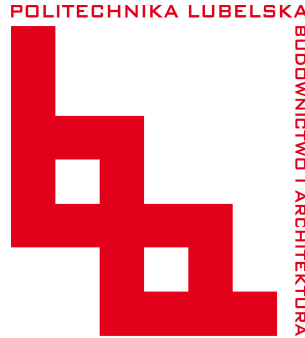


**Politechnika Lubelska**  
**Wydział Budownictwa i Architektury**

Dyscyplina: Inżynieria Lądowa i Transport



ROZPRAWA DOKTORSKA

**DOBÓR PARAMETRÓW MODELI  
OBLICZENIOWYCH PEŁNYCH DŹWIGARÓW  
Z KOMPOZYTÓW DREWNO-POLIMEROWYCH  
ZBROJONYCH WŁÓKNAMI**

**SELECTION OF THE PARAMETERS FOR NUMERICAL MODELS  
OF FULL GIRDERS MADE OF WOOD-POLYMER COMPOSITES  
REINFORCED WITH FIBRES**

Autor: mgr inż. Bartosz Kawecki

Promotor:

Dr hab. inż. Jerzy Podgórski, prof. PL

Lublin 2020

# Streszczenia

## **Dobór parametrów modeli obliczeniowych pełnych dźwigarów z kompozytów drewno-polimerowych zbrojonych włóknami**

Kompozyty w obecnych czasach mają szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu. Połączenie materiałów o odmiennych właściwościach pozwala na optymalizację elementów i dostosowanie ich wytrzymałości do przewidywanych obciążeń. W literaturze opisywane są różnorodne kompozycje materiałów. W niniejszej pracy analizowano połączenie drewna z polimerem zbrojonym włóknami węglowymi, za pomocą kleju poliuretanowego.

Podczas przeglądu literatury skupiono się na sposobach modelowania drewna, badaniach połączeń klejonych w kompozytach zawierających drewno oraz możliwościach wzmocnienia lub zbrojenia elementów przy użyciu kompozytów włóknistych w osnowie polimerowej. W odróżnieniu od niniejszej pracy, przedmiotem badań prowadzonych przez inne ośrodki naukowe były głównie podobne kompozyty łączone na klej inny niż poliuretanowy. Ponadto autorzy publikacji zajmowali się przede wszystkim badaniami laboratoryjnymi. Sposoby modelowania, które odnaleziono w pojedynczych pracach, były ubogo opisane i nie uwzględniały wielu istotnych parametrów. Szczegółowe podejście do powyższego tematu może pozwolić na przewidywanie rzeczywistego zachowania elementu konstrukcyjnego.

Głównym celem niniejszej pracy doktorskiej było opracowanie rozwiązań umożliwiających tworzenie zaawansowanych modeli obliczeniowych dźwigarów o pełnym przekroju, wykonanych z kompozytu drewno-CFRP. Realizacja badań laboratoryjnych na dużej liczbie próbek, wytworzonych z zachowaniem reżimu technologicznego przez certyfikowanego producenta drewna klejonego oraz zastosowanie różnorodnych technik pomiarowych, pozwoliły na otrzymanie wiarygodnych wyników. Modele komputerowe tworzono oraz analizowano w oparciu o Metodę Elementów Skończonych (MES), a weryfikacji dokonano w trzech etapach.

Pierwszym krokiem było utworzenie oraz walidacja modelu lameli drewnianej przy zginaniu, na próbkach o stosunkowo niewielkich wymiarach, a następnie na elementach rzeczywistych wykorzystywanych bezpośrednio w konstrukcjach.

W drugim etapie opracowano model numeryczny połączenia dwu-zakładkowego, wykorzystując rozwiązanie teoretyczne oraz indywidualne badania laboratoryjne.

W ten sposób uwzględniono zjawiska zachodzące w spoinach, które w większości odnalezionych publikacji były pomijane. Wyznaczono sztywność kohezyjną kleju oraz przeanalizowano możliwość wystąpienia delaminacji (rozwarstwiania się). Stwierdzono, że połączenie drewno-CFRP wykazuje blisko dwukrotnie mniejszą sztywność oraz wytrzymałość niż połączenie drewno-drewno, co istotnie wpływa to na skuteczność zbrojenia oraz determinuje miejsce jego lokalizacji. Udowodniono, że uznawanie połączeń między elementami za idealne może prowadzić do zdecydowanego zawyżenia sztywności elementu konstrukcyjnego.

W ostatnim etapie opracowano model numeryczny umożliwiający nieliniową analizę dźwigarów wielkoskalowych o pełnym przekroju. Wykorzystano wszystkie dane zebrane z poprzednich etapów oraz badań laboratoryjnych, przeprowadzonych na klejonych belkach o wymiarach konstrukcyjnych. Model MES może służyć do precyzyjnego wyznaczania sztywności liniowo-sprężystej projektowanych dźwigarów oraz do względnie dokładnego przewidywania siły niszczącej. Możliwa jest również analiza kompozytów w innych układach niż przedstawiono w niniejszej pracy, pod warunkiem pełnego przekroju dźwigarów.

Ponadto opracowano model uproszczony poprzez modyfikację rozwiązania bazującego na zastępczym polu przekroju. Dostosowanie formuł obliczeniowych do badań laboratoryjnych i modelu MES umożliwiło wykonywanie obliczeń i przedstawienie zaleceń do projektowania konstrukcji z kompozytów drewno-CFRP.

Przeprowadzone badania laboratoryjne oraz analizy komputerowe stanowią cenne źródło wiedzy na temat głównych zjawisk zachodzących w kompozytach drewno-polimerowych zbrojonych włóknami, bowiem pozwalają na przewidywanie rzeczywistego zachowania elementów konstrukcyjnych podczas zginania.

# **Abstract**

## **Selection of the parameters for numerical models of full girders made of wood-polymer composites reinforced with fibres**

Nowadays, various industries use composites. Combining materials with unique properties allows to optimise the elements and adjust their strength to the expected loads. Literature describes diverse materials compositions. In this study, the analyses include connecting wood with a carbon fibre reinforced polymer using a polyurethane glue.

The literature review focuses on the methods of wood modelling, glued joint behaviour in composites containing wood, and the possibilities of strengthening or reinforcing elements using fibre composites in a polymer matrix. Contrary to this work, other scientists test composites bonded with glue other than polyurethane. Individual studies, describing the modelling methods do not take into account many important properties. A detailed approach to the above topic may allow predicting the actual behaviour of a construction element.

The major aim of this dissertation is to develop solutions enabling creating advanced computational models of full-section girders made of wood-CFRP composite. Implementing laboratory tests on many samples, produced under the technological regime by a certified manufacturer of glued laminated timber, and various measurement techniques, allows to get reliable results. Three stages verify the computer models and analyses, based on the Finite Element Method (FEM).

The first step is creating and validating the model of a wooden lamella. Tested objects are small and structural size bent samples. The second stage is developing a numerical model of a double-lap connection, with a theoretical solution and individual laboratory tests. In most of the found publications, researchers ignore phenomena taking place in the joints. Determining the cohesive stiffness and the possibility of delamination enables to include them. Wood-CFRP joint has shown near two times less stiffness and strength than the wood-wood joint. It affects the effectiveness of the reinforcement and determines its location. Considering the connections between the elements as a perfect may lead to a significant increase in the stiffness of the structural element. The last step is developing the non-linear numerical model of large-scale girders with a full cross-section. It bases on the data collected from the earlier stages and laboratory tests carried out on glued structural-sized beams. Exploitation of the FEM model includes determining the linear-elastic stiffness

of the designed girders, predicting the destructive force and analysing composites in systems other than those presented in this paper. The only condition is a full cross-section of the girders.

Added feature is developing a simplified model by modifying the solution based on the equivalent cross-sectional area. Adjusting the calculation formulas to laboratory tests and the FEM model makes it possible to do calculations and present recommendations for the design of structures made of wood-CFRP composites.

The conducted laboratory tests and computer analyses are a valuable source of knowledge about the major phenomena occurring in fibre-reinforced wood-polymer composites. They allow to predict the actual behaviour of structural elements during bending.