

Doktorant: mgr inż. Michał Bakalarz

Promotor: dr hab. inż. Paweł Kossakowski, prof. PŚk

Efektywność wzmacniania zginanych belek z drewna klejonego warstwowo z fornirów za pomocą kompozytów włóknistych

Streszczenie

Tematyka podjęta w pracy dotyczy zagadnień związanych ze wzmacnianiem belek z drewna klejonego warstwowo z fornirów LVL (z ang. *Laminated Veneer Lumber*) za pomocą kompozytów polimerowych zbrojony włóknami ciągłymi FRP (z ang. *Fibre Reinforced Polymer*). Rozprawa doktorska ma charakter badawczy, aczkolwiek zawarto w niej również elementy teoretyczne oraz przedstawiono innowacyjną koncepcję stosowania programowania wizualnego jako narzędzia do prowadzenia analiz bazujących na wizualizacji i manipulowaniu zbiorami danych znacznej wielkości.

W ramach rozprawy dokonano wprowadzenia w problematykę wzmacniania konstrukcji drewnianych materiałami kompozytowymi. Przedstawiono argumenty uzasadniające konieczność przeprowadzenia podjętych badań eksperymentalnych.

W przeglądzie literatury podano ogólne informacje na temat fornirów klejonych warstwowo, przyczyn i metod wzmacniania konstrukcji drewnianych oraz scharakteryzowano materiały kompozytowe. Omówiono wyniki badań laboratoryjnych i przeprowadzono studium przypadków wdrożenia opracowanych technologii skupiając się głównie na elementach zginanych. Wskazano, że w literaturze krajowej brak jest prac poświęconych wzmacnianiu elementów konstrukcyjnych z fornirów klejonych warstwowo, a w literaturze zagranicznej tematyka ta poruszona została marginalnie, zaledwie w kilku pracach.

Badania eksperymentalne składały się z części pilotażowej, w której testom poddano belki w skali laboratoryjnej oraz zasadniczej, której przedmiotem były belki w skali technicznej. Przebadano łącznie 57 elementów w pełnym zakresie ich pracy statycznej aż do zniszczenia.

Celem badań wstępnych było określenie zasadności wykorzystania mat kompozytowych jednokierunkowo zbrojonych włóknami aramidowymi AFRP (z ang. *Aramid Fibre Reinforced Polymer*), węglowymi CFRP (z ang. *Carbon Fibre Reinforced Polymer*) o wysokiej wytrzymałości i ultrawysokim module sprężystości, oraz dwukierunkowo

Bakalarz

zbrojonych włóknami szklanymi GFRP (z ang. *Glass Fibre Reinforced Polymer*) do wzmacniania zginanych belek z fornirów klejonych warstwowo.

Przedmiotem badań zasadniczych były pełnowymiarowe belki wzmocnione matami i laminatami CFRP. Maty przyklejano w trzech konfiguracjach różniących się między sobą liczbą zastosowanych warstw i stopniem pokrycia powierzchni bocznej. Taśmy CFRP wklejano w wydrążone bruzdy i aplikowano od spodu belek. Stosowano klej na bazie żywicy epoksydowej. Szczegółowo opisano wpływ właściwości mechanicznych oraz przestrzennego rozmieszczenia materiału kompozytowego na nośność na zginanie, deformacje, odkształcenia i mechanizmy zniszczenia układu „LVL – klej – kompozyt”.

Oprócz tradycyjnych metod pomiarowych w analizie deformacji i odkształceń w układzie przestrzennym wykorzystano bezkontaktowy, nieniszczący system optyczny typu ARAMIS. Wyniki pomiarów posłużyły do oceny wpływu przyjętych w badaniach warunków brzegowych na zachowanie niewzmocnionych i wzmocnionych zginanych belek pełnowymiarowych. Zakres analiz obejmował ocenę odkształceń powierzchni bocznej, przemieszczeń pionowych i poziomych punktów pomiarowych, krzywizny w płaszczyźnie zginania oraz prostopadłej do niej, kąta obrotu wybranego profilu przekroju poprzecznego, sztywności i ciągłości przy zginaniu. Zmiany wartości parametrów ukazano w układzie lokalnym przetwarzając informacje o położeniu punktów pomiarowych bądź globalnym dla całej powierzchni pomiarowej. Ciągłość przy zginaniu oszacowano na podstawie indeksów bazujących na porównaniu wartości ugięć i absorpcji energii.

Zaprezentowano autorskie skrypty napisane w środowisku programowania wizualnego, które zastosowano do rozszerzenia i usprawnienia procesu analizy odkształceń i deformacji wykorzystując dane o położeniu punktów pomiarowych uzyskane z systemu optycznego. Szczegółowo opisano sposób budowania skryptów, które rozumie się jako ciąg następujących po sobie operacji na danych oraz podano przykłady ich wdrożenia. Istotnym elementem tej części jest analiza odkształceń powierzchni bocznej. Metodologia ta nie została dotychczas opisana i stanowi, według autora, cenne źródło wiedzy.

Analiza analityczna przeprowadzona została w oparciu o metodę zastępczych charakterystyk przekroju poprzecznego. Wykazano dobrą zgodność pomiędzy sztywnością na zginanie belki wyznaczoną eksperymentalnie na podstawie krzywizny elementu w płaszczyźnie zginania a jej wartością teoretyczną. Szczegółowo omówiono również zmiany położenia osi obojętnej w funkcji działającego obciążenia.

Wykazano efektywność zaproponowanych modeli wzmocnienia zginanych belek z drewna klejonego warstwowo z fornirów za pomocą kompozytów włóknistych. Zaproponowana technologia okazała się być łatwa i szybka w aplikacji.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych dokonano podsumowania, a także wyciągnięto wnioski o charakterze naukowym i praktycznym oraz wskazano planowane kierunki dalszych badań.

Balachan

Abstract

The subject matter of this work concerns issues related to the reinforcement of glued laminated timber beams made of LVL (*Laminated Veneer Lumber*) veneers with the use of polymer composites reinforced with FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) continuous fibres. This doctoral dissertation is of a research nature, although it also contains theoretical elements and presents an innovative concept of using visual programming as a tool for conducting analyses based on visualisation and manipulation of large data sets.

The dissertation introduces the problem of reinforcing wooden structures with composite materials. It includes arguments justifying the necessity to conduct the undertaken experimental research.

The literature review provides general information on glued laminated veneers, causes and methods for strengthening wooden structures, and characterises composite materials. The results of laboratory tests were discussed and a case study of the implementation of the developed technologies was carried out, focusing mainly on bending elements. It was pointed out that in the domestic literature there are no works devoted to the reinforcement of structural elements made of glued laminated veneers, and in foreign literature this subject was discussed only marginally in a few works.

The experimental tests consisted of a pilot part, in which, beams on a laboratory scale were tested, and the main part for beams on a technical scale. A total of 57 elements were tested in the full range of their static operation until destruction.

The aim of the preliminary research was to determine the validity of the use of composite sheets unidirectionally reinforced with aramid fibres AFRP (*Aramid Fibre Reinforced Polymer*), carbon CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*) with high strength and ultra-high modulus of elasticity, and bi-directional glass fibre reinforced GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*) for the reinforcement of bent laminated veneer beams.

The subject of the main research were full-size beams strengthened with CFRP sheets and laminates. The sheets were glued in three configurations differing in the number of layers applied and the degree of coverage of the side surface. CFRP laminates were glued into hollow grooves and applied to the underside of the beams. An adhesive based on epoxy resin was used. The influence of the mechanical properties and spatial distribution of the composite material on the bending capacity, deformation and destruction mechanisms of the "LVL - adhesive - composite" system was described in detail.

In addition to traditional measurement methods, a non-contact, non-destructive ARAMIS optical system was used in the analysis of deformation and strain in the spatial system. The measurement results were used to evaluate the influence of the boundary conditions adopted in the research on the behaviour of unstrengthened and strengthened full-size bent beams. The scope of the analyses included the assessment of side surface deformations, vertical and horizontal displacements of measurement points, curvature in the bending plane and perpendicular to it, the rotation angle of the selected cross-section profile, bending stiffness and ductility. Changes in parameter values were shown in the local system by processing information about the location of the measuring points or the global one for the entire measuring area. The bending ductility was estimated on the basis of indices based on a comparison of the values of deflection and energy absorption.

Balaban

Original scripts written in a visual programming environment were presented, which were used to extend and improve the process of deformation and strain analysis using data on the location of measurement points obtained from the optical system. The method of building scripts, understood as a sequence of consecutive data operations, and examples of their implementation are given in detail. An important element of this part is the analysis of the strain of the lateral surface. This methodology has not been described so far and is, according to the author, a valuable source of knowledge.

The analytical analysis was carried out on the basis of the method of equivalent characteristics of the cross-section. Good compatibility was shown between the beam bending stiffness determined experimentally on the basis of the curvature of the element in the bending plane and its theoretical value. Changes in the position of the neutral axis as a function of the acting load are also discussed in detail.

The effectiveness of the proposed models of reinforcement of bent glued laminated veneer beams with the use of fibrous composites was demonstrated. The proposed technology turned out to be easy and quick to apply.

Based on the results of the experimental research, a summary was made and conclusions of a scientific and practical nature were drawn, and the planned directions for further research were indicated.

Behalan