

Metody analityczne projektowania belek zespolonych drewniano-szklanych

Mgr inż. Konrad Rodacki, prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak, Politechnika Krakowska

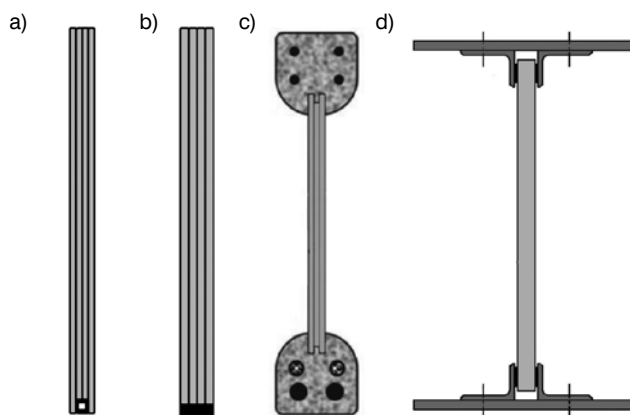
1. Wprowadzenie

Szkło mimo swoich licznych wad coraz częściej znajduje zastosowanie jako materiał konstrukcyjny. Obok konstrukcji typowo powierzchniowych, takich jak stropodachy przezierne czy elewacje szklane budynków, coraz częściej pojawiają się również nośne elementy prętowe (belki, słupy) zbudowane ze szkła. Zaletami takich konstrukcji jest głównie efektowny wygląd, a w przypadku połączenia szkła z innymi materiałami również bezpieczeństwo konstrukcji.

Szkło, podobnie jak beton, charakteryzuje się wysoką wytrzymałościową na ściskanie (wytrzymałość chwilowa szkła zwykłego to nawet 800–1000 MPa), za to bardzo niską wytrzymałością na rozciąganie osiągającą wartość chwilową rzędu 45 MPa (wartość wytrzymałości długotrwałej to ok. 7 MPa). W celu realizacji bezpiecznych konstrukcji szklanych, o których nośności decyduje wytrzymałość materiału na rozciąganie przy zginaniu, pojawiło się kilka pomysłów wzmocnienia strefy rozciąganej belek z wykorzystaniem szkła. Pierwsze pomysły, podobnie jak w przypadku konstrukcji żelbetonowych, polegały na zbrojeniu biernym lub czynnym strefy rozciąganej belek [1–6]. Kolejnymi sposobami wzmocniania belek zbudowanych przy użyciu szkła było zespalanie środników szklanych z pasami wykonanymi z innych materiałów, jak żelbet i strunobeton [7] oraz stal [8] (rys. 1). Najświeższymi i jednocześnie dającymi nadzieje na tanie i bezpieczne belki zbudowane ze szkła są belki zespolone drewniano-szklane.

2. Przegląd wybranych badań belek drewniano-szklanych

Pomysł tego typu belek pojawił się w 2000 r. i do tej pory był obiektem licznych projektów badawczych w europejskich ośrodkach naukowych. Pierwsze poważne badania oraz analizy tego typu belek, w których szklany środnik połączony jest z drewnianymi pasami wykonął J. Hamm [9, 10]. W swojej pracy badał on wpływ zespolenia belki szklanej z doklejonymi listwami drewnianymi w górnej oraz dolnej partii belki (rys. 2). Podczas badań zaobserwowano dwie główne cechy tak przygotowanej konstrukcji, a mianowicie: równomierny odstęp między rysami w szkle, równy ok. 250 mm (rys. 2) oraz



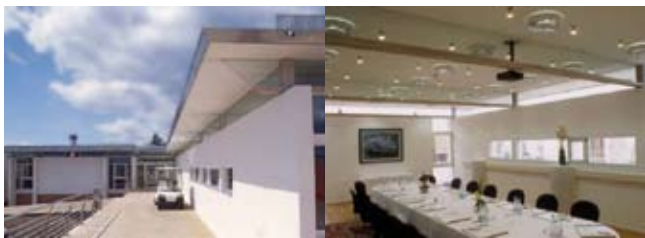
Rys. 1 a) i b) Belki ze szkła zespolonego zbrojone lub sprężone elementami stalowymi [3–8], c) belki dwuteowe ze szkła zespolonego zespolone z pasami strunobetonowymi [9], d) belki dwuteowe stalowo-szklane [10]

znaczną nośność rezerwową, pokrytyczną takiego elementu równą ok. 200% siły rysującej szkło.

Kolejnym badaczem wykorzystującym pomysł konstrukcji belek zespolonych dwuteowych drewniano-szklanych był Kreher [11, 12]. W badaniach użył on trzech



Rys. 2. Przekrój belki wykonanej przez J. Hamma (u dołu) oraz widok zniszczonej belki (u góry) [11]



Rys. 3. Stropodach nad salą bankietową hotelu Palafitte w Szwajcarii [14]

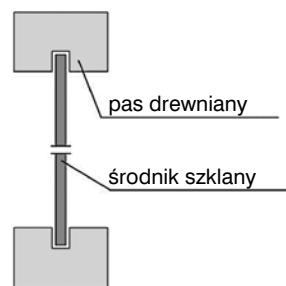
różnych rodzajów szkła: float, półhartowanego oraz hartowanego. Badania prowadzone były w próbie zginania czteropunktowego quasi-statycznego belek zespolonych. Wnioskiem płynącym z badań było odrzucenie szkła poddanego obróbce termicznej (półhartowane i hartowane) z konstrukcji tego typu belek ze względu na bardzo gwałtowny, wybuchowy charakter zniszczenia. Zwieńczeniem wspomnianych badań było zaprojektowanie i wykonanie stropodachu w hotelu Palafitte w Szwajcarii podpartego na belkach zespolonych drewniano-szklanych [13] (rys. 3).

Należy tutaj zwrócić uwagę, że ze względu na brak obszernych badań tego typu elementów belki zostały zaprojektowane w sposób bardzo asekuracyjny. Chodzi tu głównie o fakt, że dla stanu SGU analizowano całą belkę zespoloną dwuteową, natomiast w SGN element analizowano tylko i wyłącznie ze względu na nośność na zginanie górnego pasa belki.

Podobny pomysł konstrukcji belek drewniano-szklanych zaprezentowali badacze Cruz i Pequeno [14]. W czasie badań zaobserwowali oni, że dla sztywniejszych połączeń klejowych (polimerowych) rozkład zarysowań w szkłe jest bardziej równomierny, a skoki na krzywej obciążenie-przemieszczenie łagodniejsze. Prowadzi to do wniosku, że dla obciążeń statycznych doraźnych najbardziej niebezpieczne, bo prezentujące najbardziej gwałtowny charakter zniszczenia, są połączenia sztywne drewna ze szkłem.

Inny pomysł konstrukcji belek drewniano-szklanych zaprezentowali badacze Blyberg i Serrano [15–19]. Różnicą w stosunku do poprzednich badaczy była konstrukcja samego pasa drewnianego, który w tym przypadku nie składał się z dwóch listew naklejonych po obu stronach szyby, ale z jednego kawałka, a szyba wklejona była w przygotowany rowek (rys. 4).

Kolejne badania, prowadzone przez Kozłowskiego i in. [20–22], skierowane były na zbadanie nośności pokrytych belek zespolonych dwuteowych drewniano-szklanych. Dla uzyskanych wykresów ugięcie-siła (rys. 5) autor zaobserwował, że klej bardzo sztywny, jakim jest żywica epoksydowa, prowadzi do nagłych przeskoków na wykresie (nagłej redukcji sztywności), w odróżnieniu od innych klejów, dla których to elementy zachowują się bardziej ciągliwie. Autorzy zalecają, aby do konstrukcji takich belek używać klejów o umiarkowanej

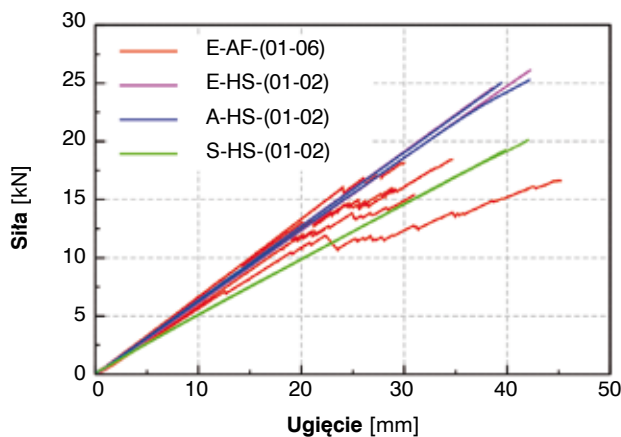
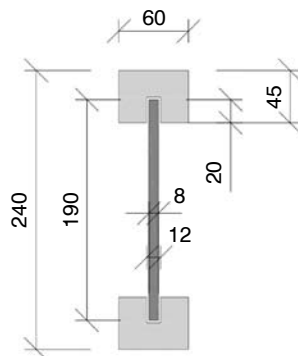


Rys. 4. Przekrój belki badanej przez Cruz'a i Pequeno [14]

sztywności (akryle), które zapewniają dobrą ciągliwość ustroju po pierwszym zarysowaniu oraz częściowe zespolenie przekroju.

Powyżej przytoczono jedynie główne badania omawianych elementów wraz z ogólnymi wnioskami. Szczegółowy przegląd dotychczas badanych i zrealizowanych belek drewniano-szklanych czytelnik może znaleźć w [23].

3. Sposoby analizy nośności belek zespolonych drewniano-szklanych



Rys. 5. Przekrój poprzeczny belek wykonanych przez Kozłowskiego i Serrano [1,21], wykres zależności ugięcia od siły dla różnych klejów (E – żywica epoksydowa, A – klej akrylowy, S – silikon) [1,21]

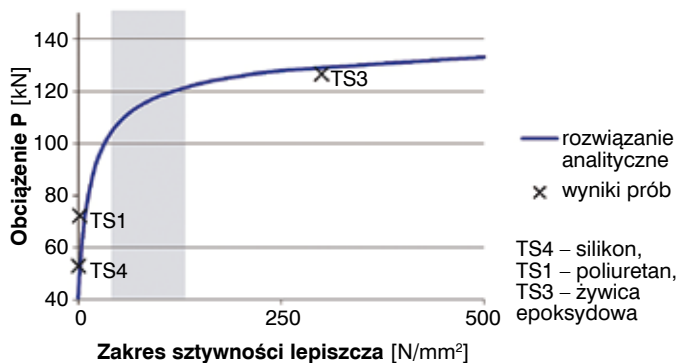
Zachowanie elementu zespolonego, w którym zespolenie odbywa się przez warstwę elastycznego spoiwa nie może być analizowane przy założeniu pełnego zespolenia elementów składowych, tak jak pozwala to czynić norma PN-EN 1994-1-1 [24] dla elementów zespolonych stalowo-betonowych. Nawet przy zapewnieniu nośności spoiny klejowej dla elementu w pełni zespolonego musimy liczyć się w tym przypadku z pewnym poślizgiem w połączeniu. Poślizg ten będzie generował wzrost naprężeń w środku szklanym, co jest zjawiskiem wysoce niebezpiecznym ze względu na brak zdolności szkła do jakiegokolwiek uplastycznienia miejscowego.

Analizę nośności na zginanie dwuteowych belek zespolonych drewniano-szklanych można przeprowadzić jedną z 3 metod:

- analizy numeryczne (ABAQUS, ANSYS),
- analiza analityczna belek złożonych zaproponowana w normie PN-EN 1995-1-1 (metoda γ) [25],
- analiza analityczna belek złożonych zaproponowana przez Pischla [26].

Pierwsza ze wspomnianych metod, najbardziej ogólna, pozwala – przy znajomości parametrów poszczególnych materiałów – przeanalizować zachowanie elementu zespolonego. Ze względu na dużą czasochłonność metody można przypuszczać, że nie znajdzie zastosowania w praktyce projektowej. Pierwsza z metod analitycznych, znana jako metoda γ , została zaproponowana do projektowania belek drewnianych złożonych, w których części połączone podatnie za pomocą łączników mechanicznych [25]. Ideą tego podejścia jest uzależnienie rozkładu naprężeń w częściach składowych belki zespolonej jedynie od sztywności połączenia między nimi. Metoda opracowana przez Karla Möhlera dla belek drewnianych złożonych została następnie adaptowana dla belek zespolonych drewniano-szklanych [21] oraz belek zespolonych stalowo-szklanych [27]. Dla badanych belek zespolonych drewniano-szklanych uzyskano bardzo dobre zgodności wyników metody z eksperymentem [21, 28], natomiast dla badanych belek stalowo-szklanych zgodność ta była nieco gorsza.

Lepszą zgodność wyników z eksperymentem dla belek zespolonych stalowo-szklanych uzyskano dla drugiej z wymienionych metod opracowanej przez Pischla [26]. Metoda ta została opracowana, podobnie jak metoda γ , dla belek drewnianych złożonych. Podstawową różnicą w stosunku do poprzedniego podejścia jest uzależnienie rozkładu naprężeń i sił wewnętrznych w poszczególnych elementach od schematu statycznego belki, a nie wyłącznie od sztywności połączenia między elementami składowymi. Jak dotąd metoda ta nie była stosowana do analizy dwuteowych belek zespolonych drewniano-szklanych. W badaniach prowadzonych dla belek zespolonych stalowo-szklanych w próbie czteropunktowego quasi-statycznego zginania autorzy uzyskali bardzo dobrą dokładność naprężeń wyznaczonych metodą Pischla w odniesieniu do eksperymentu



Rys. 6. Zależność nośności belki od sztywności lepiszcza opracowana przez Ungermann i Pickewinkel w pracy [27] na podstawie rozwiązania analitycznego z pracy [26]

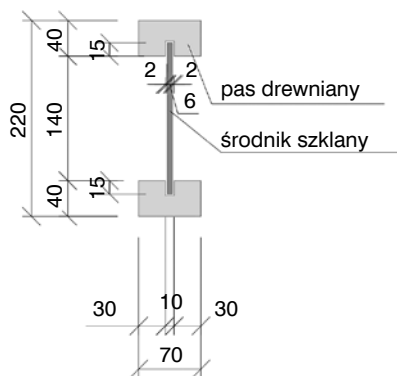
(rys. 6). Na wykresie autorzy porównali nośności belek w odniesieniu do sztywności kleju łączącego elementy składowe. W każdej z badanych belek pierwszy ulegał zniszczeniu środek szklany, tak więc pośrednio wykres obrazuje zgodność naprężeń maksymalnych w środku uzyskanych w toku analiz, a naprężeniami rzeczywistymi w materiale [27].

4. Weryfikacja doświadczalna

W celu przeanalizowania słuszności obu podejść analitycznych zaproponowano analizę dwóch belek zespolonych drewniano-szklanych o identycznych gabarytach (rys. 7), różniących się jedynie schematem obciążenia. Belki zostały poddane analizie numerycznej Metodą Elementów Skończonych w programie ABAQUS CAE, a następnie przeprowadzono dla nich analizę analityczną z wykorzystaniem metody γ oraz metody Pischla. Pasy belki zostały zbudowane z drewna jodłowego klasy C22 o parametrach zaczerpniętych wprost z normy [29]. Środek szklany to szyba ze szkła sodowego typu float, a całość połączona została klejem poliuretanowym Sika®PM, szeroko omówionym w opracowaniu [31]. Najważniejsze parametry materiałów zestawiono w tabeli 1. Drewno, jako materiał anizotropowy, zostało zaimplementowane do programu obliczeniowego za pomocą trzech modułów Younga, trzech modułów Kirchhoffa oraz sześciu współczynników Poissona zgodnie z [32], natomiast w tabeli podano jedynie najistotniejszy z punktu widzenia prowadzonych analiz moduł Younga wzdłuż włókien.

Tabela 1. Parametry stosowanych materiałów

	Drewno C22	Szko float	Poliuretan PM
Moduł Younga	10 GPa (wzdłuż włókien)	70 GPa	4.65 MPa
Współczynnik Poissona	-	0.2	0.498



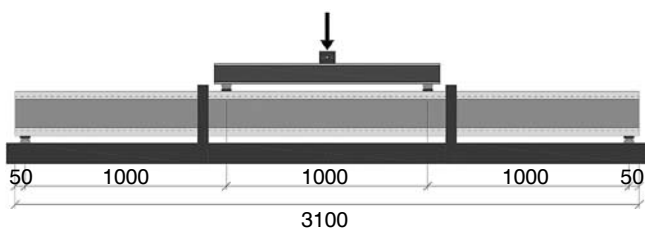
Rys. 7. Przekrój belki zespolonej drewniano-szklanej poddanej analizie

5. Analiza nośności belek obciążonych dwiema siłami skupionymi

Pierwszą z analizowanych belek jest element obciążony w sposób charakterystyczny dla badań laboratoryjnych, który w teorii zapewnia brak wpływów sił ścinających na zniszczenie elementu, a mianowicie czteropunktowe zginanie. Wymiary belki oraz dokładny schemat statyczny przedstawiono na rysunku 8.

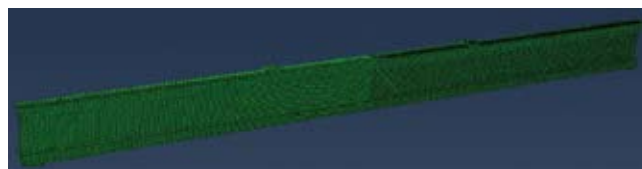
Model numeryczny belki został zbudowany jako model przestrzenny o rzeczywistych wymiarach wszystkich elementów składowych. Wielkość zastosowanego elementu skończonego dla pasów oraz środka szklanego to 5 mm, natomiast dla 2 mm warstwy kleju – 2 mm (rys. 9). Użyto elementów izometrycznych sześciennych o 20 węzłach z hybrydowym sformułowaniem równań wewnątrz elementu skończonego. Układ został obciążony dwiema siłami skupionymi (rys. 8) o wartościach 2 kN każda. Ze względu na podwójną symetrię układu analizie numerycznej poddano jedynie ćwiartkę modelu przy założeniu odpowiednich więzów odwzorowujących symetrię układu.

Po przeprowadzeniu analizy numerycznej belki zginanej zaobserwowano, że mimo iż moment globalny między siłownikami ma stałą wartość, to rozkład naprężeń normalnych na tym odcinku nie jest stały (rys. 10, rys.

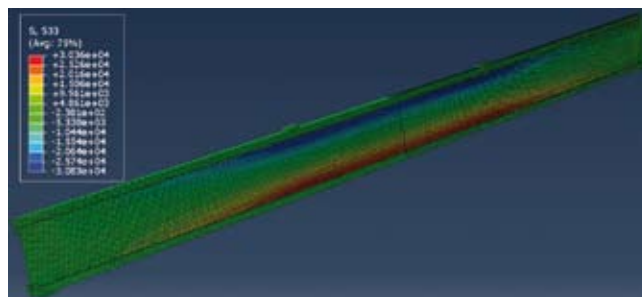


Rys. 8. Schemat statyczny belki

12). Na mapie naprężeń widać, że największa koncentracja, a co za tym idzie maksymalne naprężenia normalne nie są stałe na odcinku stałego momentu globalnego. Naprężenia w przekroju krytycznym szkła pokazano na wykresie (rys. 11). Maksymalne naprężenie wyniosło



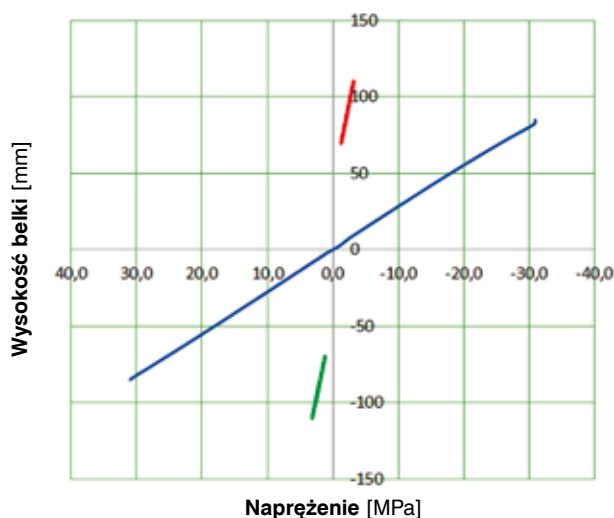
Rys. 9. Widok modelu numerycznego belki



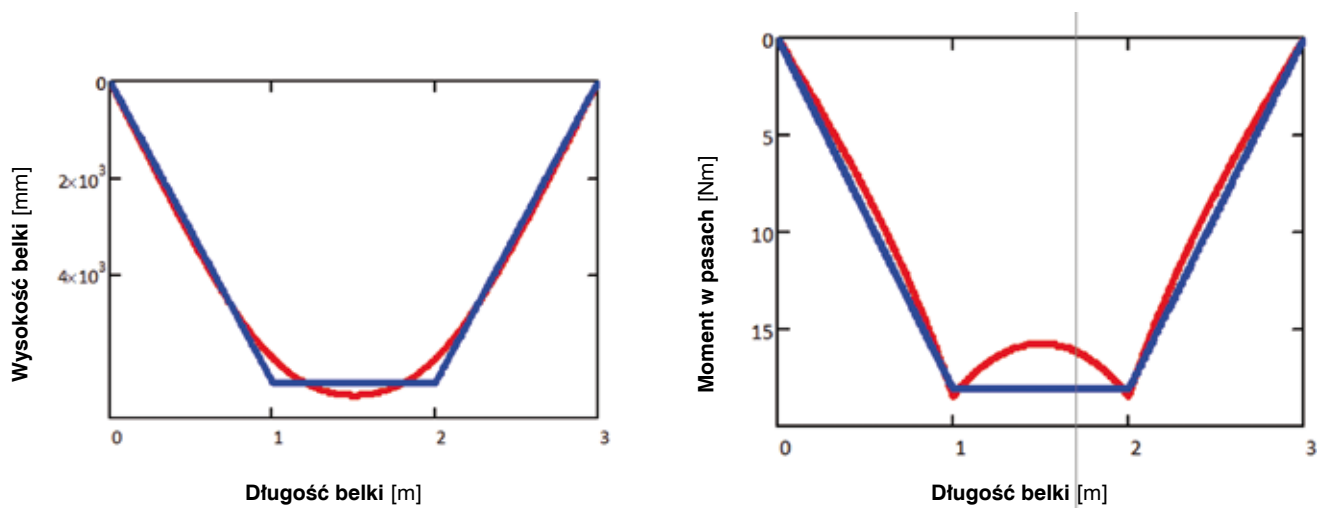
Rys. 10. Naprężenia normalne do przekroju poprzecznego belki

dla badanego przypadku 31 MPa (wartości odczytana w punktach Gaussa, a następnie ekstrapolowana do krawędzi środka). Lokalną koncentrację naprężeń normalnych w środniku belek zespolonych drewniano-szklanych potwierdzają również badania eksperymentalne takich elementów [17, 20, 21]. We wszystkich wspomnianych badaniach pierwsze rysy w szklanych środnikach pojawiały się zawsze pod któryś z siłowników po stronie włókien rozciąganych.

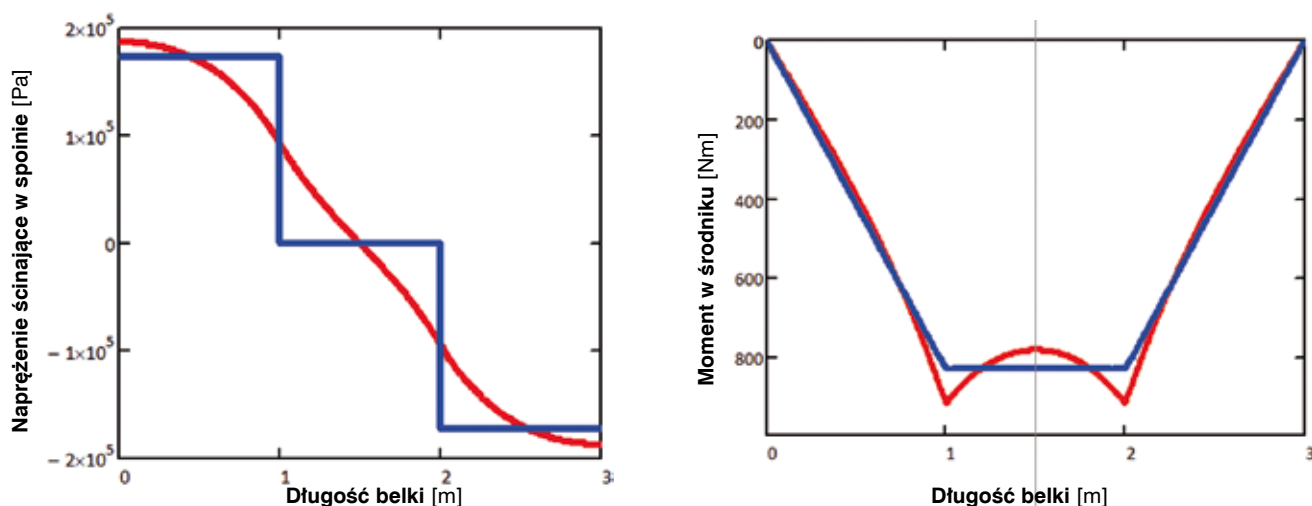
W celu znalezienia optymalnego rozwiązania analitycznego problemu skorzystano z dwóch metod. Metoda γ , której istotą jest obliczenie sprowadzonej sztywności giętej całej belki, wzory podano wprost w normach [25] oraz metody Pischla, która uzależnia rozkład naprężeń



Rys. 11. Rozkład naprężeń normalnych w przekroju bezpośrednio pod siłownikiem (wartości odczytano w punktach Gaussa)



Rys. 12. Porównanie rozkładu siły osiowej i momentu zginającego w pasach drewnianych. Wykres czerwony przedstawia wartości policzone metodą Pischla, wykres niebieski wartości policzone metodą γ



Rys. 13. Porównanie rozkładu naprężenia ścinającego w spoinie i momentu zginającego w środku szklanym. Wykres czerwony przedstawia wartości policzone metodą Pischla, wykres niebieski wartości policzone metodą γ

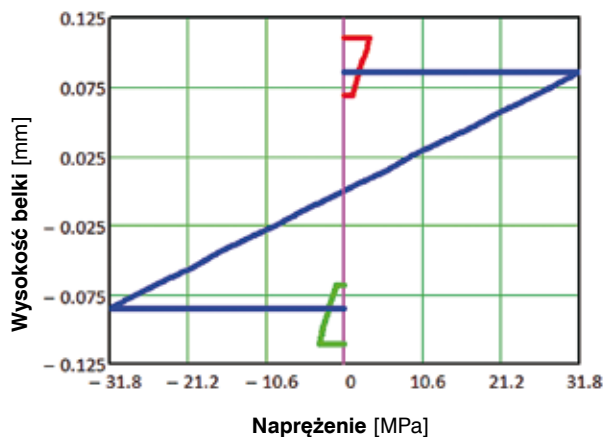
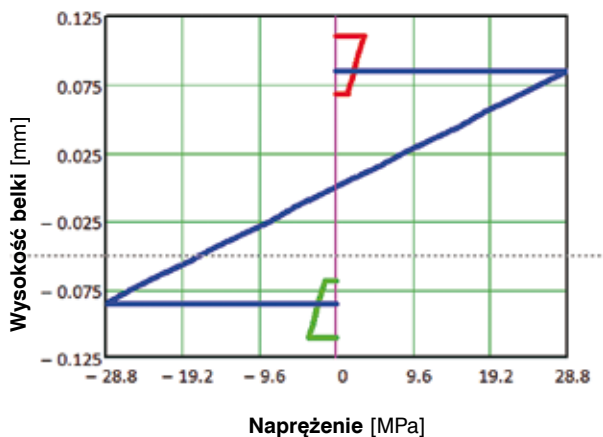
w przekroju również od schematu styčnego elementu. Na potrzeby analizowanego przypadku wyprowadzono wzory dla rozkładu sił wewnętrznych oraz naprężeń (rys. 12 i rys. 13).

Porównując powyższe wykresy z wynikami analizy numerycznej, wnioskować można, że metoda Pischla nieco dokładniej przedstawia rzeczywisty rozkład sił wewnętrznych w elementach składowych belki. Lokalny pik momentu zginającego w środku odpowiada za maksymalne naprężenie rozciągające w tym miejscu. Dla przekrojów krytycznych, tj. w miejscach przyłożenia sił, stworzono również wykresy rozkładu naprężeń normalnych (rys. 14). Widać na nich, że mimo takiego samego rozkładu momentu globalnego w elemencie wartości naprężeń w środku z metody Pischla są znacznie większe od tych wyznaczonych metodą γ . Wartość maksymalna naprężenia wyznaczonego metodą γ wynosi 28,8 MPa, co daje zaniżenie wartości względem modelu numerycznego o 7,1%, natomiast wartość naprężenia dla

metody Pischla wynosi 31,8 MPa, co daje przeszacowanie względem modelu numerycznego rzędu 2,6%.

6. Belka obciążona równomiernie

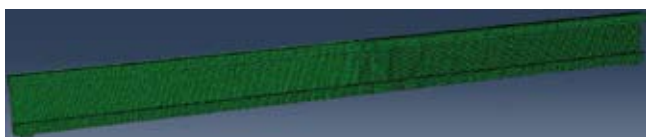
Drugą analizę przeprowadzono dla belki o identycznych gabarytach i sposobie podparcia, ale obciążonego w sposób równomierny. Podobnie jak poprzednio, belka została poddana analizie numerycznej Metodą Elementów Skończonych w programie ABAQUS CAE, a następnie przeprowadzono dla niej analizę analityczną z wykorzystaniem metody γ oraz metody Pischla. Model numeryczny o takich samych parametrach jak poprzednio przedstawiono na rysunku 15. Układ został obciążony obciążeniem równomiernie rozłożonym o intensywności 1,778 kN/m. Wartość obciążenia została dobrana w ten sposób, aby pola powierzchni pod wykresem momentów dla przypadku z dwiema siłami skupionymi oraz dla obciążenia równomiernie rozłożonego były takie same. Ze względu na podwójną symetrię



Rys. 14. Rozkład naprężeń w przekroju pod siłownikiem (1/3 rozpiętości belki) dla analizy metodą γ (lewa) i metodą Pischla (prawa)

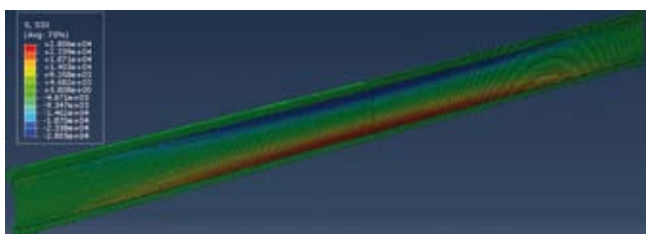
układu analizie numerycznej poddano jedynie ćwiartkę modelu przy założeniu odpowiednich więzów odwzorowujących symetrię układu.

Dla przeprowadzonej analizy przedstawiono mapę naprężeń normalnych po długości elementu (rys. 16). Naprężenia w przekroju środkowym belki pokazano na wykresie (rys. 17). Maksymalne naprężenie wyniosło dla badanego przypadku 28,1 MPa (wartości szczytano w punktach Gaussa, a następnie ekstrapolowano do krawędzi środnika).

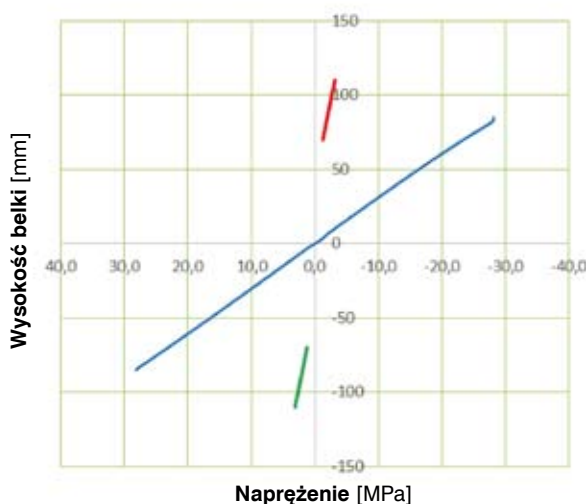


Rys. 15. Widok modelu numerycznego belki

Porównując powyższe wykresy z wynikami analizy numerycznej, wnioskować można, że obie metody analizy belek zespolonych drewniano-szklanych w poprawny sposób opisują rozkład naprężeń w elemencie pod obciążeniem równomiernie rozłożonym. Dla przekroju środkowego belki stworzono również wykresy rozkładu naprężeń normalnych (rys. 10). Widać na nich, że obie metody analityczne dają podobne wartości naprężeń maksymalnych w elemencie. Wartość maksymalna naprężenia normalnego w środniku wyznaczonego



Rys. 16. Naprężenia normalne do przekroju poprzecznego belki

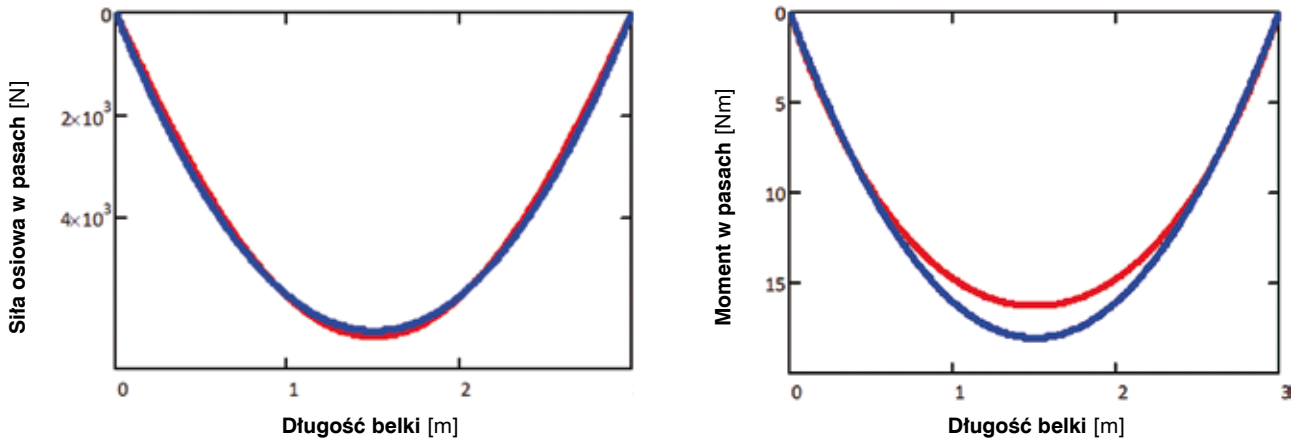


Rys. 17. Rozkład naprężeń normalnych w środku rozpiętości belki (wartości odczytano w punktach Gaussa). Na potrzeby analizowanego przypadku wyprowadzono wzory dla rozkładu sił wewnętrznych oraz naprężeń (rys. 18, rys. 9)

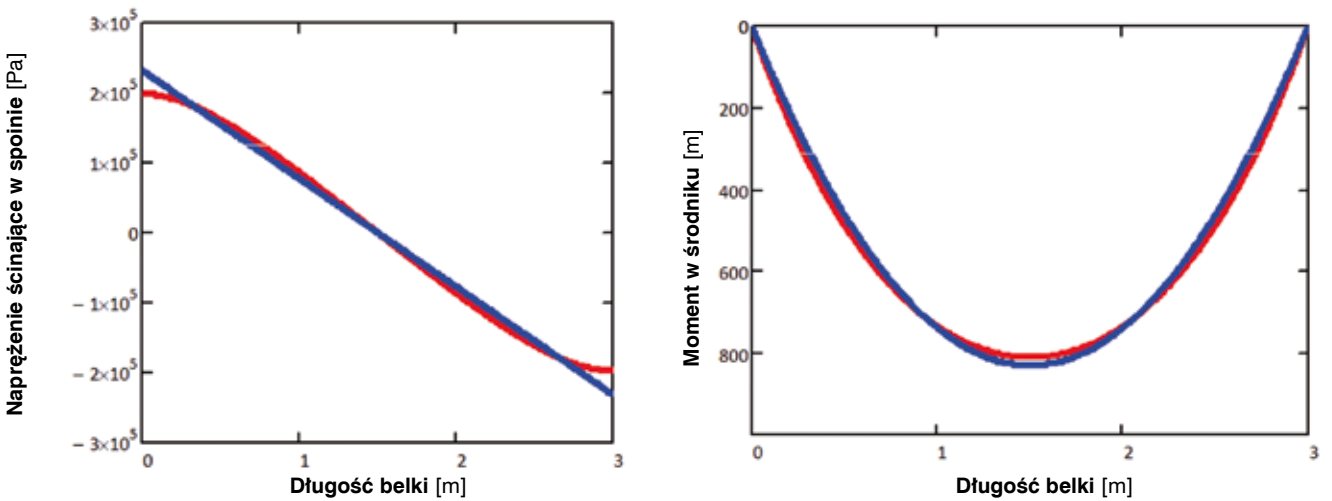
metodą γ wynosi 28,8 MPa, co daje przeszacowanie wartości względem modelu numerycznego o 2,5%, natomiast wartość naprężenia dla metody Pischla wynosi 28,1 MPa, co daje pełną zgodność z wartością wyznaczoną Metodą Elementów Skończonych.

7. Podsumowanie

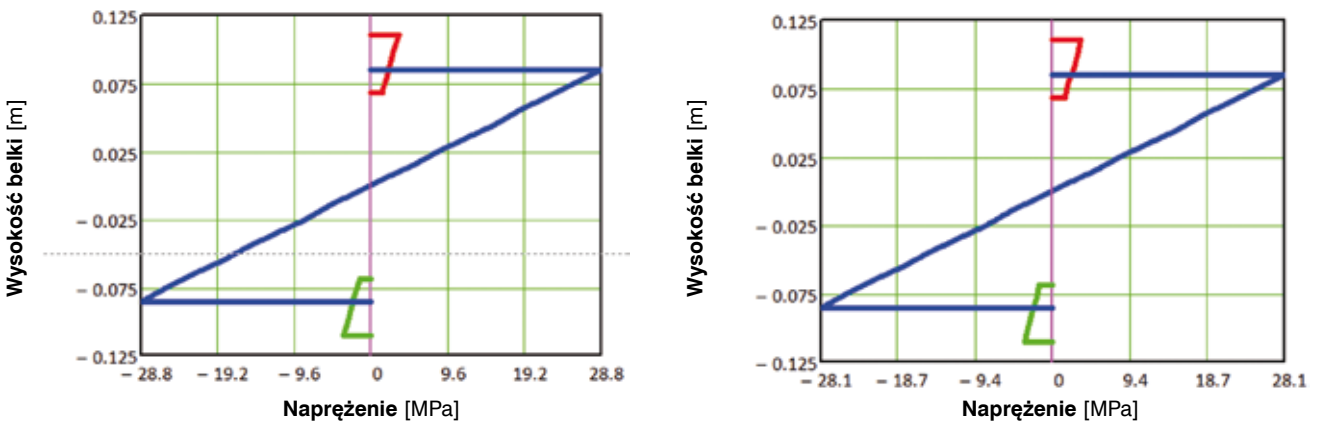
W artykule zaprezentowano metody projektowania dwuteowych belek zespolonych drewniano-szklanych ze szczególnym naciskiem na metody analityczne. Otrzymane wyniki analiz analitycznych skonfrontowano z wynikami obliczeń pakietem MES oraz wynikami badań doświadczalnych, będących podstawą do weryfikacji metod projektowych.



Rys. 18. Porównanie rozkładu siły osiowej i momentu zginającego w pasach drewnianych. Wykres czerwony przedstawia wartości policzone metodą Pischla, wykres niebieski wartości policzone metodą γ



Rys. 19. Porównanie rozkładu naprężenia ścinającego w spoinie i momentu zginającego w środkniku szklanym. Wykres czerwony przedstawia wartości policzone metodą Pischla, wykres niebieski wartości policzone metodą γ



Rys. 20. Rozkład naprężeń w przekroju środkowym belki dla analizy metodą γ (lewa) i metodą Pischla (prawa)

Obie z zaprezentowanych metod analitycznych projektowania dwuteowych belek zespolonych drewniano-szklanych pozwoliły na uzyskanie dobrej zgodności wartości naprężeń z wartościami uzyskanymi z badań

i analiz numerycznych. Nieco lepszą dokładność wyników uzyskano metodą Pischla, a mianowicie wykazano, że błąd tej metody w stosunku do modelu numerycznego to ok. 2,5% dla obciążenia w postaci dwóch

sił skupionych. Dla obciążenia równomiernego metodą Pischla wyznaczono identyczne wartości naprężeń jak podczas analizy numerycznej. Dla tych samych przypadków obciążeniowych naprężenia wyznaczone metodą γ okazały się niedoszacowane dla obciążenia siłami skupionymi (błąd ok. 7%) oraz nieco przeszacowane dla obciążenia równomiernie rozłożonego. Metoda γ , ze względu na prostotę znalazła dotychczas szersze zastosowanie w projektowaniu belek złożonych, a jej interpretacja pojawiła się również w normie Eurokod 5 [25]. Autor uważa, że metoda ta jest odpowiednia do analizy belek zespolonych drewniano-szklanych obciążonych w sposób równomierny. Mimo dużej wartości materiałowego współczynnika bezpieczeństwa dla szkła (wg projektu normy europejskiej wynosi 1,8), elementy obciążone punktowo zaleca się poddać dokładniejszej analizie, ze względu na możliwość pojawienia się lokalnych konsternacji naprężeń rozciągających w szkłe, szczególnie niebezpiecznych dla tego materiału.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Louter C, van Heusden JF, Veer F, Vamersky J, de Boer HR, Versteegen J., Post-Tensioned Glass Beams. Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures n.d.: 597-8
- [2] Louter C., Adhesively bonded reinforced glass beams. Heron 2007: 31-57
- [3] Bedon C, Louter C., Exploratory numerical analysis of SG-laminated reinforced glass beam experiments. Engineering Structures 2014: 457-68
- [4] Belis J, Louter C, Verfaillie K, Van Impe R, Callewaert D., The effect of post-tensioning on the buckling behaviour of a glass T-beam., Monahium: 2006, s. 129-36
- [5] Ølgaard AB, Nielsen JH, Olesen JF., Design of Mechanically Reinforced Glass Beams – Modelling and Experiments. Structural Engineering International 2009: 130-6
- [6] Louter C, Veer FA, Belis J., Redundancy of reinforced glass beams: temperature, moisture and time dependent behaviour of the adhesive bond., Faculty of Architecture, TU Delft: 2008, s. 479-91
- [7] Freytag B., Glass-concrete composite technology. Structural Engineering International 2004
- [8] Wellershoff F, Gerhard S., Structural Use of Glass in Hybrid Elements: Steel-Glass-Beams, Glass-GFRP-Plates., Tempere: 2013, s. 268-70
- [9] Hamm J., Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas. Rozprawa doktorska. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000
- [10] Hamm J., Development of timber-glass prefabricated structural elements., Lahti: 2001, s. 41-6
- [11] Kreher K., Load introduction with timber. Timber as reinforcement for glued composites (shear-walls, I-beams) structural safety and calculation-model., Portland: 2006
- [12] Kreher K., Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas. Rozprawa doktorska. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004
- [13] Kreher K, Netterer J., Timber-glass-composite girders for a hotel in Switzerland. Structural Engineering International 2004: 149-51
- [14] Cruz P, Pequeno J. Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour and Architectural Solutions., Delft: 2008, s. 439-49
- [15] Blyberg L, Serrano E, Enquist B, Sterley M., Adhesive joints for timber/glass applications – Part 1: Mechanical properties in shear and tension. n.d.
- [16] Blyberg L, Serrano E, Enquist B, Sterley M., Adhesive joints for timber/glass applications – Part 2: Test evaluation based on FE-analyses and contact free deformation measurements. n.d.
- [17] Blyberg L, Serrano E., Timber/Glass adhesively bonded I-beams. n.d.
- [18] Blyberg L, Lang M, Lundstedt K, Schander M, Serrano E, Silverhielm M, et al. Glass, timber and adhesive joints - Innovative load bearing building components. Construction and Building Materials 2014: 470-8
- [19] Blyberg L, Serrano E, Enquist B, Sterley M., Adhesive joints for structural timber/glass applications: Experimental testing and evaluation methods. International Journal of Adhesion & Adhesives 2012: 76-87
- [20] Kozłowski M, Serrano E, Enquist B., Experimental investigation on timber-glass composite I-beams., Londyn: Taylor & Francis Group, 2014
- [21] Kozłowski M., Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, 2014
- [22] Dorn M, Kozłowski M, Serrano E., Design approaches for timber-glass beams., Düsseldorf: 2014, s. 1-9
- [23] Rodacki K., Belki zespolone drewniano-szklane – przegląd zagadnienia n.d.
- [24] PN-EN 1994-1-1 Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków n.d.
- [25] PN-EN 1995-1-1: 2010 Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków, PKN, 2010
- [26] Pischl R., Die Berechnung Zusammengesetzter Holzerner Biegetrager auf Grund der Elastischen Verbundtheorie. Rozprawa doktorska. Technischen Hochschule Graz, 1966
- [27] Ungermann D, Preckwinkel E. Structural behaviour of hybrid steel-glass beams., TU Delft: Maj 20110, s. 485-95
- [28] Kozłowski M., Hybrid glass beams. Review of research projects and applications. ACEE Journal 2012
- [29] PN-EN 338: 1999 Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości, PKN, 1999
- [30] Schittich C, et al. Glass Constuction Manual. 2nd revised and expanded edition. Monahium: Birkhauser, 2007
- [31] Kwiecień A., Polimerowe złącza podatne w konstrukcjach murewowych i betonowych. Kraków, Wydawnictwo PK, 2012
- [32] Bergman R., Wood handbook. Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: Forest Products Laboratory, 2010

Za publikację w miesięczniku „Przegląd Budowlany”
uzyskuje się 5 punktów
zgodnie z komunikatem MNiSW
 z dnia 23.12.2015 roku, wykaz B, pozycja 1381.

Serdecznie zapraszamy autorów do publikowania w Przeglądzie Budowlanym.