

BUILDER
FOR THE
FUTUREBUILDER
FOR THE
YOUNG
ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

Konrad Rodacki, Małgorzata Mieszczak
Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Krakowska

OPIEKUN NAUKOWY
prof. dr hab. inż. **Kazimierz Furtak**
Instytut Materiałów i Konstrukcji
Budowlanych, Politechnika Krakowska

Od około dwóch dekad obserwowany jest coraz większy wzrost zainteresowania szkłem jako konstrukcyjnym materiałem (nośnym). Jest to tendencja o tyle zrozumiała, że dla użytkowników oraz architektów przezroczyste elementy nośne nadają obiektom budowlanym lekkości i efektownego wyglądu. W związku z rosnącą popularnością w literaturze można znaleźć coraz więcej badań wszelkiego rodzaju konstrukcyjnych elementów szklanych, najczęściej w zespoleniu z innymi materiałami. Jednym z typów takich elementów są dwuteowe belki zespolone drewniano-szklane (rys. 1.). Pozwalają one wykrywać najsilniejsze cechy obu materiałów. W przypadku szkła jest to sztywność i duża wytrzymałość na ściskanie, natomiast w przypadku drewna duża ciągliwość, zdolność do uplastycznienia i łatwość obróbki. Połączenie tych dwóch materiałów odbywa się przez warstwę klejową. Głównym problemem pojawiającym się podczas doboru kleju zespalającego jest jego wymagana sztywność, która ze względu na różny charakter obciążeń jest diametralnie różna. Dla obciążeń statycznych najlepsze są kleje o dużej sztywności zapewniające pełne zespolenie, a dla obciążeń dynamicznych (wielokrotnie zmiennych lub sejsmicznych) kleje o małej sztywności zabezpieczające szkło przed zniszczeniem.

Analiza belek dwuteowych

Jak dotąd do analizy belek dwuteowych zespolonych drewniano-szklanych zaproponowano dwa podejścia analityczne. Pier-

BELKI ZESPOLONE DREWNIANO- -SZKLANE

W świetle przeprowadzonych dotychczas badań pomysł łączenia szkła z drewnem przy pomocy różnego rodzaju klejów konstrukcyjnych wydaje się optymalną metodą kształtowania bezpiecznych, a zarazem efektywnych elementów nośnych.

szsze z nich jest znane jako metoda γ i używana do projektowania belek drewnianych połączonych, w których części połączono podatnie za pomocą łączników mechanicznych [2]. Drugą metodą jest metoda opracowana przez Pischl'a [3], dla której rozkład naprężeń i sił wewnętrznych w elementach belki zespolonej zależy również od schematu statycznego belki. Szerzej obie metody analizy belek zespolonych drewniano-szklanych omówiono w pracy [4]. Pomimo małego zaawansowania wiedzy na temat tego typu elementów są one już stosowane w realizacjach (rys. 2.).

Przebieg badań

Badania belek zespolonych drewniano-szklanych podejmowało jak dotąd kilku badaczy [1, 5–18], a prowadzone przez nich badania różniły się:

- sposobem konstrukcji belek – szyba wklejana w rowek lub listwy doklejane do boków szklanego środnika (rys. 3.);
- rodzajem zastosowanego szkła – badano zarówno belki ze środnikami ze szkła *float* (*annealed*), ze szkła półhartowanego, ze szkła hartowanego oraz szkła zespolonego na folii PVB;
- rodzajem materiału pasów – najczęściej stosowano drewno iglaste, ale prowadzone były też badania elementów o pasach z LVL;
- wielkością (skalą) badanych elementów.

Wszystkie wymienione wyżej badania skomentowano szerzej w publikacjach [19, 20], a w niniejszym artykule przytoczono tylko najważniejsze wnioski.

Wszystkie wymienione badania polegały na obciążaniu quasi-statycznym elementów badawczych w próbie czteropunktowego zginania, aż do całkowitego zniszczenia elementów. We wszystkich prowadzonych badaniach, gdzie środnik zrobiony był ze szkła typu *float* (*annealed*), zaobserwowano dwie główne cechy tak przygotowanej konstrukcji: równomierny odstęp między rysami w szkłe (rys. 4.) oraz znaczną nośność postkrytyczną takiego elementu, sięgającą nawet 200% siły rysującej szkło (rys. 4.). Zastosowanie szkła *float* przy tych belkach zapewnia utrzymanie sztywności elementu nawet po zarysowaniu szkła ze względu na efekt zakleszczania się dużych kawałków szyby i dalszego przenoszenia ścinań. Drewno zapewnia ciągliwość i tworzy „mosty” dla rysy w szkłe. We wszystkich badaniach belek zespolonych-drewniano szklanych, gdzie środnik wykonany był ze szkła *float* (*annealed*), belki finalnie wyczerpały swą nośność przez zniszczenie pasa drewnianego (rys. 5.). Podobnej cechy nie wykazywały belki ze środnikami ze szkła półhartowanego i hartowanego, w których pierwsze zarysowanie szkła powodowało całkowite zniszczenie elementu.

Cruz i Pequeno [8] zaobserwowali podczas swoich badań, że dla mniej sztywnych połączeń klejowych (polimerowych) rozkład zarysowań w szkłe jest bardziej równomierny, a skoki na krzywej obciążenie – przemieszczenie łagodniejsze. Powyższe cechy prowadzą do wniosku, że dla obciążeń statycznych doraźnych najbardziej niebezpieczne, bo prezentujące najbardziej gwałtowny charak-

ter zniszczenia, są połączenia sztywne drewna ze szkłem.

Znaczny wpływ na nośność belek zespolonych drewniano-szklanych ma sposób wykończenia krawędzi szkła, który, jak pokazały wcześniejsze badania [21, 22], ma znaczący wpływ na nośność szkła przy zginaniu.

Opis badań autorskich

W celu poszerzenia dotychczasowej wiedzy na temat belek zespolonych drewniano-szklanych zaproponowano przeprowadzenie badań belek pod obciążeniem wielokrotnie zmiennym w celu weryfikacji odporności elementów na tego typu obciążenia oraz sprawdzenia ubytku nośności elementów w próbie zginania czteropunktowego pod obciążeniem quasi-stalym po określonej ilości cykli obciążenie – odciążenie.

Przedmiotem badań jest 6 belek zespolonych drewniano-szklanych o wymiarach 70 x 220 x 3100 mm (rys. 6). Trzy belki zostały poddane badaniom pod obciążeniem wielokrotnie zmiennym w próbie czteropunktowego zginania i trzy belki próbie quasi-statycznego czteropunktowego zginania. Belki zostały wykonane jako dwuteowe o drewnianych pasach i szklanym środkiem połączonej spoiną klejową. Pasy belek wykonano z drewna konstrukcyjnego jodłowego klasy C22 wg normy [23], a środek z szyby laminowanych ze szkła float (annealed) o wcześniej wypolerowanych krawędziach wg [24]. Zewnętrzne wymiary elementów to:

- 6,68 x 170 x 3100 mm dla środka szklanego,
- 70 x 40 x 3100 mm dla pasów drewnianych.

Środek wklejono w wyfrezowane żłobienia w pasach drewnianych za pomocą kleju poliuretanowego Sika®PS. W celu zapewnienia jak największej dokładności wykonania połączenia i prostoliniowości elementów sklejaćie prowadzono na specjalnie do tego przygotowanym stole z uchwytami (rys. 7).

Dla wykonanych belek zespolonych przygotowano również model numeryczny w pakiecie Metody Elementów Skończonych ABAQUS (rys. 8). Model numeryczny pozwoli na walidację wyników badań doświadczalnych, a następnie może być podstawą do zbudowania szerszych zależności nośności elementu od poszczególnych parametrów. Stworzenie takich zależności będzie jednak wymagało wykonania szerszych badań o większej liczbie i różnorodności elementów badawczych.

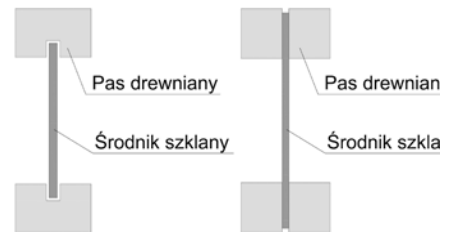
Przewidziano obciążenie wielokrotnie zmiennie dynamiczne o częstotliwości 1 Hz. Przewidziano minimalną liczbę cykli równą 100 000. Obciążenie dobrano jako jednoznaczowe, w ten sposób, aby element pracował z 40% wyężeniem przy obciążeniu siłownikiem „w dół”, a następnie powracał do położenia zero. Poziomy wyężenie zostały wyznaczone na podstawie analiz projektowanej belki o rzeczywistych rozmiarach (rozpiętość 7 m) dla narzuconych normowo współczynników obliczeniowych. Obciążenia i rozmiary belki dobrano



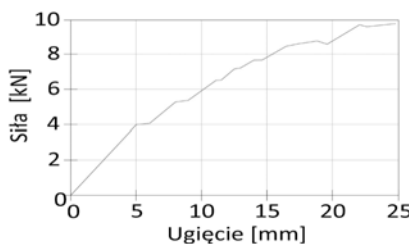
Rys. 1. Belki drewniano-szklane (po lewej) [1], sklejana belka drewniano-szklana do badań własnych (opracowanie własne)



Rys. 2. Konstrukcja stropodachu w hotelu Palafitte w Szwajcarii [5]



Rys. 3. Przekrój belki z pasami wykonanymi w postaci doklejonych do szyby listew drewnianych [6] (po lewej), przekrój belki ze środkiem wklejonym w pasy drewniane [8] (po prawej)



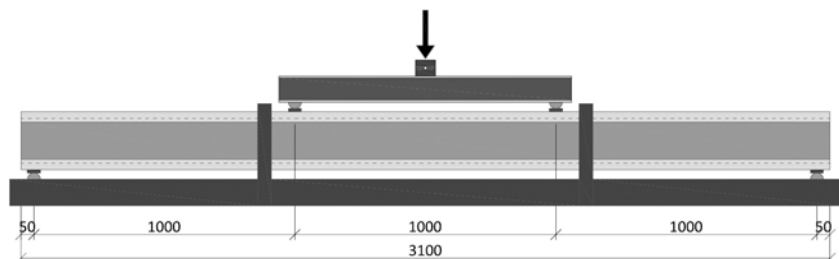
Rys. 4. Ugięcie w zależności od siły belek zespolonych dwuteowych drewniano-szklanych (po lewej), widok zniszczonej belki (po prawej) [6]



Rys. 5. Obraz wyczerpania nośności zespolonej belki drewniano-szklanej przez rozerwanie pasa drewnianego [13], [15], [16]



Rys. 7. Widok stanowiska montażowego podczas łączenia belek



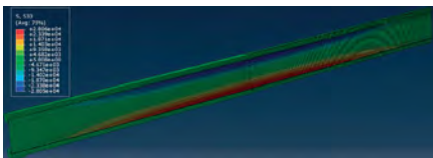
Rys. 6. Widok belki zespolonej dwuteowej zbudowanej do badań pod obciążeniem wielokrotnie zmiennym

w ten sposób, aby uzyskać wyężenie elementów dla najbardziej niekorzystnej kombinacji obciążeń na poziomie prawie 100%. Następnie dla belki o rozpiętości jak poprzednio przeprowadzono analizę dla tych samych obciążeń przy założeniu charakterystycznych właściwo-

ści materiałowych. W ten sposób uzyskano wartość wyężenia równą prawie 40% dla charakterystycznych właściwości materiałowych przy obciążeniu (ciężar własny + śnieg) oraz 10% przy odciążeniu (ciężar własny + ssanie wiatru). Ze względu na przewidywane zastosowania

Innowacyjne elementy nośne

Dwułteowe belki zespolone drewniano-szklane pozwalają wykorzystać najsilniejsze cechy obu materiałów. W przypadku szkła – sztywność i dużą wytrzymałość na ściskanie, w przypadku drewna – dużą ciągliwość, zdolność do uplastycznienia i łatwość obróbki. Połączenie tych dwóch materiałów odbywa się przez warstwę klejową.



Rys. 8. Naprężenia normalne do przekroju poprzecznego belki



Rys. 9. Widok zniszczonej szyby szklanej w czasie badań szkła

wanie badanych elementów głównie jako element nośny stropodachów, takie obciążenia wydawały się najwłaściwsze. Analizę przeprowadzono dla pojedynczej belki o stałych wymiarach oraz dla jednej strefy klimatycznej.

Jak dotąd opracowano wyniki z badań materiałów wykorzystanych do budowy belek, z których na największą uwagę zasługują badania szkła laminowanego wykonanego przez firmę FAKRO z Nowego Sącza. Ze względu na zastosowanie folii PVB między dwoma szymbami ze szkła float i sterowaniu przemieszczeniem podczas badania, szyba poddana próbie czteropunktowego zginania (szyba ustawiona „na sztorc”) w momencie zniszczenia zachowała pełną integralność, nie powodując rozprysku niebezpiecznych fragmentów (rys. 9).

Wnioski

W świetle przeprowadzonych dotychczas badań pomysł łączenia szkła z drewnem przy pomocy różnego rodzaju klejów konstrukcyjnych wydaje się optymalną metodą kształtowania bezpiecznych, a zarazem efektywnych elementów nośnych. Łączenie kruchego materiału, jakim jest szkło, z materiałem o wysokiej ciągliwości, podobnie jak w przypadku konstrukcji żelbetowych, zabezpiecza przed nagłym zniszczeniem elementów, pozwala na dalsze przenoszenie obciążeń nawet po wystąpieniu uszkodzeń szkła oraz ułatwia sposób montażu elementów, zabezpieczając element szklany przed punktowymi dociskami.

Zarówno drewno, jak i szkło są stosunkowo tanie i charakteryzują się dużym stosunkiem wytrzymałości do gęstości objętościowej. Zaproponowane przez autorów badania belek zespolonych pozwalają poszerzyć dotychczas zdobytą wiedzę w zakresie tak innowacyjnych elementów nośnych, jak belki drewniano-szklane. Ponadto do budowy belek użyto materiałów bezpiecznych (szkło laminowane) i łatwo dostępnych, a połączenie między poszczególnymi elementami wykonano przy użyciu kleju poliuretanowego najnowszej generacji, który znajduje coraz większe zastosowanie w nawiązaniu konstrukcji murowych i betonowych.

Podziękowania

Autorzy artykułu kierują szczególne podziękowania za uzyskaną pomoc w pozyskaniu materiałów, konstrukcji belek i przeprowadzenia badań, do firmy FAKRO Sp. z o. o. za udostępnienie szkła, do Bogusława Zajęca i Antoniego Rodackiego za pomoc w przygotowaniu elementów badawczych oraz do ekipy Laboratorium Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej za pomoc w przeprowadzeniu badań. ■

Streszczenie. W artykule omówiono nową i innowacyjną koncepcję wykonania belek nośnych z wykorzystaniem drewna oraz szkła. W artykule pokrótce opisano dotychczas przeprowadzone badania w zakresie wymienionych belek ze zwróceniem uwagi na najważniejsze wnioski dotyczące budowy, użytych materiałów oraz bezpieczeństwa tego typu konstrukcji. W kolejnej części artykułu przybliżono plan badań autorskich belek drewniano-szklanych pod obciążeniem wielokrotnie zmiennym wraz z walidacją numeryczną wyników.

Słowa kluczowe: Belki zespolone drewniano-szklane, obciążenie wielokrotnie zmienne

Abstract. COMPOSITE TIMBER-GLASS BEAMS AS INOVATIVE BEARING ELEMENTS. The paper consists of the description of new and innovative concept of constructing bearing beams with timber and glass. There is short description of previous investigations in the paper, with mentioning the most important

conclusions of previous works: way of constructing, used materials and safety of these structures. Further, the own research plan of timber-glass beams under multiple variable loading was described with the numerical validation of the results.

Keywords: Timber-glass composite beams, multiple variable loading

Bibliografia

- [1] Kreher K.: Load introduction with timber. Timber as reinforcement for glued composites (shear-walls, I-beams) structural safety and calculation-model. 9th World Conference on Timber Engineering, Portland 2006.
- [2] PN-EN 1995-1-1: 2010 Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguly ogólne i reguly dotyczące budynków. PKN, 2010.
- [3] Pischl R.: Die Berechnung Zusammengesetzter Holzerner Biegetrager auf Grund der Elastischen Verbundtheorie [rozprawa doktorska], Technischen Hochschule Graz, Graz 1966.
- [4] Rodacki K. i Furtak K.: Metody analityczne projektowania belek zespolonych drewniano-szklanych, „Przegląd Budowlany”, 2016, no 4, s. 24-31.
- [5] Kreher K.: Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas [rozprawa doktorska], École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Szwajcaria 2004.
- [6] Hamm J.: Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas [rozprawa doktorska], École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Szwajcaria 2000.
- [7] Hamm J.: Development of timber-glass prefabricated structural elements, Innovative Wooden Structures and Bridges IABSE Conference 1, Lahti 2001, s. 41-46.
- [8] Cruz P. i Pequeno J.: Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour and Architectural Solutions, Proceedings of the Challenging Glass Conference, Delft 2008, s. 439-449.
- [9] Blyberg L. i in.: Glass, timber and adhesive joints – Innovative load bearing building components, Constr. Build. Mater, 2014, no 55, s. 470-478.
- [10] Blyberg L., Serrano E., Enquist B., i Sterley M.: Adhesive joints for structural timber/glass applications: Experimental testing and evaluation methods, International Journal of Adhesion & Adhesives., 2012, no 35, s. 76-87.
- [11] Blyberg L. i Serrano E.: Timber/Glass adhesively bonded I-beams. Lineaus University.
- [12] Kozłowski M., Serrano E., i Enquist B.: Experimental investigation on timber-glass composite I-beams, Challenging Glass & COST Action TU905 Final Conference, Londyn 2014.
- [13] Kozłowski M.: Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams [rozprawa doktorska], Politechnika Śląska, Gliwice 2014.
- [14] Dorn M., Kozłowski M., i Serrano E.: Design approaches for timber-glass beams, Glass, facade, energy: Engineered Transparency International Conference at Glasstec: Conference on Glass, Glass Technology, Facade Engineering and Solar Energy, Dusseldorf 2014, s. 1-9.
- [15] Hulimka J. i Kozłowski M.: Mechanism of Failure and Post-Breakage Strength of Hybrid Timber-Glass Beams., 10th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Building, Bratysława 2012.
- [16] Kozłowski M. i Hulimka J.: Load-bearing capacity of hybrid timber-glass beams, ACEE J., 2014, no 2, s. 61-70.
- [17] Kozłowski M. i Hulimka J.: Mechanism of Failure and Post-Breakage Strength of Hybrid Timber-Glass Beams., Proceedings of the 10th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, Bratysława 2012.
- [18] Premrov M., Zlatinek M., i Štrukelj A.: Experimental analysis of load-bearing timber-glass I-beam, Construction of Unique Buildings and Structures., 2014, no 4 (19), s. 11-20.
- [19] Rodacki K.: Belki zespolone drewniano-szklane – przegląd zagadnienia, w Zagadnienia aktualne poruszane przez młodych naukowców, t. 2, Kraków, 2016, s. 549-554.
- [20] Rodacki K. i Mieszczak M.: Obciążenia termiczne belek o szklanych środkniku – przegląd. V Ogólnopolska Konferencja Budowlana Studentów i Doktorantów EUROIZYNIER 2015 – referaty, Kraków 2015.
- [21] Veer F. i Zuidema J.: The strenght of glass, effect of edge quality, Faculty of Architecture, TU Delft.
- [22] Veer F., Zuidema J., i Bos F.: The strength and failure of glass in bending, Glass Processing Days, Tempere 2005.
- [23] PN-EN 338: 1999 Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości. PKN, 1999.
- [24] ISO 12543-5:2011(E) Szkło w budownictwie -- Szkło warstwowe i bezpieczne szkło warstwowe -- Część 5: Wymiary i wykończenie obrzeża. PKN, 2012.