

## BELKI ZESPOLONE DREWNIANO-SZKLANE – PRZEGLĄD ZAGADNIENIA

### COMPOSITE TIMBER-GLASS I-BEAMS – CASE STUDY

#### Konrad Rodacki

Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Katedra budowy Mostów i Tuneli  
ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków  
e-mail: konrad.rodacki@gmail.com

**Abstract:** In recent years, there has been carried out an extensive research on the possibilities of the use of glass in combination with other materials as safe surface and members structures. Timber-glass composite I-beams are one of the ideas of built up members with glass as a structural material. Such beams contain glass web and timber flanges. The idea of these beams appeared in 2000. The first serious research and analysis of these beams, in which the glass web is connected to the wooden flanges. The paper focuses on the study of previous studies of timber-glass I-beams. Joints of timber and glass together, differences in stiffness of both materials and capacity in uncracked stage and postcritical load capacity were the main points of the paper. As a summary, the idea of further research on these elements was outlined, resulting from the unrecognized problem of thermal loads, long-term loads and dynamic loads acting on these elements.

**Keywords:** composite beams, timber structures, glass structures.

#### Wprowadzenie

W ostatnich latach prowadzone są szerokie badania nad możliwościami wykorzystania szkła w połączeniu z innymi materiałami jako bezpieczne konstrukcje pomierzchniowe oraz prętowe. Jednym z pomysłów realizacji elementów prętowych wykorzystujący szkło jako element nośny są belki dwuteowe zespolone o szklanym środkniku i drewnianych pasach. Pomysł tego typu belek pojawił się w roku 2000 (rys. 1).

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 zaspolenie, a dla obciążeń dynamicznych (sejsmicznych) kleje o małej sztywności zabezpieczające szkło przed zniszczeniem.



Rys. 1 Drewniano-szklane ściany usztywniające (po lewej), belki drewniano-szklane (po prawej) [15].

#### Opis zagadnienia

Konstrukcje zespolone drewniano-szklane pozwalają wykorzystać najmocniejsze cechy materiałów. W przypadku szkła będzie 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, ze względu na trudności i niebezpieczeństwa związane z otworowaniem szkła i

punktowymi dociskami do szkła. Taka konstrukcja elementu nie zapewni nigdy „pełnego zespolenia” elementów, a więc pełnej zgodności odkształceń. Jak dotąd do analizy belek dwuteowych zespolonych drewniano-szklanych zaproponowano dwa podejścia analityczne. Pierwsze z nich, znane jako metoda  $\gamma$  używana do projektowania belek drewnianych połączonych, w których części połączono podatnie za pomocą

łączników mechanicznych [18]. Metoda ta była szeroko analizowana dla belek zespolonych drewniano-szklanych [11] oraz belek zespolonych stalowo-szklanych [20]. Drugą metodą jest metoda opracowana przez Pischl’a [17], dla której rozkład naprężeń i sił wewnętrznych w elementach belki zespolonej zależy również od schematu statycznego belki.



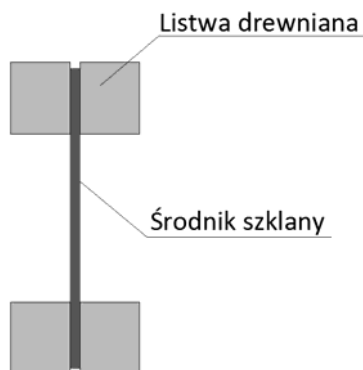
Rys. 2 Konstrukcja stropodachu w hotelu Palafitte w Szwajcarii [Kreher i Netterer 2004].

Belki zespolone drewniano-szklane, ze względu na niepewność stosowanych modeli analitycznych oraz szeroki wachlarz rodzajów klejów łączących drewno ze szkłem są przedmiotem licznych badań. Badania dotyczą głównie nośności i bezpieczeństwa tego typu konstrukcji. Pomimo małego zaawansowania wiedzy na temat tego typu elementów, są one już stosowane w rzeczywistych realizacjach.

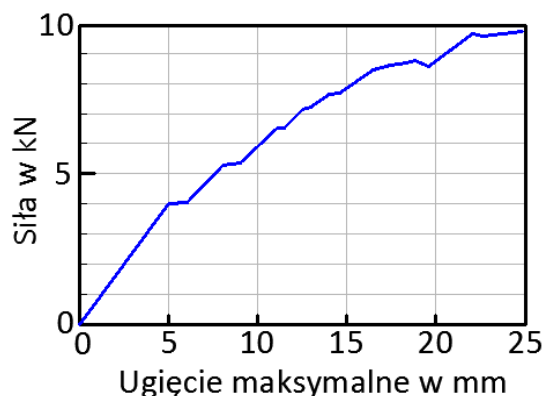
### Przeгляд literatury

Pierwsze badania belek zespolonych drewniano-szklanych wykonał J. Hamm [8, 9]. W swojej pracy badał on wpływ zespolenia belki szklanej z doklejonymi listwami

drewnianymi w górnej oraz dolnej partii belki (rys. 3). Autor przebadiał osiem belek o długości 4000 mm i wysokości 250 mm, szerokość była zmienna, zależna od zastosowanych listew drewnianych. Użyto listew z przedziału od 30 mm x 50 mm do 60 mm x 50 mm oraz szyby ze szkła float o grubości 10 mm, lepiszczem był klej poliuretanowy. Badania prowadzone były w teście czteropunktowego zginania quasi-statycznego. Podczas badań zaobserwowano dwie główne cechy tak przygotowanej konstrukcji, a mianowicie: równomierny odstęp między rysami w szkłe, równy ok. 250 mm (rys. 3) oraz znaczną nośność rezerwową, pokrytyczną takiego elementu równą ok. 200% siły rysującej szkło (rys. 4).



Rys. 3 Przekrój belki wykonanej przez J. Hamm'a (po lewej) oraz widok zniszczonej belki (po prawej) [8].



Rys. 4. Ugięcie w zależności od siły belek zespolonych dwuteowych drewniano-szklanych [8].

Kolejnym badaczem wykorzystującym pomysł konstrukcji belek zespolonych dwuteowych drewniano-szklanych był Kreher [14, 15, 16]. Konstrukcja belek w tym przypadku różniła od wspomnianej wyżej grubością szyby, która wyniosła 4 mm i 6 mm w zależności od próbki. Co więcej, w badaniach użyto trzech różnych rodzajów szkła: float, półhartowanego oraz hartowanego. Wymiary belki również zostały zredukowane: długość do 2000 mm, wysokość do 150 mm, wymiary listew drewnianych mieściły się w zakresie 30 mm x 30 mm do 50 mm x 50 mm. Badania te prowadzone były również tylko i wyłącznie dla próby zginania czteropunktowego quasi-statycznego. Wynikiem badań był wniosek, że szkła półhartowane i hartowane ze względu na bardzo gwałtowny, wybuchowy charakter zniszczenia nie są zalecane do budowy tego typu belek. W artykule został podany sposób modelowania matematycznego podatnego kleju łączącego drewno ze szkłem wyprowadzony na podstawie równań różniczkowych używanych do opisu gruntu. Wzór ma postać:

$$\tau(\delta) = \tau_a + k \cdot \delta \quad (1)$$

gdzie:

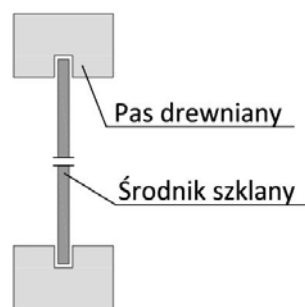
$\tau(\delta)$  – wartość naprężenia stycznego w warstwie kleju w zależności od przemieszczenia,

$\tau_a$  – wartość stała dla danego kleju,  $\tau_a \geq 0$ ,

$k$  – współczynnik sprężystości kleju,

$\delta$  – przemieszczenie bezwzględne.

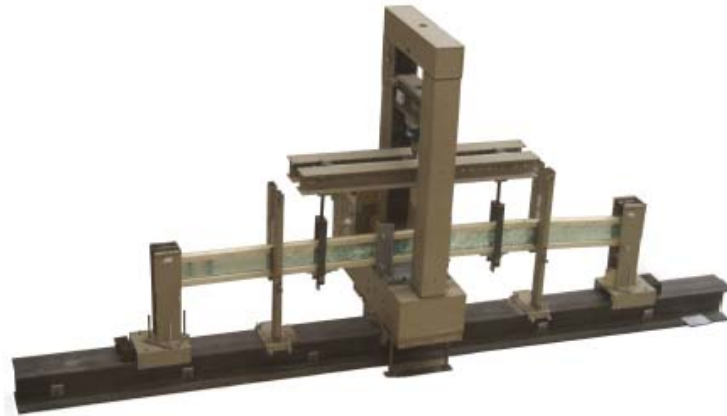
Inny pomysł konstrukcji belek drewniano-szklanych zaprezentowali badacze Cruz i Pequeno [6]. Przebadali oni dwadzieścia różnych belek, w tym 15 zespolonych, cztery drewniane i jedna szklana. Badane belki zespolone miały różne długości z przedziału 650-3200 mm, tą samą wysokość równą 550 mm oraz wymiar pasa drewnianego 70 mm x 110 mm. Do konstrukcji użyto szkła zespolonego na folii PVB złożonego z dwóch szyb grubości 6 mm. 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, a le z jednego kawałka, a szyba wklejona była w przygotowany rowek (rys. 5). Do połączenia belek użyto klejów o różnych sztywnościach, a mianowicie: kleju polimerowego, silikonu okiennego oraz kleju poliuretanowego. Cruz i Pequeno zaobserwowali podczas swoich badań, że dla sztywniejszych połączeń klejowych (polimerowych) rozkład zarysowań w szkłe jest bardziej równomierny, a skoki na krzywej obciążenie-przemieszczenie łagodniejsze. Prowadzi do wniosku, że dla obciążeń statycznych doraźnych najbezpieczniejsze, bo prezentujące najbardziej gwałtowny charakter zniszczenia, są połączenia sztywne drewna ze szkłem.



Rys. 5. Przekrój belki badanej przez Cruz'a i Pequeno [6].

Kolejne badania belek zespolonych drewniano-szklanych (rys. 6) prowadzili Blyberg i Serrano [1, 2, 3, 4, 5]. Konstrukcja czternastu belek została zaczerpnięta z prac Cruz'a i Pequeno, a mianowicie szyba o wymiarach 200 mm x 3850 mm x 10 mm wklejona była w rowek wykonany w pasach wykonanych z LVL o wymiarach 45 mm x 60 mm x 3850 mm. Użyte szkło to szkło float. Główną różnicą między poszczególnymi próbkami był sposób wykończenia szkła, który jak pokazały wcześniejsze badania [24, 25] ma znaczący wpływ na nośność szkła przy zginaniu. Siedem próbek wykonano

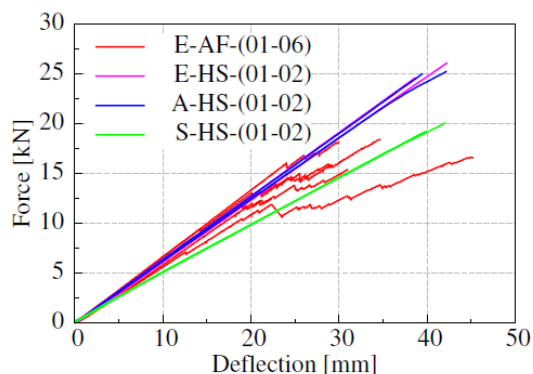
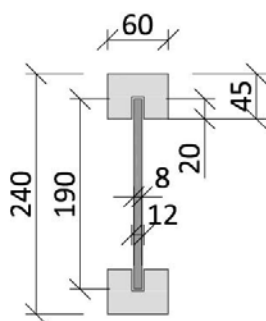
przy użyciu szkła bez żadnej obróbki krawędzi, bezpośrednio po cięciu, natomiast pozostałe siedem wykonano z użyciem szkła z wypolerowanymi krawędziami. W celu połączenia użyto klejów o różnych sztywnościach: kleju poliuretanowego oraz silikonu. W tym przypadku belki również badane były w próbie quasi-statycznego zginania pod obciążeniem doraźnym. Zniszczenie miało charakter ciągły. Zaobserwowano tutaj, że sztywność belki zespolonej dwuteowej jest o ok. 30% wyższa niż belki o takich samych wymiarach wykonanej przy użyciu jedynie drewna.



Rys. 6. Maszyna wytrzymałościowa wraz z próbką do badań belki zespolonej drewniano-szklanej [2].

Kolejne badania, prowadzone przez Kozłowskiego i in. [7, 11, 13], skierowane były na zbadanie nośności pokrytych belek zespolonych dwuteowych drewniano-szklanych. Zbadali oni 12 belek o wymiarach zbliżonych do rzeczywistych, o długości 4800 mm i wysokości 240 mm. Im mniejsze elementy badamy, tym odleglejsze od prawdziwych konstrukcji wyniki dostajemy. Jest to spowodowane efektem skali, który w przypadku szkła odgrywa bardzo dużą rolę [21, 22, 23]. Belki zostały posiadają środniki ze szkła: float oraz półhartowanego o wymiarach 4800 mm x 190 mm x 8 mm, wklejonych w rowki wykonane w pasach drewnianych (rys. 7). Pasy wykonane z drewna iglastego używanego do wykonywania okien. Elementy sklejono za pomocą trzech

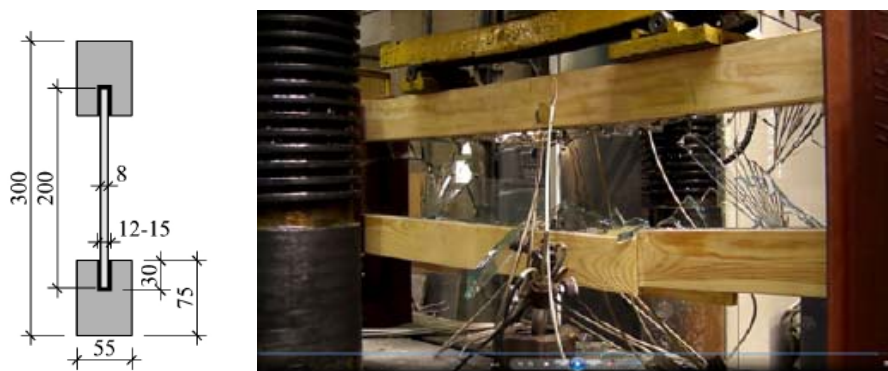
klejów o różnych sztywnościach: żywicą epoksydową, klejem akrylowym oraz silikonem strukturalnym. W każdym przypadku warstwa kleju miała grubość 2 mm. Próbkę poddano próbie czteropunktowego zginania quasi-statycznego. Dla uzyskanych wykresów ugięcia (rys. 7) autor zaobserwował, że klej bardzo sztywny 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 sztywności (akryle) które zapewniają dobrą ciągliwość ustroju po pierwszym zarysowaniu oraz częściowe zespolenie przekroju.



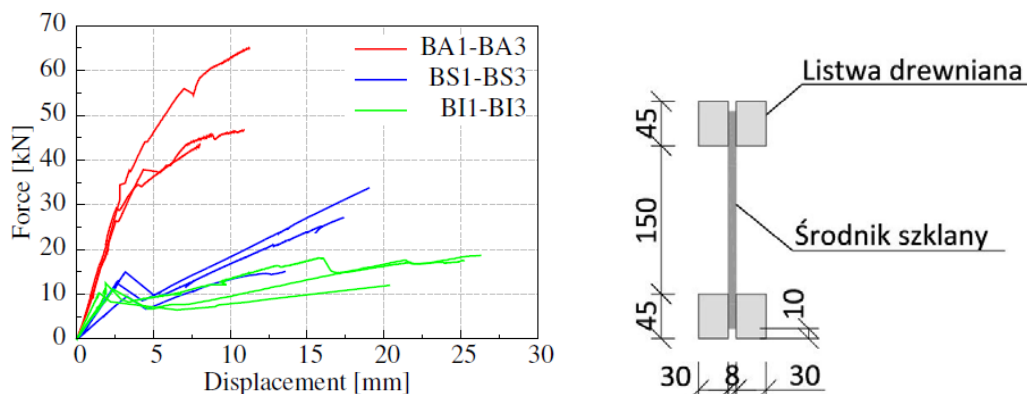
Rys. 7. Przekrój poprzeczny belek wykonanych przez Kozłowskiego i Serrano [11, 13] (po lewej), wykres zależności ugięcia od siły dla różnych klejów (E - żywica epoksydowa, A - klej akrylowy, S - silikon) [11, 13] (po prawej).

Wstępem do badań wspomnianych wcześniej [11, 13] były badania przeprowadzone w kraju, na Politechnice Śląskiej przez Kozłowskiego i Hulimkę [10, 11, 12]. Badania prowadzono na nieco mniejszych próbkach o długości 1800 mm oraz wysokości 300 mm. Belki zbudowane były z szyby o wymiarach 200 mm x 1800 mm x 8 mm ze szkła float oraz z drewna iglastego używanego do budowy okien (rys. 8). Do połączenia elementów użyto trzech rodzajów klejów o różnych sztywnościach: silikonu, kleju poliuretanowego oraz kleju akrylowego. Wykonano 9 próbek, po 3 dla

każdej sztywności kleju. Badania prowadzone były przez czteropunktowe quasi-statyczne zginanie, natomiast warty uwagi jest fakt, że wszystkie belki finalnie wyczerpały swą nośność przez zniszczenie pasa drewnianego. Autor zauważył (rys. 9), że dla klejów sztywnych (akryle) wykres przemieszczenia-siła jest prawie liniowy aż do pierwszego zarysowania. Mimo tego, do elementów obciążonych statycznie autor zalecił używanie klejów sztywnych (akrylowych) ze względu na znaczną sztywność i nośność takich elementów.



Rys. 8. Przekrój poprzeczny belki (lewa) oraz widok zniszczonej belki wykonanej przez Kozłowskiego i Hulimkę [10, 11, 12].



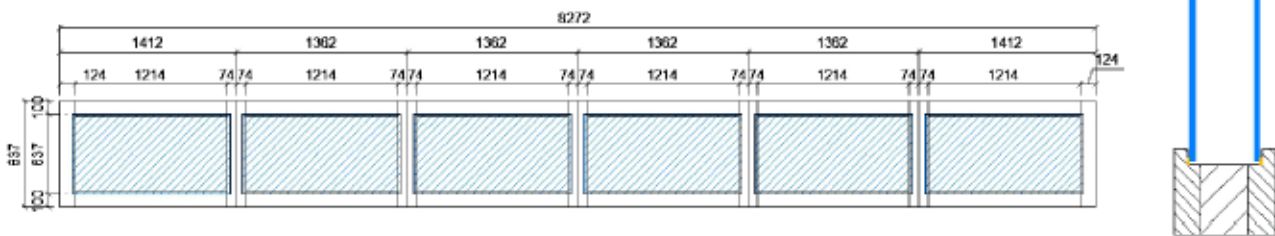
Rys. 9. Wykres zależności ugięcia od siły dla badanych belek (BA - akryl, BS - silikon, BI - poliuretan) [11] (po lewej), przekrój poprzeczny belek przygotowanych przez Premrov'a i in. [19] (po prawej).

Badania belek zespolonych dwuteowych o szklanym środku i pasach z drewna prowadzone były również na Słowenii [19]. Przeprowadzono badanie zginania czteropunktowego pod obciążeniem quasi-stałym belek o długości 2400 mm i wysokości 240 mm. Środek został wykonany ze szkła float o wymiarach 4800 mm x 220 mm x 8 mm, a pasy w postaci doklejonych listew drewnianych z drewna C24. 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 ciągłość i tworzy „mosty” dla rysy w szkłe. Jako lepiszcza użyto w tym przypadku silikonu. Całkowicie inna od poprzednich koncepcję zaprezentowali Winter i Hochhauser [26] (rys. 10). Zaproponowali oni układ, w którym elementy drewnopochodne, w tym przypadku LVL, zbudowane zostały w ramę połączoną quasi-przegubowo w węzłach. W powstałe przestrzenie wklejono panele wykonane ze szkła półhartowanego po jednym na stronę belki za pomocą kleju akrylowego lub żywicy epoksydowej. Panele te pełnią rolę tarcz, które usztywniają konstrukcje przenosząc obciążenia poprzeczne. Układ ten ma dwie mocne strony: ograniczenie wymiarów elementów

szklanych co znacznie upraszcza budowę i możliwości budowania nawet długich belek, dłuższych niż długość handlowa szkła oraz brak naprężeń rozciągających w szkłe. Autorzy zwrócili uwagę na konieczność uwzględ-

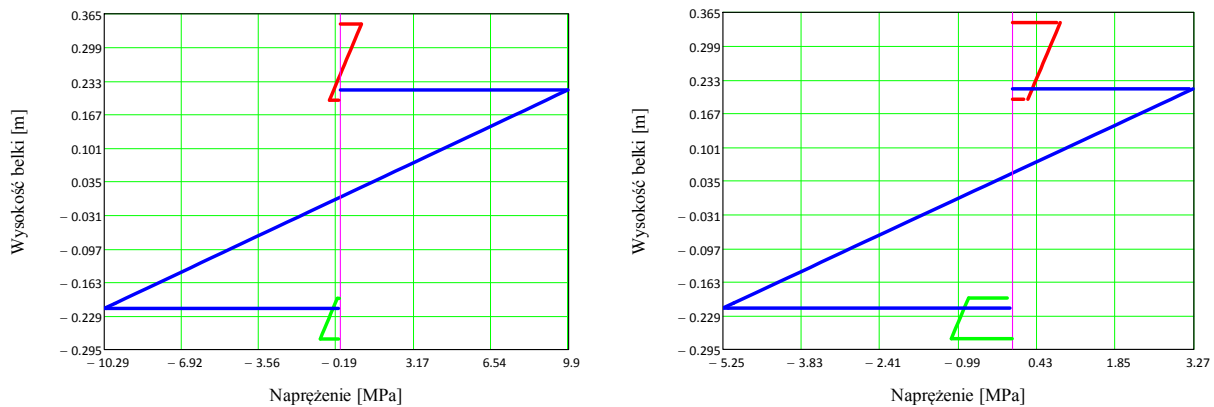
nienia współczynnika redukcyjnego dla właściwości klejów ze względu na obciążenia długotrwałe oraz konieczność dalszych badań elementów dla obciążeń długotrwałych.



Rys. 10. Widok i przekrój belki zaproponowanych przez Winter'a i Hochhauser'a [26].

Szukając rozwiązania analitycznego dla belek zespolonych drewniano-szklanych bardzo dobrą zgodność naprężeń dla klei zarówno sztywnych jak i podatnych z wynikami badań uzyskano przy skorzystaniu z metody  $\gamma$  [10, 11, 12]. Z uwagi jednak na ograniczoną ilość wzorów wyprowadzonych dla skończonej ilości schematów

statycznych, praktyczniejszym wydaje się podejście metodą  $\gamma$ . Dla zobrazowania rozkładu naprężeń w przekroju zespolonym dwuteowym drewniano-szklanym przedstawiono dwa przykładowe wykresy (rys. 11) dla kleju bardzo podatnego (np. silikon) i kleju średnio sztywnego (np. poliuretan).



Rys. 11. Wykres naprężeń w przekroju zespolonym złożonego ze środniczka szklanego i pasach drewnianych (LVL) dla dwóch różnych sztywności połączenia klejowego, lewy dla sztywności 0,5M Pa, prawy dla sztywności 10 MPa. Rozkład oparty jest o metodę  $\gamma$  [opracowanie własne].

## Podsumowanie

Prowadzone dotychczas badania belek zespolonych dwuteowych szklano-drewnianych pozwoliły na znalezienie najoptymalniejszego sposobu łączenia elementów, zabezpieczających szkło przed punktowymi dociskami na podporach [2, 11, 13]. Ponadto, dotychczasowe bada-

nia, że elementy drewniano-szklane, wykonane ze szkła float wykazują dużą nośność post-krytyczną po pojawieniu się zarysowania na szklanym środniczku. Duży wachlarz dostępnych klejów do łączenia elementów oraz brak badań doświadczalnych dla innego niż quasi-statyczne obciążenia (termiczne, długotrwałe) pozostawiają ciągle duże pole dla przyszłych badaczy.

## Literatura

1. Blyberg, L., Lang, M., Lundstedt, K., Schander, M., Serrano, E., Silfverhielm, M., Stålhandske, C., Glass, timber and adhesive joints - Innovative load bearing building components, *Construction and Building Materials*, 2014, 55, pp. 470–478.
2. Blyberg, L., Serrano, E., Timber/Glass adhesively bonded I-beams, Lineaus University, 2010
3. 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, 35, pp. 76–87.

4. Blyberg, L., Serrano, E., Enquist, B., Sterley, N., Adhesive joints for timber/glass applications - Part 1: Mechanical properties in shear and tension, SP Technical Research Institute of Sweden, 2011.
5. 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, SP Technical Research Institute of Sweden, 2011.
6. Cruz, P., Pequeno, J., Timber-Glass Composite Beams: Mechanical Behaviour and Architectural Solutions, Delft, 2008.
7. Dorn, M., Kozłowski, M., Serrano, M., Design approaches for timber-glass beams, In: Schneider, Jens and Weller, Bernhard (ed.), Glass, facade, energy: Engineered Transparency International Conference at glasstec: Conference on Glass, Glass Technology, Facade Engineering and Solar Energy, 2014, pp. 1–9, Düsseldorf, 2014.
8. Hamm, J., Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas, Rozprawa doktorska, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Szwajcaria, 2000.
9. Hamm, J., Development of timber-glass prefabricated structural elements, In: Innovative Wooden Structures and Bridges IABSE, Conference Report 85, Lahti, 2001, pp. 41-46.
10. Hulimka, J., Kozłowski, M., Mechanism of failure and post-breakage strength of hybrid timber-glass beams, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, Slovak Society of mechanics SAS, Bratysława, 2012.
11. Kozłowski, M., Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2014.
12. Kozłowski, M., Hulimka, J., Load-bearing capacity of hybrid timber-glass beams, *ACEE Journal*, 2014, 2, pp. 61–70.
13. Kozłowski, M., Serrano, E., Enquist, B., Experimental investigation on timber-glass composite I-beams, Taylor & Francis Group, Londyn, 2014.
14. Kreher, K., Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas, Rozprawa doktorska, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Szwajcaria, 2004.
15. Kreher, K., Load introduction with timber. Timber as reinforcement for glued composites (shear-walls, I-beams) structural safety and calculation-model, Portland, 2006.
16. Kreher, K., Netterer, J., Timber-glass-composite girders for a hotel in Switzerland, *Structural Engineering International*, 2004, 14, pp. 149–151.
17. Pischl, R., Die Berechnung Zusammengesetzter Holzerner Biegetrager auf Grund der Elastischen Verbundtheorie, Rozprawa doktorska, Technischen Hochschule Graz, Austria, 1966.
18. PN-EN 1995-1-1: 2010 Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków, PKN, 2010.
19. Premrov, M., Zlatinek, M., Štrukelj, A., Experimental analysis of load-bearing timber-glass I-beam, *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, 4 (19), pp. 11–20.
20. Ungermann, D., Preckwinkel, E., Structural behaviour of hybrid steel-glass beams, TU Delft, 2010, pp. 485-495.
21. Vandebroek, M., Louter, C., Caspeepele, R., Ensslen, F., Belis, J., Size effect for the edge strength of glass with cut and ground edge finishing, *Engineering Structures*, 2014, 79, pp. 96–105.
22. Veer, F., Bos, F.P., Zuidema, J., T. Romein, T., Strength and fracture behaviour of annealed and tempered float glass, Proceedings of the 11th International Conference on Fracture (ICF11). - S.I. : Curran Associates, 2005.
23. Veer, F., Bos, F.P., Zuidema, J., Romein, T., Strenght and Fracture Behaviour of Annealed and Tempered Float Glass, Proceedings of the 11th International Conference on Fracture (ICF11). - S.I. : Curran Associates, 2005.
24. Veer, F., Zuidema, J., The strenght of glass, effect of edge quality, Faculty of Architecture, TU Delft, 2003, , pp. 106-109.
25. Veer, F., Zuidema, J., Bos, F., The strength and failure of glass in bending, TU Delft, 2005, pp. 1-3.
26. Winter, W., Hochhauser, W., Fadai, A., Timber-glass composite trusses and plates, Poster: World Conference on Timber Engineering WCTE 2012, Auckland, 2012.