

Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta
Ústav nábytku, designu a bydlení

**Vliv teploty na pevnost lepeného spoje nábytkových
hran z jehličnatého dřeva**
Diplomová práce

2016/2017

Bc. Michaela Picková

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: *Vliv teploty na pevnost lepeného spoje nábytkových hran z jehličnatého dřeva* vypracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně dne.....

podpis studenta.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu Ing. Josefu Hlavatému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a za pomoc v průběhu zpracování celé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat firmě DSP nábytek za přípravu zkušebních vzorků.

Jméno autora: Bc. Michaela Picková

Název práce: Vliv teploty na pevnost lepeného spoje nábytkových hran z jehličnatého dřeva

Klíčová slova: polyuretan, etyl-vinyl-acetát, lepidlo, šikmý smyk, odlupování, olepování hran, dýhová hrana

Abstrakt:

Tato práce řeší vliv teploty na pevnost lepeného spoje u nábytkových hran z jehličnatého dřeva. Cílem výzkumu bylo zjistit rozdíl mezi použitím tavného etyl-vinyl-acetátového lepidla (EVA) a tavného polyuretanového lepidla (PUR). Práce se zaměřuje zejména na maximální dosažené pevnosti lepených spojů za různých teplot.

K testování pevnosti byli využity zkoušky odolnosti lepených spojů prostřednictvím odlupování pod úhlem 90° a zkoušky šikmého tlakového smyku pod úhlem 45°. Data byla zpracována pomocí analýzy rozptylu (ANOVA) a porovnání středních hodnot pevností lepidel mezi sebou.

Z výsledků vyplývá, že při zkoušce v odlupování má vyšší odolnost PUR lepidlo, které i při 70 °C odolalo namáhání. Při šikmém tlakovém smyku nebylo možné uskutečnit srovnání z důvodu překročení limitu rozsahu měřitelnosti použitého trhacího stroje při testování vzorků PUR lepidla.

Na základě zjištěných údajů lze konstatovat, že tavné PUR lepidlo je pro olepování hran nábytkových dílců vhodnější než tavné EVA lepidlo, které nedosahuje požadovaných pevností v obou typech provedených zkoušek.

Name of student: Bc. Michaela Picková

Name of thesis: Temperature influence on strength of adhesive joint of coniferous wood furniture edges

Key words: Polyurethane, ethyl vinyl acetate, adhesive, shear angle test, peeling, edge banding, veneer

Abstrakt:

This work aims on the effect of temperature on the strength of adhesive joints of coniferous wood furniture edges. The objective of the research was to determine the difference between hot melt ethyl-vinyl-acetate (EVA) and hot melt polyurethane (PUR) adhesives. The main focus was devoted to the maximum achievable strength of bonded joints at different temperatures.

The peeling test at an angle of 90 degrees and a shear pressure test at an angle of 45 degrees were performed to test the strength of joints to resist the stress. The data had been analyzed using analysis of variance (ANOVA) method to compare the strength mean values of glues with each other.

The results show that PUR glue achieves higher resistance in peel as it withstood the stress even at 70°C. The oblique shear pressure test results were however not possible to compare because of exceeding the measuring range limit of the ripping device while testing PUR adhesive samples.

Based on the data it can be summarized that melt PUR adhesive for furniture edge banding is more convenient than EVA adhesive which does not reach the required strength in both types of tests conducted.

OBSAH

1. ÚVOD.....	8
2. CÍL PRÁCE	10
3. LITERÁRNÍ PŘEHED.....	11
3.1. Dřevotřískové desky.....	11
3.2. Materiály na olepování bočních ploch dílců	12
3.3. Jehličnaté dřevo.....	14
3.4. Technologie olepování	15
3.5. Fyzikální vlastnosti dřeva ve vztahu k olepování	16
3.6. Teorie lepení.....	17
3.7. Tavná lepidla.....	21
3.8. Termostabilita lepidel.....	23
3.9. Požadavky na pevnost lepených spojů.....	23
4. POUŽITÉ MATERIÁLY A STROJE	25
4.1. Použité materiály.....	25
4.2. Stroje a přístrojové vybavení	27
4.3. Vzorky.....	31
5. METODIKA	34
5.1. Cyklování vzorků	34
5.2. Postup zkoušky pevnosti v lepené spáře odlupováním pod úhlem 90°	35
5.3. Postup zkoušky pevnosti v lepené spáře pro šikmý tlakový smyk pod úhlem 45°	36
5.4. Postup zkoušky odolnosti v ohybu u dýhy.....	37
5.5. Zpracování naměřených hodnot.....	38
6. VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	41
6.1. Pevnost v lepené spáře – odlupování pod úhlem 90°.....	41

6.2.	Pevnost v lepené spáře – šikmý tlakový smyk.....	48
6.3.	Napětí v lepené spáře – šikmý tlakový smyk.....	51
6.4.	Pevnost dýhy v ohybu.....	55
7.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	57
8.	DISKUSE.....	60
9.	ZÁVĚR.....	62
10.	SUMMARY.....	64
11.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
11.1.	Použitá literatura.....	66
11.2.	Použité normy.....	68
12.	SEZNAM TABULEK	69
13.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	70
14.	SEZNAM POŽITÝCH ZKRATEK.....	72
15.	SEZNAM PŘÍLOH.....	73

1. ÚVOD

V dnešní době plné výrobních linek a nových výrobních postupů je důležité, aby výrobky, potažmo tedy i technologie jejich výroby, splňovaly vysoké nároky na kvalitu. Svou roli však samozřejmě hraje i cena a estetika produktu. Z důvodu snížení cen nábytku je tento již poměrně dlouhou dobu vyráběn místo masivu především z aglomerovaných materiálů. Ty by však samy o sobě nesplňovaly estetické požadavky zákazníků, jelikož po formátování vznikají nevzhledné boční plochy, a tak je nutné využívat technologii olepování bočních ploch nábytkových dílců (nejčastěji dýhou, ABS hranou, náklížkem či fólií). Dle budoucího využití daného nábytku je v tomto kroku výrobního procesu samozřejmě nutností optimalizovat lepené spoje těchto hran s deskami tak, aby byl nábytek schopen odolávat nejen mechanickým vlivům, ale i vlhkosti a teplotním vlivům (především nábytek např. do kuchyní nebo koupelen). Tyto faktory prostředí totiž při nevhodné volbě lepidla či technologii nanášení často na nábytku způsobují i nevratné škody.

Nejčastěji využívaným typem lepidel pro olepování hran nábytkových dílců jsou bezesporu lepidla tavná. Ta totiž umožňují velmi jednoduchou manipulaci a skladování před použitím, aplikace prostřednictvím prostého rozehřátí je technologicky v rámci linky poměrně nenáročná a po jejich opětovném ochlazení, které je velmi rychlé jsou vytvrzena. Jednotlivá tavná lepidla se však liší a vyžadují svůj specifický technologický postup a tedy i přizpůsobení výrobního procesu. Je tedy zapotřebí si vybrat kvalitní druh lepidla a optimalizovat k němu technologickou cestu pro konkrétní daný typ nábytku již před započítáním jeho vlastní výroby.

Za zmínku stojí též fakt, že z důvodu vysoké hygroskopicity dřeva a materiálů na bázi dřeva je pro zachování tvaru a vlastností výrobků z nich nutné dodržet podmínky pro které byly výrobním procesem koncipovány – a to nejen při využívání produktu u zákazníka ale i v průběhu skladování a přepravy. To však ne vždy bývá dodrženo a dlouhodobé působení vlhkosti mnohdy navíc ve spojení s teplem nepříznivě působí na lepenou spáru. Potom co výrobce vezme v potaz tyto okolní faktory je nezbytně nutné před zahájením výroby otestovat několik druhů lepidel a přesvědčit se o jeho kvalitě a vhodnosti použití pro konkrétní typy materiálů. V rámci této diplomové práce byl tento proces simulován v laboratorních podmínkách. Testována byla dvě tavná lepidla běžně využívaná tuzemskými výrobci – lepidlo na bázi etyl-vinyl-acetátu (dále jen EVA) a druhé na bázi polyuretanu

(dále jen PUR), z nichž druhé jmenované je nákladnější a je využíváno především na nábytek pro náročnější aplikace.

Co se týče materiálu olepovací hrany, byla zvolena dřevěná dýha, která bývá dlouhou dobu před použitím skladována v návinu ve formě pásky. Díky tvarové paměti může pak takováto hrana držet napětí i po aplikaci a při působení zvýšených teplot nebo vlhkosti napomoci odlepení. Navíc byla vybrána dýha z borovicového dřeva jejíž vysoký obsah pryskyřice by rovněž mohl nepříznivě ovlivnit lepený spoj.

Metody pro testování vzorků byly zvoleny tak, aby odpovídaly běžným nejméně odolným metodám testování – odlupování pod úhlem 90° a šikmý tlakový smyk pod úhlem 45° . Zkouška odlupování pod úhlem 90° byla graficky srovnána se zkouškou v ohybu dýhové hrany, kde byla zjištěna síla potřebná k přilepení hrany.

2. CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je zjistit vliv teploty na pevnost lepeného spoje nábytkových hran lepených pomocí dvou druhů tavných lepidel. Experimentální část práce se věnuje testování vzorků připravených pro zkoušku v odlupování hrany pod úhlem 90° a šikmý tlakový smyk pod úhlem 45°. Testované vzorky byli předem vystaveny teplotnímu cyklickému namáhání (simulace skutečného životního cyklu nábytku) a následně byli pro účely pevnostních zkoušek ohřáty na teploty v rozmezí 20 °C až 70 °C. Vzorky pro tuto práci byly vyrobeny z dřevotřískové laminované desky a dýhové olepovací pásy z borovicového dřeva za použití tavného etyl-vinyl-acetátového lepidla a polyuretanového lepidla.

3. LITERÁRNÍ PŘEHED

3.1. Dřevotřískové desky

Na výrobu dřevotřískových desek se nejběžněji používá močovinoformaldehydové lepidlo. Toto lepidlo však lze použít pouze do suchého prostředí a jeho dalším nedostatkem je uvolňování formaldehydu, který má toxické účinky na lidský organismus. Z tohoto důvodu je více prosazováno lepidlo fenolformaldehydové, které formaldehyd neuvolňuje, je odolné proti vlhkosti a nespornou výhodou je navíc vytvrzování při nižší teplotě, které je méně energeticky náročné (Gelbič, 2000).

Výroba dřevotřískových desek (DTD)

DTD se vyrábějí ze dřevní hmoty jehličnatých a listnatých dřevin v podobě malé třísek spojovaných posléze močovinoformaldehydovou pryskyřicí. Tyto desky jsou poté ošetřovány tekutým parafinem a lze je dále upravovat nejen laminováním ale také dýchováním apod. Tyto desky jsou ve středu hrubé, jejich povrch je však hladký a uzavřený (Svoboda et al., 2013).

Podle způsobu lisování se dělí (Kafka, 1989; Rowell, 2013):

- *plošné lisované DTD* – třísky uloženy rovnoběžně s plochou,
- *vytlačené lisované DTD* – třísky uloženy kolmo na plochu.

Podle počtu vrstev se dělí:

- *jednovrstvé* – deska je vyrobena z jednoho druhu třísek,
- *třívrstvé* – střední vrstva desky je vyrobena z hrubých třísek a povrchové vrstvy z jemných třísek,
- *vícevrstvé* – na plochách jsou vrstvy velmi jemných třísek.

Podle povrchové úpravy se dělí (Kafka, 1989):

- a) *DTD tmelené* – jsou určeny pro barevně dokončené nábytkové dílce. Na plochu je nanášena vrstva alkydového nebo polyesterového tmelu.
- b) *DTD laminované (dále jen DTD-L)* – na povrchu desky je nalisovaná melaminová fólie nebo jiná fólie, která tvoří povrchovou úpravu. Laminování se provádí

současně s lisováním DTD. DTD-L jsou určeny pro přímé použití na nábytkové dílce bez dalšího dokončování.

3.2. Materiály na olepování bočních ploch dílců

3.2.1. Dýhové olepovací pásy

Dýhy jsou materiály získané především podélným dělením rostlého dřeva na tenké listy nebo pásy, které jsou následně slepeny.

Vlastnosti, rozměry a jakost jsou dány normami:

- ČSN 49 2301 Dýhy. Základní a společné ustanovení,
- ČSN 49 2315 Okrasné dýhy,
- ČSN 49 2316 Konstrukční dýhy,
- ČSN 49 2320 Sesazenky a hrany.

Podle způsobu použití se dýhy dělí:

- a) *Okrasné* – vhodné pro výrobu dýhových sesazenek pro dýhování viditelných ploch výrobků.
- b) *Konstrukční* - těchto dýh převažují kritéria technická a ekonomická. Používají se např. jako vnitřní dýhy pro zlepšení technických vlastností konstrukčních desek, k dýhování povrchů, které nejsou vidět a jako konstrukční materiál při výrobě tvarových lamelových dílců.

Podle způsobu výroby se dělí (Zemiar et al. 2009):

- a) *řezané* – tímto způsobem se vyrábějí dýhy, které nelze plastifikovat. Vznikají řezáním na pilách s jedním ozubením.
- b) *krájené* – vznikají postupným okrajováním dýhových listů nožem.
- c) *loupané* – vznikají odlupováním dýhového pásu nožem z otáčejícího špalku.
- d) *vyráběné zvláštními způsoby*:
 - *lamidýhy (ARO dýhy)* – vznikají krájením, popřípadě loupáním bloku slepených dýh.

- *mikrodýhy* – velmi tenké dýhy vznikají loupáním nebo krájením na speciálních loupacích nebo krájecích strojích.

3.2.2. Fólie

Fólie jsou vyráběny z termoplastů a reaktoplastů a jsou vhodné pro olepování ploch nábytkových dílců. Nejběžněji se používají fólie tloušťky 0,2 mm. Protože jsou fólie tenčí než přírodní dýhy, jsou v případě jejich použití kladeny vyšší nároky na kvalitu lepeného povrchu. Výhoda fólií při olepování dílců tkví především ve stejných opakujících se dezénech – zvýšení uniformity výrobků a možnost jednoduššího navazování dezénu dílců než v případě přírodní dřevěné „kresby“. Termoplastické fólie se dělí na fólie s podkladem, bez podkladu a pěnové. V nábytkářském průmyslu se používají především fólie na bázi PVC, ABS, PS a PE. Reaktoplastické fólie jsou vyráběny pouze s podkladem z důvodu křehkosti pryskyřice (Zemiar et al. 2009).

Dále se dělí na (Zemiar et al. 2009):

- a) *Fólie z polyvinylchloridu (PVC)* – vyrábějí se PVC tvrdé nebo měkké válcované fólie v různých barevných odstínech s potiskem kresby dřeva nebo pěnové lehčené fólie v různé barevné úpravě. Nelehčené fólie jsou odolné proti vodě, snadno se čistí, mohou mít antistatickou úpravu proti prachu.
- b) *Fólie polystyrenové (PS, ABS)* – vyrábějí se v různých barevných odstínech a použití je velmi podobné jako u PVC fólií.
- c) *Fólie aminoplastické (MF, MF + UF)* – v nábytkářském průmyslu jsou tyto fólie nejpoužívanější. Podstatu těchto fólií tvoří sulfitový papír, který je impregnovaný melaminoformaldehydovou nebo močovinomelaminovou pryskyřicí. Slouží k olepení konstrukčních desek stejným způsobem jako dýhy.
- d) *Fólie polyesterové (PES)* – vyrábějí se ze speciálního sulfitového papíru, který je impregnovaný pryskyřicí.

3.3. Jehličnaté dřevo

Dřevo jehličnanů je složeno z několika druhů buněk s pravidelným uspořádáním. V následujícím výčtu jsou jednotlivá pletiva těchto dřev popsána detailněji, obecně však lze shrnout jejich funkce na mechanické a vodivé vykonávané tracheidami, a funkci zásobní kterou zajišťují parenchymatické buňky (Hrubý, 2010).

3.3.1. Tracheidy

Tracheidy čili cévice jsou základním stavebním elementem jehličnatého dřeva, tvoří více jak 90 % celého objemu dřeva u borovice až 93,1 % dřeva. Tracheidy jsou především mrtvé buňky (na podzim se ucpávají metabolity), ty živé se nachází až v posledním letokruhu.

V letokruhu se nachází jarní nebo letní tracheidy, které jsou na příčném řezu uspořádány v pravidelných řadách (Šlezingerová, 2012).

- *jarní tracheidy* – plní vodivou funkci, obsahují velký lumen a tenké blány s mnoha ztenčeninami, jsou větší než letní tracheidy,
- *letní tracheidy* – plní mechanickou funkci, obsahují malý lumen, tlusté stěny a málo ztenčenin.

3.3.2. Dřeňové paprsky

Vznikají v prvním roce života kmene, rozbíhají se paprscitě od středu kmene ke kůře kolmo na letokruhy. Primární paprsky vychází ze dřene a sekundární paprsky začínají až v letokruhu. Nejvýraznější jsou dřeňové paprsky na radiálním řezu, kde tvoří rozmanitě široké kolmo k letokruhu směřující silné a lesklé pásy. Dřeňové paprsky mají vyšší zastoupení u listnatých dřevin oproti jehličnatým, zde je podíl dřeňových paprsků k celkovému objemu dřeva velmi malý (Šlezingerová, 2012).

3.3.3. Parenchymatické buňky

V jehličnatém dřevě tvoří dřeňové paprsky, pryskyřičné kanálky a u některých jehličnanů také dřevní parenchym (Šlezingerová, 2012).

- *dřevní paprsky* – jsou úzké, na výšku jsou tvořeny několika řadami parenchymatických buněk.
- *pryskyřičné kanálky* – jsou dlouhé a úzké mezi buňkové kanálky, jsou tvořeny třemi vrstvami parenchymatických buněk. Buňky vnitřní vrstvy produkují pryskyřici, kolem nich se nachází vrstva mrtvých buněk vyplněna vzduchem a na obvodu se nachází živé parenchymatické buňky se zásobou živin.
- *dřevní parenchym* – je málo pouze zastoupen v jehličnatém dřevě, protože jehličnany nepotřebují tolik zásobních látek na tvorbu nového jehličí jako listnaté.

3.3.4. Pryskyřičné kanálky

Jedná se o tenké kanálky naplněné pryskyřicí a vyskytují se pouze v jehličnatém dřevě. Dělí se na svislé, které jsou obsažené v letním dřevě a vodorovné, které procházejí dřevními paprsky. Pouhým okem jsou viditelné pouze svislé kanálky, na příčném řezu se projevují jako tečky a na podélném jako tenké hnědé čárky (Šlezingerová, 2012).

Pryskyřičné látky mají vysoký obsah pryskyřičných látek, které způsobují lepivost, znečištění nástrojů při obrábění, vytékání z již hotových výrobků ale především zvyšují odolnost a trvanlivost dřeva (Šlezingerová, 2012).

3.4. Technologie olepování

3.4.1. Olepování bočních ploch

Jedná se o jeden z nejnáročnějších způsobů olepování, který se provádí na průběžné olepovačce hran, na které lze nalepovat náklížky z masivu, dýhové nebo plastové pásy. Velmi zde záleží na rychlosti posuvu dílce a také na teplotě použitého lepidla. Lepení se provádí pomocí tavných lepidel na průběžných olepovačkách – ty mohou být jednostranné nebo oboustranné.

Na bok desky se většinu nanese tryskami nebo válečkem nejběžnější tavné lepidlo EVA s teplotou nanášení 160-190 °C, při vyšších nárocích na odolnost bývá použito PUR lepidlo s teplotou nanášení 140-160 °C. Vzápětí se na něj příkládá náklížek nebo dýhová olepovací páska, která je k dispozici ze zásobníku a přitlačí se průběžně přitlačnými válečky. Dle vybavení stroje v dalším kroku probíhá např. odřezávání přesahů náklížků, zarovnávací frézování, zkracování, profilování či broušení (Nutsh et al., 2006).

3.4.2. Olepování technologií SLIM LINE

Nová technologie integrovaná do stávající olepovací linky, kde nanášení roztaveného PUR lepidla probíhá pouze na olepovací pásku nikoli na dílec. Díky tomu se nanáší jen velmi tenká vrstva lepidla v tloušťce 0,05 až 0,1 mm což je ve výsledku pouze 80-90 g/m² oproti obvyklým až 150 g/m². Jedná se tedy o nezanedbatelnou úsporu pro výrobce. Olepování PUR lepidlem se takto dostává na stejnou cenovou úroveň jako olepování pomocí EVA lepidla. Méně použitého lepidla znamená menší lepenou spáru, méně přetoků lepidla, a především lepší estetický vzhled. Technologie SLIM LINE dosahuje stejné kvality, jako olepování laserovou technologií (Malý, 2013).

3.5. Fyzikální vlastnosti dřeva ve vztahu k olepování

3.5.1. Měrné teplo

Měrné teplo charakterizuje schopnost dřeva pohlcovat teplo, u dřeva je měrné teplo velké tzn., že dřevo má velkou schopnost pohlcovat teplo. Tato veličina je závislá na přítomnosti vody ve dřevě, která měrné teplo dřeva zvyšuje. Velký význam má rovněž při sušení, paření, vaření a impregnaci dřeva (Kafka, 1989).

3.5.2. Tepelná vodivost dřeva

Tepelná vodivost udává schopnost dřeva vést teplo. Dřevo má malou tepelnou vodivost, která se zvětšuje s narůstajícím objemovou hmotností, vlhkostí a teplotou, záleží i na orientaci vláken dřeva. Tepelná vodivost je velmi důležitou veličinou při posuzování tepelných vlastností materiálů (Kafka, 1989).

3.5.3. Tepelná roztažnost dřeva

Působením tepla se dřevo roztahuje, naopak při klesání teploty se stahuje. Tepelná roztažnost nemá příliš velký význam, protože vlivem zvýšené teploty dřevo sesychá – zmenšuje objem, proto se roztažnost prakticky nemůže objevit (Kafka, 1989).

3.6. Teorie lepení

Lepení je schopnost některých látek – lepidel – spojovat dvě tělesa na základě přilnavosti k jejich povrchu. Přitažlivé a odpuzivé síly a jejich výsledné působení jsou velmi důležitým činitelem, který ovlivňuje vlastnosti lepidel. Jsou označovány jako koheze (soudržnost – většinou v souvislosti 1 fáze) a adheze (přilnavost – mezifázová). Je-li adheze lepeného spoje větší než koheze spojovaných materiálů, dojde při mechanickém namáhání k porušení materiálu mimo lepidlový spoj. Při opakovaném namáhání tak dojde až k destrukci lepeného spoje (Boubík, 1966).

Přednosti lepení (Eisner, 1958):

- dovoluje spojovat stejné nebo různé materiály bez ohledu na jejich tloušťku,
- je možné připravit spoje vodotěsné a plynotěsné,
- není narušen estetický vzhled,
- lepený spoj tlumí vibrace a zvyšuje tuhost,
- lepením se nezvyšuje hmotnost,
- vysoká pevnost spojů při smykovém namáhání a rázová houževnatost.

Nevýhody lepení (Eisner, 1958):

- vysoké požadavky na rovnost a čistotu slepovaného povrchu,
- při špatné adhezi povrchu jsou nutné speciální úpravy povrchu,
- lepený spoj nelze rozebrat,
- lepený spoj je méně odolný při namáhání v odlupování,
- životnost lepících směsí je omezená,
- maximální pevnost spoje je dosažena až po dosažení určitého času,

- omezená odolnost vůči vyšším teplotám,
- lepení nelze uskutečnit při nízkých teplotách (Boubík, 1966).

Pro vznik soudržného spoje je potřeba (Tesařová, 2014):

- vhodně zvolit druh lepidla s ohledem na vlastnosti lepených materiálů,
- důležitá je polarita povrchu a polarita lepeného spoje – polární lepidlo se používá pro lepení polárních povrchů např. dřeva,
- mechanické vlastnosti – u lepených spojů je nutno odstranit nejprve nerovnost povrchu broušením,
- hodnota viskozity nebo výtokové doby lepidla – při nanášení musí mít povrch vyšší viskozitu, aby nepenetrovala do povrchu před vytvořením lepidlového filmu,
- povrchové napětí lepidla musí být menší než napětí lepeného povrchu, to je podmínka pro dosažení co nejmenšího úhlu smáčení lepidla při lepení povrchů.

Podmínky lepení (Boubík, 1966):

- Čistota povrchu* – je důležitá pro dosažení optimální pevnosti lepeného spoje. Zbytky nečistot ze stykových ploch je nutno odstranit, nejčastěji odmašťováním těkavými organickými rozpouštědly nebo vodnými roztoky saponátů.
- Hladkost povrchu* – pro vznik pevného spoje mezi tuhými materiály jsou vhodné jemně opracované plochy. Naopak zdrsnění povrchu má dobrý vliv na pevnost lepeného spoje – zvyšuje plochu styku povrchu s lepidlem
- Porozita a nasákavost* – zvyšuje plochu styku lepidla a lepeného materiálu. Nevýhodou však je zvýšení nasákavosti – lepidlo tak rychleji pronikne do povrchu a při takto vzniklém nedostatku mezi lepenými plochami vzniká nesoudržný tzv. chudý spoj. Toto riziko se zvyšuje se snižující se viskozitou lepidla.

3.6.1. Mezimolekulární síly

Hmota je složena z atomů a molekul, atomy jsou dále spojeny v molekuly pomocí primárních meziatomových sil, které se nazývají síly chemické vazby. Molekuly jsou k sobě přitahovány sekundárními přitažlivými silami a při těsném přiblížení molekul lepidla a lepené látky, vznikají mezi nimi sekundární přitažlivé síly. Pro vznik mezimolekulárních sil je nutné jejich těsné přiblížení k sobě a vyvinutí tlaku na lepený spoj (Rowell, 2013).

3.6.2. Adheze

Jedná se o vzájemnou přilnavost různorodých molekul, která je vyvolána především mezimolekulárními přitažlivými silami molekul lepidla a lepeného materiálu. Makroskopické mechanické spojení vytvrzeného lepidla s materiálem je způsobeno zatékáním lepidla do pórů dřeva, lepidlo zde po vytvrzení vytvoří malé kuličky, na jejichž množství z mechanického hlediska závisí pevnost lepeného spoje (Rowell, 2013).

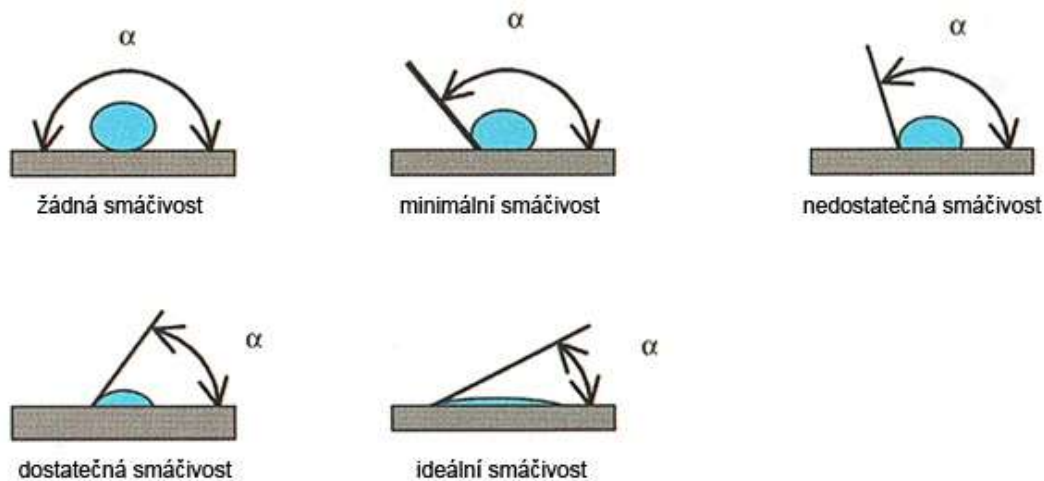
3.6.3. Koheze

Jedná se o vnitřní molekulovou soudržnost v rámci téhož materiálu. Pevnost lepeného spoje závisí na dokonalé přilnavosti lepidla k lepenému povrchu ale také na dobré vnitřní soudržnosti molekul lepidla. Při zkoušce pevnosti by nemělo dojít ke ztrátě koheze v rámci materiálu (lepidla) v lepené spáře. Z hlediska zkoušek lepidlových spojů tedy koheze lepidla musí být v lepeném spoji větší než koheze lepeného materiálu (Tesařová, 2014).

3.6.4. Smáčení povrchu tuhých látek kapalinami

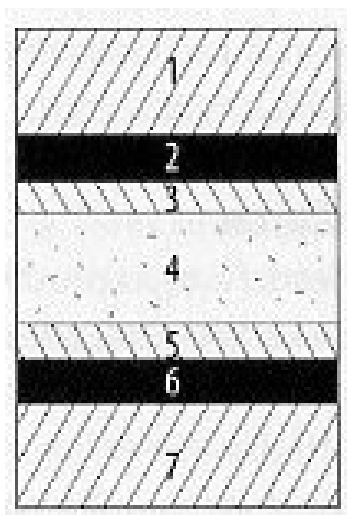
Smáčení lepených povrchů lepidlem se řadí mezi nejdůležitější vlastnosti lepidla. Jeho schopnost smáčet povrch závisí na povrchovém napětí lepeného povrchu. Na povrchu každého pevného tělesa působí povrchové síly jejichž výslednice se nazývá povrchové napětí. U kapalin jej pozorujeme jako tendenci ke zmenšení povrchu kapaliny, protože povrchové síly brání volnému pohybu částic kapaliny. Povrchové napětí ovlivňuje stejně tak i roztečení lepidla a jeho smáčení povrchu lepeného substrátu. Aby se lepidlo dobře rozteklo a smáčelo povrch, musí mít menší povrchové napětí, než je povrchové napětí

podkladu. Kapalina dobře smáčí povrch, je-li úhel smáčení menší než 90° , naopak je-li úhel větší než 90° , povrch se pro danou kapalinu označuje jako nesmáčivý (Rowell, 2013).



Obr. 1 Úhel smáčení povrchu (dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz>)

Smáčecí úhel je důležitý z důvodu nutnosti přiblížit molekuly lepidla k molekulám lepeného podkladu pro dosažení optimálního výsledku lepení. Lepidlo musí být při nanášení tekuté a musí dobře smáčet povrch, aby došlo k přiblížení molekul lepidla a lepeného podkladu (Tesařová, 2014).



Legenda:

1. lepený podklad - adherend,
2. přilnavostí zóna lepidla,
3. přechodová přilnavostí zóna,
4. nános lepidla – soudržnostní kohezní zóna,
5. přechodová kohezní zóna,
6. přilnavostí zóna lepidla,
7. lepený podklad – adherend

Obr. 2 Struktura lepeného spoje (zdroj: Tesařová, 2014)

3.7. Tavná lepidla

Tavná lepidla jsou pevná lepidla vyrobená z umělých pryskyřic bez použití rozpouštědel, která jsou dále zpracovávána v roztaveném stavu. Teplota tavení je dána druhem použitého tavného lepidla, nejčastěji v rozmezí 100 °C až 280 °C. Při poklesu teploty pod teplotu tavení okamžitě tuhnou a spoj se stává pevným. U reaktivních lepidel dochází kromě fyzikálního ztuhnutí také k zesílení. Mezi tato řadíme například polyuretanová tavná lepidla. Použitím různých umělých pryskyřic, vosků, plnidel, barviv a dalších přísad při výrobě tavných lepidel je možné tato lepidla použít pro různé technologické účely (Nutsh et al., 2006).

Důležité je, aby v průběhu ochlazování a tuhnutí lepidlové směsi ve spoji nedošlo ke vzniku vnitřního pnutí. Počáteční pevnost spoje závisí na vlastnostech lepidla, např. na jeho rozsahu teplot, při kterých si udržuje nízkou viskozitu. Po ochlazení má spoj zůstat několik sekund pod tlakem, aby bylo zajištěno dostatečné ztuhnutí a počáteční pevnost spoje (Osten, 1996).

Tavná lepidla jsou většinou termoplastické materiály, které si udržují termoplasticitu i v lepeném spoji např. EVA tavné lepidlo. Tato vlastnost umožňuje rozpojit slepovaný materiál opětovným zahřátím lepidla (Osten, 1996). Pokud se jedná o termosety např. PUR tavné lepidlo zde dochází k zesíťování a spoj již nadále nelze za pomoci zvýšené teploty rozebrat.

Předpokladem správné funkce tavného lepidla je nízká viskozita jeho taveniny, proto se používají filmotvorné polymery a kopolymery s nízkou molekulovou hmotností. Tyto kopolymery jsou dále kombinovány s dalšími složkami, jejichž úkolem je upravit viskozitu a bod měknutí. Bod měknutí jednotlivých lepidel se volí podle požadované tepelné odolnosti lepeného spoje (Osten, 1996).

Tavná lepidla se používají především na olepování bočních ploch nábytkových dílců v interiéru nebo pro olepování profilů pomocí olepovacích strojů (Nutsh et al., 2006).

3.7.1. Tavné lepidlo na bázi EVA kopolymerů

Vyrábějí se z kopolymeru ethylenu a vinylacetátu, do kterých se následně přidávají přísady jako jsou např. změkčovadla nebo pigmenty. Teploty při nanášení tavného lepidla musí být v rozmezí 180 až 220 °C, po ochlazení tavná lepidla tuhnou (Nutsh et al., 2006; Park, 2006).

Toto lepidlo je určeno především k olepování bočních ploch nábytkových dílců na olepovacích strojích (Kafka, 1989).

Použití nábytku s tímto lepidlem je omezeno na suché interiéry, použití v koupelnách a kuchyních, kde je vyšší teplota a vlhkost prostředí by bylo problematické (Nutsh et al., 2006).

Základní vlastnosti (Nutsh et al., 2006):

- | | |
|---------------------------|---------------|
| - teplota měknutí | 110 až 115 °C |
| - teplota zpracování | 180 až 190 °C |
| - tepelná odolnost spoje | -10 až +75 °C |
| - odolnost proti vlhkosti | 10% |

3.7.2. Tavná lepidla polyuretanová

Jedná se o polyadiční produkt složený z alkoholu a isokyanátu. Teplota při nanášení lepidla by měla být v rozmezí 120 až 150 °C, pro zpracování lepidla je zapotřebí speciální strojní technika. Polyuretanové lepidlo po ochlazení tuhne, dochází k zesíťování a odebrání okolní vlhkosti (Ren, 2013; Clerc, 2017).

Použití polyuretanového lepidla je nejvhodnější v koupelnách, kuchyních a u venkovních dveří. Lepidlo je odolné proti působení vyšší teploty a vlhkosti (Nutsh et al., 2006).

Základní vlastnosti (Nutsh et al., 2006):

- | | |
|--|----------------|
| - teplotní odolnost | -40 až +140 °C |
| - teplotní odolnost při UV vytvrzování | až 200 °C |

3.8. Termostabilita lepidel

Při dodržování doporučených ohřivacích teplot lepidel výrobcem je lepidlová tavenina vystavena stálým vysokým teplotám, proto může dojít k oxytermodefektu, tzn. že při příliš dlouhém působení vzdušného kyslíku a vysokých teplot se zhoršují vlastnosti lepidel oxidací. Oxytermodefekty se projevují silným hnědnutím, zhuštěním a následným rozkladem na černou taveninu. Dochází tak k výskytu vadných spojů degradací lepidla – zhoršením adheze a koheze (Clerc, 2017).

3.9. Požadavky na pevnost lepených spojů

Zatěžování lepidlového spoje je prováděno v rámci zkoušek staticky, tj. vlastní hmotností dílce např. ve smyku tahu nebo odlupování, nebo dynamicky – chvěním, opakovanými rázy a kroucením. Obecně lze říci lepidlové spoje méně odolávají zatížení statickému.

Pro dosažení optimální pevnosti lepeného spoje je důležitá čistota povrchu bez prachu, koroze, starých laků a zbytků lepidel apod. Pro spojení dvou tuhých těles je vhodné styčný povrch rovněž přiměřeně zdrsňit, což má příznivý vliv na kvalitu lepeného spoje (Osten, 1996).

Vady lepených spojů (Tesařová, 2014):

- *Zrnitý spoj* – je málo pevný, po rozloupnutí film vykazuje krupicovitou strukturu,
- *Chudý spoj* – na první pohled nemá rozlepená místa. K porušení spoje je zapotřebí poměrně málo síly, v lepeném spoji se nevytvořil souvislý film a lepidlo se vsáкло do lepeného povrchu,
- *Rozlepený spoj* – je místy nebo po celé ploše volný, jsou zjevně viditelné spáry v lepeném spoji,
- *Zamrzlý spoj* – je málo pevný, proto při násilném porušení na jedné z lepených ploch zůstane souvislý film lepidla lpící dobře na podkladu,
- *Nezakotvený spoj* – je málo pevný spoj, kdy po násilném rozloupnutí spoje ve spáře zůstane souvislý film lepidla, který však nelpí pevně na lepeném povrchu,

- *Zdánlivě pevný (optický) spoj* – po jeho násilném rozloupnutí se spoj poruší přímo v blízkosti vytvrzeného filmu lepidla, ve dřevě a na filmu lepidla zůstává souvislá vrstvička jemných dřevných vláken.

4. POUŽITÉ MATERIÁLY A STROJE

4.1. Použité materiály

4.1.1. Dřevotřísková deska laminovaná

Jako podkladový materiál pro tuto diplomovou práci byla pro olepení hrany zvolena dřevotřísková deska laminovaná s tloušťkou 25 mm. Tento materiál byl zvolen pro jeho velmi časté použití v nábytkářském průmyslu. Tyto laminované desky jsou vhodné pro vnitřní použití, vyrábějí se přímou aplikací impregnovaných papírů s vytvrzovatelnou aminoplastickou pryskyřicí nanesenou na jednu nebo obě strany středové dřevotřískové desky (Gelbič, 2000).



Obr. 3 Dřevotřísková deska laminovaná (dostupné z: <http://www.n-i-s.cz>)

4.1.2. Dýhová olepovací páska

Jako materiál na olepení hran vzorků byla zvolena dýhová olepovací páska vyrobená z borovicového dřeva o tloušťce 2 mm. Tato dýhová páska byla zadána pro vysoký obsah pryskyřičných kanálek vyskytujících se v této dřevině, které by mohly ovlivnit pevnost lepeného spoje. Dýhové olepovací pásky o tloušťce ≥ 1 mm vznikají slepením dvou nebo více listů dýh sesazených do potřebného nekonečného formátu a následně jsou tyto pásy děleny na obchodní šířky a uskladněny v návinu ve formě kotoučů pásky – viz Obr. 4.



Obr. 4 Dýhová olepovací páska (dostupné z: <http://www.querkusdecospan.com>)

4.1.3. Použitá tavná lepidla

K olepení boční ploch DTD-L dýhou byly zvoleny dva nejběžnější typy lepidel, tavné lepidlo na bázi EVA kopolymerů a PUR tavné lepidlo. Tato lepidla byla zvolena nejen pro jejich časté využití v nábytkářském průmyslu, ale také pro jejich rozdílné vlastnosti.

Tavné lepidlo na bázi kopolymerů (EVA)

Jedno z použitých lepidel bylo tavné lepidlo německé značky ZIKA Schmelzkleber Patronen 1587, které je tvořeno pryskyřicí na bázi EVA kopolymerů s vynikajícími vlastnostmi. Toto lepidlo má univerzální použití pro lepení dýhové pásky, masivního dřeva, PVC hrany, polyesteru a melaminové pryskyřice viz Technický list – příloha.

Parametry lepidla z technického listu ZIKA Schmelzkleber Patronen 1587:

- | | |
|---------------------------|---------------|
| - teplota zpracování | 210 až 220 °C |
| - doba tání | 2 až 4 minuty |
| - teplota zpracování | min. 18 °C |
| - vlhkost dřeva/materiálu | 8 až 12 % |

Teplotní odolnost z technického listu ZIKA Schmelzkleber Patronen 1587:

- | | |
|--|---------------|
| - dýhové hrany z masivu | -20 až +95 °C |
| - PVC hrany | -20 až +75 °C |
| - polyesterové a melaminové pryskyřice | -20 až +90 °C |

Polyuretanové lepidlo (PUR)

Další z testovaných lepidel bylo PUR lepidlo značky Jowatherm – Reaktant 607.40, 41 vhodné pro automatické hranovací a olepovací stroje. Je to rychle vytvrzující se lepidlo s vysokou počáteční pevností, která po několika dnech ještě stoupá. Toto lepidlo je vhodné pro lepení vrstvených materiálů, PVC, papírových hran, dýhové pásky a hrany z masivního dřeva viz Technický list – příloha.

Parametry lepidla z technického listu Jowatherm – Reaktant 607.40, 41:

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| - hustota | 1,3 g/cm ³ |
| - teplota zpracování | 140 °C |
| - reakční čas zesíťování | 3 dny |

4.2. Stroje a přístrojové vybavení

4.2.1. Klimatizační komora INCUCCELL V-111

Před zahájením zkoušky pevnosti v odlupování pod úhlem 90° byla využita klimatizační komora značky INCUCCELL. Do komory byly umístěny zkušební vzorky a následně byla provedena simulace teplotního kolísání např. při převozu v kontejnerech nebo ve skladech v letních měsících. Toto cyklování probíhalo od 3.11.2016 do 25.1.2017 v režimu denního zahřívání a nočního chladnutí.



Obr. 5 Klimatizační komora INCUCCELL

4.2.2. Sušárna řady STE 39/II

Zkušební tělíska pro zkoušku pevnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45° byla umístěna do sušárny řady STE a byla cyklována od 3.11.2016 do 25.1.2017 ve stejném režimu jako v předchozím případě.



Obr. 6 Sušárna řady STE se vzorky pro zkoušku odolnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°

4.2.3. Teplotní datalogger Testo 174H

V průběhu cyklování vzorků v klimatizační komoře INCUCCELL byl pro sběr dat umístěn teplotní datalogger. Toto zařízení po celou dobu cyklování zaznamenávalo teplotu a relativní vlhkost vzduchu při simulaci podmínek při převozu v kontejnerech a ve skladech v letních měsících.

4.2.4. Trhací stroj INSTRON 3365

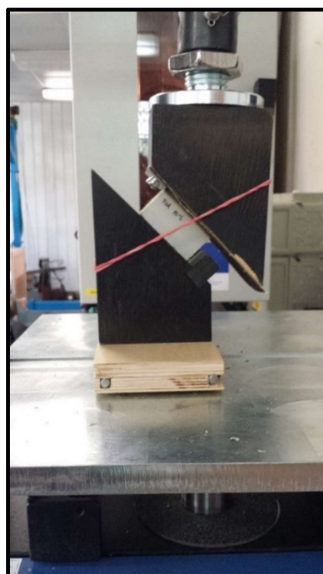
V praktické části diplomové práce pro zkoušku odolnosti v odlupování a šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45° byl použit trhací stroj značky INSTRON.

Stroj se skládá z posuvného zařízení, ocelové rámové konstrukce a snímacího čidla (tenzometru) připevněného na ocelové konstrukci. Na čidlo je v průběhu zkoušky připevněn zkušební upínací agregát. Data byla zaznamenávána prostřednictvím programu Bluehill 2.22.

Pro každý druh zkoušky byl k čidlu trhacího stroje INSTRON připevněn vhodný upínací agregát schopný vzorky pevně zajistit pro daný typ namáhání. Maximální zatížení stroje s daným snímacím prvem je 5 000 N s rezervou 250 N.



Obr. 7 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v odlupování pod úhlem 90°



Obr. 8 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°



Obr. 9 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti dýchové pásky v ohybu

4.2.5. Tepelná komora INSTRON model 3119-409-22

Tato tepelná komora disponuje rozsahem teplot od $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato komora byla použita při zkoušce odolnosti v odlupování i zkoušce odolnosti v šikmém smyku současně s trhacím stojem INSTRON pro klimatizaci vzorků během zkoušek, a to jmenovitě při teplotách 20, 30, 40, 50, 60 a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 10 Tepelná komora INSTRON

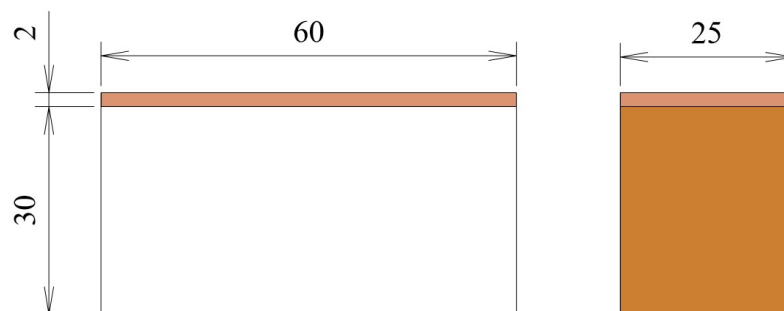
4.3. Vzorky

4.3.1. Vzorky pro zkoušku v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°

Vzorky z DTD-L byly vyrobeny na zakázku ve firmě DSP nábytek. Tyto vzorky o rozměru 900x50x25 mm byli nejprve oboustranně olemeny dýhovou olepovací páskou, jedna polovina tavným lepidlem EVA a druhá polovina PUR lepidlem, na olepovače značky HOLZHER Sprint 1310. Následně byly rozřezány formátovací pilou značky ALTENDORF F45 na rozměry 60x30x25 mm.



Obr. 11 Oboustranně oleměný polotovár vzorku před rozřezáním



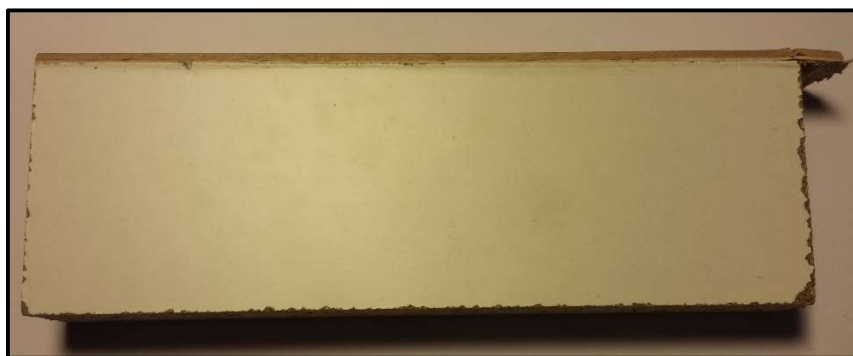
Obr. 12 Zkušební vzorek pro šikmý tlakový smyk pod úhlem 45° a jeho rozměry



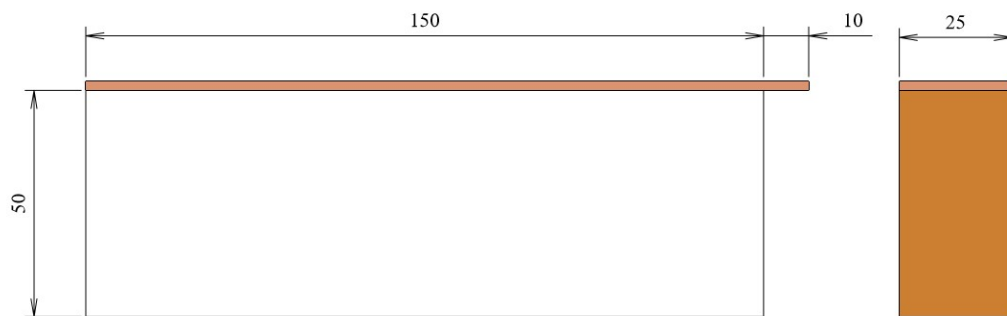
Obr. 13 Olepovačka hran značky HOLZHER Sprint 1310

4.3.2. Vzorky pro zkoušku odolnost v odlupování pod úhlem 90°

Pro zkoušku odolnosti v odlupování byly vyrobeny vzorky z DTD-L, a to stejně jako v předchozím případě firmou DSP nábytek. Vzorky o rozměru 800x100x25 mm byly nejprve oboustranně olemeny dýhovou olemovací páskou jedna polovina tavným lepidlem EVA a druhá PUR lepidlem na olemovačce značky HOLZHER Sprint 1310. Následně byly rozřezány formátovací pilou značky ALTENDORF F45 na rozměry 160x50x25 mm, později byla příčně zkráceny až po dýhovou pásku a následně byl do dýhové pásky vytvořen otvor.



Obr. 14 Zkušební vzorek pro zkoušku v odlupování pod úhlem 90°



Obr. 15 Zkušební vzorek pro zkoušku v odlupování pod úhlem 90° a jeho rozměry

4.3.3. Vzorky pro zkoušku ohybu dýhové pásky

Pro zkoušku ohybu byla použita stejná dýhová lepicí páska jako pro olepení předchozích vzorků. Dýhová páska tloušťky 2 mm a šířky 30 mm byla nařezána na několik kusů o délce 200 mm.



Obr. 16 Zkušební vzorek dýhové pásky pro zkoušku v ohybu

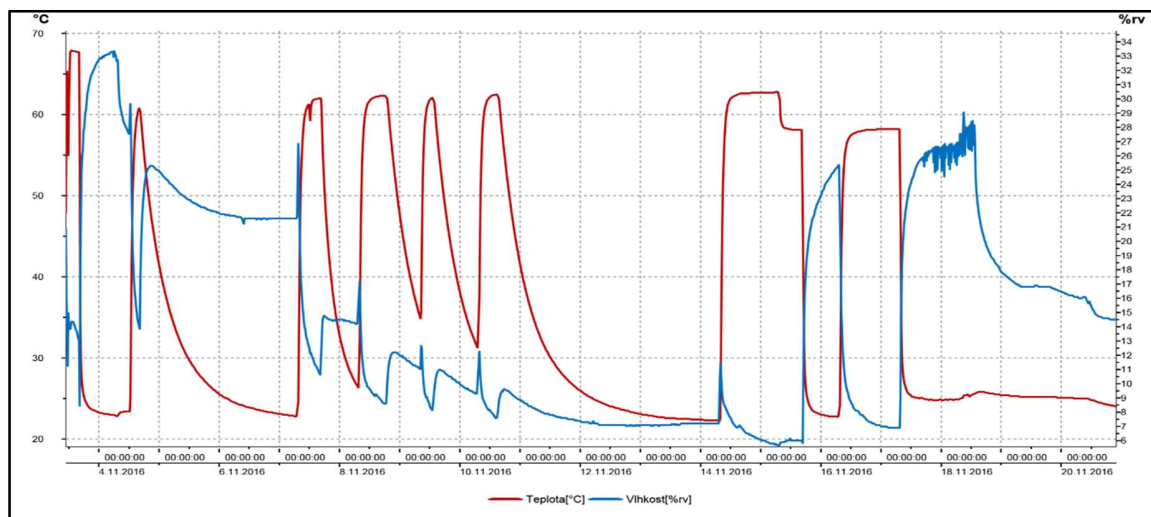
5. METODIKA

5.1. Cyklování vzorků

Cyklování probíhalo od 3.11.2016 do 25.1.2017 v režimu denního zahřívání a nočního chladnutí. Hodnoty naměřené teplotním dataloggerem jsou zaznamenány v Tab. 1 a grafické znázornění na Obr. 19. Maximální dosažená teplota byla 67,9 °C a maximální vlhkost dosahovala až 33 %.

Tab. 1 Naměřené minimální, maximální a střední hodnoty teploty a relativní vlhkosti, testovaných vzorků při cyklickém zatížení

	Minimum	Maximum	Střední hodnota
Teplota [°C]	19,1	67,9	25,643
Vlhkost [%rv]	5,6	33,4	20,785
Čas spuštění	3.11.2016 10:53:00		
Čas ukončení	25.1.2017 18:38:00		

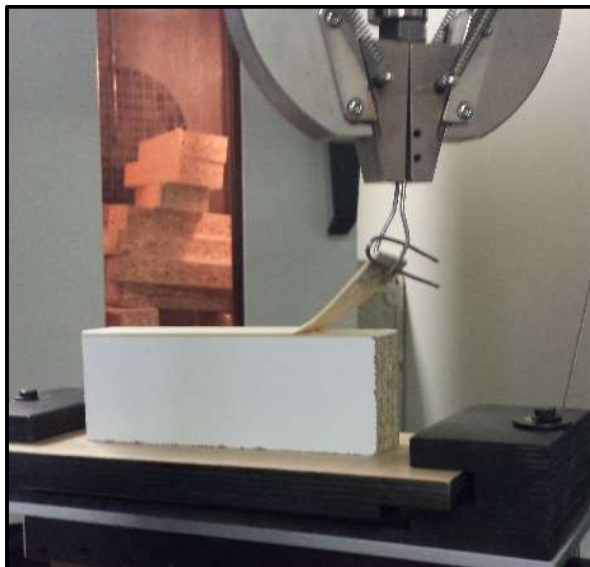


Obr. 17 Graf průběhu změny teploty a relativní vlhkosti při cyklickém teplotním namáhání zkušebních vzorků

5.2. Postup zkoušky pevnosti v lepené spáře odlupováním pod úhlem 90°

1. Spuštění tepelné komory INSTRON a předehřátí na požadovanou teplotu
2. Osazení trhacího stroje INSTRON upínacím agregátem a nastavení metody testování v programu Bluehill
3. Umístění vzorků do tepelné komory a předehřátí po dobu 30 min na požadovanou teplotu
4. Vyjmutí vzorku z tepelné komory a upnutí do trhacího stroje
5. Vyvážení a vynulování měřícího čidla v programu Bluehill
6. Spuštění testu v programu
7. Po ukončení testu vyjmutí zkušební vzorku

Stejným způsobem byly testovány všechny vzorky EVA a PUR lepidla dle zadaných teplot v rozmezí od 20 do 70 °C.

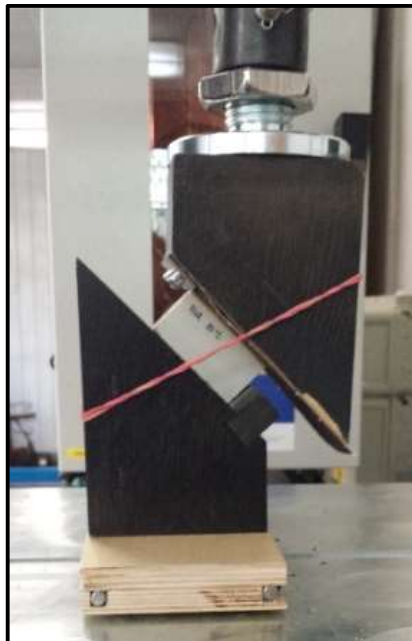


Obr. 18 Postup zkoušky odolnosti v odlupování pod úhlem 90°

5.3. Postup zkoušky pevnosti v lepené spáře pro šikmý tlakový smyk pod úhlem 45°

1. Spuštění tepelné komory INSTRON a přehřátí na požadovanou teplotu
2. Osazení trhacího stroje INSTRON upínacím agregátem a nastavení metody testování v programu Bluehill
3. Umístění vzorků do tepelné komory a přehřátí po dobu 30 min na požadovanou teplotu
4. Vyjmutí vzorku z tepelné komory a upnutí do trhacího stroje
5. Vyvážení a vynulování měřícího čidla v programu Bluehill
6. Spuštění testu v programu
7. Po ukončení testu vyjmutí zkušební vzorku

Stejným způsobem postupujeme u všech vzorků EVA a PUR lepidla dle zadaných teplot v rozmezí od 20 do 70 °C.

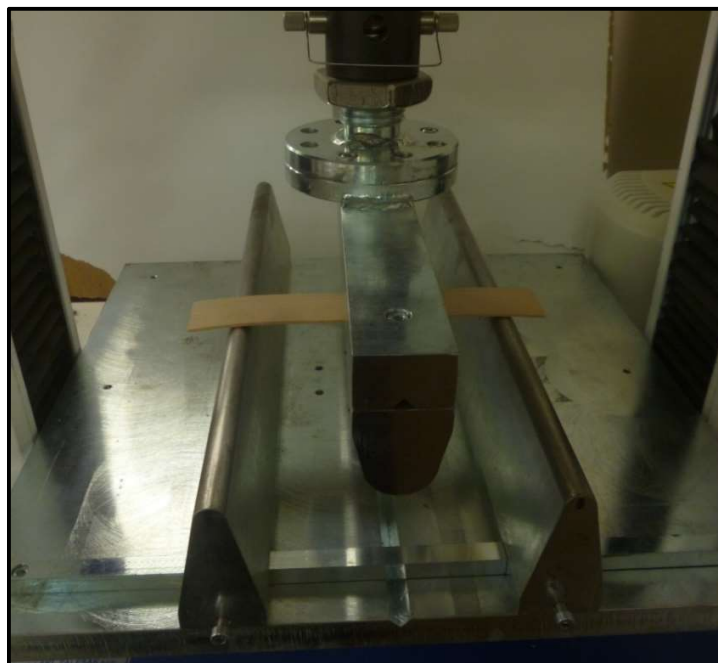


Obr. 19 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°

5.4. Postup zkoušky odolnosti v ohybu u dýhy

1. Spuštění tepelné komory INSTRON a předeřtání na požadovanou teplotu
2. Osazení trhacího stroje INSTRON upínacím agregátem a nastavení metody testování v programu Bluehill
3. Umístění vzorků dýhy do tepelné komory a předeřtání po dobu 30 min na požadovanou teplotu
4. Vyjmutí vzorku z tepelné komory a umístění do zkušební agregátu, vzdálenost mezi podpěrami byla nastavena na 150 mm
5. Vyvážení a vynulování měřícího čidla v programu Bluehill
6. Spuštění testu v programu (stroj se sám zastavil po vyrovnání dýhy)
7. Po ukončení testu vyjmutí zkušební vzorku

Stejným způsobem postupujeme u všech vzorků dle zadaných teplot v rozmezí od 20 do 60 °C.



Obr. 20 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v ohybu dýhové pásky

5.5.Zpracování naměřených hodnot

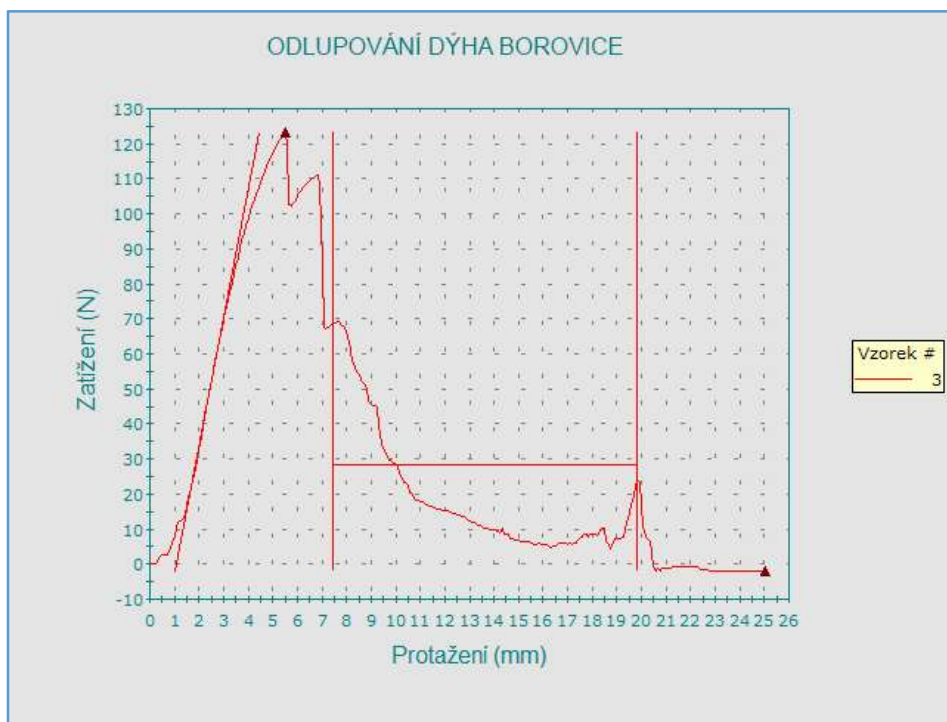
5.5.1. Zkouška odolnosti odlupování pod úhlem 90°

Zkouška byla provedena za účelem stanovení odolnosti proti odlupování lepených spojů ze dvou adherendů – ohebného a tuhého. Zkouška odlupování pod úhlem 90° je vhodná především pro méně ohebné adherendy.

Adherendy byly od sebe oddělovány rovnoměrnou rychlostí se započítáním odlupování kolmo k rovině spoje. Trhací stroj vyvíjí tahovou sílu s konstantní rychlostí pohybu. Zařízení musí být vybaveno softwarovou řídicí jednotkou a také zařízením k měření sil. Lepený povrch vzorku musí dle ČSN EN 28510-1 mít šířku $25,0 \pm 0,5$ mm a minimální délku 150 mm.

Vyjádření výsledků bylo graficky zaznamenáno a současně byla vyhodnocena průměrná odlupovací síla v Newtonech planimetricky proložením přímky, nebo jiným vhodným způsobem. Pokud by byl požadován přesný výstup, spočítal by se aritmetický průměr středních hodnot špiček a jejich pokles, rovněž by se spočítal aritmetické průměry z maximálních a minimálních sil (ČSN EN 28510-1).

Celkový průběh zkoušky byl zaznamenáván programem Bluehill, který zapisoval hodnoty pro maximální zatížení, maximální pevnost a modul pružnosti v testovaném vzorku. Veškeré získané hodnoty byly dále zpracovány pomocí programu Statistica.



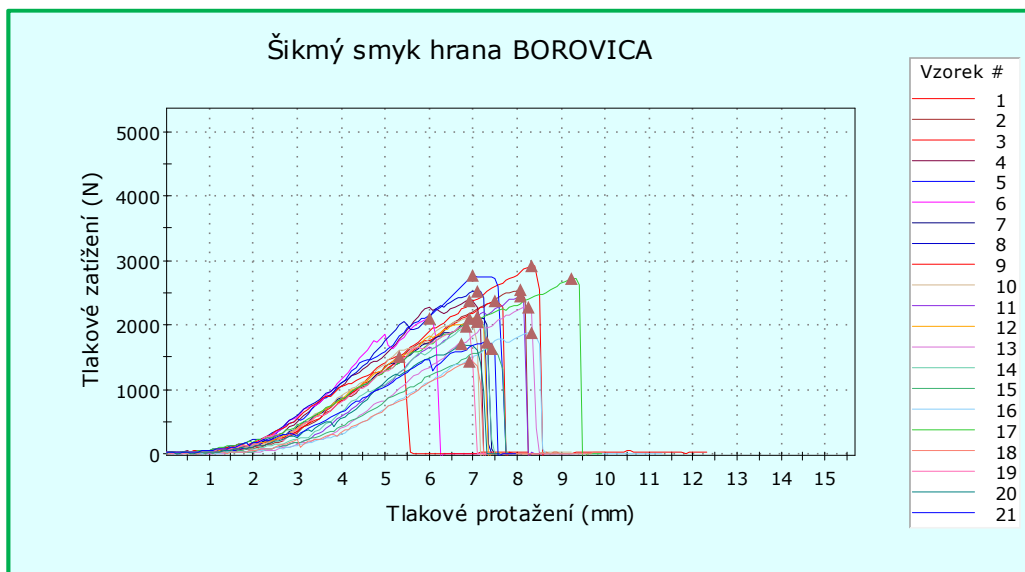
Obr. 21 Grafické vyjádření průběhu zkoušky EVA lepidla v programu BlueHill při působení teploty 40 °C

5.5.2. Zkouška tlakového smyku pod úhlem 45°

Celkový průběh zkoušky byl zaznamenáván programem Bluehill, který zapisoval hodnoty pro maximální zatížení, maximální pevnost a modul pružnosti v testovaném vzorku. Tyto hodnoty zatížení byly dále graficky a početně zpracovány pomocí rovnice:

$$\tau = \frac{F_{max}}{S \cdot \sqrt{2}} [MPa] \quad [1]$$

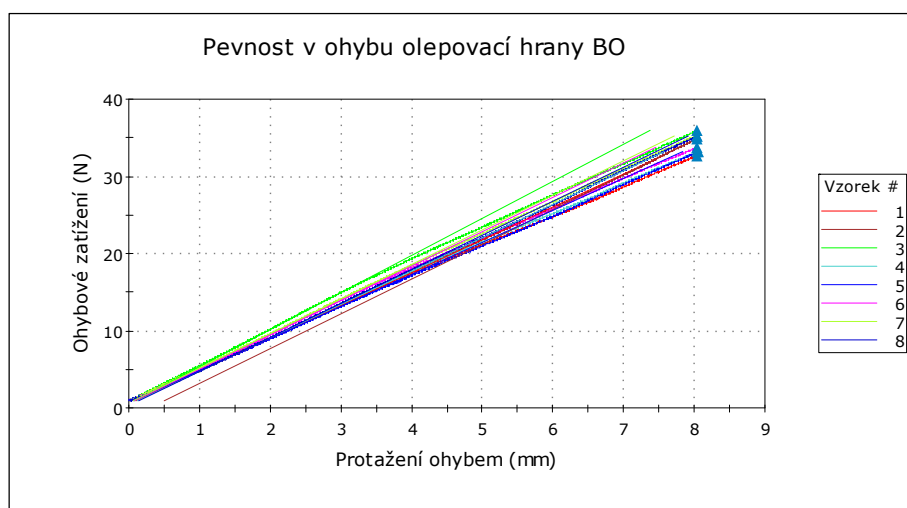
kde τ je smykové napětí [MPa], F_{max} zatížení [σ], S plocha [mm]. Veškeré získané hodnoty byly dále zpracovány pomocí programu Statistica.



Obr. 22 Grafické vyjádření průběhu zkoušky PUR lepidla v programu BlueHill při působení teploty 40 °C

5.5.3. Zkouška ohybu u dýhy

Zkouška byla provedena za účelem stanovení maximální ohybového zatížení prohnuté dýhy z borovicového dřeva do jejího úplného vyrovnání. Hodnoty zkoušky byly zaznamenány programem Bluehill a graficky zpracovány.



Obr. 23 Grafické vyjádření průběhu zkoušky ohybu dýhové pásky při působení teploty 20 °C

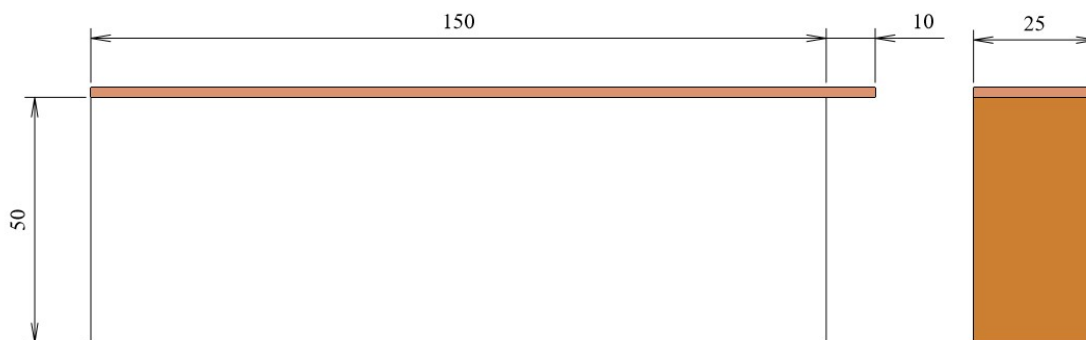
6. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Tato kapitola obsahuje naměřené výsledky dvou laboratorních zkoušek. Jejich statistické vyhodnocení a grafické znázornění výsledků je vyneseno ve spojnicových a krabicových grafech níže. Výstupem zkoušky odlupování pod úhlem 90° byly hodnoty síly [N], které odpovídaly průměrnému tahovému a maximálnímu tlakovému zatížení testovaných vzorků. Výstupem zkoušky pro šikmý smyk pod úhlem 45° byly hodnoty síly [N], které byly následně přepočítány pomocí výše uvedeného vzorce na hodnotu napětí [MPa]. Tato kapitola obsahuje i zkoušku odolnosti dýhové hrany v ohybu.

6.1. Pevnost v lepené spáře – odlupování pod úhlem 90°

Tato zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 28510-1 Lepidla – Zkouška v odlupování zkušební tělesa z ohebného a tuhého adherendu – Část 1: Odlupování pod úhlem 90 stupňů.

Zkouška odhaluje síly [N] potřebné k odloupení dýhové hrany a porušení lepeného spoje.



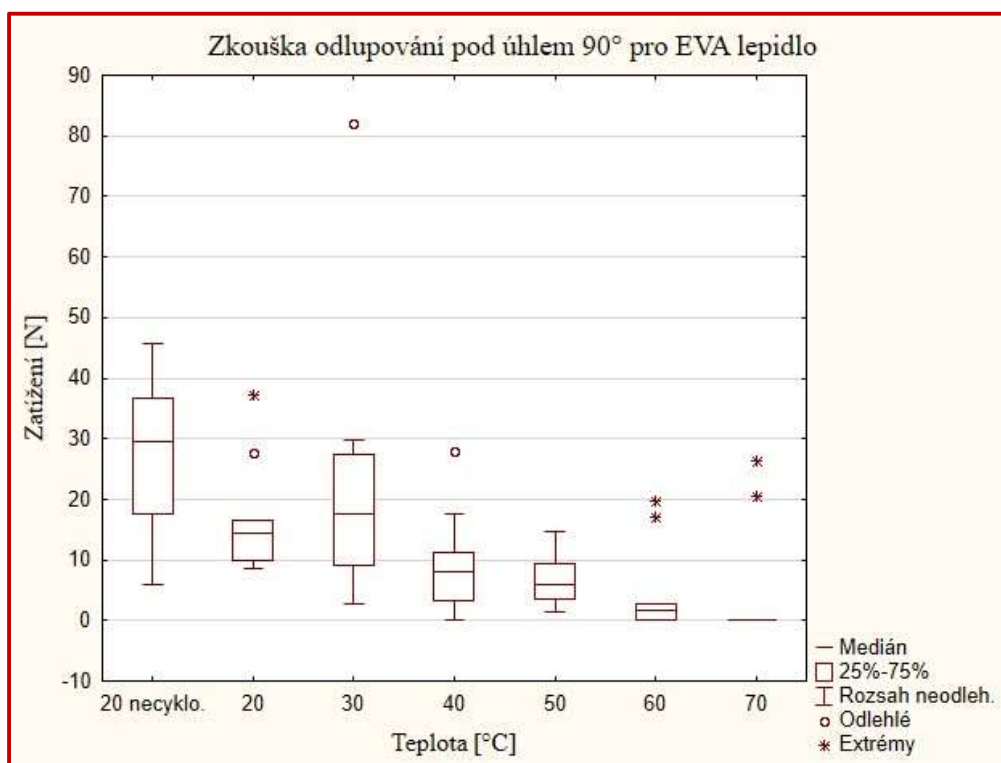
Obr. 24 Základní rozměry vzorků pro zkoušku odlupování pod úhlem 90°

Tab. 2 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce odlupování pod úhlem 90° pro EVA lepidlo

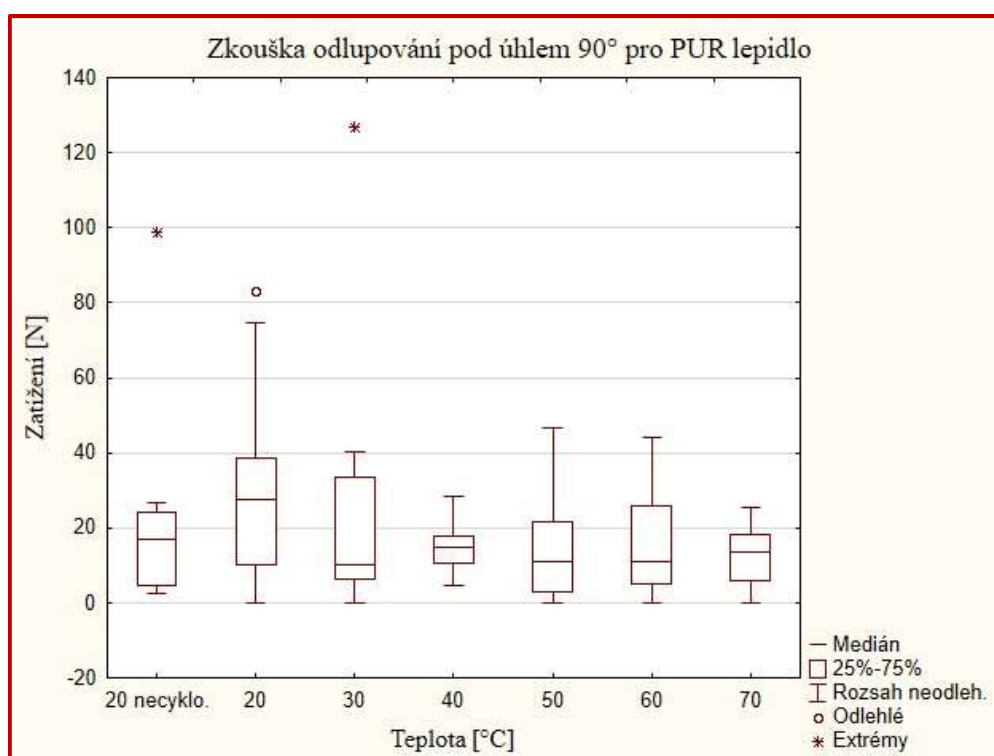
EVA lepidlo	Průměr zatížení při průměrné hodnotě (5 špičky + poklesy) [N]						
Teplota	necyklované	cyklované					
	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Vzorky	34,686	8,678	17,655	4,279	9,269	0,896	-
	25,729	9,875	29,807	-	3,462	19,688	0,067
	17,136	8,692	17,593	8,937	1,525	16,993	5,241
	5,867	13,982	9,150	27,956	5,410	2,859	10,471
	45,691	37,153	82,172	7,546	7,734	2,316	-
	36,589	27,816	24,064	8,559	6,360	-	-
	41,198	16,559	2,649	11,242	2,609	2,664	-
	33,187	15,367	10,365	3,007	4,651	-	-
	17,745	10,918	27,554	17,706	14,740	-	-
	23,089	14,923	6,024	3,379	9,744	-	-
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
	necyklované	cyklované					
Průměr	28,092	16,396	22,703	10,290	6,550	7,569	5,259
Maximum	45,691	37,153	82,172	27,956	14,740	19,688	10,471
Minimum	5,867	8,678	2,649	3,007	1,525	0,896	0,067
Medián	29,458	14,452	17,624	8,559	5,885	2,762	5,241
Směrodatná odchylka	11,725	8,728	21,634	7,581	3,759	7,682	4,248

Tab. 3 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce odlupování pod úhlem 90° pro PUR lepidlo

PUR lepidlo	Průměr zatížení při průměrné hodnotě (5 špičky + poklesy) [N]						
Teplota	necyklované	cyklované					
	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Vzorky	15,320	38,708	11,572	13,297	2,749	17,046	15,201
	13,647	-	6,529	16,148	5,068	25,809	8,854
	2,997	74,775	-	28,452	8,739	28,625	11,731
	4,508	83,061	-	6,039	46,636	-	25,486
	26,622	10,091	33,372	12,446	1,969	5,472	18,125
	18,880	3,425	40,336	17,906	21,547	10,586	-
	98,943	32,271	8,361	10,757	40,708	5,180	-
	23,696	23,161	13,334	16,000	-	11,267	5,804
	2,640	31,962	127,051	18,627	13,213	44,258	18,265
	24,356	19,267	8,108	4,537	14,094	3,168	18,577
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
	necyklované	cyklované					
Průměr	23,161	35,191	31,083	14,421	17,191	16,824	15,255
Maximum	98,943	83,061	127,051	28,452	46,636	44,258	25,486
Minimum	2,640	3,425	6,529	4,537	1,969	3,168	5,804
Medián	17,100	31,962	12,453	14,648	13,213	11,267	16,663
Směrodatná odchylka	26,650	25,663	38,150	6,471	15,359	12,882	5,871



Obr. 25 Krabicový graf odlupování pod úhlem 90 °C pro EVA lepidlo



Obr. 26 Krabicový graf odlupování pod úhlem 90 °C pro PUR lepidlo

Tab. 4 Vícerozměrný test významnosti zkoušky odlupování pro EVA a PUR lepidlo

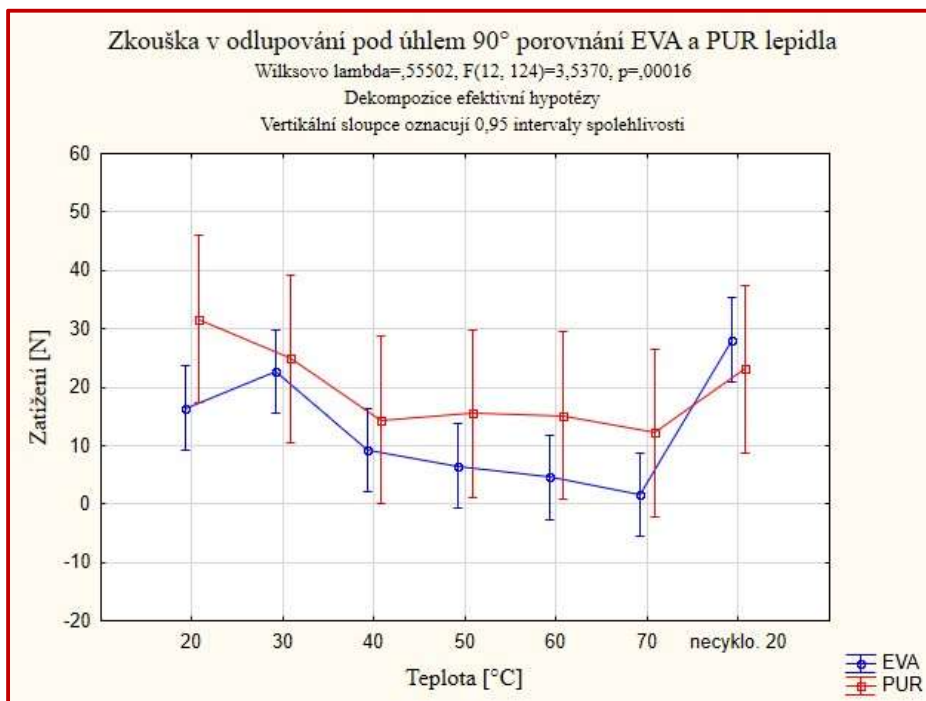
Vícerozměrné testy významnosti. (Zkouška v odlupování) Sigma-omezená parametrizace Dekompozice efektivní hypotézy						
Efekt	Test	Hodnota	F	Efekt SV	Chyba SV	p
Abs. člen	Wilksuv	0,349613	57,66938	2	62	0,000000
Teplota [°C]	Wilksuv	0,555018	3,53701	12	124	0,000158

Tab. 5 Výsledky testu mnohonásobného porovnání pro zkoušku odlupování u EVA lepidla

Tukeyuv HSD test; proměnná EVA (Zkouška v odlupování) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PC = 129,75, sv = 63,000								
C. bunky	Teplota [°C]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		16,396	22,703	9,2612	6,5503	4,5416	1,5778	28,092
1	20		0,876481	0,799490	0,467076	0,247788	0,070588	0,262369
2	30	0,876481		0,132029	0,036068	0,011922	0,001993	0,937943
3	40	0,799490	0,132029		0,998311	0,966906	0,738925	0,008036
4	50	0,467076	0,036068	0,998311		0,999710	0,957400	0,001549
5	60	0,247788	0,011922	0,966906	0,999710		0,997168	0,000488
6	70	0,070588	0,001993	0,738925	0,957400	0,997168		0,000169
7	necyklo. 20	0,262369	0,937943	0,008036	0,001549	0,000488	0,000169	

Tab. 6 Výsledky testu mnohonásobného porovnání pro zkoušku odlupování u PUR lepidla

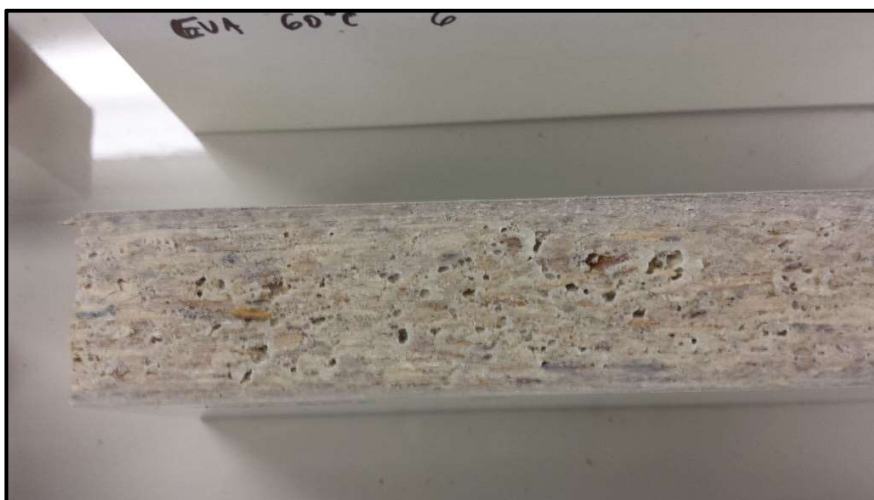
Tukeyuv HSD test; proměnná PUR (Zkouška v odlupování) Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PC = 516,47, sv = 63,000								
C. bunky	Teplota [°C]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}
		31,672	24,866	14,421	15,472	15,141	12,204	23,161
1	20		0,993853	0,620344	0,686615	0,666035	0,478105	0,980022
2	30	0,993853		0,945656	0,967279	0,961275	0,873264	0,999998
3	40	0,620344	0,945656		1,000000	1,000000	0,999991	0,977139
4	50	0,686615	0,967279	1,000000		1,000000	0,999912	0,988197
5	60	0,666035	0,961275	1,000000	1,000000		0,999953	0,985297
6	70	0,478105	0,873264	0,999991	0,999912	0,999953		0,932310
7	20 necyklo.	0,980022	0,999998	0,977139	0,988197	0,985297	0,932310	



Obr. 27 Graf ANOVY s opakovaným měřením pro metodu odlupování, porovnání EVA a PUR lepidla



Obr. 28 Detail průběhu odlupování vzorku PUR lepidla při působení teploty 60 °C



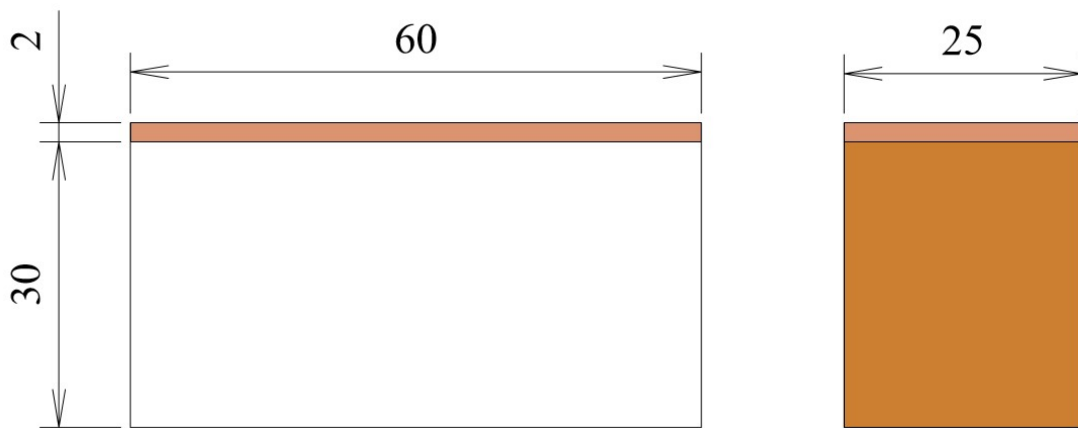
Obr. 29 Detailní pohled na povrch odloupnuté dýhové pásky za použití EVA lepidla při působení teploty 60 °C



Obr. 30 Detailní pohled na povrch odloupnuté dýhové pásky za použití PUR lepidla při působení teploty 60 °C

6.2. Pevnost v lepené spáře – šikmý tlakový smyk

Pevností v tomto kontextu je myšlena odolnost proti silám vycházejícím z kombinace normálního napětí σ a smykového napětí τ pod úhlem 45° při tlakovém zatížení dýchové hrany. Hodnota byla vyjádřena v [N] a ověření této vlastnosti proběhlo na vzorcích o rozměrech $60 \times 25 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.



Obr. 31 Základní rozměry vzorků pro zkoušku šikmého tlakového smyku pod úhlem 45°

Tab. 7 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce šikmým tlakovým smykem pod úhlem 45° pro EVA lepidlo

EVA lepidlo	Tlakový smyk – zatížení F [N]						
	necyklované	cyklované					
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Vzorky	5250,31	5250,19	3395,52	2906,11	1734,30	338,46	137,52
	5250,11	4489,51	3609,23	2538,28	705,50	366,14	167,36
	5251,61	4319,45	3984,27	2362,57	875,29	345,73	214,37
	5251,01	3557,79	4880,66	2382,39	2717,70	180,14	136,88
	5251,22	3199,17	3137,71	2759,46	566,90	495,58	112,32
	5251,74	3554,48	2921,37	2089,15	1635,01	143,20	254,70
	5252,10	4416,45	5251,15	2108,46	398,96	115,79	100,39
	5250,81	3061,38	2734,05	2524,45	1441,66	285,31	148,69
	5251,65	3922,77	4105,92	1515,87	2059,49	386,78	282,00
	5251,83	4651,74	4544,55	2108,97	773,11	95,78	80,18
	5252,36	4463,39	4193,79	2442,49	1705,76	219,18	137,36
	5250,04	3183,63	4943,44	2120,22	493,97	570,10	194,04
	5251,21	4639,49	4476,97	2272,99	122,50	143,74	117,29
	5251,77	4187,21	4961,65	2042,24	856,76	168,67	110,76
	5251,98	3864,32	3669,84	1631,76	1324,72	117,93	176,33
5251,69	2135,30	4604,20	1883,99	471,30	138,22	137,42	
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
	necyklované	cyklované					
Průměrná hodnota	5251,34	3931,02	4088,40	2230,59	1117,68	256,92	156,73
Maximální	5252,36	5250,19	5251,15	2906,11	2717,70	570,10	282,00
Minimální	5250,04	2135,30	2734,05	1515,87	122,50	95,78	80,18
Medián	5251,63	4054,99	4149,85	2196,60	866,03	199,66	137,47
Směrodatná odchylka	0,6887	757,0404	754,3871	361,5196	690,1624	141,2697	54,0559

Tab. 8 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce šikmým tlakovým smykem pod úhlem 45° pro PUR lepidlo

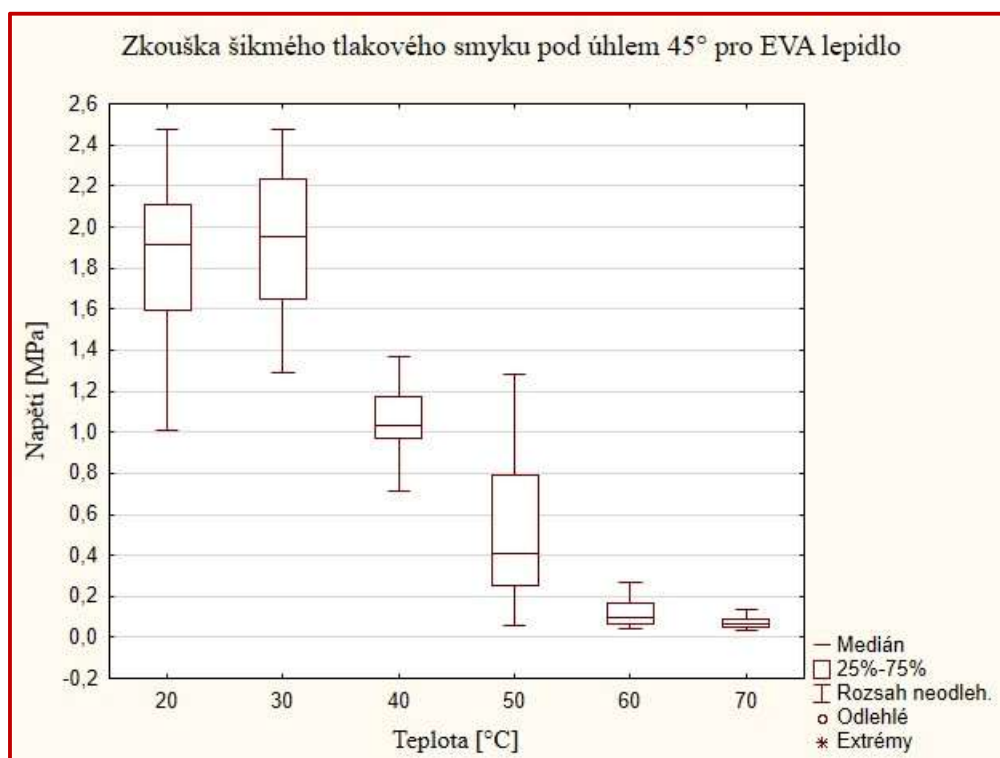
PUR lepidlo	Tlakový smyk – zatížení F [N]						
	necyklované	cyklované					
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Vzorky	5252,45	5250,58	5250,35	5250,17	5250,04	5250,12	5250,68
	5251,73	5251,21	5250,93	5251,48	5251,91	5251,45	5252,55
	5250,18	5250,16	5251,11	5252,06	5250,08	5251,99	5251,34
	5262,24	5251,95	5251,75	5252,08	5250,57	5250,82	5250,56
	5252,50	5250,38	5250,68	5250,85	5250,64	5251,08	5251,87
	5252,86	5252,75	5250,74	5251,23	5251,14	5250,02	5251,17
	5251,73	5251,10	5250,13	5250,32	5250,80	5250,29	5251,67
	5251,12	5251,13	5250,15	5251,51	5253,99	5250,95	5250,30
	5250,81	5251,37	5250,91	5250,33	5251,25	5252,21	5250,66
5250,54	5250,29	5251,27	5251,03	5250,98	5252,42	5251,14	
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
	necyklované	cyklované					
Průměrná hodnota	5252,62	5251,09	5250,80	5251,10	5251,14	5251,14	5251,19
Maximální	5262,24	5252,75	5251,75	5252,08	5253,99	5252,42	5252,55
Minimální	5250,18	5250,16	5250,13	5250,17	5250,04	5250,02	5250,30
Medián	5251,73	5251,12	5250,82	5251,13	5250,89	5251,02	5251,15
Směrodatná odchylka	3,3159	0,7649	0,4835	0,6588	1,0865	0,8229	0,6555

Hodnoty zatížení vyjádřené v Tab. 8 pro PUR lepidlo odpovídají maximálnímu rozsahu stroje. Výsledná hodnota zatížení vzorků je vyšší, než dosahuje stroj INSTRON a hodnoty nebyly naměřeny. Pro získání hodnověrných konečných výsledků by bylo nutno měřit na vzorcích s menšími rozměry. Nedochozí zde ke změknutí hrany jako u olepovací pásky ABS. PUR lepidlo ve vztahu k ploše vzorku a soudržnosti dřevěné olepovací pásky vykazuje vyšší pevnost než je povolené maximum pro stroj INSTRON. Hodnoty pro PUR lepidlo testované v šikmém, tlakové smyku z tohoto důvodu nejsou dále v této práci statisticky zpracovány.

6.3. Napětí v lepené spáře – šikmý tlakový smyk

Tab. 9 Hodnoty napětí u vzorků podrobených zkoušce šikmého tlakového smyku pod úhlem 45° pro EVA lepidlo

EVA lepidlo	Tlakový smyk – napětí τ [MPa]						
	necyklované	cyklované					
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
Vzorky	2,48	2,47	1,60	1,37	0,82	0,16	0,06
	2,47	2,12	1,70	1,20	0,33	0,17	0,08
	2,48	2,04	1,88	1,11	0,41	0,16	0,10
	2,48	1,68	2,30	1,12	1,28	0,08	0,06
	2,48	1,51	1,48	1,30	0,27	0,23	0,05
	2,48	1,68	1,38	0,98	0,77	0,07	0,12
	2,48	2,08	2,48	0,99	0,19	0,05	0,05
	2,48	1,44	1,29	1,19	0,68	0,13	0,07
	2,48	1,85	1,94	0,71	0,97	0,18	0,13
	2,48	2,19	2,14	0,99	0,36	0,05	0,04
	2,48	2,10	1,98	1,15	0,80	0,10	0,06
	2,47	1,50	2,33	1,00	0,23	0,27	0,09
	2,48	2,19	2,11	1,07	0,06	0,07	0,06
	2,48	1,97	2,34	0,96	0,40	0,08	0,05
	2,48	1,82	1,73	0,77	0,62	0,06	0,08
	2,48	1,01	2,17	0,89	0,22	0,07	0,06
Teplota	20 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
	necyklované	cyklované					
Průměrná hodnota	2,48	1,85	1,93	1,05	0,53	0,12	0,07
Maximální	2,48	2,47	2,48	1,37	1,28	0,27	0,13
Minimální	2,47	1,01	1,29	0,71	0,06	0,05	0,04
Medián	2,48	1,91	1,96	1,04	0,41	0,09	0,06
Směrodatná odchylka	0,0003	0,3569	0,3556	0,1704	0,3253	0,0666	0,0255



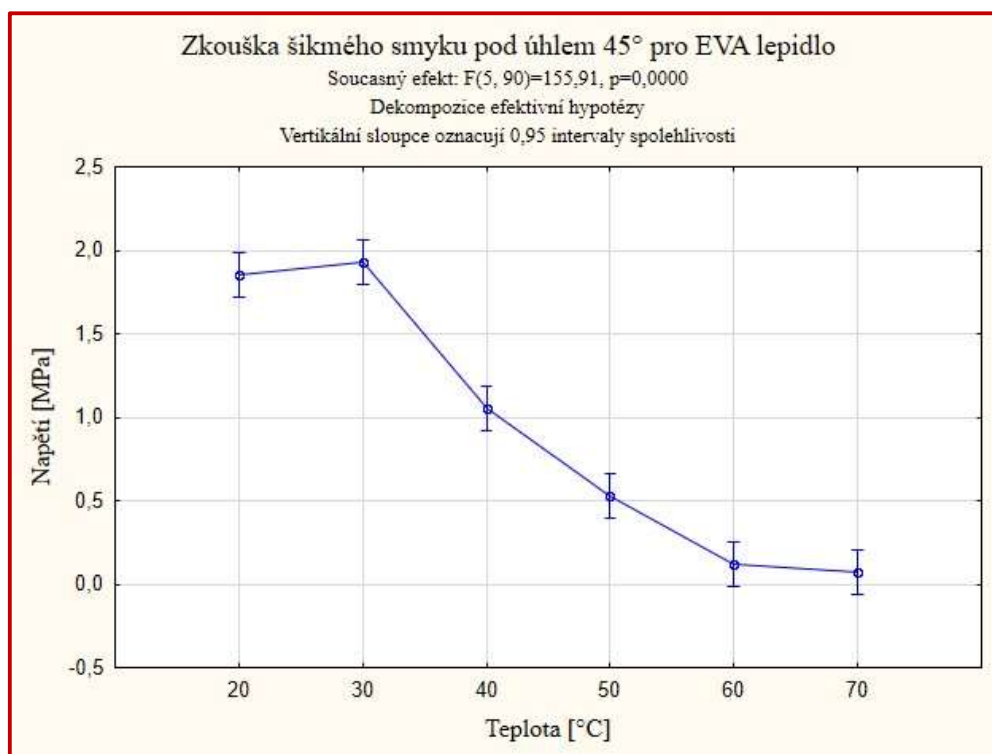
Obr. 32 Krabicový graf napětí u vzorků šikmého smykového tlaku pod úhlem 45° pro EVA lepidlo

Tab. 10 Jednorozměrný test významnosti jednofaktorové ANOVY u zkoušky šikmého tlakového smyku pro EVA lepidlo

Jednorozměrné testy významnosti pro EVA [MPa] (Zkouška šikmý tlakový smyk)						
Sigma-omezená parametrizace						
Dekompozice efektivní hypotézy						
Efekt	SC	Stupně volnosti	PC	F	p	
Abs. člen	82,25174	1	82,25174	1174,869	0,00	
Teplota [°C]	54,57735	5	10,91547	155,915	0,00	
Chyba	6,30084	90	0,07001			

Tab. 11 Výsledky testu mnohonásobného porovnání pro zkoušku šikmého tlakového smyku pod úhlem 45° - EVA lepidlo

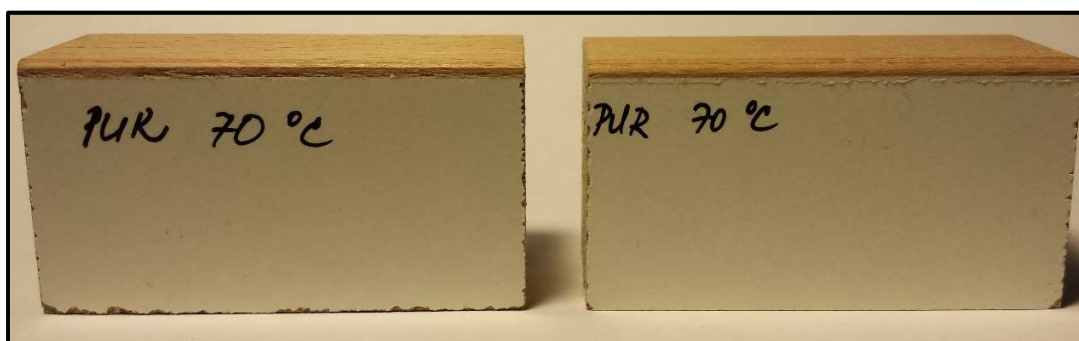
		Tukeyuv HSD test; proměnná EVA [MPa] (Zkouška šikmý tlakový smyk)					
		Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy					
		Chyba: meziskup. PC = ,07001, sv = 90,000					
C. bunky	Teplota [°C]	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}
		1,8531	1,9273	1,0515	,52688	,12111	,07388
1	20		0,968083	0,000123	0,000123	0,000123	0,000123
2	30	0,968083		0,000123	0,000123	0,000123	0,000123
3	40	0,000123	0,000123		0,000125	0,000123	0,000123
4	50	0,000123	0,000123	0,000125		0,000635	0,000190
5	60	0,000123	0,000123	0,000123	0,000635		0,995947
6	70	0,000123	0,000123	0,000123	0,000190	0,995947	



Obr. 33 Graf jednofaktorové ANOVY pro metodu odlupování pod úhlem 45° pro EVA lepidlo



Obr. 34 Detailní pohled na povrch odtržené dýhy za použití EVA lepidla při působení teploty 30 °C



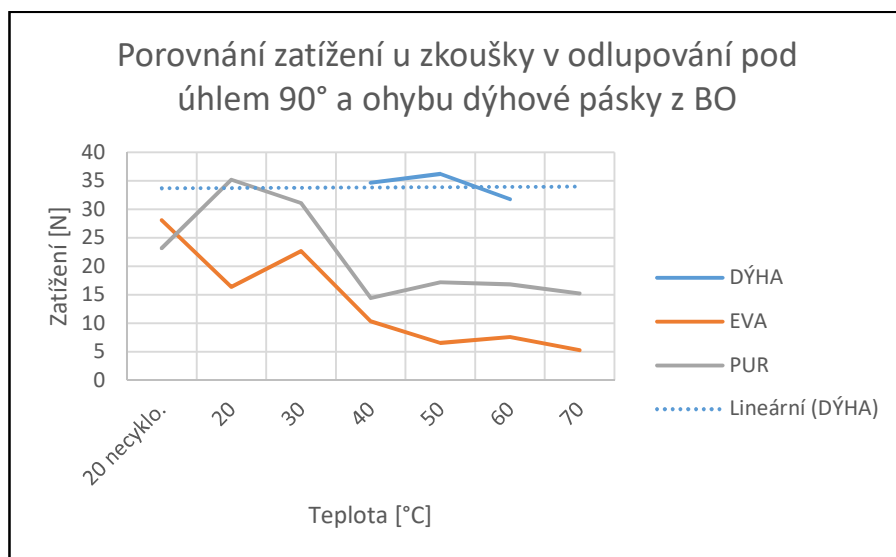
Obr. 35 Detailní pohled na povrch odtržené dýhy za použití PUR lepidla při působení teploty 70 °C

6.4. Pevnost dýhy v ohybu

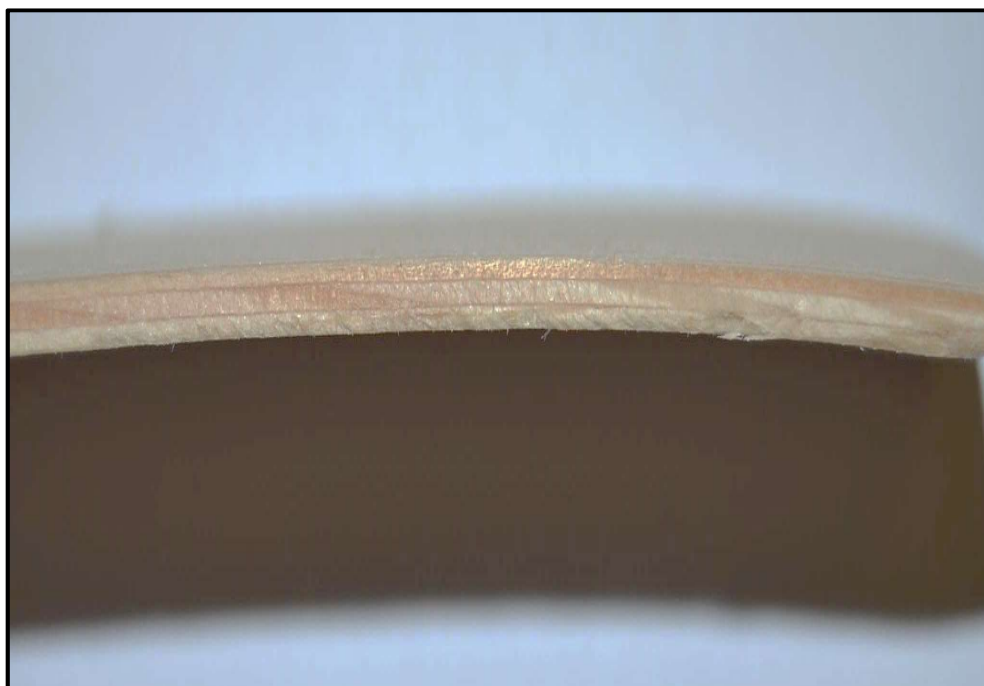
Tato zkouška byla provedena za účelem zjištění odolnosti dýhové hrany proti působící deformační síle. Naměřeny byly hodnoty maximálního ohybového zatížení v [N]. Zkouška proběhla na vzorcích o rozměru 200x30x2 mm.

Tab. 12 Hodnoty zatížení vzorků dýhové olepovací pásky z BO podrobené zkoušce v ohybu

Maximální ohybové zatížení [N]				
Teplota	20 °C	40 °C	50 °C	60 °C
1	32,73	34,67	36,21	31,76
2	34,85	35,24	34,46	30,49
3	35,94	34,64	35,04	30,8
4	33,21	38,58	37,95	34,02
5	33,19	33,38	32,79	29,29
6	33,76	33,66	33,89	30,95
7	35,28	33,35	33,77	31,16
8	35,16	34,97	34,5	31,69
9	35,94	33,66	33,77	34,02
10	36,28	33,35	30,79	29,29
Průměr	34,63	34,55	34,32	31,35
Maximum	36,28	38,58	37,95	34,02
Minimum	32,73	33,35	30,79	29,29
Medián	35,01	34,15	34,18	31,06
Směrodatná odchylka	1,24	1,51	1,81	1,56



Obr. 36 Graf porovnání zatížení vzorků v odlupování pro EVA a PUR lepidlo s ohybovým zatížením dýchové pásky z BO



Obr. 37 Detail dýchové olepovací pásky z BO s viditelným rozhraním konstrukce dýchového soulepu

7. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

7.1. Zkouška pevnosti v odlupování pod úhlem 90°

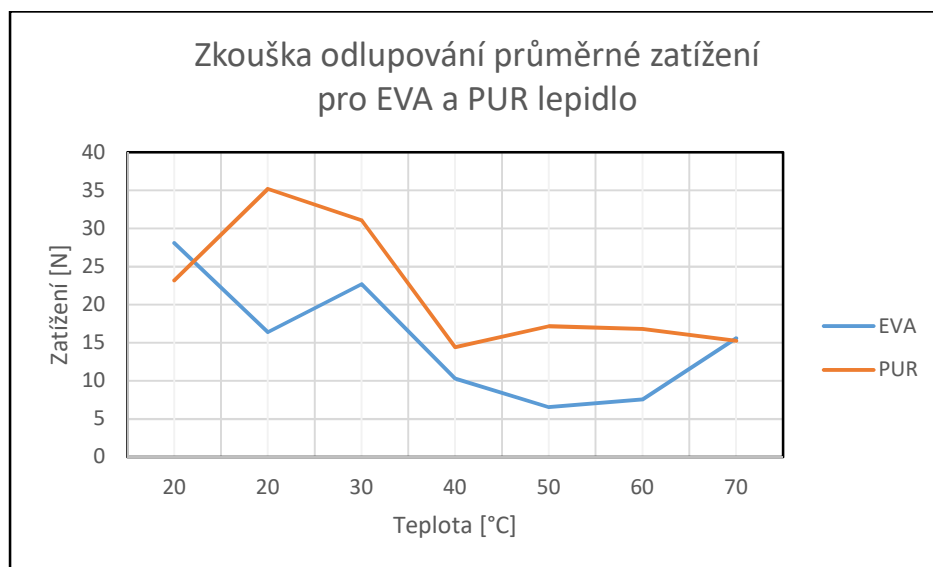
Z krabicového diagramu Obr. 25 je patrné, že maximální hodnoty zatížení u EVA tavného lepidla se zvyšující se teplotou mírně klesají. Na vícerozměrném testu významnosti (Tab. 4) je významná p -hodnota, která je menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$. To znamená že hypotéza o rovnosti souborů se zamítá a posuzovaný faktor má statisticky významný vliv. Z důvodů významnosti středních hodnot zatížení těchto dvou lepidel bylo nutné provést dvoufaktorovou ANOVA s opakovaným měřením.

Červeně vyznačené hodnoty v Tuckeyho testu mnohonásobného porovnání v Tab. 5 jsou menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$ a jsou tedy statisticky významné. V tomto souboru je zřejmé, že statisticky významně odlišná střední hodnota se týká cyklovaných vzorků měřených při 30 °C a necyklovaných vzorků měřených při 20 °C.

Na přiložených fotografiích vzorků lepených s použitím EVA měřených při 30 °C je patrné, že lepidlo velmi dobře odolává zatížení. Průměrně naměřená síla se pohybovala kolem 23 N, přičemž však v žádném z případů nedošlo k odloupení dýhy na úrovni lepeného spoje ale pouze k jejímu odlomení. Na vzorku testovaném při 50 °C již je potřebná síla pro odloupení dýhové hrany nižší – průměrně 6,5 N, jelikož lepidlo je již méně odolné. I zde však po částečném odloupení došlo k lomu dýhové hrany, a to zhruba v polovině délky u všech testovaných vzorků. Při 70 °C je síla potřebná k odloupení dýhové hrany již tak malá, že trhací stroj pouze ve třech případech z deseti naměřil průměrnou hodnotu 5 N, v ostatních případech byla síla potřebná k rozlepení spoje mimo rozlišovací schopnost přístroje. Dýhová hrana při této teplotě již sama o sobě držela jen na několika místech.

Obr. 26 obsahuje krabicový diagram hodnot PUR z něž vyplývá, že střední hodnoty zatížení jsou téměř souměrné pro všechna měření, lze vypořadovat pouze mírný pokles s narůstající teplotou. Vícerozměrný test významnosti vykazuje p -hodnotu menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$ a jde tedy také o statisticky významná data, hypotéza o rovnosti souborů se zamítá. Taktéž byla data podrobena dvoufaktorovému ANOVA testu s opakovaným měření, ve kterém již nebyla zjištěna žádná statisticky významná data.

Na fotografiích vzorků s použitím PUR lepidla uvedených v příloze lze pozorovat u vzorků měřených při 30 °C, 50 °C a 70 °C, že všechny odolávají zatížení velmi podobně – nejprve byla odtrhnuta část DTD, poté byla dýchová hrana zlomena a lepidlo zůstalo neporušeno. Síla vyvinutá trhacím strojem byla tedy využita prakticky pouze na odtržení části DTD a zlomení dýchové hrany.



Obr. 38 Porovnání hodnot zatížení EVA a PUR lepidla

Ze srovnání testovaných lepidel na Obr. 38 je vidět, že potřebné zatížení vzorků klesá s rostoucí teplotou jak u EVA, tak i PUR lepidla. Prokázalo se, že ve zkoušce v odolnosti odlupování při úhlu 90° lépe obstálo PUR.

7.2. Zkouška pevnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°

U této zkoušky byla dále zpracována pouze data pro EVA lepidlo, protože hodnoty zatížení PUR při této zkoušce uvedené v Tab. 9 vykazují pevnosti vyšší, nežli je maximální rozsah použitého trhacího stroje. Taktéž byli vyřazeny hodnoty naměřené pro EVA lepidlo při 20 °C necyklované (viz Tab. 8) a dále ve statistice nejsou zpracovány.

Na fotografii v příloze je patrné, že při testování vzorku PUR lepidla při teplotě 70 °C lepidlová spára odolala maximálnímu zatížení stroje a stále pevně drží.

V krabicovém diagramu této zkoušky (viz Obr. 32) je jednoznačně patrné, že s rostoucí teplotou se snižuje síla potřebná k odtržení hrany. Jednorozměrný test významnosti v Tab. 12

udává p -hodnotu menší, než je hladina významnosti α 0,05 a jde tedy o statisticky významný rozdíl středních hodnot, hypotéza o rovnosti souborů se tudíž zamítá. Z důvodu významnosti středních hodnot tohoto lepidla byla dále využita jednofaktorová ANOVA. Tuckého test mnohonásobného porovnání (viz Tab. 13) vyznačil červenou barvou statisticky významná data která jsou menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Podle tohoto testu jsou statisticky významně odlišné střední hodnoty souboru změřené při 40 a 50 °C.

Na fotografiích uvedených v příloze je vyobrazen vzorek pro EVA lepidlo při působení teploty 30 °C a již při takto nízké teplotě byla působením průměrného napětí 1,9 MPa dýhová hrana odtržena. Při zvyšující se teplotě se napětí snižovalo a např. při teplotě 50 °C bylo zapotřebí na odtržení hrany pouhých 0,5 MPa.

7.3. Zkouška pevnosti v ohybu

Hodnoty zjištěné v této zkoušce byly dále graficky porovnány s hodnotami zkoušky v odlupování pod úhlem 90°. Obrázek 36 obsahuje porovnání zatížení dýhové hrany a zkoušky v odlupování pro obě lepidla. Hodnoty zatížení dýh převyšují hodnoty odlupovacích sil u obou lepidel, což má zřejmě vliv na lepidlovou spáru. Dýhová páska má po odloupení zachovanou tvarovou paměť a opět se vrací do počátečního tvaru viz Obr. 15.

8. DISKUSE

Je třeba mít na paměti, že k mechanickému a teplotnímu namáhání nábytku dochází nejen v domácnostech, ale již dávno před započítím jeho životního cyklu u koncového uživatele – tedy při přepravě a skladování. Nejběžnější mechanické zatížení nábytku v domácnostech je svislé statické zatížení, které vyvolávají nejen uložené předměty ale často osoby, které například při opírání či sedání namáhají nejprve nábytkovou hranu. Nároky na výdrž a kvalitu jsou přitom nemalé a je potřeba, aby nábytek vyrobený z aglomerovaných materiálů vydržel bez viditelného estetické újmy poměrně dlouho dobu.

Vzhledem k těmto skutečnostem byly zvoleny pro výzkum v rámci této práce pevnostní zkoušky odolnosti v odlupování pod úhlem 90°, šikmý tlakový smyk pod úhlem 45° a zkouška pevnosti v ohybu dýhové pásky. První dva zmíněné nejnáročněji zatěžují lepený spoj mezi nábytkovou hranou a vlastním dílcem. Ohyb dýhové pásky zase napovídá jaká síla je potřeba k nalepení dýhové pásky, která je před aplikací dlouho dobu zdeformovaná (navinutá na roli) a díky tvarové paměti klade odpor. Navíc, jak bylo dokázáno, si napětí zachovává i po aplikaci, což může napomáhat k jejímu odlepení. Testovací metody byly uplatněny na vzorky se spoji lepenými dvěma ve výrobě běžně používanými lepidly – hranovací EVA lepidlo značky ZIKA a PUR lepidlo značky Jowatherm. Na vzorcích byl využit samozřejmě stejný typ nábytkové hrany z borovicového dřeva, u kterého byla zjišťována odolnost proti zatížení v ohybu. Tato dýhová pásky byla zvolena záměrně pro vysoký obsah pryskyřice a množství pryskyřičných kanálků ve dřevě, ty by totiž mohly zásadně ovlivnit pevnost lepeného spoje.

I přes hodnoty udané výrobcem v technickém listu pro maximální teplotní odolnost + 95 °C u EVA lepidla od firmy ZIKA, v zatížení odlupováním odolalo bez problémů pouze teplotě 40 °C. Síla potřebná k odloupení byla přitom průměrně pouze kolem 10 N, po zvyšování teploty na 60 °C síla klesla dokonce až k 6 N a u některých vzorků byla dokonce neměřitelná. Tato odlišnost od výrobcem udaných hodnot může být způsobena například zmíněným obsahem pryskyřice v lepeném dřevě nebo napětím dýhové pásky souvisejícím s tvarovou pamětí – síla potřebná při zkoušce k narovnání dýhové hrany totiž převyšovala sílu potřebnou k odloupení dýhy v těchto případech. Lze se však pouze domnívat o těchto příčinách, k empirickému důkazu by bylo nutné srovnat hodnoty s hodnotami vzorků olepených dýhovou páskou vyrobenou z jiné dřeviny.

Výrobce PUR lepidla, firma Jowatherm, teplotní odolnost v technickém listu pro změnu neuvádí vůbec. Zřejmě však teplotám, kterým je nábytek běžně vystavován odolává velmi dobře, jelikož pouze u jednoho vzorku došlo k odloupení dýhové hrany, a to jen k částečnému, při teplotě 60 °C. V ostatních případech došlo dříve ke zlomení dýhové hrany. Tudíž lze konstatovat, že PUR lepidlo je při vyšších nárocích na kvalitu a odolnost vhodnější k olepování bočních ploch nábytkových dílců než lepidlo EVA.

V šikmém tlakovém smyku bohužel nebylo možné porovnat lepidla mezi sebou, protože silový rozsah použitého trhacího stroje nestačil k tomu, aby změřil sílu potřebnou k odtržení dýhové pásky u PUR lepidla. Pro tuto zkoušku by bylo zřejmě nutné zvolit jiný stroj s vyšším rozpětím sil nebo vzorky menších rozměrů.

Dále byla tedy pro tuto zkoušku statisticky zpracována pouze data naměřená s EVA lepidlem. Všechny necyklované vzorky testované při 20 °C odolaly maximálnímu zatížení vyvinutému trhacím strojem. Cyklované vzorky testované při teplotě 20 °C však již nevydržely a hrana byla odtržena při zatížení dosahující 4 kN. S rostoucí teplotou potřebná síla klesala a při 70 °C již stačilo k odtržení pouze necelých 157 N. V tomto případě opět nelze dotvrdit, zda na toto lepidlo záporně nepůsobí obsah pryskyřice ve dřevě. Tuto skutečnost by bylo nutné nejprve podložit daty ze zkoušek s použitím dýhové pásky z jiné dřeviny a získaná data statisticky vyhodnotit.

9. ZÁVĚR

Tato práce se zabývá vlivem zvýšených teplot na pevnost lepeného spoje dýhové nábytkové hrany z jehličnatého dřeva. Pro zkoušky odolnosti byla zvolena dvě běžně využívaná tavná lepidla. Důvodem výzkumu tohoto tématu je především vystavení nábytku těmto podmínkám například při přepravě v kontejnerech či skladování nábytku především v letních měsících. Je proto důležité, aby zvolené tavné lepidlo bylo zvýšeným teplotám dostatečně odolné a nábytek si tak zachoval svou formu a vlastnosti.

Hlavním cílem experimentální části bylo srovnání vhodnosti použití etyl-vinyl-acetátového a polyuretanového lepidla na nábytkové hrany. Před laboratorními zkouškami byly vzorky vystaveny teplotnímu cyklickému namáhání simulujícímu teplotní namáhání při dopravě v kontejnerech či skladování. Následně byly vzorky mechanicky testovány při zvýšených teplotách v rozmezí od 20 do 70 °C. Dle očekávání byl naplněn předpoklad snižování pevnosti s narůstající teplotou.

Ke zjištění odolnosti lepeného spoje mezi dřevotřískovou deskou a dýhovou olepovací páskou z borovicového dřeva byly využity tři typy laboratorních zkoušek, které zjišťovaly – zkouška v odlupování pod úhlem 90°, zkouška v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45° a zkouška odolnosti dýhové hrany v ohybu.

Zadané cíle byly splněny s výjimkou srovnání zkoušek v šikmém tlakovém smyku pro daná lepidla. To bohužel nebylo možné, jelikož limit měřicího rozsahu trhací stroje je nižší než pevnost polyuretanového lepidlového spoje v tomto typu namáhání.

Celkové výsledky laboratorních zkoušek potvrdily očekávanou vyšší odolnost lepeného spoje u polyuretanového tavného lepidla oproti lepidlu na bázi etyl-vinyl-acetátu. Laboratorní zkouška rovněž potvrdila, že cyklické namáhání vzorků před zkouškami mělo negativní vliv na pevnosti lepených spojů. EVA lepidlo při zkoušce v odlupování pod úhlem 90° neodolalo již teplotě 30 °C. Vliv na rozdělení lepeného spoje má při zvýšené teplotě i dýhová olepovací páska, která díky tvarové paměti má snahu navrátit se do svinutého stavu, ve kterém byla před aplikací na nábytkovou hranu.

U zkoušky v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45° cyklické namáhání zřetelně ovlivnilo pevnost spojů lepených EVA lepidlem. Zatímco necyklované vzorky při teplotě 20 °C byly mimo rozsah trhacího stroje, vzorky cyklované při stejné teplotě namáhání

neodolaly. Vzorke lepené PUR lepidlem vydržely bez rozdílu i po působení cyklického namáhání a zvolený trhací stoj nedokázal hranu odtrhnout.

10. SUMMARY

This work examines the effect of elevated temperatures on the strength of glued joint veneer furniture edges made from coniferous wood. There were two commonly used hot melt adhesives chosen for the durability tests. The reason for this research topic is particularly real exposure of the furniture to these conditions e.g. during transport or storage in containers, especially in the summer months. It is therefore important for the selected hot melt adhesive to be sufficiently resistant to elevated temperatures so the furniture retains its shape and properties.

The main objective of the experimental part was to compare the suitability of use of ethyl vinyl acetate, and polyurethane adhesive for furniture edges banding. Prior to laboratory tests, the samples were exposed to thermal cyclic stresses simulating thermal stress during transport or storage in containers. Then the samples were mechanically tested at elevated temperatures ranging from 20 to 70 °C. As expected, the assumption was filled with strength reduction to increasing temperature dependence.

To determine the resistance of the adhesive bond between the chipboard and veneer edge banding strip, made of pine wood, three types of laboratory tests were used – peel test at an angle of 90 degrees, oblique compressive shear test at an angle of 45 degrees and an endurance bending test of the veneer edges.

The desired objectives have been met with the exception of comparison of the oblique shear pressure tests for a given adhesive. Unfortunately this was not possible, since the measurement range limit of the ripping machine was lower than the strength of the polyurethane adhesive bond for this type of stress.

The overall results of all laboratory tests confirmed the expected higher resistance of the polyurethane hot melt adhesive versus the adhesive based on ethyl vinyl acetate. Laboratory examination also confirmed that the cyclic loading of samples before testing had a negative effect on the strength of bonded joints. The surprise was that the EVA adhesive could not resist the peel test at an angle of 90 degrees already at 30°C. A significant effect on the delamination of the bonded joint at elevated temperature was observed also due to veneer gluing tape itself, which due to the shape memory tends to return into the rolled state, in which it was prior to application to furniture edges.

In compressive shear test at an angle of 45 degrees cyclic strain significantly affected the strength of joints bonded with EVA glue. While noncycled samples at 20°C were outside the range of a ripping device, cycled samples could not resist the same conditions. Samples bonded by PUR adhesive all withstood these tests even after exposure to cyclic loading, used ripping machine could not tear off the edge.

11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

11.1. Použitá literatura

Autor neuveden. 2010. *Dřevo od A do Z*. 3. vyd. Čestlice: Rebo, ISBN 978-80-255-0389-8.

BOUBLÍK, V. 1966. *Lepidla a jejich příprava*. 2., nezměněné vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. Polytechnická knihnice. Udělejte si sami.

CLERC, C., Brülisauer, M., Affoloter, S., Volkmer, T., Pichelin, F., Niemz, M. 2017. *Characterization of the ageing process of one-component polyurethane moisture curing wood adhesive*. Science direct 72. 130–138.

EISNER, K., Berger, V. 1958. *Lepidla v dřevařském průmyslu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. Řada dřevařské literatury.

GELBIČ, J. 2000. *Tavná lepidla: aplikace syntetických lepidel v knihařství, balení a kartonáži, výrobě nábytku*. Brno: Vydavatelství Knihař. ISBN 80-86292-01-0.

HRUBÝ, V. 2010. *Přehled materiálového inženýrství*. Ostrava: Kovosil. ISBN 978-80-903694-5-0.

KAFKA, E. 1989. *Dřevařská příručka*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. ISBN 80-03-00009-2.

MALÝ, Z., 2013. *SLIM LINE: Nový standard v technologii olepování hran*. Dřevařský magazín odborný časopis pro podporu dřevařské a nábytkářské výroby s vybranými recenzovanými články: společné vydávání pro Českou a Slovenskou republiku. Banská Bystrica, Trendwood-twd. ISSN 1338-371X

NUTSCH, W., 2006. *Příručka pro truhláře. 2.*, přeprac. vyd. Praha, Europa-Sobotáles. 615 s. ISBN 80-86706-14-1.

OSTEN, M., 1996. *Práce s lepidly a tmely. 3.*, přepracované a zkrácené vyd. Praha, Grada. 129 s. ISBN 80-7169-338-3.

PARK, Y., Joo h., Kim, H., Lee, Y. 2006. *Adhesion and rheological properties of EVA-based hot-melt adhesives*. Science direct 26 (8). 571–576.

REN, D., Frazier Ch.E. 2013. Structure/durability relationships in polyurethane wood adhesives: Neat films or wood/polyurethane composite specimens? Science direct 68. 77–83.

ROWELL, R. M. 2013. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-4398-5380-1

SVOBODA, J., Brunecký, P., Hála, B. 2013 *Nábytkářský informační systém "NIS". Část IX., Materiály na bázi dřeva a ostatní materiály pro výrobu nábytku*. Brno: Ircas. ISBN 978-80-87502-12-9.

ŠLEZINGEROVÁ, J., Gandelová, L. 2012. *Stavba dřeva: cvičení. 2*. Mendelova univerzita v Brně: Ediční středisko. ISBN 978-80-7375-168-5.

TESAŘOVÁ, D. 2014. *Povrchové úpravy dřeva*. Praha: Grada. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-4715-6.

ZEMIAR, J., 2009 *Technológia výroby nábytku*. 1 vyd. Technická univerzita vo Zvolene, 287 s. ISBN 978-80-228-2064-6.

11.2. Použité normy

ČSN EN 28510-1: Lepidla – Zkouška v odlupování zkušebního tělesa z ohebného a tuhého adherendu – Část 1: Odlupování pod úhlem 90 stupňů

12. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Naměřené minimální, maximální a střední hodnoty teploty a relativní vlhkosti, testovaných vzorků při cyklickém zatížení.....	34
Tab. 2 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce odlupování pod úhlem 90° pro EVA lepidlo	42
Tab. 3 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce odlupování pod úhlem 90° pro PUR lepidlo	43
Tab. 4 Vícerozměrný test významnosti zkoušky odlupování pro EVA a PUR lepidlo	45
Tab. 5 Výsledky testu mnohonásobného porovnání pro zkoušku odlupování u EVA lepidla	45
Tab. 6 Výsledky testu mnohonásobného porovnání pro zkoušku odlupování u PUR lepidla	45
Tab. 7 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce šikmým tlakovým smykem pod úhlem 45° pro EVA lepidlo	49
Tab. 8 Hodnoty zatížení u vzorků podrobených zkoušce šikmým tlakovým smykem pod úhlem 45° pro PUR lepidlo.....	50
Tab. 9 Hodnoty napětí u vzorků podrobených zkoušce šikmého tlakového smyku pod úhlem 45° pro EVA lepidlo	51
Tab. 10 Jednorozměrný test významnosti jednofaktorové ANOVY u zkoušky šikmého tlakového smyku pro EVA lepidlo	52
Tab. 11 Výsledky testu mnohonásobného porovnání pro zkoušku šikmého tlakového smyku pod úhlem 45° - EVA lepidlo	53
Tab. 12 Hodnoty zatížení vzorků dýchové olepovací pásky z BO podrobené zkoušce v ohybu	55

13. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Úhel smáčení povrchu (dostupné z: http://www.ksp.tul.cz).....	20
Obr. 2 Struktura lepeného spoje (zdroj: Tesařová, 2014).....	20
Obr. 3 Dřevotřísková deska laminovaná (dostupné z: http://www.n-i-s.cz)	25
Obr. 4 Dýhová olepovací páska (dostupné z: http://www.querkusdecospan.com)	26
Obr. 5 Klimatizační komora INCUCEL	27
Obr. 6 Sušárna řady STE se vzorky pro zkoušku odolnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°	28
Obr. 7 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v odlupování pod úhlem 90°	29
Obr. 8 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°	29
Obr. 9 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti dýhové pásky v ohybu.....	30
Obr. 10 Tepelná komora INSTRON.....	30
Obr. 11 Oboustranně olepený polotovár vzorku před rozřezáním.....	31
Obr. 12 Zkušební vzorek pro šikmý tlakový smyk pod úhlem 45° a jeho rozměry	31
Obr. 13 Olepovačka hran značky HOLZHER Sprint 1310	32
Obr. 14 Zkušební vzorek pro zkoušku v odlupování pod úhlem 90°	32
Obr. 15 Zkušební vzorek pro zkoušku v odlupování pod úhlem 90° a jeho rozměry	33
Obr. 16 Zkušební vzorek dýhové pásky pro zkoušku v ohybu	33
Obr. 17 Graf průběhu změny teploty a relativní vlhkosti při cyklickém teplotním namáhání zkušebních vzorků	34
Obr. 18 Postup zkoušky odolnosti v odlupování pod úhlem 90°.....	35
Obr. 19 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v šikmém tlakovém smyku pod úhlem 45°	36
Obr. 20 Zkušební agregát pro zkoušku odolnosti v ohybu dýhové pásky.....	37
Obr. 21 Grafické vyjádření průběhu zkoušky EVA lepidla v programu BlueHill při působení teploty 40 °C	39
Obr. 22 Grafické vyjádření průběhu zkoušky PUR lepidla v programu BlueHill při působení teploty 40 °C	40
Obr. 23 Grafické vyjádření průběhu zkoušky ohybu dýhové pásky při působení teploty 20 °C	40

Obr. 24 Základní rozměry vzorků pro zkoušku odlupování pod úhlem 90°	41
Obr. 25 Krabicový graf odlupování pod úhlem 90 °C pro EVA lepidlo	44
Obr. 26 Krabicový graf odlupování pod úhlem 90 °C pro PUR lepidlo	44
Obr. 27 Graf ANOVY s opakovaným měřením pro metodu odlupování, porovnání EVA a PUR lepidla.....	46
Obr. 28 Detail průběhu odlupování vzorku PUR lepidla při působení teploty 60 °C	46
Obr. 29 Detailní pohled na povrch odloupené dýhové pásky za použití EVA lepidla při působení teploty 60 °C.....	47
Obr. 30 Detailní pohled na povrch odloupené dýhové pásky za použití PUR lepidla při působení teploty 60 °C.....	47
Obr. 31 Základní rozměry vzorků pro zkoušku šikmého tlakového smyku pod úhlem 45°	48
Obr. 32 Krabicový graf napětí u vzorků šikmého smykového tlaku pod úhlem 45° pro EVA lepidlo	52
Obr. 33 Graf jednofaktorové ANOVY pro metodu odlupování pod úhlem 45° pro EVA lepidlo	53
Obr. 34 Detailní pohled na povrch odtržené dýhy za použití EVA lepidla při působení teploty 30 °C	54
Obr. 35 Detailní pohled na povrch odtržené dýhy za použití PUR lepidla při působení teploty 70 °C	54
Obr. 36 Graf porovnání zatížení vzorků v odlupování pro EVA a PUR lepidlo s ohybovým zatížením dýhové pásky z BO.....	56
Obr. 37 Detail dýhové olepovací pásky z BO s viditelným rozhraním konstrukce dýhového soulepu.....	56
Obr. 38 Porovnání hodnot zatížení EVA a PUR lepidla.....	58

14. SEZNAM POŽITÝCH ZKRATEK

ABS – akrylonitril-butadien-styren

BO – borovice

DTD – dřevotřísková deska

DTD-L – dřevotřísková deska laminovaná

EU – Evropská unie

EVA – ethylen-vinyl acetát

ISO – mezinárodní organizace pro normalizaci

MF – melaminoformaldehydová pryskyřice

PES – polyester

PUR – polyuretan

UF – Močovinoformaldehydová pryskyřice

UV – ultrafialové záření

15. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Vzorky – Zkouška odlupování pod úhlem 90°

Příloha 2: Vzorky – Zkouška šikmý tlakový smyk pod úhlem 45°

Příloha 3: Výstupy z měření

Příloha 4: Technické listy