

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ**

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

---

Mechanická analýza lepeného spoje dřevo – uhlíková vlákna

**Diplomová práce**

2014/2015

Bc. Jiří Harok

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci na téma: Mechanická analýza lepeného spoje dřevo – uhlíková vlákna zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně, dne:.....



Poděkování:

Děkuji všem lidem, kteří mi pomáhali s diplomovou prací, zejména Ing. Janu Tippnervi, Ph.D. za odborné konzultace, vedení této práce a Ing. Václavu Seberovi, Ph.D. za odborné konzultace. Také děkuji všem lidem, kteří mne v průběhu studia podporovali, zejména mým rodičům.

JIŘÍ HAROK

JIŘÍ HAROK

## **Mechanická analýza lepeného spoje dřevo – uhlíková vlákna**

Mechanical analysis of bonded wood - carbon fibers joints

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá mechanickou analýzou lepeného spoje mezi dřevem a uhlíkovými vlákny. Pro popsání chování lepeného spoje byla zvolena zkouška na ohyb, smyk a tlak. Průběh měření byl sledován jednou nebo dvěma kamerami a ze záznamu byly následně vyhodnoceny poměrné deformace, posuny a poměrné smykové deformace vedoucí k selhání vzorků. Získaná data byla použita pro analýzu deformací, chování, porovnání výsledků jednotlivých zkušebních tělísek i různých druhů dřev a sestavení numerického modelu.

Klíčová slova: buk, epoxidové lepidlo, uhlíkové vlákno, tlak, ohyb, smyk, pevnost, elasticita.

Abstract:

This diploma thesis deals with a mechanical analysis of bonded joints between timber and carbon fibres. Bending, shear and compression tests were chosen to describe the bonded joint's behaviour. The experiments were filmed by cameras for further evaluation of relative deformation and relative shear deformation, as well as movement. The measured data were used for analysis of deformation and specimen behaviour, comparison of different wood types and specimen results, and numerical three-dimensional model compilation.

Keywords: beech, epoxy resin, carbon fiber, shear strength, tension strength, bending strength, modulus of rupture, modulus of elasticity.

# Obsah

1 ÚVOD.....	9
2 CÍL PRÁCE.....	10
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	11
3.1 Kompozitní materiály.....	11
3.2 <i>Přehled vybraných dřevin</i> .....	12
3.2.1 <i>Buk (Fagus sylvatica )</i> .....	12
3.2.2 Smrk.....	12
3.3 Přehled vybraných vláknitých materiálů.....	13
3.3.1 <i>Tkaniny a plátna</i> .....	13
3.3.2 <i>Lamelové výztuže</i> .....	14
3.4 <i>Přehled vybraných lepidel</i> .....	15
3.4.1 Epoxidové pryskyřice.....	15
3.4.2 Polyesterové pryskyřice.....	16
3.4.3 Vinylesterové pryskyřice.....	16
3.4.4 Polyuretanové pryskyřice.....	17
3.4.5 Močovinoformaldehydová lepida.....	17
3.5 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna.....	17
3.6 Vliv tloušťky lepené spáry na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů dřevo – uhlíková vlákna.....	19
3.7 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna – zatížení v tlaku.....	20
3.8 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna – zatížení v ohybu.....	22
3.9 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna – zatížení v smyku.....	23
3.10 <i>Modelování nosníků vyztužených vláknitými materiály</i> .....	24
3.11 <i>Modelování malých zkušebních tělísek vyztužených vláknitými materiály</i> .....	26
3.12 <i>Lepení uhlíkových vláken se dřevem</i> .....	27
4 VÝCHODISKA ŘEŠENÍ.....	29
4.1 <i>Přehled použitých materiálů pro výrobu vzorků</i> .....	29
4.1.1 Buková dýha.....	29
4.1.2 Smrk ztepilý.....	29
4.1.3 Uhlíková vlákna.....	30
4.1.4 Epoxidová pryskyřice LH 300.....	30
4.2 Výroba vzorků použitých pro bakalářskou práci.....	30

4.3 Výroba vzorků pro diplomovou práci.....	32
4.3.1 Tlakové vzorky.....	32
4.3.2 Ohybové vzorky.....	33
4.3.3 Smykové vzorky.....	33
5 METODY.....	34
5.1 Zkušební metody.....	34
5.1.1 Zatížení na tlak.....	34
5.1.2 Zatížení na ohyb.....	35
5.1.3 Zatížení na smyk.....	36
5.2 Obecný charakter porušení vzorků.....	38
5.3 Modelování vzorků v programu ANSYS.....	39
5.3.1 Materiálové vlastnosti použitých materiálů.....	40
5.3.1.1 Buková dýha.....	41
5.3.1.2 Uhlíková vlákna.....	41
5.3.1.3 Epoxidová lepidla.....	41
5.3.1.4 Smrková dýha.....	42
5.3.2 Vymodelování a zatížení modelů.....	42
5.3.2.1 Tlakové vzorky.....	42
5.3.2.2 Ohybové vzorky.....	42
5.3.2.3 Smykové vzorky.....	43
5.3.3 Vysíťování (mesh).....	44
5.4 Optická analýza metodou DIC.....	44
6 VÝSLEDKY PRÁCE A JEJICH UPLATNĚNÍ.....	46
6.1 Naměřené výsledky.....	46
6.1.1 Tlakové vzorky.....	46
6.1.2 Ohybové vzorky.....	47
6.1.3 Smykové vzorky.....	47
6.2 Analýza namáhání a porušení zkušebních tělísek optickou metodou DIC.....	48
6.2.1 Tlakové vzorky.....	49
6.2.1.1 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C bez vláken.....	50
6.2.1.1.1 Zkušební vzorek T2 (označení 103).....	50
6.2.1.1.2 Zkušební vzorek T4 (označení 101).....	52
6.2.1.1.3 Zkušební vzorek T5 (označení 106).....	54
6.2.1.2 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C.....	56
6.2.1.2.1 Zkušební vzorek T1 (označení 88).....	56
6.2.1.2.2 Zkušební vzorek T7 (označení 86).....	58
6.2.1.2.3 Zkušební vzorek T8 (označení 86).....	60
6.2.1.3 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 120 °C.....	62
6.2.1.3.1 Zkušební vzorek T3 (označení 145).....	63

6.2.1.3.2 Zkušební vzorek T6 (označení 144).....	65
6.2.1.3.3 Zkušební vzorek T9 (označení 145).....	67
6.2.2 Ohybové vzorky.....	68
6.2.2.1 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C bez vláken.....	70
6.2.2.1.1 Zkušební vzorek O1 (označení 107).....	70
6.2.2.1.2 Zkušební vzorek O2 (označení 106).....	72
6.2.2.1.3 Zkušební vzorek O3 (označení 105).....	73
6.2.2.2 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C.....	74
6.2.2.2.1 Zkušební vzorek O4 (označení 90).....	74
6.2.2.2.2 Zkušební vzorek O5 (označení 85).....	76
6.2.2.2.3 Zkušební vzorek O6 (označení 86).....	77
6.2.2.3 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 120 °C.....	78
6.2.2.3.1 Zkušební vzorek O7 (označení 142).....	78
6.2.2.3.2 Zkušební vzorek O8 (označení 146).....	80
6.2.2.3.3 Zkušební vzorek O9 (označení 151).....	81
6.2.3 Smykové vzorky.....	82
6.2.3.1 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C bez vláken.....	84
6.2.3.1.1 Zkušební vzorek S1 (označení 101).....	84
6.2.3.1.2 Zkušební vzorek S2 (označení 99).....	86
6.2.3.1.3 Zkušební vzorek S3 (označení 94).....	88
6.2.3.2 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C.....	90
6.2.3.2.1 Zkušební vzorek S4 (označení 83).....	91
6.2.3.2.2 Zkušební vzorek S5 (označení 91).....	93
6.2.3.2.3 Zkušební vzorek S6 (označení 82).....	94
6.2.3.3 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 120 °C.....	96
6.2.3.3.1 Zkušební vzorek S7 (označení 155).....	97
6.2.3.3.2 Zkušební vzorek S8 (označení 149).....	99
6.2.3.3.3 Zkušební vzorek S9 (označení 143).....	101
6.3 Verifikace vymodelovaných vzorků v programu ANSYS.....	103
6.3.1 Tlakové vzorky.....	103
6.3.1.1 Nevztyžená zkušební tělíska.....	103
6.3.1.2 Zkušební tělíska vztyžená uhlíkovými vlákny.....	105
6.3.2 Ohybové vzorky.....	107
6.3.2.1 Nevztyžená zkušební tělíska.....	108
6.3.2.2 Zkušební tělíska vztyžená uhlíkovými vlákny.....	109
6.3.3 Smykové vzorky.....	111
6.3.3.1 Nevztyžená zkušební tělíska.....	111
6.3.3.2 Zkušební tělíska vztyžená uhlíkovými vlákny.....	114
6.4 Porovnání vybraných dřevin vymodelovaných vzorků v programu ANSYS....	116
6.4.1 Tlakové vzorky.....	116
6.4.1.1 Nevztyžená zkušební tělíska.....	117
6.4.1.2 Zkušební tělíska vztyžená uhlíkovými vlákny.....	119
6.4.2 Ohybové vzorky.....	121
6.4.2.1 Nevztyžená zkušební tělíska.....	121
6.4.2.2 Zkušební tělíska vztyžená uhlíkovými vlákny.....	123

6.4.3 Smykové vzorky.....	125
6.4.3.1 Nevyztužená zkušební tělíska.....	125
6.4.3.2 Zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny.....	128
7 DISKUZE.....	131
8 ZÁVĚR.....	132
9 SUMMARY.....	134
10 Pojmy a zkratky.....	137
11 SEZNAM TABULEK.....	138
12 SEZNAM CITOVANÉ LITERATURY.....	139
12.1 Publikace:.....	139
12.2 Webové zdroje:.....	141
13 PŘÍLOHY.....	148
13.1 Seznam příloh:.....	148

# 1 ÚVOD

Dřevo je tradičním materiálem a lidstvo jej používá po tisíciletí. Je to anizotropní materiál, s dobrými mechanickými vlastnosti při relativně nízké váze, který je zároveň obnovitelným zdrojem surovin. Dřeviny ke svému růstu využívají fotosyntézu, tudíž produkují kyslík, který je jednou ze základních podmínek pro život na Zemi.

Existuje mnoho druhů dřevin, ze kterých se těžbou a následným zpracováním získává dřevo různých fyzikálních, mechanických a chemických vlastností. Každá dřevina má svou jedinečnou kresbu, čehož se využívá pro estetické účely zejména v nábytkářství. Dřevo je také jednoduše recyklovatelné. Nevýhodou dřeva je jeho snadná biologická degradace, rozměrové změny spojené se změnou vlhkosti a poměrně malá pevnost v ohybu, u některých dřevin také nízká odolnost vůči povětrnostním vlivům.

Naopak uhlíková vlákna jsou materiálem poměrně novým, jedná se o dnešní „hi-tech“, který je však již hojně používaný. Uhlíková vlákna mají také anizotropní vlastnosti. Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken jsou několikanásobně vyšší při porovnání se dřevem a chemická odolnost uhlíkových vláken je také lepší. Využívají se např. k nahrazování různých konstrukčních prvků při významném snížení hmotnosti prvků díky nízké hmotnosti uhlíkových vláken, nebo vyztužování různých materiálů, čímž zvyšují jejich zatížení nebo umožňují snížit jejich průřez.

Spojení těchto dvou materiálů může být dalším vývojovým stupněm při používání dřeva. Z historického hlediska bylo dřevo používáno nejprve neopracované, což se postupem času měnilo s příchodem nových technologií. Prvním významným milníkem bylo opracování dřeva pomocí tesání, poté řezáním. Egypťané byli schopni dřevo rozřezat na tenké destičky, které pak pomocí organických lepidel slepili do formy první překližky. Následovali povrchové úpravy na organické bázi, mnohem později syntetické nátěrové hmoty a lepidla, které umožnily lepit rozmanité materiály, např. uhlíková vlákna, která byly objeveny teprve před 135 lety.

## **2 CÍL PRÁCE**

Cílem této diplomové práce je popsat vlastnosti a chování lepeného spoje mezi dřevem a uhlíkovými vlákny. K tomuto účelu byly vybrány tři různé metody zatížení a byly vyrobeny tři sady vzorků. Konkrétně se jedná o zatížení na tlak, ohyb a smyk. Samotný průběh měření na zkušebním stroji bude zaznamenáván jednou nebo dvěma kamerami, které poskytnou videozáznam z měření. Ten bude zpracován pro popsání chování kompozitu do bodu porušení, vlastního porušení a porovnání případů.

Dalším cílem je sestavení numerických modelů pro popis mechanického chování vzorků. Modely budou vytvořeny v programu ANSYS a následně budou verifikovány s výsledky experimentálního měření vzorků kompozitního materiálu. Poté bude do modelu dosazena jiná dřevina, simulující zatížení vzorků vyrobených z jiného dřeva.



### **3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY**

V současnosti se již kombinace lepeného spoje dřeva s uhlíkovými vlákny běžně používá například u masivních i lepených nosníků (GLULAM). Použití uhlíkových vláken dovoluje snížení průřezu těchto nosníků až o 25 %, nebo zvýšení jejich zatížení.

V této problematice je často řešeným problémem selhání kompozitu na bázi dřeva a uhlíkových vláken v lepené spáře. Je to dáno tím, že mechanické vlastnosti kompozitu určují všechny složky, z nichž se kompozit skládá a výsledné vlastnosti ovlivňují vlastnosti nejméně mechanicky odolného materiálu. Nejčastěji se jedná o smykovou pevnost lepidla.

Tato kapitola je poměrně rozsáhlá, jelikož byla vytvořena se snahou zachytit současný stav řešené problematiky, proto byla pro větší přehlednost rozdělena do podkapitol nacházejících se níže.

#### **3.1 Kompozitní materiály**

Kompozit je materiálový systém složený nejméně ze dvou druhů materiálů (fází). Alespoň jeden je pevnější a tužší, proto se mu říká výztuž. Výztuž se označuje také jako materiál diskontinuální. Druhý kontinuální materiál má nižší mechanické vlastnosti. Tento podkladový materiál se označuje jako matrice. Materiály jsou makroskopicky rozeznatelné, dosahují vlastností nedosažitelných kteroukoliv složkou samostatně ani prostou sumací. (Bareš, 1988; Berthelot, 1999). Použití kompozitních materiálů vede nejen ke zvýšení mechanických, fyzických a chemických vlastností, ale také ke snížení opotřebení podkladového materiálu (Harris a Wyn-Roberts, 1968). Výsledné vlastnosti kompozitů závisí na vlastnostech materiálů, z kterých se kompozit skládá. Na znalosti těchto materiálů závisí konstrukce kompozitu, která udává vlastnosti kompozitů. Existují obecné základní konstrukce kompozitních materiálů na bázi dřeva, ze kterých se jejich použitím, nebo jejich modifikací pro složitější kompozitní materiály na bázi dřeva kompozitní materiály vyrábějí. (Bodig a Jayne, 1993)

Při konstrukci kompozitních materiálů je nyní velký zájem o vyztužování matrice materiály na bázi vláken, protože mají vysokou tuhost, pružnost, pevnost a mají maximálně anizotropní strukturu. Tyto materiály mají různé uspořádání vláken. Jednosměrné uspořádání vláken zajišťuje jejich nejvyšší možnou elastickou pevnost.

(Varshavkii, Korabel'nikov, 1995). Termínem pokročilé kompozitní materiály se označují ty, jejichž dominantní složkou jsou vláknité materiály. (Savage, 1993).

## **3.2 Přehled vybraných dřevin**

### **3.2.1 Buk (*Fagus sylvatica*)**

Buk je v České republice rostoucí dřevina s nejvyšší pevností a pružností ve smyku. Jeho ostatní mechanické vlastnosti jsou také velmi dobré. Hustota buku je při  $w = 12\%$   $710 \text{ Kg/m}^3$  (při  $w = 0\%$  je  $684 \text{ Kg/m}^3$ ), sesychání je ve směru podélném  $0,3\%$ , radiálním  $5,3\%$ , tangenciálním  $17,5\%$  a celkové objemové sesychání činí  $17,5\%$ . Pevnost v tlaku je  $56,7 \text{ MPa}$  podél vláken,  $12,9 \text{ MPa}$  v radiálním směru a  $8,5 \text{ MPa}$  v tangenciálním směru. Pevnost v ohybu je  $124 \text{ MPa}$  a ve smyku  $12,6 \text{ MPa}$  podél vláken/kolmo na vlákna v radiálním směru  $12,6/14,2 \text{ MPa}$  a tangenciálním směru  $15,1/10,2 \text{ MPa}$ . Modul pružnosti v tlaku je  $16\,837 \text{ MPa}$  a  $12\,966 \text{ MPa}$  v ohybu. (Požgaj a kol., 1997). Buk se dobře opracovává, lepí i povrchově dokončuje. Tato dřevina se často používá pro výrobu ohýbaných produktů (metodou paření párou) díky vysokému obsahu ligninu ve dřevě. Nevýhodou jsou poměrně velké rozměrové změny a nižší rozměrová stabilita dřeva, což může nastat například změnou vlhkosti ve dřevě. (www.wood-database.com, 2014)

Při zvážení dobrých mechanických vlastností, dostupnosti na trhu a ceny je tato dřevina vhodným kandidátem pro aplikaci na různé konstrukční prvky nižší tloušťky. Dobrým příkladem je buková překližovaná deska vyztužená tkaninou nebo plátnem z uhlíkových vláken.

### **3.2.2 Smrk**

Smrk ztepilý je dřevina s nejvyšším zastoupením v ČR a velkým zastoupením ve zbytku Evropy. Hustota smrku je při  $w = 12\%$   $405 \text{ Kg/m}^3$  (při  $w = 0\%$  je  $392 \text{ Kg/m}^3$ ), sesychání je ve směru podélném  $0,65\%$ , radiálním  $4,3\%$ , tangenciálním  $9,8\%$ . Pevnost v tlaku je  $34,1 \text{ MPa}$  podél vláken,  $3,4 \text{ MPa}$  v radiálním směru a  $4,0 \text{ MPa}$  v tangenciálním směru. Pevnost v ohybu je  $70,4 \text{ MPa}$  a ve smyku  $6,7 \text{ MPa}$  podél vláken, kolmo na vlákna v radiálním směru  $2,1 \text{ MPa}$  a tangenciálním směru  $2,4 \text{ MPa}$ . Modul pružnosti v tlaku je  $13\,650 \text{ MPa}$  a  $8\,210 \text{ MPa}$  v ohybu (Požgaj a kol., 1997). Smrk se často používá pro výrobu nosníků – hranolů nebo lepených nosníků

(GLULAM). U obou těchto možností se již využívá vyztužení uhlíkovými vlákny (André, 2012). Smrk je dobře opracovatelný s výjimkou kusů s velkou sukovitostí, dobře se lepí a povrchově upravuje. (www.wood-database.com, 2014)

Mechanické vlastnosti této dřeviny ovlivňuje místo růstu dřeviny mající vliv na její hustotu, tloušťku letokruhů apod. či místo odběru vzorků z kmene. Smrk je sice bělová dřevina, avšak v jejím středu se nachází vyzrálé dřevo, které má mírně lepší mechanické vlastnosti, nežli dřevo nevyzrálé nacházející se v povrchové vrstvě kmene. (André, 2012)

### **3.3 Přehled vybraných vláknitých materiálů**

Vláknité materiály jsou dnes běžně dostupné ve formách tkanin, pláten a lamelových výztuží. Použití každé možnosti pro vyztužování má své klady i zápory.

#### **3.3.1 Tkaniny a plátna**

„Při výběru vhodné výztuže bylo rozhodnuto o použití běžně dostupných materiálů ve formě vláken. Tyto materiály mají vysokou pevnost, tuhost a pružnost. Navíc se běžně prodávají ve formě vláken, tkanin, pláten a různých profilů. Jelikož se jednalo o plošnou aplikaci, byla pro jednoduchou manipulaci zvolena forma tkaniny nebo plátna.“ (Harok, 2013)

„Aramidová vlákna mají průměrný modul pružnosti v tahu 400 GPa a průměrnou pevnost v tahu 4000 MPa. (Speciality Materials, Inc., 2013). Čedičová a skelná vlákna mají poměrně nízký průměrný modul pružnosti v tahu 60 - 100 GPa a zároveň vyšší průměrnou pevnost v tahu 1850 - 2150 MPa. Hlavní nevýhodou těchto vláken je jejich křehkost. (Basaltex, 2013, PPG Industries, 2001). Uhlíková vlákna mají vysoký průměrný modul pružnosti až 400 GPa a vysokou průměrnou pevnost v tahu až 4500 MPa. Pro manipulaci s kovovými vlákny jsou vyžadovány speciální nástroje, proto nebylo uvažováno o použití kovových vláken. (Havel Composites, 2013, Web.utk.edu)“ (Harok, 2013)

„Šilhan O. (2008) tvrdí, že materiály na bázi skelných vláken poskytují vynikající parametry při zvyšování pevnosti prvků namáhaných jen po krátkou dobu. V místech trvale namáhaných napětím (např. ohybem nebo smykem) není vhodné používat tyto kompozity (na bázi skelných vláken) vzhledem k efektům porušení při tečení. Materiály

na bázi uhlíkových vláken jsou pro tyto aplikace mnohem vhodnější. Navíc uhlíková vlákna mají vyšší pevnost v tahu a výrazně vyšší rázovou houževnatost (Raftery, et al, 2009). Kulík a Melzerová (2012) zkoumali optimalizaci tloušťky a materiálů použitých u nosníků z lepeného lamelového dřeva. Ve své práci zjistili, že nosníky vyztužené materiály z uhlíkových vláken mají při stejném zatížení nižší průhyb, než stejné nosníky vyztužené materiály ze skelných vláken.“(Harok, 2013). Odolnost uhlíkových vláken závisí na typu polymeru matrice, tloušťce výztuže, kvalitě a metodě produkce, délce frakce, ze které se vlákna skládají. (Raftery, et al, 2009)

### **3.3.2 Lamelové výztuže**

„Neubauerová, Karmazínová a Pešek (2011) zkoumali únosnost kompozitních nosníků z jehličnatého dřeva s externí lepenou výztuží z polymerů s uhlíkovými vlákny. Zjistili, že vyztužení má větší význam pro nosníky s menší výškou (do 200×100 mm). U nosníků s větší výškou (nad 220×100 mm) nejsou rozdíly naměřených maximálních sil vyztužených a nevyztužených nosníků tak vysoké.“ (Harok, 2013). P. Neubauerová (2012) zkoumala zesilování dřevěných nosníků lamelami s uhlíkovými vlákny. K lepení nosníku s lamelou použila speciální epoxidovou lepidlovou směs, avšak při tomto výzkumu se ukázalo, že je obtížné spojit dřevěný nosník s lamelou s uhlíkovými vlákny. Při zkoušce často docházelo k delaminaci lepeného spoje a oddělení lamely od nosníku z důvodu velkého smykového napětí mezi vrstvou dřeva a uhlíkovou lamelou. Smykové napětí působí přímo ve vrstvě lepidla a lepidlo tedy musí toto zatížení snést. U nosníků, kde k oddělení výztužné lamely nedošlo, bylo prokázáno výrazné zpevnění. Ukázalo se, že tento problém pravděpodobně vznikl kvůli velké hladkosti lamel. Tudiž musí být kladen důraz na správnou úpravu povrchu před lepením, která je rozhodující pro odolnost lepeného spoje (Hutchinson, 1987). Zejména při vytvrzování epoxidových lepidel při lepení FRP za studena (Raftery, et al, 2009). Lavisci (2001) ve své studii uvádí, že broušení lepených povrchů zvyšuje odolnost proti delaminaci, tudíž je vhodné provést broušení pro zdrsnění povrchu prefabrikované výztuže vodním brusným papírem o zrnitosti 320. (Vick, 1995)

Vyztužování lamelovými prefabrikáty lze snadno začlenit do výrobního procesu lepení a laminování, na rozdíl od vyztužování samotnými uhlíkovými vlákny nebo jejich tkaninou, vyžadující časově náročnější výrobní postupy. Při použití vláknitého

prefabrikátu se také dá snadno měnit tloušťka lepené spáry (Raftery, 2009). Na lepení lamelových výztuží byl zaměřen experiment Objoise a jeho týmu (1999) zabývající se vhodnou tloušťkou lepené spáry v rozmezí 0,05 až 0,1 mm a bylo experimentálně naměřeno, že lepená spára tloušťky 0,1 mm poskytuje optimální pevnost spoje při lepení dřevěných lamel.

### **3.4 Přehled vybraných lepidel**

Lepení je nejvhodnější metodou pro spojování dvou materiálů, protože zajišťuje efektivní přenos zatížení mezi materiály (Raftery, et al, 2009). Při volbě vhodných typů lepidel byly kladeny požadavky na vhodnost lepidlových směsí pro lepení použitých materiálů, dřeva a uhlíkových vláken. Výběr lepidla má vliv na konečnou pevnost vzniklého kompozitu (Jánská, 2009) a zvolená lepidla musí být dostatečně elastická, aby při bobtnání a sesychání dřeva nedošlo k poškození polymerových řetězců vznikajících při vytvrzení lepidla (Frihart, 2005). Největší důraz při výběru lepidel byl tudíž kladen na mechanické vlastnosti lepidel.

#### **3.4.1 Epoxidové pryskyřice**

„Epoxidové pryskyřice „překonávají“ většinu dalších pryskyřic v mechanických vlastnostech. Mají také dobrou houževnatost, odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům. Epoxidové pryskyřice jsou snadno vytvrditelné v rozsahu teplot od 5 do 150 °C. Vytvrzení těchto pryskyřic lze urychlit zvýšením teploty v lisu. Vytvrzování za vyšších teplot zvyšuje konečné mechanické vlastnosti materiálu. (Havel Composites, 2013). Epoxidové pryskyřice se navíc běžně používají k lepení kompozitů na bázi uhlíková vlákna – dřevo v praxi i experimentálním měřením. Z těchto důvodů byla vybrána epoxidová lepidla LH 260, LH 300, LH 3000 (Obr. 2)., (Harok, 2013)

Jsou velmi univerzálním lepidlem, která se používají v širokém měřítku. Pro lepení dřeva se používají jen velmi málo vzhledem k vysoké ceně a náročnosti na zpracování. Mohou se vytvrzovat za studena přidáním tvrdidla na bázi polyamidů nebo za horka (do 200 °C) při přidání tvrdidla na bázi dikyandiamidu. Tyto lepidla jsou vysoce houževnatá, s výbornou adhezí a kohezí, s nepatrnou kontrakcí (tudíž v lepené spáře nevzniká pnutí). Také nevyžadují vysoký lisovací tlak (stačí 0,02 MPa) a jsou chemicky odolná. Často se používají jako laminovací pryskyřice např. na skelné lamináty. Jejich

vlastnosti závisí také na použitém tvrdidle a jeho přesném dávkování. Vytvrzování těchto lepidel probíhá zesítním molekul chemickou reakcí (Křupalová, 1999). Vynikají výtečnou adhezí ke kovům a keramice. Mechanická pevnost je dobrá, lepené spoje se vyrovnají svárům. Nevýhodou je menší rázuvzdornost. Odolnost vůči vlhkosti je uspokojivá, hodnota izolačního odporu vysoká. Uplatňují se především jako lepidla, lící pryskyřice a vypalovací látky (Vaněk, 2005). Epoxidová lepidla nelepí termoplasty a pryž. Nejsou vhodná pro lepení nepolárního povrchu, např. polystyrénu a polyetylen (Tesařová, 2014)

Obecně při lepení lepidly je vhodné dodržet optimální tloušťku lepidlové vrstvy (zejména u křehkých lepidel), protože u vrstvy vyšší tloušťky dojde snadno k popraskání a smyková pevnost lepeného spoje je nižší (Křupalová, 1999).

### **3.4.2 Polyesterové pryskyřice**

„Polyesterové (PES) pryskyřice jsou často používané, levnější než epoxidové a dobře smáčí skelná vlákna. Jsou ale poměrně křehké, méně teple odolné a pevnost vazby matrice - skelné vlákno je menší. Výrobce neuvádí možnost použít PES pryskyřici s uhlíkovými vlákny. Výrobce pro PES pryskyřice obecně uvádí tyto pevnosti: v tahu 190 MPa, v ohybu 240 MPa. (Havel Composites, 2013, Kořínek, 2009). Vzhledem k zjištění z práce P. Neubauerové, že budeme potřebovat pryskyřici s velkou pevností a PES pryskyřice je navíc křehká, bylo rozhodnuto nepoužít tento typ pryskyřice., (Harok, 2013)

### **3.4.3 Vinylesterové pryskyřice**

„Vinylesterové pryskyřice (VE) jsou vhodné pro výrobu kompozitů vyztužených skelnými, nebo uhlíkovými vlákny, se kterými dobře reagují a vytvářejí tak velmi odolné kompozity. Jsou používány pro svou velmi dobrou odolnost tepelnou, chemickou, mechanickou i proti povětrnosti. VE mají nižší stupeň zesítnění než EP, proto mají větší ohebnost a odolnost proti tvorbě trhlinek. Běžně se používají k výrobě vinylesterových rour, nádrží, lopatek větrných elektráren, v letectví a v dopravě. Pevnost v tahu je 70-85 MPa. Modul pružnosti v tahu je 3-3,5 GPa. (Kořínek, 2009, Mendelu.cz, 2013). Tato pryskyřice nebyla zvolena kvůli tepelného dotvrzování, vyšší ceny, navíc nebyla dostupná u lokálního prodejce., (Harok, 2013)

„A. Pirvu et al. (2004) zkoumali vlastnosti kompozitu vyrobeného z vinyl-esterové (VE) pryskyřice a uhlíkových nebo skelných vláken aplikovaných na dřevěný nosník. Při experimentu zjistili, že uhlíková vlákna mají v podélném směru vyšší mez pevnosti a pružnosti. V příčném směru se naměřené hodnoty téměř nelišily. Tento výzkum potvrdil vhodnost použití VE pryskyřice s uhlíkovými vlákny.,, (Harok, 2013)

#### **3.4.4 Polyuretanové pryskyřice**

„Polyuretany (PU) jsou houževnatější než polyesterové pryskyřice. Jejich hlavní výhodou je větší rázová houževnatost a větší odolnost proti únavě. Mají dobrou adhezi k vláknům a jsou poměrně levné. Pro výrobu kompozitů jsou vhodné dvousložkové polyuretanové pryskyřice. Životnost namíchané směsi (doba tekutosti) bývá asi 20 minut. Pryskyřice jsou kompatibilní se stávající povrchovou úpravou skleněných vláken (Kořínek, 2009). V experimentu Š. Šteller ověřil vhodnost použití PU pryskyřice s uhlíkovými vlákny, tento experiment byl však ojedinělý a dostupné informace v minimální míře. Proto bylo rozhodnuto tuto pryskyřici nepoužít.,, (Harok, 2013)

#### **3.4.5 Močovinoformaldehydová lepidla**

Močovinoformaldehydová lepidla se dnes běžně používají a jsou nejvýznamnějšími v dřevařském i nábytkářském průmyslu. Používají se při dýchování velkoplošných materiálu i jejich výrobě, např. dřevotřískových a pazdeřových desek. Tato lepidla se vyznačují velmi příznivou cenou, avšak uvolňují do ovzduší ještě dlouhou dobu po vytvrzení poměrně velké množství formaldehydu. Pro toto lepidlo je doporučena tenká lepená spára, jinak dochází ke snižování vlastností lepené spáry (Křupalová, 2004). Jánská (2009) zjistila, že močovinoformaldehydové lepidlo je pro spoje namáhané na ohyb nevhodné, jelikož snižuje pevnost i pružnost celého kompozitu.

### **3.5 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna**

Lepení kompozitních materiálů ze dřeva a uhlíkových vláken má svá specifika. Současný stav poznání doporučuje použít uhlíková vlákna (Kulík a Melzerová, 2012), jelikož mají velmi dobré mechanické vlastnosti oproti např. vláknům skelným (Pirvu et

al., 2004). Pokud plánujeme kompozit zatěžovat pouze v tahu nebo smyku podél směru uhlíkových vláken či v ohybu kolmo na ně, pak jsou vhodná vlákna jednosměrná (Varshavkii, Korabelnikov, 1995). Obecně lze tvrdit, že je vhodné orientovat vláknité materiály v podélném směru vzhledem k předpokládanému směru působení síly (Savage, 1993). U kompozitů nižší výšky lze předpokládat, že nejvyšší smykové napětí bude působit ve vrstvě lepidla (Neubauerová, 2012) a může tak snadno dojít k delaminaci (ČSN EN 73 2835, 2002). U vyšších kompozitů, např. lepeného lamelového dřeva vyztuženého uhlíkovými vlákny lze předpokládat, že největší působící síly budou působit mimo vrstvu lepidla při vhodném umístění výztuže (Raftery, et al., 2008, 2009). Pro lepení je potřeba použít lepidla kompatibilní s uhlíkovými vlákny, např. PUR (Šteller, 2009), vinyl-esterové (Pirvu et al., 2004), nebo epoxidové (Neubauerová, 2012; Harok, 2013), které byly použity v již provedených studiích nejčastěji a jsou všeobecně doporučována (Davis, 1997). Jejich výhody jsou např. dobrá schopnost vyplnit lepenou spáru a vyžadují pouze nízký lisovací tlak pro vytvrzení. Jelínková (2009) doporučuje uhlíková vlákna předepnout, což zvýší pevnost přibližně o 30 % a pružnost přibližně o 20 %, navíc nedoporučuje kompozit tepelně modifikovat (Jelínková, 2011), jelikož by došlo ke snížení pevnosti cca. o 5 %.

Uhlíková vlákna a dřevo jsou materiály mající rozdílné moduly elasticity, povrchové vlastnosti, chování při zatížení a rozdílné chování při vystavení vlhkosti. (Raftery, et al, 2009). Proto může vyztužování nosníků změnit způsob selhání nosníků z křehkého porušení v tahu na plastické porušení v tlaku (Gentile, et al, 2002). Vyztužování nosníků vláknitými materiály může zvýšit mez pevnosti do bodu porušení vláken (Gentile, et al, 2002; Dempsey, 2006) a dlouhodobě zvýšit mechanické vlastnosti nosníků, zejména průhyb (Gilfillan, 2003), únosnost a rázovou houževnatost. (Kim, Harries, 2010)

Avšak i po uplynutí dvou let od rešerší prováděných pro mou bakalářskou práci musím konstatovat, že je stále jen částečně zpracována problematika nejvhodnějšího způsobu umístění uhlíkových vláken či výztuže. Zpracována je problematika umístění uhlíkových vláken vně zkušebního tělíska (André a kol., 2012), avšak při umístění uhlíkových vláken uvnitř existuje mnoho možností. Jsou prozkoumány jen některé možnosti a to nejčastěji pro vyztužování lepených nosníků (Raftery et al., 2008, 2009).



Zajímavostí je, že uhlíková vlákna se dají použít k vyztužování různých částí nástrojů, např. žeber akustických kytar (Paučo, 2012), avšak umístění výztuže má vliv na fyzikálně-akustické vlastnosti jednotlivých žeber. Dalším příkladem je použití uhlíkových vláken namísto dřevěných žeber pro vyztužení desky akustické kytary (Palowská, 2010). Zjistila, že správným umístěním uhlíkové výztuže se uhlíkovými vlákny vyztužená deska zvukově neliší od desky vyztužené dřevěnými žebry. Použitím uhlíkových vláken namísto dřeva dojde ke snížení váhy, což zvýší zvučnost kytary.

Postupem času dochází ke stárnutí uhlíkových vláken ve výztuži, což snižuje ohybové a tahové vlastnosti (Liao et al, 1999). Nejdříve však dochází k degradaci vytvrzené vrstvy lepidlové směsi, která přenáší napětí z matrice na vlákna (Pilato, Michno, 1994).

### ***3.6 Vliv tloušťky lepené spáry na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů dřevo – uhlíková vlákna***

Na tloušťku lepené spáry má vliv změna vlhkosti. Epoxidové pryskyřice absorbují vlhkost pouze do mikro dutin (Apicella, et al., 1979), takže přijímáním vody u nich nedochází k rozměrovým změnám, stejně jako u uhlíkových vláken. Avšak dřevo je hygroskopické a při přijímání vlhkosti z okolního prostředí mění svou hmotnost a objem. Při výrazné změně vlhkosti v důsledku rozměrových změn dřeva může dojít k popraskání vytvrzené epoxidové pryskyřice, zejména v příčném směru (kolmo na vlákna) (Dinwoodie, 2000). Kvůli těmto rozdílným vlastnostem dřeva a uhlíkových vláken reagují tyto materiály rozdílně při změně vlhkosti a teploty. Vzhledem k jejich rozdílným rozměrovým změnám vzniká v lepením spoji namáhání na smyk (Barbero, et al, 1994). Tloušťku lepené spáry ovlivňuje i tuhost lepidla, tedy odolnost proti poškození polymerových řetězců vznikajících při vytvrzení lepidla (Frihart, 2005). V současnosti výrobci lepených nosníků řeší tento problém nanesením většího nánosu lepidla a vytvořením větší tloušťky lepené spáry, která lépe odolává praskání při bobtnání a sesychání dřeva. Lépe tedy vyrovnává rozdílné rozměrové změny mezi těmito dvěma materiály. V lepené spáře tloušťky 2 mm tyto rozměrové změny přenášejí delší polymerové řetězce (nežli u tloušťky 1 mm) a přenášené síly v lepené spáře lépe „rozptýlí“. Avšak Adams a Peppiatt (1974) uvádějí, že tlustší vrstvy lepené spáry mají

vyšší pórovitost než vrstvy tenčí, což vede k častějšímu vzniku mikrotrhlin u větších tloušťek lepené spáry snižujících mechanické vlastnosti lepeného spoje.

Na vhodnou tloušťku lepené spáry v rozmezí 0,05 až 0,1 mm pro lepení lamelových výztuží byl zaměřen experiment Objoise a jeho týmu (1999). Experimentálně bylo naměřeno, že lepená spára tloušťky 0,1 mm poskytuje optimální pevnost spoje při lepení dřevěných lamel. Avšak Chui (1998) a Shiah-Chuan (1999) zkoumali vliv tloušťky lepené spáry za pomoci modelové studie konečných prvků a jejich výsledky byly v rozporu s předchozí studií. Výsledky experimentů uvádějí, že v lepené spáře větší tloušťky dochází k rozložení smykových napětí v celé tloušťce lepené spáry, což má pozitivní vliv na její mechanické vlastnosti. Nicméně, lineární analýza studie metodou konečných prvků Gleicha a jeho týmu (2001) potvrzuje výsledky experimentů Objoise a jeho týmu (1999). Ti zjistili, že při zvýšení tloušťky lepené spáry dochází ke zvýšení velikosti přenášených sil ve smyku a stříhu, avšak celkově došlo ke zhoršení ostatních mechanických vlastností.

Experiment Rafteryho a jeho týmu (2009) dokazuje, že kvalita lepeného spoje nezávisí pouze na vlastnostech lepidla, ale i na vláknitém materiálu. Současná epoxidová lepidla jsou dostatečně tuhá a odolná, aby obstála při zkoušce opakovaným bobtnáním a sesycháním dřeva v lepeném kompozitním materiálu při použití lepené spáry tloušťky 0,5 mm při současném zachování dobrých mechanických vlastností. To je však podmíněno použitím vhodného epoxidového lepidla.

To potvrzuje experiment Andrého, Kliger a Olssona (2012), kdy při zatížení v tlaku dosáhl nános lepidlové směsi tloušťky 0,5 mm všeobecně lepších výsledků v porovnání s nánosem lepidlové směsi tloušťky 2 mm.

### **3.7 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna – zatížení v tlaku**

André, Kliger a Olsson (2012) se zabývali průběhem a popisem selhání malých smrkových zkušebních tělísek vyztužených uhlíkovými vlákny v zatížení tlakem. Při tomto výzkumu vyházeli z poznatku, že masivní nebo lepený nosník (glulam) je vhodné vyztužit uhlíkovými vlákny na tlakové i tahové straně nosníku pro nejefektivnější zvýšení tuhosti a nosnosti nosníku (Kliger et al, 2007; Gugudsize a Draškovič 2009), a že u nosníků nejčastěji dochází k selhání na tahové straně (Wandgaard, 1964).

Všeobecně je smrkové dřevo v porovnání s uhlíkovými vlákny vnímáno jako křehký materiál při zatížení na tah a stříh (André a Kliger, 2009).

Byly zjištěny rozdíly v tuhosti a pevnosti mezi vyzrálým a nevyzrálým dřevem, pomalu a rychle rostoucí dřevinou. Mezi pomalu a rychle rostoucím dřevem byl rozdíl v tuhosti 18 %. Použitím výztuže z uhlíkových vláken vzrostl modul elasticity o 200 – 300 % a zároveň došlo ke snížení tuhosti o 30 %. Pevnost vzorků byla použitím vláken zvýšena o 100 % u vzorků z rychle rostoucích dřevin a o 80 % u vzorků z pomalu rostoucích dřevin. U vzorků vyztužených uhlíkovými vlákny z boku došlo ke zvýšení modulu pružnosti (v podélném směru) o 230 % a pevnosti o 70 %.

U vzorků vyztužených uhlíkovými vlákny v jejich geometrickém středu byla mez pevnosti a pružnosti ovlivněna odklonem dřevních vláken vzhledem k rovině působení tlaku; množstvím použitých uhlíkových vláken (v průřezu vzorku) pro vyztužení a vlhkostí obsaženou ve dřevě. Průměrně byla u těchto vzorků zvýšena pevnost o 200 %.

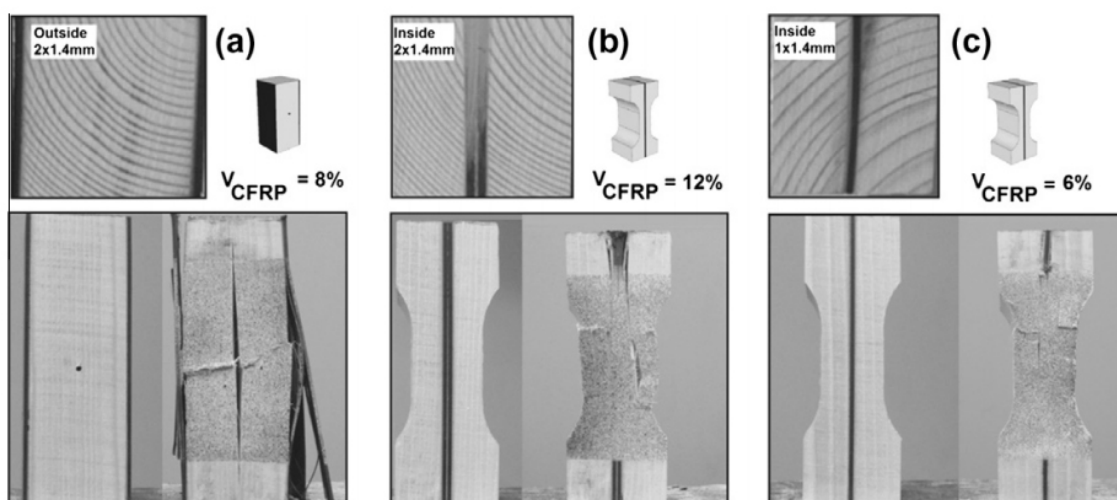
K selhání vzorků vyztužených jednou vrstvou uhlíkových vláken (podíl CF 6 %) (Obr. 1: c) došlo částečným selháním lepeného spoje mezi vlákny a dřevem na začátku vzorku a následným selháním dřeva pod tímto místem, či selháním zkušební vzorku v jeho nejtenčí - pracovní části vzorku anebo posunutím vrstev dřevních vláken při nesouměrném zatížení vzorku, což vedlo k vyboulení vzorku ve tvaru písmene S. Také bylo zjištěno, že se snížením vlhkosti vzorků se zvýší pevnost vzorku.

U vzorků s podílem 12 % (Obr. 1: b) CF došlo ke zvýšení stability, avšak nedošlo k výraznému zvýšení tuhosti a pevnosti. Při zatížení nedošlo k vybočení vzorku.

Vyhodnocení selhání vzorků optickou analýzou bylo zjištěno, že k nejvyšší lokalizaci napětí dochází v místě posunutí či porušení vzorků. U geometrie „psí kost“ (Obr. 1: b, c) nejdříve dochází k lokalizaci vysokého tlakového napětí v levé horní oblasti pracovní části vzorku, tedy na začátku vybrání. Toto napětí se projevilo již při zatížení 30 % průměrné síly, selhání vzorku začalo v tomto místě při 50 % zatížení ve dřevě a napětí se začalo přesouvat ke středu vzorku. Po dosažení meze pevnosti došlo k delaminaci lepeného spoje. Současně došlo k dalšímu lomu ve spodní pracovní části vzorku.

U vzorků vyztužených po stranách (Obr. 1: a) nejprve došlo k lokalizaci vysokého napětí poblíž vyvrtaného otvoru. V této oblasti začalo selhání vzorků ve dřevě. Při dosažení maximálního zatížení (meze pevnosti) došlo k selhání dřeva v celém průřezu vzorku v místě, kde došlo k zahájení selhání. Poté následovala delaminace výztuže.

Obecně bylo prokázáno, že selhání nosníku (lom) bylo obvykle započato v blízkosti nejmenšího průřezu pracovní části vzorku v důsledku koncentrace napětí. Poté došlo k přenesení tlakových sil do lepeného spoje uhlíkových vláken se dřevem, což vedlo k následné delaminaci v tomto spoji.



Obr. 1: Selhání zkušebních vzorků a) vzorek vyztužených ze stran, b) vzorek s vybráním v jeho pracovní části s podílem vláken 12 %, c) vzorek s vybráním v jeho pracovní části s podílem vláken 6 %

### 3.8 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna – zatížení v ohybu

V kapitole „Současný stav řešené problematiky“ se nachází většinou informace získané při měřeních v zatížení na ohyb. Většinou se však jednalo o zatížení nosníků, tudíž tyto informace nelze bez výhrad převzít.

Zkoušením vzorků s totožnou konstrukcí v třibodovém ohybu se zabývala Jelínková (2009) ve své diplomové práci. Porovnávala modul pružnosti a pevnosti vyztužených a nevyztužených tělísek. Zjistila, že při použití lepidlové směsi lepidla LH 300 a tužidla H 303 HT došlo ke zvýšení pevnosti o 35 % a modulu pružnosti o 34,5 % u vyztužených vzorků oproti vzorkům nevyztuženým (u vzorků vytvrzovaných při 90 °C). Tato lepidlová směs dosáhla nejlepších výsledků. „Z výsledků vyplývá, že

vzorky bez vláken mají pevnost 136 MPa a s vlákny 181 MPa. Rozdíl v těchto hodnotách je 45 MPa, což je rozdíl poměrně významný. Při měření dosahovaly některé vzorky s vlákny hodnot přes 200 MPa“ (Jelínková, 2009). Modul pružnosti vyztužených vzorků byl 16 885,4 MPa a nevyztužených vzorků 12 396,5 MPa. Vyztužením došlo ke zvýšení modulu pružnosti o 25 %.

### **3.9 Kompozitní materiály dřevo – uhlíková vlákna – zatížení v smyku**

Zkoušením vzorků s totožnou konstrukcí jsem se věnoval ve své bakalářské práci (Harok, 2013). Vzorky byly zkoušeny na smykovou pevnost lepeného spoje a nejlepších výsledků dosáhlo lepidlo LH 300 s tužidlem H 303 HT při všech měřených teplotách a porovnávaných veličinách – mechanickou práci do meze pevnosti, tuhost a mez pevnosti. Vyztužené vzorky dosáhly lepších výsledků v mechanické práci do meze pevnosti o 130 %, tuhosti o 176 % a mezi pevnosti o 156 % oproti vzorkům nevyztuženým (u vzorků vytvrzovaných při 90 °C).

„Vzhledem ke konstrukci vzorků metodou překližování lze usuzovat, že kombinace smyků v tangenciálně – příčné rovině s působením síly ve směru vláken a kolmo na vlákna mělo na lom vzorku velký vliv. Uhlíková vlákna vždy zůstala přilepena na dýze, která měla směr vláken souběžně se směrem vláken jednosměrné uhlíkové tkaniny. Ze zjištěných faktů tedy můžeme vyvodit, že uhlíková vlákna mají větší soudržnost, když jsou lepena souběžně s vlákny BK dýhy, než když jsou lepena napříč směru vláken BK dýhy. Naopak u vzorků bez vláken došlo k lomu ve vrchní, nebo spodní vrstvě dýhy. Střední vrstva dýhy zůstala vždy neporušená. Ze směru lomu u vzorků bez vláken lze tedy usoudit, že loupání dýhy neproběhlo v přesně kolmém řezu vzhledem k vláknům, což je při průmyslové výrobě loupání dýhy těžko dosažitelné, a došlo k lomu dřeva v místě letokruhu.“ (Harok, 2013)

„Poměr uhlíkových vláken v místě lomu na středové vrstvě dýhy byl poměrně malý (průměrně 10%). Nebylo zjištěno, zda-li je tento poměr odtržených uhlíkových vláken obvyklý, protože nebyly dostupné materiály pro porovnání. Nebo lze usuzovat, že lepený spoj uhlíkových vláken orientovaných kolmo na vlákna bukové dýhy má menší mez pevnosti.“ (Harok, 2013)

„K porušení vzorků ve vláknech bukové dýhy s největší pravděpodobností došlo z důvodu, že uhlíková vlákna mají vyšší pevnost a tuhost než bukové dřevo.“ (Harok, 2013)

### **3.10 Modelování nosníků vyztužených vláknitými materiály**

Nosníky vyztužené vláknitými materiály jsou obecně odolnější vůči tahovému a ohybovému namáhání než nosníky nevyztužené. Při optimalizaci mají na úsporu nákladů výrazný vliv specializované programy (např. ANSYS), jelikož počítačová simulace je výrazně levnější než reálné zkoušky (Raftery et al., 2009). Kasal a Heiduschke (2004) použili trojrozměrný model založený na metodě konečných prvků pro analýzu využití kompozitních materiálů pro vyztužení zakřiveného lepeného nosníku (GLULAM) v radiálním směru. Alam (2004) zhotovil anizotropní plastický trojrozměrný model, který s dobrou přesností předpovídal mechanické vlastnosti vrstvených nosníků z dýhy vyztužených vlepými polymerovými vlákny. Avšak do modelu nebyl zahrnut přenos napětí v nosníku a jeho selhání. Kim a Harries (2010) vyvinuli trojrozměrný model nosníku simulující lineárně elastické chování vedoucí k selhání nosníku vyztuženého uhlíkovými vlákny. Valipour a Crewse (2011) vyvinuli postup pro modelování nelineárního chování vyztužených masivních částí. Autoři zjistili, že smykové napětí působící v lepené spáře mezi vláknitou výztuží a dřevem mělo malý vliv na tuhost a únosnost vyztužených nosníků za předpokladu dokonalého lepeného spoje mezi těmito materiály. Tyto poznatky využili pro vytvoření nelineárního dvourozměrného numerického modelu zatíženého na ohyb v programu ANSYS. Každá vrstva byla vymodelována jako vlastní entita (objem), což dovolilo nastavit materiálové charakteristiky vlastní vrstvy.

V předchozích experimentech na zatížení lepeného nosníku (glulam) bylo zjištěno, že nedochází k porušení přímo ve vrstvě lepidla při lepení dřeva v předchozích studiích (Raftery, et al, 2008, 2009). Vrstva lepidla tedy nebyla zahrnuta pro modely bez výztuže a u modelů s výztuží měla vymodelovaná lepená spára tloušťku 0,1 mm. V modelu zanedbali vrstvy, kde dochází ke styku epoxidové pryskyřice se dřevem nebo uhlíkovými vlákny. Předpokládali perfektní přenos sil v lepené spáře, protože při selhání lepených nosníků (vyztužených i nevyztužených) došlo k porušení ve spodní dřevěné lamě namáhané na tah (Raftery, 2010).

ANSYS obsahuje materiálové modely založené na teorii anizotropní plasticity (Ansys Inc, 2015), které byly použity pro studii plastického chování materiálu v tlačené oblasti definované Hillem (1948). Shih a Lee (1978) . Přidali do této studie rozdílné meze kluzu při namáhání v tahu a tlaku v ortotropním materiálu. To vyžaduje splnění kritérií plastické nestlačitelnosti (nedochází ke změně objemu) a zachování uzavřeného kluzného povrchu eliptického průřezu. Zatímco devět konstant je vyžadováno pro ortotropní elastické materiály, dalších 18 se požaduje pro anizotropní teorii plasticity.

Raftery a Harte (2009) se zabývali nelineárním numerickým modelováním lepeného nosníku (glulam) vyztuženého skelnými vlákny. Jejich cílem bylo vytvoření numerického modelu pro optimalizaci těchto nosníků. Využili nelineárního materiálového (geometrického) modelu pro zjištění způsobu porušení při zatížení, tuhosti, nosnosti a přenosu napětí mezi plátem výztuže vyrobené z skelných vláken, lepenou spárou a smrkovým dřevem. Pro model byla využita teorie anisotropické plasticity ve dřevě při zatížení. Model byl také použit pro zhodnocení efektivity vyztužení nosníku výztužemi s rozdílným množstvím uhlíkových vláken. Pro experiment použili bi-lineární ortotropní model pro dřevo se třemi smykovými rovinami v modelu, lineární elastický model ortotropního materiálu pro FRP desku a lineární elastický izotropní model materiálu pro epoxidové lepidlo. Jimi vytvořený materiálový model dobře předpovídal mez tuhosti, s mírnými odchylkami mez pevnosti a vzniklé deformace. Pomocí počítačového modelu také zkoumali vliv podílu uhlíkových vláken (1% a 4 % podíl), který má výrazný vliv na tuhost (6,6 % / 29 %), houževnatost (14,1 % / 54,9 %) a pevnost (57,5 % / 116,7 %) vyztuženého nosníku. Avšak tento počítačový model nezohledňoval vady dřeva a předpokládal, že vyztužení vláknitým materiálem vytvoří efektivní „most“ přenášející působící síly přes tyto vady. Modelem simulované deformace a nelineární chování při zatížení jsou ve shodě s experimentálně naměřenými výsledky pro nevyztužené i vyztužené nosníky, avšak mez tuhosti a pevnosti je modelem předpovězena jen uspokojivě. Z výsledků simulací vyplývá, že vláknitá výztuž se chová jako „most“ přes vady dřeva, což zvyšuje tuhost i pevnost dřeva. Počítačový model lze také použít pro zkoumání přenosu působících sil při v nosníku při jeho zatížení. Mechanické vlastnosti výrazně ovlivnily vlastnosti lepené spáry, která přímo ovlivňovala nelineární chování vyztužených nosníků při zatížení. Tyto vlastnosti nejvíce lepená spára ovlivňovala při zatížení na tah. Model může také sloužit pro

optimalizaci geometrického uspořádání prvků, hodnocení laminace (lepené spáry), mechanických vlastnosti výztuže a účinnosti vyztužení.

### **3.11 Modelování malých zkušebních tělísek vyztužených vláknitými materiály**

Modelování se používá pro předpověď chování dřevěných konstrukcí od jednoduchých analytických modelů používajících teorii lineární pružnosti (Johns, 2000; Borri, et al, 2005; Corradi, M., 2007) až po použití trojrozměrného modelování založeného na metodě konečných prvků (FEA) (Kurian, 2000; Choi, 2008). Modelování se také používá pro zjištění teorie poškození (damage theory) a lomové mechaniky (Campilho, et al, 2009). Pro modelování dřevěných prvků se používají dvě techniky: technika tvorby a šíření trhlin (Davids, et al, 2003; Snow, 2006) a přístup kontinua (Leicester, 2006; Guan, Zhu, 2009). Do současné doby bylo však provedeno pouze malé množství numerických analýz zabývajících se modelováním dřevo-vláknitých kompozitních materiálů (Campilho, et al, 2009).

Tingley (1997) vymodeloval dvourozměrný model založený na metodě konečných prvků pro posouzení deformací nosníku z lepeného dřeva (glulam) vyztuženého uhlíkovými vlákny. Tento model dosáhl dobré shody s chováním nosníku při ohybovém zatížení s provedenými experimentálními měřeními, avšak do tohoto modelu nebyla zahrnuta plasticita materiálů. Zjistil, že tloušťka výztuže významně ovlivňuje koncentrace napětí a tuhost nosníku. Kirlin (1996) použil lineární model pro zkoumání koncentrace napětí na konci výztuže u částečně vyztužených nosníků. Serrano (2001) použil nelineární trojrozměrný model pro zkoumání chování lepených výztuží v dřevěných konstrukcích. Model obsahoval plastické chování dřeva a proto bylo dřevo modelováno jako lineární elastický ortotropní materiál. Raftery a Harte (2009) pro nelineární modelování nosníků vyztuženého uhlíkovými vlákny použili bi-lineární ortotropní model pro dřevo se třemi smykovými rovinami v modelu, lineární elastický model ortotropního materiálu pro FRP desku a lineární elastický izotropní model materiálu pro epoxidové lepidlo.

Kim a Harries (2010) vymodelovali trojrozměrné modely pro porovnání vyztužení nosníků z různých druhů dřeva uhlíkovými vlákny. Dřevo vymodelovali jako ortotropní materiál používající element SOLID 45. Jednosměrná uhlíková vlákna modelovali jako



element LINK 8. Vrstva lepidla byla v těchto modelech zanedbána. Pro meshování použili velikost ok 1,4% délky nosníků. Bylo zkoumáno chování modelů při zatížení, rozložení zatížení, koncentraci napětí a způsobu selhání. Modely prokázaly dobrou shodu s experimentálně naměřenými výsledky s maximální odchylkou 10 %. V experimentu testovali efektivnost vyztužení nepoškozených a poškozených nosníků, u nichž se uhlíková vlákna používají jako alternativní forma opravy. Při zatížení na ohyb neměl modul pružnosti uhlíkových vláken významný vliv na selhání vyztužených nosníků při jejich zatížení, jelikož selhaly ve vrstvě dřeva. Modul pružnosti uhlíkových vláken však výrazně ovlivňuje místo selhání ve dřevě, jelikož posunuje polohu neutrální osy v nosníku více do jeho středu. Při porušení došlo ke křehkému lomu na tahové straně nosníku. U dřevin s nízkým modulem pružnosti došlo vyztužením ke snížení pružnosti nosníku, avšak došlo ke zvýšení jeho únosnosti. Externě lepené CFRP kompozity podstatně zlepšily únosnost a pevnost poškozených dřevěných nosníků, avšak i po vyztužení vykazovaly nižší pevnost ve srovnání s nosníky nepoškozenými.

### **3.12 Lepení uhlíkových vláken se dřevem**

Lepení dřeva s uhlíkovými vlákny má svá specifika a technologická doporučení, která jsou vhodná dodržet. Jedná se o dodržení doporučené vlhkosti pro dřevěné materiály umístěné v interiéru a exteriéru, jelikož vysoký obsah vlhkosti má negativní vliv na pevnost lepené spáry. Je také potřeba zvolit pro konkrétní aplikaci vhodné lepidlo, úpravu (drsnot) povrchů před lepením, dostatečnou dobu vytvrzování a správnou vytvrzovací teplotu (American institute of timber constructions, 2005). Také je potřeba dodržet doporučenou tloušťku nanesené lepidlové směsi, jinak může dojít k chudému lepenému spoji, což bylo v některých experimentech hlavní příčinou porušení zkušebních vzorků v lepené spáře (Raftery, 2009). Při nedodržení doby nebo teploty vytvrzování, či volbě nevhodné epoxidové pryskyřice může dojít k vytvoření nedostatečné vazby (zesíťování) v epoxidové pryskyřici, tudíž lepená spára může mít nižší pevnost než lepené materiály (Van Gemert, 1987).

Na pevnost kompozitu má také vliv bobtnání a sesychání, které způsobuje rozměrové změny dřeva a zvyšuje požadavky na přenos sil v lepené spáře nebo k přenosu působení zatížení do lepené spáry (Brandon, et al, 2005). Což potvrzuje i studie Gardnera, et al (1994), kdy v 90 % případů došlo k poškození kompozitu ve

dřevě při použití suchého dřeva, ale při použití dřeva mokrého došlo k poškození ve dřevě v méně než 20% případů při použití stejného lepidla a geometrie kompozitu. Rowlands, et al (1986) zjistili, že epoxidová lepidla vytvářejí vynikající vazbu se skelnými, aramidovými a uhlíkovými vlákny při lepení se suchým dřevem, avšak po vystavení vlhkosti klesá pevnost lepeného spoje na méně než 50% pevnosti naměřené u suchého kompozitu. Avšak mechanické vlastnosti lepeného spoje vystaveného bobtnání a sesychání přímo ovlivňuje tuhost lepidla, tedy odolnost proti poškození polymerových řetězců vznikajících při vytvrzení lepidla (Frihart, 2005), což dokazuje i Frihartův (2005) experiment, kde byl kompozit lepený epoxidovým lepidlem vystaven opětovnému bobtnání a vysoušení, což vedlo k porušení soudržnosti vazeb epoxidového lepidla v místě styku dřeva s epoxidovou lepidlovou směsí a následným selháním v tomto místě.

Při zkouškách nebo experimentálním měření na mechanické vlastnosti spoje může dojít k rozlepení nebo roztržení lepeného spoje v lepidle. Tento jev se nazývá delaminace. Za delaminaci je považováno porušení soudržnosti uvnitř vrstvy lepidla; porušení lepeného spoje přesně mezi vrstvou lepidla a dřevem (v tomto případě nesmí zůstat spojená žádná vlákna dřeva s vrstvou lepidla); případně porušení dřeva, které je v rozmezí první ze dvou buněčných vrstev sousedících s vrstvou lepidla a jehož charakter není ovlivněn odklonem vláken anebo strukturou letokruhu. Je charakterizována hebkým vzhledem dřeva, která ohraničují mezi povrchem dřeva a vrstvou lepidla (ČSN EN 73 2835, 2002). Nebo také může dojít k porušení ve dřevě. To by mělo zpravidla nastat ve dřevě nebo v lepené spáře smykové plochy, tj. mezi zářezy pilou. Porušení by nemělo vzniknout mimo tuto oblast a porušení by nemělo být tvořeno z více než 50 % plochy přetržení lícové dýhy. (ČSN EN 49 0173, 2005)

V některých experimentech se projevila nízká adheze některých epoxidových lepidel, kterou však lze zvýšit speciálním přípravkem pro zvýšení adheze na bázi silanu (Raftery et al., 2009).

## 4 VÝCHODISKA ŘEŠENÍ

Pro experimentální měření na tlak, ohyb a smyk byla zvolena zkušební tělíska zhotovená z bukových dýh a jednosměrné uhlíkové tkaniny různých epoxidových pryskyřic. Konstrukce zkušebních tělísek byla zvolena po inspiraci normami ČSN EN 408+A1, které se používají pro zkoušení lamelového lepeného dřeva a ČSN EN 49 0173, které se používá pro zkoušení na delaminaci. Zkušební tělíska pro tuto diplomovou práci byla zhotovena z použitých tělísek pro mou bakalářskou práci.

### 4.1 Přehled použitých materiálů pro výrobu vzorků

„Tento přehled je doslovnou citací materiálů použitých pro výrobu vzorků, s výjimkou smrku, jelikož buková zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny použitá pro měření mechanických vlastností v ohybu, tahu a tlaku byla vyrobena ze zbytků experimentálních vzorků použitých v mé bakalářské práci. Stejně materiály (krom dřeviny) byly použity pro výrobu verifikačních vzorků.“ (Harok, 2013)

#### 4.1.1 Buková dýha

„Dřevina buk byla vybrána, protože je to naše v průmyslu běžně používaná dřevina s nejvyšší pevností ve smyku. Bukové dřevo s rovnými vlákny taktéž doporučuje ČSN EN 205. Listnaté dřeviny mají přibližně 1,5-krát vyšší pevnost než jehličnaté, z našich listnatých dřevin má nejvyšší pevnost ve smyku buk. (Požgaj a kol., 1997). Dýha tloušťky 2,7 mm byla zvolena z důvodu dostatečné tloušťky vzhledem k aplikaci lepidla, dostatečné pevnosti při následovném zatížení a také z důvodu snadného prohřátí dýhy v lisu.“ (Harok, 2013)

#### 4.1.2 Smrk ztepilý

Tato dřevina nebyla použita pro výrobu vzorků nebo samotné měření, byla však použita pro ověření funkčnosti modelu vytvořeného v programu ANSYS. Při vytvoření modelu byly vloženy hodnoty jednotlivých materiálů, tedy bukového dřeva, vrstvy dřeva ovlivněného lepidlem, vrstvy samotného lepidla a uhlíkových vláken prosycených epoxidovou pryskyřicí. Poté došlo k záměně hodnot pro bukové dřevo za hodnoty pro dřevo smrkové. Výsledné hodnoty získané zatížením modelu byly porovnány s výzkumem Andrého a kol. (2012).

### **4.1.3 Uhlíková vlákna**

„Pro výrobu vzorků byla použita jednosměrná uhlíková vlákna o plošné hmotnosti 125 g/m<sup>2</sup>, s lineární hustotou 3500-4000, to je 3,7 g na 1m rovingu a obsahuje cca 50 000 elementárních vláken. Tloušťka těchto vláken je 0,20 mm. Tato tkanina se skládá z uhlíkových vláken spojených polyesterovou mřížkou o váze 3,5 g/m<sup>2</sup>. Pevnost těchto vláken v tahu je 3860 MPa, modul pružnosti v tahu je 342 GPa (Havel Composites, 2015).“ (Harok, 2013). Prodloužení těchto vláken je 1,75 % (Toho Tenax Co., Ltd., 2015)

### **4.1.4 Epoxidová pryskyřice LH 300**

„Tato epoxidová pryskyřice je středně viskózní, vhodná pro laminování dílů s vysokou odolností. Používá se např. při výrobě forem a dílů pro chlazení brzdového systému na vozech Škoda Fabia WRC, kde jsou vystavovány extrémním teplotám a nárazům. Také se používá na letecké modely, formy, nástroje, odlitky a kompozitní díly s vysokou teplotní odolností. Teplotní odolnost je až 160 °C. Doba zpracovatelnosti je od 15 minut do 3 hodin. K vytvrzení této pryskyřice sice dojde při pokojové teplotě, ale je velmi křehká, proto je nutné temperovat při 90°C po dobu minimálně 3 hodin (Havel Composites, 2013)“ (Harok, 2013)

#### **Tužidlo H 303 HT**

„Toto tužidlo je vhodné pro získání teplotní odolnosti až 150°C. Tužidlo se míchá s pryskyřicí ve váhovém poměru 4:1. Doba zpracovatelnosti je 1-1,5 hodiny. Dobrého vytvrzení tohoto systému je dosaženo po době minimálně 3 hodiny při teplotách od 50 °C. Tepelná odolnost je vyšší při temperování minimálně 2 hodiny při 90-100 °C. Lze dosáhnout teplotní odolnosti až 150°C bez výrazné změny parametrů. (Havel Composites, 2013)“ (Harok, 2013)

## **4.2 Výroba vzorků použitých pro bakalářskou práci**

„Vzorky byly vyrobeny z bukové dýhy, jednosměrných uhlíkových vláken a vhodného epoxidové lepidlové směsi. Nejdříve byly formáty bukové dýhy o rozměrech 1200 × 800 mm rozměřeny na 6 částí o rozměrech 398 × 398,5 mm. Po naměření byly dýhy přesně naformátovány na formátovací pile SCM. Následovalo naměření a

nastřihání jednosměrné tkaniny z uhlíkových vláken s nadměrkem nad rozměr bukové dýhy.“ (Harok, 2013)

„Poté bylo na analytických vahách zváženo potřebné množství epoxidového lepidla a tvrdidla. Potřebné množství bylo namícháno podle poměrů uvedených v části lepidla. Doporučený nános epoxidové lepidlové směsi je  $240 \text{ g/m}^2$ . Plocha jedné naformátované dýhy je  $0,159 \text{ m}^2$ . V jednom souboru jsou čtyři tyto plochy pro nános lepidlové směsi. Proto  $0,159 \times 4 = 153 \text{ g}$  lepidlové směsi. Z důvodu vysoké savosti uhlíkové tkaniny bylo použito  $250 \text{ g}$  lepidlové směsi. Pryskyřice LH 3000 má nízkou viskozitu (velkou vsákavost do povrchu dýhy), proto bylo rozhodnuto použít  $300 \text{ g}$  lepidlové směsi na soubor. Lepidlová směs byla nanášena na bukovou dýhu stěrkou pro nanášení lepidlových směsí. Dále byla přiložena jednosměrná uhlíková tkanina. Směr vláken uhlíkové tkaniny byl shodný se směrem vláken bukové dýhy. Stejným způsobem byla nanesena lepidlová směs na středovou vrstvu bukové dýhy (Obr. 4), poté došlo k přiložení na uhlíkovou tkaninu. Směr vláken této vrstvy byl kolmo na směr vláken jednosměrné uhlíkové tkaniny. Následovalo nanesení lepidlové směsi a přiložení jednosměrné uhlíkové tkaniny, opět kolmo na směr vláken bukové dýhy. Na poslední (horní) bukovou dýhu byla nanesena lepidlová směs z jedné strany a poté byla dýha přiložena podélně na směr tkaniny. Dále byla namíchána další lepidlová směs a celý postup se opakoval do složení kompozitů ze všech tří druhů lepidlových směsí.“ (Harok, 2013)

„Do lisu Italpresse SCF 6 bylo potřeba vložit nejméně čtyři soubory, pro rovnoměrné rozložení v lisu. Proto bylo rozhodnuto o vytvoření čtvrtého souboru, bez uhlíkových vláken, který byl následně využit pro porovnání s vzorky s uhlíkovými vlákny. Výroba tohoto souboru byla obdobná jako u vzorků s vlákny, ovšem bez uhlíkových vláken. Z důvodu velkého vsakování lepidla do bukové dýhy bylo použito stejné množství lepidla, i stejný nanášecí postup jako u vzorků s uhlíkovými vlákny. Po lisování se toto množství lepidla ukázalo být zbytečné, protože v konečné fázi došlo k jeho vytlačení. (Harok, 2013)

„Takto vyrobené soubory byly vloženy do lisu a lisovány pod tlakem  $0,4 \text{ MPa/m}^2$ . Vzorky lisované při teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  byly vloženy do lisu, který byl pak uzavřen a následovalo lisování v lisu po dobu 18 hodin. Následovalo vytažení vzorků z lisu. Poté

následovalo lisování vzorků při teplotě 120 °C. Lis byl zahřán na tuto teplotu, pak došlo k otevření lisu, vložení vzorků do lisu, následovalo uzavření lisu a vypnutí vyhřívání. Teplota po 2 hodinách klesla na 90 °C, kdy došlo k opětovnému otevření lisu a rychlému vložení vzorků lisovaných při teplotě 90 °C. Poté byl lis opět uzavřen a vzorky byly lisovány za klesající teploty po dobu 18 hodin.“ (Harok, 2013)

„Po lisování byly z ploten ořezány přesahy, následovalo rozřezání ploten na jednotlivé vzorky o rozměrech 150×20 mm. Poté byly vloženy do šablony na proříznutí dvou vrstev dýhy a jedné vrstvy vláken. Poté následovalo otočení vzorků v šabloně a opětovné proříznutí.“ (Harok, 2013)

### **4.3 Výroba vzorků pro diplomovou práci**

Zkušební vzorky byly vyrobeny ze zbytků vzorků použitých pro mou bakalářskou práci „Vlastnosti lepeného spoje uhlíkových vláken a dřeva“ (Harok, 2013). Byla vyrobena zkušební tělíska pro zkoušku na tlak, ohyb a smyk. Velikost zbytků vzorků přímo ovlivnila velikost nově vyrobených zkušebních vzorků, které jsou uvedeny níže.

#### **4.3.1 Tlakové vzorky**

Tyto vzorky (Obr. 3) měly rozměry 20 × 20 × 7,85 mm a byly určeny pro zatížení na tlak. Vzorky byly vyrobeny na formátovací pile. Nejdříve byl vyroben přípravek z hranolku, do kterého byla vyřezána drážka, následně se do této drážky umístil zbytek zkušební tělíska a provedl se řez, čímž došlo ke zkrácení tělíska na jeho potřebnou délku (Obr. 2). Tyto vzorky byly do zkušebního stroje umístěny tak, aby směr působení tlakové síly byl rovnoběžný se směrem umístění uhlíkových vláken ve vzorku.



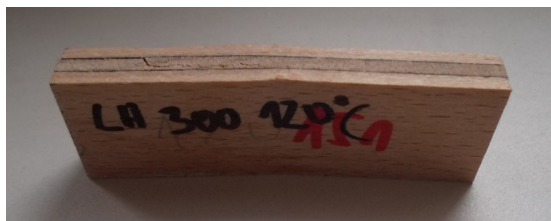
Obr. 2: Krácení vzorků na přesný rozměr v přípravku z hranolku



Obr. 3: Zkušební tělíska pro zkoušku na tlak

### 4.3.2 Ohybové vzorky

Vzorky určené pro zkoušku na ohyb (Obr. 4) měly rozměry  $20 \times 60 \times 7,85$  mm. Byly vyrobeny stejným způsobem jako tlakové vzorky. Vzorek byl určen pro zatížení ve směru kolmém na vlákna působícím na střed vzorku při podepření dvěma podpěrami na jeho koncích. Byl tedy zatížen tříbodovým ohybem.



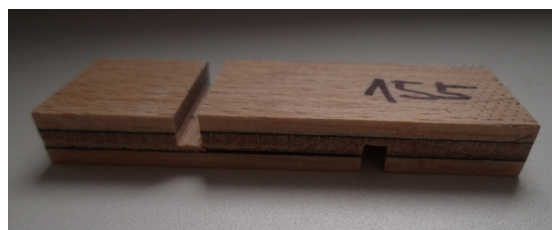
Obr. 4: Zkušební tělísko pro zkoušku na ohyb (po porušení)

### 4.3.3 Smykové vzorky

Zkušební tělíška pro zatížení na smyk (Obr. 6) měla rozměry  $20 \times 60 \times 7,85$  mm. U tohoto typu vzorku byly uprostřed vyříznuty dvě drážky (Obr. 5), jedna z horní a druhá ze spodní strany zkušebního tělíška tak, aby uprostřed vznikla plocha  $20 \times 20$  mm pro zatížení na smyk. Drážka měla tloušťku 3 mm a byla umístěna 17 mm od konce tělíška. Od protilehlého konce byla vzdálenost totožná.



Obr. 5: Vyříznutí drážky do vzorků určených pro zatížení na smyk



Obr. 6: Zkušební tělísko pro zkoušku na smyk

## 5 METODY

### 5.1 Zkušební metody

Při prováděných mechanických zkoušek dřevo reaguje na základě vazeb mezi chemickými složkami dřeva, anatomickou stavbou a také geometrií tělesa (Gandelová, 2009). Měření bylo provedeno na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z050 a naměřené hodnoty byly zpracovány v programu TestExpert V11.02 Master. Pro vytvoření 3D modelů a jejich porovnání s naměřenými hodnotami byl použit program ANSYS 16 a pro zpracování videozáznamu programy Vic – 2D 2009 a Vic – 3D 2010.

#### 5.1.1 Zatížení na tlak

Měření meze pevnosti v tlaku (Obr. 7) ve směru vláken bylo inspirováno ČSN 49 0110 (pro masivní dřevo) a ČSN EN 408+A1 (pro lepené lamelové dřevo). Zkušební tělíska mají plný průřez s rovinnými plochami kolnými k podélné ose tělesa. V polovině výšky zkušebního tělesa se s přesností 0,1 mm měří deformace. Zkušební těleso se zatěžuje rovnoměrně při konstantní rychlosti namáhání anebo konstantní rychlosti pohybu zatěžovací hlavy stroje. Rychlost musí být taková, aby se těleso porušilo za  $1 \pm 0,5$  min. od začátku zatěžování. Maximální zatížení  $F_{max}$  a deformace se měří s přesností 1 %. Po měření se zjišťuje vlhkost tělísek.

Požadavky na zkušební tělíska pro stanovení modulu pružnosti v tlaku podél vláken jsou obdobné s požadavky pro stanovení pevnosti.

Vzorec pro stanovení meze pevnosti v tlaku ve směru vláken (v MPa)

$$\sigma_w = \frac{F_{max}}{a \times b}$$

$F_{max}$  - maximální zatížení (N)

$a, b$  - průřez vzorku (mm)

Vzorec pro stanovení modulu pružnosti v tlaku podél vláken (v MPa)

$$E_{tw} = \frac{\Delta F \times l}{a \times b \times \Delta l}$$

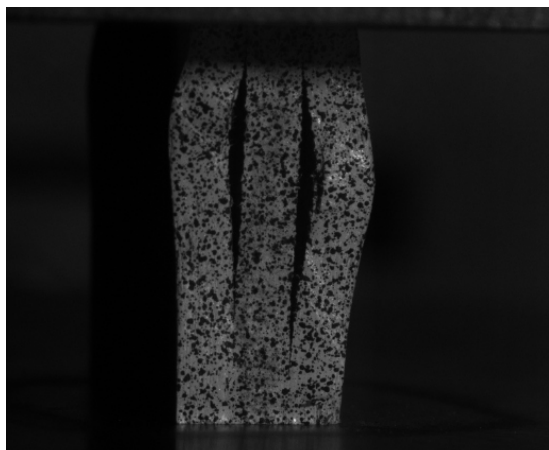
$\Delta F$  – rozdíl mezi horní a dolní hranicí zatížení zkušebního tělesa (N)

$l$  – délka měřicí úsečky v mm

$\Delta l$  - průměrná deformace v mm, připadající rozdílu zatížení  $F$  v N



Zkouška na tlak (Obr. 7) proběhla při posuvu trámce 0,05 mm za sekundu (tedy 3 mm za minutu). Vzorky byly předzatíženy silou 10 N a průběh měření byl snímán 2 kamerami pro 3D vyhodnocení obrazu. Rychlost snímání byla 4 snímky za sekundu. Zkušební těleso bylo umístěno mezi dvě tlačné desky, z nichž byla spodní pevná a horní vyvíjela na zkušební tělísko tlak konstantním posuvem.



Obr. 7: Porušené zkušební tělísko při zkoušce na tlak

### 5.1.2 Zatížení na ohyb

Zatížení na ohyb bylo inspirováno ČSN EN 310 „Desky ze dřeva – stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu“. Jedná se o zkoušku na tříbodový ohyb, kdy se zkušební tělísko položí plochou na dvě válové podpěry s otáčením kolem osy. Ve středu je tělísko zatěžováno hlavou. Rychlost zatížení je konstantní a k porušení tělíska musí dojít za 60±30 s. Průhyb tělíska se měří v jeho středu s přesností 0,1 mm a zatížení se měří s přesností 1 %. Modul pružnosti a pevnosti se vypočítá z lineární části zatěžovací křivky.

Vzorec pro výpočet modulu pružnosti:

$$E_m = \frac{l_1^3 \times (F_2 \times F_1)}{4b \times t^3 \times (a_2 - a_1)}$$

Vzorec pro výpočet pevnosti:

$$f_m = \frac{3 \times F_{max} \times l_1}{2b \times t^2}$$

$F_2 - F_1$  – přírůstek zatížení v zatěžovací části přímky  $F_{max}$  - maximální zatížení (N)

$a_2 - a_1$  – přírůstek průhybu ve střední části

$b$  - šířka zkušební tělesa (mm)

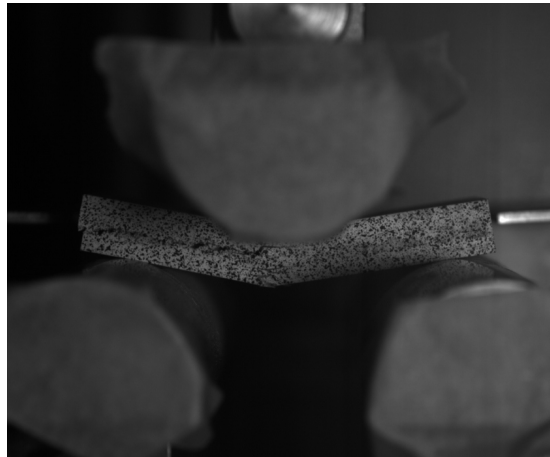
$l_1$  – vzdálenost podpěr (mm)

$t$  - tloušťka zkušební tělesa (mm)

$l_1$  – vzdálenost podpěr (mm)

$l_1$  – vzdálenost podpěr (mm)

Při zkoušce zatížení na ohyb byl rozpon podpěr 50 mm a posuv horního trámce působícího ve středu zkušební tělíska byl při 6 mm / min konstantní. Průběh zkoušek (Obr. 8) byl snímán při rychlosti snímání 2 snímky za sekundu. Vzhledem k 60 mm délce zkušebních tělísek bylo zatížení spíše ohybem v tlaku. Tudíž se nelze striktně řídit normami popisujícími zkoušení tělísek v ohybu, požadující délku tělíska rovnající se alespoň 19 násobku průřezu zkušební tělíska.



*Obr. 8 Porušené zkušební tělíska při zkoušce na ohyb*

### **5.1.3 Zatížení na smyk**

„Dřevo je anizotropní materiál, který má různou smykovou pevnost ve všech třech základních směrech. Smyk se běžně vyskytuje při kroucení, při ohybu dřeva nebo při jednoduchém smyku. Zkouška na smyk (Obr. 9) je poměrně obtížná, protože jednosměrný smyk se bez spolupůsobení jiných napětí nevyskytuje. Při experimentálním měření byla použita zkouška pro pevnost dřeva v jednoduchém smyku. U této zkoušky působíme na zkušební těleso dvěma stejně velkými silami, které vyvolávají vzájemné posunutí dvou protilehlých průřezů. (Poždgaj et al.)“ (Harok, 2013)

„Při zkoušce smykové síly působí ve směru vláken v tangenciální rovině a kolmo na směr vláken v radiální rovině, což je způsobeno výrobou vzorků překližováním. Smyková pevnost dřeva ve směru vláken v radiální a tangenciální rovině je poměrně malá, pohybuje se od 6 do 19 MPa. Smyková pevnost dřeva listnáčů je asi 1,5 krát vyšší, než u dřeva jehličnanů. Smyková pevnost listnáčů v tangenciální rovině je při porovnání s radiální rovinou o 10-30 % vyšší. Dřevo jehličnanů má v obou rovinách

tuto smykovou pevnost přibližně stejnou. Smyková pevnost ( $\tau$ ) dřeva ve směru kolmo na vlákna v radiální a tangenciální rovině je nižší než ve směru vláken, pohybuje se od 3 do 8 MPa. (Poždgaj et al.)“ (Harok, 2013)

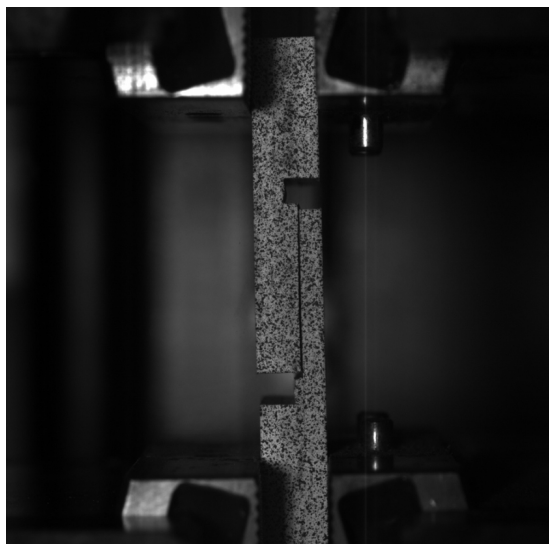
„Před vložením do zkušebního stroje byla změřena délka a šířka smykové plochy. Při zkoušce zkušební stroj Zwick zaznamenával maximální sílu (N), práci (J), tuhost (N/mm) a posun do porušení vzorků neboli do doby dosažení maximální síly (mm). Mez pevnosti ve smyku byla vypočítána podle vzorce pro výpočet meze pevnosti ve smyku ve směru vláken v tangenciální nebo radiální rovině uvedeného např. v ČSN 49 0118. Po provedení zkoušky bylo odhadnuto množství vláken, které zůstalo přilepeno na uhlíkové tkanině.“ (Harok, 2013)

$$\tau = \frac{F_{max}}{b \times l}$$

$F_{max}$  - maximální smykové zatížení (N)  $l$  - délka smykové plochy (mm)

$b$  - šířka smykové plochy (mm)

První zkušební vzorek byl proveden při konstantní rychlosti posunu horního trámce v tahu při 2 mm za sekundu, avšak průběh zkoušky byl příliš pomalý, proto byla rychlost posuvu horního trámce zvýšena na 5 mm za minutu. Tato rychlost posuvu se ukázala jako dostačující, aby došlo k porušení tělíska doporučeného v normě. Průběh zkoušek byl sledován videokamerou s rychlostí snímání 4 snímky za vteřinu. Zkušební tělísko bylo uchyceno v čelistech stroje (Obr. 9), z nichž byla spodní čelist pevně uchycena k rámu zkušebního stroje a horní čelist vykonávala konstantní pohyb vzhůru, kterým působila na uchycené zkušební tělísko na tah. Vzhledem ke geometrii vzorku docházelo k namáhání středu zkušebního tělíska na smyk. Zkouška na smyk byla vykonána bez předzatížení a nebylo měřeno extensometry.



*Obr. 9 Porušené zkušební tělísko při zkoušce na smyk*

## **5.2 Obecný charakter porušení vzorků**

Pro zkoušku na smykovou pevnost spoje byly předpokládány následující možnosti porušení vzorků:

### **Delaminace**

„Při zkouškách nebo experimentálním měření na smykovou pevnost spoje může dojít k rozlepení nebo roztržení lepeného spoje v lepidle. Tento jev se nazývá delaminace. Za delaminaci je považováno porušení soudržnosti uvnitř vrstvy lepidla; porušení lepeného spoje přesně mezi vrstvou lepidla a dřevem (v tomto případě nesmí zůstat spojená žádná vlákna dřeva s vrstvou lepidla); případně porušení dřeva, které je v rozmezí první ze dvou buněčných vrstev sousedících s vrstvou lepidla a jehož charakter není ovlivněn odklonem vláken anebo strukturou letokruhů. Je charakterizováno hebkým vzhledem dřeva, která ohraničují mezi povrchem dřeva a vrstvou lepidla. (ČSN EN 73 2835, 2002)“ (Harok, 2013)

### **Porušení ve dřevě**

„Porušení by mělo zpravidla nastat ve dřevě nebo v lepené spáře smykové plochy, tj. mezi zářezy pilou. Porušení by nemělo vzniknout mimo tuto oblast a porušení by nemělo být tvořeno z více než 50 % plochy přetržení lícové dýhy. (ČSN EN 49 0173, 2005)“ (Harok, 2013)

## **Porušení ve vrstvě uhlíkových vláken**

„Definici porušení ve vrstvě uhlíkových vláken můžeme odvodit z definice pro porušení ve dřevě. Porušení by tedy mělo zpravidla nastat ve vrstvě uhlíkových vláken nebo v lepené spáře této vrstvy. Na vrstvě lepidla by měli zůstat části uhlíkových vláken.“ (Harok, 2013)

### **5.3 Modelování vzorků v programu ANSYS**

ANSYS je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze jednak provádět jednotlivě anebo zároveň v multifyzikálním prostředí. ANSYS se používá pro provádění kontrolních výpočtů, pro citlivostní a optimalizační analýzy a také výpočty spolehlivosti. Tento program je založen na metodě konečných prvků (FEM). (SVS FEM, 2015, ANSYS, Inc., 2015)

Všechny zkoušené vzorky byly vymodelovány ve verzi ANSYS 16 v prostředí „ANSYS Mechanical“ určeném pro strukturální analýzu. Prostředí se používá pro lineární, nelineární a dynamické analýzy (ANSYS, Inc., 2015). Tyto modely byly zkoušeny strukturálními zkouškami. Rozměry modelovaných 3D vzorků byly rozdílné podle zvolené zkoušky a jsou uvedeny níže. Všechny vzorky se skládaly z těchto vrstev: vrstva dřeva tloušťky 1,65 mm, vrstva dřeva ovlivněného lepidlem tloušťky 0,7 mm, vrstva lepidla tloušťky 0,1 mm, vrstva uhlíkových vláken tloušťky 0,2 mm, vrstva lepidla tloušťky 0,1 mm, vrstva dřeva ovlivněného lepidlem tloušťky 0,7 mm, vrstva dřeva tloušťky 0,95 mm, vrstva dřeva ovlivněného lepidlem tloušťky 0,7 mm, vrstva lepidla tloušťky 0,1 mm, vrstva uhlíkových vláken tloušťky 0,2 mm, vrstva lepidla tloušťky 0,1 mm, vrstva dřeva ovlivněného lepidlem tloušťky 0,7 mm, vrstva dřeva tloušťky 1,65 mm. Jednotlivé vrstvy měly přiřazeny své materiálové modely, v modelu zkušebního tělíska se tedy nacházely čtyři různé materiálové modely a to pro dřevo, dřevo ovlivněné lepidlem, lepidlo a uhlíková vlákna prosycené lepidlem. Vrstvy byly mezi sebou spojeny za pomoci funkce „glue“. Jelikož se jednalo o 3D modely, byl pro vymodelování chování jednotlivých materiálů při zatížení použit element SOLID 185.

V kapitole s názvem Současný stav řešené problematiky je uvedeno mnoho zahraničních experimentů s modelováním kompozitních materiálu ze dřeva a vláknitých

materiálů, avšak výsledky není možné bez výhrad převzít, jelikož byly modelovány masivní nebo lepené nosníky, vyztužené uhlíkovými vlákny. V mnoha případech došlo k zanedbání lepené spáry u vytvořených modelů. Lepenou spáru lze zanedbat pouze v případě, kdy je experimentálně dokázáno, že k selhání dojde v jiné vrstvě lepeného materiálu, např. ve dřevě. U dřevěných nosníků je to častým způsobem selhání, avšak z experimentů provedených na Mendelově univerzitě v Brně a jiných výzkumech provedených v zahraničí s malými zkušebními tělisky (André, et al, 2012) je patrné, že často dochází k selhání v lepené spáře delaminací.

Zkušební těliska byla pro zjednodušení vymodelována jako lineárně elastický materiál, jelikož přesné vymodelování zkušebních tělísek by vyžadovalo naměření všech potřebných konstant a velmi dobrou znalost práce v tomto programu.

Při porozumění lepenému spoji mezi těmito materiály mohou být deklarovány vlastnosti pro konkrétní produkty, které bude možné garantovat. To by mohlo vést velkému rozšíření ke konstrukčním účelům a použití v mnoha různých výrobcích. Budoucnost těchto materiálů je tedy v kombinaci jejich vlastností a nemusí se jednat pouze o vlastnosti mechanické. Vhodným případem je kompozit, kdy mechanické vlastnosti budou z větší části zajišťovat uhlíková vlákna a dřevo bude použito kvůli jeho estetickým, tepelně-izolačním a dalším užitným vlastnostem. Dřevo i uhlíková vlákna mají také jednu mechanickou vlastnost, která je v porovnání s ostatními materiály nezanedbatelná a tou je rázová houževnatost.

### **5.3.1 Materiálové vlastnosti použitých materiálů**

Hodnoty byly do programu ANSYS zadány v jednotkách Si – metrech, Pascálech a Newtonech. Tyto materiály byly modelovány jako lineárně elastické, uhlíková vlákna a dřevo byly modelovány jako ortotropní materiály a epoxidové lepidlo bylo vymodelováno jako izotropní materiál.

Při zadávání materiálových vlastností ortotropních materiálů je však potřeba dodržet správné zadání těchto hodnot do programu ANSYS, aby experimentálně naměřené hodnoty pro P, R, T směr odpovídaly zadaným hodnotám pro P, R, T směr vymodelovaného tělesa, ve vztahu k orientaci vláken jednotlivých vrstev materiálů ve zkušebním tělisku vymodelovaném v programu ANSYS.

### 5.3.1.1 Buková dýha

Materiálové vlastnosti pro buk dle Hearmona (1948) potřebné pro lineární elastický model ortotropního materiálu:

EX 1,37E+10	PRXY 0,073	GXY 4,6E+8
EY 2,24E+9	PRYZ 0,044	GYZ 1,06E+9
EZ 1,44E+9	PRXZ 0,49	GXZ 1,61E+9

kde  $E_i$  jsou Youngovy moduly pružnosti (Pa) pro jednotlivé směry při normálových namáháních (tah, tlak, ohyb),  $PR_{ij}$  jsou Poissonova čísla (koeficienty příčné deformace, vyjadřuje tedy schopnost materiálu měnit tvar),  $G_{ij}$  jsou smykové moduly při tangenciálním namáháním (smyk a krut) (Mendelu, 2015).

### 5.3.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou do programu ANSYS zadávána jako kompozit skládající se z vláken a epoxidové pryskyřice, kterou byla vlákna prosycena. Proto jsou v souřadnici Z uvedeny hodnoty pro epoxidovou pryskyřici. Pro souřadnice X a Y byly hodnoty převzaty z Performance COMPOSITES (2015), jelikož tato měřená uhlíková vlákna měla velmi podobné vlastnosti jako uhlíková vlákna použitá. Převzít tyto hodnoty bylo možné z důvodu, že uhlíková vlákna jsou materiálem s nejvyšším modulem pružnosti a smykovými moduly. Materiálové vlastnosti pro uhlíková vlákna potřebné pro lineární elastický model ortotropního materiálu byly následující:

EX 175E+9	PRXY 0,3	GXY 5E+9
EY 8E+9	PRYZ 0,3	GYZ 5E+9
EZ 3,45E+9	PRXZ 0,35	GXZ 1,28E+9

### 5.3.1.3 Epoxidová lepidla

Materiálové vlastnosti potřebné pro vrstvu lepidla lineárního elastického izotropního modelu byly převzaty od R. Younese a jeho týmu (2012):

EX 3,45E+9	PRXY 0,35
------------	-----------

Izotropní materiálový model vyžaduje pouze Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo, jelikož jeho vlastnosti jsou ve všech směrech namáhání stejná.

#### 5.3.1.4 Smrková dýha

Materiálové vlastnosti pro smrk dle Hearmona (1948) potřebné pro lineární elastický model ortotropního materiálu:

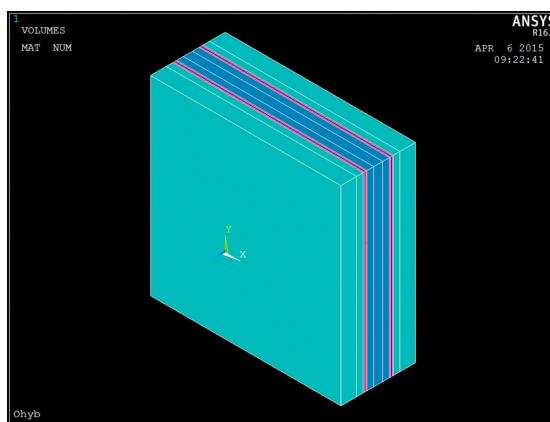
EX 1,16E+10	PRXY 0,029	GXY 3,9E+7
EY 9E+8	PRYZ 0,02	GYZ 7,2E+8
EZ 5E+8	PRXZ 0,37	GXZ 7,5E+8

#### 5.3.2 Vymodelování a zatížení modelů

Modely byly vypracovány tak, aby co nejlépe simulovaly upnutí a zatížení ve zkušebním stroji.

##### 5.3.2.1 Tlakové vzorky

Tlaková tělíska (Obr. 10) měla rozměry  $20 \times 20 \times 7,85$  mm (š  $\times$  v  $\times$  h). Tato tělíska byla ze spodní strany ukotvena ve dvou bodech ve všech osách a celá spodní plocha byla ukotvena v ose X. Zatížení na tlak bylo vymodelováno po celé horní ploše vzorku a jeho velikost byla zadána posuvem (simulující posuv tlačné plochy).



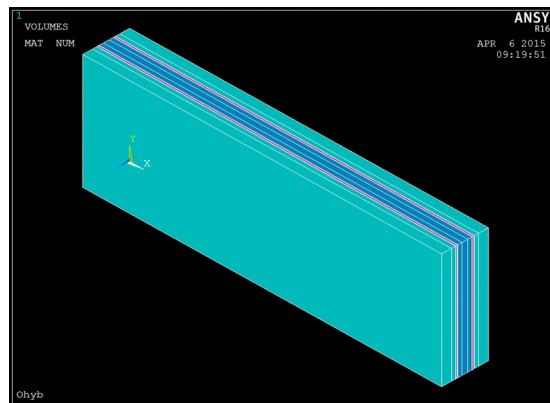
Obr. 10 Zkušební tlakové tělísko vymodelované v ANSYS

##### 5.3.2.2 Ohybové vzorky

Ohybová tělíska (Obr. 11) měla rozměry  $20 \times 60 \times 7,85$  mm (š  $\times$  v  $\times$  h). Tato tělíska byla uprostřed ukotvena ve třech uzlech na bočních hranách horní plochy s boky proti posunu ve všech osách a mezi těmito uzly pak body v ose Y. Na hranách spodní plochy s boky pak došlo k ukotvení 9. a 10. uzlu z levé i pravé strany v ose Z. Na tyto body a na body mezi nimi pak bylo aplikováno zatížení v ose Y, které bylo definováno



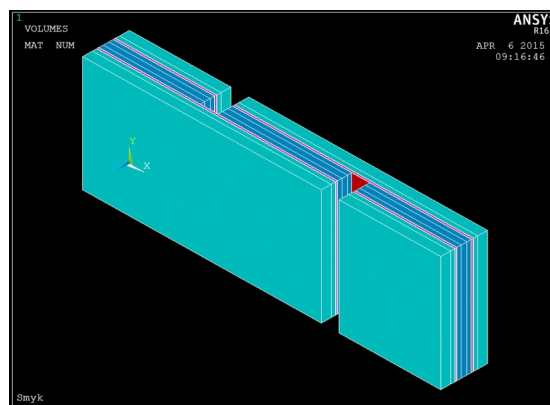
posuvem. Tyto body simulovaly místa kontaktů (a následných otláčení) zkušebního tělíska se zatěžovací hlavou a podpěrami (půlkruhových průřezů).



Obr. 11 Zkušební ohybové tělísko vymodelované v ANSYS

### 5.3.2.3 Smykové vzorky

Smyková tělíska Obr. 12 měla rozměry  $20 \times 60 \times 7,85$  mm ( $\text{š} \times \text{v} \times \text{h}$ ) a z horní i spodní strany byla vyříznuta drážka tak, aby uprostřed tělíska vznikla smyková plocha o délce 20 mm. Proříznuty byly vždy dvě vrstvy dých a jedna vrstva uhlíkových vláken. Tato tělíska byla na spodním konci v povrchových vrstvách pevně ukotvena ve všech osách a na horním konci byla ukotvena v ose  $Y$  a  $Z$ . V ose  $X$  pak byl model zatížen tahovou silou. Čelisti simulovala aplikace sil do výšky 16 uzlů od konce zkušebního tělíska přes celou jeho šířku = 20 mm, do hloubky 1 uzlu z obou stran.



Obr. 12 Zkušební smykové tělísko vymodelované v ANSYS

### 5.3.3 Vysít'ování (mesh)

Vysít'ování, anglicky mesh, udává hodnotu hustoty elementů, v tomto případě SOLID 165 vyjádřenou vzdáleností těchto elementů od sebe. Čím je tato síť hustší, tím je chování modelu realističtější, avšak se zvyšující se hustotou této sítě se navyšuje čas potřebný pro výpočet chování modelu. Hustota sítě byla ve všech případech zvolena 0.0005 m, tj. 0,5 mm.

### 5.4 Optická analýza metodou DIC

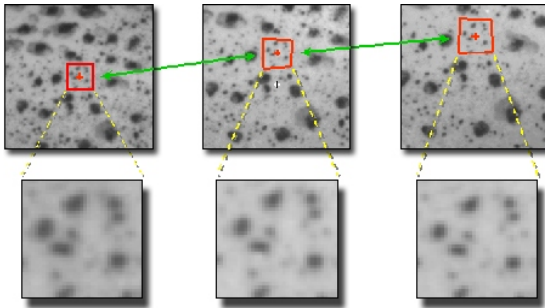
Metoda DIC znamená Digital Image Correlation, v překladu digitální korelace obrazu, která měří deformace na povrchu objektu na základě nasnímaného obrazu. Tato metoda rozdělí povrch tělesa na síť čtverců, ve kterých se nacházejí malé body (tečky) (Obr. 13), které byly nastříkány na povrch tělesa – např. černé tečky na bílém pozadí a sleduje jejich pohyb při zatížení (viz. Obr. 14). Pohyb teček vzniká deformací vzorku. Povrch vzorku je snímán jednou kamerou (pro 2D vyhodnocení) nebo dvěma kamerami (pro 3D vyhodnocení). Pro 2D vyhodnocení je snímán pouze povrch vzorku a program vyhodnotí změny na povrchu vzorku pouze v jedné (snímané) rovině. Pro 3D vyhodnocení jsou snímány i boky vzorků a dochází k vyhodnocení změn v prostoru. Program vyhodnocuje poměrné deformace ve vzorku, průběh poměrných deformací, posuny a rychlosti posunů (correlatedsolutions.com, 2015).



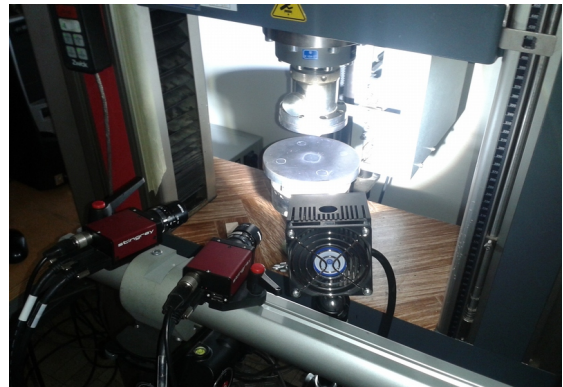
Obr. 13: Aplikace „patternu“ pro sledování deformací při DIC analýze

Pro zpracování nasnímaného obrazu byl použit program Vic 3D – 2010. Tento systém používá dvě 5 MP kamery pro zachycení obrazu zatížení snímaného tělesa velikosti od 1 mm do 10 m. Při správném rozestavení kamer je schopen snímat objekty v rozsahu 360°. Pro správné zpracování obrazu je třeba nejprve provést kalibraci kamer a uložit kalibrační vzorek, který se pak použije při zpracovávání obrazu. Tímto systémem byla snímána normálová deformace  $E_{xx}$  (napětí ve směru  $X$ , kladná čísla naznačují tahové napětí, záporná stlačení),  $E_{xy}$  (smykové deformace),  $E_{yy}$  (napětí ve

směru  $Y$ ),  $U$  (posun podél osy  $X$ ) a  $V$  (posun podél osy  $Y$ ). Obr. 15 zachycuje rozestavení kamer pro 3D záznam obrazu při zatížení tlakem.



Obr. 14 Princip funkce digitální korelace obrazu - sledování bodů (correlatedsolutions.com, 2015)



Obr. 15 Zkušební stroj připraven k tlakové zkoušce se současným snímáním obrazu metodou DIC

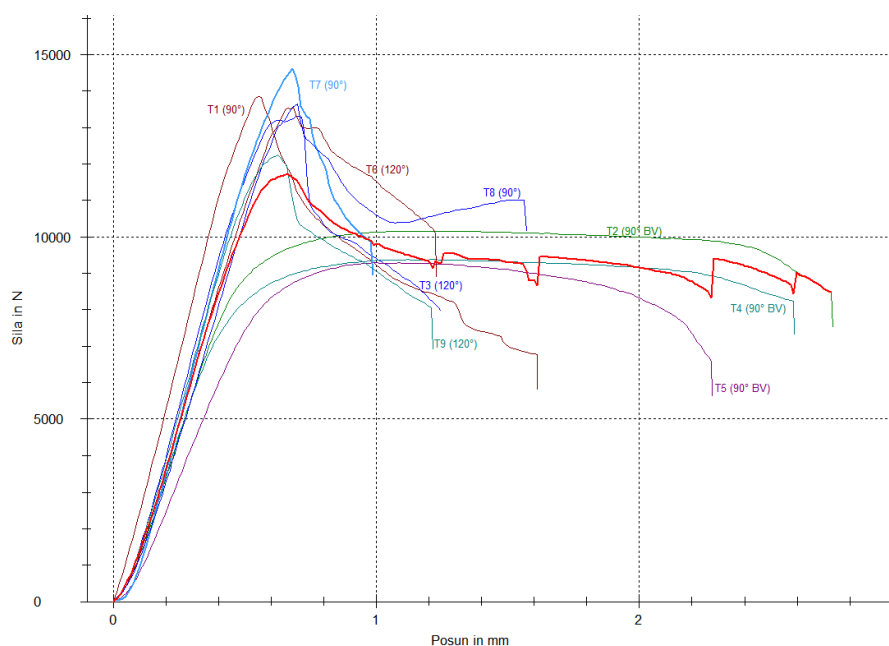
## 6 VÝSLEDKY PRÁCE A JEJICH UPLATNĚNÍ

### 6.1 Naměřené výsledky

Níže jsou uvedeny výsledky pro všechna měřená zkušební tělíska. Z výsledků byl vyhodnocen vliv lisovacích teplot na vyztužení vzorků a lisovací teplota s nejlepšími výsledky. Naměřené výsledky byly uvedeny v pracovních diagramech a tabulkách.

#### 6.1.1 Tlakové vzorky

Při porovnání naměřených hodnot (Obr. 16 a Tab. 1) je patrné, že nejlepšího vyztužení dosáhly vzorky lisované při teplotě 90 °C. Druhých nejlepších výsledků dosáhly vzorky lisované při teplotě 120 °C. Nejhorších výsledků dosáhly vzorky nevyztužené, lisované při teplotě 90 °C.



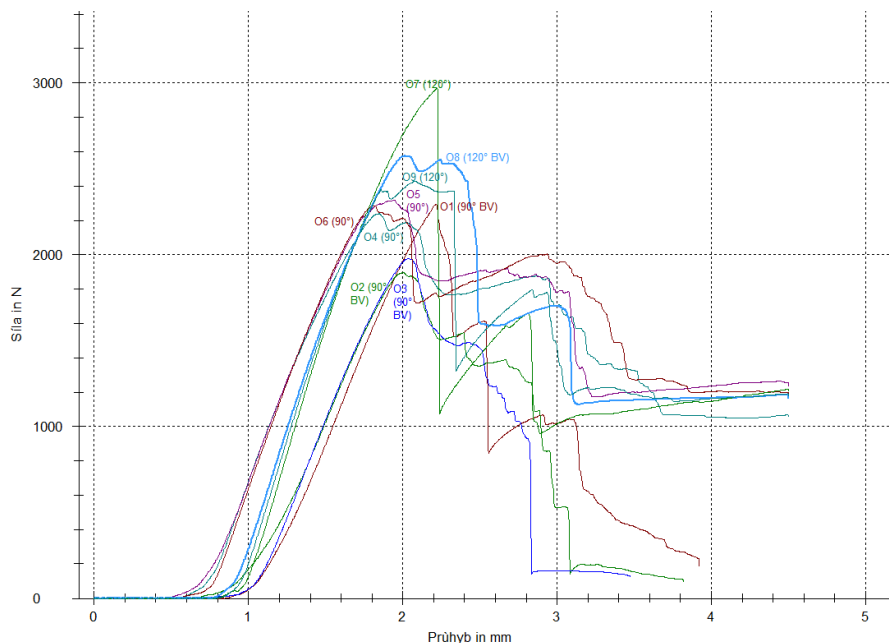
Obr. 16: Pracovní diagram průběhu zatížení vzorků při zkoušce na tlak

Tab. 1: Naměřené hodnoty pro vzorky zatížené na tlak

Nr	Oznac vzorku	Fmax	$\epsilon$ -F max	$W_{Rm}$	EMod
		N	%	Nmm	MPa
T2	103 – 90 bv	10167,64	7,79	8825,69	808,71
T4	101 – 90 bv	9378,17	8,03	8602,19	2027,19
T5	106 – 90 bv	9290,23	6,6	6008,05	1706,59
T1	88 – 90	13856,74	3,68	4046,96	2697,41
T7	86 – 90	14621,54	4,55	4987,42	2639,46
T8	88 – 90	13638	4,68	4827,06	2193,36
T6	144 – 120	13552,95	4,56	4781,21	2358,7
T3	145 – 120	13299,04	4,7	5348,64	980,23
T9	145 – 120	12239,46	4,17	4097,03	2404,43

## 6.1.2 Ohybové vzorky

Při porovnání naměřených hodnot (Obr. 17) je patrné, že nejlepšího vyztužení dosáhly vzorky lisované při teplotě 120 °C, mírně horšího vyztužení dosáhly vzorky lisované při 90 °C. Nejhorších výsledků dosáhly opět vzorky nevyztužené, lisované při 90 °C.



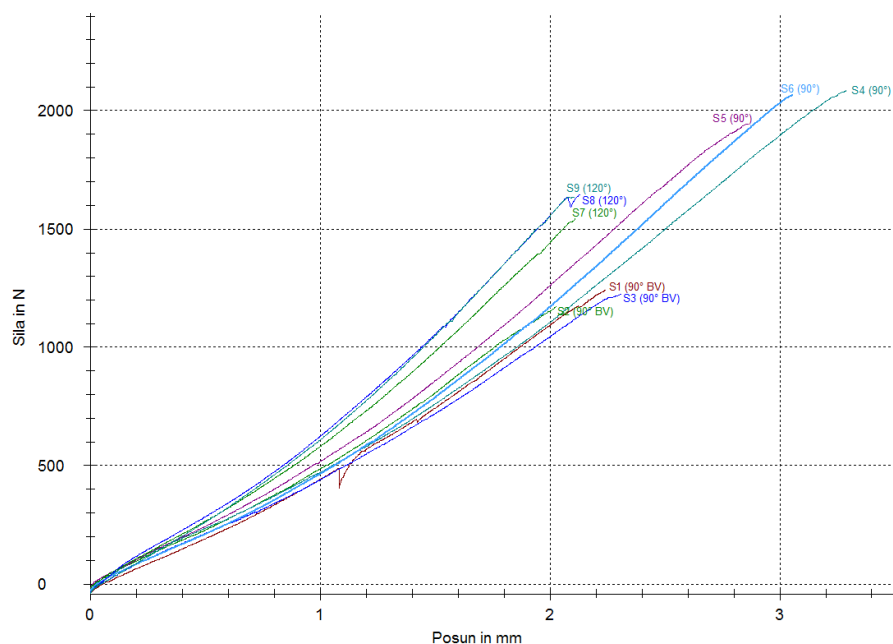
Obr. 17: Pracovní diagram průběhu zatížení vzorků při zkoušce na ohyb

Tab. 2: Naměřené hodnoty pro vzorky zatížené na ohyb

Nr	Oznac vzorku	Fmax N	e-F max %	EMod MPa	Density kg/m <sup>3</sup>	Weight g	WRm Nmm	Tloušťka vzorku mm	Šířka vzorku mm	Délka Vzorku mm
O1	107_90bv	2293	14,76	184	856	8,1	1393	7,68	20,58	59,87
O2	106_90bv	1898	13,36	151	822	7,9	1063	7,78	20,55	60,16
O3	105_90bv	1979	13,57	207	799	7,69	1090	7,78	20,59	60,04
O4	90_90	2238	12,31	227	868	8,6	1434	8,09	20,45	59,87
O5	85_90	2318	12,96	211	890	8,79	1694	8,06	20,43	60
O6	86_90	2283	12,14	231	919	9,26	1381	8,07	20,53	60,81
O7	142_120	2969	14,82	284	962	9,23	2157	7,86	20,39	59,83
O8	146_120	2575	13,39	262	884	8,5	1614	7,97	20,16	59,83
O9	151_120	2426	13,87	272	895	8,65	1724	7,86	20,51	59,89

## 6.1.3 Smykové vzorky

Při porovnání naměřených hodnot (Obr. 18 a Tab. 3) je patrné, že nejlepšího vyztužení dosáhly vzorky lisované při teplotě 90 °C, druhých nejlepších výsledků dosáhly vzorky lisované při 120 °C. Nejhorších výsledků dosáhly opět vzorky nevyztužené, lisované při 90 °C.



Obr. 18: Pracovní diagram průběhu zatížení vzorků při zkoušce na smyk

Tab. 3: Naměřené hodnoty pro vzorky zatížené na smyk

Nr	Oznac vzorku	Vyska smyk plochy mm	Sirka smyk plochy mm	Rm	EMod	Fmax
				MPa	MPa	N
S1	101-90bv	20,39	20,39	2,99	549,61	1241,15
S2	99-90bv	20,19	20,55	2,83	599,91	1171,01
S3	94-90bv	19,71	20,57	3,02	571,68	1223,07
S4	83-90	20,5	20,5	4,97	656,5	2087,4
S5	91-90	20,68	20,55	4,58	712,67	1933,66
S6	82-90	20,41	20,44	4,95	728,08	2066,09
S7	155-120	20,31	20,5	3,71	758,11	1544,17
S8	149-120	20,31	20,36	3,98	811,92	1645,32
S9	143-120	20,53	20,53	3,88	836,71	1636,85

## 6.2 Analýza namáhání a porušení zkušebních tělísek optickou metodou DIC

V podkapitolách níže jsou uvedeny naměřené výsledky ve formě pracovních diagramů zachycujících napětí (v N) a posunutí (v mm) pro skupiny vzorků, a ve formě obrázků zachycujících poměrné deformace, smykové poměrné deformace nebo posunutí (dále jen zkoumané veličiny) ve vzorcích v průběhu měření jednotlivých vzorků při 10 % síly meze pevnosti, mezi úměrnosti a mezi pevnosti. Tyto obrázky byly vyhotoveny ze souboru snímků zachycujícího průběh měření vzorků zpracováním snímků v programu VIC 2D – 2009 nebo VIC 3D – 2010. Pracovní diagramy zachycující průběh měření byly vytvořeny v programu TestExpert. Obrázky zpracované

programem VIC byly kvůli jejich přílišné rozměrnosti oříznuty a obsahují pouze vyhodnocovanou pracovní část vzorku, což je dostatečné pro vyhodnocení vývoje zkoumaných veličin. Tyto obrázky tudíž neobsahují barevnou škálu, která by jednotlivým barvám použitým pro zobrazení různých velikostí zkoumaných veličin přiřadila numerickou hodnotu. Obrázky s touto škálou jsou přiloženy v elektronické podobě na DVD.

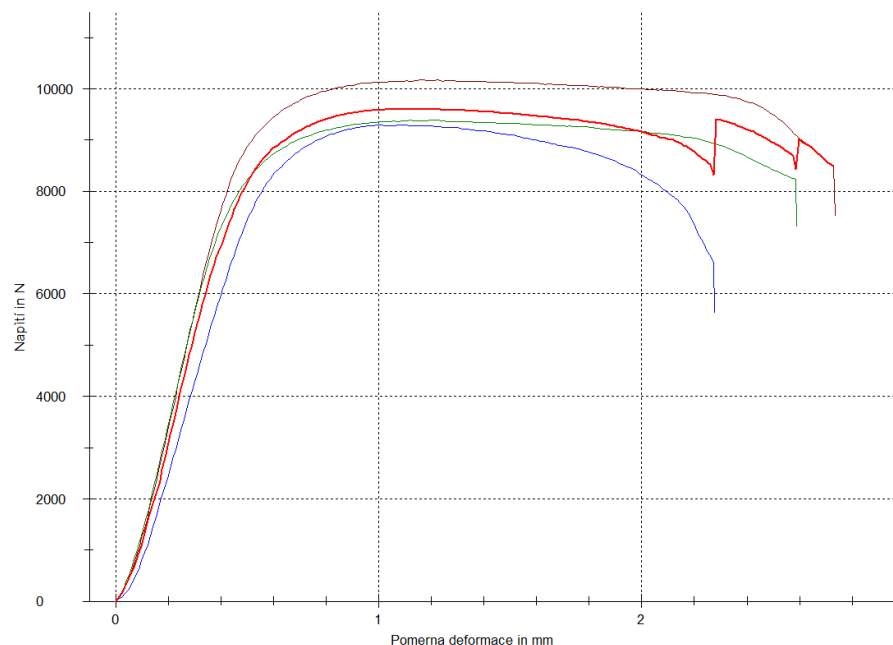
### 6.2.1 Tlakové vzorky

Tlakové vzorky měly povrchové vrstvy bukové dýhy a uhlíková vlákna orientovány rovnoběžně s podélnou osou zkušebního vzorku a středová vrstva dýhy byla na ně orientována kolmo. Síla tedy působila na boční vrstvy dýh a uhlíkových vláken podél vláken (dále jen bočních vrstev), a u středové vrstvy dýhy napříč vláken s určitým odklonem v radiálním směru. Při tlakové zkoušce dochází k namáhání všech vrstev zároveň, avšak ve vzorku dochází k rozdílným velikostem zkoumaných veličin v různých místech vzorků, jelikož byly použity rozdílné materiály s rozdílnými vlastnostmi ve všech směrech (s výjimkou lepidla). Dřevo má při zatěžování silou kolmo na směr vláken mnohem nižší mez pevnosti a úměrnosti (potažmo odolnost vůči poměrným deformacím), nežli v podélném směru. Snímky  $E_{xx}$  zachycují poměrné deformace v ose  $X$ , tedy v šířce vzorku. Na těchto snímcích je nejpatrnější rozšíření a zúžení v jednotlivých vrstvách, stejně jako na snímcích  $E_{yy}$ , které zachycují poměrné deformace na ose  $Y$ , tedy ve výšce vzorku. Mezi těmito poměrnými deformacemi v jednotlivých osách dochází ke smykovým poměrným deformacím. Zúžení při poměrných deformacích je vyznačeno fialově a rozšíření červeně. Poměrné smykové deformace jsou patrné na snímcích  $E_{xy}$ . Posunutí  $U$  zachycuje posun vláken v ose  $X$  a posunutí  $V$  zachycuje posun vláken v ose  $Y$ .

Obecně u všech zkušebních vzorků je vývoj sledovaných veličin při zatížení do meze pevnosti velmi podobný. Nejprve dochází k poměrně velkým elastickým deformacím ve středové dýze, čímž dojde ke koncentraci napětí v boční vrstvě (což je patrné na snímcích zachycujících mez úměrnosti), kde později dojde k místním deformacím formou zakřivení vláken (elastickým deformacím). Po překročení meze úměrnosti dochází k deformaci buněčných stěn a celých vláken (tedy k plastickým deformacím). K porušení dochází ve vzorku v místě největších poměrných deformací a

poměrných smykových deformací. U nevyztužených vzorků je porušení vzorků podobné porušení masivních vzorků, kdy dochází k posunu dřevních vláken a zborcení vzorků. Poté může dojít k delaminaci lepené spáry. U vzorků vyztužených pak po překročení meze pevnosti obvykle dochází buď k porušení ve dřevě nebo k delaminaci v lepené spáře. Po porušení ve dřevě pak obvykle dojde k přesunu napětí do lepené spáry (u vzorků lisovaných při 120 °C po delaminaci první lepené spáry k přesunu napětí do druhé lepené spáry) a následně dojde k její delaminaci. Detailnější popis průběhu zkoušek je uveden u jednotlivých zkušebních vzorků níže.

### 6.2.1.1 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C bez vláken



Obr. 19: Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově – T2, modře - T5, zeleně - T4.

#### 6.2.1.1.1 Zkušební vzorek T2 (označení 103)

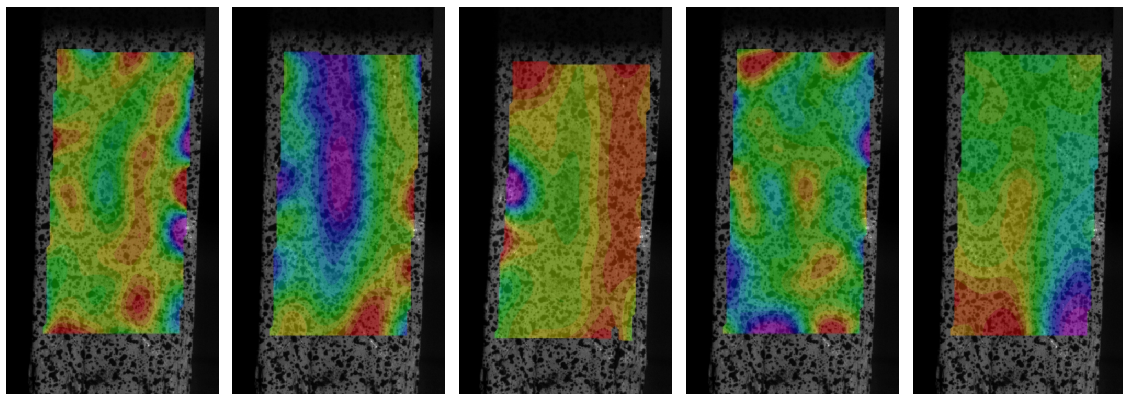
Při zatížení zkušebního tělíska nevyztuženého uhlíkovými vlákny dochází zpočátku k relativně rovnoměrnému zatížení pracovní části zkušebního vzorku při zatížení 10 % síly MOR. Již při tomto zatížení však na čelech vzorku dochází ke vzniku elastických poměrných deformací (PD) a poměrných smykových deformací (PSD).

Při mezi úměrnosti dochází k zeštíhlení vzorků v jeho středové vrstvě (Obr. 21 fialově) a k rozšíření v pravé vrstvě dýhy ve spodním rohu (červeně) vlivem působení PD. Ve spodních rozích vzorků také působí PSD (Obr. 25), které také působí ve



středové vrstvě. Při dosažení meze pevnosti (MOR) dochází k velkému zúžení v levé dýze v její horní třetině, což je viditelné na Obr. 22 a Obr. 28 (fialově  $E_{xx} = -0,0278$ ,  $E_{yy} = -0,0474$ ) a v okolí tohoto místa působí PSD (Obr. 25 červeně ve velikosti 0,0069 až 0,009) stejně jako v pravém spodním rohu (fialově -0,246). V pravé dýze dochází k patrnému rozšíření, které je viditelné na Obr. 22 (světle červeně 0,0082), stejně jako v levém horním rohu vzorku (tmavě červeně 0,0106), což bylo způsobeno poměrnými deformacemi.

Po překročení meze pevnosti dochází k porušení ve dřevě v pravé spodní části dýhy trhlina a ve střední a levé dýze dochází k velkým PD. Obr. 35 – 37 zachycují vývoj porušení ve dřevě při zvyšování síly a při PSD. K porušení v těchto místech vzorků došlo z důvodu působení poměrně velkých PD a PSD nebo v jejich těsné blízkosti.



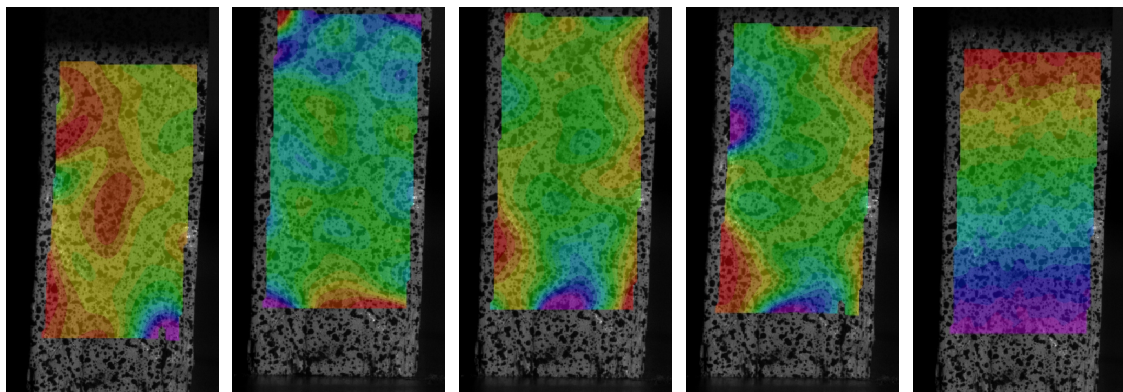
Obr. 20 T2 –  $E_{xx}$  – 10 %  
(č. 0,00012,  
f. -0,000645)

Obr. 21 T2 –  $E_{xx}$  – MÚ  
(č. 0,00154,  
f. -0,00032)

Obr. 22 T2 –  $E_{xx}$  – MOR  
(č. 0,0106,  
f. -0,0278)

Obr. 23 T2 –  $E_{xy}$  – 10 %  
(č. 0,000215,  
f. -0,00028)

Obr. 24 T2 –  $E_{xy}$  – MÚ  
(č. 0,00182,  
f. -0,00164)



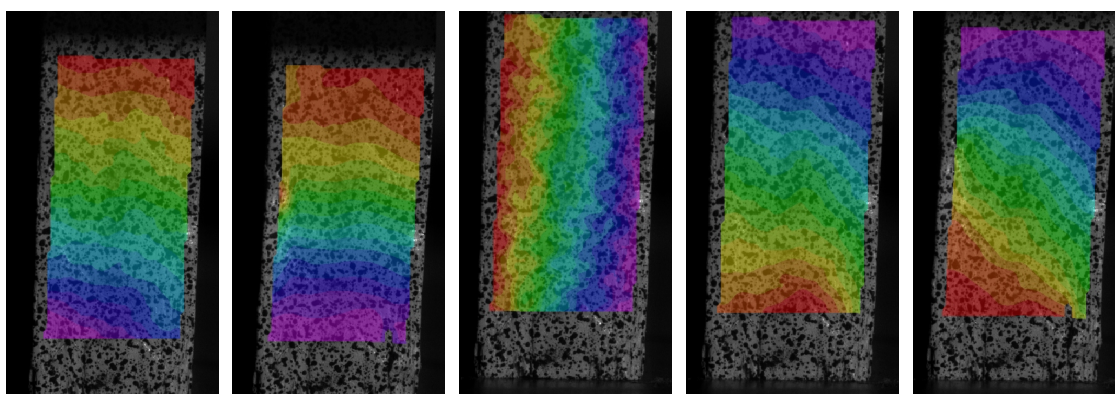
Obr. 25 T2 –  $E_{xy}$  – MOR  
(č. 0,009,  
ž. 0,0027,  
f. -0,0246)

Obr. 26 T2 –  $E_{yy}$  – 10 %  
(č. 0,000515,  
f. -0,000365)

Obr. 27 T2 –  $E_{yy}$  – MÚ  
(č. -0,00138,  
f. -0,00386)

Obr. 28 T2 –  $E_{yy}$  – MOR  
(č. -0,0102,  
f. -0,0474)

Obr. 29 T2 – U – 10 %  
(č. 0,0185,  
f. 0,0052)



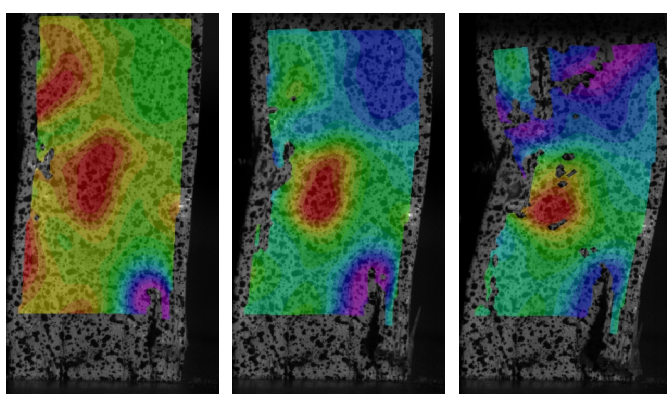
Obr. 30 T2 – U –  
MÚ  
(č. 0,0632,  
f. 0,0362)

Obr. 31 T2 – U –  
MOR  
(č. 0,189,  
f. 0,053)

Obr. 32 T2 – V –  
10 %  
(č. -0,02005,  
f. -0,0266)

Obr. 33 T2 – V –  
MÚ  
(č. -0,0994,  
f. -0,133)

Obr. 34 T2 – V –  
MOR  
(č. -0,238,  
f. -0,594)



Obr. 35 T2 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0122,  
f. -0,025)

Obr. 36 T2 – Exy  
MOR+  
(č. 0,031,  
f. -0,0225)

Obr. 37 T2 – Exy  
MOR+  
(č. 0,069,  
f. -0,0465)

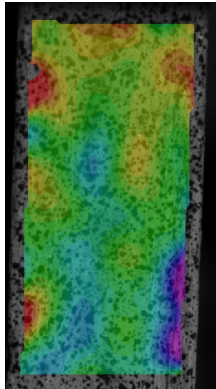
### 6.2.1.1.2 Zkušební vzorek T4 (označení 101)

Tento vzorek při zatížení 10 % síly MOR vykazoval mírné PSD ve střední vrstvě dýhy (Obr. 41) a mírné otláčení vzorků na čelech viditelné na Obr. 44, případně zanedbatelné PD na Obr. 38. Při dosažení MÚ došlo k přenosu většiny PSD do rohů sledované části vzorků a do pravé vrstvy dýhy, avšak k nárůstu PSD došlo i ve středové vrstvě (Obr. 42). V povrchových vrstvách pravé dýhy také docházelo k PD, viditelných na Obr. 45 a Obr. 39. Při překročení meze úměrnosti zkušebního tělíska došlo v tomto místě k porušení ve dřevě, které při zvyšující se síle pokračovalo do přibližně 3/4 délky zkušebního tělíska při dosažení meze pevnosti (Obr. 43). V mezi pevnosti pak docházelo k poměrně velkým PD (Obr. 40; Obr. 46), stejně tak i PSD (Obr. 43)

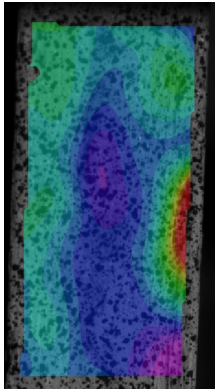
Po překročení meze pevnosti docházelo v tělísku k plastickým deformacím v celém jeho průřezu, později však došlo k PSD v jeho středové vrstvě uprostřed (Obr. 53) a



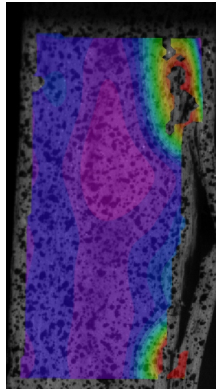
následnému porušení (ve dřevě) v tomto místě (Obr. 54), což později zapříčinilo delaminaci pravé lepené spáry (Obr. 55) vzniklou v blízkosti tohoto místa.



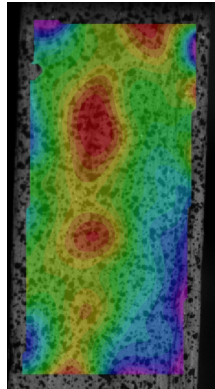
Obr. 38 T4 – Exx –  
10 %  
(č. 0,000485,  
f. -0,00047)



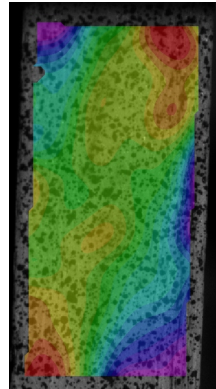
Obr. 39 T4 – Exx –  
MÚ  
(č. 0,0045,  
f. -0,0008)



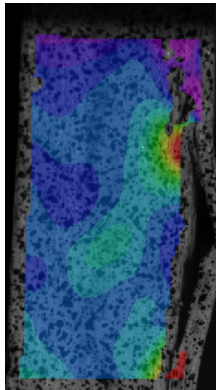
Obr. 40 T4 – Exx –  
MOR  
(č. 0,063,  
f. -0,003)



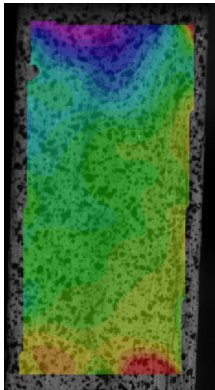
Obr. 41 T4 – Exy –  
10 %  
(č. 0,00495,  
f. -0,00039)



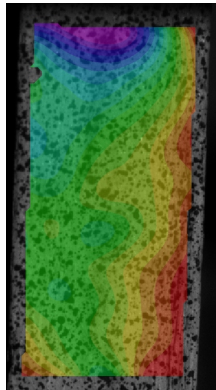
Obr. 42 T4 – Exy –  
MÚ  
(č. 0,00134,  
o. 0,0009,  
f. -0,00154)



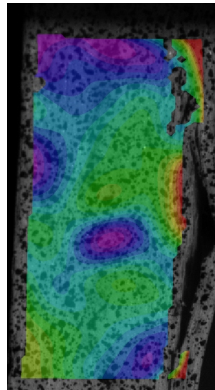
Obr. 43 T4 – Exy –  
MOR  
(č. 0,0358,  
f. -0,0132)



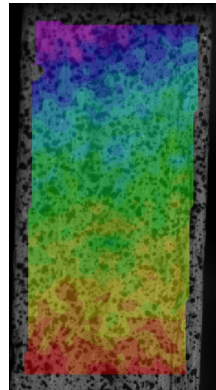
Obr. 44 T4 – Eyy –  
10 %  
(č. 0,00056,  
f. 0,00133)



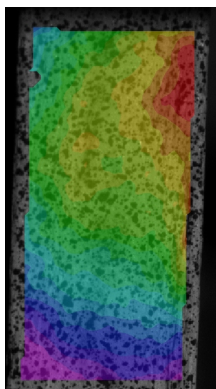
Obr. 45 T4 – Eyy –  
MÚ  
(č. -0,00045,  
f. -0,0384)



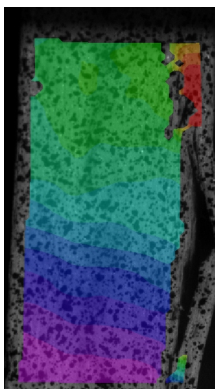
Obr. 46 T4 – Eyy –  
MOR  
(č. -0,0076,  
f. -0,0384)



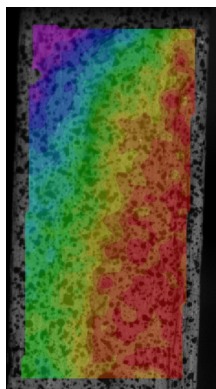
Obr. 47 T4 – U –  
10 %  
(č. 0,0175,  
f. 0,01135)



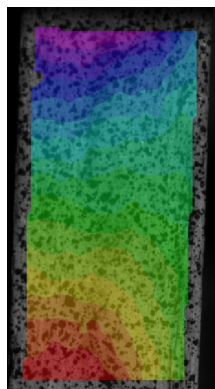
Obr. 48 T4 – U –  
MÚ  
(č. 0,0492,  
f. 0,0334)



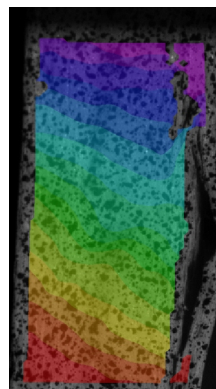
Obr. 49 T4 – U –  
MOR  
(č. 0,316,  
f. -0,016)



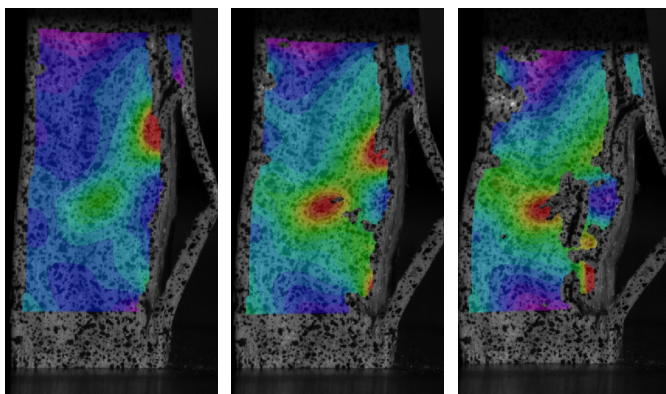
Obr. 50 T4 – V –  
10 %  
(č. -0,04615,  
f. -0,05385)



Obr. 51 T4 – V –  
MÚ  
(č. -0,1102,  
f. -0,1506)



Obr. 52 T4 – V –  
MOR  
(č. -0,214,  
f. -0,62)



*Obr. 53 T4 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0505,  
f. -0,0165)*

*Obr. 54 T4 – Exy  
MOR+  
(č. 0,044,  
f. -0,0245)*

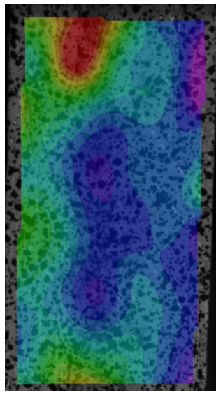
*Obr. 55 T4 – Exy  
MOR+  
(č. 0,058,  
f. -0,0355)*

### **6.2.1.1.3 Zkušební vzorek T5 (označení 106)**

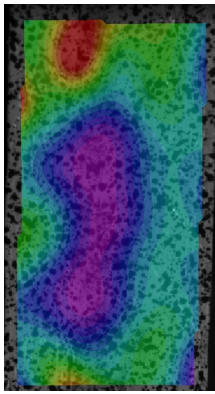
Průběh porušení je podobný jako u vzorku T2. Tento vzorek již při zatížení 10 % síly MOR vykazoval známky větších PSD v horní třetině levé vrstvy dýhy a středové vrstvě vzorku (Obr. 59) stejně jako PD ve středové vrstvě (Obr. 56) nebo zanedbatelnými PD v pravé vrstvě dýhy (Obr. 62). Při rostoucím zatížení do meze úměrnosti došlo ve středu a v levém horním rohu vzorku ke zvyšování PSD, což zachycuje Obr. 60 a také PD ve středové vrstvě (Obr. 57) nebo PD v pravé vrstvě dýhy či ve spodní části střední vrstvy (Obr. 63).

Při dalším zvyšování působící síly do meze pevnosti docházelo k velkým PD v levém hornímu okraji vzorku (Obr. 58; Obr. 64) a koncentraci PSD (Obr. 61). Po překročení MOR dále následovalo další deformování zkušebního tělíska, čímž docházelo k dalším PD v levém horním rohu a také došlo k PSD ve středové dýze (Obr. 71), kde následně došlo ke zvýšení jejich velikosti (Obr. 72). Poté došlo k delaminaci pravé lepené spáry (Obr. 73).

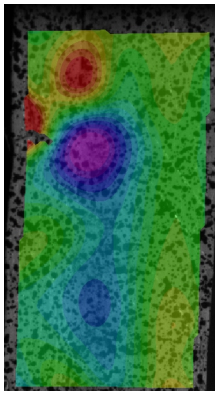




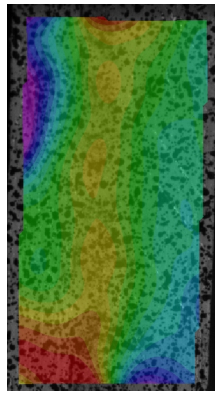
Obr. 56 T5 – Exx –  
10 %  
(č. 0,0021,  
f. -0,00016)



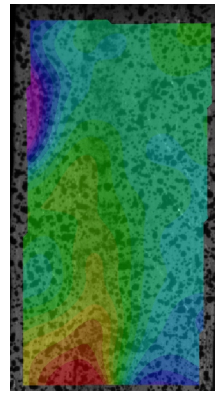
Obr. 57 T5 – Exx –  
MÚ  
(č. 0,00555,  
f. -0,0004)



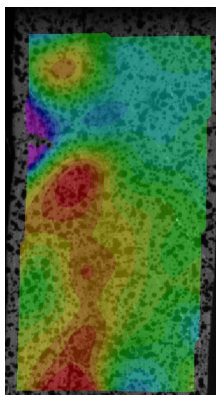
Obr. 58 T5 – Exx –  
MOR  
(č. 0,0192,  
f. -0,0118)



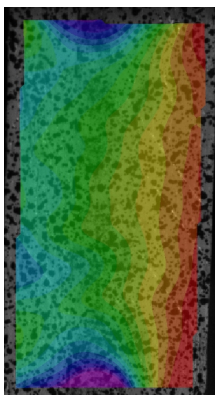
Obr. 59 T5 – Exy –  
10 %  
(č. 0,00182,  
o.0,0012425,  
f. -0,00126)



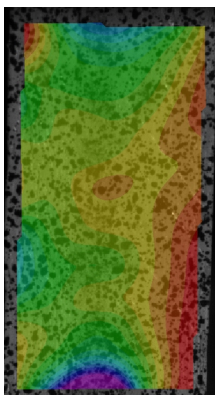
Obr. 60 T5 – Exy –  
MÚ  
(č. 0,00615,  
ž. 0,0042,  
f. -0,00425)



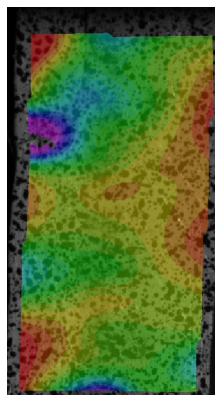
Obr. 61 T5 – Exy –  
MOR  
(č. 0,0112,  
o. 0,0073375,  
f. -0,0094)



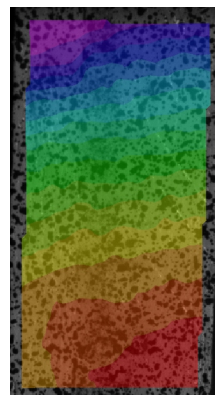
Obr. 62 T5 – Eyy –  
10 %  
(č. -0,00205,  
f. -0,01355)



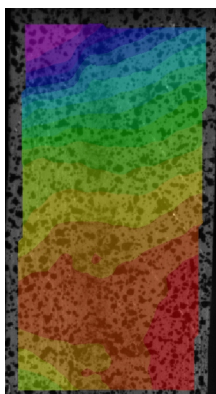
Obr. 63 T5 – Eyy –  
MÚ  
(č. -0,0096,  
f. -0,0582)



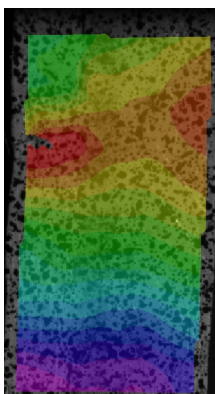
Obr. 64 T5 – Eyy –  
MOR  
(č. -0,0096,  
o. -0,0187125,  
f. -0,0582)



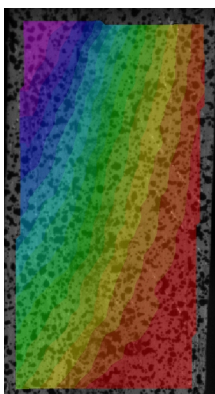
Obr. 65 T5 – U –  
10 %  
(č. 0,0318,  
f. -0,008)



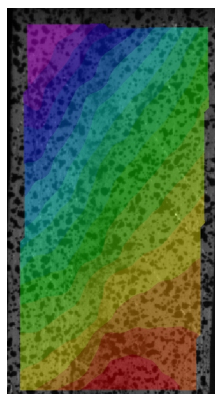
Obr. 66 T5 – U –  
MÚ  
(č. 0,0805,  
f. -0,0145)



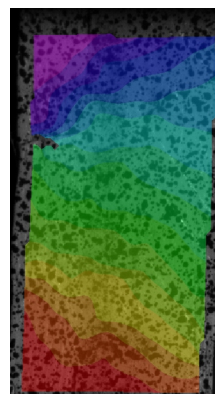
Obr. 67 T5 – U –  
MOR  
(č. 0,266,  
f. 0,03)



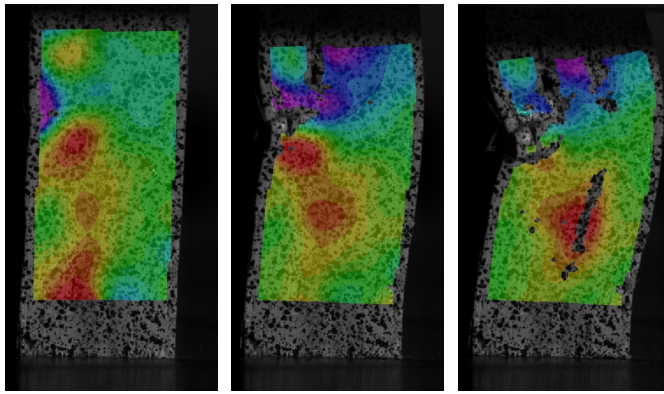
Obr. 68 T5 – V –  
10 %  
(č. -0,0294,  
f. -0,0664)



Obr. 69 T5 – V –  
MÚ  
(č. -0,0815,  
f. -0,1835)



Obr. 70 T5 – V –  
MOR  
(č. 0,162,  
f. -0,576)

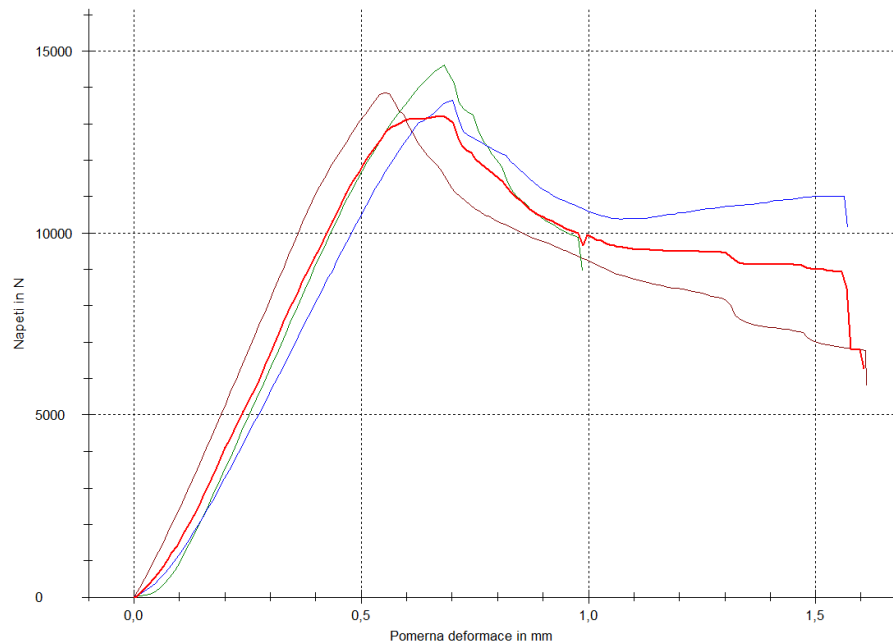


Obr. 71 T5 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0103,  
f. -0,0092)

Obr. 72 T5 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0355,  
f. -0,04)

Obr. 73 T5 – Exy  
MOR+  
(č. 0,082,  
f. -0,107)

### 6.2.1.2 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C



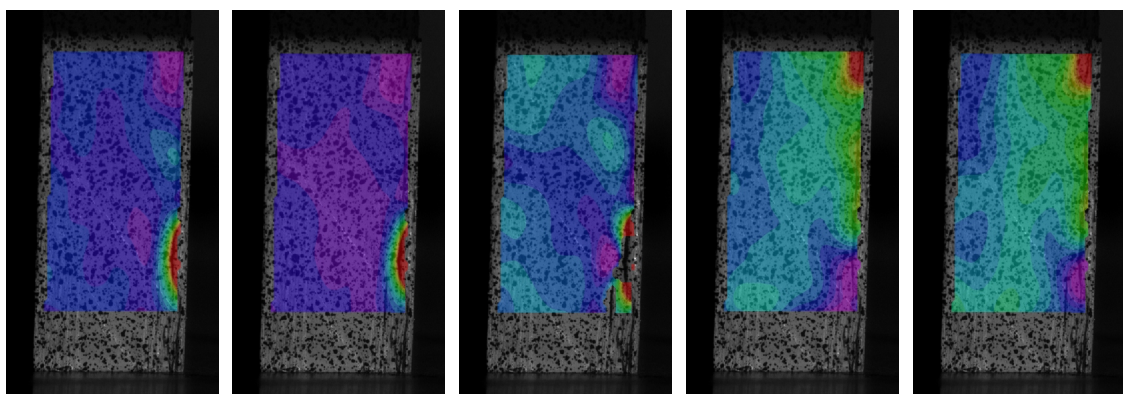
Obr. 74: Pracovní diagram Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově – T1, modře - T8, zeleně - T7.

#### 6.2.1.2.1 Zkušební vzorek T1 (označení 88)

Tento vzorek již při zatížení 10 % síly MOR vykazuje PD ve spodním rohu pravé dýhy, které jsou patrné na Obr. 75. PD v tomto místě jsou také patrné na Obr. 81. Na Obr. 78 je patrné, že v rozích pravé dýhy působí větší PSD, než ve zbytku vzorku. Rozložení sledovaných veličin zůstává stejné až do dosažení meze pevnosti a dochází ke zvyšování jejich velikosti. Při mezi úměrnosti jsou PD patrné na Obr. 76 a Obr. 82 a

PSD na Obr. 79. Po překročení meze úměrnosti dochází k porušení v pravé dýze dole a k následnému zvětšování až do MOR, což je viditelné na Obr. 77, na Obr. 83 zachycujících PD a na Obr. 80 PSD.

Po překročení meze pevnosti dochází k přesouvání PD a PSD do spodní 1/4 pravé lepené spáry a do spodní části levé lepené spáry, kde dochází k místním delaminacím lepených spár (Obr. 80). Poté dochází k delaminaci pravé lepené spáry a přesunutí PD a PSD také do horní části lepené spáry, což zachycuje Obr. 91. Dále dochází k delaminacím v těchto lepených spárách, což způsobuje deformace celého zkušebního vzorku.



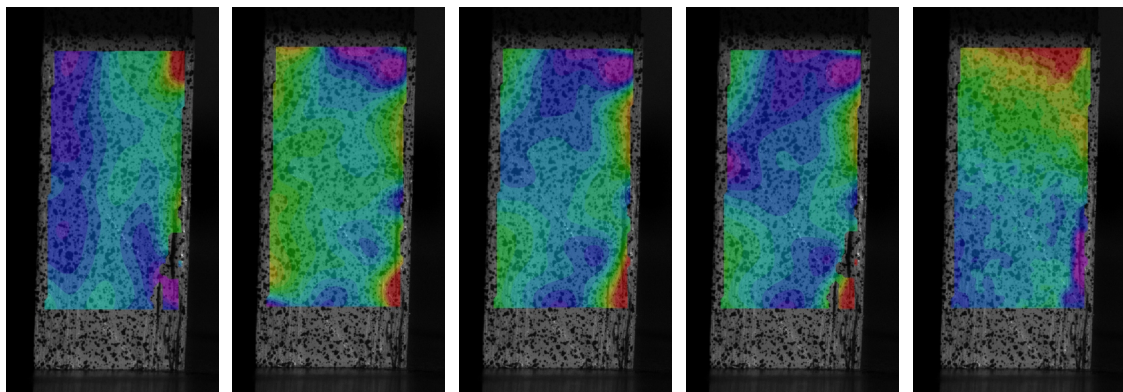
Obr. 75  $Tl - E_{xx} - 10\%$   
(č. 0,00505,  
f. -0,00085)

Obr. 76  $Tl - E_{xx} - MÚ$   
(č. 0,0284,  
f. -0,0028)

Obr. 77  $Tl - E_{xx} - MOR$   
(č. 0,0175,  
f. -0,0043)

Obr. 78  $Tl - E_{xy} - 10\%$   
(č. 0,0021,  
f. -0,00102)

Obr. 79  $Tl - E_{xy} - MÚ$   
(č. 0,0086  
f. -0,0044)



Obr. 80  $Tl - E_{xy} - MOR$   
(č. 0,0132,  
f. -0,0046)

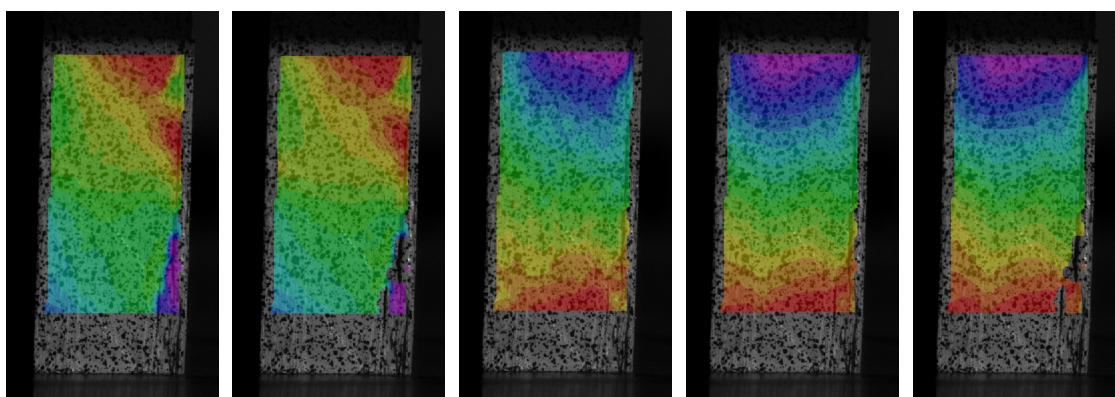
Obr. 81  $Tl - E_{yy} - 10\%$   
(č. 0,00019,  
f. -0,0017)

Obr. 82  $Tl - E_{yy} - MÚ$   
(č. 0,0003,  
f. -0,00665)

Obr. 83  $Tl - E_{yy} - MOR$   
(č. 0,0013,  
f. -0,0104)

Obr. 84  $Tl - U - 10\%$   
(č. 0,0125,  
f. 0,00305)





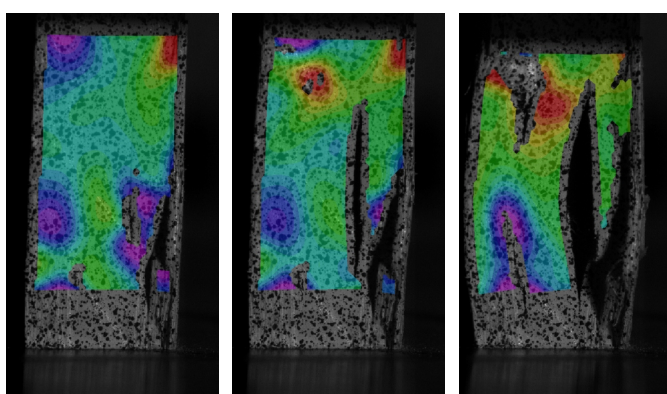
Obr. 85 T1 – U –  
MÚ  
(č. 0,055,  
f. 0,0216)

Obr. 86 T1 – U –  
MOR  
(č. 0,073,  
f. 0,014)

Obr. 87 T1 – V –  
10 %  
(č. -0,0159  
f. -0,0296)

Obr. 88 T1 – V –  
MÚ  
(č. -0,073  
f. -0,135)

Obr. 89 T1 – V –  
MOR  
(č. -0,1025  
f. -0,2005)



Obr. 90 T1 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0184,  
f. -0,0092)

Obr. 91 T1 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0246  
f. -0,0142)

Obr. 92 T1 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0355,  
f. -0,042)

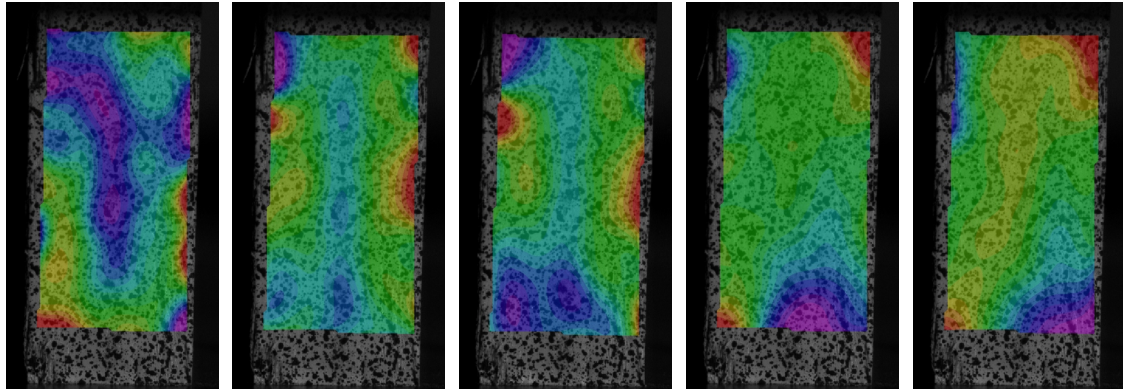
### 6.2.1.2.2 Zkušební vzorek T7 (označení 86)

U tohoto vzorku nedošlo k prvotnímu porušení ve dřevě a došlo přímo k delaminaci lepeného spoje. Při zatížení 10 % MOR jsou patrné PD ve středu vzorku, kde docházelo ke zúžení středové vrstvy dýhy a místním PD v povrchových vrstvách vzorku, viz Obr. 93, což je patrné i na Obr. 99. V rozích vzorku pak dochází k větším PSD, což zachycuje Obr. 96. Při mezi úměrnosti došlo k přesunutí PD do bočních vrstev a k PD středové vrstvy v ose  $X$  téměř nedocházelo (Obr. 94). Docházelo k nim však v ose  $Y$ , viz Obr. 100 a ve středové vrstvě také působily PSD, což je patrné na Obr. 97.

Stejné rozložení jako v případě MÚ měly při mezi pevnosti i PD v ose  $X$  (Obr. 95) a PSD (Obr. 98) a jen došlo ke zvýšení jejich velikosti. U Obr. 101 je však patrné, že ve spodní části tělíska došlo k přesunutí PD ze středové dýhy do dýhy pravé. Po překročení meze pevnosti (Obr. 108) došlo k přenosu PSD a PD nejprve do pravé lepené spáry, což



vedlo k její delaminaci a poté i do levé lepené spáry, zatímco se delaminace v pravé lepené spáře dále rozšiřovala a v pravé dýze docházelo k jejímu vybočování (Obr. 109). Poté došlo i k následné částečné delaminaci levé lepené spáry (Obr. 110).



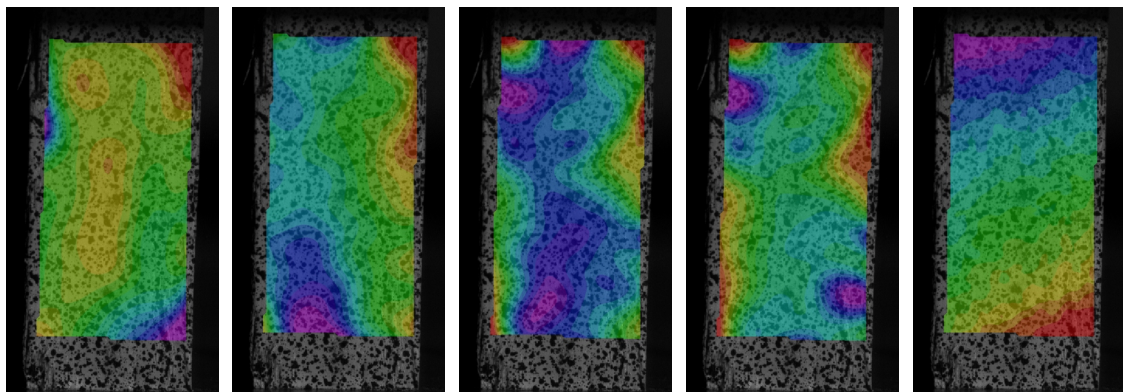
Obr. 93 T7 – Exx – 10 %  
(č. 0,00118,  
f. 3,5e-0,5)

Obr. 94 T7 – Exx – MÚ  
(č. 0,0043,  
f. -0,00165)

Obr. 95 T7 – Exx – MOR  
(č. 0,00675,  
f. -0,004)

Obr. 96 T7 – Exy – 10 %  
(č. 0,00134,  
f. -0,00122)

Obr. 97 T7 – Exy – MÚ  
(č. 0,00465,  
f. -0,00735)



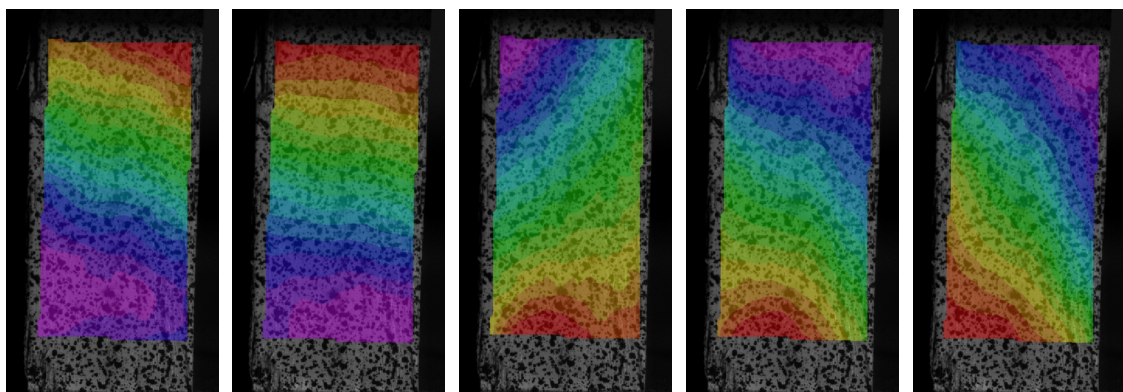
Obr. 98 T7 – Exy – MOR  
(č. 0,0058,  
f. -0,0118)

Obr. 99 T7 – Eyy – 10 %  
(č. -0,00019,  
f. -0,00243)

Obr. 100 T7 – Eyy – MÚ  
(č. -0,00245,  
f. -0,00865)

Obr. 101 T7 – Eyy – MOR  
(č. -0,00305,  
f. -0,01425)

Obr. 102 T7 – U – 10 %  
(č. 0,0214,  
f. 0,0056)



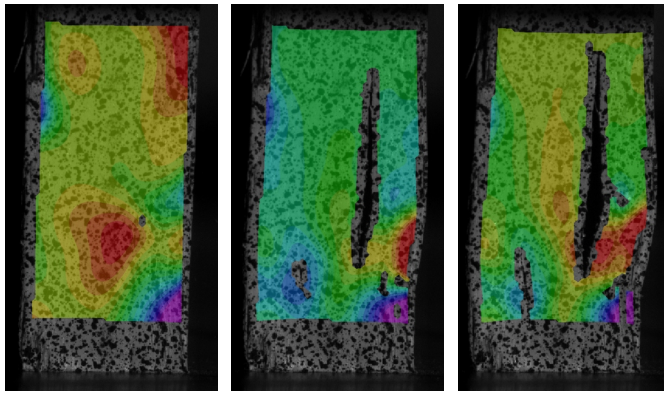
Obr. 103 T7 – U – MÚ  
(č. 0,081,  
f. 0,029)

Obr. 104 T7 – U – MOR  
(č. 0,112,  
f. -0,033)

Obr. 105 T7 – V – 10 %  
(č. -0,0408,  
f. -0,0658)

Obr. 106 T7 – V – MÚ  
(č. -0,1285,  
f. -0,2315)

Obr. 107 T7 – V – MOR  
(č. -0,209,  
f. -0,357)



Obr. 108 T7 – Exy MOR+ (č. 0,0063, f. -0,0176)    Obr. 109 T7 – Exy MOR+ (č. 0,0375, f. -0,0365)    Obr. 110 T7 – Exy MOR+ (č. 0,0285, f. -0,059)

### 6.2.1.2.3 Zkušební vzorek T8 (označení 86)

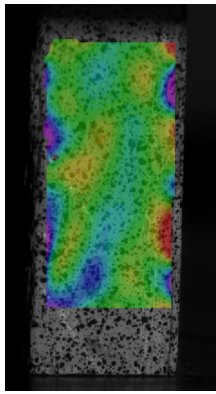
Při zatížení 10 % síly MOR byla maxima PD a PSD rozmístěna zejména po okrajích vzorku a ve středu byly jejich koncentrace nižší, což zachycují u PD Obr. 111 a Obr. 117, a pro PSD Obr. 114.

Poté u tohoto vzorku došlo k postupné koncentraci smykového napětí vedoucího k PDS ve středu vzorku (Obr. 115) a PD v ose  $X$  (Obr. 112), což následně v tomto místě způsobilo elastické deformace. Na obrázku Obr. 118 zachycujícím PD v ose  $Y$  je patrné, že k maximálním hodnotám docházelo u čel vzorku a v jeho povrchových vrstvách byly PD nižší, zatímco ve středu středové vrstvy byly PD nejvyšší. Poté docházelo k plastickým deformacím ve dřevě až do dosažení meze pevnosti.

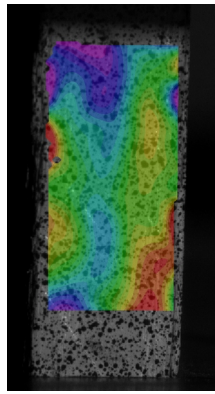
Na obrázcích PD je pak patrné, že došlo k zúžení středové vrstvy vzorku na Obr. 113 a lokálním PD v bočních vrstvách Obr. 119. Na Obr. 116 je pak patrné, že v levé a středové vrstvě dýhy byly PSD vcelku rovnoměrné a v pravé povrchové vrstvě došlo k jejím maximálním hodnotám.

Po překročení meze pevnosti došlo k současnému poškození ve dřevě a místní delaminaci lepeného spoje v levé spodní části vzorku (Obr. 126). Tyto trhliny se při zvyšování působící síly dále zvětšovaly (Obr. 127). Ke konci zkoušky došlo k místní delaminaci pravého lepeného spoje v jeho spodní 1/5 výšky (Obr. 128). Zajímavostí je, že nedošlo k celkové delaminaci lepeného spoje, vzorek svým chováním ve spodní části připomínal tečení dřeva masivního vzorku.

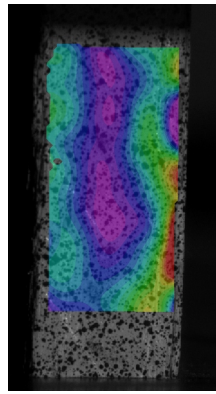




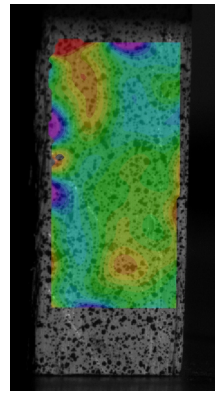
Obr. 111 T8 – Exx  
– 10 %  
(č. 0,000265  
f. -0,00035)



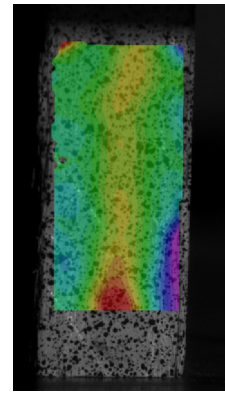
Obr. 112 T8 – Exx  
– MÚ  
(č. 0,000505,  
ž. 0,00100375,  
f. -0,000695)



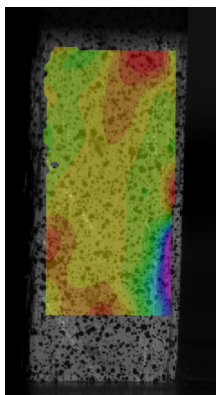
Obr. 113 T8 – Exx  
– MOR  
(č. 0,0043,  
f. 4e-05)



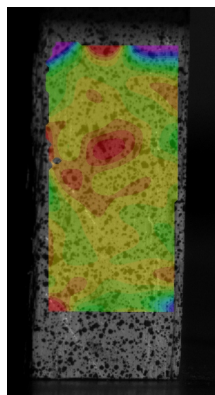
Obr. 114 T8 – Exy  
– 10 %  
(č. 0,0003,  
f. -0,00032)



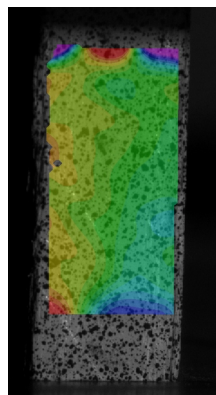
Obr. 115 T8 – Exy  
– MÚ  
(č. 0,00141,  
f. -0,00089)



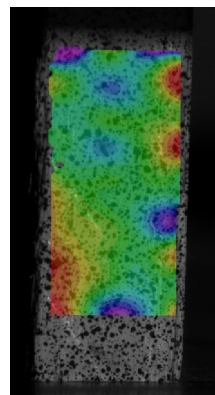
Obr. 116 T8 – Exy  
– MOR  
(č. 0,0032,  
o.0,00168125,  
f. -0,049)



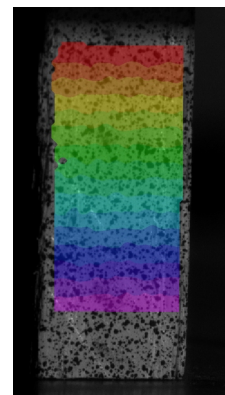
Obr. 117 T8 – Eyy  
– 10 %  
(č. 0,00043,  
f. -0,00082)



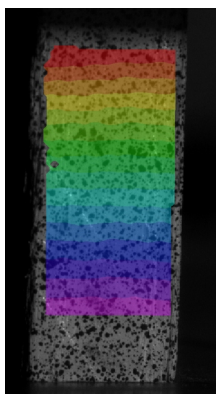
Obr. 118 T8 – Eyy  
– MÚ  
(č. -0,00086,  
f. -0,00208)



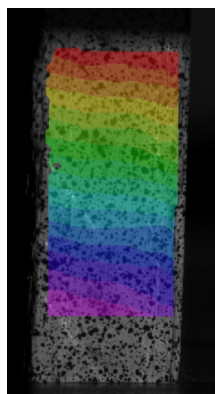
Obr. 119 T8 – Eyy  
– MOR  
(č. -0,00264,  
f. -0,00712)



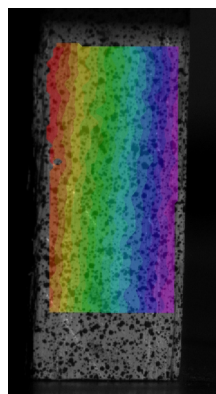
Obr. 120 T8 – U  
– 10 %  
(č. -0,0146  
f. -0,0534)



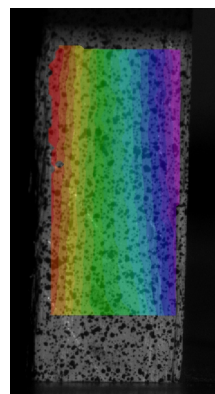
Obr. 121 T8 – U  
– MÚ  
(č. 0,0015  
f. -0,0855)



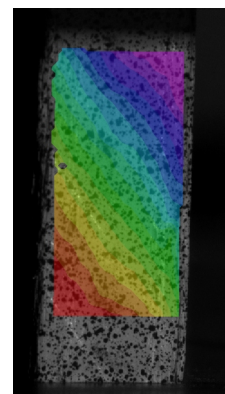
Obr. 122 T8 – U  
– MOR  
(č. 0,0145,  
f. -0,0975)



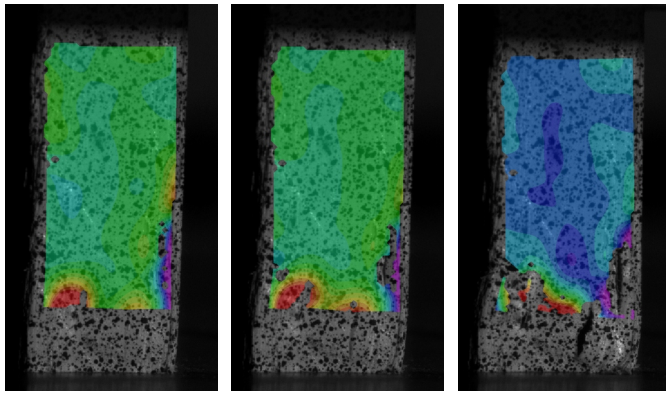
Obr. 123 T8 – V  
– 10 %  
(č. -0,0367,  
f. -0,0564)



Obr. 124 T8 – V  
– MÚ  
(č. -0,161,  
f. -0,2005)



Obr. 125 T8 – V  
– MOR  
(č. -0,221,  
f. -0,2985)

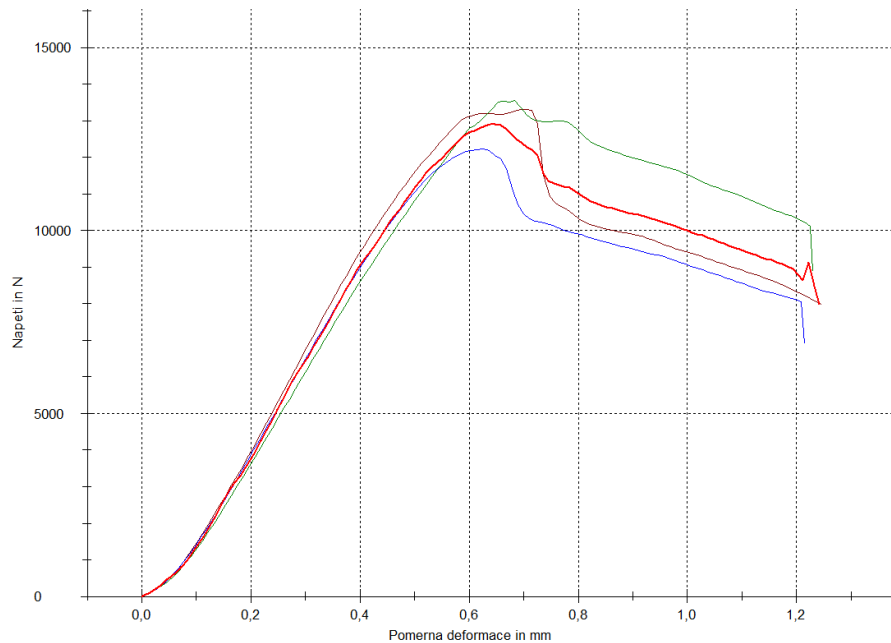


Obr. 126 T8 – Exy MOR+  
(č. 0,0178,  
f. -0,0164)

Obr. 127 T8 – Exy MOR+  
(č. 0,0305,  
f. -0,0315)

Obr. 128 T8 – Exy MOR+  
(č. 0,0505,  
f. -0,0235)

### 6.2.1.3 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 120 °C



Obr. 129: Pracovní diagram Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově - T3, modře - T9, zeleně - T6.

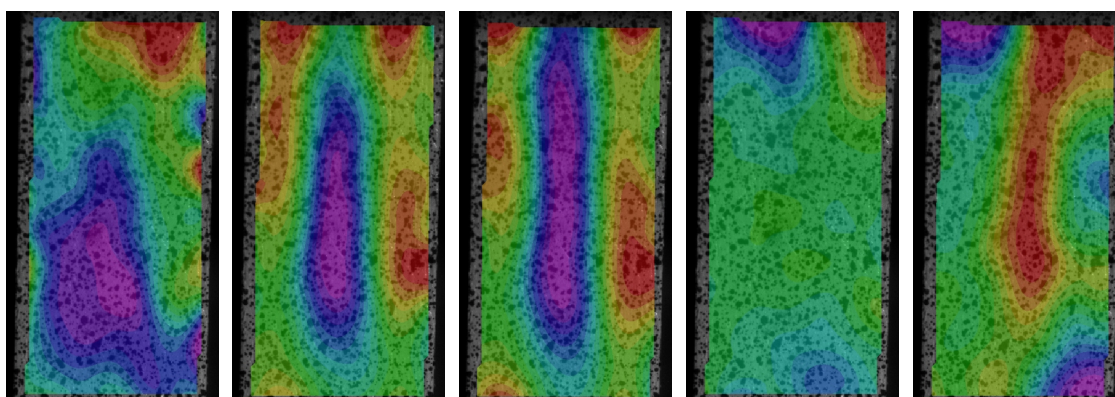
U těchto vzorků došlo k PD ve středové dýze, ve které dochází k jejímu zúžení, vyvolaném snadnou deformovatelností dřeva ve směru zatíženém silou napříč vláken a „rozšíření“ vedoucí k následnému „ohybu“ bočních dých při současné delaminaci lepených spojů vznikem PSD v lepených spojích. Dále pak dochází při působení síly k vybočování středové vrstvy směrem k boční vrstvě, která se delaminovala později a k ohybu bočních vrstev.

### 6.2.1.3.1 Zkušební vzorek T3 (označení 145)

Při působení 10 % síly MOR dochází k PD v horní a spodní části vzorku a v uhlopříčce z levého horního do pravého spodního rohu k rozšíření či zúžení vzorku téměř nedochází, což zachycují Obr. 130 a Obr. 136. K maximálním hodnotám PSD dochází na čelech vzorů a ve středu je pak PSD téměř rovno nule (Obr. 133).

Poté dochází k zúžení způsobeným PD a PSD ve středové vrstvě vzorku. Vrstvy uhlíkových vláken jsou orientovány s bočními vrstvami, s nimiž spolupůsobí. Je to díky jejich poměrně vysoké pevnosti a přímé orientaci vláken v rovině působení tlakové síly, mající za následek jejich chování na vzpěr. Tímto dochází v krajních vrstvách ke PSD a PD. V pravé dýze dochází k většímu rozšíření, nežli v dýze levé, což je patrné na obrázcích zachycujících mez úměrnosti (Obr. 131; Obr. 134; Obr. 137).

Koncentrací PD a PSD ve zmíněných místech však při překročení meze úměrnosti a později MOR nevede k toku jednotlivých vrstev vláken, což je běžné při zkoušce na tlakové namáhání masivního tělíska, ale k jejich pozdějšímu ohybu při překročení MOR způsobující delaminaci lepených spojů, která vzniká ve spodní části zkušebního tělíska a dále se šíří směrem vzhůru. Po ohybu těchto krajních vrstev vznikne dostatek místa pro ohyb středové vrstvy, která se ohne směrem doleva, tedy k vrstvě, u které došlo k delaminaci později. Na těchto obrázcích zachycující MOR je patrné popsání výše uvedeného Obr. 132, Obr. 135, Obr. 138.



Obr. 130 T3 – Exx  
– 10 %  
(č. 0,00125,  
f. -1e-0,5)

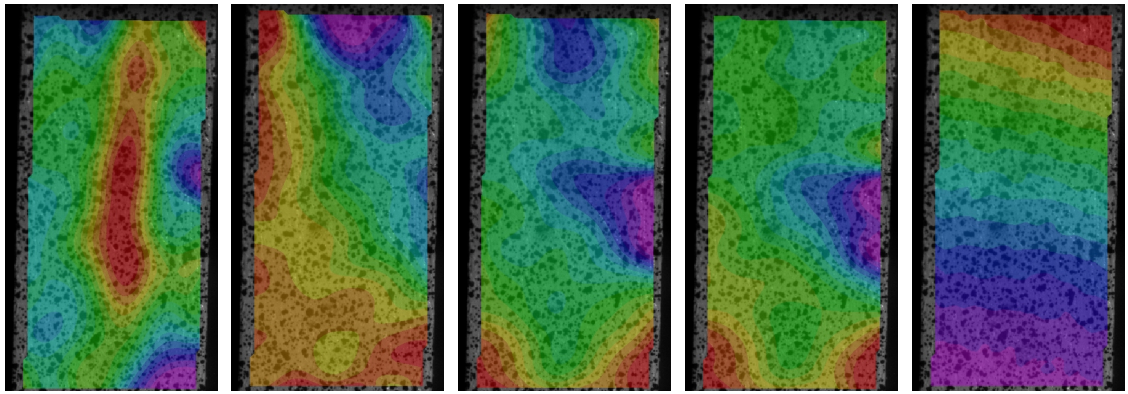
Obr. 131 T3 – Exx  
– MÚ  
(č. 0,00318,  
f. -0,00032)

Obr. 132 T3 – Exx  
– MOR  
(č. 0,0045,  
f. -0,0009)

Obr. 133 T3 – Exy  
– 10 %  
(č. 0,00077,  
f. -0,00132)

Obr. 134 T3 – Exy  
– MÚ  
(č. 0,00148,  
f. -0,00262)





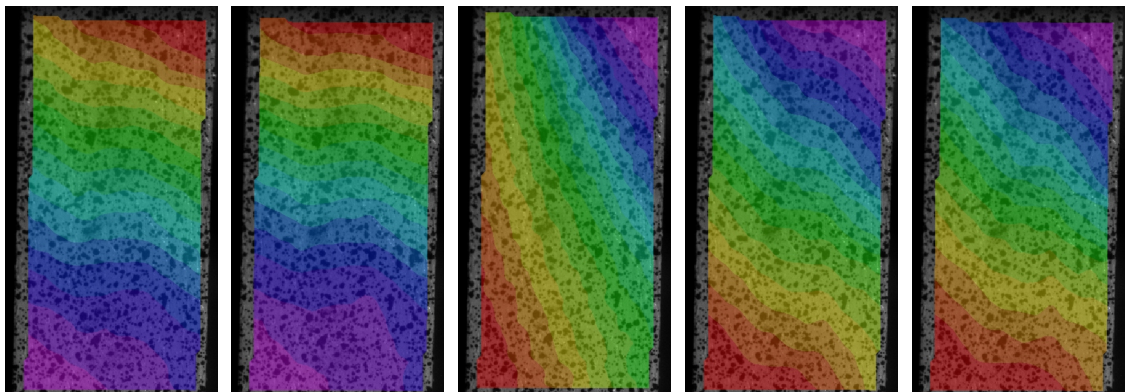
*Obr. 135 T3 – Exy – MOR*  
*(č. 0,00205, f. -0,0031)*

*Obr. 136 T3 – Eyy – 10 %*  
*(č. -0,00048, f. -0,00256)*

*Obr. 137 T3 – Eyy – MÚ*  
*(č. -0,00265, f. -0,0087)*

*Obr. 138 T3 – Eyy – MOR*  
*(č. -0,00435, f. -0,01445)*

*Obr. 139 T3 – U – 10 %*  
*(č. 0,0252, f. -0,0094)*



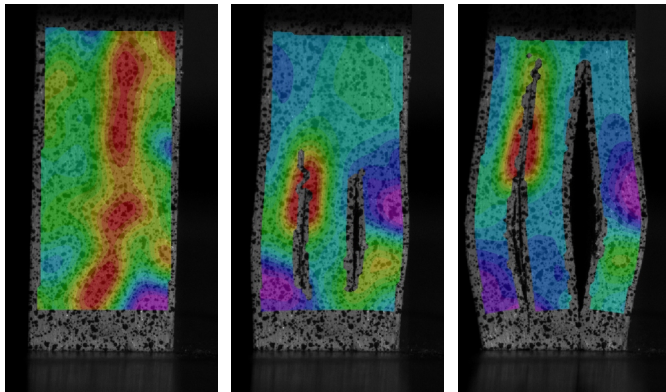
*Obr. 140 T3 – U – MÚ*  
*(č. 0,0635, f. -0,008)*

*Obr. 141 T3 – U – MOR*  
*(č. 0,08, f. -0,0215)*

*Obr. 142 T3 – V – 10 %*  
*(č. -0,0208, f. -0,0538)*

*Obr. 143 T3 – V – MÚ*  
*(č. -0,0915, f. -0,1915)*

*Obr. 144 T3 – V – MOR*  
*(č. -0,127, f. -0,281)*



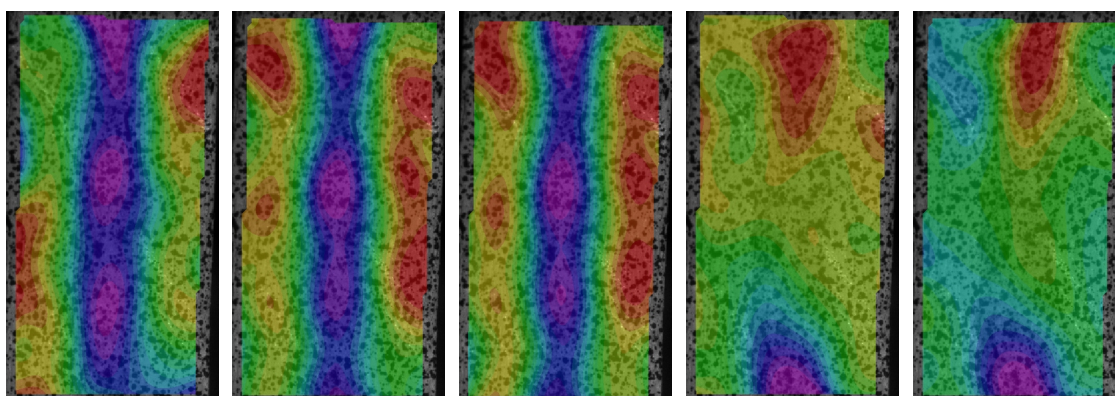
*Obr. 145 T3 – Exy MOR+*  
*(č. 0,00132, f. -0,00332)*

*Obr. 146 T3 – Exy MOR+*  
*(č. 0,0268, f. -0,0162)*

*Obr. 147 T3 – Exy MOR+*  
*(č. 0,0675, f. -0,032)*

### 6.2.1.3.2 Zkušební vzorek T6 (označení 144)

K porušení tohoto tělíška došlo stejným způsobem jako u tělíška T3, avšak delaminace nezapočala ve spodní části vzorku, nýbrž v jeho horní části (Obr. 163), ze které se následně šířila směrem dolů (Obr. 164). Další odlišností je, že ke PSD a PD při působení 10 % síly MOR docházelo v horní části vzorku (Obr. 148, Obr. 151 a Obr. 154) a dále docházelo ke zvyšování jejich velikosti až do MOR. Po překročení MOR došlo k přesunutí PD a PSD do středu vzorku při současném započítání delaminace pravé lepené spáry, což zachycuje rozdíl mezi obrázky Obr. 153 a Obr. 163. Po rozšíření delaminace došlo k delaminaci levé lepené spáry, stejně jako u pravé lepené spáry, také v její horní části (Obr. 164). Poté dalším působením síly došlo k rozšíření delaminace téměř po celé délce vzorku a k ohybu bočních vrstev. Na Obr. 148 zachycujícím poměrné deformace v ose  $X$  je patrné zúžení ve středu vzorku (fialově) a rozšíření v bočních vrstvách (červeně). Na Obr. 151 jsou pak patrná maxima PSD působících v horní (červeně), a spodní (fialově) části středové dýhy a ve zbytku vzorku působí téměř rovnoměrné PSD (žlutě). Na Obr. 154 jsou pak patrné PD v ose  $Y$ . Dále je patrné zvyšování PD a PSD v těchto místech při mezi úměrnosti, což zachycují obrázky Obr. 149, Obr. 155, Obr. 152 a při mezi pevnosti, což zachycují obrázky Obr. 150, Obr. 153, Obr. 156.



Obr. 148 T6 – Exx  
– 10 %  
(č. 0,00116,  
f. -0,0001)

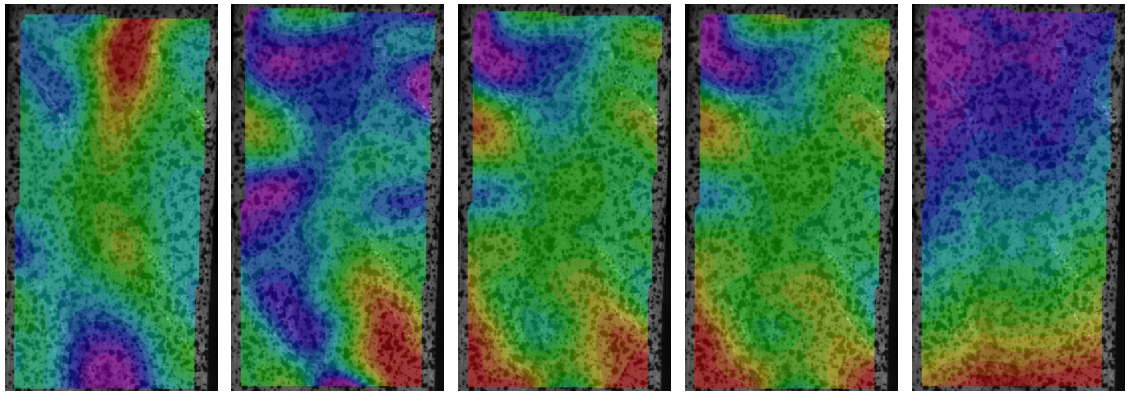
Obr. 149 T6 – Exx  
– MÚ  
(č. 0,00338,  
f. -8e-05)

Obr. 150 T6 – Exx  
– MOR  
(č. 0,0052,  
f. -0,0007)

Obr. 151 T6 – Exy  
– 10 %  
(č. 0,00086,  
ž. 0,000475625,  
f. -0,00119)

Obr. 152 T6 – Exy  
– MÚ  
(č. 0,00335,  
f. -0,00165)





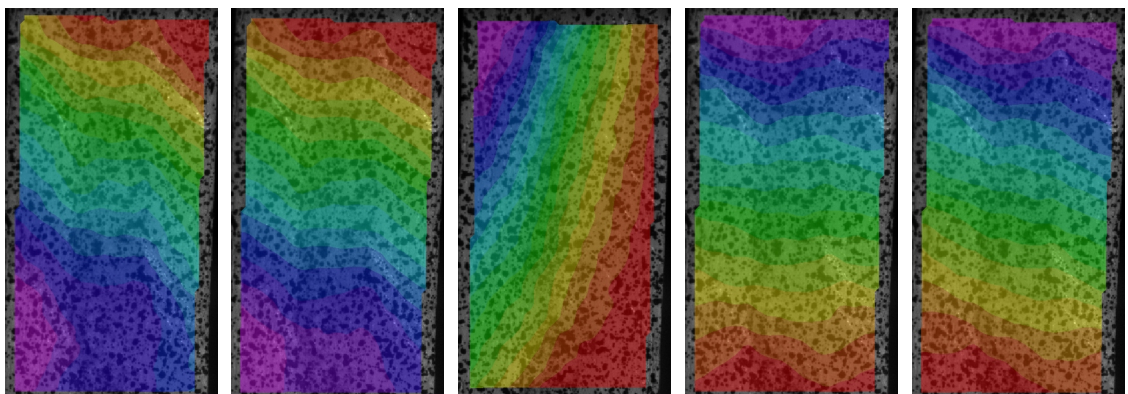
*Obr. 153 T6 – Exy – MOR*  
*č. 0,0048,*  
*f. -0,0018)*

*Obr. 154 T6 – Eyy – 10 %*  
*(č. -0,00131,*  
*f. -0,00257)*

*Obr. 155 T6 – Eyy – MÚ*  
*(č. -0,004,*  
*f. -0,01015)*

*Obr. 156 T6 – Eyy – MOR*  
*(č. -0,00645,*  
*f. -0,011815)*

*Obr. 157 T6 – U – 10 %*  
*(č. 0,0017,*  
*f. -0,0125)*



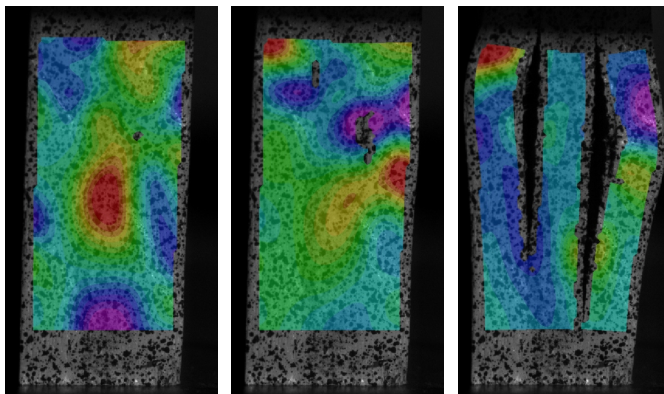
*Obr. 158 T6 – U – MÚ*  
*(č. 0,0346,*  
*f. -0,007)*

*Obr. 159 T6 – U – MOR*  
*(č. 0,0705,*  
*f. -0,022)*

*Obr. 160 T6 – V – 10 %*  
*(č. -0,0288,*  
*f. -0,0618)*

*Obr. 161 T6 – V – MÚ*  
*(č. -0,084,*  
*f. -0,182)*

*Obr. 162 T6 – V – MOR*  
*(č. -0,117,*  
*f. -0,282)*



*Obr. 163 T6 – Exy MOR+*  
*(č. 0,0048,*  
*f. -0,0018)*

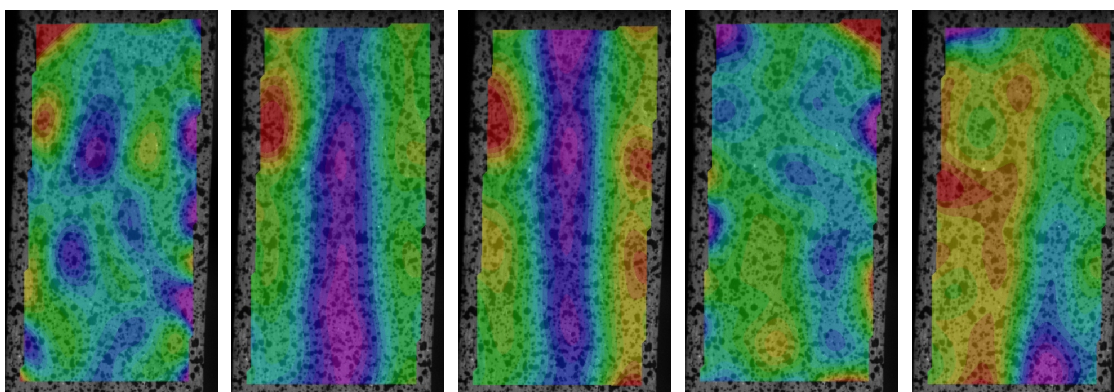
*Obr. 164 T6 – Exy MOR+*  
*(č. 0,0094,*  
*f. -0,0067)*

*Obr. 165 T6 – Exy MOR+*  
*(č. 0,066,*  
*f. -0,036)*



### 6.2.1.3.3 Zkušební vzorek T9 (označení 145)

U tohoto zkušebního tělíska došlo k totožnému porušení jako v případě tělíska T6. Zatížení zkušebního vzorku pak zachycují níže uvedené obrázky. Poměrné deformace v ose  $X$  při zatížení 10 % síly potřebné pro dosažení meze pevnosti zachycuje Obr. 166, mez úměrnosti Obr. 167 a mez pevnosti Obr. 168. Poměrné smykové napětí při zatížení 10 % síly potřebné pro dosažení meze pevnosti zachycuje Obr. 169, mez elasticity Obr. 169 a mez pevnosti Obr. 171. Poměrné deformace v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 172, při mezi úměrnosti Obr. 173 a při MOR Obr. 174.



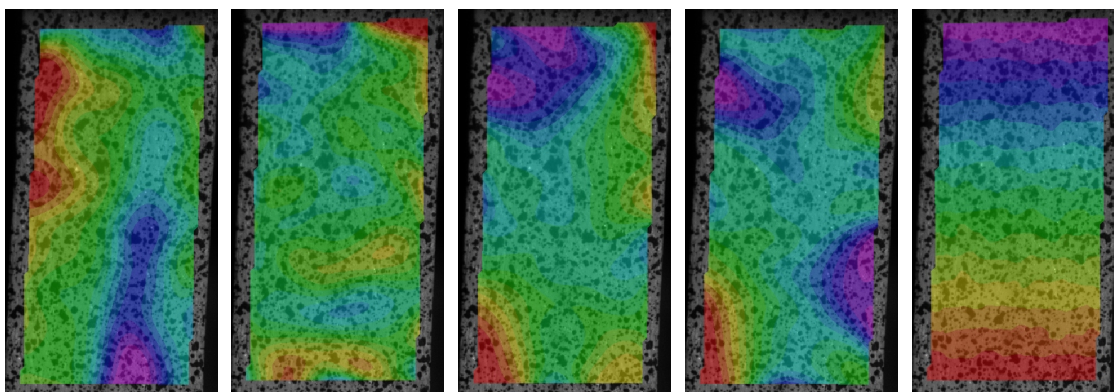
Obr. 166 T9 – Exx  
– 10 %  
(č. 0,002345,  
f. -0,00024)

Obr. 167 T9 – Exx  
– MÚ  
(č. 0,00264,  
f. -0,00018)

Obr. 168 T9 – Exx  
– MOR  
(č. 0,0039,  
f. -0,001)

Obr. 169 T9 – Exy  
– 10 %  
(č. 0,00042,  
f. -0,00023)

Obr. 170 T9 – Exy  
– MÚ  
(č. 0,00182,  
f. -0,00126)



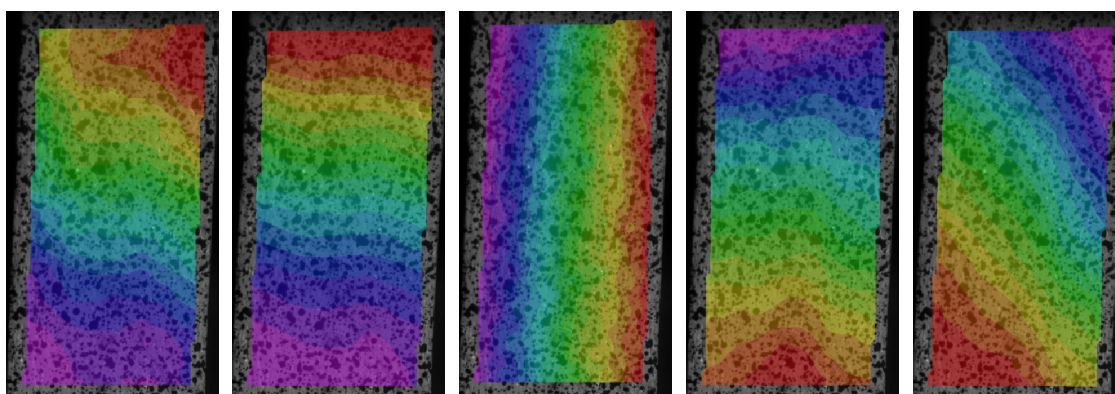
Obr. 171 T9 – Exy  
– MOR  
(č. 0,00325,  
f. -0,00335)

Obr. 172 T9 – Eyy  
– 10 %  
(č. 0,000415,  
f. -0,00063)

Obr. 173 T9 – Eyy  
– MÚ  
(č. -0,00196,  
f. -0,00566)

Obr. 174 T9 – Eyy  
– MOR  
(č. -0,00315,  
f. -0,011)

Obr. 175 T9 – U  
– 10 %  
(č. 0,0252,  
f. -0,0026)



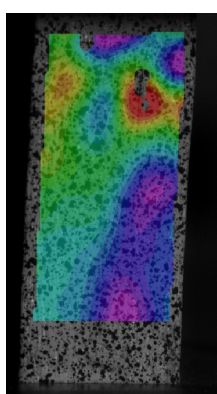
Obr. 176 T9 – U –  
MÚ  
(č. 0,0914,  
f. 0,00648)

Obr. 177 T9 – U –  
MOR  
(č. 0,1395,  
f. 0,0195)

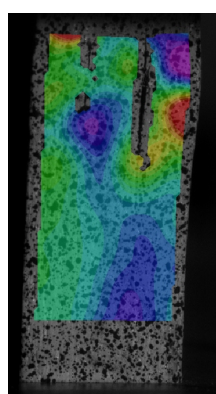
Obr. 178 T9 – V –  
10 %  
(č. -0,0382,  
f. -0,0526)

Obr. 179 T9 – V –  
MÚ  
(č. -0,152,  
f. -0,209)

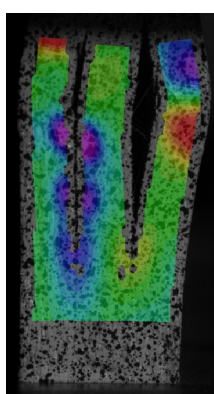
Obr. 180 T9 – V –  
MOR  
(č. -0,172,  
f. -0,307)



Obr. 181 T9 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0081,  
f. -0,0046)



Obr. 182 T9 – Exy  
MOR+  
(č. 0,0116,  
f. -0,0095)



Obr. 183 T9 – Exy  
MOR+  
(č. 0,031,  
f. -0,0375)

## 6.2.2 Ohybové vzorky

Vzhledem ke konstrukci vzorku, kdy povrchové vrstvy bukové dýhy a uhlíková vlákna byly orientovány rovnoběžně s podélnou osou zkušebního vzorku a středová vrstva dýhy byla na ni orientována kolmo, působila síla na povrchové vrstvy dýhy a uhlíková vlákna napříč vláken v radiálním směru a u středové vrstvy ve směru vláken, avšak vlákna měla ke směru působení síly určitý odklon. Při zkoušce dochází k namáhání horní povrchové vrstvy tlakem a spodní povrchové vrstvy tahem, což je způsobeno poměrnými deformacemi v těchto místech. Toto namáhání je nejpatrnější na snímcích zachycujících poměrné deformace v ose  $X$ . Tyto vzorky jsou označeny  $Exx$ . Mezi tahovým a tlakovým namáháním vzniká smykové napětí, které následně způsobuje PSD a je patrné na snímcích  $Exy$ . Toto napětí vzniká ve středové vrstvě dýhy,

kteřá je vlákny orientována kolmo na podélnou osu tělesa. Snímky  $E_{yy}$  zachycují poměrné deformace na ose  $Y$  a je na nich nejpatrnější otláčení od tlačné hlavy (fialově) a podpor (zeleně). Posunutí  $U$  zachycuje posun vláken v  $X$  ose v průběhu zkoušky, kdy dochází k nejviditelnějšímu posunu vláken v povrchových vrstvách dýhy na krajích vzorků. Jednotlivé snímky zachycují vývoj poměrných deformací, poměrných smykových deformací a posunutí v průběhu zkoušky.

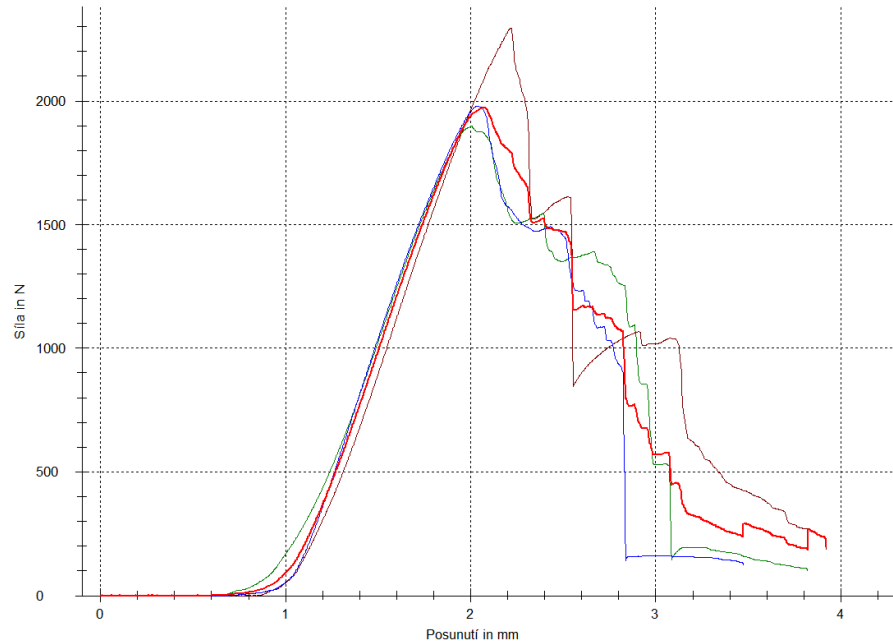
Při porušení těchto zkušebních vzorků dochází nejprve k vybočování vláken (zúžení) v tlakové zóně vzorku. Poměrné deformace způsobené tlakovým napětím jsou patrné na snímcích  $E_{xx}$  již při zatížení 10 % síly MOR v jejich horní povrchové části. Na těchto snímcích je také patrné tahové namáhání dřevních vláken (rozšíření) ve spodní povrchové vrstvě vzorku. Tahové napětí však vzniká později a je tedy patrné až na vzorcích zachycujících mez úměrnosti. Na snímcích zachycujících mez úměrnosti jsou také patrné poměrné smykové deformace ve středové vrstvě vzorku. Samotné porušení pak nejlépe zachycují obrázky poměrných smykových deformací, jelikož dochází k porušení ve dřevě vždy ve středové dýze mezi dřevními vlákny.

Obecně lze porušení těchto zkušebních tělísek popsat následovně. U nevyztužených vzorků nejprve dojde ke hladkému (křehkému) lomu ve směru síly ve středové vrstvě po celé tloušťce dýhy v místě pod zatěžovací hlavou a po překročení meze pevnosti začne vznikat porušení mezi dřevními vlákny ve středové vrstvě (případně částečná delaminace lepeného spoje), která se šíří ke kraji vzorku. Ke konci zkoušky dochází k vláknitému zlomu ve spodní vrstvě dýhy zkušebního tělíska. U vyztužených vzorků většinou nedochází k hladkému (křehkému) lomu ve středové dýze pod zatěžovací hlavou, ale zpravidla dochází k delaminaci v ose  $X$  mezi dřevními vlákny, nebo dochází k částečné delaminaci lepeného spoje. Tímto je chování vyztužených a nevyztužených vzorků u této zkoušky rozdílné. Ke konci zkoušky pak také dochází k vláknitému zlomu ve spodní vrstvě dýhy zkušebního tělíska. U jednotlivých zkušebních vzorků je pak popsáno jejich specifické porušení.

K prvotnímu porušení těchto zkušebních tělísek dochází jak již bylo zmíněno ve střední vrstvě dýhy, která se snadno deformuje. Místo porušení pak ovlivňuje také stavba dřeva, zejména tloušťka letokruhů letního dřeva a odklon vláken. V místě s nižší tloušťkou letokruhů a vyšším odklonem vláken pak snadněji dochází ke vzniku

poměrných smykových deformací, které nemusí mít nejvyšší velikost (ve vzorku mohou být lokálně i vyšší poměrné smykové deformace) a dochází k porušení v tomto místě. K hladkému lomu pak dochází vždy v jarním dřevě středové dýhy nad místem vláknitého lomu spodní dýhy, který většinou vzniká v ose působení zatěžovací hlavy.

### 6.2.2.1 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C bez vláken



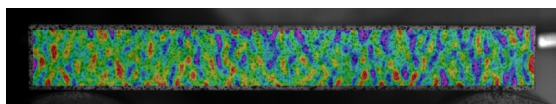
Obr. 184: Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově - O1, modře - O3, zeleně - O2.

#### 6.2.2.1.1 Zkušební vzorek O1 (označení 107)

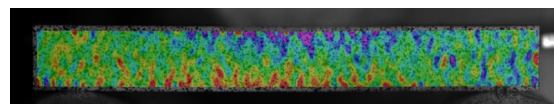
Při zatížení 10 % síly potřebné k dosažení meze pevnosti dochází pouze k mírnému průhybu vzorku. Síla, kterou zkušební stroj působí se koncentruje v povrchových vrstvách ve středu vzorku v místě, kde dochází ke kontaktu zatěžovací hlavy se vzorkem (Obr. 188) a způsobuje zanedbatelné elastické tlakové deformace. Při zvyšování napětí dochází ve vzorku k elastickým deformacím až do meze úměrnosti, ve vrchních povrchových vrstvách horní dýhy dochází ke tlakovému napětí (fialově) a ve spodních povrchových vrstvách dochází k namáhání tahem (červeně), což je nejpatrnější na Obr. 186. U tohoto tělíska však při dosažení meze úměrnosti není patrný vznik PSD ve střední vrstvě dýhy. Po překročení meze úměrnosti do dosažení meze pevnosti velikost PD a PSD v povrchových vrstvách dále roste a způsobuje plastické deformace. Také však dochází ke značné koncentraci PSD ve středové vrstvě vzorku.



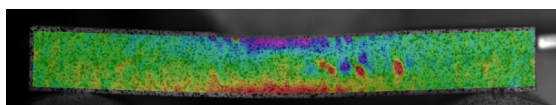
K největším PD dochází na pravé straně vzorku v místě působení tahového napětí, kde po překročení meze pevnosti dochází k lomu (Obr. 190 červeně). Po překročení meze pevnosti dochází v tomto místě k delaminaci mezi dřevními vlákny od poloviny do počátku 5/6 délky vzorku, kde dochází k přesunutí smykového napětí do spodní lepené spáry, což zapříčiňuje její pozdější delaminaci od 5/6 do konce zkušebního vzorku.



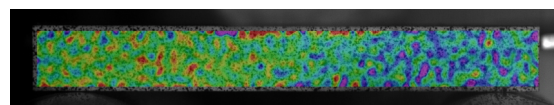
Obr. 185:  $O1 - E_{xx} - 10\%$  (č. 0,00138, z.  $3,25001e-05$ , m. -0,00093, f. -0,0017)



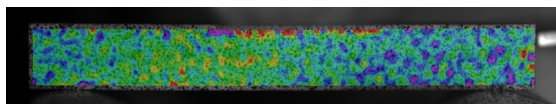
Obr. 186:  $O1 - E_{xx} - MÚ$  (č. 0,0018, z. 0,00018, m. -0,00144, f. -0,00252)



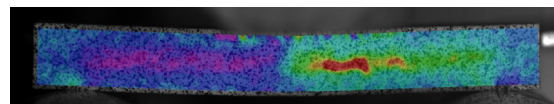
Obr. 187:  $O1 - E_{xx} - MOR$  (č. 0,0069, z. 0,006375, m. -0,005625, f. -0,0098)



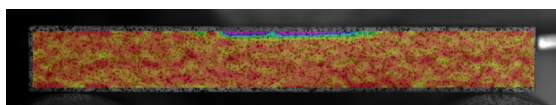
Obr. 188:  $O1 - E_{xy} - 10\%$  (č. 0,00152, z. 0,00063875, m. -0,00077125, f. -0,0013)



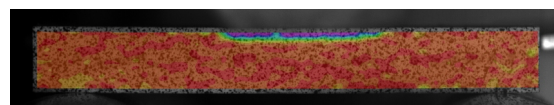
Obr. 189:  $O1 - E_{xy} - MÚ$  (č. 0,0019, z. 0,000465, m. -0,000765, f. -0,00138)



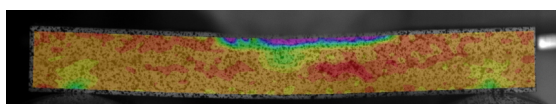
Obr. 190:  $O1 - E_{xy} - MOR$  (č. 0,0164, z. 0,00603125, m. -0,0015875, f. -0,0073)



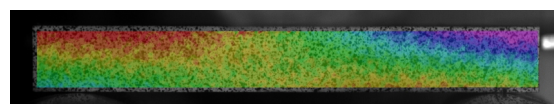
Obr. 191:  $O1 - E_{yy} - 10\%$  (č. 0,0021, o.1,24993e-05, ž. -0,0010312, f. -0,00146)



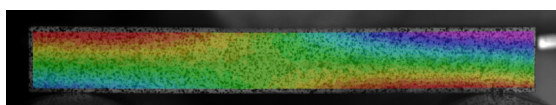
Obr. 192:  $O1 - E_{yy} - MÚ$  (č. 0,02, o. -0,001175, ž. -0,0027625, f. -0,0234)



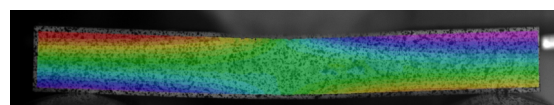
Obr. 193:  $O1 - E_{yy} - MOR$  (č. 0,0054, o. -2,50014e-05, z. -0,010875, f. -0,038)



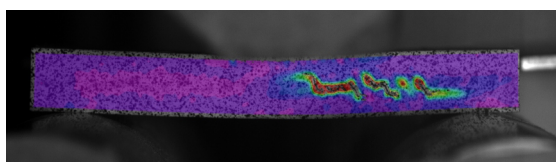
Obr. 194:  $O1 - U - 10\%$  (č. 0,0276, z. 0,020325, m. 0,01305, f. 0,0082)



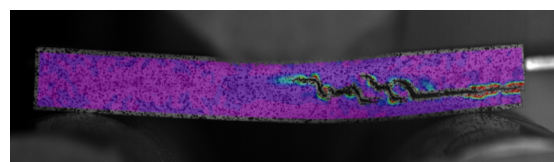
Obr. 195:  $O1 - U - MÚ$  (č. 0,058, ž. 0,03925, z. 0,0455, f. 0,008)



Obr. 196:  $O1 - U - MOR$  (č. 0,192, z. 0,112875, m. 0,060125, f. -0,019)



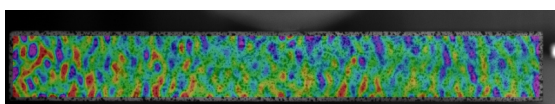
Obr. 197:  $O1 - E_{xy} - MOR+$  (č. 0,056, z. 0,03275, m. 0,0095, f. -0,006)



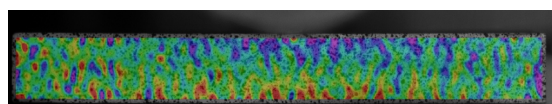
Obr. 198:  $O1 - E_{xy} - MOR+$  (č. 0,128, z. 0,076625, m. 0,02525, f. -0,009)

### 6.2.2.1.2 Zkušební vzorek O2 (označení 106)

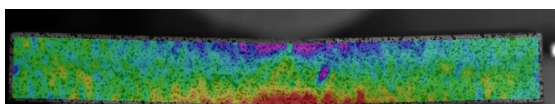
Průběh zatížení vzorku je totožný s předchozím případem O1 do dosažení MOR. Po ni však dochází k menším PSD v levé straně středové vrstvy vzorku, nežli v pravé straně, konkrétně ve dřevě těsně pod horní lepenou spárkou (cca 0,5 mm). V tomto (levém) místě působení PSD (Obr. 204 fialově) dochází k porušení mezi dřevními vlákny (ve směru  $X$ ), i když v tomto místě působí nižší PSD, nežli na pravé straně vzorku. K porušení ve dřevě v tomto místě dochází z důvodu orientace dřevních vláken dřevní vrstvy vůči směru působení PSD. Poté dochází k následnému šíření trhliny (Obr. 211), která způsobuje delaminaci středové dýhy od středu vzorku do jeho 1/6 a následně lom pokračuje směrem dolů, do dosažení spodní lepené spáry, v níž následně dochází k delaminaci. Delaminace pokračuje v lepené spáře od tohoto místa doleva. Delaminace však nepokračuje až ke konci zkušebního tělíska, jelikož dochází k vláknitému zlomu vzorku ve spodní vrstvě uprostřed, pod místem působení tlačné hlavy. Následně zlom pokračuje i do dýhy středové, tento zlom je však již hladký (Obr. 212).



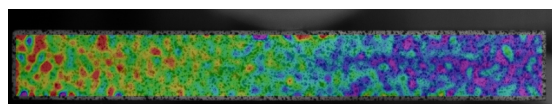
Obr. 199: O2 – Exx – 10 % (č. 0,00134, z. 5,85e-05, m. -0,001225, f. -0,00208)



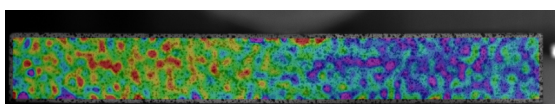
Obr. 200: O2 – Exx – MÚ (č. 0,0014, z. -0,0001925, m. -0,0015575, f. -0,00224)



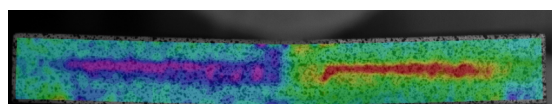
Obr. 201: O2 – Exx – MOR (č. 0,0054, z. 0,000171875, m. -0,00206875, f. -0,00655)



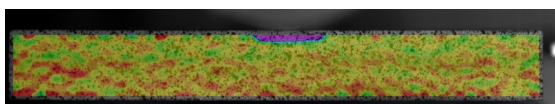
Obr. 202: O2 – Exy – 10 % (č. 0,0236, z. 0,0009425, m. -2,50002e-06, f. -0,00142)



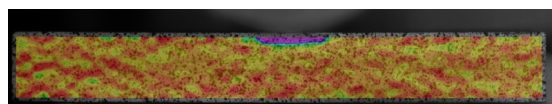
Obr. 203: O2 – Exy – MÚ (č. 0,00202, z. 0,00076, m. -8e-05, f. -0,00134)



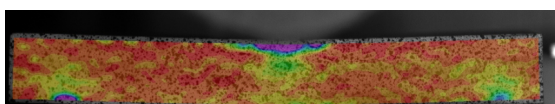
Obr. 204: O2 – Exy – MOR (č. 0,0101, z. 0,0046625, m. -0,0018625, f. -0,0073)



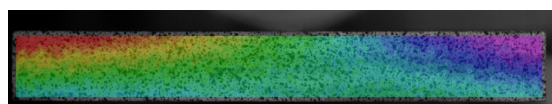
Obr. 205: O2 – Eyy – 10 % (č. 0,0022, z. -0,00085, ž. -8,75e-5, f. -0,01)



Obr. 206: O2 – Eyy – MÚ (č. 0,0016, o. -0,000125, ž. -0,00185, f. -0,0122)

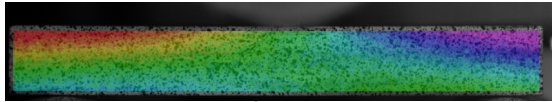


Obr. 207: O2 – Eyy – MOR (č. 0,0018, o. 0,0011625, ž. -0,004125, f. -0,0073)

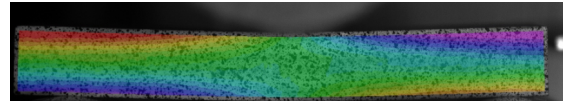


Obr. 208: O2 – U – 10 % (č. 0,039, z. 0,0319875, m. -0,00179625, f. 0,0016)

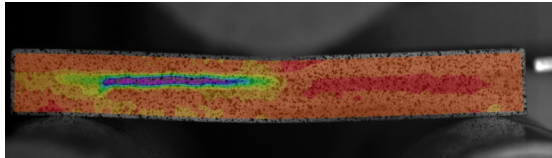




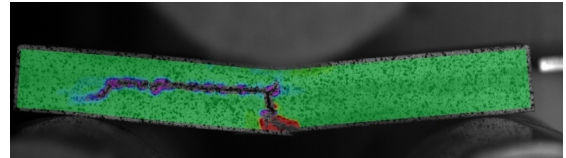
Obr. 209: O2 – U – MÚ (č. 0,0415, z. 0,0218125, m. 0,0086875, f. -0,011)



Obr. 210: O2 – U – MOR (č. 0,0108, z. 0,0314375, m. -0,0123125, f. -0,067)



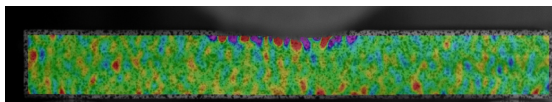
Obr. 211: O2 – Exy – MOR+ (č. 0,009, o. -0,0019357, ž. -0,00740625, f. -0,0073)



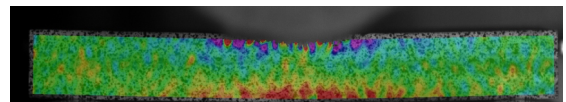
Obr. 212: O2 – Exy – MOR+ (č. 0,073, z. -0,006, m. -0,035625, f. -0,085)

### 6.2.2.1.3 Zkušební vzorek O3 (označení 105)

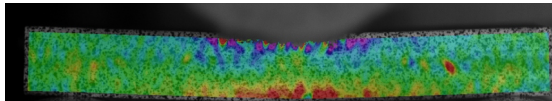
Průběh zatížení vzorku je velmi podobný s případem O2. Výjimkou je dosažení meze úměrnosti (Obr. 217), kde je patrné, že dochází ke koncentraci poměrných smykových deformací ve středové vrstvě zkušebního tělíska (dříve než v případě O2).



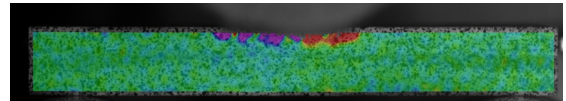
Obr. 213: O3 – Exx – 10 % (č. 0,00215, z. 0,0004625, m. -0,0015625, f. -0,000325)



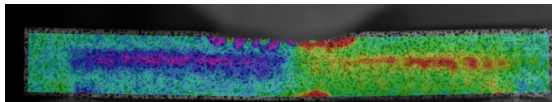
Obr. 214: O3 – Exx – MÚ (č. 0,00445, z. 0,00130938, m. -0,00245937, f. -0,0056)



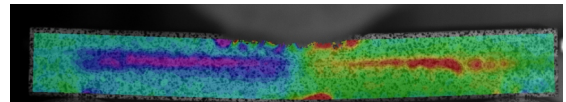
Obr. 215: O3 – Exx – MOR (č. 0,007, z. 0,0024375, m. -0,0030372, f. -0,0076)



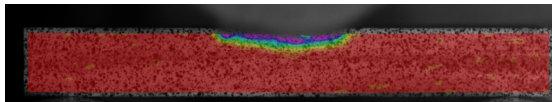
Obr. 216: O3 – Exy – 10 % (č. 0,00505, z. 0,00190937, m. -0,00185938, f. -0,005)



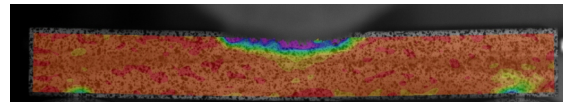
Obr. 217: O3 – Exy – MÚ (č. 0,009, z. 0,0038125, m. -0,0024125, f. -0,0076)



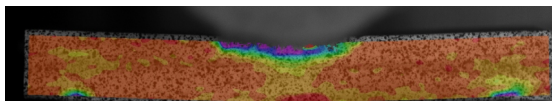
Obr. 218: O3 – Exy – MOR (č. 0,0154, z. 0,0065875, m. -0,0039875, f. -0,0128)



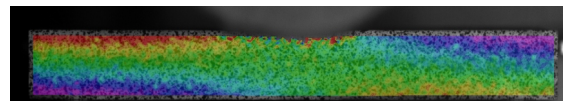
Obr. 219: O3 – Eyy – 10 % (č. 0,002, o -0,004625, z. -0,0145625, f. -0,051)



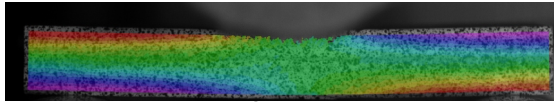
Obr. 220: O3 – Eyy – MÚ (č. 0,004, o -0,002875, z. -0,0131875, f. -0,051)



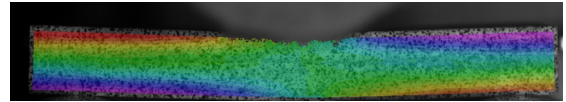
Obr. 221: O3 – Eyy – MOR (č. 0,0055, o -0,001875, z. 0,0350625, f. -0,0535)



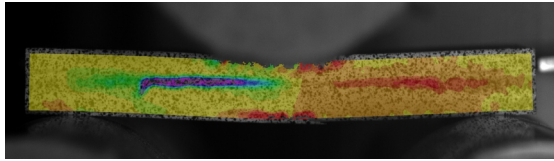
Obr. 222: O3 – U – 10 % (č. 0,0256, z. 0,0200375, m. 0,0133625, f. 0,0078)



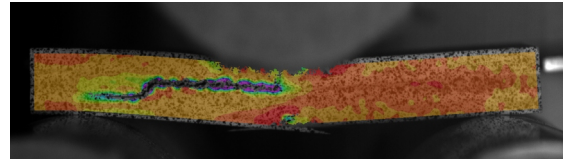
Obr. 223: O3 – U – MÚ (č. 0,097, z. 0,0621563, m. 0,0203438, f. -0,0145)



Obr. 224: O3 – U – MOR (č. 0,139, z. 0,084, m. 0,018, f. -0,037)

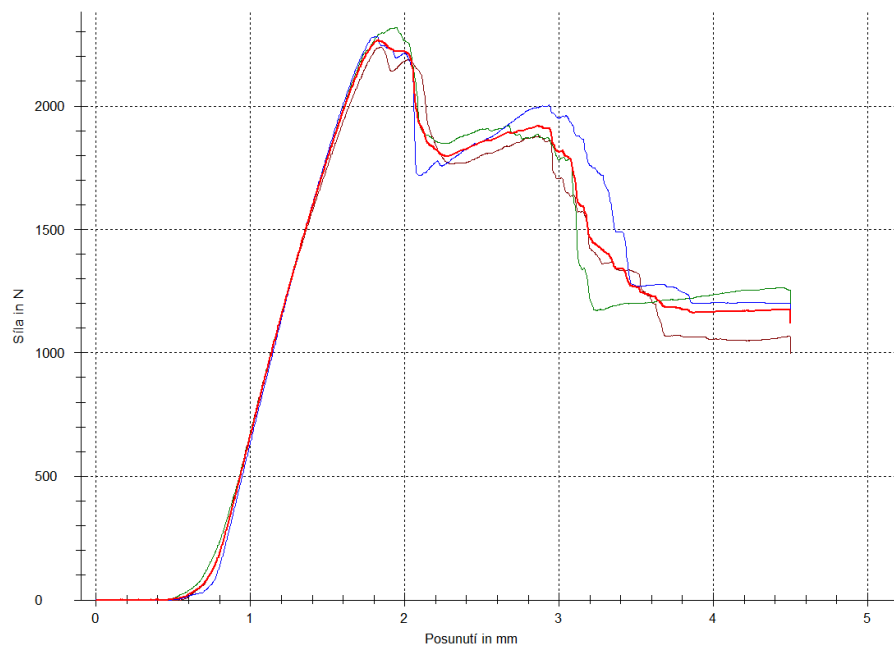


Obr. 225: O3 – Exy – MOR+ (č. 0,0195, z. -0,0101875, m. -0,0458125, f. -0,0755)



Obr. 226: O3 – Exy – MOR+ (č. 0,02, z. -0,0271875, m. -0,0838125, f. -0,131)

### 6.2.2.2 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C



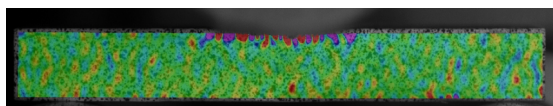
Obr. 227: Pracovní diagram Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově – O4, modře - O6, zeleně - O5.

#### 6.2.2.2.1 Zkušební vzorek O4 (označení 90)

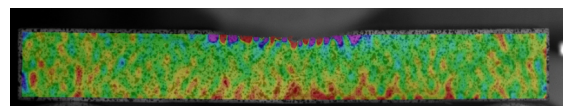
Tento vzorek se do meze úměrnosti chová velmi podobně jako nevyztužená tělíska, zejména jako vzorek O3. Síla, kterou je nutno na vzorek pro dosažení úměrnosti působit je však vyšší. Při zatížení 10 % síly potřebné k dosažení meze pevnosti tedy dochází pouze k mírnému průhybu vzorku. Síla, kterou zkušební stroj působí, způsobuje poměrné smykové deformace ve středu vzorku, poměrné deformace v povrchových vrstvách a v místě, kde dochází ke kontaktu zatěžovací hlavy se vzorkem (Obr. 231). Při dosažení meze úměrnosti dochází ve vzorku k elastickým deformacím, v horních



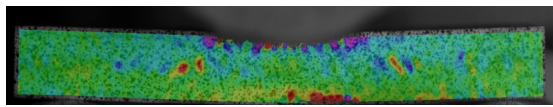
povrchových vrstvách dochází k namáhání tlakem (zkrácení – fialově). Ve spodních povrchových vrstvách dochází k namáhání tahem (prodloužení – červeně), což je způsobeno poměrnými deformacemi (Obr. 229 a Obr. 235). Ve středu vzorku dochází ke zvyšování PSD, což je nejpatrnější na Obr. 232. Od meze elasticity do dosažení meze pevnosti PD v povrchových vrstvách a PSD ve středové vrstvě dále roste a způsobuje plastické deformace. K velkým PSD dochází ve středové vrstvě (velikostí PSD vůči ploše na kterou působí) na levé straně vzorku, kde po překročení meze pevnosti dochází k porušení ve dřevě (Obr. 233 fialově). Po překročení meze pevnosti tedy v tomto místě dochází k porušení mezi dřevními vlákny po celé délce levé strany vzorku (Obr. 240), a současně dochází k vláknitému zlomu ve spodní dýze uprostřed její délky (Obr. 241). Ve střední vrstvě dýhy k následnému hladkému zlomu nedochází.



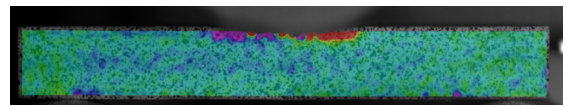
Obr. 228: O4 – Exx – 10 % (č. 0,0025, z. 0,00059375, m. -0,00169375, f. -0,0036)



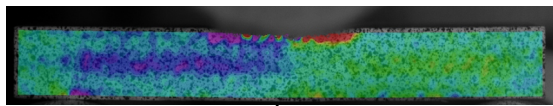
Obr. 229: O4 – Exx – MÚ (č. 0,0027, z. 0,00016875, m. -0,00286875, f. -0,0054)



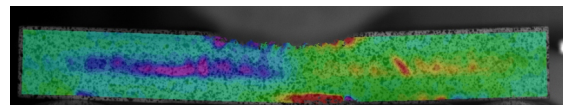
Obr. 230: O4 – Exx – MOR (č. 0,0087, z. 0,00295, m. -0,00395, f. -0,0097)



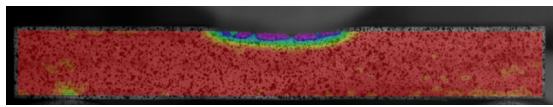
Obr. 231: O4 – Exy – 10 % (č. 0,0068, z. 0,00308125, m. -0,00138125, f. -0,0051)



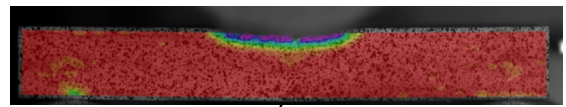
Obr. 232: O4 – Exy – MÚ (č. 0,0086, z. 0,00406875, m. -0,00136875, f. -0,0059)



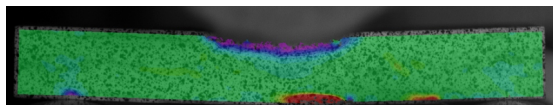
Obr. 233: O4 – Exy – MOR (č. 0,0228, z. 0,009175, m. -0,007175, f. -0,0208)



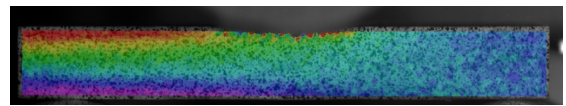
Obr. 234: O4 – Eyy – 10 % (č. 0,002, z. -0,0155, m. -0,0365, f. -0,054)



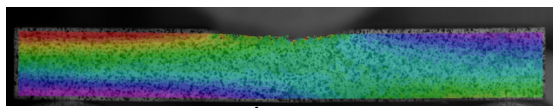
Obr. 235: O4 – Eyy – MÚ (č. 0,002, z. -0,0183125, m. -0,0426875, f. -0,063)



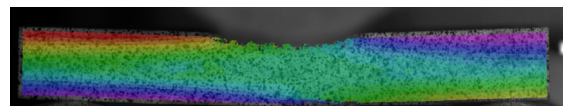
Obr. 236: O4 – Eyy – MOR (č. 0,06, z. 0,020625, m. -0,026625, f. -0,066)



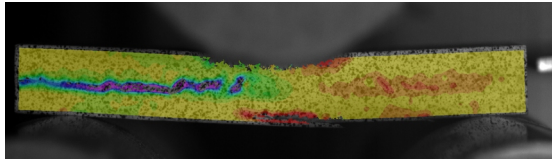
Obr. 237: O4 – U – 10 % (č. 0,365, z. 0,0915625, m. -0,236562, f. -0,51)



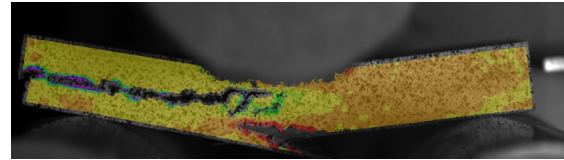
Obr. 238: O4 – U – MÚ (č. 1,11, z. 0,46, m. -0,32, f. -0,97)



Obr. 239: O4 – U – MOR (č. 3,5, z. 1,73438, m. -0,384375, f. -2,15)



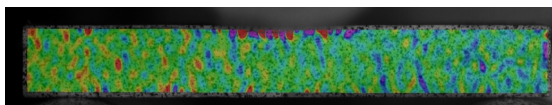
Obr. 240: O4 – Exy – MOR+ (č. 0,0275, z. -0,00984375, m. -0,0546563, f. -0,092)



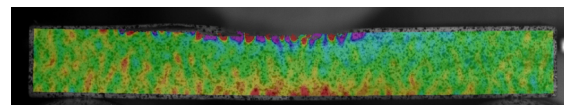
Obr. 241: O4 – Exy – MOR+ (č. 0,072, z. -0,07125, m. -0,190625, f. -0,31)

#### 6.2.2.2 Zkušební vzorek O5 (označení 85)

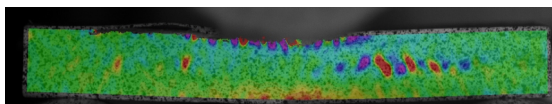
Průběh zatížení i porušení vzorku je podobný případu O4 až do dosažení meze pevnosti, avšak po překročení meze pevnosti nedochází k porušení na levé tlakem namáhané straně, ale na pravé tahem namáhané straně ve střední vrstvě vzorku (Obr. 254). V tomto místě dochází k nejvyššímu namáhání PSD, jelikož jsou letokruhy letního dřeva užší, nežli na levé straně vzorku, což může být také důvodem vyšších PSD v levé vrstvě vzorku. Ve vzorku dochází opět k porušení ve střední vrstvě dýhy, kde dochází k porušení ve dřevě od středu až do konce vzorku. Poté dojde k vláknitému zlomu ve spodní vrstvě dýhy pod místem působení zatěžovací hlavy, což zachycuje Obr. 255. Ve střední vrstvě dýhy k následnému hladkému zlomu nedochází.



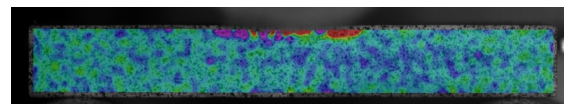
Obr. 242: O5 – Exx – 10 % (č. 0,0021, z. 0,000490625, m. -0,00144063, f. -0,00305)



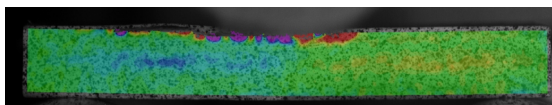
Obr. 243: O5 – Exx – MÚ (č. 0,00365, z. 0,000384375, m. -0,00353438, f. -0,0068)



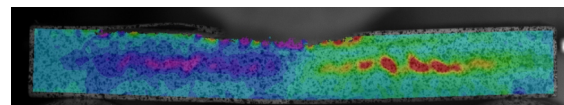
Obr. 244: O5 – Exx – MOR (č. 0,0093, z. 0,002675, m. -0,005275, f. -0,0119)



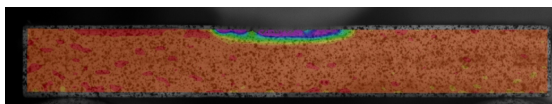
Obr. 245: O5 – Exy – 10 % (č. 0,00445, z. 0,0022, m. -0,0005, f. -0,00275)



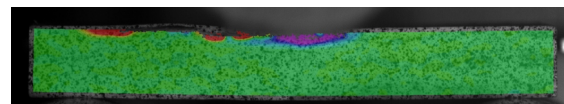
Obr. 246: O5 – Exy – MÚ (č. 0,0097, z. 0,00304375, m. -0,00494375, f. -0,0116)



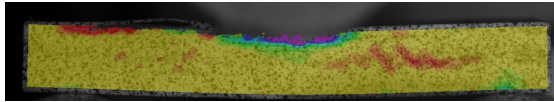
Obr. 247: O5 – Exy – MOR (č. 0,0242, z. 0,01245, m. -0,00165, f. -0,0134)



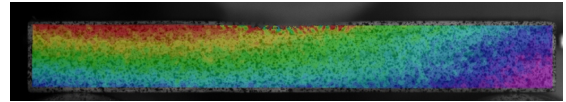
Obr. 248: O5 – Eyy – 10 % (č. 0,0036, o -0,002, z. -0,0104, m. -0,0272, f. -0,0412)



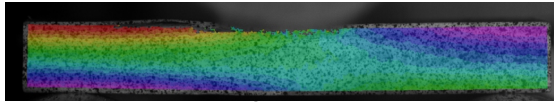
Obr. 249: O5 – Eyy – MÚ (č. 0,0, z. 0,0, m. -0,0, f. -0,0)



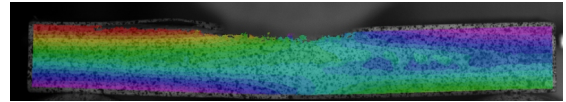
Obr. 250: O5 – Eyy – MOR (č. 0,023, ž. 0,0017187, z. -0,012468, m. -0,055031, f. -0,0905)



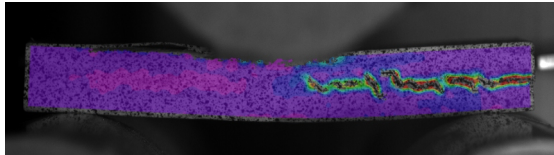
Obr. 251: O5 – U – 10 % (č. 1,75, z. 1,47531, m. 1,13969, f. 0,86)



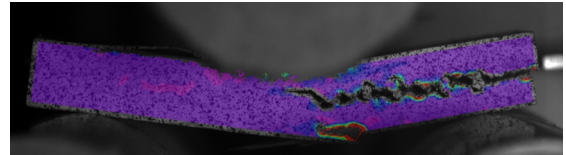
Obr. 252: O5 – U – MÚ (č. 3,32, z. 2,37, m. 1,23, f. 0,28)



Obr. 253: O5 – U – MOR (č. 5,55, z. 3,675, m. 1,425, f. -0,45)



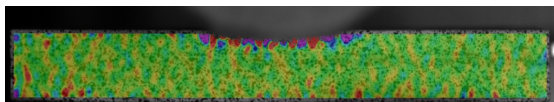
Obr. 254: O5 – Exy – MOR+ (č. 0,1105, z. 0,0725312, m. 0,0269688, f. -0,011)



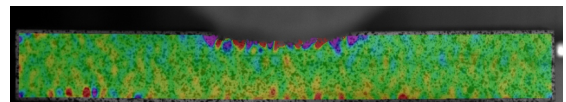
Obr. 255: O5 – Exy – MOR+ (č. 0,19, z. 0,125, m. 0,047, f. -0,018)

### 6.2.2.2.3 Zkušební vzorek O6 (označení 86)

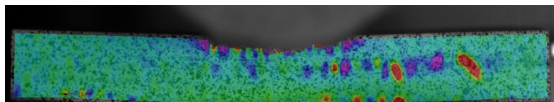
Průběh zatížení i porušení vzorku je shodné s předchozím případem O5.



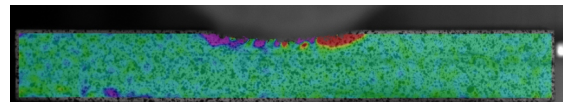
Obr. 256: O6 – Exx – 10 % (č. 0,00245, z. 0,000246875, m. -0,00239688, f. -0,046)



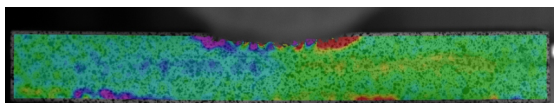
Obr. 257: O6 – Exx – MÚ (č. 0,0038, z. 0,000784375, m. -0,00283438, f. -0,00585)



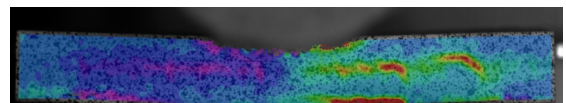
Obr. 258: O6 – Exx – MOR (č. 0,0172, z. 0,0077, m. -0,0037, f. -0,0132)



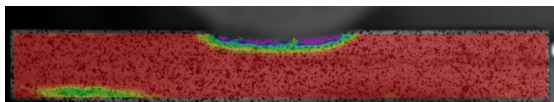
Obr. 259: O6 – Exy – 10 % (č. 0,0072, z. 0,003075, m. -0,001875, f. -0,006)



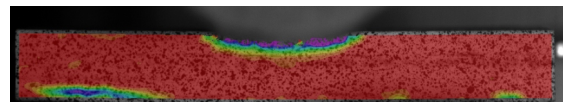
Obr. 260: O6 – Exy – MÚ (č. 0,0079, z. 0,00293125, m. -0,00303125, f. -0,008)



Obr. 261: O6 – Exy – MOR (č. 0,0348, z. 0,0194875, m. 0,0011125, f. -0,0142)

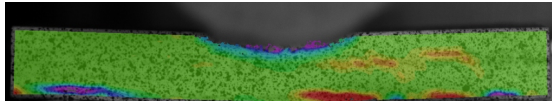


Obr. 262: O6 – Eyy – 10 % (č. 0,0015, z. -0,0192812, m. -0,0442187, f. -0,065)

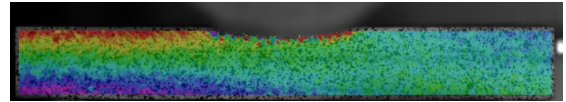


Obr. 263: O6 – Eyy – MÚ (č. 0,002, z. -0,0183125, m. -0,0426875, f. -0,063)

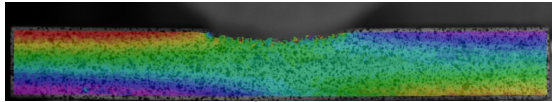




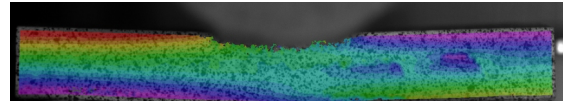
Obr. 264: O6 – Eyy – MOR (č. 0,045, z. 0,0025001, m. -0,0485, f. -0,091)



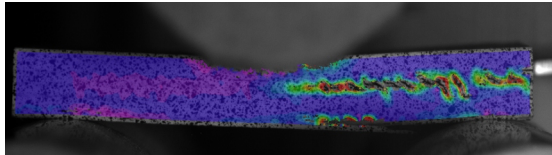
Obr. 265: O6 – U – 10 % (č. 0,0267, z. 0,0205125, m. 0,0130875, f. 0,0069)



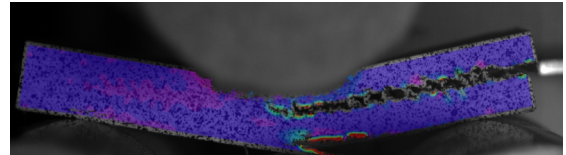
Obr. 266: O6 – U – MÚ (č. 0,0575, z. 0,0407813, m. 0,0207189, f. 0,004)



Obr. 267: O6 – U – MOR (č. 0,155, z. 0,101562, m. 0,0374375, f. -0,016)

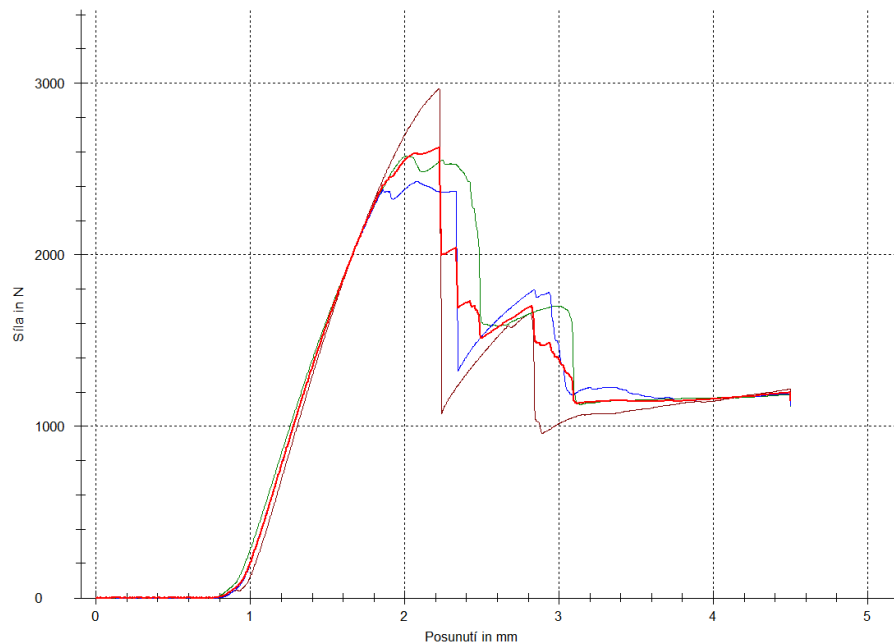


Obr. 268: O6 – Exy – MOR+ (č. 0,0875, z. 0,0551562, m. 0,0163438, f. -0,016)



Obr. 269: O6 – Exy – MOR+ (č. 0,0242, z. 0,1545, m. 0,0495, f. -0,038)

### 6.2.2.3 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 120 °C

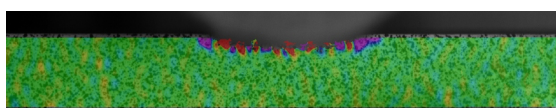


Obr. 270: Pracovní diagram Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově – O7, modře - O9, zeleně - O8.

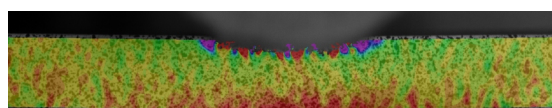
#### 6.2.2.3.1 Zkušební vzorek O7 (označení 142)

Průběh zatížení i porušení vzorku je shodné se vzorkem O5, byla však zapotřebí vyšší síla k dosažení meze úměrnosti a pevnosti, nežli v předchozích případech. Lišil se také průběh zdeformování vzorku po překročení meze pevnosti. Při zatížení 10 % síly

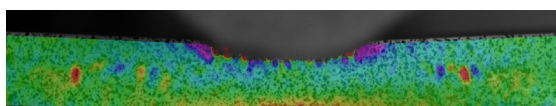
potřebné k dosažení meze pevnosti dochází pouze k mírnému průhybu vzorku. Síla, kterou zkušební stroj působí, způsobuje PD a PSD ve středu vzorku v povrchových vrstvách v místě, kde dochází ke kontaktu zatěžovací hlavy se vzorkem (Obr. 274). Při dosažení meze úměrnosti dochází ve vzorku k elastickým deformacím, v horních povrchových vrstvách dochází k namáhání tlakem (zkrácení – fialově). Ve spodních povrchových vrstvách dochází k namáhání tahem (prodloužení – červeně), což je způsobeno PD, a ve středu vzorku dochází k PSD (Obr. 275). Od meze elasticity do dosažení meze pevnosti dochází k PD v povrchových vrstvách a k PSD v místě kontaktu tlačné hlavy se zkušebním vzorkem, zatímco PSD ve středové vrstvě dále rostou. K velkým PSD dochází ve středové vrstvě na pravé straně vzorku, kde po překročení meze pevnosti dochází k delaminaci (Obr. 276 červeně). Po překročení meze pevnosti u tohoto zkušebního tělíska došlo k delaminaci horního lepeného spoje od poloviny zkušebního tělíska do zhruba 5/6, kde došlo k přesunu lomu do středové vrstvy dýhy a delaminace pokračovala ve spodní lepené spáře viz. Obr. 283. Poté při dalším působení síly došlo k vláknitému zlomu ve spodní vrstvě dýhy až ke spodnímu lepenému spoji, kde porušení pokračovalo formou místní delaminace lepeného spoje (Obr. 284).



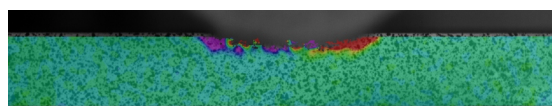
Obr. 271: O7 – Exx – 10 % (č. 0,00405, z. 0,0009875, m. -0,0026875, f. -0,00575)



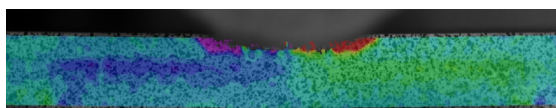
Obr. 272: O7 – Exx – MÚ (č. 0,0029, z. -0,00081875, m. -0,00528125, f. -0,009)



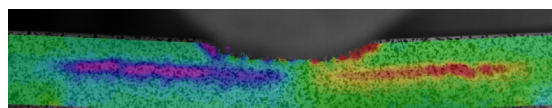
Obr. 273: O7 – Exx – MOR (č. 0,0093, z. 0,00308125, m. -0,00438125, f. -0,0106)



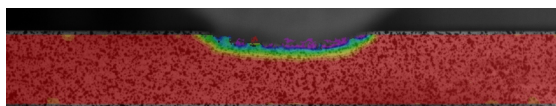
Obr. 274: O7 – Exy – 10 % (č. 0,0106, z. 0,0046, m. -0,0026, f. -0,0086)



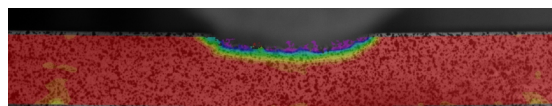
Obr. 275: O7 – Exy – MÚ (č. 0,0139, z. 0,00674375, m. -0,00184375, f. -0,009)



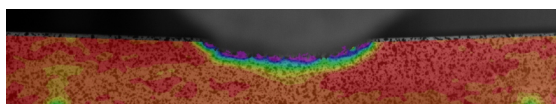
Obr. 276: O7 – Exy – MOR (č. 0,021, z. 0,0074375, m. 0,0088375, f. -0,0224)



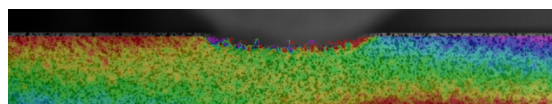
Obr. 277: O7 – Eyy – 10 % (č. 0,0015, z. -0,0192812, m. -0,0442187, f. -0,065)



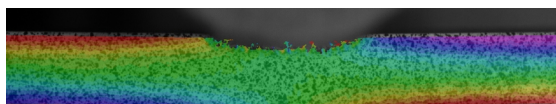
Obr. 278: O7 – Eyy – MÚ (č. 0,0015, z. -0,019125, m. -0,043875, f. -0,0645)



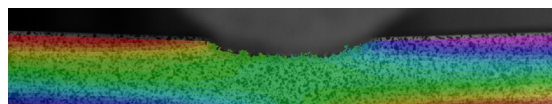
Obr. 279: O7 – Eyy – MOR (č. 0,003, o -0,004062, z. -0,0146563, m. -0,0358438, f. -0,0535)



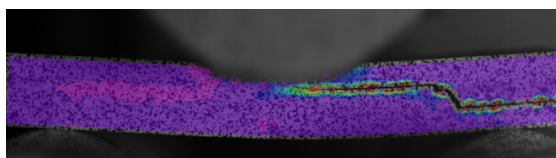
Obr. 280: O7 – U – 10 % (č. 0,0137, z. 0,0085125, m. 0,0022875, f. -0,0029)



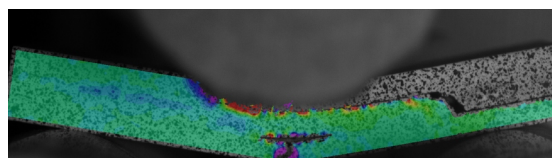
Obr. 281: O7 – U – MÚ (č. 0,049, z. 0,026013, m. -0,00153125, f. -0,0245)



Obr. 282: O7 – U – MOR (č. 0,131, z. 0,06725, m. -0,00925, f. -0,073)



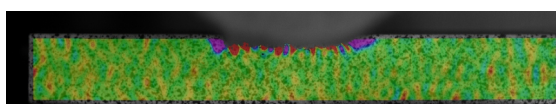
Obr. 283: O7 – Exy – MOR+ (č. 0,117, z. 0,0766875, m. 0,0283125, f. -0,012)



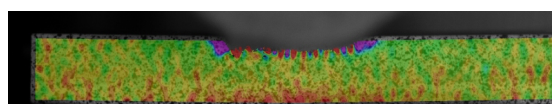
Obr. 284: O7 – Exy – MOR+ (č. 0,04, z. 0,0165625, m. -0,0115625, f. -0,035)

### 6.2.2.3.2 Zkušební vzorek O8 (označení 146)

Zatížení a porušení tohoto vzorku je podobné se vzorkem O4. Síla, kterou je nutno na vzorek pro dosažení úměrnosti působit je však vyšší. Při zatížení 10 % síly potřebné k dosažení meze pevnosti dochází k mírnému průhybu vzorku. Síla, kterou zkušební stroj působí, způsobuje PD v povrchových vrstvách a PSD ve středu vzorku v místě, kde dochází ke kontaktu zatěžovací hlavy se vzorkem (Obr. 288). Při dosažení meze úměrnosti dochází ve vzorku k elastickým deformacím, kdy horní povrchové vrstvy jsou namáhány tlakem (zkráceny - fialově), spodní vrstvy tahem (prodlouženy - červeně) a ve středu vzorku pod tlačnou hlavou dochází k PSD, viz. Obr. 289. Od meze elasticity do dosažení meze pevnosti dochází k PD a PSD ve středové a povrchových vrstvách, které dále rostou a dochází v nich k plastickým deformacím. K největším PSD dochází ve středové vrstvě na levé straně vzorku. Po překročení meze pevnosti zde dochází k porušení ve dřevě (Obr. 290 fialově) mezi dřevními vlákny od poloviny délky vzorku do 12/12, kde dochází k přesunutí lomu do spodní lepené spáry, což vede k její následné delaminaci. Poté dochází k vláknitému lomu uprostřed spodní dýhy.

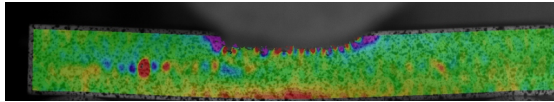


Obr. 285: O8 – Exx – 10 % (č. 0,0034, z. 0,000321875, m. -0,00337188, f. -0,00645)

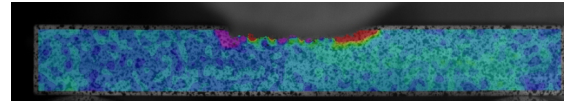


Obr. 286: O8 – Exx – MÚ (č. 0,0036, z. -0,000525001, m. -0,005475, f. -0,0096)

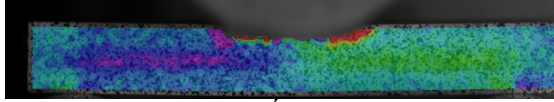




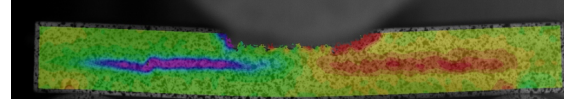
Obr. 287: O8 – Exx – MOR (č. 0,0089, z. 0,001775, m. -0,006775, f. -0,0139)



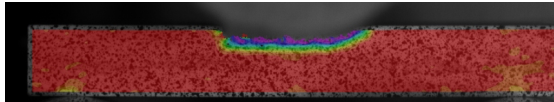
Obr. 288: O8 – Exy – 10 % (č. 0,0119, z. 0,00643125, m. -0,00013125, f. -0,0056)



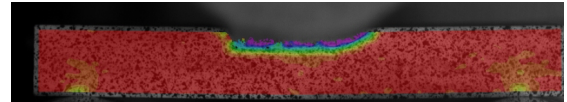
Obr. 289: O8 – Exy – MÚ (č. 0,0138, z. 0,00714375, m. -0,00084375, f. -0,0075)



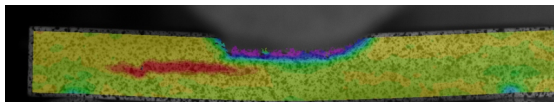
Obr. 290: O8 – Exy – MOR (č. 0,0165, ž. 0,006093, z. -0,000843, m. -0,021656, f. -0,039)



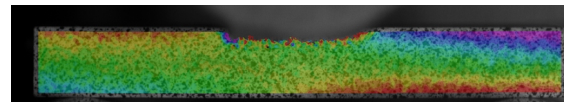
Obr. 291: O8 – Eyy – 10 % (č. 0,002, z. -0,0178437, m. -0,0416563, f. -0,0615)



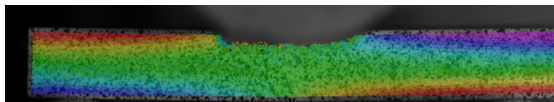
Obr. 292: O8 – Eyy – MÚ (č. 0,002, z. -0,0208125, m. -0,0481875, f. -0,071)



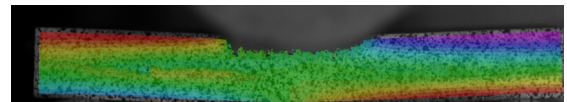
Obr. 293: O8 – Eyy – MOR (č. 0,019, z. -0,006, m. -0,036, f. -0,061)



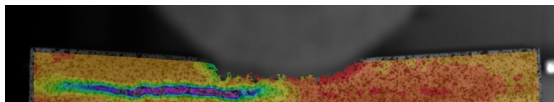
Obr. 294: O8 – U – 10 % (č. 0,0248, z. 0,0168625, m. 0,0073375, f. -0,0006)



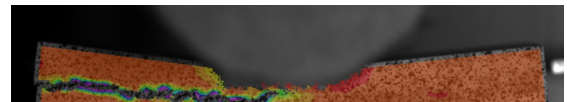
Obr. 295: O8 – U – MÚ (č. 0,0685, z. 0,0442813, m. 0,0152188, f. -0,009)



Obr. 296: O8 – U – MOR (č. 0,152, z. 0,0829375, m. 6,24975e-05, f. -0,069)



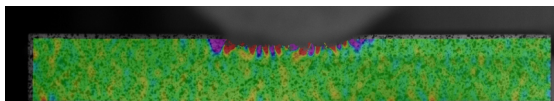
Obr. 297: O8 – Exy – MOR+ (č. 0,019, z. -0,0238125, m. -0,0751875, f. -0,118)



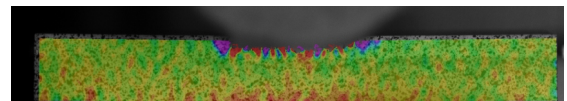
Obr. 298: O8 – Exy – MOR+ (č. 0,024, z. -0,0535, m. -0,1465, f. -0,224)

### 6.2.2.3.3 Zkušební vzorek O9 (označení 151)

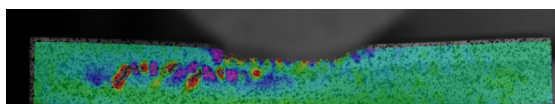
Průběh zatížení i porušení tohoto vzorku byl velmi podobný vzorku O7. Porušení však neproběhlo ve středové vrstvě na pravé straně vzorku, ale na levé straně vzorku, kde byly PSD vyšší. Charakter porušení byl však totožný se vzorkem O7.



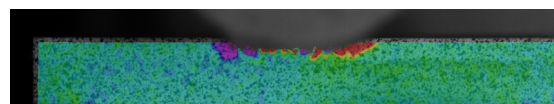
Obr. 299: O9 – Exx – 10 % (č. 0,0045, z. 0,00101562, m. -0,00316563, f. -0,00665)



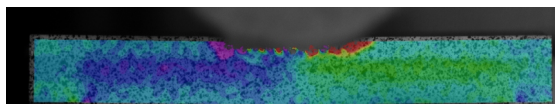
Obr. 300: O9 – Exx – MÚ (č. 0,0037, z. -0,0002375, m. -0,0049625, f. -0,0089)



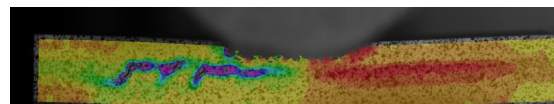
Obr. 301: O9 - E<sub>xx</sub> - MOR (č. 0,0222, z. 0,0092625, m. -0,0062625, f. -0,0192)



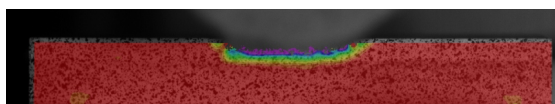
Obr. 302: O9 - E<sub>xy</sub> - 10 % (č. 0,0092, z. 0,00404375, m. -0,00214375, f. -0,073)



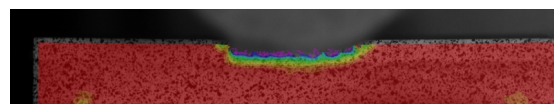
Obr. 303: O9 - E<sub>xy</sub> - MÚ (č. 0,0126, z. 0,00631875, m. -0,00121875, f. -0,0075)



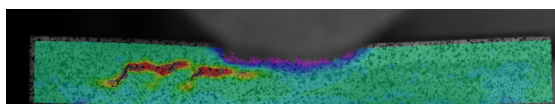
Obr. 304: O9 - E<sub>xy</sub> - MOR (č. 0,017, ž. 0,00049997, o. 0,006, z. -0,0105, f. -0,071)



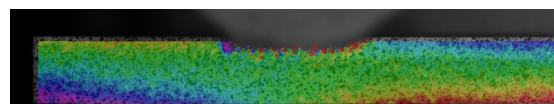
Obr. 305: O9 - E<sub>yy</sub> - 10 % (č. 0,002, z. -0,0231563, m. -0,0533438, f. -0,0785)



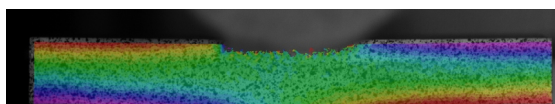
Obr. 306: O9 - E<sub>yy</sub> - MÚ (č. 0,002, z. -0,0264375, m. -0,0605625, f. -0,089)



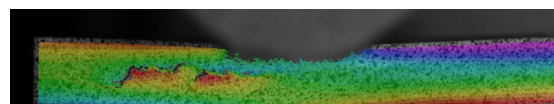
Obr. 307: O9 - E<sub>yy</sub> - MOR (č. 0,099, z. 0,0430625, m. -0,0240625, f. -0,08)



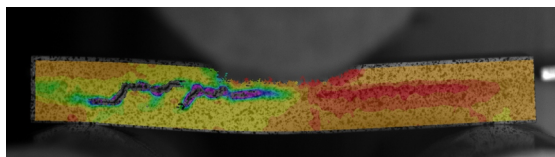
Obr. 308: O9 - U - 10 % (č. 0,0157, z. 0,0101687, m. 0,00353125, f. -0,002)



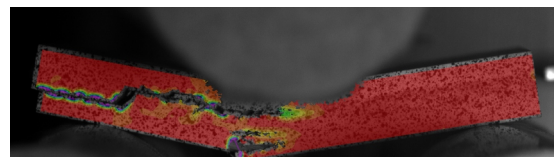
Obr. 309: O9 - U - MÚ (č. 0,048, z. 0,0289375, m. 0,0060625, f. -0,013)



Obr. 310: O9 - U - MOR (č. 0,14, z. 0,0671875, m. -0,0201875, f. -0,0930)



Obr. 311: O9 - E<sub>xy</sub> - MOR+ (č. 0,0175, z. -0,0148438, m. -0,0536563, f. -0,086)



Obr. 312: O9 - E<sub>xy</sub> - MOR+ (č. 0,018, z. -0,101375, m. -0,0244625, f. -0,364)

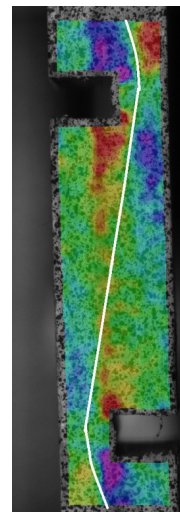
### 6.2.3 Smykové vzorky

Vzhledem ke konstrukci vzorku, kdy povrchové vrstvy bukové dýhy a uhlíková vlákna byly orientovány rovnoběžně s podélnou osou zkušební vzorku a středová vrstva dýhy byla na ni orientována kolmo, působila síla na povrchové vrstvy dýhy a na uhlíková vlákna ve směru vláken a u středové vrstvy kolmo na vlákna, která měla vůči směru působení síly určitý odklon. U tohoto vzorku byla z každé strany vyřezána drážka tak, aby došlo k proříznutí jedné boční vrstvy dýhy, uhlíkových vláken a středové vrstvy dřeva. Tím ve středu vzorku vznikla smyková (pracovní) část vzorku, která má délku přibližně 1/3 délky zkušební vzorku. Horní a spodní část zkušební tělíska měla



jednu boční vrstvu dlouhou 2/3 délky zkušebního tělíska. Po provedení řezu vznikly takzvané krčky, které mají tloušťku jedné vrstvy dýhy, uhlíkových vláken (u vyztužených tělísek) a nedořezu dřeva středové dýhy. Tento „krček“ je v podstatě označení části nacházející se přibližně v polovině dlouhých bočních vrstev.

Při zkoušce dochází k zatížení horní části vzorku ukotvené v horních čelistech tahovou silou, která způsobuje napětí přenášející se za pomoci 2/3 dlouhé boční vrstvy do pracovní části vzorku a následně do 2/3 dlouhé spodní boční vrstvy a dále spodní části vzorku. Spodní část vzorku je pevně ukotvena ve spodních čelistech, které však pohyb nevykonávají, čímž dochází ke vzniku smykového napětí v pracovní části vzorku vedoucí k PSD. Pracovní část vzorku, ve které působí PSD se má tendenci vychýlit se tak, aby došlo k narovnání „tahové osy“ zatížení, čímž by došlo ke změně smykového napětí na tahové napětí. Tímto dochází ke vzniku PSD na Obr. 313 červeně prodloužení a fialově zkrácení vrstvy vzorku. Ve středu vzorku je pak patrný přenos PSD (oranžově). „Tahová osa“ je zobrazena bílou křivkou. Obr. 313 zachycuje mez úměrnosti u smykového zkušební vzorku S4 při zobrazení působících PSD.



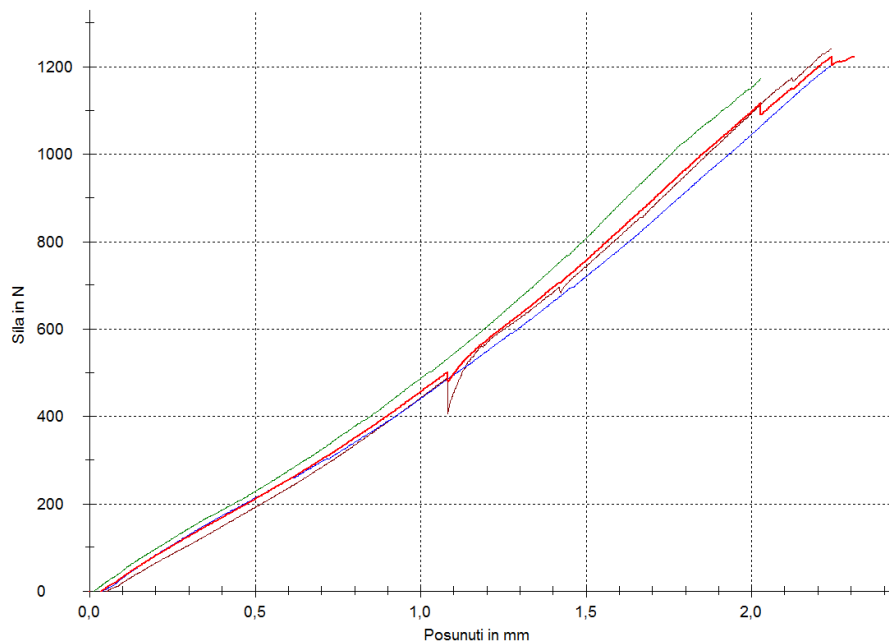
Obr. 313: S4 -  
Exy - MÚ

Průběh zkoušky je následující – ve vrstvách dřeva v blízkosti krčků dochází k PSD a PD (jejich maxim) a také k jejich působení ve všech vnitřních rozích krčků, kde dochází k jejich rozšíření na vnitřní straně krčku a zúžení na vnější straně (dýhy) krčku. Jejich rozložení je pak patrné na všech obrázcích zachycující průběh této zkoušky. PSD a PD v těchto místech neustále vzrůstají až do meze pevnosti, kdy dochází k místním delaminacím v rozích krčků. Dalším působením tahové síly dochází k rozšiřování delaminací zejména v pracovní části vzorku, která se začíná vychylovat. Zkouška končí úplnou delaminací lepeného spoje nebo méně častým dostatečným vychýlením pracovní části tělíska bez vzniku úplné delaminace.

Vývoj a působení PD zachycují snímky  $E_{xx}$  (na ose  $X$ ) a  $E_{yy}$  (na ose  $Y$ ). Na snímcích  $E_{yy}$  je patrná „tahová osa“. PSD je pak vyhodnoceno na snímcích  $E_{xy}$ , místa jeho nejčastějšího rozložení ve vzorcích zachycuje Obr. 313. Při vyhodnocení rozložení PSD zjistíme, že v místech zbarvených červeně a fialově působí dochází k maximům a ve středové vrstvě v lepených spárách a středové dýze dochází k přenosu PSD, což je

dobře patrné na snímcích zachycujících mez pevnosti. Posunutí  $V$  zachycuje posun vláken v ose  $Y$  v průběhu zkoušky, kdy dochází k nejviditelnějšímu posunu vláken u tažené části vzorku (červeně, zeleně a žlutě) a naopak u spodní části vzorků ukotvených v čelistech zkušebního stroje k posunutí téměř nedochází, jelikož tyto čelisti nevykonávají zatěžující pohyb (posunem příčnicku).

### 6.2.3.1 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C bez vláken



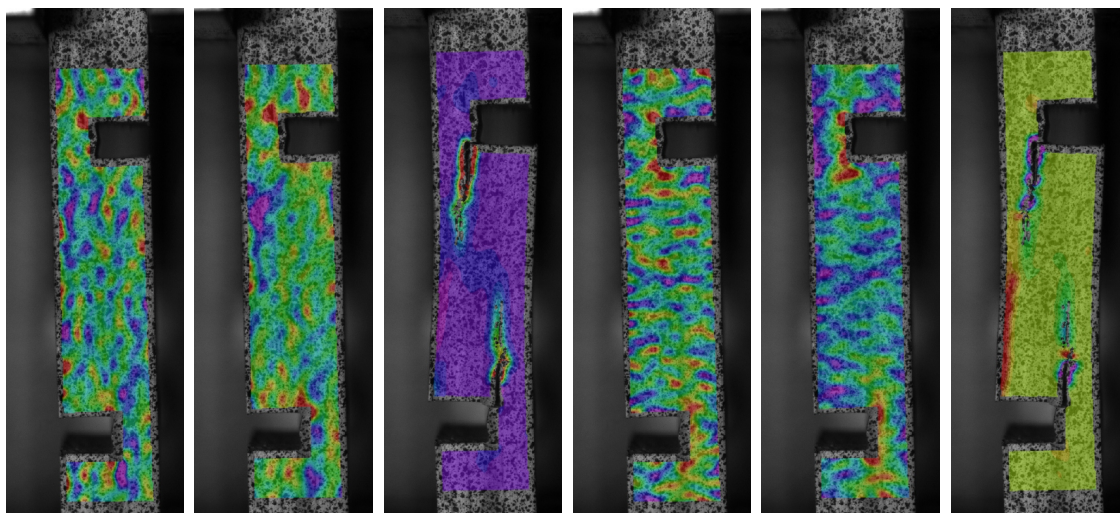
Obr. 314: Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově - S1, modře - S3, zeleně - S2.

#### 6.2.3.1.1 Zkušební vzorek S1 (označení 101)

Tento vzorek v průběhu zkoušky vykazuje chování, které je popsáno výše (obecné chování). Při porovnání s vyztuženými vzorky je však patrné, že PSD vznikají v celé středové (pracovní) části vzorků a PSD nejsou ovlivňovány uhlíkovými vlákny, které u vyztužených vzorků mírně mění jeho rozložení. U těchto nevyztužených vzorků často dochází k porušení částečnou delaminací v lepené spáře a mezi dřevními vlákny. Rozložení poměrných deformací je pak v podstatě stejné u všech vzorků. Rozložení sledovaných veličin je patrné na snímcích níže.

Obr. 327 zachycuje PSD před započítáním delaminace, Obr. 328 pak zachycuje začátek delaminací v lepené spáře. Na Obr. 320 je patrné přesouvání delaminace z levé

lepené spáry do levé dýhy při dosažení meze pevnosti. Obr. 329 pak zachycuje vzorek na konci zkoušky, kdy je patrné, že došlo k celkové delaminaci zpočátku v lepené spáře a poté se delaminace přesunula do pravé dýhy, kde došlo k porušení mezi dřevními vlákny až ke konci pracovní části vzorku. V pravé lepené spáře pak došlo k delaminaci do poloviny pracovní části vzorku.



Obr. 315:  $S_I - E_{xx} - 10\%$   
(č. 0,00101,  
z.  $-4e-05$ ,  
m.  $-0,0006952$ ,  
f.  $-0,00109$ )

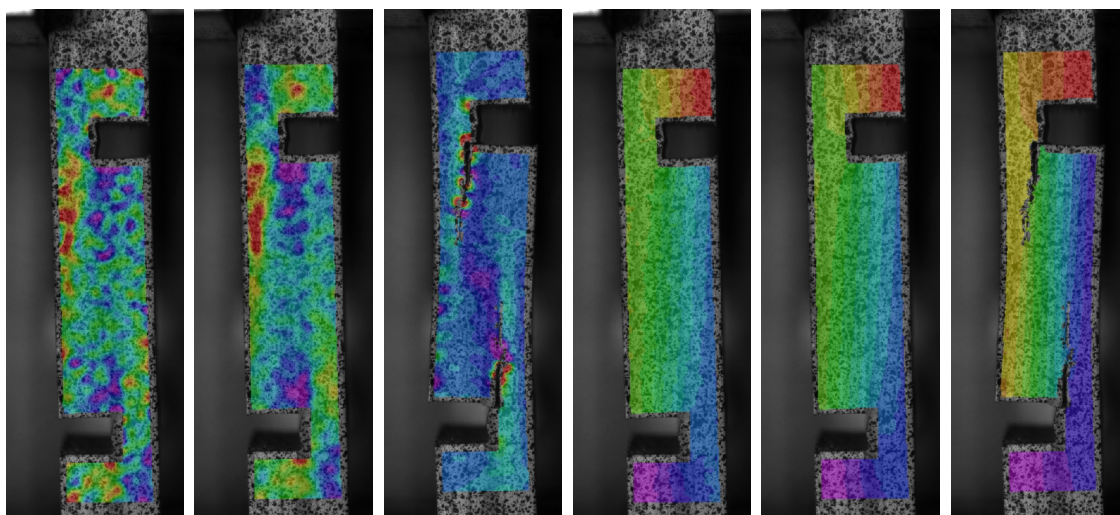
Obr. 316:  $S_I - E_{xx} - MÚ$   
(č. 0,00118,  
z.  $-4e-05$ ,  
m.  $-0,00096$ ,  
f.  $-0,00196$ )

Obr. 317:  $S_I - E_{xx} - MOR$   
(č. 0,29,  
z. 0,16625,  
m. 0,021875,  
f.  $-0,04$ )

Obr. 318:  $S_I - E_{xy} - 10\%$   
(č. 0,00102,  
z. 0,0003075,  
m.  $-0,0005237$ ,  
f.  $-0,00088$ )

Obr. 319:  $S_I - E_{xy} - MÚ$   
(č. 0,0021,  
z. 0,0006375,  
m.  $-0,0016875$ ,  
f.  $-0,0018$ )

Obr. 320:  $S_I - E_{xy} - MOR$   
(č. 0,029,  
z. 0,0035,  
m.  $-0,03475$ ,  
f.  $-0,073$ )



Obr. 321:  $S_I - E_{yy} - 10\%$   
(č. 0,00118,  
z. 0,0003093,  
m.  $-0,000312$ ,  
f.  $-0,00081$ )

Obr. 322:  $S_I - E_{yy} - MÚ$   
(č. 0,00274,  
z. 0,001435,  
m. 0,00013,  
f.  $-0,00074$ )

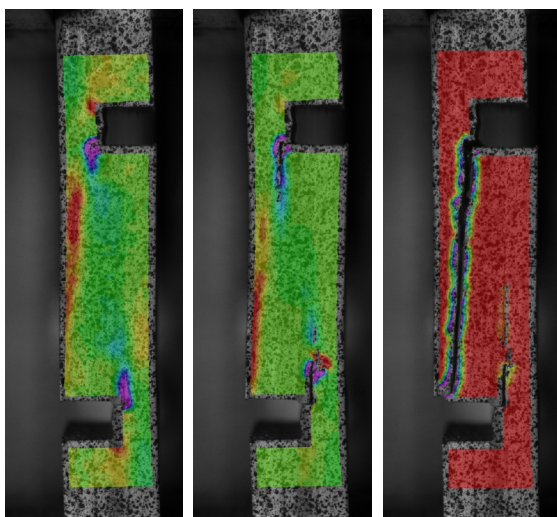
Obr. 323:  $S_I - E_{yy} - MOR$   
(č. 0,0208,  
z. 0,01015,  
m.  $-0,002275$ ,  
f.  $-0,0076$ )

Obr. 324:  $S_I - V - 10\%$   
(č. 0,2395,  
z. 0,224425,  
m. 0,20905,  
f. 0,1906)

Obr. 325:  $S_I - V - MÚ$   
(č. 0,597,  
z. 0,555125,  
m. 0,51325,  
f. 0,463)

Obr. 326:  $S_I - V - MOR$   
(č. 1,67,  
z. 1,46844,  
m. 1,26688,  
f. 1,025)

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 204, mez úměrnosti Obr. 205 a mez pevnosti Obr. 206. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 207, mez úměrnosti Obr. 208 a mez pevnosti Obr. 209. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 210, při mezi úměrnosti Obr. 211 a při MOR Obr. 212. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 213, Obr. 214 a Obr. 215. Obr. 216 zachycuje koncentraci PSD před započítím porušení, Obr. 217 při porušení a Obr. 218 vzorek na konci zkoušky.

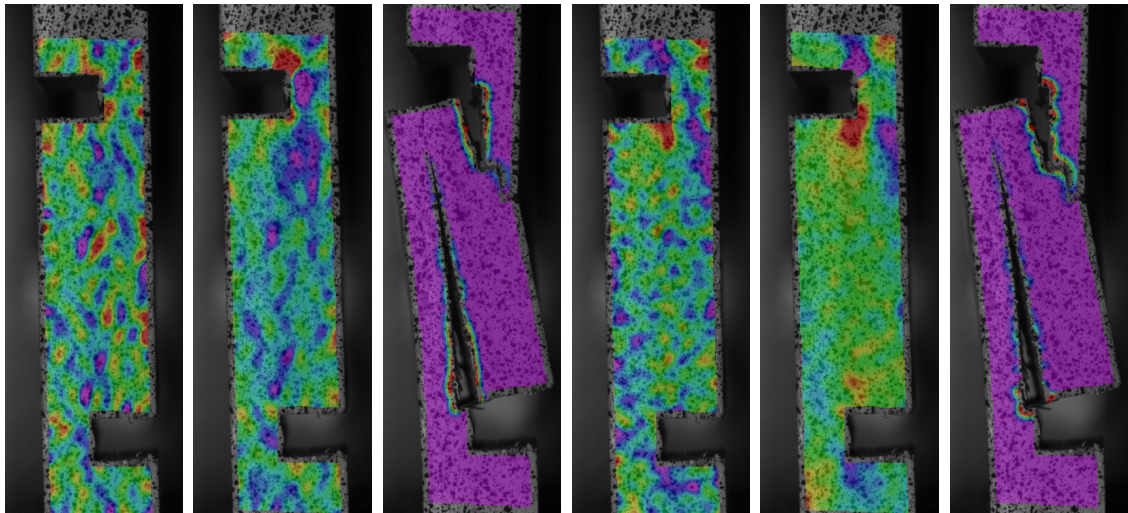


Obr. 327:  $SI - E_{xy} - MÚ +$  (č. 0,0074, z. 0,00049375, m. -0,007793, f. -0,0147)      Obr. 328:  $SI - E_{xy} - MÚ +$  (č. 0,0225, z. 0,0025, m. -0,215, f. -0,0415)      Obr. 329:  $SI - E_{xy} - MOR +$  (č. 0,014, z. -0,08475, m. -0,20325, f. -0,302)

### 6.2.3.1.2 Zkušební vzorek S2 (označení 99)

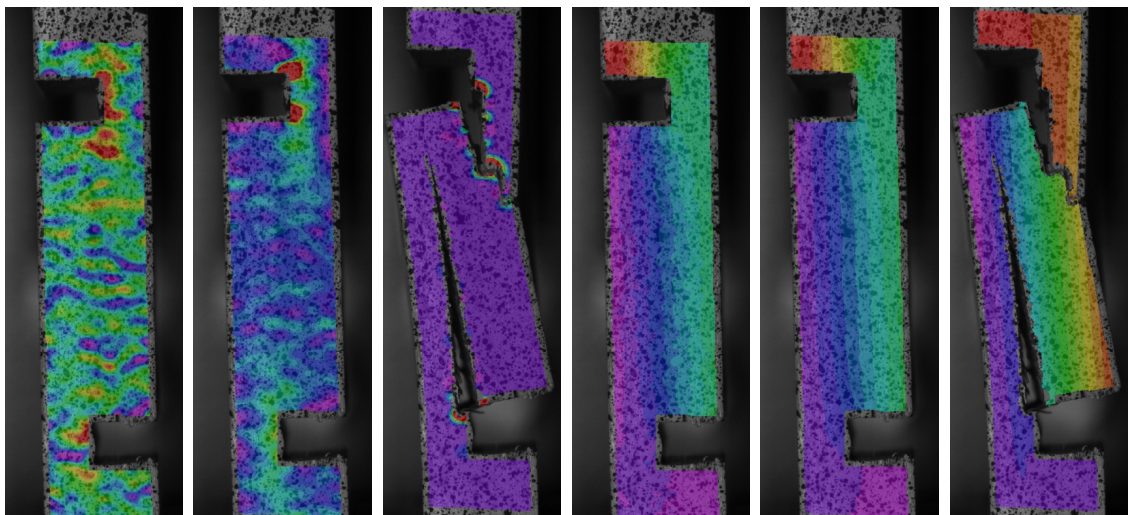
Průběh zatížení a deformací odpovídá obecnému popisu uvedeném výše. Při zvyšování působící tahové síly nad mezí úměrnosti pak dochází k delaminaci v lepených spárách před dosažením meze pevnosti. PSD před započítím delaminace jsou viditelné na Obr. 342, kde je patrné, že v horní části pravé lepené spáry působí větší PSD nežli ve spodní části levé lepené spáry. Z tohoto důvodu dochází k delaminaci v pravé lepené spáře, což je patrné na Obr. 343, kde dochází k přesunutí delaminace do dřeva. Ve středu pravé dýhy se pak delaminace zastaví a dochází pak k přenášení tahové síly do střední dýhy pracovní části zkušebního vzorku. Tímto dochází ke zvýšení PSD ve spodní části levé lepené spáry a následně dochází k její delaminaci, což je patrné na Obr. 335. Dalším působením síly pak dochází k celkové delaminaci lepené spáry, což zachycuje Obr. 344.



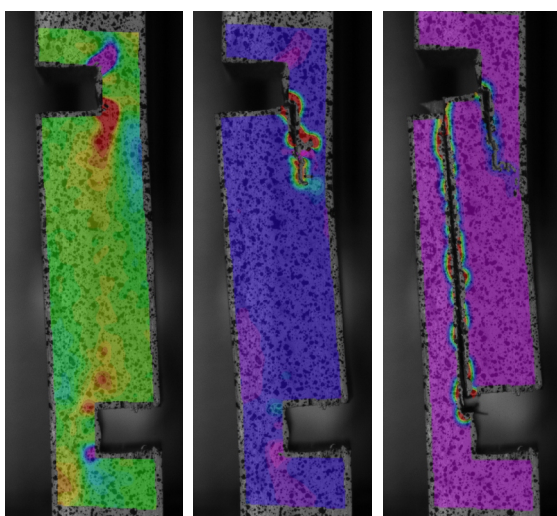


Obr. 330:  $S_2 - E_{xx} - 10\%$  (č. 0,00107, z. 0,00038875, m. -0,000565, f. -0,00111)   
 Obr. 331:  $S_2 - E_{xx} - MÚ$  (č. 0,00196, z. 0,00081625, m. -0,000785, f. -0,0017)   
 Obr. 332:  $S_2 - E_{xx} - MOR$  (č. 1,51, z. 1,03188, m. 0,3625, f. -0,02)   
 Obr. 333:  $S_2 - E_{xy} - 10\%$  (č. 0,00103, z. 0,00043625, m. -0,00145, f. -0,00087)   
 Obr. 334:  $S_2 - E_{xy} - MÚ$  (č. 0,0023, z. 0,0007375, m. -0,000395, f. -0,0027)   
 Obr. 335:  $S_2 - E_{xy} - MOR$  (č. 0,418, z. 0,28175, m. 0,091, f. -0,018)

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 219, MÚ Obr. 220 a MOR Obr. 221. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 222, MÚ Obr. 223 a MOR Obr. 224. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 225, při MÚ Obr. 226 a při MOR Obr. 227. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 228, Obr. 229 a Obr. 230. Obr. 231 zachycuje koncentraci PSD před započítáním porušení, Obr. 232 při porušení a Obr. 233 vzorek na konci zkoušky.



Obr. 336:  $S_2 - E_{yy} - 10\%$  (č. 0,00145, z. 0,00069062, m. -0,0003725, f. -0,00098)   
 Obr. 337:  $S_2 - E_{yy} - MÚ$  (č. 0,00525, z. 0,00366875, m. -0,0009312, f. -0,00135)   
 Obr. 338:  $S_2 - E_{yy} - MOR$  (č. 0,284, z. 0,187125, m. -0,070875, f. -0,026)   
 Obr. 339:  $S_2 - V - 10\%$  (č. 0,101, z. 0,0879375, m. 0,0722625, f. 0,0592)   
 Obr. 340:  $S_2 - V - MÚ$  (č. 0,487, z. 0,436375, m. 0,375625, f. 0,325)   
 Obr. 341:  $S_2 - V - MOR$  (č. 2,17, z. 1,69188, m. 1,11812, f. 0,64)



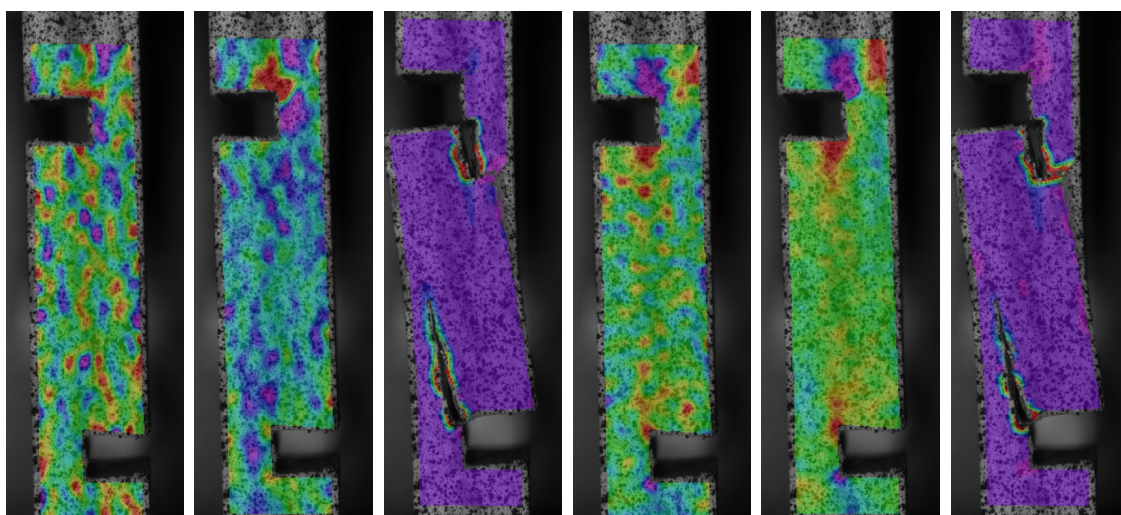
Obr. 342:  $S2 - E_{xy} - M\dot{U} +$   
( $\dot{c}. 0,0064,$   
 $z. 0,001275,$   
 $m. -0,004875,$   
 $f. -0,01$ )

Obr. 343:  $S2 - E_{xy} - M\dot{U} +$   
( $\dot{c}. 0,0885,$   
 $z. 0,0564887,$   
 $m. -0,0180312,$   
 $f. -0,014$ )

Obr. 344:  $S2 - E_{xy} - MOR +$   
( $\dot{c}. 0,48,$   
 $z. 0,325312,$   
 $m. 0,139687,$   
 $f. -0,015$ )

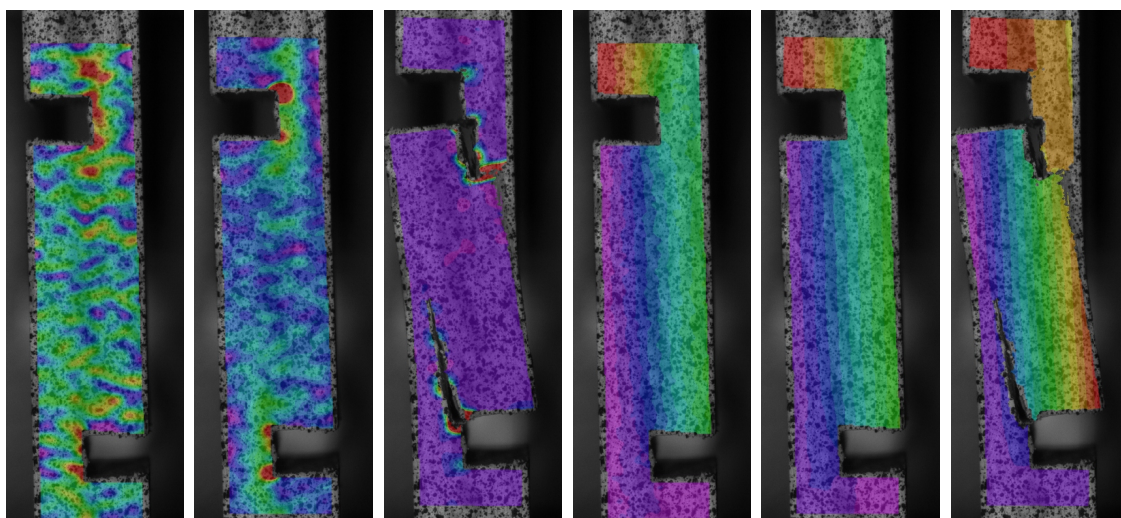
### 6.2.3.1.3 Zkušební vzorek S3 (označení 94)

Průběh zkoušky byl opět shodný s obecným popisem uvedeným výše. Je však zajímavé, že v obou lepených spárách došlo k přesunu delaminací do bočních dých a nedošlo k celkové delaminaci („roztržení“) zkušebního vzorku. Rozložení PSD před započítáním delaminace je viditelné na Obr. 357, kde je patrné, že v lepených spárách působí téměř totožné PSD. Na tomto obrázku je také patrné PSD ve středové vrstvě dýhy (žlutě). Z tohoto důvodu dochází k delaminaci v obou lepených spárách zároveň na Obr. 358. Poté dochází k přesunutí delaminace do dřeva (Obr. 350), kde v pravé lepené spáře delaminace pokračuje pouze krátce cca do 5/5 pracovní části vzorku (delaminace tedy proběhla jen v horní 1/5). V levé lepené spáře pak delaminace proběhne do 1/2 pracovní části vzorku, což zachycuje Obr. 350 (mez pevnosti). Po překročení meze pevnosti pak dochází k další delaminaci v levé lepené spáře a to až ke konci pracovní části zkušebního vzorku (Obr. 359). K celkové delaminaci zkušebního tělíška nedojde.



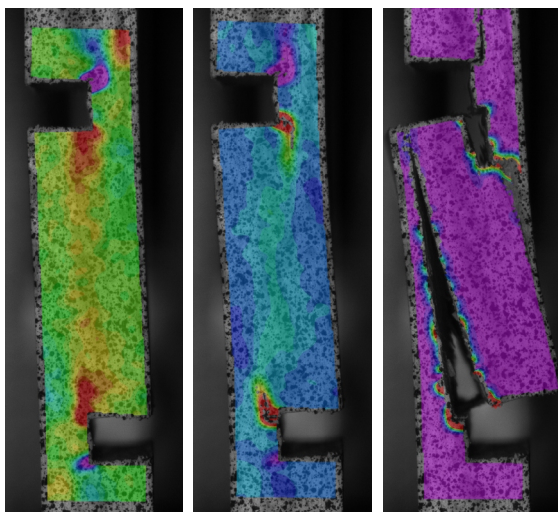
Obr. 345: S3 – Exx – 10 % (č. 0,00087, z. 0,00017, m. -0,00067, f. -0,00137)   
 Obr. 346: S3 – Exx – MÚ (č. 0,00228, z. 0,000955, m. -0,000635, f. -0,00196)   
 Obr. 347: S3 – Exx – MOR (č. 0,555, z. 0,3675, m. 0,1425, f. -0,045)   
 Obr. 348: S3 – Exy – 10 % (č. 0,00112, z. 0,00035437, m. -0,0005643, f. -0,00133)   
 Obr. 349: S3 – Exy – MÚ (č. 0,00275, z. 0,00071875, m. -0,0017187, f. -0,00375)   
 Obr. 350: S3 – Exy – MOR (č. 0,219, z. 0,144937, m. 0,0560625, f. -0,018)

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 234, MÚ Obr. 235 a MOR Obr. 236. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 237, MÚ Obr. 238 a MOR Obr. 239. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 240, při MÚ Obr. 241 a při MOR Obr. 242. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 243, Obr. 244 a Obr. 245. Obr. 246 zachycuje koncentraci PSD před započítáním porušení, Obr. 247 při porušení a Obr. 248 vzorek na konci zkoušky.



Obr. 351: S3 – Eyy – 10 % (č. 0,00174, z. 0,00085875, m. -0,0001987, f. -0,00108)   
 Obr. 352: S3 – Eyy – MÚ (č. 0,0052, z. 0,0030963, m. -0,0005593, f. -0,00155)   
 Obr. 353: S3 – Eyy – MOR (č. 0,1065, z. 0,077, m. 0,025375, f. -0,0115)   
 Obr. 354: S3 – V – 10 % (č. 0,1415, z. 0,12875, m. 0,107125, f. 0,0915)   
 Obr. 355: S3 – V – MÚ (č. 0,553, z. 0,50425, m. 0,44575, f. 0,397)   
 Obr. 356: S3 – V – MOR (č. 1,86, z. 1,54438, m. 1,16562, f. 0,85)



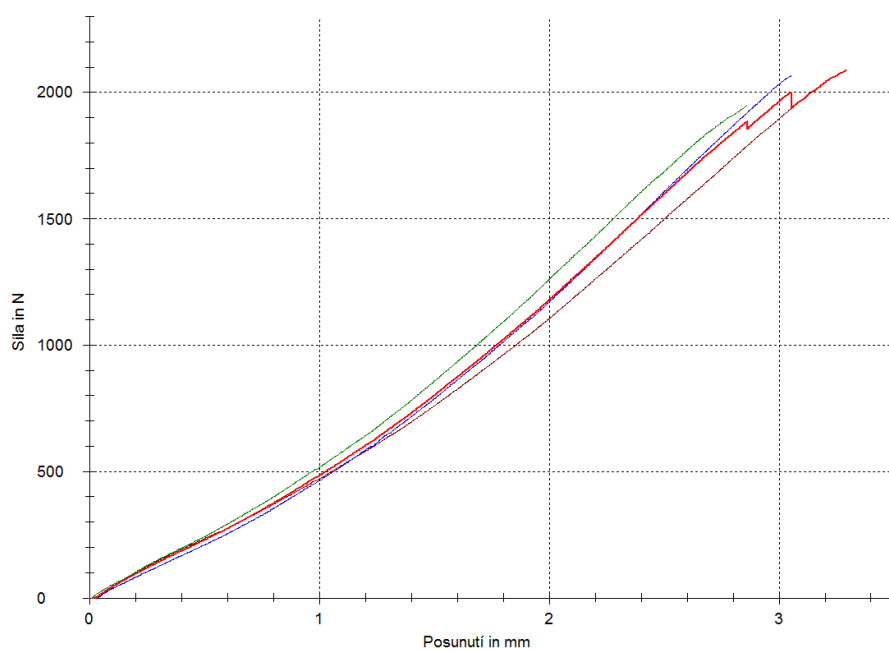


Obr. 357: S3 – Exy – MÚ +  
(č. 0,0048,  
z. 0,0008,  
m. -0,004,  
f. -0,008)

Obr. 358: S3 – Exy – MÚ +  
(č. 0,0308,  
z. 0,0173,  
m. 0,0011,  
f. -0,0124)

Obr. 359: S3 – Exy – MOR +  
(č. 0,685,  
z. 0,46,  
m. 0,19,  
f. -0,035)

### 6.2.3.2 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 90 °C

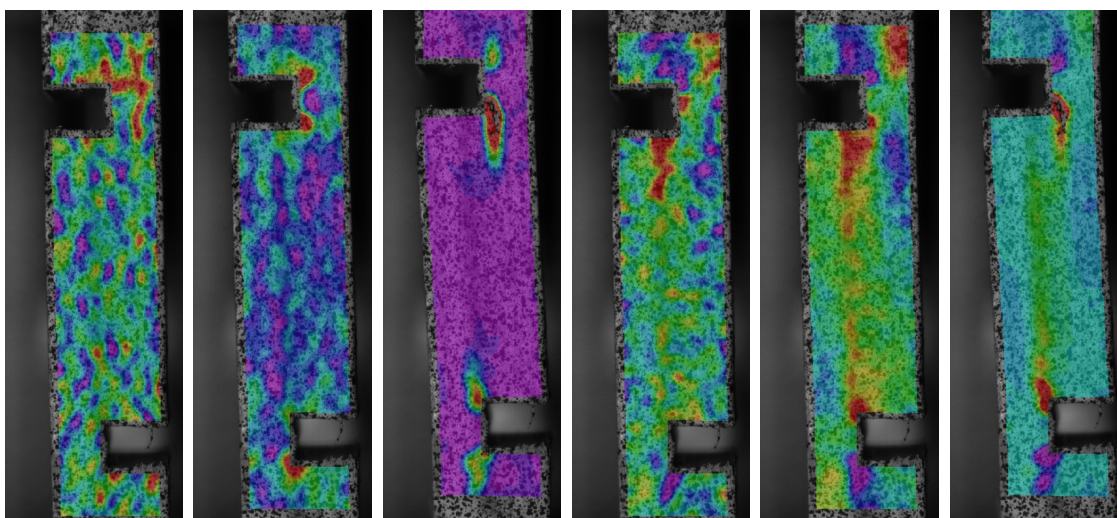


Obr. 360: Pracovní diagram Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově – S4, modře - S6, zeleně - S5.

### 6.2.3.2.1 Zkušební vzorek S4 (označení 83)

Průběh zkoušky byl opět shodný s obecným popisem uvedeným výše. K porušení však došlo až při dosažení meze pevnosti, ke konci zkoušky. Rozložení PD a PSD bylo podobné jako u vzorků nevyztužených, na první pohled je však patrné, že toto rozložení bylo ovlivněno uhlíkovými vlákny. V blízkosti krčků je rozložení víceméně stejné, avšak ve středu pracovní části vzorku je rozložení výrazně ovlivněno uhlíkovými vlákny. K největším PD dochází v blízkosti lepených spár Obr. 362 (fialově) a Obr. 368 (modře), a PSD pak přímo v lepených spárách, což je patrné na Obr. 365 (oranžově) a Obr. 366 (zeleně).

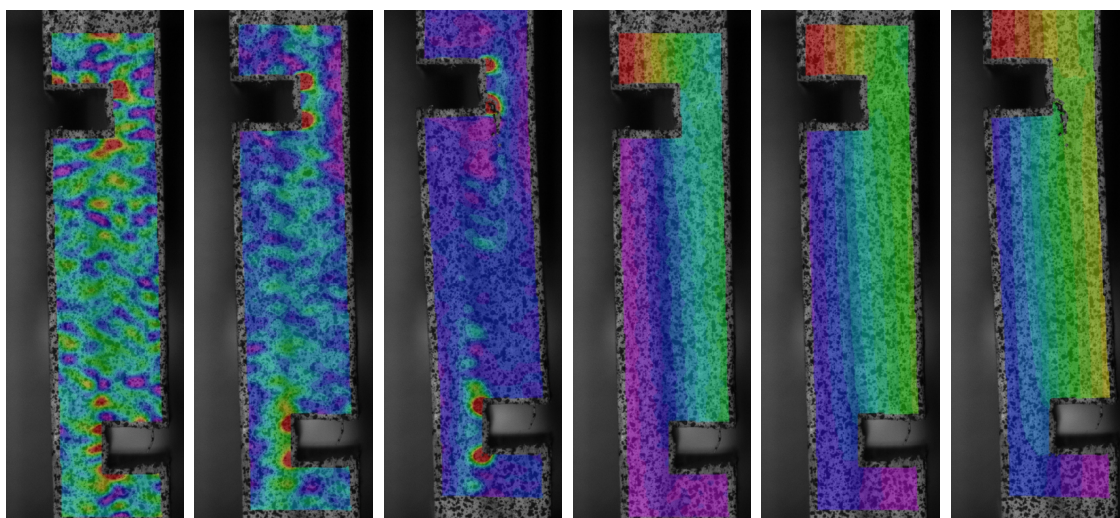
Na Obr. 373 je zachyceno rozložení PSD před započítáním delaminace. Jsou na něm patrné lokální maxima PSD v rozích krčků a ve středové (zeleně) a bočních (světle modře) vrstvách pracovní části vzorku. Na Obr. 366 je patrná změna rozložení PSD, které se začalo přesouvat v blízkosti lepené spáry, pravděpodobně z důvodu započítání delaminace v pravém spodním rohu krčku. Na Obr. 374 a Obr. 375 je pak patrné přesouvání PSD přímo do lepených spár a zvětšování delaminací. Obr. 375 zobrazuje stav vzorku při ukončení zkoušky.



<i>Obr. 361: S4 – Exx – 10 %</i>	<i>Obr. 362: S4 – Exx – MÚ</i>	<i>Obr. 363: S4 – Exx – MOR</i>	<i>Obr. 364: S4 – Exy – 10 %</i>	<i>Obr. 365: S4 – Exy – MÚ</i>	<i>Obr. 366: S4 – Exy – MOR</i>
<i>(č. 0,00105,</i>	<i>(č. 0,00286,</i>	<i>(č. 0,052,</i>	<i>(č. 0,00112,</i>	<i>(č. 0,00255,</i>	<i>(č. 0,023,</i>
<i>z. 0,00043437,</i>	<i>z. 0,00164125,</i>	<i>z. 0,0349688,</i>	<i>z. 0,00046062,</i>	<i>z. 0,00090937,</i>	<i>z. 0,0113125,</i>
<i>m. -0,0003043,</i>	<i>m. -0,0001787,</i>	<i>m. -0,014531,</i>	<i>m. -0,0003306,</i>	<i>m. -0,0010593,</i>	<i>m. -0,0027125,</i>
<i>f. -0,00092)</i>	<i>f. -0,00104)</i>	<i>f. -0,0025)</i>	<i>f. -0,00099)</i>	<i>f. -0,0027)</i>	<i>f. -0,0144)</i>

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 250, MÚ Obr. 251 a MOR Obr. 252. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 253, MÚ Obr. 254 a MOR Obr. 255. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 256, při MÚ Obr. 257 a při

MOR Obr. 258. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 259, Obr. 260 a Obr. 261. Obr. 262 zachycuje koncentraci PSD před započítím porušení, Obr. 263 při porušení a Obr. 264 vzorek na konci zkoušky.



Obr. 367:  $S4 - E_{yy} - 10\%$   
(č. 0,00162,  
z. 0,00083875,  
m.  $-9,875e-05$ ,  
f.  $-0,00088$ )

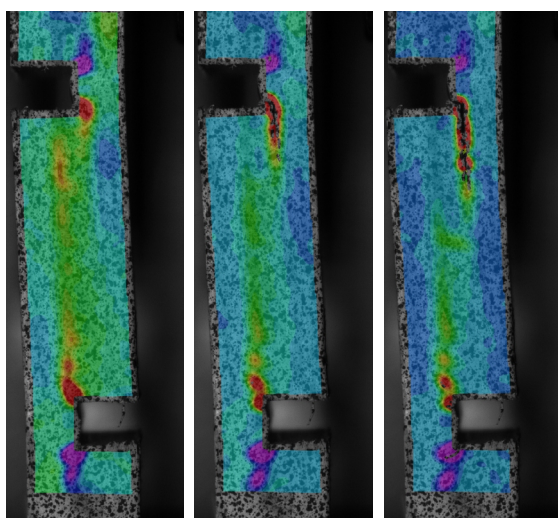
Obr. 368:  $S4 - E_{yy} - M\dot{U}$   
(č. 0,0042,  
z. 0,0025125,  
m. 0,0004875,  
f.  $-0,0012$ )

Obr. 369:  $S4 - E_{yy} - MOR$   
(č. 0,0232,  
z. 0,0145125,  
m. 0,0040875,  
f.  $-0,0046$ )

Obr. 370:  $S4 - V - 10\%$   
(č. 0,2046,  
z. 0,190163,  
m. 0,172837,  
f. 0,1584)

Obr. 371:  $S4 - V - M\dot{U}$   
(č. 0,789,  
z. 0,741812,  
m. 0,685188,  
f. 0,638)

Obr. 372:  $S4 - V - MOR$   
(č. 1,978,  
z. 1,82987,  
m. 1,65213,  
f. 1,504)



Obr. 373:  $S4 - E_{xy} - M\dot{U} +$   
(č. 0,0126,  
z. 0,0056625,  
m.  $-0,0026625$ ,  
f.  $-0,0096$ )

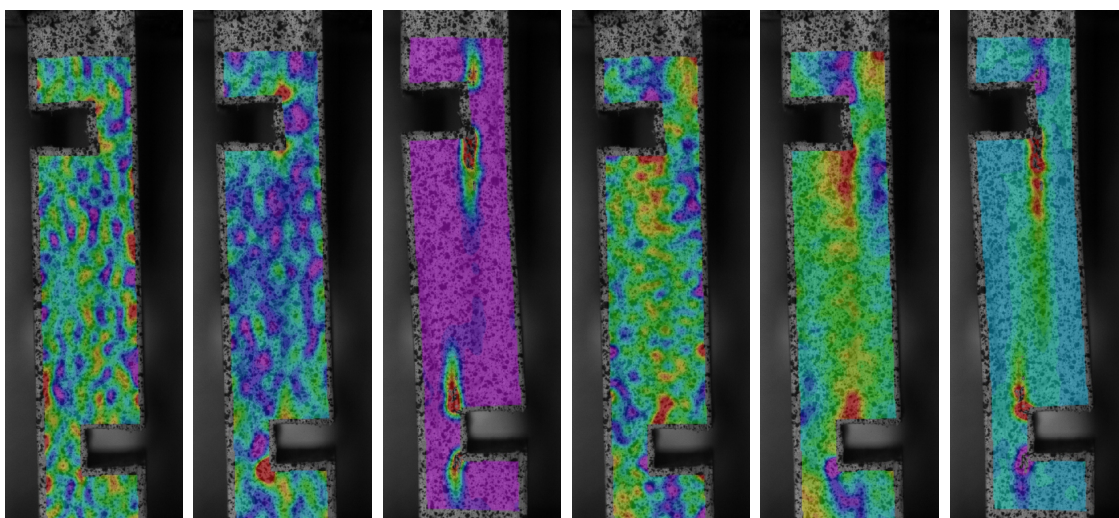
Obr. 374:  $S4 - E_{xy} - MOR +$   
(č. 0,0268,  
z. 0,0138625,  
m.  $-0,0016625$ ,  
f.  $-0,0146$ )

Obr. 375:  $S4 - E_{xy} - MOR +$   
(č. 0,036,  
z. 0,0195937,  
m.  $-9,375e-05$ ,  
f.  $-0,0165$ )

### 6.2.3.2.2 Zkušební vzorek S5 (označení 91)

Tento zkušební vzorek je rozložením sledovaných veličin podobný vzorku O4. Rozložení PD a PSD bylo opět ovlivněno uhlíkovými vlákny, což je patrné zejména na obrázcích zachycujících mez úměrnosti a pevnosti.

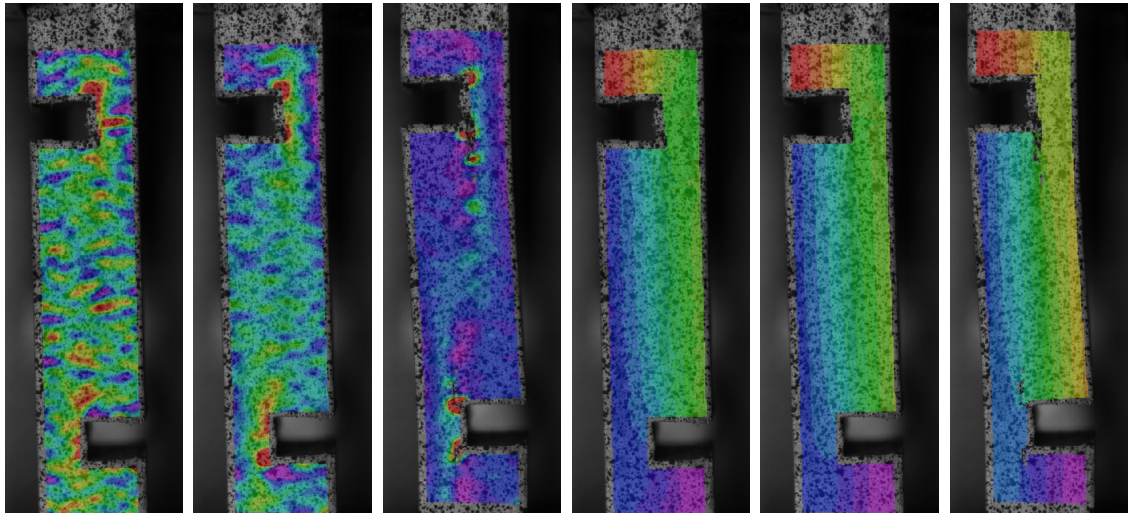
Průběh delaminací byl obdobný s případem S4, což zachycují obrázky Obr. 388 a Obr. 381. Zkouška však nekončí částečnou delaminací obou lepených spár, což je zachyceno na Obr. 388, který je obdobou stejného stavu jako na Obr. 366 u zkušebního vzorku S4. Delaminace však pokračují dále, což je patrné na Obr. 389, zachycujícím stav PSD krátce po překročení MOR, kdy došlo k delaminaci pravé lepené spáry do 1/2 její délky a levá lepená spára se delaminovala do 1/3. Při dalším zvyšování tahové síly delaminace v pravé lepené spáře dále nepokračovala a došlo k přenesení PSD do levé lepené spáry, což způsobilo její celkovou delaminaci (Obr. 390 zachycujícím stav tělíška na konci zkoušky).



Obr. 376: S5 – Exx – 10 % (č. 0,00107, z. 0,00041062, m. -0,0003806, f. -0,00104)    Obr. 377: S5 – Exx – MÚ (č. 0,00244, z. 0,0,0119, m. -0,00031, f. -0,00156)    Obr. 378: S5 – Exx – MOR (č. 0,0885, z. 0,0594375, m. 0,0245625, f. -0,0045)    Obr. 379: S5 – Exy – 10 % (č. 0,00102, z. 0,0003856, m. -0,0003756, f. -0,00101)    Obr. 380: S5 – Exy – MÚ (č. 0,00285, z. 0,00105313, m. -0,0011312, f. -0,0029)    Obr. 381: S5 – Exy – MOR (č. 0,0314, z. 0,0160875, m. -0,0022875, f. -0,0176)

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 265, MÚ Obr. 266 a MOR Obr. 267. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 268, MÚ Obr. 269 a MOR Obr. 270. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 271, při MÚ Obr. 272 a při MOR Obr. 273. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 274, Obr. 275 a Obr. 276. Obr. 277 zachycuje koncentraci PSD před započítáním porušení, Obr. 278 při porušení a Obr. 279 vzorek na konci zkoušky.





Obr. 382: S5 –  
Eyy – 10 %  
(č. 0,00126,  
z. 0,0005881,  
m. -0,0002181,  
f. -0,00089)

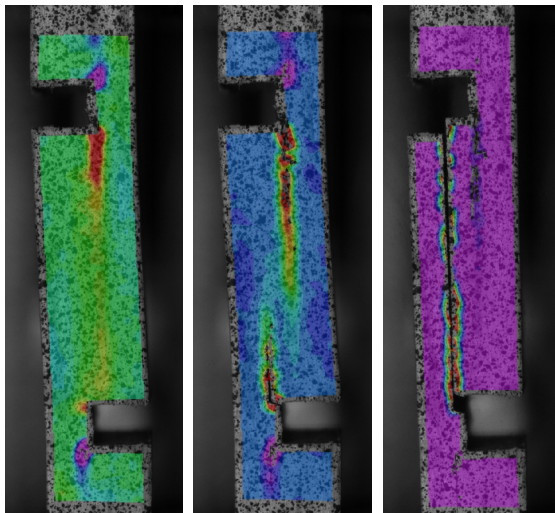
Obr. 383: S5 –  
Eyy – MÚ  
(č. 0,00334,  
z. 0,0018525,  
m. -6,75e-05,  
f. -0,00142)

Obr. 384: S5 –  
Eyy – MOR  
(č. 0,0198,  
z. 0,0122375,  
m. 0,0031625,  
f. -0,0044)

Obr. 385: S5 –  
V – 10 %  
(č. 0,1892,  
z. 0,174325,  
m. 0,156475,  
f. 0,1416)

Obr. 386: S5 –  
V – MÚ  
(č. 0,625,  
z. 0,573438,  
m. 0,511563,  
f. 0,46)

Obr. 387: S5 –  
V – MOR  
(č. 1,69,  
z. 1,51969,  
m. 1,31531,  
f. 1,145)



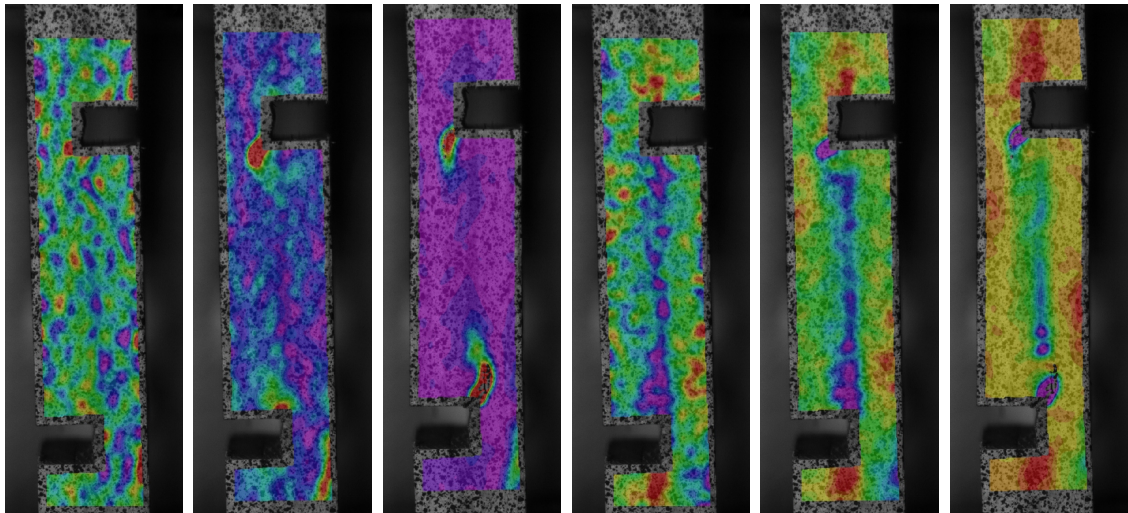
Obr. 388: S5 –  
Exy – MÚ +  
(č. 0,0148,  
z. 0,0056125,  
m. -0,0054125,  
f. -0,0146)

Obr. 389: S5 –  
Exy – MOR +  
(č. 0,0505,  
z. 0,02925,  
m. 0,00375,  
f. -0,0175)

Obr. 390: S5 –  
Exy – MOR +  
(č. 0,595,  
z. 0,402813,  
m. 0,172188,  
f. -0,02)

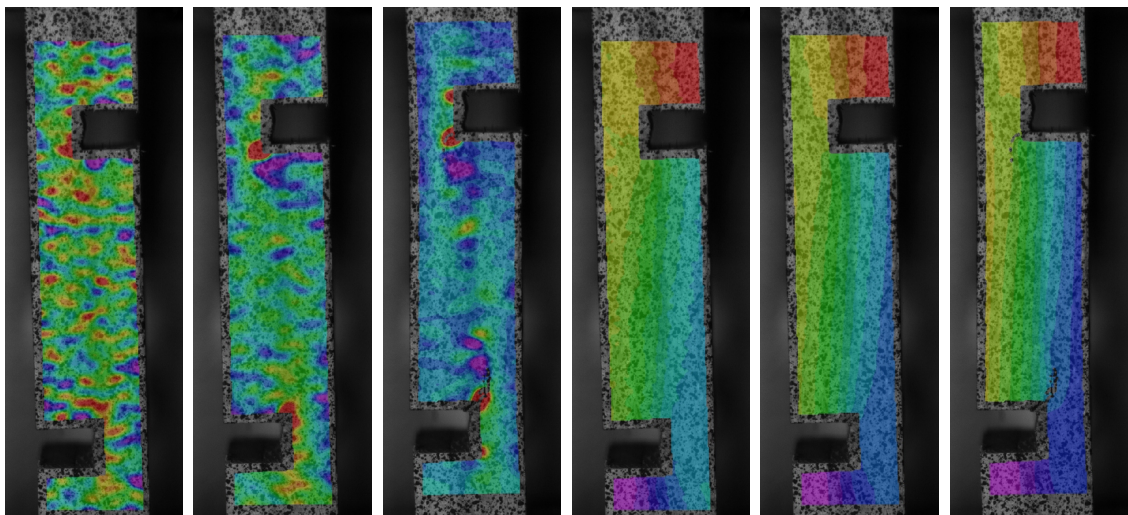
### 6.2.3.2.3 Zkušební vzorek S6 (označení 82)

Namáhání a porušení tohoto vzorku je shodné se vzorkem S5. Na obrázcích zachycujících PSD jsou pak patrné PSD v uhlíkových vláknech a ve střední dýze pracovní části vzorku.

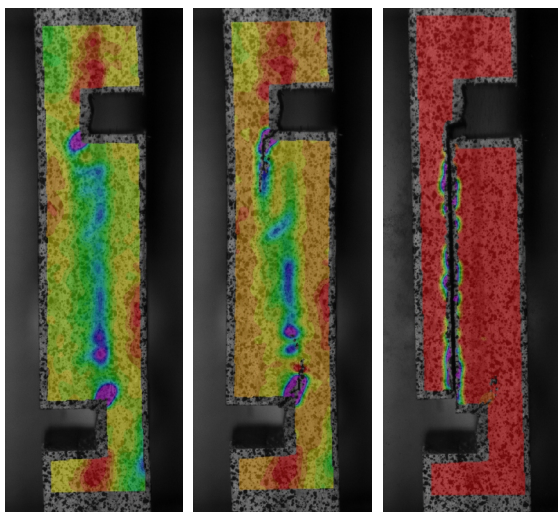


*Obr. 391: S6 – Exx – 10 % (č. 0,00132, z. 0,00048875, m. -0,0005087, f. -0,00134)*   
*Obr. 392: S6 – Exx – MÚ (č. 0,0045, z. 0,00257812, m. 0,0002718, f. -0,00165)*   
*Obr. 393: S6 – Exx – MOR (č. 0,061, z. 0,0406875, m. 0,0163125, f. -0,004)*   
*Obr. 394: S6 – Exy – 10 % (č. 0,00124, z. 0,00038375, m. -0,0006435, f. -0,0015)*   
*Obr. 395: S6 – Exy – MÚ (č. 0,00235, z. 0,0002875, m. -0,0021875, f. -0,00425)*   
*Obr. 396: S6 – Exy – MOR (č. 0,0064, z. -0,002975, m. -0,014225, f. -0,0236)*

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 280, MÚ Obr. 281 a MOR Obr. 282. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 283, MÚ Obr. 284 a MOR Obr. 285. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 286 , při MÚ Obr. 287 a při MOR Obr. 288. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 289, Obr. 290 a Obr. 291. Obr. 292 zachycuje koncentraci PSD před započítáním porušení, Obr. 293 při porušení a Obr. 294 vzorek na konci zkoušky.



*Obr. 397: S6 – Eyy – 10 % (č. 0,0014, z. 0,00063437, m. -0,0002843, f. -0,00105)*   
*Obr. 398: S6 – Eyy – MÚ (č. 0,0032, z. 0,00171875, m. -5,875e-05, f. -0,00154)*   
*Obr. 399: S6 – Eyy – MOR (č. 0,0137, z. 0,00754375, m. -0,0001562, f. -0,006)*   
*Obr. 400: S6 – V – 10 % (č. 0,2915, z. 0,273531, m. 0,251969, f. 0,234)*   
*Obr. 401: S6 – V – MÚ (č. 0,77, z. 0,722812, m. 0,666188, f. 0,619)*   
*Obr. 402: S6 – V – MOR (č. 1,81, z. 1,66875, m. 149925, f. 1,358)*

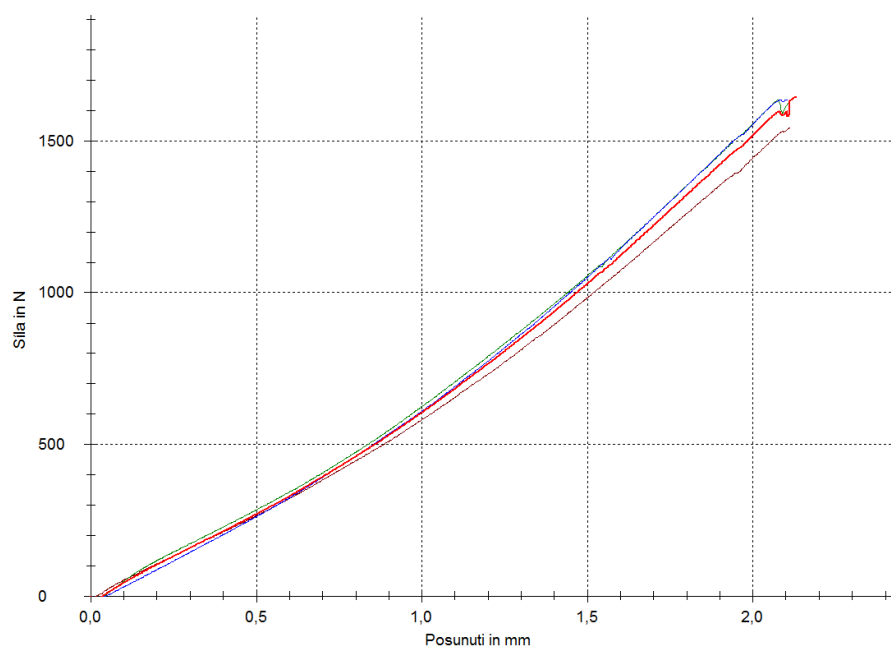


Obr. 403: S6 – Exy – MÚ +  
(č. 0,0052,  
z. -0,0011437,  
m. -0,008756,  
f. -0,0)

Obr. 404: S6 – Exy – MOR +  
(č. 0,007,  
z. -0,004937,  
m. -0,01926,  
f. -0,0312)

Obr. 405: S6 – Exy – MOR +  
(č. 0,004,  
z. -0,12287,  
m. -0,2751,  
f. -0,402)

### 6.2.3.3 Vzorky vyrobené při lisovací teplotě 120 °C

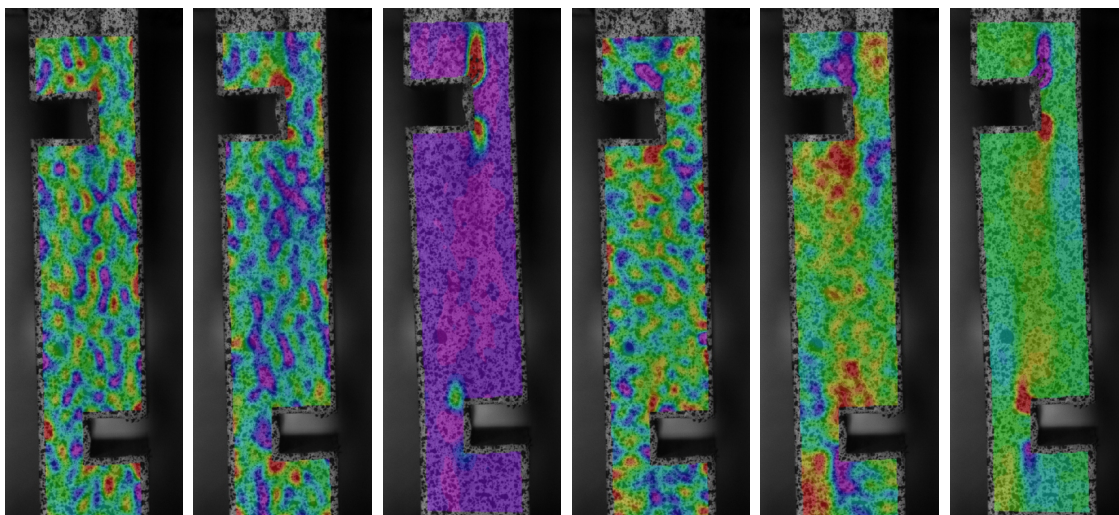


Obr. 406: Pracovní diagram zachycující napětí a poměrné deformace ve vzorcích. Červeně - průměrná křivka, oranžově – S7, modře - S9, zeleně - S8.



### 6.2.3.3.1 Zkušební vzorek S7 (označení 155)

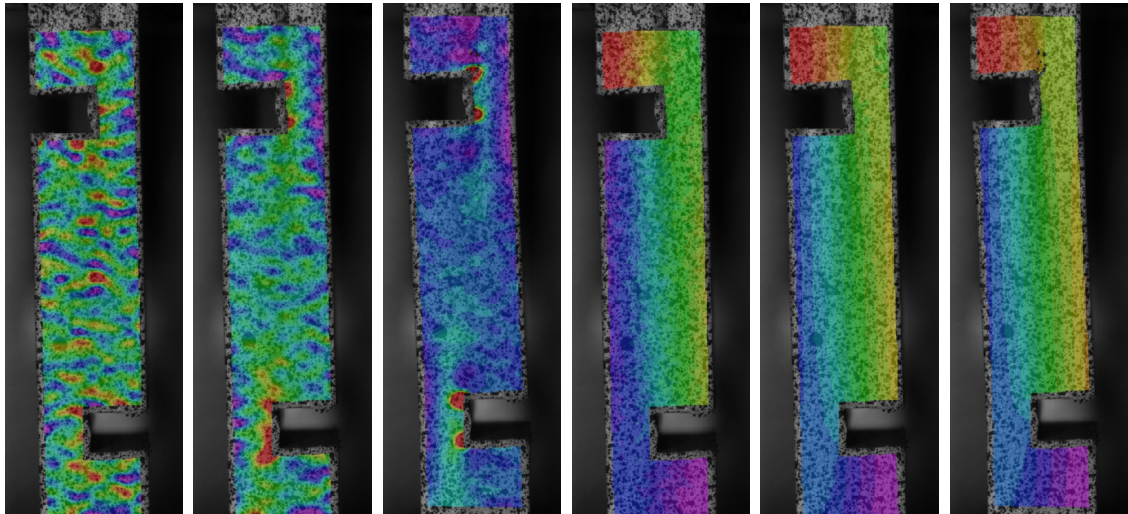
Zkušební vzorek S7 již při zatížení 10 % síly MOR vykazuje vznikající PSD nad a pod krčky vzorku (Obr. 410). Při zvyšování působící síly do meze úměrnosti jsou PSD v těchto místech více patrné (Obr. 411) a také je patrné rozložení PD v krčících vzorků a pracovní části vzorku, zejména pak v jeho středové vrstvě (viz. Obr. 408 a Obr. 414), jelikož středová část zkušební tělíska „se snaží narovnat“ ve směru působící (tahové) síly. Toto chování vzniká z důvodu prořiznutí středové dýhy, boční dýhy, a uhlíkových vláken, z čehož vyplývá, že PSD je namáhána zejména středová vrstva dýhy slepená s uhlíkovými vlákny, v níž jsou PSD nejvyšší a dosahují lokálních maxim v krčících vzorků. Po překročení meze úměrnosti dochází v krčících vzorku k místní delaminaci lepeného spoje v horní 1/3 vzorku v pravé lepené spáře (Obr. 412). Při zvyšování působící tahové síly pak dochází ke vzniku delaminační trhliny i v pracovní části vzorku (Obr. 420 červeně), k čemuž však dochází až při překročení meze pevnosti. Následně se delaminační trhlina zvětšuje do poloviny délky pracovní části vzorku (Obr. 421).



<i>Obr. 407: S7 – Exx – 10 % (č. 0,00087, z. 0,00028875, m. -0,0004087, f. -0,00099)</i>	<i>Obr. 408: S7 – Exx – MÚ (č. 0,00134, z. 0,00054, m. -0,00042, f. -0,00122)</i>	<i>Obr. 409: S7 – Exx – MOR (č. 0,0346, z. 0,0227875, m. 0,0086125, f. -0,0032)</i>	<i>Obr. 410: S7 – Exy – 10 % (č. 0,00073, z. 0,00025812, m. -0,0003081, f. -0,00078)</i>	<i>Obr. 411: S7 – Exy – MÚ (č. 0,00128, z. 0,00033, m. -0,00081, f. -0,00176)</i>	<i>Obr. 412: S7 – Exy – MOR (č. 0,0081, z. 0,0029125, m. -0,0033125, f. -0,0085)</i>
--	---	---	--	---	--

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 296, MÚ Obr. 297 a MOR Obr. 298. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 299, MÚ Obr. 300 a MOR Obr. 301. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 302 , při MÚ Obr. 303 a při MOR Obr. 305. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 305, Obr. 306 a Obr. 307. Obr. 308

zachycuje koncentraci PSD před započítím porušení, Obr. 309 při porušení a Obr. 310 vzorek na konci zkoušky.



Obr. 413:  $S7 - E_{yy} - 10\%$   
(č. 0,001,  
z. 0,00042187,  
m. -0,0002718,  
f. -0,00085)

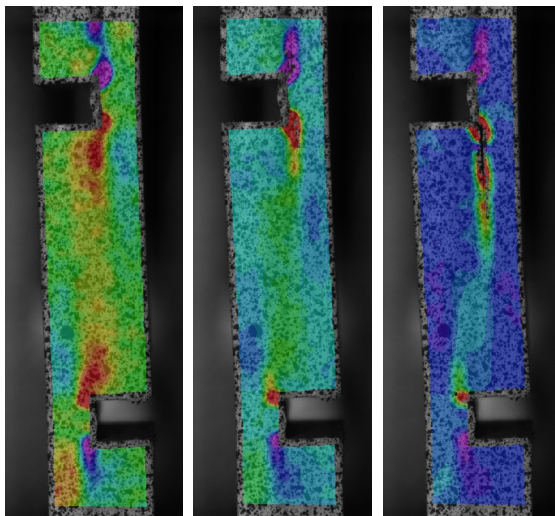
Obr. 414:  $S7 - E_{yy} - MÚ$   
(č. 0,00216,  
z. 0,00112875,  
m. -0,0001087,  
f. -0,00114)

Obr. 415:  $S7 - E_{yy} - MOR$   
(č. 0,0116,  
z. 0,00694375,  
m. 0,0013562,  
f. -0,0033)

Obr. 416:  $S7 - V - 10\%$   
(č. 0,1134,  
z. 0,105587,  
m. 0,0962125,  
f. 0,0884)

Obr. 417:  $S7 - V - MÚ$   
(č. 0,4805,  
z. 0,451438,  
m. 0,416562,  
f. 0,3875)

Obr. 418:  $S7 - V - MOR$   
(č. 1,23,  
z. 1,13,  
m. 1,01,  
f. 0,91)



Obr. 419:  $S7 - E_{xy} - MÚ +$   
(č. 0,00385,  
z. 0,0010281,  
m. -0,002478,  
f. -0,0054)

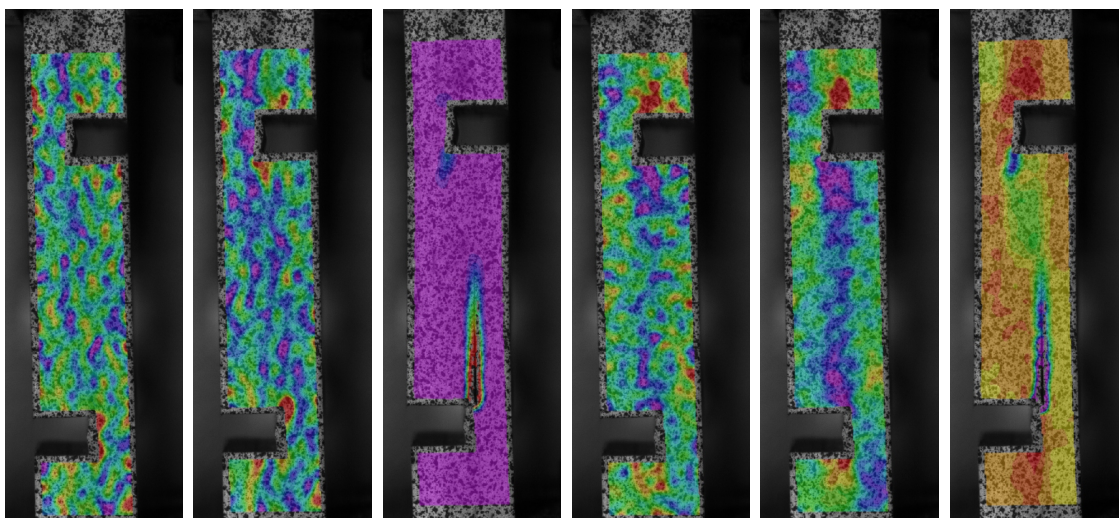
Obr. 420:  $S7 - E_{xy} - MOR +$   
(č. 0,0138,  
z. 0,0068,  
m. -0,0016,  
f. -0,0086)

Obr. 421:  $S7 - E_{xy} - MOR +$   
(č. 0,0322,  
z. 0,0191375,  
m. -0,003462,  
f. -0,0096)

### 6.2.3.3.2 Zkušební vzorek S8 (označení 149)

Při zkoušce na smyk nejprve dochází k rovnoměrnému zatížení zkušebního vzorku a nedochází k velkým PD, což je patrné na Obr. 422 a Obr. 428 zachycujících PD při zatížení 10 % síly MOR. Na Obr. 425 zachycujícím PSD je patrné, že dochází k působení PSD zejména v krčících vzorku a jeho středové dýze ležící mezi dvěma vrstvami uhlíkových vláken v pracovní části vzorku. Při zvyšování působící síly do meze úměrnosti pak dochází ke vzniku PD nejpatrnějších v krčících vzorků (kde byla v rozích umístěna jejich lokální maxima) a v pracovní (středové) části zkušebního tělíška.

Po překročení meze úměrnosti dochází k dalšímu zvýšení PD a PSD v těchto místech, což zachycuje Obr. 434. Poté dochází v těchto místech k místní delaminaci lepeného spoje Obr. 435 a následnému rozšiřování pravé delaminační trhliny směrem do středu pracovní plochy, k čemuž dochází až do meze pevnosti (Obr. 427), kdy je pravá lepená spára delaminována téměř do 1/2 délky pracovní plochy. Po překročení meze pevnosti došlo k celkové delaminaci pravé lepené spáry na rozhraní středové vrstvy dýhy a uhlíkových vláken ve vrstvě lepidla, jelikož na delaminovaných plochách téměř nezůstala vytržená vlákna (méně než 5 %).



Obr. 422: S8 –  
Exx – 10 %  
(č. 0,0009,  
z. 0,00032187,  
m. -0,0003718,  
f. -0,00095)

Obr. 423: S8 –  
Exx – MÚ  
(č. 0,00123,  
z. 0,00050812,  
m. -0,0003581,  
f. -0,00108)

Obr. 424: S8 –  
Exx – MOR  
(č. 0,139,  
z. 0,094,  
m. 0,04,  
f. -0,005)

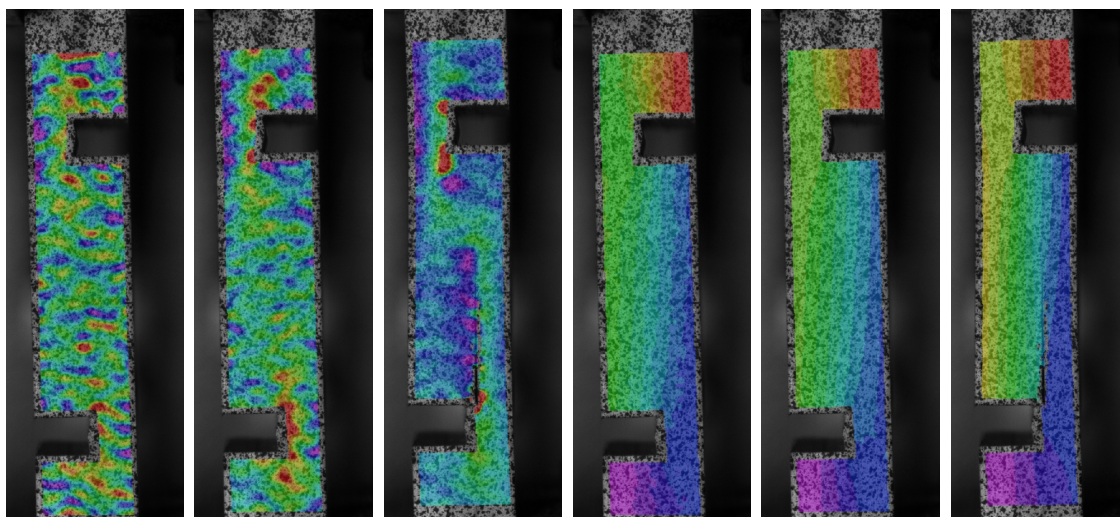
Obr. 425: S8 –  
Exy – 10 %  
(č. 0,00089,  
z. 0,00032125,  
m. -0,0003612,  
f. -0,00093)

Obr. 426: S8 –  
Exy – MÚ  
(č. 0,00178,  
z. 0,00072375,  
m. -0,0005437,  
f. -0,0016)

Obr. 427: S8 –  
Exy – MOR  
(č. 0,005,  
z. -0,0035625,  
m. -0,0138375,  
f. -0,0224)



PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 311, MÚ Obr. 312 a MOR Obr. 313. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 314, MÚ Obr. 315 a MOR Obr. 316. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 317 , při MÚ Obr. 318 a při MOR Obr. 319. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 320, Obr. 321 a Obr. 322. Obr. 323 zachycuje koncentraci PSD před započítáním porušení, Obr. 324 při porušení a Obr. 325 vzorek na konci zkoušky.



Obr. 428: S8 –  
Eyy – 10 %  
(č. 0,00115,  
z. 0,00053437,  
m. -0,0002048,  
f. -0,00082)

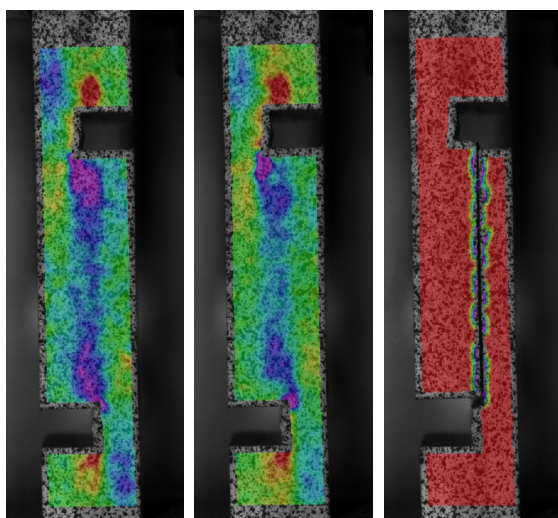
Obr. 429: S8 –  
Eyy – MÚ  
(č. 0,00192,  
z. 0,00101375,  
m. -7,375e-05,  
f. -0,00098)

Obr. 430: S8 –  
Eyy – MOR  
(č. 0,0076,  
z. 0,004225,  
m. -0,000175,  
f. -0,0032)

Obr. 431: S8 –  
V – 10 %  
(č. 0,2158,  
z. 0,202238,  
m. 0,185962,  
f. 0,1724)

Obr. 432: S8 –  
V – MÚ  
(č. 0,531,  
z. 0,497094,  
m. 0,456406,  
f. 0,4225)

Obr. 433: S8 –  
V – MOR  
(č. 1,27,  
z. 1,16125,  
m. 1,03075,  
f. 0,922)



Obr. 434: S8 –  
Exy – MÚ +  
(č. 0,00265,  
z. 0,00106062,  
m. -0,0008906,  
f. -0,0025)

Obr. 435: S8 –  
Exy – MÚ +  
(č. 0,0033,  
z. 0,00101875,  
m. -0,0017187,  
f. -0,004)

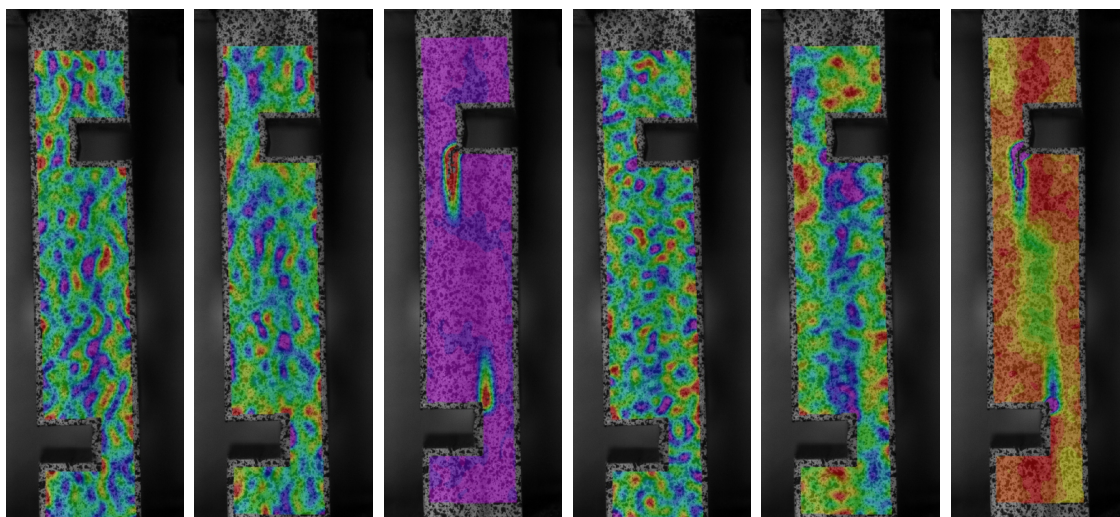
Obr. 436: S8 –  
Exy – MOR +  
(č. 0,004,  
z. 0,0,  
m. -0,0,  
f. -0,346)

### 6.2.3.3.3 Zkušební vzorek S9 (označení 143)

Při zkoušce na smyk nejprve dochází k rovnoměrnému zatížení zkušebního vzorku a nedochází k velkým PD, což je patrné na obrázcích Obr. 437 a Obr. 443 zachycujících PD při zatížení 10 % síly MOR. Na Obr. 440 také není patrná koncentrace PSD v jakékoliv části zkušebního vzorku. Při zvyšování působící síly do meze úměrnosti pak dochází ke vzniku PD v krčcích vzorku a zanedbatelných PD v pracovní části vzorku (Obr. 438 a Obr. 444). V těchto místech však dochází ke vzniku nezanedbatelných PSD (Obr. 441). Na snímku jsou dobře patrné PSD ve středové dýze v pracovní části vzorku mezi vrstvami uhlíkových vláken.

Po překročení meze úměrnosti dochází ke vzniku nezanedbatelných PD a PSD zejména v krčcích vzorků v jejich části blíže k pracovní části vzorku Obr. 449. V těchto místech následně dochází k místním delaminacím lepeného spoje (Obr. 450) a následně se delaminační trhlinka v levé lepené spáře zvětšuje až do meze pevnosti (Obr. 442). Po překročení meze pevnosti došlo k mírnému zvětšení delaminací v lepených spárách (Obr. 451).

Na obrázcích PSD od meze úměrnosti je u tohoto vzorku velmi dobře patrné působení PSD v lepených spárách a ve středové dýze pracovní části vzorku.



Obr. 437: S9 – Exx – 10 %  
(č. 0,00092,  
z. 0,00037,  
m. -0,00029,  
f. -0,00084)

Obr. 438: S9 – Exx – MÚ  
(č. 0,00108,  
z. 0,00032687,  
m. -0,0005768,  
f. -0,00133)

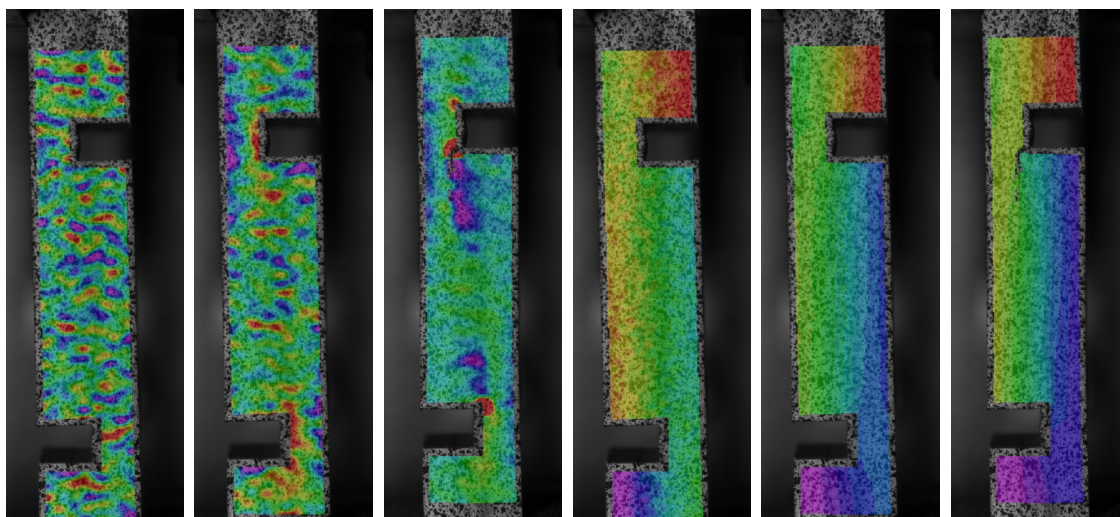
Obr. 439: S9 – Exx – MOR  
(č. 0,122,  
z. 0,0823125,  
m. -0,0346875,  
f. -0,005)

Obr. 440: S9 – Exy – 10 %  
(č. 0,00067,  
z. 0,00024812,  
m. -0,0002581,  
f. -0,00068)

Obr. 441: S9 – Exy – MÚ  
(č. 0,001,  
z. 0,00025,  
m. -0,00065,  
f. -0,0014)

Obr. 442: S9 – Exy – MOR  
(č. 0,0024,  
z. -0,0060375,  
m. -0,0016162,  
f. -0,0246)

PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 326, MÚ Obr. 327 a MOR Obr. 328. PSD při zatížení 10 % MOR zachycuje Obr. 329, MÚ Obr. 330 a MOR Obr. 331. PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR zachycuje Obr. 332 , při MÚ Obr. 333 a při MOR Obr. 334. Posunutí v ose  $V$  pak zachycují Obr. 335, Obr. 336 a Obr. 337. Obr. 338 zachycuje koncentraci PSD před započítáním porušení, Obr. 339 při porušení a Obr. 340 vzorek na konci zkoušky.



Obr. 443:  $S9 - E_{yy} - 10\%$   
(č. 0,00087,  
z. 0,00031687,  
m. -0,0003468,  
f. -0,0009)

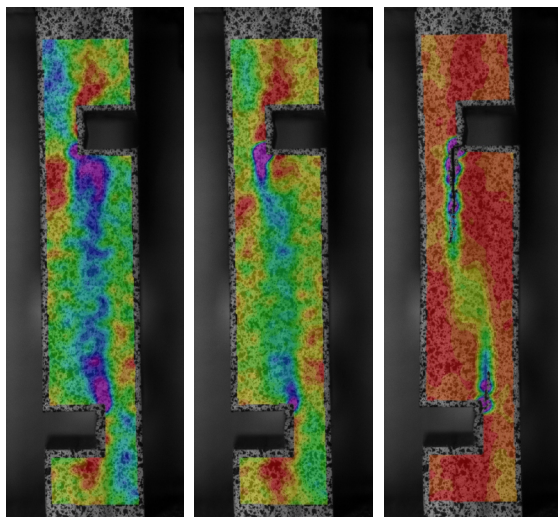
Obr. 444:  $S9 - E_{yy} - MÚ$   
(č. 0,00124,  
z. 0,00048062,  
m. -0,0004306,  
f. -0,00119)

Obr. 445:  $S9 - E_{yy} - MOR$   
(č. 0,0071,  
z. 0,00335,  
m. -0,00115,  
f. -0,0049)

Obr. 446:  $S9 - V - 10\%$   
(č. 0,0974,  
z. 0,0932125,  
m. 0,0881875,  
f. 0,084)

Obr. 447:  $S9 - V - MÚ$   
(č. 0,481,  
z. 0,453625,  
m. 0,430813,  
f. 0,408)

Obr. 448:  $S9 - V - MOR$   
(č. 1,242,  
z. 1,14513,  
m. 1,02887,  
f. 0,932)



Obr. 449:  $S9 - E_{xy} - MÚ +$   
(č. 0,00174,  
z. 0,00030875,  
m. -0,0014087,  
f. -0,00284)

Obr. 450:  $S9 - E_{xy} - MÚ +$   
(č. 0,00175,  
z. -0,0002031,  
m. -0,002546,  
f. -0,0045)

Obr. 451:  $S9 - E_{xy} - MOR +$   
(č. 0,0024,  
z. -0,0060375,  
m. -0,0161625,  
f. -0,0246)

## **6.3 Verifikace vymodelovaných vzorků v programu ANSYS**

Modely vytvořené v programu ANSYS byly zatíženy posunutím nebo silou, při které došlo k dosažení meze úměrnosti a 10 % síly MOR u vybraných vzorků. Pro každou zkoušku byl zvolen jeden vyztužený a jeden nevyztužený vzorek. Zpravidla byly vybrány vzorky, které dosáhly nejlepších výsledků (porušení při nejvyšší působící síle).

Při porovnání experimentálně naměřených sil a posunů se silami a posuny vypočítanými programem ANSYS pro vymodelovaná tělíska bylo zjištěno, že mezi naměřenými a simulací získanými silami a posuny jsou poměrně velké rozdíly ve sledovaných momentech. Tyto rozdíly byly způsobeny ideálním chováním lineárně – elastických modelů, které nesimulovaly možnost delaminace lepených spár a variabilní vlastnosti dřeva (např. odklon vláken, vady ve dřevě, apod.). Síly a posunutí působící v modelech byly pro snadnější porovnání vloženy do tabulek, které jsou vloženy v podkapitolách níže.

Barevné škály, které jsou přiřazeny k jednotlivým velikostem distribucí sledovaných veličin jsou mírně rozdílné pro obrázky experimentálně naměřených a vypočítaných distribucí. U obou případů jsou maximální kladné hodnoty označeny červeně, avšak maximální záporné hodnoty jsou u experimentálně naměřených distribucí zobrazeny fialově a u vypočítaných modře. Rozložení barev mezi maximy je obdobné. Na obrázcích modelů jsou však škály nevhodně otočeny a působí dojmem obráceného rozložení.

### **6.3.1 Tlakové vzorky**

#### **6.3.1.1 Nevyztužená zkušební tělíska**

Model zkušebního tělíska vytvořeného v programu ANSYS byl zatížen posunutím o 0,428 mm a o 0,09 mm, což jsou posunutí příčnicku, při kterých došlo k dosažení meze úměrnosti a 10 % síly MOR u vzorku T2.

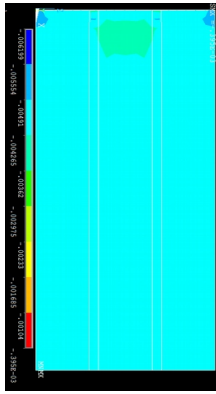
Model vykazuje mnohem vyšší tuhost a tím i vyšší potřebnou sílu pro dosažení zadaného posunutí (viz. Model TBK2 v Tab. 4), nežli reálný zkušební vzorek (Vzorek T2 v Tab. 4) při 10 % síly MOR a při mezi úměrnosti. Programem vypočítané hodnoty jsou přibližně 6× vyšší, nežli naměřené hodnoty.



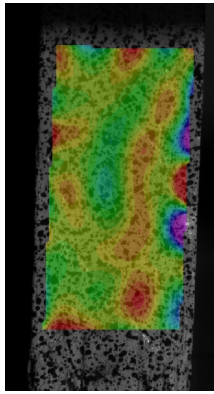
Tab. 4 Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek T2) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model TBK2) pro případ T2

Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)
T2	Vzorek T2	0,0896	1056,25	0,4279	8074,21
	Model TBK2	0,0896	6567,72	0,4279	44391,6

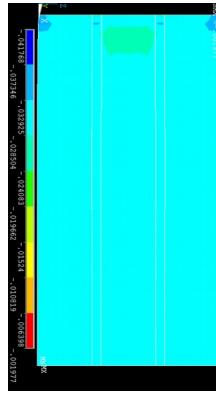
Při porovnání grafických výstupů je taktéž na první pohled patrné ideální rozložení sledovaných veličin v modelu při porovnání s obrázky zachycujícími experimentální měření. Podobné jsou pouze obrázky zachycující posunutí v ose  $U$ . Tato podobnost může být způsobena zatížením modelu posunem a také skutečností, že se jedná o zkoušku na tlak, kde teoreticky nedochází k zakřivení osy tělíska. Při porovnání velikosti sledovaných veličin je patrné, že v při působení v modelu mají mnohem větší velikost, nežli ve skutečnosti.



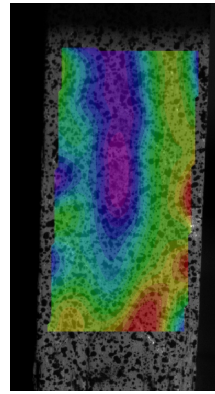
Obr. 452 TBK2 – Exx 10%  
(č.  $-0,395e-03$ ,  
s. m.  $-0,00491$ ,  
m.  $-0,004199$ )



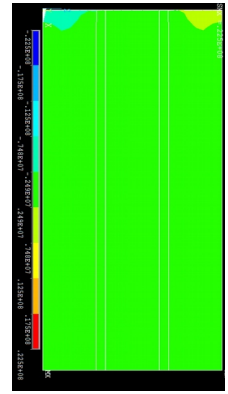
Obr. 453 T2 – Exx – 10 %  
(č.  $0,0012$ ,  
z.  $-0,000119063$ ,  
f.  $-0,000645$ )



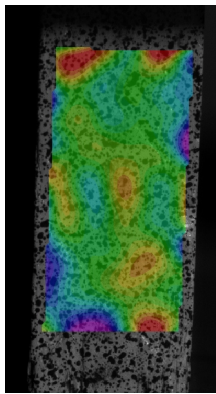
Obr. 454 TBK2 – Exx – MU  
(č.  $-0,001977$ ,  
s. m.  $-0,032925$ ,  
m.  $-0,041768$ )



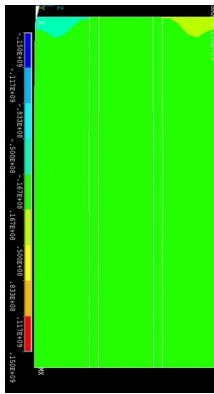
Obr. 455 T2 – Exx – MU  
(č.  $0,00154$ ,  
z.  $0,00095875$ ,  
f.  $-0,00032$ )



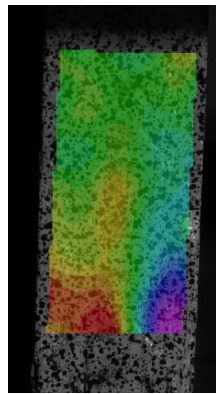
Obr. 456 TBK2 – Exy – 10 %  
(č.  $0,225e+08$ ,  
z.  $0,245e+07$ ,  
m.  $-0,225e+08$ )



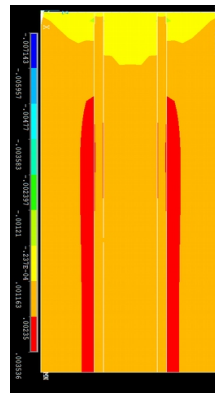
Obr. 457 T2 – Exy – 10%  
(č.  $0,000215$ ,  
z.  $2,937e-05$ ,  
f.  $-0,00028$ )



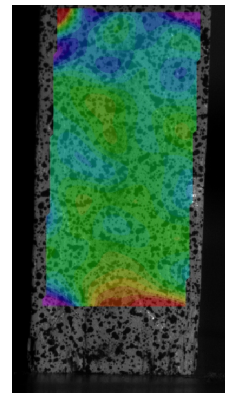
Obr. 458 TBK2 – Exy – MU  
(č.  $0,150e+09$ ,  
z.  $0,167e+08$ ,  
m.  $-0,150e+09$ )



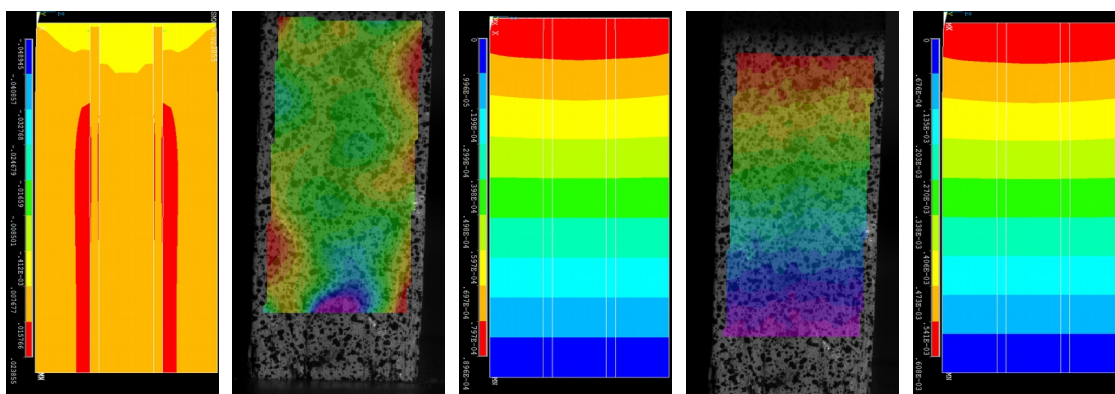
Obr. 459 T2 – Exy – MU  
(č.  $0,00182$ ,  
z.  $0,0005225$ ,  
f.  $-0,00164$ )



Obr. 460 TBK2 – Eyy – 10 %  
(č.  $0,003536$ ,  
o.  $0,001163$ ,  
m.  $-0,007143$ )



Obr. 461 T2 – Eyy – 10 %  
(č.  $0,000515$ ,  
z.  $0,000245$ ,  
f.  $-0,000365$ )



Obr. 462 TBK2 – Eyy – MÚ  
(č. 0,023855,  
o. 0,007677,  
m. -0,0048945)

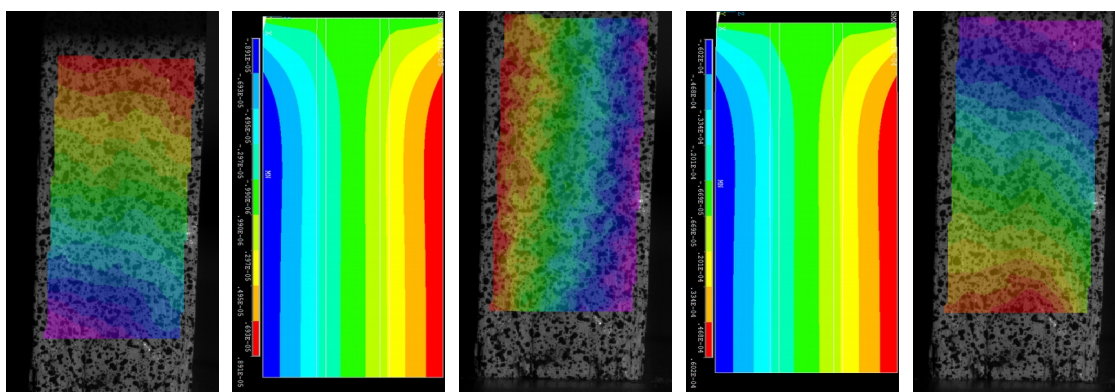
Obr. 463 T2 – Eyy – MÚ  
(č. -0,00138,  
z. -0,002155,  
f. -0,00386)

Obr. 464 TBK2 – U – 10 %  
(č. 0,896e-04,  
s. m. 0,299e-04,  
m. 0)

Obr. 465 T2 – U – 10 %  
(č. 0,0185,  
z. 0,0143437,  
f. 0,00052)

Obr. 466 TBK2 – U – MÚ  
(č. 0,608e-03,  
s. m. 0,203e-03,  
m. 0)

Obr. 341 a Obr. 342 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 343 a Obr. 344 při MÚ. Obr. 345 a Obr. 346 prožívají PSD při zatížení 10 % MOR, Obr. 347 a Obr. 348 při MÚ. Obr. 349 a Obr. 350 prožívají distribuci PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 351 a Obr. 352 při MÚ. Obr. 353 a Obr. 354 prožívají posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 355 a Obr. 356 při MÚ. Obr. 357 a Obr. 358 prožívají posunutí v ose  $V$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 359 a Obr. 360 při MÚ.



Obr. 467 T2 – U – MÚ  
(č. 0,0632,  
z. 0,0547625,  
f. 0,0362)

Obr. 468 TBK2 – V – 10 %  
(č. 0,891e-05,  
s. m. -0,495e-05,  
m. -0,891e-05)

Obr. 469 T2 – V – 10 %  
(č. -0,02005,  
z. -0,0220969,  
f. -0,0266)

Obr. 470 TBK2 – V – MÚ  
(č. 0,602e-04,  
s. m. -0,201e-04,  
m. -0,602e-04)

Obr. 471 T2 – V – MÚ  
(č. -0,0994,  
z. -0,1099,  
f. -0,133)

### 6.3.1.2 Zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny

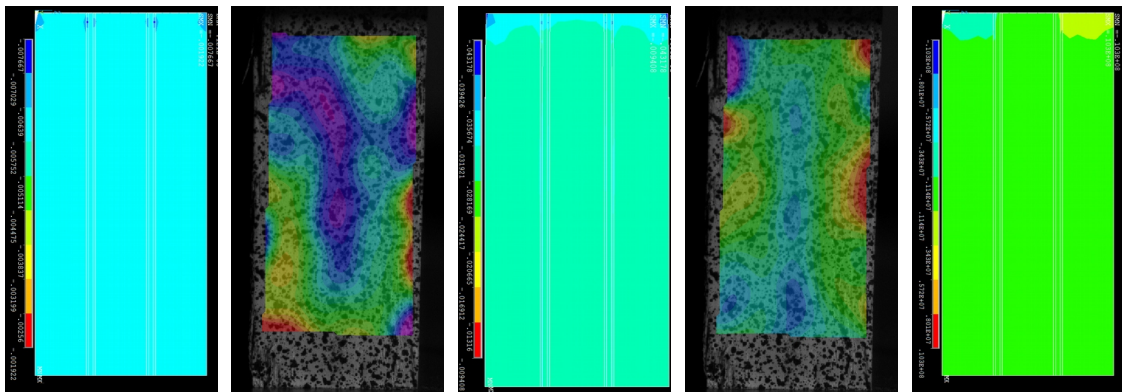
Model zkušebního tělíska vytvořeného v programu ANSYS byl zatížen posunutím o 0,608 mm a o 0,121 mm, což jsou přibližné posunutí příčnicku, při kterých došlo k dosažení meze pevnosti a 10 % síly MOR u vzorku T7.

Model vykazuje mnohem vyšší tuhost a tím i vyšší potřebnou sílu pro dosažení zadaného posunutí (viz. Model TBK7 v Tab. 5), nežli reálný zkušební vzorek (Vzorek T7 v Tab. 5) při 10 % síly MOR a při mezi úměrnosti. Programem vypočítané hodnoty jsou přibližně 13× a 8× vyšší, nežli naměřené hodnoty.

Při porovnání grafických výstupů bylo opět patrné ideální rozložení sledovaných veličin v modelu při porovnání s obrázky zachycujícími experimentální měření. Při porovnání velikosti sledovaných veličin je patrné, že v při působení v modelu mají opět mnohem větší velikost, nežli ve skutečnosti.

Tab. 5 Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek T7) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model TBK7) pro případ T7

Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)
T7	Vzorek T7	0,1214	1451,65	0,6085	13719,6
	Model TBK7	0,1214	19336,9	0,6085	99485,57



Obr. 472 TBK7 – Exx 10%  
(č. -0,001922,  
s. m. -0,005752,  
m. -0,007667)

Obr. 473 T7 – Exx – 10 %  
(č. 0,00118,  
z. 0,000822188,  
f. -3,5e-05)

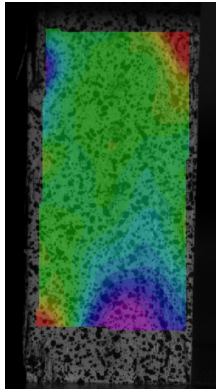
Obr. 474 TBK7 – Exx – MÚ  
(č. -0,009408,  
s. m. -0,031921,  
m. -0,043178)

Obr. 475 T7 – Exx – MÚ  
(č. 0,0043,  
z. 0,00244063,  
f. -0,00165)

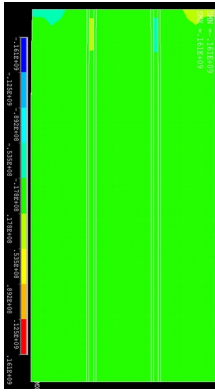
Obr. 476 TBK7 – Exy – 10 %  
(č. 0,103e+08,  
z. 0,114e+07,  
m. -0,103e+08)

Obr. 361 a Obr. 362 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 363 a Obr. 364 při MÚ. Obr. 365 a Obr. 366 prožívají PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 367 a Obr. 368 při MÚ. Obr. 369 a Obr. 370 prožívají distribuci PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 371 a Obr. 372 při MÚ. Obr. 373 a Obr. 374 prožívají posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 375 a Obr. 376 při MÚ. Obr. 377 a Obr. 378 prožívají posunutí v ose  $V$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 379 a Obr. 380 při MÚ.

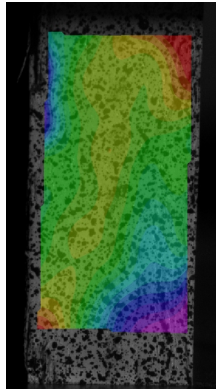




Obr. 477 T7 – Exy  
– 10%  
(č. 0,00134,  
z. 0,00054,  
f. -0,00122)



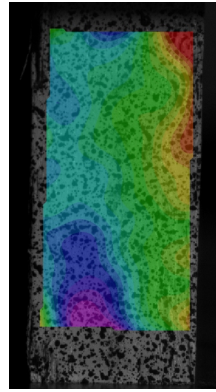
Obr. 478 TBK7 –  
Exy – MÚ  
(č. 0,161e+09,  
z. 0,178e+08,  
m. -0,161e+09)



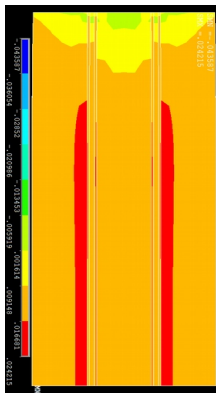
Obr. 479 T7 – Exy  
– MÚ  
(č. 0,00465,  
z. 0,0009,  
f. -0,00735)



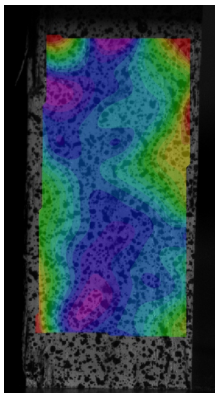
Obr. 480 TBK7 –  
Eyy – 10 %  
(č. 0,003699,  
o. 0,945e-03,  
m. -0,008694)



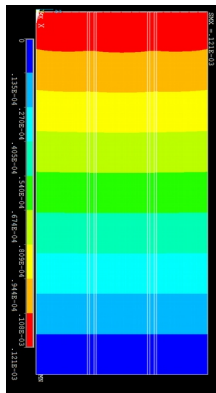
Obr. 481 T7 – Eyy  
– 10 %  
(č. -0,00019,  
z. -0,00089,  
f. -0,00243)



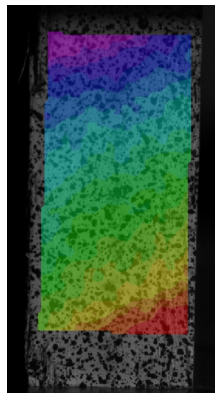
Obr. 482 TBK7 –  
Eyy – MÚ  
(č. 0,024215,  
o. -0,020986,  
m. -0,043587)



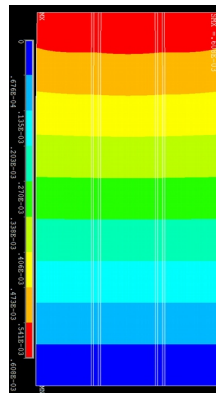
Obr. 483 T7 – Eyy  
– MÚ  
(č. -0,00305,  
z. -0,00655,  
f. -0,01425)



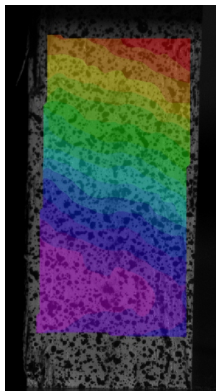
Obr. 484 TBK7 – U  
– 10 %  
(č. 0,121e-03,  
s. m. 0,405e-04,  
m. 0)



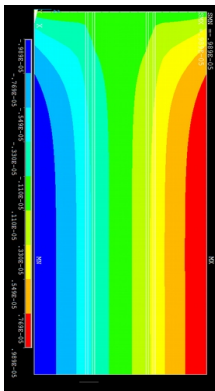
Obr. 485 T7 – U –  
10 %  
(č. 0,0214,  
z. 0,0164625,  
f. 0,0056)



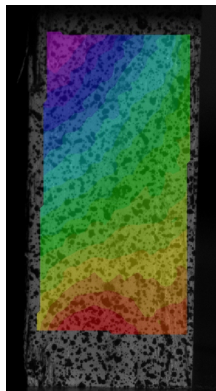
Obr. 486 TBK7 – U  
– MÚ  
(č. 0,608e-03,  
s. m. 0,203e-03,  
m. 0)



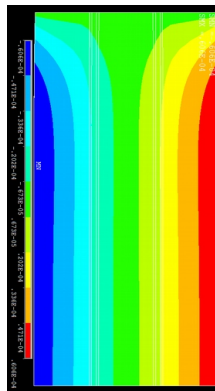
Obr. 487 T7 – U –  
MÚ  
(č. 0,081,  
z. 0,06475,  
f. 0,029)



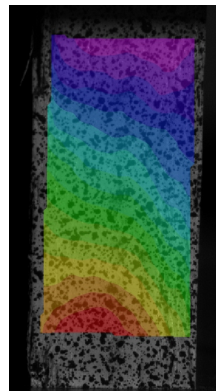
Obr. 488 TBK7 – V  
– 10 %  
(č. 0,989e-05,  
s. m. -0,330e-05,  
m. -0,989e-05)



Obr. 489 T7 – V –  
10 %  
(č. -0,0408,  
z. -0,0486125,  
f. -0,0658)



Obr. 490 TBK7 – V  
– MÚ  
(č. 0,606e-04,  
s. m. -0,202e-04,  
m. -0,606e-04)



Obr. 491 T7 – V –  
MÚ  
(č. -0,1285,  
z. -0,160688,  
f. -0,2315)

### 6.3.2 Ohybové vzorky

Ohybové modely vykazovaly rozložením sledovaných veličin poměrně dobrou shodu s experimentálně naměřenými výsledky zpracovanými metodou DIC. Poměrné deformace a poměrné smykové deformace vznikají přibližně v místech, kde k nim dochází reálně. Velikost působící síly však byla několikanásobně větší nežli ve skutečnosti.

#### 6.3.2.1 Nevztažená zkušební tělíska

Model ohybového zkušebního tělíska vytvořeného v programu ANSYS byl zatížen posunutím o 1,431 mm a o 1,152 mm, což jsou posunutí příčnicku, při kterých došlo k dosažení meze úměrnosti a 10 % síly MOR u vzorku O1.

Model vykazuje mnohem vyšší tuhost a tím i vyšší potřebnou sílu pro dosažení zadaného posunutí (viz. Model OBK1 v Tab. 6), nežli reálný zkušební vzorek (Vzorek O1 v Tab. 6) při 10 % síly MOR a při mezi úměrnosti. Programem vypočítané hodnoty jsou přibližně 10× a 5× vyšší, nežli naměřené hodnoty.

Tab. 6: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek O1) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model OBK2) pro případ O1

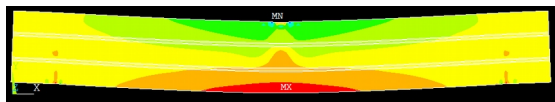
Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčnicku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčnicku (mm)	Síla (N)
O1	Vzorek O1	1,1523	228,46	1,4308	744,91
	Model OBK1	1,1523	2890,66	1,4308	3501,14

Při porovnání grafických výstupů je patrné podobné rozložení sledovaných veličin v modelu při porovnání s obrázky zachycujícími experimentální měření. U zkušebních tělísek, zachycujících poměrné deformace v ose  $X$ , je patrné rozložení PD na tahové a tlakové straně vzorku. U obrázků zachycujících PSD jsou patrné působící PSD ve vzorku, vpravo s kladnou hodnotou (žlutě) a vlevo se zápornou hodnotou (světle modře). Na obrázcích zachycujících PD v ose  $Y$  je pak patrné otláčení od podpěr a tlačné hlavy, stejně jako na obrázcích zachycujících průběh reálné zkoušky. Při porovnání velikosti sledovaných veličin je patrné, že při působení v modelu mají většinou mnohem větší velikost nežli ve skutečnosti.

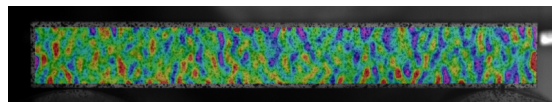
Obr. 381 a Obr. 382 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 383 a Obr. 384 při MÚ. Obr. 385 a Obr. 386 prožívají distribuci PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 387 a Obr. 388 při MÚ. Obr. 389 a Obr. 390 prožívají distribuci



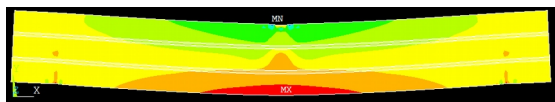
PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 391 a Obr. 392 při MÚ. Obr. 393 a Obr. 394 provádají distribuci posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 395 a Obr. 396 při MÚ.



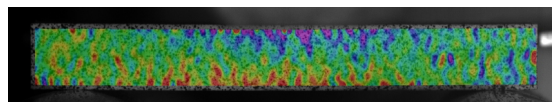
Obr. 492:  $OBK1 - Exx - 10\%$  (č. 0,012991, z. - 0,009749, ž.  $-0,653e-03$ , m. -0,02794)



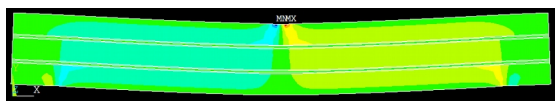
Obr. 493:  $OI - Exx - 10\%$  (č. 0,00138, z.  $3,25001e-05$ , m. -0,00093, f. -0,0017)



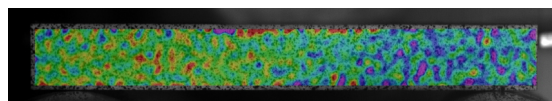
Obr. 494:  $OBK1 - Exy - MÚ$  (č. 0,01613, z. - 0,012105, ž.  $-0,811e-03$ , m. -0,010483)



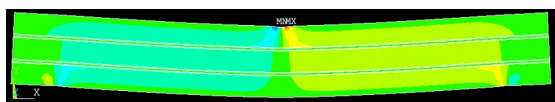
Obr. 495:  $OI - Exx - MÚ$  (č. 0,0018, z. 0,00018, m. -0,00144, f. -0,00252)



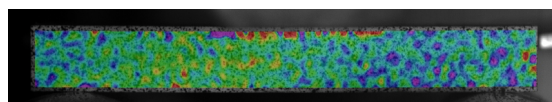
Obr. 496:  $OBK1 - Exy - 10\%$  (č. 0,067778, z. - 0,007531, s.m. + ž.  $-0,0022593$ , m. -0,067778)



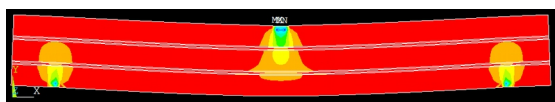
Obr. 497:  $OI - Exy - 10\%$  (č. 0,00152, z. 0,00063875, m. -0,00077125, f. -0,0013)



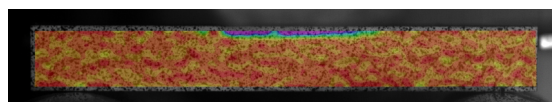
Obr. 498:  $OBK1 - Eyy - MÚ$  (č. 0,084159, z. - 0,009351, s.m.+ž.  $-0,028053$ , m. -0,084159)



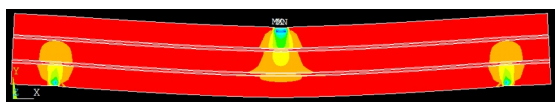
Obr. 499:  $OI - Exy - MÚ$  (č. 0,0019, z. 0,000465, m. -0,000765, f. -0,00138)



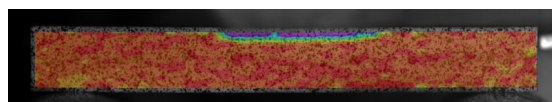
Obr. 500:  $OBK1 - U - 10\%$  (č. 0,003899, o. - 0,006772, ž.  $-0,012108$ , m. -0,04412)



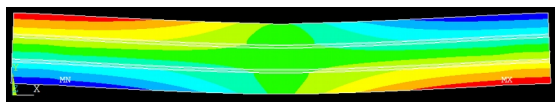
Obr. 501:  $OI - Eyy - 10\%$  (č. 0,0021, o.  $1,24993e-05$ , ž.  $-0,0010312$ , f. -0,00146)



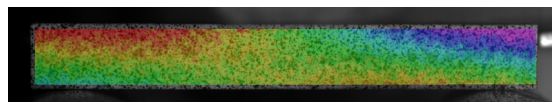
Obr. 502:  $OBK1 - U - MÚ$  (č. 0,004841, o. - 0,008409, ž.  $-0,0015034$ , m. -0,054783)



Obr. 503:  $OI - Eyy - MÚ$  (č. 0,02, o. -0,001175, ž.  $-0,0027625$ , f. -0,0234)



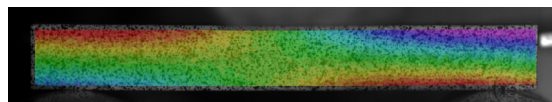
Obr. 504:  $OBK1 - U - 10\%$  (č.  $-0,17e-03$ , z.+ ž. - 0,194e-04, m.  $-0,175e-03$ )



Obr. 505:  $OI - U - 10\%$  (č. 0,0276, z. 0,020325, m. 0,01305, f. 0,0082)



Obr. 506:  $OBK1 - U - MÚ$  (č.  $0,217e-03$ , z.+ ž. - 0,241e-04, m.  $-0,0217e-03$ )



Obr. 507:  $OI - U - MÚ$  (č. 0,058, ž. 0,03925, z. 0,0455, f. 0,008)

### 6.3.2.2 Zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny

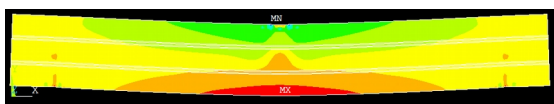
Model zkušebního tělíska vytvořeného v programu ANSYS byl zatížen posunutím o 1,325 mm a o 1,067 mm, což jsou posunutí příčnicku, při kterých došlo k dosažení meze úměrnosti a 10 % síly MOR u vzorku O7.

Model vykazuje mnohem vyšší tuhost a tím i vyšší potřebnou sílu pro dosažení zadaného posunutí (viz. Model OBK7 v Tab. 7), nežli reálný zkušební vzorek (Vzorek O7 v Tab. 7) při 10 % síly MOR a při mezi úměrnosti. Programem vypočítané hodnoty jsou přibližně  $10,5\times$  a  $3,5\times$  vyšší, nežli naměřené hodnoty.

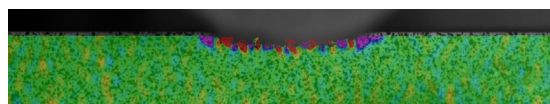
Tab. 7: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek O7) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model OBK7) pro případ O7

Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčnicku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčnicku (mm)	Síla (N)
O7	Vzorek O7	1,0668	293,24	1,3250	1069,54
	Model OBK7	1,0668	3117,06	1,3250	3781,41

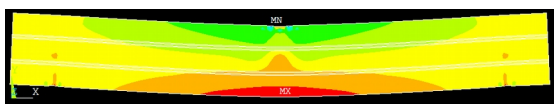
Při porovnání grafických výstupů je patrné podobné rozložení sledovaných veličin v modelu jako při porovnání s obrázky zachycujícími experimentální měření. Podobnost je však menší, nežli v případě O1. Rozložení sledovaných veličin v modelu je totožné s předchozím případem OBK1, jen se liší velikost sledovaných veličin. Při porovnání obrázků zachycujících rozložení sledovaných veličin v modelu OBK1 a modelem OBK7 je patrné, že přítomnost uhlíkových vláken v modelu nikterak neovlivnila rozložení sledovaných veličin. Při porovnání obrázků O1 a O7 je patrné silné ovlivnění rozložení sledovaných veličin, zejména u obrázků zachycujících PSD při mezi úměrnosti. Při porovnání velikosti sledovaných veličin je opět patrné, že v při působení v modelu mají většinou mnohem větší velikost, nežli je tomu skutečnosti.



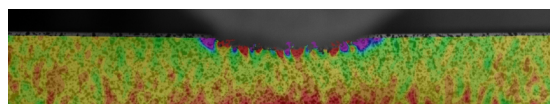
Obr. 508: OBK7 – Exy – 10 % (č. 0,011605, z. -0,009961, ž. -0,001334, m. -0,027214)



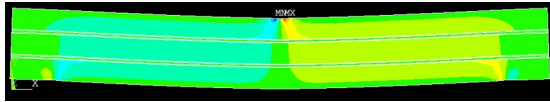
Obr. 509: O7 – Exx – 10 % (č. 0,00405, z. 0,0009875, m. -0,0026875, f. -0,00575)



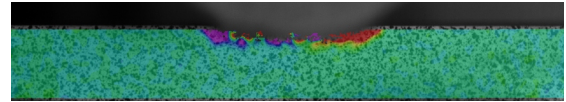
Obr. 510: OBK7 – Exy – MÚ (č. 0,014414, z. -0,012371, ž. -0,001657, m. -0,0338)



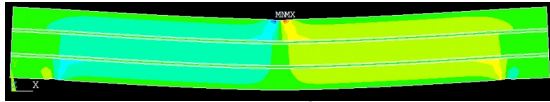
Obr. 511: O7 – Exx – MÚ (č. 0,0029, z. -0,00081875, m. -0,00528125, f. -0,009)



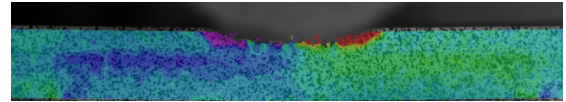
Obr. 512:  $OBK7 - E_{xy} - 10\%$  (č. 0,0703687, z. -0,007812, ž. 0,023437, m. -0,070312)



Obr. 513:  $O7 - E_{xy} - 10\%$  (č. 0,0093, z. 0,00308125, m. -0,00438125, f. -0,0106)

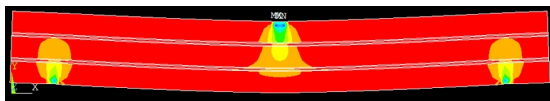


Obr. 514:  $OBK7 - E_{yy} - MÚ$  (č. 0,087328, z. -0,009703, ž. 0,029109, m. -0,087328)

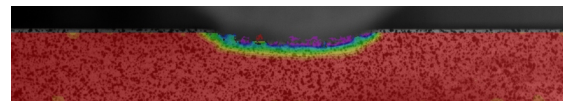


Obr. 515:  $O7 - E_{yy} - MÚ$  (č. 0,0139, z. 0,00674375, m. -0,00184375, f. -0,009)

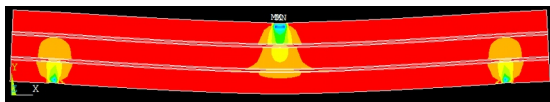
Obr. 397 a Obr. 398 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 399 a Obr. 400 při MÚ. Obr. 401 a Obr. 402 prožívají distribuci PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 403 a Obr. 404 při MÚ. Obr. 405 a Obr. 406 prožívají distribuci PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 407 a Obr. 408 při MÚ. Obr. 409 a Obr. 410 prožívají distribuci posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 411 a Obr. 412 při MÚ.



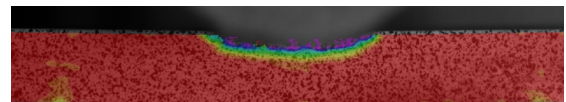
Obr. 516:  $OBK7 - U - 10\%$  (č. 0,003537, z. -0,02532, ž. -0,013904, m. -0,048787)



Obr. 517:  $O7 - E_{yy} - 10\%$  (č. 0,0015, z. -0,0192812, m. -0,0442187, f. -0,065)



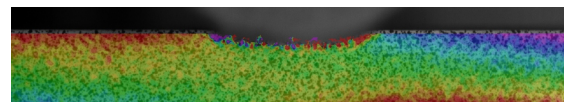
Obr. 518:  $OBK7 - U - MÚ$  (č. 0,004393, z. -0,031711, ž. -0,017269, m. -0,060593)



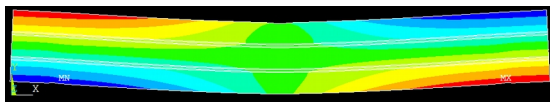
Obr. 519:  $O7 - E_{yy} - MÚ$  (č. 0,0015, z. -0,019125, m. -0,043875, f. -0,0645)



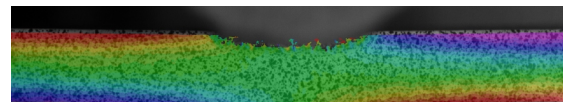
Obr. 520:  $OBK7 - U - 10\%$  (č. 0,155e-03, z. -0,172e-04, ž. -0,517e-04, m. -0,155e-03)



Obr. 521:  $O7 - U - 10\%$  (č. 0,0137, z. 0,0085125, m. 0,0022875, f. -0,0029)



Obr. 522:  $OBK7 - U - MÚ$  (č. 0,193e03, z. -0,214e-04, ž. -0,642e-04, m. -0,193e-03)



Obr. 523:  $O7 - U - MÚ$  (č. 0,049, z. 0,026013, m. -0,00153125, f. -0,0245)

### 6.3.3 Smykové vzorky

Smykové modely vykazovaly rozložením sledovaných veličin poměrně dobrou shodu s experimentálně naměřenými výsledky zpracovanými v DIC. Poměrné deformace a poměrné smykové deformace vznikají přibližně v místech, kde k nim dochází reálně. Velikost posunu však byla několikanásobně menší nežli ve skutečnosti.

#### 6.3.3.1 Nevztažená zkušební tělíska

Model zkušebního tělíska vytvořeného v programu ANSYS byl zatížen silou 396,48 N a 107,18 N, což jsou síly, při kterých došlo k dosažení meze úměrnosti a 10 % síly MOR u vzorku S2.

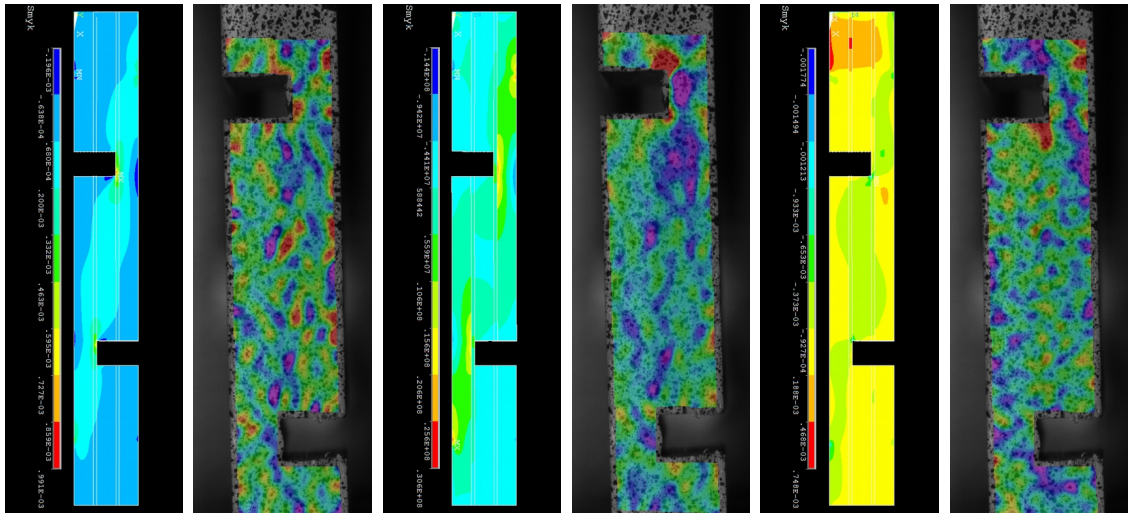
Model vykazuje mnohem vyšší tuhost a tím i nižší posun pro dosažení zadané velikosti síly (viz. Model SBK2 v Tab. 8), nežli reálný zkušební vzorek (Vzorek S2 v Tab. 8) při 10 % síly MOR a při mezi úměrnosti. Programem vypočítané posuny jsou přibližně 3× nižší, nežli naměřené posuny.

Tab. 8: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek S2) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model SBK2) pro případ S2

Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10 % síly MOR			Mez úměrnosti		
		Posunutí příčnicku (mm)	Posunutí ve vzorku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčnicku (mm)	Posunutí ve vzorku (mm)	Síla (N)
S2	Vzorek S2	0,2215	0,0418	107,18	0,84	0,1620	396,48
	Model SBK2	-	0,0146	107,18	-	0,0539	396,48

Při porovnání grafických výstupů je na první pohled patrné velmi podobné rozložení sledovaných veličin v modelu při porovnání s obrázky zachycujícími experimentální měření. Patrné je téměř totožné rozložení PD a PSD v krčcích a v pracovní části vzorku. Rozložení posunutí je též téměř totožné. Při porovnání velikosti PD a PSD je patrné, že v při působení v modelu mají mírně větší velikost nežli ve skutečnosti, nejpodobnější velikost mají při PD v ose  $Y$ . Posun je naopak velmi rozdílný. Podobnou velikost PD v ose  $Y$  a velmi rozdílný posun lze přisuzovat zatížení zkušebního tělíska silou a nikoliv posunem.





Obr. 524:  
SBK2 – Exx –  
10 %  
(č.  $0,991e-3$ ,  
z.  $0,332e-3$ ,  
s.m.  $-0,200e-3$ ,  
m.  $-0,196e-3$ )

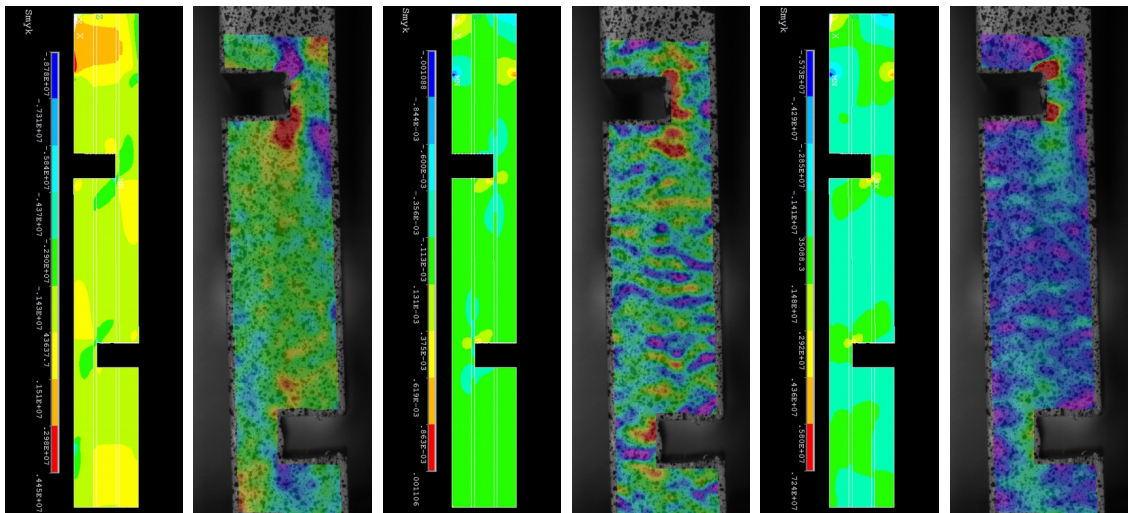
Obr. 525: S2 –  
Exx – 10 %  
(č.  $0,00107$ ,  
z.  $0,00038875$ ,  
m.  $-0,000565$ ,  
f.  $-0,00111$ )

Obr. 526:  
SBK2 - Exx –  
MÚ  
(č.  $0,306e+8$ ,  
z.  $0,559e+7$ ,  
s.m.  $-0,441e+7$ ,  
m.  $-0,144+8$ )

Obr. 527: S2 –  
Exx – MÚ  
(č.  $0,00196$ ,  
z.  $0,00081625$ ,  
m.  $-0,000785$ ,  
f.  $-0,0017$ )

Obr. 528:  
SBK2 – Exy –  
10 %  
(č.  $0,768e-3$ ,  
z.  $0,653e-3$ ,  
ž.  $-0,927e-4$ ,  
m.  $-0,001774$ )

Obr. 529: S2 –  
Exy – 10 %  
(č.  $0,00103$ ,  
z.  $0,00043625$ ,  
m.  $-0,00145$ ,  
f.  $-0,00087$ )



Obr. 530:  
SBK2 – Exy –  
MÚ  
(č.  $0,445e+7$ ,  
z.  $0,290e+7$ ,  
ž.  $43637,7$ ,  
m.  $-0,878e+7$ )

Obr. 531: S2 –  
Exy – MÚ  
(č.  $0,0023$ ,  
z.  $0,0007375$ ,  
m.  $-0,000395$ ,  
f.  $-0,0027$ )

Obr. 532:  
SBK2 – Eyy –  
10 %  
(č.  $0,001106$ ,  
z.  $0,113e-3$ ,  
s.m.  $-0,6e-3$ ,  
m.  $-0,001088$ )

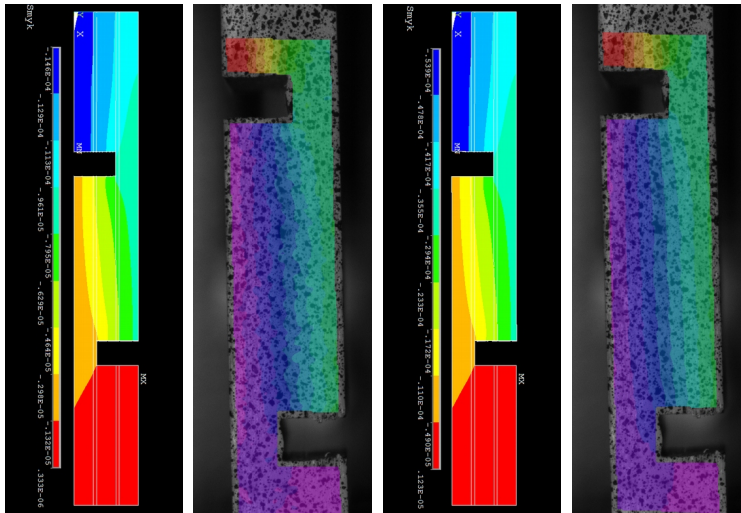
Obr. 533: S2 –  
Eyy – 10 %  
(č.  $0,00145$ ,  
z.  $0,00069062$ ,  
m.  $-0,0003725$ ,  
f.  $-0,00098$ )

Obr. 534:  
SBK2 – Eyy –  
MÚ  
(č.  $0,724e+7$ ,  
z.  $35088,3$ ,  
s.m.  $-0,285e+7$ ,  
m.  $-0,573e+7$ )

Obr. 535: S2 –  
Eyy – MÚ  
(č.  $0,00525$ ,  
z.  $0,00366875$ ,  
m.  $-0,0009312$ ,  
f.  $-0,00135$ )

Obr. 413 Obr. 414 prožívají distribuci PD v ose X při zatížení 10 % MOR, Obr. 415 a Obr. 416 při MÚ. Obr. 417 a Obr. 418 prožívají distribuci PSD při zatížení 10 % MOR, Obr. 419 a Obr. 420 při MÚ. Obr. 421 a Obr. 422 prožívají distribuci PD v ose Y při zatížení 10 % MOR, Obr. 423 a Obr. 424 při MÚ. Obr. 425 a Obr. 426 prožívají distribuci posunutí v ose U při zatížení 10 % MOR, Obr. 427 a Obr. 428 při MÚ.





Obr. 536:  
SBK2 – V – 10  
%  
(č.  $0,333e-6$ ,  
z.  $0,795e-5$ ,  
o.  $-0,298e-5$ ,  
m.  $-0,146e-4$ )

Obr. 537: S2 –  
V – 10 %  
(č.  $0,101$ ,  
z.  $0,0879375$ ,  
m.  $0,0722625$ ,  
f.  $0,0592$ )

Obr. 538:  
SBK2 – V –  
MÚ  
(č.  $0,123w-5$ ,  
z.  $0,294e-4$ ,  
o.  $-0,110e-4$ ,  
m.  $-0,539e-4$ )

Obr. 539: S2 –  
V – MÚ  
(č.  $0,487$ ,  
z.  $0,436375$ ,  
m.  $0,375625$ ,  
f.  $0,325$ )

### 6.3.3.2 Zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny

Model zkušebního tělíska vytvořeného v programu ANSYS byl zatížen silou 689,63 N a 208,07 N, což jsou síly při kterých došlo k dosažení meze úměrnosti a 10 % síly MOR u vzorku S4.

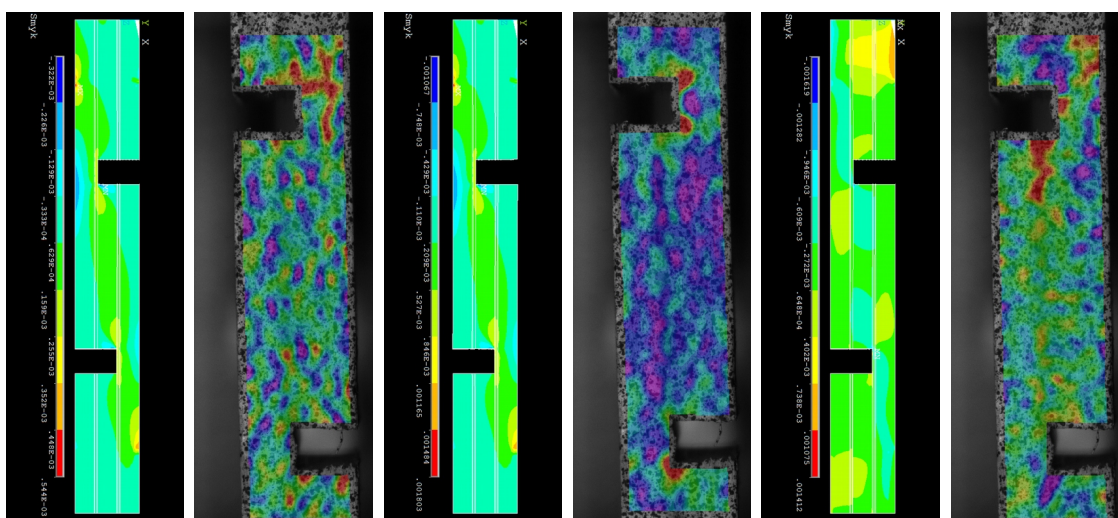
Model vykazuje mnohem vyšší tuhost a tím i nižší posun po dosažení zadané velikosti síly (viz. Model SBK4 v Tab. 9), nežli reálný zkušební vzorek (Vzorek S4 v Tab. 9) při 10 % síly MOR a při mezi úměrnosti. Programem vypočítaný posun je přibližně 3× nižší nežli naměřený posun.

Tab. 9: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek S4) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model SBK4) pro případ S4

Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10 % síly MOR			Mez úměrnosti		
		Posunutí příčnicku (mm)	Posunutí ve vzorku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčnicku (mm)	Posunutí ve vzorku (mm)	Síla (N)
S4	Vzorek S4	0,4344	0,0462	208,07	1,39	0,1510	689,63
	Model SBK4	-	0,0145	208,07	-	0,0488	689,63

Při porovnání grafických výstupů je na první pohled zřejmé velmi podobné rozložení sledovaných veličin v modelu při porovnání s obrázky zachycujícími experimentální měření. Na modelu S4 je patrné ovlivnění uhlíkovými vlákny a to zejména u obrázků zachycujících PSD. Téměř totožné rozložení PD a PSD je viditelné

v krčcích a v pracovní části vzorku. Rozložení posunutí je též téměř totožné. Při porovnání velikosti PD a PSD je patrné, že v při působení v modelu mají mírně větší velikost nežli ve skutečnosti, avšak jsou velmi podobné. Nejpodobnější velikost mají PD a PSD při mezi úměrnosti. Posun je naopak velmi rozdílný. Podobnou velikost PD a PSD, a velmi rozdílný posun, lze přisuzovat zatížení zkušebního tělíska silou a nikoliv posunem či přítomností uhlíkových vláken, které ovlivňují rozložení působících veličin.



Obr. 540:  
SBK4 – Exx –  
10 %  
(č.  $0,544e-3$ ,  
z.  $0,629e-4$ ,  
s.m.  $-0,129e-3$ ,  
m.  $-0,322e-3$ )

Obr. 541: S4 –  
Exx – 10 %  
(č.  $0,00105$ ,  
z.  $0,00043437$ ,  
m.  $-0,0003043$ ,  
f.  $-0,00092$ )

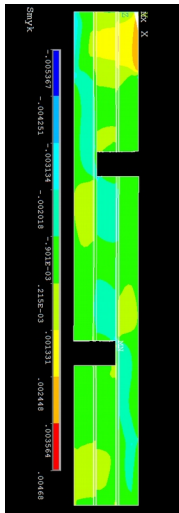
Obr. 542:  
SBK4 – Exx –  
MÚ  
(č.  $0,001803$ ,  
z.  $0,209e-3$ ,  
s.m.  $-0,429e-3$ ,  
m.  $-0,001067$ )

Obr. 543: S4 –  
Exx – MÚ  
(č.  $0,00286$ ,  
z.  $0,00164125$ ,  
m.  $-0,0001787$ ,  
f.  $-0,00104$ )

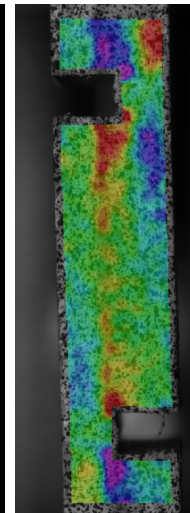
Obr. 544:  
SBK4 – Exy –  
10 %  
(č.  $0,001412$ ,  
z.  $0,272e-3$ ,  
s.m.  $-0,946e-3$ ,  
m.  $-0,001619$ )

Obr. 545: S4 –  
Exy – 10 %  
(č.  $0,00112$ ,  
z.  $0,00046062$ ,  
m.  $-0,0003306$ ,  
f.  $-0,00099$ )

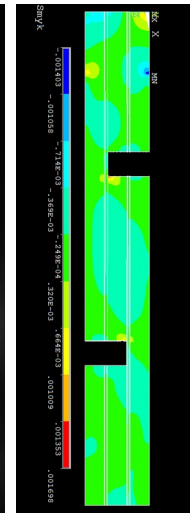
Obr. 429 Obr. 430 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 431 a Obr. 432 při MÚ. Obr. 433 a Obr. 434 prožívají distribuci PSD při zatížení 10 % MOR, Obr. 435 a Obr. 436 při MÚ. Obr. 437 a Obr. 438 prožívají distribuci PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 439 a Obr. 440 při MÚ. Obr. 441 a Obr. 442 prožívají distribuci posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 443 a Obr. 444 při MÚ.



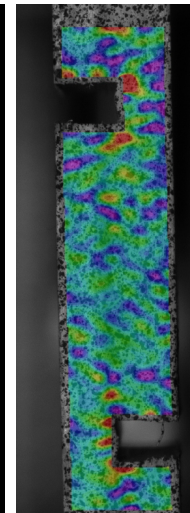
Obr. 546:  
SBK4 –  $E_{xy}$  –  
MÚ  
(č. 0,00468,  
z.  $901e-3$ ,  
s.m. -0,003134,  
m. -0,005367)



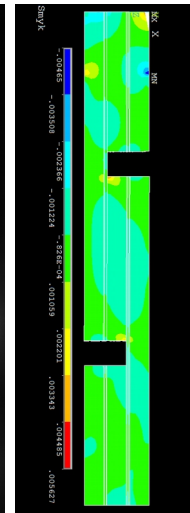
Obr. 547: S4 –  
 $E_{xy}$  – MÚ  
(č. 0,00255,  
z. 0,00090937,  
m. -0,0010593,  
f. -0,0027)



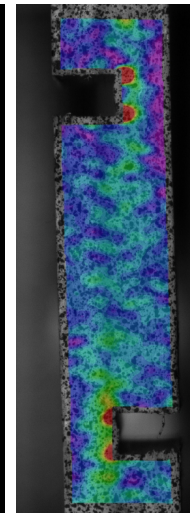
Obr. 548:  
SBK4 –  $E_{yy}$  –  
10 %  
(č. 0,001698,  
z.  $0,249e-4$ ,  
s.m. -0,714e-3,  
m. -0,001403)



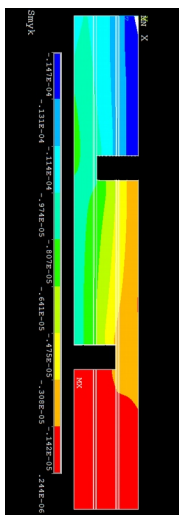
Obr. 549: S4 –  
 $E_{yy}$  – 10 %  
(č. 0,00162,  
z. 0,00083875,  
m. -9,875e-05,  
f. -0,00088)



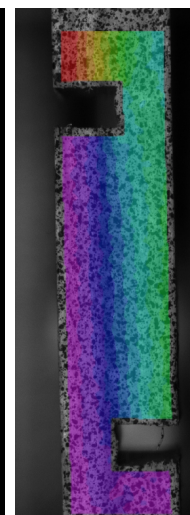
Obr. 550:  
SBK4 –  $E_{yy}$  –  
MÚ  
(č. 0,005627,  
z.  $0,826e-4$ ,  
s.m. -0,002366,  
m. -0,00465)



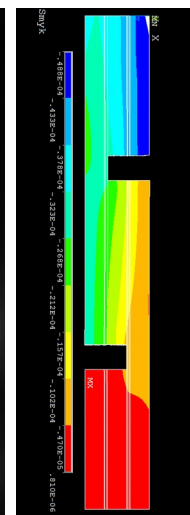
Obr. 551: S4 –  
 $E_{yy}$  – MÚ  
(č. 0,0042,  
z. 0,0025125,  
m. 0,0004875,  
f. -0,0012)



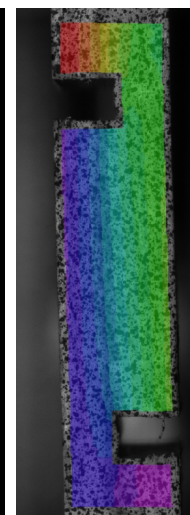
Obr. 552:  
SBK4 –  $V$  – 10  
%  
(č.  $0,244e-6$ ,  
z.  $0,807e-5$ ,  
s.m. -0,974e-5,  
m. -0,0147e-4)



Obr. 553: S4 –  
 $V$  – 10 %  
(č. 0,2046,  
z. 0,190163,  
m. 0,172837,  
f. 0,1584)



Obr. 554:  
SBK4 –  $V$  –  
MÚ  
(č.  $0,810e-6$ ,  
z.  $0,268e-4$ ,  
s.m. -0,378e-4,  
m. -0,0488e-4)



Obr. 555: S4 –  
 $V$  – MÚ  
(č. 0,789,  
z. 0,741812,  
m. 0,685188,  
f. 0,638)

## **6.4 Porovnání vybraných dřevin vymodelovaných vzorků v programu ANSYS**

Vyhotovené modely byly zatíženy posunutím nebo silou pro simulaci 10 % zatížení MOR a meze úměrnosti buku. Tyto posuny a síly byly použity i pro zatížení smrku, i když neodpovídaly 10 % zatížení MOR a mezi úměrnosti smrku. Tento fakt znehodnocuje hodnoty zdeformování modelu při mezi úměrnosti smrku. Z tohoto důvodu došlo ve vytvořeném modelu se smrkovým dřevem k větším deformacím. Je však zajímavé porovnat deformace v modelech při zatížení stejným posunutím nebo silou, pro zjištění míry ovlivnění sledovaných veličin v modelu uhlíkovými vlákny. Také lze předpokládat, že při použití adekvátních hodnot pro dosažení sledovaných stavů by obrázky zachycující tyto stavy byly totožné a smrk by dosáhl pouze nižších naměřených hodnot.

### **6.4.1 Tlakové vzorky**

Při zatížení v tlaku model ani vzdáleně nepřipomíná reálné rozložení sledovaných veličin v reálně zatíženém zkušební vzorku. Na snímcích získaných zachycením stavu sledovaných veličin v modelu je patrné pouze rozložení poměrných deformací v ose  $Y$ , poměrné deformace v ose  $X$  je kvůli lineárně elastickému chování modelu rovnoměrné, stejně jako poměrné smykové deformace a posunutí. Je to způsobeno tím, že model byl ze spodní plochy ukotven a z horní plochy zatížen. Tudíž vznikají PD v ose  $X$  a PSD v celém průřezu vzorku současně. Tento jev je také zřejmý u posunutí v ose  $X$ . Při posunutí v ose  $Y$  došlo k takovému rozložení s největší pravděpodobností z důvodu ukotvení modelu proti posunu ve spodních rozích ve všech směrech.

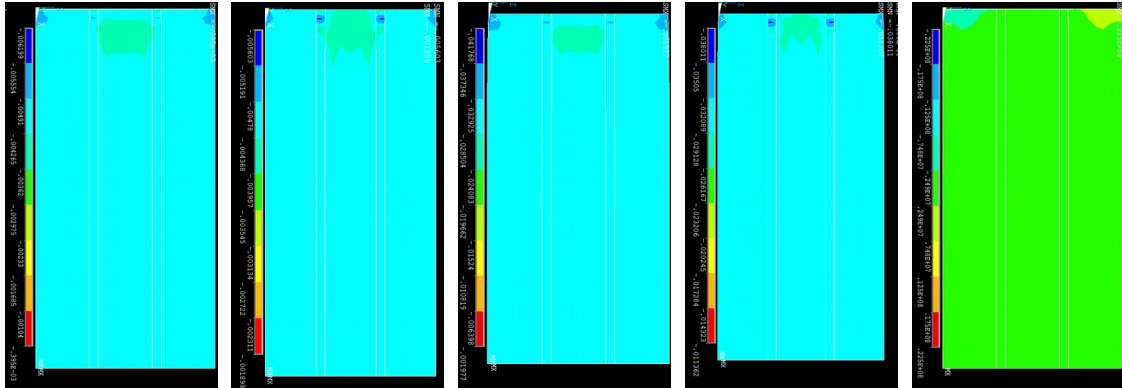
#### **6.4.1.1 Nevyztužená zkušební tělíska**

Vyhotovené modely byly zatíženy posunutím 0,222 mm pro simulaci 10 % zatížení MOR buku a 0,842 mm pro simulaci meze úměrnosti buku. Tyto posuny byly použity i pro zatížení smrku. Jelikož tento model zachycuje vzorky nevyztužené, tak v modelu použitím posunu pro smrk došlo k většímu rozšíření zkušební vzorku.

Při porovnání poměrných deformací a smykového napětí v modelech je patrné, že u modelů, ve kterých bylo použito smrkové dřevo dochází k působení těchto veličin

v jejich menší velikosti (Chyba: zdroj odkazu nenalezen). Tento model však nevykazoval alespoň vzdálenou shodu s experimentálně naměřenými hodnotami.

Při porovnání obrázků je zajímavé, že byly naměřeny pouze nižší hodnoty a obrázky zachycující PD, PSD a posunutí jsou téměř totožné. U obrázků zachycujících PD v ose  $Y$  jsou pak patrné PD ve větším průřezu vzorku a v lepené spáře.



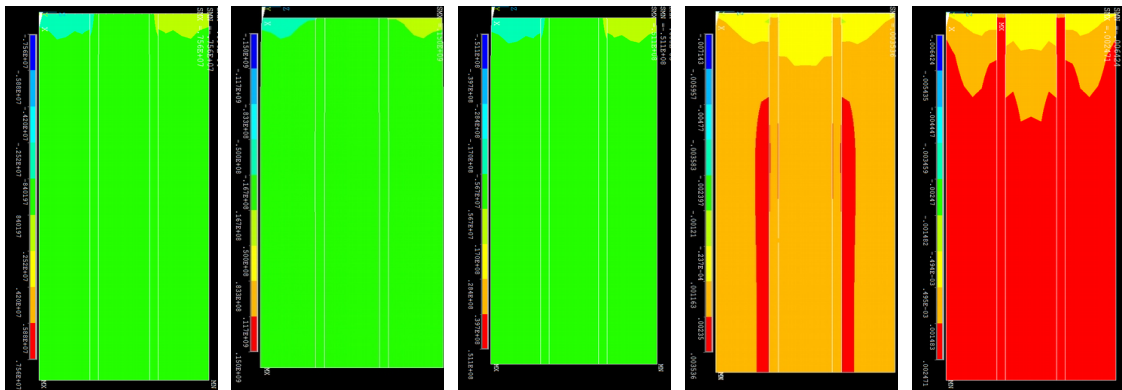
Obr. 556 TBK2 –  
Exx 10%  
(č.  $-0,395e-03$ ,  
s. m.  $-0,00491$ ,  
m.  $-0,004199$ )

Obr. 557 TSM2 –  
Exx 10 %  
(č.  $-0,001899$ ,  
s. m.  $-0,00478$ ,  
m.  $-0,005603$ )

Obr. 558 TBK2 –  
Exx – MÚ  
(č.  $-0,001977$ ,  
s. m.  $-0,032925$ ,  
m.  $-0,041768$ )

Obr. 559 TSM2 –  
Exx MÚ  
(č.  $-0,011362$ ,  
s. m.  $-0,029128$ ,  
m.  $-0,038011$ )

Obr. 560 TBK2 –  
Exy – 10 %  
(č.  $0,225e+08$ ,  
z.  $0,245e+07$ ,  
m.  $-0,225e+08$ )



Obr. 561 TSM2 –  
Exy 10%  
(č.  $0,756e+07$ ,  
z.  $-0,840197$ ,  
m.  $-0,756e+07$ )

Obr. 562 TBK2 –  
Exy – MÚ  
(č.  $0,150e+09$ ,  
z.  $0,167e+08$ ,  
m.  $-0,150e+09$ )

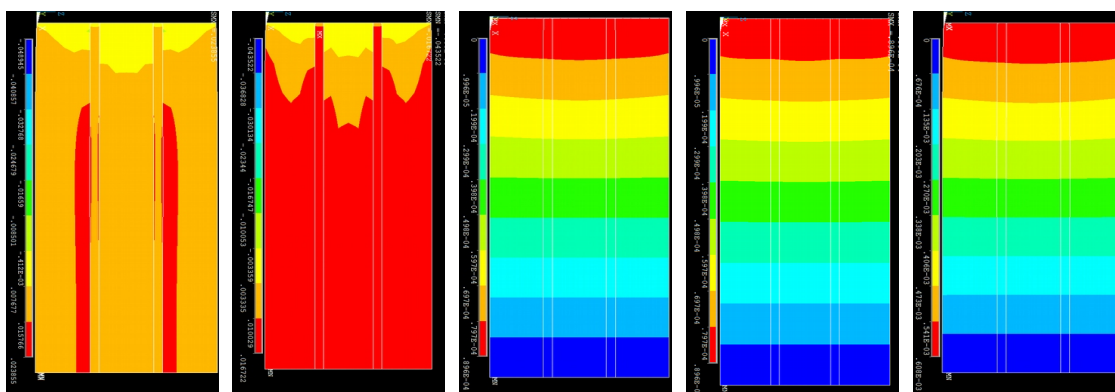
Obr. 563 TSM2 –  
Exy MÚ  
(č.  $0,511e+08$ ,  
z.  $0,567e+07$ ,  
m.  $-0,511e+08$ )

Obr. 564 TBK2 –  
Eyy – 10 %  
(č.  $0,003536$ ,  
o.  $0,001163$ ,  
m.  $-0,007143$ )

Obr. 565 TSM2 –  
Eyy 10 %  
(č.  $0,002471$ ,  
o.  $0,495e-03$ ,  
m.  $-0,006424$ )

Obr. 445 a Obr. 446 prožívají PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 447 a Obr. 448 při MÚ. Obr. 449 a Obr. 450 prožívají PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 451 a Obr. 452 při MÚ. Obr. 453 a Obr. 454 prožívají PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 455 a Obr. 456 při MÚ. Obr. 457 a Obr. 458 prožívají posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 459 a Obr. 460 při MÚ. Obr. 461 a Obr. 462 prožívají posunutí v ose  $V$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 463 a Obr. 464 při MÚ.





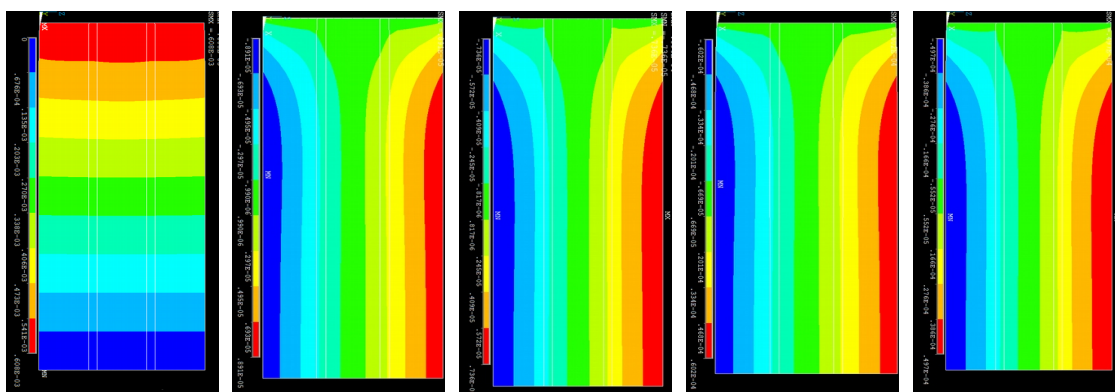
Obr. 566 TBK2 –  
Eyy – MÚ  
(č. 0,023855,  
o. 0,007677,  
m. -0,0048945)

Obr. 567 TSM2 –  
Eyy MÚ  
(č. 0,016722,  
o. 0,03335,  
m. -0,043522)

Obr. 568 TBK2 – U  
– 10 %  
(č. 0,896e-04,  
s. m. 0,299e-04,  
m. 0)

Obr. 569 TSM2 –  
U 10 %  
(č. 0,896e-04,  
s. m. 0,299e-04,  
m. 0)

Obr. 570 TBK2 – U  
– MÚ  
(č. 0,608e-03,  
s. m. 0,203e-03,  
m. 0)



Obr. 571 TSM2 –  
U MÚ  
(č. 0,608e-03,  
s. m. 0,0203e-03,  
m. 0)

Obr. 572 TBK2 – V  
– 10 %  
(č. 0,891e-05,  
s. m. -0,495e-05,  
m. -0,891e-05)

Obr. 573 TSM2 – V  
– 10 %  
(č. 0,736e-05,  
s. m. -0,0245e-05,  
m. -0,736e-05)

Obr. 574 TBK2 – V  
– MÚ  
(č. 0,602e-04,  
s. m. -0,201e-04,  
m. -0,602e-04)

Obr. 575 TSM2 – V  
– MÚ  
(č. 0,497e-04,  
s. m. -0,166e-04,  
m. -0,497e-04)

#### 6.4.1.2 Zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny

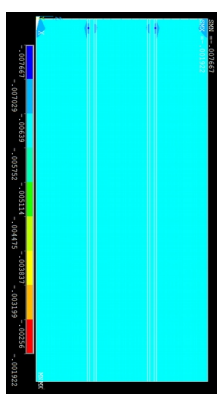
Vyhotovené modely byly zatíženy posunutím 0,121 mm pro simulaci 10 % zatížení MOR buku a 0,609 mm pro simulaci meze úměrnosti buku. Tyto posuny byly taktéž použity pro zatížení smrku. Byla však zapotřebí mnohem větší síla pro dosažení zadaného posunu, nežli v předchozím případě, jelikož se jedná o modely vyztužené uhlíkovými vlákny (Tab. 10).

Rozložení sledovaných veličin v modelech bylo téměř stejné, což zachycují obrázky níže. Rozdílné byly pouze poměrné deformace v ose *Y*, které probíhaly téměř po celé délce vrstev lepidla a ve dřevě v blízkosti lepeného spoje, kde je tlakové napětí přenášeno uhlíkovými vlákny, které jsou také deformována. U vzorků simulující použití

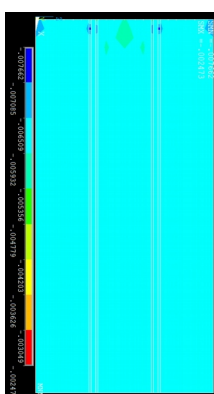
smrkové dýhy (Model TSM7) pak měly vypočítané veličiny mnohem menší velikost (Tab. 10), nežli modely simulující použití bukové dýhy (Model TBK7). Ani jeden z modelů však velikosti působících veličin nebo jejich rozložením v modelech neodpovídá reálným vzorkům (Vzorek T7).

Tab. 10: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model TBK7) a smrkovou (Model TSM7)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek T7) pro buk pro případ T7

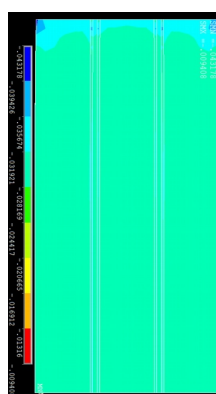
Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)
T7	Vzorek T7	0,1214	1451,65	0,6085	13719,6
	Model TBK7	0,1214	19336,9	0,6085	99485,57
	Model TSM7	0,1214	15587,4	0,6085	78124,94



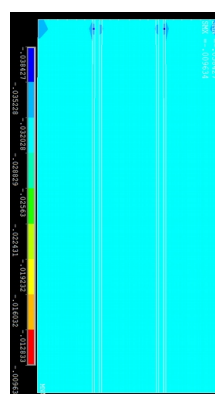
Obr. 576 TBK7 – Exx 10%  
(č. -0,001922,  
s. m. -0,005752,  
m. -0,007667)



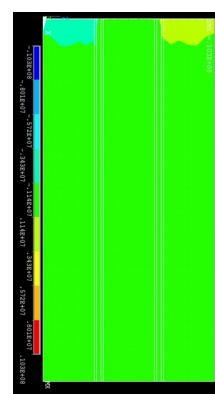
Obr. 577 TSM7 – Exx – 10 %  
(č. -0,007662,  
s. m. -0,005932,  
m. -0,002473)



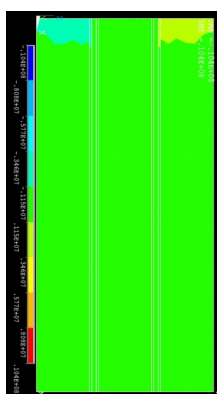
Obr. 578 TBK7 – Exx – MÚ  
(č. -0,009408,  
s. m. -0,031921,  
m. -0,043178)



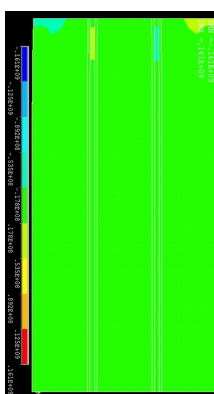
Obr. 579 TSM7 – Exx – MÚ  
(č. -0,009634,  
s. m. -0,028829,  
m. -0,038427)



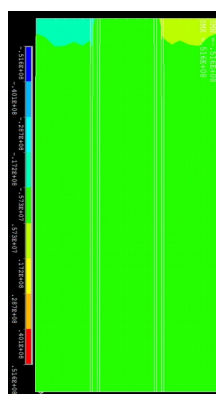
Obr. 580 TBK7 – Exy – 10 %  
(č. 0,103e+08,  
z. 0,114e+07,  
m. -0,103e+08)



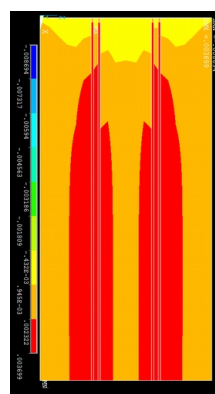
Obr. 581 TSM7 – Exy – 10 %  
(č. 0,104e+08,  
z. 0,115e+07,  
m. -0,104e+08)



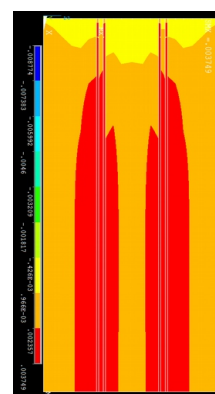
Obr. 582 TBK7 – Exy – MÚ  
(č. 0,161e+09,  
z. 0,178e+08,  
m. -0,161e+09)



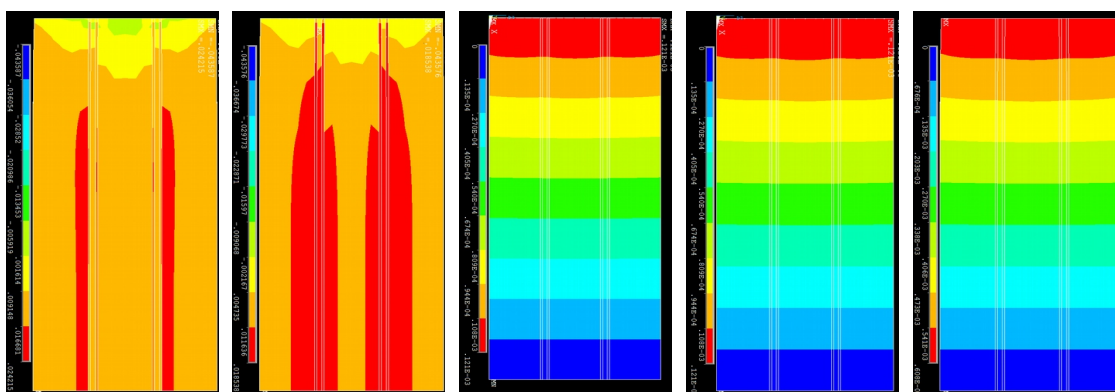
Obr. 583 TSM7 – Exy – MÚ  
(č. 0,516e+08,  
z. 0,573e+07,  
m. -0,516e+08)



Obr. 584 TBK7 – Eyy – 10 %  
(č. 0,003699,  
o. 0,945e-03,  
m. -0,008694)



Obr. 585 TSM7 – Exy – 10 %  
(č. 0,003749,  
o. 0,966e-03,  
m. -0,008774)



Obr. 586 TBK7 –  $E_{yy} - M\acute{U}$   
(č. 0,024215,  
o. -0,020986,  
m. -0,043587)

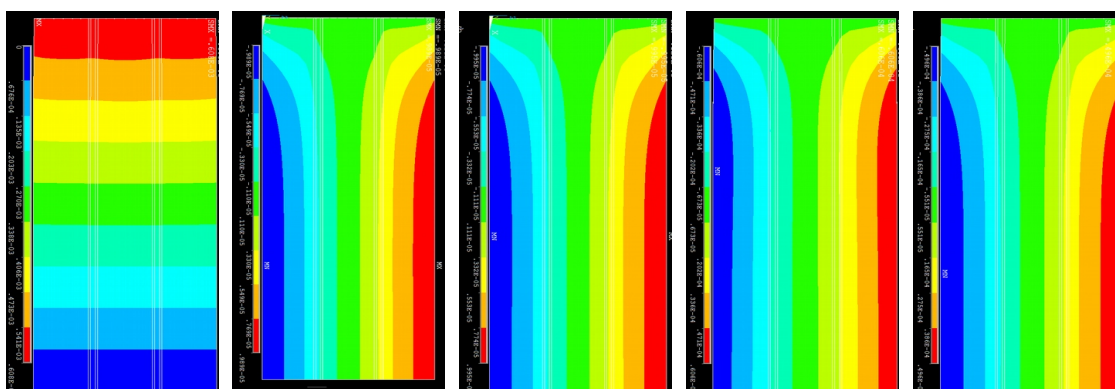
Obr. 587 TSM7 –  $E_{yy} - M\acute{U}$   
(č. 0,018538,  
o. -0,004735,  
m. -0,043576)

Obr. 588 TBK7 –  $U - 10\%$   
(č. 0,121e-03,  
s. m. 0,405e-04,  
m. 0)

Obr. 589 TSM7 –  $U - 10\%$   
(č. 0,0121e-03  
s. m. 0,405e-04,  
m. 0)

Obr. 590 TBK7 –  $M\acute{U}$   
(č. 0,608e-03,  
s. m. 0,203e-03,  
m. 0)

Obr. 465 a Obr. 466 prožívají PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 467 a Obr. 468 při  $M\acute{U}$ . Obr. 469 a Obr. 470 prožívají PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 471 a Obr. 472 při  $M\acute{U}$ . Obr. 473 a Obr. 474 prožívají PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 475 a Obr. 476 při  $M\acute{U}$ . Obr. 477 a Obr. 478 prožívají posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 479 a Obr. 480 při  $M\acute{U}$ . Obr. 481 a Obr. 482 prožívají posunutí v ose  $V$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 483 a Obr. 484 při  $M\acute{U}$ .



Obr. 591 TSM7 –  $U - M\acute{U}$   
(č. 0,608e-03,  
s. m. 0,203e-03,  
m. 0)

Obr. 592 TBK7 –  $V - 10\%$   
(č. 0,989e-05,  
s. m. -0,330e-05,  
m. -0,989e-05)

Obr. 593 TSM7 –  $V - 10\%$   
(č. 0,955e-05,  
s. m. -0,332e-05,  
m. -0,955e-05)

Obr. 594 TBK7 –  $M\acute{U}$   
(č. 0,606e-04,  
s. m. -0,202e-04,  
m. -0,606e-04)

Obr. 595 TSM7 –  $M\acute{U}$   
(č. 0,496e-04,  
s. m. -0,165e-04,  
m. -0,496e-04)

## 6.4.2 Ohybové vzorky

Ohybové modely vykazovaly rozložením sledovaných veličin poměrně dobrou shodu s experimentálně naměřenými výsledky zpracovanými metodou DIC. Rozložení sledovaných veličin ve smrkové dýze tedy může odpovídat reálnému rozložení. Nelze to

však tvrdit s jistotou, jelikož velikost působící síly byla několikanásobně větší nežli ve skutečnosti.

#### 6.4.2.1 Nevztažená zkušební tělíska

Vyhotovené modely byly zatíženy posunutím 1,152 mm pro simulaci 10 % zatížení MOR buku a 1,431 mm pro simulaci meze úměrnosti buku. Tyto posuny byly taktéž použity pro zatížení smrkových modelů.

Při porovnání obrázků je zajímavé, že obrázky zachycující rozložení v buku (OBK1) a smrku (OSM1) měli mírně jiné rozložení sledovaných veličin v modelech, které odpovídá rozložení v reálných vzorcích. Jejich velikost byla také jiná, pro smrk nižší. Rozdílné rozložení v modelech bylo způsobeno použitím rozdílných hodnot pro rozdílné dřeviny. Vypočítané hodnoty pro buk (Model OBK1) byly přibližně 3× (při 10 % síly MOR) a 3,5× (při mezi úměrnosti) vyšší než pro smrk (Model OSM1). V obou případech však byly vypočítané hodnoty několikanásobně vyšší než experimentálně naměřené hodnoty (Vzorek O1) uvedené v Tab. 11.

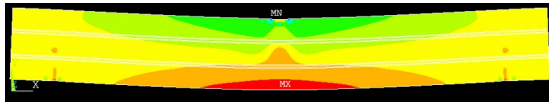
Tab. 11: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model OBK1) a smrkovou (Model OSM1) dřívku. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek O1) pro buk pro případ O1

Jméno porovnávaného případu	Porovnání modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčnicku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčnicku (mm)	Síla (N)
O1	Vzorek O1	1,1523	228,46	1,4308	744,91
	Model OBK1	1,1523	2890,66	1,4308	4180,36
	Model OSM1	1,1523	946,38	1,4308	1175,11

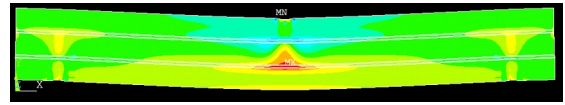
Při porovnání rozložení sledovaných veličin v modelech je možné konstatovat, že nižší mechanické vlastnosti smrkového dřeva vedly ke koncentracím sledovaných veličin v blízkosti lepené spáry (viz. Obr. OSM1). To může být způsobeno tím, že lepidlo bylo modelováno jako izotropní materiál, který má vyšší Youngovy moduly pružnosti nežli smrkové dřevo v příčném a tangenciálním směru.

Obr. 485 a Obr. 486 projevují distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 487 a Obr. 488 při MÚ. Obr. 489 a Obr. 490 projevují distribuci PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 491 a Obr. 492 při MÚ. Obr. 493 a Obr. 494 projevují distribuci PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 495 a Obr. 496 při MÚ. Obr. 497 a Obr.

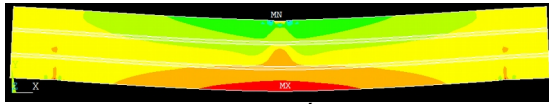
498 provnávají distribuci posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 499 a Obr. 500 při MÚ.



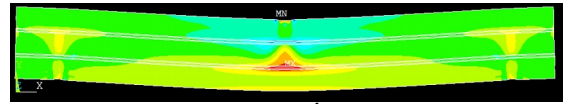
Obr. 596:  $OBK1 - E_{xx} - 10\%$  (č. 0,012991, z. -0,009749, ž. -0,653e-03, m. -0,02794)



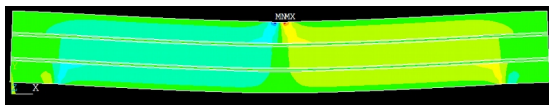
Obr. 597:  $OSM1 - E_{xx} - 10\%$  (č. 0,011115, z. -0,002272, ž. 0,003083, m. -0,012981)



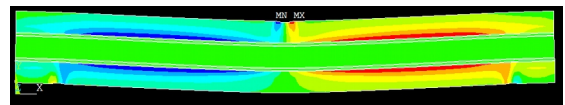
Obr. 598:  $OBK1 - E_{xy} - MÚ$  (č. 0,01613, z. -0,012105, ž. -0,811e-03, m. -0,010483)



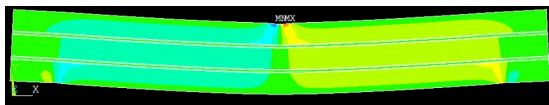
Obr. 599:  $OSM1 - E_{xy} - MÚ$  (č. 0,013802, z. -0,002821, ž. 0,003828, m. -0,016119)



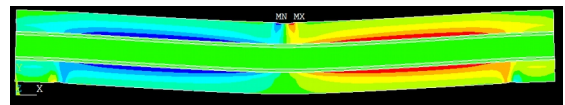
Obr. 600:  $OBK1 - E_{xy} - 10\%$  (č. 0,067778, z. -0,007531, -s.m. + ž.  $\pm 0,0022593$ , m. -0,067778)



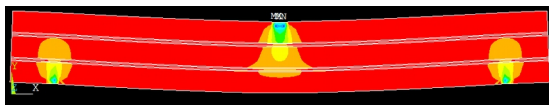
Obr. 601:  $OSM1 - E_{xy} - 10\%$  (č. 0,103634, z. -0,011515, -s.m. + ž.  $\pm 0,034545$ , m. -0,103634)



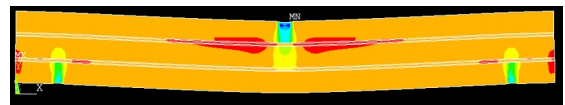
Obr. 602:  $OBK1 - E_{yy} - MÚ$  (č. 0,084159, z. -0,009351, -s.m. + ž.  $\pm 0,028053$ , m. -0,084159)



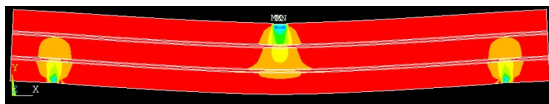
Obr. 603:  $OSM1 - E_{yy} - MÚ$  (č. 0,128681, z. -0,014298, -s.m. + ž.  $\pm 0,042894$ , m. -0,1286681)



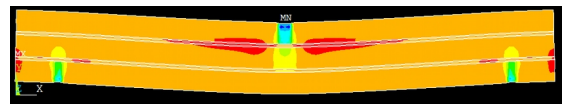
Obr. 604:  $OBK1 - U - 10\%$  (č. 0,003899, o. -0,006772, ž. -0,012108, m. -0,04412)



Obr. 605:  $OSM1 - U - 10\%$  (č. 0,006696, o. -0,00539, ž. -0,011433, m. -0,047691)



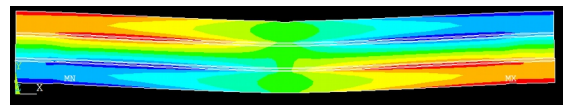
Obr. 606:  $OBK1 - U - MÚ$  (č. 0,004841, o. -0,008409, ž. -0,0015034, m. -0,054783)



Obr. 607:  $OSM1 - U - MÚ$  (č. 0,008314, o. -0,006693, ž. -0,014197, m. -0,059218)



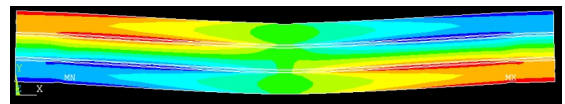
Obr. 608:  $OBK1 - U - 10\%$  (č. -0,17e-03, -z. + ž.  $\pm 0,194e-04$ , m. -0,175e-03)



Obr. 609:  $OSM1 - U - 10\%$  (č. -0,663e-04, z. -736e-05, -s.m. + ž.  $\pm 0,221e-04$ , m. -0,663e-04)



Obr. 610:  $OBK1 - U - MÚ$  (č. 0,217e-03, -z. + ž.  $\pm 0,241e-04$ , m. -0,0217e-03)



Obr. 611:  $OSM1 - U - MÚ$  (č. 0,823e-04, z. 0,914e-05, s.m. + ž.  $\pm 0,274e-04$ , m. -0,823e-03)



### 6.4.2.2 Zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny

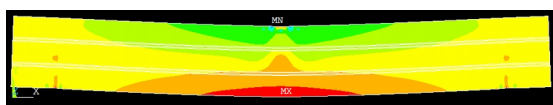
Vyhotovené modely byly zatíženy posunutím o 1,067 mm pro simulaci 10 % zatížení MOR buku a o 1,325 mm pro simulaci meze úměrnosti buku. Při porovnání je zajímavé, že obrázky zachycující rozložení sledovaných veličin v buku (OBK7) a smrku (OSM7) mají mírně jiné rozložení sledovaných veličin v modelech, které však odpovídá rozložení v reálných vzorcích. Jejich velikost byla také jiná, pro smrk nižší. Rozdílné rozložení v modelech bylo způsobeno použitím rozdílných hodnot pro rozdílné dřeviny. Vypočítané hodnoty pro buk (Model OBK7) byly přibližně 2,3× vyšší než pro smrk (Model OSM7). V obou případech však byly vypočítané hodnoty vyšší než experimentálně naměřené hodnoty (Vzorek O7) uvedené v Tab. 12.

Při porovnání rozložení sledovaných veličin v modelech je možné konstatovat, že vyztužení uhlíkovými vlákny více ovlivnilo jejich rozložení při použití smrkového dřeva, což je patrné při porovnání s bukovým modelem (OBK7) a modely nevyztuženými (OBK1 a OSM1). Lze to přisuzovat mnohem nižším mechanickým vlastnostem smrku v porovnání s bukem.

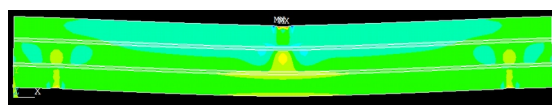
Tab. 12: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model OBK7) a smrkovou (Model OSM7) dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek O7) pro buk pro případ O7

Jméno porovnávaného případu	Porovnání modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)
O7	Vzorek O7	1,0668	293,24	1,3250	1069,54
	Model OBK7	1,0668	3117,06	1,3250	3781,41
	Model OSM7	1,0668	1342,87	1,3250	1605,76

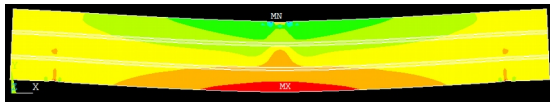
Obr. 501 a Obr. 502 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 503 a Obr. 504 při MÚ. Obr. 505 a Obr. 506 prožívají distribuci PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 507 a Obr. 508 při MÚ. Obr. 509 a Obr. 510 prožívají distribuci PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 511 a Obr. 512 při MÚ. Obr. 513 a Obr. 514 prožívají distribuci posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 515 a Obr. 516 při MÚ.



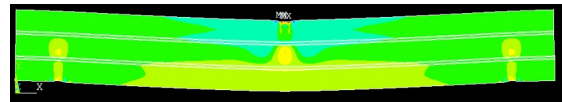
Obr. 612: OBK7 – Exx – 10 % (č. 0,011605, z. -0,009961, ž. -0,001334, m. -0,027214)



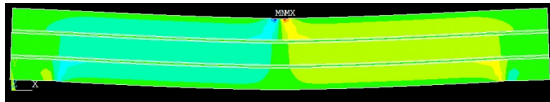
Obr. 613: OSM7 – Exx – 10 % (č. 0,016597, z. -0,536e-03, ž. 0,006301, m. -0,014291)



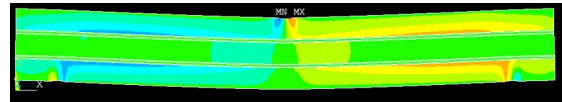
Obr. 614: OBK7 – E<sub>xy</sub> – MÚ (č. 0,014414, z. -0,012371, ž. -0,001657, m. -0,0338)



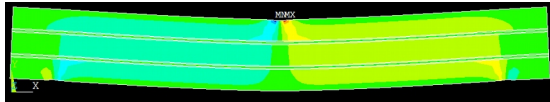
Obr. 615: OSM7 – E<sub>xy</sub> – MÚ (č. 0,016898, z. -0,002424 -s.m. +ž. ±0,005305, m. -0,017881)



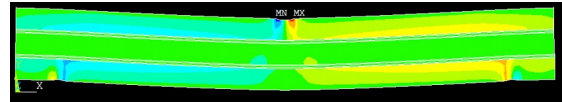
Obr. 616: OBK7 – E<sub>xy</sub> – 10 % (č. 0,0703687, z. -0,007812, ž. 0,023437, m. -0,070312)



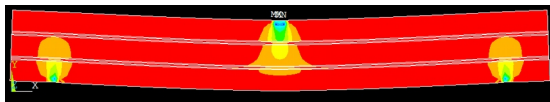
Obr. 617: OSM7 – E<sub>xy</sub> – 10 % (č. 0,122518, z. -0,013613, -s.m. +ž. ±0,040839, m. -0,122518)



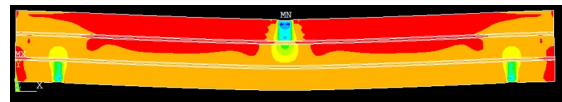
Obr. 618: OBK7 – E<sub>yy</sub> – MÚ (č. 0,087328, z. -0,009703, ž. 0,029109, m. -0,087328)



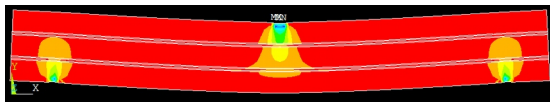
Obr. 619: OSM7 – E<sub>yy</sub> – MÚ (č. 0,16868, z. -0,018742, -s.m. +ž. ±0,056227, m. -0,16868)



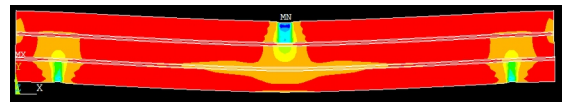
Obr. 620: OBK7 – U – 10 % (č. 0,003537, z. -0,02532, ž. -0,013904, m. -0,048787)



Obr. 621: OSM7 – U – 10 % (č. 0,006655, z. -0,027147, ž. -0,013625, m. -0,054189)



Obr. 622: OBK7 – U – MÚ (č. 0,004393, z. -0,031711, ž. -0,017269, m. -0,060593)



Obr. 623: OSM7 – U – MÚ (č. 0,009034, z. -0,040415, ž. -0,020635, m. -0,079974)



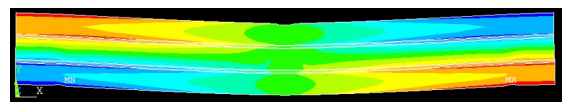
Obr. 624: OBK7 – U – 10 % (č. 0,155e-03, z. -0,172e-04, ž. -0,517e-04, m. -0,155e-03)



Obr. 625: OSM7 – U – 10 % (č. 0,606e-04, z. -0,674e-05, ž. -0,202e-04, m. -0,606e-04)



Obr. 626: OBK7 – U – MÚ (č. 0,193e03, z. -0,214e-04, ž. -0,642e-04, m. -0,193e-03)



Obr. 627: OSM7 – U – MÚ (č. 0,724e-04, z. -0,804e-05, ž. 0,241e-04, m. -0,724e-04)

## 6.4.3 Smykové vzorky

### 6.4.3.1 Nevztažená zkušební tělíska

Vyhotovené modely byly zatíženy silou 107,18 N pro simulaci 10 % zatížení MOR buku a 396,48 N pro simulaci meze úměrnosti buku. Tyto síly byly použity i pro zatížení smrku. Jelikož tento model zachycuje vzorky nevztažené, tak v modelu použitím síly pro smrk došlo k většímu zúžení zkušební vzorku.

U obrázků získaných z vymodelovaných modelů z programu ANSYS byly použity konstanty pro dvě dřeviny, v případě SBK2 buk a SSM2 smrk. Tyto modely odpovídají vzorkům nevyztuženým. Na Obr. 604 a Obr. 605; Obr. 606 a Obr. 607 zachycujících poměrné deformace v ose  $X$  je patrné, že rozložení poměrných deformací ve vzorcích jsou vzhledem k ploše vzorku ve větším rozsahu, což se vzhledem k rozdílným mechanickým vlastnostem dřeva dalo předpokládat. U Obr. 605 a Obr. 607 jsou poměrné deformace vznikající upnutím v čelistech směřující do krčků vzorků více viditelné (světle zelené), což znamená, že při zatížení vzorku došlo k jeho větším zúžení v tomto místě. U Obr. 604 a Obr. 606 tomu tak není z důvodu lepších mechanických vlastností buku. U smykového napětí je jeho rozložení v modelech naprosto stejné a změnila se pouze jeho velikost. Na obrázcích zachycující poměrné deformace v ose  $Y$  jsou také patrné větší poměrné deformace (zejména zúžení vzorku).

Při porovnání programem vypočítaných hodnot (Tab. 13) je zřejmý rozdíl mezi tělisky zhotovenými ze smrkové (Model SSM2) a bukové (Model SBK2) dýhy. Pro srovnání byly vloženy i experimentálně naměřené výsledky (Vzorek S2).

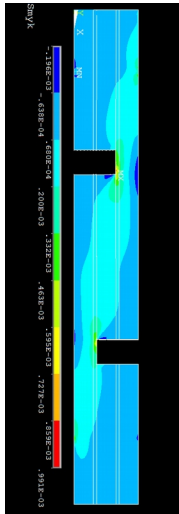
Jelikož model nevyztuženého smykového zkušebního tělíska vykazoval velmi špatnou shodu s experimentálně naměřenými daty, není vhodné použít programem vypočítané hodnoty pro předpoklad změn ve vlastnostech zkušebního tělíska při záměně bukové dýhy za smrkovou.

Tab. 13: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model SBK2) a smrkovou (Model SSM2) dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek S2) pro buk pro případ S2

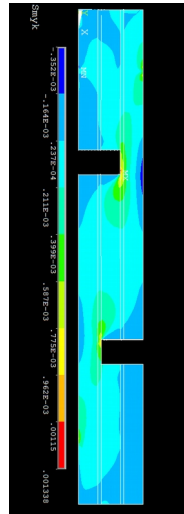
Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)
S2	Vzorek S2	0,0418	107,18	0,1620	396,48
	Model SBK2	0,0146	107,18	0,0539	396,48
	Model SSM2	0,0269	107,18	0,0995	396,48

Při porovnání obrázků modelů zachycujících posunutí je zajímavé, že modely vykazují stejné rozložení posunutí. Z obrázků je také patrné, že došlo k většímu zúžení smrkového modelu. Tento fakt je překvapivý, zejména z důvodu, že byly vzorky stejné délky zatíženy totožným posunutím a u vzorku simulující smrk došlo k většímu zúžení. Vzorky by tedy měly mít stejnou délku i šířku a mělo by se projevit pouze lokálně větší

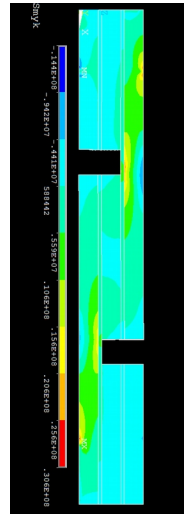
zdeformování vzorku (trhliny či lomy). Zdůvodnit si tento stav lze faktem, že bylo použito lineárně – elastické chování modelu.



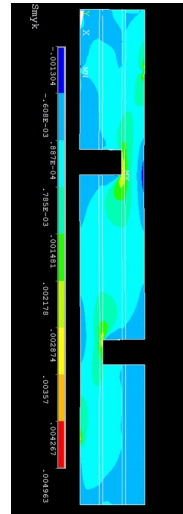
Obr. 628:  
SBK2 – Exx –  
10 %  
(č.  $0,991e-3$ ,  
z.  $0,332e-3$ ,  
s.m.  $-0,200e-3$ ,  
m.  $-0,196e-3$ )



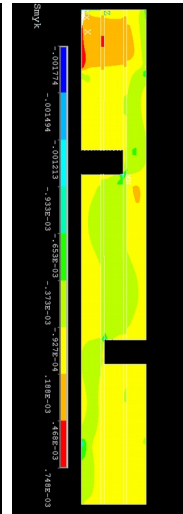
Obr. 629:  
SSM2 – Exx –  
10 %  
(č.  $0,001338$ ,  
z.  $0,399e-03$ ,  
s.m.  $-0,211e-3$ ,  
m.  $-0,352e-03$ )



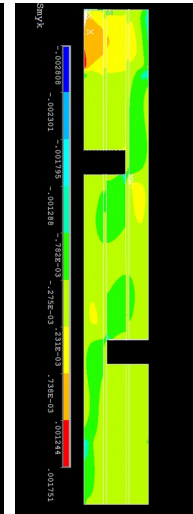
Obr. 630:  
SBK2 – Exx –  
MÚ  
(č.  $0,306e-8$ ,  
z.  $0,559e-7$ ,  
s.m.  $-0,441e-7$ ,  
m.  $-0,144e-8$ )



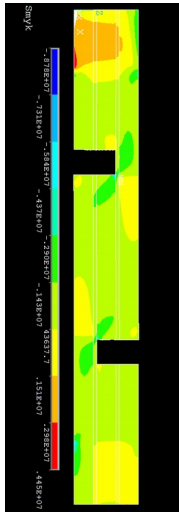
Obr. 631:  
SSM2 – Exx –  
MÚ  
(č.  $0,004963$ ,  
z.  $0,001481$ ,  
s.m.  $0,877e-4$ ,  
m.  $-0,001304$ )



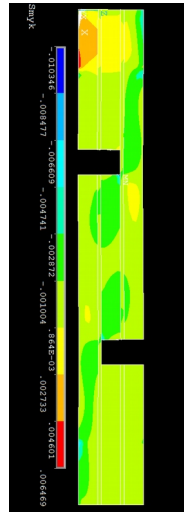
Obr. 632:  
SBK2 – Exy –  
10 %  
(č.  $0,768e-3$ ,  
z.  $0,653e-3$ ,  
ž.  $-0,927e-4$ ,  
m.  $-0,001774$ )



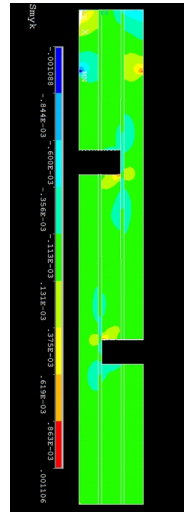
Obr. 633:  
SSM2 – Exy –  
10 %  
(č.  $0,001751$ ,  
z.  $0,782e-03$ ,  
ž.  $0,231e-03$ ,  
m.  $-0,002808$ )



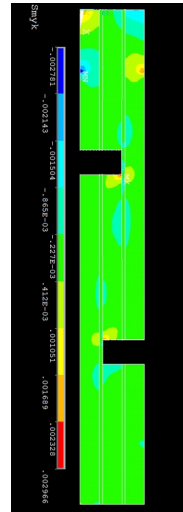
Obr. 634:  
SBK2 – Exy –  
MÚ  
(č.  $0,445e+7$ ,  
z.  $0,290e+7$ ,  
ž.  $43637,7$ ,  
m.  $-0,878e+7$ )



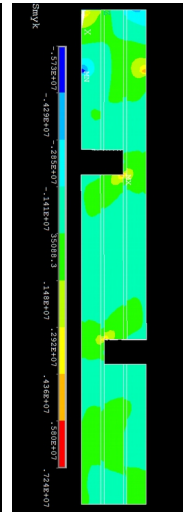
Obr. 635:  
SSM2 – Exy –  
MÚ  
(č.  $0,006469$ ,  
z.  $0,002872$ ,  
ž.  $864e-03$ ,  
m.  $0,10346$ )



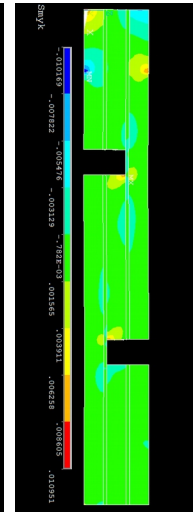
Obr. 636:  
SBK2 – Eyy –  
10 %  
(č.  $0,001106$ ,  
z.  $0,113e-3$ ,  
s.m.  $-0,6e-3$ ,  
m.  $-0,001088$ )



Obr. 637:  
SSM2 – Eyy –  
10 %  
(č.  $0,002966$ ,  
z.  $0,227e-03$ ,  
s.m.  $-0,001504$ ,  
m.  $-0,002781$ )



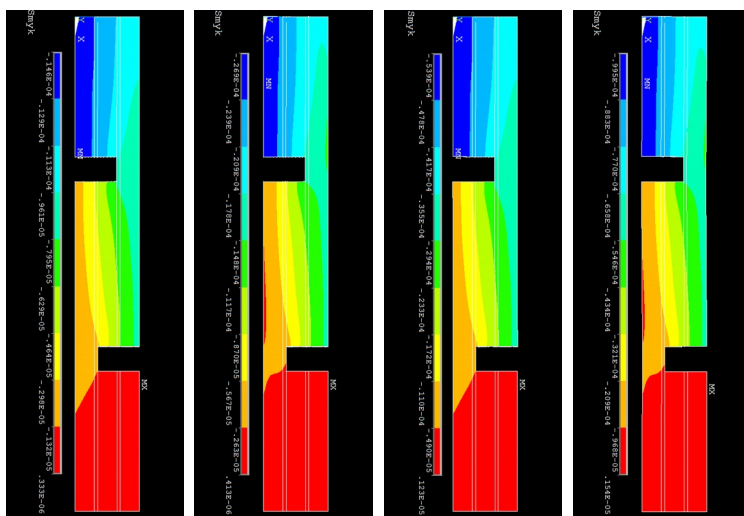
Obr. 638:  
SBK2 – Eyy –  
MÚ  
(č.  $0,724e+7$ ,  
z.  $35088,3$ ,  
s.m.  $-0,285e+7$ ,  
m.  $-0,573e+7$ )



Obr. 639:  
SSM2 – Eyy –  
MÚ  
(č.  $0,010951$ ,  
z.  $0,782e-03$ ,  
s.m.  $-0,005476$ ,  
m.  $-0,010169$ )

Obr. 517 Obr. 518 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % MOR, Obr. 519 a Obr. 520 při MÚ. Obr. 521 a Obr. 522 prožívají distribuci PSD při zatížení 10 % MOR, Obr. 523 a Obr. 524 při MÚ. Obr. 525 a Obr. 526 prožívají distribuci PD v ose

Y při zatížení 10 % MOR, Obr. 527 a Obr. 528 při MÚ. Obr. 529 a Obr. 530 provádají distribuci posunutí v ose U při zatížení 10 % MOR, Obr. 531 a Obr. 532 při MÚ.



Obr. 640:  
SBK2 – V – 10  
%  
(č.  $0,333e-06$ ,  
z.  $0,795e-05$ ,  
o.  $-0,298e-05$ ,  
m.  $-0,146e-04$ )

Obr. 641:  
SSM2 – V – 10  
%  
(č.  $0,413e-06$ ,  
z.  $0,870e-05$ ,  
o.  $-0,567e-05$ ,  
m.  $-0,269e-04$ )

Obr. 642:  
SBK2 – V –  
MÚ  
(č.  $0,123e-05$ ,  
z.  $0,294e-04$ ,  
o.  $-0,110e-04$ ,  
m.  $-0,539e-04$ )

Obr. 643:  
SSM2 – V –  
MÚ  
(č.  $0,413e-06$ ,  
z.  $-0,148e-04$ ,  
o.  $-0,870e-05$ ,  
m.  $-0,269e-04$ )

#### 6.4.3.2 Zkušební tělíska vyztužená uhlíkovými vlákny

Vyhotovené modely byly zatíženy posunutím 0,434 mm pro simulaci 10 % zatížení MOR buku a 1,387 mm pro simulaci meze úměrnosti buku. Při porovnání obrázků je zajímavé, že byly pouze naměřeny nižší hodnoty a obrázky zachycující poměrné deformace a posunutí zůstaly vcelku stejné. Ve smrkou došlo k působení smykových sil na větší ploše v pracovní části vzorku ve středové dýze. Což je přesně naopak, nežli u nevyztužených vzorků. Z tohoto vyplývá, že uhlíková vlákna ovlivňují vznik poměrných deformací, které transformují do vyššího smykového napětí.

Při porovnání programem vypočítaných hodnot (Tab. 14) je patrný rozdíl mezi tělísky zhotovenými ze smrkové (Model SSM4) a bukové (Model SBK4) dýhy. Pro srovnání byly vloženy i experimentálně naměřené výsledky (Vzorek S4).

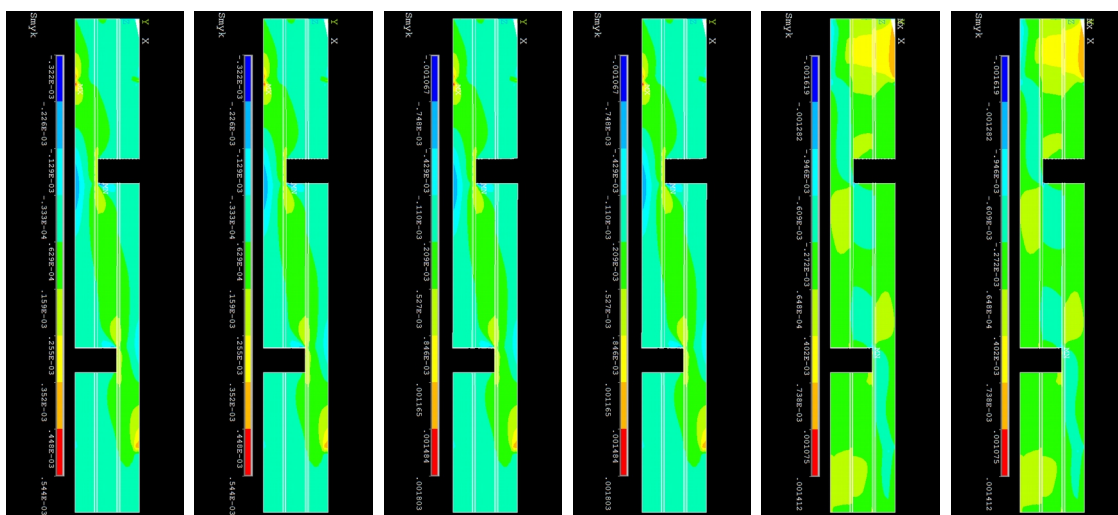
Z důvodu největší shody smykového modelu s experimentálně naměřenými daty lze omezeně předpokládat změny ve vlastnostech zkušební tělíska při záměně bukové dýhy za smrkovou. Aby však bylo možné použít model pro reálné testování je potřeba vyvinout složitější model s dobrou shodou s experimentálně naměřenými výsledky.



Tab. 14: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model SBK4) a smrkovou (Model SSM4)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek S4) pro buk pro případ S4

Jméno porovnávaného případu	Porovnání vzorků a modelů	10% síly MOR		Mez úměrnosti	
		Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)	Posunutí příčniku (mm)	Síla (N)
S4	Vzorek S4	0,0462	208,07	0,1510	689,63
	Model SBK4	0,0147	208,07	0,0488	689,63
	Model SSM4	0,0245	208,07	0,0839	689,63

Obr. 533 a Obr. 534 prožívají distribuci PD v ose  $X$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 535 a Obr. 536 při MÚ. Obr. 537 a Obr. 538 prožívají distribuci PSD při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 539 a Obr. 540 při MÚ. Obr. 541 a Obr. 542 prožívají distribuci PD v ose  $Y$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 543 a Obr. 544 při MÚ. Obr. 545 a Obr. 546 prožívají distribuci posunutí v ose  $U$  při zatížení 10 % síly MOR, Obr. 547 a Obr. 548 při MÚ.



Obr. 644:  
SBK4 – Exx –  
10 %  
(č.  $0,544e-3$ ,  
z.  $0,629e-4$ ,  
s.m.  $-0,129e-3$ ,  
m.  $-0,322e-3$ )

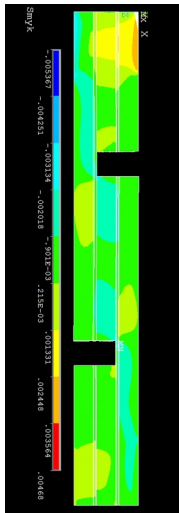
Obr. 645:  
SSM4 – Exx –  
10 %  
(č.  $0,928e-3$ ,  
z.  $0,121e-3$ ,  
s.m.  $-0,202e-3$ ,  
m.  $-0,525e-3$ )

Obr. 646:  
SBK4 – Exx –  
MÚ  
(č.  $0,001803$ ,  
z.  $0,209e-3$ ,  
s.m.  $-0,429e-3$ ,  
m.  $-0,001067$ )

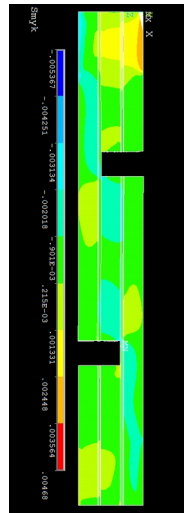
Obr. 647:  
SSM4 – Exx –  
MÚ  
(č.  $0,003066$ ,  
z.  $0,488e-3$ ,  
s.m.  $-0,543e-3$ ,  
m.  $-0,001574$ )

Obr. 648:  
SBK4 – Exy –  
10 %  
(č.  $0,001412$ ,  
z.  $-0,272-3$ ,  
s.m.  $-0,946e-3$ ,  
m.  $-0,001619$ )

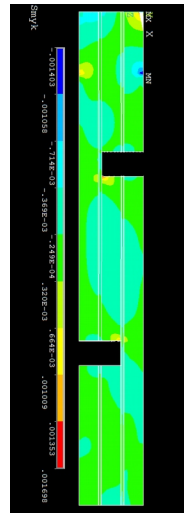
Obr. 649:  
SSM4 – Exy –  
10 %  
(č.  $0,003273$ ,  
z.  $-0,152e-3$ ,  
s.m.  $-0,001522$ ,  
m.  $-0,002892$ )



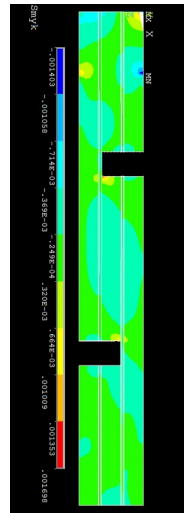
Obr. 650:  
SBK4 - Exy -  
MÚ  
(č. 0,00468,  
z. -0,901e-3,  
s.m. -0,003134,  
m. -0,005367)



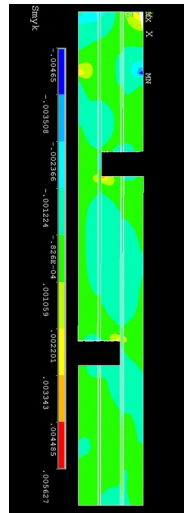
Obr. 651:  
SSM4 - Exy -  
MÚ  
(č. 0,010841,  
z. -0,510e-3,  
s.m. -0,005051,  
m. -0,009591)



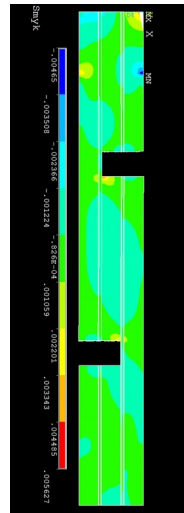
Obr. 652:  
SBK4 - Eyy -  
10 %  
(č. 0,001698,  
z. 0,249e-4,  
s.m. -0,714e-3,  
m. -0,001403)



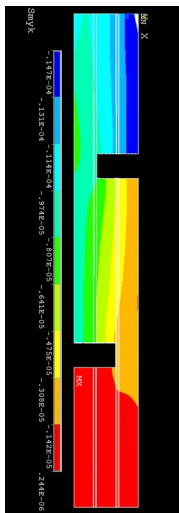
Obr. 653:  
SSM4 - Eyy -  
10 %  
(č. 0,004226,  
z. 0,492e-4,  
s.m. -0,001621,  
m. -0,003292)



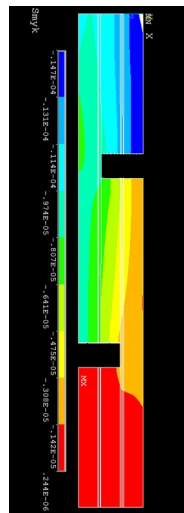
Obr. 654:  
SBK4 - Eyy -  
MÚ  
(č. 0,005627,  
z. 0,826e-4,  
s.m. -0,002366,  
m. -0,00465)



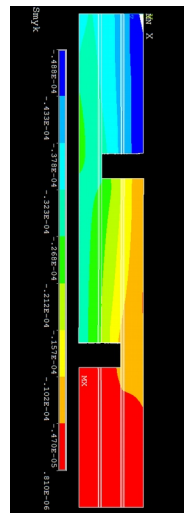
Obr. 655:  
SSM4 - Eyy -  
MÚ  
(č. 0,013834,  
z. 0,154e-3,  
s.m. -0,005318,  
m. -0,01079)



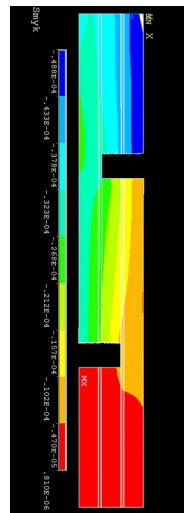
Obr. 656:  
SBK4 - V - 10  
%  
(č. 0,244e-6,  
z. -0,807e-5,  
s.m. -0,974e-5,  
m. -0,0147e-4)



Obr. 657:  
SSM4 - V - 10  
%  
(č. 0,136e-6,  
z. -0,141e-4,  
s.m. -0,197e-4,  
m. -0,254e-4)



Obr. 658:  
SBK4 - V - MÚ  
(č. 0,244e-6,  
z. -0,807e-5,  
s.m. -0,974e-5,  
m. -0,0147e-4)



Obr. 659:  
SSM4 - V - MÚ  
(č. 0,482e-6,  
z. -0,464e-4,  
s.m. -0,558e-4,  
m. -0,839e-4)

## 7 DISKUZE

Důvodem pro velmi rozdílný způsob porušení tlakových vzorků lisovaných při 120 °C v porovnání se vzorky lisovanými při 90 °C je lisovací teplota. Vyšší lisovací teplota tedy s nejvyšší pravděpodobností způsobuje vytvoření mnohem pevnějších vazeb s nižší pružnosti, neboli mnohem vyšší stupeň zesíťování mezi molekulami lepidla.

Ve všech případech, kdy došlo k delaminaci lepených spár zůstala vrstva uhlíkových vláken přilepena na boční vrstvu dýhy, ke které byla vlákna orientována rovnoběžně. Pravděpodobně to bylo způsobeno tím, že ve všech případech měření vzorku docházelo k velkým deformacím ve středové vrstvě dřeva. Tyto deformace pak kladou vysoké požadavky na pružnost vytvrzeného lepidlového spoje. Ke shodnému porušení by s největší pravděpodobností došlo i pokud by bylo použito plátno z uhlíkových vláken namísto uhlíkové tkaniny. Z tohoto poznatku vyplývá, že je velmi důležité zvážit orientaci dřeva vůči směru působení zatěžovací síly. V tomto ohledu by bylo velmi přínosné použít model vytvořený v ANSYSu pro ověření navrženého řešení.

Při porovnávání experimentálních výsledků s výsledky vymodelovaných tělísek v programu ANSYS se ukázalo, jejich chování bylo ideální a špatně simulovalo variabilní vlastnosti dřeva a chování lepené spáry. Pro přesnější výsledky simulací by bylo nutné vytvořit propracovanější modely, které by lépe obsáhly variabilní vlastnosti dřeva a chování lepeného spoje přidáním například možností delaminace lepeného spoje.

U smykových vzorků lisovaných při 90 °C docházelo ke smykovým deformacím i působení smykového napětí ve u všech vzorků ve stejných místech, k čemuž došlo i u ostatních skupin, avšak při porovnání se skupinou lisovanou při 120 °C měli tyto vzorky jednoznačnější chování, to znamená, že k jejich porušení došlo ve stejných sledovaných momentech. Vzorky lisované při 120 °C v tomto ohledu vykazují vyšší variabilitu, stejně jako vzorky nevyztužené.

## 8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala mechanickou analýzou lepeného spoje mezi dřevem a uhlíkovými vlákny. Bylo zjištěno, že nejlepšího vyztužení u tlakových a smykových vzorků dosáhla lepidlová směs vytvrzená při 90 °C a u ohybových vzorků lepidlová směs vytvrzená při 120 °C. Vzorky lisované při 90 °C vykazovaly nižší stupeň zesílení epoxidové pryskyřice, což se projevilo větší elasticitou lepené spáry. Vzorky lisované při 120 °C dosáhly vyššího stupně zesílení a měly vyšší pevnost lepené spáry. U všech modelů docházelo k deformacím ve středové vrstvě vzorku.

Také lze tvrdit, že uhlíková vlákna výrazně ovlivnila distribuci deformací ve vzorcích i modelech. U vyztužených tlakových vzorků je patrné jejich chování na vzpěr, které často způsobilo vybočení nebo přímo ohyb vrstev vzorku. U vyztužených ohybových vzorků dochází k vyšší koncentraci deformací v místě lomu, zatímco u nevyztužených vzorků je distribuce napětí ve středové vrstvě rovnoměrnější. U vyztužených smykových vzorků je pak ovlivnění uhlíkovými vlákny zřejmé. U nevyztužených vzorků dochází k největším deformacím v bočních dýhách, které zatížení přenášejí (2/3 délky vzorku) a k menším deformacím ve středové dýze vzorku. Naopak u vyztužených vzorků přenášejí zatížení uhlíková vlákna a vznikají větší deformace ve středové vrstvě dýhy. Nejpatrnější je tento fakt na obrázcích zachycujících poměrné smykové deformace.

Tlakové vzorky byly nejprve deformovány ve středové vrstvě dýhy, což u nevyztužených vzorků (T2, T4 a T5) následně způsobilo zborcení vzorku, podobně jako u vzorků masivních. U vyztužených vzorků lisovaných při 90 °C (T1, T7 a T8) pak po stlačení středové vrstvy došlo k porušení ve dřevě, případně k delaminaci lepené spáry. U vzorků lisovaných při 120 °C (T6, T3 a T9) vždy došlo k delaminaci lepených spár a ohybu bočních vrstev. Ohybové vzorky (O1 až O9) byly vždy porušeny ve dřevě. Lom většinou započal ve dřevě a pak pokračoval ve středové vrstvě dýhy směrem ke konci vzorku, nebo došlo k přesunu porušení do lepené spáry, což vedlo k její následné delaminaci. Porušení však ani v jednom případě nezapočalo v lepené spáře. Smykové vzorky byly vždy porušeny delaminací, u nevyztužených vzorků (S1, S2 a S3) došlo k částečné delaminaci lepené spáry a následnému přenosu porušení do vrstvy dřeva. Vyztužené vzorky (S4 až S9) byly vždy delaminovány v lepené spáře ve vrstvě lepidla,

na rozhraní středové dýhy a uhlíkových vláken. Delaminace vždy započala v oslabené části (krčku) vzorků.

Vyztužené tlakové vzorky lisované při 90 °C (T1, T7 a T8) vykazovaly průměrně o 46 % vyšší mez pevnosti a o 66 % vyšší modul pružnosti oproti vzorkům nevyztuženým. Vzorky (T6, T3 a T9) lisované při 120 °C pak vykazovaly průměrně o 36 % vyšší mez pevnosti a o 26 % vyšší modul pružnosti oproti vzorkům nevyztuženým. Vyztužené ohybové vzorky lisované při 120 °C (O7, O8 a O9) vykazovaly průměrně o 29 % vyšší mez pevnosti a o 51 % vyšší modul pružnosti oproti vzorkům nevyztuženým. Vzorky lisované při 90 °C (O4, O5 a O6) vykazovaly průměrně o 11 % vyšší mez pevnosti a o 24 % vyšší modul pružnosti oproti vzorkům nevyztuženým. Vyztužené smykové vzorky lisované při 90 °C (S4, S5 a S6) vykazovaly průměrně o 67 % vyšší mez pevnosti a o 22 % vyšší modul pružnosti oproti vzorkům nevyztuženým. Vzorky (S7, S8 a S9) lisované při 120 °C pak vykazovaly průměrně o 33 % vyšší mez pevnosti a o 40 % vyšší modul pružnosti oproti vzorkům nevyztuženým. Vyztužené vzorky lisované při 90 °C tedy dosáhli vyšší meze pevnosti, avšak nižšího modulu pružnosti oproti vzorkům lisovaným při 120 °C.

Všeobecně lze tvrdit, že smykové a ohybové modely vykazovaly věrné chování v elastické oblasti. Tlakové modely však věrné chování nevykazovaly. Hodnoty sledovaných veličin získané numerickou simulací nevykazují dobrou shodu s hodnotami experimentálně naměřenými. To bylo způsobeno příliš jednoduchými numerickými modely, které neobsahovaly variabilní vlastnosti dřeva a možnost delaminace lepeného spoje. Hodnoty vypočítané programem byly několikanásobně vyšší, nežli hodnoty experimentálně naměřené. Smrkové modely vykazovaly dobrou shodu v rozložení sledovaných veličin i vypočítaných hodnot při porovnání mezi modely. Smrk měl vypočítané hodnoty nižší, což odpovídá nižším mechanickým vlastnostem smrkového dřeva při porovnání se dřevem bukovým. Problematika numerické simulace lepeného spoje dřeva s uhlíkovými vlákny by mohla být zajímavým tématem pro další výzkumnou práci.



## 9 SUMMARY

This diploma thesis dealt with a mechanical analysis of bonded joints between timber and carbon fibres. During research of the work was found that the best reinforcement in compression and shear test specimens were achieved by specimens cured at 90 °C and at 120 °C by bending specimens. Samples molded at 90 °C showed a lower degree of crosslinking of the epoxy resin, which showed greater elasticity of glued joint. Samples molded at 120 °C achieved higher degree of crosslinking and had higher strength of bonded joints. In all cases were high deformations in the core layer of the sample.

Also, it can be argued that the carbon fibers significantly influenced the distribution of deformation in samples and models. For compression samples is evident their behavior to buckling which often causes buckling or bending of the layers within the sample. For bending samples occurs higher concentration at the place of deformation fracture while in the unreinforced samples stress distribution in the core layer were more uniform. Influence of carbon fibers is then obvious the shear samples. For unreinforced samples were the biggest deformations on the side veneers which transfer load (2/3 of the sample) and a smaller deformation at the core layer of veneer. In contrast, in reinforced samples load were transferred by carbon fibers that cause concentration of large deformations in the core layer of veneer. Most notably is this fact in the pictures depicting the relative shear deformation.

For compression samples initially deformations of veneers in the core layer, which in the unreinforced samples (T2, T4 and T5) subsequently cause collapsing of the sample, like solid samples. For reinforced specimens molded at 90 °C (T1, T7 and T8), then after deformations in the central layer a begun breach in the wood or delamination of bonded joints. For reinforced samples molded at 120 °C (T6, T3 and T9) always occurred delamination of glued joints and after that side layers were bent. Bending samples (O1 to O9) were always breached in wood - particularly in the core layer of veneer. The breach usually started in the timber and then proceeded in the central veneer layer towards the end of the sample or a shift in breach of glued joint, leading to its subsequent delamination. However, a breach in neither case has not commenced the bondline. The unreinforced shear samples (S1, S2, S3) were always breached by

delamination. The breach began in the bondline by delamination and then was transferred into the breach of side wood layers. Reinforced samples (S4-S9) were always delaminated at the bondline in the adhesive layer at the interface of the central veneer and carbon fibers. Delamination always started in a weakened portion (neck) samples.

Reinforced compression specimens pressed at 90 °C (T1, T7 and T8) show good reinforcement. The breaking strength was average increased for 46% and modulus of elasticity for 66% in comparison to non-reinforced samples. Samples (T6, T3 and T9) pressed at 120 °C showed an average increase of breaking strength for 36% and for 26% higher modulus of elasticity in comparison to non-reinforced samples. Reinforced bending specimens pressed at 120 °C (O7, O8 and O9) showed an average 29% higher breaking strength and 51% higher modulus of elasticity compared to non-reinforced samples. Samples molded at 90 °C (O4, O5 and O6) showed an average 11% higher breaking strength and 24% higher modulus compared to non-reinforced samples. Reinforced shear specimens pressed at 90 °C (S4, S5 and S6) showed an average of 67% higher breaking strength and 22% higher modulus compared to non-reinforced samples. Samples (S7, S8 and S9) pressed at 120 °C then showed an average 33% higher breaking strength and 40% higher modulus of elasticity compared to non-reinforced samples. Reinforced specimens pressed at 90 °C therefore achieved a higher breaking strength but a lower modulus of elasticity compared to the samples molded at 120 °C.

In general it can be argued that the shear and bending models showed good behavior conformity in the elastic region with experimental measured results. However, pressure models didn't show good behavior conformity. Values of monitored quantities obtained by numerical simulations didn't show good agreement with the experimentally measured values. This was caused by very simple numerical models which didn't include variable properties of wood and the possibility of delamination of the glued joint. Values calculated by the program were several times higher than the experimentally measured values. Spruce models showed good conformity in the distribution of monitored parameters and calculated values of the comparison between models. Spruce had calculated lower values which correspond to lower mechanical

properties of spruce timber as compared to the beech timber. The issue of numerical simulation of the bonded joints between timber and carbon fibres would be an interesting topic for further research.

## 10 Pojmy a zkratky

**Boční vrstvy** – vrstvy skládající se z vrstvy dýhy a uhlíkových vláken orientovaných jedním směrem

**BV** – bez vláken (nevyztužené vzorky)

**MOR** – mez pevnosti

**CF** – uhlíková vlákna

**MÚ** – mez úměrnosti

**$E_{xx}$**  – poměrná deformace v ose  $X$

**PD** – poměrné deformace

**$E_{xy}$**  – poměrná smyková deformace

**PSD** – poměrné smykové deformace

**$E_{yy}$**  – poměrná deformace v ose  $Y$

**$U$**  – posunutí v ose  $X$

**MOE** – modul pružnosti

**$V$**  – posunutí v ose  $Y$

**Krčky** – vzikly vyříznutím drážky ve smykových vzorcích, mají tloušťku jedné vrstvy dýhy, uhlíkových vláken (u vyztužených tělísek) a nedořezu dřeva středové dýhy

**TBK** – tlakový kompozitní vzorek z bukové dýhy, uhlíkových vláken a lepidla

**SBK** – smykový kompozitní vzorek z bukové dýhy, uhlíkových vláken a lepidla

**OBK** – ohybový kompozitní vzorek z bukové dýhy, uhlíkových vláken a lepidla

**TSM** – tlakový kompozitní vzorek ze smrkové dýhy, uhlíkových vláken a lepidla

**TBK** – smykový kompozitní vzorek ze smrkové dýhy, uhlíkových vláken a lepidla

**OBK** – ohybový kompozitní vzorek ze smrkové dýhy, uhlíkových vláken a lepidla

### U popisků obrázku znamenají tyto písmena zkratky pro barvu:

**č.** - červeně

**o.** - oranžově

**s. m.** - světle modře

**f.** - fialově

**z.** - zeleně

**m.** - modře

**ž.** - žlutě

# 11 SEZNAM TABULEK

## Seznam tabulek

Tab. 1: Naměřené hodnoty pro vzorky zatížené na tlak.....	46
Tab. 2: Naměřené hodnoty pro vzorky zatížené na ohyb.....	47
Tab. 3: Naměřené hodnoty pro vzorky zatížené na smyk.....	48
Tab. 4: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek T2) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model TBK2) pro případ T2.....	103
Tab. 5: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek T7) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model TBK7) pro případ T7.....	105
Tab. 6: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek O1) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model OBK2) pro případ O1.....	107
Tab. 7: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek O7) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model OBK7) pro případ O7.....	109
Tab. 8: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek S2) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model SBK2) pro případ S2.....	111
Tab. 9: Srovnání experimentálně naměřených hodnot (Vzorek S4) s hodnotami vypočítanými programem ANSYS (Model SBK4) pro případ S4.....	113
Tab. 10: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model TBK2) a smrkovou (Model TSM2)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek T2) pro buk pro případ T2.....	116
Tab. 11: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model TBK7) a smrkovou (Model TSM7)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek T7) pro buk pro případ T7.....	118
Tab. 12: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model OBK1) a smrkovou (Model OSM1)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek O1) pro buk pro případ O1.....	120
Tab. 13: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model OBK7) a smrkovou (Model OSM7)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek O7) pro buk pro případ O7.....	122
Tab. 14: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model SBK2) a smrkovou (Model SSM2)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek S2) pro buk pro případ S2.....	124
Tab. 15: Srovnání hodnot vypočítaných programem ANSYS pro bukovou (Model SBK4) a smrkovou (Model SSM4)dýhu. Možné je také porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami (Vzorek S4) pro buk pro případ S4.....	126



## 12 SEZNAM CITOVANÉ LITERATURY

### 12.1 Publikace:

BAREŠ, R. A. Kompozitní materiály. První vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 80-8076-007.

BERTHELOT, Jean-Marie. *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. New York: Springer, c1999, xxv, 645 p. Mechanical engineering series (Berlin, Germany). ISBN 03-879-8426-7.

BODIG, Jozsef a Benjamin A JAYNE. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar, Florida: Krieger publishing company, 1993, xxi, 712 p. ISBN 04-420-0822-8.

BUCUR, Voichita. *Acoustics of wood*. 2nd ed. New York: Springer, c2006, xviii, 393 p. ISBN 978-354-0261-230. (Literatura z které byly čerpány Poissonovy hodnoty dle Hearmona 1948)

ČSN 49 0110. *Dřevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláken*. Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1980.

ČSN EN 310. *Desky ze dřeva STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI V OHYBU A PEVNOSTI V OHYBU*. Český normalizační institut, 1995.

ČSN EN 480+A1. *Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. Český normalizační institut, 2004.

ČSN EN 49 0173. *Překližované desky - kvalita lepení: Část 1: Metody zkoušení*. Český normalizační institut, 2005.

ČSN EN 73 2835. *Lepené lamelové dřevo - Zkouška delaminace spojů*. Český normalizační institut, 2002.

DINWOODIE, J. *Timber, its nature and behaviour*. 2nd ed. England: BRE, with the support of the Centre for Timber Technology and Construction at BRE, 2000, x, 257 p. ISBN 04-192-3580-9.

FRIHART, Edited by Charles R. *Wood adhesives 2005: November 2-4, 2005, Holiday Inn on the Bay, San Diego, California*. Madison, WI: Forest Products Society, 2006. ISBN 18-925-2945-9.

GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009, iv, 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

HAROK, Jiří. *Vlastnosti lepeného spoje uhlíkových vláken a dřeva*. Brno, 2013.

Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Tippner, Ph.D.

JÁNSKÁ, Dagmar. *Vliv lepidla na MOE a MOR dřevěného experimentálního tělíska vyztuženého uhlíkovými vlákny*. Brno, 2009. Bakalářská práce. MZLU v Brně. Vedoucí práce Ing. Vladimír Dániel, Ph.D.

JELÍNKOVÁ, Vendula. Vliv předpětí uhlíkových vláken na MOE a MOR dřevěného experimentálního tělíska vyztuženého uhlíkovými vlákny [online]. MZLU Brně, 2009 [cit. 2013-02-01]. Bakalářská práce. MZLU v Brně. Vedoucí práce Ing. Vladimír Dániel, Ph.D.

JELÍNKOVÁ, Vendula. Vliv tepelné modifikace na mechanické vlastnosti kompozitu dřevo - uhlíková vlákna [online]. Mendelova univerzita v Brně, 2010/2011 [cit. 2013-02-01]. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Tippner, Ph.D.

KŘUPALOVÁ, Zdeňka. *Nauka o materiálech: pro 1. a 2. ročník SOU učebního oboru truhlář*. 3., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2008, 253 s. ISBN 978-80-86817-25-5.  
KŘUPALOVÁ, Zdeňka. *Nauka o materiálech: pro 1. a 2. ročník SOU učebního oboru truhlář*. 3., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2008, 253 s. ISBN 978-80-86817-25-5.

POŽGAJ, A., D. CHOVANEC, S. KURJATKO a M. BABIAK. Štruktúra a vlastnosti dreva. Druhé vydání. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.

RAFTERY, G. *The use of advanced composite materials in the flexural reinforcement of low-grade glulam*. National University of Ireland, Galway, 2010. Thesis/Dissertation. National University of Ireland, Galway.

SAVAGE, G. *Carbon Fibres* [online]. Springer Netherlands: Springer Netherlands, 1993 [cit. 2015-03-21]. ISBN 978-94-010-4690-9.

VANĚK, Vladimír. OSTRAVSKÁ UNIVERZITA. *Materiály a technologie I plasty*. Ostrava, 2005, 53 s.

WANDGAARD, F.F. Elastic-Deflection of Wood-Fiberglass Composite Beams. *Forest Product Journal*. 1964, roč. 14, č. 6, s. 256-260.

## 12.2 Webové zdroje:

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. Use of epoxies in repair of structural glued laminated timber. *AITC technical note 14*. 2005, TN-14. Dostupné z: <http://www.aitc-glulam.org/>

ADAMS, R. D. a N. A. PEPPIATT. Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints. *The Journal of Adhesion*. 2006-12-13, vol. 9, issue 1, s. 1-18. DOI: 10.1080/00218467708075095. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218467708075095>

A. André, R. Kliger, R. Olsson, Compression failure mechanism in small-scale wood specimens reinforced with CFRP: An experimental study, *Construction and Building Materials*, Volume 41, April 2013, Pages 790-800, ISSN 0950-0618, 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.038. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812009956>)

ANDRÉ, A. a R. KLIGER. Strengthening of timber beams using FRP, with emphasis on compression strength. *APFIS 2009* [online]. 2009 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/260036868\\_STRENGTHENING\\_OF\\_TIMBER\\_BEAMS\\_USING\\_FRP\\_WITH\\_EMPHASIS\\_ON\\_COMPRESSION\\_STRENGTH\\_A\\_STATE\\_OF\\_THE\\_ART\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/260036868_STRENGTHENING_OF_TIMBER_BEAMS_USING_FRP_WITH_EMPHASIS_ON_COMPRESSION_STRENGTH_A_STATE_OF_THE_ART_REVIEW)

*ANSYS, Inc.* [online]. 2015 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/>

APICELLA, Antonio, Luigi NICOLAIS, Gianni ASTARITA a Enrico DRIOLI. Effect of thermal history on water sorption, elastic properties and the glass transition of epoxy resins. *Polymer* [online]. 1979, vol. 20, issue 9, s. 1143-1148 [cit. 2015-04-01]. DOI: 10.1016/0032-3861(79)90307-0. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0032386179903070>

Basaltex a.s. Basaltex a.s. [online]. 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://www.basaltex.cz>

BARBERO, E., J. DAVALOS a U. MUNIPALLE. Bond Strength of FRP-Wood Interface. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1994-09-01, vol. 13, issue 9, s. 835-854. DOI: 10.1177/073168449401300905. Dostupné z: <http://jrp.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/073168449401300905>

BORRI, Antonio, Marco CORRADI a Andrea GRAZINI. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites Part B: Engineering*. 2005, vol. 36, issue 2, s. 143-153. DOI: 10.1016/j.compositesb.2004.04.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836804000903>

BRANDON, Rishawn; IBACH, Rebecca E.; FRITHART, Charles R. 2005. Effects

of chemically modified wood on bond durability. *Wood Adhesives 2005* : November 2-4, 2005 ... San Diego, California, USA. Madison, WI : Forest Products Society, 2005: ISBN: 1892529459: pages 111-114. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/252402935\\_Effects\\_of\\_Chemically\\_Modified\\_Wood\\_on\\_Bond\\_Durability](https://www.researchgate.net/publication/252402935_Effects_of_Chemically_Modified_Wood_on_Bond_Durability)

CAMPILHO, R.D.S.G., M.F.S.F. DE MOURA, A.M.J.P. BARRETO, J.J.L. MORAIS a J.J.M.S. DOMINGUES. Fracture behaviour of damaged wood beams repaired with an adhesively-bonded composite patch. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009, vol. 40, 6-7, s. 852-859. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.04.007. Dostupné z: [z:http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X09001067](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X09001067)

Carbon fibres. *Web.utk.edu* [online]. 2004 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://web.utk.edu/~mse/Textiles/CARBON%20FIBERS.htm>

CHOI, FC, B SAMALI a K CREWS. *Application of the modified damage index method to timber beams*. University of Technology Sydney, 2008. Dostupné z: <https://opus.lib.uts.edu.au/research/bitstream/handle/10453/12795/2007001143.pdf?sequence=1>

CORRADI, Marco a Antonio BORRI. Fir and chestnut timber beams reinforced with GFRP pultruded elements. *Composites Part B: Engineering*. 2007, vol. 38, issue 2, s. 172-181. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.07.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836806001144>

*Correlated SOLUTIONS* [online]. 2015 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/>

DAVIS, G. The performance of adhesive systems for structural timbers. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1997, vol. 17, issue 3, s. 247-255. DOI: 10.1016/S0143-7496(97)00010-9. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749697000109>

Davids, W. G., Landis, E. N., & Vasic, S. (2003). Lattice models for the prediction of load-induced failure and damage in wood. *Wood and fiber science*, 35(1), 120-134.

DEMPSEY, Dwight D. a David W. SCOTT. Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips. *Journal of Composites for Construction*. 2006, vol. 10, issue 5, s. 392-398. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:5(392). Dostupné z: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:5\(392\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:5(392))

Frihart, Charles R. 2003. Durable wood bonding with epoxy adhesives. *Proceedings : 26th Annual Meeting of the Adhesion Society, Inc. : Adhesion Fundamentals from Molecules to Mechanisms and Modeling* : February 23-26, 2003, Myrtle Beach, SC. Blacksburg, VA : The Adhesion Society, c2003: pages 476-478. Dostupné z: [http://www.researchgate.net/publication/245977268\\_DURABLE\\_WOOD\\_BONDING\\_](http://www.researchgate.net/publication/245977268_DURABLE_WOOD_BONDING_)

## WITH\_EPOXY\_ADHESIVES

GARDNER, DJ, JF DAVALOS a UM MUNIPALLE. Adhesive bonding of pultruded fiberreinforced plastic to wood. *Forest Products Journal*. 1994, roč. 44, č. 5.

GENTILE, Chris, Dagmar SVECOVA a Sami H. RIZKALLA. Timber Beams Strengthened with GFRP Bars: Development and Applications. *Journal of Composites for Construction* [online]. 2002, vol. 6, issue 1, s. 11-20 [cit. 2015-04-01]. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(11). Dostupné z: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:1\(11\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(11))

GILFILLAN, J. R., S. G. GILBERT a G. R. H. PATRICK. The Use of FRP Composites in Enhancing the Structural Behavior of Timber Beams. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2003-10-01, vol. 22, issue 15, s. 1373-1388. DOI: 10.1177/073168403035583. Dostupné z: <http://jrp.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/073168403035583>

GLEICH, D. M., M. J. L. VAN TOOREN a A. BEUKERS. Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2001, vol. 15, issue 9, s. 1091-1101. DOI: 10.1163/156856101317035503. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1163/156856101317035503>

GUAN, Z.W. a E.C. ZHU. Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings. *Engineering Structures* [online]. 2009, vol. 31, issue 2, s. 394-403 [cit. 2015-04-02]. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.09.007. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029608003052#>

GUGUTSIDZE, G. a F. DRAŠKOVIČ. Reinforcement of timber beams with carbon fibers reinforced plastics. *Slovak journal of civil engineering* [online]. 2009 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: [http://www.svf.stuba.sk/docs/sjce/2010/2010\\_2/file1.pdf](http://www.svf.stuba.sk/docs/sjce/2010/2010_2/file1.pdf)

HARRIS, C. L. a D. WYN-ROBERTS. Wear of Carbon Fibre Reinforced Polymers in a High Vacuum Environment. *Nature* [online]. 1968-3-9, roč. 217, č. 5132, s. 981-982 [cit. 2015-03-21]. ISSN 0028-0836. DOI: 10.1038/217981a0. Dostupné z: <http://www.nature.com/doi/finder/10.1038/217981a0>

Havel Composites. HAVEL COMPOSITES CZ S.R.O. Havel Composites [online]. 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>

HER, Shih-Chuan. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints. *Composite Structures*. 1999, vol. 47, 1-4, s. 673-678. DOI: 10.1016/S0263-8223(00)00052-0. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822300000520>

HILL, R. A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 1948-05-27, vol. 193, issue 1033, s. 281-297 [cit. 2015-03-06]. DOI: 10.1098/rspa.1948.0045. Dostupné



z: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1948.0045>

HUTCHINSON, AR. *Surface pre-treatment—the key to durability: roceedings of the second international conference on structural faults and repair*. University of London, 1987.

CHUI YH, Ni C. Stress distributions in glued wood lap joints subjected to an axial force. *5th world conference on timber engineering*. Lausanne, 1998.

JOHNS, Kenneth C. a Simon LACROIX. Composite reinforcement of timber in bending. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000, vol. 27, issue 5, s. 899-906. DOI: 10.1139/cjce-27-5-899. Dostupné z: [http://www.nrc.ca/cgi-bin/cisti/journals/rp/rp2\\_abst\\_e?cjce\\_100-017\\_27\\_ns\\_nf\\_cjce27-00](http://www.nrc.ca/cgi-bin/cisti/journals/rp/rp2_abst_e?cjce_100-017_27_ns_nf_cjce27-00)

KIRLIN, Chad P. *Experimental and finite-element analysis of stress distributions near the end of reinforcement in partially reinforced glulam*. Oregon State University, 1996. Dostupné z: <https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/12262?show=full>. Thesis/Dissertation. Oregon State University.

KOŘÍNEK, Z. *Kompozity* [online]. 2009 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://volny.cz/zkorinek/>

KULÍK, Petr a Lenka MELZEROVÁ. Vyskopevnostní výztužné lamely v nosnících z lepeného lamelového dřeva. In: *Vyskopevnostní výztužné lamely v nosnících z lepeného lamelového dřeva* [online]. 2012 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevene-a-ocelove-konstrukce/8776-vyskopevnostni-vyztuzne-lamely-v-nosnicich-z-lepeneho-lameloveho-dreva>

KURIAN, A. *Analytical modeling of glued laminated girder bridges using ANSYS: MTC transportation scholars conference*. Iowa State University, 2000. Dostupné z: <http://www.intrans.iastate.edu/mtc/documents/studentPapers/2000/kurian.pdf>

LAVISCI, P., S. BERTI, B. PIZZO, P. TRIBOULOT a R. ZANUTTINI. A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2001-4-27, vol. 59, 1-2, s. 145-152. DOI: 10.1007/s001070050486. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s001070050486>

LEICESTER, R H. Application of linear fracture mechanics to notched timber elements. *Progress in Structural Engineering and Materials*[online]. 2006, vol. 8, issue 1, s. 29-37 [cit. 2015-04-02]. DOI: 10.1002/pse.210. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pse.210/pdf>

Mendelu. *Mendelu* [online]. 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://thuja.mendelu.cz/und/?q=node/72>

*Mendelu.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://mendelu.cz/cz>

NEUBAUEROVÁ Pavla, Marcela KARMAZÍNOVÁ a Ondřej PEŠEK. Únosnost

kompozitních nosníků ze dřeva s externí lepenou výztuží z polymerů s uhlíkovými vlákny. *Juniorstav 2012: 14. odborná konference doktorského studia : sborník anotací : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební = 14th Professional Conference of Postgraduate Students : [collection of abstracts] : Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering : : 26.1.2012* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012 [cit. 2015-03-21]. ISSN 978-80-214-4393- 8. Dostupné z: [http://www.cideas.cz/free/okno/technicke\\_listy/8tlv/TL11CZ\\_2521-P29.pdf](http://www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/8tlv/TL11CZ_2521-P29.pdf)

NEUBAUEROVÁ, Pavla. Zesilování dřevěných nosníků lamelami s uhlíkovými vlákny. *STEEL STRUCTURES AND BRIDGES 2012* [online]. 2012, roč. 2012, č. 40 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812024836>

OBJOIS, Anthony, Yvon GILIBERT a Bernard FARGETTE. Theoretical and Experimental Analysis of the Scarf Joint Bonded Structure: Influence of the Adhesive Thickness on the Micro-mechanical Behavior. *The Journal of Adhesion*. 1999, vol. 70, 1-2, s. 13-32. DOI: 10.1080/00218469908010485. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218469908010485>

Performance COMPOSITES. [online]. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: [http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties\\_2.asp](http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp)

A. PIRVU et al. Carbon fiber-vinyl ester composite reinforcement of wood using the VARTM/SCRIMP fabrication proces. *Researchgate.com* [online]. 2004 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: [http://www.researchgate.net/publication/222550652\\_Carbon\\_fiber-vinyl\\_ester\\_composite\\_reinforcement\\_of\\_wood\\_using\\_the\\_VARTMSCRIMP\\_fabrication\\_process?ev=pub\\_srch\\_pub](http://www.researchgate.net/publication/222550652_Carbon_fiber-vinyl_ester_composite_reinforcement_of_wood_using_the_VARTMSCRIMP_fabrication_process?ev=pub_srch_pub)

RAFTERY, Gary M., Annette M. HARTE a Peter D. RODD. Bond quality at the FRP–wood interface using wood-laminating adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2009, vol. 29, issue 2, s. 101-110 [cit. 2015-03-06]. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.01.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749608000286>

RAFTERY, G., A. HARTE a P. RODD. Qualification of Wood Adhesives for Structural Softwood Glulam with Large Juvenile Wood Content. *Journal of the Institute of Wood Science* [online]. 2008, vol. 18, issue 1, s. 24-34 [cit. 2015-03-06]. DOI: 10.1179/wsc.2008.18.1.24. Dostupné z: <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/wsc.2008.18.1.24>

ROWLANDS, RE, RP VAN DEWEGHE, TL LAUFENBERG a GP KRUEGER. Fiber-reinforced wood composites. *Wood and Fiber Science* [online]. 1986, roč. 18, č. 1 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1986/rowla86a.pdf>

SERRANO, Erik. Glued-in rods for timber structures — a 3D model and finite element parameter studies. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2001, vol. 21, issue 2, s. 115-127 [cit. 2015-03-06]. DOI: 10.1016/S0143-7496(00)00043-9. Dostupné

z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749600000439>

SHIH, C. F. a D. LEE. Further Developments in Anisotropic Plasticity. *Journal of Engineering Materials and Technology*[online]. 1978, vol. 100, issue 3, s. 294- [cit. 2015-03-06]. DOI: 10.1115/1.3443493. Dostupné z:<http://MaterialsTechnology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1422483>

Speciality Materials, Inc. Speciality Materials, Inc. [online]. 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://specmaterials.com/boronfiber.htm>

SNOW, M. *Fracture development in engineered wood product bolted connections*. Ottawa: Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada, 2009. ISBN 978-049-4467-466.

SVS FEM. <Http://www.svsfem.cz/> [online]. 2015 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/>

ŠILHAN, Ondřej. MINOVA BOHEMIA S.R.O. *Zesilování stavebních konstrukcí externě lepenou kompozitní výztuží*. Minova Bohemia s.r.o, 2008. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2008/pics/17.pdf>

ŠTELLER, Š. Vystužené drevené nosné prvky materiálmi na báze vlákien. [online]. 2009 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://www.apvv.sk/buxus/docs/zk/zk-apvv-99-015805.pdf>

TINGLEY, Dan A. *The stress-strain relationships in wood and fiber-reinforced plastic laminae of reinforced glued-laminated wood beams*. Oregon State University, 1997. Dostupné z:<http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/18454?show=full>. Thesis/Dissertation. Oregon State University.

Toho Tenax Co., Ltd. *Toho Tenax Co., Ltd.* [online]. 2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.teijin.co.jp/>

YOUNES, Rafic, Ali HALLAL, Farouk FARDOUN a Fadi HAJJ. Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials. *Composites and Their Properties* [online]. InTech, 2012-08-22 [cit. 2015-03-26]. DOI: 10.5772/50362. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/composites-and-their-properties/comparative-review-study-on-elastic-properties-modeling-for-unidirectional-composite-materials>

VALIPOUR, Hamid R. a Keith CREWS. Efficient finite element modelling of timber beams strengthened with bonded fibre reinforced polymers. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, vol. 25, issue 8, s. 3291-3300 [cit. 2015-03-06]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.017. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811000638>

VARSHAVSKII, V. Ya. a Yu. G. KORABEL'NIKOV. Fibre chemistry [online]. Kluwer Academic Publishers: Plenum Publishers, 1995 [cit. 2015-03-21]. ISBN 0015-0541. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00557669#>

*The Wood Database* [online]. 2014 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://www.wood-database.com/>

VAN GEMERT, D. a M. VANDEN BOSCH. Structural restoration of wooden beams by means of epoxy resin. *Materials and Structures*. 1987, vol. 20, issue 3, s. 165-170. DOI: 10.1007/BF02472732. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02472732>

VICK, CB. *Hydroxymethylated resorcinol coupling agent for enhanced adhesion of epoxy and other thermosetting adhesives to wood: Proceedings of the wood adhesives 1995*. Madison, WI, USA, 1995.

## **13 PŘÍLOHY**

### **13.1 Seznam příloh:**

1. Elektronické přílohy na DVD