

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Vliv použitých dřevin a jejich kombinací na pevnost
lepeného spoje při smykovém namáhání**

Bakalářská práce

Autor: Marek Hoch

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kytka

2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Marek Hoch

Dřevařství
Zpracování dřeva

Název práce

Vliv použitých dřevin a jejich kombinací na pevnost lepeného spoje při smykovém namáhání

Název anglicky

The effect of wood species and their combinations on the tensile-shear strength of the glued joint

Cíle práce

Cíl práce je rozdělen do dvou dílčích cílů.

První cíl je teoretický rozbor problematiky lepení dřeva s důrazem na použité dřeviny a možnosti použití kombinací dřevin v závislosti na použitém druhu dřeviny.

Druhý cíl je aplikace teoretických poznatků získaných v literární rešerši a jejich ověření pomocí smykové zkoušky při tahovém namáhání.

Metodika

Metodiku práce je možné rozdělit do následujících bodů dle časového harmonogramu:

- červenec – září 2023: Zpracování literární rešerše o vlastnostech lepeného dřeva ve vztahu k použitým dřevinám a smykové pevnosti lepených spojů
- říjen – listopad 2023: Příprava, třídění a značení zkušebních těles
- prosinec 2023 – únor 2024: Experimentální zjišťování smykové pevnosti kombinovaného lepeného dřeva. Porovnání kombinací dřevin s referenčními homogenními kombinacemi.
- březen 2024: Analýza dat a zpracování výsledků v textové, tabulkové a grafické podobě.
- duben 2024: Odevzdání bakalářské práce.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

lepení, kombinace dřevin, smyk

Doporučené zdroje informací

- AICHER, S.; REINHARDT, H.W. 2007. Delamination properties and shear strength of glued beech wood laminations with red heartwood. Holz Roh Werkst 64:125–136
- ANDERSONE, I., a kol. 1998. Investigation of the structure, composition and sorption properties of alder (Alnus) wood. In: Proceedings of the Fifth European Workshop on Lignocellulosics and Pulp. 41–44.
- BACHTIAR, E.V., a kol. 2017. Static and dynamic tensile shear test of glued lap wooden joint with four different types of adhesives, Holzforschung, Vol. 71(5), pp. 391-396.
- BROCKMANN, W., 2009. Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-31898-8.
- KOLLMANN, F. F. P.; COTE, W. A. Jr. 2012. Principles of Wood Science and Technology: I. Solid Wood. Springer Science & Business Media, 592 s. ISBN: 978-3-642-87928-9
- PIZZI, A., MITTAL, K., 2003. Handbook of adhesive technology. 2nd, rev. And expanded. New York: M. Dekker. ISBN 08-247-0986-1
- PIZZI, A., MITTAL, K. 2011. Wood adhesives. CRC Press. ISBN 978-9-00-419092-4.
- UZELAC GLAVINIĆ, I., BOKO, N., J. TORIĆ, J., VRANKOVIĆ, L. 2020. Application of hardwood for glued laminated timber in Europe. Građevinar 72. 607-616. DOI: 10.14256/JCE.2741.2019
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Tomáš Kytka

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 8. 6. 2023

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vliv použitých dřevin a jejich kombinací na pevnost lepeného spoje při smykovém namáhání vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 5.4.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Kytkovi za ochotu, odborné konzultace, cenné připomínky, a především za jeho čas obětovaný této práci. Dále bych rád poděkoval společnosti Akzo Nobel N.A za bezplatné poskytnutí lepidla pro účely této práce. Na závěr děkuji všem, kteří mi v mé bakalářské práci poskytli jakkoliv podporu, a zejména svým blízkým za jejich ohromnou dávku trpělivosti.

Vliv použitých dřevin a jejich kombinací na pevnost lepeného spoje při smykovém namáhání

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá stanovením a porovnáním smykové pevnosti při tahovém namáhání lepeného spoje dřevin buku lesního (*Fagus sylvatica* L.), smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) H. Karst.), olše lepkavé (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), jejich kombinací a 3 různých adheziv (PUR, RPF, EPI). Práce se skládá z teoretické a experimentální části.

Teoretická část se zabývá vlastnostmi lepeného spoje a charakterizuje se zde pojem lepení dřeva. Jsou zde popsány faktory působící na pevnost lepeného spoje. Dále jsou uvedeny základní informace o lepidlech a stručná charakteristika lepených materiálů.

Experimentální část se zabývá metodikou a řádným stanovením zkoumaných vlastností v souladu s platnými normami. Tato část obsahuje statistický výstup ve formě tabulek a grafů.

Z výsledků vyplývá, že použitá dřevina a kombinace dřevin mají prokazatelný vliv na smykovou pevnost lepeného spoje při tahovém namáhání. Nejvyšší smykové pevnosti dosahovali homogenní tělesa vyrobená z buku. Naopak nejnižší pevnost se zjistila u olšových zkušebních těles. Z hlediska lepidel se jako nejvíce únosné jeví lepidlo PUR. Na rozdíl od lepidla EPI, které vykazuje nejnižší pevnostní hodnoty. V rámci kombinací dřevin se prokázal nárůst smykové pevnosti pouze u těles vyrobených z buku a olše spojované adhezivem PUR. Na druhou stranu se u žádné kombinace neprojevovalo zhoršení.

Klíčová slova: lepení, kombinace dřevin, smyk

The effect of wood species and their combinations on the tensile-shear strength of the glued joint

Abstract

The bachelor thesis deals with the determination and comparison of shear strength under tensile stress of glued joint of beech (*Fagus silvatica* L.), spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), their combinations and 3 different adhesives (PUR, RPF, EPI). The work consists of theoretical and experimental parts.

The theoretical part deals with the properties of the glued joint and characterizes the concept of wood gluing. The factors affecting the strength of the glued joint are described. Furthermore, basic information on adhesives and a brief characterisation of glued materials are given.

The experimental part deals with the methodology and proper determination of the properties under investigation in accordance with the applicable standards. This part contains statistical output in the form of tables and graphs.

The results show that the wood species and combination of wood species used have a demonstrable effect on the shear strength of the bonded joint under tensile loading. The highest shear strength was achieved by homogeneous samples made of beech wood. On the other hand, alder wood samples showed the lowest strength. In terms of adhesives, PUR adhesives appeared to have a highest load-bearing. In contrast to EPI adhesive, which proved to have the lowest load-bearing strength. In terms of wood combinations, only the beech wood and alder wood test samples bonded with PUR adhesive showed an increase in shear strength. On the other hand, no combination showed deterioration.

Keywords: bonding, combination of wood species, shear strength

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Cíl práce.....	11
3 Literární rešerše.....	12
3.1 Stavba dřeva.....	12
3.1.1 Anatomie dřeva.....	12
3.1.2 Chemická struktura dřeva.....	13
3.2 Specifikace použitých dřevin.....	14
3.2.1 Buk.....	14
3.2.2 Smrk.....	15
3.2.3 Olše.....	16
3.2.4 Lepené konstrukční dřevo.....	17
3.3 Teorie lepení.....	19
3.3.1 Základní pojmy.....	19
3.3.2 Mezimolekulární síly.....	19
3.3.3 Adheze.....	20
3.3.4 Koheze.....	21
3.3.5 Smáčivost povrchu.....	21
3.4 Složení lepidel.....	22
3.5 Typy lepených spojů.....	24
3.6 Konstrukce lepeného spoje.....	26
3.7 Faktory ovlivňující lepené spoje.....	27
3.7.1 Faktory vztahující se k lepidlu.....	27
3.7.2 Faktory vztahující se k lepenému materiálu.....	29
3.7.3 Faktory vztahující se k technologickým podmínkám.....	31
3.8 Rozdělení lepidel.....	33
3.8.1 Rozdělení podle původu.....	33
3.8.2 Rozdělení podle charakteru vytvrzení.....	34
3.8.3 Rozdělení podle teploty při zpracování.....	34
3.8.4 Rozdělení podle fyzikálního stavu (formy).....	35
3.8.5 Rozdělení podle způsobu vytvrzení spoje.....	35
3.8.6 Rozdělení podle dalších znaků.....	35
3.8.7 Rozdělení podle vodovzdornosti.....	36
3.9 Specifikace použitých lepidel.....	36
3.9.1 Polyuretanová lepidla.....	36
3.9.2 Resorcinol-fenolformaldehydová lepidla.....	37
3.9.3 Emulgovaná polymerovaná izokyanátová lepidla.....	38

4 Metodika	39
4.1 Výběr materiálu.....	39
4.2 Výběr lepidel	39
4.3 Výroba zkušebních těles	40
4.3.1 Egalizace a řezání	41
4.3.2 Lepení	41
4.3.3 Lisování a vyzrání.....	41
4.3.4 Formátování a rozměry	42
4.3.5 Kódování.....	42
4.3.6 Klimatizace	43
4.4 Testování zkušebních těles.....	43
4.4.1 Měření rozměrů a vážení hmotnosti	43
4.4.2 Zkouška smykové pevnosti při tahovém namáhání	44
4.4.3 Sušení	45
5 Výsledky a diskuze	46
6 Přínosy pro vědu a pro praxi	55
7 Závěr.....	56
8 Seznam obrázků a tabulek	57
9 Literatura.....	58
10 Seznam použitých zkratk a symbolů	64
11 Seznam příloh	66

1 Úvod

Dřevo je úžasným materiálem jak z hlediska jeho udržitelnosti, tak použitelnosti. Se dřevem přicházíme do kontaktu hned v několika sférách lidského života a stal se jeho neoddělitelnou součástí. S ohledem na současnou ekologickou problematiku a snahu o dosažení uhlíkové neutrality lze předpokládat pouze rostoucí zájem o tento obnovitelný zdroj. S tím se ruku v ruce objevují požadavky na jeho spojování a zušlechťování.

Jedním z nabízených řešení se jeví lepení. Lepení umožňuje jak pevné a současně pružné spoje, tak i vrstvení materiálů na sebe. Technologie lepení je známa už několik tisíc let. Lepidla představují v dřevařském průmyslu i jiných oborech důležitý pomocný materiál, který velkou mírou přispívá nejen ke zdokonalení kvality výrobku, ale je i základem pro nové pokrokové produkty. Lepidla, popřípadě nové materiály pomocí nich vyráběných, znamenají důležitý ekonomický přínos, neboť dovolují zpracovávat zdánlivě nevyužitelné sortimenty dřeva na materiály, které nejenže v mnoha případech nahrazují různé sortimenty řeziva, ale většinou je předčí.

Z pohledu dřevěných lepených konstrukcí se do této doby využívalo především dřevo jehličnaté (zejména smrk). S aktuální situací v České republice, kdy lesy sužují vlny veder, nízké zásoby podzemních vod či kůrovcové kalamity, již smrkové monokulturní porosty nemohou dlouhodobě odolávat takové zátěži a je pravděpodobné, že se v budoucnu druhová skladba lesních porostů změní. Z těchto důvodů zájem o využití listnatých dřevin v dřevozpracujícím průmyslu neustále roste. Vzhledem ke svým dobrým mechanickým vlastnostem má vysoký potenciál využití pro výrobu lepených dřevěných konstrukcí. Zbývá však vyřešit otázku konstrukčního lepení, než bude možné dosáhnout efektivní výroby a bezpečného použití listnatých dřevin v těchto konstrukcích. Tato práce tedy slouží jako ověření alternativ (se zaměřením na smykovou pevnost při podélném namáhání), kterým se pravděpodobně bude dřevozpracovatelský průmysl v budoucnu ubírat.

Práci na toto téma jsem se rozhodl věnovat z důvodu zájmu o tuto problematiku. Dřevozpracující průmysl se nachází v turbulentní době a je vzrušující být součástí objevování nových směrů. Také je tato práce součástí většího celku, kde se toto téma komplexně rozebere, ale i vzhledem k budoucí praxi, orientace v oblasti nových trendů bude nepopíratelná výhoda.

2 Cíl práce

Cíl práce je rozdělen do dvou dílčích cílů.

První cíl je teoretický rozbor problematiky lepení dřeva s důrazem na použité dřeviny a možnosti použití kombinací dřevin v závislosti na použitém druhu dřeviny.

Druhý cíl je aplikace teoretických poznatků získaných v literární rešerši a jejich ověření pomocí smykové zkoušky při tahovém namáhání.

3 Literární řešerše

V této kapitole se nachází teoretické seznámení se všemi tématy souvisejícími s problematikou lepení dřeva, kombinací dřevin a smykového namáhání. Zmíni se relevantní ověřené informace z již existující literatury, které se následně využijí při praktickém ověřování zkoumaných myšlenek.

3.1 Stavba dřeva

V pracích, ve kterých figuruje dřevo, neodmyslitelnou částí probíraných témat bude problematika stavby dřeva. Konkrétně se tato kapitola dotkne témat procesu vzniku a chemické struktury dřeva.

3.1.1 Anatomie dřeva

Anatomická stavba dřeva vychází z procesu jeho vzniku. Mezi kůrou a dřevem stromu se nachází kambium, vrstva živých dělicích buněk. Jejich dělením dochází k neustálému růstu na obou stranách pletiva. Nové buňky dřeva vznikají směrem ke dřeni, zatímco směrem od dřene přibývají buňky, které tvoří kůru stromu (Gandelová, Šlezingerová, 2014).

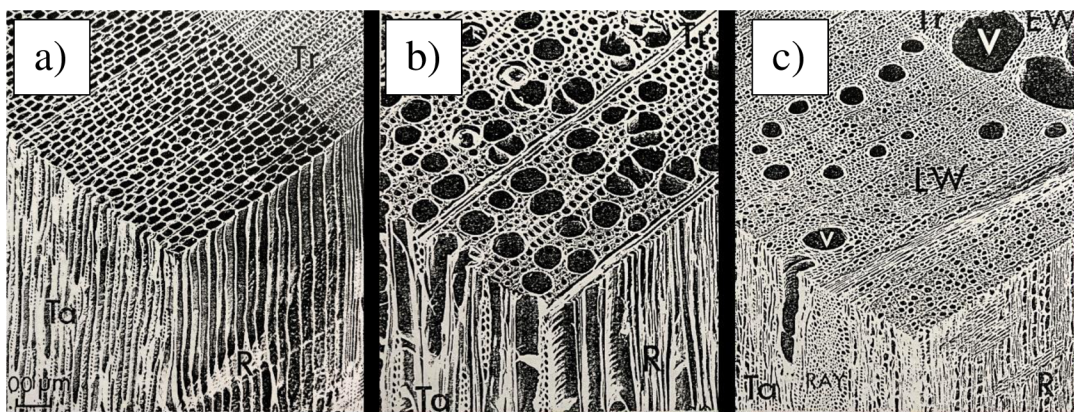
Mimo tropické oblasti dřeviny procházejí periodickými obdobími vegetačního klidu, takže kambium přirůstá pouze po dobu vegetačního období. Tato přerušovaná aktivita vede k vytvoření letokruhu. Letokruh se skládá z vrstvy jarního dřeva, obsahujícího větší buňky s většími lumeny a nižší hustotou, a letního dřeva, které se vyznačuje tlustšími buněčnými stěnami. Hlavní funkcí jarního dřeva je vést vodu s rozpuštěnými živinami z kořenů k listům do koruny. Naopak letní dřevo, s vyšší hustotou, poskytuje mechanickou pevnost a více ovlivňuje vlastnosti dřeva (Kamenický, Rizmanová, 1989).

Rozdíly v anatomické stavbě mezi jehličnatými a listnatými dřevinami jsou značné, ale společným rysem zůstává skutečnost, že různé typy buněk dřeva jsou lignifikované a skládají se z buněčné stěny a buněčné dutiny tzv. lumen (Křupalová, 2008).

Různorodost buněk a rozměry buněčných lumenů jsou faktory ovlivňující celou škálu vlastností dřeva, například hustotu, vlhkost, pórovitost a další

charakteristiky. Zároveň je důležité brát v úvahu, že tvar a orientace buněk přispívá k anizotropii, což znamená výrazné rozdíly ve vlastnostech dřeva v různých směrech. Tato nehomogenita je klíčová při prakticky každém procesu zpracování dřeva (Gandelová, Šlezingerová, 2014).

Rozdíly na buněčné úrovni se mohou pozorovat na obrázku č. 1, konkrétně jsou jednotlivé rozdíly ukázány na mikroskopických snímcích jehličnatého modřínu a dvou listnatých dřevinách liliovníku a dubu.



Obrázek 1 Mikrofotografie prostorové struktury dřev modřín b) liliovník a c) dub (Šlezingerová, Gandelová 1994)

3.1.2 Chemická struktura dřeva

Z hlediska chemického složení je dřevo primárně složeno z uhlíku (50 %), kyslíku (35-55 %), vodíku (6 %) a dusíku (1 %). Tyto prvky se výrazně neliší mezi různými druhy dřeva. Zbylý podíl připadá na anorganické látky, zejména vápenaté soli, zjištělné například spalnou zkouškou, ve formě popelovin (Rowell, 2005).

Hydroxylové skupiny (-OH) jsou klíčové pro modifikace a lepení dřeva, protože se často vyskytují v dlouhých řetězcích biopolymerů. Tyto skupiny mohou reagovat s okolím vytvářením vodíkových můstků s lepíci materiály či se vázat s vodními parami (Gandelová, Šlezingerová, 2014).

Hlavními složkami dřevní hmoty jsou celulóza (30-55 %), hemicelulóza (20-35 %) a lignin (15-36 %). Celulóza, představující až 55 % objemu dřeva, se skládá z dlouhých makromolekulárních sacharidických řetězců organizovaných ve fibrilách. Část těchto vláken tvoří krystalickou celulózu, což představuje zhruba 70 % celulózy, zatímco zbylá část je označována jako amorfní podíl (Rowell, 2005).

Lignin, prostorově rozvětvená molekula na bázi fenylypropanových jednotek, se zaplétá mezi molekuly celulózy a hemicelulózy a tvoří s nimi fyzikální i chemické vazby a celkově posiluje pevnost molekulové struktury dřeva (Gandelová, Šlezingerová, 2014).

Hemicelulóza, která tvoří přibližně jednu třetinu objemu dřeva, se skládá z heterogenních řetězců cukernatých jednotek, jako jsou např.: pentózy (xylóza, arabinóza) a hexózy (glukóza, galaktóza). Dále ve dřevě hraje roli při udržování jeho struktury. Je zodpovědná za částečnou adhezi mezi celulózou a ligninem a může ovlivňovat i vlastnosti lepených spojů (Křupalová, 2008).

3.2 Specifikace použitých dřevin

Následující kapitola se bude věnovat konkrétním použitým dřevinám. Přiblíží a porovnají se jejich mechanické a fyzikální vlastnosti, využití v dřevozpracovatelském průmyslu a jejich možný budoucí vývoj v tomto odvětví.

3.2.1 Buk

Bukové dřevo (*Fagus silvatica* L.) je z pohledu listnatých roztroušeně pórovitých dřevin v České republice nejvíce zastoupený druh. Proto má, i vzhledem ke své poměrně homogenní struktuře, velký potenciál ve dřevozpracujícím průmyslu. Je také často používán jako referenční dřevina pro testování mechanických vlastností. Řadí se do kategorie tvrdých a středně těžkých dřevin s hodnotou hustoty 685 kg/m³. Pevnost ve smyku buku činí 12,3 MPa. Toto dřevo je méně trvanlivé a náchylné k poškození biotickými škůdci jako jsou např. houby a hmyz. Také má tendenci tvořit trhliny a bortit se během sušení. Na druhou stranu je dobře impregnovatelné, má schopnost absorbovat mořící látky a dobře reaguje na parní ošetření. Díky svým vlastnostem je bukové dřevo široce využíváno v evropském dřevařství, zejména pro výrobu ohýbaných produktů jako jsou židle a křesla, překližky, dýhy atd. Jeho charakteristickým rysem jsou výrazné dřeňové paprsky o šířce 1-5 mm na tangenciálním řezu a zřetelná zrcátka na radiálním řezu (viz obr. 2), což usnadňuje jeho rozpoznání (Gandelová, Šlezingerová, 2008).



Obrázek 2 Buk – příčný řez (Horáček, Mencl, 2019)

Z důvodu několika faktorů, jako jsou změny klimatu a kůrovcové kalamity, dochází v Evropě k tendenci diverzifikovat složení lesů a stále více se v nich prosazují listnaté dřeviny. Jedním z hlavních zástupců je právě buk. Buk zaujímá svými výbornými mechanickými vlastnostmi a poměrně snadnou dostupností díky jeho hojnému výskytu v evropských lesích. Navzdory své finanční nákladnosti, delší době růstu a vyšší náročnosti zpracování z důvodu rozměrové nestálosti roste poptávka po jeho využívání v dřevozpracujícím průmyslu. Z těchto důvodů bude buk zkoumán jako možná alternativa ke smrku při výrobě lepených konstrukcí. Díky svým signifikantním fyzikálním a mechanickým vlastnostem je ve výzkumech hojně využíván jako referenční dřevina (Konnerth a kol., 2006).

3.2.2 Smrk

Prvním a zároveň jediným zástupcem jehličnatých dřevin je smrk (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Řadí se mezi lehké dřeviny s hustotou 420 kg/m^3 a z hlediska smykové pevnosti dosahuje hodnot $5,3 \text{ MPa}$. Je málo trvanlivý a snadno podléhá biotickým škůdcům. Jednou z nejzásadnějších nevýhod je fakt, že se obtížně impregnuje. Nicméně se vyznačuje dobrou obrobiteľností a patří mezi nejužitečnější dřeviny v České republice. Jeho využití je široké, nevyjímáje stavebnictví, nábytkářství, dokonce se uplatní i při výrobě hudebních nástrojů. Smrkové dřevo je obecně světlé s mírným žlutobílým nádechem a má jemný zápach pryskyřice. Na příčném řezu je patrný pozvolný přechod mezi jarním a letním dřevem, avšak který je méně zřetelný než u jiných jehličnanů. I přesto, že má převážně homogenní strukturu typickou pro jehličnany (viz obr. 3), zvýšený obsah extraktivních látek, může při lepení způsobovat obtíže. Zejména se jedná o obsah pryskyřice (Gandelová, Šlezingerová, 2008).



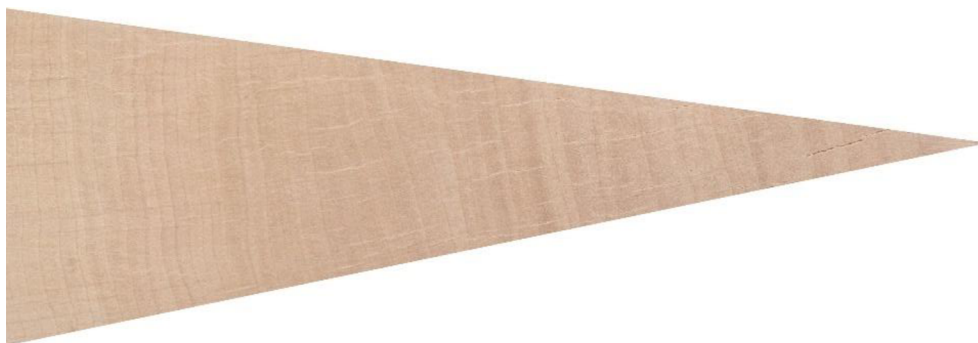
Obrázek 3 Smrk – radiální řez (Démós, 2024)

Jak už bylo řečeno, smrk je nejvytěžovanější dřevina v dřevozpracujícím průmyslu. To je zapříčiněno několika faktory. Především tím, že smrk je v Česku původní dřevina. Roste tu po tisíciletí a byl dokonale přizpůsobený zdejšímu prostředí. Také v období dvacátého století byl hojně upřednostňován před jinými dřevinami a je tedy ve velkém množství a snadno dostupný. Dále má smrk homogenní strukturu, která usnadňuje jeho zpracování. Nezanedbatelným faktorem je to, že smrk má v Česku dlouhou tradici využití. Tyto skutečnosti ze smrku činí dostupný a ekonomicky příznivý materiál. Navzdory všem těmto faktorům je aktuálně trend českých lesníků od výsadby smrku spíše ustupovat a je snaha o vyšší diverzifikaci lesních porostů tak, jak to bylo před nástupem masivního dřevařského průmyslu. Původně byly lesy na českém území převážně smíšené, avšak primárně v období dvacátého století byla upřednostňována lesní monokultura kvůli jednoduššímu hospodaření a ekonomickým výhodám (Novák, Dušek, 2014)

3.2.3 Olše

Dalším zástupcem roztroušeně pórovitých listnatých dřevin je Olše (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Olše se oproti smrku vyznačuje vyšší pevností (40 MPa). Dřevo je lehké a měkké. Olše zaujímá svojí pružností a dobrými vlastnostmi, které se týkají impregnovatelnosti, moření, sušení a opracovatelnosti. Avšak olše lehce ztrácí na poli trvanlivosti a odolnosti proti biotickým škůdcům. Podobně jako smrk má nižší hustotu kolem 530 kg/m³. V návaznosti na tento faktor při porovnání se smrkem se olše jeví jako perspektivní alternativa. Olšové dřevo se využívá k výrobě dřevotřískových desek a překližek, ale také v oborech jako je řezbářství, soustružnictví a na výrobu lodí. (Gandelová, Šlezingerová, 2008).

Z těchto důvodů byla jako další dřevina zvolena olše, jakožto možná alternativa za smrk. Navíc vzhledem k tendenci českých lesníků o vyšší diverzifikaci lesních porostů z důvodu kůrovcových kalamit a změn klimatu, budou počty smrků v tuzemských lesích nadále klesat. Zvažována byla i možnost využití topolu, avšak kvůli jeho horším vlastnostem byla nakonec upřednostněna olše. Tato dřevina si je z pohledu fyzikálních a mechanických vlastností se smrkem velmi podobná, proto se zdá jako ideální alternativa. Její největší výhodou je z pohledu dřevozpracujícího průmyslu rychlost růstu. Olše v průběhu patnácti let dokáže vyrůst až 14-20 m. Dále je vyzdvihována díky své výborné odolnosti proti vlhkosti. Nevýhodou oproti smrku může být její nižší smyková pevnost (4,4 MPa) a příslušnost k listnatým dřevinám, jelikož její kresba není tak esteticky výrazná, viz obr. 4 (DeBell, Giordano, 1994).



Obrázek 4 Olše – příčný řez (Horáček, Mencl, 2019)

3.2.4 Lepené konstrukční dřevo

Lepené konstrukční dřevo je produkt, který těží z kombinace výhod dřeva jako přírodního materiálu a kontrolované průmyslové výroby. Na rozdíl od dřevního masivu, který se vyznačuje podstatnými rozdíly fyzikálních a mechanických vlastností v důsledku několika faktorů (např. přirozeného růstu, vnějších podmínkách atd.), lepenému konstrukčnímu dřevu se daří většinu těchto nevýhod zredukovat, či úplně odstranit (Uzelac Glavinič a kol., 2020).

V současnosti se objevují požadavky na využití více druhů dřevin v rámci jednoho prvku. Využití kombinace dřevin v lepené konstrukci je primárně dáno charakteristickými mechanickými vlastnostmi, které jsou vlastní každé dřevině. Různé druhy dřeva mají své vlastní jedinečné vlastnosti. Kombinace různých druhů umožňuje strategické využití jejich individuálních silných stránek. Tento kompozitní

přístup může poskytnout lepené prvky s vynikající celkovou pevností a trvanlivostí ve srovnání s materiály z jednotlivých druhů dřeva. Začlenění různých druhů dřeva také podporuje efektivní využití dostupných zdrojů. Regionální dostupnost a udržitelné získávání různých druhů lze využít, čímž se minimalizuje odpad a optimalizuje využití zdrojů v rámci procesu výroby lepeného dřeva (Kytka a kol., 2023).

Zlepšení výrobního procesu lepeného lamelového dřeva v posledních desetiletích přispělo k rozvoji technologie lepení dřeva pro konstrukční použití. Výrobní proces lepeného lamelového dřeva zajišťuje vyšší pevnost a tuhost prvků zvýšením homogenity materiálu a odstraněním přirozených nedokonalostí dřeva, jako jsou suky, nepravidelnost struktury či mechanické poškození. Požadavky na kvalitu a spolehlivost lepeného lamelového dřeva přispěly k tomu, že se z něj stala konkurenceschopná alternativa k tradičním konstrukčním materiálům (např. železobeton, ocel atd), a to jak z hlediska ceny, tak výkonu, a podporuje jeho použití v konstrukčních dílech (De Lorenzis a kol., 2005).

Hlavní výhody lepeného konstrukčního dřeva zahrnují vysokou pevnost, vyšší tvarovou stabilitu a dobrou odolnost vůči vlhkosti a hnilobě. Dále umožňuje efektivní využití dřevní suroviny a snižuje množství odpadu. Navíc má lepené dřevo v porovnání s tradičními materiály jako je ocel nebo beton nižší ekologickou stopu a přispívá k udržitelné výrobě. Ceněné je také pro své ekonomické a estetické kvality (Ong, 2015).

Mezi nevýhody konstrukcí z lepeného dřeva patří především požadavek na jeho provedení v továrních podmínkách. Při proměnlivých teplotních a vlhkostních podmínkách panující v exteriéřním prostředí není možné zaručit odpovídající kvalitu lepených spojů. To v případě velkorozměrových trámových nebo deskových konstrukcí činí značné dodatečné náklady na dopravu, nevyjímaje logistickou náročnost věci (De Lorenzis a kol., 2005).

Své využití najde lepené dřevo především ve stavebnictví. Vzhledem ke svému výbornému poměru mezi váhou a únosností, ale také libovolnosti tvaru konstrukce, je hojně využíváno pro trámové konstrukce (Abbott, Whale, 1987).

3.3 Teorie lepení

Teorie lepení představuje základní pilíře a principy, které stojí za procesem spojování materiálů pomocí lepidel. Hlavním cílem teorie lepení je porozumění interakcím mezi lepidlem a materiálem, což umožňuje optimalizovat proces lepení a dosáhnout pevných a spolehlivých spojů. Tento text se zaměřuje na základní koncepty teorie lepení a jejich aplikace v průmyslu a výzkumu.

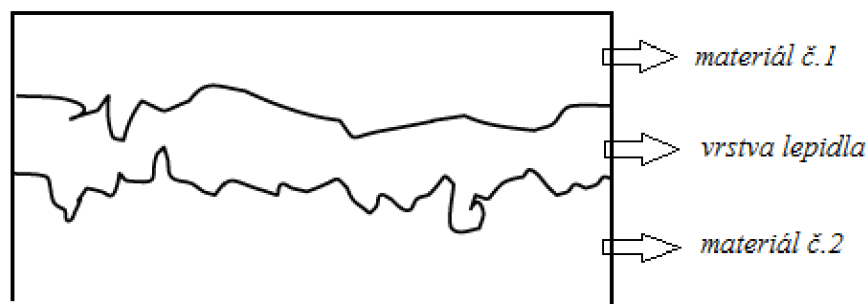
3.3.1 Základní pojmy

Spojení materiálů pomocí nekovových látek, známé jako lepení, umožňuje vytváření trvalých spojů mezi dvěma nebo více materiály bez jejich trvalého poškození. Při lepení probíhá několik chemických a fyzikálních procesů, které jsou ovlivněny fyzikálně-chemickými vlastnostmi jak použitého lepidla, tak fyzikálně-chemickými vlastnostmi spojovaného materiálu. Během procesu vzniká adheze, což je síla, jež spojuje povrchy materiálů, a je zásadní pro vytváření pevných spojů. Nedostatečná přilnavost lepidla může způsobit, že spoj není dostatečně trvanlivý a dochází k jeho rozlepení (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998).

Podklad, který je spojován lepidlem, se nazývá adherend neboli substrát. Lepidla, nazývaná adheziva, mohou být v kapalném stavu nebo se alespoň ve většině případů při působení na povrchu adherendu stávají roztavenými nebo plastickými. Základní struktura lepeného spoje se skládá minimálně ze dvou adherendů a spojovacího adhesiva. Tyto substráty mohou být ze stejného materiálu (např. dřevo a dřevo) nebo ze dvou odlišných materiálů (např. dřevo a kov). Pevnost lepeného spoje závisí nejen na přilnavosti lepidla na povrch adherendu, ale také na vnitřní soudržnosti molekul lepidla při nanášení i po vytvrnutí lepidla, která se označuje jako koheze (Stokke a kol., 2014). Lepení je využíváno nejen při spojování dřeva, ale i v mnoha dalších průmyslových odvětvích, kde se ukázalo jako nezbytné.

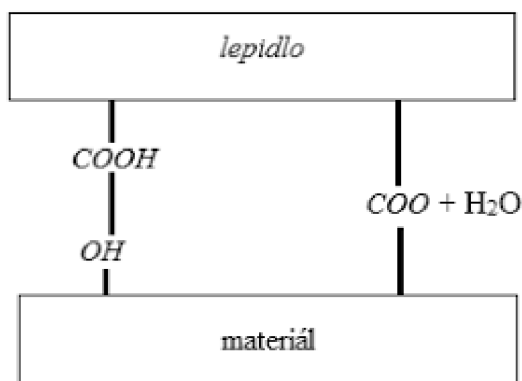
3.3.2 Mezimolekulární síly

Mezi adhezivem a adherendem rozlišujeme dva základní typy vazeb. Těmi jsou vazby mechanické (viz obr. 5) a vazby chemické. Mechanické vazby se projevují zejména u porézního a členitého povrchu, přičemž na hladkém a leštěném povrchu je tato vazba jen ve velmi malé míře (Pizzi, Mittal, 2003).



Obrázek 5 Mechanická vazba lepidla s povrchy – vznik tzv. mechanického zámku (Šmíra, 2012)

Vazba chemického charakteru (viz obr. 6) se projevuje převážně na površích, které jsou hladké a neporézní. V tomto případě mezi adhezivem a adherendem převládají takzvané van der Waalsovy síly. Nejlepší adheze je dosahována u povrchů s reaktivní strukturou, což zahrnuje oxidované materiály (kovy, oxidované plasty) a přírodní polymery (papír, dřevo, celulóza) s volnými chemickými skupinami, jako jsou -oxy, -hydroxy a další skupiny (Boublík, 1966; Král, Hrázský, 2005).



Obrázek 6 Chemická vazba lepidla s povrchem (Šmíra, 2012)

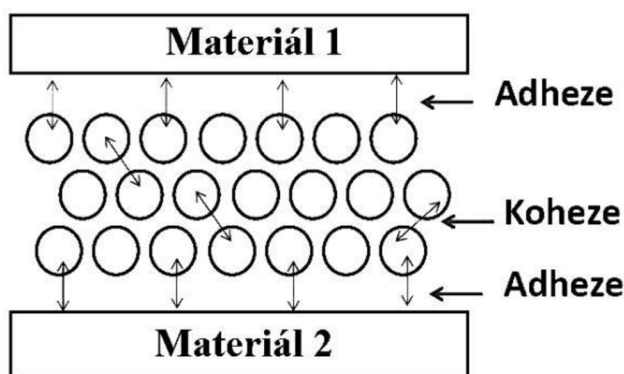
3.3.3 Adheze

Adheze představuje schopnost lepidla spojit se s povrchem materiálu, který se lepí. V případě, že lepidlo nedokáže dostatečně a pevně přilnout k povrchu, spojení nebude stabilní a může se rozlepit. Pokud se tak stane, je koheze (vnitřní soudržnost lepidla) a pevnost materiálu větší než přilnavost (adheze). Princip vzniku adhezních sil mezi lepidlem a lepeným povrchem je obvykle vysvětlován několika teoretickými modely, avšak všeobecně přijímané jsou pouze dva z nich uvedené v kapitole 3.3.2 (Liptáková, Sedliačik, 1989).

3.3.4 Koheze

Koheze v podstatě určuje vnitřní sílu vrstvy lepidla, schopnost udržet jakýkoliv předmět pohromadě díky kohezním silám. Ty vycházejí z iontových a kovalentních vazeb mezi atomy nebo dvojných vazeb mezi molekulami, propojující polymerované molekuly. Roztržení lepeného spoje ve vrstvě lepidla ukazuje, že pevnost lepeného materiálu a adheze převažují nad kohezí. Kohezní síla závisí na charakteru lepidla a na tepelném namáhání spoje. Ideálně by měla koheze lepidla být větší než u lepeného materiálu. V tomto případě by při testu pevnosti došlo k porušení v lepeném materiálu, a ne v lepidle (Osten, 1972; Pokorný, 2000).

Lepivost lepidla tvoří spoluúčinnost adheze a koheze (viz obr. 7), která je ovlivněna několika faktory, včetně povrchu a povahy lepených materiálů, struktury, pórovitosti, času tuhnutí, okolní teploty a vlhkosti, použitého rozpouštědla atd.

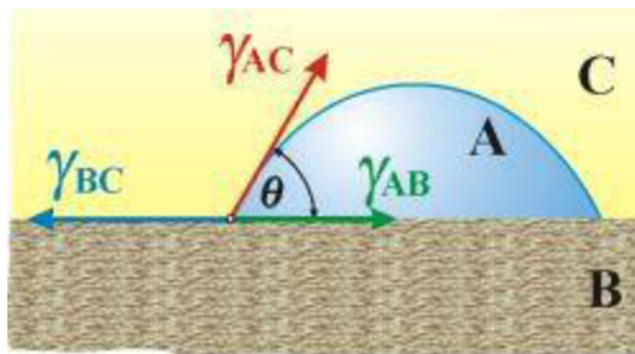


Obrázek 7 Adheze a koheze v lepeném spoji (Kotrla, 2016)

3.3.5 Smáčivost povrchu

Smáčivost se týká schopnosti kapaliny rozprostřít se na povrchu pevného materiálu. V oblasti lepení materiálů je smáčivost důležitá pro zajištění správného kontaktu mezi lepidlem a povrchem. Vysoká smáčivost umožňuje lepidlu dobře proniknout do mikroskopických struktur povrchu, což zvyšuje adhezi a vytváří pevnější spoj. Naopak, pokud má lepidlo nízkou smáčivost, může dojít k nedostatečnému kontaktu a snížení pevnosti spoje (Osten 1982).

Smáčivost je možno měřit několika způsoby. Nejčastější metodou je kapkový způsob (viz obr. 8), kdy se kapka vody (A) nanese na povrch zkušebního materiálu (B) a měří se kontaktní úhel (θ). Platí přitom Youngova rovnice (viz rovnice 1) (Bartovská, Šišková 2020).



Obrázek 8 Kapka kapaliny smáčejíci dřevěný povrch (Bartovská, Šišková, 2020)

$$\gamma_{BC} - \gamma_{AB} = \gamma_{AC} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Kde:

γ_{BC} je povrchová energie kapaliny v [J],

γ_{AB} je povrchová energie povrchu v [J],

γ_{AC} je energie styčné plochy v [J],

θ je úhel smáčení v [°].

3.4 Složení lepidel

Základními složkami lepidel jsou makromolekulární látky, které když nejsou v tekutém stavu, musejí být rozptýleny do koloidního stavu. Obvykle se k tomu používá voda nebo jiná polární kapalina, jako je aceton, alkohol apod. (Muzikář, 2008). Pro dosažení ideálních vlastností lepidel se přidávají různá aditiva. Mezi ně patří tvrdidla, plniva, regulátory tuhosti a další zušlechťovací látky, které se do lepicích směsí přidávají z ekonomických a technických důvodů (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998).

Pojiva – Pojivo v lepidle je základní složkou, která poskytuje lepidlu jeho schopnost držet materiály pohromadě. To zahrnuje různé makromolekulární látky, jako jsou syntetické polymery nebo přírodní složky, které vytvářejí strukturu a zajišťují adhezi mezi povrchy, které se mají spojit (Trávník, 2005).

Stabilizátory – Jsou látky, uchovávající vlastnosti lepidel během skladování a zpracování. Zároveň zachovávají vlastnosti lepidel během používání (Liptáková, Sedliačik, 1989).

Tvrdidla – Jedná se 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. Do lepicích směsí se nejčastěji přidávají ve formě roztoku nebo prášku, a to vždy těsně před použitím lepidla (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998).

Plniva – Plniva jsou jednou ze složek lepidel, která má za úkol zlepšit nebo modifikovat vlastnosti lepidla. Jsou to často tuhé látky v podobě prášku, které se přidávají do lepidel především z důvodu úspory drahých surovin, snížení pnutí ve vytvrzeném stavu a zlevnění lepidla. Dále snižují viskozitu lepicí směsi, čímž zabraňují vsakování se do dřevní struktury. Mezi další vlastnosti, které plniva ovlivňují, patří smršťování lepidel, kdy zabraňují vzniku nežádoucích napětí v lepené spáře (Sedliačik, 1992).

Rozpouštědla – V případě, že lepicí směs neposkytuje dostatečnou tvárnost a použitelnost při jejím zpracování, přidávají se tzv. rozpouštědla. Jde o kapaliny nebo směsi kapalin, které zajišťují rozpouštění nebo zředění pojiva. Primárně mají vliv na viskozitu lepicích směsí (Muzikář, 2008).

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

Nastavovadla – Přidávání nastavovadel a plniv je běžné a ekonomicky výhodné. Jejich hlavní odlišnost od plniv spočívá v jejich schopnosti lepení a přilnutí k povrchům. Pokud však tato aditiva nejsou přidána ve správném poměru, může dojít ke snížení pevnosti a odolnosti lepeného spoje vůči vlhkosti. Jako nejlevnější nastavovadlo slouží vzduch, který „zjemní“ lepicí směs, což umožňuje aplikaci tenčí vrstvy lepidla. Tento postup přináší výhodu nižšího obsahu vody a snižuje množství naneseného lepidla, čímž se minimalizuje pronikání lepidla na povrch např. dýhovaných materiálů (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998; Trávník, 2005).

Zušlechťující látky – Zlepšují vlastnosti lepeného spoje. Těmito látkami jsou například vosk, parafín nebo asfalt, které disponují hydrofobními vlastnostmi. Taktéž je možné využít přísady, které zvyšují odolnost vůči teplotě a vodě a současně vážou volný formaldehyd např. fenol, melamin, resorcinol (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998; Trávník, 2005).

3.5 Typy lepených spojů

Existuje široká škála lepených spojů, ale v rámci měření je použitelný pouze jeden – dokonalý spoj. Ostatní typy vznikají při nedodržení předepsaných postupů a je potřeba se jim vyvarovat. Na následujících řádcích je uvedeno, jaké další typy lepených spojů existují a jaké chyby při jejich konstrukci mohou nastat.

Dokonalý spoj – Lepené plochy k sobě těsně přiléhají. Vytvrzené lepidlo vytváří v mezeře mezi spojenými částmi tenký, rovnoměrný a homogenní film. K roztržení tohoto spoje je potřeba vynaložit velkou sílu. Při trhávání vzniká porušení lepeného spoje zpravidla ve dřevě (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998).

Rozlepený spoj – Spoj je částečně nebo po celé lepené ploše volný. Z boků jsou jasně patrné spáry či vzduchové mezery mezi materiály. Tento stav může být zapříčiněn následujícími faktory:

- nedostatečné opracování lepených povrchů a tím nedojde k dostatečnému doléhání,
- malý lisovací tlak,
- velké napětí v lepeném výrobku, příčinou může být nesprávná vlhkost dřeva,
- nerovnoměrný nebo v některých místech chybějící nános lepidla,
- předčasně vytvrzená vrstva lepidla před zalisováním lepených částí,
- nedokonalé vytvrzení lepidla v lepeném spoji,
- porušení dřeva v okolí lepeného spoje (Eisner a kol., 1966).

Chudý spoj – Při pohledu na spoj nejsou zjevně viditelná místa, kde by došlo k rozlepení. Na porušení spoje je však potřeba pouze malá síla a okolní dřevo zůstává neporušeno. V lepeném spoji chybí kontinuální film lepidla, protože se vsákl do povrchu lepeného materiálu. Důvodem vzniku takového spoje může být:

- příliš velká vlhkost a pórovitost lepeného dřeva,
- nadměrná viskozita použitého lepidla,
- nedostatečný nános lepidla,
- příliš velký lisovací tlak, který způsobil zatlačení lepidla do dřeva nebo bylo lepidlo vytlačeno mimo lepený spoj,
- příliš pomalé vytvrzování lepidla v lepeném spoji (Eisner a kol., 1966; Muzikář, 2008).

Nezakotvený spoj – Spoj je nedostatečně pevný a při násilném roztržení se sice objevuje kontinuální film lepidla, ale není však pevně přilnutý k lepeným plochám. Příčinou může být:

- znečištěním lepeného povrchu mastnotou nebo prachem,
- malá vlhkost lepeného dřeva,
- příliš vysoká viskozita lepidla nebo lepicí směsi,
- předčasné, úplné nebo částečné vytvrzení vrstvy lepidla při jednostranném nanášení lepidla (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998).

Zmrzlý spoj – Spoj má nedostatečnou pevnost. Při násilném rozdělení se na jedné z lepených ploch objeví souvislý film lepidla, zatímco druhá lepená plocha zůstává téměř čistá, bez viditelného lepidla. Příčina může spočívat v:

- příliš malé vlhkosti lepeného dřeva,
- předčasného vytvrzení vrstvy lepidla, ještě před zalisováním,
- příliš rychlé vytvrzení použitého lepidla nebo lepicí směsi (Eisner a kol., 1966).

Zrnitý spoj – Spoj má nedostatečnou pevnost. Po rozlepení je vytvrzený film lepidla krupicovité struktury. Tato situace může být zapříčiněna následujícími důvody:

- málo rozpuštěné práškové lepidlo,
- velký obsah nastavovala nebo plniva v lepené směsi, nedokonalé promíchání lepicí směsi,
- nesprávné nastavovalo, které brání vsáknutí lepidla do dřeva,
- příliš velká vlhkost lepeného dřeva, které způsobuje vysrážení lepidla v roztoku (Muzikář, 2008).

Zdánlivě pevný spoj – Lepený spoj má nedostatečnou pevnost a při rozlepení se dřevo porušuje v blízkosti vytvrzeného filmu. Na filmu lepidla zůstává souvislá vrstva dřevních vláken. Tento jev může být zapříčiněn následujícími faktory:

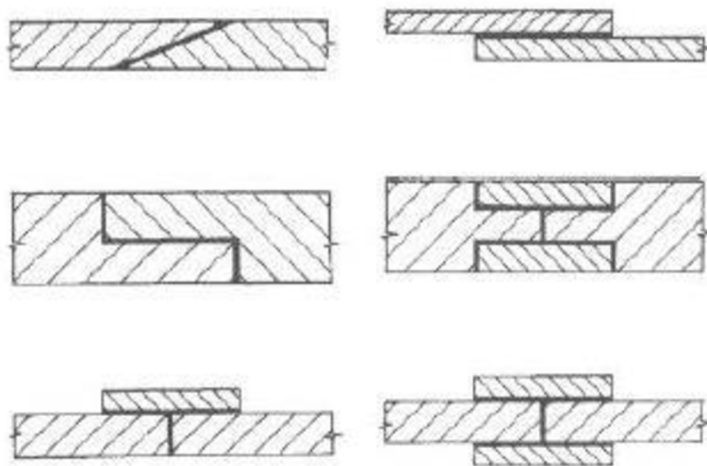
- nevhodné opracování lepeného povrchu, kterým se porušila pevnost povrchových vrstev dřeva,
- malá pevnost lepeného dřeva v důsledku napadení dřeva hnilobou, dřevokaznými houbami,
- narušení pevnosti dřeva lepidlem nebo některými jeho složkami (Sedliačik M., Sedliačik J., 1998).

Další vady – V praxi se lze setkat s chybným lepením různých druhů materiálů s rozdílnou vlhkostí, s nerovnostmi lepených povrchů, se špatnou volbou lepidla atd. (Eisner a kol., 1966).

3.6 Konstrukce lepeného spoje

Lepené spoje jsou vystaveny velké řadě mechanických namáhání, jako je namáhání v tahu, tlaku a smyku, dále rázové pevnosti, pevnosti v kroucení či odlupování částí spoje. Odolat veškerým namáháním je pro spoj náročné, proto je žádoucí najít vhodnou geometrii lepeného spoje a eliminovat tím namáhání spoje v kroucení a odlupování, jelikož těmto spoj nejmeně odolává (Osten, 1982).

Pro vytvoření pevného spoje musí být stykovaná plocha co největší. Její zvětšení můžeme dosáhnout pomocí styčných desek, zkosení styčných ploch nebo pomocí vhodného tvarování styčného prvku. Příklady možného spojení jsou naznačeny na obr. 9.



Obrázek 9 Příklady geometrie lepených spojů (Konvičková, 2014)

Optimálních hodnot mechanické pevnosti lze dosáhnout u spojů přeplátovaných, tedy u spojů s jednostrannou či oboustrannou příložkou nebo vytvořením spoje s geometricky upravovanými styčnými plochami. Obecně se ovšem, z technologického hlediska, musí dbát na co nejmeně členěné dotykové plochy lepených materiálů (Folta, 2008).

3.7 Faktory ovlivňující lepené spoje

Lepení je proces spojování materiálů a je závislé na mnoha proměnných, které mohou výrazně ovlivnit výslednou kvalitu a sílu spoje. Jedním z důležitých faktorů je povrch samotných materiálů, které se mají spojit. Povrchová struktura a jeho vlastnosti jsou zásadní pro smáčivost lepidla a jeho adhezní vlastnosti. Čistota povrchu je také kritická, protože přítomnost nečistot nebo mastnoty může negativně ovlivnit přilnavost lepidla. Okolní prostředí hraje také důležitou roli. Teplota a vlhkost mohou mít vliv na vlastnosti lepidla a proces vytvrzování (Osten, 1982).

Dále je podstatné vzít v úvahu i technologické parametry. Tlak a doba lisování, jsou důležité pro dosažení pevného a spolehlivého spoje. Optimální tlak pomáhá zajistit rovnoměrné rozprostření lepidla a odstranění vzduchových bublin. Naopak nadměrný tlak může narušit molekulární síly lepidla a snížit jeho účinnost (Drobný, 2016).

V neposlední řadě je důležité vzít v úvahu vlastnosti samotného lepidla. Lepidlo by mělo být vhodně zvoleno pro konkrétní materiály, které se mají spojit, a mělo by být upraveno pro optimální adhezi a vytvrzování. Úpravy lepidla mohou změnit jeho viskozitu, což je důležité pro správné smáčení povrchů a vytváření kvalitního spoje. Výběr vhodných parametrů a pečlivé zohlednění těchto faktorů při procesu lepení jsou klíčové pro dosažení stabilních a odolných spojů, které vyhovují specifickým potřebám dané aplikace (Křupalová, 2008).

3.7.1 Faktory vztahující se k lepidlu

Chemické složení lepidel – Lepidla, buďto přírodního původu nebo synteticky vytvořená, představují filmotvorné makromolekulární látky, které obsahují aktivní skupiny. Nejběžnějšími z těchto aktivních skupin jsou -OH, -NH₂ a -COOH skupiny. Tyto skupiny mají významný vliv na adhezi k povrchu materiálu. Makromolekuly s lineární strukturou vytvářejí termoplastický film, který se snadno rozpouští v organických rozpouštědlech a výjimečně i ve vodě. Naopak trojrozměrné makromolekuly, jako například močovinové, epoxidové a polyuretanové pryskyřice, vytvářejí nerozpustný, teplem netavitelný film (Osten, 1982).

Délka těchto makromolekul ovlivňuje viskozitu roztoku a schopnost lepidla přilnout k povrchu materiálu. Čím jsou makromolekuly delší, tím je roztok lepidla viskozitnější a lepidlo má nižší schopnost přilnutí k materiálu. Pro správnou funkčnost lepidla ve spoji je důležité, aby v něm byly zastoupeny jak nízkomolekulární, tak vysokomolekulární prvky (Trávník, 2005).

Princip vytvrzování – Vytvrzování adheziva může být rozděleno do dvou hlavních kategorií. První zahrnuje chemickou reakci, jako je smíchání dvou složek, reakce se vzdušnou vlhkostí nebo UV zářením. Z chemického hlediska lze dále vytvrzování rozčlenit na různé procesy, jako je polymerace (sloučení molekul jedné látky), polykondenzace (tvorba prostorových makromolekul ze dvou látek s odštěpováním vody během reakce) a polyadice (spojení molekul za vzniku prostorových makromolekul). Druhý přístup vychází z fyzikálních vlastností, jako je odpařování rozpouštědla v lepidle nebo absorpce lepidla. Výběr lepidla pro konkrétní použití závisí na materiálu, který má být spojen (Křupalová, 2008; Drobný, 2016).

Příprava lepidla – Správná příprava lepidel je podstatným faktorem pro vytváření pevných a spolehlivých lepených spojů. Zahrnuje pečlivé dodržování správných poměrů jednotlivých složek, jako jsou ředidla, tvrdidla a další přísady. Nesprávný poměr složek může mít za následek změnu viskozity, adheze a výsledných mechanických vlastností lepidla, což může negativně ovlivnit pevnost spoje. Rovněž je důležité dodržovat stanovené technologické postupy a časy výroby. Každá složka má individuální časovou potřebu na reakci s ostatními složkami (Tesařová, 2012).

Množství použitého lepidla – Množství aplikovaného lepidla má vliv na tloušťku vytvořeného lepidlového filmu a tím i na pevnost spoje. Nanesení příliš malého množství lepidla může však vést ke vzniku tzv. chudého spoje, kdy aplikované množství nestačí na vytvoření souvislého filmu. Naopak, příliš velké množství lepidla může vést k destrukci spoje, kdy lepidlo přebytně zasychá a následně se drobí, což má za následek snížení pevnosti spoje. Tloušťka filmu by se po vytvrzení měla pohybovat okolo 0,05 až 0,2 mm v závislosti na použitém adhezivu. Při použití větší tloušťky filmu lepidla se do spáry mohou vložit tzv. distanční drátky, které zabráňují vytlačování lepidla z lepené spáry. Optimální množství nánosu je závislé na opracování povrchu, schopnosti dřeviny vsáknout lepidlo, konzistenci a obsahu sušiny (Trávník, 2005).

Viskozita – Lepidlo s vysokou viskozitou nedostatečně proniká do lepeného materiálu, je husté a špatně se roztírá, což omezuje jeho přilnavost. Naopak lepidlo s nízkou viskozitou je řídké, příliš se vsakuje do dřeva a nedokáže vytvořit dostatečný film lepidla. Regulace viskozity je možná změnou koncentrace sušiny. Přidáním sušiny lze lepidlo zahustit, nebo v případě potřeby lepidla s menší viskozitou lepidlo zředit. Pokud nejsou dodrženy požadavky na viskozitu lepidla, mohou se objevit vady v lepených spojích, což negativně ovlivňuje jejich další vlastnosti (Osten, 1972; Kamenický, Rizmanová, 1989).

Reologie lepidla – Reologii lepidel lze rozdělit do dvou skupin, a to na reologii při nanášení a reologii při vytvrzování. V případě nanášení lepidla se preferuje vyšší viskozita, která zajišťuje lepší vyplnění lepící spáry a tím pádem vyšší kvalitu lepeného spoje. Důležitou roli v udržení lepidla v této spáře hrají plniva a nastavovadla. V průběhu procesu vytvrzování dochází ke zvýšení viskozity, koheze a zesíťování molekul lepidla (Tesařová, 2012).

Z pohledu reologie při vytvrzování můžeme vlivem vlhkosti pozorovat tok a deformace materiálu. Hlavním jevem je expanze lepidlového filmu, a současně je třeba brát zřetel na vznik vnitřního pnutí. Z důvodu tohoto pnutí dochází k oddělení lepidlového filmu od lepeného materiálu. Během procesu vytvrzování prochází lepidla změnou skupenství z kapalného stavu do podoby gelu (Osten, 1982).

3.7.2 Faktory vztahující se k lepenému materiálu

Chemické složení – Dřevo se složením liší mezi druhy, jednotlivými stromy v rámci stejného druhu, dokonce i uvnitř samostatných stromů. Hlavní složky představují celulóza, hemicelulóza a lignin. Při lepení hraje důležitou roli polární charakter celulózy a hemicelulózy, který je důležitý pro přilnavost k polárním lepidlům díky hydroxylovým skupinám. Obsah extraktivních látek ve dřevě, jako jsou pryskyřice, třísloviny a vosky, má rovněž významný vliv. Tyto látky snižují schopnost povrchu dřeva smáčet se, což může negativně ovlivnit kvalitu lepených spojů. Tvrdá dřeva obsahují více extraktivních látek než dřeva měkká. Rozdíl mezi lepícími vlastnostmi bělového a jádrového dřeva může být u řady dřev rozdílné, patrně kvůli povaze a množství extraktivních látek obsažených v jádrovém dřevu (Custódio a kol., 2009).

Adhezivum by nemělo poškozovat okolní dřevo. Silně kyselá lepidla, jako je fenolické lepidlo, mohou narušovat okolní dřevo díky obsahu silně kyselých tvrdidel a snižovat tak jeho pevnost. Alkalická lepidla mohou reagovat s tříslovinami a dalšími látkami ve dřevě, čímž mohou zbarvit dřevo. Například roztoky železitých solí mohou dřevo zbarvit do tmavě modrých nebo fialových odstínů i při nízkých koncentracích (Drápela a kol., 1980; Uhlíř, 1997; Muzikář, 2008).

Struktura povrchu – V první řadě je důležitá čistota lepených materiálů. Další podmínkou je co nejvyšší styk lepených materiálů. To je umožněno opracováním lepených materiálů broušením, frézováním atd. Nejvíce využívanou metodou pro povrchové úpravy dřevin je hoblování. Na strukturu lepicí plochy mají vliv především dva faktory. Prvním je druh dřeva a druhým je kvalita a druh opracování (Knorz a kol., 2015).

Nedílnou součástí jsou také vady dřevní suroviny. Vady, které se objevují v průběhu růstu stromů, jako jsou například suky, mohou ovlivnit vlastnosti dřeva. V případě, že jsou suky odstraněny a dřevěné části spojeny, je spoj obvykle poměrně pevný. Negativní dopad růstových vlastností lze do velké míry odstranit výběrem dílců s co nejmenším počtem růstových vad (Zeidler 2011).

Vlhkost podkladu – Vlhkost lepeného podkladu hraje důležitou roli v procesu lepení a ovlivňuje rychlost difúze rozpouštědla nebo vody a tím i rychlost vytvrzování lepidla. Pro dosažení optimálního a kvalitního spoje je důležité dodržovat správnou vlhkost podkladu. Ideální vlhkost pro lepení se pohybuje v rozmezí 8 ± 2 %. Maximální hodnota vlhkosti lepeného materiálu by neměla přesahovat 12 %. Pokud je vlhkost příliš vysoká, vstřebávání rozpouštědla do materiálu se snižuje, čímž se zpomaluje proces vytvrzování. V extrémních případech může dojít i k jeho úplnému zastavení. Dalším problémem, který se může vyskytnout při vysoké vlhkosti, je nedostatečně rychlé odpařování vody. V takovém případě chemický proces vytvrzování lepidla předběhne fyzikální proces odpařování vody a voda tak zůstane uvnitř lepeného spoje (Trávník, 2005).

Naopak nízká vlhkost zapříčiňuje příliš rychlou difúzi rozpouštědla. To může vést k jeho předčasnému vytvrzení, a to ještě před jeho rovnoměrným rozprostřením po povrchu. Následkem je nerovnoměrný film lepidla a s tím spojené snížení kvality spoje. Je důležité dosáhnout vyváženého stavu, aby chemický proces vytvrzování nebyl ovlivněn fyzikálními procesy (Knorz a kol., 2015).

3.7.3 Faktory vztahující se k technologickým podmínkám

Lisovací tlak – Jedním z hlavních vlivů lisovacího tlaku je zajištění těsného kontaktu mezi lepenými povrchy. Čím vyšší je tlak, tím lépe se lepidlo rozprostře mezi povrchy a vyplní jakékoliv mikroskopické mezery. To vede k většímu kontaktu mezi lepenými materiály a zlepšuje adhezi mezi nimi, což přispívá ke zvýšení pevnosti spoje. Dalším aspektem lisovacího tlaku je jeho vliv na odstranění vzduchových bublin uvnitř lepeného spoje. Při aplikaci tlaku jsou tyto bubliny v lepidle stlačeny nebo vytlačeny ven, což snižuje množství vad spojených s těmito elementy a zlepšuje celkovou homogenitu spoje (Eisner a kol., 1966).

Nicméně extrémně vysoký tlak může mít také negativní dopad na pevnost spoje. Při nadměrném lisovacím tlaku může dojít k vytlačování lepidla z mezer mezi materiály, což snižuje množství lepidla ve spoji a tím i jeho pevnost. Také může způsobit deformace materiálů a vést k poruchám v jejich struktuře (Adams a kol., 2011). Lisovací tlak je tedy podstatným faktorem, který je třeba pečlivě kontrolovat při vytváření lepených spojů. Optimální tlak závisí na specifických vlastnostech lepidla a lepených materiálů a pečlivé nastavení tohoto parametru může významně ovlivnit kvalitu výsledného spoje, viz Tabulka 1 (Pizzi, Mittal, 2003).

Tabulka 1 Spotřeba lepidel a určení lisovacího tlaku při lepení (Uhlíř, 1997)

Způsob lepení, druh lepeného výrobku	Druh lepidla	Nános lepidla nebo směsi [g/m²]	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

Čas a teplota lisování – Vyšší teplota lisování může výrazně zkrátit dobu, během které dochází k lisování materiálů, viz obr. 10. To je patrné například u močovinných lepidel, která umožňují zkrácení lisovacích časů až na 20 vteřin. V praxi se rozlišují tři základní druhy lepení:

- Lepení za studena – kdy teplota v lepené spáře je mezi 15 až 30 °C,
- Lepení za tepla - 30 až 100 °C,
- Lepení za zvýšených teplot – nad 100 °C (Trávník a Svoboda, 2007).

Nejčastěji používaným typem ohřevu je kontaktní ohřev, který nabízí minimální ztráty energie a umožňuje rychlé prohřátí tenkých materiálů. Na rozdíl od tohoto principu fungují tavná nebo glutinová lepidla, která rychleji vytvrzují při snížené teplotě (Trávník, 2005). Celková doba lisování je dána vztahem v rovnici 2:

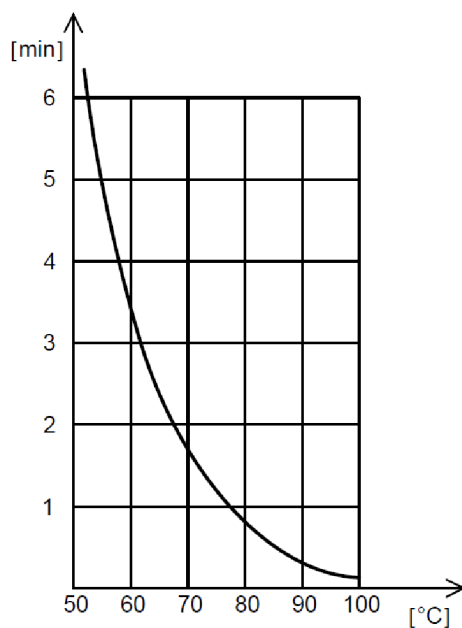
$$t = t_p + t_k \quad (2)$$

Kde:

T je celková doba lisování v [s],

t_p je doba potřebná k prohřátí lisované vrstvy v [s],

t_k je doba potřebná k vytvrzení lepicí směsi v [s].



Obrázek 10 Závislost času vytvrzování t [min] na teplotě T [°C] (Trávník, 2005)

Příliš vysoká teplota a delší doba lisování mohou vést k degradaci jak dřeva, tak i samotného lepeného spoje. Přehřáté lepidlo ztrácí na pevnosti a stává se křehkým. U některých lepidel tak nastává při teplotě spáry nad 140 °C (např. močovino-formaldehydových), u fenol-formaldehydových nad 180 °C nastává částečný rozklad, projevující se zřetelným poklesem pevnosti (Eisner a kol., 1966).

Významný vliv na dobu a teplotu lisování má také tloušťka. Dřevo, díky své nízké tepelné vodivosti ($\lambda = 0,1 - 0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), funguje jako dobrý izolant (Eisner a kol., 1966; Trávník, 2005; Trávník a Svoboda, 2007).

3.8 Rozdělení lepidel

Lepidla představují širokou a chemicky rozmanitou skupinu zahrnující jak organické, tak anorganické látky, což vedlo k jejich klasifikaci do různých kategorií. Avšak i přes toto rozdělení, podle různých kritérií, nedokáží plně zachytit všechny specifické vlastnosti jednotlivých lepidel.

3.8.1 Rozdělení podle původu

1. Lepidla z přírodních zdrojů

1.1 Lepidla živočišného původu

Mezi lepidla tohoto druhu se zahrnují albuminové klihy, rybí klihy, kaseinové klihy, kostní a kožní glutinové klihy atd.

1.2 Lepidla rostlinného původu

Do této skupiny lepidel patří přírodní kaučuky, přírodní pryskyřice, rostlinné slizy a gummy, deriváty celulózy, škroby, mouky, pektiny, algináty atd.

1.3 Lepidla minerálního původu

Příklady tohoto zařazení jsou asfalt, cement, sádra, vodní sklo atd.

2. Syntetická lepidla

2.1 Termoreaktivní (termosetická, reaktoplastická)

2.1.1 Polyadiční

Do této skupiny patří polyestery, polyuretany, epoxidy atd.

2.1.2 Polykondenzační

Sem se řadí močovinoformaldehydy, fenolformaldehydy, melaminformaldehydy, resorcinol-fenolformaldehydy atd.

2.2 Termoplastická

2.2.1 Roztoková

Mezi lepidla tohoto zařazení patří polyvinylchloridy, polyvinylacetáty, kaučuky, chloropreny atd.

2.2.2 Disperzní vodou ředitelná lepidla

V této skupině se objevují polyvinylacetáty, kopolymery, akryláty atd.

2.2.3 Tavná

Zástupci tohoto druhu jsou ethylvinylacetáty, polyamidy atd.

2.3 Dvousložková

Do této skupiny lepidel se zahrnují epoxidy, lepidla na bázi izokyanátů nebo polyuretanů.

2.4 Polysyntetická

Sem se řadí hlavně lepidla na bázi derivátů celulózy.

2.5 Ostatní

Mezi zbylá lepidla bez určitého zařazení pokládáme lepidla vteřinová, lepidla tmelivá, tlakocitlivá a lepidla vytvrzující pomocí infračerveného, mikrovlnného a UV záření (Boublík, 1966).

3.8.2 Rozdělení podle charakteru vytvrzení

1. Vratné

Vlivem rozpouštědla je možné je opět rozpustit. Kožní a kostní kliehy.

2. Nevratné

Syntetické a minerální pojiva (Liptáková, Sedliačik, 1989).

3.8.3 Rozdělení podle teploty při zpracování

1. Lepidla zpracovaná za studena

Pod 30 °C, montážní lepidla

2. Za zvýšené teploty

30 až 100 °C, lepidla na aglomerované materiály

3. Za horka

Nad 100 °C (Liptáková, Sedliačik, 1989)

3.8.4 Rozdělení podle fyzikálního stavu (formy)

- 1. Prášková**
- 2. Tekutá**
- 3. Pastová**
- 4. Fólie**
- 5. Pěnová**
- 6. Perličky** (Boublík, 1966)

3.8.5 Rozdělení podle způsobu vytvrzení spoje

- 1. Odpaření rozpouštědla**
- 2. Oddifundování rozpouštědla**
- 3. Chemická reakce**

Podněcená reakcí katalyzátorem, teplem nebo jejich kombinací.

- 4. Změna skupenství**

Tavná lepidla

- 5. Působením tepla, vzdušné vlhkosti atd**

- 6. Zářením**

Infračervené, mikrovlnné a UV

- 7. Tlakem**

Tlakocitlivá lepidla (Tesařová a kol., 2014)

3.8.6 Rozdělení podle dalších znaků

- 1. Podle lepeného materiálu**

Dřevo, kov, keramika, textil atd.

- 2. Podle prostředí**

Interiér, exteriér

- 3. Podle oboru použití**

Čalounický, nábytkářský atd.

- 4. Podle místa použití**

Montážní, dýchovací atd.

- 5. Podle rychlosti zasychání**

Vteřinová lepidla atd.

- 6. Podle vlastnosti lepeného spoje**

Konstrukční lepidla atd. (Muzikář, 2008)

3.8.7 Rozdělení podle vodovzdornosti

1. Vysoce vodovzdorná

Odolávající jak studené a vroucí vodě, tak i páře, např.: PF lepidla.

2. Vodovzdorná

Odolávající studené vodě.

3. Nevodovzdorná (Sedliačik, 1992)

3.9 Specifikace použitých lepidel

V následující kapitole se blíže rozebere téma, ve kterém budou hrát primární roli použitá lepidla a jejich konkrétní specifikace a odlišnosti.

3.9.1 Polyuretanová lepidla

Polyuretanová lepidla (PUR) jsou jedno nebo dvousložkové sloučeniny. Jednou složkou je vždy izokyanát. Dvousložková polyuretanová lepidla byla vytvořena v 20. století v Německu. Vznikla na základě chemické reakce mezi vícesytnými alkoholy neboli polyoly s vícefunkčními izokyanáty. V dnešní době se z důvodu zjednodušení a zrychlení práce používají více polyuretanová lepidla jednosložková. Výroba spočívala v reakci polyolu s nadbytkem izokyanátu. V pryskyřici zůstávaly nezreagované izokyanátové skupiny, které reagují s vodou, alkoholy, kyselinami a dalšími chemikáliemi obsahující tzv. aktivní vodík, v jejichž reakci se opakuje skupina –NH – CO – O – (Černá, Gregor, 1989; Rowel, 2005).

Patří mezi termoreaktivní, konkrétně polyadiční lepidla. Mezi přednosti polyuretanových lepidel patří jejich vysoká pevnost, nerozpustnost a pružnost spojů. Tyto spoje odolávají dynamickému zatížení, vlhkosti a povětrnostním vlivům. Polyuretanová lepidla se vyznačují také rychlým vytvrzováním a mají vysokou smykovou pevnost až 23 MPa. Při lepení se používá měrný tlak v rozmezí 0,1 až 0,3 MPa. Tepelná odolnost spojů dosahuje až 170 °C. Tyto lepidla lze zpracovávat při různých teplotách, včetně nízkých hodnot kolem 0 °C. Jejich vysoká pevnost, pružnost, odolnost a okamžitá únosnost se využívá i při stavbě letadel (Sedliačik M., Sedliačik J. 1998; Tesařová a kol., 2014; Kytka, 2019).

Nevýhodou polyuretanových lepidel je obsah izokyanátů, které mohou nepříznivě reagovat při použití rozpouštědel obsahujících alkohol a vodu. Tato reakce může způsobit poškození očí, dýchacích cest a vyvolat alergické reakce. Proto se v oblasti technických opatření a ochrany pracovního prostředí usiluje o redukci nebo nahrazení izokyanátových složek v polyuretanových lepidlech. Jednou z nadějných alternativ jsou cyklické uhličitany (Leitsh a kol., 2016; Kytka, 2019).

V průmyslových provozech se jednosložkové polyuretany často používají k montáži dřevěných lepených konstrukcí, ale pro aplikaci na místě nejsou vhodné. Při jejich aplikaci se totiž uvnitř husté vrstvy lepidla vytvářejí plynové bublinky, což vede ke snížení pevnosti lepeného spoje (Pizzo a Smedley 2015).

V roce 2013 činila polyuretanová lepidla až 5 % celosvětové produkce lepidel. Také má širokou průmyslovou použitelnost, od lepení DTD po konstrukci lepených lamelových konstrukcí (glulam, BSH). V případě konstrukčního použití (glulam), se již nyní využívá polyuretanové lepidlo v 35 % případů (Leitsh a kol., 2016).

3.9.2 Resorcinol-fenolformaldehdydová lepidla

Resorcinol-fenolformaldehdydová (RPF) lepidla pro lepení za studena se používají především při výrobě konstrukčních lepených spojů pro použití v exteriéru. Vytvářejí spoje nejen s vysokou pevností, ale také s vynikající odolností proti vodě a povětrnostním vlivům při vystavení mnoha klimatickým podmínkám. RPF lepidla se připravují především štěpením resorcinolu na aktivní methylové skupiny nízkokondenzačních pryskyřic získaných reakcí fenolu s formaldehydem. Resorcinol je chemickou látkou, která dává těmto lepidlům jejich charakteristické chování při tuhnutí za studena. Po přidání tvrdidla zajišťuje zrychlené a zlepšené zesíťování pryskyřic, při čem je chemickou reakcí štěpen resorcinol. Vzniklá pryskyřice vytvrzuje 16 až 24 hodin při pokojové teplotě. Celosvětově se více než 90 % resorcinových lepidel nanáší za studena (Pizzi, Mittal, 2003).

Resorcinol je drahá chemická látka, která se vyrábí především ve Spojených státech, Německu a Japonsku. Jeho vysoká cena je stěžejním faktorem určující konečnou cenu RPF lepidel. Z tohoto důvodu je historie RPF pryskyřic z nutnosti úzce spjata s hledáním možností snížení obsahu resorcinolu, aniž by došlo ke ztrátě

lepících vlastností. V uplynulých desetiletích bylo dosaženo významného snížení obsahu resorcinolu v RPF lepidlech. V současné době se hmotnostní podíl resorcinolu v tekutých pryskyřicích pohybuje v rozmezí 15 až 18 % (Frihart, 2012).

Krokem vpřed byl také vývoj a komercializace systému rychlého tuhnutí "honeymoon", který se skládá buď pouze ze syntetických RPF pryskyřic, nebo z RPF pryskyřice ve spojení s použitím taninových extraktů, které se v některých zemích používají k získání RPF s obsahem 8 až 9 % resorcinolu bez ztráty vlastností a s některými dalšími výhodami (např. lepení dřeva s vysokou vlhkostí). Jednalo se o systémové zlepšení, nikoli o pokrok v základním složení RPF pryskyřic. V průmyslu se jeho využitelnost pohybuje okolo 9 % všech lepených konstrukcí (Pizzi, Mittal, 2003), což je zapříčiněno zmíněnou vyšší cenou oproti jiným více využívaným alternativám.

3.9.3 Emulgovaná polymerovaná izokyanátová lepidla

Adhezivní systémy na bázi emulgovaných polymerovaných izokyanátů (EPI) se v Japonsku používají od počátku 70. let minulého století. EPI byl popsán v japonské průmyslové normě JIS K6806 v roce 1985 a od té doby se používá pro stavební účely. Evropští výrobci lepených konstrukcí pro Japonsko začali používat EPI pro vývoz a vznikla poptávka po EPI schváleném pro evropský trh. Japonské normy nepožadují vlastnosti vyplňování mezer a systémy používané pro Japonsko nesplňují v tomto ohledu evropské požadavky (Grøstad, Bredesen, 2014).

Lepidla EPI jsou rychle tuhnoucí a vytvrzující za studena. Vytvářejí světlý transparentní film lepidla. Proces vytvrzování je kombinací tvorby filmu, což je fyzikální proces, a chemických reakcí izokyanátu. Lepicí systémy lze optimalizovat pro různé aplikace změnou složení, ale obecně mají tyto systémy velmi dobrou přilnavost, velmi dobře lepí dřevo, ale zároveň je možnost využití i lepení kov na dřevo (Guo a kol., 2018). Prvním systémem EPI schváleným pro lepené lamelové dřevo pro Evropu byl Prefere 6151/6651 v roce 2005. První evropská norma pro EPI lepidla, EN 16254, byla zavedena v roce 2013. Kromě asijských zemí jsou EPI lepidla velice rozšířena v Rusku, kde se používají pro různé účely např. u objektů, kde se neustále mění povětrnostní podmínky, k lepení nábytku a v lodním průmyslu (ne však v částech, které jsou pod hladinou vody) (Grøstad, Bredesen, 2014).

4 Metodika

Tato kapitola se zabývá podrobným popisem postupu získávání empirických dat. Průběh měření je možno rozdělit do několika kroků:

- 1) Výběr materiálu
- 2) Výběr lepidel
- 3) Výroba zkušebních těles
- 4) Testování zkušebních těles

4.1 Výběr materiálu

Výběr lepidla má nezanedbatelný dopad na charakter práce. Na základě literární rešerše byl vybrán materiál ve formě masivního dřeva olše, buku a smrku.

4.2 Výběr lepidel

Rozhodování je často podmíněno několika faktory, z nichž jeden spočívá v konstrukční použitelnosti lepidla. Proto je preferováno použití termosetických nebo reaktoplastických lepidel, která zachovávají svoji stabilitu i při zvýšených teplotách a vlhkosti. Z tohoto důvodu byla zvolena tři specifická lepidla:

Polyuretanové lepidlo (PUR)

V této BP bylo konkrétně použito lepidlo Kestopur 1010, vyrobené finskou společností Kiilto Oy (viz technický list v příloze č. 1).

Resorcinol-formaldehydové lepidlo (RPF)

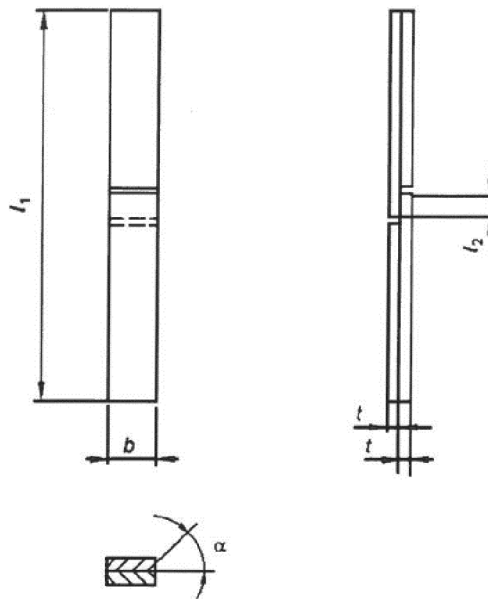
Pro výrobu zkušebních těles bylo využito dvousložkového lepidla 1711 s tužidlem 2520 od firmy Akzo Nobel N.A. (viz technický list v příloze č. 2).

Emulgované polymerované izokyanátové lepidlo (EPI)

Jako třetí v této BP bylo použito lepidlo emulgovaný polymerovaný izokyanát Kestokol WR 05 od Finského výrobce Kiilto Oy (viz technický list v příloze č. 3).

4.3 Výroba zkušebních těles

Norma ČSN EN 302-1 (2013) stanovuje rozměry zkušebních těles pro určení pevnosti ve smyku při tahovém zatížení. Zkušební tělesa musí splňovat definované parametry: lamely mají tloušťku 5 mm, šířku 20 mm a délku 80 mm. Dvě slepené lamely mají šířku 20 mm, délku 150 mm, přičemž šířka lepené spáry je 20 mm a délka přelepu 10 mm. Úhel mezi letokruhy a lepenou plochou lamely je v rozmezí 30–85° (viz obr. 11). Vlhkost zkušebních těles je stanovena na 12 % a je dosažena klimatizací v klimatizační komoře. Lepidlo musí být rovnoměrně rozprostřeno po celé ploše lepené spáry alespoň na jedné lamele, aby byly přebytky lepidla vytlačeny ven během lisování. Pro lepidla s rychlým tuhnutím lze použít i tělesa s jednoduchým přelepem místo těles lepených z panelů a následně prořezávaných.



Obrázek 11 Zkušební tělesa (ČSN EN 302-1, 2013)

Kde:

- l_1 je délka zkušebního tělesa v [mm],
- l_2 je šířka lepené plochy v [mm],
- b je šířka tělesa v [mm],
- t je tloušťka lepené lamely v [mm],
- α je úhel mezi letokruhy a lepenou spárou v [°].

4.3.1 Egalizace a řezání

Pro výrobu zkušebních těles bylo použito dřevo smrku (*Picea abies* (L.) H. Karst.), olše (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) a buku (*Fagus sylvatica* L.) zakoupené od místního prodejce řeziva Woodstore družstvo. Sušené fošny byly pomocí kotoučové formátovací pily SCM si 400 Class (SCM Group, Rimini, Itálie) nařezány na lamely o rozměrech 1000 × 50 × 7 mm, a to vždy tak, aby splňovaly definované podmínky stanovené výše zmíněnou normou. Tyto lamely byly následně tloušťkově egalizovány pomocí horní rovinné tloušťkovací frézky SCM s630 Class (SCM Group, Rimini, Itálie) na tloušťku 5 mm. Úběr z obou stran činil celkově 1 mm, s dvěma průchody tloušťkovací frézky po 0,5 mm. Příprava těles pro experiment probíhala v prostorách Laboratoře zpracování biomateriálů na Fakultě lesnické a dřevařské, České zemědělské univerzity v Praze.

4.3.2 Lepení

Aplikace lepidla probíhala ručně pomocí štětce, při teplotě 20 ± 2 °C podle technických listů jednotlivých lepidel a doporučení výrobce. V případě resorcinol-fenolformaldehydového lepidla bylo množství aplikovaného lepidla 250–350 g/m². Pro polyuretanové lepidlo nános lepidla činil 160–200 g/m² a pro EPI 150–220 g/m².

Z důvodu krátké doby možnosti otevřenosti lepidla (ve všech případech 10–15 minut) a rychlé polymeraci s podkladem o vlhkosti 12 ± 2 %, bylo nutné urychlit aplikaci a co možná nejdříve vložit tělesa do lisu. Viskozita lepidel nevyžadovala žádnou úpravu, po aplikaci vznikl hladký a rovnoměrný film. Přebytké nevytvrzené lepidlo bylo po obvodu těles odstraněno.

4.3.3 Lisování a vyzrání

V případě polyuretanového a EPI lepidla se lisování provádělo na jednoetážovém lisu za tlaku 1 MPa po dobu minimálně 30 minut, pro RPF lepidlo byl použit tlak 0,9 MPa po dobu 7,5 hodin. Veškeré lisování bylo prováděno v souladu s technickými listy (viz technické listy v příloze) jednotlivých lepidel. Lisovací desky nebyly nijak přehřívány. Po vyjmutí z lisu se slepené lamely ponechaly 1 den ve vnitřním prostředí dílny po dobu 24 hodin vyzrát.

4.3.4 Formátování a rozměry

Po vyzrání byly ze slepených lamel vyřezány přířezy o šířce 20 mm. Tloušťka těles zůstala nezměněna, přičemž požadovaná tloušťka 10 mm byla dosažena už během samotného lepení v hydraulickém lisu. Následně byly přířezy nakráčeny na požadovanou délku 150 mm, viz obr. 12. Na obou hlavních plochách těles byly poté vyřezány příčné drážky hluboké 5 mm pomocí pilového kotouče s rovnými zuby, aby vznikla testovací smyková plocha 20×10 mm podle normy ČSN EN 302-1 (2013).



Obrázek 12 Zkušební těleso (autor práce)

4.3.5 Kódování

Všechna zkušební tělesa byla následně označena kódem, kde v rámci dřevin B znamená buk, S je smrk a O označuje olši. Z pohledu lepidel P je označení pro polyuretanové lepidlo (PUR), E značí emulgovaný polymerovaný izokyanát (EPI) a R je symbol pro resorcinol-fenolformaldehydové lepidlo (RPF). Celkové označení zkušebního tělesa tedy může vypadat například takto: BOE419, kde první dvě písmena jsou vždy označení pro kombinaci dřevin (mohou být i stejné v případě, kdy obě spojené lamely jsou ze stejného materiálu), třetí značka v podobě také písmene je značení pro použitý lepicí prostředek, první z číslic je vždy číslo 4 pro označení referenčního tělesa z důvodu příslušnosti zkušebních těles k většímu zkoušenému celku a číslo na konci označuje pořadové číslo tělesa v sérii (viz obr. 12).

4.3.6 Klimatizace

Po označení byla zkušební tělesa umístěna po dobu 7 dní do klimatizační komory Weiss ClimeEvent 2/2000/40/3 (Weiss Umwelttechnik GmbH, Reiskirchen, Německo) podle standardu ČSN EN 302-1 (2013), kde při 20 ± 2 °C a při relativní vlhkosti vzduchu 65 ± 5 % dosáhly relativního obsahu vlhkosti 12 % (viz obr. 13).



Obrázek 13 Klimatizace zkušebních těles (autor práce)

4.4 Testování zkušebních těles

Testování zkušebních těles probíhalo v souladu s normou ČSN EN 302-1 (2013), která stanovuje metodu pro zjišťování smykové pevnosti při tahovém namáhání.

4.4.1 Měření rozměrů a vážení hmotnosti

Nejprve byla tělesa přeměřena posuvným měřidlem, viz obr. 14. Určovala se jejich konkrétní délka, šířka, tloušťka a šířka lepené spáry. Měření probíhalo s přesností 0,01 mm. Po přeměření se každé jednotlivé těleso zvážilo na laboratorní váze s přesností 0,01 g. Veškerá tato měření probíhala na tělesech s relativním obsahem vlhkosti 12 %.



Obrázek 14 Posuvné měřítko a laboratorní váha (autor práce)

4.4.2 Zkouška smykové pevnosti při tahovém namáhání

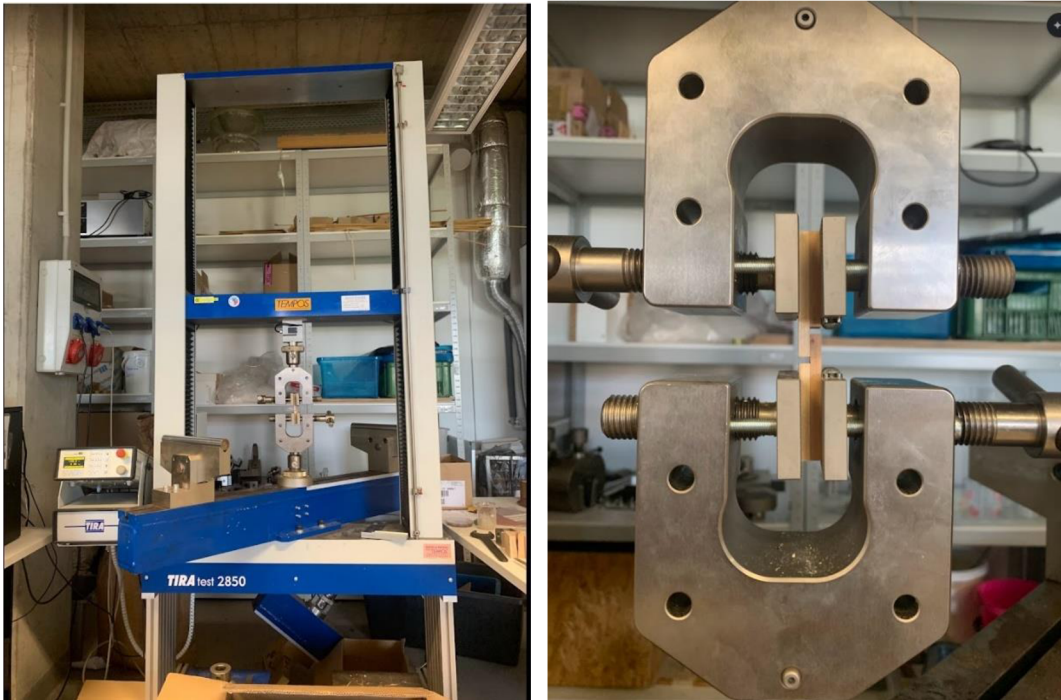
Následně byla tělesa upevněna do trhacího stroje TIRAtest 2850 S (TIRA GmbH, Schalkau, Německo). Zkušební tělesa byla vložena do čelistí stroje a s přesahem 40–50 mm byly oba konce těles dostatečně zajištěny utahovacími závity po stranách, viz obr. 15. Po upevnění byla tělesa namáhána tahovou silou až do okamžiku porušení. Spodní část stroje zůstávala statická, zatímco horní část byla dynamická. Rychlost posuvu byla pevně stanovena na 5 mm/min.

Začátek testu probíhal s plynulým přechodem od elastických deformací přes plastické až po mez pevnosti. Měření bylo ukončeno v okamžiku, kdy senzorický systém stroje detekoval nulový odpor síly nebo zaznamenal náhlý pokles odporu síly o více než 10 %. Nejvyšší síla dosažená při testu, vyjádřená v Newtonech (N), byla zaznamenána jako F_{max} . Po skončení měření se tělesa vytáhla pomocí uvolnění obou zajišťovacích závitů po stranách. Následovně se u těles pomocí vizuální metody určovalo, zda pokles pevnosti byl zapříčiněn porušením v lepidle nebo ve dřevě. Tato hodnota se určovala v procentech (%).

Nakonec se vypočítala hodnota pevnosti ve smyku pomocí rovnice 3:

$$\tau = \frac{F_{max}}{l_2 \cdot b} \quad (3)$$

Kde τ je pevnost ve smyku v $[N/mm^2]$, F_{max} je maximální dosažená síla v tahu v $[N]$, l_2 je délka lepené plochy v $[mm]$, b je šířka lepené plochy v $[mm]$.



Obrázek 15 Trhací stroj a nastavitelné čelisti (autor práce)

4.4.3 Sušení

Po otestování smykové pevnosti se tělesa umístila opět do sušárny, kde se vysušila do absolutně suchého stavu, aby se následně opět přeměřily a zvažily. Toto měření se provádělo z důvodu verifikace obsahu relativní vlhkosti ve zkušebních tělesech.

Naměřené údaje byly analyzovány v programu Statistica 14 (TIBCO Software Inc., Alto, USA) pomocí analýzy rozptylu (ANOVA). Následně byla provedena kontrola statistické významnosti rozdílů výsledků pomocí Tukeyova post-hoc testu.

5 Výsledky a diskuze

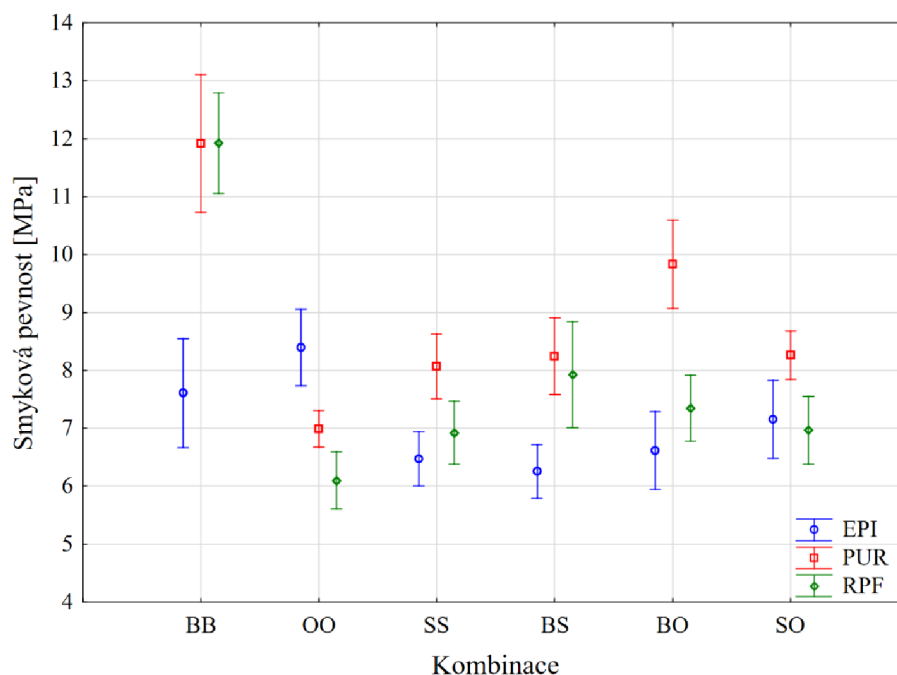
Pro zhodnocení kvality lepeného spoje za použití různých dřevin a jejich kombinací byl pro účely této práce zvolen jeden z charakteristických typů zkušebních metod, a to konkrétně podélná pevnost ve smyku při tahovém namáhání. Ke třem různým použitým dřevinám (buk (BB), smrk (SS) a olše (OO)) a jejich kombinacím (BO, SO, BS) byla také pro větší diverzifikaci výsledků použita tři různá adheziva (PUR, RPF a EPI). V tabulkách níže jsou uvedeny popisné statistiky naměřených hodnot podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání (Tab. 2), hustoty zkušebních těles (Tab. 4), vlhkosti (Tab. 6) a míra procentuálního porušení ve dřevě (Tab. 7). Tyto data se následně zpracovala do grafů (viz obr. 16, 19, 20 a 21).

Tabulka 2 Popisné statistiky smykové pevnosti lepených spojů (autor práce)

Kombinace	Lepidlo	Průměr [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
BB	E	7,61	4,51	11,33	2,01
BB	R	11,92	8,50	15,29	1,85
BB	P	11,92	7,24	15,98	2,54
OO	E	8,39	5,53	10,65	1,41
OO	R	6,10	4,28	7,75	1,05
OO	P	6,99	5,98	8,56	0,67
SS	E	6,47	4,82	9,14	1,00
SS	R	6,92	5,18	9,42	1,16
SS	P	8,07	6,03	10,71	1,21
BS	E	6,26	4,69	9,10	0,99
BS	R	7,93	4,45	11,23	1,95
BS	P	8,25	6,74	11,86	1,41
BO	E	6,61	3,75	9,97	1,44
BO	R	7,35	5,33	9,48	1,21
BO	P	9,83	6,42	12,55	1,64
SO	E	7,16	4,23	10,02	1,43
SO	R	6,97	4,32	8,65	1,24
SO	P	8,26	6,54	10,48	0,89

Z výsledků v tabulce č. 2 a z grafu na obrázku č. 16 je patrné, že z hlediska dřevin, nejvyšších pevností dosahovaly zkušební tělesa vyrobené pouze z buku (BB). Na druhou stranu, u kombinací buku s jinými dřevinami (BS a BO) již zkušební tělesa nedosahovala takových pevností jako u homogenních těles. To bylo dáno vysokou mírou porušení lepeného spoje ve dřevě měkčí dřeviny.

Ze zkoumaných dřevin dosahuje bukové dřevo nejvyšší hustoty (685 kg/m^3) a má nejvyšší smykovou pevnost (12,6 MPa). Díky širokým cévám disponuje dobrými predispozicemi pro vytvoření tzv. mechanické vazby mezi adhezivem a adherentem. Naměřené hodnoty podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání u homogenních těles buku korespondují s hodnotami uvedených u Burdurlu a kol. (2007), které vycházely přibližně o 2 % vyšší.



Obrázek 16 Hodnoty smykové pevnosti lepených spojů (autor práce)

Z grafu na obrázku č. 16 a tabulky č. 2 lze vyčíst, že nejnižších hodnot pevností lepeného spoje dosahovaly zkušební tělesa kombinované s olší. Především u homogenních těles složených pouze z olše měl tento parametr vysokou statistickou významnost (viz příloha č. 4 a tabulka č. 3).

Tabulka 3 ANOVA smykové pevnosti (autor práce)

	Stupně volnosti	Suma čtverců	Průměr čtverců	Hodnota Fisherova testu	Hodnota p ($\alpha = 0,05$)
Průsečík	1	22724,40	22724,40	10576,17	0,00
Kombinace	5	488,09	97,62	45,43	0,00
Lepidlo	2	196,04	98,02	45,62	0,00
Kombinace x Lepidlo	10	311,47	31,15	14,50	0,00
Chyba	342	734,84	2,15		

Konnerth a kol. (2006) zmiňují, že minimálně v případě PUR adheziv lze tento efekt vysvětlit jako důsledek optimalizace lepidla pro smrkové dřevo, které je nejčastěji používanou dřevinou pro konstrukční účely. Dalším významným faktorem je nižší hustota olše v porovnání s ostatními zkoušenými dřevinami, viz tab. 4.

Tabulka 4 Popisné statistiky hustoty zkušebních těles (autor práce)

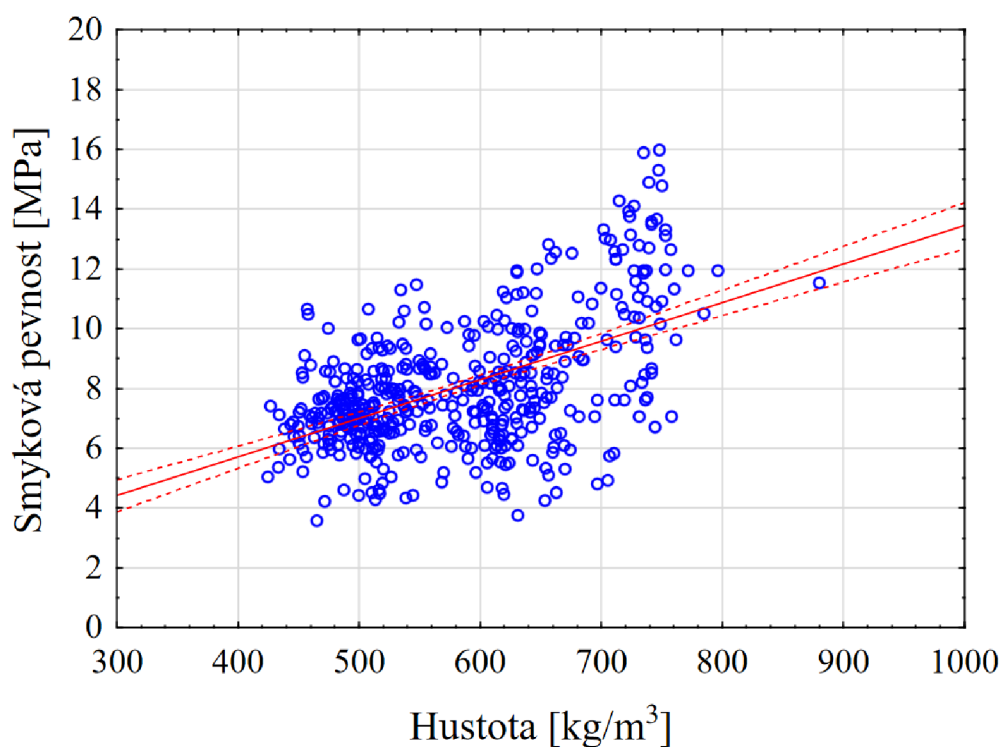
Kombinace	Lepidlo	Průměr [MPa]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]
BB	E	710,33	662,84	760,64	27,06
BB	R	737,23	703,53	796,68	22,00
BB	P	732,44	656,29	879,90	45,84
OO	E	521,98	474,84	546,80	18,23
OO	R	490,49	456,63	516,67	16,65
OO	P	502,51	468,93	526,52	15,64
SS	E	484,84	424,83	590,17	42,05
SS	R	537,70	511,85	570,07	17,81
SS	P	540,44	495,49	585,63	26,89
BS	E	617,77	568,58	666,39	30,48
BS	R	608,55	572,48	635,43	14,13
BS	P	602,24	554,59	647,39	24,31
BO	E	633,78	603,74	707,33	24,87
BO	R	632,84	607,19	661,28	16,81
BO	P	655,12	586,72	685,41	26,40
SO	E	491,23	453,99	519,15	19,36
SO	R	514,50	487,73	538,90	13,27
SO	P	497,52	453,13	558,84	34,44

V tabulce č. 5 se nacházejí korelační analýzy mezi jednotlivými faktory. Ze zjištěných výsledků vyplývá, že na smykovou pevnost při tahovém namáhání má největší vliv hustota použitých dřevin u zkušebních těles ($r = 0,536$). Dokonce je hustota podstatnějším faktorem než použitá kombinace dřevin ($r = -0,319$). Dalším statisticky významným faktorem ovlivňující smykovou pevnost je použité adhezivum s hodnotou korelační analýzy ($r = 0,252$). Dále si lze povšimnout významného vlivu hustoty na míru porušení zkušebních těles ve dřevě. Nakonec zajímavým faktorem je minimální vliv vlhkosti na všechny faktory, nicméně to je z hlediska metodiky měření žádaným výsledkem.

Tabulka 5 Souhrnná tabulka korelační analýzy (autor práce)

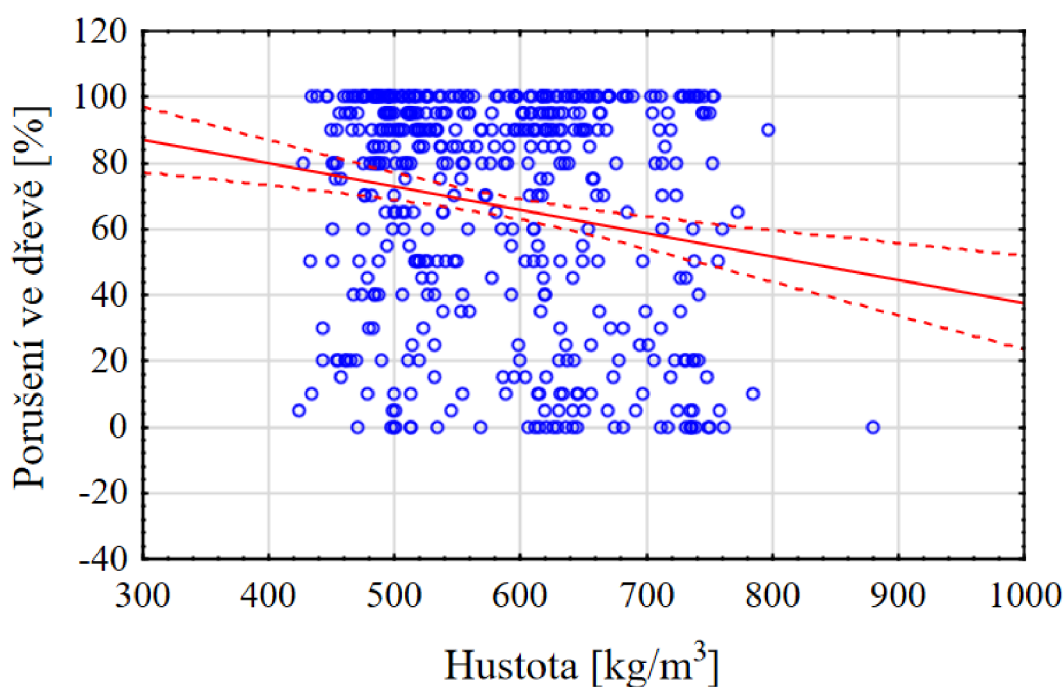
	Kombinace	Lepidlo	Hustota [kg/m ³]	Smyková pevnost [MPa]	Vlhkost [%]	Porušení ve dřevě [%]
Kombinace	1,000	0,000	-0,327	-0,319	0,066	0,075
Lepidlo	0,000	1,000	0,056	0,252	-0,079	0,029
Hustota [kg/m ³]	-0,327	0,056	1,000	0,536	0,006	-0,186
Smyková pevnost [MPa]	-0,319	0,252	0,536	1,000	-0,058	-0,048
Vlhkost [%]	0,066	-0,079	0,006	-0,058	1,000	0,030
Porušení v lepidle [%]	0,075	0,029	-0,186	-0,048	0,030	1,000

Jak už bylo řečeno, z výsledků korelační analýzy v tabulce č. 5 se lze přesvědčit o vysokém korelačním koeficientu mezi smykovou pevností a hustotou, což v grafickém zobrazení dokládá obr. č. 17.



Obrázek 17 Korelace smykové pevnosti a hustoty (autor práce)

Nižší hustota zkušebních těles z olše má také velmi významný vliv na procentuální poměr porušení lepeného spoje ve dřevě. Korelace mezi těmito dvěma faktory potvrzuje velmi podstatnou významnost (viz tab. 5 a obr. 18).



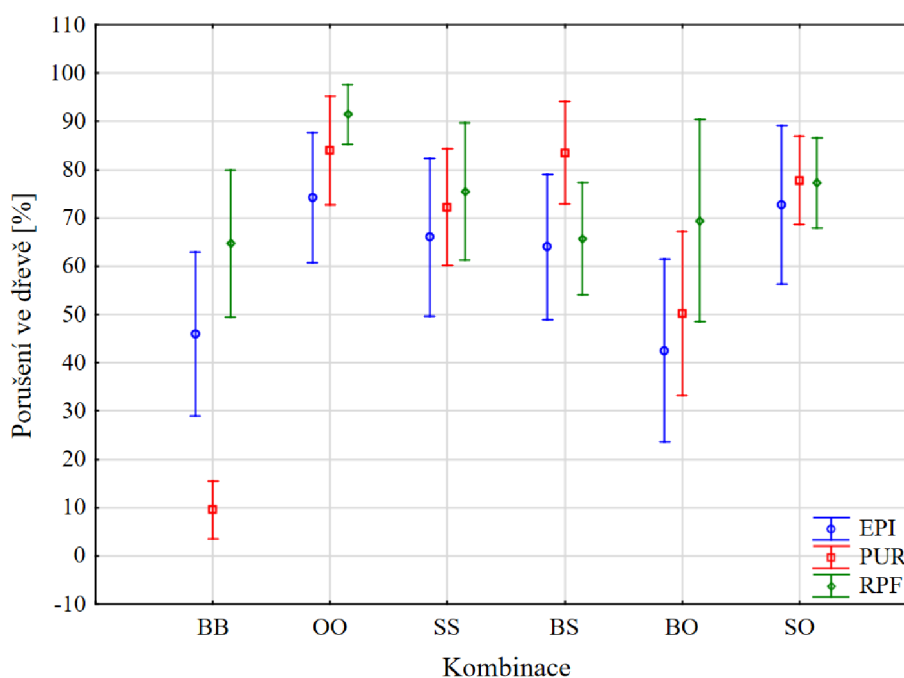
Obrázek 18 Korelace procentuálního porušení ve dřevě a hustoty (autor práce)

Z hlediska lepidel, standartně nejvyšších pevností dosahovaly zkušební tělesa spojované pomocí PUR adheziva (viz tab. 2 a obr. 16). Při uvážení hladiny významnosti $\alpha = 0,05$ dosahovala v případě kombinace BB smyková pevnost při tahovém namáhání až 13 MPa. Významných pevností dosahovala také kombinace BO, a to až 10,6 MPa. Adheziva na bázi polyuretanů jsou ceněna za jejich výborné pevnostní vlastnosti a odolnost, takže naměřené výsledky nejsou nijak odlišující se od jiných prací zaměřujících se na smykovou pevnost. Podobných hodnot dosáhl např. Bernaczyk a kol. (2023), jejichž výsledky se lišily v rozmezí 6 %. Statisticky významným faktorem byla také procentuální míra porušení ve dřevě (viz příloha č. 7), která se u kombinace BB PUR pohybovala pouze okolo hodnoty 9,5 % (viz tab. 6 a obr. 19).

Tabulka 6 Popisné statistiky míry porušení ve dřevě (autor práce)

Kombinace	Lepidlo	Průměr [%]	Minimum [%]	Maximum [%]	Směrodatná Odchylka [%]
BB	E	46,00	0,00	100,00	36,37
BB	R	64,75	5,00	100,00	32,46
BB	P	9,50	0,00	45,00	12,97
OO	E	74,25	15,00	100,00	28,80
OO	R	91,50	55,00	100,00	13,19
OO	P	84,00	0,00	100,00	24,20
SS	E	66,00	0,00	100,00	35,04
SS	R	75,50	5,00	100,00	30,39
SS	P	72,25	10,00	100,00	25,98
BS	E	64,00	0,00	100,00	32,22
BS	R	65,75	15,00	95,00	24,94
BS	P	83,50	10,00	100,00	22,77
BO	E	42,50	0,00	100,00	40,47
BO	R	69,50	0,00	100,00	44,63
BO	P	50,25	0,00	100,00	36,36
SO	E	72,75	0,00	100,00	35,00
SO	R	77,25	40,00	100,00	19,97
SO	P	77,75	40,00	100,00	19,50

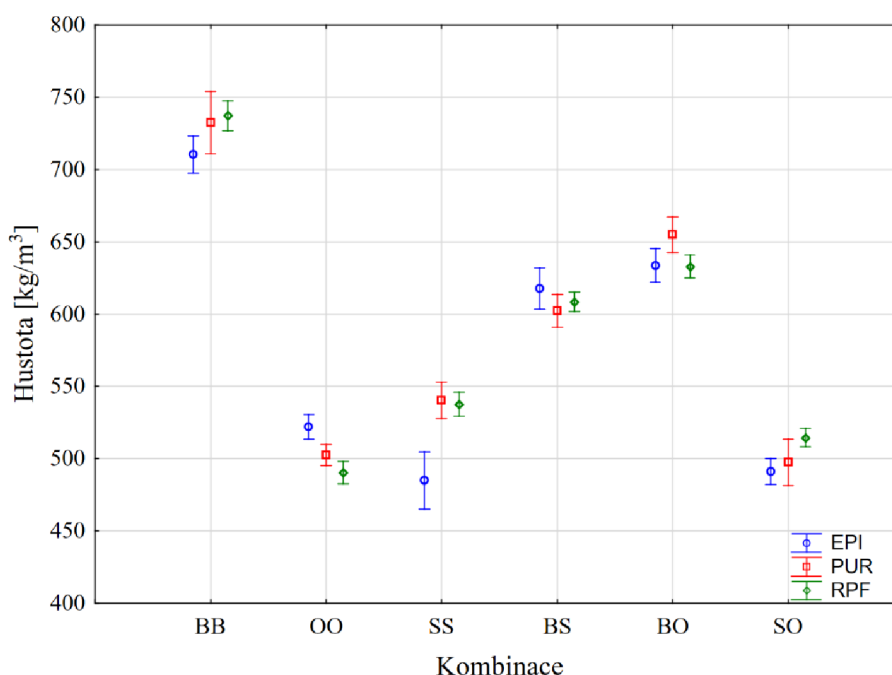
Takto nízká míra porušení ve dřevě je signifikantní pro vysokou únosnost buku, protože hodnoty zkoušky podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání dosáhly na hranici koheze adheziva a nepřekročily pevnost adherentu. Tohoto jevu si v takové míře lze všimnout pouze u kombinace BB spojované PUR adhezivem (viz tab. 6 a obr. 19).



Obrázek 19 Hodnoty míry porušení lepeného spoje ve dřevě (autor práce)

Dále lze sledovat trend nízké smykové pevnosti u zkušebních těles spojovaných lepidlem EPI (viz tab. 2 a obr. 16). Pevnost těchto těles se pohybovala v rozmezí 6–9 MPa. S tímto poznatkem je úzce svázána nízká hodnota míry procentuálního porušení lepeného spoje ve dřevě (viz tab. 6 a obr. 19). Naměřená data nasvědčují, že adhezivum nedosahovalo dostatečné koheze.

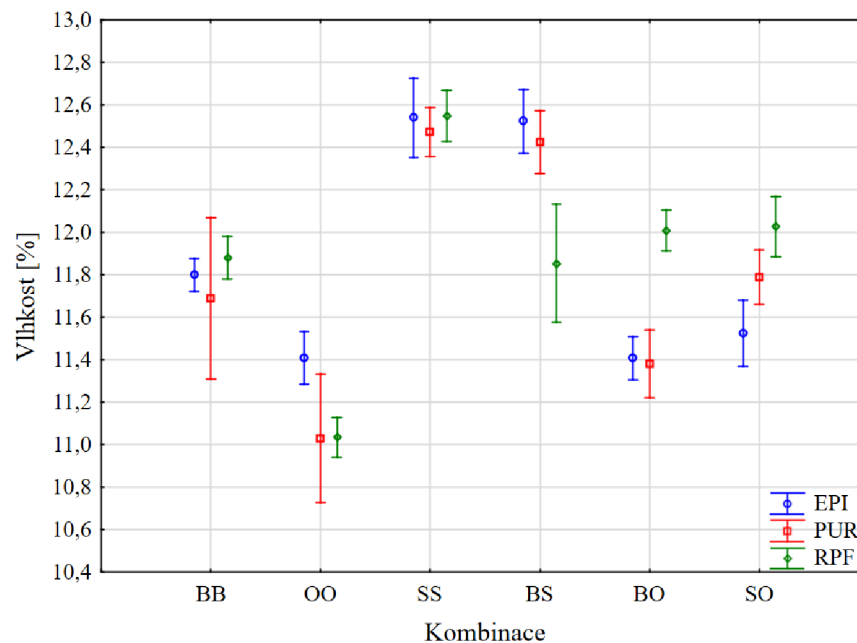
Tato skutečnost pravděpodobně nastala v důsledku předčasné polymerace lepidla během jeho aplikace, respektive při míchání jeho dvou složek. Polymerace (zesíťování), je proces přeměny malých molekul (monomerů) na větší molekuly (makromolekuly) za působení kyslíku. Tento proces ovlivňuje rozlití lepidla při aplikaci a zejména jeho fyzikální a mechanické vlastnosti změnou chemického složení monomerů. Na tuto skutečnost odkazuje Cadenaro a kol. (2019).



Obrázek 20 Hodnoty hustoty zkušebních těles (autor práce)

Z tabulky č. 4 a obrázku č. 20 lze pozorovat statisticky významný pokles hustoty u kombinace SS spojované EPI adhezivem. Tento rozdíl byl potvrzen Tukeyho testem (viz příloha č. 5). Tato skutečnost může být vysvětlena tím, že zkušební tělesa byla vyrobena z jiného výřezu, který tak podléhal jiným podmínkám růstu. Wieruszewski a Mydlarz (2021) ve své práci prokázali, že typ stanoviště má statisticky významný vliv na hustotu dřeva.

Dále z hodnot smykových pevností (viz tab. 2 a obr. 16) lze vyčíst anomálii v podobě smykové pevnosti homogenních těles vyrobených z olše spojovaných adhezivem EPI. Ve zbylých případech tato kombinace vycházela jako nejméně únosná, ale v případě těles OO spojovaných EPI dosahovala pevnost ve smyku při započtení hladiny významnosti $\alpha = 0,05$ až 9 MPa. Jedním z nabízejících se vysvětlení náhle vyšší pevnosti lepeného spoje může být vliv vyšší hustoty u zkušebních těles této kombinace (viz tab. 4 a obr. 20). Z obrázku č. 17, kde se nachází graf korelační analýzy mezi smykovou pevností a hustotou je patrné, že hustota má na smykovou pevnost podstatně významný vliv. Podobnou tendenci zaznamenal ve své práci Aicher a kol. (2018).



Obrázek 21 Hodnoty vlhkosti zkušebních vzorků (autor práce)

Pro úplnost zhodnocení všech měřených faktorů, z hodnot korelační analýzy (viz tab č. 5) není patrná žádná statistická významnost vlivu vlhkosti na ostatní faktory a především na hodnoty podélné smykové pevnosti při tahovém namáhání. Tyto výsledky odporují výsledkům uvedených u Custódio a kol. (2009). Důvodem je zvolený postup měření, kdy zkušební tělesa byla před průběhem zkoušky klimatizována v klimatizační komoře na hodnotu 12 % relativního obsahu vlhkosti. Tímto se docílilo jen velmi malého rozptylu obsahu relativní vlhkosti ve zkušebních tělesech (viz tab. 7 a obr. 21), který v této míře neměl statisticky významný vliv na ostatní veličiny.

Tabulka 7 Popisné statistiky vlhkosti zkušebních těles (autor práce)

Kombinace	Lepidlo	Průměr [%]	Minimum [%]	Maximum [%]	Směrodatná Odchylka [%]
BB	E	11,80	11,44	12,07	0,17
BB	R	11,88	11,60	12,43	0,21
BB	P	11,69	10,13	13,88	0,81
OO	E	11,41	11,00	12,02	0,27
OO	R	11,03	10,60	11,33	0,20
OO	P	11,03	8,78	11,92	0,65
SS	E	12,54	11,80	13,50	0,40
SS	R	12,55	11,99	12,98	0,26
SS	P	12,47	11,88	12,84	0,25
BS	E	12,52	11,97	13,24	0,32
BS	R	11,85	10,41	13,15	0,59
BS	P	12,43	11,85	13,09	0,32
BO	E	11,41	11,04	11,81	0,22
BO	R	12,01	11,56	12,37	0,21
BO	P	11,38	10,63	11,87	0,34
SO	E	11,52	11,01	12,02	0,33
SO	R	12,03	11,45	12,53	0,30
SO	P	11,79	11,11	12,24	0,27

6 Přínosy pro vědu a pro praxi

Tato práce přináší významné přínosy jak pro vědu, tak i pro praxi v oblasti dřevozpracujícího průmyslu. Jedním z hlavních přínosů pro vědu je rozšíření poznatků o pevnosti lepeného spoje při smykovém namáhání a vlivu použitých dřevin a jejich kombinací, ačkoliv poznatky v této práci jsou zaměřeny pouze na jeden faktor, a to smykovou pevnost.

Tato práce je dílčí částí většího celku, který se zabývá tématem lepených kombinací dřevin daleko komplexněji. Zmíněná práce posuzuje lepené kombinace dřevin i na řadu dalších vlastností, mezi které se řadí např. pevnost v ohybu, požární charakteristiky, pevnost v tlaku, rozlupčivost, odolnost proti vytažení spojovacích prostředků apod. Implementace výsledků této práce proto přispěje k širšímu pochopení problematiky kombinace dřevin v lepeném dřevě.

Kombinace dřevin v lepených nosnících je reakce na snižující se zastoupení smrkových monokulturních porostů v České republice. Z tohoto důvodu je vyvíjen tlak na hledání adekvátních alternativ, především ve smyslu listnatých dřevin. Avšak listnaté dřeviny mají několik nevýhod. Především se jedná o jejich vyšší cenu a nižší pilařskou výtěž. Nicméně dřevozpracující průmysl je přizpůsoben zpracování těchto dřevin, zejména buku, který se využívá pro výrobu nábytku, dýh apod. Taktéž olše se jeví jako adekvátní náhrada smrku, ačkoliv je v České republice primárně využívána pro řezbářské účely, ve světě se běžně používá i na výrobu nábytkových dílců a překližek.

Pro použití v praxi je však třeba zjistit řadu dalších vlastností, zejména pokud se má lepené kombinované dřevo využívat pro konstrukční použití, na které je kladena celá řada normativních požadavků stanovených především Eurokódy.

Proto je vhodné aplikovat vědu v praxi a využít výhody lepení a vrstvení dřeva, kdy střed nosníků může být z nižší jakosti řeziva a vnější lamely z kvalitnějšího řeziva, což ve výsledku přebírá výhody I profilu. Alternativou k jakosti tak může být i použití různě pevných dřevin do příčných částí nosníku.

To potvrzují i výsledky, kdy kombinace Buk-Olše (BO) vykazuje dobrou smykovou pevnost, což je jedna z důležitých vlastností lepených nosníků. Z těchto důvodů se např. kombinace BO jeví jako kvalitní alternativa k homogenním konstrukcím vyrobených z jehličnatých dřevin a nasvědčuje vysoký potenciál pro budoucí využití v praxi.

7 Závěr

V rámci literární rešerše byla rozebrána teorie a podstata lepení. Dále byly analyzovány faktory, které mají vliv na kvalitu lepeného spoje. Výsledkem literární rešerše je pak soubor informací, díky nimž byl vytvořen metodologický postup stanovení pevnosti ve smyku tahovou zkouškou dle ČSN EN 302-1 (2013) pro zvolené dřeviny spojované různými adhezivy. V rámci práce byly stanoveny pevnosti lepených spojů ve smyku u dřeva buku, smrku a olše. Jako spojovací prostředek byly použity tři různá adheziva, konkrétně polyuretan, resorcinol-fenolformaldehyd a emulgovaný polymerovaný izokyanát.

Laboratorním měřením bylo zjištěno, že při smykové zkoušce tahem nejvyšších pevností dosahují homogenní zkušební tělesa vyrobená z buku. Na základě dosažených výsledků bylo potvrzeno, že čím vyšší je hustota dřeva, tím vyšší je pevnost lepených spojů.

Jedním ze záměrů této práce bylo posoudit buk a olši jako potenciální alternativu ke smrku, v rámci využití v dřevozpracujícím průmyslu, se zaměřením na podélnou smykovou pevnost při tahovém namáhání. Olše nedosáhla očekávaných hodnot, což lze přičíst nižší smykové pevnosti. Tento aspekt je však jediným, ve kterém z hlediska mechanických vlastností olše zaostává. Jiné mechanické vlastnosti naznačují potenciál lepších výsledků.

Buk z pohledu smykové pevnosti při tahovém namáhání dosahoval mnohem příznivějších hodnot. Homogenní tělesa z buku spojovaná adhezivem RPF dosahovala o 72 % vyšší pevnosti než zkušební tělesa vyrobená ze smrku.

Z hlediska kombinací dřevin, u většiny zástupců nebylo prokázáno výrazné zlepšení smykových pevností. Z tohoto tvrzení se vymaňuje pouze kombinace Buk-Olše (BO) spojovaná PUR adhezivem. Díky této skutečnosti se využití ostatních lepených kombinací namáhaných na smykovou pevnost při podélném namáhání jeví jako bezpředmětné. Naopak kombinace BO lepená PUR adhezivem dosahovala o 40,6 % lepších výsledků než olšová homogenní tělesa spojovaná identickým adhezivem a projevuje vysoký potenciál pro využití v dřevozpracujícím průmyslu.

8 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 Mikrofotografie prostorové struktury dřev.....	13
Obrázek 2 Buk – příčný řez	15
Obrázek 3 Smrk – radiální řez	16
Obrázek 4 Olše – příčný řez	17
Obrázek 5 Mechanická vazba lepidla s povrchy	20
Obrázek 6 Chemická vazba lepidla s povrchem	20
Obrázek 7 Adheze a koheze v lepeném spoji	21
Obrázek 8 Kapka kapaliny smáčející dřevěný povrch	22
Obrázek 9 Příklady geometrie lepených spojů	26
Obrázek 10 Závislost času vytvrzování t na teplotě T	32
Obrázek 11 Zkušební tělesa	40
Obrázek 12 Zkušební těleso	42
Obrázek 13 Klimatizace zkušebních těles	43
Obrázek 14 Posuvné měřítko a laboratorní váha	44
Obrázek 15 Trhací stroj a nastavitelné čelisti	45
Obrázek 16 Hodnoty smykové pevnosti lepených spojů	47
Obrázek 17 Korelace smykové pevnosti a hustoty	49
Obrázek 18 Korelace procentuálního porušení ve dřevě a hustoty	50
Obrázek 19 Hodnoty porušení lepeného spoje ve dřevě	51
Obrázek 20 Hodnoty hustoty zkušebních těles	52
Obrázek 21 Hodnoty vlhkosti zkušebních vzorků	53
Tabulka 1 Spotřeba lepidel a určení lisovacího tlaku při lepení	31
Tabulka 2 Popisné statistiky smykové pevnosti lepených spojů	46
Tabulka 3 ANOVA smykové pevnosti	47
Tabulka 4 Popisné statistiky hustoty zkušebních těles	48
Tabulka 5 Souhrnná tabulka korelační analýzy	49
Tabulka 6 Popisné statistiky míry porušení ve dřevě	51
Tabulka 7 Popisné statistiky vlhkosti zkušebních těles	54

9 Literatura

- ABBOTT, A., WHALE, L. An overview of the use of glued laminated timber (glulam) in the UK. *Construction and Building Materials*, 1987. Vol. 1, Is 2, pg 104-110, ISSN 0950-0618, [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0950061887900079>
- ADAMS, R. D., DA SILVA, L. F. M., ECHSNER, A. *Handbook of adhesion technology*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. Vol. 2, ISBN: 978-3-642-01170-2.
- AICHER, S., AHMAD, Z., HIRSCH, M. Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams. *European Journal Wood Prod.*, 2018. Vol. 76 [online]. [cit. 2024-03-10]. ISSN 1205–1222. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-018-1305-0#citeas>
- BARTOVSKÁ, L., ŠIŠKOVÁ, M. Co je co v povrchové a koloidní chemii. Vydavatelstvi.vscht.cz 2020. [online]. [cit 2023-12-29] Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/
- BERNACZYK, A., WAGENFÜHR, A., TERFLOTH, CH., LINCKE, J., KRYSZTOFIK, T., NIEMZ, P. Investigations into the Influence of Temperature on the Tensile Shear Strength of Various Adhesives. *Adhesives. Materials*, 2023. Vol. 16, No. 18, ISSN 1996-1944, [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/18/6173>
- BOUBLÍK, V. *Lepidla a jejich příprava. II. vydání*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury Praha, 1966. 192 s. ISBN 04-952-66.
- BURDURLU, E., USTA, I., KILIC Y., ULUPINAR, M. The effect on shear strength of different surfacing techniques in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007. Vol. 21, No. 3–4, pg. 319–330, DOI 0169-4243, [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1163/156856107780684611>
- CADENARO, M., MARAVIC, T., COMBA, A., MAZZONI, A., FANFONI, L., HILTON, T., FERRACANE, J., BRESCHI, L. The role of polymerization in adhesive dentistry. University of Trieste, Italy, 2019. Vol. 35, Is. 1, s e1-e22, [online]. [cit. 2024-03-10]. ISSN 0109-5641. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564118312156>

- CUSTÓDIO, J., BROUGHTON, J., CRUZ, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timbers joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009. Vol. 29, Is. 2, pg. 173-185, ISSN 0143-7496, [online], [cit. 2024-03-15]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749608000365>
- ČERNÁ, B.; GREGOR, R. *Syntetické polymerní hmoty*. 1. vyd. Brno : Masarykova univerzita, 1989. pg. 122, ISBN 80-210-0129-1.
- ČSN EN 302-1. *Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Zkušební metody – Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Úřad pro normalizaci, metrologii a zkušebnictví*. Praha. 2013.
- DE LORENZIS, L., SCIALPI, V., LA TEGOLA, A. Analytical and experimental study on bonded-in CFRP bars in glulam timber, *Composites Part B: Engineering*, 2005. Vol. 36, Is. 4, Pg. 279-289, ISSN 1359-8368.
- DEBELL, D. S., GIORDANO, P. A. Growth patterns of red alder. Corvallis: Oregon State University Press, 1994. pg. 116-130, [online]. [cit 2024-03-29] Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836804001416>
- DÉMOS. *Vše pro výrobu nábytku* [online]. Praha, 2024, [cit 2024-01-10] Dostupné z:
<https://www.demos-trade.cz/preklizka-truhlarska-dyhovana-smrk-classic-a-b-2500-1220-6/>
- DRÁPELA, J. a kol. *Výroba nábytku: Technologie*. 1. vyd. Spálená 51, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980. 488s.
- DROBNÝ, D. Jak se vytvrzují lepidla? *Lepidla.cz* 2016. Broumov [online]. [cit 2023-12-28] Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/jak-lepidla-vytvrzuji.html>
- EISNER, K., BERGER, V.; HAVLÍČEK, V.; OSTEN, M. *Příručka lepení dřeva*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 287s.
- EN 16254. *Lepidla – Emulzní polymery síťované izokyanáty (EPI) pro nosné dřevěné konstrukce – Klasifikace a funkční charakteristiky*. Úřad pro normalizaci, metrologii a zkušebnictví. Praha. 2013.
- FOLTA, J. *Hodnocení pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů*. Pardubice, Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2008.
- FRIHART, CH. *Wood Adhesion and Adhesives. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison 2012. DOI 10.1201/b12487-13.

- GANDELOVÁ, L., ŠLEZINGEROVÁ, J. Stavba dřeva. 2., nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. 187 s. ISBN 978-80-7375-966-7.
- GANDELOVÁ, L., ŠLEZINGEROVÁ, J. Stavba dřeva (cvičení). 2., nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2008, 129 s. ISBN 978-80-7375-168-5.
- UZELAC, GLAVINIČ, I., BOKO, I., TORIČ, N., VRANKOVIČ, J. L. Application of hardwood for glued laminated timber in Europe. *Gradevinar*, 2020. Vol. 72, Is. 7, pg. 607-616, [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <http://www.casopis-gradjevinar.hr/archive/article/2741>
- GREGOR, M. Technologie a technika lepení. 2016. [online]. [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: <http://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>.
- GRØSTAD, K., BREDESEN, R. EPI for Glued Laminated Timber. In: Aicher, S., Reinhardt, HW., Garrecht, H. (eds) *Materials and Joints in Timber Structures*. Rilem Bookseries, 2014. Vol. 9. Springer, Dordrecht, [online]. [cit. 2024-03-27]. ISBN 978-94-007-7811-5. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-7811-5_32#citeas
- GUO, J., GCLOCK, H., ZHANG, K., HE, Y., GUO, X. Revealing the Mechanical Properties of Emulsion Polymer Isocyanate Film in Humid Environments. *Journal Polymers*, 2018. [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/6/652>
- HORÁČEK, P., MENCL, J. *dendrologie.cz*, Praha 2019. [online]. [cit 2024-01-10] Dostupné z: https://www.dendrologie.cz/html_stranky/drevo.htm
- JIS K6806. Polymer-isokyanátová lepidla na vodní bázi na lepení dřeva. Japonský výbor pro průmyslové normy. Tokio. 1986.
- KAMENICKÝ, J.; RIZMANOVÁ, M. *Materiály: pro 1. až 3. ročník SOU učebních oborů zpracování dřeva*. 1989. Vid. 2, Praha: SNTL, 115s.
- KNORZ, M., NEUHAEUSER, E., TRONO, S. Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood-adhesive bonds. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2015. Vol. 57.
- KONNERTH, J., GINDL, W., HARM, M., MÜLLER, U. Comparing dry bond strength of spruce and beech wood glued with different adhesives by means of scarf – and lap joint testing method. *Originalarbeiten originals*, 2006, Vol. 64, s. 269–271, [online]. [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-006-0104-1>

- KONVIČNÁ, I. Lepené spoje. Investice do rozvoje vzdělávání. 2014. 1, pg. 1-5. ISSN 1802-4785.
- KOTRLA, J. Vliv plazmové úpravy povrchu na pevnost lepeného spoje. Bakalářská práce, Vedoucí práce: Ing. Martin Bednařík, Ph.D. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2016.
- KRÁL, P., HRÁZSKÝ, J. Kompozitní materiály na bázi dřeva, Část 2: Dýhy, překližky a lepené materiály. 1. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2005. ISBN 80-7157-878-9
- KŘUPALOVÁ, Z. Nauka o materiálech: pro 1. a 2. ročník SOU učebního oboru truhlář. 3., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2008. 253pp. ISBN 978-80-86817-25-5. pg. 188-198.
- KYTKA, T. Posouzení kvality PUR lepidla pro nosné dřevěné konstrukce metodou stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. 2019. pg. 91.
- KYTKA, T, GAŠPARÍK M., SAHULA, L., NOVÁK, D., KARAMI, E., DAS, S., SVITÁK, M. Predicted and Experimental Bending Behaviour of Glulam Bonded by RPF Adhesive. Materials. 2024; Vol. 17, no. 2, pg. 514. [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/2/514>
- LEITSH, E. K., HEATH, W. H., TORKELSON, J. M. Polyurethane/polyhydroxyurethane hybrid polymers and their applications as adhesive bonding agents International Journal of Adhesion & Adhesives [online]. 2016, vol. 64, pg. 1-8 [citováno: 2024-02-17] DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.09.001. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749615001372>
- LIPTÁKOVÁ E.; SEDLIČIK, M. Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1989, 520s. ISBN 80-05-00116-9.
- MUZIKÁŘ, Z. Materiály II: pro UO truhlář. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2008, 175 s. ISBN 978-80-7333-061-3
- NOVÁK, J., DUŠEK, D. Sborník přednášek: Chřadnutí smrku v oblasti severní a střední Moravy. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Výzkumná stanice Opočno, 2014. 220s, ISBN 978-80-7417-079-9
- ONG, C. Glue-laminated timber (Glulam). Wood Composites, Woodhead Publishing, Pg. 123-140, ISBN 9781782424543, 2015. [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978178242454300007X?via%3Dihub>

- OSTEN, M. Lepení plastických hmot. Státní nakladatelství technické literatury, 1972. Praha, 152s.
- OSTEN, M. Práce s lepidly a tmely. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1982. 285s. Polytechnická knihnice (SNTL). Pg. 11-49.
- PIZZI, A., MITTAL, K. Handbook of adhesive technology. 2nd, rev. And expanded. New York: M. Dekker, 2003. ISBN 08-247-0986-1
- PIZZO, B., SMEDLEY, D. Adhesives for on-site bonding: Characteristics, testing and prospects. 2015. Construction and Building Materials. 97.
- POKORNÝ, J. Lepení a tmelení v dílně i domácnosti. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2000. pg. 104, ISBN 80-7169-857-1
- ROWELL, M. R. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005, pg. 485, ISBN 08-493-1588-3.
- SEDLIAČIK, M. Nové kompozície polykondenzačných lepidiel a ich aplikácie v drevárskom priemysle. 1. vyd. Strážske: ZSVTS Chemko, 1992, pg. 202. ISBN 80-228-0207-7.
- SEDLIAČIK, M., SEDLIAČIK, J. Chemické látky v drevárskom priemysle. 1. vyd.: Technická univerzita Zvolen, 1998, pg. 286, ISBN 80-228-0745-1.
- STOKKE, D., WU, Q., HAN, G. Introduction to wood and natural fiber composites. 1. vyd. Chichester: Wiley, 2014, 285 s. ISBN 978-0-470-71091-3.
- ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. Stavba dřeva. Vysoká škola zemědělská v Brně, 1994. 132 s. ISBN 80-7157-400-7,
- ŠMÍRA, D. Analytické metody určující kvalitu lepeného spoje dřevěného adherendu. Bakalářská práce, Vedoucí práce: Ing. Jan Vaněrek, Ph.D. Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- TESAŘOVÁ, D. Definice lepidel, definice lepeného spoje, teorie lepení, základní vlastnosti lepidel, úhel smáčení, reologie lepidel, složení lepidel, rozdělení lepidel, způsoby namáhání lepeného spoje. Prezentace. Mendelova univerzita v Brně, 2012.
- TESAŘOVÁ, D. a kol. Povrchové úpravy dřeva: [lakování, moření, lazurování a lepení]. 1. vyd. Praha: Grada, 2014, 134 s. ISBN 978-80-247-4715-6.
- 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. vyd. Praha: Informatorium, 1997, 255 s. ISBN 80-86073-09-2
- WIERUSZEWSKI, M., MYDLARZ K. The Influence of Habitat Conditions on the Properties of Pinewood. Forests 2021. [online]. Vol. 12, no. 10, [cit. 2024-03-09]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f12101311
- ZEIDLER, A. Lexikon vad dřeva. Fld.czu.cz Česká zemědělská univerzita v Praze 2011 [online]. [cit 2024- 02-08] Dostupné z: http://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/lexikon_vad/index.htm
- ZEIDLER, A., BORŮVKA, V. Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin – podklady pro cvičení. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2016, ISBN 978-80-213-2674-3.

10 Seznam použitých zkratek a symbolů

BP	bakalářská práce
ČSN	Česká státní norma
WHO	Světová zdravotnická organizace
DTD	dřevotřísková deska
VOC látky	těkavá organická látka
PUR	polyuretan
RPF	resorcinol-fenolformaldehyd
EPI	emulgovaný polymerovaný izokyanát
PVAc	polyvinylacetát
EN	evropská norma
N	Newton
N/mm ²	newton na milimetr čtvereční
°C	stupeň Celsia
Fmax	maximální dosažená síla
mm/min	milimetr za minutu
%	procento
kg/m ³	kilogram na metr krychlový
MPa	mega pascal
Glulam	lepené lamelové dřevo
BSH	lamelové dřevo
JIS	Japonské technické normy
UV	ultrafialové záření
λ	lambda
W/m·K	watt na metr krát kelvin
min	minuta

s	sekunda
g/m ²	gram na metr čtvereční
-OH	hydroxylová skupina
-NH ₂	zásaditá aminoskupina
-COOH	kyselá karboxylová skupina
J	joule
mm	milimetr
g	gram
B	buk
S	smrk
O	olše

11 Seznam příloh

- Příloha č. 1 Technický list lepidla PUR
- Příloha č. 2 Technický list lepidla RPF
- Příloha č. 3 Technický list lepidla EPI
- Příloha č. 4 Tukeyho test smykové pevnosti
- Příloha č. 5 Tukeyho test hustoty
- Příloha č. 6 Tukeyho test vlhkosti
- Příloha č. 7 Tukeyho test míry porušení ve dřevě



Kestopur 1010



Kestopur 1010 is a one-part, moisture curing PU-adhesive for production of engineered wood products. It complies with the requirements of EN 15425 norm and is approved for manufacturing of CE-labelled glulam according to EN 14080.



- Fiber reinforced
- Low foaming
- Non-sagging

AREA OF APPLICATION

Kestopur 1010 is a 1-component, 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 glulam according to EN 14080, manufacturing of CE-labelled finger jointed wood according to EN 15497 and CE-labelled CLT (cross laminated timber) according to EN 16351.

It can also be used for manufacturing other engineered wood products and applications that require unexceptionally good moisture resistance.

Kestopur 1010 is solvent- and formaldehyde-free. Complies with M1-emission classification for building materials.

INSTRUCTIONS FOR USE

The surfaces to be bonded must be clean and dust-free. Suitable for nozzle and ribbon application. Apply the adhesive in an even layer one or two-sided. In order to determine the necessary pressing time and ensure the adhesive joint strength, adequate tests are to be carried out before use in full-scale production.

Use safety gloves when using Kestopur 1010 adhesive. Wear a breathing mask if spraying the glue and working in temperature above +40 °C.

Remove fresh adhesive stains with a dry cloth and clean the surfaces with acetone or Kilito Cleaner 307. Hardened adhesive can be removed only mechanically.

ADDITIONAL INFORMATION

The information given in this product data sheet is based on our tests and our practical knowledge. The technical data is defined in standard conditions. Variations in local working conditions will affect the product performance and result. The result is also strongly affected by working methods. We guarantee the high quality of our products according to our Quality Management System. No liability can be accepted from incorrect use of the product or prevailing

TYPE/BINDER	Polyurethane
DENSITY/SPECIFIC WEIGHT	approx. 1.2 kg/dm ³
COLORS	Transparent, light after drying.
VISCOSITY	10000 mPas (Brookfield, RVT 20 °C)
OPEN TIME	max. 10 min (amount applied 180 g/m ² , wood moisture 15 %, temperature 20 °C, RH 50 %)
CLASSIFICATIONS AND CERTIFICATES	EN 15425 I 70 GP 0,3 AUS/NZ 4364:2010 type I
CONSUMPTION	140-180 g/m ² finger jointing 160-200 g/m ² face jointing
PRESSING TIME	From 30 min when face jointing
WORKING CONDITIONS	Temperature in the hall at least 15 °C (according to EN 14080, EN16351, EN 15497)
APPLICATION TEMPERATURE	18-30 °C (according to EN 14080, EN16351; EN 15497)
AIR HUMIDITY	During gluing 40-75 % and after pressing ≥ 30 % (according to EN 14080, EN 16351)
WOOD MOISTURE CONTENT	6-20 % (we recommend approx. 15 % humidity)
JOINT SIZE	< 0.3 mm
STORAGE	Can be stored in a dry and cool place (+10- 20 °C), if stored in an unopened original package at +20 °C, the shelf life is 4 months for 1000 l containers and 6 months for smaller packages.

Date 29.01.2024



Page 2/2

conditions, over which we have no control. Thus, we cannot be held responsible for the final result. The user of the product must test the product's suitability for the intended application.

ENVIRONMENT AND SAFETY

Avoid unnecessary skin contact and exposure with the fresh product, use safety gloves. Refer to material safety data sheet. For information on product and package disposal, visit www.kiilto.com.

Product Information

Laminated beam PRF system 1711/2520

The combination can be used in door production, lamination, finger jointing and other applications in the wood working industry, where there is demand for high water and weather resistance of the joints.

Product Specification

	1711	2520				
Product	PRF adhesive	PRF hardener				
Delivery Form	Liquid	Liquid				
Colour	Reddish brown	Greyish brown				
Viscosity (at time of production)	3000 - 8000 mPas (Brookfield LVT, sp. 4, 12 rpm, 25°C / 77°F)	5000 - 13000 mPas (Brookfield LVT, sp. 4, 60 rpm, 25°C / 77°F)				
Density	Appr. 1150 kg/m ³	Appr. 1200 kg/m ³				
pH (at time of production)	7,0 - 9,0 (at 25°C / 77°F)	3,5 - 6,0 (at 25°C / 77°F)				
Dry content	54 - 57%	Not applicable				
Storage Life (months from time of production)	15°C/59°F ---	20°C/68°F 12	30°C/86°F ---	15°C/59°F ---	20°C/68°F 6	30°C/86°F ---
Storage Conditions	<p>Recommended storage temperature 10°C to 20°C / 50°F to 68°F.</p> <p>Only short term exposure to temp above 30°C / 86°F is acceptable.</p> <p>The product can be frozen but it must be thawed, raised to room temperature and homogenized before usage.</p> <p>The product can form a skin on the surface if the container is not properly closed.</p> <p>Is not sensitive to moisture.</p>		<p>Recommended storage temperature is 10°C to 20°C / 50°F to 68°F.</p> <p>Only short term exposure to temp above 30°C / 86°F is acceptable.</p> <p>The product can be frozen but it must be thawed, raised to room temperature and homogenized before usage.</p>			
Formaldehyde Emission Info	<p>Fulfils F****</p> <p>Bonded wood constructions will pass JAS MAFF Not. No. 1587 Class A</p>					
Glue Line Properties	High water and weather resistance.					

Contact Information

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
High Point, USA +1 336 841 5111
Amata, Vietnam +84 8 844 5743
Medellin, Colombia +57 4 3618888
www.akzonobel.com/adhesives

Version: 05 (2021-04-23)

Reason for changes: Changes to pressing time section and clarification added regarding adhesive classification code

Approvals

1711/2520 has been tested by the Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart - Otto-Graf-Institut - (MPA), Germany in accordance with EN 301 and fulfils the requirements for Adhesive type I-90-GP-0,6-M-w for use with the wood species spruce, fir and pine.

The product is suitable for the production of glued laminated timber according to EN 14080:2013. The product is suitable for the production of cross-laminated timber according to EN 16351:2015. The product is suitable for the production of structural finger-jointed solid wood according to EN 15497:2014.

Gluing Operation Information

Applications	Structural elements (face lamination) and finger joints	
Press Type	Cold Press	
	Hot Press	
	Continuous Press	
Press Temperature	Not below 20°C / 68°F	
Pressing Time		
acc to EN 302-6, 20°C/ 65% RH, Beech	0,3 mm glue line thickness	7,5h

The given pressing time is related to the production of straight beams with a moisture content of approximately 12%. When gluing curved beams or using wood with higher moisture content, the pressing times have to be prolonged.

Numerous parameters influence the performance of the glue system, such as the condition of the press, the moisture content of the substrate, the ambient temperature and relative humidity, the type of construction, bond-line thickness, and the species of wood.

The given pressing time is related to a material temperature of approximately 68°F (20°C). If the temperature of the material is lower, the pressing time must be prolonged. The value given in the table is a minimum value and is to be used as guidelines.

Pot Life	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F
	2h 15 min	1h 10 min	30 min
Pressure	Minimum 0,5 MPa for soft wood. Minimum 1,0 MPa for hard wood. In laminated beam production: Minimum 0,7 MPa for 33 mm lamellas. Minimum 0,9 MPa for 45 mm lamellas.		

Contact Information

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
 High Point, USA +1 336 841 5111
 Amata, Vietnam +84 8 844 5743
 Medellin, Colombia +57 4 3618888
www.akzonobel.com/adhesives

Version: 05 (2021-04-23)

Reason for changes: Changes to pressing time section and clarification added regarding adhesive classification code

	Gluing condition	Max Closed
Assembly Time	20°C/68°F, 250g/m ² / 51 lbs/1000ft ²	20'
	20°C/68°F, 400g/m ² / 82 lbs/1000ft ²	40'

The assembly time is influenced by the glue spread, the moisture content in the wood, and the ambient temperature and humidity. Higher glue spread, lower temperature, and higher moisture content in the wood and in the surrounding air will extend the assembly time.

The pressure must be applied while the adhesive is still tacky. The total assembly time (open assembly time + closed assembly time) must be evaluated in each specific case.

A slight squeeze out of adhesive along the edge of all the joints when pressure is applied indicates adequate glue spread and that the total assembly time has not been exceeded.

Mixing Ratio (by weight)	100:15, adhesive:hardener
Glue Spread	170 - 450 g/m ² , for laminated beams 250 - 450 g/m ²

The glue spread can vary depending on the wood species, wood moisture, relative humidity, room temperature, press type, assembly time and planing quality. However, the lower limit of glue spread should not be lower than the value in the table above.

In the production of load-bearing components, a reduction of the glue spread, e.g. in the case of very short assembly times, may only be carried out with the approval of AkzoNobel's technical support, taking into account the production parameters on the respective production line. This optimisation requires that the specified parameters are adhered to and that continuous checks in the form of delamination tests are carried out. A written and signed confirmation from AkzoNobel and the adhesive testing body is mandatory for this.

Moisture content of wood	8 - 15%, for laminated beams preferably 10 - 12%
Preparation of wood	For best result the wood must be smoothly planed. For optimum bond strength the bonding operation shall take place within 24 hours after preparation.
Temperature of wood	In order to meet the given press times, wood temperature shall not be below 20°C / 68°F
Post curing	1 day at 20°C / 68°F

Contact Information

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
 High Point, USA +1 336 841 5111
 Amata, Vietnam +84 8 844 5743
 Medellin, Colombia +57 4 3618888
www.akzonobel.com/adhesives

Version: 05 (2021-04-23)

Reason for changes: Changes to pressing time section and clarification added regarding adhesive classification code

Additional information for finger jointing

For the production of finger joints the requirements given in DIN EN 15497 and EN14080:2013 must be followed.

The table below highlights important bonding information for finger jointing:

Mixing Ratio (by weight)	100:15, adhesive:hardener
Glue Spread	250 - 350 g/m ²
Curing time	7,5 h
Pressure	According to EN 14080:2013 / EN 15497

Further treatment of finger joints

Finger jointed lamellae may only be further processed directly after the finger jointing operation if the transportation equipment and the planing of the lamellae do not expose the joints for any damaging stresses. Otherwise the pressing time in the table above shall be followed.

Handling and HSE info

Handling	Always use gloves and goggles when handling the product.
Cleaning	Warm water (must be cleaned before curing)
Waste handling - of the products	Glue - Classified as hazardous waste. (Contains free phenol and resorcinol.) Hardener - Classified as hazardous waste. (Contains free formaldehyde.) Mixed glue and hardener – Can be treated as non hazardous waste when fully cured. NOTE! There might be national and/or local regulatory differences, therefore always keep a dialogue with the local authorities.
Waste water treatment - of the waste water	<u>Send of for destruction</u> Use an approved local contractor. <u>Incineration with woodchips</u> Please note the requirements according to Directive 2000/76/EC on incineration of waste. Contact our Environmental Advisor for further information. For more info, see General Information. NOTE! There might be national and/or local regulatory differences, therefore always keep a dialogue with the local authorities.
Health and Safety	For more information, see respective SDS.

Contact Information

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
High Point, USA +1 336 841 5111
Amata, Vietnam +84 8 844 5743
Medellin, Colombia +57 4 3618888
www.akzonobel.com/adhesives

Version: 05 (2021-04-23)

Reason for changes: Changes to pressing time section and clarification added regarding adhesive classification code

Legal clause

The information is based on laboratory tests and practical experience. It is introductory and intended to help the user find the most suitable method of working. Since the user's production conditions are beyond our control, we cannot be held responsible for the results of the work which is affected by local circumstances. In each particular case testing and continuous control are recommended.

Contact information

Stockholm, Sweden +46 8 743 40 00
High Point, USA +1 336 841 5111
Amata, Vietnam +84 8 844 5743
Medellin, Colombia +57 4 3618888
www.akzonobel.com/adhesives

Version: 05 (2021-04-23)

Reason for changes: Changes to pressing time section and clarification added regarding adhesive classification code



Kestokol WR 05



Kestokol WR 05 is 2-component emulsion polymer isocyanate adhesive suitable for glulam production according to JAS 111 norm (Norsk Träteknisk Institut (NTI), 2011) conditions class C.



- Unprotected outside use
- Excellent weather resistance

AREA OF APPLICATION

Kestokol WR 05 + Hardener WR is an emulsion polymer isocyanate adhesive that has excellent resistance against climatic stress. It fulfils the boiling water resistance requirements according to JIS K 6806-1985 (1995) and EN 204D4 durability class. It is also approved to be used in glulam production according to the JAS 111 norm (Norsk Träteknisk Institut (NTI), 2011).

Kestokol WR 05 + Hardener WR can be used in objects exposed to constantly changing weather conditions such as garden furniture, boat gluing's (not for parts below the water level) and specific glulam applications.

INSTRUCTIONS FOR USE

Add 15 weight parts of Hardener WR into 100 weight parts of Kestokol WR 05 adhesive and mix well. If the pot-life of the mixture is exceeded, the mixture starts to foam. New mixture can be added into an older mixture within the pot-life.

Check that the joints fit well. Apply adhesive evenly on one side. Assemble and press the parts together aiming at an even squeeze out for the whole length of the joint. Joints can be pressed in a cold, hot or high frequency press. In order to determine the necessary pressing time and ensure the adhesive joint strength, adequate tests are to be carried out before use in full-scale production.

Parts may need to be stored for a while before further machining to reach the necessary bond strength. The final strength and water resistance of the bond is reached within 7 days.

Technical data for general and specific glulam applications:

	General use	Specific glulam applications
Consumption	140 - 160 g/m ²	200 - 240 g/m ²
Open time	5 - 7 min	7 - 12 min
Pressing time (minimum)	20 min	30 min

ADDITIONAL INFORMATION

The information given in this product data sheet is based on our tests

DENSITY/SPECIFIC WEIGHT	1,15 kg/dm ³
pH	6,5 - 8,0
MIXING RATIO	100 : 15
VISCOSITY	9000 mPas (Brookfield RVT +20 °C)
MIXTURE VISCOSITY	13500 mPas (Brookfield RVT +20 °C) immediately after addition of hardener
MIXTURE COLOUR	light beige
POT LIFE	The pot-life of the mixture is at most 20 min (+20 °C)
OPEN TIME	5 - 12 min (consumption 150 - 220 g/m ²)
CONSUMPTION	140 - 240 g/m ²
PRESSING TIME	minimum 20 min
MINIMUM FILM FORMING	+5 °C
WOOD MOISTURE CONTENT	6 - 15 %
TEMPERATURE RESISTANCE	EN 14257 (Waz 9): 12,5 N/mm
STORAGE	In unopened containers, above +1 °C, for 6 months. After long storing, stir before use.



and our practical knowledge. The technical data is defined in standard conditions. Variations in local working conditions will affect the product performance and result. The result is also strongly affected by working methods. We guarantee the high quality of our products according to our Quality Management System. No liability can be accepted from incorrect use of the product or prevailing conditions, over which we have no control. Thus, we cannot be held responsible for the final result. The user of the product must test the product's suitability for the intended application.

ENVIRONMENT AND SAFETY

Avoid unnecessary skin contact and exposure with the fresh product, use safety gloves. Refer to material safety data sheet. For information on product and package disposal, visit www.kiilto.com.

Příloha č. 4: Tukeyho test smykové pevnosti

		BB	BB	BB	OO	OO	OO	SS	SS	SS	BS	BS	BS	BO	BO	BO	SO	SO	SO
		E	P	R	E	P	R	E	P	R	E	P	R	E	P	R	E	P	R
BB	E		0,00	0,00	0,97	1,00	0,10	0,57	1,00	0,99	0,24	1,00	1,00	0,79	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
BB	P	0,00		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BB	R	0,00	1,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OO	E	0,97	0,00	0,00		0,19	0,00	0,00	1,00	0,13	0,00	1,00	1,00	0,01	0,16	0,72	0,40	1,00	0,16
OO	P	1,00	0,00	0,00	0,19		0,91	1,00	0,66	1,00	0,98	0,37	0,86	1,00	0,00	1,00	1,00	0,35	1,00
OO	R	0,10	0,00	0,00	0,00	0,91		1,00	0,00	0,95	1,00	0,00	0,01	1,00	0,00	0,38	0,70	0,00	0,92
SS	E	0,57	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00		0,06	1,00	1,00	0,02	0,14	1,00	0,00	0,91	0,99	0,01	1,00
SS	P	1,00	0,00	0,00	1,00	0,66	0,00	0,06		0,55	0,01	1,00	1,00	0,14	0,02	0,99	0,88	1,00	0,62
SS	R	0,99	0,00	0,00	0,13	1,00	0,95	1,00	0,55		0,99	0,28	0,77	1,00	0,00	1,00	1,00	0,26	1,00
BS	E	0,24	0,00	0,00	0,00	0,98	1,00	1,00	0,01	0,99		0,00	0,03	1,00	0,00	0,64	0,90	0,00	0,99
BS	P	1,00	0,00	0,00	1,00	0,37	0,00	0,02	1,00	0,28	0,00		1,00	0,04	0,06	0,90	0,65	1,00	0,34
BS	R	1,00	0,00	0,00	1,00	0,86	0,01	0,14	1,00	0,77	0,03	1,00		0,29	0,01	1,00	0,97	1,00	0,83
BO	E	0,79	0,00	0,00	0,01	1,00	1,00	1,00	0,14	1,00	1,00	0,04	0,29		0,00	0,98	1,00	0,04	1,00
BO	P	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,06	0,01	0,00		0,00	0,00	0,07	0,00
BO	R	1,00	0,00	0,00	0,72	1,00	0,38	0,91	0,99	1,00	0,64	0,90	1,00	0,98	0,00		1,00	0,89	1,00
SO	E	1,00	0,00	0,00	0,40	1,00	0,70	0,99	0,88	1,00	0,90	0,65	0,97	1,00	0,00	1,00		0,62	1,00
SO	P	1,00	0,00	0,00	1,00	0,35	0,00	0,01	1,00	0,26	0,00	1,00	1,00	0,04	0,07	0,89	0,62		0,32
SO	R	1,00	0,00	0,00	0,16	1,00	0,92	1,00	0,62	1,00	0,99	0,34	0,83	1,00	0,00	1,00	1,00	0,32	

Příloha č. 5: Tukeyho test hustoty

		BB	BB	BB	OO	OO	OO	SS	SS	SS	BS	BS	BS	BO	BO	BO	SO	SO	SO
		E	P	R	E	P	R	E	P	R	E	P	R	E	P	R	E	P	R
BB	E		0,38	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BB	P	0,38		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BB	R	0,09	1,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OO	E	0,00	0,00	0,00		0,62	0,01	0,00	0,71	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,20	1,00
OO	P	0,00	0,00	0,00	0,62		0,99	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,99
OO	R	0,00	0,00	0,00	0,01	0,99		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,23
SS	E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	1,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,99	0,03
SS	P	0,00	0,00	0,00	0,71	0,00	0,00	0,00		1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
SS	R	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	1,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29
BS	E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,91	1,00	0,89	0,00	0,93	0,00	0,00	0,00
BS	P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91		1,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
BS	R	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00		0,16	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00
BO	E	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89	0,01	0,16		0,45	1,00	0,00	0,00	0,00
BO	P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45		0,36	0,00	0,00	0,00
BO	R	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	0,02	0,21	1,00	0,36		0,00	0,00	0,00
SO	E	0,00	0,00	0,00	0,02	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	0,28
SO	P	0,00	0,00	0,00	0,20	1,00	1,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00		0,83
SO	R	0,00	0,00	0,00	1,00	0,99	0,23	0,03	0,13	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,83	

