych rozmiarach i przeanalizowano wrażliwość modelu na zmianę parametrów obliczeniowych, takich jak rodzaj i wielkość elementów skończonych i wartość energii pęknięcia. Kolejno, bazując na optymalnych parametrach, zamodelowano hybrydowe belki o zmniejszonych i rzeczywistych rozmiarach.

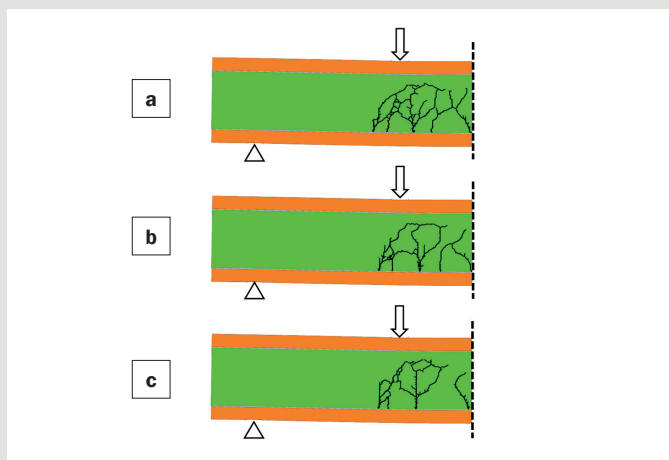
W celu ograniczenia liczby elementów skończonych, hybrydowe belki zamodelowano jako ćwiartki z odpowiednio dobranymi warunkami brzegowymi, symulującymi czteropunktowe zginanie (Rys. 3). Podpory oraz miejsca przyłożenia obciążenia, zamodelowano jako sztywne powierzchnie o długości 50 mm. Obciążenie przykładano przemieszczeniowo. W analizach uwzględniono również nieliniowe efekty dużych deformacji.

Wyniki analizy parametrycznej

Przeprowadzono analizę parametryczną na modelu belki o zmniejszonych rozmiarach (Rys. 3a). Rozmyty model zarysowania jest wrażliwy na kształt i wymiary elementów skończonych, dlatego w analizie zastosowano dwie geometrie elementów skończonych: siatka prostokątna (modele P-01÷03) i trójkątna (modele P-04÷06);



Rys. 6. Wyniki dla różnej wielkości energii pęknięcia szkła przy trójkątnej siatce MES.



Rys. 7. Obraz spękania środka belki przy różnej wielkości energii pęknięcia szkła: a) 3,0 J/m², b) 5,5 J/m², c) 8,0 J/m² przy trójkątnej siatce MES.

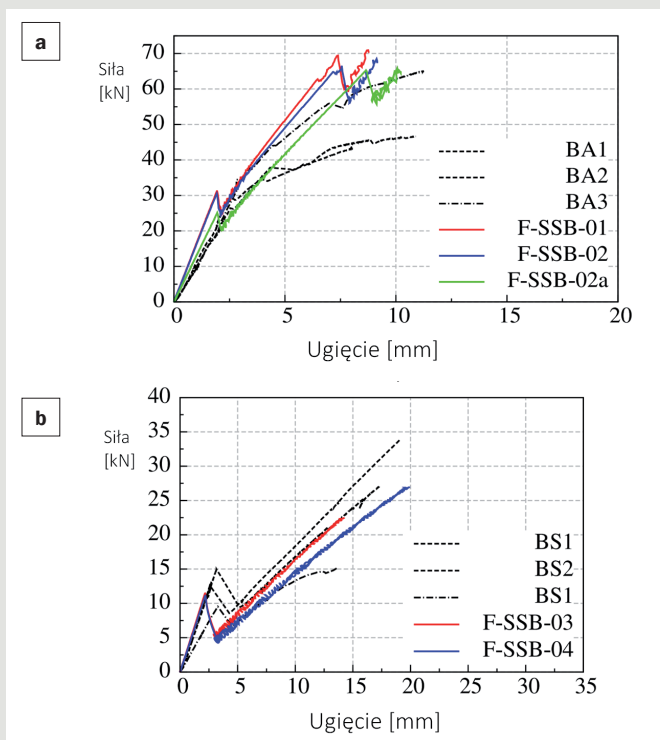
oraz trzy wielkości elementów: 8, 4 i 2 mm. Wymiar 8 mm to grubość zastosowanego w badaniach szklanego środka. Dodatkowo, sprawdzono wrażliwość modelu na wielkość energii pęknięcia (modele P-05 i P-07+08).

Na podstawie analizy wpływu geometrii i wielkości elementów skończonych na przebieg zależności siła-przemieszczenie można stwierdzić, że model nie wykazuje wrażliwości na zmianę tych parametrów (Rys. 4). Jedynie w ostatniej fazie obciążenia pojawiają się różnice, które są związane z wielkością otrzymanej siły niszczącej. Jednak, pomimo braku wpływu zmiany parametrów siatki na przebieg krzywych siła-przemieszczenie, ma ona znaczny wpływ na siatkę spękań (Rys. 5). Przede wszystkim można zauważyć, że im mniejszy jest element, tym większa jest liczba uzyskanych rys. Drugą jest znaczny wpływ geometrii elementów na przebieg rys. W przypadku elementów prostokątnych rysy przebiegają generalnie w dwóch równoległych kierunkach, natomiast przy siatce trójkątnej rysy ujawniają się pod różnymi kątami.

Analogiczne wyniki otrzymano dla modeli z różnymi wielkościami energii pęknięcia. Krzywe siła-przemieszczenie praktycznie nachodzą na siebie, co zostało przedstawione na Rys. 6, dla przykładowych energii pęknięcia szkła równych 3,0, 5,5 oraz 8,0 J/m². Można zatem stwierdzić, że zmiana tego parametru nie ma wpływu na przebieg zależności siły od przemieszczenia. Ma ona jednak wpływ na obraz rys, przedstawiony dla przykładowych siatek spękań na Rys. 7. Wówczas, im mniejsza energia pęknięcia, tym więcej rys ujawnia się w modelu.

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że zmiana geometrii siatki elementów skończonych, czy wielkości energii pęknięcia szkła nie ma istotnego wpływu na poziom otrzymanej siły przy pojawieniu się pierwszej rysy w szkłe oraz ma znikomy wpływ na dalszy przebieg krzywych siła-przemieszczenie. Parametry te jednak znacznie wpływają na siatkę spękań. Im mniejszy element oraz mniejsza wielkość energii pęknięcia, tym pojawia się więcej rys.

Najlepszą zgodność z obserwacjami poczynionymi podczas badań wykazują modele obliczeniowe o siatce elementów skończonych z elementami trójkątnymi. Biorąc pod uwagę czas obliczeń, który przy wymiarach elementu 2 mm wyniósł ponad 72 godziny, optymalną kombinacją parametrów wydaje się być: elementy skończone o wymiarach 4 mm, kształt trójkątny oraz wielkość energii pęknięcia równa 3,0 J/m². Takie parametry zostały wykorzystane w dalszych analizach numerycznych belek hybrydowych.

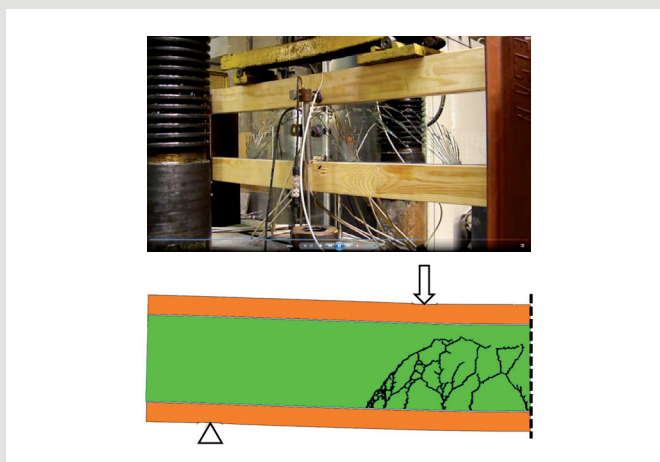


Rys. 8. Porównanie wyników analiz numerycznych przy trójkątnej siatce MES z wynikami badań (belki o zmniejszonych wymiarach) z klejem: a) akrylowym, b) silikonowym.

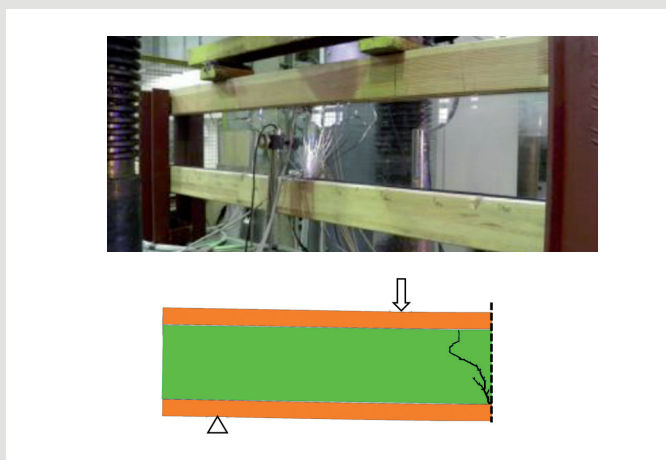
Porównanie wyników analiz numerycznych z wynikami badań Belki o zmniejszonych wymiarach

Wykresy na Rys. 8 przedstawiają porównanie wyników uzyskanych z obliczeń numerycznych z badaniami belek o zmniejszonych rozmiarach [18].

Otrzymane na podstawie analiz numerycznych zachowanie belek z klejem akrylowym (F-SSB-01-02) o różnej grubości spoiny klejowej (spowodowanej różną geometrią rowka w półce) do momentu pojawienia się pierwszej rysy w szkłe jest bardzo podobne do uzyskanych w laboratorium. Przy sile około 60 kN, gdy pojawia się druga rysa, wykresy zaczynają się rozbiegać. Jest to spowodowane tym, że grubsza spoina klejowa pozwala na większe odkształcenia kleju. Podobną zależność zaobserwowano w modelach obliczeniowych belek z klejem silikonowym (F-SSB-03-04). Każdorazowo, jako



Rys. 9. Porównanie wyników analiz numerycznych przy trójkątnej siatce MES oraz $G_c = 3 \text{ J/m}^2$ z wynikami badań (belki o zmniejszonych wymiarach) z klejem akrylowym.



Rys. 10. Porównanie wyników analiz numerycznych przy trójkątnej siatce MES oraz $G_e = 3 \text{ J/m}^2$ z wynikami badań (belki o zmniejszonych wymiarach) z klejem silikonowym.

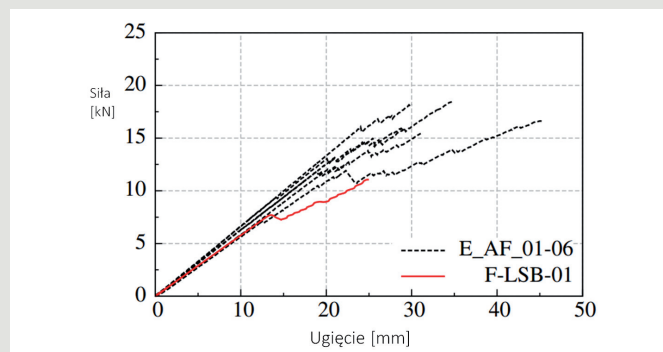
Tab. 4. Belki o zmniejszonych wymiarach – porównanie wyników badań modelowych i analizy numerycznej.

Model	Badania modelowe		Model numeryczny	
	F [kN]	EI [MNm ²]	F [kN]	EI [MNm ²]
F-SSB-01	27,9	0,658	31,4	0,966
F-SSB-02	26,4	0,632	30,6	0,941
F-SSB-02a	26,4	0,632	25,3	0,779
F-SSB-03	12,7	0,292	11,5	0,315
F-SSB-04	12,6	0,289	11,1	0,307

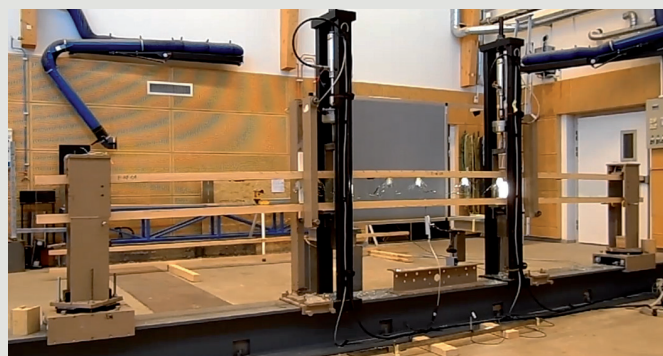
moment całkowitego zniszczenia belki przyjęto zrównanie odkształceń w pasie rozciągającym z wartościami krytycznymi uzyskanymi w badaniach materiałowych drewna.

W przypadku belek z klejem akrylowym (F-SSB-01÷02) otrzymana na podstawie analiz numerycznych początkowa sztywność (EI) jest o około 47% wyższa od wartości otrzymanej w testach laboratoryjnych, a poziom siły, przy której dochodzi do zarysowania środka, o około 13% (Tab. 4). Wyniki nie odzwierciedlają sztywności zmierzonej w czasie badań, co jest spowodowane faktem, że klej akrylowy wykazuje silne cechy lepko-sprężyste i wyznaczone jego parametry sprężyste w badaniach podstawowych nie odzwierciedlają jego zachowania w rzeczywistych badaniach. Zagadnienie to zostało szczegółowo opisane w pracy [11]. Celem wyeliminowania tego efektu, a zarazem zapewnienia ekonomicznego projektowania belek, przeprowadzono dodatkową analizę obliczeniową, przyjmując sztywność kleju akrylowego uzyskaną z badań relaksacji (17 MPa). Otrzymano znacznie lepsze dopasowanie, a mianowicie różnica sztywności wynosi około 23%, a różnica w wartości siły, przy której dochodzi do zarysowania środka wynosi – 4% (Tab. 4).

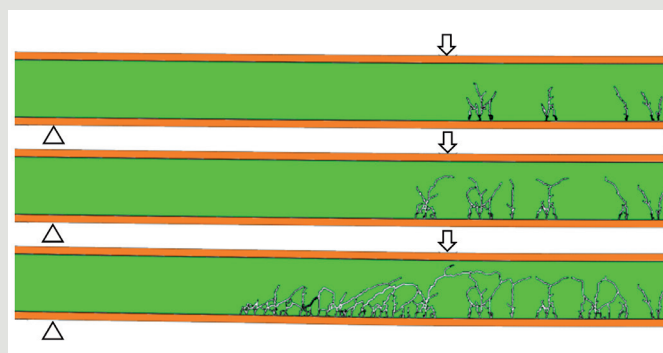
Również wartość siły, przy której belka ulega całkowitemu zniszczeniu, wyznaczona przy użyciu modeli obliczeniowych F-SSB-01÷02, jest przeszacowana. Zniszczenie belki w analizach numerycznych jest spowodowane utratą nośności przez szklany środek. Rzeczywisty obraz zniszczenia, obserwowany w badaniach laboratoryjnych wskazał, że zniszczenie spowodowane było awarią półki (zerwanie mikrowczepów). Podobną zależność zaobserwowano dla modeli belek hybrydowych z klejem silikonowym (F-SSB-03-04), przy czym w analizach tych otrzymano wartość sztywności początkowej wyższą o około 8% od otrzymanych w badaniach laboratoryjnych oraz wartość siły przy pierwszej rysie niższą o około 10%.



Rys. 11. Porównanie wyników analiz numerycznych przy trójkątnej siatce MES oraz $G_e = 3 \text{ J/m}^2$ z wynikami badań (belki o rzeczywistych wymiarach – E_AF_01-06) z klejem epoksydowym.



Rys. 12. Belka o rzeczywistych wymiarach z klejem epoksydowym – siatka spękań uzyskana w badaniach.



Rys. 13. Siatka spękań w modelu F-LSB-01 w kolejnych etapach obciążania.

Tab. 5. Belki o rzeczywistych wymiarach – wyniki badań modelowych i analizy numerycznej.

Model	Badania modelowe		Model numeryczny	
	F [kN]	EI [MNm ²]	F [kN]	EI [MNm ²]
E-AF-01-02	8,3	0,887	9,1	0,920
E-HS-01-02	25,5	0,898	25,5	0,920
A-HS-01-02	25,2	0,907	24,6	0,904
S-HS-01-02	19,8	0,720	18,3	0,692

Siatka spękań uzyskana z analiz numerycznych dosyć poprawnie odwzorowuje zachowanie się belek w warunkach laboratoryjnych (Rys. 9 i 10). Nie zaobserwowano różnicy dla modeli F-SSB-01÷02 oraz F-SSB-03÷04.

Belki o rzeczywistych wymiarach

Belki ze szkłem float (model F-LSB-01) wykazały w badaniach laboratoryjnych, jako jedyne, wieloetapowy mechanizm zniszczenia i nośność poawaryjną [11, 19]. Dla belek ze szkłem półhartowanym obliczenia zatrzymano w chwili pojawienia się pierwszej rysy w szkłe i przeprowadzono wyłącznie analizę sztywnościową.

Wyniki analiz numerycznych modelu F-LSB-01 wykazują dużą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych (Rys. 11).

Podobnie jak w przypadku belek o zmniejszonych rozmiarach, w modelu numerycznym całkowite zniszczenie elementu spowodowane było awarią szklanego środka, podczas gdy w rzeczywistości, analogicznie jak poprzednio, zniszczenie spowodowane było awarią półki (zerwanie mikrowczepów). Jako moment zniszczenia przyjęto zrównanie odkształceń w pasie rozciągającym z wartościami krytycznymi uzyskanymi w badaniach materiałowych drewna [11].

Na podstawie przeprowadzonych analiz uzyskano w modelach niższe o 1,7% do 4,7% wartości sztywności początkowej hybrydowych belek, w stosunku do wartości otrzymanych w testach laboratoryjnych. Różnice siły rysującej mieściły się natomiast w przedziale od -0,1% do 10% (Tab. 5).

Porównanie siatki spękań uzyskanej w modelu numerycznym oraz badaniach laboratoryjnych przedstawiono na Rys. 12 i 13.

W ramach pracy [11] przeprowadzono również analizę naprężeń termicznych, które mogą być niebezpieczne szczególnie w przypadku długich belek o rzeczywistych wymiarach z klejami sztywnymi. Przeprowadzone analizy dla zmiany temperatury o $\pm 25^\circ\text{C}$ wykazały, że w najbardziej niekorzystnym przypadku (klej epoksydowy) naprężenia termiczne nie przekraczają 9% charakterystycznej wytrzymałości szkła na rozciąganie, nie ma zatem niebezpieczeństwa zarysowania środka przy zmianie temperatury. Niemniej, efekt ten powinien zostać uwzględniony przy szacowaniu nośności hybrydowych belek drewniano-szklanych.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych hybrydowych belek drewniano-szklanych o zmniejszonych i rzeczywistych wymiarach. Przeprowadzona analiza numeryczna potwierdza możliwość wiarygodnego modelowania zachowania się hybrydowych belek pod obciążeniem. Wykazano zadowalającą zgodność uzyskanych w modelu numerycznym sztywności oraz poziomu siły powodującej zarysowanie środka w odniesieniu do wyników badań laboratoryjnych. Ponadto pokazano, że analiza numeryczna pozwala na wiarygodną symulację powstania i propagacji rys w szklanym środku.

LITERATURA

- [1] Aslop D. i in. (1999), *Structural use of glass in buildings*, The Institution of Structural Engineers, London
- [2] Nijse R. (2003), *Glass in structures: elements, concepts, designs*, Birkhauser
- [3] Wurm J. (2007), *Glass Structures: Design and Construction of Self-supporting Skins*. Birkhauser
- [4] Kozłowski M., Bao M. (2016), „Cold-Bent Glass for Marine Applications” [w:] Materiały konferencyjne: *Engineered Transparency – International Conference at Glasstec*. 20–21 października 2016, Dusseldorf, ss. 275–284
- [5] Kozłowski M. (2017), *Szko gięte na zimno i laminowane na potrzeby zastosowania w dużych jachtach morskich*, „Świat Szkła”, nr 3, ss. 34–38
- [6] Kozłowski M. (2016), *Szko w renowacji zabytków*, „Świat Szkła”, nr 9, 28, 30, 32, 34
- [7] Kozłowski M. (2010), *Właściwości i odmiany szkła konstrukcyjnego*, „Świat Szkła”, nr 5, 41–42, 44
- [8] Kozłowski M. (2012), *Hybrid glass beams. Review of research projects and applications*, „Architecture Civil Engineering Environment”, nr 5 (3), 53–62
- [9] Kozłowski M., Kadela M., (2014), *Hybrydowe dźwigary szklane. Przegląd badań i realizacji*, „Świat Szkła”, nr 3, 8–13
- [10] Martens K., Caspele R., Belis J. (2015), Development of composite glass beams – A review, „Engineering Structures”, nr 101, 1–15
- [11] Kozłowski M. (2014), *Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice
- [12] Hulimka J., Kozłowski M. (2012), „Mechanism of failure and post-breakage strength of hybrid timber-glass beams” [w:] Materiały konferencyjne: *Proceedings of the 10th international conference on new trends in statics and dynamics of buildings*, Bratysława, 29–32
- [13] Dorn M., Kozłowski M., Serrano E. (2014), „Design approaches for timber-glass beams” [w:] Materiały konferencyjne: *Engineered Transparency – International Conference at Glasstec*, 21–22 października, Dusseldorf
- [14] Kozłowski M. (2012), *Load-bearing capacity of hybrid timber-glass beams*, „Architecture Civil Engineering Environment”, nr 7 (2), 61–71
- [15] Kozłowski M., Hulimka J. (2013), *Belki drewniano-szklane – nowe rozwiązanie w konstrukcji lekkich dachów*, „Świat Szkła”, nr 1, 10–12
- [16] Hibbit D., Karlsson B., Sorensen P. (2004), *ABAQUS/Standard User's Manual*. Ver. 6.10. Pawtucket, Rhode Island
- [17] Chung W. J., Cho J. W., Belytschko T. (1998), On the dynamic effects of explicit FEM in sheet metal forming analysis, „Engineering Computations”, nr 15 (6), 750–776
- [18] Kozłowski M., Kadela M., Hulimka J. (2016), *Numerical Investigation of Structural Behaviour of Timber-Glass Composite Beams*, „Procedia Engineering”, nr 161, 990–1000
- [19] Kozłowski M., Serrano E., Enquist B. (2014), „Experimental investigation on timber-glass composite I-beams” [w:] *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*, 261–268