

MKP MODEL DŘEVĚNÝCH NOSNÍKŮ VYZTUŽENÝCH LAMELOU Z VLÁKEN VYSOKÉ PEVNOSTI

FEM MODEL OF TIMBER BEAMS REINFORCED BY HIGH-STRENGTH FIBRE LAMING

Petr KUKLÍK, Lenka MELZEROVÁ, Jan VÍDEŇSKÝ¹

Abstrakt

Prezentováno je vyztužení dřevěných prvků. Rozvoj technologie lepeného lamelového dřeva je v současnosti velmi podstatný. Lepené lamelové dřevo může být vyrobeno mnohem účinněji s použitím lamel vyztužených vláknou vysoké pevnosti. V rámci tohoto výzkumu byl vyvinut výpočetní model. Zkušební nosníky byly komerčně vyrobeny. Ohybové zkoušky byly provedeny se dvěma břemeny. V tomto příspěvku jsou uvedeny výsledky nosníků zatížených až do porušení za účelem verifikace výpočetního modelu.

Klíčová slova: dřevěné konstrukce, lepené lamelové dřevo, dřevěné vyztužené prvky

Abstract

The reinforcement of timber elements is presented. Advancement in glued laminated timber technology is now essential. Glued laminated timber can be made more efficient through the use of high-strength fibre-reinforced laming. Within this research a calculation model was developed. The test beams were commercially produced. Bending tests were conducted under two-point loads. This paper presents the test results of beams loaded up to failure to verify the calculation model.

Keywords: timber structures, glued laminated timber, reinforced timber members

ÚVOD

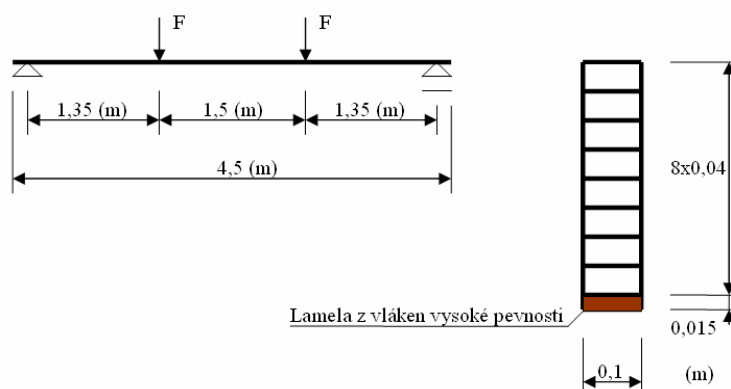
V rámci výzkumného úkolu byly zkoušeny v laboratoři stavební fakulty trámy vyztužené na spodním povrchu lamelou vysoké pevnosti, které měly rozměry skutečných konstrukčních prvků. Jako lamela vysoké pevnosti byla použita jednak lamela ze skelných vláken a jednak z uhlíkových vláken, a to každá v několika sériích lišících se navzájem tloušťkami. V tomto článku se zaměříme na použití skelné lamely o tloušťce 15 mm, kde bylo v sérii zkoušeno pět nosníků a na jejich modelování metodou konečných prvků.

POPIS EXPERIMENTÁLNÍCH METOD A POUŽITÉHO MATERIÁL

Každý trám délky 4,5 m, šířky 0,1 m a výšky 0,335 m (to je 0,32 m dřevo a 0,015 m skelná lamela) byl uložen jako prostý nosník a zatížen dvěma silami jak je uvedeno v obr.1. Dřevěná část byla složena po výšce z osmi částí po 4 cm a po délce byla každá část individuálně nastavena za použití lepeného zubovitého spoje. Pod obě břemena byla umístěna ocelová roznášecí deska délky 40 cm přes celou šířku nosníku. Podobné opatření bylo provedeno i v místě

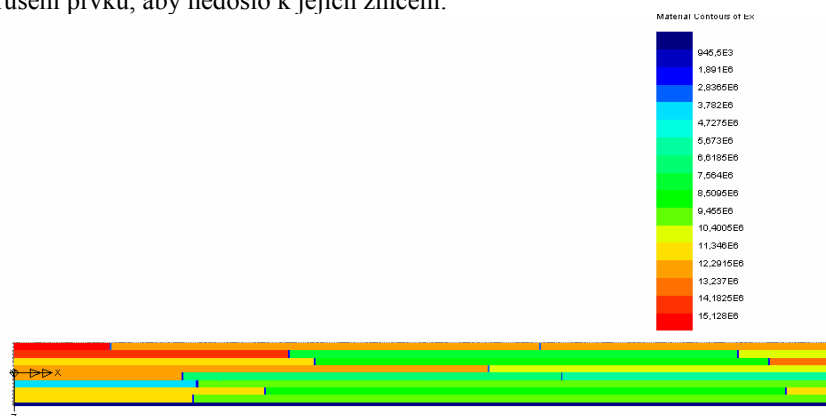
¹ doc. Ing. Petr KUKLÍK, CSc., Ing. Lenka MELZEROVÁ, PhD., Ing. Jan VÍDEŇSKÝ, FSv ČVUT v Praze, kuklik@fsv.cvut.cz, melzerov@fsv.cvut.cz, Jan.Vidensky@fsv.cvut.cz,
Lektoroval: doc. Ing. Ján KANÓCZ, CSc., SvF TU v Košiciach, jan.kanocz@tuke.sk

uložení aby nedošlo k výraznému zatlačení podpor při zatěžování. Síly se postupně zvětšovaly v krocích po 4 kN. Mezi dvěma zatěžovacími stupni byla vždy časová přestávka, ve které byla sledována změna deformace při udržování stálé hladiny zatížení. Pokud došlo k ustálení deformace, přistoupilo se k dalšímu zatěžovacímu kroku. Postup byl opakován až do porušení prvku.



Obr.1 Schéma zatěžování nosníků a zobrazení polohy lamely z vláken vysoké pevnosti v nosníku

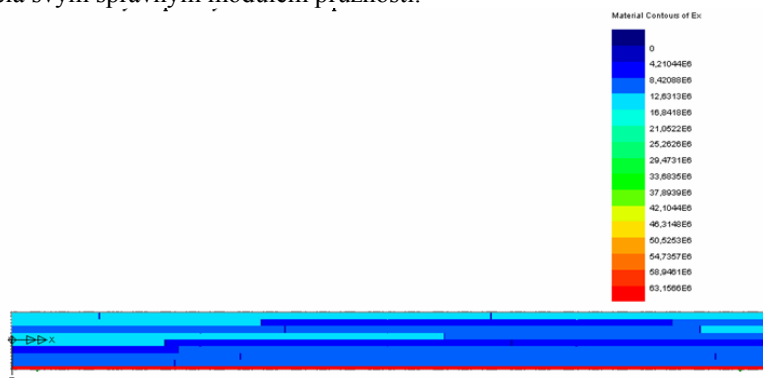
V průběhu zatěžování byly jednak sledovány deformace pomocí tenzometrů umístěných na horním povrchu trámu a na spodním povrchu lamely uprostřed rozpětí a jednak bylo na trám osazeno celkem sedm snímačů posunutí. Dva snímače posunutí byly umístěny u podpor, aby bylo možné provést korekci o jejich zatlačení, jeden snímač posunutí byl umístěn v polovině rozpětí a určoval průhyb trámu v každém zatěžovacím stupni. Zbývající čtyři snímače posunutí byly umístěny v párech na bocích nosníku uprostřed rozpětí a byly deaktivovány ve chvíli, kdy se blížilo porušení prvku, aby nedošlo k jejich zničení.



Obr.2 Rozložení charakteristiky E_x v kPa na trámu 46 s potlačeným vlivem lamely s vláknou vysoké pevnosti

Zcela nezávisle na této zatěžovací zkoušce byly stanoveny moduly pružnosti ve směru vláken sklerometrickou a dynamickou metodou, a to v každém segmentu zvlášť. V rámci každého segmentu byla tato zkouška provedena čtyřikrát, z čehož byla stanovena výsledná průměrná hodnota. Na spoje je do výpočtu použit materiál s poškozením, což se projeví lokálním snížením modulu pružnosti ve směru vláken. Následující obr.2 ukazuje rozložení modulů pružnosti ve směru vláken pro jeden konkrétní trám s označením TRÁM 46. Na tomto obrázku je potlačen vliv modulu pružnosti výztužné lamely (respektive je zadán nulovou hodnotou), neboť její modul

pružnosti je řádově šestkrát vyšší a rozdíly v modulech pružnosti mezi jednotlivými dřevěnými částmi a spoji by nevynikly. Pro úplnost je pro stejný trám ještě uveden obr.3, kde je zobrazena i výztužná lamela svým správným modulem pružnosti.



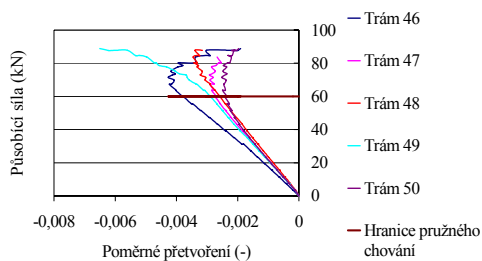
Obr.3 Rozložení charakteristiky E_x v kPa na trám 46 s patrným vlivem lamely s vlákny vysoké pevnosti

VÝSLEDKY A DISKUSE

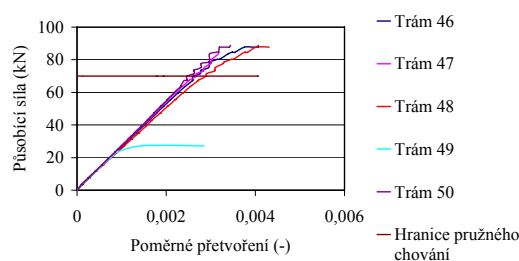
Vstupními parametry výpočtu jsou tedy přesné hodnoty E_x (modulu pružnosti ve směru vláken v jednotlivých segmentech a polohy spojů. Po vytvoření MKP modelu každého nosníku nás bude zajímat, jak se shodují některé měřitelné parametry v modelu a ve skutečném experimentu. MKP model jednoho nosníku včetně deformovaného tvaru zachycuje obr.4. Materiál je namodelován jako ortotropní.



Obr.4 Zatížení, dělení a deformovaný tvar trámu 46



Obr.5 Závislost poměrného přetvoření na tlačeném povrchu na působící síle



Obr.6 Závislost poměrného přetvoření na taženém povrchu na působící síle

Pro další výpočet je nejprve nutné určit hranici zatížení, po kterou se nosníky chovají pružně. Názorně to lze stanovit z obr.5, který popisuje závislost poměrného přetvoření na zatížení na tlačeném povrchu (viz. data z tenzometrů na tomto povrchu), respektive obr.6, který popisuje závislost poměrného přetvoření na zatížení na taženém povrchu. Zde vychází, že pro všechny

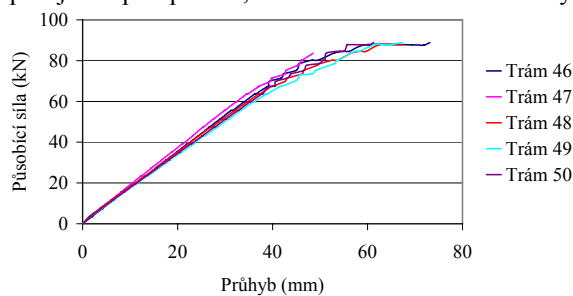
nosníky je na taženém povrchu hraniční síla 70 kN a na tlačném povrchu 60 kN. Pro trám jako celek budeme tedy uvažovat hodnotu 60 kN (každé z obou působících sil) jako hranici pružného chování. V následující tabulce jsou ukázány rozdíly mezi experimenty a výpočty za předpokladu pružného chování nosníků $F = 60$ kN.

Měřené a vypočtené hodnoty průhybu a poměrného přetvoření na nosících na taženém respektive tlačném povrchu uprostřed rozpětí

Tabulka 1

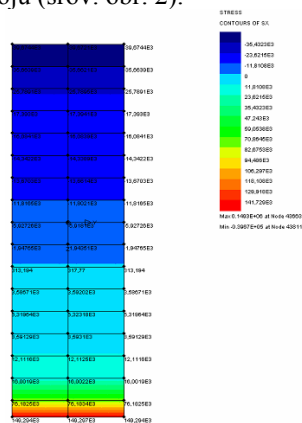
| Trám | w měř.mm | w vyp. mm | ε tah měř. | ε tah vyp. | ε tlak měř. | ε tlak vyp. |
|---------|----------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Trám 46 | 33,88 | 34,59 | 0,002261 | 0,002165 | -0,003777 | -0,003105 |
| Trám 47 | 32,17 | 32,17 | 0,002202 | 0,002062 | -0,002732 | -0,002737 |
| Trám 48 | 34,54 | 37,34 | 0,002373 | 0,002389 | -0,002568 | -0,003313 |
| Trám 49 | 35,85 | 32,24 | Chyba | 0,002028 | -0,002876 | -0,002820 |
| Trám 50 | 35,09 | 35,07 | 0,002167 | 0,002151 | -0,002345 | -0,003225 |

Z tabulky 1 je patrné, že při síle 60 kN jsou rozdíly mezi výpočtem a měřením v případě průhybu od 0 do 3,61 mm, to je od 0% do 10% průhybu naměřeného. Pro ilustraci je ještě vhodné uvést graf závislosti průhybu uprostřed rozpětí na působící síle (obr.7). Tato data byla získána ze snímače posunutí a podporují náš předpoklad, že do zatížení 60 kN se trámy chovají pružně.

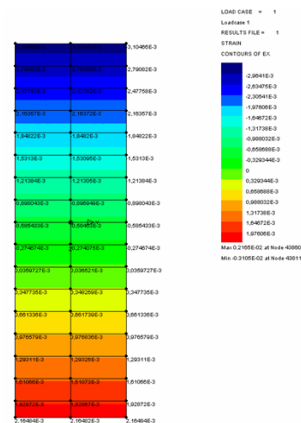


Obr.7 Závislost průhybu uprostřed rozpětí na velikosti působící síly

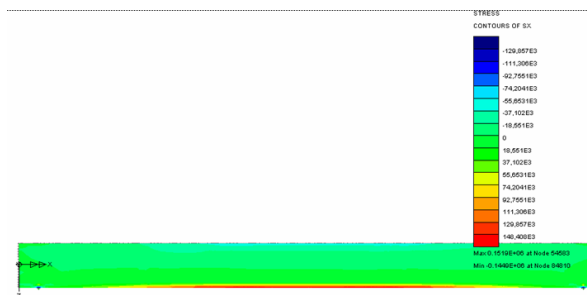
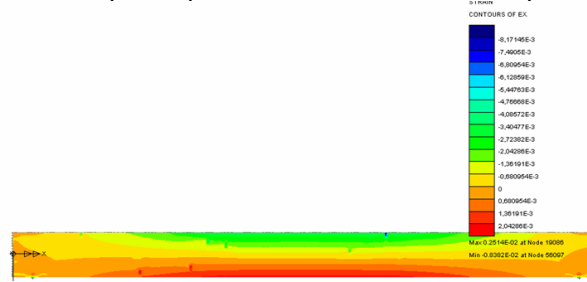
Dále je v obr.8,9 uvedeno pro konkrétní trám 46 rozložení napětí a poměrného přetvoření po průřezu uprostřed rozpětí a pro tentýž trám je v obr.10,11 uvedeno napětí σ_x a poměrné přetvoření ε_x podél celého nosníku. Zde je možné si všimnout náhlých změn v průběhu σ_x a ε_x v místech spojů (srov. obr. 2).



Obr.8 Průběh napětí σ_x po středním průřezu v limitním pružném stavu, trám 46



Obr.9 Průběh poměrných přetvoření ε_x po středním průřezu v limitním pružném stavu, trám 46

Obr.10 Průběh napětí σ_x po délce nosníku 46 v limitním pružném stavuObr.11 Průběh poměrného přetvoření ϵ_x po délce nosníku 46 v limitním pružném stavu s patrnými místy spojů

Z uvedeného je patrné, že modely vykazují velmi dobrou shodu s provedenými experimenty. Je tedy možné pokusit se provést predikci chování skutečných nosníků při fiktivním rozmístění spojů. Nejprve je však třeba stanovit modul pružnosti dřeva ve směru vláken, který má na výpočet dominantní vliv. Ostatní parametry dřeva jako ortotropního materiálu zůstávají nezměněny. Tento modul pružnosti je stanoven průměrnou hodnotou modulů pružnosti všech segmentů všech pěti trámů. Pro ověření přesnosti byly všechny skutečné trámy se skutečným rozložením spojů fiktivně složeny ze dřeva o průměrném E_x . Tabulka 2 ukazuje odchylky průhybu uprostřed rozpětí každého skutečného trámu a fiktivního trámu se stejným rozložením spojů.

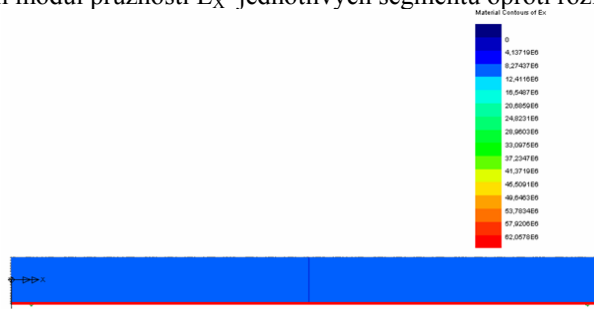
Odchylky průhybu uprostřed rozpětí skutečných trámů a trámů se stejným rozložením spojů, ale průměrným E_x

Tabulka 2

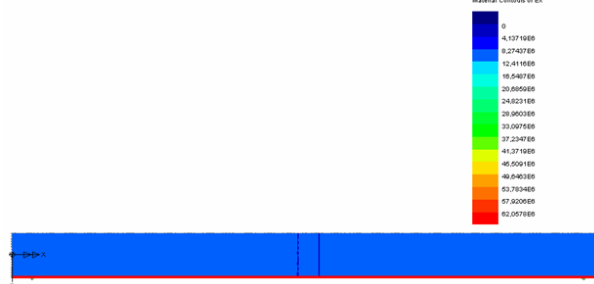
| Trám | Průhyb v mm skutečné E_x vyp. | Průhyb v mm průměrné E_x vyp. |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|
| Trám 46 | 34,59 | 34,03 |
| Trám 47 | 32,17 | 34,08 |
| Trám 48 | 37,34 | 34,15 |
| Trám 49 | 32,24 | 33,88 |
| Trám 50 | 35,07 | 33,96 |

Z této tabulky 2 plyne, že rozdíly mezi jednotlivými rozloženými spojů při konstantním modulu pružnosti E_x jsou velmi malé. Nyní se pokusíme vytvořit tři fiktivní trámy s extrémním rozložením spojů. Trám 1 nebude obsahovat žádné spoje. Průhyb uprostřed rozpětí je z MKP modelu vypočten na $w = 33,83$ mm. Trám 2 má v každé vrstvě pouze jeden spoj, ale tyto spoje jsou všechny srovnány nad sebou a umístěny do poloviny rozpětí (obr.12). V tomto velice nepříznivém případě vychází $w = 34,11$ mm. Trám 3 bude mít rozložení spojů ještě nepříznivější. Ze zkoušených trámů je zjištěno, že segment o nejmenší délce je dlouhý 160 mm. Proto je trám 3 vytvořen tak, že spoje jsou umístěny po celá výšce nosníku nad sebou, a to ve dvou liniích ve vzdálenosti 80 mm symetricky od svislé roviny symetrie nosníku (obr.13). Při tomto

nejnepříznivějším rozložení spojů (které vzhledem k výrobním kritériím není přípustné vyrobit) vyšel průhyb uprostřed rozpětí $w = 34,41$ mm. Z uvedeného je patrné, že při vyztužení prvku lamelou ze skelných vláken o tloušťce 15 mm hraje v rozdílných průhybech mezi jednotlivými prvky dominantní roli modul pružnosti E_x jednotlivých segmentů oproti rozložení spojů.



Obr.12 Rozložení charakteristiky E_x v kPa na fiktivním trámu 2 s průměrným E_x se spojem uprostřed rozpětí s patrným vlivem lamely s vlákny o vysoké pevnosti



Obr.13 Rozložení charakteristiky E_x v kPa na fiktivním trámu 3 s průměrným E_x s dvojicí spojů uprostřed rozpětí s patrným vlivem lamely s vlákny o vysoké pevnosti

ZÁVĚR

- Vytvořené modely vykazují s provedenými experimenty velmi dobrou shodu.
- Pro výsledné hodnoty průhybu hrají dominantní roli skutečné materiálové charakteristiky jednotlivých dřevěných segmentů oproti rozložení spojů.
- Při znalosti materiálových charakteristik jednotlivých částí lepeného nosníku zjištěných nedestruktivní zkouškou a geometrie tohoto nosníku, lze vytvořit MKP model, který velmi přesně vystihuje jeho chování.

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

LITERATURA

- [1] COLLING, F.: *Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen*. University of Karlsruhe, Germany, 1990
- [2] LARSEN, H. J.: *Strength of glued laminated beams – Part 5: Tests of beams*. Institute of Building Technology and Structural Engineering. Report No. 8201, 1982
- [3] MEIER U.: *Carbon Fiber-Reinforced Polymers*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, 1992
- [4] SERRANO, E., LARSEN, H. J.: *Numerical investigations of the laminating effect in laminated beams*. J. Structural Engineering, 125(7), 740-745, 1999