

STRESZCZENIE

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. Belki zespolone drewniano-szklane pozwalają wykorzystać 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.

Dotychczasowe badania zespolonych belek drewniano-szklanych polegały na obciążaniu quasi-statycznym elementów badawczych w próbie czteropunktowego zginania, aż do całkowitego zniszczenia. 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 oraz znaczną nośność postkrytyczną takiego elementu sięgającą nawet 200% siły rysującej szkło. 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. Podobnej cechy nie wykazywały belki ze środnikami ze szkła pół-hartowanego i hartowanego w których pierwsze zarysowanie szkła powodowało całkowite zniszczenie elementu.

Badania prowadzone na potrzeby niniejszej dysertacji polegały na weryfikacji wpływu obciążenia wielokrotnie zmiennego na nośność zmęczeniową oraz doraźną zespolonych belek drewniano-szklanych. Belki złożone ze środnika szklanego oraz pasów drewnianych połączonych klejem poliuretanowym badano w próbie czteropunktowego zginania quasi-statycznego (elementy referencyjne) oraz pod obciążeniem wielokrotnie zmiennym. W związku z brakiem widocznych uszkodzeń zmęczeniowych elementy zostały poddane próbie zginania pod obciążeniem quasi-stałym w celu weryfikacji wpływu obciążenia dynamicznego na nośność doraźną elementów. Środniki belek zostały zbudowane ze szkła laminowanego typu float (annealed) na podwójnej warstwie folii PVB, a pasy wykonano z wyselekcjonowanego drewna jodłowego.

Przeprowadzone badania poszczególnych materiałów pozwoliły na dokładne określenie ich właściwości fizycznych. Drewno, jako materiał ortotropowy, zostało przebadane pod kątem weryfikacji odpowiedzi materiału przy ściskaniu, rozciąganiu i zginaniu, zarówno wzdłuż jak i w poprzek włókien. Szkło zostało przebadane dla identycznych gabarytów oraz w identycznej pozycji jak późniejsze środniki belek w próbie czteropunktowego quasi-statycznego zginania.

Z uwagi na decydujący wpływ spoiny klejowej na stopień zespolenia belki przebadano trzy różne kleje poliuretanowe, różniące się głównie sztywnością postaciową. Wykorzystane polimery poddano badaniom w prostych stanach naprężenia (ściskani i rozciąganie) oraz w połączeniu z drewnem i szkłem w próbie ścinania pod obciążeniem quasi-stałym oraz zmęczeniowym. Tak przeprowadzone kompleksowe badania ułatwiły wybór najodpowiedniejszego kleju do wykonania belek zespolonych oraz pozwoliły na lepsze przewidzenie zachowania się belek zespolonych i właściwe oddanie materiałów w modelach numerycznych.

Ze względu na utrudniony dostęp do samego połączenia ścinanego w trakcie badań kleju w próbie prostego ścinania stworzono płaski model numeryczny tego połączenia przy użyciu komercyjnego pakietu Metody Elementów Skończonych ABAQUS. Model ten, po wcześniejszym zdefiniowaniu właściwości mechanicznych materiałów posłużył do lepszego rozpoznania rozkładu naprężeń w połączeniu oraz porównaniu modelu hipersprężystego materiału z modelem sprężystym. Ponadto, przeprowadzono również analizę wpływu efektu Mullina w przypadku modelowania materiałów polimerowych oraz postaci zniszczenia takiego połączenia. Dla lepszego przybliżenia omawianych problemów czytelnikowi, wszystkie z wymienionych pojęć i modeli materiałów zostały przystępnie wyjaśnione.

Po dokładnym określeniu parametrów materiałów składowych oraz weryfikacji modeli matematycznych polimerów w prostym modelu zbudowano model przestrzenny zespolonej belki drewniano-szklanej. Model numeryczny zbudowany w pakiecie ABAQUS dokładnie odwzorowywał belki użyte w trakcie badań, zarówno pod kątem geometrii jak i schematu statycznego. Z uwagi na to, że mimo pojawiania się rys w szklanych środnikach wszystkie badane belki charakteryzowały się znaczną nośnością postkrytyczną, główny nacisk w analizie modeli belek położono na zarysowanie szkła oraz wyczerpanie nośności kleju. Do analizy zarysowania wykorzystano model rys dyskretnych w Rozszerzonej Metodzie Elementów Skończonych (XFEM), jednak przybliżono czytelnikowi również inne sposoby modelowania problemu zarysowania materiałów kruchych.

Poruszany w pracy typ konstrukcji jest stosunkowo młodym rozwiązaniem, w związku z czym przeprowadzono również próbę walidacji analitycznej rozwiązania dla zespolonych belek drewniano-szklanych. Proponowane do tej pory metody analizy zespolonych belek drewniano-szklanych są metodami stosunkowo prostymi, ale jak pokazano w pracy dla niektórych schematów statycznych belek okazują się bardzo niedokładne, powodując znaczne niedoszacowania naprężeń rozciągających, głównie w szklanych środnikach. W związku z powyższym zaproponowano bardziej skomplikowaną metodę analizy oparta na pracach Pischla dla belek drewnianych złożonych, a otrzymane wyniki porównano z dotychczas proponowanymi metodami analitycznymi, wynikami badań doświadczalnych oraz analiz numerycznych.

ABSTRACT

Growing interest in glass as a construction material can be seen for about two decades. This tendency can be easily understood because of the lightweight and attractive appearance of such structures for users and architects as well. Due to the growing popularity, more and more studies of all kinds of structural glass elements can be found in literature, most often composited with other materials. Composite timber-glass I-beams are one of the types of such elements. Composite timber-glass I-beams allow to use the strongest features of both materials. In the case of glass it is rigidity and high compressive strength, whereas in the case of timber, high ductility, ability to plasticize and ease of processing. The connection of these two materials is realized through the adhesive layer. The main problem encountered during the adhesive selection is its required stiffness, which due to the different load origin is diametrically different. For static loads, the best adhesives are those with high stiffness for full composition, and for dynamic loads (multi-variable or seismic) adhesives with low stiffness to protect the glass from damage are the best.

Previous studies of composite timber-glass I-beams consisted of quasi-static load tests in a four-point bending test until complete breakage. In all of those studies where the web was made of float (annealed) glass, two main structure features were observed: the even spacing between the cracks in the glass and the significant post breakage capacity of such elements reaching up to 200% force causing first crack in glass. The element remains rigid after the glass cracking due to the effect of jamming large pieces of glass and further transfer of shear forces caused by usage of float glass. Timber provides ductility and creates "bridges" for the cracks appeared in the glass. In all tests of composite timber-glass beams where the web was made of float (annealed) glass the beams finally exhausted their capacity by timber flange breakage. Beams with heat-strengthened and fully-tempered glass webs did not present a similar feature and the first glass crack caused complete breakage of the element.

All researches which were carried out on the purposes of this thesis consisted of the influence of multi-variable load on the fatigue capacity verification and the instantaneous capacity of composite timber-glass I-beams as well. Composed of glass web and timber flanges beams where the joint was made by polyurethane adhesive were tested in four-point quasi-static bending test (reference elements) and under multi-variable loading. Due to the lack of visible fatigue damage, beams were subjected to bending test under quasi-static load to verify the effect of dynamic load on the instantaneous capacity of the components. Investigated beams were made of float (annealed) laminated glass on a double layer of PVB film and flanges made of selected fir timber.

Carried out investigation of each material allowed to determine precisely their physical properties. Timber as an orthotropic material has been tested to verify the material's response to compression, tension and bending for longitudinal and transversal directions to the grains. The glass was tested for identical dimensions and in the same position as the following beams' webs in a four-point quasi static bending test. Due to the decisive influence of the adhesive layer on the compositeness grade, three different polyurethane adhesives were investigated. They differ mainly by the bulk modulus. All three investigated polymers were subjected to simple stress tests (uniaxial compression and tension), and under multi-variable and quasi-static and fatigue shear test of double lap joint between glass and timber. Carried comprehensive investigations allow to select the most suitable adhesive for

composite I-beams. Moreover, they allow better prediction of the composite I-beams behaviour and the proper materials parameters for numerical models.

Due to the difficult access to the double lap joint during the shear test a flat numerical model of this joint was created using the Finite Element Method software ABAQUS. Strictly defined material properties in the model allowed to better understand the stress distribution in the joint. Furthermore, the comparison of the hyperplastic material model and elastic material model was made. In addition, an analysis of the Mullin effect influence on polymers modelling and the breakage history of such a joint were also carried out. For a better understanding all discussed problems, material models and analysis types have been explained to the reader.

When the detailed material parameters were stated and the simply models of double lap joint were analysed a model of the composite timber-glass I-beam was built. The numerical model was built in the ABAQUS software and it was directly reproduction of the investigated beams, both geometric and static. The main focus during beam model analysis was on the cracking of the glass and the depletion of the adhesive due to the observation that all investigated beams had considerable postcritical capacity (after first crack in glass appeared). Discrete cracks model was used for crack analysis in the Extended Finite Element Method (XFEM). The reader was also introduced to other ways of modelling cracks in fragile materials.

Analysed type of structure in the thesis is a relatively young solution. Therefore an analytical validation for composite timber-glass I-beams has also been carried out. So far proposed method of composite timber-glass I-beams analysis is relatively straightforward. As shown in the work, for some static schemes they appear to be very inaccurate causing considerable underestimation of the cracking stresses mainly in glass webs. Therefore, a more complex method of analysis based on Pischl's work on composite timber beams was proposed in the thesis. Results of both analytical methods were compared with experimental results and numerical analyses.