



WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA  
KATEDRA WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW

PRACA DOKTORSKA

KOMPOZYTOWY MOST DLA PIESZYCH.  
BADANIA DOŚWIADCZALNE  
I PRZYGOTOWANIE DO PROJEKTOWANIA

*COMPOSITE FOOTBRIDGE.  
EXPERIMENTAL TESTS AND PREPARATION FOR DESIGNING*

MGR INŻ. TOMASZ FERENC

PROMOTOR DR HAB. INŻ. TOMASZ MIKULSKI, PROF. PG  
PROMOTOR POMOCNICZY DR INŻ. ŁUKASZ PYRZOWSKI

GDAŃSK 2016

## Streszczenie

Dysertacja powstała w ramach grantu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, pt. „Opracowanie kompozytowych przęseł mostów dla pieszych do zastosowania nad drogami GP”, nr PBS1/B2/6/2013. Głównym celem pracy było przygotowanie do projektowania kompozytowego mostu pieszo-rowerowego. Zakres pracy obejmuje badania doświadczalne elementów kompozytowych, walidację modeli obliczeniowych oraz wykorzystanie aparatu analizy wrażliwości do procesu projektowego.

Przeprowadzono badania doświadczalne trzech typów elementów kompozytowych podzielonych z uwagi na ich typ i rozmiar. Badano: próbki laminatu, belki przekładkowe (sandwiczowe) oraz segment o pełnowymiarowym przekroju poprzecznym, tzw. segment walidacyjny. Badany laminat to czterowarstwowy kompozyt GFRP o osnowie winyloestrowej zbrojonej szklanymi tkaninami wielokierunkowymi. Próbki przygotowane zgodnie z normą badane były w próbie jednoosiowego rozciągania, dzięki czemu możliwa była identyfikacja zastępczych parametrów materiałowych, takich jak moduł sprężystości czy współczynnik Poissona. Belki sandwiczowe składały się z okładek w postaci czterowarstwowego laminatu oraz pianki PET stanowiącej ich rdzeń. Belki poddane zostały zginaniu trój- oraz czteropunktowemu na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym. Belki badano aż do zniszczenia rejestrując jego charakter i siłę niszczącą oraz mierzone w wybranych punktach przemieszczenia i odkształcenia. Zwieńczeniem badań doświadczalnych były testy przeprowadzone na segmencie o przekroju poprzecznym wykonanym w skali 1:1 będącym trzymetrowym odcinkiem projektowanej w ramach grantu kładki. Segment walidacyjny stanowił powłokową konstrukcję przekładkową składającą się z sześciowarstwowego laminatu jako okładek oraz pianki PET jako rdzenia. Dla różnych schematów obciążeń przeprowadzono szereg prób statycznych i dynamicznych w celu uzyskania opisu zachowania się konstrukcji. Dla wszystkich badanych elementów przeprowadzono symulacje numeryczne. Modele obliczeniowe wykonano w programie FEMAP & NX Nastran v. 10.1.1 będącym aplikacją metody elementów skończonych. Oszacowano doświadczalnie i numerycznie zakres obciążeń, dla których obowiązuje liniowa teoria sprężystości, co jest wystarczające w zakresie projektowym. Dodatkowo przeprowadzono walidację modelu obliczeniowego opisującego segment.

W pracy podjęto także tematykę analizy wrażliwości będącą jedną z ważnych działań teorii projektowania. Wykonano trzy przykłady analizy wrażliwości z uwagi na wymiar problemu. Dwa przykłady testowe, w których wykorzystano autorskie programy napisane w środowisku MATLAB, to rama płaska jako problem jednowymiarowy oraz tarcza jako problem dwuwymiarowy. W trzecim przypadku, wykorzystując oprogramowanie FEMAP &

NX Nastran v. 10.1.1 przeprowadzono analizę wrażliwości rzeczywistej konstrukcji tj. projektowanej kładki. Określono obszary kompozytowej okładki obiektu, gdzie zmiany jej sztywności mają największy wpływ na wariację wiodącej zmiennej stanu jaką jest przemieszczenie w środku rozpiętości przęsła, w środku szerokości przekroju poprzecznego. Taka analiza stanowi numeryczne wsparcie procesu projektowego, gdzie jest wykorzystywana obok doświadczenia i intuicji projektantów.

## Summary

The dissertation is a part of grant FOBRIDGE no. PBS1/B2/6/2013 entitled “Elaboration of composite pedestrian bridge spans to be applied over two-lane motorway” which is supported by the National Centre for Research and Development, Poland. The main aim of the study was the preparation for designing foot and cycle bridge whole made of composite materials. The dissertation consist of two main parts: experimental tests of various glass fiber reinforced polymer GFRP composites elements with numerical models validation and sensitivity analysis as a support the designing process.

The first part of study includes experimental tests of three types of elements sorted due to its type and size: laminate specimen, sandwich beam and full scale segment which is a three meters long section of target designed foot and cycle bridge. Laminate specimen is produced as four-layer composite based on vinylester resin reinforced by glass stitched multidirectional fabrics. The specimen was prepared according to standard and was examined in unidirectional tension test, so global material properties such as modulus of elasticity or Poisson ratio was determined. Sandwich beam consist of the same four-layer laminate as a skin and PET foam as a core. Three- and fourpoint bending test was conducted on a specially designed and produced test stand adjusted to testing machine. Beams were examined until its failure determining maximum force, displacement and strain and failure mode. And, finally, full scale segment was examined by various of static and dynamic tests. For each experimental tests numerical simulations were carried out. Numerical models were performed in FEMAP & NX Nastran v. 10.1.1 using Finite Element Method. The range of linear elasticity was assessed. Additionally, for full scale segment, validation of numerical model was conducted.

The second part of study contains sensitivity analysis as a part of theory of design. Three examples of sensitivity analysis were performed and classified in order to problem size: one-dimensional problem – frame, two-dimensional problem – shield and three-dimensional problem – designed composite foot and cycle bridge. In the first and second test examples calculation were conducted by means of a MATLAB based code. In the third, sensitivity analysis of real structure of pedestrian bridge investigated which areas of designed foot and cycle bridge impact more and which less on analyzed deflection in the middle of the span length. Based on that, areas which need to be strengthened were identified.