

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie

Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa

mgr Grzegorz Koczan

# Badanie nieliniowych modeli wytrzymałościowych dla zginania drewna

Research of nonlinear strength models for wood bending

Praca doktorska  
Doctoral thesis

Praca wykonana pod kierunkiem  
dra hab. inż. Pawła Kozakiewicza, prof. SGGW  
Katedra Nauki o Drewnie i Ochrony Drewna  
Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Recenzenci:

dr hab. inż. Edward Roszyk  
Katedra Nauki o Drewnie  
Wydział Leśny i Technologii Drewna  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

dr hab. inż. Cezary Gozdecki, prof. UKW  
Katedra Materiałów Konstrukcyjnych i Biomateriałów  
Instytut Inżynierii Materiałowej  
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

Warszawa 2020

## Streszczenie

### Badanie nieliniowych modeli wytrzymałości dla zginania drewna

Idea pracy polegała na zbadaniu relacji pomiędzy wytrzymałością na zginanie, a wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie drewna. Praca miała w równym stopniu charakter teoretyczny, co eksperymentalny. Badania doświadczalne, wykonane na dziesięciu gatunkach drewna, umożliwiły wybranie najbardziej zgodnych z nimi nieliniowych modeli zginania.

Teoretyczna część pracy polegała na wyprowadzeniu formuły wytrzymałości na zginanie w zależności od wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie dla jedenastu nierównoważnych modeli nieliniowych. Jeden z czterech nieliniowych modeli literaturowych miał charakter referencyjny, a pozostałe siedem to propozycje autorskie, w tym te najbardziej zgodne z pomiarami. W przypadku referencyjnego modelu Thunella–Roša udało się znacznie uprościć oryginalną formułę wytrzymałości na zginanie przytoczoną w niemieckim podręczniku Kollmanna.

Metodyka badań doświadczalnych opierała się na pomiarach wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i zginanie, które są obarczone stosunkowo małym współczynnikiem zmienności w stosunku do modułów sprężystości. Wybór czteropunktowego testu zginania podyktowany był brakiem naprężeń ścinających oraz prostopadłych do włókien w łamanych fragmentach próbek drewnianych. Ponadto zastosowano próbki toczone w teście rozciągania, w kształcie zbliżonym do starej normy australijskiej. Materiał badawczy stanowiło dziesięć gatunków drewna czterech podstawowych typów: iglastego (sosna zwyczajna, świerk pospolity), rozpierzchnaczyniowego (buk zwyczajny, brzoza brodawkowata, topola czarna), pierścieniowonaczyniowego (jesion wyniosły, dąb szypułkowy), egzotycznego (merbau, wenge, meranti białe). Do badania drewna przyjęto dwa standardy wilgotności: drewna powietrznosuchego w stanie wykonania próbek oraz drewna klimatyzowanego nad nasyconym roztworem  $\text{NaNO}_2$ .

W opracowaniu wyników oprócz zwykłych wykresów korelacyjnych zastosowano specjalny typ wykresów (nazwany mapą modeli) umożliwiający porównywanie zgodności pomiarów z przewidywaniami modeli nieliniowych. Na jednej takiej mapie modeli mogły być przedstawiane wszystkie modele i wszystkie punkty serii pomiarowych. Modele nieliniowe zostały poddane ocenie rankingowej na podstawie średniego odchylenia kwadratowego ich przewidywań od wartości zmierzonych. W obu przeprowadzonych zastosowaniach takiego rankingu najlepiej wypadły modele dwutrapezowe i dwumodułowe, a także nietypowy model nierównowagowy. Przeanalizowano również geometryczną przyczynę, niezależną od nieliniowości i nierównowagowości, zawyżania pomiarów wytrzymałości na zginanie, które oszacowano na 5%. Uwzględnienie tej przyczyny dodatkowo poprawiło zgodność wyników pomiarów z przewidywaniami modeli nieliniowych, a szczególnie trapezowego modelu dwumodułowego.

*Słowa kluczowe:* wytrzymałość na zginanie, przesuwanie osi obojętnej, nieliniowość sprężysto-plastyczna, znakoczułość drewna, model Thunella–Roša, model dwumodułowy, model dwutrapezowy, model nierównowagowy, nieliniowe prawo Hooke'a

## Summary

### Research of nonlinear strength models for wood bending

The idea of the work was to examine the relationship between bending strength and compression strength and tension strength of wood. The work was both theoretical and experimental. Experimental tests carried out on nine species of wood made it possible to select the most compatible nonlinear bending models.

The theoretical part of the work consisted in deriving the bending strength formula depending on the compression and tension strength of eleven non-equivalent nonlinear models. One of the four nonlinear literature models had a reference character, and the remaining seven were proprietary propositions, including the ones most consistent with the measurements. In the case of the Thunell–Roš reference model, the original bending strength formula quoted in the German Kollmann textbook was significantly simplified.

The methodology of experimental research was based on measurements of compression strength, tension strength and bending strength, which are burdened with a relatively small coefficient of variation in relation to elastic modulus. The choice of a four-point bending test was dictated by the lack of shear stresses and perpendicular to the grain in broken fragments of wooden samples. In addition, the samples used in the tension test were turned, with a shape similar to the old Australian standard. The research material consisted of ten types of wood of four basic types: softwood (Scots pine, spruce), diffuse-porous (beech, silver birch, black poplar), ring-porous (ash tall, English oak), exotic (merbau, wenge, meranti white). Two standards of moisture for airborne wood in the state of making samples and air-conditioned wood over a saturated solution of  $\text{NaNO}_2$  were adopted for wood testing.

In the analysis of the results, apart from the usual correlation graphs, a special type of graphs (called a models map) were used to compare the compliance of the measurements with the predictions of nonlinear models. All models and all points of the measurement series could be presented on one such map of models. Nonlinear models were ranked on the basis of the mean squared deviation of their predictions from the measured values. In both applications of such a ranking, the double trapezoidal and double module models, as well as the atypical non-equilibrium model, fared best. The geometric cause, independent of nonlinearity and non-equilibrium, was also analyzed for overestimating the bending strength measurements, which was estimated at 5%. Taking this cause into account additionally improves the compliance of the measurement results with the predictions of nonlinear models, especially the trapezoidal double module model.

*Keywords:* bending strength, displacement of the neutral axis, elastic-plastic nonlinearity, wood sign-sensitivity, Thunell–Roš model, double module model, double trapezoidal model, non-equilibrium model, nonlinear Hooke's law.