

Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

**Stanovení interlaminární lomové houževnatosti lepené spáry zatížené módem II
při ohybové zkoušce**

Diplomová práce

2015/2016

Bc. Alena Pešková

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Prohlašuji, že jsem práci: **Stanovení interlaminární lomové houževnatosti lepené spáry zatížené módem II při ohybové zkoušce** zpracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona c. 111/1998 Sb., 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 nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne 8. dubna 2016

.....

Bc. Alena Pešková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Václavu Seberovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, vstřícný přístup, cenné připomínky a čas strávený nad mou prací. Jen těžko lze slovy vyjádřit vděk za jeho trpělivost a mentorství při zpracování, zejména v závěrečné fázi.

Dále bych ráda poděkovala celému Ústavu nauky o dřevě Mendelovy univerzity v Brně za pomoc při přípravě vzorků a při experimentální části.

Touto cestou bych chtěla zvěčnit veliké poděkování mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou nejen v posledním roce, ale po celou dobu studia.

ABSTRAKT

Autor práce: Bc. Alena Pešková

Název bakalářské práce: Stanovení interlaminární lomové houževnatosti lepené spáry zatížené módem II při ohybové zkoušce

Práce se zabývá problematikou lomové mechaniky. Klade si za cíl srozumitelně zpracovat teoretické poznatky z této oblasti, a to jak v České republice, tak v zahraničí, kde se výzkum lomové mechaniky provádí častěji. Na základě teoretické rešerše byl zvolen nejvhodnější způsob pro získání parametru lomové houževnatosti a postup pro její stanovení. K tomuto účelu byly vyrobeny tři sady smrkových tělísek za použití tří různých lepidel. Tyto sady byly podrobeny zkoušce tříbodovým ohybem při módu II (3ENF) za současného snímání kamer pro metodu obrazové digitální korelace (DIC). Z těchto výsledků byla vypočítána rychlost šíření deformační energie a lomová houževnatost zkoumaných vzorků. Zjištěná data práce porovnává a analyzuje jejich vzájemné závislosti.

Klíčová slova: DIC, ENF, lomová houževnatost, lomová mechanika, rychlost uvolnění deformační energie

ABSTRACT

Author's name: Bc. Alena Pešková

Title of bachelor thesis: Determination of interlaminar fracture toughness of bonded joints for mode II by End-Notched Flexure test

This thesis focuses on problematics of fracture mechanics. It aims to comprehensively explain theoretical knowledge in both Czech Republic and abroad, where a research of this field is taken more often. Based on theoretical research best way to determine fracture toughness was selected. For this purpose three sets of spruce specimens (using three different adhesives) were created and tested by 3ENF test under the mode II while being monitored by digital image correlation method. From these values strain release rate energy and fracture toughness of tested specimens were determined. The thesis compares found data and analyses their correlations.

Key words: DIC, ENF, fracture toughness, fracture mechanics, strain energy release rate

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	CÍL PRÁCE	12
3	LITERÁRNÍ REŠERŠE	13
3.1	LOMOVÁ MECHANIKA.....	13
3.1.1	Lomový proces.....	13
3.1.2	Mechanické vlastnosti dřeva.....	14
3.1.3	Houževnatost materiálu	15
3.1.4	Statická houževnatost dřeva.....	17
3.1.5	Křehký lom	17
3.1.6	Faktory ovlivňující charakter lomového procesu	18
3.1.7	Zkoušení houževnatosti	19
3.1.8	Zkoušení pevnosti dřeva v ohybu	20
3.1.9	Základní módy šíření trhliny.....	21
3.1.10	Lineární lomová mechanika.....	22
3.2	Dřevo jako kompozitní materiál	25
3.2.1	Nejčastější poruchy ve dřevě	26
3.2.2	Současné poznatky ve výzkumu lomové houževnatosti.....	26
3.2.3	Ekvivalentní trhlina.....	27
3.2.4	Metody pro zkoušení materiálů	29
3.2.5	Vzorový výzkum.....	30
3.3	NORMA.....	32
3.4	LEPIDLA	33
3.4.1	Mechanické vlastnosti lepidel.....	33
3.4.2	Fenolformaldehydová pryskyřice (PF) – Lignofen G/3/D.....	35
3.4.3	Disperzní polyvinylacetátové lepidlo (PVAc).....	36
3.4.4	Polyuretanové lepidlo (PUR, LEAR D4).....	36
4	METODIKA	37
4.1	Mechanické zkoušky	37
4.2	Výpočet interlaminární lomové houževnatosti G_{IIc}	37
4.2.1	R-křivka.....	40
4.2.2	Metoda DIC	40
4.3	Popis zkoušky a vzorků.....	42

4.4	Vzorky a příprava.....	43
4.4.1	<i>Etapa I – základní zpracování dřeva</i>	43
4.4.2	<i>Etapa II – příprava tělísek a lepení</i>	44
4.4.3	<i>Etapa III – lisování, čisté rozměry zkušebních vzorků, trhlina</i>	46
4.5	ENF zkouška třibodovým ohybem	47
4.5.1	Průběh zkoušky	48
4.6	DIC – metoda digitální obrazové korelace	49
4.6.1	Princip	49
4.7	Statistické metody	49
5	VÝSLEDKY	51
5.1	Výsledky mechanických zkoušek	51
5.1.1	Zkoušení fenolformaldehydového lepidla	51
5.1.2	Zkoušení PVAc lepidla	54
5.1.3	Zkoušení PUR lepidla	56
5.2	Statistika.....	58
5.2.1	Hustota	58
5.2.2	Modul pružnosti v ohybu – MOE	59
5.2.3	Mez úměrnosti	60
5.2.4	Pevnost v ohybu	62
5.2.5	Lomová houževnatost G_{IIc}	63
5.2.6	Korelace mezi měřenými veličinami	65
6	DISKUZE	66
7	ZÁVĚR	69
8	SUMMARY	71
9	POUŽITÁ LITERATURA	72
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
11	SEZNAM TABULEK	78
12	PŘÍLOHY	79

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CBBM	compliance based beam method nosníková teorie založená na poddajnosti
CBT	corrected beam theory upravená nosníková teorie
CCM	compliance calibration method metoda redukce dat, kde vztah mezi průhybem vzorku [T^2/M] a delaminační délkou [L] je stanoven před měřením simulací na různých délkách vzorků
CSD	crack shear displacement smykové posunutí trhliny
CTSD_{II}	crack tip shear displacement posun čela trhliny pro mód II
CTOD	crack tip opening displacement posun otevírání čela (špice) trhliny
CZM	cohesive zone models model kohezivní (soudržné) oblasti
DIC	digital image correlation metoda digitální obrazové korelace
ENF3	end notched flexure zkouška 3bodovým ohybem
FPZ	fracture process zone procesní lomová oblast
L, R, T	longitudinal, radial and tangential podélný, radiální a tangenciální směr
4ENF	four point end notched flexure zkouška 4bodovým ohybem
MKP	metoda konečných prvků

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN S JEDNOTKAMI

a	[mm]	délka trhliny
a_{eq}	[mm]	ekvivalentní délka trhliny
a_0	[mm]	počáteční délka trhliny
Δa_{FPZ}	[mm]	délka zóny protažení
B	[mm]	šířka tělíska
C	[mm/N]	poddajnost materiálu
C_0	[mm/N]	počáteční poddajnost
δ	[mm]	deformace
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
ε	[mm]	deformace
ε_{pl}	[mm]	plastická deformace
G	[N/mm]	modul pružnosti ve smyku
G_{II}	[N/mm]	rychlost uvolnění deformační energie (hnací rychlost trhliny) při módu II
G_{IIc}	[N/mm]	interlaminární lomová houževnatost – mód II
G_{LR}	[N/mm]	smykový modul pružnosti v LR směru
G_Q	[N/mm]	zkušební interlaminární lomová houževnatost – mód II
h	[mm]	poloviční výška tělíska
I	[mm ⁴]	kvadratický moment průřezu plochy
J_{II}	[N]	lomová energie
K	[MPa]	faktor intenzity napětí
l_0	[mm]	vzdálenost mezi podpěrami
L	[mm]	poloviční vzdálenost mezi podpěrami
λ	[–]	deformační koeficient
M	[Nm]	ohybový moment
$\nu_{m,n} (m,n = L, R, T)$		Poissonova čísla
P	[N]	zatěžovací síla
U	[N]	deformační energie
w_{II}	[mm]	otevření trhliny

1 ÚVOD

Lomová mechanika, jako vědní obor, vznikla na základě rozvoje používání konstrukcí z vysoce pevných ocelí. Při používání těchto konstrukcí se ukázalo, že jejich pevnost není určena mezí kluzu, ale odolností proti iniciaci lomu z defektu. Při zkoumání tohoto chování materiálu vznikl nový velmi důležitý parametr, a tím je lomová houževnatost. Většina výzkumů a odborných prací se v tomto oboru zabývala ocelmi, ale zhruba od konce druhé světové války na významu získávají v obecné míře kompozitní materiály a především díky své nízké ekologické zátěži i materiály přírodní. V této práci se bude pohlížet na rostlé lepené dřevo jako na kompozitní materiál, přičemž zkoumána jeho lomová houževnatost v módu II a další mechanické vlastnosti.

Lomová houževnatost tělesa se zavedenou trhlinou, bude určena rychlostí šíření trhliny při zkoušce 3bodým ohybem (mód II). Tento parametr je určující pro lomovou houževnatost materiálu, především potom v závislosti na délce trhliny v průběhu zatěžování (*R*-křivka). Tvar *R*-křivky (resistance curve) určuje odpor materiálu vůči lomu a je závislý na chování materiálu, proto se tato charakteristika často používá pro vyjádření lomové houževnatosti materiálu. Naměřená data budou sloužit k doplnění materiálové charakteristiky pro lepené dřevěné spoje, což konstruktérům umožní přesnější dimenzování konstrukcí. Konstruktéři a designéři mohou data využít k přesnějším výpočtům či při vytváření numerického modelu, a tudíž při následné lokalizaci oblastí náchylnějším k defektu.

2 CÍL PRÁCE

Diplomová práce si klade za cíl porovnat interlaminární lomové houževnatosti lepených smrkových vzorků s aplikovanou trhlinou při ohybové zkoušce (ENF zkouška) za použití tří různých lepidel. Pro slepení smrkových lamel byla použita lepidla PVAc, PUR a fenolformaldehydová pryskyřice. Všechna tělíska byla standardizována dle popisu níže (rozměry, trhlina, lepidlo apod.). Pro detailní sledování šíření lomu byla využita metoda přímá, založená na přístupu „Compliance beam based method“ a metoda digitální obrazové korelace (DIC).

Experimentální měření bylo odvozeno ze standardu ASTM D7905 – Standardní testovací metoda určení módu II interlaminárním lomem. Dílčím cílem této práce bylo modifikovat tento standard novými poznatky výzkumu a měření interlaminární houževnatosti v módu II. Z tohoto důvodu byly zkoušky, probíhající na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z050, obohaceny o nové výpočty tzv. ekvivalentní délky trhliny a data z optického měření.

Konečným cílem práce bylo provést statistické zhodnocení třech druhů lepidel na základě fundamentálních i pokročilých mechanických ukazatelů. A dle tohoto zhodnocení určit, zda má typ lepidla vliv na sledované materiálové charakteristiky, a které lepidlo ze zkoumaných je nejvhodnějším kandidátem pro spoje namáhané ve smyku, pro spoje, kde je dobrá lomová houževnatost vyžadována.

3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

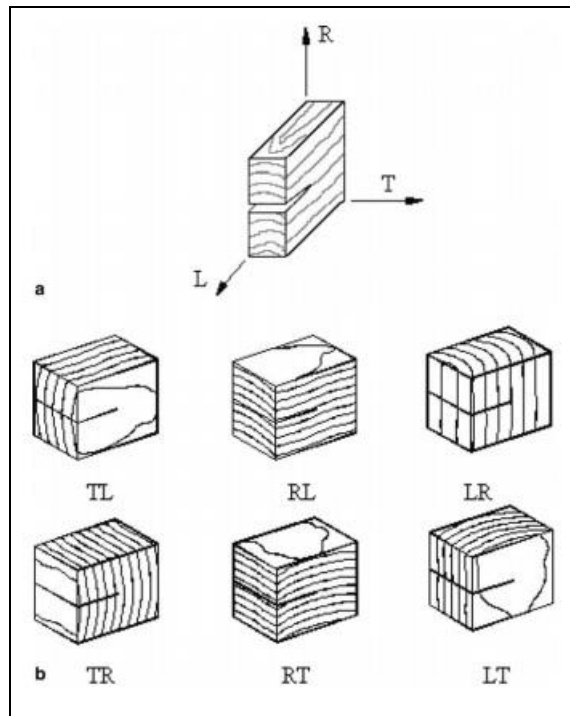
3.1 LOMOVÁ MECHANIKA

Lomová mechanika je multidisciplinární vědní obor zabývající se studiem materiálů, jejich lomových vlastností, jednotlivými typy lomu, lomovými procesy a mnoha parametry, které chování materiálu a jeho lomu ovlivňují. Tento obor se v posledních letech neobyčejně rychle vyvíjí a dochází v něm k řadě změn. Nejvíce probádanou částí je chování a materiálová charakteristika kovových materiálů. V posledních desetiletích je pozornost poutána především ke kompozitním materiálům, ale i materiálům přírodním jako jsou ty na bázi dřeva. Mluvíme-li o lepených dřevěných nosnících, mluvíme o oblasti s velkým prostorem pro zkoumání, experimenty a měření materiálových charakteristik.

3.1.1 Lomový proces

Při šíření trhliny v materiálu dochází k tvorbě nových volných povrchů, tj. lomových ploch. Lom je proces časově i prostorově nehomogenní skládající se ze dvou základních etap – z fáze iniciace, která probíhá ve větším či menším počtu lokalizovaných oblastí, a z fáze šíření (propagace) a propojování jednotlivých dílčích nespojitostí (Kunz, 2005). Všechny materiály jsou tvořeny atomy a molekulami, dřevo a materiály na bázi dřeva nejsou výjimkou. Stupeň homogenity uspořádání atomů a molekul v objemu dřeva a orientace jejich kovalentních vazeb a vodíkových můstků určují míru a orientaci jejich mechanických vlastností.

Vlastnost dřeva, že v různých směrech má různé vlastnosti se nazývá anizotropie. Opakem anizotropie je izotropie, což je charakteristika, která zaručuje, že se daný materiál chová ve všech směrech stejně (např. není určující, v jakém směru ho mechanicky namáháme). Při vytváření nového kompozitního materiálu je izotropie jednou z hlavních materiálových charakteristik a výhod.



Obr. 1 a) referenční LRT orientace b) hlavní směry šíření trhliny (Silva et al, 2006)

Pro dřevo je velmi důležité, v jakém směru je zatěžováno a jakým způsobem. Mnoho autorů zkoumalo poměr mezi směry zatěžování při různých způsobech zatěžování. Experimentálními zkouškami pevnostních a pružnostních vlastností dřeva bylo dokázáno, že vlastnosti dřeva v podélném směru a směru napříč vláken vykazují velké rozdíly. Menší rozdíly jsou i mezi tangenciálním a radiálním zatěžováním. Tyto rozdíly jsou dány stavbou dřeva, především uspořádáním libriforních vláken a tracheid. Směr mikrofibril ve středních vrstvách sekundárních stěn S_2 je příčinou transverzálně-axiální anizotropie s významným rozdílem mechanických vlastností dřeva v podélném směru a ve směru napříč vláken. Síly, které působí kolmo na vlákna dřeva, vyvolávají větší deformace zploštěním buněk, než by způsobily rovnoběžně s vlákny (Požgaj, 1993).

3.1.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Mezi základní mechanické vlastnosti dřeva řadíme pevnost a pružnost. Tyto charakteristiky často využíváme k mechanickým predikcím konstrukcí či komponent. K odvozeným pevnostním charakteristikám řadíme tvrdost, jejíž význam je spíše praktický při zkoumání chování materiálu při kontaktu s jinými.

Pevnost charakterizuje schopnost materiálu odporovat porušení vlivem mechanického zatížení. Ukazatelem a mírou této vlastnosti je mez pevnosti. Tato

mez představuje maximální hodnotu zatížení, kterou těleso vydrží bez destrukce. Tato mez se stanovuje pro tlak, tah, smyk, ohyb a krut. Jelikož má dřevo anizotropní charakter, který se z praktických důvodů zjednodušuje na ortotropní, stanovuje se mez pevnosti ve třech základních směrech: podél vláken, napříč vláken ve směru radiálním a tangenciálním (Matovič, 1993).

Pružnost je schopnost materiálu odolávat deformacím a nabývat počátečních rozměrů a tvaru po přerušení působení vnějších sil. Tato vlastnost se také může označovat jako deformovatelnost, což je schopnost měnit rozměry a tvar za působení vnějších sil. Pružnost dřeva je charakterizována při krátkodobých zatíženích pomocí modulu pružnosti, modulu pružnosti ve smyku a koeficientem příčné deformace (Poissonovým číslem). Při dlouhodobém zatížení průběh deformací charakterizují reologické vlastnosti (Matovič, 1993).

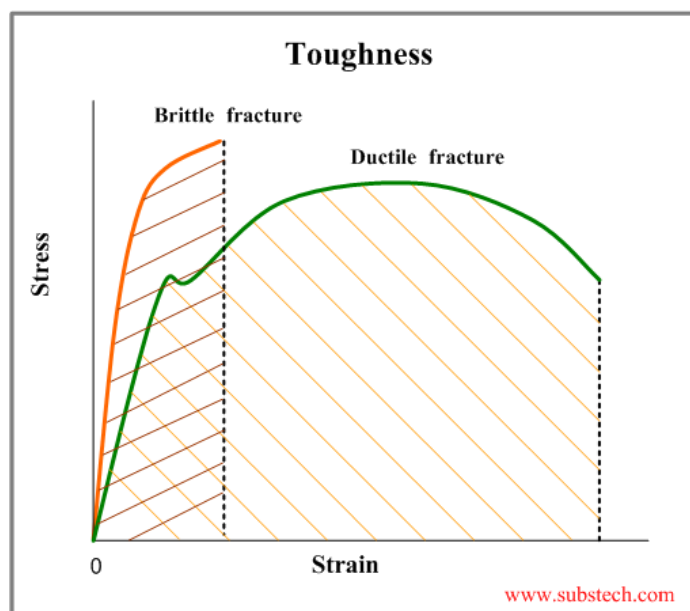
Tvrdość materiálu vyjadřuje schopnost materiálu odporovat vnikání jiného tělesa do jeho struktury. Velikost tvrdosti charakterizují hodnoty statické a dynamické tvrdosti, které se nejčastěji měří dle Brinella nebo Janka (ČSN EN ISO 6506–1).

3.1.3 Houževnatost materiálu

V této práci bude zvláštní pozornost věnována lomové houževnatosti. Tuto významnou vlastnost konstrukčních materiálů lze obecně definovat jako schopnost absorpce energie. Tato vlastnost je zejména důležitá při navrhování konstrukcí a při výběru materiálu. K absorpci energie dochází v zatíženém tělese ve fázi, která předchází porušení i v průběhu vlastního lomového procesu. Z hlediska lomové mechaniky tato vlastnost úzce souvisí především se schopností plastické deformace, která je dána pohyblivostí dislokací. Klesá-li tato pohyblivost (např. nahromaděním dislokací na určité překážce, snížením teploty apod.), snižuje se schopnost plastické deformace, a tedy i schopnost absorpce energie – houževnatost materiálu se snižuje.

Houževnatost materiálu ovlivňuje do značné míry lomový proces a tedy i povahu lomové plochy tělesa. Je-li houževnatost materiálu malá, jde o lom křehký, provázaný relativně malou plastickou deformací, zatímco u materiálů s velkou houževnatostí jde o lom houževnatý, charakterizovaný plastickou deformací většího rozsahu. Dřevo je spíše řazeno mezi materiály houževnaté, křehký lom se u něj vyskytuje v menší míře, než u jiných materiálů, např. u zatížení tahem podél vláken.

Lom dělí materiály na křehké a houževnaté (viz Obr. 2) podle energetické náročnosti jejich porušení. Potřebujeme-li relativně malé množství energie, jde o lom křehký a materiál je řazen mezi křehké. Lom houževnatý naopak vyžaduje relativně velké množství energie, ve většině zdrojů jsou běžné dřeviny (dub, buk, smrk, borovice apod.) řazeny mezi materiály houževnaté. Záleží ovšem na způsobu sušení, úpravy dřeva, např. impregnace a především na množství defektů dřeva. Při tomto členění lomů nezávisí na mikromechanismu porušování, tento charakter se bere v úvahu při dělení lomů z fraktografického hlediska. Podle charakteristiky mikromechanismu porušování (mikroskopické znaky lomové plochy), rozdělujeme lomy na tvárné a štěpné, dále pak na transkrystalické a interkrystalické. Lomy křehké mívají většinou štěpný charakter a lomy houževnaté povahu tvárného lomu, ale i přesto nelze tyto pojmy zaměňovat (Kunz, 2005).



Obr. 2 Pracovní diagram průběhu křehkého a tvárného lomu (<http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=toughness.png>)

Ve většině publikací lze dohledat tabulky pro námi měřené parametry (MOE, pevnost, mez úměrnosti, lomová houževnatost, apod.), zejména pro kovy a nástrojové oceli, ovšem tato práce zkoumala vzorky ze smrkového dřeva (*Picea abies* L. Karst.). Pro charakteristiku dřeva je potřeba definovat houževnatost, houževnatost dřeva je definována jako mechanická práce, která je spotřebována na vytvoření plastické deformace. Tato vlastnost má velmi úzký vztah k plastičnosti dřeva a dle druhu zatížení se rozděluje na statickou a dynamickou (rázovou) houževnatost.

3.1.4 Statická houževnatost dřeva

Statická houževnatost dřeva je mechanická vlastnost, která stanovuje spotřebovanou mechanickou energii na vznik plastické deformace. Vztahem mezi napětím a plastickou deformací je charakterizován pomocí koeficientu plastičnosti λ :

$$\sigma^2 = 2\lambda c \varepsilon_{pl} \quad (1)$$

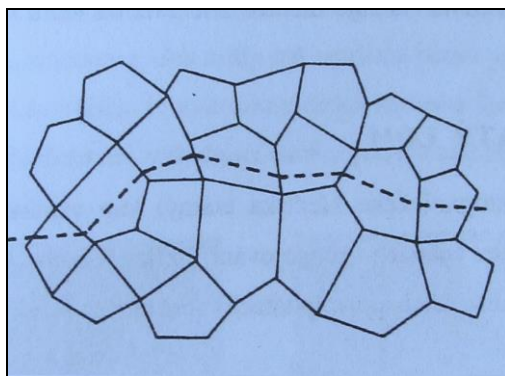
Měrnou energii deformační práce vynaloženou na vznik plastické deformace se vypočítá integrováním působícího napětí podle deformace v rozsahu plastické deformace:

$$\omega_{pl} = \int_0^{\varepsilon_{pl}} \sigma \cdot d\varepsilon = \frac{2}{3} \sqrt{2 \cdot \lambda \cdot c \cdot \varepsilon_{pl}^3} \quad (2)$$

Pokud je deformační práce malá a plastická deformace téměř zanedbatelná, řadíme takové materiály mezi křehké. Dřevo je na vznik plastické deformace energeticky náročné a plastická deformace je při určitých způsobech zatížení velmi výrazná (např. tlak napříč vláken), bývá tedy většinou řazeno mezi materiály houževnaté.

3.1.5 Křehký lom

Pro křehký lom je charakteristická nižší spotřeba energie než při lomu tvárném a skutečnost, že lom probíhá bez fáze plastické deformace. Z fraktografického hlediska je transkrystalický lom (viz Obr. 3) charakteristickým představitelem křehkého lomu.

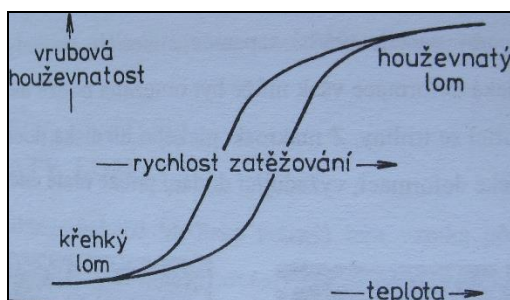


Obr. 3 Transkrystalický lom (Kunz, 2005)

Pro transkrystalický lom je typické porušování meziatomových vazeb podél některých krystalografických rovin – u železa např. podél rovin (Kunz, 2005).

3.1.6 Faktory ovlivňující charakter lomového procesu

Lomový proces může ovlivňovat celá řada podmínek, ať už vedoucích k urychlení šíření lomu nebo naopak k jeho zpomalení. Mezi základní parametry, které lomový proces ovlivňují, patří teplota, koncentrace napětí, geometrie zkušebního tělíska, přítomnost vrubu a způsob zatěžování. Například pravděpodobnost vzniku křehkého lomu roste s klesající teplotou (viz Obr. 4).



Obr. 4 Schématické znázornění vlivu teploty a rychlosti zatěžování na vrubovou houževnatost materiálu a typ lomu (Kunz, 2005)

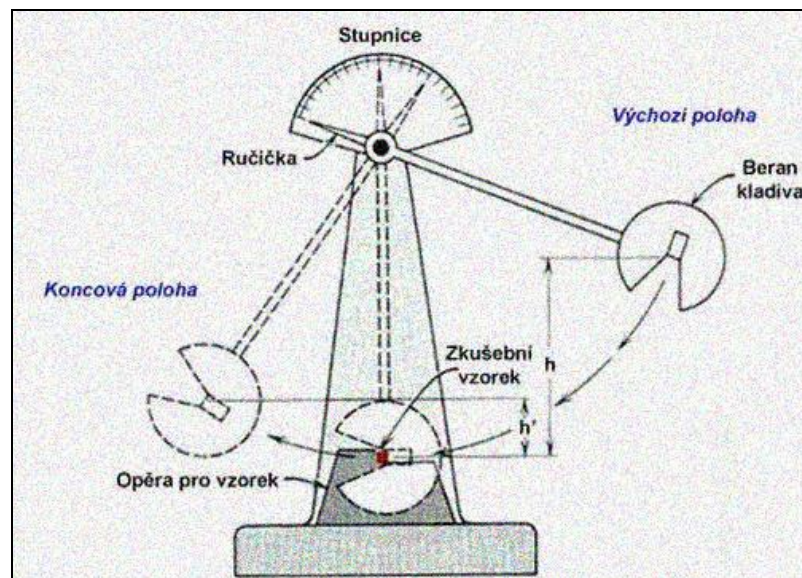
Je zřejmé a současně i logické, že křehký lom je energeticky méně náročný než lom houževnatý. Přechodová (transitní) teplota, při které dochází k výraznému poklesu vrubové houževnatosti, je velmi důležitou charakteristikou vrubové citlivosti konstrukčních materiálů, ale především materiálů kovových či kompozitních (Kunz, 2005). Pojmem tranzitní teplota rozumíme teplotu, kdy se vzorky zkoušené nad touto teplotou porušují houževnatě a pod tranzitní teplotou křehce. Obecně můžeme zkoušky rozdělit na dvě skupiny, a to na zkoušky využívající poznatků lomové mechaniky a zkoušky založené na tranzitní teplotě. Skupina první charakterizuje vlastnosti trhliny z hlediska stabilního a nestabilního růstu (Chotěborský a Hrabě, 2004).

Strmost a poloha křivky teplotní závislosti vrubové houževnatosti závisí na celé řadě různých podmínek jako je rychlost zatěžování, prostředí (neutrální, kyselé, zásadité atd.), radiačních podmínkách apod. Například u ocelí má významnou roli chemické složení – se snižujícím se obsahem uhlíku vrubová houževnatost roste a přechodová teplota se snižuje (Irvine et al., 1964).

3.1.7 Zkoušení houževnatosti

Před samotnou zkouškou houževnatosti materiálu je nutné zajistit standardní podmínky pro zkoušené vzorky, aby naměřené výsledky byly relevantní. Mezi základní předpoklady pro získání výsledků s dobrou výpovědní hodnotou patří: klimatizování zkušebních těles v klimatizační komoře, stanovení rozměrů klimatizovaných zkušebních těles s přesností $\pm 1\%$, stanovení vlhkosti zkušebních těles (lze provést i po provedení zkoušky nebo stanovit dle nastavení klimatizační komory) a stanovení hustoty dřeva zkušebních těles.

Zkoušení houževnatosti je prováděno Charpyho kladivem (viz Obr. 5), při této zkoušce je zjištěna rázová houževnatost (práce stroje při zlomu).



Obr. 5 Charpyho kladivo pro zkoušku rázové houževnatosti (<http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/image006.jpg>)

Zkoušky pevnosti materiálů a testy materiálových vlastností v ohybu můžeme rozdělit do následujících skupin:

- empirické zkoušky houževnatosti (Charpy, teplota nulové houževnatosti);
- lineárně-elastická lomová mechanika (Irwin, zkoušky lomové houževnatosti);
- elasto-plastická lomová mechanika (zkoušky, interpretace, podmínky šíření trhliny).

3.1.8 Zkoušení pevnosti dřeva v ohybu

Jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva je pevnost v ohybu. U rostlého dřeva rozlišujeme dva základní způsoby zatěžování ohybem vzhledem k průběhu vláken:

- pevnost v ohybu, kdy jsou vlákna orientována rovnoběžně s podélnou osou tělesa, a tudíž síla působí napříč vláken v radiální nebo tangenciálním směru;
- pevnost v ohybu, kdy jsou vlákna orientována kolmo na podélnou osu tělesa, a tudíž příčný řez probíhá ve směru působící síly nebo kolmo na ni.

Mez pevnost dřeva při statickém ohybu se vypočte ze vztahu:

$$\sigma_w = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3)$$

kde F je působící síla [N], l je vzdálenost mezi podpěrami [mm], h je výška [mm] a b šířka nosníku [mm].

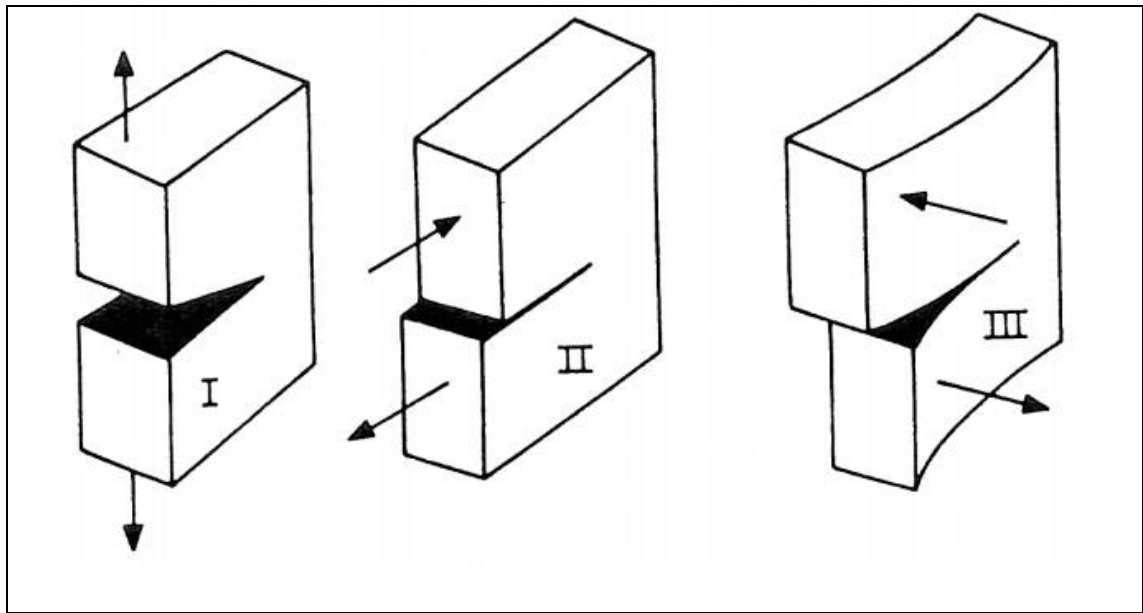
Při většině zkoušení se sleduje pevnost dřeva v ohybu napříč vláken. Při zkoušení dřevěných vzorků bývá zkušební tělísko orientováno tak, aby zatěžovací síla působila napříč vláken v tangenciálním směru (tzv. tangenciální ohyb). Rozdíly mezi pevnostmi při měření ohybu v radiální a tangenciálním směru dřeva byly zjištěny u jehličnatých dřevin (např. mez pevnosti v tangenciálním směru je o 10–12 % větší než ve směru radiálním). U dřevin listnatých jsou rozdíly v mezích pevnosti při statickém ohybu srovnatelné, rozdíl maximálně 2–4 % (Zkoušení stavebních hmot a výrobků, 2016).

Při zatížení tělesa ohybem vzniká v jeho vrchní části napětí v tlaku a ve spodní části v tahu. Nedeformovatelná část v tělese bez normálového napětí se označuje jako neutrální osa. V neutrální ose se naopak vyskytuje maximální smykové napětí. Deformace začíná v tlakové zóně vybočováním vláken (jelikož tlaková pevnost vláken dřeva je mnohem menší než tahová), tento jev je ale pouhým okem nepozorovatelný. K finálnímu porušení tělesa dochází v tahové části, kde po překročení meze pevnosti dojde prvně k odštěpení krajních vláken a následně k úplnému zlomu. Mez pevnosti

při statickém ohybu je cca 90–100 MPa, variační koeficient má hodnotu cca 16 %. Mez úměrnosti je přibližně 70 % meze pevnosti (Matovič, 1993).

3.1.9 Základní módy šíření trhliny

V tělesech se trhlina může šířit třemi různými způsoby – módy (viz Obr. 6). Módy I, II, III se liší z hlediska působení vnější síly na těleso vzhledem k rovině a čelu trhliny.



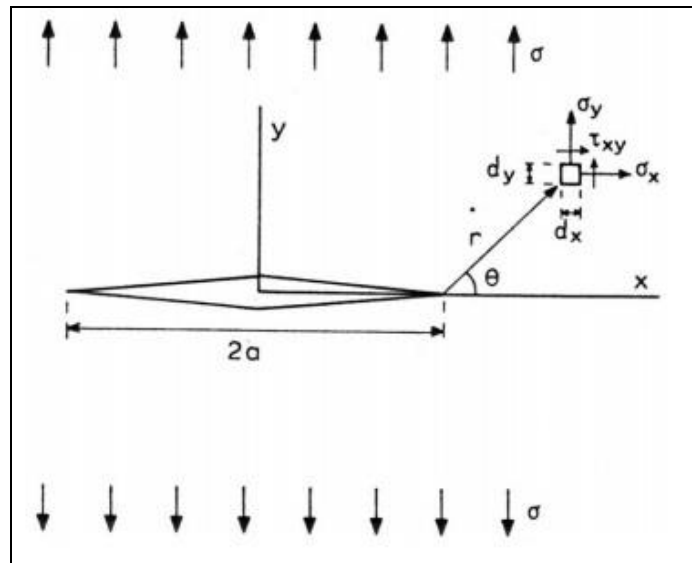
Obr. 6 Základní módy šíření trhliny v tělesech (Matocha a Jonšta, 2013)

Mód I představuje tahové zatížení tělesa kolmo na rovinu trhliny. Při zatěžování módem II dochází k posunutí lomových ploch v rovině trhliny kolmo na její čelo. Při tomto módu je růst trhliny řízen smykovou složkou napětí τ_{yx} . Mód III zatěžuje trhlinu antirovinným smykem a dochází k posunutí lomových ploch v rovině trhliny, avšak rovnoběžně s čelem trhliny. Růst trhliny je řízen smykovou složkou napětí τ_{yz} . V běžné technické praxi se nejvíce využívá módu I (Matocha a Jonšta, 2013).

3.1.10 Lineární lomová mechanika

- *Napjatost v čele s trhlinou*

Vezmeme-li v úvahu nekonečně širokou desku s integrovanou trhlinou délky $2a$ a zatížíme ji módem I, jednoosým tahem, bude situace vypadat následovně (viz Obr. 7).



Obr. 7 Trhlina délky $2a$ (Matocha a Jonšta, 2013)

Na plochu $dx \cdot dy$ ve vzdálenosti r od špičky trhliny, při odklonu o úhel θ od roviny trhliny, působí normálová napětí σ_x a σ_y a smykové napětí τ_{xy} . Výpočetní vztahy pro nekonečně širokou desku zatíženou tahovým napětím σ :

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (4)$$

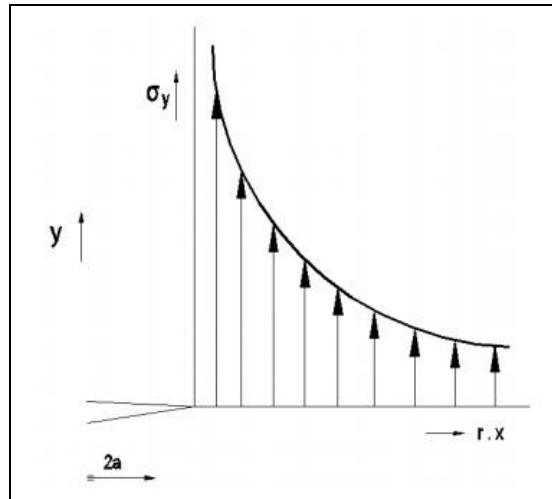
$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (6)$$

$$\sigma_z = 0 \quad - \text{pro stav rovinného napětí} \quad (7)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad - \text{pro stav rovinné deformace} \quad (8)$$

Složky rovinného napětí σ_x a σ_y a smykového napětí τ_{xy} jsou úměrné vnějšímu tahovému napětí σ a druhé odmocnině délky trhliny a . V okolí špičky trhliny (crack tip) se jejich velikost blíží nekonečnu. Obr. 8 znázorňuje závislost napětí σ_y blížící se 0, namísto $\sigma_y = \sigma$, tento vztah platí pouze v nejbližším okolí trhliny.



Obr. 8 Závislost napětí σ_y na vzdálenosti od špičky trhliny (Matocha a Jonšta, 2013)

Rovnice pro jednotlivé složky elastického napětí mohou být vyjádřeny:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad (9)$$

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (10)$$

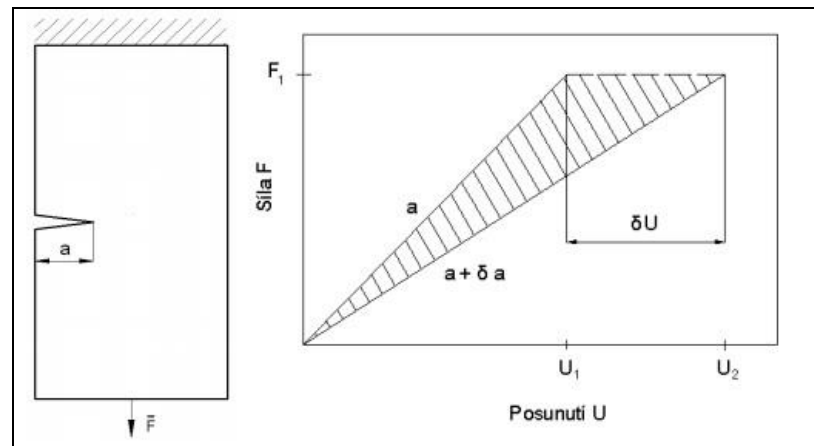
Parametr K nám vyjadřuje „faktor intenzity napětí“ [MPa]. Tato veličina popisuje stav napjatosti na špičce trhliny (Matocha a Jonšta, 2013). V případě, že uvažujeme těleso konečné šířky, platí vztah:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (11)$$

kde a je délka trhliny a W je rozměrová charakteristika tělesa.

- **Hnací síla trhliny G (rychlost uvolňování deformační energie)**

Zatěžujeme-li ideálně pružné těleso s trhlinou, je možno pozorovat závislost mezi zatěžovací silou a posunutím na základě Hookeova zákona, tato závislost bude lineární (viz Obr. 9).



Obr. 9 Znárodnění závislosti síly na posunutí, těleso s trhlinou při konstantní síle – měkký způsob zatížení (Matocha a Jonšta, 2013)

Sklon přímky neboli parametr „poddajnosti“ C , je definován jako posunutí odpovídající jednotce síly. Jde tedy o převrácenou hodnotu tuhosti tělesa, kterou lze zapsat pomocí vztahu:

$$U = C \cdot F \quad (12)$$

Jelikož trhlina roste a její rozměr se mění z a na $a + \delta$, při konstantní síle dojde k uvolnění energie dE :

$$dE = \frac{1}{2} \cdot F_1 \left(\frac{dC}{da} \right) \cdot da \quad (13)$$

Hnací síla trhliny (rychlost uvolňování energie) se rovná:

$$\left(\frac{dE}{da} \right)_{F=konst.} G = \frac{1}{2} \cdot F_1^2 \cdot \left(\frac{dC}{da} \right) \quad (14)$$

Pro těleso o tloušťce b poté platí:

$$(G)_{F=konst.} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{F_1^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{dC}{da} \right) \quad (15)$$

Irwin odvodil z posunutí a napětí na čele trhliny vztah pro hnací sílu trhliny a faktor intenzity napětí K (pro stav rovinného napětí):

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (16)$$

Pro rovinnou deformaci poté platí:

$$G = (1 - \nu^2) \cdot \frac{K^2}{E} \quad (17)$$

- ***Odpor proti růstu trhliny R***

Trhlina se bude šířit za předpokladu, že je splněna podmínka:

$$G = R \quad (18)$$

Uvažujeme-li ideálně křehký materiál (případy, kdy můžeme hovořit o stavu rovinné deformace), považujeme odpor proti růstu trhliny za konstantní. Hnací síla trhliny (rychlost uvolňování deformační energie) lineárně roste s délkou trhliny. V případě, že napětí dosahuje úrovně σ_1 , nedojde k náhlému nestabilnímu růstu trhliny, jelikož je $R > G$. Ve chvíli, kdy G dosáhne míry R , dojde k náhlému nestabilnímu růstu trhliny za napětí σ_2 (Matocha a Jonšta, 2013).

3.2 Dřevo jako kompozitní materiál

Dřevo je přírodní vláknitý, vrstvený kompozit, který se prezentuje unikátní kombinací vlastností spojených s pevností, tuhostí a houževnatostí (Vincent a Currey, 1980). Jehličnaté dřevo se hlediska makrostruktury skládá z letokruhů, dřeňových paprsků a pryskyřičných kanálků. Obecně pro jehličnaté dřevo platí, že letokruhy jsou zřetelné, jasně ohraničené a v barevném kontrastu. Barevný kontrast letokruhů se u jednotlivých druhů dřevin liší, od modřínu, který má barevný kontrast největší, až po borovici vejmutovku, kde jsou přechody letokruhů nevýrazné. Pryskyřičné kanálky můžeme pozorovat jako světlejší tečky v letním dřevě nebo jako tečky tmavší v dřevě jarním a můžeme je pozorovat pouze u smrku, borovice douglasky, modřínu, borovice a borovice vejmutovky.

3.2.1 Nejčastější poruchy ve dřevě

Mezi nejčastější poruchy pozorované ve dřevě a kompozitech na bázi dřeva patří: porušení dřevních vláken, delaminace mezi vrstvami a oddělení vrstvy dřeva od lepidla. Delaminace je nejvíce časté pozorované porušení dřeva, může se objevit během výroby, během zatěžování, při užívání v nestandardních podmínkách (přílišné zatížení, zvýšená teplota, tlak, vlhkost apod.). Zjišťování poruch a delaminace je velmi důležitou částí bezpečnosti a prevence úrazu pro infrastrukturu mechanického inženýrství, které se zabývá dřevěnými prvky a kompozity na bázi dřeva (Bucur, 2011).

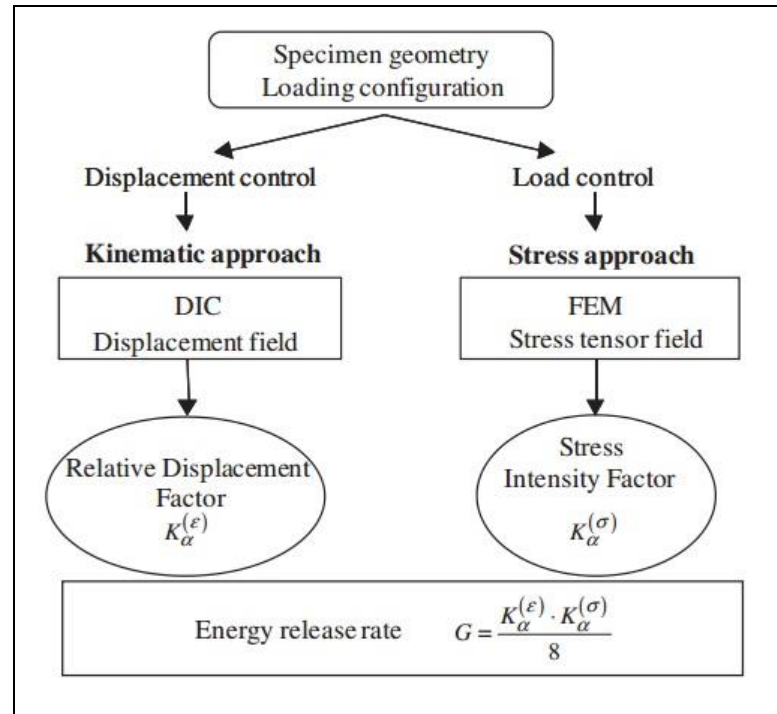
3.2.2 Současné poznatky ve výzkumu lomové houževnatosti

Studie, které se věnují problematice lomové mechaniky, se mohou lišit mnoha způsoby. Mezi hlavní rozdíly patří zkoumání různých materiálů, zatěžování odlišnými módy a používání různých způsobů zatěžování (ENF, ELS, DCB, 4ENF, atd.). Zaměříme-li se na teoretickou část, mohou poznatky vycházet z různých teorií, při orientaci na zkoušení dřeva např. nosníková teorie, upravená nosníková teorie apod.

Konkrétní výzkumy zabývající se zjišťováním interlaminární lomové houževnatosti se dělí v podstatě na dvě skupiny. Obě skupiny pro svůj výzkum sestavují graf závislosti zatěžovací síly na posunutí ($P-\delta$ graf) a snaží se získat R -křivku neboli křivku odporu materiálu vůči deformaci. Hlavním rozdílem v této řešené problematice bývá hledisko, zda autoři výzkumů sledují a měří délku trhliny během zatěžování a na jeho konci (Schuecker a Davidson, 2000), tzv. problematika šíření délky trhliny. Tito autoři měřili šíření trhliny přímo při zatěžování 4ENF a zkoušeli různé geometrie vzorků, aby našli tu nejvhodnější geometrii pro tento test. Přímé sledování růstu trhliny během zkoušky je značně komplikované, proto se v posledních letech od něj výzkumná obec odvrací.

Stanovení interlaminární lomové houževnatosti se provádí výpočtem, který se následně porovnává s dalšími metodami, např. obrazovou digitální korelací nebo s numerickým modelem vytvořeným ve speciální programu (ANSYS, ABAQUS, FRACOD^{3D} apod.). Pro získání dat k výpočtu hnací síly trhliny se používá mnoho metod – BTBR (beam theory including bending rotations) – nosníková teorie zahrnující ohybové rotace, CCM (compliance calibration method) – metoda kalibrace poddajnosti, CBT (corrected beam theory) – upravená nosníková teorie, CTB-FPZ (corrected

beam theory – fracture proces zone) – upravená nosníková teorie s lomovou procesní zónou, CBBM (compliance based beam theory) – nosníková teorie založená na poddajnosti.



Obr. 10 Vývojový diagram získávání dat pro G (Dubois et al., 2012)

Jedním z možných přístupů je zaměřit se na porovnání numerických a experimentálních výsledků, výsledků z metody konečných prvků a z DIC metody a jejich vzájemného porovnání. Jedná se o vyšetření energetického a mechanického chování v okolí špice trhliny. Dubois et al., 2012 vytvořili vývojový diagram, jak se získanými daty pracovat (viz Obr. 10) a v závěru navrhli, že by měl tento diagram být vhodný i pro sledování v čase.

3.2.3 Ekvivalentní trhlina

Jak bylo zmíněno výše, sledování šíření trhliny přímo při zatěžování je velice složité. Jde hlavně o oblast za mezí úměrnosti, kde se již trhlina šíří nelineárně. V lineární části můžeme šíření trhliny vypočítat ze zatěžovací síly. Ale její hodnota za mezí úměrnosti je zapotřebí k výpočtu mnoha dalších parametrů. Tudíž se výzkumná komunita po celém světě snažila nalézt metodu, která bude nejvhodnější pro analýzu šíření trhliny bez nutnosti ji přímo sledovat.

Jedním z přístupů k měření propagace (šíření) trhliny je umístění měřidel (párů senzorů) po stranách měřeného tělíska v rozestupu 10 mm a pomocí jejich změřených hodnot následně spočítat šíření trhliny. Přičemž jedna série senzorů je umístěná navrchu tělíska a druhá na spodní části. Toto rozložení slouží k pozorování šíření trhliny, ale především ke sledování rozložení kohezivních sil v okolí lepené spáry (Ben Salem et al., 2014).

Přístupy postavené na tzv. ekvivalentní délce trhliny (Wang a Vu-Khanh, 1996) jsou v posledních cca 10 letech v oblasti výzkumu používány nejčastěji. V této práci jsme se tímto přístupem řídili také, a to skrze tzv. momentální hodnoty poddajností. Nejdůležitější poddajnost představuje parametr C (current compliance – aktuální poddajnost), jež se mění v závislosti na čase experimentu. Z této charakteristiky chování materiálu se dále vypočítají ostatní parametry potřebné pro výpočty, ze kterých získáme hodnotu pro a_e či a_{eq} (ekvivalentní délku trhliny). Tento postup aplikovali např. Silva et al. (2014), Xavier et al. (2014), Moura et al. (2006), Yoshihara a Ohta (2000) a mnoho dalších.

Ve svých výzkumech používají vždy tuto nepřímou metodu, kdy vycházejí z naměřených dat a dopočítaných parametrů v kombinaci s další metodou. Když se výsledné křivky (R -křivka) shodují nebo jsou si velmi podobné, mají důkaz, že obě metody jsou vhodné pro tento typ zkoumání materiálu a jeho vlastností. Konkrétně Silva et al. 2014, měli za cíl stanovit kohezivní zákonitosti v lepených dřevěných spojích, které jsou zatěžovány módem II při ENF testu. Pro porovnání dat naměřených a vypočítaných byla vybrána inverzní metoda založená na optimalizaci dat pomocí genetického algoritmu a metody konečných prvků (MKP). Díky výsledkům z těchto metod a jejich porovnání, byly stanoveny kohezivní zákonitosti a sestaven správný model kohezivních zón pro využití v simulacích pomocí MKP.

Trochu jiným výpočtem délky trhliny v testu se zabývali Wang a Qiao 2004. Tento výpočet je založen na základním elastickém modelu pro nosník. K počáteční délce trhliny se připočte parametr χh a vznikne upravená délka trhliny.

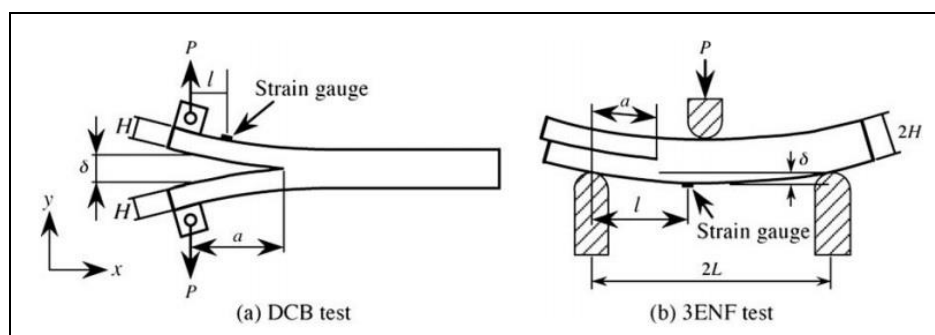
Ke konceptu výpočtu ekvivalentní trhliny přistoupili i Fernandes et al. (2013) při zjišťování vývoje lomové energie (J_{II}) a posunu otevírání špice trhliny (CTOD) lepených kompozitních materiálů při zatěžování módem II. Přístup přes použití ekvivalentní trhliny je méně komplikovaný pro sledování vývoje lomové energie

v průběhu zkoušky a k monitorování vývoje CTOD využili metody obrazové digitální korelace (DIC).

Silva et al. (2006) se zabývali sledováním parametru lomové houževnatosti pomocí metody CCM a CBT při ENF zkoušce a vytvořením numerického modelu pomocí programu ABAQUS®. Prostřednictvím těchto metod bylo sledováno šíření trhliny v RL a TL směru. Jedním z účelů tohoto výzkumu bylo stanovit vhodnou geometrii tělíska pro tento typ zkoušení s ohledem na třecí efekty povrchů trhliny. Výsledkem této práce byla lepší shoda pro metodu CCM pro oba směry šíření a metoda CTB byla vyhodnocena jako vhodná s přípustnou chybou. Přičemž nejuniverzálnějším přístupem byl vyhodnocen výpočet přes ekvivalentní trhlínu (pokud uvažujeme převážně s lineárním vývojem napětí v oblasti FPZ).

3.2.4 Metody pro zkoušení materiálů

Prvním z používaných testů je zkouška end notched flexure (ENF, viz Obr. 11) statickým ohybem, přičemž může být jak 3bodová, tak i 4bodová. Další zkouškou je tzv. double cantilever beam (DCB, viz Obr. 11), která je běžně využívána pro stanovení odolnosti vrstev vůči delaminaci. Zkouška je určena pro rovnoběžné vrstvy (tzn. úhel mezi jednotlivými vrstvami je 0°), protože je velmi obtížné získat relevantní hodnoty G_{Ic} (lomová houževnatost materiálu pro mód I) ze vzorků s více směry jednotlivých vrstev. Tato vlastnost je způsobena hlavně komplexní lomovou morfologií, která zahrnuje především nežádoucí poškození mezi jednotlivými vrstvami (De Morais, 2003). DCB nosník ve své práci použili i Xavier et al. (2015), a to při zkoumání kohezivních zákonitostí lepených dřevěných spojů zatížených módem I.



Obr. 11 DCB a 3ENF zkouška pro mód I a II (Yoshihara a Satoh, 2009)

Při vyhodnocování výsledků byla použita kombinace optické metody DIC a FBG (Fiber Bragg Grating), přičemž snímací senzory byly umístěny přímo do lepidla. Výsledkem této kombinace metod bylo zjištěno, že dle rychlosti uvolňování deformační energie, lze odhadnout G_{Ic} (lomovou houževnatost materiálu pod módem I). Další autoři se věnovali porovnání výsledků ze zkoušek DCB a ENF při módu I a II (viz Obr. 11) za použití metody konečných prvků, Timoshenkovy nosníkové teorie, obecné nosníkové teorie, opravené nosníkové teorie apod.

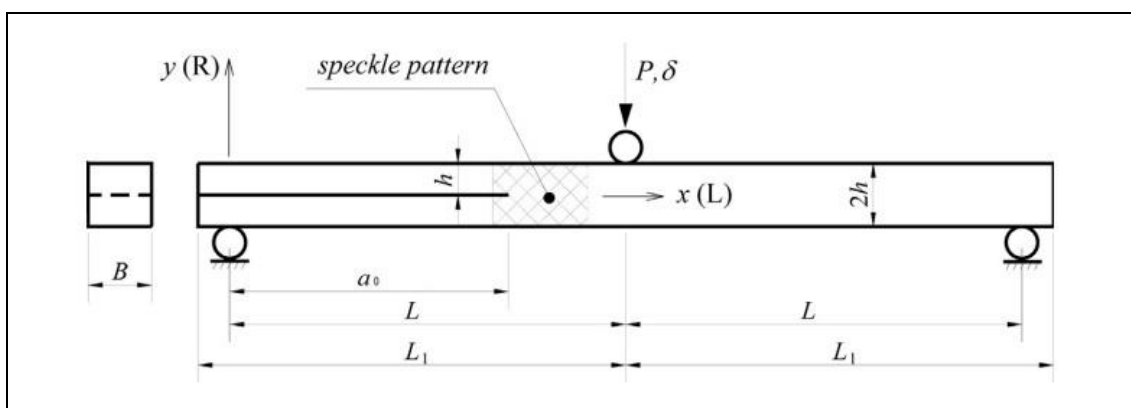
Účelem jejich práce bylo stanovení počáteční lomové houževnatosti pomocí již zmíněných metod. Výsledkem jejich práce je porovnání jednotlivých výsledků a stanovení vhodných metod pro stanovený typ měření (Yoshihara a Satoh, 2009). Tento výzkum vycházel z dřívějších poznatků měření počáteční lomové houževnatosti při zkoušce 3ENF pomocí 8 různých metod (Yoshihara, 2005).

I v dalších výzkumech byla měřena rychlost uvolňování deformační energie G_{IIC} pomocí ENF testu pro vzorky ze západního jedlovce. Výsledky potvrdily, že rychlost uvolňování deformační energie roste se šířící se trhlinou. Z tohoto důvodu by měla být brána v potaz původní délka trhliny (vzhledem k lomové houževnatosti). Autory bylo doporučeno, aby se délka trhliny v průběhu propagace hodnotila na základě konečné délky trhliny (Yoshihara a Ohta, 2000).

3.2.5 Vzorový výzkum

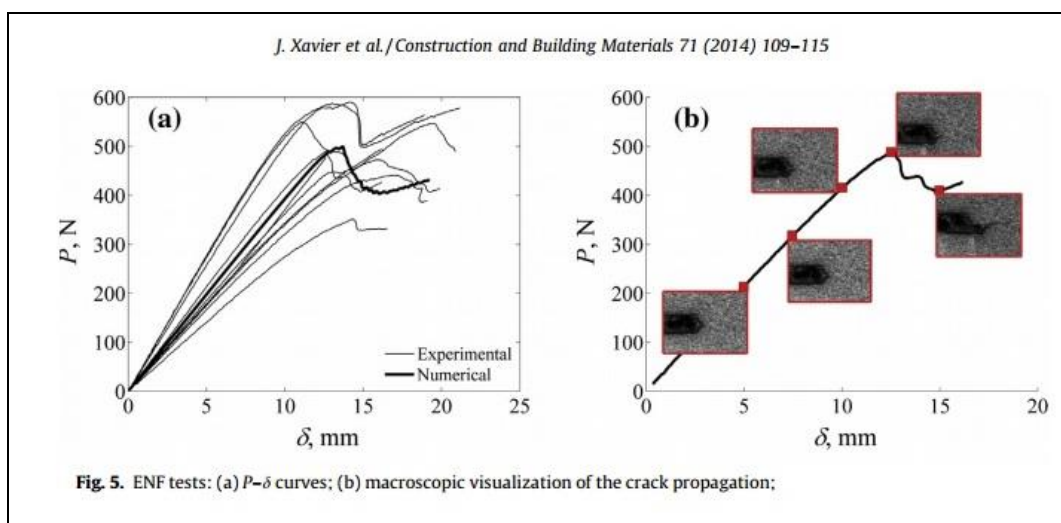
Postup v této práci se inspiroval výzkumem Xavier et al. (2014), jež se zabýval stanovením kohezivních zákonitostí borovice přímořské při módu II pomocí ENF zkoušky a DIC metody. Jedná se o přístup pomocí přímé metody, která je porovnávána s výsledky posunutí při snímání DIC. V tomto výzkumu bylo použito tělísko z dřeviny *Pinus pinaster* (borovice přímořská) o rozměrech $2h = 20$ mm, $L_I = 250$ mm, $L = 230$ mm, $B = 20$ mm a $a_0 = 162$ mm (viz Obr. 12).

Vzorky byly podepřeny dvěma cylindrickými válci ($2L = 460$ mm – vzdálenost mezi podpěrami) a byly zatěžovány cylindrickým pohonem (kvůli snížení možnosti vtlačení do tělíška) ve středu rozpětí mezi podpěrami. Mezi povrchy s aplikovanou trhlinou byl vložen teflonový film pro minimalizaci tření během zatěžování. Zkušební vzorky byly laboratorně testovány, aby se jejich relativní vlhkost byla 60–65 % a teplota 20–25 °C.



Obr. 12 Rozměry zkušebního tělíka a znázornění oblasti snímání (Xavier et al., 2014)

Studie se zabývá porovnáním výsledků naměřených a výsledků spočítaných pomocí metody konečných prvků. Jelikož se jedná o smykový mód II, na makrostruktuře dřeva nebyly znatelné změny, ani mikrotrhliny a potrhaná vlákna. Ze snímků získaných pomocí metody DIC je ale vnitřní poškození jasně znatelné (viz Obr. 13).



Obr. 13 (a) P - δ křivka; (b) makroskopická vizualizace šíření trhliny (Xavier et al., 2014)

Ze snímků byla metodou DIC zjištěna vnitřní deformace v čase – w_{II} (otevírání trhliny). Tento parametr je měřen ze stejného bodu v blízkosti špičky trhliny, tento bod se vlivem ohybu posunuje a lze vypočítat velikost tohoto posunu. Stačí jednoduše odečíst jeho počáteční polohu od koncové a získáme parametr w_{II} . Výsledkem této studie bylo porovnání obou metod dosažení G_{IIc} a z toho vyplývající doporučení pro navrhování lepených dřevěných konstrukcí.

3.3 NORMA

Norma ASTM D7905/D7905M–14 udává, že pro stanovení lomové houževnatosti materiálu zatěžovaného módem II G_{IIc} , potřebujeme kritickou hodnotu rychlosti uvolnění energie napětí G pro delaminační růst (kvůli smykové síle v rovině) nebo posunutí orientované kolmo na delaminační čelo.

Zkušební houževnatost G_Q je spočítána a následně zkontrolována, jestli je validní. Pro jakýkoli vzorek, kde je akceptována zkušební houževnatost platí vztah:

$$G_Q = G_{IIc} \quad (19)$$

Zkušební houževnatost je vypočítána ze vztahu:

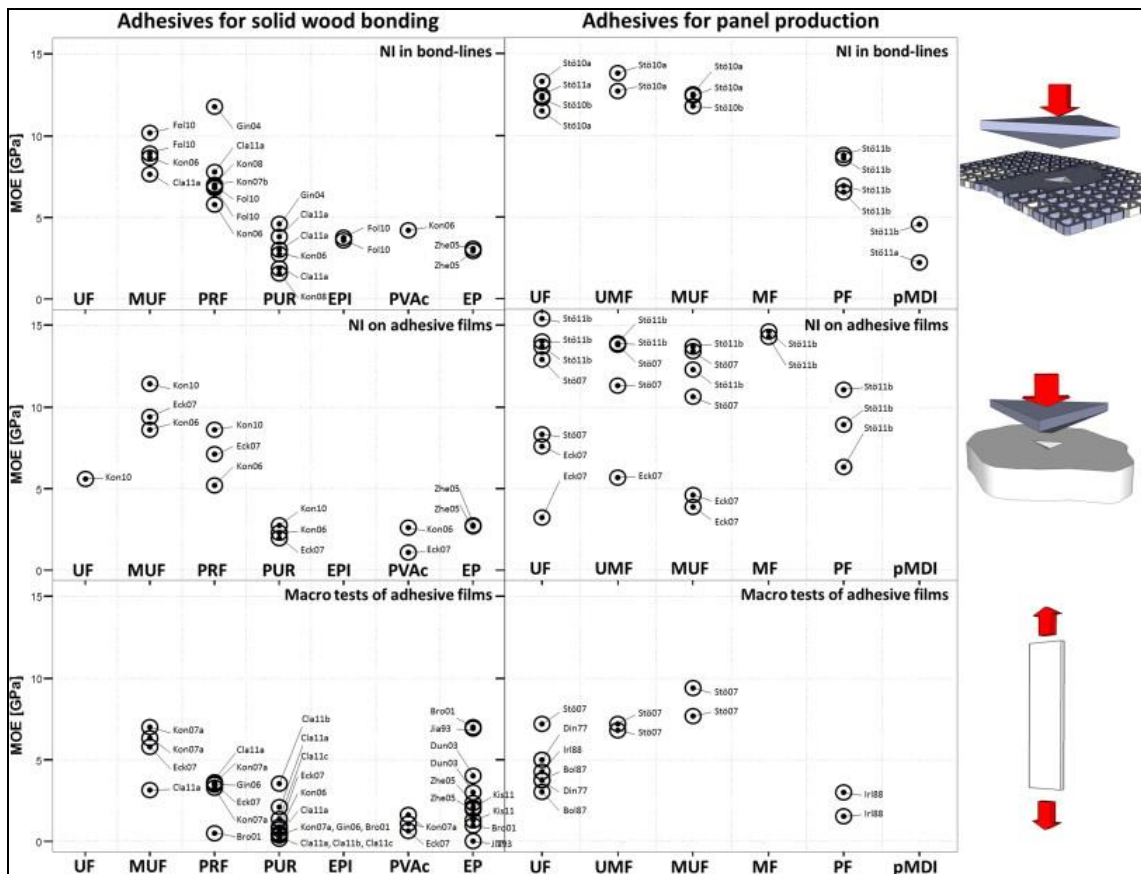
$$G_Q = \frac{3mP_{MAX}^2 a_{eQ}^2}{2B} \quad (20).$$

3.4 LEPIDLA

3.4.1 Mechanické vlastnosti lepidel

Hodnoty mechanických charakteristik lepidel byly posbírány z několika různých publikací. Autoři těchto prací ke svým výsledkům dospěli na základě různých metodik, ať už z mikroskopického či makroskopického hlediska. Z makroskopických výzkumů jsou běžně získávány tahové charakteristiky dřeva (pevnost v tahu, mez úměrnosti, modul pružnosti v tahu, atd.), zatímco u vlastností jako je tvrdost, redukovaný modul, modul pružnosti a parametry tečení, jsou materiálové charakteristiky stanovovány na základě techniky nanoindentace. Pro porovnání jednotlivých lepidel byl vybrán jako nejvhodnější parametr MOE, modul pružnosti v ohybu.

Moduly pružnosti vytvrzených lepidel se stanovují prostřednictvím tahových zkoušek nebo pomocí nanoindentace do lepidlového filmu a dalšími metodami. Na diagramu (viz Obr. 14) můžeme pozorovat porovnání hodnot MOE (modulu pružnosti v ohybu) pro některá běžně používaná lepidla na dřevo. Každý bod v diagramu představuje střední hodnotu MOE odpovídající skupiny lepidel. Data ukázala enormní rozptyl u hodnot parametru MOE (0,1–15 GPa), a to i u skupin lepidel se stejným chemickým základem (EP – epoxidová, PUR – polyuretanová). Při porovnání dat s ohledem na jejich určení pro aplikaci bylo zjištěno, že vyšších hodnot MOE dosahovala lepidla navrhovaná pro panely na bázi dřeva než lepidla o obdobném chemickém základu, která byla navržena pro masivní dřevo (Stoeckel et al., 2013).



Obr. 14 Porovnání vlastností lepidel (<http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0143749613000687-gr2.jpg>)

Pro výběr nejvhodnějšího lepidla je nutné zvážit mnoho parametrů. Musíme vzít v potaz smáčivost povrchu, penetraci do povrchu, druh vytvrzování a pevnost lepeného spoje při různých způsobech namáhání při odlišných okolních podmínkách. Ve výpisu (viz Tab. 1) jsou vyjmenovány charakteristické vlastnosti pro daná lepidla, jako je forma, vlastnosti, způsob přípravy a použití apod. (Carl et al., 2010).

Tab. 1 Výpis vlastností lepidel (Carl et al., 2010)

	FORMA A BARVA	PŘÍPRAVA A APLIKACE	PEVNOSTNÍ VLASTNOSTI	TYPICKÉ POUŽITÍ
FENOLFORM ALDEHYD	tekutý, prášek, suchý film; zabarvuje spáru do tmavě červené	tekutina míchána s nastavovadly a plnidly uživatelem; film je nanášen přímo mezi lepené povrchy; všechny formy lepidla jsou vytvrzovány za tepla a tlaku: 120–150 °C, více jak 200 °C pro třískové desky	vysoká pevnost za sucha i mokra; velmi odolné vůči vodě a vlhkému prostředí; odolnější než dřevo proti vysoké teplotě a chemickému stárnutí	lepidlo pro překližky z měkkého dřeva do exteriéru; třískové desky, dřevovláknité desky a částicové desky s nízkými emisemi
PVAc	emulze; tekutina připravená pro použití; často polymerováno jinými polymery; barva od bílé přes žlutohnědou až po žlutou; bezbarvá spára	tekutina se aplikuje přímo na povrch; lisování při pokojové teplotě a ve vysokofrekvenčním lisu	vysoká pevnost za sucha; nízká odolnost vůči vlhkosti a zvýšené teplotě; spoje pod neustálým zatížením jsou poddajné	nábytek, hladké dveře; plastové lamináty; obložkové dveře a stěnové systémy do průmyslově vyráběného bydlení; hlavní využití v domácích a obchodních podmínkách
PUR	od nízko viskózní tekutiny až po vysoce viskózní tmel; jednosložkový nebo dvousložkový systém; velmi reaktivní; různé barvy od průhledné až po hnědou; bezbarvá spára	lepidlo se nanáší přímo na jeden z lepených povrchů, reaktivní s vlhkostí na povrchu a ve vzduchu; vytvrzuje při pokojové teplotě; při vytvrzování je vyžadován vysoký tlak, pro tmely pouze tlak ze sesvorkování	vysoká pevnost za sucha i mokra; odolný vůči vodě i vlhkému prostředí, omezená odolnost vůči dlouhotrvajícímu a opakovanému máčení a sušení; vyplňující spáru	hlavní použití v domácích a obchodních podmínkách; konstrukční lepidlo pro panelové podlahy a stěnové systémy, od laminované překližky až po kovové a plastové plošné materiály; speciálně na lamináty a pro instalaci sádrových desek

3.4.2 Fenolformaldehydová pryskyřice (PF) – Lignofen G/3/D

Tento typ lepidla vzniká polykondenzací z výsledku reakce fenolu a jeho homologů (resolů a xylenolů) s formaldehydem v alkalickém prostředí. Největší význam (pro získání tvrditelných fenolických pryskyřic) mají trojfunkční fenoly, které jsou schopny vytvářet prostorově zesíťovanou makromolekulu pryskyřice po vytvrzení (NIS, 2013).

Tato lepidla jsou zcela voděvzdorná (i vůči vodě o vyšší teplotě), s tmavým zabarvením, odolávají stárnutí a mikroorganismům. Využití nachází např. pro lepení nosníků, které jsou vystavovány povětrnostním vlivům. Vytvrzují za zvýšené teploty v rozmezí od 130–160 °C či za pomoci tvrdidla (50% roztok kyseliny paratoluensulfonové). Nevytvrzené lepidlo je rozpustné vodou, může znečistit odpadní vody. Karcinogenního volného formaldehydu lepidlo obsahuje minimum (Houška, 2013).

3.4.3 Disperzní polyvinylacetátové lepidlo (PVAc)

Polyvinylacetátová lepidla se vyrábí emulzní polymerací vinylacetátu. PVAc lepidlo je nejběžněji používané truhlářské lepidlo. Částičky lepidla jsou rozptýleny (dispergovány) ve vodě, jedná se tedy o směs vody s polymerem, který není ve vodě rozpuštěný a tvoří rozptýlené částice o velikosti 100–1000 nm. Soustava povrchově aktivních látek tyto částice udržují stále ve vznosu a zabraňují tak jejich usazování. Tato lepidla vytvrzují na fyzikálním principu, kdy z nánosu lepidla je do podkladu oddifundována a zčásti odpařena voda (rozpuštědlo). Je tedy podmínkou, aby minimálně jeden lepený povrch byl porézní. Jednotlivé částičky polymeru se k sobě přibližují, až dojde k jejich vzájemnému prolnutí za vzniku pevného filmu, který je ve vodě nerozpustný. Pro vznik kvalitního a souvislého filmu je potřeba dodržet minimální filmotvornou teplotu, která se pohybuje kolem 13 °C. Při nedodržení této teploty vzniká do běla zbarvený film o nízké pevnosti (Trávník, 2008).

Polyvinylacetátová lepidla mají obsah sušiny 50–60 %, takže viskozita se před použitím většinou nemusí upravovat. Tepelná odolnost spojů je kolem 50 °C. Lepidla jsou slabě kyselá, pH je 4–6. Lepená spára je bílá až čirá a lepidlo je vyráběno ve skupinách D1 až D4 dle odolnosti vůči vodě (Houška, 2013). Zpracovávají se za normální teploty jako jednosložková lepidla s omezenou voděvzdorností.

3.4.4 Polyuretanové lepidlo (PUR, LEAR D4)

Bylo použito jednosložkové polyuretanové lepidlo vytvrzující působením vlhkosti, jež je určeno pro lepení obtížně lepitelných truhlářských dílců, např. lepení dřevěných rámců. Další praktické využití toto lepidlo nalézá při lepení lakovaných ploch (PUR nebo polyesterové laky) navzájem, nebo k jiným, i neporézním (nesavým) povrchům jako jsou melaminové povrchy, kovy apod.

4 METODIKA

4.1 Mechanické zkoušky

Pro měření mechanických veličin byl v této práci využíván univerzitní zkušební stroj Zwick Z050 (viz Obr. 15), přizpůsobený pro testování statickým zatěžováním pro 3bodý ohyb. Jedná se o univerzální zkušební stroj s mechanickým pohybem horního příčnicku. Podle druhu přípravků lze jednoduše měnit druh zkoušky. Jednotlivé přípravky jsou vyrobeny z rostlého dřeva pro zkoušky na tah, tlak, ohyb a smyk. Další možností je zkoušení rozebíratelných spojů tlakem a tahem. Mezi základní parametry patří maximální zatěžovací síla stroje, a to je 50 kN a rozsah rychlosti posuvu 0,001–500 mm/min. Pro naše měření byla nastavena rychlost zatěžování na 10 mm/min.



Obr. 15 Univerzální zkušební stroj Zwick Z050 (<http://www.zwick.cz/>)

4.2 Výpočet interlaminární lomové houževnatosti G_{IIc}

Přímá metoda je založená na rychlosti uvolňování deformační energie při zatěžování módem II (G_{II}), tahem v módu II (τ) a při odpovídajícím smykovém posuvu čela trhliny (CTSD_{II}). Tento vztah je určen rovnicí:

$$G_{II}(u) = \int_0^u \tau(u) du \quad , \quad 0 \leq u \leq u_w \quad (4)$$

kde u představuje CTSD_{II}, přičemž derivace předchozí rovnice stanoví pro $\tau = f(u)$ vztah:

$$\tau(u) = \frac{dG_{II}}{du} \quad (5)$$

Vztah reprezentuje kohezivní síly při zatěžování módem II. Tato rovnice vyžaduje stanovení průběhu rychlosti uvolňování deformační energie v průběhu ENF zkoušky. V této práci byly hodnoty pro G_{II} získány redukcí dříve naměřených dat založených na stejné metodě. S ohledem na Timoshenkovu nosníkovou teorii pro ENF vzorky lze vztah $C = \delta/P$ přepsat jako:

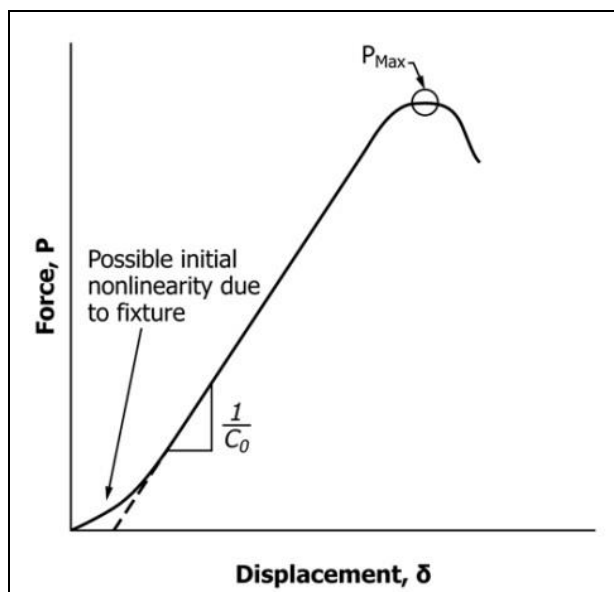
$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_L B h^3} + \frac{3L}{10G_{LR} B h} \quad (6)$$

Přičemž v tomto vztahu jsou zaneseny rozměry vzorku (L, B, h, a), síla zatěžování (P) a posun (δ). E_L a G_{LR} vyjadřují podélný a smykový modul pružnosti, L označuje směr podélný a R směr radiální v rámci stavby dřeva. Vzhledem k přirozené stavbě dřeva, která má značný vliv na elastické vlastnosti, počáteční hodnoty poddajnosti C_0 a počáteční délku trhliny a_0 je použit ekvivalentní modul pružnosti (E_f) a pro testované vzorky se vypočítá z rovnice:

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8B h^3} \cdot \left(C_0 - \frac{3L}{10G_{LR} B h} \right)^{-1} \quad (7)$$

Tento proces poskytuje několik výhod. Ve skutečnosti, pomineme-li variabilitu dřeva, se u lomových zkoušek vyskytuje několik vnitřních procesů, se kterými nosníková teorie nepočítá, jako je např. použití lepidla, koncentrace napětí v blízkosti čela trhliny a kontakt mezi rameny vzorku. Tento fenomén ovlivňuje vhodnost vzorku a nepřímo bere v potaz modul pružnosti E_f . Hodnota G_{LR} není natolik důležitá, tudíž můžeme používat její současnou hodnotu, aniž by nám tato hodnota ovlivňovala výsledky.

Pro získání hodnoty současné poddajnosti C je potřeba vypočítat modul pružnosti v čase pomocí derivace změny síly v podílu se změnou deformace (viz Obr. 16). Tyto hodnoty jsou inverzní k hodnotám tuhosti.



Obr. 16 P-δ křivka s naznačenou poddajností (norma ASTM D7905/D7905–14)

Při zkoušce ENF se trhlina šíří v přímém kontaktu s ostatními plochami, což způsobuje problémy při stanovování přesného čela trhliny. Navíc moderní tažná lepidla běžně odhalí zřetelnou procesní zónu trhliny, která by měla být započítána do hodnocení houževnatosti, protože se jedná o významnou ztrátu energie. Vzhledem k těmto aspektům se sledování délky trhliny při ENF zkoušce nedoporučuje. Abychom předešli těmto komplikacím, použijeme ekvivalentní délku trhliny (a_e), abychom se k reálné hodnotě přiblížili. Tuto hodnotu získáme z rovnice za použití vztahu:

$$a_e = \left[\frac{C_c}{C_{0c}} \cdot a_0^3 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{C_c}{C_{0c}} - 1 \right) \cdot L^3 \right]^{1/3} \quad (8)$$

kde:

$$C_c = C - \frac{3L}{10BhG_{LR}} \quad \text{a} \quad C_{0c} = C_0 - \frac{3L}{10BhG_{LR}} \quad (9)$$

Konečně můžeme získat definici vzorce $G_{II} = f(a_e)$ z kombinace Irwin–Kies věty:

$$G_{II} = \frac{P^2 dC}{2B d 2a} \quad (10)$$

Když tento výrok zkombinujeme s rovnicí č. 8, získáme vztah:

$$G_{II} = \frac{9P^2 a_e^2}{16B^2 h^3 E_f} \quad (11)$$

Tento proces stanoví tzv. křivku odporu (resistance curve, R -curve), která znázorňuje vývoj G_{II} během zkoušky, přičemž vyžaduje pouze data z křivky zatížení v závislosti na posunu.

Při zjišťování kohezivních zákonitostí, je řádné měření $CTSD_{II}$ velmi důležité. V tomto případě byl relativní posun kontinuálně měřen pomocí metody DIC a synchronizován s růstem G_{II} . DIC je bezkontaktní optická technika, která zachycuje pole posunu na skvrnitém vzoru díky korelaci dvou obrazů odpovídacích dvěma různým mechanickým stavům (např. před a po zatížení, více viz níže). Parametr otevírání čela trhliny $CTSD_{II}$ je definován jako relativní posun ve směru trhání s ohledem na umístění vnitřní špice trhliny. $CTSD_{II}$ při módu II (w_{II}) se stanoví jako:

$$w = \|w^+ - w^-\| \quad (12)$$

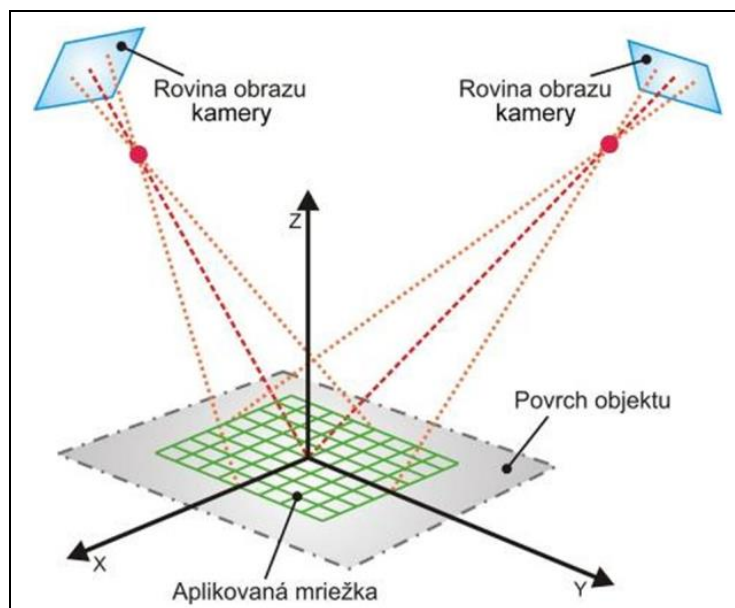
kde w^+ a w^- reprezentují vyšší a nižší paralelní posuny složek vůči šíření trhliny (Silva et al., 2014 a Xavier et al., 2014).

4.2.1 R -křivka

Pro vyhodnocení a názornou interpretaci dat lomové houževnatosti se používá R -křivka. Jedná se o graf závislosti rychlosti uvolňování deformační energie G_{II} (hnací síla trhliny) a délky trhliny, v této práci počítané jako ekvivalentní délka trhliny a_e . Kritické hodnoty hnací síly trhliny R lze určit experimentálně, např. měřením kritického napětí σ_c (meze pevnosti), které vede k lomu, obdobně jako při určování lomové houževnatosti K_c . Tato charakteristika se řádově pohybuje v rozsahu 10 až 10^6 J/m² a významně závisí na mnoha faktorech, především na teplotě (Kunz, 2005).

4.2.2 Metoda DIC

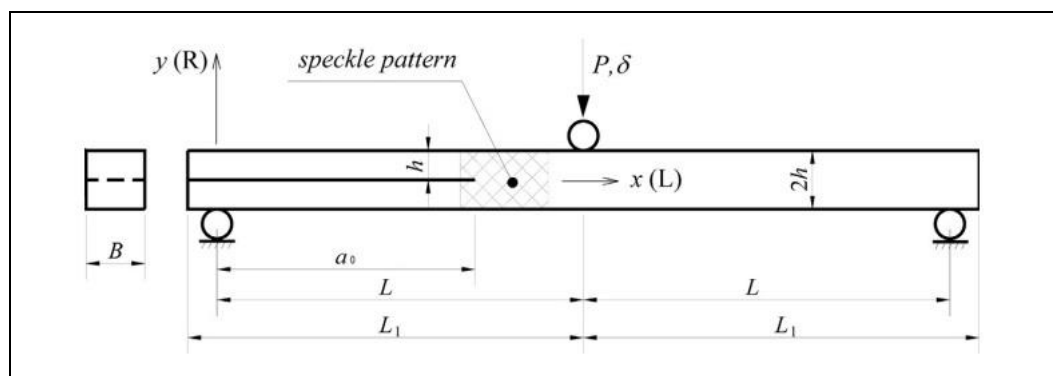
V případě rovinné obrazové korelace jsou deformace objektu určeny pozorováním jednou kamerou (fotoaparát) namířenou přímo kolmo na povrch přípravku. Tento proces umožňuje stanovit deformace objektu v rovině, která je rovnoběžná s obrazovou rovinou kamery. Pro prostorovou analýzu se používá stereoskopické uspořádání senzorů. Máme-li objekt pozorovaný ze dvou různých směrů, pozice každého bodu povrchu je zaostřená na určitý pixel v obrazové rovině příslušné kamery (viz Obr. 17).



Obr. 17 Snímání dvěma směry (<http://www.engineering.sk/images/stories/Obrazky-oktober/Frankovsky/obr2-velky.jpg>)

Pokud známe polohy obou kamer vůči sobě, zvětšení objektivů a všechny parametry obrazu (tzv. kalibrační parametry), systém vypočítá absolutní trojrozměrné souřadnice každého bodu na povrchu a vytvoří jeho virtuální prostorový obrys. Digitální snímky pořízené v jednotlivých krocích měření, kdy se body na povrchu přemísťují vlivem zatěžování, jsou v procesu korelace porovnávány se zvoleným referenčním krokem (Třebuňa, 2011). Výsledkem těchto porovnání jsou deformační pole a pole posunutí povrchových bodů v jednotlivých časových okamžicích.

4.3 Popis zkoušky a vzorků



Obr. 18 Zkušební vzorek o rozměrech: $2h = 20$ mm, $L_1 = 250$ mm, $L = 230$ mm, $B = 20$ mm, $a_0 = 162$ mm (Xavier et al., 2014)

Vzhled a hlavní rozměry zkušební vzorku vidíme na Obr. 18. Vzorek pro ENF zkoušku je třeba dimenzovat i z hlediska tzv. štíhlosti. Tento parametr vznikl, protože ohybová pevnost dřeva je závislá na rozměrech zatěžovaného tělesa. Proto se každé zkušební těleso připraví tak, aby na jeho příčném řezu bylo více jak 2 letokruhy a podíl vzdálenosti podpěr k výšce tělesa byl:

$$\frac{l_0}{h} \geq 14 \quad (8)$$

Při našem měření byla rozteč podpěr $l_0 = 460$ mm a $2h = 20$ mm, tedy výsledný poměr se pohybuje kolem hodnoty 23. Změna ohybové pevnosti vlivem štíhlosti má stoupající trend. Tento trend se ustaluje při hodnotách 14–20, tudíž hodnota 23 by měla zajistit stabilní výsledky s odpovídající výpovědní hodnotou (Požgaj, 1993).

4.4 Vzorky a příprava

4.4.1 Etapa I – základní zpracování dřeva

Pro experiment bylo zvoleno přírodně rostlé smrkové dřevo (*Picea abies* L. Karst.). Dřevo, použité pro výrobu vzorků pro tento experiment, pochází ze Školního lesního podniku Masarykův les ve Křtinách. Po skácení byl kmen prvotně zpracován na odkornovacím stroji, rozřezán na rámové pile a přířezy byly uloženy do hrání k přirozenému sušení (viz Obr. 19 vlevo). Po cca 2 letech přirozeného sušení byly vybrány přířezy s nejmenším počtem defektů (suky, točitost, odklon vláken, plíseň, dřevokazný hmyz, apod.) a na nich označeny nejlepší oblasti pro výrobu vzorků. Tyto vybrané úseky byly následně vymanipulovány na zkracovací a formátovací pile (viz Obr. 19 vpravo).



Obr. 19 Dřevo vyskládané v hrání (přirozené sušení), úprava přířezů na formátovací pile

Byly získány různě velké přířezy, jejichž jedna plocha byla ofrézována na spodní srovnávací frézce a strana druhá na protahovací frézce v dílnách na budově P v areálu kampusu Mendelovy univerzity v Brně. Takto upravené přířezy byly ponechány v místnosti o teplotě 20 °C a vlhkosti 60 ± 5 % na klimatizaci. Klimatizací by mělo v přířezech dojít k vyrovnání vnitřní vlhkosti, stabilizaci vnitřního napětí a vyrovnání teploty v celém průřezu. Po měsíci klimatizace byly přířezy převezeny do Výzkumného centra Josefa Ressela v Brně – Útěchově.

4.4.2 Etapa II – příprava tělísek a lepení

V rámci klimatizace došlo k vyrovnání vnitřního napětí ve dřevě díky stabilní teplotě v místnosti skladování. Tato změna se projevuje jako mírné zkroucení, které je nutné odstranit opětovným srovnáním ploch na spodní válcové frézce a na protahovací frézce. Dále bylo potřeba dosáhnout tloušťky $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, čehož bylo dosaženo při podélném rozřezání na formátovací pile (viz Obr. 20). Abychom docílili tloušťky přesné, bylo použito posuvné digitální měřidlo a následné tloušťkové rozdíly byly eliminovány pomocí ruční vibrační brusky (viz Obr. 21).



Obr. 20 Rozřezání desek na tloušťku $t = 10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$



Obr. 21 Protahovací frézka; ruční vibrační bruska – dosažení přesné tloušťky $t = 10 \text{ mm}$

V této fázi přípravy vzorků byly získány přířezy o tloušťce 10 mm a různých rozměrech, do kterých byly započítány nadměry. Přířezy byly opět přeměřeny a bylo zhodnoceno, kolik finálních vzorků z nich lze získat a podle toho jim bylo přiřazeno číslo. Dle počtu byly rozděleny na 3 skupiny, pro každé lepidlo jedna skupina.

Pro určení navážky lepidla byla vypočítána plocha každého přířezu, vynásobená daným nánosem). Tímto jednoduchým výpočtem byla získána navážka lepidla pro každý kus.

Při aplikaci PVAc lepidla je potřeba přidání tvrdidla (viz Obr. 22). Pro lepení tělísek pro tuto práci bylo použito disperzní PVAc lepidlo VINALEP 830, kategorie odolnosti vůči vodě D3. Do lepidla se přidalo tvrdidlo Leabond WBN, izokyanátové tvrdidlo do disperzních lepidel, vše od výrobce LEAR.

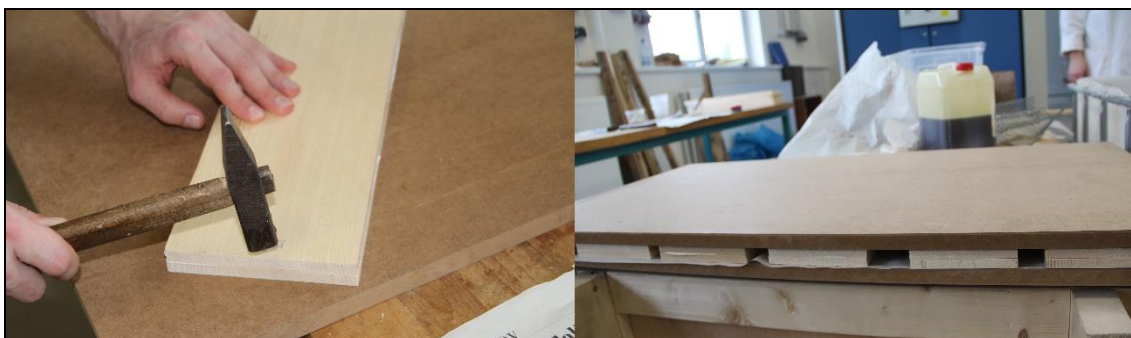


Obr. 22 Navážení PVAc lepidla a přidání tvrdidla

Lepidlo bylo naváženo, aplikováno na přípravky (viz Obr. 22). Při aplikaci je nutno lepidla nanášet na očištěný, suchý a odmaštěný povrch. Fenolformaldehydové lepidlo bylo naneseno v nánosu cca 100–200 g/m², PVAc lepidlo cca 130–200 g/m² a PUR lepidlo cca 100–200 g/m². PUR lepidlo při vytvrzování uvolňuje plynný CO₂, což může vést k napěnění. Jako prevenci vůči napěnění a posunutí lepených částí je potřeba k sobě dílce přitlačit. Po spojení dvojic k sobě náležících byly jednotlivé desky s lepidlem přibity k sobě pro lepší stabilizace při lisování (viz Obr. 24).



Obr. 23 Nanášení jednosložkového PUR lepidla stěrkou

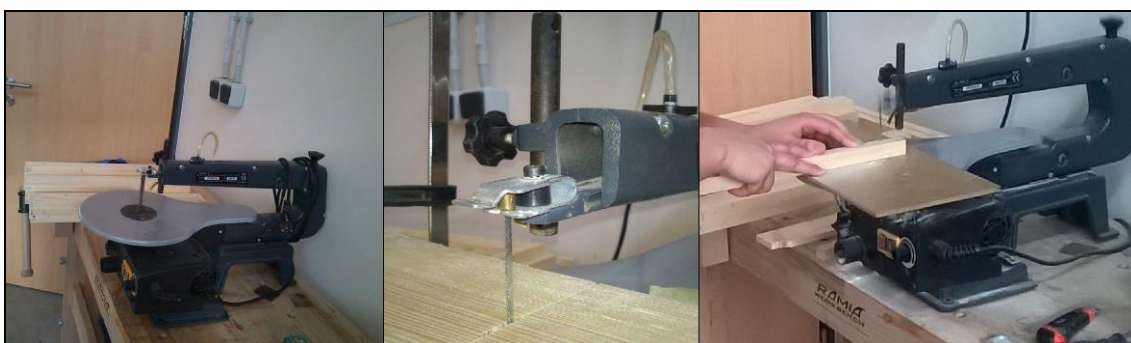


Obr. 24 Přibíjení lamel a vložení mezi desky na lisování

4.4.3 *Etapa III – lisování, čisté rozměry zkušebních vzorků, trhlina*

Lisování muselo probíhat pro každou skupinu jednotlivě z důvodu jiných technologických podmínek (teplota, tlak, čas) při zalisování. Pro zalisování fenolformaldehydové pryskyřice je potřeba zvýšený tlak a teplota (120–150 °C), ale za to lisovací čas je pouze v řádu minut. K zalisování lepidla disperzního PVAc dle technického listu potřebujeme tlak 0,2–0,6 N/mm² a obvyklá doba lisování se pohybuje mezi 15–60 min (při 20 °C). Parametry pro lisování PUR lepidla: lisovací tlak $\geq 0,5$ atm a lisovací čas ≥ 60 min. Po procesu lisování byly skupiny přípravků opět ponechány klimatizovat pro vyrovnání teploty, vnitřního napětí a úplné vytvrzení.

Následující fází přípravy bylo rozřezání přípravků na čistý rozměr vzorku (20×20×520 mm) na formátovací pile. Po rozřezání na čistý rozměr vzorku nadešla fáze prořezání trhliny, která byla prováděna na strojní vyřezávací pilce (lupínková pilka – viz Obr. 25).



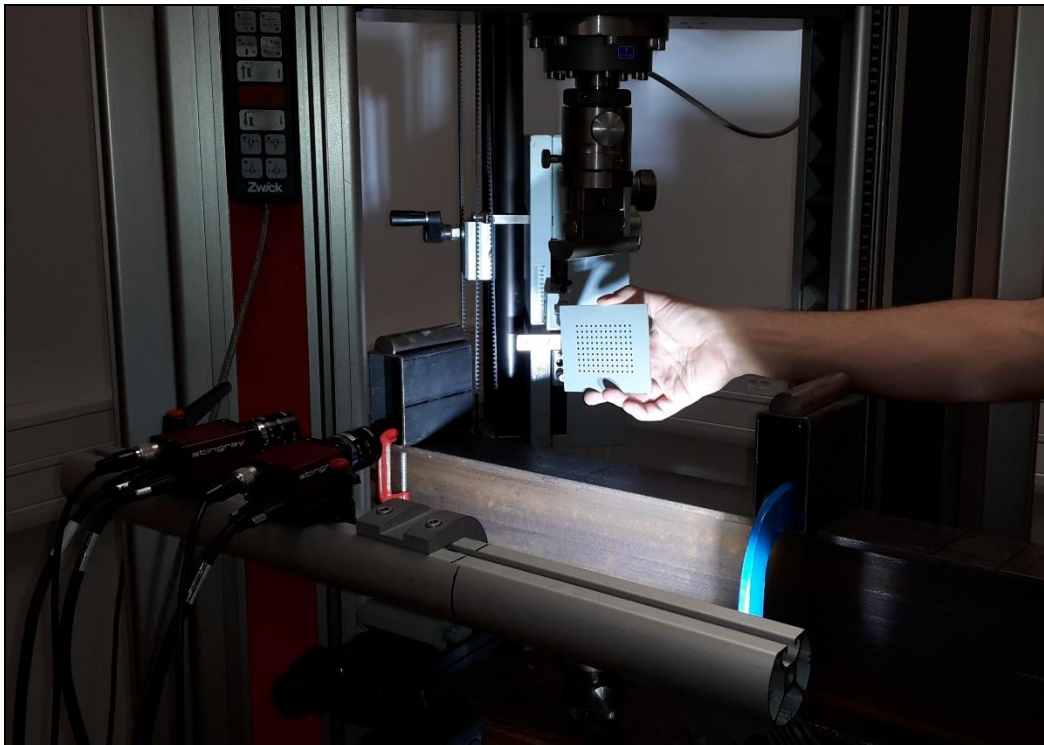
Obr. 25 Lupínková pilka na prořezání trhliny vzorku

Procedura prořezávání trhliny byla prováděna ručně, a protože byl řez veden v lepené spáře, vyžadoval přesnost a důkladnost. Lepená spára má totiž lepší kohezivní (soudržné) vlastnosti, než rostlé dřevo, tudíž pilový list měl tendenci z lepené spáry sjíždět do dřeva. Z tohoto důvodu není řez trhliny dokonale rovný, což by ale na průběh

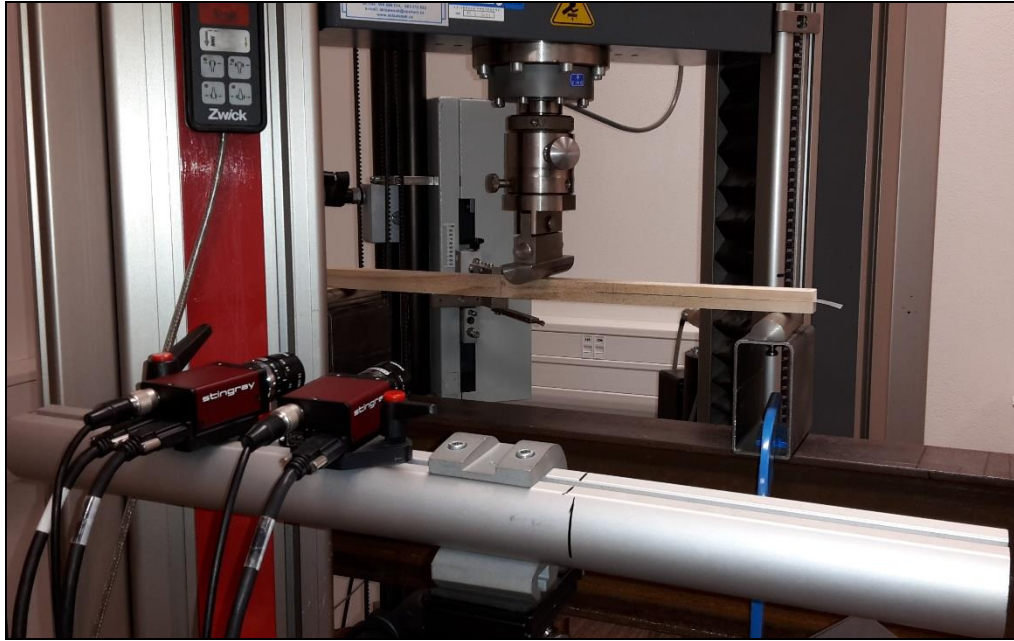
ENF zkoušky nemělo mít žádný zásadní vliv. Pro eliminaci třecích sil v trhlině v průběhu zkoušky, byla do trhliny vložena tenká teflonová fólie.

4.5 ENF zkouška třibodovým ohybem

Před vložením připravených vzorků do zkušebního stroje se musí stroj správně nastavit, tj. zvolit adekvátní knihovnu zkoušky. V našem případě byla prováděna zkouška třibodovým ohybem. Pro stereoskopický set je nutné provést kalibraci snímání v průběhu zkoušky a pro následný výpočet pomocí metody DIC. Kalibrace kamer probíhá formou snímání kalibračních destiček v různých pozicích (viz Obr. 26). Série těchto snímků umožní vypočítat perspektivy obou kamer a transformační vztahy mezi nimi, což ve výsledku zaručí stereovizní pohled. Pro zabezpečení kvalitního snímání bylo využito i siných LED čipových světel.



Obr. 26 Kalibrace zařízení pro DIC metodu



Obr. 27 ENF zkouška s kamerami pro DIC metodu

4.5.1 Průběh zkoušky

Pro každé lepidlo (fenolformaldehydové, PVAc, PUR) bylo připraveno 10 zkušebních vzorků. Vzorky byly vkládány do stroje postupně a v průběhu zkoušky byl zaznamenáván: čas, síla a průhyb. Na druhém počítači byly stereoskopickým systémem pořizovány snímky, které následně sloužily k výpočtu deformací a k dalším výpočtům, viz metodiku výše.



Obr. 28 Detail špice (vrcholu) trhliny při 3ENF zkoušce

4.6 DIC – metoda digitální obrazové korelace

4.6.1 Princip

Metoda spočívá ve snímání kontrastního skvrnitého černobílého vzoru vytvořeného na povrchu zkoumaného přípravku, např. rozptýlením (stříkáním) černé barvy na bílý podklad. Tento barevný podklad jsme na tělíška nanесли dvěma spreji, bílým podkladovým a černým, který vytvořil náhodný vzorec černých částic. Dále se měřené oblasti definují na menší podoblasti tzv. subsety, což jsou podmnožiny, na kterých probíhá korelační výpočet. V naší práci jsme definovali kontrastní subset o velikosti 39 pixelů. Pomocí metody DIC implementované v software VIC-3D jsme spočítali posunutí a následně poměrné deformace na celé oblasti zájmu.

V rámci práce bylo použito vybavení pro metodu digitální obrazové korelace, které zahrnuje set pro akvizici dat (včetně osvětlení a stativů), výpočetní stanici se softwarem VIC-Snap a VIC-3D (pro akvizici dat a analýzu metodou DIC).

Technické údaje použitého setu pro optické měření deformací:

- kamery: 2× CCD AVT 5 Mpx Firewire, C-mount,
- objektivy: 2× Schneider Xenoplan 2,8/50 mm Compact, 2× Pentax 25 mm Fix focal lens,
- software: VIC-Snap pro akvizici snímků,
- VIC-3D pro analýzu posuvů a deformací ve 3D,
- kalibrační terče: 3 mm, 4 mm, 5,5 mm, 12 mm, 15 mm, 19 mm, 25 mm,
- PC Desktop: čtyřjádrový procesor INTEL Core i5, 3,3 GHz, 8 GB RAM, Windows 7 Home Premium 64 bit, LCD monitor 19 ",
- stativ pro osvětlení: Flood light tripod, Manfrotto Nano, stativ na kamery Manfrotto Tripod 055XPROB.

4.7 Statistické metody

Pro vyhodnocení výsledků je nutné použití popisné statistiky a základních statistických metod. V této práci jde o porovnání vypočítaných údajů a materiálových charakteristik z ENF zkoušky pro tři různá lepidla. Z každého pracovního diagramu lze jednoduše vyčíst mez úměrnosti a pevnosti, dále se výpočty zjistí hnací síla trhliny G_{II} a další parametry, a pro jejich vzájemné porovnání mezi skupinami lepidel bude

využitá analýza rozptylu – ANOVA (z anglického názvu analysis of variance). Jedná se o statistický test, který testuje nulovou hypotézu – shodu středních hodnot. Pokud má alespoň jedna skupina statisticky významný rozdíl středních hodnot, nulovou hypotézu zamítneme a pokračujeme testem mnohonásobného porovnání (např. Scheffeho test). Testy mnohonásobného porovnání nám stanoví, mezi kterými skupinami se nachází statisticky významný rozdíl středních hodnot.

Pro porovnání jednotlivých měřených veličin a jejich vzájemných závislostí byl zvolen způsob porovnání pomocí Pearsonova korelačního koeficientu r . Počítáme jej z n párových hodnot – korelačních dvojic (x_i, y_i) naměřených na n jedincích náhodně vybraných z populace. Protože při výpočtu využíváme odchylek jednotlivých hodnot x_i, y_i od průměrů obou veličin, je někdy pro tento koeficient používán termín „parametrický korelační koeficient“. Podmínkou použití Pearsonova korelačního koeficientu je normální rozdělení obou náhodných proměnných X a Y (tzv. dvounormální rozdělení).

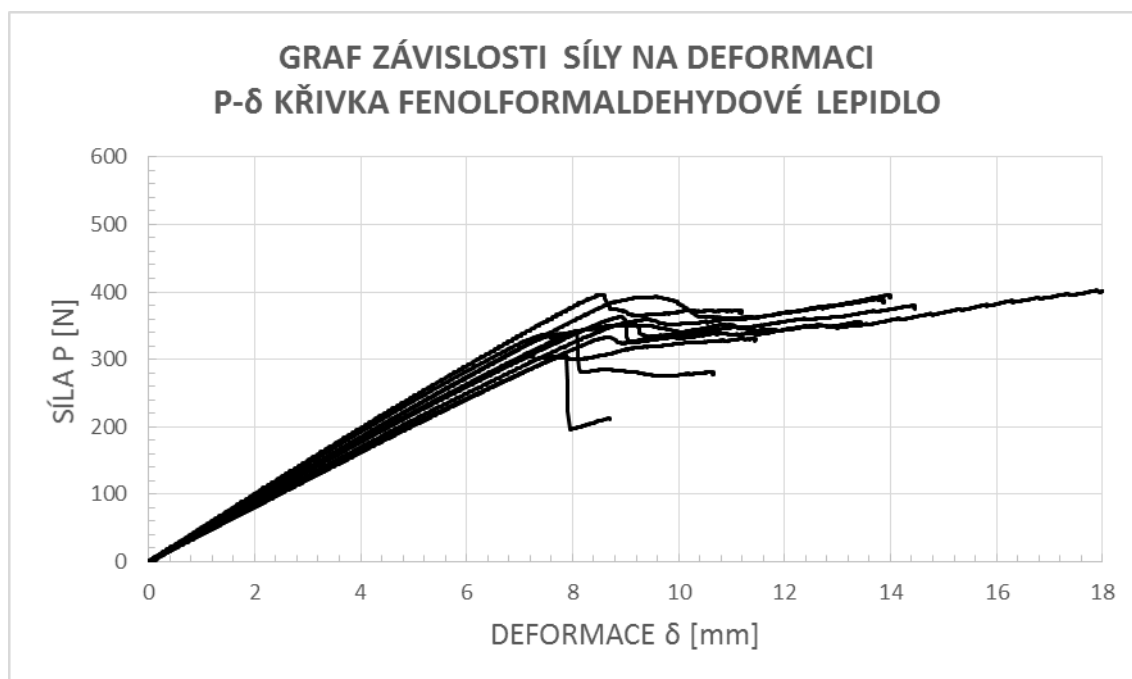
Korelační koeficient r může nabývat hodnot v intervalu od $r = -1$ po $r = +1$. Čím je absolutní hodnota r větší, tím těsnější je korelace mezi oběma proměnnými. Kladný korelační koeficient vyjadřuje pozitivní korelaci mezi veličinami, záporný korelační koeficient vyjadřuje negativní korelaci. Pokud je hodnota korelačního koeficientu rovna nule, korelační závislost mezi veličinami neexistuje. Korelační koeficient $r = +1$ vyjadřuje úplnou (lineární) přímou závislost veličin, korelační koeficient $r = -1$ označuje úplnou (lineární) nepřímou závislost veličin.

5 VÝSLEDKY

5.1 Výsledky mechanických zkoušek

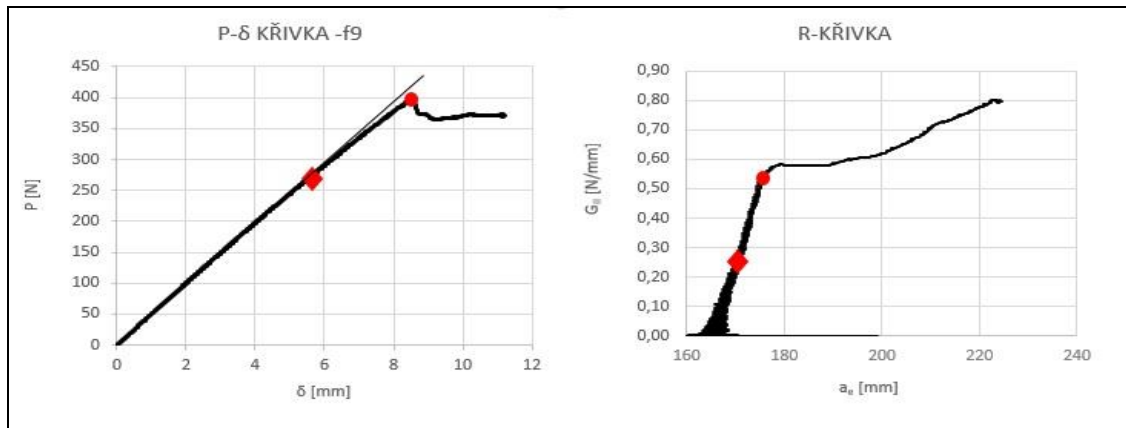
5.1.1 Zkoušení fenolformaldehydového lepidla

Pro porovnání výsledků jednotlivých vzorků byl vytvořen souhrnný pracovní diagram pro každé lepidlo (viz Obr. 29). Pro jednotlivá lepidla byly určeny hodnoty pro mez úměrnosti a pevnosti.

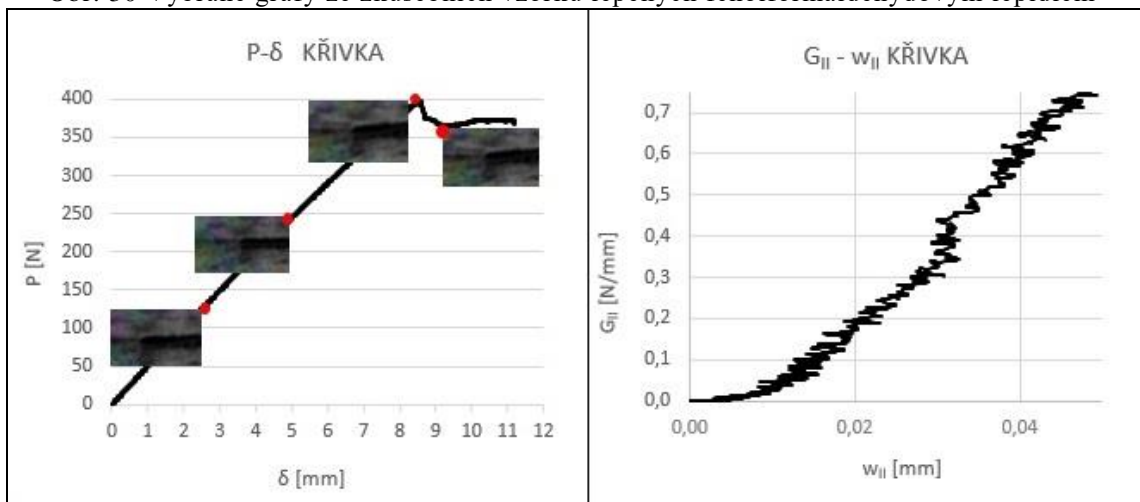


Obr. 29 Pracovní diagramy pro fenolformaldehydové lepidlo

Z tohoto grafu je patrné, že mez úměrnosti a pevnosti se pohybovaly mezi 200–400 N, konkrétně meze úměrnosti: 225–310 N a meze pevnosti 301–391 N. Pro názornější ilustraci výsledků byl pro další grafy vybrán vzorek číslo 9, na Obr. 30 – mez úměrnosti 302 N a mez pevnosti 386 N.

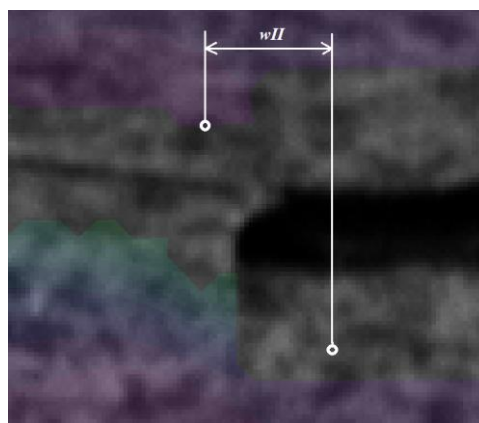


Obr. 30 Vybrané grafy ze zkušebních vzorků lepených fenolformaldehydovým lepidlem



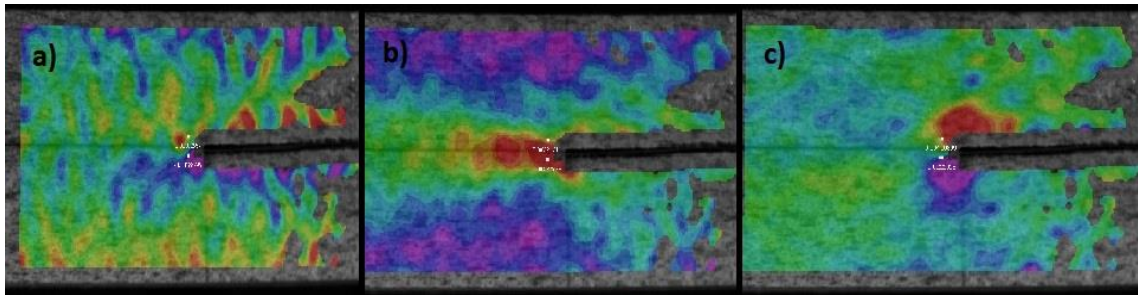
Obr. 31 Makroskopická vizualizace šíření trhliny z DIC metody a $G_{II} - w_{II}$ graf ve spáře lepené fenolformaldehydem

Na Obr. 31 je makroskopicky zobrazeno šíření trhliny, v závislosti na zatěžování. Snímky byly získány optickým měřením, v lineární části se trhlina neliší, lépe pozorovatelné změny můžeme vidět až po dosažení meze úměrnosti. Napravo na Obr. 31 je umístěn graf závislosti hnačí síly trhliny a faktoru w_{II} , který byl získán z dat digitální obrazové korelace (viz Obr. 32).



Obr. 32 Ukázka měření w_{II} ze snímků DIC

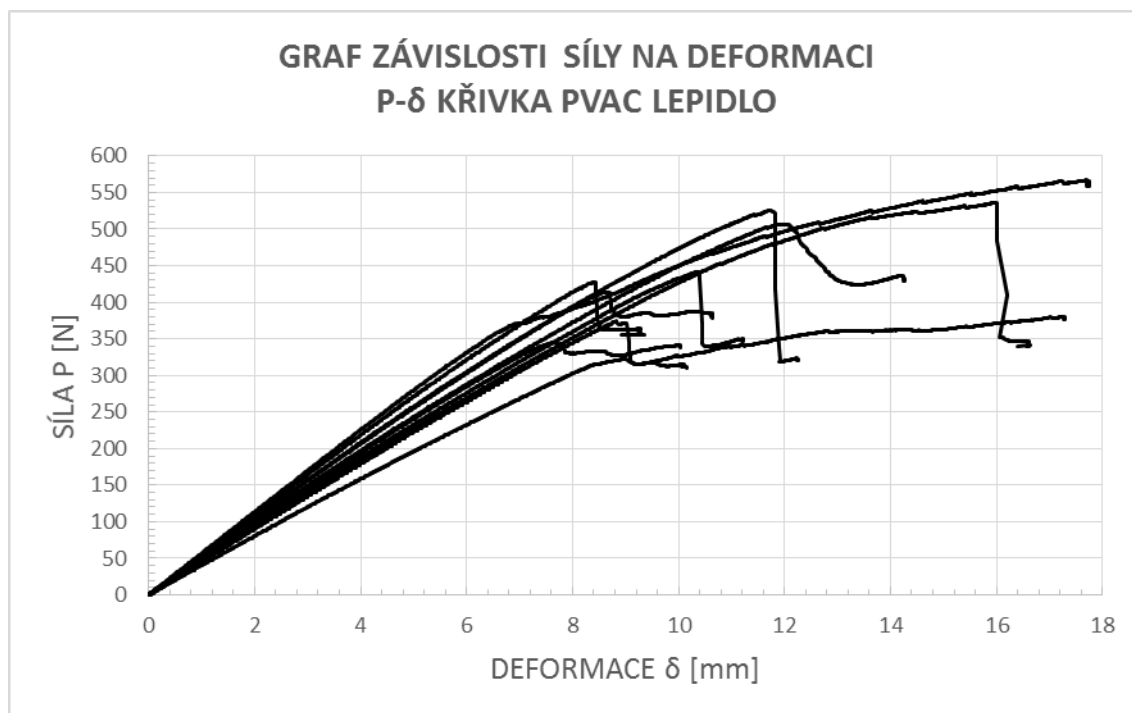
Z výsledků metody DIC lze získat mnoho grafických interpretací výsledků, a to ve formě snímků i videí, jak ve 3D, tak ve 2D zobrazení. Příkladem takového 2D snímku je Obr. 33, na kterém můžeme vidět rozložení poměrné deformace v horizontálním směru (ϵ_{xx}), smykové poměrné deformace (ϵ_{xy}) a poměrnou deformaci ve vertikálním směru (ϵ_{yy}). Z Obr. 33 b) vidíme, že lepená spára je nejvíce namáhána smykem. Důvodem je skutečnost, že při ohybu je největší smykové napětí soustředěno v neutrální ose. A tato skutečnost je zároveň přímým důkazem, že se jedná o zkoušku lomové houževnatosti v módu II, tzn. o zkoušku odolnosti proti šíření trhliny v tělese způsobené smykovým napětím.



Obr. 33 snímky z metody DIC a) deformace ve směru osy x, b) smykové deformace, c) deformace ve směru osy y

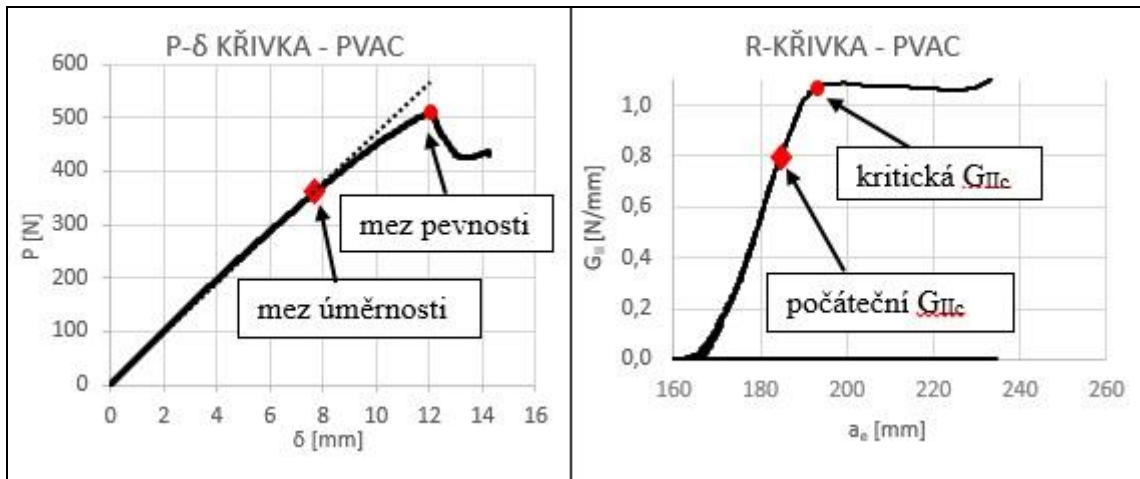
5.1.2 Zkoušení PVAc lepidla

Toto lepidlo při testech a výpočtech prokázalo nejlepší mechanické vlastnosti při zatěžování třibodovým ohybem, tudíž při zkoušení odolnosti ve smyku. Nejen, že jeho meze pevnosti významně převyšovaly meze ostatních lepidel, ale především pro rozlepení PVAc lepené spáry musela být vyvinuta nejvyšší síla (viz Obr. 34).

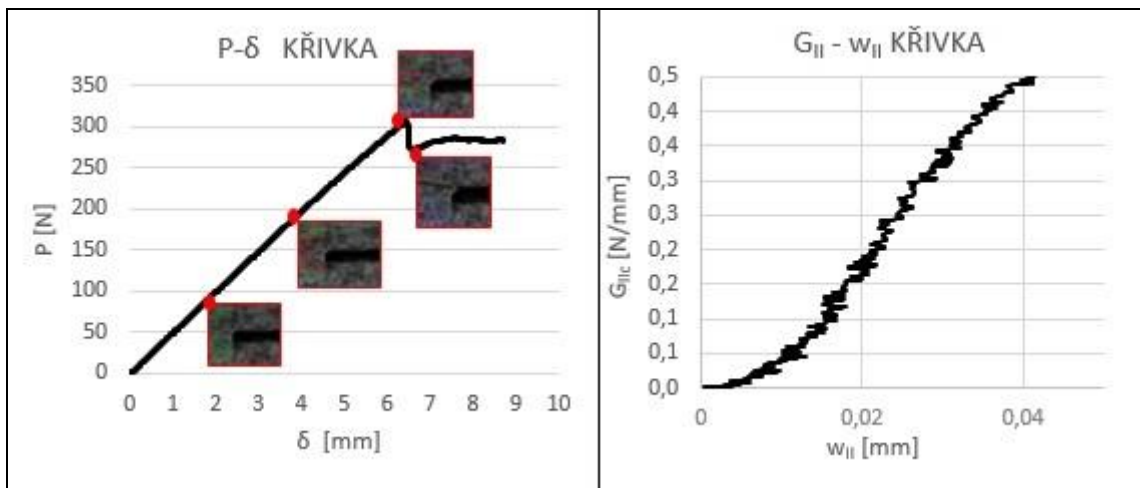


Obr. 34 Pracovní diagramy pro PVAc lepidlo

Z Obr. 34 je patrné, že mez úměrnosti a pevnosti se pohybovaly mezi 300–550 N, konkrétně meze úměrnosti: 265–390 N a meze pevnosti 318–536 N. Pro názornější ilustraci výsledků byl pro další grafy vybrán vzorek číslo 1, na Obr. 35 – mez úměrnosti 360 N a mez pevnosti 501 N.



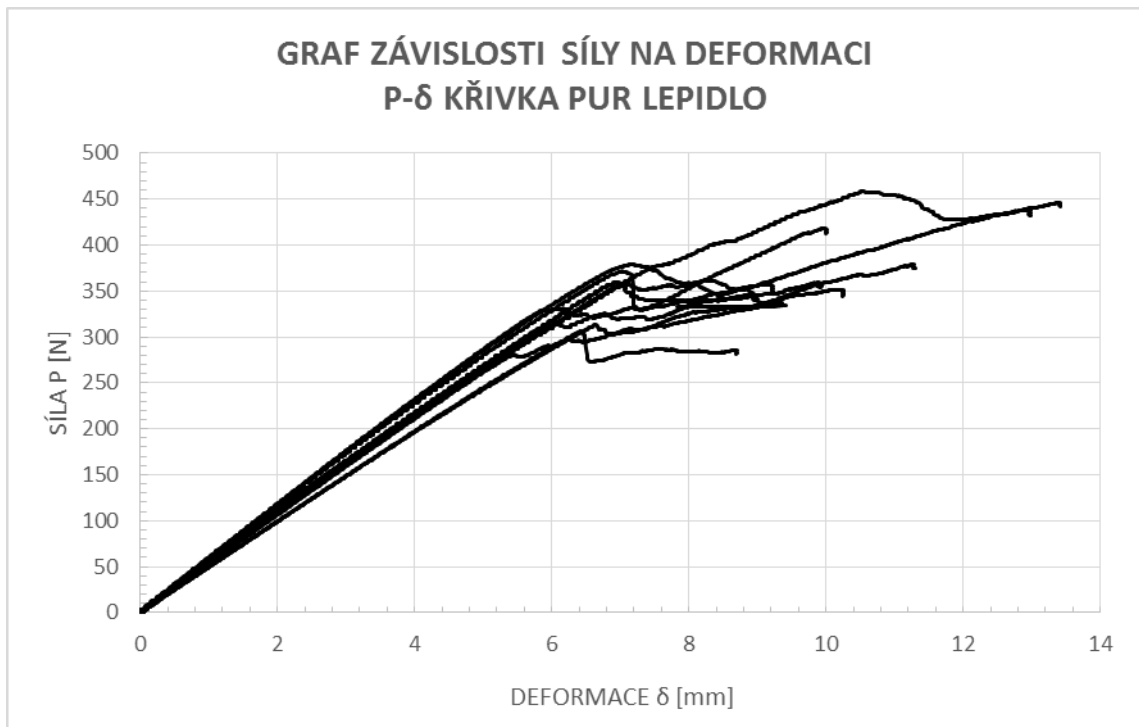
Obr. 35 Vybrané grafy ze zkušebních vzorků lepených PVAc lepidlem, znázornění počátečního a kritického zatížení a rychlosti uvolňování deformační energie



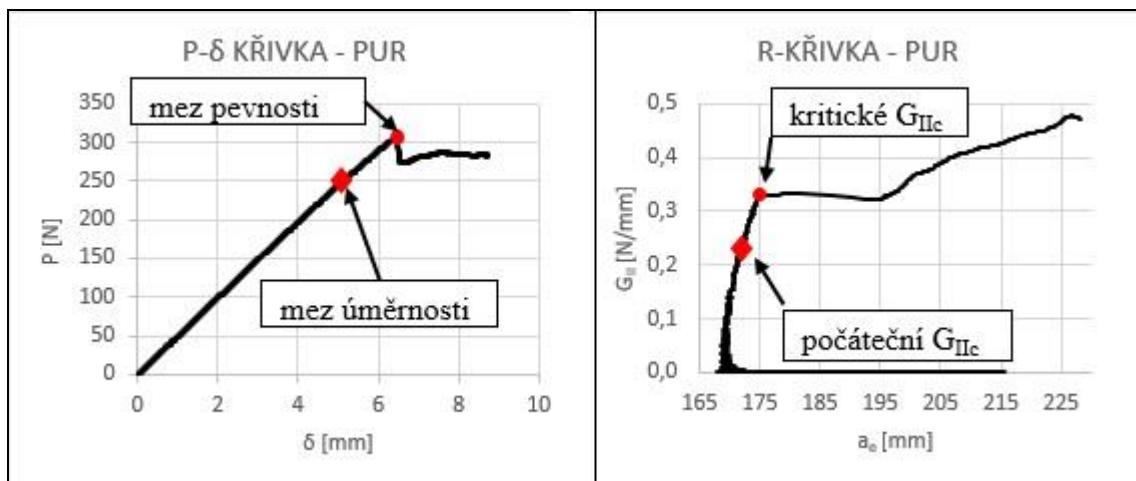
Obr. 36 Makroskopická vizualizace šíření trhliny (DIC metoda) a graf $G_{II} - w_{II}$ ve spáře lepené PVAc

5.1.3 Zkoušení PUR lepidla

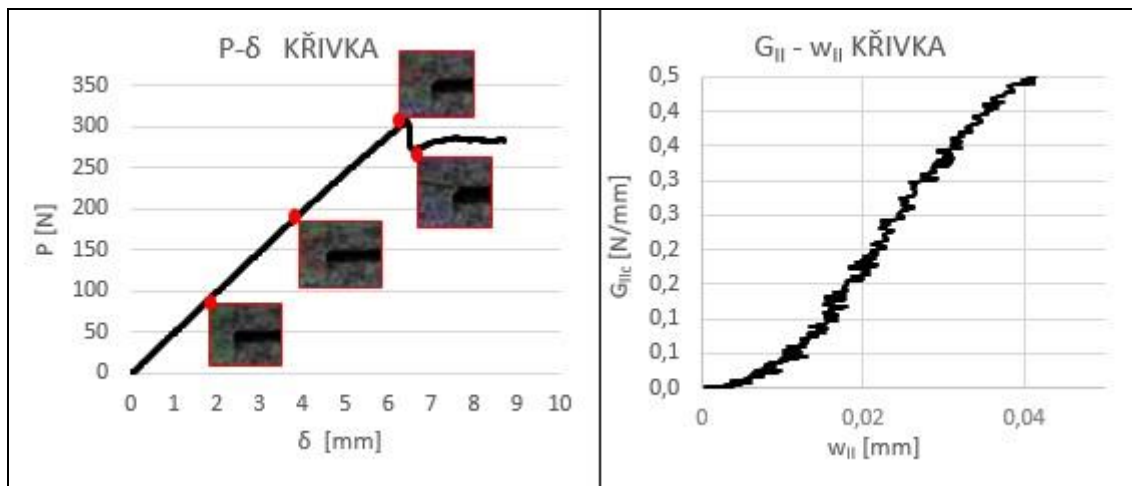
Z Obr. 37 vyčteme, že meze úměrnosti a pevnosti vzorků lepených PUR lepidlem se pohybovaly mezi 250–450 N, konkrétně meze úměrnosti: 250–300 N a meze pevnosti 289–377 N. Další grafy byly zpracovány z dat vzorku číslo 2 (viz Obr. 38) mez úměrnosti 250 N a mez pevnosti 302 N.



Obr. 37 Pracovní diagramy pro PUR lepidlo



Obr. 38 Vybrané grafy ze zkušebních vzorků lepených PUR lepidlem, znázornění počátečního a kritického zatížení a rychlosti uvolňování deformační energie



Obr. 39 Makroskopická vizualizace šíření trhliny (DIC metoda) a graf $G_{II} - w_{II}$ ve spáře lepené PUR

5.2 Statistika

Statisticky byly porovnávány skupiny lepidel z hlediska: hustoty, modulu pružnosti v ohybu, meze úměrnosti, meze pevnosti a lomové houževnatosti G_{IIc} . Jednotlivé parametry byly porovnávány statistickou metodou jednofaktorové ANOVY, popř. Scheffeho testem mnohonásobného porovnání. Dále byly zjištěny korelační koeficienty mezi jednotlivými kategoriemi.

5.2.1 Hustota

Střední hodnoty všech tří lepidel nevykazovaly statisticky významnou odchylku, považujeme je tedy za stejné s pravděpodobností 95 %. Jelikož hodnota F_{crit} je menší než hodnota F (viz Tab. 4), nulovou hypotézu o shodě středních hodnot nezamítáme. Předpokládáme tedy, že střední hodnoty hustot vzorků těchto tří kategorií se neliší.

Tab. 2 Hustoty jednotlivých vzorků

	FENOLFORMALDEHYD [kg/m ³]	PVAC [kg/m ³]	PUR [kg/m ³]
1	465	480	495
2	462	514	526
3	427	481	472
4	482	482	477
5	490	466	495
6	470	487	482
7	472	474	474
8	478	448	491
9	484	467	483
10	462	473	471

Tab. 3 Popisná statistika hustotu

<i>FENOLFORMALDEHYD [kg/m³]</i>		<i>PVAC [kg/m³]</i>		<i>PUR [kg/m³]</i>	
Stř. hodnota	469,20	Stř. hodnota	477,20	Stř. hodnota	486,60
Chyba stř. hodnoty	5,58	Chyba stř. hodnoty	5,38	Chyba stř. hodnoty	5,22
Směr. odchylka	17,65	Směr. odchylka	17,02	Směr. odchylka	16,51
Minimum	427,00	Minimum	448,00	Minimum	471,00
Maximum	490,00	Maximum	514,00	Maximum	526,00

Tab. 4 ANOVA pro hustotu

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit.
Mezi výběry	1 517,07	2	758,53	2,604	0,092	3,354
Všechny výběry	7 863,6	27	291,24			
Celkem	9 380,67	29				

5.2.2 Modul pružnosti v ohybu – MOE

Střední hodnoty MOE se liší při porovnání vzorků lepených fenolformaldehydovým lepidlem s vzorky s PUR lepidlem (viz Tab. 8). PUR lepidlo má v průměru statisticky významně vyšší hodnoty MOE, než fenolformaldehydové lepidlo. Porovnáme-li fenolformaldehydové lepidlo s PVAc lepidlem (viz Tab. 8), výsledky nevykazují významný rozdíl středních hodnot, považujeme je tedy z hlediska středních hodnot za stejné. Pro modul pružnosti v ohybu tedy platí, že hodnoty PVAc lepidla a fenolformaldehydu jsou statisticky stejné a největší rozdíl vykazuje porovnání fenolformaldehydu s PUR lepidlem (tzn. hodnoty MOE pro PUR vzorky dosahují významně vyšších hodnot než ostatní).

Tab. 5 MOE pro jednotlivé vzorky

	FENOLFORMALDEHYD [Mpa]	PVAC [Mpa]	PUR [Mpa]
1	6146,05	7157,56	8446,11
2	7538,24	8069,62	7613,42
3	6472,81	8293,07	7691,74
4	7223,51	7563,18	7798,86
5	7152,40	7187,98	8656,96
6	7091,42	7723,58	8318,88
7	7238,10	6734,38	7817,23
8	6925,64	5887,44	7871,78
9	7714,06	6921,20	7724,55
10	7185,83	6579,89	7315,28

Tab. 6 Popisná statistika pro MOE

FENOLFORMALDEHYD [Mpa]		PVAC [Mpa]		PUR [Mpa]	
Stř. hodnota	7068,81	Stř. hodnota	7211,79	Stř. hodnota	7925,48
Chyba stř. hodnoty	146,73	Chyba stř. hodnoty	229,96	Chyba stř. hodnoty	131,50
Směr. odchylka	464,00	Směr. odchylka	727,21	Směr. odchylka	415,83
Minimum	6146,05	Minimum	5887,44	Minimum	7315,28
Maximum	7714,06	Maximum	8293,07	Maximum	8656,96

Tab. 7 ANOVA pro MOE

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit.
Mezi výběry	4 212 304	2	2 106 152	6,890	0,004	3,354
Všechny výběry	8 253 458	27	305 684			
Celkem	12 465 763	29				

Tab. 8 Scheffeho test pro MOE

KH = 3,172			FENOL	PVAC	PUR
			10	10	10
Výběr	Počet	Průměr	7 068,81	7 211,79	7 925,48
FENOL	10	7 068,81	0	0,578	3,465
PVAC	10	7 211,79	0,578	0	2,886
PUR	10	7 925,48	3,465	2,886	0

5.2.3 Mez úměrnosti

Při porovnávání lepidel z hlediska meze úměrnosti bylo zjištěno, že fenolformaldehydové a PUR lepidlo se téměř neliší. Naopak statisticky významný rozdíl lze pozorovat při porovnání s PVAC lepidlem (viz Tab. 12), toto lepidlo se vyznačuje významně vyššími hodnotami pro mez úměrnosti. Znamená to, že vzorky lepené PVAc lepidlem mají rozsáhlejší oblast elasticity (v této oblasti je schopno těleso nabýt původních rozměrů, po ukončení působení vnějšího zatížení).

Tab. 9 Síla při mezi úměrnosti pro jednotlivé vzorky

	FENOLFORMALDEHYD [N]	PVAC [N]	PUR [N]
1	280	360	265
2	270	320	250
3	280	290	285
4	265	325	270
5	260	295	290
6	260	390	275
7	310	290	285
8	225	265	265
9	305	345	300
10	295	370	260

Tab. 10 Popisná statistika pro mez úměrnosti

<i>FENOLFORMALDEHYD [N]</i>		<i>PVAC [N]</i>		<i>PUR [N]</i>	
Stř. hodnota	275,00	Stř. hodnota	325,00	Stř. hodnota	274,50
Chyba stř. hodnoty	7,92	Chyba stř. hodnoty	12,85	Chyba stř. hodnoty	4,86
Směr. odchylka	25,06	Směr. odchylka	40,62	Směr. odchylka	15,36
Minimum	225,00	Minimum	265,00	Minimum	250,00
Maximum	310,00	Maximum	390,00	Maximum	300,00

Tab. 11 ANOVA pro mez úměrnosti

ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit.</i>
Mezi výběry	16 835	2	8417,5	10,046	0,001	3,354
Všechny výběry	22 622,5	27	837,870			
Celkem	39 457,5	29				

Tab. 12 Scheffeho test pro mez úměrnosti

KH = 3,172			FENOL	PVAC	PUR
			10	10	10
			275	325	274,5
FENOL	10	275	0	3,862	0,038625
PVAC	10	325	3,862	0	3,901
PUR	10	274,5	0,038625	3,901	0

5.2.4 Pevnost v ohybu

Daná analýza byla prováděna klasickým výpočtem pro pevnost v ohybu ze síly působící na těleso při mezi pevnosti. Vyplývá z ní, že střední hodnoty pro PUR a fenolformaldehydové lepidlo jsou srovnatelné a hodnoty pro PVAc lepidlo jsou vyšší než obě další lepidla (viz Tab. 16). Z těchto výsledků lze usoudit, že vzorky lepené PVAc lepidlem, vykazují vyšší pevnost lepených spojů.

Tab. 13 Hodnoty pro pevnost pro jednotlivé vzorky

	FENOLFORMALDEHYD [MPa]	PVAC [MPa]	PUR [MPa]
1	28,89	43,21	28,38
2	29,33	36,05	26,05
3	30,02	31,91	30,79
4	28,12	34,24	24,93
5	25,96	28,81	32,43
6	29,58	45,02	31,57
7	33,72	31,14	30,02
8	26,31	27,43	27,00
9	33,29	37,17	32,52
10	30,19	46,23	26,57

Tab. 14 Popisná statistika pro pevnost

<i>FENOLFORMALDEHYD [MPa]</i>		<i>PVAC [MPa]</i>		<i>PUR [MPa]</i>	
Stř. hodnota	29,54	Stř. hodnota	36,12	Stř. hodnota	29,02
Chyba stř. hodnoty	0,80	Chyba stř. hodnoty	2,13	Chyba stř. hodnoty	0,89
Směr. odchylka	2,54	Směr. odchylka	6,73	Směr. odchylka	2,80
Minimum	25,96	Minimum	27,43	Minimum	24,93
Maximum	33,72	Maximum	46,23	Maximum	32,52

Tab. 15 ANOVA pro pevnost

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit.</i>
Mezi výběry	313,21	2	156,60	7,88	0,002	3,35
Všechny výběry	536,55	27	19,87			
Celkem	849,76	29				

Tab. 16 Scheffeho test pro pevnost

KH = 3,172			FENOL	PVAC	PUR
			10	10	10
			29,541	36,122	29,023
FENOL	10	29,541	0	3,301	0,2560
PVAC	10	36,122	3,301	0	3,561
PUR	10	29,023	0,260	3,561	0

5.2.5 Lomová houževnatost G_{IIc}

Hlavním předmětem této diplomové práce bylo zjištění lomové houževnatosti lepené spáry tělísek a jejich porovnání dle toho, jakým lepidlem byly lepeny. Z pohledu popisné statistiky je lomová houževnatost tělísek lepených PUR lepidlem – střední hodnota 0,22 N/mm (směrodatná odchylka 0,03) a fenolformaldehydovým lepidlem – střední hodnota 0,3 N/mm (směrodatná odchylka 0,05). Vzorky lepené PVAc lepidlem vykazují vyšší lomovou houževnatost – střední hodnota 0,38 (směrodatná odchylka 0,11), a jelikož vykazovaly i vyšší pevnost, lze toto lepidlo vyhodnotit z mechanického pohledu jako nejvhodnější pro lepené dřevěné spoje (viz Tab. 18).

Tab. 17 Hodnoty lomové houževnatosti pro jednotlivé vzorky

	FENOLFORMALDEHYD [N/mm]	PVAC [N/mm]	PUR [N/mm]
1	0,362	0,464	0,167
2	0,252	0,283	0,209
3	0,340	0,213	0,235
4	0,282	0,341	0,215
5	0,273	0,304	0,203
6	0,281	0,494	0,192
7	0,371	0,340	0,232
8	0,228	0,337	0,199
9	0,318	0,453	0,266
10	0,329	0,552	0,232

Tab. 18 Popisná statistika pro G_{IIc}

FENOLFORMALDEHYD [N/mm]		PVAC [N/mm]		PUR [N/mm]	
Stř. hodnota	0,30	Stř. hodnota	0,38	Stř. hodnota	0,22
Chyba stř. hodnoty	0,02	Chyba stř. hodnoty	0,03	Chyba stř. hodnoty	0,01
Směr. odchylka	0,05	Směr. odchylka	0,11	Směr. odchylka	0,03
Rozptyl výběru	0,00	Rozptyl výběru	0,01	Rozptyl výběru	0,00
Minimum	0,23	Minimum	0,21	Minimum	0,17
Maximum	0,37	Maximum	0,55	Maximum	0,27

Pro porovnání hodnot lomové houževnatosti byla použita jednofaktorová ANOVA (viz Tab. 19). Z této tabulky vyplývá, že hodnota $F_{crit.} = 3,354$, tudíž kritická hodnota (KH) pro tento test, je menší než hodnota $F = 13,797$, která vyjadřuje testové kritérium (TK). Jelikož je tedy $KH < TK$, tak zamítáme nulovou hypotézu o shodě středních hodnot výběrů – alespoň jedna střední hodnota výběru liší od ostatních. Pokud chceme dohledat, které střední hodnoty se liší od ostatních, musíme provést test mnohonásobného porovnání, Scheffeho test (viz Tab. 20).

Hodnoty průměrů výběrů, přepočítaných dle daného vzorce porovnááme s vypočítanou kritickou hodnotou, $KH = 3,172$. Pokud je daná hodnota vyšší než KH, jedná se o statisticky významnou odchylku od ostatních středních hodnot. V tomto případě se jedná o hodnotu 5,25 (viz Tab. 20) při porovnání lomové houževnatosti PUR a PVAc lepidla. Z hodnot průměrů v Tab. 18 vidíme, že hodnoty lomové houževnatosti G_{IIc} pro PVAc lepidlo, jsou značně vyšší než pro lepidlo PUR.

Tab. 19 ANOVA pro G_{IIc}

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit.
Mezi výběry	0,133	2	0,067	13,797	0,0001	3,354
Všechny výběry	0,130	27	0,005			
Celkem	0,263	29				

Tab. 20 Scheffeho test pro G_{IIc}

KH = 3,172			FENOL	PVAC	PUR
			10	10	10
Výběr	Počet	Průměr	0,304	0,378	0,215
FENOL	10	0,304	0,00	2,40	2,85
PVAC	10	0,378	2,40	0,00	5,25
PUR	10	0,215	2,85	5,25	0,00

5.2.6 Korelace mezi měřenými veličinami

Pearsonovy korelační koeficienty byly vypočítány pro všechny měřené veličiny a zapsány do Tab. 21. Zelenou barvou byly zvýrazněny ty hodnoty, které nás upozorňují na zvýšenou závislost (tzn. větší než hodnota $\pm 0,6$). Nejvyšší kladná korelační závislost byla zjištěna u závislosti parametrů meze úměrnosti a pevnosti PVAc lepidla ($r = 0,96$). Dále u PVAc lepidla byly zjištěny přímé závislosti – hustoty na modulu pružnosti v ohybu ($r = 0,79$), lomové houževnatosti na modulu pružnosti v ohybu ($r = 0,82$) a na pevnosti ($r = 0,82$). Pro PVAc lepidlo byla zjištěna největší závislost mezi mezi úměrnosti a pevností, jeho lomová houževnatost je velmi závislá na hodnotě MOE a na pevnosti a hodnota MOE je závislá na hustotě.

U lepidla fenolformaldehydového nám korelační koeficienty ukázaly přímou závislost mezi modulem pružnosti v ohybu (MOE) a pevností ($r = 0,88$) a závislost lomové houževnatosti na MOE ($r = 0,82$). S menší závislostí ($r = 0,67$) je na sobě přímo závislá pevnost a lomová houževnatost fenolformaldehydového lepidla.

U PUR lepidla byla pozorována nepřímá závislost lomové houževnatosti na modulu pružnosti v ohybu a na mezi úměrnosti. Na mezi úměrnosti naopak přímo závislá pevnost PUR lepidla.

Při výpočtech Pearsonových korelačních koeficientů se projevila korelační závislost $r = 0,65$ mezi pevností fenolformaldehydového lepidla a lomovou houževnatostí lepidla PUR. Tuto korelační závislost nebudeme hodnotit a budeme na ni pohlížet jako na statistickou anomálii, která nemá žádný další význam.

Tab. 21 Pearsonovy koeficienty

	ρ F	ρ PVAc	ρ PUR	MOE F	MOE PVAc	MOE PUR	MÚ F	MÚ PVAc	MÚ PUR	σ F	σ PVAc	σ PUR	GIlc F	GIlc PVAc	GIlc PUR
ρ F	X	-0,37	0,16	0,53	-0,52	0,37	-0,17	0,02	0,19	-0,18	-0,16	0,05	-0,37	0,28	-0,08
ρ PVAc	-0,37	X	0,49	0,13	0,79	-0,15	0,20	0,36	-0,44	0,17	0,37	-0,25	0,02	-0,14	-0,13
ρ PUR	0,16	0,49	X	0,17	0,21	0,20	-0,34	-0,09	-0,47	-0,34	-0,10	-0,21	-0,52	-0,26	-0,41
MOE F	0,53	0,13	0,17	X	-0,09	-0,37	0,21	0,04	0,15	0,32	-0,09	-0,21	-0,52	0,07	0,59
MOE PVAc	-0,52	0,79	0,21	-0,09	X	0,06	0,11	0,20	-0,02	0,05	0,14	0,11	-0,36	-0,39	-0,02
MOE PUR	0,37	-0,15	0,20	-0,37	0,06	X	-0,34	0,05	0,27	-0,45	-0,30	0,53	0,07	-0,02	-0,65
MÚ F	-0,17	0,20	-0,34	0,21	0,11	-0,34	X	0,30	0,36	0,88	0,33	0,26	-0,07	0,26	0,59
MÚ PVAc	0,02	0,36	-0,09	0,04	0,20	0,05	0,30	X	-0,17	0,24	0,96	0,04	0,82	0,82	-0,14
MÚ PUR	0,19	-0,44	-0,47	0,15	-0,02	0,27	0,36	-0,17	X	0,37	-0,32	0,84	0,23	-0,02	-0,65
σ F	-0,18	0,17	-0,34	0,32	0,05	-0,45	0,88	0,24	0,37	X	0,26	0,28	-0,07	0,24	0,65
σ PVAc	-0,16	0,37	-0,10	-0,09	0,14	-0,30	0,33	0,96	-0,32	0,26	X	-0,09	0,67	0,82	-0,16
σ PUR	0,05	-0,25	-0,21	0,02	0,11	0,53	0,26	0,04	0,84	0,28	-0,09	X	0,32	0,00	0,24
GIlc F	-0,37	0,02	-0,52	-0,36	0,07	-0,07	0,82	0,23	-0,07	0,67	0,32	0,26	X	0,23	0,22
GIlc PVAc	0,28	-0,14	-0,26	0,07	-0,39	-0,02	0,26	0,82	-0,02	0,24	0,82	0,00	0,23	X	-0,07
GIlc PUR	-0,08	-0,13	-0,41	0,59	-0,02	-0,65	0,59	-0,14	-0,65	0,65	-0,16	0,24	0,22	-0,07	X

6 DISKUZE

V dřevařském a nábytkářském oboru je jedním z nejčastěji používaných spojů spoj lepený. Z tohoto důvodu je potřeba se zabývat nejen základními mechanickými charakteristikami (např. tuhostí a pevností) těchto spojů, ale i těmi, které vystihují jeho porušení (např. kvalitativní zhodnocení typu porušení apod.) a porušování, tedy energii, kterou lepený spoj spotřebuje pro porušení své integrity. Tento fenomén otevírání nazýváme šíření trhliny. V lepených konstrukcích se často vyskytuje smykové zatížení, proto je důležité v oblasti analýzy šíření trhliny lepené spáry experimentálně testovat i tento smykový mód porušování. V této práci byla pro zjištění statické lomové houževnatosti ve smykovém módu tzv. „End-Notched Flexure“ (ENF). Sledování šíření trhliny lze provádět různými způsoby, jako je například umístění párů senzorů na horní a spodní straně snímaného tělíška. Toto měření se používá především pro sledování rozložení kohezivních sil v okolí trhliny. Jeho hlavní nevýhodou je velká náročnost na vybavení. Při využití metody ekvivalentní trhliny potřebujeme získat hodnoty zatížení a poměrné deformace, z čehož je dále vypočítána poddajnost v čase. Tato metoda je relativně nenáročná na vybavení a výpočetní techniku a v oblasti výzkumu se používá velmi často, a proto byla použita i pro tuto práci.

Během zkoušky tříbodovým ohybem ENF bylo zkušebním strojem sledována síla zatěžování a poměrná deformace. Z těchto informací byly posléze vytvořeny pracovní diagramy (P - δ grafy), které sloužily k dalším výpočtům. V rámci práce byla zkoušena tři různá lepidla, která se běžně používají pro konstrukční lepení v nábytkářském a dřevařském průmyslu. Vzorky byly hodnoceny z hlediska materiálových charakteristik, jako je modul pružnosti v ohybu, mez pevnosti, mez úměrnosti, hustota a lomová houževnatost.

Bylo zjištěno, že typ lepidla nemá vliv pouze na hustotu vzorků. Tedy nezáleží na tom, jakým lepidlem jsme vzorek lepili v rámci porovnání hustoty. Podíváme-li se na zkoumanou problematiku z hlediska významu meze úměrnosti a pevnosti v ohybu, nalezneme pro tyto dva parametry stejný trend. Zatěžovací síla při mezi úměrnosti pro fenolformaldehyd se pohybovala mezi 225–310 N, u PVAc lepidla mezi 265–390 N a u PUR lepidla mezi 250–300 N. Vypočítané hodnoty pro pevnost v ohybu se nacházely v rozmezí 26–34 MPa pro fenolformaldehydové lepidlo, 27–46 MPa

pro PVAc lepidlo a 26–33 MPa pro PUR. Obě tyto veličiny po statistickém porovnání středních hodnot (ANOVA) a následném Scheffeho testu mnohonásobného porovnání vykazují shodný trend – hodnoty pro lepidlo fenolformaldehydové a PUR jsou srovnatelné. Porovnáme-li jejich hodnoty s hodnotami pro vzorky lepené PVAc lepidlem vidíme, že jsou hodnoty pro PVAc znatelně vyšší. Z těchto výsledků lze vyvodit, že disperzní PVAc lepidlo je velmi pevné a odolné, vhodné tedy pro lepení komplikovaných spojů a velmi namáhaných spojů, jako jsou v nábytkářském průmyslu především rohové spoje namáhané ohybem a stříhem (lub a nohy židle, boční díl a nohy postele apod.).

Průměrný modul pružnosti v ohybu (MOE) se u fenolformaldehydové pryskyřice pohyboval je 6146–7714 MPa, u PVAc lepidla v rozmezí 5887–8293 MPa a u PUR lepidla 7315–8657 MPa. Statistické toleranci shody 95 % se vymyká porovnání MOE fenolformaldehydového lepidla s PUR lepidlem – PUR lepidlo vykazuje vyšší hodnoty pro modul pružnosti v ohybu. Tato informace vede k hypotéze, že by PUR vzorky měly dosáhnout nejlepších výsledků pro lomovou houževnatost (odporu materiálu proti porušení). Lomová houževnatost byla hodnocena z hlediska parametru G_{IIc} [N/mm], ten byl sledován v momentě zatížení silou na mezi úměrnosti. Hodnoty pro vzorky lepené fenolformaldehydovým lepidlem se pohybovaly v rozmezí 0,228–0,371 N/mm, PVAc lepidlem: 0,213–0,552 N/mm a PUR lepidlem: 0,167–0,266 N/mm. Jak je již z hodnot čitelné výrazně nejvyšších hodnot dosáhlo PVAc lepidlo. Což by nemuselo znamenat, že hodnoty pro všechna tělíka lepená PVAc lepidlem byly větší než ostatní. Ale po statistickém testu porovnání středních hodnot se potvrdilo, že vzorky slepené PVAc lepidlem opravdu dosáhly statisticky významně vyšších hodnot, a to především v porovnání právě s PUR lepidlem. Z hlediska lomové houževnatosti jednosložkové PUR lepidlo dosáhlo nejnižších hodnot ze tří zkoušených lepidel.

Dle obecných parametrů daných lepidel, tabulkových hodnot a zkušeností by předpokládané pořadí odolnosti lepeného spoje bylo od nejodolnějšího PUR => PVAc => fenolformaldehydové lepidlo. Námi nejvíce sledovaný parametr lomové houževnatosti ale prokázal jinou posloupnost od nejvíce houževnatého lepidla – PVAc => fenolformaldehydové => PUR lepidlo.

Podle korelačních koeficientů byla zjištěna největší přímá závislost mezi mezi úměrností a pevností PVAc lepidla. U tohoto lepidla bylo dále zjištěno, že lomová houževnatost je přímo závislá na MOE a na pevnosti. U fenolformaldehydového lepidla byla zjištěna přímá závislost mezi MOE a pevností a mezi lomovou houževnatostí a MOE. U PUR lepidla byla pozorována nepřímá závislost lomové houževnatosti na modulu pružnosti v ohybu a na mezi úměrnosti, na mezi úměrnosti je naopak přímo závislá pevnost PUR lepidla. Shrnutím celého hodnocení výsledků z hlediska korelačních koeficientů je skutečnost, že lomová houževnatost je nejvíce závislá na modulu pružnosti v ohybu – MOE, a ten je závislý na mezi úměrnosti. Chceme-li tudíž zlepšit lomovou houževnatost lepidla, či materiálu, měli bychom se zaměřit na metody zvýšení modulu pružnosti v ohybu.

Obecně se tato práce zabývala důkazem, že typ použitého lepidla má/nemá vliv na některou z materiálových charakteristik. Z pěti zkoumaných charakteristik (hustota, MOE, mez úměrnosti, pevnost a lomová houževnatost), ve třech dominovalo PVAc lepidlo (mez úměrnosti, pevnost a lomová houževnatost), v jedné PUR (MOE) a poslední disciplíně dosáhla všechna tři lepidla srovnatelných výsledků (hustota).

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá tématem z oblasti lomové mechaniky. Hlavní principy této disciplíny s ohledem na izotropní materiály, ale i dřevo a lepené dřevěné materiály jsou zmíněny v literární rešerši. Ze samotné literární rešerše vyplývají možnosti použitelné při vyhodnocování výsledků při lomových zkouškách a metod podpůrných jako jsou optická měření deformací – metoda obrazové digitální korelace. Z tohoto důvodu byly v práci využity jak současné poznatky z vědeckých zdrojů, tak zejména techniky měření na bázi metody DIC.

Pro experiment byly vytvořeny vzorky, odpovídající všem požadavkům a současnému poznání. Vzorky byly zpracovány z rostlého smrkového dřeva bez vad, přičemž pro jejich slepení bylo využito třech běžných lepidel používaných v nábytkářském a dřevařském průmyslu: fenolformaldehydové, PVAc a jednosložkové PUR.

Ve světě bylo popsáno mnoho různých metod pro mechanické zkoušky módu II, pro tuto práci byla zvolena zkouška 3ENF – zkouška 3bodým ohybem se zavedenou trhlinou. Pro možnost získání dalších parametrů lomové houževnatosti bylo současně tělísko snímáno pomocí metody DIC. Z těchto snímků bylo nadále vyhodnoceno šíření trhliny v tělese a průběh smykového zatížení v čase zkoušky.

Z výsledných grafů a statistik jasně vyplývá, že lepidlo s nejvyššími hodnotami G_{IIc} je PVAc lepidlo. PVAc lepidlo tak vykazuje nejlepší kvality v zamezení šíření trhliny v lepené spáře způsobené smykovým napětím. Jeho hodnoty pro mez pevnosti také statisticky významně převyšovaly ostatní dvě lepidla. Dle korelačních koeficientů byla zjištěna největší přímá závislost mezi mezí úměrnosti a pevností PVAc lepidla, dále bylo dále zjištěno, že lomová houževnatost je přímo závislá na MOE a na pevnosti.

Posledním porovnáním bylo srovnání rychlosti uvolňování deformační energie s mechanickým posunem, který byl změřen ze snímků poskytnutých DIC metodou. Při tomto porovnání byla zjištěna dobrá shoda, což vypovídá o vhodně zvolené metodice pro tento typ výzkumu. Číselně se parametr w_{II} pohyboval podobně jako samotná ekvivalentní trhlina a_e , pouze průběh v závislosti na G_{II} – rychlost uvolňování

deformační energie – byl odlišný. Tento rozdíl může být například způsoben nevhodným zvolením výchozích bodů, mezi kterými je posunutí w_H měřeno.

8 SUMMARY

This thesis focuses on the field of fracture mechanics. There are main principles mentioned in the literature research regarding to the isotropic character of materials and wood and wood-based materials. From literature research result options that can be used for evaluating results from fracture tests and other tests (e.g. optical measurement of deformations – digital image correlation method). Because of that I have used modern knowledge from science field and also techniques based on DIC method.

Special specimen have been created for this experiment respecting all requirements of nowadays research. The specimen have been sawed from mature spruce wood without defects and three typical adhesives for furniture and wood industry have been used for their bonding (fenolfomaldehyd, PVAc and one compound PUR adhesive).

A lot of methods for mechanical tests mode II have been described, in this work 3ENF test has been used, 3 point precrack bending test. In the same time the specimen was monitored by cameras and other information has been gained for DIC method. From these pictures the crack growth and shear stress have been evaluated during the test time.

The final graphs and statistic schedules clearly show that adhesive with the highest value for G_{IIc} is PVAc adhesive. PVAc adhesive declare the best quality in resistance of crack growth in adhesive gap caused by shear stress. Values of fracture limit of PVAc adhesive have been statistically higher than in case of two other adhesives.

The last comparison compared a strain energy release rate with mechanical displacement, which has been obtained from images provided by DIC method. High correlation has been discovered in this comparison, which means that proper methodology had been chosen for this work. Parameter w_{II} had numerically the same field as equivalent crack a_e , only graph with the strain energy release rate appeared differently. This difference can be caused for example by inappropriate selection of points to gain w_{II} displacement.

9 POUŽITÁ LITERATURA

ANDERSON, T. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1995. ISBN 0–8493–4260–0.

ARRESE, A., N. CARBAJAL, G. VARGAS a F. MUJIKA. A new method of determining mode II R-curve by the End-Notched Flexure test. Engineering Fracture Mechanics. 2010, (77), 51–70.

BEN SALEM, N., J. JUMEL, M.K. BUDZIK, M.E.R. SHANAHAN a F. LAVELLE. Analytical and experimental investigations of crack propagation in adhesively bonded joints with the Mixed Mode Bending (MMB) test Part II: Investigation of cohesive stresses distribution with backface strain monitoring. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2014, (74), 222–232.

BUCUR, V. Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites. New York: Springer, 2011. ISBN 978–90–481–9549–7.

CARL, C., BERGMAN, R., CAI, Z. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. Madison, Wis.(U.S.): Forest Products Laboratory (U.S.), 2010. 508 s.

ČSN EN ISO 6506–1: 2014. Kovové materiály. Zkoušení tvrdosti podle Brinella. Část 1: Zkušební metoda.

DE MORAIS, A.B. Double cantilever beam testing of multidirectional laminates. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2003, 34(12), 1135–1142.

DE MOURA, M.F.S.F., M.A.L. SILVA, A.B. DE MORAIS a J.J.L. MORAIS. Equivalent crack based mode II fracture characterization of wood. Engineering Fracture Mechanics. 2006, (73), 978–993.

DUBOIS, F., M. MÉITÉ, O. POP a J. ABSI. Characterization of timber fracture using the Digital Image Correlation technique and Finite Element Method. Engineering Fracture Mechanics. 2012, (96), 107–121.

FERNANDES, R.M.R.P., J.A.G. CHOUSAL, M.F.S.F. DE MOURA a J. XAVIER. Determination of cohesive law of composite bonded joints under mode II loading. Composites: Part B. 2013, (52), 269–274.

HOUŠKA, Petr. Dřevostavba a její lepidla [online]. 2013 [cit. 2016–03–16]. Dostupné z: <http://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/stavebnichemie/2488-drevostavba-a-jeji-lepidla>.

CHOTĚBORSKÝ, Rostislav a Petr HRABĚ. Teplotní závislost houževnatosti kovových materiálů. *MM*[online]. 2004, (7), 1 [cit. 2016–03–13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/teplotni-zavislost-houzevnosti-kovovych-materialu.html>

IRVINE, W.H., A. QUIRK a E. BEVITT. Fast fracture of Pressure Vessels: an Appraisal of Theoretical and Experimental Aspects and Application to Operational Safety. British Nuclear Energy Society. 1964, 3, 31–48.

KUNZ, Jiří. Aplikovaná lomová mechanika. Vyd. 4., přeprac. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 1991. ISBN 80–01–03306–6.

MATOCHA, K. a P. JONŠTA. Speciální zkušební metody. Ostrava, 2013. VŠB – TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.

MATOVÍČ, A. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1993.

NIS, Nábytkářský informační systém. *Aglomerované materiály, Používaná lepidla* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016–03–16]. Dostupné z: <http://www.n-is.cz/cz/aglomerovane-materialy/page/190/>.

POŽGAJ, Alexander. Štruktúra a vlastnosti dreva. 1.vyd. /. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80–07–00600–1.

SCHUECKER, C. a B.D. DAVIDSON. Evaluation of the accuracy of the four-point bend end-notched flexure test for mode II delamination toughness determination. *Composites Science and Technology*. 2000, (60), 2137–2146.

SILVA, F.G.A., J.L.L. MORAIS, N. DOURADO, J. XAVIER, F.A.M. PEREIRA a M.F.S.F. DE MOURA. Determination of cohesive laws in wood bonded joints under mode II loading using the ENF test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2014, 51, 54–61.

SILVA, M.A.L., J.J.L. MORAIS, M.F.S.F. DE MOURA a J.L. LOUSADA. Mode II wood fracture characterization using the ELS test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007, (74), 2133–2147.

SILVA, M.A.L., M.F.S.F. DE MOURA, J. XAVIER a J.J.L. MORAIS. Numerical analysis of the ENF test for mode II wood fracture. *Composites: Part A*. 2006, (37), 1334–1344.

STOECKEL, Frank, Johannes KONNERTH a Wolfgang GINDL-ALTMUTTER. Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2013, 45(9), 32–41.

TREBUŇA, P. – PEKARČÍKOVÁ, M.: *Modely riadenia produkčných systémov*, 2011. In: *Manažment podnikov*. Roč. 1 (7), č. 1 (2011), s. 55–61. – ISSN 1338–4104.

VINCENT, J.F.K. a J.D. CURREY. *The mechanical properties of biological materials*. Cambridge University Press, 1980. ISBN 0–521–23478–6.

XAVIER, J., J.R.A. FERNANDES, O. FRAZÃO a J.J.L. MORAIS. Measuring mode I cohesive law of wood bonded joints based on digital image correlation and fibre Bragg grating sensors. *Composite Structures*. 2015, 121(3), 83–89.

XAVIER, J., M. OLIVEIRA, J.L.L. MORAIS a M.F.S.F. DE MOURA. Determining mode II cohesive law of *Pinus pinaster* by combining the end-notched flexure test with digital image correlation. *Construction and Building Materials*. 2014, (71), 109–115.

YOSHIHARA, H. a A. SATOH. Shear and crack tip deformation correction for the double cantilever beam and three-point end-notched flexure specimens for mode I and mode II fracture toughness measurement of wood. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, (76), 335–346.

YOSHIHARA, H. a M. OHTA. Measurement of mode II fracture toughness of wood by the end-notched flexure test. *Journal of Wood Science*. 2000, (46), 273–278.

YOSHIHARA, H. Mode II fracture mechanics properties of solid wood measured by the three-point eccentric end-notched flexure test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2015, (141), 140–151.

YOSHIHARA, H. Mode II initiation fracture toughness analysis for wood obtained by 3-ENF test. *Composites Science and Technology*. 2005, (65), 2198–2207.

WANG, H. a T. VU-KHANH. Use of end-loaded-split (ELS) test to study stable fracture behaviour of composites under mode II loading. *Composite Structures*. 1996, (36), 71–79.

WANG, J. a P. QIAO. Novel beam analysis of end notched flexure specimen for mode-II fracture. *Engineering Fracture Mechanics*. 2004, (71), 219–231.

Zkoušení stavebních hmot a výrobků. [Http://www.vsb.cz/cs/](http://www.vsb.cz/cs/) [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2016–03–09]. Dostupné z:
http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zkouseni.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 a) referenční LRT orientace b) hlavní směry šíření trhliny (Silva et al, 2006) ...	14
Obr. 2 Pracovní diagram průběhu křehkého a tvárného lomu (http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=toughness.png)	16
Obr. 3 Transkrystalický lom (Kunz, 2005).....	17
Obr. 4 Schématické znázornění vlivu teploty a rychlosti zatěžování na vrubovou houževnatost materiálu a typ lomu (Kunz, 2005).....	18
Obr. 5 Charpyho kladivo pro zkoušku rázové houževnatosti (http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/image006.jpg)	19
Obr. 6 Základní módy šíření trhliny v tělesech (Matocha a Jonšta, 2013).....	21
Obr. 7 Trhlina délky $2a$ (Matocha a Jonšta, 2013)	22
Obr. 8 Závislost napětí σ_y na vzdálenosti od špice trhliny (Matocha a Jonšta, 2013).....	23
Obr. 9 Znázornění závislosti síly na posunutí, těleso s trhlinou při konstantní síle – měkký způsob zatížení (Matocha a Jonšta, 2013)	24
Obr. 10 Vývojový diagram získávání dat pro G (Dubois et al., 2012).....	27
Obr. 11 DCB a 3ENF zkouška pro mód I a II (Yoshihara a Satoh, 2009)	29
Obr. 12 Rozměry zkušebního tělíska a znázornění oblasti snímání (Xavier et al., 2014)	31
Obr. 13 (a) P- δ křivka; (b) makroskopická vizualizace šíření trhliny (Xavier et al., 2014)	31
Obr. 14 Porovnání vlastností lepidel (http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0143749613000687-gr2.jpg)	34
Obr. 15 Univerzální zkušební stroj Zwick Z050 (http://www.zwick.cz/)	37
Obr. 16 P- δ křivka s naznačenou poddajností (norma ASTM D7905/D7905M–14).....	39
Obr. 17 Snímání dvěma směry (http://www.engineering.sk/images/stories/Obrazky-oktober/Frankovsky/obr2-velky.jpg)	41
Obr. 18 Zkušební vzorek o rozměrech: $2h = 20$ mm, $L_I = 250$ mm, $L = 230$ mm,	42
Obr. 19 Dřevo vyskládané v hráni (přirozené sušení), úprava přířezů na formátovací pile	43
Obr. 20 Rozřezání desek na tloušťku $t = 10$ mm \pm 2 mm.....	44
Obr. 21 Protahovací frézka; ruční vibrační bruska – dosažení přesné tloušťky $t = 10$ mm	44

Obr. 22 Navážení PVAc lepidla a přidání tvrdidla	45
Obr. 23 Nanášení jednosložkového PUR lepidla stěrkou	45
Obr. 24 Přibíjení lamel a vložení mezi desky na lisování	46
Obr. 25 Lupínková pilka na prořezání trhliny vzorku	46
Obr. 26 Kalibrace zařízení pro DIC metodu	47
Obr. 27 ENF zkouška s kamerami pro DIC metodu	48
Obr. 28 Detail špice (vrcholu) trhliny při 3ENF zkoušce	48
Obr. 29 Pracovní diagramy pro fenolformaldehydové lepidlo	51
Obr. 30 Vybrané grafy ze zkušebních vzorků lepených fenolformaldehydovým lepidlem	52
Obr. 31 Makroskopická vizualizace šíření trhliny z DIC metody a $G_{II} - w_{II}$ graf ve spáře lepené fenolformaldehydem	52
Obr. 32 Ukázka měření w_{II} ze snímků DIC	52
Obr. 33 snímky z metody DIC a) deformace ve směru osy x, b) smykové deformace, c) deformace ve směru osy y	53
Obr. 34 Pracovní diagramy pro PVAc lepidlo	54
Obr. 35 Vybrané grafy ze zkušebních vzorků lepených PVAc lepidlem, znázornění počátečního a kritického zatížení a rychlosti uvolňování deformační energie	55
Obr. 36 Makroskopická vizualizace šíření trhliny (DIC metoda) a graf $G_{II} - w_{II}$ ve spáře lepené PVAc	55
Obr. 37 Pracovní diagramy pro PUR lepidlo	56
Obr. 38 Vybrané grafy ze zkušebních vzorků lepených PUR lepidlem, znázornění počátečního a kritického zatížení a rychlosti uvolňování deformační energie	56
Obr. 39 Makroskopická vizualizace šíření trhliny (DIC metoda) a graf $G_{II} - w_{II}$ ve spáře lepené PUR	57

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Výpis vlastností lepidel (Carl et al., 2010)	35
Tab. 2 Hustoty jednotlivých vzorků	58
Tab. 3 Popisná statistika hustotu.....	58
Tab. 4 ANOVA pro hustotu.....	59
Tab. 5 MOE pro jednotlivé vzorky	59
Tab. 6 Popisná statistika pro MOE	59
Tab. 7 ANOVA pro MOE.....	60
Tab. 8 Scheffého test pro MOE	60
Tab. 9 Síla při mezi úměrnosti pro jednotlivé vzorky	60
Tab. 10 Popisná statistika pro mez úměrnosti	61
Tab. 11 ANOVA pro mez úměrnosti.....	61
Tab. 12 Scheffého test pro mez úměrnosti	61
Tab. 13 Hodnoty pro pevnost pro jednotlivé vzorky	62
Tab. 14 Popisná statistika pro pevnost.....	62
Tab. 15 ANOVA pro pevnost	62
Tab. 16 Scheffého test pro pevnost.....	63
Tab. 17 Hodnoty lomové houževnatosti pro jednotlivé vzorky.....	63
Tab. 18 Popisná statistika pro G_{IIc}	63
Tab. 19 ANOVA pro G_{IIc}	64
Tab. 20 Scheffého test pro G_{IIc}	64
Tab. 21 Pearsonovy koeficienty.....	65

12 PŘÍLOHY

Příloha č. 1 – Technický list T5412 – VINALEP 830 D3

Příloha č. 2 – Technický list T47813 – VINALEP PUR BOND D4

Příloha č. 3 – Technický list T19314 – LEABOND WBN

Příloha č. 4 – Bezpečnostní list – VINALEP 830 D3

Příloha č. 5 – Bezpečnostní list – VINALEP PUR BOND D4

Příloha č. 6 – Bezpečnostní list – LEABOND WBN