

# E xperimentální A nalýza N apětí 2005

## REINFORCED GLUED LAMINATED TIMBER LEPENÉ LAMELOVÉ DŘEVO VYZTUŽENÉ VLÁKNY

Lenka Hluší<sup>1</sup>, Petr Konvalinka<sup>2</sup>, Karel Hořejší<sup>3</sup>

*Timber is one of the oldest materials of the world. It was used for the buildings as well as for the bridges and many other constructions. Later it was unable to compete with new materials as steel and concrete. It's not possible to use timber for constructions with big span. Now there are attempts to reverse this situation. This paper is about one of the attempts – reinforcement of the beam with carbon fibres. This material is made from six unidirectional layers of carbon fibres and one upper and one bottom layer of bidirectional glass fibres. The reinforcement is glued to the timber beam (from the bottom side).*

*The other parts of the paper are about the production of the samples, about the arrangement of the bend test and the resulting material characteristics of the samples.*

### Keywords

reinforced timber, material characteristics, carbon, bending

### 1. Úvod do problematiky

Dřevo je jedním z nejstarších konstrukčních materiálů. Používalo se pro všechny druhy staveb - ať už se jednalo o obydlí nebo o mosty a budovy prospěšné společnosti. S nástupem nových materiálů a nových požadavků na účel budov došlo k ústupu oblíbenosti dřeva. S ohledem na své vlastnosti nemohlo konkurovat betonovým a ocelovým konstrukcím v oblasti výstavby výškových budov, průmyslových hal na velká rozpětí ap. Využití dřeva pro konstrukční účely se snížilo, ale nezaniklo úplně. Důkazem je např. kostel Neposkvrněného početí Panny Marie ve Strašnicích v Praze, oblouková lávka v Českých Budějovicích nebo visutá lávka pro pěší v Benešově u Semil, která byla dokončena v roce 2002 a je jedinou lávkou svého druhu v České republice (obrázky viz příloha).

Během posledních let se objevilo více požadavků na dřevěné konstrukce a je tedy nutné hledat nové možnosti vylepšení dřeva jako materiálu. Již dlouho je známa metoda lepeného lamelového dřeva, která přinesla zvýšení tuhosti a pevnosti materiálu. Jednotlivé dřevěné lamely jsou nastavovány zubovitým spojem a tyto pak slepeny v několika vrstvách. Narozdíl

---

<sup>1</sup> Ing. Lenka Hluší: ČVUT Fakulta stavební; Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, ČR, tel.: +420777862581, e-mail: lenka.hlusi@fsv.cvut.cz

<sup>2</sup> Doc. Ing. Petr Konvalinka, CSc: ČVUT Fakulta stavební; Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, ČR, tel.: +420224354499; e-mail: conwa@fsv.cvut.cz

<sup>3</sup> Ing. Karel Hořejší: ČVUT Fakulta stavební; Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, ČR, tel.: +420224354941; e-mail: conwa@fsv.cvut.cz

od rostlého dřeva není potřeba hledat vhodné stromy kvůli velkým průřezům nebo dlouhým nosníkům, protože pomocí nastavování a slepování lamel není problém vytvořit libovolný průřez, který je omezen pouze možnostmi výroby. Společnost Tesko, která je největším výrobcem lepených lamelových konstrukcí u nás, dokáže vyrobit nosník o výšce 2m a délce 30m. Jednou z dalších výhod je možnost výroby zakřivených nosníků.

Ačkoli není možné zpochybnit přínos lepeného lamelového dřeva, je nutné pokračovat dál a hledat nové možnosti využití tohoto materiálu. Výzkum se ubírá ve směru kompozitních materiálů, jako je např. spojení dřeva a betonu nebo spojení dřeva a vláknitých materiálů. Dřívější pokusy s vyztužením dřeva pomocí tyčové výztuže nebo vysokopevnostních drátů se ukázaly jako nevhodné z důvodu nedostatečného spolupůsobení dřeva a výztuže.

Současným trendem (a také obsahem mé práce) je vyztužení pomocí vláken. Podle výzkumů Dr. Dana Tingleyho a jeho spolupracovníků ze společnosti Wood Science and Technology Institute (N.S.), Ltd., Corvallis, Oregon, USA, je celková úspora při výrobě vyztuženého nosníku, který má stejnou únosnost jako nosník nevyztužený, 35% při přepočtení na finanční stránku věci. V jejich případě byla použita karbonová vlákna, ale pro vyztužení jsou používány i jiné materiály jako například aramidová nebo skleněná vlákna. Tato vlákna jsou zpracována do tkanin podobně jako běžná látka nebo jsou pomocí cívek ukládána jednosměrně. Dalším krokem je spojení tkaniny s pojivem, nejčastěji pryskyřicí. Výrobek je potom lisován a za tepla vytvrzován. Existují také alternativní metody výroby výztuží, kdy není potřeba použít drahého autoklávu a vytvrzení probíhá za pokojové teploty. Tyto sice nemají velkou tepelnou odolnost, ale pro použití na nosné konstrukce jsou dostačující. Hotová výztuž je ke dřevu přilepena pomocí běžných lepidel.

Ačkoliv je výroba dřevěných kompozitních materiálů v České republice na svém počátku, ve světě již byly realizovány konstrukce, kde byly tyto materiály použity. Příkladem je oblouk v Bristolu ve Velké Británii, který podpírá zastřešení zábavního parku (viz příloha).

## **2. Výroba vzorků a experimenty**

Obsahem tohoto příspěvku je výzkum materiálových charakteristik dřeva vyztuženého uhlíkovou lamelou.

### **2.1 Návrh a výroba zkušebních vzorků**

#### **- výztuž**

Výztuž byla vyrobena z osmi vrstev tkaniny. Na spodní a horní vrstvu byla použita skelná tkanina Interglas 90070 s vlákny ve dvou navzájem kolmých směrech. Mezi ně se uložilo šest vrstev jednosměrné uhlíkové tkaniny HEXCEL style 48 300. Tloušťka každé uhlíkové vrstvy byla 0,32mm a výsledná tloušťka výztuže 2mm. Jako pojivo byla použita epoxidová pryskyřice Havel LH 3000. Výztuž byla vyrobena metodou kontaktní laminace v jednom panelu a posléze rozřezána na jednotlivé pásy. Postup výroby byl následující: do formy byly uloženy vrstvy suché tkaniny. Na ně byly uloženy technologické vrstvy, které se ve výsledku odstranily. Byla to odtrhová tkanina Astonica, která zajistila hladký povrch výztuže, perforovaná folie Airtech Stretchlon P3 a stříž Ronolin HC – poslední dvě jmenované vrstvy rozvedly pojivo rovnoměrně po celém panelu. Poslední vrstvou byla PE membrána, díky které bylo možno ve formě dosáhnout vakua, za kterého došlo ke zhutnění vrstev a vytvrzení pojiva (při podtlaku -90 kPa za 24h při normální teplotě).

## - dřevěná tělesa

Výroba těles a vlastní zkoušky proběhly podle ČSN EN 386 - Lepené lamelové dřevo - Požadavky na užitné vlastnosti a minimální výrobní požadavky, ČSN EN 408 - Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Zjišťování některých fyzikálních a mechanických vlastností, a podle ČSN EN 384 - Konstrukční dřevo - Zjišťování charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty.

Norma ČSN EN 386 zahrnuje požadavky na výrobu vzorků - teplotu, vlhkost vzduchu, dobu vytvrzení. Norma ČSN EN 384 udává metody výběru těles, referenční podmínky, velikost těles a stanovení vlastností dřeva, norma ČSN EN 408 uspořádání zkoušek a výpočet požadovaných vlastností.

Experimenty zahrnují celkem čtyři sady zkušebních těles, na nichž byla provedena ohybová zkouška. Každá sada obsahovala tři vzorky. Sady byly vytvořeny takto:

- 1 - rostlé dřevo
- 2 - rostlé dřevo s výztuhou na spodní straně nosníku (obr. 1)
- 3 - lepené lamelové dřevo
- 4 - lepené lamelové dřevo s výztuhou na spodní straně nosníku

Průřez zkoušených vzorků byl 30x30mm, délka vzorků odpovídala požadavkům normy, tzn. 600mm (20ti-násobek výšky průřezu).

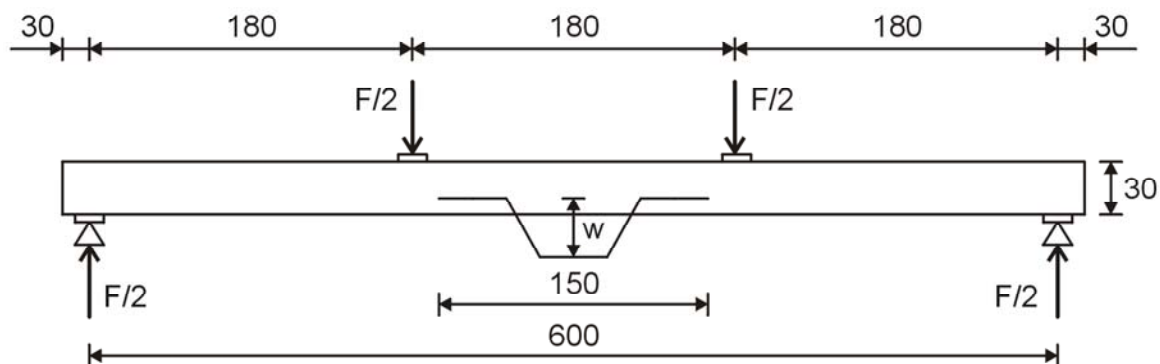
Na výrobu vzorků bylo použito smrkové dřevo třídy SI, které je nejběžnějším materiálem pro lepené konstrukce. Z časových důvodů zatím neproběhly všechny experimenty, ale pouze sady 1 a 2. Vyhodnocení se tedy týká pouze těchto vzorků.



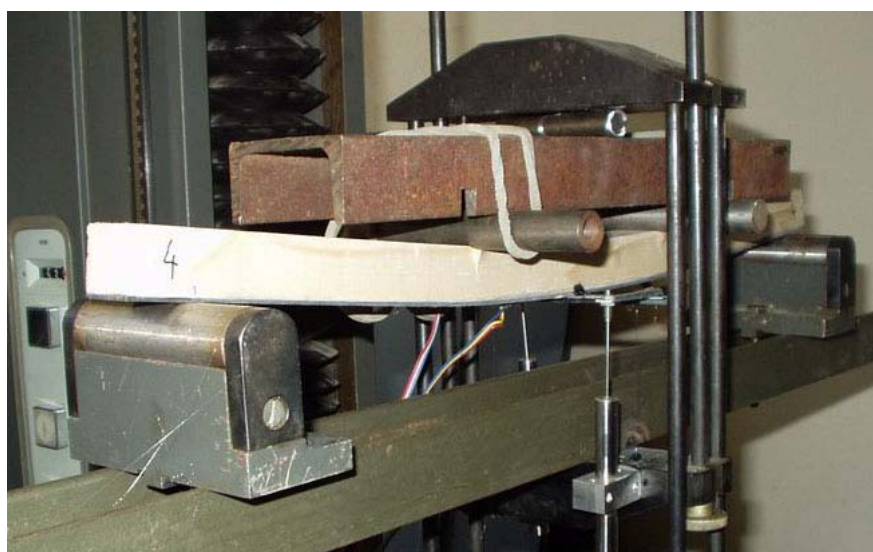
Obr. 1 - Rostlé dřevo s výztuhou na straně dolních vláken

## 2.2 Experimenty

Model uspořádání zkoušky v ohybu je na obr. 2. Zkušební těleso bylo zatěžováno na ohyb symetricky dvěma břemeny při rozpětí v souladu s obr. 2 a prostém podepření. Mezi zkušební těleso a zatěžovací hlavy byly v případě vyztužených vzorků vloženy malé ocelové podložky (jejich délka nepřesáhla polovinu výšky zkušebního tělesa), čímž se omezilo lokální zatlačení. Nevytužené vzorky byly zatěžovány podle předběžných odhadů po 200N až do porušení. Vytužené vzorky byly zatěžovány po 500N do hodnoty zatížení 2500N a dále po 250N až do porušení.



Obr. 2 – Uspořádání ohybové zkoušky



Obr. 3 - Průběh zkoušky

Nevyztužený celistvý vzorek (bez výrazných suků) se porušil klasickým způsobem. Zbylé dva vzorky se porušily v suku, který byl v blízkosti zatížení. Jeden z vyztužených vzorků byl porušen smykovou trhlinou po výšce průřezu, u druhého se roztrhlo dřevo po délce a u posledního došlo k odtržení lamely. U vyztužených vzorků došlo ke zplastizování dřeva (obr. 4), jelikož celková únosnost kompozitu vysoce překročila únosnost běžného nevyztuženého dřeva.



Obr. 4 – Porušení vyztuženého vzorku dřeva

### 3. Vyhodnocení

Podle maximální dosažené síly byla pro nevyztužené dřevo určena pevnost v ohybu (ČSN EN 408):

$$f_m = \frac{a \cdot F_{\max}}{2 \cdot W}, \text{ kde} \quad (1)$$

a ... vzdálenost zatížení od bližší podpory;  $a = 180\text{mm}$ ,

$F_{\max}$  ... maximální dosažená síla (průměr ze tří vzorků);  $F_{\max} = 2967\text{ N}$ ,

W ... průřezový modul;  $W = 4500\text{mm}^3$ .

Podle vztahu (1) byla stanovena pevnost  $f_m = 58,53\text{ MPa}$ , což odpovídá elastickému výpočtu. Tato hodnota byla použita pro teoretické určení momentu únosnosti kompozitního průřezu. Podle uspořádání zkoušky lze stanovit moment únosnosti průřezu podle vztahu

$$M = \frac{a \cdot F_{\max}}{2}. \quad (2)$$

Pro nevyztužený průřez byla po dosažení do vztahu (2) získána hodnota  $M_n = 267,03\text{ Nm}$ .

Výpočet únosnosti průřezu vyztuženého lamelou byl proveden jak elasticky, tak plasticky. Elastický výpočet je obecně více konzervativní než plastický. U výpočtu dřevěných konstrukcí se s plasticitou běžně nepočítá, v případě vyztuženého dřeva ale bylo nutné vzít ji v úvahu. Lamela se chovala podobně jako ocelová výztuž v betonu a přenesla namáhání tahem. Tím umožnila dřevu částečné zplastizování průřezu. Pro výpočet ideálního průřezu byly použity hodnoty stanovené výrobcem výztuže.

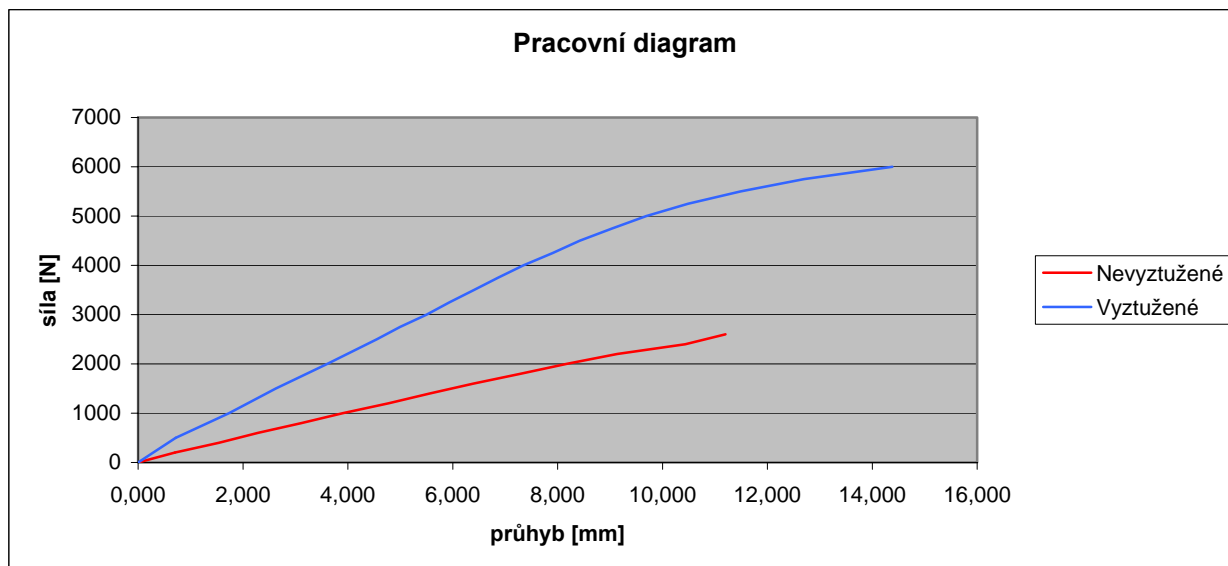
Elastickým výpočtem bylo stanoveno, že moment únosnosti průřezu  $M_{v,el} = 387,68\text{ Nm}$ . Plastickým výpočtem bylo dosaženo hodnoty  $M_{v,pl} = 726,04\text{ Nm}$ . Při použití vzorce (2), kde

$a = 180\text{mm}$ ,

$F_{\max} = 3000\text{ N}$  (z experimentu),

byla získána hodnota  $M_v = 540,0\text{ Nm}$ . Tím se prokázalo, že kompozit se chová elasto-plasticky.

Stejně jako výpočet momentů únosnosti i pracovní diagram prokázal, že při použití výztužné lamely lze výrazně vylepšit charakteristiky dřeva. Z výsledků experimentů byly vytvořeny pracovní diagramy, které zobrazují závislost průhybu na zatěžovací síle. Na následujícím obrázku je vidět srovnání pracovních diagramů vyztuženého a nevyztuženého dřeva v jednom grafu. Rozdíl maximální dosažené síly potvrdil předchozí výpočty.



Obr. 5 – Srovnání pracovních diagramů vyztuženého a nevyztuženého dřeva

## 4. Závěr

Bylo prokázáno, že vyztužené dřevo je výrazně únosnější než dřevo nevyztužené. Únosnost vyztuženého průřezu je přibližně dvojnásobná ve srovnání s průřezem nevyztuženým.

## Poděkování

Děkuji za poskytnutí výztuže a potřebných poznatků Ing. Františku Martausovi z firmy Výzkumný a zkušební letecký ústav, divize leteckých vrtulí.

Výzkum byl podpořen interním grantem ČVUT a výzkumným záměrem MŠMT MSM 21000000.

## Literatura

- [1] Martaus, F.: *Vývoj univerzální metody RTM pro obecné kompozitní průmyslové výrobky* – VZLÚ, a.s., Praha, 2002,
- [2] Tingley, Dan A.: *Wood and wood composites reinforced with high-strength, fiber reinforced plastic: innovative, cost effective, structural materials* – Mat Tech, 1996, 85-87
- [3] ČSN EN 386 - *Lepené lamelové dřevo - Požadavky na užité vlastnosti a minimální výrobní požadavky*
- [4] ČSN EN 408 - *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Zjišťování některých fyzikálních a mechanických vlastností*
- [5] ČSN EN 384 - *Konstrukční dřevo - Zjišťování charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty*

**Příloha:**



Kostel Neposkvrněného početí Panny Marie



Oblouková lávka v Českých Budějovicích



Visutá lávka v Benešově u Semil



Oblouk v Bristolu