

Mendelova univerzita v Brně
LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA
ÚSTAV NAUKY O DŘEVĚ



**Posouzení kvality lepení kombinovaných
masivních materiálů na bázi dřeva**

Bakalářská práce

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: "**Posouzení kvality lepení kombinovaných masivních materiálů na bázi dřeva**" zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne.....

Podpis.....

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu panu doc. Dr. Ing. Pavlu Královi za cenné rady a pomoc při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Děckému, který mi pomáhal a radil při praktické části.

Abstrakt

Myšlenka této práce vznikla po kontaktu firmou MATRIX a.s. z Rychnova nad Kněžnou ohledně výzkumu použití vhodných materiálů a lepidel pro dřevěné okenní rámy. Cílem mé práce bylo zjistit pevnost lepeného spoje různých kombinací dřev (buk, dub, modřín, smrk a acetylovaná borovice) a 3 druhů polyuretanových lepidel. Výzkum byl z části orientován na chování, dnes stále méně známé dřeviny, acetylované borovice a její experimentální výsledky v kombinaci s další dřevinou. Je to modifikovaný druh dřeva (borovice Radiata Pine), který díky chemickému procesu zvaném acetylaci se stává velmi kvalitním, odolným a trvanlivým materiálem. Praktickou částí bylo tahové namáhání zkušebních tělísek na smyk s 3 typy PUR lepidel. Mým úkolem bylo najít ideální kombinaci dřeva a lepidla, které budou mít dostatečnou pevnost a současně splňují odolnost externích podmínek (vlhkost, vítr, sluneční záření).

Klíčová slova

Acetylaci, chemická modifikace dřeva, pevnost lepeného spoje, polyuretanová lepidla, smyková pevnost

Abstract

The idea of this work came from doc. Dr. Ing Pavel Král when some company contact him regarding research for using appropriate materials and adhesives for window frames. The goal of my work is to determine the bonding strength of various combinations of wood (oak, beech, larch, spruce, poplar and accoya) and polyurethane adhesives. The research was half focused on today less known tree species Accoya wood and its behavior in combination with other tree species. It is a modified type of wood (pine Radiata Pine), who thanks to a chemical process called acetylation becomes a high quality, durable and durable material. The practical part is a tensile stress test specimen to shear with various types of adhesives. My job was to find the right combination of wood and glue, that will have sufficient strength and concurrently resist external conditions (humidity, wind, solar radiation).

Key words

Acetylation, bonding strength, chemical modification of wood, polyurethane glue, shear strength

Obsah

1	Úvod	7
2	Cíl a zaměření práce	8
3	Literární přehled	9
3.1	Teorie lepení.....	9
3.1.1	Mezimolekulární síly	9
3.1.2	Adheze	10
3.1.3	Koheze	11
3.1.4	Smáčivost povrchu	11
3.1.5	Lisovací tlak	12
3.1.6	Kvalita opracování.....	12
3.1.7	Vlhkost podkladu.....	13
3.1.8	Velikost nánosu	13
3.1.9	Čas a teplota lisování.....	14
3.2	Složky lepidel.....	15
3.3	Druhy lepených spojů	17
3.4	Polyuretanová lepidla.....	18
3.4.1	Polyhydroxyuretanová lepidla.....	18
3.4.2	Organické polyuretany	19
3.4.3	Termoplastické polyuretany	22
3.4.4	Charakteristika použitých PUR lepidel	23
3.4.5	Lepidlo Xilobond T30	23
3.4.6	Lepidlo Kestopur 1010	23
3.4.7	Lepidlo Kestopur 1050	24
3.4.8	Porovnání PUR lepidel s jinými druhy lepidel.....	24
3.4.9	Vliv vlhkosti na smykovou pevnost PUR lepidel.....	25
3.4.10	Vliv teploty	26
3.5	Vlastnosti (specifikace) použitých dřevin	30
3.5.1	Dub	30
3.5.2	Buk	31
3.5.3	Modřín	31
3.5.4	Acetylovaná borovice	32
3.5.5	Smrk	34
3.6	Mechanické vlastnosti dřeva	34

3.6.1	Elastické deformace.....	34
3.6.2	Plastické deformace.....	35
3.6.3	Modul pružnosti.....	35
3.6.4	Tah ve směru vláken.....	35
3.6.5	Smyk.....	36
4	Materiál a metodika	37
4.1	Příprava vzorků	37
4.1.1	Použité kombinace dřevin a lepidel.....	37
4.1.2	Egalizace, řezání.....	37
4.1.3	Lepení	38
4.1.4	Lisování	38
4.1.5	Formátování a rozměry tělísek	38
4.2	Průběh měření	39
4.2.1	Zkušební trhací stroj	40
4.2.2	Smyková zkouška tahem dle ČSN EN 205	40
4.3	Výsledky a vyhodnocení	41
4.3.1	Grafická znázornění výsledků	43
4.3.2	Program pro záznam měření.....	45
4.3.3	Porušení lepeného spoje	47
4.3.4	Závislost pevnosti na hustotě.....	50
4.4	Diskuze.....	52
5	Závěr.....	54
6	Summary.....	55
7	Přehled použitých zdrojů	56

1 Úvod

Pokud bych si měl vybrat mezi dřevem a jiným konstrukčním či stavebním materiálem, měl bych dnes jasno. Dřevo na nás působí přirozeným dojmem a je vcelku rychle obnovitelnou surovinou. Ve srovnání např. s kovy má na své poměry dobré fyzikální i mechanické vlastnosti a je dobře opracovatelné. Jeho nevýhodou oproti již zmíněným kovům nebo plastům je jeho životnost (bavíme se o dřevině v surovém stavu) a tvarová nestabilita. Některé kovy či plasty dosahují trvanlivosti v nezměněném stavu řády desítek, stovek či více let. U dřeva tomu tak není, ale můžeme toho dosáhnout jeho modifikací. Již dávno pravěcí lidé částečně modifikovali dřevo, byť o tom možná nevěděli. Pouhé opálení hrotů oštěpů nebo kůlů prodlužovalo jeho funkčnost a snižovalo jeho degradaci vlhkostí či mikroorganismy.

Velký vliv na modifikaci dřeva má neustálý nárůst těžby, zvyšování cen a klesající kvalita. Je snahou, aby se těžba dřeva snížila. Efektivního zhodnocení již pokáceného řeziva dosáhneme různými technologickými úpravami, které zlepšují mechanické, fyzikální a estetické vlastnosti.

Jednou z modifikací dřeva, která má spojitost s dřevinou uvedenou v této práci, je acetylace. Cílem dané modifikace je prodloužit užitnou hodnotu, minimalizovat údržbu a zachovat původní tvar a barvu. Její výzkum trval několik desítek let a ve světě je známa pouze krátce. Jde o chemicky upravenou borovici *Radiata pine*, která nese obchodní název *Accoya wood* nebo *Titan wood*. Její benefity budou podrobněji popsány v samostatné kapitole.

2 Cíl a zaměření práce

Cílem této bakalářské práce bylo najít ideální kombinaci dvou stejných nebo různých materiálů a 3 druhů polyuretanových lepidel, která budou mít nejvyšší výsledné hodnoty pevnosti v tahu na smyk.

V teoretické části jsou ve větší míře popsány polyuretanová lepidla a jejich vliv na okolní prostředí (teplota, vlhkost), dále porovnání s ostatními konstrukčními či nekonstrukčními lepidly a nakonec výroba organických PUR lepidel.

Praktická část práce se zabírala posouzením pevnosti a kvality lepení v navržených variantách masivního kompozitního materiálu na bázi dřeva. Dále šlo o testování acetylací modifikované borovice, která není ještě v těchto směrech probádána, v kombinaci s jinými dřevinami. Experimentální měření bylo prováděno na univerzálním zkušebním stroji, kde se měřila pevnost lepeného spoje.

3 Literární přehled

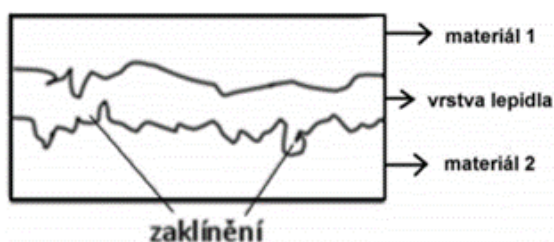
3.1 Teorie lepení

V teorii lepení se uplatňují fyzikální síly, chemické vazby a mezimolekulární síly. Pojem lepení znamená spojení dvou různých ploch prostřednictvím lepidla, které by se v době lepení mělo nacházet nejlépe v kapalném stavu. Jen díky tomu dosáhneme dokonalého přilnutí povrchů. Lepidly můžeme taktéž slepit různorodé povrchy (dřevo/plast, kov/dřevo či jiné materiály). Je požadováno, aby pevnost lepeného spoje byla vyšší, než je pevnost samotného materiálu. Pevnost lepeného spoje závisí obecně na prvních čtyřech parametrech, další z nich byly takové, které jsme měli možnost ovlivnit: (Uhlíř, 1997)

- na mezimolekulárních silách
- na přilnavosti lepidla k lepenému povrchu (adheze)
- na soudržnosti hmoty neboli vnitřní pevnosti lepidla (koheze)
- na smáčivosti povrchu lepidlem
- dále na velikosti nánosu
- na vlhkosti podkladu
- na lisovacím tlaku
- na kvalitě opracování

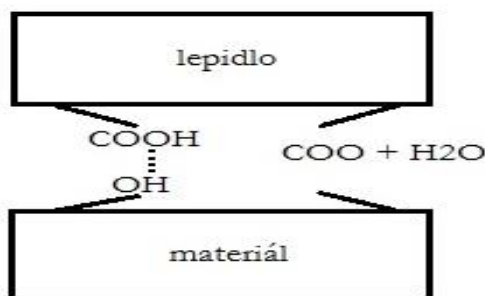
3.1.1 Mezimolekulární síly

Existují 2 druhy vazeb, které vzniknou mezi lepidlem a lepenou plochou. Je to vazba mechanická nebo chemická. Mechanická vazba vzniká u dřev, která jsou porézní a členitá (hrubá). Pokud je povrch hladký a leštěný, je mechanická vazba zanedbatelná.



Obr. 1 Mechanická vazba lepidla s povrchy - vznik mechanického „zámku“
(zdroj: http://www.abclepidla.cz/Files/file/files/Teorie_lepeni.pdf)

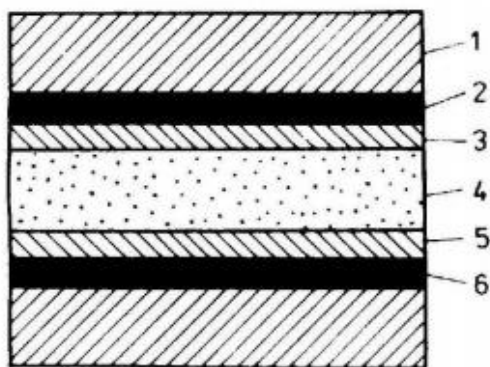
Chemická vazba se uplatňuje i u porézních a hladkých povrchů. Mezi molekulami lepidla a lepeným povrchem se nachází tzv. slabé van der Waalsovy síly. Velmi dobře se lepí povrchy, které mají reaktivní povrch, tzn. oxidované (kovy, oxidované plasty), přírodní polymery (dřevo, papír, celulóza) s volnými chemickými skupinami –oxy, -hydroxy atd.



Obr. 2 Chemická vazba lepidla s povrchem (zdroj: http://www.abclepidla.cz/Files/file/files/Teorie_lepeni.pdf)

3.1.2 Adheze

Adheze neboli přilnavost je schopnost stejných nebo různých materiálů vázat se k sobě navzájem. Každý lepený spoj můžeme z hlediska vnitřní struktury rozložit do tří hlavních vrstev a dvou mikrovrstev. Lepeným materiálům se říká adherenty (1). Následuje adhezní zóna (2, 6) a přechodová adhezní zóna (3, 5). Kohezní zóna (4) je část, kde se nachází lepidlo. Pokud není lepidlo vhodné pro lepení daných materiálů, nenastane adhezní spojení a dojde k okamžitému rozlepení.



Obr. 3 Struktura lepeného spoje (zdroj: <http://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html> [citováno: 14. 1. 2016])

3.1.3 Koheze

Jinými slovy vnitřní adheze, soudržnost. Je to pojem udávající pevnost lepidla, ve kterém drží jeho částice pohromadě působením mezimolekulárních a valenčních sil (van der Waalsovi). Dalšími vlastnostmi, které jsou kohezi směrodatné, je těkavost a bod varu, které mají vliv na rozpustnost a mísitelnost. Síla koheze je závislá na velikosti a struktuře makromolekul lepidla. (Eisner a kol., 1966)

3.1.4 Smáčivost povrchu

Hydrofobní a hydrofilní chování kapalin je označováno termínem nesmáčivost a smáčivost lepeného povrchu. Jde o zbylou volnou energii na povrchu adherentu, která ovlivňuje přilnavost tím, že zlepšuje roztečení kapaliny (lepidla) na povrchu materiálu. Roztečení kapaliny na povrchu substrátu po dosažení rovnovážného stavu závisí na zbylé volné energii a na povrchovém napětí kapaliny. Velikost smáčení vyjadřuje úhel kontaktu θ (théta). Je-li velikost úhlu θ menší než 90° , kapalina smáčí povrch (hydrofilie), pokud je větší než 90° , jde o hydrofobii – vyznačující se větší smáčivostí, kontaktním úhlem a vyšším třením. Dobrá smáčivost je předpokladem pro přilnutí kapaliny (lepidla) k adherentu. (Sedliačik M. a Sedliačik J., 1998)



Obr. 4 Smáčivost povrchu – vlevo dobrá, vpravo špatná
(zdroj: <http://www.cocky.cz/images/smacivost.jpg>,
[citováno: 1. 2. 2016])

3.1.5 Lisovací tlak

Tlak lisovacích desek je odvozen z měrného tlaku a velikosti dýhované či lepené plochy. Velikost měrného tlaku se odvozuje vztahem:

$$P_s = P_c / P$$

(P_s je měrný tlak na lisovací plochu v MPa, P_c je celková síla, kterou působí písty v N, P je plocha lisovaných dílců v etáži v m^2)

Obecně platí zásady při lisování v jedné etáži, kdy lisované dílce musí mít stejnou tloušťku, jinak by došlo k nerovnoměrnosti rozložení tlaku. Lisovacím tlakem se vyrovnává přebytek lepidla, vytváří se rovnoměrná vrstva a lepidlo lépe proniká do pórů dřeviny. Příliš vysoký tlak způsobuje vytlačení lepidla z lepené spáry, zhoršuje a deformuje lepené dílce. Velikost lisovacího tlaku je dána druhem dřeviny a lepidla, teplotou lisování a kvalitou opracování (hladkostí) povrchů. (Trávník a Svoboda, 2007)

3.1.6 Kvalita opracování

Základem dobré přilnavosti (adheze) povrchů s lepidlem je kvalitně opracovaný a čistý povrch. Teorie adheze se má tak, že lepidlo v nevytvrdlém stavu zakotví do pórů dřeva a nerovností povrchu, kde po vytvrzení vytvoří mechanické spojovací můstky. Za nejvhodnější opracování před lepením se považuje broušení. Nesprávnou egalizací může dojít ke snížení pevnosti spoje, což způsobuje prach usazený v nerovnostech povrchu. Vliv na samotnou hladkost povrchu má i anatomická stavba. Před konečným lepením je zapotřebí lepené plochy zbavit prachu i mastnoty. Pokud k sobě povrchy těsně přiléhají, zajistíme tak vysokou pevnost lepeného spoje. (Trávník, 2005)

3.1.7 Vlhkost podkladu

Od vlhkosti lepeného podkladu se odvíjí rychlost difúze rozpouštědla nebo vody, tzn. rychlost vytvrzování. Difuzí rozpouštědla rozumíme odpaření či vsáknutí do daného materiálu. Optimální vlhkost podkladu, např. pro lepení či dýchování, se pohybuje v rozmezí 8 ± 2 %. Hraniční hodnota je max. 12 %. Čím vyšší je vlhkost materiálu, tím menší část rozpouštědla se vsaje. Tento fakt zpomaluje nebo dokonce i zastavuje proces vytvrzování. Problém, který dále může vzniknout, je nedostatečně rychlé odpaření vody, kdy chemický proces vytvrzování „předběhne“ fyzikální proces oddifundování vody, a voda tak zůstane uvnitř lepeného spoje.

Naproti tomu nízká vlhkost způsobuje velmi rychlou difuzi, kdy rozpouštědlo zateče do nitra materiálu a dojde k předčasnému vytvrzení. Nastane také rychlá změna konzistence a snížení smáčivosti, což má za následek vytvoření nerovnoměrného filmu a s tím spojené snížení kvality spoje. (Trávník, 2005)

3.1.8 Velikost nánosů

Nanášení lepidel či lepicích směsí se provádí různými technologiemi. Obecně platí zásada, že množství naneseného lepidla ovlivňuje pevnost lepeného spoje. Čím menší je tloušťka nánosů, tím větší je pevnost spoje. Tloušťka filmu se pohybuje v rozmezí 1 až 400 μm . Při nedodržení zásady optimálního množství lepidla vzniká u velmi nízkých nánosů riziko tzv. chudého spoje (viz kapitola 3.3). Optimální množství nánosů je závislé na opracování povrchu, schopnosti dřeviny vsáknout lepidlo, konzistenci a obsahu sušiny. (Trávník, 2005)

Tab. 1 Spotřeba lepidel a určení lisovacího tlaku při některých způsobech lepení (Uhlíř, 1997)

Způsob lepení, druh lepeného výrobku	Druh lepidla	Nános lepidla nebo směsi (g/m ²)	Lisovací tlak (MPa)
Dýchování nábytkových dílců nastavenými lepidly	PUR	180 až 220	0,6 až 1,2
Dýchování nábytkových dílců při velmi krátkých časech	PUR	100 až 160	0,6 až 0,8
Překližky s měkkými vložkami	PUR	200 až 300	0,6 až 1,4
Překližky z tvrdých dřevin	PUR	150 až 200	1,5 až 2,5
Montážní lepení (hrubě opracované povrchy)	PVaC	100 až 600	0,4 až 1,2
Montážní lepení (hladce opracované povrchy)	PVaC	300 až 600	0,2 až 0,6

3.1.9 Čas a teplota lisování

Vyšší teplota lisovacího prostředí zkracuje dobu lisování na minuty či vteřiny. Příkladem jsou močovinná lepidla, kdy se lisovací časy dají zkrátit až na 20 vteřin. Prakticky rozeznáváme 3 druhy lepení:

- za studena – teplota v lepené spáře je 15 až 30 °C
- za tepla – 30 až 100 °C
- za zvýšené teploty – nad 100 °C

Běžně se používá více druhů ohřevů. Je to např. předehřev lepených ploch, přímý ohřev lepené spáry pomocí VF ohřevu, konvekci nebo IČ záření. Nejpoužívanější je ohřev kontaktní, a to díky minimálním ztrátám a rychlosti prohřevu tenkých materiálů.

Na opačném principu fungují tavná nebo glutinová lepidla, kdy snížením teploty rychleji vytvrzují.

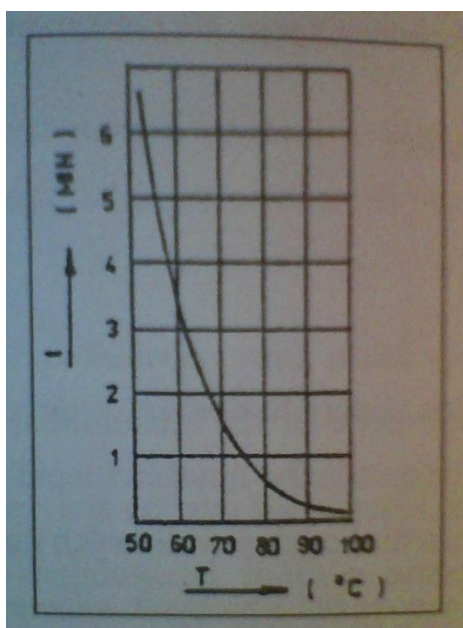
Celkový lisovací čas je dán vztahem:

$$t = t_p + t_k$$

kde: t – je celkový lisovací čas, t_p – čas potřebný k prohřátí lisované vrstvy, t_k – čas na vytvrzení lepicí směsi

Příliš vysoká teplota a doba lisování mohou dřevinu i lepený spoj znehodnotit. Lepidlo se díky tomu přehřívá, ztrácí na pevnosti a křehne. „U některých lepidel nastává při teplotě spáry (např. močovino-formaldehydových) nad 140 °C, u fenol-formaldehydových nad 180 °C částečný rozklad, projevujícím se zřetelným poklesem pevnosti“ (Eisner a kol., 1966, s. 46).

Na rychlost prohřátí, dobu a teplotu lisování má velký vliv tloušťka lepeného dílce. Jelikož má dřevo nízkou tepelnou vodivost ($\lambda = 0,1 - 0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), je dobrým izolantem. (Trávník a Svoboda, 2007; Trávník, 2008; Eisner, 1966)



Obr. 5 Závislost času vytvrzování t [min] od teploty T [°C] (Trávník, 2005)

3.2 Složky lepidel

Základní složkou lepidel jsou makromolekulární látky. Pokud nejsou kapalné, musíme je rozptýlit do koloidního stavu. Používá se voda nebo jiná polární, snadno se odpařující kapalina, jako je např. aceton, alkohol atd.

Ideálních vlastností lepidel dosáhneme přidáním různých aditiv. Jde o tvrdidla, plniva, nastavovadla a jiné zušlechťující látky, které se do lepicích směsí z ekonomických a technických důvodů přidávají. (Sedliačik M. a Sedliačik J., 1998)

Pojiva – jsou hlavní funkční složku lepidlové směsi. Zajišťují pevnost a odolnost spoje před rozlepením, přilnavost lepidla k podkladu (adheze) a vnitřní soudržnost lepidla (koheze). (Muzikář, 2008)

Tvrdidla – jde o sloučeniny kyselin nebo solí, které urychlují reakci tuhnutí lepidla. Mohou být součástí lepidla nebo samostatně přidávány před lepením do směsi nebo na jednu z lepených ploch ve formě prášku či roztoku. (Sedliačik M. a Sedliačik J., 1998)

Plniva – jsou to jemně mleté látky bez lepicích vlastností. Používají se např. křída, nerostná a hovězí moučka, fenoplasty nebo dřevní mastek. Plniva zvyšují viskozitu (tzn. snižují tekutost) lepicí směsi, čímž snižují zatékání lepidla do pórů dřeva, a tím zabraňují vzniku chudého spoje. Napomáhají vyplnit nerovnosti lepeného povrchu a snižují vznik napětí v lepené spáře. (Nutsch et al., 2006; Sedliačik M. a Sedliačik J., 1998)

Nastavovadla – jsou to jemně mleté, bobtnavé organické látky s lepicími vlastnostmi. Používá se např. obilná mouka, celulóza nebo kukuřiční či jiný škrob. Jejich přidáním snižujeme náklady, regulujeme viskozitu lepicí směsi a také se zvýší elasticita lepeného spoje - tím pádem se sníží nebezpečí popraskání spoje. (Nutsch et al., 2006; Sedliačik M. a Sedliačik J., 1998)

Přidáním nastavovadel a plniv je časté a ekonomicky velmi výhodné. Naopak pokud se tato aditiva nepřidají ve správné poměru, sníží se tak pevnost a odolnost lepené spáry vůči působení vlhkosti. Optimální je 20 % z množství lepicí směsi. Nejlevnějším nastavovadlem je vzduch, který lepidlovou směs zpění, a tím dosáhneme tenčí nanášecí vrstvy. Výhodou je nižší podíl vody, snížení množství nánosu a díky tomu lepidlo neproniká na povrch dýhovaných materiálů. (Sedliačik M. a Sedliačik J., 1998; Trávník, 2008)

Rozpouštědla – jde o kapaliny nebo směsi kapalin, které zajišťují rozpouštění nebo zředění pojiva. Upravují tokové vlastnosti lepidlových směsí. (Muzikář, 2008)

Ředidla – používají se pro úpravu tekutosti a rozlivu lepicí směsi při nanášení. (Muzikář, 2008)

Zušlechťující látky – zlepšují vlastnosti lepeného spoje. Jde o látky s hydrofobními vlastnostmi, jako je např. vosk, parafin nebo asphalt. Pokud jde o živočišná či rostlinná lepidla, jako ochranný prostředek proti biotickým činitelům se používají chlorované fenoly, anorganické fungicidy, atd. Je možné taktéž využít přísady močovinoformaldehydových lepidel, které zvyšují odolnost vůči teplé vodě

a současně vážou volný formaldehyd (fenol, melamin, rezorcinol). (Sedliačik M. a Sedliačik J., 1998; Trávník, 2008)

3.3 Druhy lepených spojů

a) Dokonalý spoj

Lepené povrchy materiálů k sobě těsně přiléhají. Vytvrdnuté lepidlo vytvoří tenký, rovnoměrný a homogenní film. K porušení spoje dochází až při působení velké síly a většinou nastává mimo lepenou oblast, tedy v části dřevní hmoty. (Eisner a kol., 1966)

b) Chudý spoj

Lepené materiály drží pohromadě, ale k jejich roztržení (lepeného spoje) je potřeba malé síly. Důvodem vzniku takového spoje může být velká pórovitost dřeva, kdy se část lepidla vsaje do materiálu; nerovnoměrný nános, způsobený vysokou viskozitou lepidla; dále vysoká vlhkost materiálu nebo nadměrný tlak lisu, kdy lepidlo zateče do pórů nebo vyteče ze spáry. (Eisner a kol., 1966)

c) Rozlepený spoj

Spoj je částečně nebo po celé lepené ploše volný. Z boků jsou jasně viditelné spáry či vzduchové kapsy mezi materiály. Příčinou vzniku může být předčasné vytvrnutí lepidla, nedostatečný tlak lisu, lepení dřeviny o nesprávné vlhkosti, nedostatečné opracování nebo zbylý prach či mastnota na povrchu. (Eisner a kol., 1966)

d) Zrnitý spoj

Pevnost takového spoje je malá. Po roztržení má vytvrzené lepidlo krupicovitou strukturu. Důvodem je buď vysoké množství plniv a nastavovadel, které příliš zhuští lepicí směs a zabrání tak vsakování lepidla do materiálu, nebo nedostatečné rozpuštění práškového lepidla. (Eisner a kol., 1966)

e) Zmrzlý spoj

Pevnost spojení mezi materiály je malá, až téměř nulová. Tento chybný spoj vzniká např. pokud je nízká vlhkost podkladu nebo při předčasném vytvrzení lepidla ještě před uvedením do lisu. (Eisner a kol., 1966)

f) Nezakotvený spoj

Spoj je velmi málo pevný, po roztržení spoje je vytvrzený film ve spáře volný, nepřilnul k lepenému povrchu. Problém mohl nastat při nánosu, kdy viskozita lepidla byla příliš vysoká; dále povrch mohl obsahovat stopy mastnoty a prachu nebo lepicí směs předčasně vytvrdla. (Eisner a kol., 1966)

g) Zdánlivě pevný spoj

Spoj se zdá být na první pohled pevný, odolný. Při působení síly, kdy dojde k rozloupnutí v blízkosti lepidlové části, zůstane na vytvrzeném filmu vrstva dřevních vláken. Příčinou může být porušení povrchových vrstev vlivem opracování nebo nízká pevnost podkladu způsobená hnilobou. (Eisner a kol., 1966)

h) další vady

Můžeme se setkat s chybným lepením různých druhů materiálů s rozdílnou vlhkostí, s nerovnostmi lepených povrchů, se špatnou volbou lepidla, aj. (Eisner a kol., 1966)

3.4 Polyuretanová lepidla

V roce 2013 činila polyuretanová lepidla až 5 % celosvětové produkce lepidel. Vyrábí se syntézou reakce izokyanátu a vícesytných alkoholů. Jsou vhodná pro stavební a konstrukční spoje. Vykazují dobrou adhezi ke dřevu, ale i k materiálům jako je PVC, polyamid či kovy (např. hliník). Hodnoty pevnosti u PVC nabývají až 10,5 MPa.

Nevýhodou PUR lepidel je izokyanátová složka, která může poškodit oči, nos, dýchací cesty, vyvolat alergie atd. Kvůli technickým opatřením a ochraně pracovního prostředí je snaha zredukovat nebo nahradit množství izokyanátové báze v polyuretanech. Slibnou alternativou reakčního činidla jsou cyklické uhličitany. (Leitsh et al., 2016)

3.4.1 Polyhydroxyuretanová lepidla

Náhradou za PUR lepidla mohou být polyhydroxyuretanová lepidla neboli hybridní polymery. Vznikají reakcí cyklického uhličitanu s triethylenetetraminem

(TETA). Podle posledních výzkumů po 2 hodinách reakce úplně zaniká izokyanátová vazba. Díky jinému uskupení vazeb vykazují PHU lepidla zvýšenou chemickou odolnost, nižší propustnost, lepší tepelnou stabilitu a nižší pórovitost. Hydroxyuretany mají hydroxylové skupiny, které zvyšují adhezi lepidla k podkladu pomocí vodíkových můstků na povrchu lepeného substrátu, který obsahuje vhodné funkční skupiny. Bylo dokázáno, že náhradou PUR lepidel za PHU se zvýšila adheze u několika různých druhů podkladů.

Na rozdíl od rychlé reakce izokyanátů s alkoholy za normálních podmínek, je reakce cyklických uhličitanů s aminy obvykle pomalejší v závislosti na teplotě okolního prostředí. Katalytická reakce by měla tento problém vyřešit. (Leitsh et al., 2016)

3.4.2 Organické polyuretany

Polyuretany mají širokou škálu použití, ať už v nábytkářském průmyslu jako lepidla či nátěrové hmoty, v obuvnictví nebo jako podpůrný materiál v textilním průmyslu – pěny. S neustále zvyšující se spotřebou dochází k obavám z dostupnosti fosilních paliv, které mají omezené zdroje. Alternativou pro přípravu PUR lepidel je výroba polyolů, z obnovitelných zdrojů či přírodních zdrojů jako jsou např. brambory nebo rostlinné oleje. Proces se nazývá transesterifikační reakce. Podstatou syntézy polyuretanových lepidel je totiž reakce izokyanátů (látky obsahující reaktivní skupinu – NCO), polyolů (polyestery, polyethery), aminů a vody (látky obsahující hydroxylové a aminové skupiny – OH, -NH₂).

Výchozí surovinou jsou brambory nebo přírodní oleje. Z brambor je nutno extrahovat škrob, který je třeba zbavit amylopektinu pomocí louhování v toluenu. První druh oleje byl získán extrakcí ze semen mexického máku *Argemone mexicana* v Soxhletově extraktoru pomocí hexanu, druhým byl ricinový olej. Oba oleje bylo nutné před experimentem přechistit. Poslední složkou byl toluen 2,4-diisocyanate (TDI).

Smíchala se 0,5% kyselina sírová a 300 ml ethylenglykolu v baňce s třemi hrdly vybavené míchadlem, teploměrem, přívodem dusíku a vývěvou. Směs se zahřívala za stálého míchání při teplotě 80 °C v dusíkové atmosféře a sníženém tlaku (125 mmHg), aby došlo k odpaření vody. Dále se přidalo 10 g bramborového škrobu a směs se zahřívala na teplotu 110-120 °C po dobu 1 hodiny. Přidáním hydroxidu barya,

se neutralizovala kyselina sírová H_2SO_4 . Vznikl světle žlutý, viskózní glykol glykosid, který bylo potřeba oddělit od sraženiny síranu barnatého filtrací. Nezareagovaný ethylenglykol se destiloval při $150\text{ }^\circ\text{C}$ a sníženém tlaku 125 mmHg . Takto připravený glykol glykosid, směs a-D-glykol glykosid a b-D-glykol glykosid, byl použit pro syntézu polyolu. Hmotnost vzniklého produktu byla 270 g .

Druhá varianta výroby je obdobná jako u polyolu z bramborového škrobu. Určité množství oleje s $1,5\text{ g}$ hydroxidu lithia bylo opět smícháno v baňce s třemi hrdly. Směs se zahřívala k teplotě $80\text{ }^\circ\text{C}$. Za sníženého tlaku se přidal glykol-glykosid a směs se za stálého míchání ohřívala při teplotě $210\text{--}230\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 1 hodiny. Po uvolnění vakua se nechala ochladit na pokojovou teplotu. Takto vyrobené polyoly na bázi ricinového oleje nebo argemonového oleje nevyžadují žádné další čištění. Nutností je uchovávat ve vzduchotěsném prostředí.

Pevnost lepidel byla dále testována v tahu na smyk univerzálním zkušebním strojem ZWICK Model 1445. Na teakové vzorky $25\times 300\times 3\text{ mm}$ byla na obě strany nanesena směs o tloušťce $0,1\text{ mm}$, poté byly zatíženy váhou 1 kg po dobu 24 hodin a jejich následná klimatizace v prostředí o $30\text{ }^\circ\text{C}$ a $50\pm 5\%$ vlhkosti trvala po dobu 7 dní. Příprava lepidla probíhala následovně: do kádinky s předem naváženým množstvím polyolu na bázi argemonového oleje s hydroxylovým číslem 300 mg KOH/g byl přidán adukt toluen 2,4-diisokyanátu (TDI), ale vždy v jiném poměru NCO/OH. Cílem bylo stanovit účinek obsahu NCO na adhezi lepidla.

Effect of NCO/OH ratio on adhesion	
NCO/OH ratio (argemone oil-based polyol with hydroxyl value of 300 mg of KOH/g)	Average lap shear strength ($\text{N/m}^2 \times 10^5$)
1.0	34.3 ± 0.8
1.1	38.4 ± 0.9
1.2	41.2 ± 0.4
1.3	50.9 ± 0.4
1.4	48.1 ± 0.4
1.5	48.1 ± 0.5
1.6	44.2 ± 0.3
1.7	41.1 ± 0.5

Obr. 6 Smyková pevnost lepidla na bázi argemonového oleje (Desai et al., 2003)

Lap shear strength of different adhesives

Hydroxyl value	Average lap shear strength ($\text{N/m}^2 \times 10^5$)	Mode of failure
<i>Argemone oil-based polyols</i>		
100	30.3 ± 1.4	C + A
200	38.2 ± 0.7	C + A
300	50.9 ± 0.4	A
400	59.8 ± 0.9	A
500	63.1 ± 1.7	S
<i>Castor oil-based polyols</i>		
200	33.3 ± 0.4	C + A
300	45.0 ± 0.8	A
400	56.8 ± 1.0	A
500	61.7 ± 1.2	S

C—Cohesive failure of adhesive.

A—Adhesive failure of adhesive.

S—Failure of wood substrate.

Obr. 7 Smyková pevnost organických lepidel na bázi olejů
(Desai et al., 2003)

Nejlepších výsledků dosáhl poměr 1.3 NCO/OH, kdy došlo k ideálnímu zesíťování lepidla. Druhou částí experimentu je vliv hydroxylového čísla na pevnost lepidel, při dodržení poměru 1.3 NCO/OH. Jde o lepidla na bázi argemonového oleje a ricinového oleje.

Vysvětlení Obr. 6 je prosté. Hodnoty pevnosti pro poměry 1.0, 1.1 a 1.2 jsou nízké z důvodu slabého zesíťování struktury PU lepidla, proto také převážná část porušení nastala v kohezni zóně. Slabé zesíťování je dáno nižším obsahem kyanátu NCO. Bohužel s rostoucím podílem kyanátu NCO neroste lineárně pevnost spoje. Nadbytek této složky způsobuje křehkost spoje. Data na Obr. 7 vykazují závislost hydroxylového čísla na pevnosti. Zde platí přímá úměra, čím více je hydroxylových skupin, tím lépe a rychleji lepidlo zpolymeruje, a je dána větší pevnost.

Výsledky smykových pevností organických PUR lepidel jsou v porovnání se syntetickými PUR lepidly dosti podobné. Organická PUR lepidla dosahovala u teakového dřeva až 6,3 MPa. Pevnost mohla být nižší z důvodu nevhodné dřeviny, předčasné polymerace či nízkého tlaku, který byl při vytvrzování lepidla pouze 1kg. (Desai et al., 2003)

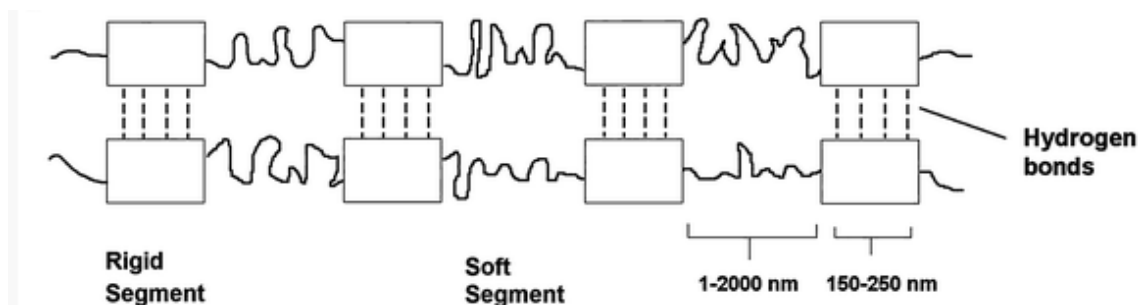
3.4.3 Termoplastické polyuretany

Tak jako všechny materiály podléhají degradaci okolními vlivy (oxidace, UV záření, teplota, vlhkost, chemikálie, aj.) a ztrácejí či mění své fyzikální a mechanické vlastnosti, tak i polyuretany jsou vystaveny těmto změnám. Na tyto změny dobře reagují termoplastické polymery - TPU. V zjednodušeném slova smyslu jde o kombinaci plastu a polyuretanu. Vyrábí se polyadiční reakcí diisokyanátu a jednoho nebo více diolů. Nanášejí se ve formě roztoku nebo prášku – tavné lepidlo. Výhodou je jeho plasticita a pevnost v tahu, kterou zapříčiňuje střídání pevného a houževnatého segmentu spojeného kovalentními vazbami – viz Obr. 7, a odolnost vůči různým vlivům (oleje, mastnota, chemikálie, mechanické poškození). Díky tvárnosti může být opětovně roztaven a neztratí tak na celistvosti konstrukce. Využití je velmi rozsáhlé od textilního a obuvnického průmyslu přes výrobu kabelů, hadic, ochranných nátěrových hmot až po výrobu lepidel. Nevýhodou je nižší odolnost vůči hydrolyzujícím látkám a teplotám nad 75 °C, kdy dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Existují tři chemické druhy TPU, které se liší ve vlastnostech reakce na změnu prostředí:

- polyesterové TPU vynikají vyššími užitnými vlastnostmi, odolností vůči oděru, chemikáliím, olejům a vyrovnaností fyzikálních vlastností

- polyeterové TPU disponují odolností proti mikrobiálním účinkům a odolností vůči hydrolyze (prostředí s výskytem vody). Nevýhodou je nízká tepelná flexibilita.

- polykaprolaktonové TPU nabízejí dobrou odolnost vůči hydrolyze a vlastní tuhost. Jsou vhodným materiálem pro výrobu pneumatických a hydraulických těsnění. (Bockorny et al., 2016; guide_tpu.pdf)



Obr. 7 Struktura TPU spoje (Bockorny et al., 2016)

3.4.4 Charakteristika použitých PUR lepidel

Polyuretanová lepidla jsou jedno nebo dvousložková – jednou složkou je vždy izokyanát. Vynikají krátkou dobou vytvrzování, proto práce s nimi musí být kvapná. Lepidlo se nanáší pouze z jedné strany materiálu. Vyznačují se vysokou smykovou pevností (až 16 MPa). Spoje jsou velmi odolné vůči povětrnostním podmínkám, teplotě do 100 °C a po vytvrzení nejsou rozpustné. Výhodou jsou teploty, při nichž lze materiály lepit (kolem 0 °C). Podmínkou pro kvalitní spoj je nemastný, čistý povrch (bez prachu). (Křupalová 2004; Tesařová, 2013)

3.4.5 Lepidlo Xilobond T30

Jedná se o jednosložkové polyuretanové lepidlo, které je vhodné pro lepení dřeva s vysokým obsahem pryskyřic (akát, smrk, borovice, douglaska). Díky jeho odolnosti vůči vlhkosti a dobré houževnatosti se používá pro širokorozponové konstrukce, stavby, okna či okenní rámy. Vlhkost dřeva pro aplikaci by neměla být nižší než 8 % a vyšší než 18 %. Lepidlo rychle polymeruje, otevřená doba je jen 30 minut při 20 °C. Doporučená lisovací doba je 60-90 minut, přičemž konečná tvrdost nastává po 24 hodinách. Výrobce uvádí 6 měsíční skladovací dobu při pokojové teplotě. (zdroj: http://www.litmar.sk/TL_lepidla/T30.html [citováno: 20. 1. 2016])

3.4.6 Lepidlo Kestopur 1010

Jednosložkové PUR lepidlo s vynikajícími vlastnostmi v odolnosti vůči vlhkosti i vodě, které se řadí se do skupiny D4, což stanovuje norma a lepidlo tak může být trvale vystaveno působení vody. Lepidlo má výborné adhezní vlastnosti pro vlhké povrchy (doporučená vlhkost materiálu je 10-20 %). Je také vhodné pro vrstvené materiály, vrstvené dřevo a délkově napájené dřevo (tzv. finger jointing). Polymerace lepidla je velmi rychlá (otevřená doba cca 10 minut), tudíž je potřeba, aby nános probíhal rychle (pomocí válečku nebo trysky) a bez další prodlevy šly lepené materiály do lisu. Lisovací doba se pohybuje kolem 30 minut při 20 °C. Nevytvrzené lepidlo lze očistit rozpouštědlem acetonem nebo xylenem. Výrobce udává dobu skladování cca

3 měsíce při pokojové teplotě v suchém prostředí.

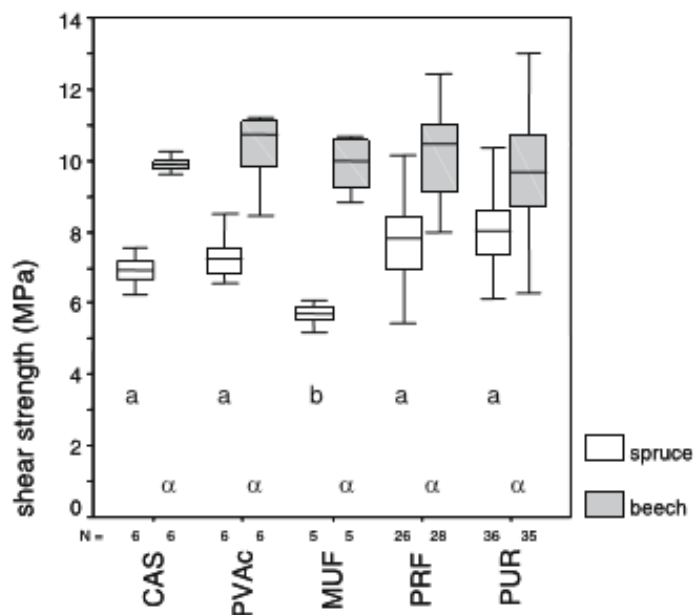
(zdroj: http://litmar.sk/TL_lepidla/K1010.html [citováno: 20. 1. 2016])

3.4.7 Lepidlo Kestopur 1050

Svémi vlastnostmi se toto lepidlo velmi podobá lepidlu předchozímu. Toto obsahuje navíc pouze složku viditelnou pod UV světlem. Delší je také lisovací doba (60 minut) a otevřená doba (20 minut). Doporučená vlhkost materiálu při lepení je 14 %. (zdroj: http://www.lepidla-eshop.cz/static/_dokumenty/3/2/2/Kestopur-1050.pdf [citováno 20. 1. 2016])

3.4.8 Porovnání PUR lepidel s jinými druhy lepidel

Následující obrázek znázorňuje pevnost lepidlového spoje u různorodých dřevin pro různé druhy lepidel. Jde o smykové zkoušky prováděné dle ČSN EN 302-1, při standardním postupu klimatizace vzorků na 20 °C a 65 % rovnovážné vlhkosti. Testovány byly dřeviny smrk a buk. Z lepidel kaseinové (CAS), polyvinylacetátové (PVAc), melamin-močovino formaldehydové (MUF), fenol-rezorcinol-formaldehydové (PRF) a polyuretanové (PUR). Nános o velikosti 200-300 g/m² a lisovací tlak 0,6 MPa byly použity dle doporučení výrobců lepidel. Tloušťka lepidlového filmu se pohybovala v rozmezí 60-80 μm. Posun čelisti zkušebního stroje byl 1mm/minutu a délka trvání zkoušky jednoho vzorku 90±30 vteřin.



Obr. 8 Smyková pevnost různých lepidel (Konnerth et al., 2006)

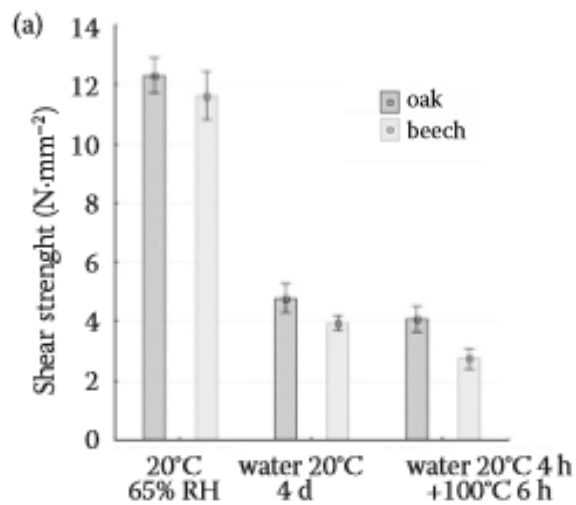
Výsledky smykové zkoušky vykazují minimální rozdíly pro danou dřevinu v závislosti na typu použitého lepidla. Většího rozdílu si můžeme všimnout u smrku v kombinaci s MUF lepidlem. Melamin-močovino formaldehydová lepidla jsou velmi tuhá, ale náchylná na vzniklá napětí podél lepeného spoje, což způsobuje pokles smykové pevnosti. Čím větší je rozdíl v modulu pružnosti dřeva a lepidla, tím je tento efekt pravděpodobnější. Pro buk (beech) se průměrné hodnoty pohybovaly kolem 10MPa a pro smrk (spruce) 7.5 MPa. Ve většině případů došlo k porušení ve dřevě, nikoli ve spoji, proto jsou smykové hodnoty u buku vyšší. (Konnerth et al., 2006)

3.4.9 Vliv vlhkosti na smykovou pevnost PUR lepidel

Degradace surového dřeva vodou je obecně známý fakt. Snížení mechanických vlastností lepeného spoje vlivem vlhkosti se to týká taktéž. Uvedený výzkum dokazuje snížení pevnosti lepidla v závislosti na typu prostředí, kterému jsou vzorky vystaveny.

Měření probíhalo za standardních podmínek dle norem ČSN EN 204, 205 a 322. Bylo použito polyuretanové lepidlo „Kleiberit 201.6“ o velikosti nánosu 120 g/m² a 2 dřeviny – buk a dub. První část vzorků byla vystavena 20 °C a 65 % vlhkosti po dobu 7 dní, druhá část vzorků byla ponořena 4 dny ve 20 °C vodní lázni a poté v prostředí o 20 °C a 65 % vlhkosti. Poslední skupina byla ponořena do vodní lázně po dobu 2 hodin s 20 °C, poté do vroucí vody 103±2 °C po dobu 6 hodin, a následovala

klimatizace v prostředí o 20 °C a 65 % vlhkosti. Vzorky byly testovány na pevnost v tahu na univerzálním trhacím stroji ZWICK Z050.



Obr. 9 Vliv prostředí na smykovou pevnost (Král et al., 2015)

Výsledek měření je takový, že vlivem vlhkosti je pevnost lepidlového spoje téměř 3x menší. Mohou to ovlivňovat tyto faktory:

- plasticita lepidla nebo částečná změna chemického složení, zejména při použití horké vody
- změkčení pojiva v kohezni zóně
- vznik napětí v sousední vrstvě vlivem bobtnání a sesychání

Polyuretanové lepidlo v kombinaci s dubem dosáhlo vždy vyšších výsledků, což mohlo to být způsobeno pórovitější strukturou dřeviny. Obecně mohou být PUR lepidla vhodnější pro dřeviny s kruhovitě pórovitou stavbou. (Král et al., 2015)

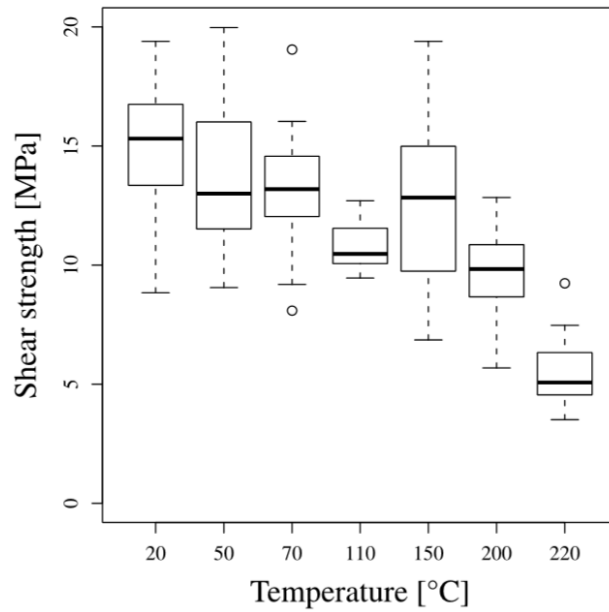
3.4.10 Vliv teploty

Tepeľná stabilita lepeného spoje je důležitým aspektem při výběru lepidla. Během jejich působení může docházet k různým teplotním výkyvům, jako je mráz, teplo nebo požár, které mohou značně ovlivnit např. strukturu, chemické složení či degradaci lepidla. Uvedený výzkum stanovuje vliv teploty na pevnost lepidlového spoje v tahu na smyk.

Lepeným podkladem byl pouze jeden druh dřeviny, a to buk lesní (*Fagus sylvatica*). Průměrná hustota při vlhkosti $w = 13 \pm 1$ % se pohybovala v rozmezí 756 ± 54 kg/m³. Úhel odklonu letokruhů od povrchu lepené plochy byl od 30-90°.

Použitým adhesivem byla 3 jednosložková polyuretanová lepidla od různých výrobců (název ani chemické složení není známo). Měření probíhalo za podobných podmínek, jako je uvedeno v kapitolách 3.4.6 a 3.4.7., pouze došlo k navýšení tlaku při lisování na 0,8 MPa, a navíc byly jednotlivé skupiny vzorků umístěny do sušárny po dobu 1 hodiny o teplotách 50, 70, 110, 150, 200 a 220 °C. Po „sušení“ byly vzorky vyhřáté nad 70 °C vloženy do plastových pytlů, aby nedošlo ke změně jejich vlhkosti. Místnost, kde byly vzorky testovány, nebyla nijak klimatizována, tudíž došlo ke snížení teploty a navýšení vlhkosti po vyjmutí ze sušárny. Po ukončení měření byly vzorky zváženy a byla stanovena jejich vlhkost dle ISO 3130 (1975).

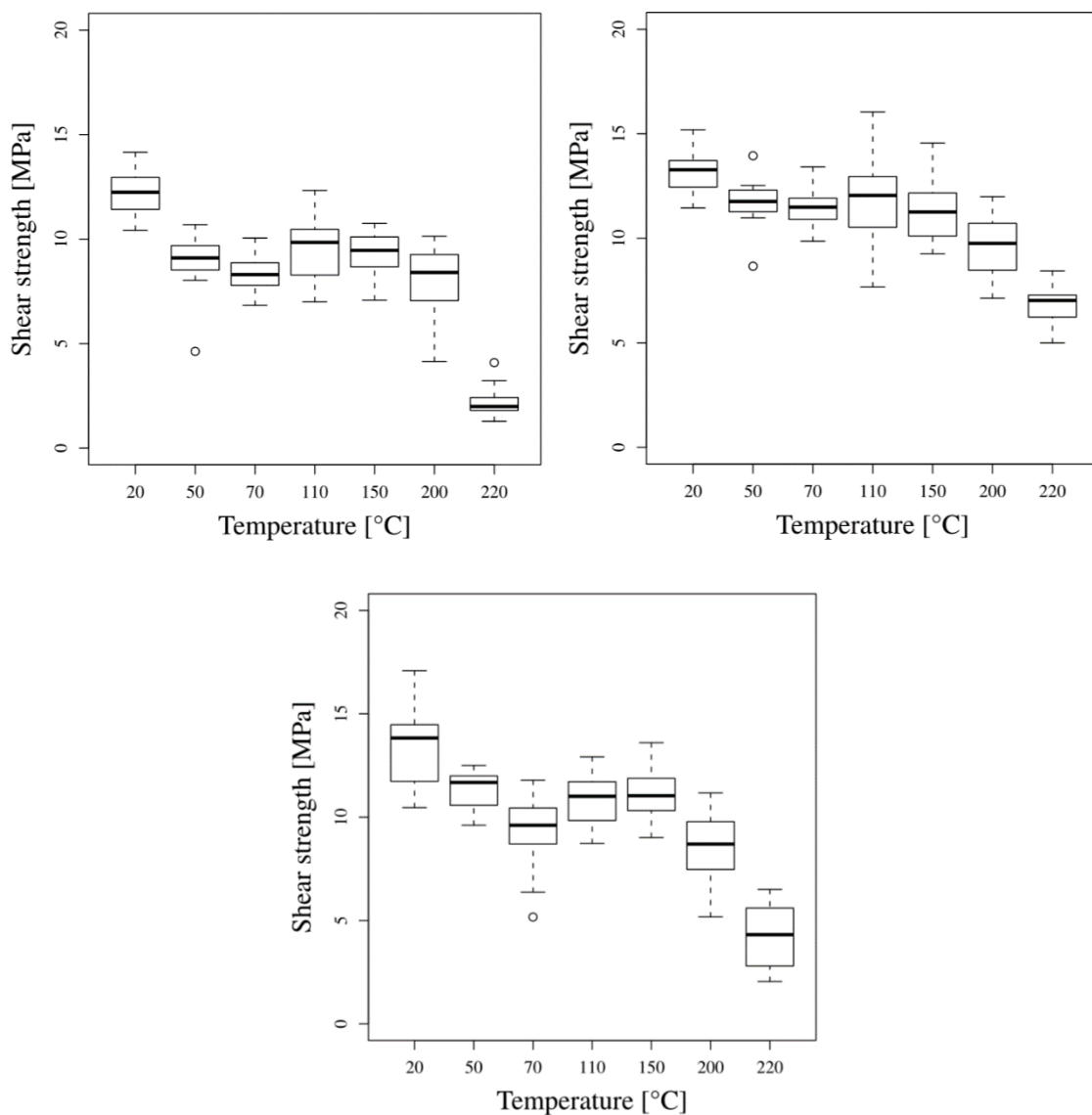
Vlivem rostoucí teploty klesá jak pevnost dřeva, tak i pevnost lepeného spoje. Dokazuje to obr. 7, kde značný pokles pevnosti dřeva nastává při 110 °C a v rozmezí teplot od 200-220 °C. Důvodem poklesu pevnosti při 110 °C je plasticita ligninu. Pokles stříhové pevnosti není tak razantní, protože lignin neplní ve dřevě funkci pevnostní, nýbrž mechanicky - ohybovou. Při teplotách nad 200 °C dochází k tzv. suché pyrolýze, kdy dochází k degradaci ligninu i celulózy, která plní funkci mechanicky - nosnou. Tento jev je pravděpodobně příčinou tak velkého poklesu pevnosti. Dalším z důvodů může být pokles pevnosti dřeva v závislosti na množství vlhkosti. Vzorky vystavené teplotě kolem 70 °C obsahovaly zhruba 12 % vlhkosti, vzorky nad 100 °C 0 % vlhkost.



Obr. 10 Vliv teploty na smykovou pevnost buku
(Clauß et al., 2011)

T [°C]	τ [MPa]				
		Beech	PUR 1	PUR 2	PUR 3
20	$\bar{\tau}$	14.96	12.15	13.17	13.35
	s_{τ}	3.54	1.02	1.05	1.98
50	$\bar{\tau}$	13.90	8.94	11.76	11.30
	s_{τ}	3.36	1.31	1.05	0.98
70	$\bar{\tau}$	13.17	8.34	11.45	9.38
	s_{τ}	2.73	0.98	0.94	1.77
110	$\bar{\tau}$	10.89	9.56	11.86	10.87
	s_{τ}	1.03	1.55	2.00	1.22
150	$\bar{\tau}$	12.71	9.31	11.33	11.12
	s_{τ}	3.77	1.06	1.40	1.28
200	$\bar{\tau}$	9.57	7.94	9.57	8.56
	s_{τ}	1.96	1.79	1.38	1.69
220	$\bar{\tau}$	5.56	2.19	6.87	4.22
	s_{τ}	1.46	0.78	0.89	1.53

Obr. 11 Vliv teploty na smykovou pevnost buku a PUR lepidel
(Clauß et al., 2011)



Obr. 12 Vliv teploty na různé druhy PUR lepidel
(Clauß et al., 2011)

Hodnoty smykové pevnosti pro 3 jednosložková PUR lepidla od různých výrobců v porovnání se smykovou pevností buku jsou si velmi podobné. Všechna lepidla pevnostně obstála. U lepidla PUR1 a PUR3 došlo ve větší části k porušení v lepeném spoji. Je to dáno jiným chemickým složením, a tím pádem i rozdílnou reaktivitou na teplotu. Lepidla se stala při vyšších teplotách plastičtější.

Teploty kolem 60 °C mají v praktickém využití význam (sluneční záření). Pokud jde o požár, bavíme se o stovkách až tisících stupních Celsia, které jsou pro dřevo a PUR lepidla nepřijatelné. (Clauß et al., 2011)

3.5 Vlastnosti (specifikace) použitých dřevin

Každá dřevina je specifická svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Při lepení různých dřevin je třeba znát vlastnosti nejen lepidla, ale i dřeva. Základní složkou je celulóza, hemicelulóza a lignin. Dále můžeme ve dřevě najít malé množství bílkovin, cukrů, anorganických solí a tuků, které mohou negativně či pozitivně ovlivnit kvalitu lepení. U jehličnatých dřevin se vyskytují pryskyřice a éterické oleje, u listnatých se objevují třísloviny. Problém může nastat např. u silně kyselých nebo zásaditých lepidel, která zdepolymerizují (rozklad složitějších látek na jednodušší) lehce hydrolyzovatelnou hemicelulózu a celulózu. Následkem je snížení pevnosti materiálu v okolí lepeného spoje. (Trávník, 2008)

3.5.1 Dub

Dub (*Quercus robur*) se řadí mezi středně tvrdá dřeva (68 MPa), do skupiny kruhovitě pórovitých. Díky velkému obsahu tříslovin je velmi trvanlivý. Jeho hustota v absolutně suchém stavu se pohybuje kolem 680 kg/m^3 , z čehož vyplývá i jeho velká pevnost. Dub je typický velkými makropóry (široké jarní cévy) a letními cévami v radiálních seskupeních ve tvaru písmene „V“ na příčném řezu. Výhodou je dobrá obrobitelnost. Naproti tomu stojí nevýhoda v náročné a dlouhé době sušení, kdy při nesprávném procesu sušení často dochází k trhlinám a borcení dřeva. Dřeň je velmi náchylná na napadení dřevokaznými škůdci, proto se dub při sušení zbavuje kůry a dřeňové části. V České republice se vyskytují převážně 2 druhy dubů – letní a zimní. (Šlezingerová a Gandelová, 2004)



Obr. 13 Dub – příčný řez

3.5.2 Buk

Bukové dřevo (*Fagus sylvatica*) je na našem území nejvíce zastoupenou dřevinou. Řadíme jej mezi středně těžká ($\rho_0 = 685 \text{ kg/m}^3$) a středně tvrdá dřeva (61 MPa). Je méně trvanlivé v porovnání s dubem, málo odolné vůči biotickým škůdcům (houby, hmyz) a špatně se suší (tvorba trhlin a borcení). Za to se dobře impregnuje, moří a paří. Je jednou z nejdůležitějších evropských dřevin, protože je vhodný k ohýbání – židle a křesla, výroba překližek, dých, DTD a DVD. Je typický a snadno rozpoznatelný podle mnohovrstevných 1-5 mm vysokých dřevových paprsků na tangenciálních řezu, na radiálním jsou značně viditelná zrcátka. (Šlezingerová a Gandelová, 2004)



Obr. 14 Buk – tangenciální řez

3.5.3 Modřín

Dřevo modřínu (*Larix decidua*) se považuje za jedno z nejkvalitnějších. Jeho použití je vhodné např. na vodní stavby, lodní stavby nebo v dřevařský průmyslu (okna, dveře, interiérové i exteriérové obklady). Zařazujeme jej mezi středně těžká ($\rho_0 = 560 \text{ kg/m}^3$) a středně tvrdá (43,5 MPa) dřeva. Typickým znakem příčného řezu je jasně viditelný rozdíl mezi jarním a letním dřevem. Modřín lze poznat podle radiálního řezu, kde pryskyřičné kanálky tvoří tmavší svislé pásy. Tangenciální řez je typický flekatým zbarvením. Výhodou je jeho trvanlivost, pevnost a odolnost, také se dobře suší (nebortí se), avšak hůře se impregnuje. (Šlezingerová a Gandelová, 2004)



Obr. 15 Modřín – příčný řez

3.5.4 Acetylovaná borovice

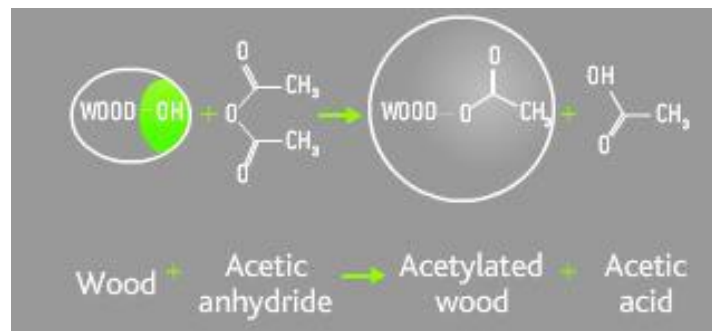
Výchozí surovinou pro výrobu tohoto modifikovaného materiálu je borovice *Radiata pine*. Nese obchodní název *Accoya wood*[®] nebo také *Titanwood*. Dřevina je chemicky upravena patentovanou technologií - acetylací. Díky nahrazení volných hydroxylových skupin za acetylovou se dřevo stane hydrofobní vůči vodě.



Obr. 16 *Accoya wood*

Nejméně vhodná jsou tedy lepidla vodouředitelná.

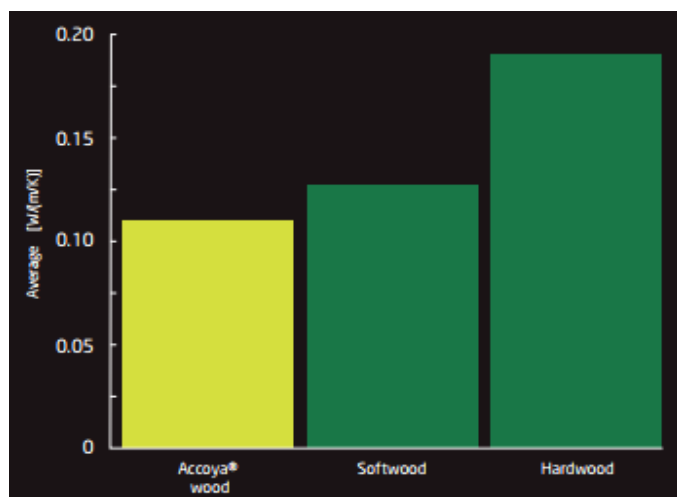
Při reakci lehce nabobtná a v nabobtnalém stavu trvale zůstane. Hustota materiálu se pohybuje kolem 510 kg/m³. Dále během reakce vznikají jako vedlejší produkty kyselina octová a anhydrid kyseliny octové, které je důležité z produktu odstranit. Děje se to při podtlaku (vakuu) a vhánění páry do prostředí se dřevem. V konečném produktu je obsah kyseliny octové méně než 1 %. Kvůli korozivním účinkům kyseliny octové, se doporučuje použití nerezových materiálů a spojů.



Obr. 17 *Chemická modifikace – acetylace*

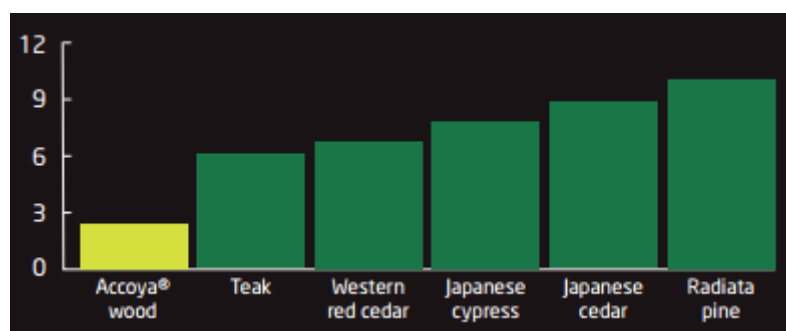
(zdroj: *Accoya-Performance-Brochure-English.pdf*)

Vyniká vysokou odolností, rozměrovou stálostí a díky chemické modifikaci je přívětivá k životnímu prostředí. Je prokázáno i zvýšení tvrdosti a pevnosti v ohybu. Za nejvhodnější lepidla se uvádí polyuretanová, izokyanátová a epoxidová. Výhodou je nízká tepelná vodivost λ v porovnání s měkkými a tvrdými dřevinami (s měkkými 17 %, s tvrdými až 40 %). Dále je to tvarová a rozměrová stálost (minimální seschnutí při vložení do laboratorní pece). Důkazem jsou následující grafy:



Obr. 18 Tepelná vodivost

(zdroj: Accoya-Performance-Brochure-English.pdf)



Obr. 19 Změna objemu (%)

(zdroj: Accoya-Performance-Brochure-English.pdf)

Malým, ale významným negativem může být samozhášivost tohoto materiálu. Podle americké normy se řadí až do kategorie Class C, což je v rozmezí od 76-200 nejvyšší stupeň šíření plamene. Čím vyšší číslo, tím je rychlost šíření plamene větší.

Dřevina	Index šíření plamene
Borovice pokroucená	93
Accoya®	95
Dub	100
Smrk sitka	100
Javor	104
Bříza	105
Topol	115

Nejhoršího samozhášivého efektu dosahují dřevotřískové desky o tloušťce 18mm. Index šíření plamene se blíží 200. (zdroj: Accoya-Performance-Brochure-English.pdf)

3.5.5 Smrk

Třetím z jehličnanů je dřevina smrk (*Picea abies*). Radíme jej mezi měkká (26 MPa) a lehká ($\rho_0 = 420 \text{ kg/m}^3$) dřeva. Je málo trvanlivý a neodolný vůči biotickým škůdcům, špatně se impregnuje. Výhodou je však dobrá obrobiteľnosť. Patří mezi nejužitkovější dřevinu na území ČR. Využití je rozmanité, od stavebně-konstrukčního materiálu, přes nábytkářský průmysl až po hudební nástroje. Obecně je smrkové dřevo světlé, žlutobílé a díky obsahu pryskyřice slabě voní. Na příčném řezu lze vidět méně zřetelný, pozvolný přechod mezi jarním a letním dřevem. (Šlezingerová a Gandelová, 2004)



Obr. 20 Smrk – příčný řez

3.6 Mechanické vlastnosti dřeva

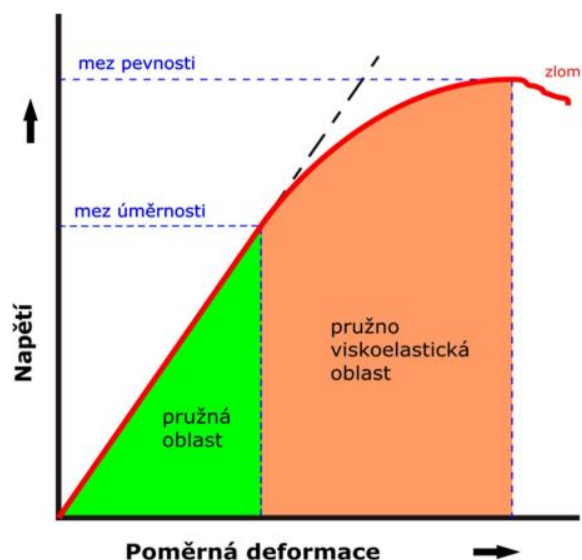
Pokud na materiál působíme jakoukoliv silou, vznikají deformace. Deformaci rozumíme jako změna tvaru či rozměru. Deformace lze dělit na:

- deformace pružné (elastické)
- deformace pružné v čase
- deformace plastické

3.6.1 Elastické deformace

Jejich průběh začíná od počátku zatížení. Pracovní diagram, viz Obr. 21, znázorňuje lineární část po mez úměrnosti, tj., oblast pružných vratných deformací, kdy po ukončení působení sil se těleso okamžitě vrací do původního tvaru. Dále existují deformace pružné v čase, kdy po ukončení působení sil se těleso vrací do původního tvaru s časovou prodlevou.

Mez úměrnosti u listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva se uvádí 70 % a u jehličnatých dřevin 80 % z meze pevnosti. (Gandelová a kol. 2009)



Obr. 21 Pracovní diagram při tahu ve směru vláken
 (zdroj: <http://www.ohybacidrevo.cz/vlastnosti/vybrane-vlastnosti-dreva>
 [citováno: 21. 1. 2016])

3.6.2 Plastické deformace

Pokud napětí překročí mez úměrnosti, dostáváme se do oblasti plastických deformací. Tyto změny jsou trvalé a nevratné. Zvýšením napětí se blížíme k limitnímu bodu – mezi pevnosti. Po překročení této hranice nastává zlom.

3.6.3 Modul pružnosti

Definice pro modul pružnosti chápeme jako vnitřní odpor materiálu vůči pružným deformacím. Čím větší je modul pružnosti, tím větší sílu (napětí) musíme vyvinout pro vznik deformací. Pro naše domácí dřeviny se uvádí hodnota modulu pružnosti v tahu ve směru vláken 10000 – 15000 MPa při vlhkosti 12 %. (Gandelová a kol., 2009)

3.6.4 Tah ve směru vláken

V porovnání s ostatními druhy namáhání, nabývá dřevo největších hodnot napětí při zatížení v tahu ve směru vláken. Je to způsobeno vláknitým tvarem buněk

a strukturou buněčných stěn (letní tracheidy a libriformní vlákna dodávají dřevu mechanickou funkci). Tyto elementy mají zdřevnatělou buněčnou stěnu, kterou tvoří z více jak 50 % makromolekulární celulóza s rovnoběžnou orientací s podélnou osou buněk. Tahová pevnost je dána silou kovalentních vazeb, která je ale redukována přítomností dřeňových paprsků. Největší podíl na pevnosti má odklon vláken v S2 vrstvě. Pro tuzemské dřeviny jsou hodnoty pevnosti v tahu ve směru vláken 120 – 130 MPa. (Gandelová a kol. 2009).

Tab. 2 Mez pevnosti (τ_p), modul pružnosti (E), hustota (ρ) a mez úměrnosti (τ_u) v tahu podél vláken (Matovič, 1993, vlastní zdroj)

Druh dřeva w = 12 %	τ_p (MPa)	E (MPa)	ρ (kg/m ³)	τ_u (MPa)
modřín	125	-	600	75
buk	123	15 750	720	69
dub	109	21 370	725	81
smrk	84	15 980	450	55

3.6.5 Smyk

Kvůli anizotropní stavbě dřeva je smyková pevnost ve všech třech základních směrech rozdílná. Stanovení smykové hodnoty ve dřevě je obtížné, protože čistý jednosměrný smyk se bez spolupůsobení jiných napětí nevyskytuje. Při tomto zatížení působí ještě tahová, nebo tlaková napětí, a je důležité respektovat případy, kdy má smyk rozhodující vliv. Při smyku v příčné rovině se porušují kovalentní vazby, v podélné rovině se porušují vodíkové můstky. Smyk se v podélné rovině chová jako tlak v příčné rovině. (Horáček, 2009)

Pro naše dřeviny se modul pružnosti ve smyku pohybuje v rozpětí 100 - 2 000 MPa a mez pevnosti 10-12 MPa při vlhkosti 12 %. Hodnota smykové pevnosti je poměrně malá, i když je často dřevina tímto způsobem namáhána (např. spoje).

Tab. 3 Mez pevnosti (τ_p), modul pružnosti (E), hustota (ρ) a mez úměrnosti (τ_u) ve smyku podél vláken v radiální rovině (Matovič, 1993)

Druh dřeva w = 12 %	τ_p	E	ρ	τ_u
	(MPa)	(MPa)	(kg.m-3)	(MPa)
modřín	9,9	-	600	7,9
buk	11,6	-	720	9,3
dub	10,2	-	751	8,2
smrk	6,9	1 230	468	5,8

4 Materiál a metodika

4.1 Příprava vzorků

Vzorky byly před provedením zkoušky klimatizovány na 20 ± 2 °C a 65 ± 5 % relativní vlhkosti vzduchu po dobu 7 dní v klimatické komoře dle normy ČSN EN 204. Příprava vzorků před samotným zkoušením probíhala v dílnách školy.

4.1.1 Použité kombinace dřevin a lepidel

Testovanými dřevinami byl buk, dub, modřín, acetylovaná borovice a smrk. Z lepidel to byla 3 polyuretanová – KESTOPUR 1010 a 1050 a XILOBOND T30.

Vzniklé kombinace lepených materiálů:

- dub/dub
- buk/buk
- acetylovaná borovice/smrk
- modřín/modřín

Každá z uvedených kombinací dřevin byla lepená všemi typy lepidel, tzn. že např. dub/dub byl lepen KESTOPUR 1010,1050 i XILOBOND T30.

4.1.2 Egalizace, řezání

Surové hranoly dřeva byly opracovány z bočních stran na jednostranné srovnávací frézce a čela byla zařezána do hladka na formátovací pile. Po vyrovnání ploch

následovalo řezání každého hranolu na 7-8 mm tlusté latě na formátovací pile, záleželo na šířce hranolu, bylo totiž nutné zajistit sudý počet latí. Konečnou fází opracování byla tloušťková egalizace na protahovací oboustranné fréze na konečný rozměr 5 mm, tzn. celkový úběr z obou stran činil 1 mm, kdy protah probíhal 2x po 0,5 mm.

4.1.3 Lepení

Nanášení lepidla probíhalo při pokojové teplotě manuálně – štětcem pouze z jedné strany lepené plochy. Velikost nánosu pro všechny kombinace dřevin byla 200 g/m². Díky krátké otevřené době lepidla (10-15 minut) a rychlé polymeraci s podkladem o vlhkosti 12±2 %, bylo potřeba nános urychlit a ihned vložit do lisu. Viskozitu lepidel nebylo třeba nijak upravovat, po nánosu se vytvořil hladký, rovnoměrný film. Přebytek nevytvrzeného lepidla po stranách materiálu byl odstraněn.

4.1.4 Lisování

Lisování probíhalo na jednoetážovém lisu. Lepené materiály byly lisovány pod tlakem 0,9 MPa po dobu 24 hodin při pokojové teplotě cca 19-21 °C (plotny lisu nebyly nijak předehřívány). Po lisování bylo nutné zkontrolovat kvalitu lepeného spoje. Nekvalitní spoj šel poznat velmi lehce. Mezi materiály se vytvořila drobná spára, která obsahovala vzduchové kapsy, a tím znehodnocovala pevnost spoje. Takovéto vzorky byly vyřazeny.

4.1.5 Formátování a rozměry tělísek

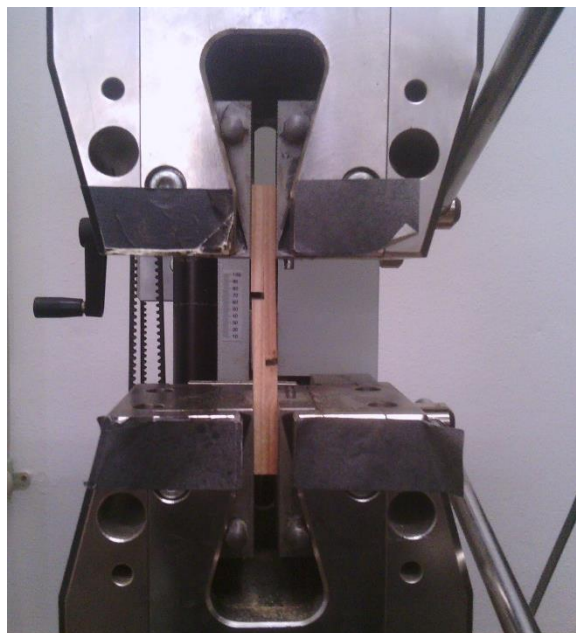
Konečnou fází bylo nařezání vzorků na formátovací pile na velikost vhodnou pro experimentální zkoušky. Rozměry zkušebního tělíska byly následující: délka × šířka × tloušťka – 150×20×10 (mm). Ve vzdálenosti 70 mm od kraje byla na obou plochách vyřezána drážka na tloušťku pilového kotouče. Hloubka drážky byla polovina tloušťky experimentálního tělíska.



Obr. 22 Neporušený vzorek zkušebního tělíska Kestopur 1010 DB/DB

4.2 Průběh měření

Na počátku měření jsme upnuli vzorek do čelistí stroje asi 20 mm od kratší hrany. Nejpřesnějšího měření jsme dosáhli tehdy, kdy plochy vzorku uchycené v čelistech byly na obou koncích souměrné. Spodní část stroje byla statická, horní dynamická. První část elastických deformací plynule přecházela v plastické deformace, kdy docházelo ve dřevě k praskání. Měření bylo ukončeno, jakmile stroj senzoričky zaznamenal nulový odpor nebo skokový posun čelisti.



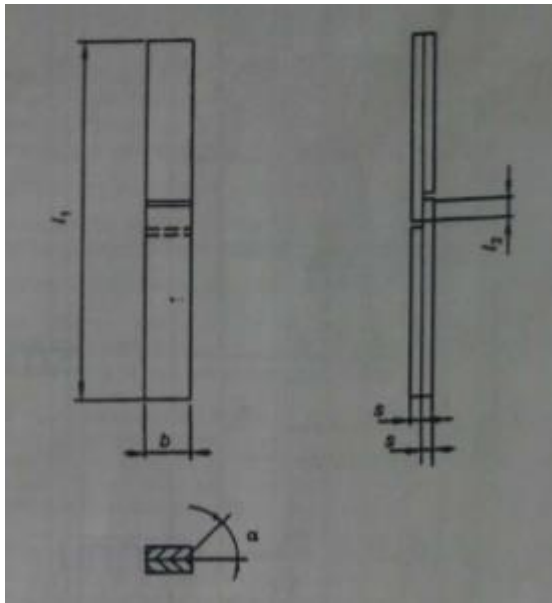
Obr. 23 Upevněný vzorek v čelistech

4.2.1 Zkušební trhací stroj

Měření probíhalo ve zkušebním ústavu v Útěchově u Brna. Vzorky byly testovány na univerzálním zkušebním trhacím stroji značky Zwick typu Z050. Stroj je díky vyměnitelným čelistem určen k testování materiálů na tlak, tah, ohyb a smyk. Maximální zkušební síla je 50 kN a pohyb čelistí je regulovatelný od 0,001 – 500 mm/min. Stroj a měřicí program jsou vzájemně propojeny. Dále bylo připojeno elektronické posuvné měřítko *Mitutoyo 150 mm + DMX USB* s digitálním výstupem připojitelným do portu USB. Díky posuvnému měřítku bylo možné rychle a přesně měřit smykové plochy tělíska pro pozdější výpočet pevnosti.

4.2.2 Smyková zkouška tahem dle ČSN EN 205

Norma se vztahuje pouze na lepidla pro nekonstrukční díly (překližky, dřevotřísky a vláknité desky). Popisuje hodnocení lepidel určených k lepení dřeva nebo dřevěných materiálů vzhledem k jejich resistenci vůči různým fyzikálním vlivům. Tyto metody jsou vhodné k zařazení lepidel do kategorií odolnosti vůči vodě D1 až D4. Dále k určení použitelnosti a jakosti lepidla na dřevo a dřevní materiály, k posouzení pevnosti a lepivosti lepidla vůči podkladu.



Obr. 24 Schéma slepeného zkušebního vzorku

Výpočet smykové pevnosti τ :

$$\tau = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{l_2 * b} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

kde: F_{max} = maximální působící síla [N]

A = měřená lepená plocha [mm²]

l_2 = délka měřené lepené plochy [mm]

b = šířka měřené lepené plochy [mm]

$l_1 = 150 \pm 5$ mm

$b = 20 \pm 0,2$ mm

$l_2 = 10 \pm 0,2$ mm

$s = 5 \pm 0,1$ mm

$\alpha = 30 - 90^\circ$

4.3 Výsledky a vyhodnocení

Doba měření tělísek složených z různých kombinací materiálů a lepidel byla variabilní. Měření trvalo od 20 po 100 vteřin. U většiny vzorků byla lepená spára po ukončení zkoušky zcela rozlomena. Nastaly i situace, kdy se na první pohled zdál být spoj kvalitní, neporušený a pevný. Jakmile se ale vzorek upevnil do čelistí stroje, okamžitě došlo k porušení spoje a měření tak bylo neplatné.

Nejllepších výsledků dosahovala kombinace dřevin buk/buk s lepidlem Kestopur 1050 s průměrnou hodnotou pevnosti 16,07 MPa. Touto hodnotou jsme překročili mez pevnosti buku při namáhání na smyk.

ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY SOUBORU – PRVNÍ MĚŘENÍ

Tab. 4,5 Statistika pevností prvního a druhého měření

	K-1010 BK	K-1050 BK	K-1010 MD	K-1050 MD
Počet platných	50	50	50	50
Průměr	13.41	16.07	8.63	8.16
Medián	14.90	16.50	8.70	8.47
Minimum	0	11.81	5.32	0
Maximum	19.91	18.69	11.75	11.61
Rozpětí	19.91	6.88	6.43	11.61
Rozptyl	19.16	2.52	2.17	3.84
Sm.odch.	4.37	1.58	1.47	1.96
Var.koef.	32.63	9.88	17.07	24.02
Šikmost	-1.32	-0.97	-0.35	-1.49
Špičatost	1.87	0.97	-0.05	4.95

ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY SOUBORU – DRUHÉ MĚŘENÍ

	K-1010 BK	K-1050 BK	X-T30 BK	K-1010 MD	K-1050 MD	X-T30 MD
Počet platných	50	50	50	50	50	50
Průměr	5,70	7,76	6,42	4,31	3,93	3,54
Medián	6,58	7,85	7,20	4,31	3,82	3,98
Minimum	0,64	2,45	2,26	2,58	0,83	0,78
Maximum	9,44	11,92	8,97	6,54	6,30	5,03
Rozpětí	8,80	9,47	6,71	3,96	5,47	4,25
Rozptyl	6,91	3,52	4,63	0,89	2,12	1,74
Sm.odch.	2,63	1,88	2,15	0,94	1,46	1,32
Var.koef.	0,46	0,24	0,33	0,22	0,37	0,37
Šikmost	-0,67	-0,50	-0,66	0,17	-0,27	-0,90
Špičatost	-0,75	1,40	-0,78	-0,41	-0,75	-0,38

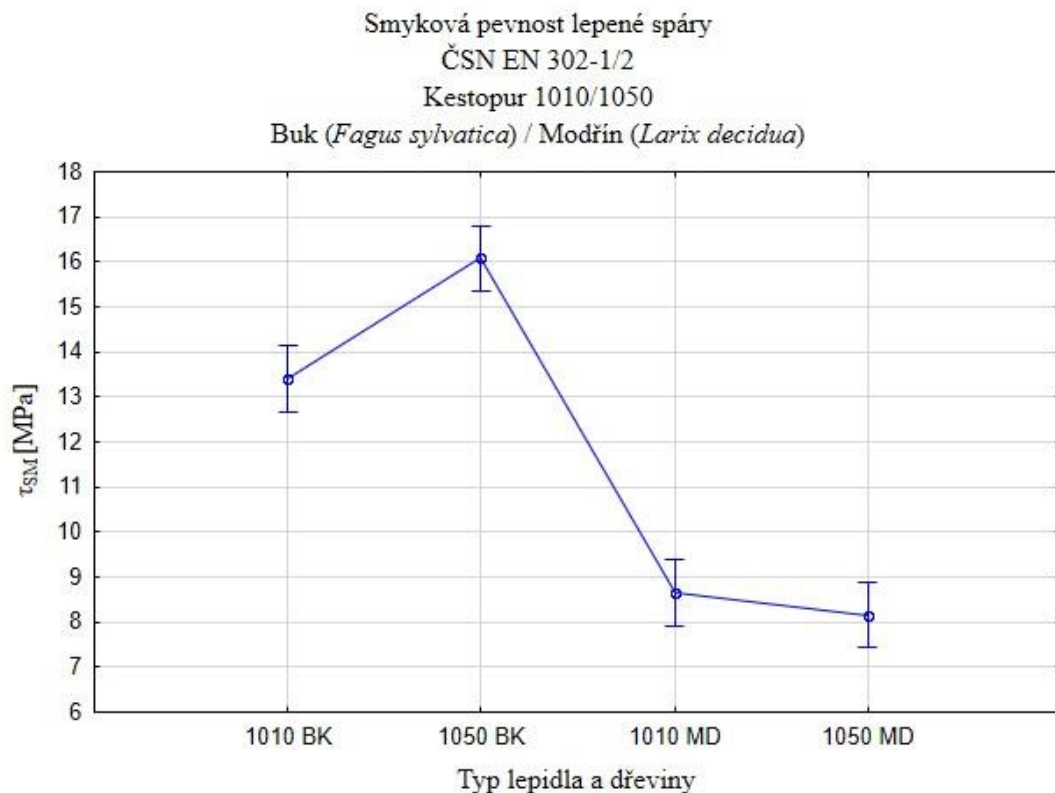
	K-1010 AC/SM	K-1050 AC/SM	X-T30 AC/SM	K-1010 DB	K-1050 DB	X-T30 DB
Počet platných	50	50	50	50	50	50
Průměr	2,60	3,41	3,04	3,70	5,22	5,01
Medián	2,24	3,45	3,20	4,11	5,34	4,94
Minimum	0,01	1,10	1,31	0,70	2,46	3,37
Maximum	5,34	5,37	4,99	6,22	6,68	6,58
Rozpětí	5,33	4,27	3,68	5,52	4,22	3,21
Rozptyl	1,80	0,97	1,05	2,43	0,89	0,96
Sm.odch.	1,34	0,99	1,02	1,56	0,94	0,98
Var.koef.	0,52	0,29	0,34	0,42	0,18	0,20
Šikmost	0,52	-0,39	-0,13	-0,26	-1,18	-0,05
Špičatost	-0,41	0,54	-0,75	-1,04	1,99	-0,87

Hodnoty prvního a druhé měření jsou dosti odlišné. Tento pokles pravděpodobně zapříčinila předčasná polymerace lepidla během nanášení nebo při skladování. Během skladování se do uzavřené nádoby dostalo malé množství vzduchu, které v reakci s kyslíkem začalo polymerovat. Zesíťování (polymerace) je proces, kdy se z malých molekul (monomerů) vlivem působení kyslíku stávají větší molekuly (makromolekuly). Tento děj ovlivňuje jednak rozliv lepidla při nanášení, ale hlavně jeho fyzikální a mechanické vlastnosti změnou chemického složení monomerů. U polyuretanů je to převážně polyadiční reakce, kdy nevzniká žádný štěpný produkt, pouze jde o přemístění vodíku. Těmto problému můžeme předcházet následujícími způsoby:

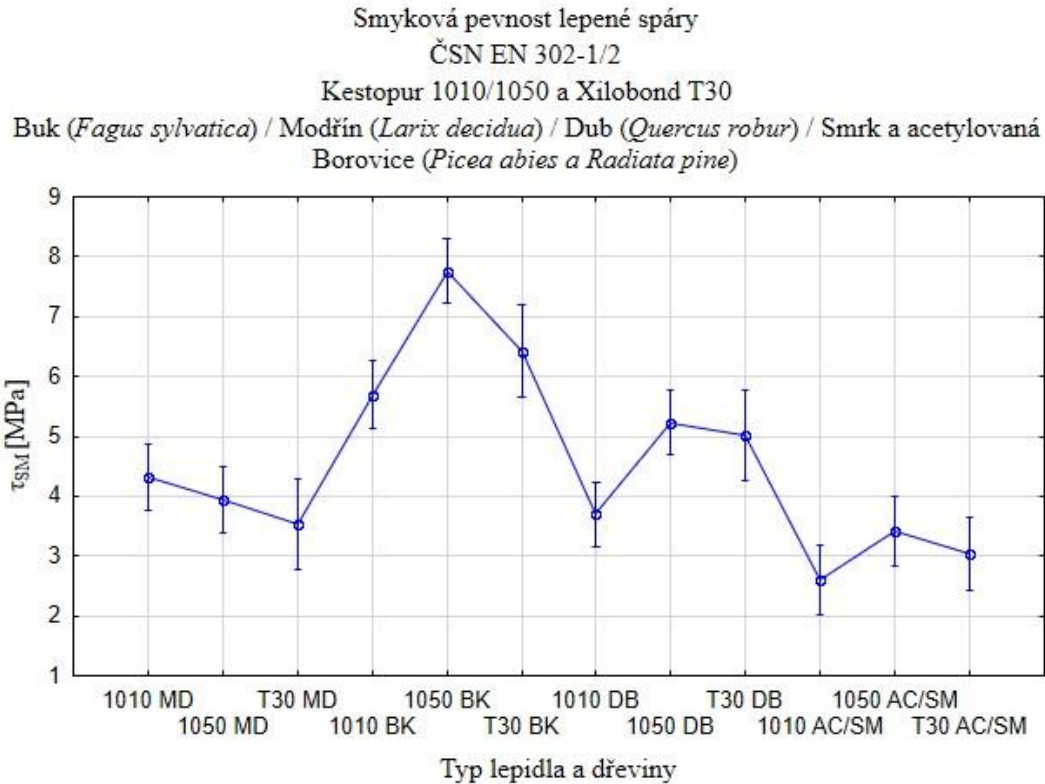
- včasné spotřebování lepidlové směsi
- použití retardérů, které zabraňují předčasnému vytvrzení (přidávají se v množství 0,5-1% z celkového objemu lepidla)
- umístění nádoby s lepidlem na vhodné skladovací místo dle doporučení výrobce
- vytvoření částečného vakua v nádobě s lepidlem spolu s hermetickým uzavřením

4.3.1 Grafická znázornění výsledků

Grafická znázornění výsledků jsou pouze obdobou předchozích tabulek (viz tab. 4,5) a jsou pořízena z programu STATISTICA12. V obou případech měření jsme největší smykové pevnosti dosáhli u lepidla typu Kestopur 1050 a dřeviny buku. Maximální hodnoty dosahovaly téměř 19 MPa. Velmi dobrých výsledků dosáhl taktéž buk, ale v kombinaci s lepidlem Kestopur 1010.



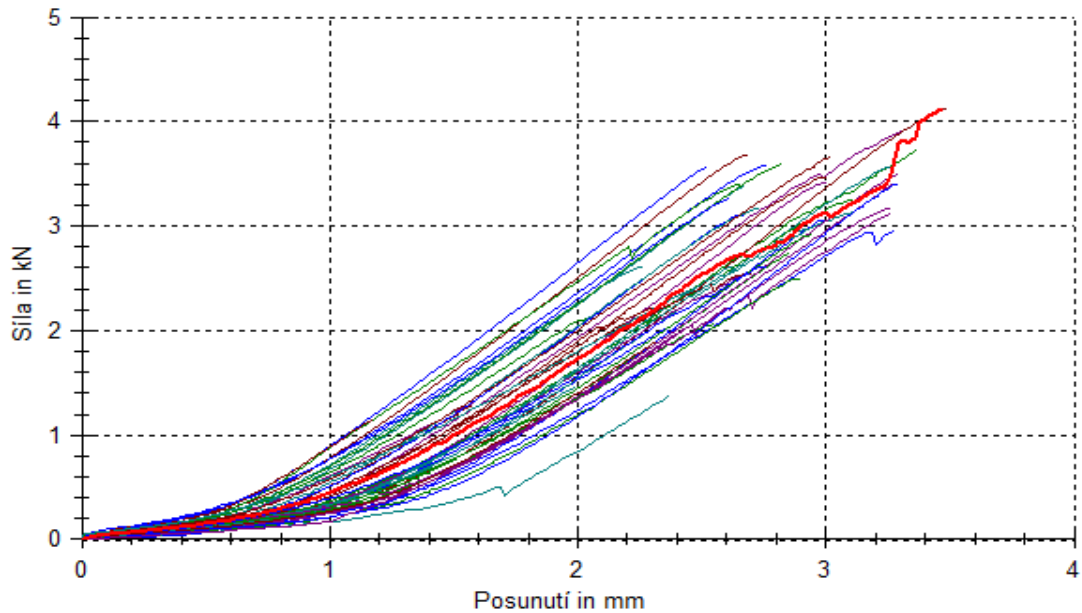
Obr. 25 ANOVA – Výsledky smykových pevností druhého měření



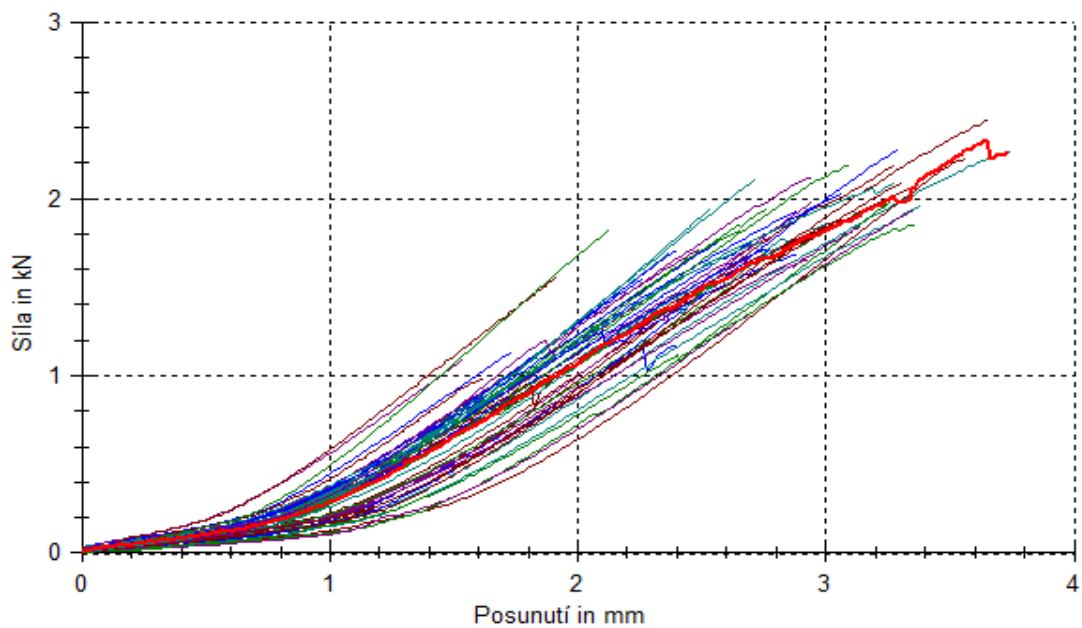
Obr. 26 ANOVA – Výsledky smykových pevností druhého měření

4.3.2 Program pro záznam měření

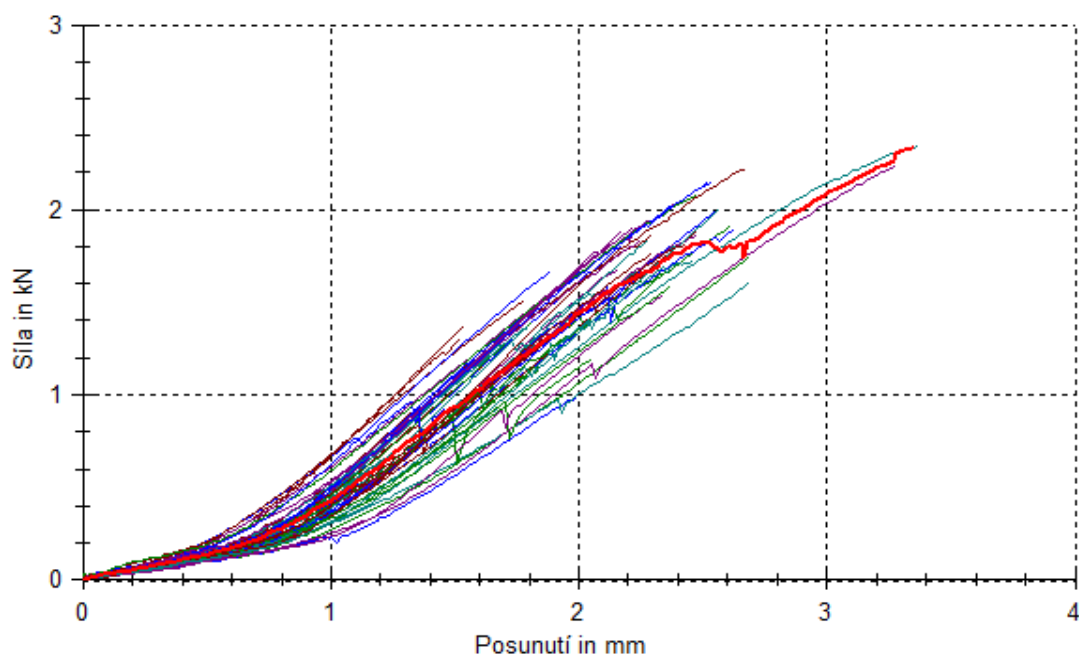
Program pro záznam dat TestXpert V11.02 od společnosti Zwick/Roell byl vzájemně propojen se zkušebním trhacím strojem. Program monitoroval průběh testování tělísek po celou dobu trvání až po konečné porušení lepené spáry.



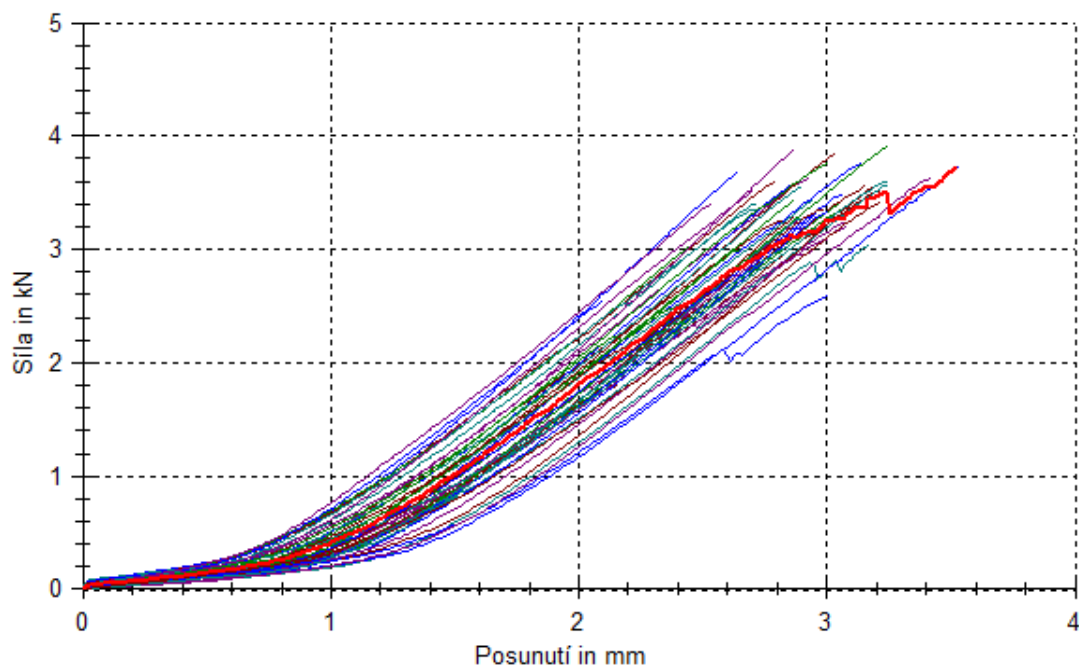
Obr. 27 Pracovní diagram BK – Kestopur 1010



Obr. 28 Pracovní diagram BK – Kestopur 1050



Obr. 29 Pracovní diagram MD – Kestopur 1010



Obr. 30 Pracovní diagram MD – Kestopur 1050

Pracovní diagramy prvního měření znázorňují průběh deformace v závislosti na tahové síle. Výrazná křivka je průměrná hodnota. Hodnoty posunutí nerostou lineárně v celém průběhu, protože dřevo je do jisté míry schopno elastické deformace absorbovat. Tyto deformace jsou vratné. Místo, kde přímka přechází v křivku, se nazývá mez úměrnosti. Od tohoto bodu a výš jde o plastické deformace. Hodnoty tahové síly dosahovaly u BK – Kestopur 1010 4 kN, což je téměř 400 kg.

4.3.3 Porušení lepeného spoje



Obr. 31 Ukončení zkoušky, lom tělíska

Po ukončení zkoušky se horní dynamická čelist vracela do původního stavu. Vzorek byl buď zcela rozlomený, nebo jen částečně. Po vyjmutí z čelistí se zapsal údaj o porušení ve spoji nebo ve dřevě. Následující tabulky znázorňují statistiku porušení.

Tab. 5 Statistika porušení MD/MD

MODŘÍN/MODŘÍN				
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
32	1010	6	10	16
28	1050	13	6	9
16	T30	9	3	4
		28	19	29
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
32	1010	18,75	31,25	50,00
28	1050	46,43	21,43	32,14
16	T30	56,25	18,75	25,00

Tab. 6 Statistika porušení AC/SM

Acetylovaná borovice/SMRK				
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
24	1010	19	3	2
28	1050	10	4	14
26	T30	12	3	11
		41	10	27
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
24	1010	79,17	12,50	8,33
28	1050	35,71	14,29	50,00
26	T30	46,15	11,54	42,31

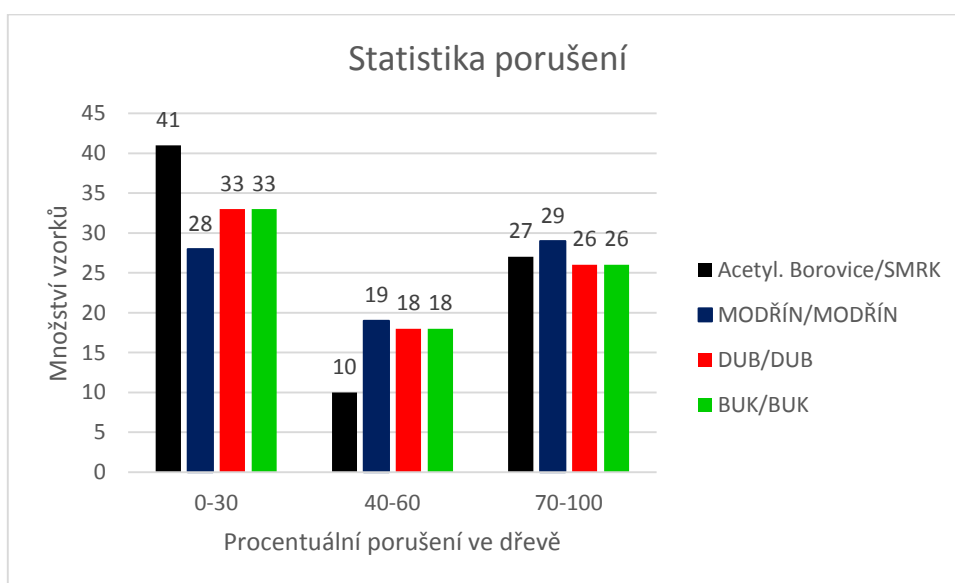
Tab. 7 Statistika porušení BK/BK

BUK/BUK				
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
28	1010	13	8	7
32	1050	10	6	16
17	T30	10	4	3
		33	18	26
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
28	1010	46,43	28,57	25,00
32	1050	31,25	18,75	50,00
17	T30	58,82	23,53	17,65

Tab. 8 Statistika porušení DB/DB

DUB/DUB				
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
31	1010	16	3	12
32	1050	7	4	21
16	T30	7	3	6
		30	10	39
Počet vzorků	Typ lepidla	0-30	40-60	70-100
31	1010	51,61	9,68	38,71
32	1050	21,88	12,50	65,63
16	T30	43,75	18,75	37,50

Horní polovina tabulky udává množství porušených vzorků. Spodní část je procentuální znázornění porušení. Buňky „0-30, 40-60 a 70-100“ chápeme jako procentuální vyjádření porušení ve dřevě. Např. 51,61 % dubových vzorků lepených Kestopor 1010 bylo poškozeno v lepidlové vrstvě. Můžeme konstatovat, že jde o méně pevný spoj. Buňku „70-100“ berme jako nejvyšší možné porušení ve dřevě, kdy lepená spára překonala pevnost dřeva. V tomto případě spoj vyhověl.



Obr. 32 Statistické vyhodnocení porušení

Graf znázorňuje množství vzorků porušených ve dřevě či v lepidle. Výsledné hodnoty jsou součtem všech vzorků v daném procentuálním porušení pro všechna lepidla. Můžeme vidět, že nejvíce vzorků porušených ve spoji nastalo u acetylované borovice. Z toho vyplývá, že spoj byl nedostatečně pevný a málo kvalitní. Vysvětlením může být nedostačující nános, nevhodné lepidlo či předčasná polymerace. Naopak lepený spoj u dřevin modřín/modřín se potvrdil jako dostatečně pevný, kdy došlo k porušení v dřevní substanci.

4.3.4 Závislost pevnosti na hustotě

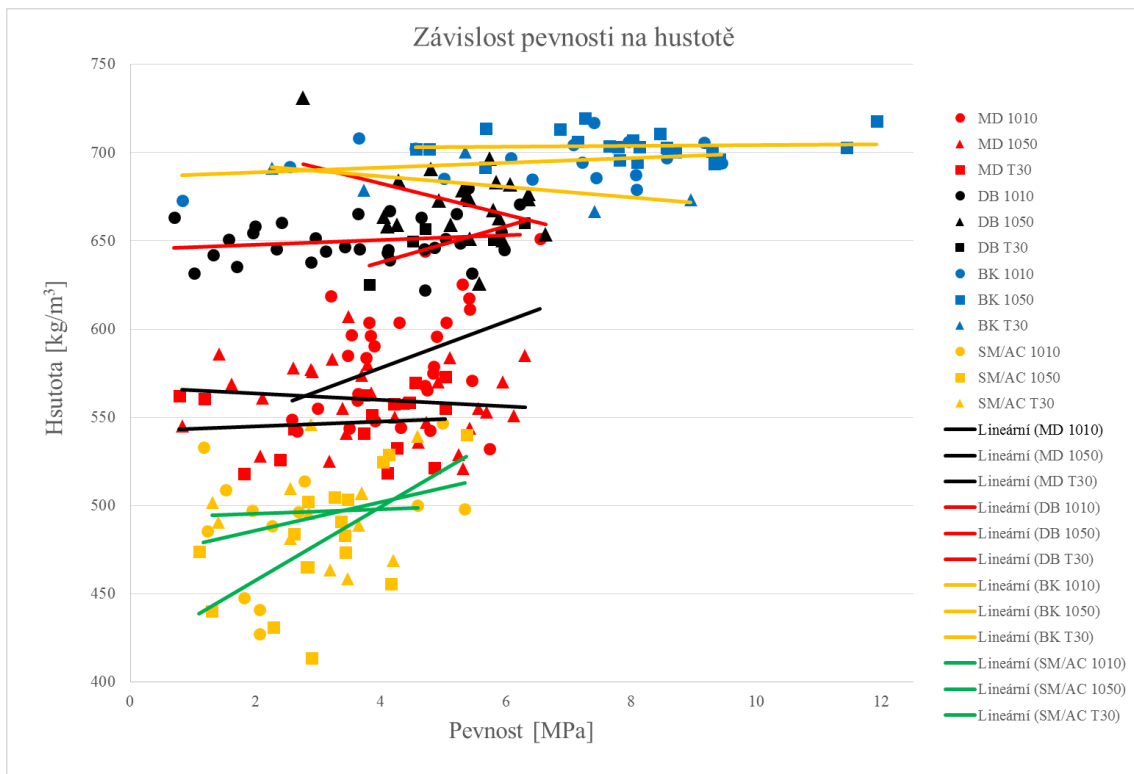
Každý vzorek byl zvážen a změřen, proto byl následný výpočet průměrné hustoty snadný.

Tab. 9 Statistika průměrné hmotnosti a hustoty

	1010 BK	1050 BK	T30 BK	1010 MD	1050 MD	T30 MD
Ø hmotnost vzorků (g)	20,94	21,10	20,44	17,42	16,80	16,41
Počet vzorků	29	32	16	32	30	16
Průměr (kg/m ³)	698	703	681	581	560	547
Medián	697	703	687	577	560	553
Minimum	673	685	657	532	521	518
Maximum	719	720	700	651	607	573
Rozpětí	46	35	44	119	86	55
Rozptyl	134,25	74,25	207,72	956,06	430,10	324,13
Sm.odch.	11,59	8,62	14,41	30,92	20,74	18,00
Var.koef.	0,017	0,012	0,021	0,053	0,037	0,033

	1010 AC	1050 AC	T30 AC	1010 DB	1050 DB	T30 DB
Ø hmotnost vzorků (g)	14,64	14,42	15,05	19,50	19,50	20,02
Počet vzorků	24	28	27	31	32	16
Průměr	488	481	502	650	667	653
Medián	492	477	501	647	666	655
Minimum	427	413	446	622	626	625
Maximum	547	540	587	680	731	668
Rozpětí	119	127	141	58	105	43
Rozptyl	1071,23	871,08	1392,43	157,32	365,12	101,32
Sm.odch.	32,73	29,51	37,32	12,54	19,11	10,07
Var.koef.	0,067	0,061	0,074	0,019	0,029	0,015

Z tabulek lze vyčíst, že u modřínu a smrku/acetylované borovice je velký rozptyl v hustotních hodnotách (SM/AC – minimum 413, maximum 587 kg/m³), za to hodnoty pevnosti se drží v oblasti od cca 0,9 – 6 MPa. Větší rozdíly pevnosti jsou patrné u bukového dřeva. Tyto extrémy mohly být způsobeny špatnou adhezí lepidla na podklad, předčasnou polymerací lepidla, větším odklonem letokruhů (>30°), na kterém velmi záleží pevnost dřeva, či drobnými vadami ve dřevě (suky, trhlínky). Jak už bylo poznamenáno v předcházejících kapitolách, nejlepších výsledků dosahovala kombinace dřevin buk/buk s lepidel Kestopur 1050, dokazují to hodnoty na Obr. 32.



Obr. 33 Závislost pevnosti na hustotě

4.4 Diskuze

Tématem pevnosti lepených spojů se zabývalo už mnoho prací. Tento výzkum byl specifický v tom, že se navíc zabýval chováním acetylované borovice v kombinaci s jinou dřevinou. Dá se říci, že tahle práce je jedna z prvních, která zkoumá smykové namáhání lepeného spoje této dřeviny. V oblasti tohoto dřeva s obchodním názvem Accoya® nejsou dostupné žádné tuzemské ani zahraniční články, které by se zabíraly danou problematikou. Mnohé publikace popisují pouze její benefity, využití, které je převážně v exteriéru (okna, pergoly, mosty, domy), nebo odolnost vůči biotickým škůdcům, chemickým látkám a vodě. Prozatím se většinou používá v severských zemích, tj. Norsko, Švédsko a Finsko. Obchodní název Accoya® a všechny zařízení, které disponují touto technologií, jsou majetkem společnosti Titan Wood sídlící ve Velké Británii.

Konnerth et al. (2006) uvádí pevnost lepeného spoje pro různá lepidla a dřeviny. Toto porovnání se bude vztahovat pouze na polyuretanová lepidla, která jsou předmětem práce. Pevnost spoje u smrku dosahovala 7,5 MPa a u buku zhruba 10 MPa. Námi naměřené hodnoty dosahovaly u kombinace smrk/acetylovaná borovice a lepidlo Kestopur 1050 pouze 3,41 MPa. Jasným důvodem není statistika porušení, protože vzorky porušené ve dřevě a ve spoji jsou zhruba v poměru 1:1. Nelze tedy jednoznačně říci, jestli v experimentu neuspěla dřevina či lepidlo. Velkou pravděpodobností naměření takto nízké hodnoty, je degradace lepidla při skladování. Naopak u buku při našem měření došlo k nárůstu až na 16,1 MPa, což je o 6,1 MPa více než uvádí Konnerth et al. (2006). Důvodem mohl být vyšší lisovací tlak, odklon letokruhů ($< 30^\circ$) či jiné chemické složení lepidla, které ovlivnilo pevnost spoje. Na trhu je spousta druhů PUR lepidel, která vynikají různými vlastnostmi (např. chemická a tepelná odolnost) na úkor vlastností jiných (např. adheze a koheze).

První část měření, viz Obr. 29, dopadla dle výsledků mnohem lépe, než měření druhé, viz Obr. 30, přestože vzorky druhého měření byly řezány, lepeny, lisovány a namáhány stejným způsobem, jako vzorky prvního měření. Rozdílnost výsledků mohla být způsobena kvalitou dřeviny, tzn. možností výskytu vad, suků, pryskyřice, vnitřních trhlin aj. Dalším z důvodů mohla být předčasná polymerace lepidla před vložením do lisu či nepravidelný nános. Eliminovat tyto nedostatky lze např. při nanášení lepidla stříkáním, kdy zajistíme rovnoměrný a rychlý nános. Dále hrálo velkou roli i stáří lepidla, kdy výrobce uvádí dobu skladování asi 3 měsíce při pokojové teplotě.

První část měření probíhala cca 2-3 týdny od výroby lepidel, tedy jakost lepidla byla ještě dost vysoká. Měření druhé bylo asi o 2 měsíce později, tedy necelé 3 měsíce od výroby lepidla. Stáří lepidla se mohlo velmi významně projevit na kvalitě spoje.

Vedlejší roli hrála také hustota dřeviny, která ovlivňovala modul pružnosti a pevnost zkušebního tělíska. Rozptýl hodnot u všech dřevin krom dubu byl značný. Nejrozumnějším vysvětlením velkého rozdílu hodnot dané dřeviny je anizotropie. Tím, že je dřevo anizotropního charakteru, v různých směrech (místech) dřeviny jsou vlastnosti odlišné. Dá se tedy předpokládat, že žádný z měřených vzorků stejné dřeviny nebyl zcela shodný s ostatními. Toto vysvětlení lze považovat za významné, protože žádná z nadcházejících hodnot nedominovala nad ostatními. Zhruba 44 % zkušebních vzorků bylo porušeno ve spoji, 35% porušení nastalo v dřevní substanci a u zbylých 21 % vzorků nelze stanovit jasné porušení ve dřevě či spoji. Konkrétní data porušení pro dané dřeviny jsou uvedena v kapitole 4.3.2. Procentuální hodnoty se mohou lišit o ± 5 % z důvodu optického vyhodnocení, nikoliv digitálního.

Pevnost lepeného spoje při jistém namáhání a určitých klimatických podmínkách jsou potřebné vlastnosti daného materiálu, které určují jeho vhodnost použití v praxi. Trh po nás bude neustále chtít nové a složitější materiály či lepidla. Časem přestane existovat pravidlo, že zlepšením jedné vlastnosti snížíme užitnou hodnotu vlastnosti druhé. Bude zapotřebí vyvinout taková lepidla, která budou pevná a odolná vůči vlhkostnímu, biotickému, tepelnému a mechanickému poškození, a současně nebudou nezatěžovat životní prostředí, nebudou uvolňovat do ovzduší karcinogenní látky, a jejich trvanlivost bude delší, než životnost samotného materiálu. Důležité je nejenom zlepšovat pojiva a materiály, ale poznat hlouběji způsob tvorby vazby lepeného spoje a jeho chování v náročných podmínkách. Touto prací jsme především získaly informace o dosud méně známé acetylované borovici - Accoya[®] - která jak se zdá, může být hubbou budoucnosti v efektivním zpracování a následné modifikaci dřeva. Dále jsou to hodnoty pevností našich domácích dřevin, které byly namáhány v tahu na smyk. Z této práce bychom si měli odnést poznatek, že nevhodným či dlouhodobým skladováním lepidla nikdy nedosáhneme takové kvality a funkce spoje, jakou uvádí výrobce či jakou má lepidlo plnit.

5 Závěr

Výsledek měření nám přinesl trochu nečekané zklamání. Hodnoty acetylované borovice se smrkem nedosáhly takového očekávání, jak jsme předpokládali. Naší představou byla bezkonkurenční dřevina v oblasti použití pro dřevěné okenní rámy. Výsledek mohla ovlivnit nesprávná kombinace acetylovaného dřeva se smrkem, kdy každá z dřevin má jiné jak fyzikální a mechanické vlastností, tak i jinou anatomickou stavbu a chemické složení. Každá z těchto veličin mohla negativně ovlivnit adhezi lepidla k podkladu. Pevnost spoje a přilnavost lepidla by bylo možné ještě zvýšit, pokud bychom např. zlepšili kvalitu opracování nebo využili plasmatické úpravy. Plasmatická modifikace by zvýšila hydrofilnost povrchu, a tím zlepšila adhezi lepidla s povrchem. Příjemným překvapením bylo překonání meze pevnosti ve smyku u bukového dřeva v prvním měření u obou lepidel.

Výhodou PUR lepidel je dlouhodobá rozměrová i kvalitativní stálost. Po vytvrzení nemění tvar vlivem vlhkosti či slunečního záření, nejsou rozpustná a jejich životnost se uvádí v rádech několika let. Literární zdroje uvádí vhodnost použití těchto lepidel pro námi testovanou acetylovanou borovici, kdy tato podmínka byla splněna. Cílem práce bylo zjistit pevnost lepených spojů, ale vedlejším výsledkem bylo zjištění, že stáří lepidla markantně ovlivňuje kvalitu a pevnost lepeného spoje. Všechny testované vzorky druhého měření měly až 2x menší hodnoty. Z toho plyne, že dlouhodobé skladování a uchovávání lepidel není vhodným řešením, pokud chceme dosáhnout kvalitního a pevného spojení. Jakost a trvanlivost lepidla zkracujeme nevhodnými skladovacími podmínkami (teplota, vlhkost, sluneční záření). Negativně také působí množství vzduchu, které zreaguje s lepidlovou směsí, tzn. vznik předčasného zesíťování.

V kapitole 4.3.2 můžeme vidět procentuální porušení spoje. Více než polovina vzorků překonala pevnost samotného dřeva, čili pevnost lepidlového spoje byla vyšší než pevnost dřevní substance. Z toho plyne, že spoj byl dostatečně pevný a odolný. Nutností lepidla je, aby mělo vždy vyšší pevnost než samotný podklad, a to se potvrdilo. Ideálním řešením stanovení procentuálního porušení by byla digitální analýza obrazu pomocí kamery či fotoaparátu. Všechny vzorky byly vyhodnoceny pouze vizuálně.

6 Summary

The measurement result brought us a bit unexpected disappointment. Values acetylated pine with spruce did not reach such expectations as we expected. Our idea was unbeatable in wood used for the wooden window frames. The result could affect incorrect combination of acetylated wood with spruce, where each of the woods has different as the physical and mechanical properties, as well as other anatomical structure and chemical composition. Each of these variables may had negative affect the adhesion of the adhesive to the substrate. The bond strength and adhesion of the adhesive could be further improved if we e.g. improve the quality of treatment or plasma treatment. Plasma modifications would increase the hydrophilicity of the surface and thereby improve the adhesion of the adhesive with the surface. A pleasant surprise was to overcome the limits of the shear strength in the beech wood in the first measurement for both glues.

The advantage of PUR adhesive is a long-term dimensional stability and quality. After curing, do not change shape due to moisture or sunlight, they are not soluble, and their lifetime is given in the order of several years. Literary sources suggest the suitability of these adhesives we tested acetylated pine when this condition was met. The purpose of the study was to determine the strength of bonded joints, but a secondary result was that age adhesives markedly affects the quality and bond strength. All tested samples of the second measuring had up to 2x smaller values. It follows that the long-term storage and preservation of adhesives is not a good solution if we are to achieve quality and solid connection. Inappropriate storage conditions (temperature, humidity, solar radiation) are reducing the quality and durability of the adhesive, then the amount of air reacts with the adhesive mixture, ie. creation of previously crosslinking.

In chapter 4.3.2 we can see the percentage of failure of the joint. More than half of the samples exceeded the strength of wood itself, or the strength of the adhesive joint was higher than the strength of the wood substance. It follows that the joint was sufficiently strong and durable. Necessity of the adhesive is to have always a higher strength than the actual substrate, and it was confirmed. The ideal solution for determining the percentage of failure would have been a breach of the digital image analysis using a videocamera or camera. All samples were evaluated only visually.

7 Přehled použitých zdrojů

Literární zdroje

EISNER, K. a kol. *Příručka lepení dřeva 2.*, přeprac. a rozš. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 288s. Řada dřevařské literatury

MATOVIČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický.* 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-086-9.

MUZIKÁŘ, Z. *Materiály II: pro UO truhlář.* Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2008, 175 s. ISBN 978-80-7333-061-3

NUTSCH, W. *Příručka pro truhláře. 2.*, přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 615 s. ISBN 80-867-0614-1

SEDLIAČIK, M., SEDLIAČIK, J. *Chemické látky v dřevárskom priemysle.* Vyd. 1 Ve Zvoleně: Technická univerzita vo Zvolene, 1998, 286 s. ISBN 80-228-0745-1

ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva – cvičení* 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004, 132 s. ISBN 80-7157-400-7

TRÁVNÍK, A. *Technologické operace výroby nábytku* 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2005, 223 s. ISBN 978-80-7157-865-9

TRÁVNÍK, A., SVOBODA, J. *Technologické procesy výroby nábytku* 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2007, 223 s. ISBN 978-80-7375-056-5

UHLÍŘ, A. *Technologie výroby nábytku II.* 2. aktualiz. vyd. Praha: Informatorium, 1997, 255 s. ISBN 80-86073-09-2

vlastní zdroj: *Mechanické vlastnosti dřeva – protokol č. 1 – Tah a smyk*, 2015, s. 6

Online zdroje

http://www.abclepidla.cz/Files/file/files/Teorie_lepeni.pdf [online] 8.6.2013 [citováno: 2016-01-14]

<https://www.accoya.com/wp-content/uploads/2013/09/Accoya-Performance-Brochure-English.pdf> [online] 12.3.2012 [citováno: 2016-04-10]

http://www.huntsman.com/portal/page/portal/polyurethanes/Media%20Library/global/files/guide_tpu.pdf [online] 12.5.2013 [citováno: 2016-04-19]

E. K. LEITSH, W. H. HEATH, J. M. TORKELSON *Polyurethane/polyhydroxyurethane hybrid polymers and their applications as adhesive bonding agents* International Journal of Adhesion & Adhesives [online]. 2016, vol. 64, s. 1-8 [citováno: 2016-04-11]

DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.09.001. Dostupné na:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749615001372>

P. KRÁL, P. KLÍMEK, D. DĚCKÝ *Comparison of the bond strength of oak (Quercus L.) and beech (Fagus sylvatica L.) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures* Journal of Forest Science [online]. 2015, vol. 61, issue 5, s. 189-192 [citováno: 2016-04-11] DOI: 10.17221/95/2014-JFS. Dostupné na:

<http://agriculturejournals.cz/publicFiles/152557.pdf>

G. DE AVILA BOCKORNY, M. M. C. FORTE, S. STARNBOROSKI, M. NOESKE, A. KEIL, W. L. CAVALCANTI *Modifying a thermoplastic polyurethane for improving the bonding performance in an adhesive technical process* Applied Adhesion Science [online]. 2015, [citováno: 2016-04-13] DOI: 10.1186/s40563-016-0060-x. Dostupné na:

<http://appliedadhesionscience.springeropen.com/articles/10.1186/s40563-016-0060-x>

S. D. DESAI, J. V. PATEL, V. K. SINHA *Polyurethane adhesive system from biomaterial-based polyol for bonding wood* International Journal of Adhesion & Adhesives [online]. 2003, vol. 23, issue 5, s. 393-399 [citováno: 2016-04-08] Dostupné na:

https://www.researchgate.net/publication/222682771_Polyurethane_adhesive_system_from_biomaterial-based_polyol_for_bonding_wood

J. KONNERTH, W. GINDL, M. HARM, U. MÜLLER *Comparing dry bond strength of spruce and beech wood glued with different adhesives by means of scarf – and lap joint*

testing method [online]. 2006, vol. 64, issue 4, s. 269-271 [citováno: 2016-04-15]

Dostupné na: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00107-006-0104-1>

S. CLAUB, M. JOSCAK, P. NIEMZ *Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests*. European Journal of Wood and Wood Products [online]. 2011, vol. 69,

102 issue 1, s. 101-111 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1007/s00107-010-0411-4. Dostupné

z: <http://link.springer.com/10.1007/s00107-010-0411-4>

F. BONGERS, M. ROBERTS, H. STEBBINS and R. ROWELL *Introduction of Accoya® wood on the market – technical aspects*. In: Proceedings of the Forth European Conference on Wood Modification. [online]. 2009, Stockholm, Sweden, s. 301-310 [citováno 2016-04-28] Dostupné na:

https://www.researchgate.net/profile/Ferry_Bongers/publication/270047898_Acetylated_Wood_in_Structural_Applications/links/549e7b580cf202801ea6cc30.pdf

Normy

ČSN EN 204: Klasifikace termoplastických lepidel pro nekonstrukční aplikace - Stanovení pevnosti lepeného spojení při tahovém namáhání, 2001

ČSN EN 205: Lepidla – Lepidla na dřevo pro nekonstrukční aplikace - Stanovení pevnosti lepeného spojení ve smyku při tahovém namáhání, 2003

ČSN EN 302-1: Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání, 2013

ČSN EN 302-2: Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce. Zkušební metody. Část 2: Stanovení odolnosti proti delaminaci (laboratorní postup), 2013

ČSN EN 322: Vlhkost dřeva a desek ze dřeva - Stanovení metody zjišťování vlhkosti zkušebních těles z desek ze dřeva, 1994

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Spotřeba lepidel a určení lisovacího tlaku při některých způsobech lepení.....</i>	14
<i>Tab. 2 Mez pevnosti (τ_p), modul pružnosti (E), hustota (ρ) a mez úměrnosti (τ_u) v tahu podél vláken (Matovič, 1993, vlastní zdroj)</i>	36
<i>Tab. 3 Mez pevnosti (τ_p), modul pružnosti (E), hustota (ρ) a mez úměrnosti (τ_u) ve smyku podél vláken v radiální rovině (Matovič, 1993)</i>	37
<i>Tab. 4,5 Statistika pevností prvního a druhého měření</i>	42
<i>Tab. 5 Statistika porušení MD/MD.....</i>	48
<i>Tab. 6 Statistika porušení AC/SM.....</i>	48
<i>Tab. 7 Statistika porušení BK/BK</i>	48
<i>Tab. 8 Statistika porušení DB/DB.....</i>	49
<i>Tab. 9 Statistika průměrné hmotnosti a hustoty</i>	50

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Mechanická vazba lepidla s povrchy - vznik mechanického „zámku“ (zdroj: http://www.abclepidla.cz/Files/file/files/Teorie_lepeni.pdf).....</i>	10
<i>Obr. 2 Chemická vazba lepidla s povrchem (zdroj: http://www.abclepidla.cz/Files/file/files/Teorie_lepeni.pdf).....</i>	10
<i>Obr. 3 Struktura lepeného spoje (zdroj: http://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html [citováno: 14. 1. 2016])</i>	11
<i>Obr. 4 Smáčivost povrchu – vlevo dobrá, vpravo špatná (zdroj: http://www.cocky.cz/images/smacivost.jpg, [citováno: 1. 2. 2016])</i>	12
<i>Obr. 5 Závislost času vytvrzování t [min] od teploty T [°C] (Trávník, 2005)</i>	15
<i>Obr. 6 Smyková pevnost lepidla na bázi argemonového oleje (Desai et al., 2003)</i>	20
<i>Obr. 7 Struktura TPU spoje (Bockorny et al., 2016).....</i>	22
<i>Obr. 8 Smyková pevnost různých lepidel (Konnerth et al., 2006)</i>	25
<i>Obr. 9 Vliv prostředí na smykovou pevnost (Král et al., 2015)</i>	26
<i>Obr. 10 Vliv teploty na smykovou pevnost buku (Clauß et al., 2011)</i>	28
<i>Obr. 11 Vliv teploty na smykovou pevnost buku a PUR lepidel (Clauß et al., 2011).....</i>	28
<i>Obr. 12 Vliv teploty na různé druhy PUR lepidel (Clauß et al., 2011)</i>	29
<i>Obr. 13 Dub – příčný řez</i>	30
<i>Obr. 14 Buk – tangenciální řez</i>	31

<i>Obr. 15 Modřín – příčný řez</i>	31
<i>Obr. 16 Accoya wood</i>	32
<i>Obr. 17 Chemická modifikace – acetylace</i>	32
<i>Obr. 18 Tepelná vodivost</i>	33
<i>Obr. 19 Změna objemu (%)</i>	33
<i>Obr. 20 Smrk – příčný řez</i>	34
<i>Obr. 21 Pracovní diagram při tahu ve směru vláken (zdroj: http://www.ohybacidrevo.cz/vlastnosti/vybrane-vlastnosti-dreva</i>	35
<i>Obr. 22 Neporušený vzorek zkušebního tělíska Kestopur 1010 DB/DB</i>	39
<i>Obr. 23 Upevněný vzorek v čelistech</i>	39
<i>Obr. 28 Schéma slepeného zkušebního vzorku</i>	41
<i>Obr. 29 ANOVA – Výsledky smykových pevností druhého měření</i>	44
<i>Obr. 30 ANOVA – Výsledky smykových pevností druhého měření</i>	44
<i>Obr. 24 Pracovní diagram BK – Kestopur 1010</i>	45
<i>Obr. 25 Pracovní diagram BK – Kestopur 1050</i>	45
<i>Obr. 26 Pracovní diagram MD – Kestopur 1010</i>	46
<i>Obr. 27 Pracovní diagram MD – Kestopur 1050</i>	46
<i>Obr. 31 Ukončení zkoušky, lom tělíska</i>	47
<i>Obr. 32 Statistické vyhodnocení porušení</i>	49
<i>Obr. 33 Závislost pevnosti na hustotě</i>	51



KESTOPUR 1050

One-component polyurethane adhesive

ADHESIVE TYPE Kestopur 1050 is a 1-component moisture curing polyurethane adhesive for joining wooden materials. It complies with the requirements of EN 15425 and is approved for manufacturing CE-labelled gluelam according to EN 14080. Kestopur 1050 adhesive contains a substance visible in UV-light. Complies with M1-emission classification for building materials.

AREA OF APPLICATION

- production of engineered wood products
- production of CE-labelled gluelam
- structured timber
- gluing of multiple-laminate log
- finger jointing and face-jointing (lamination)
- gives excellent moisture-resistance

TECHNICAL DATA AND RECOMMENDED WORKING CONDITIONS	Density	approx. 1.2 kg/dm ³
	Colour	beige
	Viscosity	approx. 10 000 mPas (Brookfield RVT 5/20, 20 °C)
	Coverage	150...200 g/m ² face-jointing
140... 180 g/m ² finger jointing		
	Open time	20 min
	Pressing time	min. 60 min.
	Pressure needed	0.6...1.0 N/mm ²
	Moisture content of wood	10...20 % (a moisture content of ca. 15 % is recommended)

^{*)} Coverage 180 g/m², pine, wood's moisture content 15 %, 20 °C 50 % RH

Open and pressing time are strongly dependent of the prevailing conditions, such as moisture content of the wood, ambient air, temperature, absorptivity and the amount of adhesive applied. Therefore the given values can be regarded as guidance only. In order to ensure sufficient pressure time and bond strength, preliminary tests must be carried out prior to full scale application. Higher temperature shortens the pressing time.

INSTRUCTIONS FOR USE

Surfaces to be bonded must be clean and dust-free. Adhesive can be spread with an application head or other appropriate glue spreading machine. Spread an even layer of adhesive on one or two sides. Remove fresh adhesive stains with a dry cloth and clean the surface with acetone or Kestopur Cleaner. Dried adhesive can be removed only mechanically.

HEALTH AND SAFETY

Appropriate protective gloves must be used when handling the adhesive. Appropriate respirator is to be used and good ventilation arranged, if applying adhesive by spraying or above +40 °C. A separate MSDS is available upon request.

STORAGE

Stored in a dry and cool place (+10–25°C) protected from light. The maximum storage time in an original package at +20 °C is 4 months, at +30 °C max. 1-1.5 months.

FURTHER INFORMATION

Our instructions are based on extensive investigations and experience. In view of the large variety of materials and the conditions under which our products are applied, no responsibility can be assumed for the results obtained or any damage caused from the use of the product. Preliminary adhesion tests must be carried out prior to full scale application. Check the validity of the printed technical data sheet from our Technical Service, tel. +358 (0)207 710 100 or www.kiilto.com.



KESTOPUR 1010

One-component polyurethane adhesive

PROPERTIES

Kestopur 1010 is a one-part, moisture curing PU-adhesive for jointing of wooden materials. It complies with the requirements of EN 15425 and is approved for manufacturing of CE-labelled gluelam according to EN 14080. Kestopur 1010 is solvent- and formaldehyde-free. Complies with M1-emission classification for building materials.

AREA OF APPLICATION

- production of engineered wood products
- production of CE-labelled gluelam
- structured timber
- gluing of multiple-laminate log
- finger jointing and face-jointing (lamination)
- gives excellent moisture-resistance

TECHNICAL DATA

Adhesive type	polyurethane
Density	approx. 1.2 kg/dm ³
Colour	beige
Viscosity	approx. 10 000 mPas (Brookfield RVT, 5/20, 20 °C)
Coverage	150...200 g/m ² (face-jointing) 140... 180 g/m ² (finger jointing)
Open time ¹	10 minutes
Pressing time ¹	min. 30 minutes
Pressure needed	0.6...1.0 N/mm ²
Moisture content of wood	10...20 % (15 % moisture content recommended)

¹ Coverage 180 g/m², pine, wood's moisture content 15 %, 20 °C 50 % RH

Open and pressing time are strongly dependent of the prevailing conditions, such as moisture content of the wood and ambient air, temperature, absorbency and the amount of adhesive applied. Therefore the given values can be regarded as guidance only. In order to ensure sufficient pressure time and bond strength, preliminary tests must be carried out prior to full scale application. Higher temperature shortens the pressing time.

INSTRUCTIONS FOR USE

Surfaces to be bonded must be clean and dust-free. Adhesive can be spread with an application head or other appropriate glue spreading machine. Spread an even layer of adhesive on one or two sides. Remove fresh adhesive stains with a dry cloth and clean the surface with acetone or Kestopur Cleaner. Dried adhesive can be removed only mechanically.

HEALTH AND SAFETY

Appropriate protective gloves must be used when handling the adhesive. Appropriate respirator is to be used and good ventilation arranged, if applying adhesive by spraying or above +40 °C. A separate MSDS is available upon request.

STORING

Stored in a dry and cool place (+10–25 °C) protected from light. The maximum storage time in an original package at +20 °C is 4 months, at +30 °C max. 1.5 months.

FURTHER INFORMATION

Our instructions are based on extensive investigations and experience. In view of the large variety of materials and the conditions under which our products are applied, no responsibility can be assumed for the results obtained or any damage caused from the use of the product. Preliminary adhesion tests must be carried out prior to full scale application. Check the validity of the printed technical data sheet from our Technical Service, tel. +358 (0)207 710 100 or www.kiilto.com.

Číslo vzorku	t _{SM}	Označení		Číslo vzorku	t _{SM}	Označení
	[Mpa]				[Mpa]	
1	6,07	10BK01		51	14,85	50BK01
2	17,88	10BK02		52	16,68	50BK02
3	17,08	10BK03		53	16,55	50BK03
4	12,44	10BK04		54	17,6	50BK04
5	18,97	10BK05		55	14,68	50BK05
6	17,82	10BK06		56	15,56	50BK06
7	16,23	10BK07		57	15,71	50BK07
8	16,84	10BK08		58	15,85	50BK08
9	17,13	10BK09		59	12,53	50BK09
10	16,23	10BK10		60	16,81	50BK10
11	19,91	10BK11		61	15,75	50BK11
12	9,98	10BK12		62	16,83	50BK12
13	10,16	10BK13		63	14,93	50BK13
14	14,06	10BK14		64	17,78	50BK14
15	6,16	10BK15		65	16,83	50BK15
16	Nevyhověl	10BK16		66	15,45	50BK16
17	17,38	10BK17		67	17,05	50BK17
18	15,02	10BK18		68	18,57	50BK18
19	17,13	10BK19		69	17,71	50BK19
20	13,07	10BK20		70	16,09	50BK20
21	12,17	10BK21		71	17,05	50BK21
22	13,05	10BK22		72	15,82	50BK22
23	15,29	10BK23		73	16,46	50BK23
24	14,97	10BK24		74	12,24	50BK24
25	16,1	10BK25		75	16,59	50BK25
26	17,42	10BK26		76	18,69	50BK26
27	15,84	10BK27		77	18,4	50BK27
28	14,53	10BK28		78	16,57	50BK28
29	7	10BK29		79	17,09	50BK29
30	15,62	10BK30		80	16,89	50BK30
31	16,89	10BK31		81	17,38	50BK31
32	9,88	10BK32		82	16,83	50BK32
33	15,65	10BK33		83	18,36	50BK33
34	15,12	10BK34		84	16,17	50BK34
35	15,57	10BK35		85	16,03	50BK35
36	9,21	10BK36		86	15,27	50BK36
37	11,92	10BK37		87	16,7	50BK37
38	16,51	10BK38		88	14,56	50BK38
39	6,69	10BK39		89	15,83	50BK39
40	16,98	10BK40		90	17,23	50BK40
41	10,75	10BK41		91	16,97	50BK41
42	14,84	10BK42		92	13,45	50BK42
43	12,62	10BK43		93	11,81	50BK43
44	11,68	10BK44		94	17,2	50BK44
45	9,85	10BK45		95	15,16	50BK45
46	16,31	10BK46		96	16,6	50BK46
47	12,75	10BK47		97	16,41	50BK47
48	11,21	10BK48		98	15,68	50BK48
49	Nevyhověl	10BK49		99	12,33	50BK49
50	14,69	10BK50		100	14,35	50BK50

Číslo vzorku	t _{SM}	Označení		Číslo vzorku	t _{SM}	Označení
	[Mpa]				[Mpa]	
101	5,65	10MD01		151	8,78	50MD01
102	7,41	10MD02		152	11,61	50MD02
103	7,64	10MD03		153	8,33	50MD03
104	8,56	10MD04		154	9,06	50MD04
105	10,53	10MD05		155	8,60	50MD05
106	6,91	10MD06		156	9,21	50MD06
107	8,58	10MD07		157	7,77	50MD07
108	9,63	10MD08		158	9,05	50MD08
109	9,01	10MD09		159	4,38	50MD09
110	8,26	10MD10		160	8,09	50MD10
111	8,98	10MD11		161	6,00	50MD11
112	6,64	10MD12		162	6,88	50MD12
113	8,49	10MD13		163	8,94	50MD13
114	8,20	10MD14		164	6,39	50MD14
115	9,51	10MD15		165	5,58	50MD15
116	7,18	10MD16		166	8,32	50MD16
117	7,40	10MD17		167	8,95	50MD17
118	9,33	10MD18		168	9,89	50MD18
119	10,85	10MD19		169	6,69	50MD19
120	7,15	10MD20		170	9,30	50MD20
121	9,00	10MD21		171	9,33	50MD21
122	9,40	10MD22		172	8,86	50MD22
123	5,66	10MD23		173	9,34	50MD23
124	7,77	10MD24		174	9,23	50MD24
125	7,99	10MD25		175	5,49	50MD25
126	10,78	10MD26		176	9,91	50MD26
127	9,23	10MD27		177	7,58	50MD27
128	10,88	10MD28		178	8,83	50MD28
129	9,44	10MD29		179	7,40	50MD29
130	9,36	10MD30		180	6,50	50MD30
131	10,12	10MD31		181	10,59	50MD31
132	8,83	10MD32		182	9,83	50MD32
133	8,16	10MD33		183	8,52	50MD33
134	8,50	10MD34		184	5,68	50MD34
135	8,95	10MD35		185	6,94	50MD35
136	9,96	10MD36		186	7,61	50MD36
137	9,47	10MD37		187	Newyhověl	50MD37
138	8,20	10MD38		188	9,28	50MD38
139	9,34	10MD39		189	9,08	50MD39
140	8,16	10MD40		190	10,51	50MD40
141	11,75	10MD41		191	8,42	50MD41
142	7,64	10MD42		192	6,90	50MD42
143	5,46	10MD43		193	10,96	50MD43
144	10,22	10MD44		194	7,48	50MD44
145	5,32	10MD45		195	8,38	50MD45
146	7,60	10MD46		196	10,53	50MD46
147	10,69	10MD47		197	6,76	50MD47
148	8,26	10MD48		198	7,58	50MD48
149	10,11	10MD49		199	10,88	50MD49
150	9,76	10MD50		200	7,92	50MD50

Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení
	MPa			MPa			MPa	
1	4,83	1_M_10	31	0,83	1_M_50	61	3,73	1_M_T30
2	3,2	2_M_10	32	3,79	2_M_50	62	4,86	2_M_T30
3	2,58	3_M_10	33	4,6	3_M_50	63	1,82	3_M_T30
4	3,53	4_M_10	34	2,11	4_M_50	64	0,78	4_M_T30
5	4,79	5_M_10	35	3,23	5_M_50	65	1,18	5_M_T30
6	3,89	6_M_10	36	1,62	6_M_50	66	5,03	6_M_T30
7	3,49	7_M_10	37	2,6	7_M_50	67	4,21	7_M_T30
8	3,77	8_M_10	38	3,39	8_M_50	68	4,26	8_M_T30
9	5,04	9_M_10	39	4,22	9_M_50	69	4,55	9_M_T30
10	3,63	10_M_10	40	5,95	10_M_50	70	5,03	10_M_T30
11	5,42	11_M_10	41	5,69	11_M_50	71	3,73	11_M_T30
12	4,32	12_M_10	42	4,73	12_M_50	72	2,61	12_M_T30
13	3,9	13_M_10	43	5,24	13_M_50	73	4,1	13_M_T30
14	3,83	14_M_10	44	6,12	14_M_50	74	3,86	14_M_T30
15	3,47	15_M_10	45	4,92	15_M_50	75	2,39	15_M_T30
16	4,89	16_M_10	46	3,18	16_M_50	76	4,46	16_M_T30
17	5,46	17_M_10	47	3,45	17_M_50			
18	3,62	18_M_10	48	6,3	18_M_50			
19	2,99	19_M_10	49	5,1	19_M_50			
20	4,84	20_M_10	50	5,56	20_M_50			
21	2,66	21_M_10	51	1,42	21_M_50			
22	3,81	22_M_10	52	5,31	22_M_50			
23	5,74	23_M_10	53	5,42	23_M_50			
24	5,3	24_M_10	54	2,91	24_M_50			
25	6,54	25_M_10	55	3,85	25_M_50			
26	4,7	26_M_10	56	3,69	26_M_50			
27	4,29	27_M_10	57	4,36	27_M_50			
28	4,7	28_M_10	58	2,88	28_M_50			
29	4,74	29_M_10	59	2,08	29_M_50			
30	5,41	30_M_10	60	3,48	30_M_50			

Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení
	MPa			MPa			MPa	
77	0,92	1_BK_1010	105	7,37	1_BK_1050	136	2,58	1_BK_T30
78	0,64	2_BK_1010	106	7,59	2_BK_1050	137	4,7	2_BK_T30
79	7,27	3_BK_1010	107	7,88	3_BK_1050	138	8,25	3_BK_T30
80	5,02	4_BK_1010	108	7,78	4_BK_1050	139	5,33	4_BK_T30
81	5,33	5_BK_1010	109	2,45	5_BK_1050	140	6,98	5_BK_T30
82	6,74	6_BK_1010	110	9,38	6_BK_1050	141	5,88	6_BK_T30
83	7,56	7_BK_1010	111	5,08	7_BK_1050	142	7,73	7_BK_T30
84	1,77	8_BK_1010	112	9,4	8_BK_1050	143	8,97	8_BK_T30
85	5,06	9_BK_1010	113	9,04	9_BK_1050	144	8,37	9_BK_T30
86	7,95	10_BK_1010	114	8,03	10_BK_1050	145	7,81	10_BK_T30
87	1,76	12_BK_1010	115	7,64	11_BK_1050	146	8,47	11_BK_T30
88	9,16	13_BK_1010	116	5,68	12_BK_1050	147	7,42	12_BK_T30
89	5,01	14_BK_1010	117	9,41	13_BK_1050	148	2,26	13_BK_T30
90	4,55	15_BK_1010	118	8,1	14_BK_1050	149	5,35	14_BK_T30
91	0,83	16_BK_1010	119	6,86	15_BK_1050	150	8,95	15_BK_T30
92	7,44	17_BK_1010	120	9,33	16_BK_1050	151	3,73	16_BK_T30
93	8,56	18_BK_1010	121	8,7	17_BK_1050			
94	8,08	19_BK_1010	122	7,81	18_BK_1050			
95	7,07	20_BK_1010	123	7,79	19_BK_1050			
96	9,44	21_BK_1010	124	7,26	20_BK_1050			
97	7,95	22_BK_1010	125	4,77	21_BK_1050			
98	6,08	23_BK_1010	126	7,65	22_BK_1050			
99	3,65	24_BK_1010	127	7,15	23_BK_1050			
100	7,21	25_BK_1010	128	8,03	24_BK_1050			
101	2,54	26_BK_1010	129	8,46	25_BK_1050			
102	6,42	27_BK_1010	130	11,92	26_BK_1050			
103	8,07	28_BK_1010	131	8,56	27_BK_1050			
104	7,4	29_BK_1010	132	4,56	28_BK_1050			
			133	5,67	29_BK_1050			
			134	11,44	30_BK_1050			
			135	8,13	31_BK_1050			
			136	9,29	32_BK_1050			

Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení
	MPa			MPa			MPa	
152	2,37	1_AC_1010	180	3,56	1_AC_1050	208	2,53	1_AC_T30
153	2,55	2_AC_1010	181	4,17	2_AC_1050	209	1,58	2_AC_T30
154	2,22	3_AC_1010	182	3,45	3_AC_1050	210	3,76	3_AC_T30
155	2,18	4_AC_1010	183	4,42	4_AC_1050	211	4,99	4_AC_T30
156	0,88	5_AC_1010	184	1,91	5_AC_1050	212	3,62	5_AC_T30
157	1,34	6_AC_1010	185	4,44	6_AC_1050	213	4,38	6_AC_T30
158	1,8	7_AC_1010	186	3,73	7_AC_1050	214	1,59	7_AC_T30
159	3,08	8_AC_1010	187	3,87	8_AC_1050	215	1,53	8_AC_T30
160	1,55	9_AC_1010	188	3,86	9_AC_1050	216	2,38	10_AC_T30
161	3,1	10_AC_1010	189	3,41	10_AC_1050	217	3,3	11_AC_T30
162	4,83	11_AC_1010	190	5,27	11_AC_1050	218	3,2	12_AC_T30
163	2,69	12_AC_1010	191	2,9	12_AC_1050	219	3,47	13_AC_T30
164	1,94	13_AC_1010	192	2,61	13_AC_1050	220	2,85	14_AC_T30
165	2,78	14_AC_1010	193	3,42	14_AC_1050	221	1,41	15_AC_T30
166	2,06	15_AC_1010	194	3,26	15_AC_1050	222	3,65	16_AC_T30
167	2,26	16_AC_1010	195	2,84	16_AC_1050	223	2,89	17_AC_T30
168	0,01	17_AC_1010	196	1,1	17_AC_1050	224	3,19	18_AC_T30
169	1,52	18_AC_1010	197	3,36	18_AC_1050	225	4,2	19_AC_T30
170	2,06	19_AC_1010	198	4,04	19_AC_1050	226	4,59	20_AC_T30
171	5,34	20_AC_1010	199	1,3	20_AC_1050	227	1,31	21_AC_T30
172	1,23	21_AC_1010	200	3,44	21_AC_1050	228	2,56	22_AC_T30
173	1,82	22_AC_1010	201	4,16	22_AC_1050	229	3,7	23_AC_T30
174	1,17	23_AC_1010	202	4,13	23_AC_1050	230	2,56	24_AC_T30
175	4,59	24_AC_1010	203	3,47	24_AC_1050	231	3,7	25_AC_T30
176	4,99	25_AC_1010	204	2,81	25_AC_1050			
177	4,55	26_AC_1010	205	2,29	26_AC_1050			
178	3,38	27_AC_1010	206	2,84	27_AC_1050			
179	4,38	28_AC_1010	207	5,37	28_AC_1050			

Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení	Číslo vzorku	τ_{SM}	Označení
	MPa			MPa			MPa	
152	6,22	1_DB_1010	180	6,63	1_DB_1050	208	3,82	1_DB_T30
153	5,27	2_DB_1010	181	4,26	2_DB_1050	209	5,81	2_DB_T30
154	0,7	3_DB_1010	182	5,12	3_DB_1050	210	4,71	3_DB_T30
155	1,96	4_DB_1010	183	4,28	4_DB_1050	211	4,51	4_DB_T30
156	4,86	5_DB_1010	184	5,42	5_DB_1050	212	6,3	5_DB_T30
157	3,43	6_DB_1010	185	5,84	6_DB_1050	213	5,36	6_DB_T30
158	4,64	7_DB_1010	186	4,8	7_DB_1050	214	5,26	7_DB_T30
159	4,14	8_DB_1010	187	5,89	8_DB_1050	215	3,43	8_DB_T30
160	1,57	9_DB_1010	188	5,74	9_DB_1050	216	3,37	10_DB_T30
161	3,66	10_DB_1010	189	6,36	10_DB_1050	217	4,68	11_DB_T30
162	4,69	11_DB_1010	190	5,3	11_DB_1050	218	4,83	12_DB_T30
163	5,92	12_DB_1010	191	6,36	12_DB_1050	219	5,81	13_DB_T30
164	4,14	13_DB_1010	192	5,57	13_DB_1050	220	5,04	14_DB_T30
165	2,88	14_DB_1010	193	4,05	14_DB_1050	221	6,58	15_DB_T30
166	1,7	15_DB_1010	194	4,93	15_DB_1050	222	6,47	16_DB_T30
167	1,32	16_DB_1010	195	5,95	16_DB_1050	223	4,22	17_DB_T30
168	1,02	17_DB_1010	196	5,42	17_DB_1050			
169	3,64	18_DB_1010	197	4,11	18_DB_1050			
170	4,11	19_DB_1010	198	2,76	19_DB_1050			
171	5,21	20_DB_1010	199	5,37	20_DB_1050			
172	3,12	21_DB_1010	200	6,06	21_DB_1050			
173	5,97	22_DB_1010	201	5,79	22_DB_1050			
174	5,03	23_DB_1010	202	5,62	23_DB_1050			
175	5,39	24_DB_1010	203	5,24	24_DB_1050			
176	2,96	25_DB_1010	204	5,01	25_DB_1050			
177	1,99	26_DB_1010	205	6,68	26_DB_1050			
178	4,12	27_DB_1010	206	4,95	27_DB_1050			
179	2,33	28_DB_1010	207	5,24	28_DB_1050			
180	4,7	29_DB_1010	208	5,22	29_DB_1050			
181	5,46	30_DB_1010	209	5,15	30_DB_1050			
182	2,41	31_DB_1010	210	5,55	31_DB_1050			
			211	2,46	32_DB_1050			