

# VPLYV LOKÁLNEHO SPEVNENIA DREVA A SPOJOV NA PÔSOBENIE DREVENÝCH KONŠTRUKCIÍ

*THE IMPACT OF A LOCAL STRENGTHENING OF WOOD AND JOINTS ON BEHAVIOUR OF TIMBER STRUCTURES*

Lukáš, Blesák<sup>1</sup>

## Abstract

The aim of this thesis is to analyze the influence of strengthening wood on its physical and mechanical features.

One of the ways to modify physical and mechanical features of wood is by so-called „deep impregnation“. This method of strengthening wood is mostly used in the furniture industry where it achieves very positive results. This procedure is not common in the field of civil engineering and therefore I decided to devote myself to this topic.

Deep impregnation is a chemical modification of wood in order to improve its resistance, strength, stiffness, and other. There are several methods and procedures to modify wood in a chemical way. In the frame of this work, there will be analyzed the impact of the most convenient impregnation method on behavior of timber structures, either single timber beams, timber joints or even load-bearing systems.

## Keywords

Deep impregnation, mechanical modification of wood, wood strengthening, physical and mechanical features of wood.

## 1 ÚVOD

Táto práca sa zaoberá spevnením dreva, jeho doterajším použitím a uplatnením, rôznymi modifikáciami, analýzou možného využitia, spôsobmi aplikácie na konštrukcie, predovšetkým však vplyvom spevnenia dreva na konštrukciu z hľadiska statického.

Jedným zo spôsobov spevnenia dreva je jeho chemická úprava tzv. „hlbková impregnácia“.

Hlbková impregnácia dreva je u nás a v blízkych štátoch pojem nie veľmi zaužívaný. S využitím impregnácie dreva sa stretávame najmä v súvislosti s ochranou drevených konštrukcií, pri ktorej sa na drevené prvky konštrukcie aplikujú chemické látky do hĺbky rádovo milimetre, čo pomáha ochrániť konštrukciu pred rôznymi škodcami, poveternostnými podmienkami a pod.

Hlbková impregnácia dreva sa v dnešnej dobe uplatňuje najmä v nábytkárskom priemysle. Napomáha zvyšovať odolnosť drevených prvkov pričom zlepšuje ich fyzikálno-mechanické vlastnosti. V tejto oblasti sú vyvinuté vysoko efektívne impregnačné zariadenia, postupy a technológie úspešne používané aj u nás.

Drevené konštrukcie sa vyznačujú svojou nehomogenitou, citlivosťou na okolité vplyvy, ako napríklad zmena klimatických podmienok, zmena zaťaženia nosnej konštrukcie, zmena statického systému a pod. Nielen toto sú dôvody prečo sa treba o drevené konštrukcie patrične starať a tým zabezpečiť ich spoľahlivú funkciu.

Práve rekonštrukcie či sanácie historických objektov sú neraz realizované neestetickým, neefektívnym, ba priam nefunkčným spôsobom práve pre obmedzené možnosti sanačných technológií či zaužívaných postupov. Práve dôležitosť zachovania drevených konštrukcií, či moderných stavieb alebo historických budov a absencia účinných a estetických sanačných postupov ma inšpirovala venovať sa práve tejto téme.

Jedným zo spôsobov ako zvýšiť pevnosť dreva je jeho impregnácia, čiže napustenie. Keďže v prípade pozemného staviteľstva požadujeme zvýšenie pevnosti dreveného prvku do maximálnej hĺbky jeho priečného rezu, na impregnáciu dreva používame také metódy impregnácie, ktoré zabezpečia absorpciu danej látky do maximálnej hĺbky rezu dreveného prvku. Preto zavádzame pojem tzv. „hlbkovej impregnácie“.

Rôzne požiadavky na modifikáciu vlastností dreva dali priestor vzniku nemalému počtu impregnačných metód za použitia rôznej technológie a postupov. Úlohou tejto práce je v skratke zhrnúť impregnačné postupy, popísať ich základné princípy, najmä však zvoliť, pre účely stavebnej praxe, najvhodnejšiu metódu a podrobne analyzovať jej vplyv na drevené konštrukcie. Pri voľbe tejto metódy spolupracujem s Fakultou chemickej a potravinárskej technológie Slovenskej technickej univerzity v Bratislave pričom na jej pôde budú analyzované vzorky chemicky modifikované.

---

<sup>1</sup> Lukáš Blesák, Ing. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra kovových a drevených konštrukcií, doktorand, Radlinského 11, Bratislava, lukas.blesak@centrum.sk

## 2 ZAUŽÍVANÉ SPÔSOBY SANÁCIE A REKONŠTRUKCIE DREVENÝCH KONŠTRUKCIÍ

K najčastejším príčinám porúch drevostavieb patria:

- zvýšená vlhkosť dreva
- nesprávna realizácia
- drevokazné huby a hmyz
- zmena zaťaženia
- zmena statického systému

Každú z týchto príčin je potrebné eliminovať pomocou vhodných zásahov. Rekonštrukcie drevostavieb sú zaužívané už od nepamäti. Poznáme mnoho sanačných postupov a technológií. V tejto časti práce stručne uvádzam tie najpoužívanejšie, ich prednosti a taktiež nedostatky.

V súčasnej stavebnej praxi sa na spevnenie či sanáciu drevených konštrukcií používa niekoľko spôsobov. Jednou z nich je aj spevnenie samotného dreva. Spevnenie dreva ako materiálu nie je však v stavebnej praxi bežné. Drevo sa dosiaľ najčastejšie spevňuje a chemicky upravuje v nábytkárskom priemysle. Rôznymi metódami sa zlepšujú požadované fyzikálno-mechanické vlastnosti dreva. Táto práca sa zaoberá spevňovaním dreva z hľadiska stavebného inžinierstva, a preto sa budem zameriavať na technológie spevnenia dreva práve z hľadiska požiadaviek na stavebné konštrukcie.

V princípe je možné rozdeliť technológie sanácie dreva a drevených konštrukcií do dvoch skupín:

- mikrotechnológie
- makrotechnológie

**Mikrotechnológie** sú spravidla konzervačné technológie obnovy poškodeného dreva, pri ktorých sa priamo do štruktúry poškodeného dreva zavádzajú vhodné spevňujúce, rozmerovo stabilizačné a iné konzervačné látky, nezriedka spolu aj s chemickým ochranným prostriedkom. Uplatňujú sa najmä pri záchrane historicky cenných drevených predmetov – kultúrnych pamiatok a archeologického dreva bez väčších nárokov na ich statickú funkciu.

**Makrotechnológie** sú sanačné technológie obnovy poškodeného dreva, pri ktorých sa makroskopicky definovaný objem poškodeného dreva nahrádza novým drevom, napríklad plombou alebo protézou, respektíve sa poškodené drevo zvonka spevňuje príložkou alebo iným spôsobom. Uplatňujú sa hlavne pri rekonštrukcií zrubových a iných drevených stavieb, mostov, krovov, stropov, schodísk, ale aj fasádnych prvkov, ako sú vonkajšie dvere a okná.

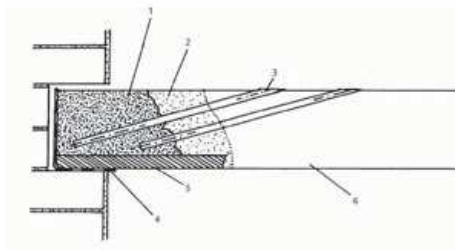
Najbežnejšie, či už makro- alebo mikro- sanačné technológie sú:

- **Výmena dreveného prvku**
- **Zosilnenie nosného prvku**
- **Zmena statického systému**
- **Chemická impregnácia**

Tento spôsob je účinnou prevenciou pred drevokaznými hubami, plesňou, hmyzom či požiarom. Nedokážeme ním zosilniť oslabený prierez, chemická impregnácia však pomáha konštrukciám zachovať si pôvodne uvažované ako fyzikálno-mechanické vlastnosti tak aj statické pôsobenie.

- **Injektáž – plombovanie** (Obrázok 1)

Tento spôsob spočíva vo vyplnení oslabenej časti prvku napríklad epoxidovou zmesou, pričom je možné pridať aj výstužné tyče. Tento moderný spôsob sanácie je veľmi efektívny a eliminuje všetky vyššie uvedené nevýhody. Injektuje sa priamo poškodený prvok, takže ho nie je nutné odstrániť, čím sa neznižuje historická hodnota stavby, injektážna zmes nadobúda tvar pôvodného prvku, prípadne jej povrchová úprava je estetická. Existujú prípady, kde je na pohľad nemožné rozoznať pôvodnú časť prvku od sanovanej časti.



*Obr.1 – Injektáž exponovanej časti dreveného prvku*

- Tepelná úprava dřeva
- Sterilizácia dřeva
  - Zvýšenou teplotou
  - Pôsobením mikrovlnného žiarenia
  - Opaľovanie dřeva plameňom
  - Ožarovanie dřeva ionizačným žiarením
  - Pôsobenie ultrazvuku alebo vysokého vákua
  - Zaplyňovanie dřeva
- Mokrá ochrana dřeva
- Odstránenie zdroja nákazy
- Odľahčenie
- Konštrukčné opatrenia

Všetky z vyššie uvedených skupín sanácie majú svoje výhody aj nevýhody. Podrobný prehľad spôsobov sanácie nie je predmetom tejto práce, stručný prehľad však slúži pre zorientovanie sa v možných rizikách, výhodách a nevýhodách sanácií a rekonštrukcií. Ku každej rekonštrukcií či oprave treba pristupovať individuálne – nedá sa určiť univerzálny spôsob sanovania, je však možné sa k nemu priblížiť, a to práve elimináciou všetkých vyššie uvedených nevýhod a použitím sanačného postupu, ktorý je prístupný pre väčšinu drevených konštrukcií – z hľadiska dispozičného, statického, finančného, estetického a z hľadiska zachovania pôvodnej hodnoty sanovanej konštrukcie.

## 2.1 Chemická modifikácia dřeva

Chemická modifikácia dřeva je predmetom prieskumu už niekoľko storočí. Najbežnejšou formou modifikácie dřeva zahŕňa acetyláciu dřeva. Drevo, resp. fibrily dřeva sa taktiež modifikovali polyfunkčnými reaktantami za účelom zanechať chemicky aktívnu skupinu molekúl určitého prvku na povrchu steny bunky, ktoré zabezpečujú ďalšiu modifikáciu alebo zmenu vlastností dřeva.

Jestvujú práce venujúce sa modifikáciou dřeva metakrylovými anhydridmi (MA), krotónovými anhydridmi (CA), propionátovými anhydridmi (PA). (Anhydrid je chemická zlúčenina odvodená od inej zlúčeniny tak, že z pôvodnej zlúčeniny je odobraný ľubovoľný počet molekúl vody).

V skorších výskumoch bolo dokázané, že vzorky modifikované pomocou MA vytvorili aktívne časti na povrchu bunkovej lignocelulózy (lignocelulóza je látka v zdrevnatých bunkových blanách) a vinylové monoméry (monomér je nízkomolekulárna látka, stavebný prvok makromolekúl).

Podrobných štúdií bolo v tejto oblasti realizovaných mnoho, pričom každá z nich sleduje iné veličiny. Každá zo štúdií však dokazuje významný priaznivý dopad chemickej modifikácie dřeva na jeho fyzikálno-mechanické vlastnosti.

## 2.2 Fyzikálno-matematický model dřeva

Aby bolo možné dôkladne pochopiť správanie sa dřeva ako ortotropného materiálu, je potrebné analyzovať si jeho jednotlivé vlastnosti definujúce účinnosť impregnačnej metódy – prechod impregnanu materiálom, vodivosť materiálu drevom a iné. Preto uvádzam jeden z fyzikálno-matematických modelov, ktorý poukazuje práve na ortotropiu dřeva a jej dopad na správanie sa dřeva vo vzťahu k vodivosti rôznych látok, či tepla.

Hlavné parametre stavu uvažovaného modelu sú hustota tekutiny  $\rho_f$  a hustota vzduchu  $\rho_a$ , resp. ich obsah v jednotkovom objeme dřeva (efektívna hustota) zabezpečujúci spojitosť rovníc. Rýchlosť premiestnenia, resp. pohybu substancie  $v_s$  je predpokladaná tak, že je úmerná lokálnemu tlakovému gradientu (tlakovému spádu):

$$v_s = \sigma_s \nabla P$$

kde

$v_s$  je rýchlosť premiestnenia, resp. pohybu substancie

$P$  je tlak

$\sigma_s$  je tenzor vodivosti

, kde tlak  $P$  súvisí s hustotou  $\rho_a$  na základe stavovej rovnice a tenzor vodivosti  $\sigma_s$  je určený na základe aktuálnej štruktúry mäkkého (ihličnatého) dreva. Úpravami tejto rovnice pomocou rovnice rovnováhy energií, Fourierovho zákona a iných dostávame relatívne presný model slúžiaci na popis absorpcie impregnačnej látky do dreva.

Odchýlky fyzikálno-matematického modelu od skutočného správania sa spočívajú v mnohých faktoroch. Jedným z nich je aj smer vlákien dreva. Tepelná vodivosť dreva závisí práve od tepelnej vodivosti stien vlákien dreva, ktoré taktiež určujú dominantný smer vodivosti. Keďže dĺžka tracheidy je omnoho dlhšia ako jej priečny rez, vo výpočte efektívnej tepelnej vodivosti vplyv priečných bunkových stien je ignorovaný a drevo sa považuje za systém pozdĺžnych kapilár. Ak predpokladáme, že impregnačná tekutina je distribuovaná ako konštantná vrstva pozdĺž stien tracheid (čo je spravidla pravda vďaka fibrilárnej štruktúre bukových stien), potom tepelná vodivosť v pozdĺžnom smere je daná vzťahom:

$$\lambda_{\parallel} = \alpha_w \lambda_w + \alpha_f \lambda_f + \alpha_a \lambda_a$$

kde

$\alpha_w$  je podiel plochy priečného rezu vztiahnutý na jednotku bunky k stene bunky

$\alpha_f$  je podiel plochy priečného rezu vztiahnutý na jednotku bunky k tekutine

$\alpha_a$  je podiel plochy priečného rezu vztiahnutý na jednotku bunky k vzduchu

Ako je zrejme z uvedenej rovnice, na tepelnú vodivosť dreva v smere rovnobežnom s vláknami má priamy vplyv obsah plochy v priečnom reze jednotlivých zložiek dreva. Pri uvážení nasledujúcich hodnôt súčiniteľov tepelnej vodivosti je možné určiť vodivosť jednotlivých drevín na základe obsahu jednotlivých zložiek a ich vzájomného pomeru (tabuľka 1):

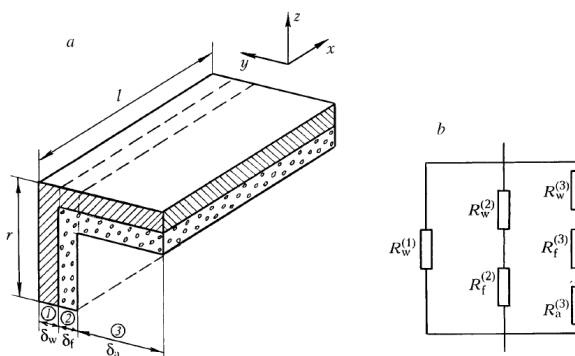
Druh dreva	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m.K)]	
		kolmo na vlákna	rovnobežne s vláknami
Mäkké drevo	400	<b>0,18</b>	<b>0,41</b>
Tvrdé drevo	600	<b>0,22</b>	<b>0,49</b>

**Tab. 1** – Tepelná vodivosť dreva v závislosti od jeho hustoty a smeru vlákien

Tepelná vodivosť materiálov závisí od rozličných vplyvov, z ktorých najdôležitejšie sú:

- hustota a objemová hmotnosť a pórovitosť (čím menšia objemová hmotnosť, tým menší súčiniteľ tepelnej vodivosti)
- vlhkosť (súčiniteľ tepelnej vodivosti sa zväčšuje so zvyšujúcim sa obsahom vlhkosti)
- smer tepelného toku v anizotropných látkach
- chemické zloženie (organické stavebné látky sú zvyčajne zlými vodičmi tepla – majú nízky súčiniteľ tepelnej vodivosti)
- teplota (súčiniteľ tepelnej vodivosti sa zväčšuje so stúpaním teploty látky)

Pre výpočet tepelnej vodivosti v smere kolmom na smer vlákien uvažujeme štruktúru jednej bunky zobrazenej schematicky na obrázku 2 (keďže bunka je symetrická, je zobrazená len 1/4 rezu bunky):



**Obr. 2** Schematické znázornenie diagramu tepelných odporov dreva po reze bunky [1]

Tepelná vodivost' dreva v smere kolmom na smer vlákiem je daná vzťahom:

$$\lambda_{\perp} = \frac{Q/(r \cdot l)}{\Delta T/r} = \frac{Q}{\Delta T l} = \frac{1}{Rl}$$

kde

**R** je tepelný odpor

**Q** je tepelný tok v smere osi z

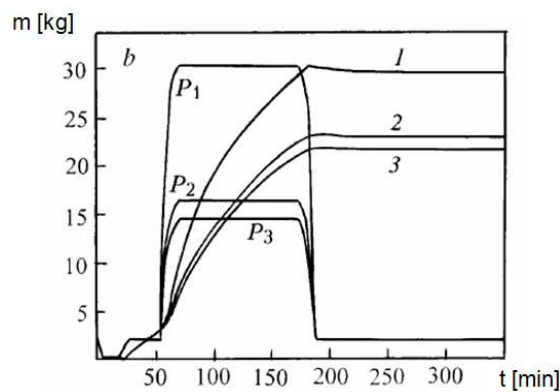
$\Delta T$  je príslušný pokles teploty

**l** je pozdĺžny rozmer uvažovanej oblasti

**r** je priečny rozmer uvažovanej oblasti

Na základe týchto vplyvov je možné predpokladať priebeh impregnácie rôznych druhov dreva a následne jej vplyv na rôzne fyzikálno-mechanické vlastnosti dreva. Pri výbere vhodnej formy impregnácie je nutné zohľadniť vyššie uvedené okrajové podmienky ako napríklad vlhkosť dreva, jeho pórovitosť a podobne, prípadne vplyv klimatických podmienok na tieto vlastnosti dreva.

Obrázok 3 znázorňuje priebeh impregnácie v čase pri zmene teploty impregnačnej látky a pri zmene tlaku impregnácie.



**Obr.3** Priebeh impregnácie v čase pri zmene teploty impregnačnej látky a pri zmene tlaku impregnácie [1]

1) hmotnosť absorbovanej tekutiny teploty 40°C

2) hmotnosť absorbovanej tekutiny teploty 30°C

3) hmotnosť absorbovanej tekutiny teploty 20°C

Poznámka: Uvádzaná teplota je teplota impregnovanej tekutiny pri jej impregnácií.

P1) hmotnosť absorbovanej tekutiny impregnovanej pri tlaku  $P_1 = 1,7\text{MPa}$ ,  $T_f = 40^\circ\text{C}$

P2) hmotnosť absorbovanej tekutiny impregnovanej pri tlaku  $P_2 = 0,9\text{MPa}$ ,  $T_f = 40^\circ\text{C}$

P3) hmotnosť absorbovanej tekutiny impregnovanej pri tlaku  $P_3 = 0,8\text{MPa}$ ,  $T_f = 40^\circ\text{C}$

Z vyššie uvedených poznatkov je zreteľný vplyv zmeny teploty impregnačnej látky a zmeny impregnačného tlaku na priebeh impregnácie a objem absorbovaného materiálu za určitý čas. Na základe týchto poznatkov je možné zvoliť vhodný spôsob impregnácie vzhľadom na požadované výsledky. V súčasnosti poznáme niekoľko spôsobov impregnácie, pričom každý z nich sa vyznačuje inými výsledkami.

### 3 SLEDOVANÉ CIELE VPLYVU HÍBKOVEJ IMPREGNÁCIE DREVA

Hĺbková impregnácia dreva zvyšuje mnohé pozitívne vlastnosti dreva potrebné pre efektívny návrh nosnej konštrukcie. Pre podrobnú analýzu som sa preto zameril len na tie aspekty, ktoré sú relevantné z hľadiska pozemného staviteľstva. Zameril som sa najmä na nosné spoje – spoje drevo-drevo, oceľ-drevo, použitie rôznych druhov spájacích prostriedkov, ich rôzny počet a usporiadanie. Pozornosť venujem faktorom, ktoré vystupujú vo vzťahoch pre výpočet odolnosti spoja a iným faktorom majúcim priamy vplyv na odolnosť spoja. Podľa laboratórnych výsledkov mojej analýzy (uvedenej nižšie v tejto práci) sa zameriam na tieto okruhy:

- analýza vplyvu hĺbkovej impregnácie dreva na fyzikálno-mechanické vlastnosti dreva potrebné pre výpočet odolnosti dreveného prvku či dreveného spoja
- vplyv impregnácie na zmenu tvaru diery pre spájací prostriedok (ďalej len „s.p.“)
- vplyv impregnácie na prenos zaťaženia v prípade väčšieho počtu spájacích prostriedkov v rade
- vplyv impregnácie na prerozdelenie vnútorných síl resp. na zmenu statického pôsobenia nosného systému – porovnaný bude prípad s použitím naimpregnovaného a nenaimpregnovaného dreva (použitý nosník s použitím spájacích dosiek s prelisovanými hrotmi)
- analýza vplyvu impregnácie dreva s ohľadom na orientáciu vlákien dreva nosného prvku, typ a počet spájacích prostriedkov, druh spoja z hľadiska statického pôsobenia (rámový, kĺbový a pod.)
- porovnanie efektívnosti použitia rôznych impregnačných látok sledujúc ich vplyv na fyzikálno-mechanické vlastnosti dreva, izotropizácia ortotropných vlastností dreva, vplyv na štiepenie dreva, možnosť aplikácie do konštrukcie, trvanlivosť a pod.
- sledovanie vplyvu spevnenia dreva na odolnosť spojov z hľadiska reologického
- v neposlednom rade je mojím cieľom zhotoviť pracovný diagram naimpregnovaného dreva a dreva nenaimpregnovaného, vzájomne ich porovnať a výsledky použiť pre ďalšiu analýzu.

#### 4 TEORETICKÁ ANALÝZA VPLYVU JEDNOTLIVÝCH VSTUPNÝCH VELIČÍN NA VÝSLEDNÚ ÚNOSNOSŤ SPOJA

Uvedená analýza slúži na určenie efektívnosti zmeny vybraných vstupných veličín na charakteristickú odolnosť jednostrížneho spoja drevo-drevo pomocou oceľových spájacích prostriedkov kolíkového typu. Keďže analýza je relatívne rozsiahla a má slúžiť ako názorný príklad, používam len jeden typ spoja a sledujem vybrané vstupné veličiny. Analýzu je však možné aplikovať na všetky druhy spojov.

Vstupné údaje charakterizujúce spoj, na ktorý sa budú získané veličiny vzťahovať sú vopred stanovené. Cieľom je porovnať násobnosť zvýšenia vybranej vstupnej veličiny s násobnosťou zvýšenia charakteristickej odolnosti spoja.

Pre výpočet charakteristickej odolnosti jednej strižnej škáry jednostrížneho spoja drevo-drevo pomocou oceľových spájacích prostriedkov kolíkového typu som použil príslušné vzťahy podľa normy STN EN 1995-1-1. Vstupné údaje a ich označenie korešponduje s označeniami z príslušnej technickej normy STN EN 1995-1-1.

V analýze som použil tri varianty, v ktorých som menil nasledujúce vstupné veličiny:

- hrúbka drevenej spájanej časti, variant A)
- priemer spájacieho prostriedku, variant B)
- pevnosť stien otvorov drevenej spájanej časti, variant C)

**Poznámka:** Vo variante C) som pevnosti stien otvorov zadával ako samostatné hodnoty. Podľa vzťahu (8.32) normy STN EN 1995-1-1 je pevnosť stien otvorov v dreve funkciou priemeru spájacieho prostriedku a charakteristickej hodnoty hustoty spájaného dreva. V rámci mojej dizertačnej práce sa venujem zvýšeniu pevnosti dreva jeho impregnáciou – nie zvýšením jeho hustoty a keďže hmotnosť impregnačnej látky je v tomto prípade zanedbateľná a norma nám neponúka iný vzťah pre zvýšenie pevnosti stien otvorov, sú tieto pevnosti zadávané ako samostatné hodnoty. Práve z tohto dôvodu je jedným z cieľov tejto práce naformulovať vzťah definujúci  $f_{h,1,k}$  (pevnosť steny otvoru pre s.p.) zohľadňujúci spevnenie dreva hĺbkovou impregnáciou.

V každom z variantov uvažujem nasledujúce vstupné údaje:

- Charakteristická hodnota pevnosti v ťahu materiálu spájacieho prostriedku:  $f_{uk} = 600\text{MPa}$
- Charakteristická hodnota hustoty spájaného dreva (drevo pevnostnej triedy C22):  $\rho_k = 340\text{kg/m}^3$
- Uhol pôsobiacej sily vzhľadom na vlákna v oboch spájaných prvkoch:  $\alpha = 0^\circ$
- Vzájomný pomer pevností stien otvorov spájaných prvkov:  $\beta = 1$

Nižšie uvedené tabuľky znázorňujú násobnosť zvýšenia vybraných veličín (násobnosť volenú projektantom) a zároveň násobnosť zvýšenia charakteristickej odolnosti jednej strižovej škáry spoja.

Ako príklad uvádzam tabuľku 2:

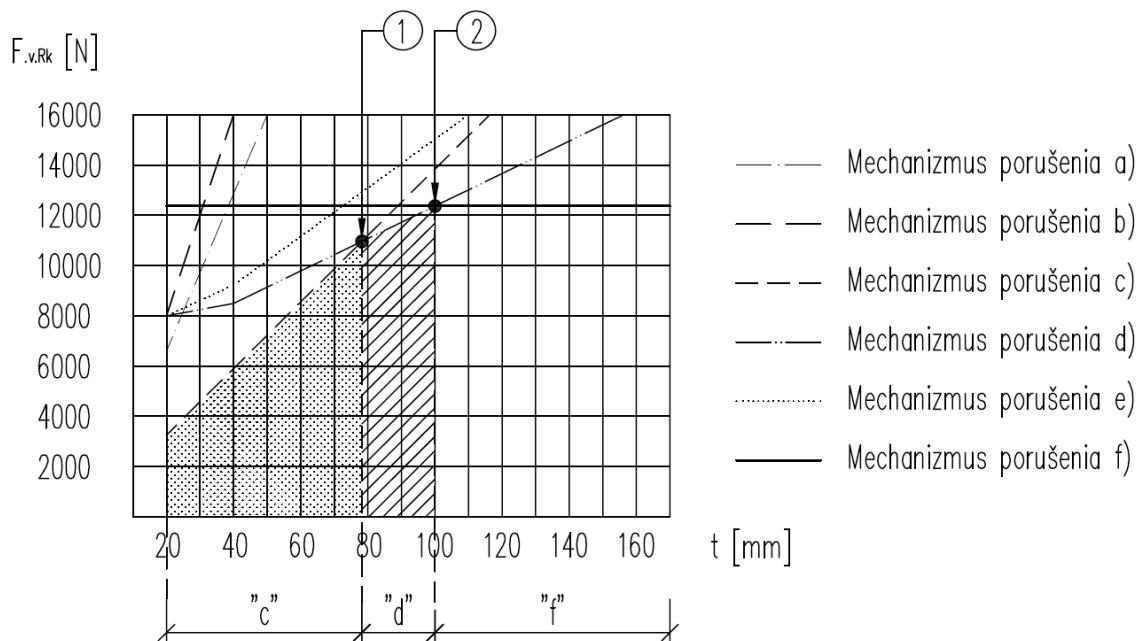
$t_{1,i} / t_{1,1}$	1	$F_{v,Rk,i} / F_{v,Rk,1}$	1,00
[-]	2	[-]	2,00
	3		3,00
	4		3,74
	5		4,01
	6		4,01
	7		4,01
	8		4,01
	9		4,01
	10		4,01

Tab. 2 – Násobnosť zvýšenia premennej veličiny

Pri zväčšení hrúbky dreveného prvku 2-krát sa charakteristická odolnosť jednej strihovej škáry spoja zvýši 2-krát. Z grafu 1 je zrejmé, že do bodu, keď sa hrúbka spájaného prvku zväčší 5-krát, rozhodujú mechanizmy porušenia „c“ a „d“, v ktorých zápisoch vystupuje veličina „t“ – hrúbka spájaného prvku a tým pádom aj má na charakteristickú odolnosť jednej strihovej škáry spoja vplyv. Od bodu, keď sa hrúbka dreveného prvku zväčší 5-krát, ďalšie zväčšovanie hrúbky dreveného prvku už nemá vplyv na charakteristickú odolnosť jednej strihovej škáry spoja, keďže tento vplyv majú iné vstupné veličiny (napr. priemer spájacieho prostriedku  $d$  a jeho materiál), resp. charakteristickú odolnosť jednej strihovej škáry spoja definuje zápis toho mechanizmu porušenia, ktorý „ponúka“ minimálnu únosnosť  $F_{v,Rk,i}$  – v tomto prípade je z grafu 1 zrejmé, že od hrúbky spájaného prvku 100 mm rozhoduje mechanizmus porušenia f), v ktorého zápise nefiguruje hrúbka spájaného prostriedku  $t$ , a preto nemá na výslednú odolnosť vplyv.

Miera vplyvu jednotlivých veličín na výslednú odolnosť spoja a takisto grafický prehľad rozhodujúcich mechanizmov porušenia sú zrejme z nižšie uvedených grafov.

Ako príklad uvádzam graf 1, ktorý som podrobne popísal a analyzoval (obrázok 4):



Obr.4 - Graf 1 – Vplyv jednotlivých mechanizmov porušenia na výslednú únosnosť spoja

Na uvedenom grafe 1 môžeme pozorovať rozhodujúce vplyvy mechanizmov porušenia na charakteristickú únosnosť spoja, oblasť ich výskytu, t.z. pri akej hrúbke spájaného prvku má vybraný mechanizmus porušenia vplyv na únosnosť spoja, a taktiež ktorý mechanizmus porušenia nemá vplyv na únosnosť spoja. Zápis únosnosti spoja pre každý mechanizmus porušenia má svoj tvar a obsahuje vstupné veličiny. Porovnaním týchto veličín a ich opodstatnenosti, podľa toho v zápise ktorého mechanizmu porušenia sa nachádzajú dokážeme určiť vplyv jednotlivých vstupných veličín na výslednú únosnosť spoja. Podobných analýz som urobil cca 20, ich výsledky som zaznamenal a zhrnul.

Zo súhrnu vyplýva, že najfrekvencovanejšie mechanizmy porušenia majúce vplyv na únosnosť spoja sú mechanizmy d) a f). Pri pohľade na zápisy jednotlivých mechanizmov porušenia je zrejmé, že zvyšovanie pevnosti stien otvorov dreveného prvku nemá na únosnosť spoja priamo úmerný vplyv.

Ak by boli rozhodujúce mechanizmy porušenia a) alebo b), potvrdil by sa priamo úmerný vplyv jednotlivých vstupných veličín na únosnosť spoja, keďže tieto vystupujú ako súčinitele v jednotlivých zápisoch. Napríklad, ak v zápise  $a*b*c = D$

dosadíme za hodnotu „a“ hodnotu „5\*a“, dostávame výsledok „5\*D“ – násobenie vstupnej veličiny „a“ má priamo úmerný vplyv na výsledok. Ak by však vstupné veličiny boli súčasťou zložitého zápisu, takýto priamo úmerný vplyv by nebol zrejmý, to však neznamená, že vplyv na výsledok nemajú – vplyv majú, ale nepriamo úmerný.

Preto si kladiem otázku: *Do akej miery je nepriamo úmerný vplyv zmeny pevnosti materiálu spájaného prvku na výslednú únosnosť spoja opodstatnený?*

Toto je len potvrdením toho, že je potrebná podrobná analýza založená na teoretickom aj praktickom skúmaní.

Tabuľka 3 zobrazuje vplyv zmeny jednotlivých premenných veličín na výslednú únosnosť spoja. Ukazuje nám taktiež percentuálny podiel priamo úmerného vplyvu, nepriamo úmerného vplyvu a hranicu, kedy už zmena vybranej veličiny nemá na výslednú hodnotu únosnosti vplyv.

Premenná veličina	Konštantná veličina	Vplyv Priamo úmerný	Vplyv Nepriamo úmerný	Vplyv Nemá
$t_1$	d = 14mm	30%	10%	60%
	d = 20mm	40%	10%	50%
	d = 28mm	60%	10%	30%
<b>d</b>	$t_1 = 100\text{mm}$		100%	
	$t_1 = 200\text{mm}$		100%	
	$t_1 = 240\text{mm}$		100%	
$f_{hk}$	d = 14mm $t_1 = 100\text{mm}$	10%	90%	
	d = 20mm $t_1 = 100\text{mm}$	20%	80%	
	d = 28mm $t_1 = 100\text{mm}$	50%	50%	
	d = 14mm $t_1 = 140\text{mm}$		100%	
	d = 14mm $t_1 = 160\text{mm}$		100%	
	d = 14mm $t_1 = 40\text{mm}$	100%		
	d = 28mm $t_1 = 200\text{mm}$		100%	

**Tab.3** – Vplyv zmeny jednotlivých premenných veličín na výslednú únosnosť spoja

Táto práca je zameraná na sledovanie vplyvu impregnácie dreva a tým aj zvýšením jeho pevnosti (či už steny otvorov v prípade spojov, alebo iných charakteristických pevností dreva) na celkovú únosnosť spoja, a preto som v tabuľke 2 sledoval najmä zmenu pevnosti dreva. Z tabuľky 2 je zrejmé, že pri rôznych kombináciách hodnôt konštantných veličín má zvyšovanie pevnosti steny otvoru v dreve vždy vplyv na výslednú únosnosť spoja – či už je stúpanie únosnosti priamo úmerné alebo nepriamo úmerné z čoho vyplýva opodstatnenosť zvyšovania uvedenej pevnosti dreva.



## 5 PRINCÍP A PODSTATA DREVOPLASTICKÝCH MATERIÁLŮV – ZÁKLADNÉ POJMY

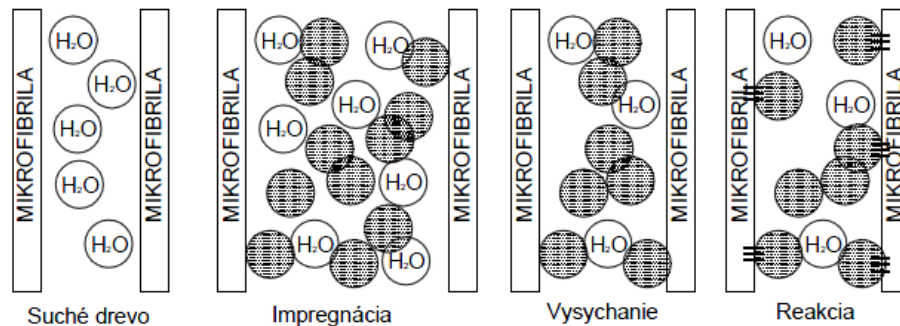
**Kompozitné materiály** sú materiály zložené z viacerých druhov materiálov.

**Drevoplastické kompozitné materiály**, alebo **drevoplastické látky**, alebo krátko **drevoplasty** sú synonymné termíny na označenie kompozitných materiálov z dreva a plastov. Sú spravidla charakterizované zlepšenými vlastnosťami v porovnaní s pôvodným drevom.

**Lignocelulóзовые kompozitné materiály** vo všeobecnosti sú všetky lignocelulóзовые materiály na báze celulózy, lignínu a iných látok rastlín alebo stromov. Vyskytujú sa v prírode alebo pochádzajú z výroby kompozitných polymérnych materiálov. Človekom vyrábané lignocelulóзовые kompozitné materiály sa dajú vyrábať výlučne z prírodných alebo aj syntetických látok. Skladajú sa z masívneho dreva alebo častí, vrstiev, vlákien alebo iných častíc a prídavných polymérov a látok.

## 6 SPÔSOBY IMPREGNÁCIE

**Beztlaková impregnácia** sa robí buď v krátkych časových úsekoch od 5 min do 15 min ponorením dreva do impregnačného kúpeľa alebo dlhodobým máčaním od 8 dní do 12 dní. Prenikanie kvapaliny sa dá pri beztlakovom spôsobe urýchliť vytvorením „pseudováku“ striedaním teploty. Základný princíp impregnácie máčaním je zobrazený na obrázku 5.



Obr.5 – Princíp impregnácie [2]

Striedanie teploty je pri impregnácií dreva priamo v konštrukciách realizovateľnejšie ako vytvorenie vákuového prostredia, pričom ani vytvorenie vákuu nie je vylúčená možnosť. V horúcom kúpeli sa vzduch v dreve rozťahne a v nasledujúcom studenom kúpeli sa ochladí, čím vzniká mierny podtlak.

Hoci tieto postupy rezultujú veľmi nerovnomerne naimpregnované drevo, sú aplikovateľné v príprave drevoplastických látok:

Na povrchovú úpravu (nízka spotreba monoméru pri dosiahnutí eventuálne nijakých alebo menších zlepšení vlastností) – pre zvýšenie pevnosti konštrukčného dreva nevyužiteľné.

Po odstránení vzduchu ľahko penetrujúcimi látkami, miešateľnými s monomérom, na impregnáciu zhnitého dreva (napríklad styrénom a živicami, špecifická impregnácia je väčšia ako 200 %) – metóda vhodná pre rekonštrukcie a sanácie drevostavieb.

**Metódy tlakovej impregnácie** sú v súčasnosti najpoužívanejšie [3].

**Metóda plných buniek.** Princíp tejto metódy spočíva v pripustení monoméru do vevakuovanej nádoby s drevom. Hnacia sila penetračného pohybu kvapalín sa tvorí tlakovým spádom medzi atmosférickým tlakom a vákuom alebo sa môže zvýšiť dodatočným pretlakom od 7 atm do 9 atm. Táto metóda sa často používa pri príprave drevo-plastických kompozitných materiálov, čo súvisí hlavne s jej jednoduchosťou a možno aj s tým, že väčšina drevín zatiaľ používaných v príprave drevoplastických kompozitných materiálov sa môže týmto spôsobom uspokojivo naimpregnovať. Malé rozmery a často nízka objemová hmotnosť používaných vzoriek umožňujú dostatočné naimpregnovanie v pomerne krátkom čase 25 minút.

Nevýhodami metódy plných buniek je veľká spotreba monoméru a jeho nedokonalý prienik do vzoriek väčších rozmerov a objemovej hmotnosti, ktorá je nežiaduca aj z hľadiska ekonomického. Pri polymerizácii monoméru *in situ* v dreve je veľkým problémom aj odvádzanie vznikajúceho tepla, ktoré s množstvom monoméru stúpa [3].

**Metóda prázdnych lumenov** je úsporná metóda (známa od roku 1902 ako Rűppingov spôsob), spočívajúca v tom, že sa najprv do dreva natlačí vzduch, prípadne iný plyn a pod ešte vyšším tlakom (cca 10x) sa vtláča do dreva impregnačná látka, ktorá tlak vzduchu v dreve ešte zvýši. Po uvoľnení sa väčšina prebytočnej látky vytesní z lumenov v dreve stlačeným vzduchom. Dodatočne vytvoreným vákuom sa môže z dreva vysať ďalší prebytok impregnačnej látky. Dosiahne sa pomerne dobrá hĺbka impregnácie a významne sa zníži spotreba impregnačnej látky oproti metóde plnobunkovej [3].

Uvedené metody je možné modifikovať a kombinovať na spôsoby podvojné prípadne zložitejšie. Účinok ďalších krokov klesá v dôsledku obsadenia drevnej štruktúry.

Na prípravu drevoplastických kompozitných materiálov sa (okrem jednoduchej vákuovej metódy) použili aj zložitejšie postupy, ktoré umožňujú lepšiu regulovateľnosť impregnácie. Pri jednoduchej vákuovej metóde je nemožné regulovať množstvo monoméru vpravené do dreva bez toho, aby sa nemenila jeho distribúcia. Na túto skutočnosť sa nemá zabúdať. Myslia sa tým práce, v ktorých sa merajú závislosti relatívnej zmeny vlastností dreva tvorbou drevo-plastických kompozitných materiálov, od množstva syntetického polyméru v dreve, pričom zmena množstva polyméru sa dosahuje zmenou impregnačných parametrov. Uvedené závislosti sa nemôžu považovať za úplne exaktné, pretože sa okrem sledovaného množstva polyméru mení tiež jeho distribúcia. Z tohto hľadiska sa považujú ako správne tie závislosti, v ktorých sa regulácia množstva polyméru robí pomocou konverzie pri polymerizácii, (pri rovnako uskutočnenej impregnácii).

Loos a kolektív použili na impregnáciu borovice metylmetakrylátom plnobunkovú metódu, Ruepingov a Lowryho spôsob impregnácie. Metóda Lowryho spočíva v tom, že sa drevo pri atmosférickom tlaku ponorí do monoméru (impregnanu) a nasakovanie (permeácia) sa robí pri zvýšenom tlaku (napr. 5,5 atm, 18 hodín). Po odstránení monoméru sa určitý čas udržuje tlak. Uvedenou metódou sa dosiahla pomerne rovnomerná distribúcia monoméru [3].

**Impregnácia v inertnej atmosfére.** Vákuum má byť na odstránenie molekulárneho kyslíka dostatočne vysoké od 10-3 torr do 10-6 torr. Pri radiačne iniciovanej polymerizácii monomérov v dreve postačuje hodnota od 10 do 15 torr; ďalšie odstraňovanie kyslíka je pomerne zbytočné. Inhibičný účinok kyslíka závisí samozrejme od druhu použitého monoméru. Pri modifikácii konvenčných modifikačných postupov pre prípravu drevo-plastických kompozitných materiálov, je v niektorých prípadoch (podľa druhu monoméru) potrebné vymeniť vzduch inertným plynom [3].

Predchádzajúca kapitola práce bola zameraná na stručný prehľad problematiky mojej práce z hľadiska chemického inžinierstva. Práce p.prof. Svetozára Katuščáka sa touto problematikou zaoberajú omnoho rozsiahlejšie, v tejto práci však na podrobnú analýzu z hľadiska chemického inžinierstva nie je priestor a nie je to jej cieľom. Uvedený prehľad slúži na zorientovanie sa v problematike a osvojení si zaužívaných pojmov.

Pri určení spôsobu impregnácie dreva, použitej impregnačnej látky a impregnačného zariadenia budem spolupracovať s pracovníkom fakulty chemickej a potravinárskej technológie.

Po stanovení si týchto impregnačných postupov nasleduje samotný výskum, ktorý spočíva v dvoch základných líniách:

- laboratórna analýza
- analýza pomocou výpočtového programu

## 7 ZÁVER

Tento príspevok sa zaoberá problematikou spevnenia dreva, pričom je zameraný na jeho chemickú modifikáciu. V uvedenom článku boli stručne uvedené hlavné témy tejto analýzy. Teoretická analýza vykonaná v rámci tejto práce jednoznačne preukázala priaznivý vplyv spevnenia dreva na drevené konštrukcie najmä z hľadiska statického. Boli preukázané vyššie hodnoty únosností analyzovaných spojov a taktiež definované rozhodujúce vstupné veličniny, resp. zápisy jednotlivých mechanizmov porušenia v rámci návrhu analyzovaných spojov. Analýza ponúka vizuálnu formu normového zápisu posúdenia analyzovaného spoja čím ukazuje „správanie sa“ celého posúdenia. Takto prehľadná forma teoretického zápisu normového postupu ponúka priestor na ďalšie otázky a tým udáva smer ďalšieho výskumu.

V prípade priaznivých výsledkov z podrobnej teoretickej a laboratórnej analýzy a získaní pozitívnych výsledkov vplyvu chemickej modifikácie dreva na jeho pevnosť bude nasledovať analýza možných aplikácií do praxe, prípadne zavedenie použitia zápisov vyjadrujúcich spevnenie dreva do príslušných technických noriem.

## Literatúra

- [1] M.A.BRICH, V.P.KOZHIN. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 75, No. 2, 2002 Modeling of the nonisothermal impregnation of wood and other porous media by fluids*
- [2] DR.ANKE SCHIRP – FRAUNHOFER-INSTITUTE FOR WOOD RESEARCH, WILHELM-KLAUDITZ-INSTITUTE, WKI, BRAUNSCHWEIG-GERMANY) *Chemical modification of wood particles for the production of WPC using N-Methylol compounds ČSN ISO 690 (01 0197) Dokumentace. Bibliografické citace. Obsah, forma a štruktúra. Praha : Český normalizační institut, 1996. 31 s.*
- [3] SVETOZÁR KATUŠČÁK, *Drevo-plastické kompozitné materiály, polymerizácia in situ a očkovanie drevných zložiek, STU Bratislava 2006*

**Recenzoval:** Jaroslav Sandanus, Ing. PhD., Katedra kovových a drevených konštrukcií, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, Bratislava, jaroslav.sandanus@stuba.sk