

ANALÝZA VYZTUŽENÝCH DŘEVĚNÝCH PRVKŮ

ANALYSIS OF REINFORCED TIMBER BEAMS

Lenka HLUŠÍ, Petr KONVALINKA¹

Abstrakt

V rámci projektu byly sestaveny čtyři sady vzorků dřeva. Tyto pak byly podrobeny zkoušce ve čtyřbodovém ohybu pro stanovení materiálových charakteristik. Každá sada obsahovala tři nosníky o rozměrech 30x30x600 mm a sady byly sestaveny takto: rostlé dřevo, rostlé dřevo s výztuhou, lepené lamelové dřevo a lepené lamelové dřevo s výztuhou. Lamela byla vyrobena z uhlíkových vláken a jejím úkolem bylo přenášet tahová napětí na spodní straně nosníku. Výsledkem bylo srovnání materiálových charakteristik jednotlivých sad a srovnání teoretických a experimentálních hodnot.

Klíčová slova: uhlíková lamela, ohybová zkouška, vyztužené lepené lamelové dřevo, vláknitá výztuž

Abstract

Four sets of timber specimens were arranged due to the project. These sets were tested in four-point bending test in order to determine the material characteristics. Each set included three beams with dimensions 30x30x600 mm and the sets were arranged this way: natural timber, reinforced natural timber, glued laminated timber and reinforced glued laminated timber. The reinforcing lamella was made of carbon fibres and its function was to transmit tension stresses on the bottom side of the beam. As a result the material characteristics of the sets were compared and so were theoretical and experimental values.

Keywords: carbon lamella, the bending test, reinforced glued laminated timber, fibre reinforcement

ÚVOD

Materiálové inženýrství je v dnešní době uznávaným vědním oborem, který je pro vývoj stavebních konstrukcí jedním z nejdůležitějších. V posledních sto letech byl v této oblasti učiněn největší pokrok, který je spojen především s kompozitními materiály. Kompozity jsou známy již ze starověku, například z Egypta nebo Číny, kde do cihel přidávali stébla slámy. Přestože cihly nebyly páleny, ale pouze sušeny na slunci, výsledná pevnost byla přibližně 7 MPa. Dnešní způsob výroby kompozitů je založen na podobném principu ve snaze vylepšit mechanické i fyzikální vlastnosti materiálů, přičemž jsou ale používány moderní přístroje, poznatky z příbuzných oborů a mimo jiné také syntetické materiály, které výrobu usnadňují a činí lépe dostupnou. Přestože již byly sepsány teorie o lomové mechanice, únavových procesech a o spolehlivosti materiálů, působení kompozitních materiálů zatím není zcela objasněno.

Dřevo je vedle kamene nejstarší a nejdostupnější stavební materiál. Jeho velkou předností je kromě energeticky snadného zpracování také jeho obnovovatelnost. Vhodným zpracováním dřeva roste jeho využitelnost k téměř sto procentům. Z dřevěného odpadu se vyrábějí dřevotřískové desky, překližky nebo je odpad použit pro papírenský průmysl. Využití dřevní

¹ Ing. Lenka HLUŠÍ, doc. Ing. Petr KONVALINKA, KME, FSv ČVUT, Praha, conwa@fsv.cvut.cz, lenka.hlusi@fsv.cvut.cz

Lektoroval: doc. Ing. Ján KANÓCZ CSc., SvF TU v Košiciach, jan.kanocz@tuke.sk

hmoty na konstrukční prvky se s použitím moderních technologií výrazně zvýšilo díky tzv. kónickým prvkům.

Dřevo je materiál organický, tudíž i ekologický a v neposlední řadě i velmi estetický. Jeho použití bylo po druhé světové válce redukováno na střešní konstrukce a výplňové materiály, ale dnes se vrací ve větším rozsahu i do nosných konstrukcí. To vše je umožněno novými metodami výroby a vylepšením pevnostních charakteristik materiálu. Nejrozšířenější současnou metodou je lepení dřevěných lamel. Postup výroby je tento: nejčastěji podle vizuálního třídění jsou vybrány vhodné lamely, ty jsou na koncích upraveny do zubovitého spoje, díky kterému se pak lamely lepí do tzv. nekonečného pásu za sebe. Tento pás je řezán na díly potřebné délky a jednotlivé lamely jsou slepeny pomocí běžných lepidel k sobě. Tím je možné dosáhnout výrazně větších průřezů než u rostlého dřeva. Díky třídění a lamelovému působení nedochází k tak kritickým poruchám, jako je např. náhlé prasknutí dřeva v suku. Nosníky je možné po slepení ohýbat do libovolných poloměrů. Rozměry jsou omezené pouze možnostmi výroby. Šířka nosníku je dána vlastnostmi dřeva, konkrétně sesycháním, kdy by při výrobě nosníku širšího než 200 mm docházelo k výsušným trhlinám. Nosníků větší šířky se dosahuje tím, že se slepí dva nosníky vedle sebe. Největší nosník vyrobený v ČR měl výšku 2 m a délku 35 m a byl vyroben v závodě Tesko (České dřevařské závody).

Přestože je použití dřeva na nosné konstrukce častější (např. lávka pro pěší v Benešově u Semil - viz obr. 1), ani lepené lamelové dřevo nemůže konkurovat ocelovým a železobetonovým konstrukcím, zejména na větší rozpětí. Dřevěné nosníky se používají např. ve spojení s betonovými stropy, ale většího využití je možné dosáhnout při použití vláknitých materiálů.



Obr. 1 Visutá lávka v Benešově u Semil, rok dokončení 2002

OHYBOVÁ ZKOUŠKA DŘEVĚNÝCH VZORKŮ

- **Výroba vzorků**

Pro výzkum bylo nutné zvolit materiál vzorků a jejich vzájemné působení. Pro dřevěné prvky bylo zvoleno smrkové dřevo třídy SI.

Materiál pro výztužnou lamelu je sám o sobě kompozitem s výztužnými vlákny. Pevná a tuhá vlákna uložená v měkčí a plastické matrici zvyšují pevnost, tuhost, únavovou odolnost a měrnou pevnost kompozitu. Matrice má za úkol přenést vnější zatížení na vlákna a zaručuje potřebnou plasticitu a houževnatost kompozitu. Matrice také přenáší napětí z předčasně porušených vláken do okolních neporušených, a tím omezuje šíření trhlin. Vyztužující vlákna mají zhruba o jeden řád vyšší modul pružnosti a pevnost. V matrici mohou být uspořádána různým způsobem - jednosměrně, ortogonálně, nahodile orientovaná vlákna (krátká) a vlákna v několika vrstvách. U kompozitů s krátkými vlákny (např. drátkobeton) nezáleží při rovnoměrném vyztužení na směru zatížení. Pro kompozity s průběžnými vlákny je ideální uspořádání podle typu zatížení,

např. pro tažené prvky jednosměrná výztuž ve směru zatížení. Významný vliv na vlastnosti kompozitu má objemové množství vláken. Se zvyšujícím se množstvím vláken vzrůstá jeho pevnost a tuhost. Největší objemový podíl vláken - cca 80% - je omezen požadavkem, aby jednotlivá vlákna byla dobře oddělena materiálem matrice. Jak již bylo řečeno, vlastnosti kompozitu ovlivňuje i rozložení vláken v matrici. Při jednosměrném zatížení a jednosměrných vláken dochází k dobré tuhosti i pevnosti, ale materiál je silně anizotropní. Při střídavém nebo kolmém uložení vláken se sice nedosáhne nejvyšší pevnosti, ale získají se rovnoměrnější vlastnosti kompozitu.

Pro tento výzkum byla vybrána uhlíková vlákna. Jejich výhodou je velká pevnost, vysoký modul pružnosti, malá odolnost proti chemickým vlivům a neměnnost vlastností až do vysokých teplot (až do 2000°C), kdy všechny ostatní materiály své původní vlastnosti zcela ztrácejí. Tato vlákna však snadno oxidují při teplotách nad 500°C, a proto je nezbytná jejich ochrana proti korozi vzduchem a oxidujícími látkami v atmosféře. Nevýhodou je malá soudržnost s většinou matric bez předběžné úpravy. Oxidací povrchu nebo vhodné povrchové nánosy mohou tuto soudržnost vylepšit. Nejlepší je nezatvrdlá epoxidová pryskyřice, která je uložena na vláknech.

Lamela byla vyrobena metodou kontaktní laminace, tzn. ručního ukládání vrstev do formy - na formu byla uložena suchá tkanina, na ni odtrhová vrstva, síťka pro lepší rozvod matrice a na závěr plast. Za podtlaku -90 kPa a normální teploty byl po 24 hodinách výrobek hotov. Odtrhová vrstva způsobila nerovnost povrchu a tím i dobrou přilnavost k lepidlu.

Lamela byla složena z těchto vrstev:

- horní a spodní vrstva ze skelné tkaniny Interglas 90070 (0/90°)
- 6x jednosměrná uhlíková tkanina HEXCEL style 48 300 (0°)

Jednosměrná výztuž byla vybrána z důvodu namáhání na ohyb, kde není potřeba mít výztuž v obou směrech, skelná tkanina jako dolní a horní vrstva byla přidána kvůli tomu, aby byla zachována soudržnost lamely v příčném směru.

Technologické vrstvy byly tyto: odtrhová tkanina Astonica, perforovaná folie Airtech Stretchlon P3, stříž Ronolin HC a PE membrána. Pojivem byla epoxidová pryskyřice s urychleným vysokomodulárním tvrdidlem - Havel LH 3000 / H 3000. Byl vyroben velký panel, který byl následně rozřezán na pásy pomocí diamantové pilky. Lamela byla vyrobena ve Výzkumném zkušebním a leteckém ústavu.

• Umístění lamely na nosníku a její vliv

Aby byla zaručena co nejlepší účinnost lamely, bylo nutné stanovit její polohu a velikost. Pro experimenty byla zvolena ohybová zkouška, a to za předpokladu, že dřevěné nosníky by v konstrukci byly nejčastěji namáhány na ohyb. Do tažených prvků by bylo jejich použití nevhodné kvůli malé tahové pevnosti dřeva.

Lamela má mnohem vyšší tahovou únosnost než samotné dřevo. To ji předurčuje k přebírání tahových namáhání na tažené straně ohýbaného nosníku podobně jako tomu je u ocelové výztuže v betonu. Pro naše účely (čtyřbodový ohyb), kdy tažená byla pouze spodní vlákna a v horních vláknech docházelo k tlaku, bylo vhodné umístit lamelu pouze na tuto taženou stranu. Při tlaku v horních vláknech by mohlo dojít k delaminaci uhlíkové lamely.

Kvůli ramenu vnitřních sil bylo nejvhodnější umístit lamelu co nejnižší. U reálných konstrukcí by se nejspíše postupovalo tak, že by byla uhlíková lamela krytá jednou dřevěnou lamelou, čímž by se snížila její účinnost, ale zvýšila by se požární odolnost konstrukce. Samotná uhlíková lamela sice odolává vysokým teplotám, ale slabým článkem by byla spára mezi lamelou a dřevem vyplněná běžným lepidlem odolným maximálně do 200°C.

Tím byla stanovena poloha lamely. Její tloušťka byla zvolena přibližně jako třetina tloušťky jednotlivých lamel dřeva podle předběžného výpočtu (při výrobě je ovšem obtížné takovéto malé tloušťky přesně dodržet). Předpokládalo se, že při zesílení průřezu v tažené oblasti

dojde k selhání dřeva v tlačené oblasti. Tím se neutrální osa posouvá ve směru zesílení a prvek se deformuje i při malých přírůstcích zatížení.

Vzorky byly vyrobeny pro zkoušku čtyřbodovým ohybem podle normy ČSN EN 408. Průřez vzorků byl 30x30 mm a délka 600 mm. Byly vyrobeny čtyři sady vzorků po třech kusech.

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



Obr.2 Lepené lamelové dřevo vyztužené uhlíkovou lamelou

- **Teoretický výpočet únosnosti vyztužených vzorků**

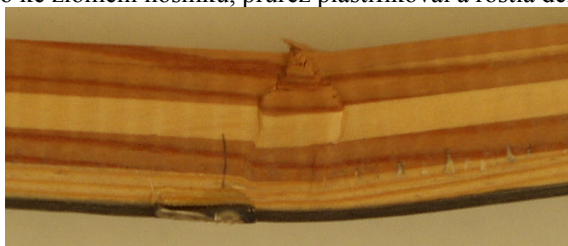
Podle teorie pružnosti byl u vyztužených vzorků proveden výpočet maximálního momentu únosnosti v elastickém a plastickém stavu. Předpokládalo se, že vzorek bude vykazovat elasto-plastické chování. Z normových hodnot pevnosti dřeva a z hodnot lamely dodaných výrobcem bylo pomocí ideálního průřezu stanoveno, že

- moment únosnosti v elastickém stavu $M_{r,el} = 387,68 \text{ Nm}$ - rostlé dřevo
(resp. $M_{l,el} = 521,64 \text{ Nm}$ - lepené dřevo)
- moment únosnosti při plné plasticitě $M_{r,pl} = 699,351 \text{ Nm}$ - rostlé dřevo
(resp. $M_{l,pl} = 932,50 \text{ Nm}$ - lepené dřevo)

Při navrhování prostých dřevěných konstrukcí se počítá pouze s elastickým chováním, zde bylo kvůli lamele nutné vyřešit i plastický stav.

- **Výsledky experimentů**

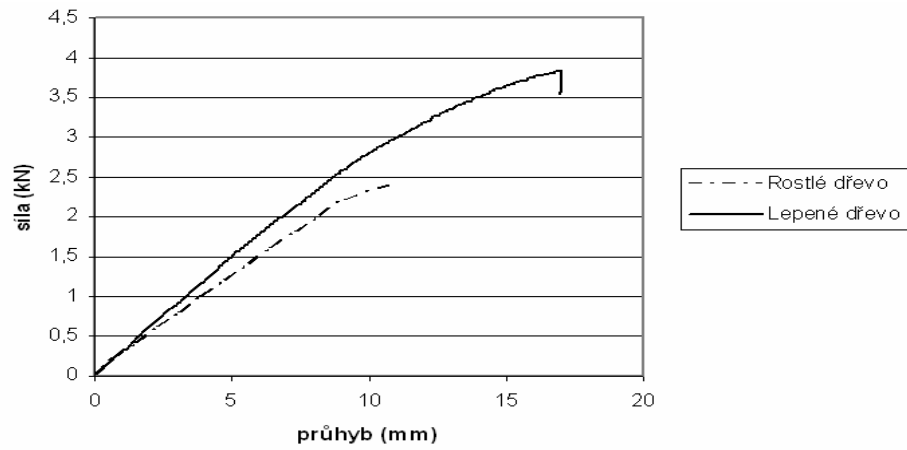
Obě sady nevyztužených vzorků byly porušeny klasickým způsobem. U rostlého dřeva s výztuhou došlo k výraznému nárůstu průhybu a únosnosti nosníku při zachování celistvosti průřezu. V dřevěném nosníku došlo v horních vláknech k dosažení meze pevnosti v tlaku a dále se po výšce průřezu začala rozšiřovat plastická zóna. Neutrální osa se posunula ve směru vyztužení a průřez se dále plastifikoval. Posléze došlo k porušení dřeva. U lepeného lamelového nosníku vyztuženého lamelou došlo k obdobnému jevu, ovšem s ještě zesíleným účinkem (pevnost v tlaku je větší než u rostlého dřeva) a průhyb nosníku dosáhl až 1/13 rozpětí. U dvou vzorků vyztuženého lepeného dřeva nedošlo ke zlomení nosníku, průřez plastifikoval a rostla deformace.



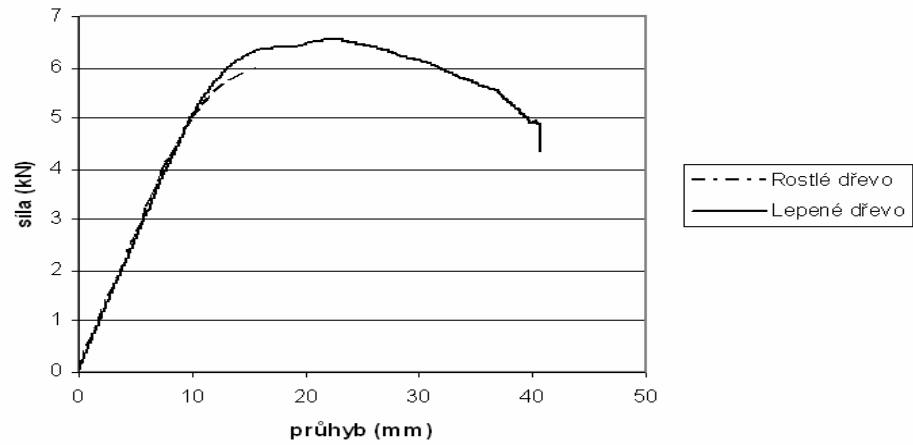
Obr.3 Porušení vyztuženého lepeného lamelového dřeva

Byly vytvořeny pracovní diagramy a spočítán skutečný moment únosnosti:

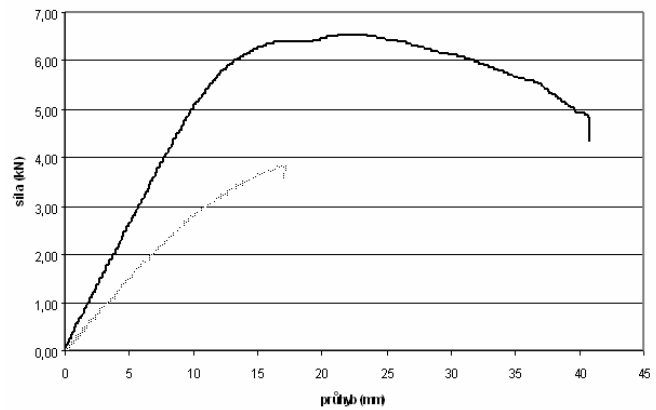
- $M_r = 540,0 \text{ Nm}$ - rostlé dřevo (resp. $M_I = 585,0 \text{ Nm}$ - lepené dřevo)



Obr.4 Srovnání nevyztužených vzorků dřeva



Obr.5 Srovnání vyztužených vzorků dřeva



Obr.6 Srovnání vyztužených a nevyztužených vzorků lepeného lamelového dřeva

ZÁVĚR

Experimenty prokázaly výrazně vyšší únosnost vyztužených vzorků. Z obr.4 (srovnání nevyztužených vzorků) je patrná vyšší únosnost lepeného lamelového dřeva. Poměr normových hodnot pevnosti v ohybu je 1,1:1 ve prospěch lepeného lamelového dřeva, z experimentu je poměr výrazně vyšší, což je způsobeno tím, že normové hodnoty jsou na straně bezpečné. U reálných vzorků byl zvýšený poměr očekáván.

V obr.5 je porovnání vyztužených vzorků rostlého i lepeného lamelového dřeva. Je zřetelné, že lamela výrazně napomáhá únosnosti dřeva. Vzájemný poměr únosnosti obou typů dřeva se více přibližuje výše zmiňované normové hodnotě. U vyztužených vzorků z lepeného lamelového dřeva je ale výrazný nárůst průhybu a plastifikace dřeva.

Obr.6 srovnává hodnoty nevyztužených a vyztužených vzorků lepeného lamelového dřeva. Z něj je zřetelně vidět, že únosnost vzorků je přibližně dvojnásobná za současného nárůstu průhybu v důsledku plastifikace dřevěného průřezu.

Výsledný materiál je vhodný pro použití na ohýbané prvky, protože vyztužené nosníky mají při stejném průřezu vyšší únosnost. Dochází k šetření materiálu a nákladů na stavbu.

LITERATURA

- [1] MARTAUS, F.: *Vývoj univerzální metody RTM pro obecné kompozitní průmyslové výrobky*. VZLÚ, a.s., Praha, 2002
- [2] BAREŠ, R.A.: *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL Praha, 1988. 325 s.
- [3] KUKLÍK, P.: *Dřevěné konstrukce I*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1998. 140 s. ISBN 80-01-01748-6