

Anna BENEŠOVÁ<sup>1</sup>, Jan VANĚREK<sup>2</sup>

VLIV DRUHU DŘEVINY NA PŘÍDRŽNOST FRP KOMPOZITU

THE INFLUENCE OF WOOD SPECIES ON FRP COMPOSITE ADHESION

**Abstrakt**

Vnější vyztužující elementy mají za úkol zvyšovat tuhost konstrukčního prvku, proto je k zajištění přenosu napětí nutná jejich co nejvyšší přídržnost k povrchu adherendu. Při vyztužování dřevěných prvků pomocí FRP kompozitů ovlivňuje kvalitu spoje několik faktorů, zejména druh a vlastnosti lepidla, vlhkost dřevěného prvku, stáří dřeva, opotřebení či úprava vyztužovaného povrchu. Protože vlastnosti jednotlivých druhů dřevin se liší na základě mikroskopického uspořádání jejich struktury, lze předpokládat, že z velké části bude přídržnost vnějších vyztužujících elementů záviset právě na druhu dřeviny.

V tomto článku je popsáno zkoušení čtyř druhů dřevin standardně používaných pro stavební účely v středoevropském regionu vyztužených při vnější straně kompozitem, tvořeným tkaninou ze skelných vláken a matricí z epoxidové pryskyřice plnicí funkci adheziva. Porovnání přídržnosti bylo provedeno zkouškou smykové pevnosti dle ČSN EN 302-1. Současně s ověřením trvanlivosti FRP/dřevo kompozitu byla u vyztužených prvků provedena i infračervená absorpční spektroskopická analýza sledující případné změny síťování adheziva během vytvrzování.

**Klíčová slova**

GFRP, smyková pevnost, epoxidová pryskyřice, infračervená absorpční spektroskopie

**Abstract**

The role of external reinforcement is to increase the rigidity of structural element, therefore its adherence has to be as good as possible to ensure transfer of stress. The quality of joint of timber members reinforced using fiber reinforced polymer composites is influenced by several factors, such as the type and properties of used adhesive, timber member moisture content, the age and adjustment of surface. The properties of wood species are different due to their microscopic structure organization, so it can be assumed, that the adherence of FRP composite will depend on which wood species was reinforced.

This paper describes the testing of four wood species commonly used in Central European region externally reinforced using the composite consisting of glass fiber fabric and an epoxy resin matrix. The resin was also used as adhesive. The adherence was compared performing the shear strength testing according to standard ČSN EN 302-1. Concurrently with the durability of FRP wood composite testing were removed samples of epoxy resin for infrared absorption spectroscopy analyses to observe the cross-linking changes during post curing.

**Keywords**

GFRP, shear strength, epoxy resin, infrared absorption spectroscopy.

---

<sup>1</sup> Ing. Anna Benešová, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 521, e-mail: benesova.a@fce.vutbr.cz.

<sup>2</sup> Ing. Jan Vaněrek, Ph.D., Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel.: (+420) 541 147 514, e-mail: vanerek.j@fce.vutbr.cz.

## 1 ÚVOD

Kompozitní materiály vytvořeny spojením tkaniny ze skelných, aramidových nebo uhlíkových vláken a matrice s polymerní bází se užívají k zesilování konstrukcí. Vnější vyztuž zvyšuje tuhost konstrukčního prvku ve směru namáhání a je aplikována dodatečně. Zesílení se provádí v rámci sanačních prací u dřevěných prvků stropních či střešních konstrukcí za splnění aplikačních požadavků vyplývajících z vlastností FRP materiálu. Hlavní úkoly vnějšího vyztužování jsou dosažení lokálního přemostění praskliny nebo trhliny, zmenšení průřezu konstrukčního prvku nebo zvýšení pevnosti dřeva nižší pevnostní třídy.

Únosnost spoje FRP/dřevo kromě charakteristik vyztužujícího elementu a adheziva závisí především na druhu a vlastnostech dřevěného prvku. Míru přídržnosti ovlivňuje zejména vlhkost použitého dřeva a pórovitost struktury na ploše, která je vyztužována. Tyto dvě vlastnosti mají největší vliv na samotnou přídržnost vyztužujícího systému k adherendu, resp. odvíjí se od ní samotná hloubka penetrace adheziva i samotná tloušťka lepené vrstvy.

## 2 MATERIÁLY A METODY

Zkušební vzorky ze čtyř rozdílných dřevin byly vyrobeny a následně zkoušeny podle požadavků normy ČSN EN 302-1 pro stanovení smykové pevnosti. Tvorba makromolekul adheziva v časovém horizontu (při síťování polymerního lepidla a v průběhu vytvrzování) byla sledována pomocí analytické metody infračervené absorpční spektroskopie.

### 2.1 Příprava vzorků

Vyztužovány byly dřeviny borovice (*Pinus sylvestris*), dubu (*Quercus robur*), modřín (*Larix decidua*) a smrk (*Picea abies*). Jejich průměrná objemová hmotnost zjištěná v rámci experimentu je uvedena v tabulce 1. FRP kompozit byl tvořen tkaninou ze skelných vláken Tyfo-SEH-51A s tloušťkou vláken 0,36 mm a matricí z dvousložkové epoxidové pryskyřice Tyfo® S od firmy FYFE. Jedná se o diglycidyl éter bisfenolu A (DGEBA) s amino-polyoxypropylenediaminovým tvrdidlem. Pryskyřice byla připravena v mísicím poměru pryskyřice/tvrdidlo 100/34,5 dílů hmotnostně.

Tab. 1: Průměrné objemové hmotnosti vybraných dřevin ve vysušeném stavu

Druh dřeviny	Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]
Borovice	550
Dub	619
Modřín	584
Smrk	546

Pro lepení byly připraveny dřevěné hoblované desky o rozměrech 200×550 mm, vyztužování se provádělo na tangenciální ploše při průměrné vlhkosti cca 9,2 až 10,1 % pro všechny dřeviny. V první fázi se provedla impregnace vyztužované plochy a prosycení tkaniny epoxidovou pryskyřicí samostatně, po částečném vytvrzení se provedl opětovný nátěr vyztužované plochy a poté přiložení tkaniny. Po vytvrzení bez vnějšího působícího tlaku, které trvalo 24 hodin, se aplikovala vnější krycí vrstva tkaniny stejným adhezivem vyrovnávající povrch kompozitu.

Dle pokynů výrobce byly vzorky vystaveny 72 hodin prostředí s teplotou 60°C a vlhkostí vzduchu 65% v klimatizační komoře, aby bylo zajištěno správné vytvrzování pryskyřice. Po vytvrzení byly vzorky nařezány dle požadavků normy ČSN EN 302-1 a zkoušeny na smykovou pevnost. Zkušební tělesa měla v porovnání s normou větší tloušťku, tedy jejich rozměry byly 8×20×150 mm, s prořezy pro vymezení smykové plochy.

Norma ČSN EN 302-1 předepisuje pět typů expozice, které simulují nepříznivé podmínky při vystavení lepeného dřevěného prvku vlhkosti. Na základě dosažené hodnoty smykové pevnosti je poté typ lepidla zařazen do třídy, která určuje zejména jeho použití v interiéru nebo exteriéru. Nařezané vzorky byly vystaveny působení expozice A1, A3 a A5. Popis těchto expozic je v tabulce 2.

Tab. 2: Expozice, kterým byly vzorky vystaveny, dle ČSN EN 302-1 [1]

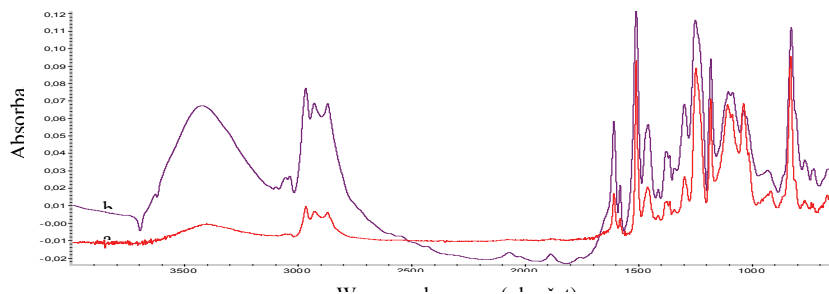
Ozn.	Expozice
A1	7 dní ve standardním prostředí ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , $65 \pm 5\%$ )
A3	4 dny ponoření ve vodě při $20 \pm 5^\circ\text{C}$ Opětne kondicionování ve standardním prostředí ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , $65 \pm 5\%$ ) do dosažení původní hmotnosti Zkouší se v suchém stavu
A5	6h ponoření ve vařící vodě 2h ponoření ve vodě při $20 \pm 5^\circ\text{C}$ Opětne kondicionování ve standardním prostředí ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , $65 \pm 5\%$ ) do dosažení původní hmotnosti Zkouší se v suchém stavu

## 2.2 Smyková pevnost

Stanovení smykové pevnosti bylo prováděno na přístroji Testometric M350-20CT. Kromě nejvyšší dosažené síly bylo zaznamenáno i procento porušení smykové plochy ohraničené 3 mm prořezy v dřevní hmotě i kompozitu.

## 2.3 Infračervená absorpční spektroskopie

Referenční vzorky (A1) pro infračervenou absorpční spektroskopii byly podrobeny následujícímu expozičnímu cyklu (vytvzování v laboratorních podmínkách po dobu 24 hodin, poté 72 hodin vystavení teplotě  $60^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti vzduchu 65% v klimatizační komoře, sedmi denní aklimatizace ve standardním prostředí  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti vzduchu  $65 \pm 5\%$ ). Protože všechny odebrané vzorky byly analyzovány metodou ATR pomocí přístroje Thermo Nicolet™ 380 FT-IR Spectrometer, bylo nutné provést analýzu objektivnosti této metody s metodou přesnější, transmisní. Srovnání obou způsobů analýzy vzorků proběhlo po vytvrzení vzorků po dobu 24 hodin. Srovnávací vzorek pro transmisní měření byl po vytvrzení zmrazen v kapalném dusíku a rozemlet na jemný prášek, ze kterého smícháním s bromidem draselným (sloučenina inaktivní v infračervené oblasti) byla vyrobena tableta. Transmisní metoda analýzy je přesnější než ATR, porovnáním spektrogramů vzorku slisovaného do tablety a vzorku měřeného na nastavci pro ATR byla tedy zjištěna míra nepřesnosti použité metody. Toto porovnání je znázorněno na obrázku 1.



Obr. 1: Porovnání spektrogramů vzorků epoxidové pryskyřice měřených metodou ATR (a) a transmisně (b)

Z obrázku 1. je zřejmé, že míra nepřesnosti metody ATR v porovnání s transmisní metodou je v tomto případě velmi nízká. Průběh křivek je totožný a intenzita pík obou spektrogramů si na většině vlnočtů odpovídá. Píky menší intenzity v rozmezích vlnočtů  $1700\text{cm}^{-1}$  až  $2100\text{cm}^{-1}$  byly sice metodou ATR zaznamenány, ale bez porovnávacího vzorku by je nebylo možné identifikovat. Protože však spektrogram obsahuje dostatečné množství charakteristických pík pro epoxid, metoda ATR bude pro hodnocení postačující.

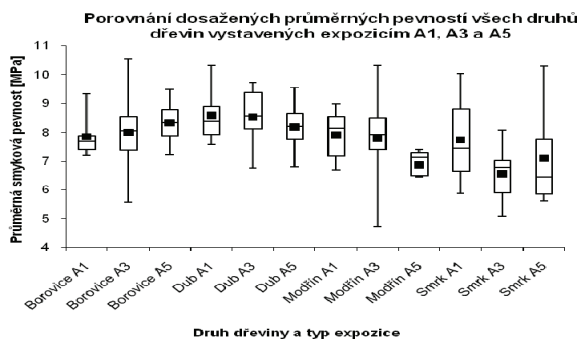
### 3 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

#### 3.1 Smyková pevnost

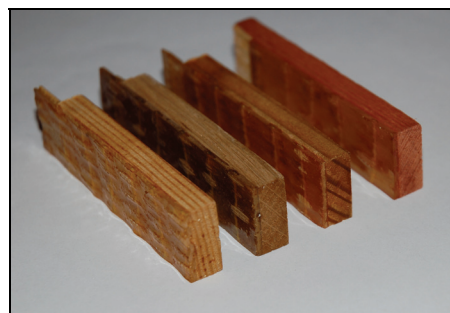
Norma ČSN EN 302-1 pro hodnocení smykové pevnosti lepeného spoje při vystavení pěti různým expozicím je vlastně zrychlenou zkouškou trvanlivosti tohoto spoje pod zvyšujícím se stupněm namáhání lepené spáry v důsledku objemových změn dřeva. Výsledky smykové zkoušky jsou uvedeny v tabulce 3. a rovněž zobrazeny v grafu na obrázku 2.

Tab. 3: Vyhodnocení smykové zkoušky pro všechny dřeviny v normovaných expozicích A1, A3 a A5

Druh dřeviny	Expozice	Smyková pevnost [MPa]	Směrodatná odchylka	Porušení ve dřevě
Borovice	A1	7,9	0,704	100,0 %
	A3	8,0	1,497	98,3 %
	A5	8,3	0,747	91,7 %
Dub	A1	8,6	0,916	100,0 %
	A3	8,5	0,995	98,3 %
	A5	8,2	0,861	100,0 %
Modřín	A1	7,9	0,846	92,5 %
	A3	7,8	1,674	46,7 %
	A5	6,9	0,398	78,3 %
Smrk	A1	7,7	1,461	80,0 %
	A3	6,6	0,974	100,0 %
	A5	7,1	1,648	81,7 %



Obr. 2: Graf porovnání dosažených průměrných hodnot smykových pevností zkoušených dřevin vystavených expozicím A1, A3 a A5, ■ - průměrná smyková pevnost, obdélník - oblast mezi kvartily, rozdělovací čára - střední hodnota, chybové úsečky - hodnoty minima a maxima

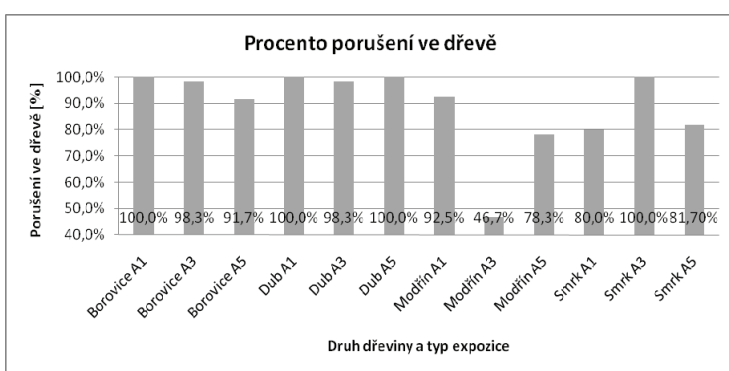


Obr. 3: Vzorky jednotlivých druhů dřevin vystaveny expozici A5 porušeny smykem. Zleva: borovice, dub, modřín, smrk.

Nejvyšších hodnot smykové pevnosti bylo dle předpokladu dosaženo u vzorků dubového dřeva, což lze obecně přičíst otevřené pórovitosti na tangenciální lepené ploše. Průměrné hodnoty smykové pevnosti jehličnatých dřevin jsou na přibližně stejné úrovni. Klesající tendence hodnot úměrná zvýšení nepříznivých podmínek v expozicích A3 a A5 je zcela porušena u borovice a částečně u smrku. Smyková pevnost borovice v jednotlivých expozicích mírně stoupá, ale celkový nárůst pevnosti u vzorků vystavených expozici A5 činí pouze 5,1%. Podobné hodnoty relativní změny pevnosti 4,9% bylo dosaženo u dubu, zde se ovšem jedná o pokles smykové pevnosti vyztužovaného vzorku. Nejvyšších hodnot poklesu bylo dosaženo u modřínu a u smrku, u smrku vystaveného expozici A3 až o 16,6%.

Kromě smykové pevnosti byl hodnocen i způsob porušení vzorku. Dojde-li k porušení ve dřevě, jedná se o kohezní porušení a lze tedy předpokládat, že únosnost spoje je vyšší než stanovená smyková pevnost. Jak je patrné z grafu na obrázku 4., ve spoji došlo k porušení převážně u modřínu a smrku, tyto dvě dřeviny budou tedy i vzhledem k nižším hodnotám smykové pevnosti méně vhodné k vnějšímu vyztužování pomocí FRP kompozitů. Pro zlepšení kvality spoje je možné zvýšit přídržnost těchto dřevin penetrací povrchu dřeva chemickými činidly zlepšujícími mezifázové napětí před vlastní aplikací epoxidu (HMR, MME aj). Výjimkou jsou pouze vzorky smrku vystaveny prostředí A3, kde bylo dosaženo 100% porušení ve dřevě. Vzhledem k nízké dosažené smykové pevnosti se jedná o vadný kus dřeva. Následné vizuální posouzení vzorků z tohoto kusu dřeva odhalilo na průřezu větší vzdálenost mezi letokruhy. Vyšší pórovitost a tudíž i menší pevnost adhérendu zapříčinily, že smykové namáhání bylo přeneseno spojem a vnějším vyztužením, a k porušení došlo vždy v dřevní hmotě.

Pro další hodnocení způsobu poškození, ať už kohezního či adhezního, a míry pórovitosti lepeného povrchu, bude v následujících etapách přistoupeno k bližší mikroskopické analýze ploch či mikroskopické fluorescenční analýze určující hloubku proniku adheziva do struktury dřeva.

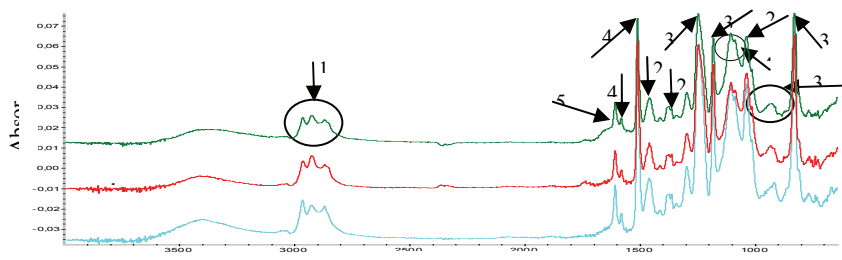


Obr. 4 Graf zobrazující průměrné porušení vzorků jednotlivých druhů dřevin vystavených působení vybraných expozic

### 3.2 Infračervená absorpční spektroskopie

Všechny zkoušené vzorky byly analyzovány metodou ATR. Odběr vzorků byl proveden z krycí vrstvy tkaniny po zahřátí na 100°C během pěti minut. Takový odběr vzorku nezpůsobí poškození jeho struktury.

Z průběhu křivek spektrogramů na obrázku 4. je možné vyvodit závěr, že ke vzniku makromolekul dochází již během prvních 24 hodin vytvrzování. Chemické složení ani struktura makromolekul se během dalšího vytvrzování již nemění. Na obrázku 4 jsou rovněž označeny typické vazby epoxidu, vlnočty jejich spektrálních páسů jsou uvedeny v tabulce 4.



Obr. 3 Spektrogramy vzorků epoxidového adheziva analyzovány po 24 hodinách vytvrzování v laboratoři (a), dalším vytvrzování 72 hodin při 60°C (b) a po 7 dnech ve standardním prostředí (c)

Tab. 4 Typické epoxidové vazby - vlnočty píků [2]

Vazby typické pro epoxidy			
Č.	Oblast	Typ vibrace	Píky na spektrogramu
1	3000 – 2800 cm <sup>-1</sup>	CH valenční vibrace	2966, 2932, 2870
2	1460 – 1340 cm <sup>-1</sup>	CH deformační vibrace	1458, 1343
3	1240 – 1170 cm <sup>-1</sup>	Epoxidová vazba (éter C-O-C) asym.	1248
	950 – 860 cm <sup>-1</sup>	Epoxidová vazba (éter C-O-C) sym	1181
	865 – 785 cm <sup>-1</sup>	Epoxidová vazba - vnitřní pozice (trans) Epoxidová v. - vnitřní pozice (cis) kruhová	915 (top)* 828
4	1110 – 1030 cm <sup>-1</sup>	(aromatické jádro) Ar-O-CH <sub>2</sub> -	1106, 1035
	1580 – 1510 cm <sup>-1</sup>	Aromatické jádro, vazba C=C	1580, 1510
5	1650 – 1590 cm <sup>-1</sup>	Aminové skupiny - tvrdidlo	1605
* vibrace je plynulá v oblasti 900 – 950 cm <sup>-1</sup>			

#### 4 ZÁVĚR

Experimentálně bylo dokázáno, že druh dřeviny skutečně ovlivňuje přídržnost FRP kompozitu k povrchu dřevěného prvku. U zkušebních těles z dubu jako listnaté dřeviny s otevřenou pórovitou strukturou ovlivňující i míru pórovitosti na tangenciální vyztužované ploše bylo dosaženo nejvyšších hodnot smykové pevnosti při minimálním adhezním porušení v oblasti spoje. Smyková pevnost lepené spáry je tedy ještě vyšší a to díky možnosti hlubší penetrace adheziva při impregnaci vyztužované plochy. U jehličnatých dřevin, jejichž pórovitost nedosahuje takových hodnot jako u listnáčů, lze ke zvýšení kvality spoje využít penetrace vhodným chemickým činidlem.

Klesající tendence pevností při zkouškách trvanlivosti byla proti předpokladům porušena u borovice, nárůst pevnosti byl ovšem velmi nízký. Obecně se smyková pevnost snižuje, je-li zkoušený vzorek vystaven cyklickému působení vlhkosti, a to kvůli namáhání spoje v důsledku objemových změn dřevní hmoty. Tento trend byl u všech ostatních typů dřevin experimentálně potvrzen. Vzorčky smrku vystavené expozici A3 byly vzhledem k nízké dosažené smykové pevnosti a 100% porušení v dřevní hmotě z vadného kusu dřeva. Vizualním posouzením byla zjištěna výrazně větší vzdálenost mezi letokruhy dřeva, která způsobila jeho nižší pevnost.

Z výsledků analýzy pomocí infračervené absorpční spektroskopie vyplývá, že ke vzniku makromolekul dochází již v prvních 24 hodinách po smísení složek lepidla a jejich struktura se během dalšího vytvrzování již nemění.

#### PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního příspěví Grantové agentury ČR, projekt P104/11/1557 Komplexní hodnocení trvanlivosti dřevěných lepených prvků a Specifického výzkumu č.: FAST-J-11-32 Hodnocení kvality lepidel pro dřevěné konstrukční lepené spoje pomocí infračervené absorpční spektroskopie - vývoj metodiky přípravy vzorků a měření.

#### LITERATURA

- [1] ČSN EN 302-1 *Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Metody zkoušení – Část 1: Stanovení podélné smykové pevnosti*. Třídící znak 668531, datum vydání 1. 12. 2004
- [2] SVEHLA, G. *Comprehensive analytical chemistry VI*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier scientific publishing company, 1976, 555 pp. ISBN 0-444-41165-8.

#### Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB–TU Ostrava.

Ing. Petr Hradil, Ph.D., VTT Technical Research Centre of Finland, P.O.Box 1000, FIN-02044 VTT.