

Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny

Bc.Václav Lecián

Diplomová práce
2014

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav Lecián**
Osobní číslo: **T12440**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium mechanických vlastností kompozitů na bázi Kordcarbon tkaniny**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše v oblasti uhlíkových kompozitů**
- 2. Příprava zkušebních těles pro mechanické zkoušky**
- 3. Provedení experimentálních zkoušek**
- 4. Zhotovení jednoduchého teoretického modelu zvolené struktury**
- 5. Vyhodnocení výsledků z hlediska praktických aplikací**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

-dle doporučení vedoucího práce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: LECIAŇ VÁCCAV

Obor: PI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 2.5.2015

Michal Gmáček

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²¹ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

²¹ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá studiem mechanických vlastností kompozitů vyrobených z tkaniny KORDCARBON dodané firmou Kordárna Plus a.s. K dispozici jsou dva druhy uhlíkových tkanin a čtyři druhy epoxidových pryskyřic.

V teoretické části jsou popsány jednotlivé mechanické zkoušky. Dále je vysvětleno, co je kompozit, jednotlivé technologie výroby a jeho využití.

Praktická část je zaměřena na přípravu a výrobu zkušebních těles z uhlíkových tkanin a epoxidových pryskyřic. Zkušební tělesa byla podrobena statické zkoušce tahem, tlakem a ohybem, dynamické zkoušce rázové houževnatosti na Charppyho kladivu, rázové zkoušce v tahu a víceosým rázovým namáháním. Dále byl vytvořen teoretický model dané struktury. V závěru byly výsledky zhodnoceny a prodiskutovány.

Klíčová slova: Uhlíková tkanina, kompozit, epoxidová pryskyřice, vlákna

ABSTRACT

This thesis deals with the study of the mechanical properties of composites products produced from fabric supplied by KORDCARBON Kordárna Plus as There are two kinds of carbon fibers and four kinds of epoxy resins.

The theoretical part describes the different mechanical tests. The following explains what is composite, each technology and its use.

The practical part is focused on the preparation and manufacture of test specimens of woven carbon-nin and epoxy resins. The test specimens were subjected to static tensile, compression and bending, dynamic unnotched to Charppyho hammer, RA-agarose tensile test and vícerym impact loads. Furthermore, a theoretical model of the structure. In conclusion, the results were evaluated and discussed.

Keywords: Carbon fabric, composites, epoxy resin, fiber

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Milanovi Žaludkovi za vedení, rady a připomínky k práci. Dále společnosti Kordárna plus a.s. za poskytnutí uhlíkové výztuže a umožnění testování těchto tkanin. V poslední řadě rodičům, za uvolnění prostorů pro výrobu zkušebních těles.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITY	12
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ	12
1.1.1 Matrice	13
1.1.2 Výztuže	14
1.1.2.1 Uhlíková vlákna	15
1.1.3 Urychlovače a iniciátory	17
1.2 MECHANIKA KOMPOZITŮ	17
1.2.1 Kompozit jako anizotropní materiál.....	19
1.3 ZPŮSOBY VÝROBY KOMPOZITNÍCH VLÁKNOVÝCH MATERIÁLŮ.....	20
1.3.1 Ruční kladení	20
1.3.2 Metoda vakuového vaku	22
1.3.3 Metoda tlakového vaku	22
1.3.4 Metoda vytvrzování v autoklávu.....	23
1.3.5 Navíjení	24
1.3.6 Metoda lisování ve formě.....	25
2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU	27
2.1 STATICKÉ ZATÍŽENÍ KOMPOZITU	28
2.1.1 Zkouška tahem	29
2.1.2 Zkouška tlakem	31
2.1.3 Zkouška ohybem	32
2.1.4 Zkouška smykem	34
2.2 DYNAMICKÉ ZATÍŽENÍ KOMPOZITU	36
2.2.1 Zkoušky rázové	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	40
4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	41
4.1 POUŽITÉ MATERIÁLY	41
4.1.1 Uhlíkové tkaniny	41
4.1.2 Matrice	42
4.2 TECHNOLOGIE VÝROBY ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	42
4.2.1 Příprava formy	42
4.2.2 Příprava uhlíkové tkaniny	42
4.2.3 Příprava směsi epoxidové pryskyřice a tužidla.....	43
4.2.4 Technologie laminování, kladení jednotlivých vrstev tkaniny	43
4.2.5 Měření a dělení plátů na zkušební tělesa.....	44
4.3 ZKUŠEBNÍ TĚLESA PRO JEDNOTLIVÉ DRUHY ZKOUŠEK.....	45
4.3.1 Zkušební tělesa pro zkoušku tahem	45
4.3.2 Zkušební tělesa pro zkoušku ohybem	46
4.3.3 zkušební tělesa pro zkoušku tlakem	46
4.3.4 Zkušební tělesa pro rázovou zkoušku	47
4.3.5 Zkušební tělesa pro rázovou zkoušku v tahu	48

4.3.6	Zkušební tělesa pro zkoušku víceosého rázového namáhání	49
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	50
5.1	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ	50
5.1.1	Zkušební stroj Zwick 1456	50
5.1.2	Zwick/Roell HIT50P	51
5.1.3	Zwick/Roell HIT230F	52
5.2	STATICKE ZKOUŠKY	53
5.2.1	Zkouška tahem	53
5.2.2	Zkouška ohybem	53
5.2.3	Zkouška tlakem	54
5.3	DYNAMICKÉ ZKOUŠKY	55
5.3.1	Zkouška rázové houževnatosti	55
5.3.2	Zkouška rázové houževnatosti v tahu	55
5.3.3	Zkouška víceosým rázovým namáháním	56
6	ZHOTOVENÍ JEDNODUCHÉHO TEORETICKÉHO MODELU DANÉ STRUKTURY	57
7	VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK.....	59
7.1	VÝSLEDKY STATICKE ZKOUŠEK	59
7.1.1	Naměřené hodnoty v tahu	59
7.1.2	Naměřené hodnoty v tlaku	69
7.1.3	Naměřené hodnoty v ohybu	73
7.2	VÝSLEDKY DYNAMICKÝCH ZKOUŠEK.....	78
7.2.1	Naměřené hodnoty rázové houževnatosti	78
7.2.2	Naměřené hodnoty rázové houževnatosti v tahu	84
7.2.3	Naměřené hodnoty zkoušky víceosým namáháním	88
8	VYHODNOCENÍ A SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	93
8.1	STATICKE ZKOUŠKY	93
8.2	DYNAMICKÉ ZKOUŠKY	99
	ZÁVĚR	105
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	106
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	107
	SEZNAM OBRÁZKŮ	108
	SEZNAM TABULEK.....	111

ÚVOD

Materiály pro výrobu kompozitních dílců musí vyhovovat spotřebiteli po technologické i ekonomické stránce. Z technologického hlediska je důležitá snadnost výroby a zpracování a vlastnosti výrobku, které se chystá použít. Po ekonomické stránce je požadována dostupnost surovin, levná výroba a zpracování bez nákladných investic. Tím je dán směr vývoje lisovacích hmot a snaha výrobců nabídnout spotřebiteli co nejširší výběr pryskyřic a umožnit mu tak výběr co nejvhodnější pryskyřice. Požadavek výroby výlisků s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi bez použití velkých lisovacích tlaků a vysokých teplot vedl jednak k vyvinutí nízkotlakých pryskyřic a jednak k použití vláknitých plniv, které podobně jako ocelová armatura v betonu značně zlepšují mechanické vlastnosti výrobků. Postupem času byla celulózová a azbestová vlákna nahrazována tkaninami ze skleněných, uhlíkových, aramidových a syntetických vláken. Ve výrobku nesou tyto tkaniny, mající velmi dobrou mechanickou pevnost, hlavní část mechanického namáhání, a pryskyřice, která je bez armování poměrně křehká, se stává pojivem mezi jednotlivými vrstvami. Tak vzniká nový druh konstrukčního materiálu – vrstvené hmoty, lamináty.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITY

Kompozity jsou heterogenní materiály, které se skládají ze dvou nebo více složek a vzájemně se liší svými mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Často je jedna složka v kompozitu spojitá. Tato složka se nazývá matrice. Nespojitá složka se nazývá výztuž. Výztuž má v porovnání s matricí obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, tvrdost, pevnost atd.). Hlavním cílem výztuže je tedy zlepšení těchto vlastností. Mezi nejznámější přírodní kompozit patří dřevo složené z celulózových vláken uložených v ligninu. Umělé kompozitní materiály jsou charakteristické tím, že se vyrábějí mechanickým míšením nebo spojováním jednotlivých složek. Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus. Synergismus znamená, že vlastnosti kompozitů jsou výrazně lepší než při pouhém poměrném sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je velmi významná, protože vede k získání materiálů, s mnohem kvalitnějšími vlastnostmi.

Samotná matrice nebo samotná vlákna jsou velice křehké, ale výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti, tzn. odolnosti proti náhlému křehkému porušení. To je způsobeno brzděním šířící se lomové trhliny na rozhraní vláken a matrice. Šířící trhlina se odklání a zároveň vzniká intenzivní vzájemné tření mezi vytahujícími se vlákny a matricí. Kvalita rozhraní mezi výztuží a matricí má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. [2]

1.1 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály můžeme rozdělit podle několika parametrů. Podle povahy matrice a povahy výztuže. Podle geometrie výztuže se kompozity dělí na částicové a vláknové (s krátkými vlákny a s dlouhými vlákny)

U částicových kompozitů nejsou tak značné rozdíly v rozměrech útvarů v jednotlivých směrech. Tvary jednotlivých vyztužujících částic mohou být různé např. kulovitý, tyčinkovitý, destičkový nebo nepravidelný.

U vláknových kompozitů jsou vlákna v jednom směru výrazně delší než v ostatních směrech. Dále vláknové kompozity dělíme podle délky výztužných vláken na kompozity s vlákny dlouhými a na kompozity s vlákny krátkými. Ve výrobku má uspořádání vláken množství variant. Jednotlivé varianty jsou zobrazeny na obrázku 14.



Obrázek 1- geometrické znázornění tvaru, geometrie a délky výztuže [2]

1.1.1 Matrice

Matrice v kompozitních materiálech dělíme na kovové, polymerní a keramické (včetně skleněných a uhlíkových).

U kovových matric je charakteristická tvárnost a houževnatost. Nejčastěji jsou to lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu.

Keramické matrice v kompozitech jsou materiály lehké a většinou velmi tvrdé, avšak poměrně křehké. Kompozity s keramickými matricemi patří mezi vysoko teplotní materiály. Keramické matrice mohou být oxidické povahy (Al_2O_3 , ZrO_2 , oxidická skla atd.) i neoxidické povahy (SiC , Si_3N_4 , C atd.).

Nejčastěji se používají polymerní pojiva. Hlavní výhodou polymerních matric v kompozitech je nízká hustota, proto je jednou z jejich hlavních oblastí konstrukce letadel. Mezi nevýhody patří nízká tepelná stabilita polymerů. Jako matrice se nejčastěji používají nenasycené polyestery (UP), epoxidy (VE), vinylestery (VE), fenolické pryskyřice (PR) a další.

matrice	hustota (g/cm ³)	modul pružnosti v tahu (GPa)	pevnost v tahu (MPa)	deformace do lomu (%)
termosety	1.10-1.67	1.3-6.0	20-180	1-30
epoxy	1.1-1.4	2.1-6.0	35-90	1-10
polyestery	1.1-1.5	1.3-4.5	45-85	1-5
fenolické pr.	1.3	4.4	50-60	1-3
polyimidy	1.2-1.9	3.0-3.1	80-190	2-40
termoplasty	0.90-1.45	1.0-4.0	20-250	5-150
PP	0.90	1.1-1.5	28-41	10-700
PA	1.42	2.8-3.4	76-83	60-300
PC	1.21	2.1-2.8	62-76	110-130
PEEK	1.31	3.8	70	50-150

Obrázek 2- Vlastnosti vybraných matic [4]

1.1.2 Výztuže

Nejčastěji používanou výztuží ve vláknových kompozitech vyráběných tažením, navíjením i jinými technikami jsou skelná vlákna. První zmínka o skelných vláknech pochází z knihy Antonia Neri, publikované ve Florencii v roce 1612.

Výztuže v kompozitech slouží jako součást nosící zatížení a dodávají kompozitu pevnost a tuhost. V 60. a 70. letech prodělaly vláknové výztuže poměrně bouřlivý vývoj, kdy na trh přišla první komerční uhlíková vlákna. Ta měla vysoký modul pružnosti až 600GPa. Na konci 70.let se začala objevovat i další vlákna, která mají vysoký modul pružnosti v tahu 120-190GPa a navíc nejsou křehká. Mezi tato vlákna patří vlákna aramidová. Jsou to aromatické polyamidy komerčně nazývané jako Kevlar a vlákna z UHMW PE, komerčně nazývaná Dynnema v Evropě a Spectra v USA). V tabulce jsou shrnuty průměrné hodnoty mechanických vlastností nejběžnějších vláken. [4]

vlákno	hustota (g/cm ³)	modul pružnosti v tahu (GPa)	pevnost v tahu (MPa)	deformace do lomu (%)
<u>anorganická:</u>				
azbest	2.56	160	3100	1.9
sklo	2.54	70-85	2200-3500	2.5
borová vl.	2.65	420	3500	0.8
SiC	2.60	250	2200	0.9
uhlík	1.86	300-800	2700	0.7
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	3.2-3.9	300-414	1800-2000	0.3-0.8
<u>organická:</u>				
Kevlar 49	1.45	130	2900	2.5
Kevlar 29	1.45	60	2700	5.0
Kevlar 129	1.44	120	3000	3.0
Kevlar 149	1.45	190	2600	2.5
PE Spectra	0.97	172	3000	1.7
PBT	1.50	250	2400	1.5
Len	1.30	180	2600	3.1

Obrázek 3- Vlastnosti vybraných výztuží [4]

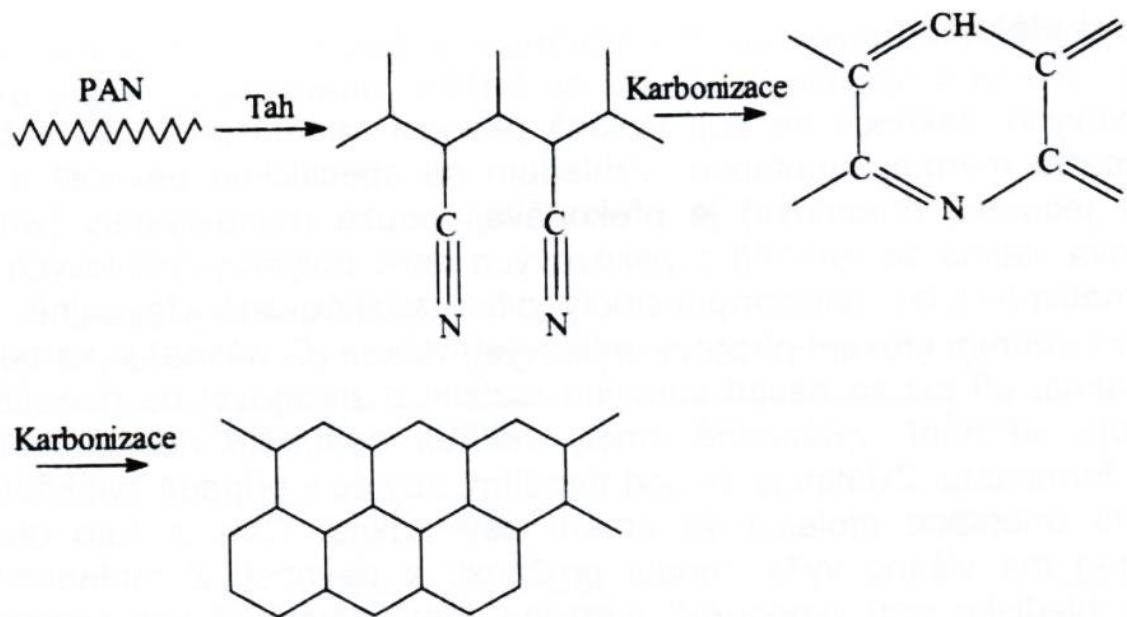
1.1.2.1 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna dosahují vysoké pevnosti, modulu pružnosti a tepelné odolnosti s nízkou měrnou hmotností. Uhlíková vlákna se vyrábějí z viskózních nebo polyakrylonitrilových (PAN) vláken a alternativně i z tzv. anizotropní smoly (pitch) zvlákněvané v tavenině.

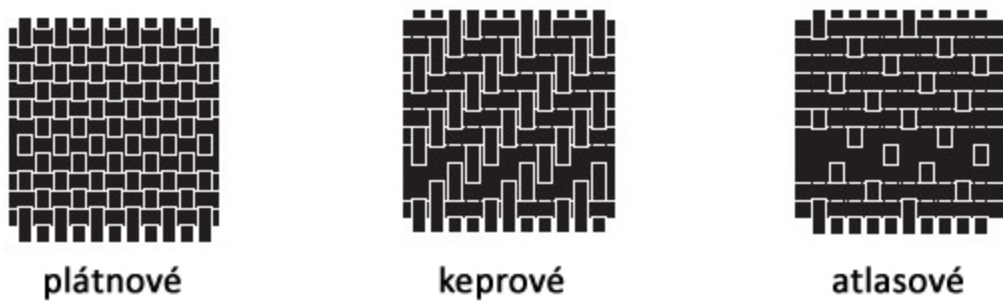
Počátečním krokem přípravy uhlíkových vláken, označovaných jako C-vlákna, je karbonizace primárního vlákna, při které se surovina nesmí roztavit ani zreagovat na jiné produkty. Z toho důvodu se provádí například provádí zesíťování opatrným naoxidováním zvlákněné smoly do netavitelného termosetu. Ke zvláknění dochází pod napětím, aby se ze smoly při zvláknění vytvořila orientace molekul ve směru osy vlákna. Čím dokonalejší je tato orientace, tím vyšší má vlákno modul pevnosti a modul pružnosti.

Uhlíková vlákna jsou z praktických důvodů obvykle dělena podle hodnot modulu pevnosti a pružnosti. Získaná vlákna při teplotách 900 °C až 1500 °C mají vyšší pevnost a nesou název vysoko pevnostní uhlíková vlákna podle anglického názvu HS - „high strength“. Následnou karbonizací vysoko pevnostních vláken při 2000 °C až 2800 °C se získávají grafitová vlákna. Ty dosahují vyššího modulu pružnosti v tahu. Jsou to vysoko modulová vlákna z anglického názvu HM - „high modulus“, ale dosahují nižší pevnosti v tahu. Tyto vlákna jsou dražší než vysoko pevnostní uhlíková vlákna. Na obrázku 17 je znázor-

ně chemický popis karbonizace PAN při výrobě grafitových vláken z PAN prekurzorů.
[4]



Obrázek 4- Chemický popis karbonizace PAN při výrobě grafitových vláken z PAN prekurzorů [4]



Obrázek 5- Schémata z vláken utkaných tkanin

Vlákno	Uhlíkové	Grafitové	Whisker (monokrystal)	Skleněné	Ocelové
Průměr [μm]	7-10	5-7	0.2	12-20	13
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,6	2,0	2,26	2,5	7,87
Pevnost v tahu [GPa]	2,5-3,5	2-2,5	20	3,5	4,2
Modul pružnosti [GPa]	250-300	400-500	500-1000	70-85	210
Měr. pevnost [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot 10^9$]	1,55-2,2	1-1,25	8,85	1,4	0,53
Měr. modul [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot 10^8$]	156-188	200-250	220-440	28	27
Tepl. tání [$^{\circ}\text{C}$]	3650	3650	3650	700	1400
Tepl. odolnost inert [$^{\circ}\text{C}$]	2000	2000	2000	500	
Tepl. odolnost vzduch [$^{\circ}\text{C}$]	350	350	350	300	

Obrázek 6-Vlastnosti vybraných druhů vláken [4]

1.1.3 Urychlovače a iniciátory

Nenasycené epoxidové pryskyřice se vytvrzují za studena za použitím iniciátoru, jenž umožňuje polymerační reakce a urychlovače, kterým lze průběh reakce kontrolovaně urychlit. Na pořadí přidávání složek do směsi nezáleží, musí se ale dbát na to, aby nedošlo k vzájemnému smíchání složek ještě před přidáním do směsi. [4]

1.2 Mechanika kompozitů

U vláknových kompozitů je velkou výhodou to, že je možné ovlivnit jejich pevnost a mechanické vlastnosti změnou prostorového uspořádání výztuže, jejího druhu (roving,

tkanina, rohož,) technologií výroby a poměru mezi obsahem výztuže. Při použití stejných základních komponentů pryskyřice a vlákna, můžeme efektivně vyrobit řadu různých materiálů. U klasických materiálů jako například dřevo, hliník nebo ocel taková vlastnost není, nebo je velmi omezená.

Mezi kompozitními materiály existují pojmy, které popisují strukturu a symetrii této struktury. Ty mají hlavní význam pro mechaniku vláknových kompozitů. Homogenní látka ta, která je jednofázová, jedno komponentní a její fyzikální vlastnosti jsou ve všech místech tělesa stejné. Heterogenní materiál je ten, který skládá ze dvou a více komponent nebo fází stejných komponent.

Další významnou vlastností kompozitů je symetrie jejich fyzikálních vlastností, která je odlišná od ostatních konstrukčních materiálů. Izotropní stav znamená, že materiálové vlastnosti jsou ve všech směrech stejné, nejsou tedy funkcí orientace. To je, že všechny roviny, které procházejí jedním bodem tělesa ze stejného materiálu, jsou roviny symetrie materiálových vlastností.

Ortotropní materiál je ten, který má ve všech vzájemně kolmých rovinách symetrické materiálové vlastnosti.

Teorie mechanické odezvy vláknových kompozitů mohou předpovídat jejich pevnost, tuhost, tepelnou roztažnost a dalším fyzikální parametry, jestliže jsou známy jejich objemové zastoupení, vlastnosti složek, geometrie a prostorové uspořádání výztuže s ohledem na vnější napětí a pevnost adheze mezi jednotlivými komponentami. Obvykle se mechanika dělí na mikro mechaniku a makro mechaniku.

Mikro mechanika se zabývá výpočtem vlastností laminy (kompozitní vrstvy) z odpovídajících vlastností jednotlivých komponent a z informací o geometrii, orientaci, uspořádání, mezifázové adhezi a objemovém zlomku výztuže. Mikro mechanické výpočty jsou důležité při odlaďování materiálových vlastností a dovolují vypočítat limitující faktory při zlepšování vlastností kompozitů. Srovnání experimentálně zjištěných vlastností s teoretickými limitami umožňuje smysluplně zjistit, zda daný kompozit již dosáhl své maximální hodnoty užitných vlastností nebo zda jeho schopnost nebyla zcela využita.

Makro mechanika se zabývá výpočtem vlastností mnohvrstvého kompozitu na základě vlastností jednotlivých vrstev z údajů o počtu, tloušťce, orientaci a uspořádání vrstev. Zároveň se zanedbává mikrostruktura kompozitu - heterogenita a u jednotlivých vrstev se uvažuje, že jsou homogenní a ortotropní. Makro mechanické výpočty se tak vztahují buď k

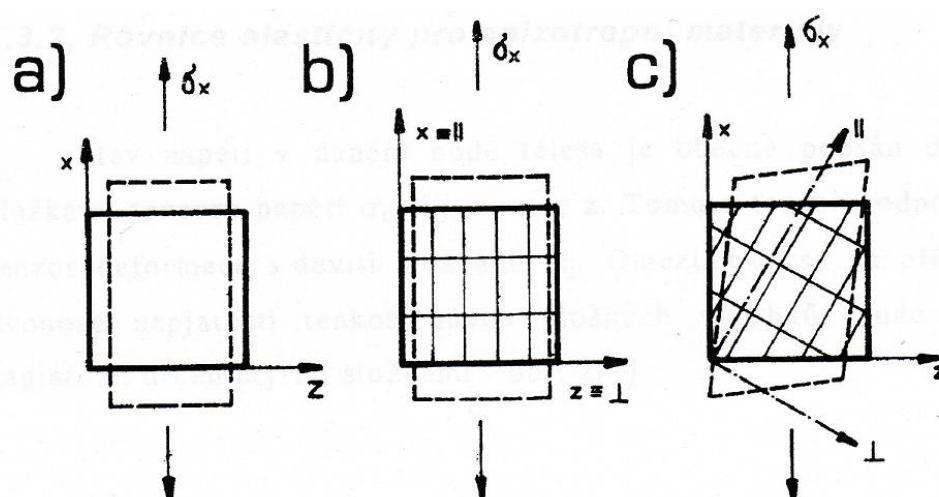
transformované lamině nebo ke konkrétnímu tvaru dílce či kompozitnímu profilu a převládajícímu způsobu namáhání.

Lomová mechanika je nový obor zabývající se předpovědí efektu přítomnosti defektů na pevnost materiálů homogenních izotropních materiálů. Lomová mechanika je spíše orientována do mikro mechaniky, kde se pomocí metod konečných prvků mohou spočítat kritické hodnoty napětí či deformace důležité pro dosažení mezního stavu (lomu) v požadovaném směru při zahnutí mikrostruktury kompozitu do výpočtů. [4]

1.2.1 Kompozit jako anizotropní materiál

Plošné výrobky vyztužené dlouhými vlákny jsou často z více vrstev, s úhlovým vrstvením několika vrstev - lamin. Každá lamina obsahuje většinou jedinou výztužnou vrstvu jednosměrnou či více směrnou, a je proto příliš tenká, než aby se jí dalo použít přímo k jakékoliv aplikaci. Struktura vzniklá kladením několika vrstev – lamin s různými vlastnostmi a orientací se nazývá laminát. Výsledné vlastnosti laminátu závisejí na jeho struktuře a vlastnostech jednotlivých lamin.

Obecně mohou být lamináty anizotropními materiály, to znamená: takovými, které vykazují různé mechanické vlastnosti v různých směrech. Je-li struktura plošného prvku souměrná ke dvěma navzájem kolmým osám, jedná se o zvláštní případ anizotropie vlastností nazývaným entropie.



Obrázek 7 – Mechanické chování a) izotropního, b) ortotropního a c) obecně anizotropního plošného prvku

Jednoosé napětí působí v izotropní vrstvě pouze podélnou a příčnou normálovou deformaci, úhly prvku zůstávají nezměněny. Podobně se jeví i ortotropní prvek, působí-li napětí ve směru některé osy symetrie jeho struktury. Obecně je však odezva materiálu různá ve směrech x a z , tj napětí, které působí ve směru x vyvolá odlišné hodnoty podélné a příčné deformace než stejné napětí, působící ve směru osy z . Osy souměrnosti ortotropního prvku jsou nazývány přirozenými osami. Pokud ve směru jedné z těchto os nepůsobí napětí, nevznikají jen normálové, ale i smykové deformace – prvek se chová jako anizotropní.

Specifickou vlastností anizotropních materiálů je, že normálová napětí vyvolávají obecně nejen normálové, ale i smykové deformace, smyková napětí pak nejen smykové, ale i normálové deformace. S tímto vzájemným ovlivňováním normálových i smykových efektů se u izotropních materiálů neseškává. Složitější mechanické chování v případě ortotropie a izotropie znamená, že počet elastických konstant bude vyšší než u izotropních materiálů. [5]

1.3 Způsoby výroby kompozitních vláknových materiálů

1.3.1 Ruční kladení

Jde o metodu ručního nanášení výztuže a pryskyřice na vhodně připravený povrch negativní nebo pozitivní formy. Podle toho, jaká forma je použita, se odvíjí i kvalita povrchu vytvrzené součásti. Na obrázcích jsou znázorněny jednotlivé fáze procesu: [4]

-Nanášení vosku na povrch formy.



Obrázek 8-Separace formy voskem

-Nanesení filmu epoxidové směsi na povrch formy.



Obrázek 9- nanášení směsi epoxidové pryskyřice s iniciátorem

-Pokládání vrstev tkaniny a následné její prosycení.



Obrázek 10-Kladení Tkaniny a prosycování

-Proces kladení se opakuje dokud nenaneseme a neprosytíme potřebný počet vrstev uhlíkové tkaniny.

- Po vytvrzení se kompozit odformuje a dodatečně upraví (např. zabroušením hran).

Mezi výhody ručního laminování patří jednoduchost operace, nízké finanční náklady, možnost vyrábět téměř neomezené rozměry a tvary výrobků.

Mezi nevýhody patří náročná lidská práce, kvalitní povrch je pouze z jedné strany, velké množství odpadu, který je jen těžko znovu zpracovatelný, nízká produktivita, kvalita výrobku závisí na zručnosti a znalostech pracovníka. [4]

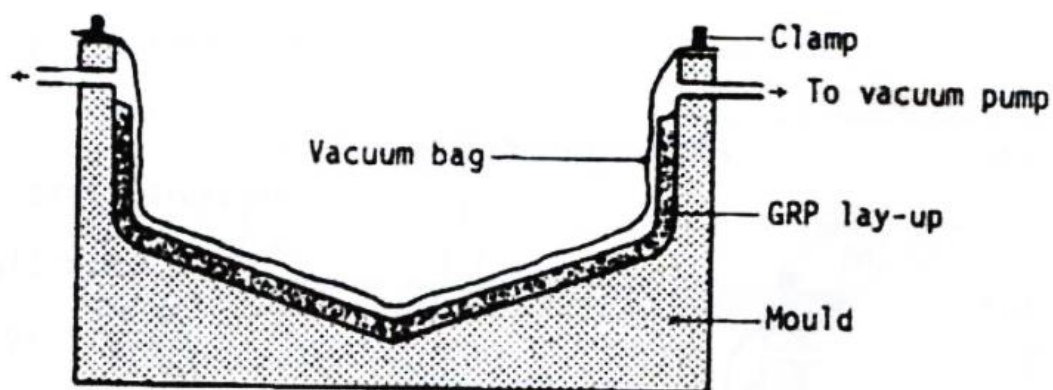
1.3.2 Metoda vakuového vaku

Je to zdokonalená metoda ručního kladení v konečném stupni vytvrzování. Na vhodný povrch ručně vyráběného kompozitu se položí tenký film nepropouštějící vzduch, dojde k evakuaci formy a tlak filmu vytlačí přebytečné bubliny.

Mezi výhody této metody patří možnost vytvořit součásti téměř bez vzduchových bublin, možnost použití většího objemu výztuží a zachování všech výhod ručního kladení,

Mezi nevýhody patří velký objem odpadu, nutnost náročné pracovní síly, a značná časová náročnost. Cenu výrobku navyšuje nemožnost zarovnání krajů výrobků ještě před vytvrzením

Používá se pro výrobu součástek pro vojenský a letecký průmysl, kde jsou potřeba dobré fyzikální vlastnosti a na ceně tolik nezáleží. [4]



Obrázek 11- Schéma metody odsávání vzduchu pomocí vaku [4]

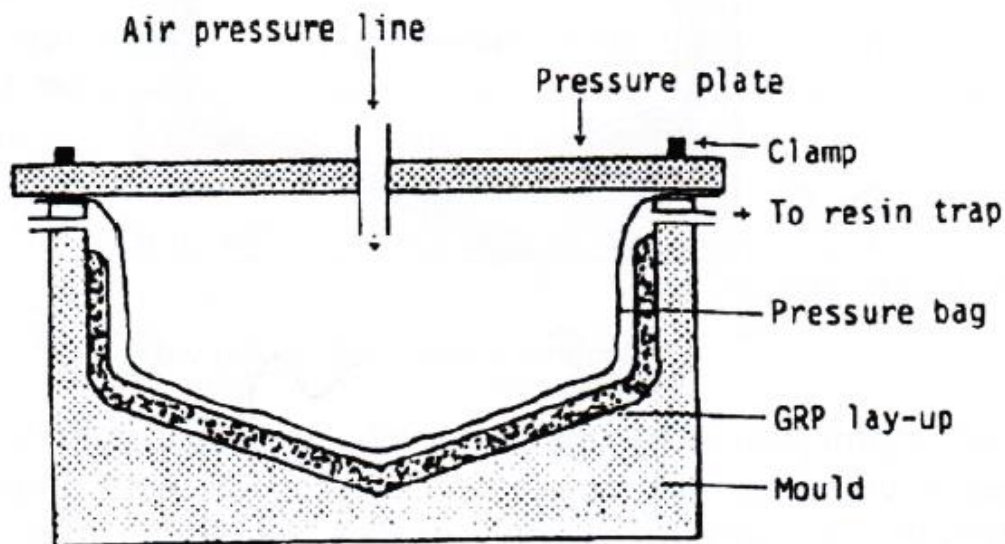
1.3.3 Metoda tlakového vaku

Je to zdokonalená metoda vakuového vaku. Na vhodný povrch ručně vyráběného kompozitu se položí tenký film nepropouštějící vzduch, dojde k evakuaci formy a tlak filmu vytlačí přebytečné bubliny. Přes vakuový pytel je ještě převlečen jeden tlakový pytel, který zlepšuje jeho účinek.

Mezi výhody této metody patří možnost vytvořit součásti téměř bez vzduchových bublin, možnost použití většího objemu výztuží, zachování všech výhod ručního kladení,

použití i pro sendvičové struktury a cylindrické díly. Touto metodou se dají vyrobit kvalitní součásti různých konvexních i konkávních tvarů.

Mezi nevýhody patří velký objem odpadu, nutnost náročné pracovní síly, a značná časová náročnost. Vysoká finanční náročnost tlakového pytle a cenu výrobku navyšuje nemožnost zarovnání krajů výrobků ještě před vytvrzením. [4]



Obrázek 12- schéma metody tlakového vaku [4]

1.3.4 Metoda vytvrzování v autoklávu

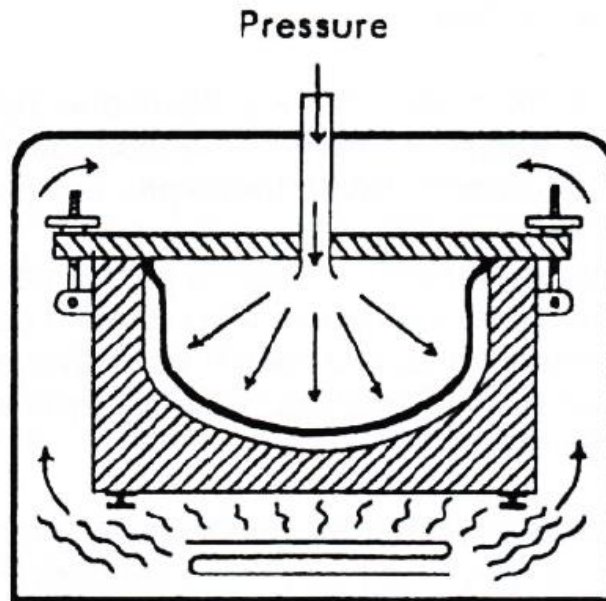
Je to zdokonalená metoda tlakového pytle. Podstatou metody je vytvrzení materiálu pomocí tlaku a tepla v autoklávu (uzavřené nádobě) s přesně nastavenými řízenými parametry vytvrzování. Jednotlivé kroky procesu jsou zde popsány:

1. Do formy se připraví kompozit stejným způsobem jako u metody vakuového pytle.
2. Připravený výrobek se vloží do autoklávu.
3. Dochází k vytvrzení výrobku působením tlaku a tepla.
4. Součást se vyjme, sundá se z ní vakuový pytel a součást je hotová.

Mezi výhody patří další zvětšení objemu výztuží, možnost použití jader pro snížení hmotnosti, v jednom cyklu můžou být použity další součásti, v jednom autoklávu může být vytvrzeno více součástí najednou.

Mezi nevýhody patří vysoká finanční náročnost autoklávu, značná náročnost metody, a velikost součástí je omezena velikostí autoklávu. Materiál forem musí být kvalitnější a ten je dražší, než materiál použitý v předchozích metodách. Při výrobě vzniká velké množství odpadu.

Používá se při výrobě částí křidel letadel, trysky raket, teplotní štíty, nosů letadel, elektronických součástek. [4]



Obrázek 13- schéma metody autoklávu [4]

1.3.5 Navíjení

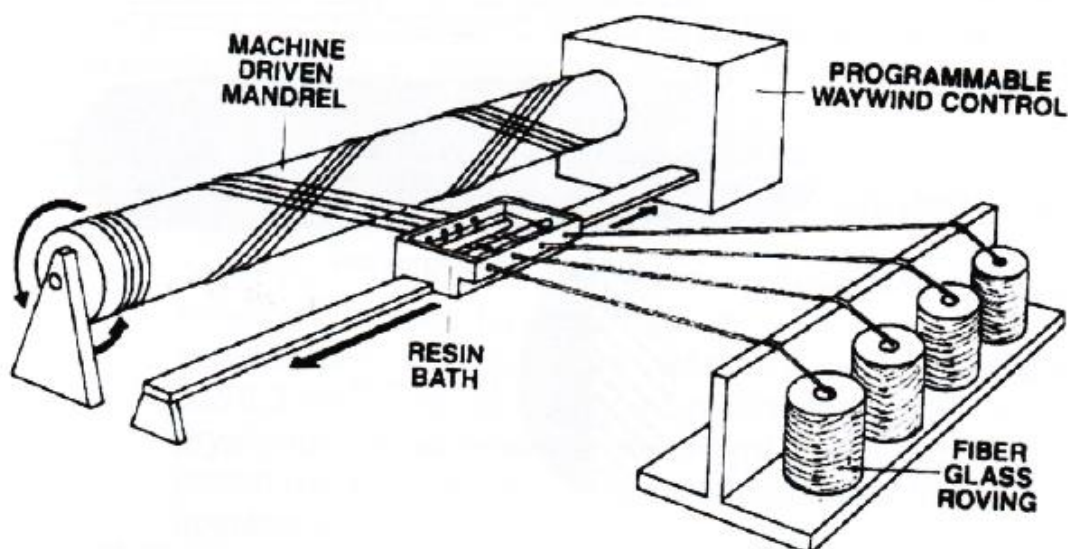
Jde o kontinuální navíjení svazku vláken nebo jiným způsobem upravených výztuží na smrštitelnou kruhovou formu. Navíjená vlákna jsou buď přímo navlhčena pryskyřicí nebo se navlhčí až po navinutí. Vlastností, které po kompozitu vyžadujeme dosahujeme uspořádáním a orientací výztuží a vláken. K vytvrzení dochází na jádru, které se následně z vytvrzeného tělesa odstraní. V následujících bodech je popsán technologický postup výroby:

1. jádro se usadí do rotačního zařízení, které po ukončení procesu zůstane součástí výrobku, nebo se na závěr z výrobku odstraní.
2. Navinou se výztuže, které mají dané složení orientace, naprogramované předpětí a jiné.

3. Při navíjení se mění stopa podle požadavků tvaru a rozměru výrobků až do ukončení navíjení.
3. Poté se kompozit spolu s jádrem vloží do pece, kde se při neustálé rotaci vytvrzuje.
5. V posledním kroku je jádro vyjmuto a výrobek je hotov.

Velkou výhodou je využití rovingu, což je levnější forma výztuže. Proces je vysoce produktivní a může být značně automatizovaný.

Mezi nevýhody patří vysoké náklady navíjecích strojů a náročné odstraňování vnitřních forem. [4]



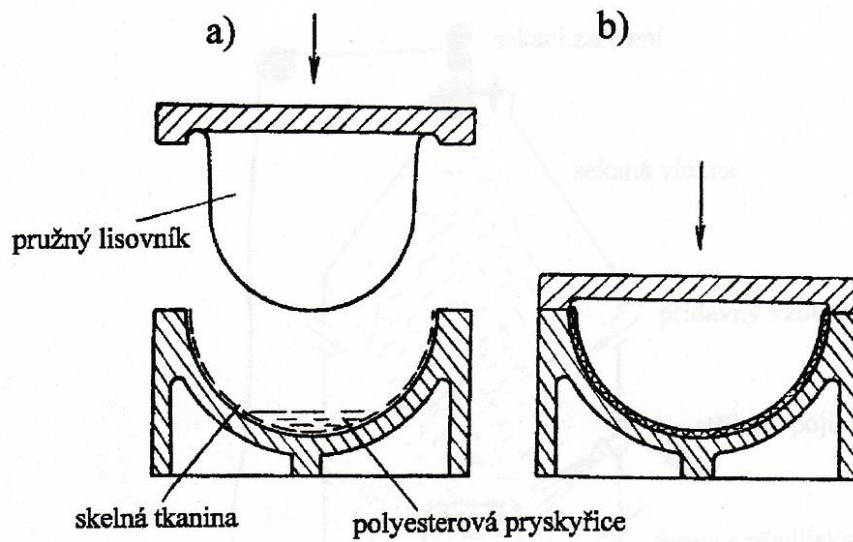
Obrázek 14- schéma navíjecího zařízení [4]

1.3.6 Metoda lisování ve formě

Tato metoda výroby je vhodná pro hromadnou výrobu dílců. Do forem se umístí všechny komponenty jako jsou výztuže, pryskyřice, plniva, barviva, aditiva, separační činidla, vnitřní mazadla a jiné. Následně se forma uzavře a za působení vyššího materiálu se roztéká a vyplňuje prostor formy ve tvaru konečného výrobku. Následně se materiál vytvrdí. Popis výrobních kroků:

1. Do lisu se vloží vyhřátá forma s předepsaným tlakem, rychlostí uzavírání, kapacitou, teplotou atd.

2. Do otvoru formy se vloží vstupní materiál a forma se uzavře.
3. Po vytvrzení se forma vyjme z lisu a výrobek vyňat, forma se vyčistí a je připravena pro další výrobní cyklus [4]



Obrázek 15- Schéma lisování kompozitních materiálů

2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU

U kompozitních materiálů nedochází k tak výrazné změně vlastností v závislosti na teplotě, podmínkách prostředí, době zatížení tak jako u nevyztužených plastů.

Na jejich chování při mechanickém namáhání má největší vliv rozložení vláken nebo plniva, jejich orientace a zakřivení, obsah vláken a vytvrzení matrice. Proto je nezbytně nutné při srovnávání brát v úvahu velikost obsahu vláken.

Porušení, případně únavové procesy, jsou u vyztužených plastů mnohem složitější než u homogenních materiálů, např. kovů nebo nevyztužených plastů. U těchto materiálů určuje např. vznik, případně rychlost šíření jednotlivé trhliny, stav poškození, a tím vlastně i životnost materiálu.

U dynamických i statických zkoušek pevnosti kompozitů dochází k lokálnímu poškození různého typu, které způsobuje narušení nosných vláken. Následně dochází k úlnému zlomení materiálu.

Převážně ve vrstvách, kde se může vyskytnout nebezpečí vzniku mezi vláknového defektu, například při zatížení smykem pod úhlem 45° nebo při zatížení tahem kolmo ke směru vláken, může dojít ke vzniku trhlin, které se negativně projeví i u vrstev zatížených ve směru vláken. To znamená, že vrstvy, které mají orientovaná vlákna pod úhlem 0° ke směru zatížení samy vykazují vyšší pevnost než ty samé vrstvy ve spojení s vrstvami, které mají orientovanou výztuž od úhlem 90° ke směru zatížení, ve kterých dochází k prvnímu porušení. Při zatížení tlakem je v takovém případě snížena místní schopnost podepření vláken maticí, a může dojít v tomto místě k vybočení. Při namáhání tahem se lokálně přerozdělují napětí a dochází ke vzniku vrubových napětí ke koncentracím napětí a k vrubovému působení v přilehlých vrstvách. Zároveň se zvětšuje i upínací délka podle významu 3. Paradoxu. Jelikož v materiálu dochází k působení různých lokálních poškození, a k následnému vzniku dalších poškození, jsou při dynamickém namáhání míjivá namáhání vhodnější než střídavá.

Výsledky měření jsou obvykle ovlivňovány okrajovými podmínkami vlastní techniky provedení zkoušek.

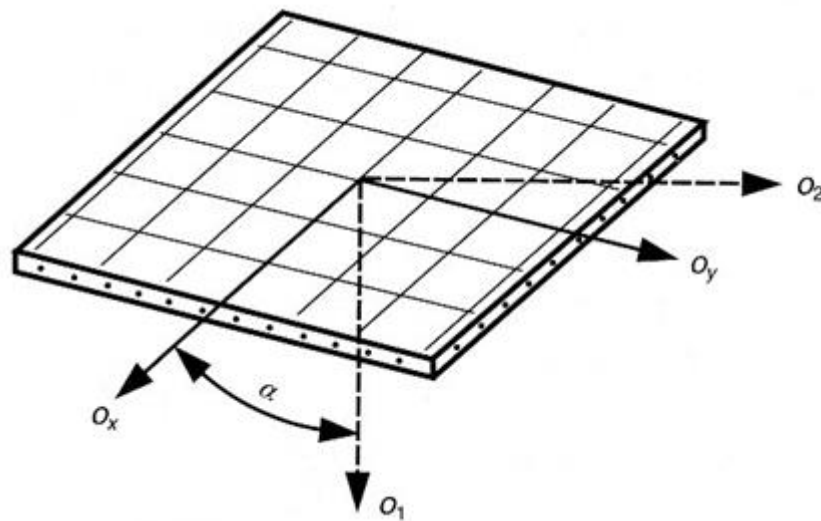
V místě působení síly dochází k prvním deformacím a k bránění v příčné kontrakci. Tímto se u tuhých a vysokopevných kompozitů s anizotropními vlastnostmi vyvolává zvý-

šený stupeň trojrozměrné napjatosti v místě poblíž upnutí zkušebního tělesa a výsledek zkoušky může být výrazně ovlivněn.

U zatížení kompozitů vícerym namáháním hrozí větší nebezpečí vzniku mezivláknového porušení než při namáhání ve směru vláken u jednosměrně vyztužených vrstev. Vznik poškození je závislý na druhu zatížení. Nestejnoměrnosti v uspořádání vláken, nedostatky v adhezním spojení složek, vzduchové bubliny, se projevují jako napětí a koncentrace protažení. Podle typu zatížení může dojít ke vzniku různých druhů prasklin a trhlin.

Vyztužené plasty vzniknou až při výrobě konstrukčního dílu a vykazují značnou anizotropii a nehomogenitu. Na to musí být brán ohled nejen při zjišťování jejich vlastností, ale také při výrobě zkušebních těles. Kvůli anizotropii je k charakterizování vyztužených plastů nutný větší počet hodnot než u nevyztužených plastů.

Vyztužené plasty jsou pro svou vysokou pevnost vhodné pro tenkostěnné konstrukce, které se nacházejí v takzvaném stavu rovinné napjatosti. Tato napjatost existuje například v desce, která je zatížena silami působícími v její rovině [16].



Obrázek 16 – Znáornění hlavních os (o_x, o_y) ortotropního materiálu[16]

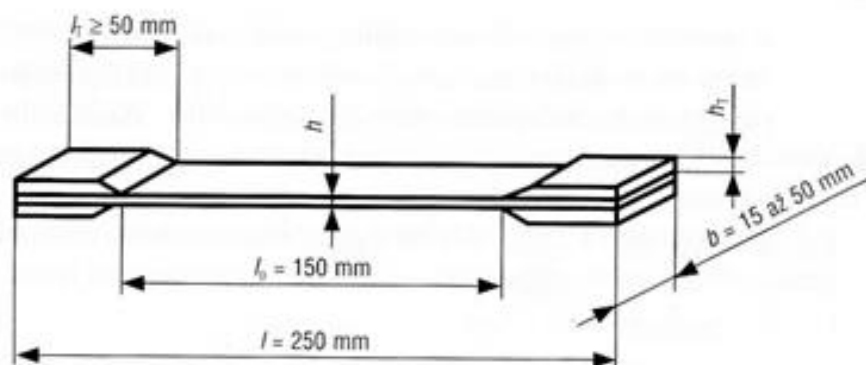
2.1 Statické zatížení kompozitu

Charakteristiky pevnostní vykazují výraznější anizotropii než charakteristiky elasticke. Je to způsobeno tím, že pevnost nezávisí pouze na vlastnostech složek, ale také výrazně

závisí na jejich vzájemné adhezi. Zatímco elastické charakteristiky jsou podle normy obvykle měřeny při nízkých zatíženích, při nichž vlivy struktury (bubliny, nedostatečná adheze, zbytková napětí) nemají význam, zobrazí se tyto vlivy při vysokých zatíženích u pevnostních zkoušek. To vede k rozdílným výsledím naměřených hodnot. Z těchto důvodů u vícere napjatosti není možné odvodit žádné srovnávací napětí jako u materiálů izotropních. Předpoklady porušení u vyztužených plastů musí brát v úvahu různé druhy porušení v rozdílných směrech zatížení i vzájemnou pevnost vrstev kompozitu mezi sebou, například interlaminární smyk. U izotropních materiálů, které mají materiálovou symetrie, jde o dvě srovnávací napětí. U transversálně izotropní jednosměrně vyztužené vrstvy je pro vyjádření pevnostní podmínky potřeba znát pět pevnostních charakteristik a v případě ortotropního materiálu šest nebo devět charakteristik [9].

2.1.1 Zkouška tahem

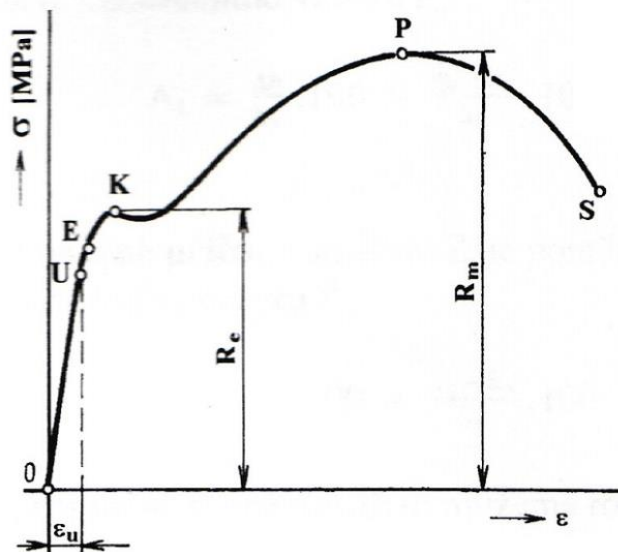
U zkoušky tahem pro kompozity je navržena spousta geometrií a tvarů zkušebních těles a jsou popsány v příslušných normách (například ČSN EN ISO 527-1 až 5), zohledňujících stavbu kompozitu. U kompozitů vyztužených formou tkaniny a jednosměrně vyztužených kompozitů se pro zkoušky tahem používají prizmatická tělesa, které mají zesílená místa v místě upnutí.



Obrázek 17- zkušební těleso pro zkoušku tahem[16]

Místo zesílení by mělo být z materiálu, který má stejný modul pružnosti jako modul pružnosti zkušebního tělesa a zesílení má být zkoseno na konci ve směru k měrné délce tělesa, aby se vliv koncentrace napětí snížil. Na vzorek působí síla smykem přes vrstvu lepidla. K lomu musí dojít v rozmezí měrné délky, a nejméně 10 mm od konců míst zesílení.

Pevnost v tahu v kolmém směru na vlákna se měří na vinutých plochých zkušebních tělesech. Pro zjištění elastických vlastností musí být zkušební tělesa vyříznuta přesně v ose ortotropie ze zkušební desky. Zatěžující rychlost v minutách, je jedno procento délky tělesa, a přitom maximální deformace nemá přesáhnout půl procenta, aby oblasti, kde vzniká poškození, neovlivnily zkoušku. V průběhu zkoušky kreslí trhací pracovní diagram závislosti zatěžující síly F na změně délky ΔL . Ve vytvořeném diagramu se nachází několik významných bodů a jim odpovídajících napětí.



Obrázek 18- Pracovní diagram [9]

U této zkoušky zjišťujeme:

Pevnost v tahu R_m - Neboli mez pevnosti v tahu. Je to největší napětí, které zkušební vzorek snesl a je dáno podílem největší zátěžné síly F_{max} a původního průřezu vzorku S_0 .

$$R_m = F_{max} / S_0 \text{ [MPa]}$$

Pevnost v kluzu R_e - je napětí, při kterém se začne se zkušební těleso výrazně prodlužovat, aniž by stoupala zatěžující síla, nebo při něm nastává prodlužování a zatěžující síla klesá. $R_e = F_k / S_0 \text{ [MPa]}$

Poměrné prodloužení ε - je to poměr změny délky zkušebního tělesa $\Delta L = L_u - L_0$ k původní délce zkušebního tělesa L_0 . $\varepsilon = \Delta L / L_0 \text{ [-]}$

Tažnost A - je to poměrné prodloužení vyjádřené v procentech. $A = \varepsilon \cdot 100 \text{ [%]}$

Zúžení Z – je to poměr změny průřezu vzorku $\Delta S = S_0 - S_u$ k původnímu průřezu tyče S_0 . Je vyjádřeno v procentech. $Z = (\Delta S / S_0) \cdot 100$ [%]

Charakteristické body:

Mez úměrnosti U – Do meze úměrnosti je napětí přímo úměrné deformaci. Platí zde Hookův zákon. V diagramu je oblast mezi body 0 a U tvořena přímkou.

Mez pružnosti E – je to smluvní hodnota napětí vyvolávající trvalou deformaci určité velikosti. Zjišťování této meze je obtížné a zdoluhavé. V praxi se stanovuje napětí způsobující trvalou deformaci o velikosti 0,005% L_0 .

Mez kluzu K – napětí, při němž se zkušební těleso začne výrazně prodlužovat, aniž by stoupala zatěžující síla. U některých materiálů se neprojevuje výrazná mez kluzu a proto se jako smluvní hodnota meze kluzu bere napětí způsobující trvalé prodloužení 0,2%.

Mez pevnosti P – nejvyšší napětí, které zkušební těleso vydrželo.

Bod S - místo, ve kterém dojde k přetržení zkušební tělesa [9].

2.1.2 Zkouška tlakem

Při zkoušce tlakem jednosměrně vyztužených kompozitů hrozí nebezpečí ztráty stability.

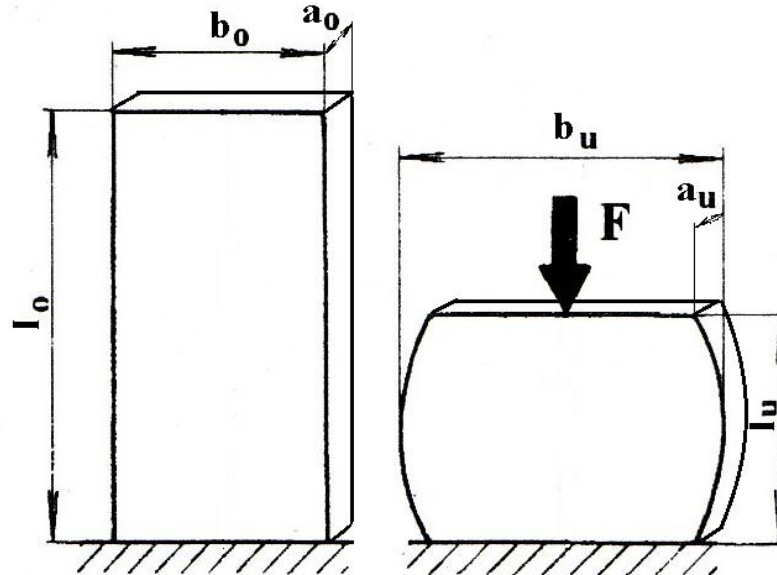
Proto musí být zkušební těleso pečlivě navrženo. Vhodné jsou přípravky, které zajišťují symetrické zatížení, například pravoúhlá prizmata, válce nebo trubky.

Při dobré adhezi vlákna s matricí nastává lom vlivem smyku, při špatné adhezi nastává lom vlivem delaminace.

Aby nedošlo k rozvrstvení v kontaktní rovině se zatěžovacím zařízením, existují různé opěrné přípravky, které vylučují vybočení zkušební tělesa.

U zkoušky tlakem je náročné realizovat v celém zkušebním tělese čistý stav napjatosti v průběhu celé zkoušky. Plochy, které způsobují vnější zatížení, musí být rovnoběžné a zcela rovné. Tloušťka stěny zkušební tělesa musí být po celé délce stejná, jinak hrozí ztráta stability. Přístupnost k měřené oblasti musí být dobrá a musí být zajištěny jednoznačně homogenní stavy napjatosti i přetvoření.

U zkušebních těles pro zkoušku tlakem se dá zvýšit stabilita zesílením v koncových místech. Tvar zesílení vzorku může mít vliv na výsledné hodnoty, obvoláš při zkoušce za vyšších teplot.



Obrázek 19 – zkušební vzorek před a po zkoušce tlakem[9]

U této zkoušky zjišťujeme:

Pevnost v tlaku R_{mt} - Je poměr největší zátěžující síly F_{max} v momentě, kdy se zkušební těleso poruší nebo stlačí na určitou hodnotu k původnímu průřezu zkušebního tělesa. $R_{mt} = F_{max} / S_0$ [MPa]

Poměrné zkrácení A_t - Je poměr zkrácení zkušebního tělesa $\Delta l = l_0 - l_u$ k původní délce zkušebního tělesa h_0 . $A_t = (\Delta h / h_0) \cdot 100$ [%].

Poměrné příčné rozšíření Z_t - Je poměr změny průřezu $\Delta S = S_u - S_0$ k původnímu průřezu zkušebního tělesa S_0 . $Z_t = (\Delta S / S_0) \cdot 100$ [%] [9]

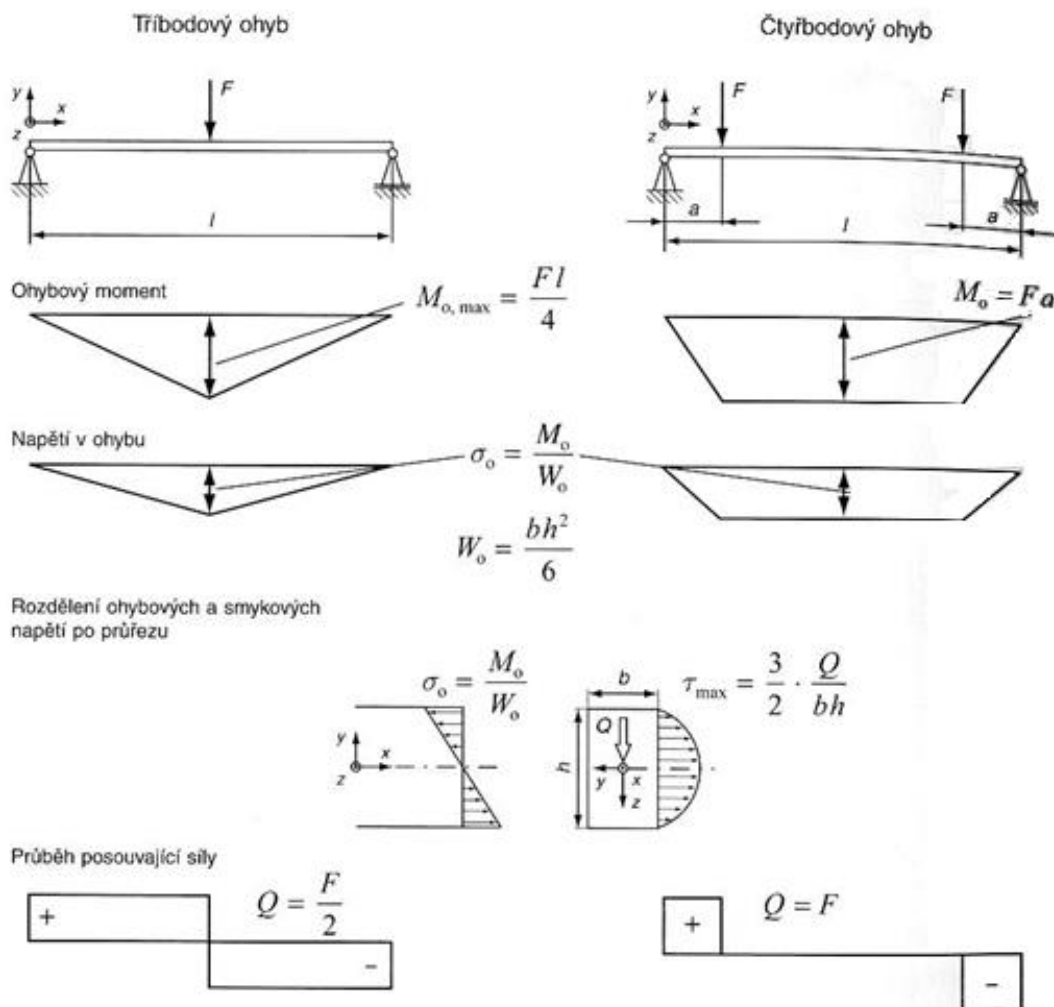
2.1.3 Zkouška ohybem

Při zjišťování pevnostních a elastických charakteristik zkouškou ohybem se předpokládá rovnoměrné rozložení normálních napětí po průřezu zkušebního tělesa. Hodnoty pevnosti v ohybu jsou výrazně závislé na poloze vláken vzhledem k neutrální rovině.

Ohybová zkouška probíhá ve třibodovém nebo čtyřbodovém uložení. U zkoušky čtyřbodovým ohybem je ta výhoda, že ohybový moment M_o je konstantní po celé délce rozteče uložení zkušebního tělesa, což má význam při zjišťování modulu pružnosti v ohybu.

U zkoušky třibodovým ohybem nastává ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu uprostřed délky tělesa. Největší smykové napětí je uprostřed tloušťky tělesa mezi vrstvami.

Získané hodnoty slouží v první řadě ke srovnání. Také je nezbytné zjistit způsob porušení. Jediný dovolený druh porušení ohýbaného zkušebního tělesa je porušení lomem vyvolaným tahem nebo tlakem. Pro zkoušku ohybem slouží několik norem pro různé druhy vyztužení. [9].



Obrázek 20- Průběh ohybových momentů při zkoušce tří- a čtyřbodovým ohybem[16]

U této zkoušky zjišťujeme:

Pevnost v ohybu R_{mo} – je to poměr největšího ohybového momentu $M_{o_{max}}$ a modulu průřezu v ohybu W_0 . Je to nejvyšší napětí, které zkušební těleso uneslo a dochází k přelomení. $R_{mo} = M_{o_{max}} / W_0$ [MPa]. Ohybový moment je $M_{o_{max}} = (F.l)/4$ [N.mm], modul průřezu v ohybu pro kruhový průřez $W_0 = (b.d^3)/32$ [mm³] a pro obdélníkový průřez je modul průřezu $W_0 = (b.h^2)/6$ [mm³].

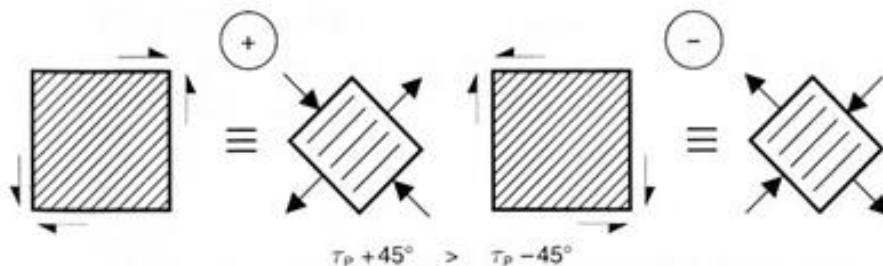
Poměrný průhyb ϕ – Je poměr mezi absolutním průhybem v okamžiku lomu y_p , měřeným uprostřed zkušebního tělesa ve směru působící síly, a délky zkušebního tělesa L . $\phi = y_p / L \cdot 100$ [%][9]

2.1.4 Zkouška smykem

Zkouška slouží ke zjištění pevnosti kompozitního materiálu ve smyku na směru zatížení.

Jednosměrně vyztužený laminát má výrazně větší pevnost ve směru vláken, než ve směru kolmém na vlákna. U tlakového namáhání je to naopak. Existuje tedy závislost pevnosti ve smyku na směr namáhání.

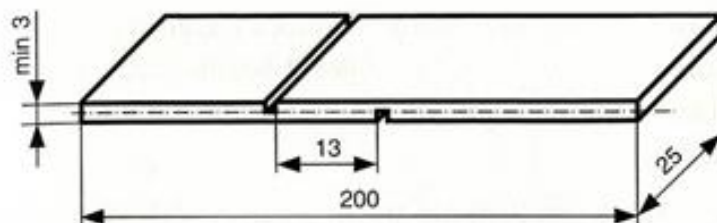
Pokud je jednosměrný laminát zatížen smykovým napětím, které působí ve směru skloněném ke směru vláken o úhel 45 stupňů, tak ve směru rovnoběžném a směru příčném k vláknům působí jen napětí normálová. Pokud působí smykové napětí ve směru znázorněném jako +, tak je příčné namáhání tlakové. Ve směru znázorněném jako – jde o napětí tahové. To znamená, že pevnost ve smyku je v prvním případě větší než v případě druhém.



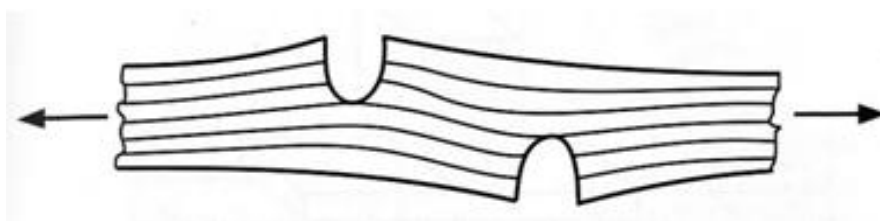
Obrázek 21- Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení[16]

Uskutečnit namáhání materiálu čistým smykem je náročné, nejideálnější jsou zkušební tělesa ve tvaru trubky namáhané na krut.

Jednou z vlastností kompozitů ovlivňujících jejich kvalitu je mezivrstvá-interlaminární pevnost ve smyku. Ke zjištění této vlastnosti se používají zkušební tělesa, která minimalizují vliv ohybové tuhosti.

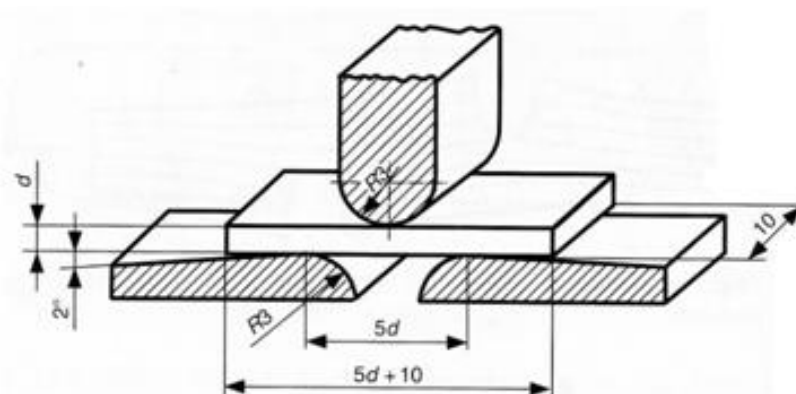


Obrázek 22- Zkušební těleso ke stanovení interlaminární pevnosti ve smyku [16]



Obrázek 23- Ohybové přetvoření zkušebního tělesa pro určení interlaminární smykové pevnosti [9]

Interlaminární pevnost ve smyku mezi jednotlivými vrstvami laminovaných kompozitů nebo jednosměrně vyztužených laminátů můžeme zjistit na krátkém zkušebním tělese namáhaným třibodovým ohybem zkouškou Short-Beam Test dle normy (ČSN EN ISO 14130). U této zkoušky vzniká lom vlivem maximálního smykového napětí, které působí v neutrální rovině krátkého nosníku.



Obrázek 24-Zkouška říbodovým ohybem ke stanovení interlaminární smykové pevnosti [16]

Zkouška smykem se používá ke kontrole kvality, pro konstrukční použití už nemá takový význam. Z toho důvodu mluvíme o zdánlivé interlaminární smykové pevnosti.

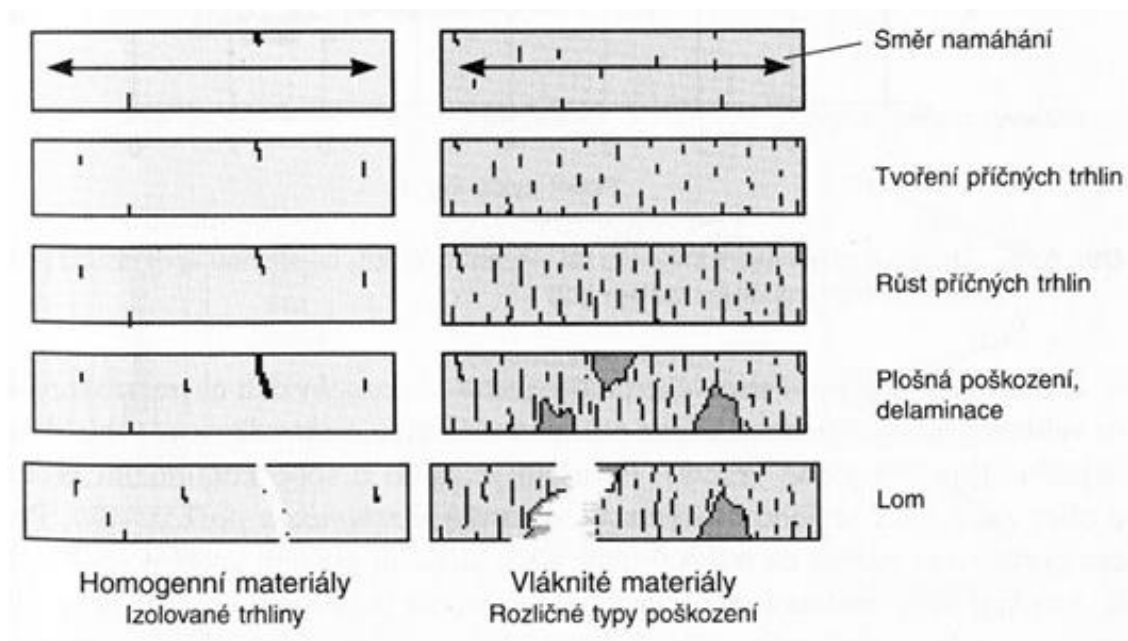
U zkoušky Short-Beam je pro znázornění maximálního ohybového napětí a smykového napětí v neutrální ose nosníku potřeba zvolit co nejkratší rezteč podpor uložení I a velký poměr tloušťky vzorku h k rozteči uložení.

Proto zkušební těleso musí být vysoké a krátké, aby nenastal lom vlivem ohybového namáhání.

Pouze při třibodovém ohybu působí pro příčné smykové napětí po celé délce zkušební tělesa relativní příčná síla. Proto má význam provádět měření, u kterého je rozhodující smykové napětí, na přípravku pro třibodový ohyb. Získanou hodnotu můžeme považovat za interlaminární smykovou pevnost jen tehdy, když dojde k porušení čistým smykem v jedné nebo více rovinách kompozitu. Pokud nastane kombinace porušení stříhem, tlakem nebo tahem, nejedná se o pevnost ve stříhu [9].

2.2 Dynamické zatížení kompozitu

Kompozity vyztužené dlouhými vlákny mají výhodu v tom, že umožňují optimalizaci jejich struktury s ohledem na předpokládaný způsob namáhání, ale kvůli jejich mikroskopicky i makroskopicky heterogenní struktuře (směrově závislé mechanické charakteristiky, náhlé změny tuhosti na rozhraní vláken a matrice a mezi různými vrstvami) je výrazná rozdílnost ve způsobu a průběhu porušování. U homogenních materiálů, jako například kovů nebo nevyztužených plastů, se nevyskytují tyto mechanismy poškozování. To mnohdy konstruktérům zvyklým pracovat s izotropními materiály činí problémy správně pochopit a objasňovat chování kompozitních materiálů při únavovém namáhání. U kovových materiálů je charakteristické, že při cyklickém namáhání se vytvoří trhlinka, která se lokálně šíří a její kritická velikost a růst se dá vysvětlit aparátem lomové mechaniky. U kompozitních materiálů vyztužených vlákny se při poškozování dynamickým namáháním rozvíjejí a vznikají různé typy defektů ve velkém objemu materiálu, které jednotlivě nemají tak velký význam jako prasklina v homogenním kovovém materiálu. V kompozitu se může šířící se trhlinka zastavit o sousední složku seriálu s vyšší pevností.



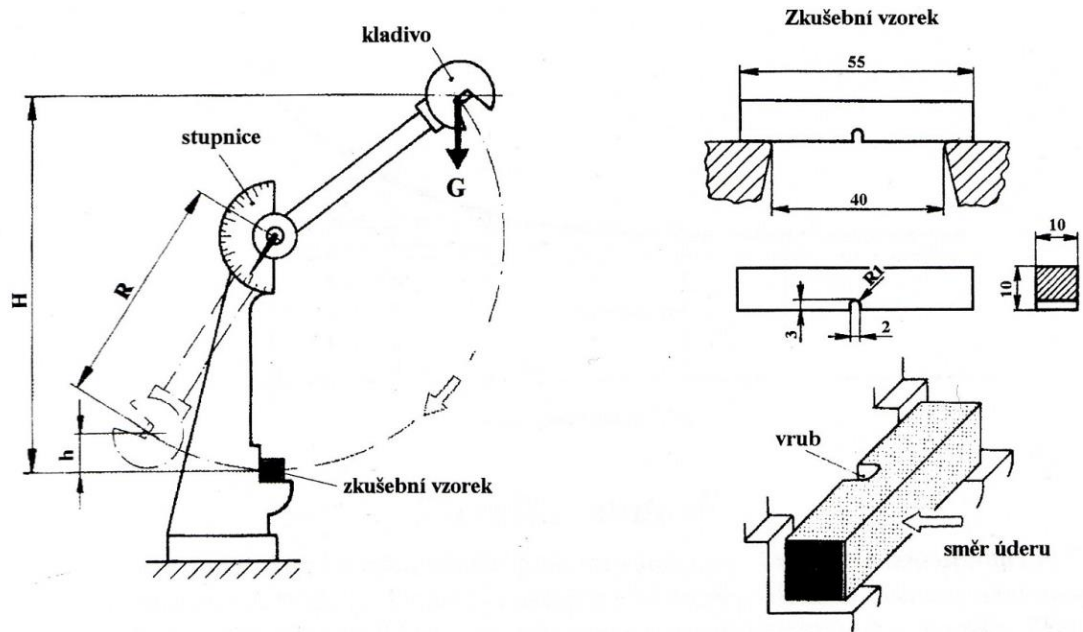
Obrázek 25 – Průběh poškození u homogenních a vláknitých materiálů [16]

U vlákniny vyztužených kompozitů se vyskytují tyto typy poškození (obrázek 10) a jsou rozděleny do těchto skupin:

- poškození vazby vlákna a matrice
- prasklina v matrici
- porušení vlákna - lom
- poškození vazby mezi jednotlivými vrstvami, především u vícevrstvých materiálů při postupujícím procesu únavy [9]

2.2.1 Zkoušky rázové

Rázové zkoušky slouží ke zjištění houževnatosti materiálu. Spotřebovaná energie k porušení zkušební tělesa udává měřítko houževnatosti. Stejně jako zkoušky statické se mohou provádět namáháním v tahu, ohybu tlaku, a krutu. Mezi nejpoužívanější a nejznámější patří rázová zkouška v ohybu. Houževnatá zkušební tělesa se opatřují vrubem, protože jinak by důsledkem vysoké houževnatosti nedošlo k porušení materiálu. Zařízení pro měření vrubové houževnatosti se nazývá Charpyho kladivo. Průběh zkoušky je následující: kladivo o hmotnosti G se zvedne a upevní se v počáteční poloze H . V nejnižší položení bodě dráhy se umístí zkušební těleso. Jakmile se kladivo uvolní, přerazí zkušební těleso a vychýlí se do konečné polohy h [9].



Obrázek 26 – Charpyho kladivo a zkušební vzorek [9]

U vlákniny vyztužených materiálů a plastů se jako zkušební těleso pro rázovou zkoušku používá pásek o délce l , šířce $b=10\text{mm}$ a tloušťce 4mm . Zkušební těleso se uloží ve svislé nebo vodorovné podle požadavků zkoušky.

U této zkoušky zjišťujeme:

Nárazová práce KU – Je to práce spotřebovaná po přeražení zkušební vzorku,
 $KU = G \cdot (H-h) \text{ [J]}$.

Vrubová houževnatost KCU – je to podíl nárazové práce KU a původního průřezu tělesa S_0 $KCU = KU / S_0 \text{ [J/cm}^2 \text{]}$.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je studium mechanických vlastností kompozitů vyrobených z tkaniny KORDCARBON dodané firmou Kordárna Plus a.s. K dispozici jsou dva druhy uhlíkových tkanin a čtyři druhy epoxidových pryskyřic.

Úmyslem bylo zjistit, jak se uhlíkové tkaniny chovají při zpracování, zjistit jaké mechanické vlastnosti má jako kompozit spolu s jednotlivými pryskyřicemi. Záměrem také bylo zjistit, která pryskyřice je pro výrobu kompozitních dílů nejvhodnější.

Cíle práce:

- Výroba zkušebních těles ručním laminováním dle normy ČSN EN 2374.
- Experimentální měření vlastností v tahu dle normy ČSN ISO 527-4
- Experimentální měření ohybových vlastností dle normy ČSN EN ISO 178.
- Experimentální měření tlakových vlastností dle normy ČSN EN ISO 604.
- Experimentální měření rázové houževnatosti v tahu dle normy ČSN EN ISO 8256.
- Experimentální měření rázové houževnatosti dle normy ČSN EN ISO 179-1
- Experimentální měření chování kompozitů při víceosém rázovém namáhání dle normy ČSN EN ISO 6603-2.
- Zhotovení teoretického modelu dané struktury.
- Vyhodnocení výsledků

4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

4.1 Použité materiály

4.1.1 Uhlíkové tkaniny

Pro výrobu zkušebních těles byly použity dvě uhlíkové tkaniny dodané firmou Kordárna Plus a.s., která tyto tkaniny přímo vyrábí. Vlákná s označením FT300B-3000-40B jsou dodávána od společnosti TORAY. Toto vlákno dosahuje pevnosti v tahu 3805 MPa a modulu pružnosti v tahu 232 GPa.

První uhlíková tkanina má vazbu plátno, hmotnost 200 g/m² a označení CC200 KORDCARBON.



Obrázek 27- Uhlíková tkanina KORDCARBON, vazba plátno

Druhá uhlíková tkanina má vazbu kepr, hmotnost rovněž 200g/m² a označení CC200 KORDCARBON.



Obrázek 28-Uhlíková tkanina KORDCARBON, vazba kepr

4.1.2 Matrice

Jako matrice byly použity čtyři druhy epoxidových pryskyřic spolu s tužidly od různých dodavatelů s různými vlastnostmi.

Epoxidová pryskyřice **Havel L285 s tužidlem H285**, poměr míchání 100:40, viskozita při 25°C je 600-900 [mPa.s]

Epoxidová pryskyřice **Biresin CR82 s tužedlem Biresin CH80-1**, poměr míchání 100:27, viskozita při 25°C je 1600 [mPa.s]

Epoxidová pryskyřice **GRM systém LG 700 s tužidlem HG 700**, poměr míchání 100:30, viskozita při 25°C je 800-900 [mPa.s]

Epoxidová pryskyřice **Araldit GY 764BD s tužidlem H285**, poměr míchání 100:40, viskozita při 25°C je 300-350 [mPa.s]

4.2 Technologie výroby zkušebních těles

4.2.1 Příprava formy

Kvalitní příprava formy je základ pro výrobu dílce bez povrchových vad. Forma je negativem budoucího výrobku a každá nerovnost nebo špatné navoskování formy se projeví na pozitivním povrchu výrobku.

V našem případě postačilo jako forma obyčejné rovné sklo, protože všechna zkušební tělesa měla rovný povrch. Sklo se pečlivě očistilo a neseparovalo voskem TR INDUSTRIES - MOLD RELEASE určeným pro separaci forem. Po pěti minutách se sklo vyleštilo a proces se opakoval pětkrát podle doporučení výrobce.

4.2.2 Příprava uhlíkové tkaniny

Pro práci s uhlíkovou tkaninou je důležité mít neprašné prostředí, protože prach a nečistoty na povrchu tkaniny by mohly být vidět na povrchu budoucího kompozitu, obzvlášť jedná-li se o pohledový díl.

Před dělením tkaniny bylo potřeba určit si rozměr budoucího zkušební tělesa (např. 100mmx20mm), následně rozměr zvětšit o násobnost těles (např. 100mmx20mmx10vzorků = 100mmx200mm) a rozměr zvětšit o rezervu, která se později oddělí (např. 120x220mm).

Pro zjednodušení stříhání jsme vysunuli jeden roving z útku nebo osnovy a tím jsme si zajistili kolmost při stříhání.

4.2.3 Příprava směsi epoxidové pryskyřice a tužidla

Nejprve zjistíme hmotnost tkaniny, kterou budeme prosycovat pryskyřicí. Tuto hmotnost vynásobíme bezpečnostním koeficientem 1,2-1,4 a získaná hodnota je hmotnost potřebné epoxidové směsi. Směs je nutné pořádně promíchat, jinak by ve výsledku mohlo dojít k nevytvrzeným místům ve výrobku. Dále následuje proces laminování, který musíme stihnout ukončit do doby, než začne směs gelovatět a v té chvíli je už nezpracovatelná. Tato doba se nazývá Gel-time, je uvedena výrobcem a u každé pryskyřice je jiná.

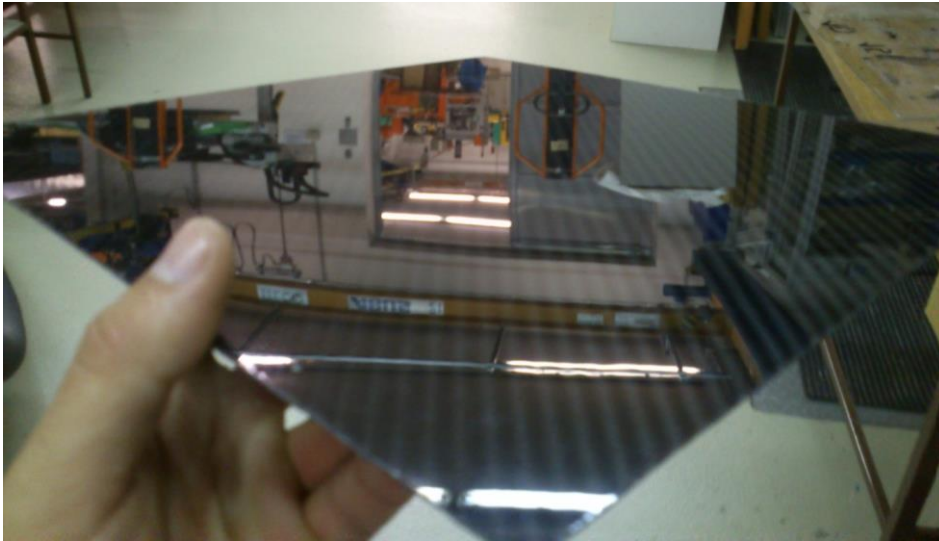
4.2.4 Technologie laminování, kladení jednotlivých vrstev tkaniny

Na připravenou formu se rovnoměrně nanese pomocí štětce nebo válečku film epoxidové směsi. Na ni se uloží vrstva tkaniny, následně se prosytí štětcem nebo válečkem a kovovým válečkem za působení menšího tlaku se vytlačí bubliny.



Obrázek 29- Výroba karbonové desky technologií ručního laminování.

Opět položíme vrstvu tkaniny a proces opakujeme tolikrát, kolik vrstev tkaniny potřebujeme. Laminát necháme vytvrdit, nejlépe 24 hodin a po vytvrzení odformujeme.



Obrázek 30-Odformovaný plát uhlíkového kompozitu.

4.2.5 Měření a dělení plátů na zkušební tělesa

Odformovaný plát kompozitu orýsujeme. U tenkých vzorků do 5ti vrstev byly tělesa nastříhána na univerzálním stříhacím stroji, u tlustých vzorků nad 5 vrstev bylo potřeba použít úhlovou brusku. K potřebnému rozměru připočítáme při orýsování šířku řezného kotouče.



Obrázek 31-Měření a následné dělení kompozitového plátu na jednotlivá zkušební tělesa.

4.3 Zkušební tělesa pro jednotlivé druhy zkoušek

4.3.1 Zkušební tělesa pro zkoušku tahem

Zkušební tělesa pro zkoušku tahem byla vyrobena dle normy ČSN EN 2374.

Nejprve byly vyrobeny desky o rozměrech 320x320 mm o tloušťkách 1,2 a 3 vrstvy tkaniny. Tato desky byly vyrobeny z obou uhlíkových tkanin (plátno a kepr). Proces se opakoval 4x za použití čtyřech různých epoxidových pryskyřic. Vyrobené pláty se nařezaly na zkušební tělesa o rozměrech 150x20mm. Získali jsme tyto série:

-Zkušební tělesa z pryskyřice Havel L285, tkanina s vazbou plátno, 1,2,3 vrstvy tkaniny, (tloušťky těles 0,35 , 0,7 , 1,15mm).

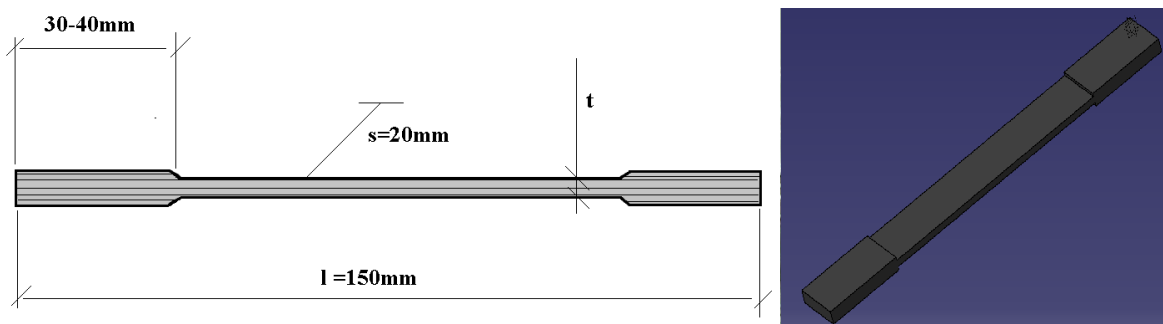
-Zkušební tělesa z pryskyřice Havel L285, tkanina s vazbou kepr, 1,2,3 vrstvy tkaniny, (tloušťky těles 0,41, 0,73, 1,03mm).

-Zkušební tělesa z pryskyřice Biresin CR82, tkanina s vazbou plátno, 2vrstvy tkaniny, (tloušťka tělesa 0,8mm).

-Zkušební tělesa z p. GRM systém LG 700, tkanina s vazbou plátno, 1,2,3 vrstvy tkaniny, (tloušťky těles 0,42, 0,8, 1,1 mm).

Na zkušební tělesa byla v místě uchycení do stroje opatřena zesílením podle normy ČSN EN ISO 527-4 z důvodu zabránění porušování vzorku čelistmi stroje a způsobení tak roztržení vzorku v místě uchycení ve stroji. Packy byly nalepeny na konce vzorků o délce cca 30-40mm a tloušťce 1-3 mm podle normy.

Materiál pacek: Uhlíková tkanina CC200KORDCARBON; gramáž 200g/m²



Obrázek 32-Schema zkušebního tělesa pro zkoušku tahem, vpravo 3D model

4.3.2 Zkušební tělesa pro zkoušku ohybem

Zkušební tělesa pro zkoušku ohybem byla zhotovena dle normy ČSN EN ISO 1268:1974.

Nejprve byly ručním kladením vyrobeny desky o rozměrech 225x100mm a z nich následně vyřezána zkušební tělesa ve tvaru hranolu o rozměrech 40x20mm. Získali jsme tyto série.:

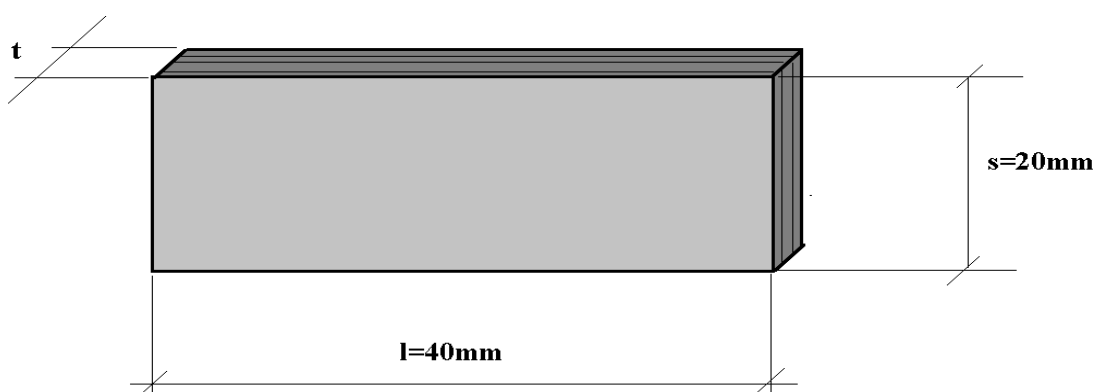
-Zkušební tělesa z pryskyřice Havel L285, tkanina s vazbou plátno, 5 vrstev tkaniny (tloušťka tělesa 1,85mm)

-Zkušební tělesa z pryskyřice Biresin CR82, tkanina s vazbou kepr, 5 vrstev tkaniny (tloušťka tělesa 1,6mm). Metoda výroby-vakuová infuze.

-Zkušební tělesa z pryskyřice Biresin CR82, tkanina s vazbou kepr, 5 vrstev tkaniny a 4 mm tlustá vrstva gelcoatu, (tloušťka zkušebního tělesa 2mm). Metoda výroby-vakuová infuze.

- Zkušební tělesa z prysk. GRM systém LG 700, tkanina s vazbou plátno, 5 vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 1,7mm).

-Zkušební tělesa z pryskyřice Araldit GY 764BD, tkanina s vazbou plátno, 5 vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 1,85mm).



Obrázek 33- Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku ohybem.

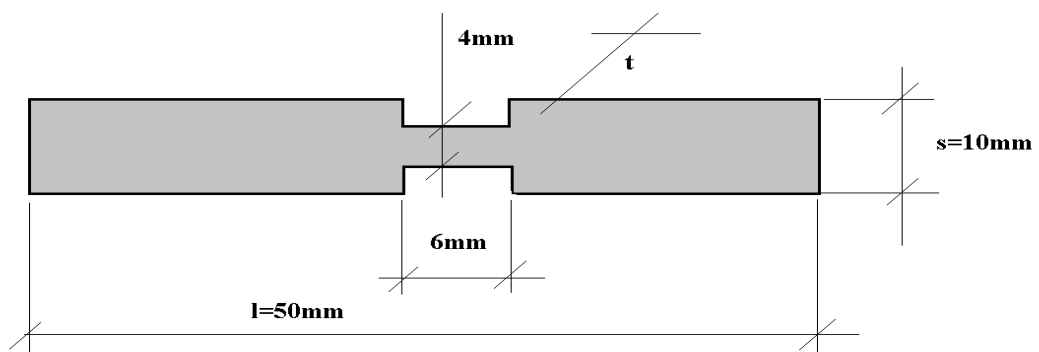
4.3.3 zkušební tělesa pro zkoušku tlakem

Zkušební tělesa byla vyrobena dle normy ČSN EN ISO 604.

Nejprve byly ručním kladením vyrobeny desky o čtrnácti vrstvách uhlíkové tkanina s vazbou plátno.

Ty měly rozměry 100x150mm. Následně se z nich nařezaly zkušební tělesa o rozměrech 50x 10mm. Tělesa byly nařezány tak, aby vákna byla rovnoběžné s osou vzorku. Proces se opakoval 4x pro všechny čtyři druhy pryskyřic. Byly vyrobeny následující série:

- *Zkušební tělesa z prysk.e Biresin CR82, tkanina s vazbou plátno, čtrnácti vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4,1mm).*
- *Zkušební tělesa z prysk. Araldit GY 76BD, tkanina s vazbou plátno, čtrnácti vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4,7mm).*
- *Zkušební tělesa z prysk.e Havel L285, tkanina s vazbou plátno, čtrnácti vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4,2mm).*
- *Zkušební tělesa z prysk. GRM systém LG 700, tkanina s vazbou plátno, čtrnácti vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4,5mm).*



Obrázek 34- Scéma zkušebního tělesa pro zkoušku tlakem

4.3.4 Zkušební tělesa pro rázovou zkoušku

Zkušební tělesa byla vyrobena podle normy ČSN EN ISO 295. Z vyrobených desek se nařezaly zkušební tělesa o délce 40 mm a šířce takové, aby nebyla širší než snímací plocha kladiva. Byly vyrobeny následující série:

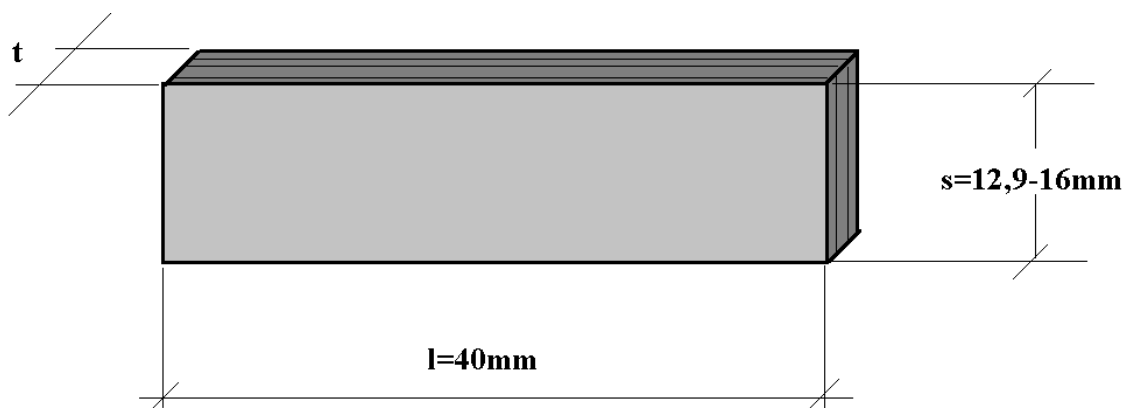
- *Zkušební tělesa z pryskyřice Havel L285, tkanina s vazbou plátno, 5 vrstev tkaniny, rozměr vzorku 1,9x40x12,9mm.*
- *Zkušební tělesa z pryskyřice Araldit GY 764BD, tkanina s vazbou plátno, 5 vrstev tkaniny, rozměr tělesa 2,01x40x16 mm.*

-Zkušební tělesa z pryskyřice Araldit GY 764BD, tkanina s vazbou plátno, 5 vrstev tkaniny, rozměr tělesa 2,01x40x14,8 mm.

-Zkušební tělesa z pryskyřice GRM systém LG 700, tkanina s vazbou plátno, 5 vrstev tkaniny, rozměr tělesa 1,6x40x15,5 mm.

-Zkušební tělesa z pryskyřice Biresin CR82, tkanina s vazbou kepr, 5 vrstev tkaniny, rozměry těles 1,6 x 13 x 40mm. Metoda výroby-vakuová infuze.

-Zkušební tělesa z pryskyřice Biresin CR82, tkanina s vazbou kepr, 5 vrstev tkaniny, rozměry těles 2 x 13 x 40mmz toho je 0,4 mm vrstva gelcoatu. Metoda výroby-vakuová infuze.



Obrázek 35- Schéma zkušebního tělesa pro rázovou zkoušku.

4.3.5 Zkušební tělesa pro rázovou zkoušku v tahu

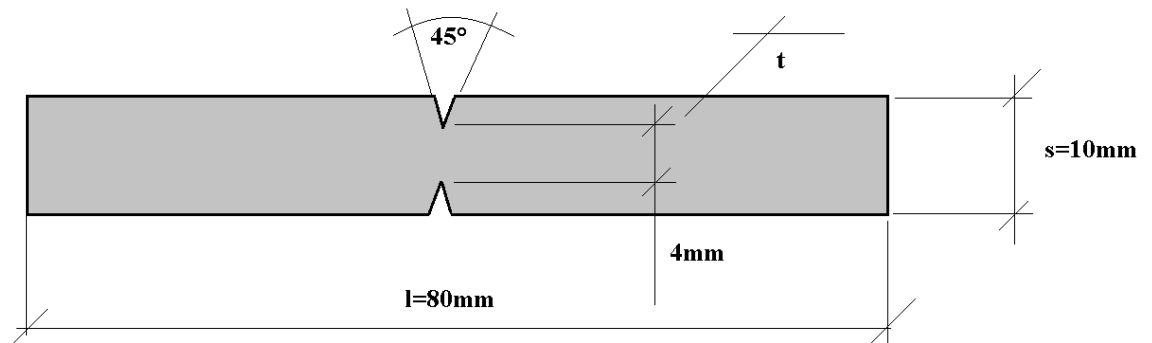
Zkušební tělesa byla vyrobena dle normy ČSN EN ISO 179-1. Vyrobená deska o třinácti vrstvách a rozměrech 100x110mm byla nařezána na zkušební tělesa o rozměrech 80x10mm a do kterých byly následně vyfrézovány vruby.

- Zkušební tělesa z prysk. Araldit GY 764BD, tkanina s vazbou plátno, třináct vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4mm).

- Zkušební tělesa z prysk. Biresin CR82, tkanina s vazbou plátno, třináct tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4mm).

- Zkušební tělesa z pryskyřice Havel L285, tkanina s vazbou plátno, třináct tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4mm).

- Zkušební tělesa z prysk. GRM Systém LG 700, tkanina s vazbou plátno, třináct vrstev tkaniny, (tloušťka zkušebního tělesa 4mm).



Obrázek 36-Schéma zkušebního tělesa pro rázovou zkoušku v tahu.

4.3.6 Zkušební tělesa pro zkoušku víceosého rázového namáhání

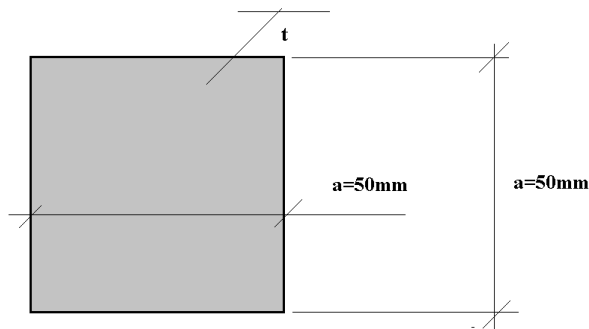
Zkušební tělesa byla vyrobena dle normy ČSN EN ISO 6603-2. Byly vyrobené 4 desky z jednotlivých pryskyřic, o rozměrech 50x50 mm a z tkaniny s vazbou plátno.

-Zkušební deska, pryskyřice Araldit GY 764BD, vazba plátno, 5 vrstev tkaniny, (tloušťka 1,8mm).

-Zkušební deska, pryskyřice Biresin CR82, vazba plátno, 5vrstev tkaniny, (tloušťka 1,8mm).

-Zkušební deska, pryskyřice Havel L285, vazba plátno, 5vrstev tkaniny, (tloušťka 1,8mm).

-Zkušební deska, pryskyřice GRM systém LG 700, vazba plátno, 5vrstev tkaniny, (tloušťka 1,8mm).



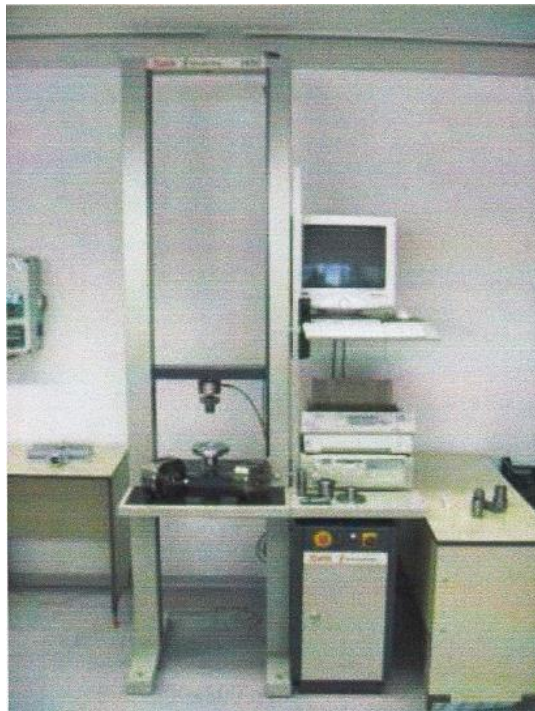
Obrázek 37- Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku vícerym rázovým namáháním.

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

5.1 Použité zařízení

5.1.1 Zkušební stroj Zwick 1456

Pro zkoušku tahem, tlakem a ohybem byl použit univerzální zkušební stroj ZWICK 1456. Stroj spolupracuje se softwarem Zwick II v.3.3.1, ve kterém lze nastavit parametry zkoušky a odtud také získáváme naměřené výsledky.



Obrázek 38-Zkušební stroj Zwick 1456

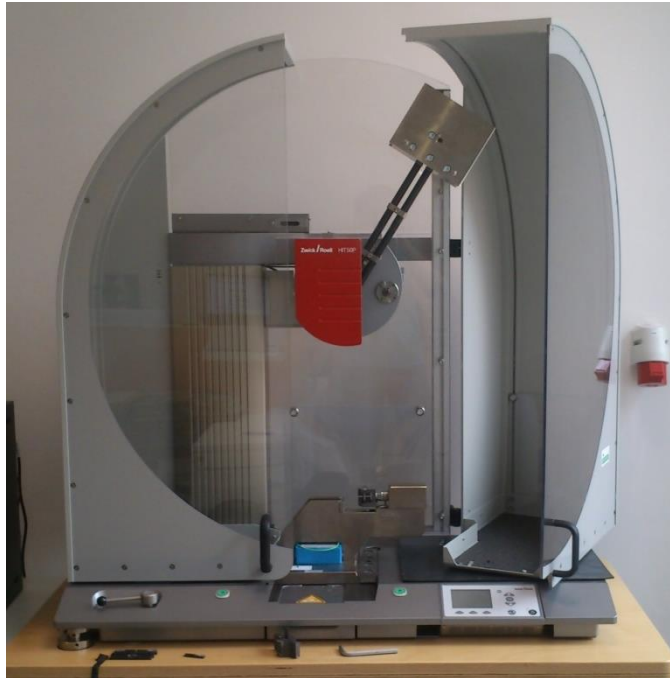
V následující tabulce jsou vypsány základní parametry stroje.

Tabulka 1- Technické specifikace stroje Zwick 1456

Maximální zkušební síla	20 kN
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg

5.1.2 Zwick/Roell HIT50P

Pro zkoušku rázové houževnatosti v tahu byl použit zkušební stroj stejného výrobce Zwick/Roell, typu HIT50P.



Obrázek 39 -Zkušební stroj Zwick/roell HIT50P.

V následující tabulce jsou popsány základní parametry stroje.

Tabulka 2-Technické specifikace stroje Zwick/roell HIT50P.

Maximální zkušební energie	50 J
Strojová výška	1170 mm
Celková šířka	1180 mm
Hmotnost stroje	475 kg
Hmotnost kladiva	6,899 kg
Nárazová rychlost	3,807 m/s

5.1.3 Zwick/Roell HIT230F

Toto zařízení slouží k získání hodnot rázové houževnatosti při víceosém rázovém namáhání. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6603-2.



Obrázek 40 - Zkušební stroj Zwick/Roell HIT230F.

V následující tabulce jsou popsány základní parametry stroje.

Tabulka 3-Technické specifikace stroje Zwick/Roell HIT230F.

Značení	Popis	Zkratka jednotky	Jednotka
Fmax	Maximální síla	N	Newton
Sm	Průhyb při maximální síle Fmax	mm	milimetr
Wm	Energie pod Fmax	J	Joule
Pokles rychlosti	Rozdíl poklesu rychlosti po nárazu	%	procenta
Fp	Penetrační síla – síla při porušení	N	Newton
Ep	Penetrační energie – celková plastická enrg	J	Joule

5.2 Statické zkoušky

5.2.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena dle normy ČSN ISO 527-4. Byla uskutečněna na stroji Zwick 1456. Vzdálenost mezi senzory extenzometru byla 30 mm.



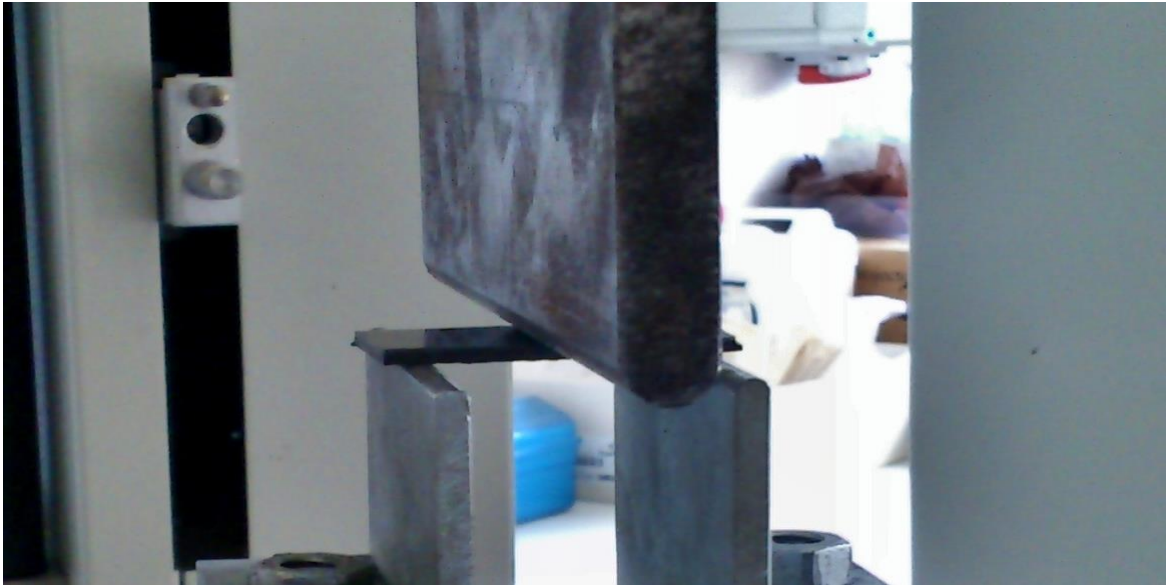
Obrázek 41- Zkouška tahem v okamžiku roztržení zkušebního tělesa.

5.2.2 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 178. Tato norma vychází z ISO 178 a je určena pro vlákny vyztužené plastové materiály.

Natavená vzdálenost mezi spodními podpěrami byla 32 mm.

Metoda se používá k hodnocení ohybových vlastností a stanovení pevnosti v ohybu, ohybového modulu a jiných parametrů, vyplývajících ze vztahu ohybové napětí/deformace za předepsaných podmínek. Používá volně podepřený hranol, zatěžovaný tříbodovým ohybem. Geometrie zkoušky se volí tak, aby byla omezena smyková deformace a vyloučeno porušení v důsledku mezilaminárního smyku [3].



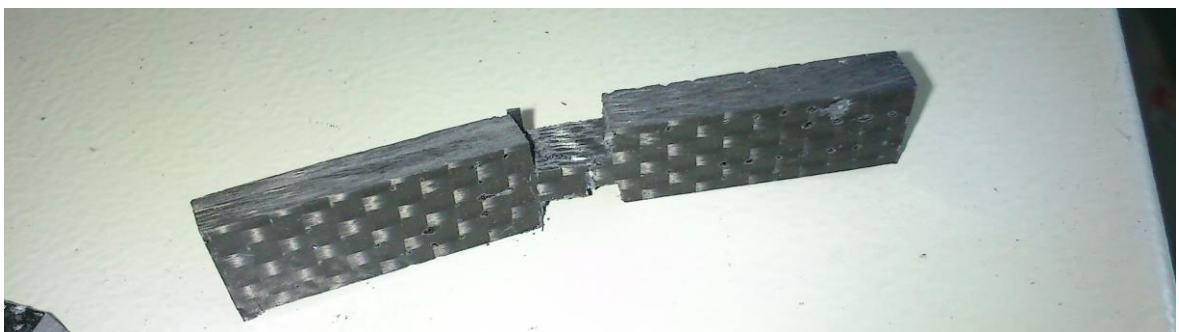
Obrázek 42- Zkouška tahem.

5.2.3 Zkouška tlakem

Zkouška tlakem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 604. Zkušební těleso bylo umístěno a upnuto do přípravku, aby se zabránilo vybočení tělesa ze směru zatěžování.



Obrázek 43-Zkušební těleso po zkoušce tlakem, vpravo zkušební přípravek (tělo přípravku čtvercového průřezu, opěrná deska, karbonové zkušební těleso, šroub M5)



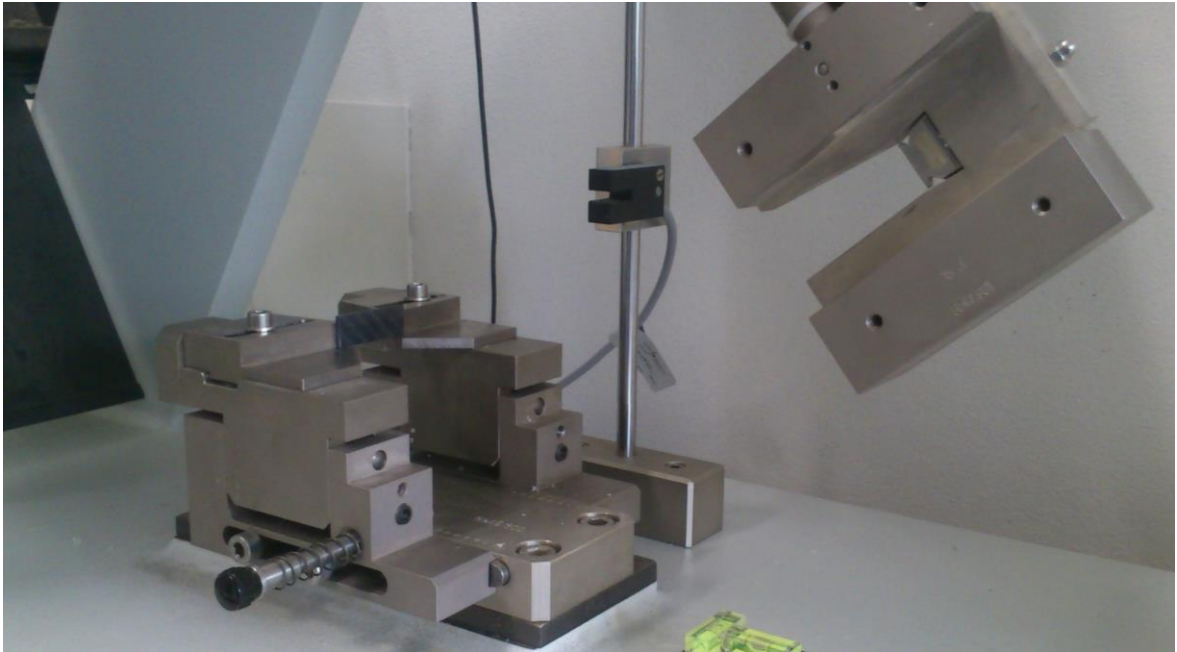
Obrázek 44- Zkušební těleso po zkoušce tlakem, pohled 2.

5.3 Dynamické zkoušky

5.3.1 Zkouška rázové houževnatosti

Zkouška rázové houževnatosti v tahu byla provedena dle normy ČSN EN ISO 179-1.

Nastavená vzdálenost mezi podpěrami byla 32 mm. Zkušební tělesa se vkládaly do stroje „na stojato“.



Obrázek 45- Charpyho kladivo pro zkoušku rázové houževnatosti.

5.3.2 Zkouška rázové houževnatosti v tahu

Zkouška rázové houževnatosti v tahu byla provedena dle normy ČSN EN ISO 8256

Podstatou této zkoušky je přeražení zkušebního tělesa uloženém v nejnižším bodě. Jediný kmit kyvadla, přeruší vzorek. Dochází k tahovému rázovému zatížení a spotřeba energie z kmitu kyvadla. Z výsledných hodnot se pak posuzuje křehkost či houževnatost zkoušených těles. Mezi nevýhody této zkoušky patří horší reprodukovatelnost. S výsledky je potřeba zacházet s vyšší opatrností, a proto se naměřené hodnoty z měření nepoužívají jako zdroje dat pro konstrukční výpočty dílů.



Obrázek 46- Zkušební tělesa po Zkoušce rázové houževnatosti v tahu.

5.3.3 Zkouška víceosým rázovým namáháním

Měření chování kompozitů při víceosém rázovém namáhání bylo provedeno dle normy EN ISO 6603-2.

Experimentální měření víceosého rázového namáhání je podstatou této zkoušky. Při zkoušce byla nastavena výška pádu 440 mm, teoretická rychlost 23,17 kg vážícího tlouku byla 2,938 m/s. Použité desky, s vazbou plátno, byly vyrobené ručním kladením. Desky s vazbou kepr byly vyrobeny vakuovou infuzí a jedna ze sad obsahovala vrstvu gelcoat.



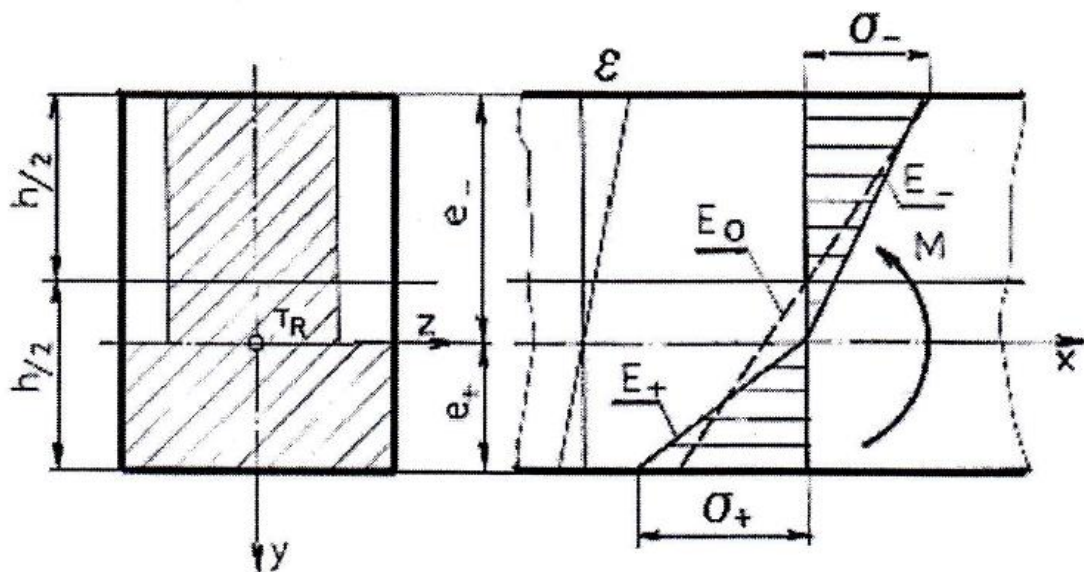
Obrázek 47-Zkušební tělesa po zkoušce víceosým rázovým namáháním.

6 ZHOTOVENÍ JEDNODUCHÉHO TEORETICKÉHO MODELU DANÉ STRUKTURY

Plasty vyztužené jednosměrné dlouhými vlákny svým mechanickým chováním patří mezi bimodulární materiály. Jsou to materiály, které mají odlišné hodnoty modulu pružnosti v tlaku a tahu. Ohyb prutu vyztuženého dlouhými vlákny je zvláštním případem ohybu složeného prutu. Rozhraní obou myšlených materiálů se vzájemně odlišnými moduly pružnosti E_+ , $E_- < E_+$ patří do neutrální osy průřezu. Její poloha vyplývá z podmínky nulového součtu osových sil v průřezu: $\int_{(S)} dN = 0$.

Skutečným mezním momentem, při jehož působení dochází v průřezu k poruše, je menší z momentů M_- , M_+ . Modul pružnosti v ohybu bimodulárního materiálu, vzorek pro ohybovou zkoušku má průřez obdélníkového tvaru, takže pro polohu neutrální osy platí:

$e_+/e_- = \eta$, s označením $\eta^2 = E_-/E_+$. Poněvadž $e_+ + e_- = h$ je: $e_- = \frac{h}{1+\eta}$, $e_+ = \frac{\eta h}{1+\eta}$.



Obrázek 48- Vzorek pro ohybovou zkoušku s průřezem obdélníkového tvaru

Tuhost v ohybu tedy je: $K_0 = b/3 (E_+ e_+^3 + E_- e_-^3) = E_- b e_-^3 (1+\eta)/3$

Vztah pro modul pružnosti v ohybu vyplývá z porovnání výrazů pro ohybovou tuhost homogenního průřezu s výrazem: $E_0 b h^2 / 12 = E_- b e_-^3 (1+\eta)/3$,

po úpravě: $\frac{E_0}{E_+} = \left(\frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2$. [12]

Výpočet modulu pružnosti v ohybu z naměřených modulů pružnosti v tahu E_+ a modulu pružnosti v tlaku E_- a porovnání s naměřeným modulem pružnosti v ohybu:

-Naměřené hodnoty Havel L285, plátno: $E_+=28000$ MPa, $E_-=18000$ Mpa, $E_o=22200$ Mpa

Tloušťka tělesa v ohybu 1,85mm.

$$\eta^2 = E_-/E_+ = 18000/28000 \Rightarrow \eta = \mathbf{0,80178}$$

$$\frac{E_o}{E_+} = \left(\frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2 \Rightarrow E_o = (2 \cdot 0,80178 / 1,80178)^2 \cdot 28000 \Rightarrow E_o =$$

$$\mathbf{E_o \text{ vypocitane} = 22\ 222 \text{ Mpa} \approx E_o \text{ naměřené} = 22200 \text{ Mpa}}$$

$$e_- = \frac{h}{1+\eta}, \quad e_+ = \frac{\eta h}{1+\eta}$$

$$\mathbf{e_- = 1,85/1,80178 = 1,027 \text{ mm}, \quad e_+ = 0,80178 \cdot 1,85/1,80178 = 0,823 \text{ mm}}$$

-Naměřené hodnoty Havel L285, kepr: $E_+=30700$ MPa, $E_-=18000$ Mpa, $E_o=22200$ Mpa

Tloušťka tělesa v ohybu 1,85mm

$$\eta^2 = E_-/E_+ = 18000/30700 \Rightarrow \eta = \mathbf{0,7657}$$

$$\frac{E_o}{E_+} = \left(\frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2 \Rightarrow E_o = (2 \cdot 0,7657 / 1,7657)^2 \cdot 30700 \Rightarrow E_o = 23094$$

$$\mathbf{E_o \text{ vypocitane} = 23094 \text{ Mpa} \approx E_o \text{ naměřené} = 22200 \text{ Mpa}}$$

$$\mathbf{e_- = 1,85/1,7657 = 1,048 \text{ mm}, \quad e_+ = 0,7657 \cdot 1,85/1,7657 = 0,802 \text{ mm}}$$

-Naměřené hodnoty Biresin CR82, kepr: $E_+=32600$ MPa, $E_-=21600$ Mpa, $E_o=29100$ Mpa

Tloušťka tělesav ohybu 1,6mm

$$\eta^2 = E_-/E_+ = 21600/32600 \Rightarrow \eta = \mathbf{0,814}$$

$$\frac{E_o}{E_+} = \left(\frac{2\eta}{1+\eta} \right)^2 \Rightarrow E_o = (2 \cdot 0,814 / 1,814)^2 \cdot 32600 \Rightarrow E_o = 26256,6$$

$$\mathbf{E_o \text{ vypocitane} = 26256 \text{ Mpa} \approx E_o \text{ naměřené} = 29100 \text{ Mpa}}$$

$$\mathbf{e_- = 1,6/1,814 = 0,882, \quad e_+ = 0,814 \cdot 1,6/1,814 = 0,718 \text{ mm}}$$

7 VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH ZKOUŠEK

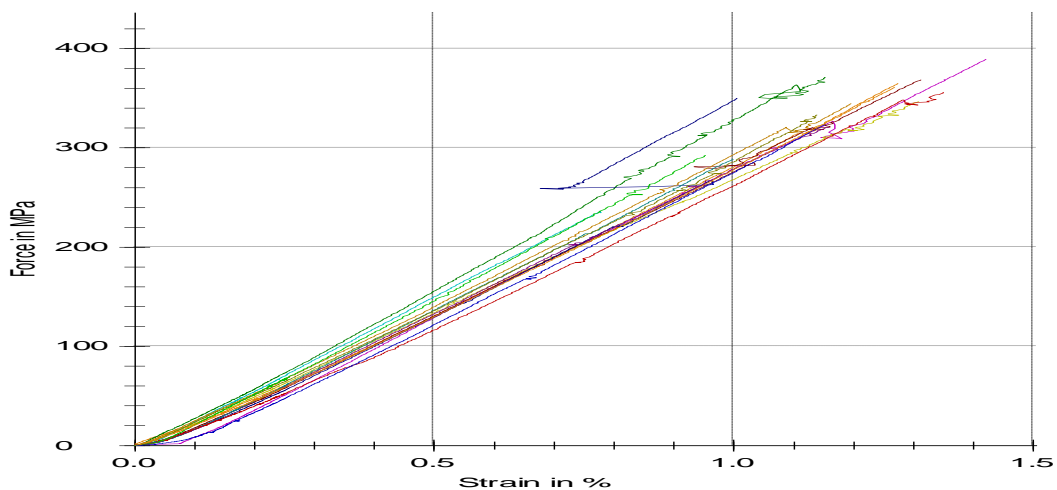
7.1 Výsledky statických zkoušek

7.1.1 Naměřené hodnoty v tahu

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles s **jednou** vrstvou tkaniny s vazbou **plátno**, použita pryskyřice **Havel L285**.

Tabulka 4-Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	27200,00	365,00	1,30	543,50
2	30700,00	389,00	1,40	646,04
3	30600,00	236,00	0,80	214,66
4	26300,00	347,00	1,30	559,13
5	25600,00	369,00	1,30	564,59
6	29700,00	371,00	1,20	497,30
7	28800,00	350,00	1,00	313,97
8	27600,00	345,00	1,20	496,63
9	26400,00	321,00	1,20	441,74
10	27500,00	288,00	1,00	309,44
11	27300,00	334,00	1,10	449,21
12	24800,00	356,00	1,30	486,41
13	30000,00	293,00	1,00	332,87
14	29000,00	324,00	1,20	431,77
15	27600,00	361,00	1,30	504,27
\bar{x}	28000,00	337,00	1,20	452,77
s	1820,00	39,50	0,20	116,05
v	6,51	11,73	14,76	25,63
s_x	469,92	10,20	0,05	29,96

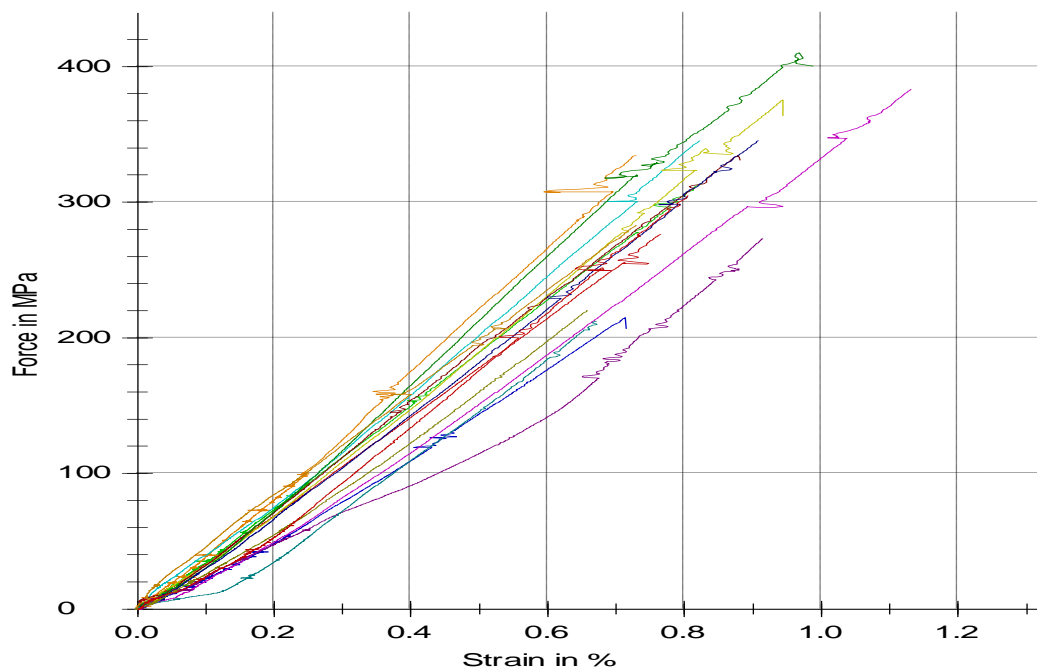


Obrázek 49-Graf závislosti napětí na deformaci, p. Havel,

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles se **dvěma** vrstvami tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Havel L285**.

Tabulka 5- -Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	35200	276	0,8	482,82
2	38300	314	0,8	502,57
3	26100	215	0,7	284,19
4	40400	334	0,7	443,59
5	32900	383	1,1	794,46
6	35900	345	0,8	570,01
7	35800	375	0,9	680,64
8	38500	334	0,9	610,83
9	39900	410	1	784,82
10	36500	345	0,9	661,68
11	37000	283	0,7	449,18
12	23500	273	0,9	426,64
13	37400	212	0,7	248,86
14	29100	220	0,7	239,46
15	40500	305	0,8	402,78
\bar{x}	35100	309	0,8	505,5
s	5150	61,6	0,1	177,64
v	14,67	19,98	15,47	35,14
s_x	1329,72	15,91	0,03	45,87

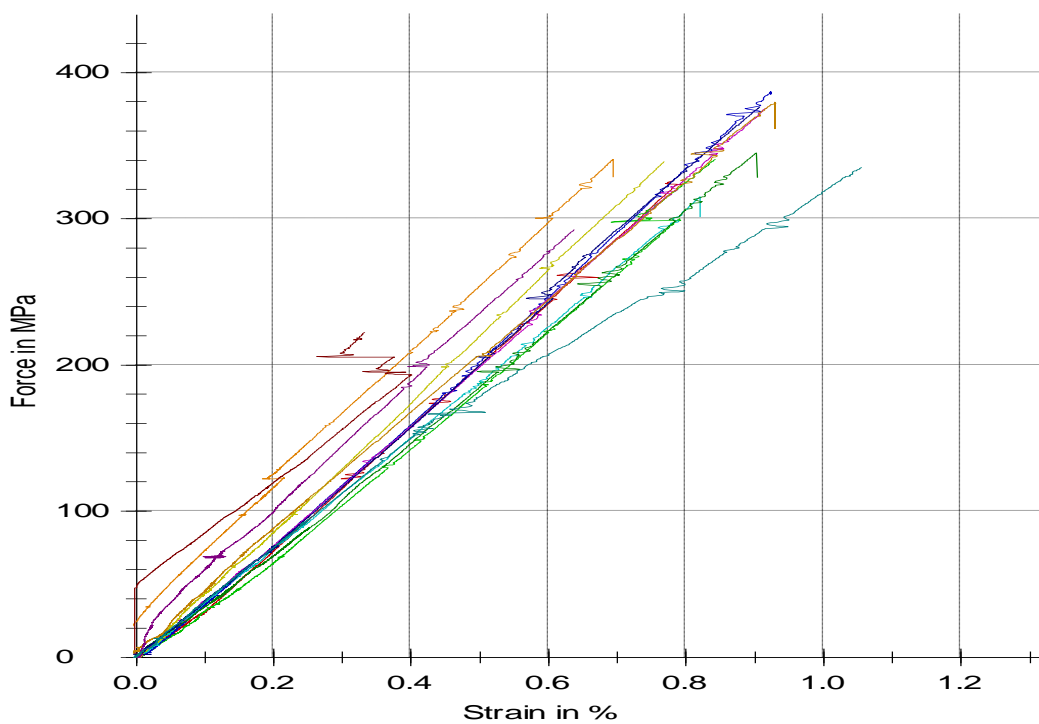


Obrázek 50- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles se **třemi** vrstvami tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Havel L285**.

Tabulka 6- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	42300,00	326,00	0,80	1126,13
2	39100,00	341,00	0,80	1269,58
3	42000,00	387,00	0,90	1598,97
4	45800,00	341,00	0,70	1103,63
5	40700,00	376,00	0,90	1640,60
6	37200,00	315,00	0,80	1200,57
7	42800,00	339,00	0,80	1191,47
8	33900,00	222,00	0,30	354,15
9	38700,00	345,00	0,90	1500,06
10	41900,00	377,00	0,90	1520,89
11	39400,00	380,00	0,90	1684,33
12	42600,00	293,00	0,60	932,05
13	37300,00	335,00	1,10	1872,09
\bar{x}	40300,00	337,00	0,80	1307,27
s	3100,00	44,00	0,20	396,85
v	7,70	13,06	22,30	30,36
s_x	859,79	12,20	0,06	110,07

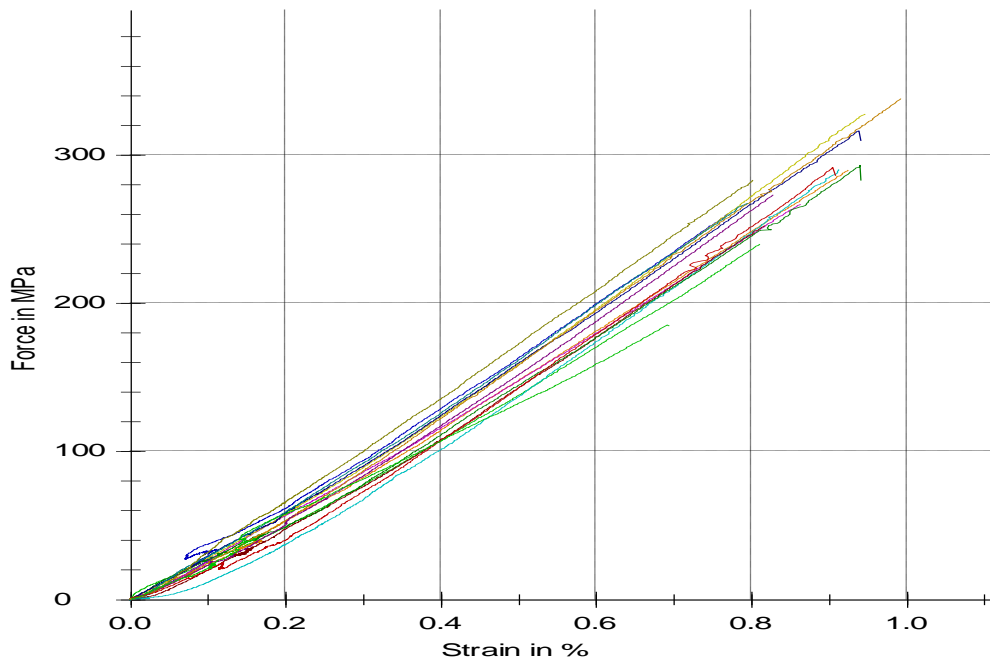


Obrázek 51- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles s **jednou** vrstvou tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Havel L285**.

Tabulka 7- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

chyba.m	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	29000,00	240,00	0,80	248,52
2	33700,00	261,00	0,80	281,17
3	30600,00	290,00	0,90	352,45
4	29900,00	267,00	0,90	304,79
5	31900,00	290,00	0,90	297,94
6	29900,00	328,00	0,90	367,93
7	27300,00	252,00	0,80	247,12
8	31200,00	293,00	0,90	303,35
9	30000,00	316,00	0,90	357,27
10	29800,00	338,00	1,00	378,33
11	28600,00	273,00	0,80	267,57
12	30800,00	268,00	0,80	238,16
13	35300,00	283,00	0,80	261,61
14	33500,00	292,00	0,90	292,77
15	28900,00	185,00	0,70	156,53
\bar{x}	30700,00	278,00	0,90	290,37
s	2140,00	37,40	0,10	58,69
v	6,98	13,42	9,57	20,21
s_x	552,55	9,66	0,03	15,15

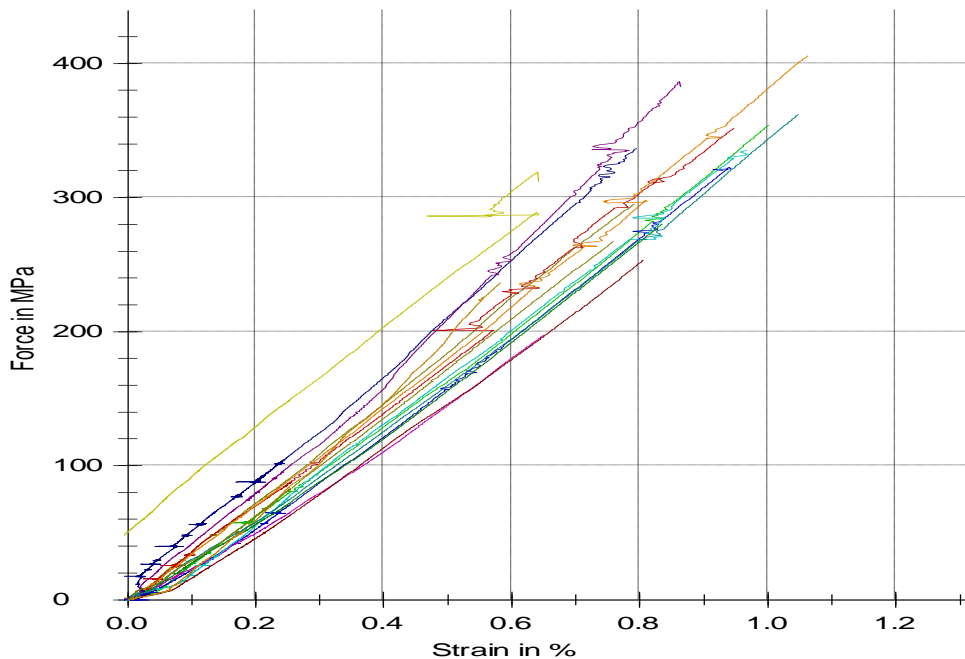


Obrázek 52- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles se **dvěma** vrstvami tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Havel L285**.

Tabulka 8- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	36100,00	295,00	0,80	566,41
2	34400,00	352,00	0,90	804,33
3	35800,00	354,00	1,00	790,34
4	34400,00	322,00	0,90	663,73
5	36500,00	406,00	1,10	985,17
6	30400,00	197,00	0,60	276,70
7	37700,00	335,00	1,00	752,66
8	38100,00	319,00	0,60	534,64
9	33700,00	254,00	0,80	439,29
10	31900,00	280,00	0,80	480,90
11	40000,00	337,00	0,80	663,04
12	39000,00	236,00	0,60	288,21
13	37700,00	387,00	0,90	717,84
14	33800,00	362,00	1,00	782,28
15	33900,00	267,00	0,80	482,30
\bar{x}	35600,00	314,00	0,80	615,19
s	2670,00	58,00	0,10	200,42
v	7,51	18,49	17,63	32,58
s_x	689,39	14,98	0,03	51,75

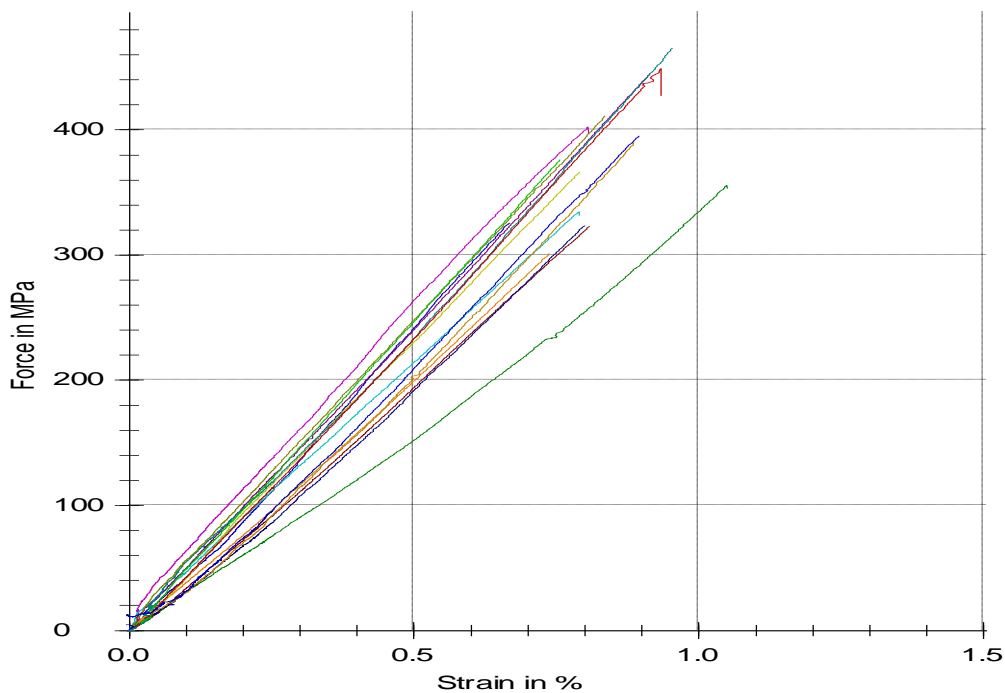


Obrázek 53- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles se **třemi** vrstvami tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Havel L285**.

Tabulka 9- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	44100,00	326,00	0,70	544,04
2	37600,00	302,00	0,70	560,99
3	48600,00	402,00	0,80	938,11
4	42100,00	335,00	0,80	764,63
5	48700,00	367,00	0,80	835,39
6	38500,00	323,00	0,80	754,55
7	30200,00	356,00	1,00	929,72
8	35500,00	324,00	0,80	652,24
9	43200,00	390,00	0,90	844,57
10	48100,00	445,00	0,90	1143,86
11	45100,00	466,00	1,00	1098,99
12	47700,00	411,00	0,80	822,36
13	47100,00	449,00	0,90	1148,87
14	48900,00	376,00	0,80	685,79
15	43900,00	395,00	0,90	834,12
\bar{x}	43300,00	378,00	0,80	837,22
s	5590,00	51,00	0,10	190,90
v	12,92	13,50	11,54	22,80
s_x	1443,33	13,17	0,03	49,29

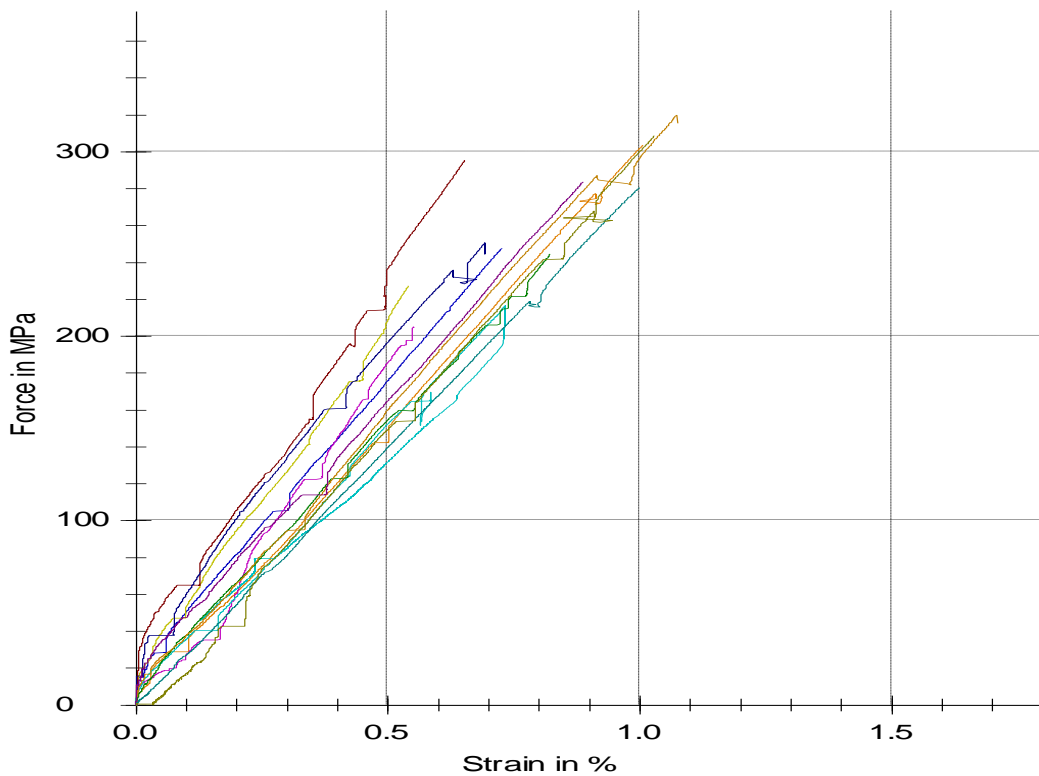


Obrázek 54- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles se **dvěma** vrstvami tkaniny s vazbou **p látno**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**.

Tabulka 10- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	31800,00	248,00	0,70	429,73
2	30400,00	304,00	1,00	699,17
3	36800,00	205,00	0,60	267,57
4	31200,00	217,00	0,70	403,28
5	35600,00	227,00	0,50	294,95
6	42200,00	296,00	0,70	433,40
7	28600,00	244,00	0,80	434,16
8	34200,00	251,00	0,70	466,16
9	31400,00	320,00	1,10	752,95
10	30600,00	284,00	0,90	576,69
11	28700,00	281,00	1,00	678,92
12	30100,00	309,00	1,00	693,42
\bar{x}	32600,00	265,00	0,80	510,87
s	3960,00	38,40	0,20	164,55
v	12,12	14,48	23,26	32,21
s_x	1143,15	11,09	0,06	47,50

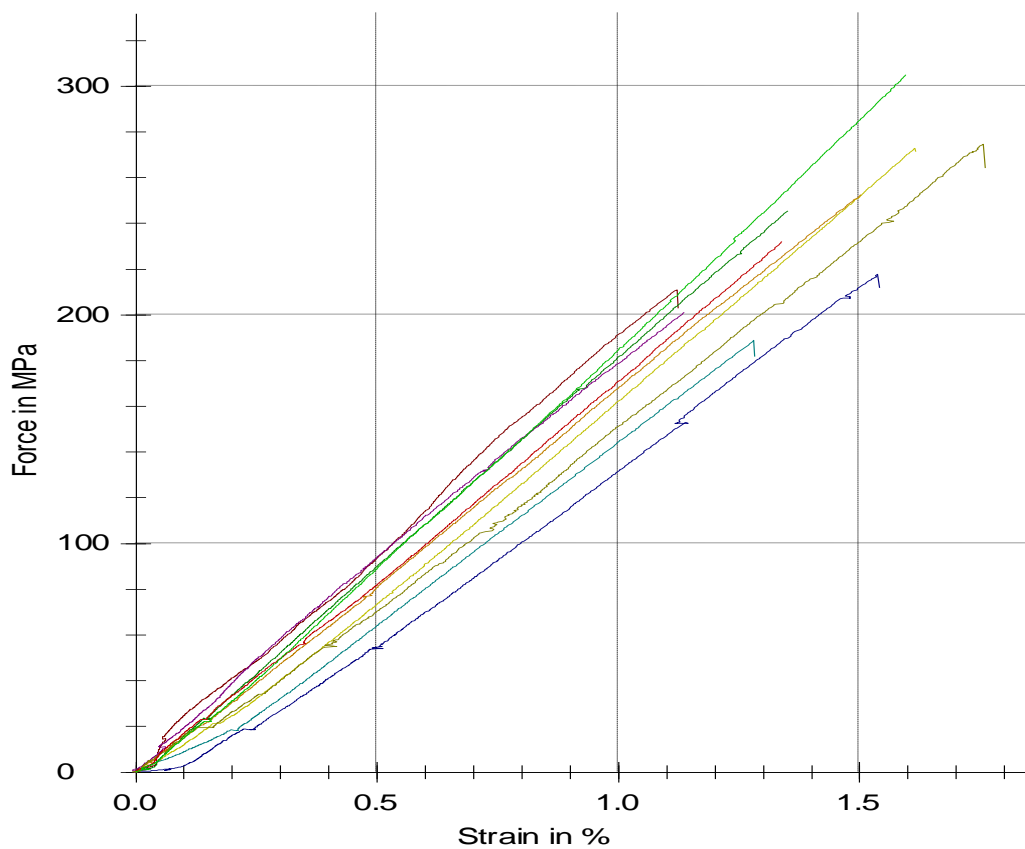


Obrázek 55- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Biresin, 2v

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles s **jednou** vrstvou tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **GRM systém LG700**.

Tabulka 11- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	18000,00	273,00	1,60	504,11
2	18900,00	211,00	1,10	306,07
3	18500,00	245,00	1,40	416,69
4	15500,00	218,00	1,50	385,72
5	17400,00	253,00	1,50	474,67
6	20400,00	201,00	1,10	298,79
7	16000,00	189,00	1,30	284,19
8	16200,00	275,00	1,80	586,76
9	16800,00	232,00	1,30	383,30
10	19200,00	305,00	1,60	591,24
\bar{x}	17700,00	240,00	1,40	423,15
s	1580,00	36,80	0,20	113,41
v	8,91	15,34	14,85	26,80
s_x	499,64	11,64	0,06	35,86

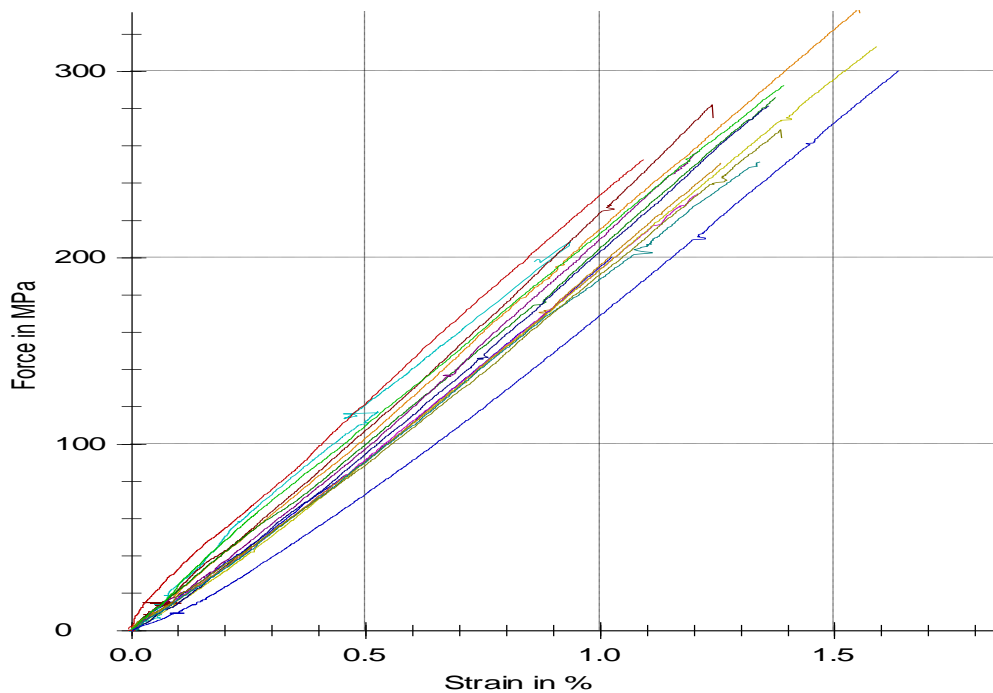


Obrázek 56- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM systém 1v

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles se **dvěma** vrstvami tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **GRM systém LG700**.

Tabulka 12- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	20800,00	200,00	1,00	476,99
2	22300,00	333,00	1,60	1232,68
3	20500,00	234,00	1,20	662,08
4	20000,00	208,00	0,90	486,25
5	20400,00	313,00	1,60	1162,45
6	23200,00	282,00	1,20	813,03
7	20100,00	286,00	1,40	930,23
8	22300,00	282,00	1,40	882,76
9	20600,00	251,00	1,30	725,06
10	22800,00	257,00	1,20	718,44
11	20100,00	251,00	1,30	804,09
12	21000,00	269,00	1,40	865,07
13	22400,00	253,00	1,10	693,45
14	21100,00	293,00	1,40	1001,27
15	19300,00	300,00	1,60	1083,42
\bar{x}	21100,00	268,00	1,30	835,82
s	1170,00	36,70	0,20	222,62
v	5,55	13,71	15,29	26,63
s_x	302,09	9,48	0,05	57,48

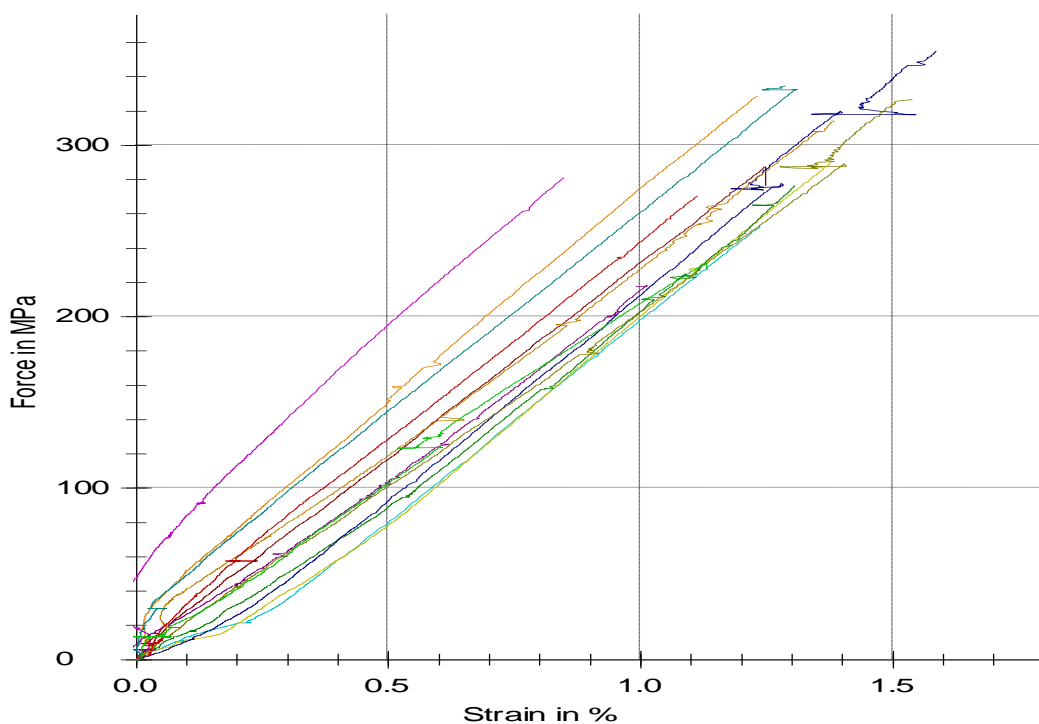


Obrázek 57- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM system

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles se **třemi** vrstvami tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **GRM systém LG700**.

Tabulka 13- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	24300,00	329,00	1,20	1467,52
2	25800,00	281,00	0,80	975,46
3	23200,00	253,00	1,20	932,45
4	24400,00	290,00	1,40	1192,37
5	23300,00	287,00	1,20	1211,91
6	22800,00	276,00	1,30	1108,13
7	24000,00	355,00	1,60	1765,14
8	21700,00	314,00	1,40	1496,57
9	22800,00	218,00	1,00	729,72
10	23100,00	335,00	1,30	1522,18
11	20200,00	327,00	1,50	1621,53
12	23000,00	271,00	1,10	1042,94
13	20200,00	231,00	1,10	896,02
\bar{x}	23000,00	290,00	1,30	1227,84
s	1580,00	41,20	0,20	318,74
v	6,88	14,20	16,05	25,96
s_x	438,21	11,43	0,06	88,40



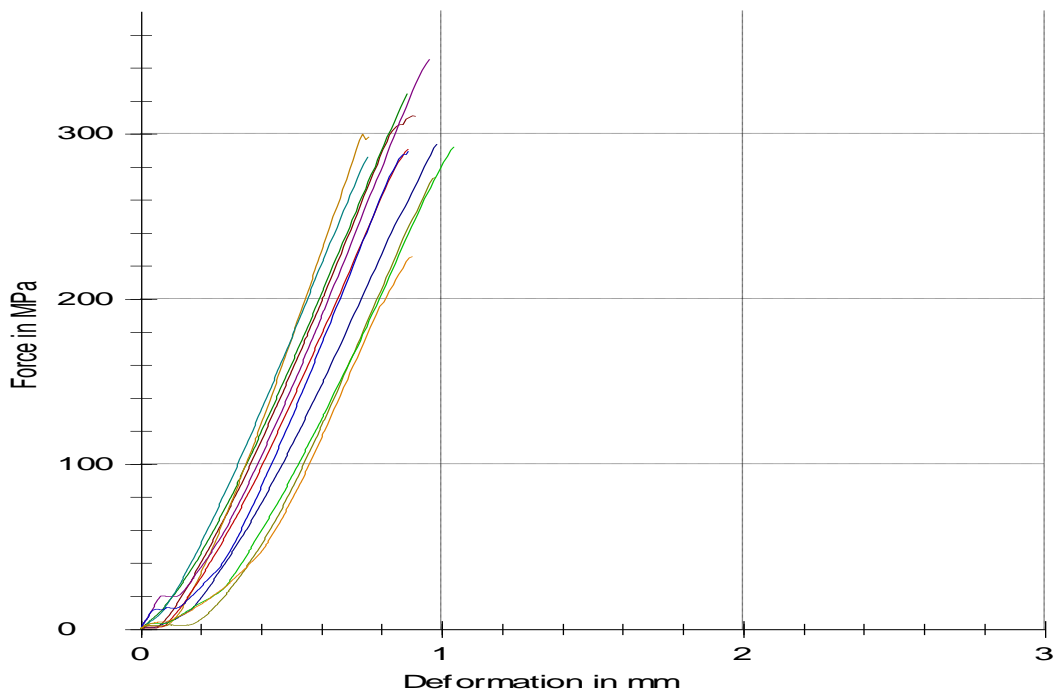
Obrázek 58- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM systém

7.1.2 Naměřené hodnoty v tlaku

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles ze **čtrnácti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 4,1x50x10 + drážka 6mm, tloušťka 4mm.

Tabulka 14- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.

zk. těleso č.	E [Gpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	22,3	5100	0,9	2108,1
2	20,1	5320	0,9	2095,42
3	20	5180	1	2093,86
4	26,4	4020	0,7	1194,76
5	22,5	5610	1	2330,83
6	21,5	4810	0,8	1623,96
7	20,9	4830	1	1760,31
8	20,9	4890	0,9	1853,65
9	19,8	5340	1	2176,16
10	22,5	4870	0,9	1805,6
11	20,3	3520	0,9	1186,29
\bar{x}	21,6	4860	0,9	1838,99
s	1,89	607	0,1	381,25
v	8,75	12,49	10,23	20,73
s_x	0,57	183,02	0,03	114,95

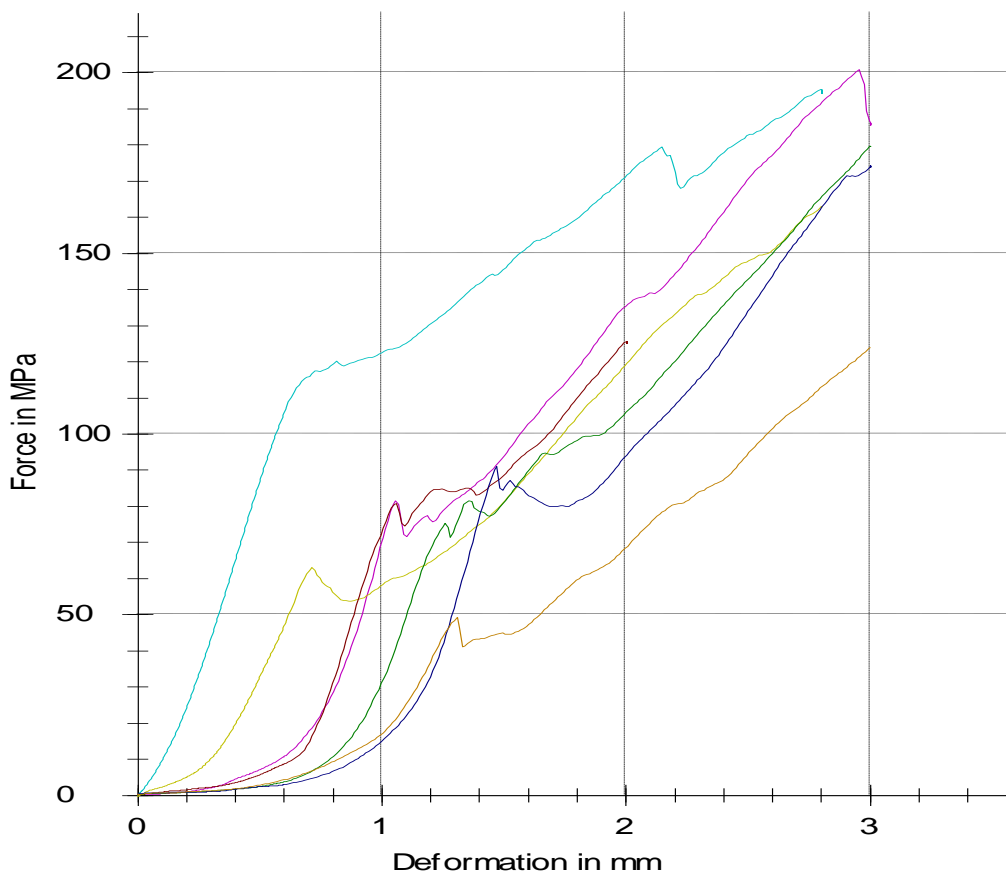


Obrázek 59- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Biresin

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles ze čtrnácti vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Araldit GY 764BD**. Rozměry 4,8x50x10 + drážka 6mm, tl. 4mm.

Tabulka 15- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.

zk. těleso č.	E [Gpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	19,45	3980,00	1,00	1324,19
2	20,60	4150,00	0,80	2183,84
3	17,94	4330,00	0,80	2421,60
4	20,70	4840,00	1,10	2319,51
5	19,52	3950,00	1,00	1852,51
6	16,40	4480,00	1,20	1322,64
7	15,78	3920,00	1,00	2112,53
\bar{x}	18,63	4340,00	1,00	1969,40
s	1,82	873,00	0,20	747,79
v	17,23	20,13	21,98	37,97
s_x	0,69	329,96	0,08	282,64

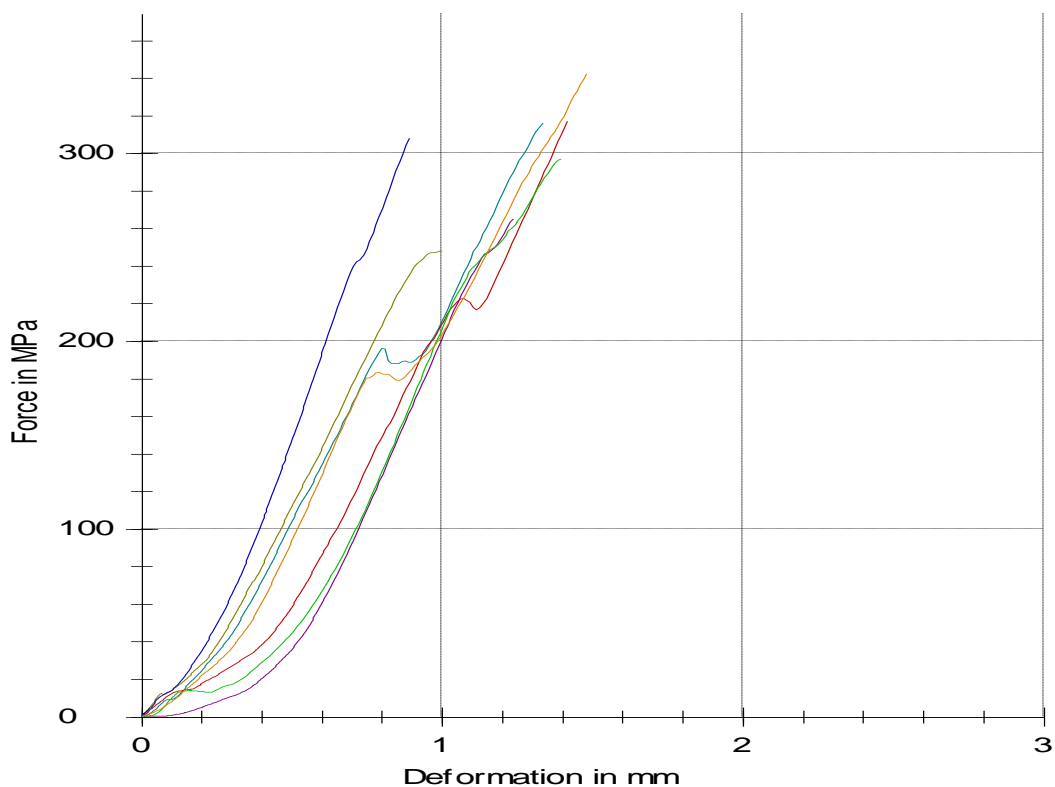


Obrázek 60- Graf závislosti napětí na deformaci, Araldit

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles ze **čtrnácti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Havel L285**. Rozměry 4x50x10 + drážka 6mm, tl. 4mm

Tabulka 16- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.

zk. těleso č.	E [Gpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	18,00	4350,00	1,20	1938,10
2	15,70	5180,00	1,30	3167,32
3	15,70	4370,00	1,00	2079,78
4	16,70	5590,00	1,40	3244,06
5	19,10	4750,00	1,40	2697,65
6	23,40	4510,00	0,90	1747,63
7	17,50	6300,00	1,50	4238,44
\bar{x}	18,00	5010,00	1,30	2730,43
s	2,67	730,00	0,20	889,47
v	14,82	14,58	17,90	32,58
s_x	1,01	275,91	0,08	336,19

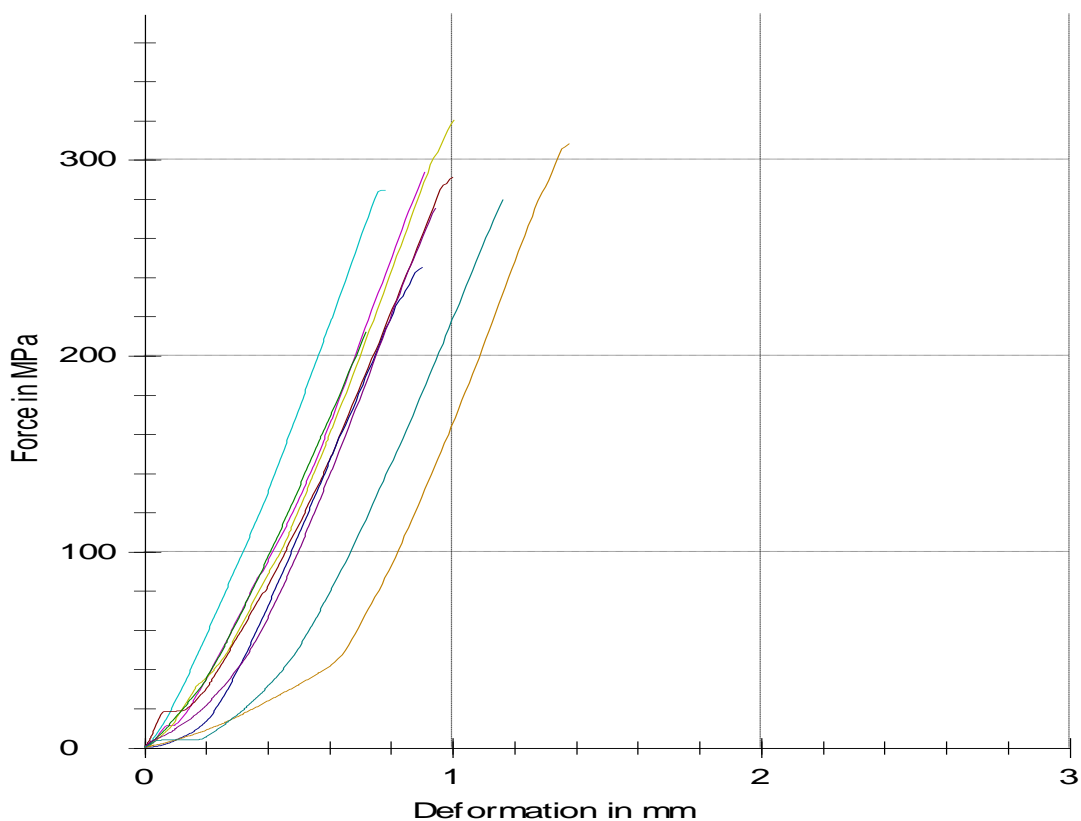


Obrázek 61- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel L285.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles ze čtrnácti vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **GRM systém LG700**. Rozměry 4x50x10 + drážka 6mm, tl. 4,5mm.

Tabulka 17- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.

zk. těleso č.	E [Gpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	19,00	5060,00	0,90	1943,73
2	21,70	4900,00	0,80	1797,22
3	19,30	5640,00	1,00	2422,78
4	16,40	5240,00	1,00	2286,23
5	17,90	3820,00	0,70	1178,03
6	18,60	4420,00	0,90	1641,97
7	20,60	5920,00	1,40	2691,61
8	19,90	5180,00	0,90	1919,78
9	19,30	5490,00	1,20	2240,85
\bar{x}	19,20	5070,00	1,00	2013,58
s	1,52	641,00	0,20	454,13
v	7,90	12,62	20,23	22,55
s_x	0,51	213,67	0,07	151,38



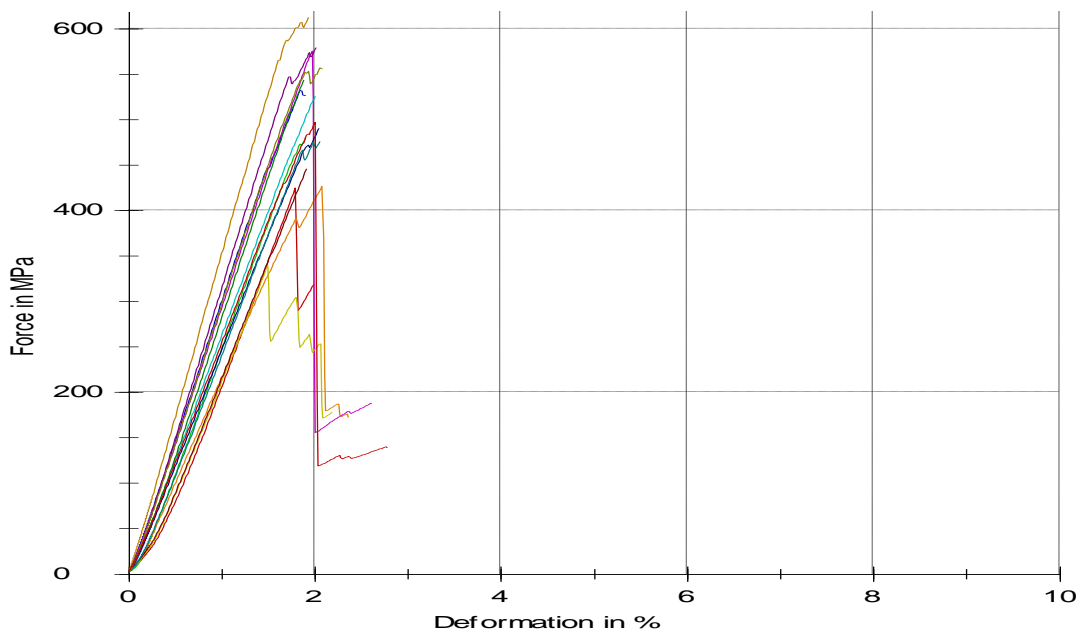
Obrázek 62- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM systém.

7.1.3 Naměřené hodnoty v ohybu

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Havel L285**. Rozměry 1,85x40x20mm

Tabulka 18- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	11700	425	1,8	445,12
2	18800	480	1,9	588,96
3	28200	532	1,8	661,64
4	18100	427	2,1	602,96
5	27400	575	2	746,9
6	25100	526	2	694,48
7	12500	340	1,5	299,92
8	13400	446	1,9	522,78
9	22900	544	1,9	656,48
10	22900	491	2	676,16
11	33100	613	1,9	850,4
12	29100	579	2	821,98
13	19100	476	2	664,45
14	27800	557	2,1	815,17
15	23000	497	2	672
\bar{x}	22200	501	1,9	647,96
s	6500	71,9	0,1	145,54
v	29,27	14,35	7,71	22,46
s_x	1678,29	18,56	0,03	37,58

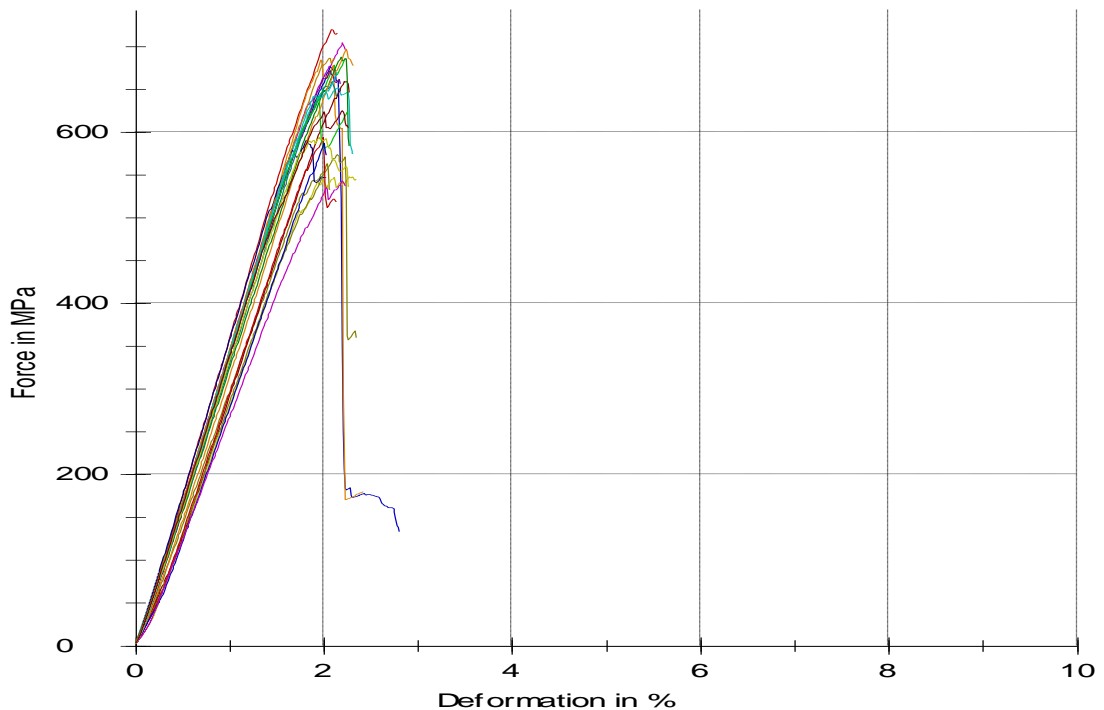


Obrázek 63- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Havel L285.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 1,6x40x20mm

Tabulka 19- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	25100	563	2	764,55
2	35100	720	2,1	884,02
3	32700	686	2,2	956,37
4	33100	677	2,1	917,62
5	31100	685	2	790,03
6	32400	704	2,2	942,94
7	31800	652	2,1	897,43
8	20800	548	2,3	895,93
9	23800	659	2,2	936,83
10	30000	688	2,2	933,83
11	35100	590	1,8	674,83
12	33100	687	2,1	909,99
13	32400	672	2,1	831,8
14	30400	660	2,1	881,26
15	22000	574	2,1	827,15
\bar{x}	29100	640	2,1	853,19
s	4980	54,1	0,1	92,25
v	17,14	8,45	5,58	10,81
s_x	1285,83	13,97	0,03	23,82

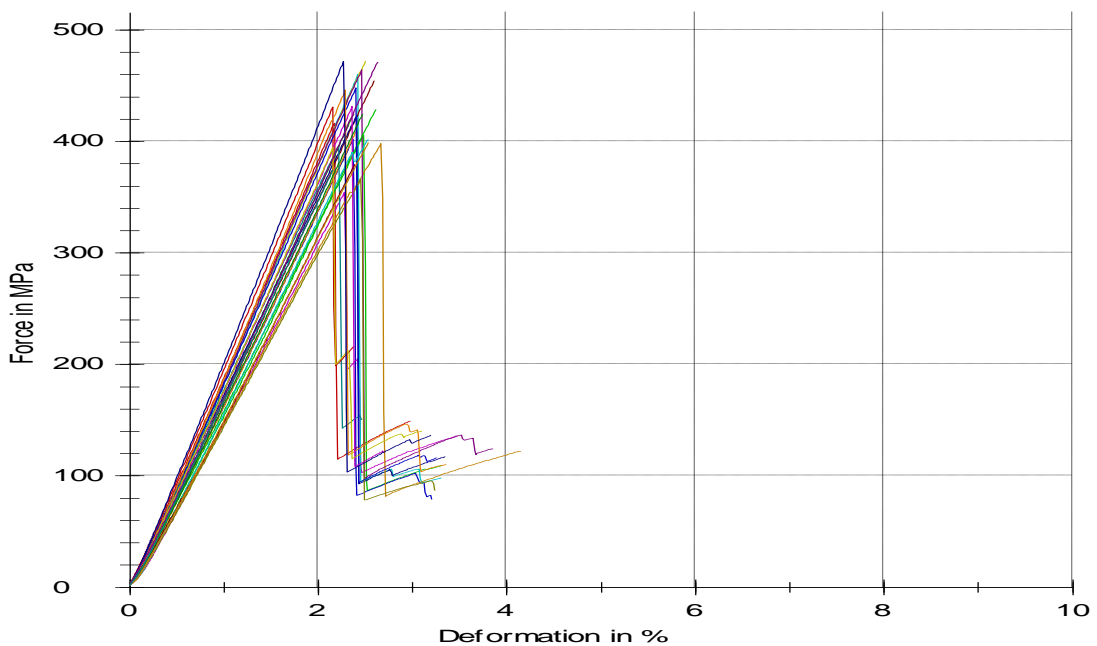


Obrázek 64- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Biresin CR82.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 5x40x20mm, z toho 0,4mm vrstva gel-coatu.

Tabulka 20- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	17600	416	2,2	669,51
2	12800	406	2,5	764,73
3	15000	402	2,4	686,41
4	15300	409	2,4	684,13
5	11800	354	2,3	620,19
6	16200	460	2,4	805,21
7	17300	472	2,5	837,13
8	15300	455	2,6	841,03
9	15300	424	2,4	707,69
10	16400	423	2,4	735,96
11	13300	398	2,7	828,95
12	16800	464	2,5	850,45
13	16500	396	2,2	634,28
14	12600	366	2,5	678,5
15	18300	431	2,2	695,15
\bar{x}	15400	420	2,4	746,79
s	1910	33,2	0,1	82,9
v	12,41	7,91	6,24	11,1
s_x	493,16	8,57	0,03	21,40

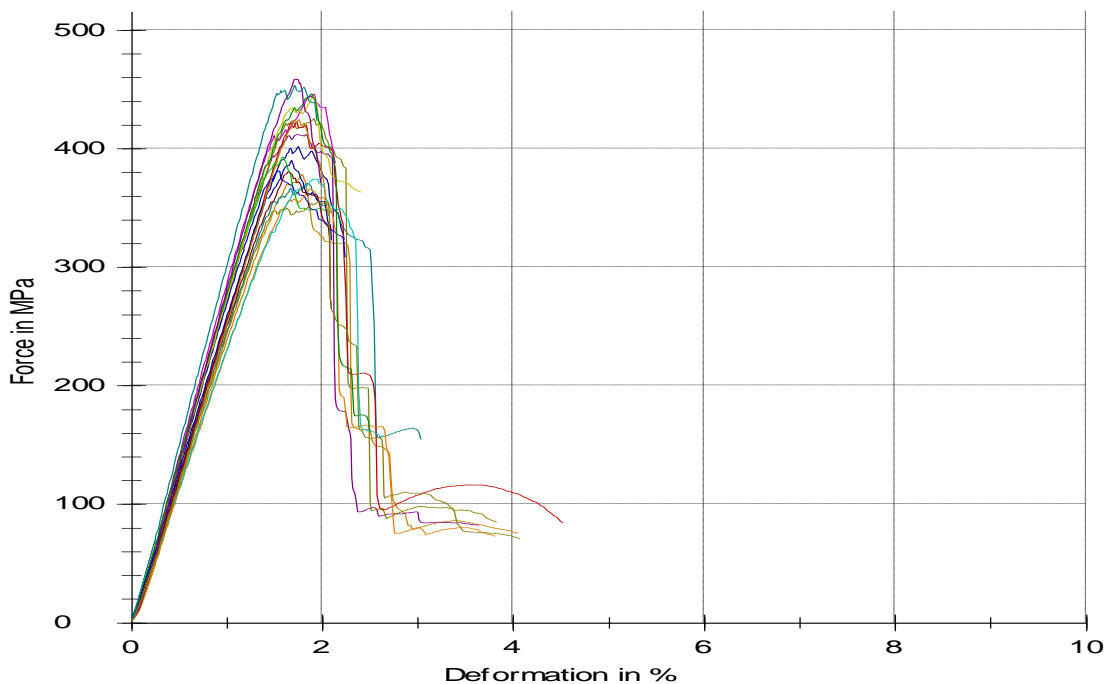


Obrázek 65- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Biresin.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použita pryskyřice **GRM systém LG700**. Rozměry 1,7x40x20mm

Tabulka 21- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	23100	402	1,7	461,37
2	21800	379	1,8	444,47
3	26000	412	1,7	491,66
4	22200	371	1,8	481,46
5	24400	425	1,9	572,79
6	23100	423	1,7	452,7
7	26300	393	1,6	414,14
8	24600	381	1,5	379,62
9	20500	366	1,9	467,87
10	26800	446	1,9	595,15
11	20200	375	1,9	487,49
12	25400	444	1,9	581,8
13	23400	381	1,6	399,6
14	25900	446	1,9	577,94
15	24000	390	1,7	430,19
\bar{x}	24100	407	1,8	485,37
s	2230	33	0,1	63,54
v	9,25	8,12	6,83	13,09
s_x	575,78	8,52	0,03	16,41

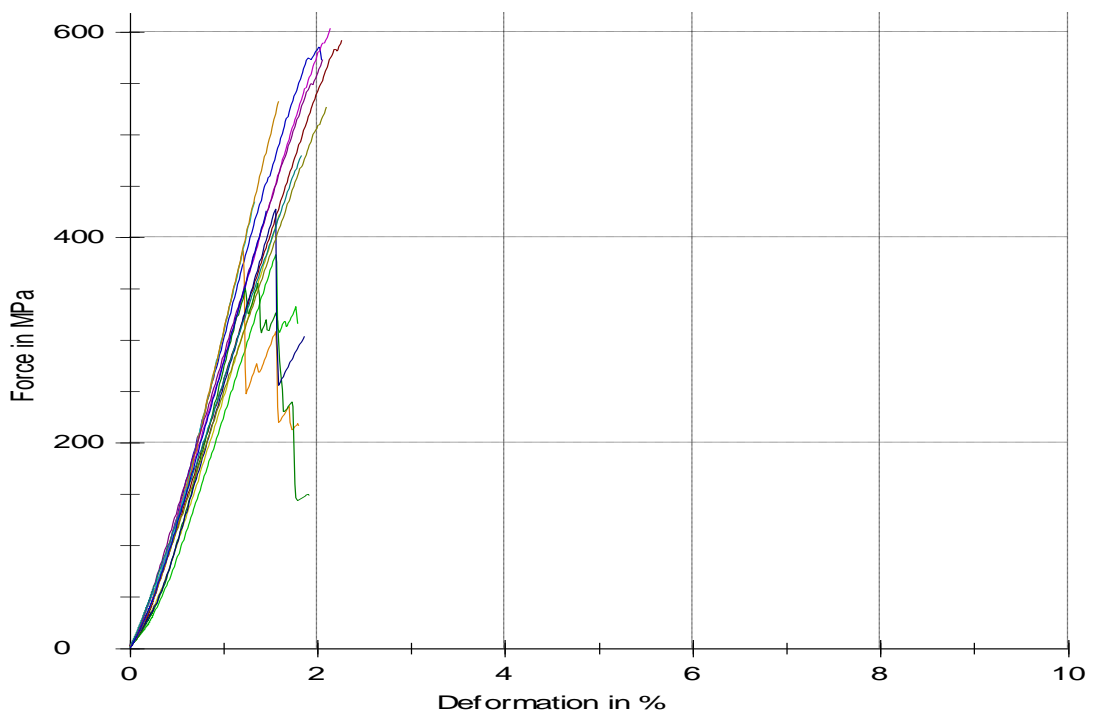


Obrázek 66- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, GRM systémem.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použita pryskyřice **Araldit GY 764BD**. Rozměry 1,85x40x20mm

Tabulka 22- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.

zk. těleso č.	E [Mpa]	σ_{max} [Mpa]	dL při σ_{max} [%]	W při σ_{max} [Nmm]
1	12800	384	1,5	347,92
2	18800	585	2	790,83
3	24100	388	1,2	287,32
4	21500	604	2,1	741,16
5	23000	435	1,3	355,44
6	15900	423	1,6	423,7
7	19500	592	2,3	816,77
8	15300	355	1,4	310,87
9	15500	428	1,6	418,38
10	19600	533	1,6	527,09
11	25200	573	2,1	725,06
12	24000	480	1,8	510,14
13	21200	527	2,1	648,6
14	20800	426	1,5	394,55
\bar{x}	19800	481	1,7	521,27
s	3780	86,4	0,3	187,89
v	19,11	17,96	19,94	36,05
s_x	1010,25	23,09	0,08	50,22



Obrázek 67-- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Araldit,

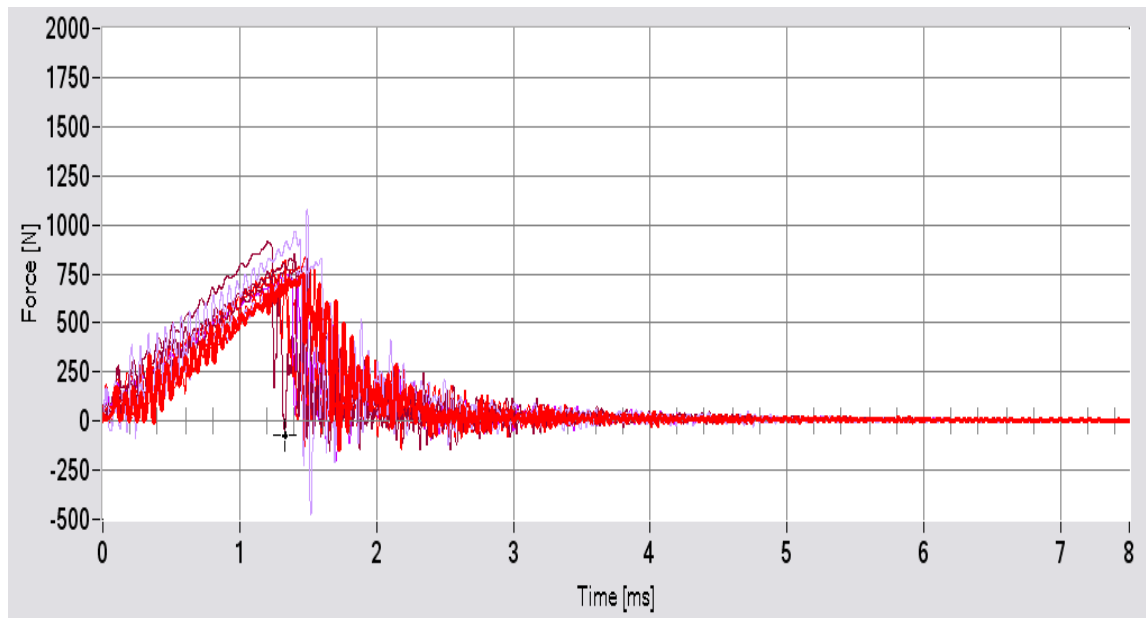
7.2 Výsledky dynamických zkoušek

7.2.1 Naměřené hodnoty rázové houževnatosti

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Havel L285**. Rozměry 1,9x40x12,9mm

Tabulka 23-Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti

zk. Těleso č.	Fm[N]	Sm[mm]	Am[kJ/m ²]	Ab[kJ/m ²]
1	742,36	2,11	30,49	35,81
2	912,52	1,7	35,17	35,17
3	748,67	1,91	32,69	35,7
4	834,37	2,12	32,97	36,51
5	852,02	1,99	34,38	36,83
6	825,55	2,25	37,52	39,13
7	807,9	1,9	32,26	34,49
8	828,07	1,94	35,52	38,43
9	1076,36	2,09	40,03	40,66
10	762,36	2	30,59	37,86
\bar{x}	839,02	2	34,16	37,06
s	93,05	0,14	2,86	1,84
v	334	0,55	9,54	6,17
s _x	29,42	0,04	0,90	0,58

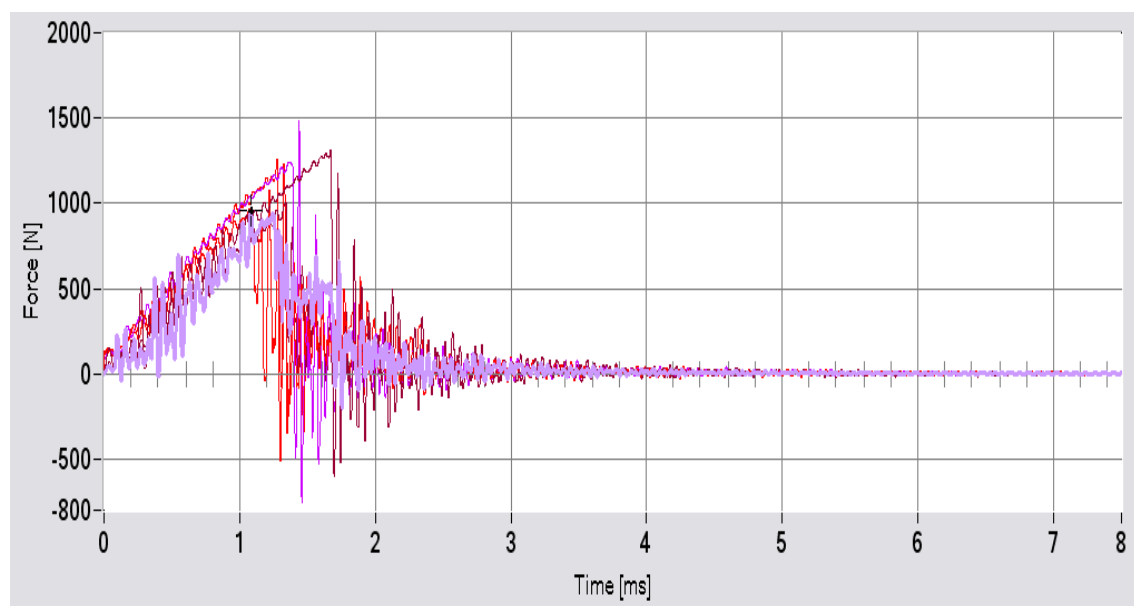


Obrázek 68-Graf závislosti působící síly na čase, Havel L285.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použita pryskyřice **Araldit GY 764BD**. Rozměry 2,01x40x16,5mm

Tabulka 24- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti

zk. Těleso č.	Fm[N]	Sm[mm]	Am[kJ/m ²]	Ab[kJ/m ²]
1	955,37	1,58	16,83	30,66
2	999,48	1,9	26,83	28,2
3	1479,69	1,94	38,22	38,61
4	1073,84	1,71	25,96	27,34
5	1308,28	2,24	43,04	43,44
6	955,37	1,58	16,83	30,66
7	1255,34	1,77	32,82	33,14
\bar{x}	1146,77	1,82	28,65	33,15
s	188,6	0,22	9,3	5,43
v	524,32	0,66	26,21	16,1
s_x	71,28	0,08	3,52	2,05

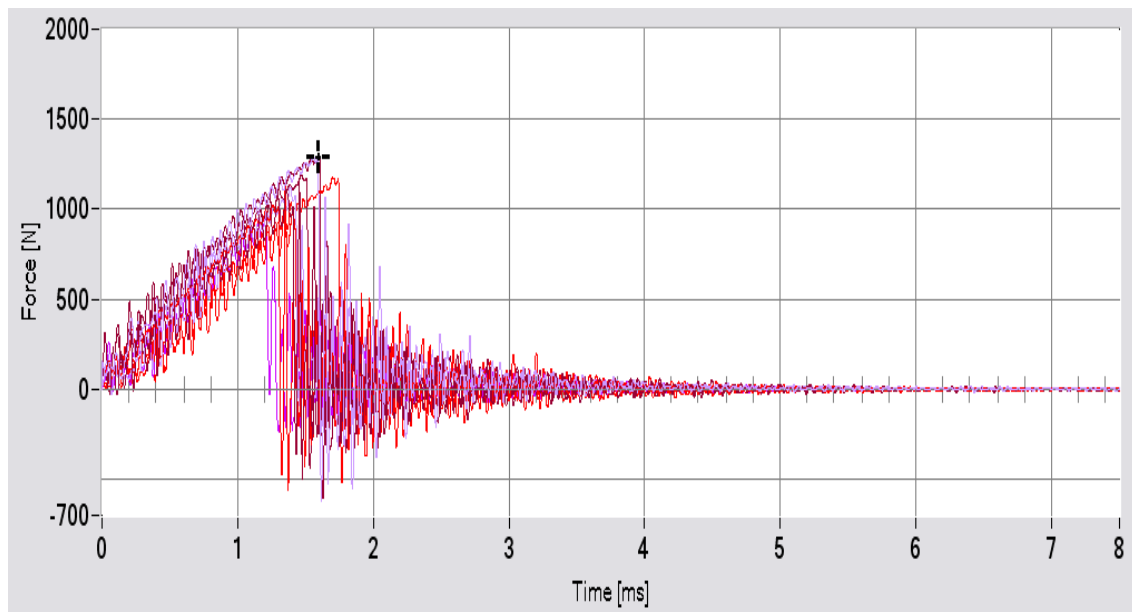


Obrázek 69- Graf závislosti působící síly na čase, Araldit GY 764BD.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použita pryskyřice **Araldit GY 764BD**. Rozměry 1,85x40x14,8mm

Tabulka 25- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti

zk. Těleso č.	Fm[N]	Sm[mm]	Am[kJ/m2]	Ab[kJ/m2]
1	1284,63	2,11	48,12	48,57
2	1289,37	2,05	47,24	47,24
3	956,63	1,73	25,68	26,12
4	1177,2	2,33	42,43	42,43
5	1189,8	2	41,43	43,39
6	1120,48	1,94	33,76	35,81
7	1130,56	1,88	33,18	33,57
8	1144,43	2,01	35,82	36,23
9	1290,63	2,12	48,1	48,47
10	975,53	2	27,78	28,85
\bar{x}	1155,93	2,02	38,35	39,07
s	113,32	0,15	7,89	7,72
v	334	0,6	22,44	22,45
s _x	35,83	0,05	2,50	2,44

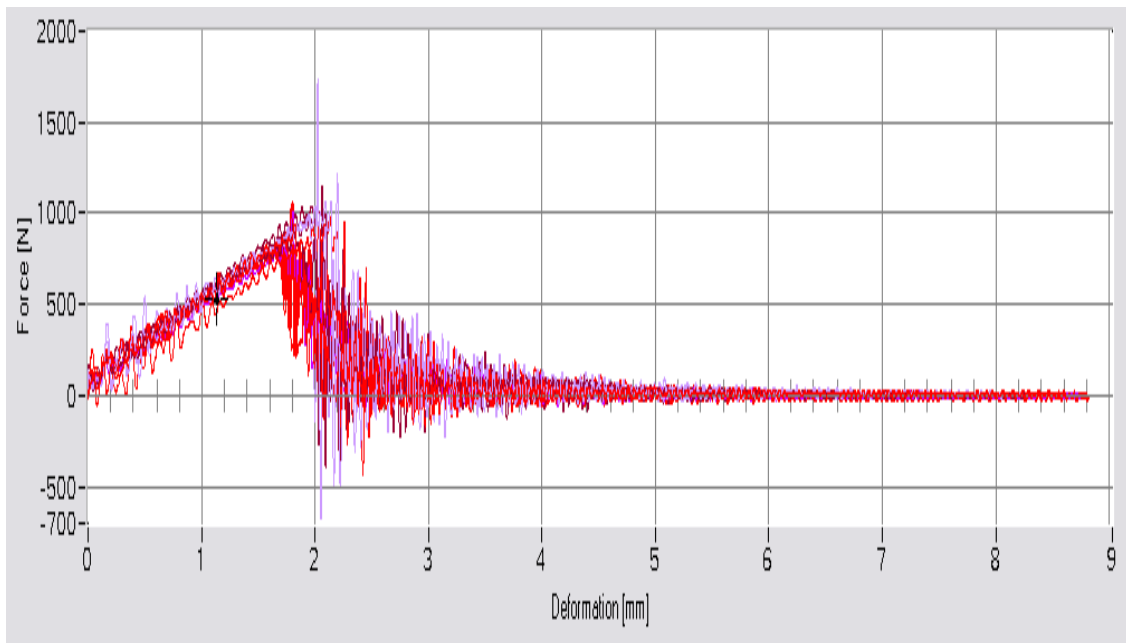


Obrázek 70- Graf závislosti působící síly na čase, Araldit GY 764BD.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použita pryskyřice **GRM Systém LG700**. Rozměry 1,6x40x15,5mm

Tabulka 26- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti

zk. Těleso č.	Fm[N]	Sm[mm]	Am[kJ/m ²]	Ab[kJ/m ²]
1	1053,7	1,8	33,9	39,6
2	1150,7	2,06	46,2	47,1
3	1003,3	1,81	32,3	42
4	980,6	2,13	39,6	42,4
5	1002	2,04	44,9	48,9
6	1738,1	2,03	43,7	44,2
7	857,1	1,76	32,7	37,6
8	905	1,81	34,3	49,8
9	1210	2,2	48,2	48,7
10	932,7	1,82	35,6	45,1
\bar{x}	1083,32	1,95	39,14	44,54
s	240,71	0,15	5,81	3,93
v	881	0,44	15,9	12,2
s_x	76,12	0,05	1,84	1,24

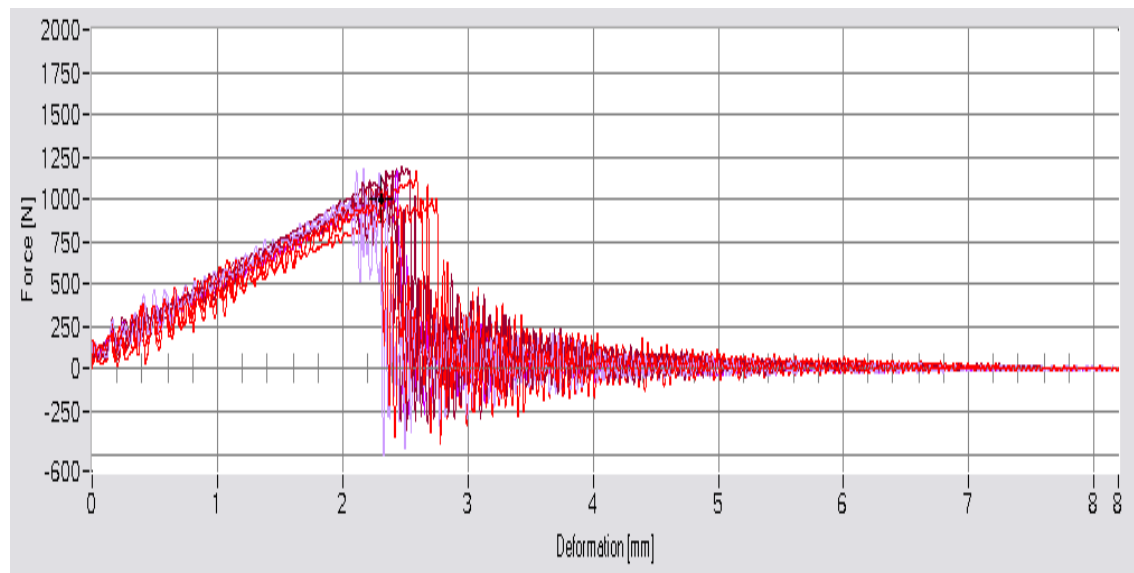


Obrázek 71- Graf závislosti působící síly na deformaci, GRM systém LG700.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 1,6x40x13mm

Tabulka 27- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti

zk. Těleso č.	Fm[N]	Sm[mm]	Am[kJ/m2]	Ab[kJ/m2]
1	1007	2,31	57,5	58,9
2	1186	2,5	73,5	77,6
3	1158,3	2,4	64,8	66,2
4	1000,7	2,7	67,9	70,3
5	1110,4	2,2	56,1	65,6
6	1184,8	2,1	56,3	62,3
7	1167,1	2,6	68,6	71,1
8	1169,6	2,35	62,5	67
9	1032,3	2,3	57,2	59,9
10	1017	2,1	54,5	59,9
\bar{x}	1103,32	2,36	61,89	65,88
s	75,7	0,19	6,21	5,64
v	185,3	0,6	19	18,7
s _x	23,94	0,06	1,96	1,78

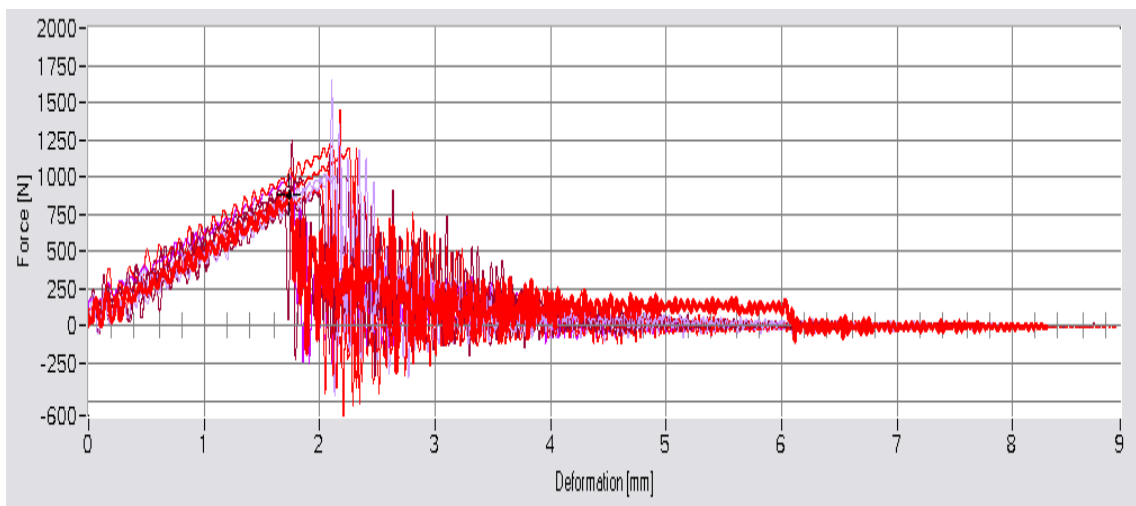


Obrázek 72- Graf závislosti působící síly na deformaci Biresin CR82.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 2x40x13mm, z toho vrstva gelcoatu 0,4mm.

Tabulka 28- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti

zk. Těleso č.	Fm[N]	Sm[mm]	Am[kJ/m2]	Ab[kJ/m2]
1	1197	2,25	49,24	50,1
2	1248	1,76	30	31
3	1001	1,76	37	39
4	1446	2,18	53,5	54
5	1154,5	2,09	36,1	36,6
6	1653,6	2,11	41,5	42,1
7	1048,6	2,08	37,5	38,1
8	998,2	1,83	36,5	39,2
9	1061,2	2,2	40,3	41
10	886,1	1,74	27,7	30,6
\bar{x}	1169,42	2	38,93	40,17
s	219,62	0,19	7,43	7
v	767,5	0,51	25,8	23,4
s_x	69,45	0,06	2,35	2,21



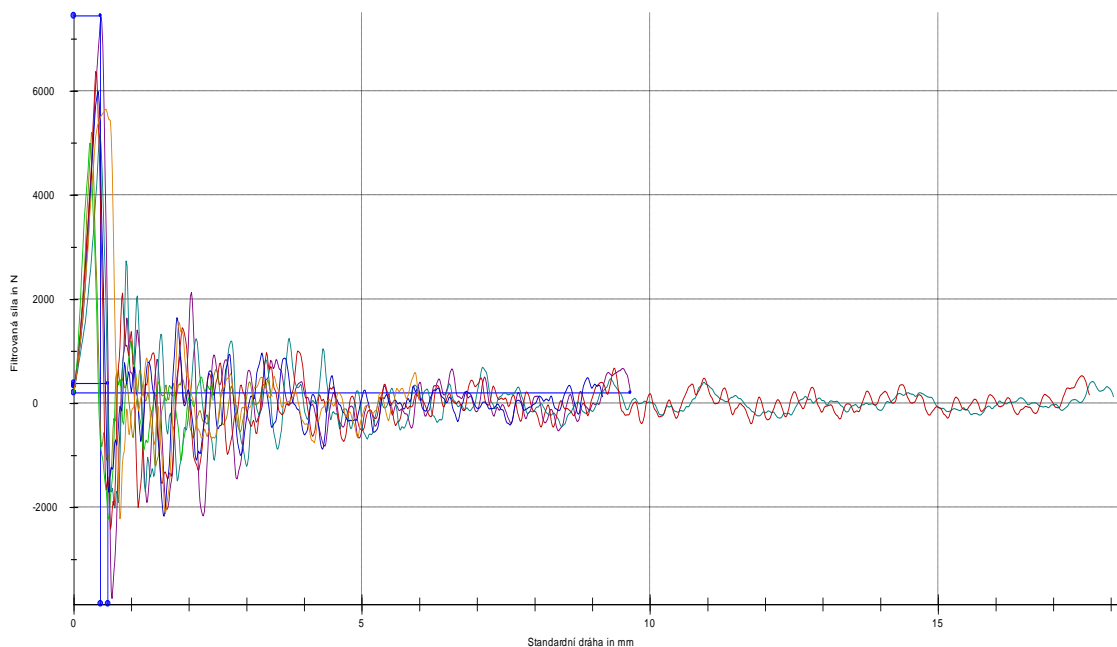
Obrázek 73- Graf závislosti působící síly na deformaci, Araldit GY 764BD.

7.2.2 Naměřené hodnoty rázové houževnatosti v tahu

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **třinácti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Havel L285**. Rozměry 4x80x10mm, v místě vrubu šířka 4mm.

Tabulka 29- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	7433,73	0,47	1,66	1,8
2	5192,44	0,46	1,01	1,2
3	5205,8	0,3	0,69	0,92
4	6378,08	0,38	1,04	1,44
5	4998,13	0,27	0,69	0,92
6	5994,15	0,42	1,22	1,35
7	5648,78	0,54	1,81	2,22
\bar{x}	5835,87	0,41	1,16	1,41
s	858,29	0,1	0,44	0,47
v	14,71	23,46	37,83	33,38
s_x	324,40	0,04	0,17	0,18

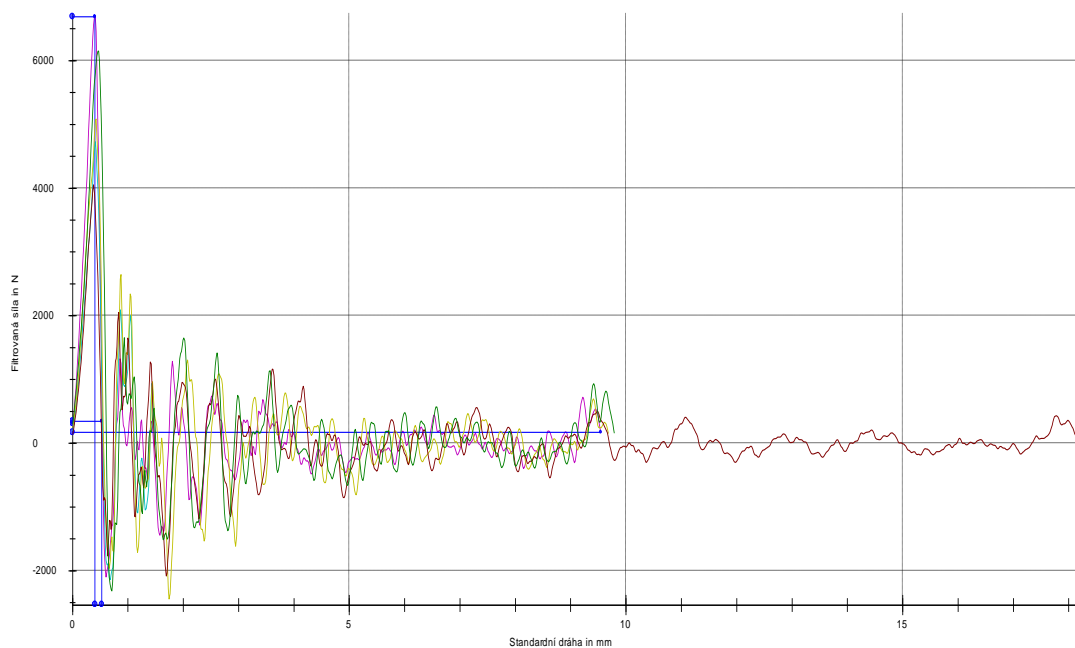


Obrázek 74- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, Havel L285.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **třinácti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použítá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 4x80x10mm, v místě v rubu šířka 4mm.

Tabulka 30- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	6678,74	0,41	1,38	1,5
2	4731,17	0,41	0,9	1,22
3	5085,04	0,42	1,08	1,33
4	4052,61	0,38	0,72	0,89
5	6149,29	0,47	1,47	1,77
6	6431,88	0,53	1,68	1,89
\bar{x}	5521,45	0,44	1,2	1,43
s	1052,13	0,05	0,37	0,37
v	19,06	12,37	30,51	25,69
s_x	429,53	0,02	0,15	0,15

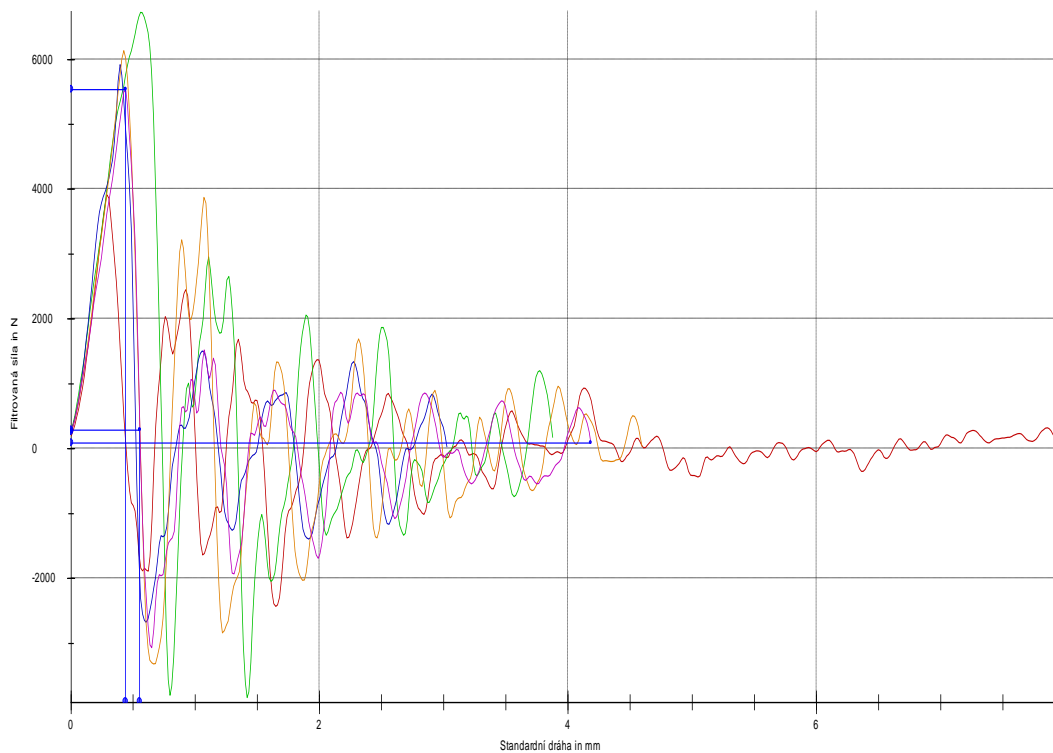


Obrázek 75- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, Biresin CR82.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **třinácti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použita pryskyřice **GRM systém LG700**. Rozměry 4x80x10mm, v místě v rubu šířka 4mm.

Tabulka 31- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	3915,43	0,29	0,53	0,88
2	6727,85	0,56	2,09	2,74
3	5923,46	0,39	1,13	1,33
4	6135,42	0,42	1,24	1,53
5	5526,91	0,44	1,21	1,22
\bar{x}	5645,81	0,42	1,24	1,54
s	1060,18	0,1	0,56	0,71
v	18,78	23,03	45,03	45,98
s _x	474,13	0,04	0,25	0,32

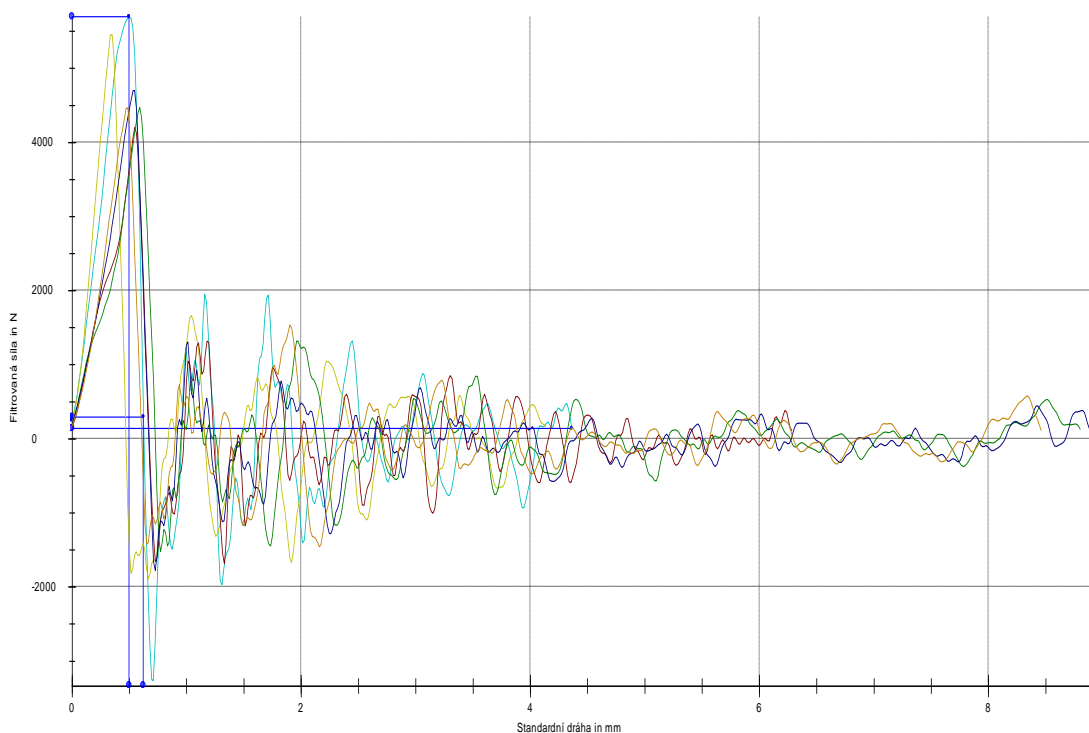


Obrázek 76- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, GRM systém LG700.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **třinácti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Araldit GY 764BD**. Rozměry 4x80x10mm, v místě v rubu šířka 4mm.

Tabulka 32- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	5690,75	0,5	1,58	1,66
2	5459,06	0,35	0,96	0,95
3	4200	0,55	1,08	1,09
4	4475,47	0,59	1,22	1,36
5	4700,95	0,53	1,19	1,15
6	4468,29	0,49	1,05	1,04
\bar{x}	4832,42	0,5	1,18	1,21
s	601,11	0,08	0,22	0,26
v	12,44	16,57	18,61	21,61
s_x	245,40	0,03	0,09	0,11



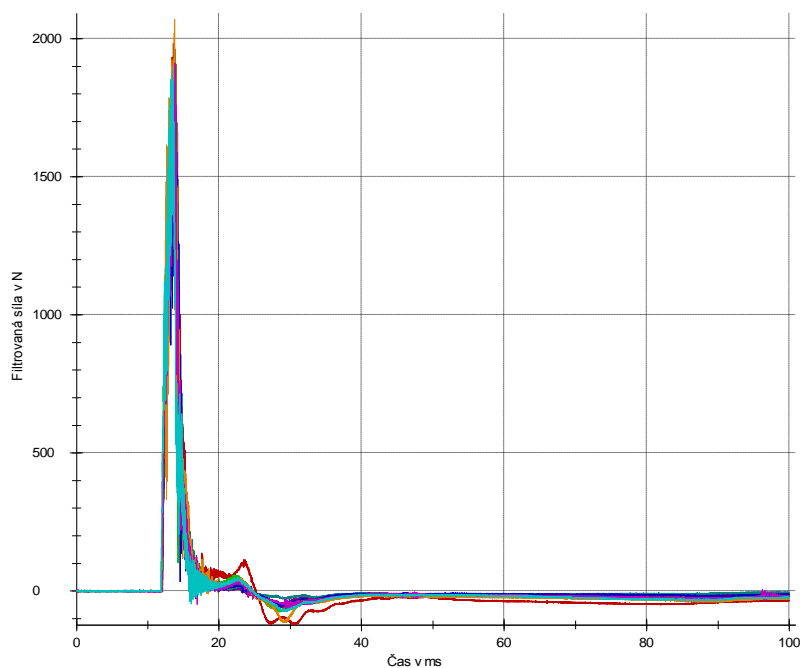
Obrázek 77- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, Araldit GY 764BD.

7.2.3 Naměřené hodnoty zkoušky víceosým namáháním

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **plátno**, použitá pryskyřice **Havel L285**. Rozměry 1,8x50x50mm.

Tabulka 33- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	1852,54	4,48	4,91	3,48
2	1686,94	4,78	4,89	3,41
3	1820,34	4,16	4,51	3,69
4	1962,38	4,96	5,62	3,34
5	1982,63	4,33	4,81	3,51
6	1903,05	4,71	4,99	3,28
7	1730,66	5,45	5,8	3,15
8	2070,44	4,93	6,07	3,44
9	1910,69	5,04	5,9	3,19
10	1893,56	4,42	4,95	3,04
\bar{x}	1881,32	4,73	5,25	3,35
s	115,04	0,39	0,54	0,19
v	6,11	8,21	10,37	5,73
s_x	36,38	0,12	0,17	0,06

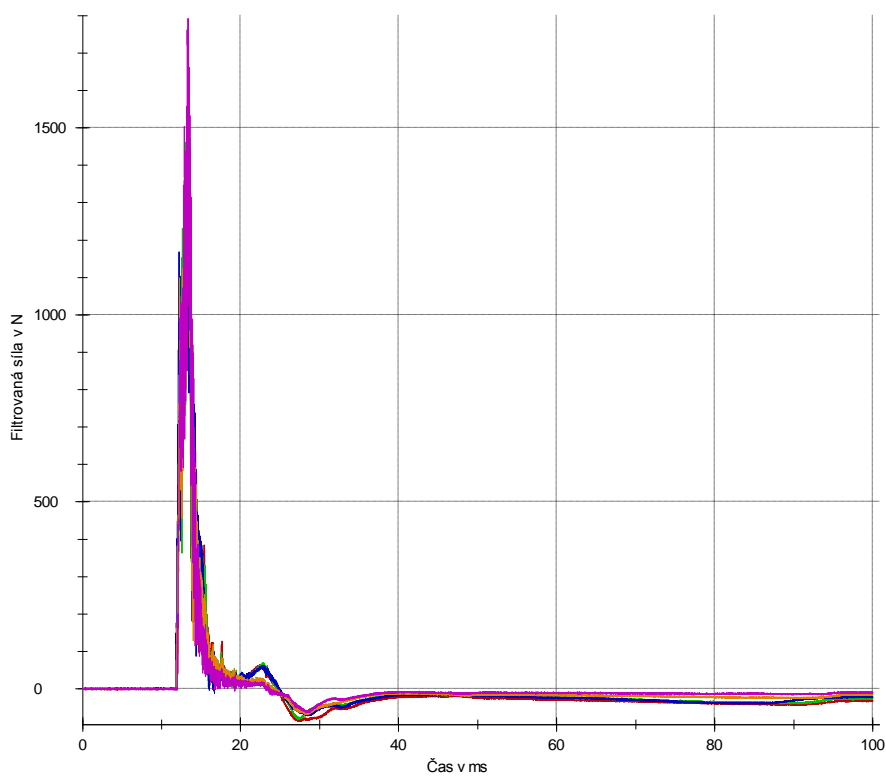


Obrázek 78- Graf - rázová houževnatost v tahu Araldit Havel L285..

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 1,6x50x50mm.

Tabulka 34- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	1449,69	4,21	3,63	1,63
2	1730,68	4,22	3,7	2,14
3	1390,14	4,09	3,33	2,16
4	1523,41	3,68	2,76	1,91
5	1792,16	3,81	3,44	2,1
\bar{x}	1577,22	4	3,37	1,99
s	176	0,24	0,37	0,22
v	11,16	6,1	11,1	11,25
s_x	78,71	0,11	0,17	0,10

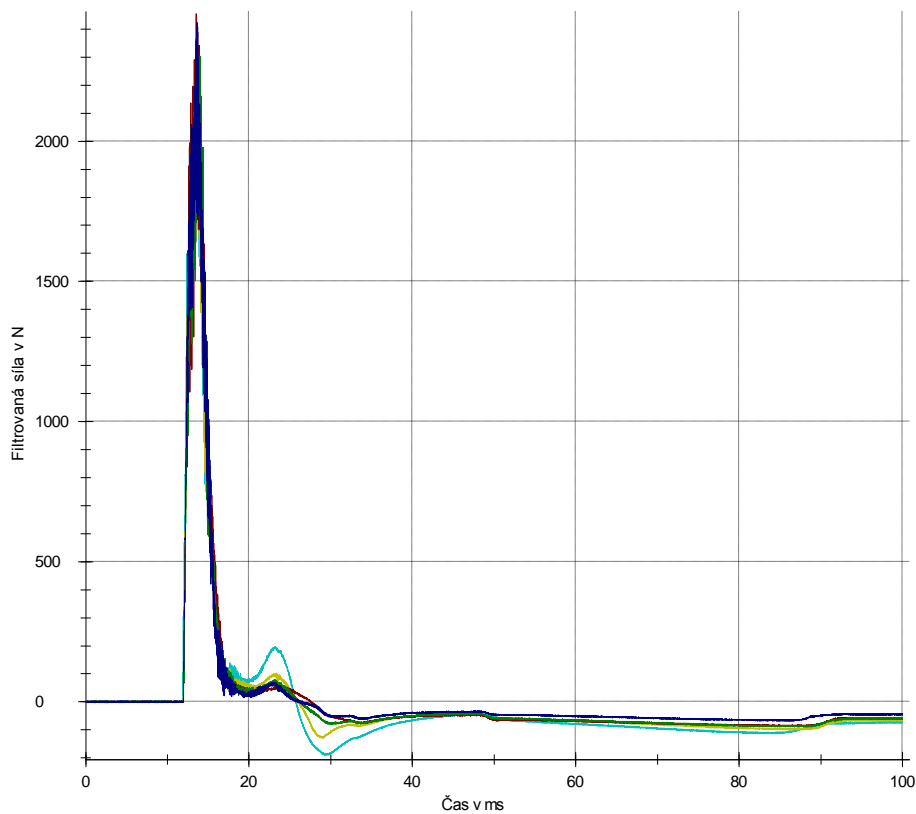


Obrázek 79- Graf - rázová houževnatost v tahu Biresin CR82.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Biresin CR82**. Rozměry 2x50x50mm, z toho vrstva gelcoatu 0,4mm.

Tabulka 35- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	2113,52	5,15	7,31	4,42
2	2256,9	5,11	7,69	5,31
3	2454,27	4,43	6,19	6,13
4	2303,23	5,79	8,82	5,89
5	2422,85	4,83	7,14	5,91
\bar{x}	2310,15	5,06	7,43	5,53
s	136,95	0,5	0,95	0,69
v	5,93	9,79	12,84	12,54
s_x	61,25	0,22	0,42	0,31

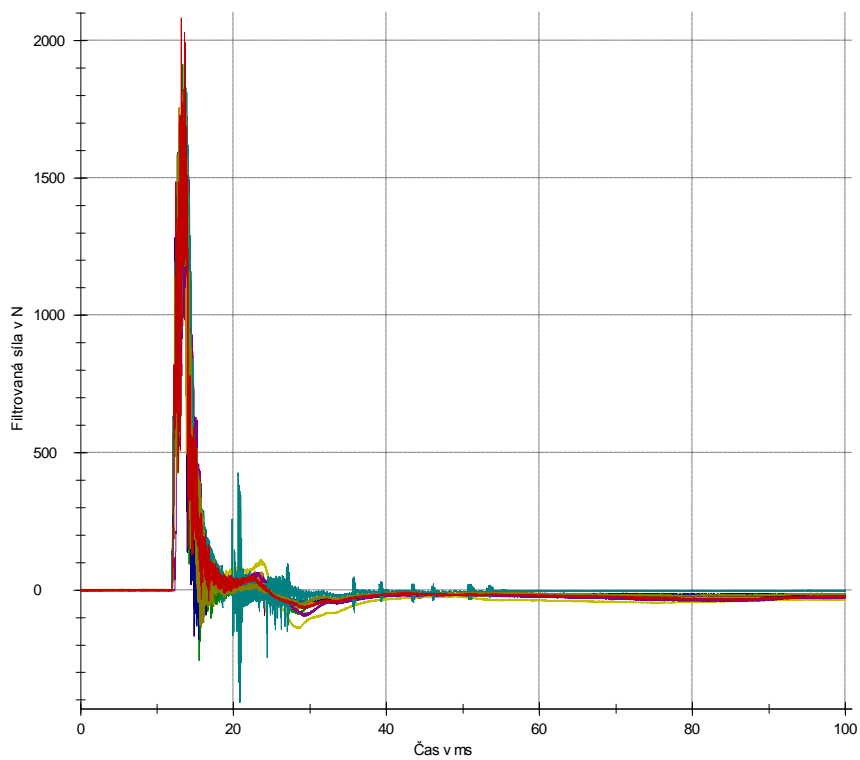


Obrázek 80- Graf - rázová houževnatost v tahu, Biresin CR82 a vrstva gelcoatu.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **GRM systém LG700**. Rozměry 1,8x50x50mm.

Tabulka 36- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	1742,93	3,72	3,75	2,93
2	1703,29	4,85	5,32	2,43
3	1913,65	3,77	3,82	2,29
4	1712,56	4,99	5,51	2,41
5	1975,42	4,65	5,06	2,85
6	1594,52	4,48	4,55	2,69
7	1827,93	5,19	5,87	2,49
8	1807,67	4,64	5,05	2,8
9	2081,71	3,12	2,82	2,77
\bar{x}	1817,74	4,38	4,64	2,63
s	151,46	0,69	0,99	0,23
v	8,33	15,71	21,35	8,65
Sx	50,49	0,23	0,33	0,08

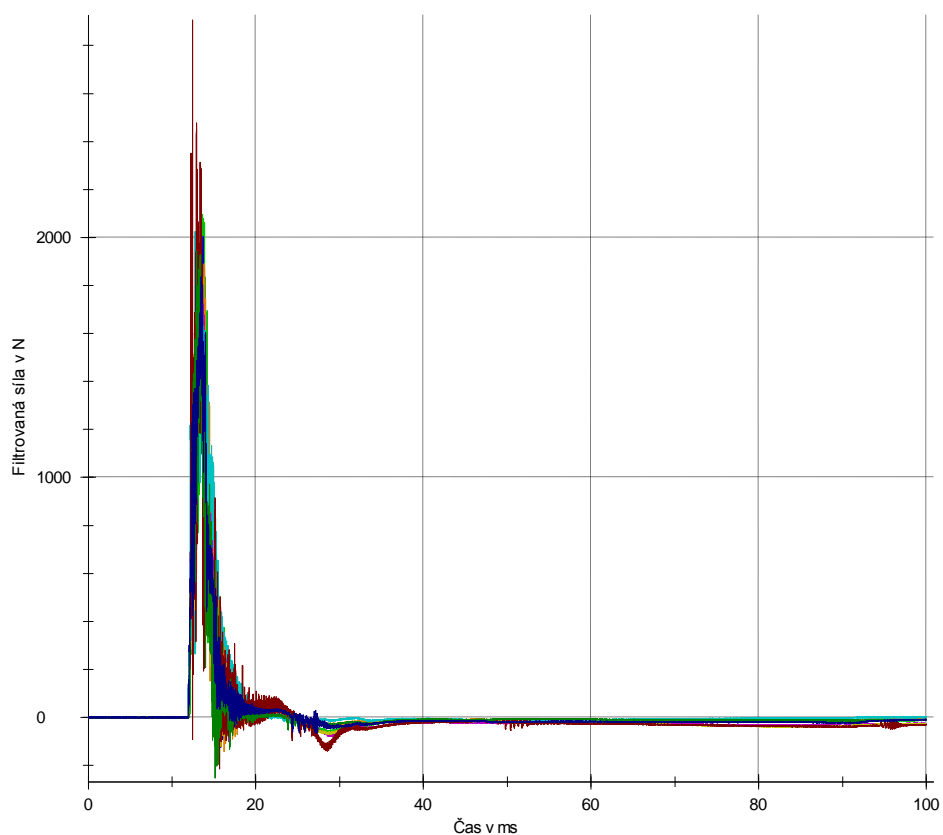


Obrázek 81- Graf - rázová houževnatost v tahu, GRM systém LG700.

-Experimentálně zjištěné hodnoty zkušebních těles z **pěti** vrstev tkaniny s vazbou **kepr**, použitá pryskyřice **Araldit GY 764BD**. Rozměry 1,8x50x50mm.

Tabulka 37- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním

zk. Těleso č.	Fmax [N]	Sm [mm]	Wm [J]	Pokles rychlosti [%]
1	2095,86	4,15	4,6	3,08
2	2003,31	4,72	5,68	3,12
3	1955,93	2,93	2,48	3,18
4	1816,63	3,99	4,46	3,12
5	2024,38	2,15	1,6	4
6	1719,36	4,07	4,31	2,39
7	2906,88	1,08	0,83	2,77
8	1940,27	2,53	2,34	2,54
9	1836,7	4,24	4,59	3,19
\bar{x}	2033,26	3,32	3,43	3,04
s	347,64	1,21	1,65	0,46
v	17,1	36,38	48,08	15,21
s_x	115,88	0,40	0,55	0,15



Obrázek 82- Graf - rázová houževnatost v tahu, Araldit GY 764BD.

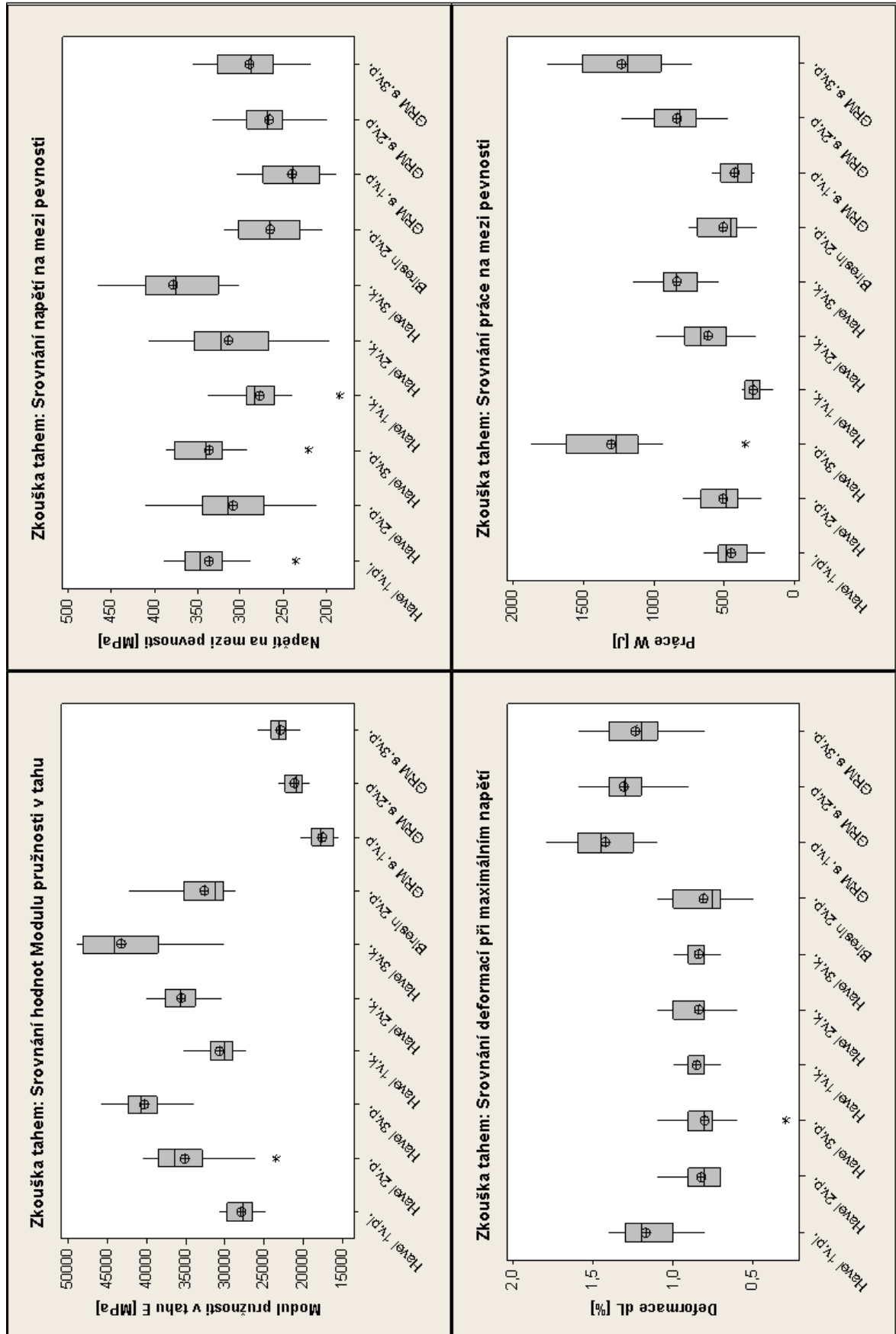
8 VYHODNOCENÍ A SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

8.1 Statické zkoušky

Tabulka 38 - Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek v tahu

	Havel 1vr./pl	Havel 2vr./pl.	Havel 3vr./pl.	Havel 1vr./k.	Havel 2v./kepr.	Havel 3vr./k.	Biresin 2v/pl	GRM 1v/pl.	GRM 2v/pl	GRM 3v/pl
[GPa]	Modul pružnosti v tahu- E									
\bar{x}	28000	35100	40300	30700	35600	43300	32600	17700	21100	23000
s	1820	5150	3100	2140	2670	5590	3960	1580	1170	1580
v	6,51	14,67	7,7	6,98	7,51	12,92	12,12	8,91	5,55	6,88
s_x	469,92	1330	859,79	552,55	689,39	1443,3	1143,2	499,64	302,1	438,21
[MPa]	Mez pevnosti v tahu – σ									
\bar{x}	337	309	337	278	314	378	265	240	268	290
s	39,5	61,6	44	37,4	58	51	38,4	36,8	36,7	41,2
v	11,73	19,98	13,06	13,42	18,49	13,5	14,48	15,34	13,71	14,2
s_x	10,2	15,91	12,2	9,66	14,98	13,17	11,09	11,64	9,48	11,43
[%]	Deformace při max. tahu – ΔL									
\bar{x}	1,2	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	1,4	1,3	1,3
s	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
v	14,76	15,47	22,3	9,57	17,63	11,54	23,26	14,85	15,29	16,05
s_x	0,05	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,05	0,06
[J]	Práce na mezi pevnosti – W									
\bar{x}	452,77	505,5	1307,27	290,37	615,19	837,22	510,87	423,15	835,82	1227,84
s	116,05	177,6	396,85	58,69	200,42	190,9	164,55	113,41	222,62	318,74
v	25,63	35,14	30,36	20,21	32,58	22,8	32,21	26,8	26,63	25,96
s_x	29,96	45,87	110,07	15,15	51,75	49,29	47,5	35,86	57,48	88,4

Zkouškou tahem byly změřeny kompozity ze třech druhů pryskyřic Havel L285, Biresin CR82 a GRM systém LG700. Z tabulky naměřených hodnot je zřejmé, že s rostoucím počtem vrstev tkaniny v kompozitu, roste modul pružnosti v ohybu. Pro zkoušku kompozitů z pryskyřice Havel L285 byly použity oba druhy tkaniny (plátno a kepr) a ukázalo se, že rozdíly modulů pružnosti mezi kompozity z jednotlivých tkanin jsou zanedbatelné. Proto v dalším měření nebyl kladen takový důraz na porovnávání tkanin mezi sebou, ale spíše porovnávání mechanických vlastností mezi kompozity z jednotlivých pryskyřic. Kompozity z pryskyřice GRM systém LG700 měly modul pružnosti výrazně nižší, skoro poloviční, než vzorky z pryskyřice Havel L285 a zároveň měly větší poměrnou deformaci při mezi pevnosti. Dále je zřejmé, že s rostoucím počtem vrstev tkaniny v kompozitu roste mez pevnosti v tahu a potvrdilo se to u dvou ze tří případů. Tato skutečnost je pravděpodobně ovlivněna kvalitou výroby.



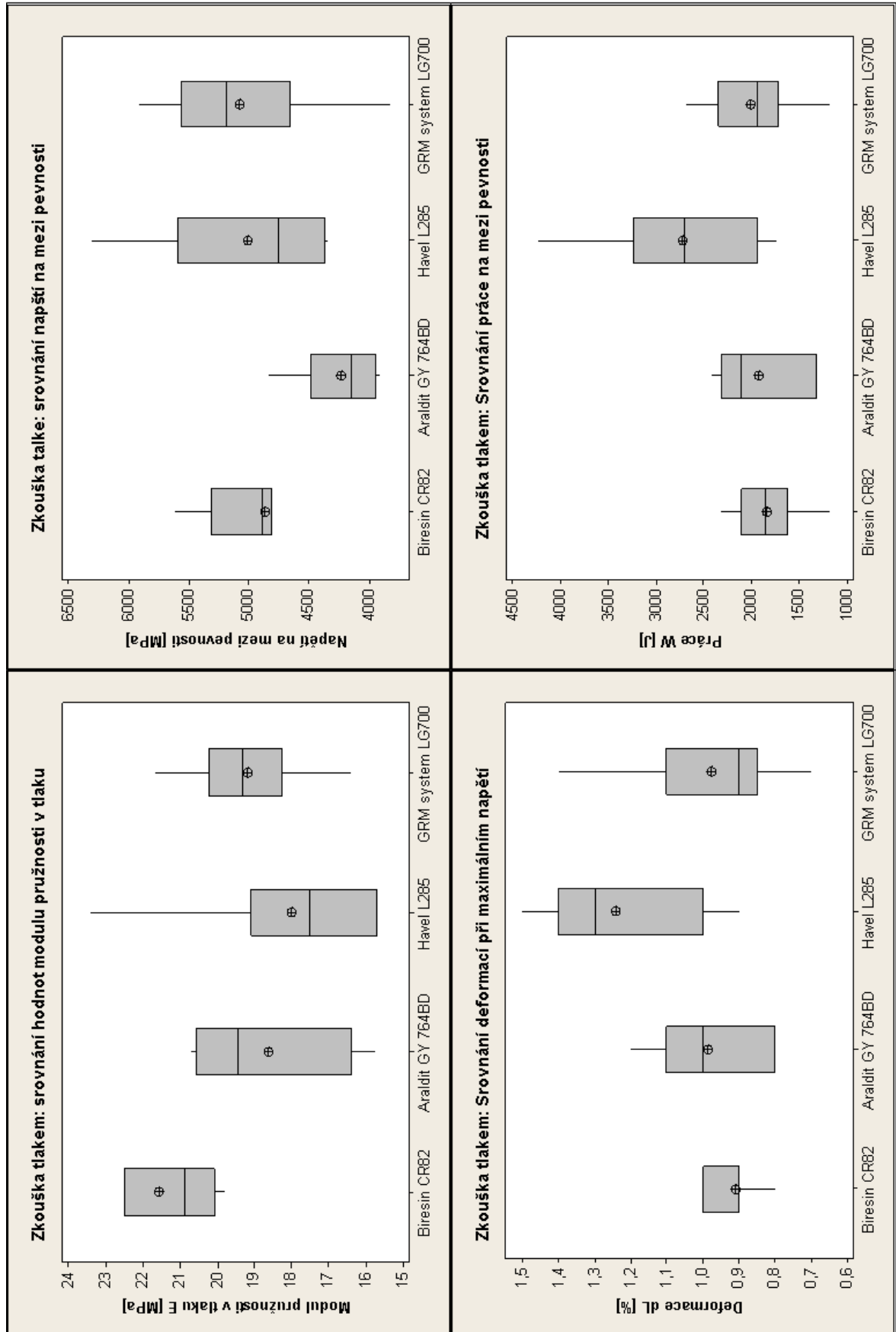
Obrázek 83-Grafy hodnot zkoušky tahem

Tabulka 39- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek v tlaku

	Havel L285	Biresin CR82	GRM systém LG700	Araldit GY 764BD
[GPa]	Modul pružnosti v tlaku- E_t			
\bar{x}	18	21,6	19,2	18,63
s	2,67	1,89	1,52	1,82
v	14,82	8,75	7,9	17,23
s_x	1,01	0,57	0,51	0,69
[MPa]	Mez pevnosti v tlaku – σ_t			
\bar{x}	5010	4860	5070	4340
s	730	607	641	873
v	14,58	12,49	12,62	20,13
s_x	275,91	183,02	213,67	329,96
[%]	Deformace při maximálním tlaku – ΔL			
\bar{x}	1,3	0,9	1	1
s	0,2	0,1	0,2	0,2
v	17,9	10,23	20,23	21,98
s_x	0,08	0,03	0,07	0,08
[J]	Práce na mezi pevnosti – W			
\bar{x}	2730,43	1838,99	2013,58	1969,4
s	889,47	381,25	454,13	747,79
v	32,58	20,73	22,55	37,97
s_x	336,19	114,95	151,38	282,64

Zkouškou tlakem byly změřeny kompozity ze všech čtyřech druhů matric a všechny byly vyrobeny ze stejného typu uhlíkové tkaniny-plátno.

Všechny zkušební tělesa měla stejné rozměry a počty vrstev. Výsledky modulu pružnosti v tlaku nejsou výrazně statisticky výrazné. Přesto nejnižšího modulu dosáhl kompozit z pryskyřice Havel L285 a zároveň měl nejvyšší deformaci, který naopak u zkoušky tahem dosáhl nejvyšší hodnoty modulu v tahu.

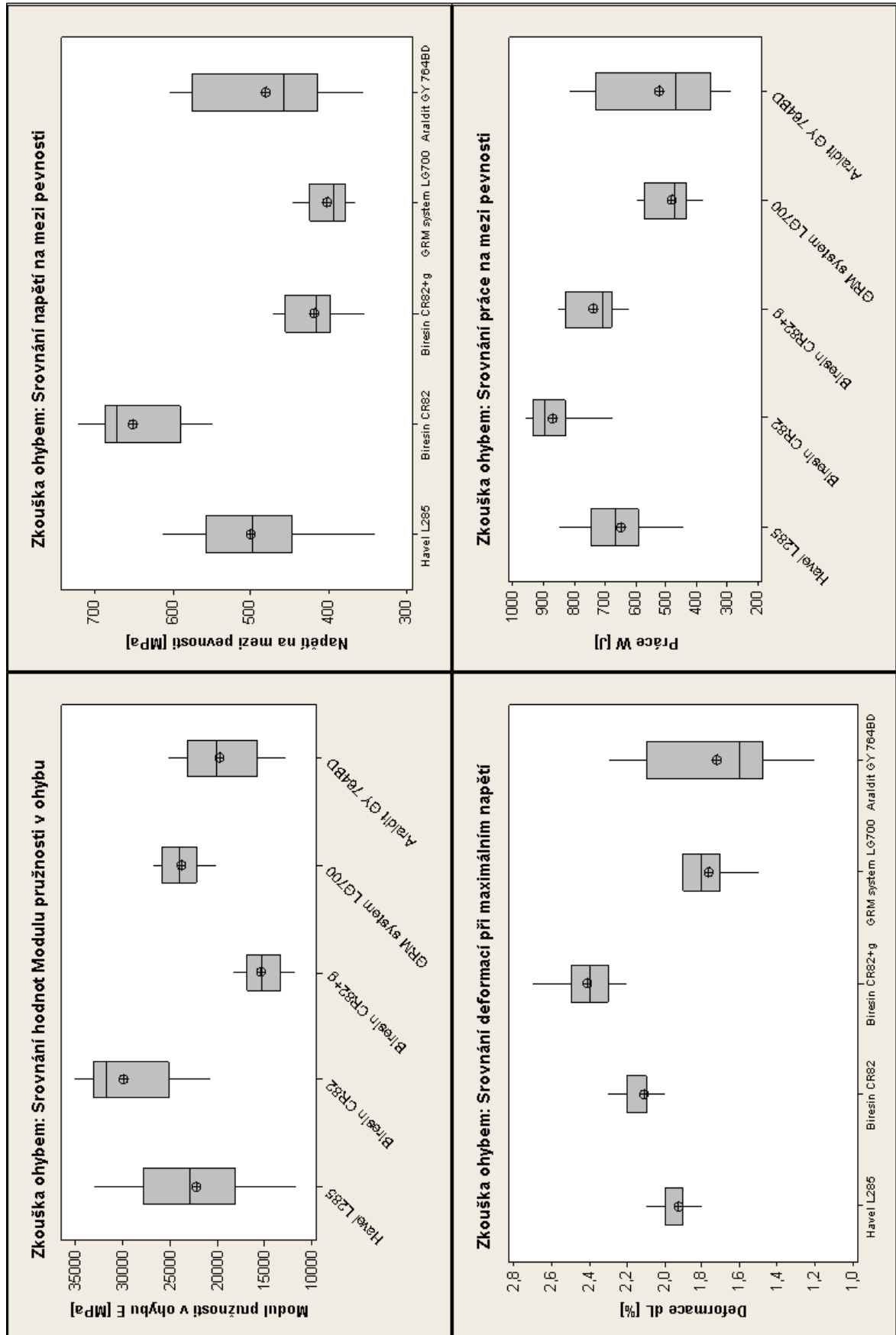


Obrázek 84-Grafy hodnot zkoušky tlakem

Tabulka 40- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek v ohybu

	Havel L285	Biresin CR82	Biresin CR82+gelcoat	GRM systém LG700	Araldit GY 764BD
[N]	Ohybový modul – E_o				
\bar{x}	22200	29100	15400	24100	19800
s	6500	4980	1910	2230	3780
v	29,27	17,14	12,41	9,25	19,11
s _x	1678,29	1285,83	493,16	575,78	1010,25
[mm]	Mez pevnosti v ohybu – σ_o				
\bar{x}	501	640	420	407	481
s	71,9	54,1	33,2	33	86,4
v	14,35	8,45	7,91	8,12	17,96
s _x	18,56	13,97	8,57	8,52	23,09
[J]	Průhyb při maximální síle – ΔL				
\bar{x}	1,9	2,1	2,4	1,8	1,7
s	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
v	7,71	5,58	6,24	6,83	19,94
s _x	0,03	0,03	0,03	0,03	0,08
[%]	práce na mezi pevnosti – W				
\bar{x}	647,96	853,19	746,79	485,37	521,27
s	145,54	92,25	82,9	63,54	187,89
v	22,46	10,81	11,1	13,09	36,05
s _x	37,58	23,82	21,4	16,41	50,22

Zkouškou ohybem byly změřeny kompozity ze všech čtyřech druhů matric. Kompozit z pryskyřice Biresin CR82 byl vyroben vakuovou infuzí z tkaniny s vazbou kepr a byl rozdělen do dvou sérií. Jedna série byla navíc opatřena 0,4 milimetrovou vrstvou gelcoatu. Ostatní tělesa byly vyrobeny z výztuže s vazbou plátno. Vrstvou gelcoatu se zvětšila tloušťka vzorku. Naměřený ohybový modul a maximální napětí vzhledem k měřenému průřezu byl u vzorku s vrstvou gelcoatu výrazně nižší než u vzorku bez gelcoatu. Z toho plyne, že vrstva gelcoatu má výrazně nižší pevnost než uhlíková tkanina. Dále jde z výsledků vidět, že kompozit vyrobený vakuovou infuzí (Biresin CR82) dosahuje až o cca 25 procent vyššího modulu i meze pevnosti v ohybu.



Obrázek 85--Grafy hodnot zkoušky ohybem

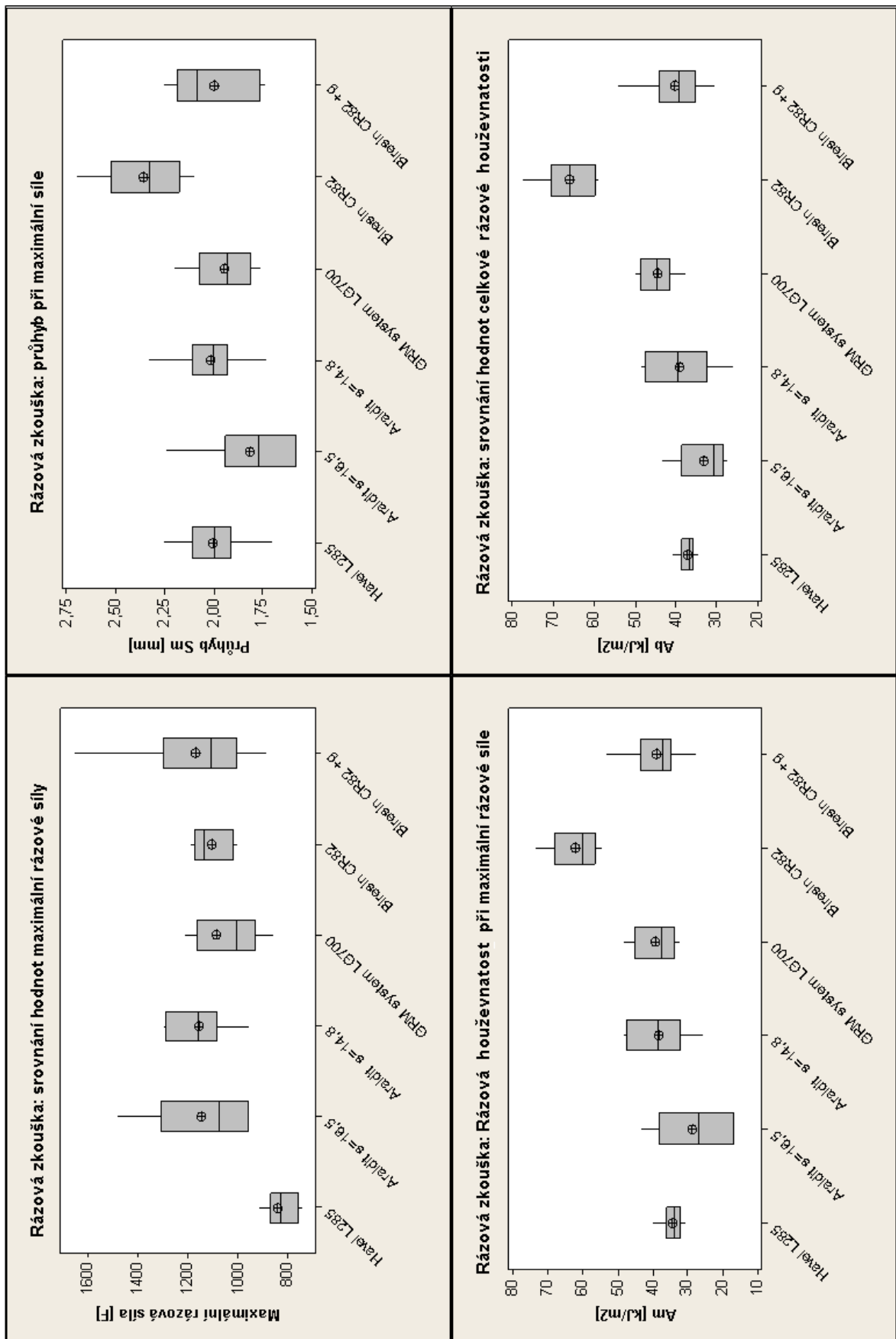
8.2 Dynamické zkoušky

Tabulka 41- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek rázové houževnatosti pro jednotlivé typy materiálů.

	Havel L285	Araldit GY 764BD	Araldit GY 764BD	GRM systém LG700	Biresim CR82	Biresin CR82+g
	1,9x40x12,9	2,01x40x16,5	1,85x40x14,8	1,6x40x15,5	1,6x40x13	2x40x13
[N]	Maximální rázová síla - F					
\bar{x}	839,02	1146,77	1155,93	1083,32	1103,32	1169,42
s	93,05	188,6	113,32	240,71	75,7	219,62
v	334	524,32	334	881	185,3	767,5
s_x	29,42	71,28	35,83	76,12	23,94	69,45
[mm]	Průhyb při maximální rázové síle – Sm					
\bar{x}	2	1,82	2,02	1,95	2,36	2
s	0,14	0,22	0,15	0,15	0,19	0,19
v	0,55	0,66	0,6	0,44	0,6	0,51
s_x	0,04	0,08	0,05	0,05	0,06	0,06
[kJ/m2]	Rázová houževnatost při maximální síle- Am					
\bar{x}	34,16	28,65	38,35	39,14	61,89	38,93
s	2,86	9,3	7,89	5,81	6,21	7,43
v	9,54	26,21	22,44	15,9	19	25,8
s_x	0,9	3,52	2,5	1,84	1,96	2,35
[kJ/m2]	Rázová houževnatost celková - Ab					
\bar{x}	37,06	33,15	39,07	44,54	65,88	40,17
s	1,84	5,43	7,72	3,93	5,64	7
v	6,17	16,1	22,45	12,2	18,7	23,4
s_x	0,58	2,05	2,44	1,24	1,78	2,21

Nejnižší hodnoty maximální síly dosáhl kompozit z pryskyřice Havel L285.

Dále byl porovnán kompozit z pryskyřice Biresin CR82 s vrstvou gelcoatu a bez gelcoatu. Pro přeražení vzorku s vrstvou gelcoatu bylo potřeba asi o 6 procent více síly než u vzorku bez gelcoatu. Naopak u vzorku bez gelcoatu byla vynaložena větší energie než u vzorku s gelcoatem. Hodnoty výsledků u jednotlivých pryskyřic jsou hodně vyrovnané.

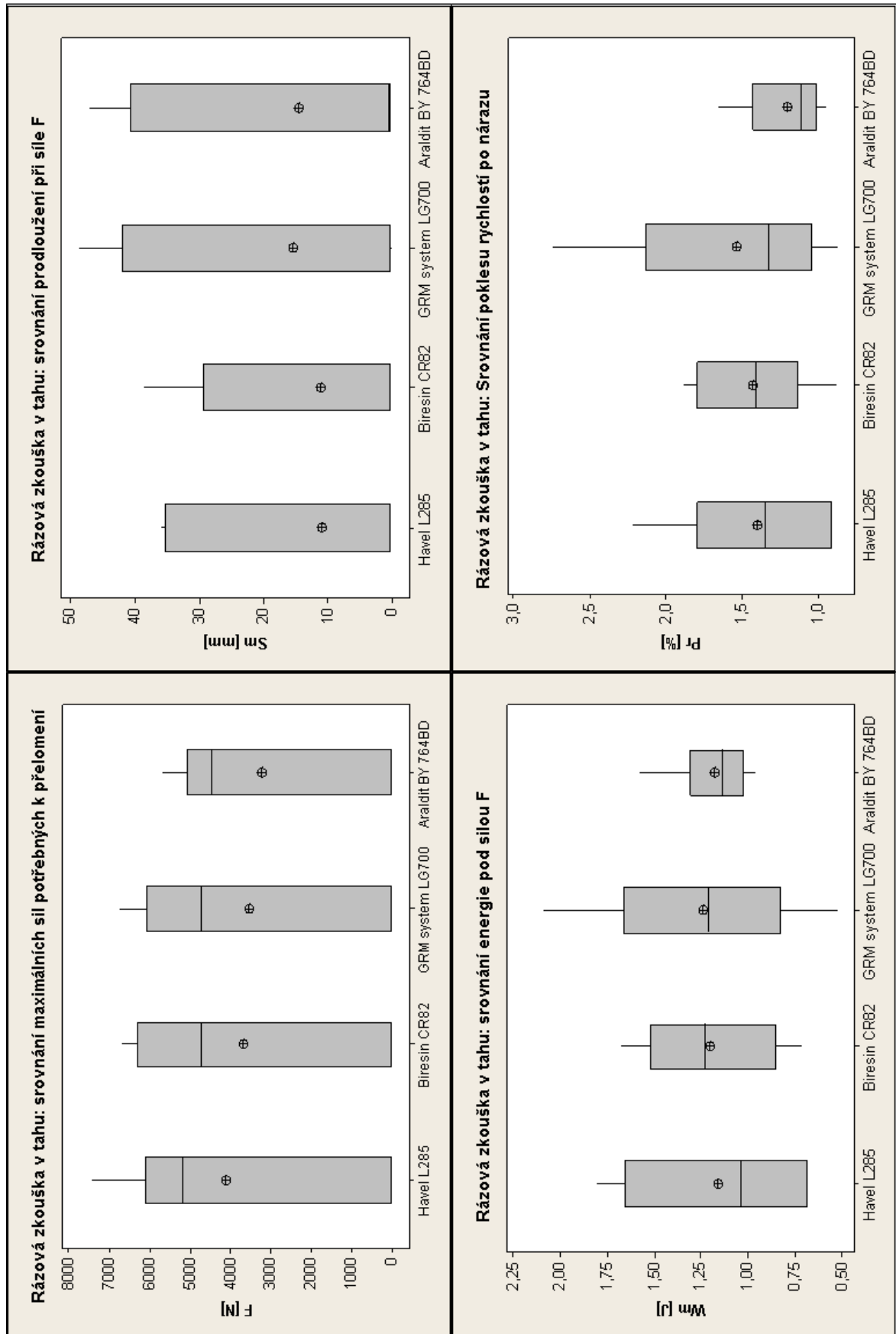


Obrázek 86-Grafy hodnot zkoušky rázové houževnatosti

Tabulka 42- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek rázové houževnatosti v tahu

	Havel L285	Biresin CR82	GRM systém LG700	Araldit GY 764BD
[N]	Maximální síla - F			
\bar{x}	5835,87	5521,45	5645,81	4832,42
s	±858,29	±1052,13	±1060,18	±601,11
v	14,71	19,06	18,78	12,44
s_x	324,4	429,53	474,13	245,4
[mm]	Prodloužení při síle F – Sm			
\bar{x}	0,41	0,44	0,42	0,5
s	±0,1	±0,05	±0,1	±0,08
v	23,46	12,37	23,03	16,57
s_x	0,04	0,02	0,04	0,03
[J]	Práce při síle F – Wm			
\bar{x}	1,16	1,2	1,24	1,18
s	±0,44	±0,37	±0,56	±0,22
v	37,83	30,51	45,03	18,61
s_x	0,17	0,15	0,25	0,09
[%]	Pokles rychlosti po nárazu – Pr			
\bar{x}	1,41	1,43	1,54	1,21
s	±0,47	±0,37	±0,71	±0,26
v	33,38	25,69	45,98	21,61
s_x	0,18	0,15	0,32	0,11

Nejnižší naměřená hodnota F_m je u kompozitu z pryskyřice Araldit 4832 N a zároveň měl nejvyšší prodloužení. Výsledky působící síly F_m u kompozitů z ostatních pryskyřic jsou skoro shodné.

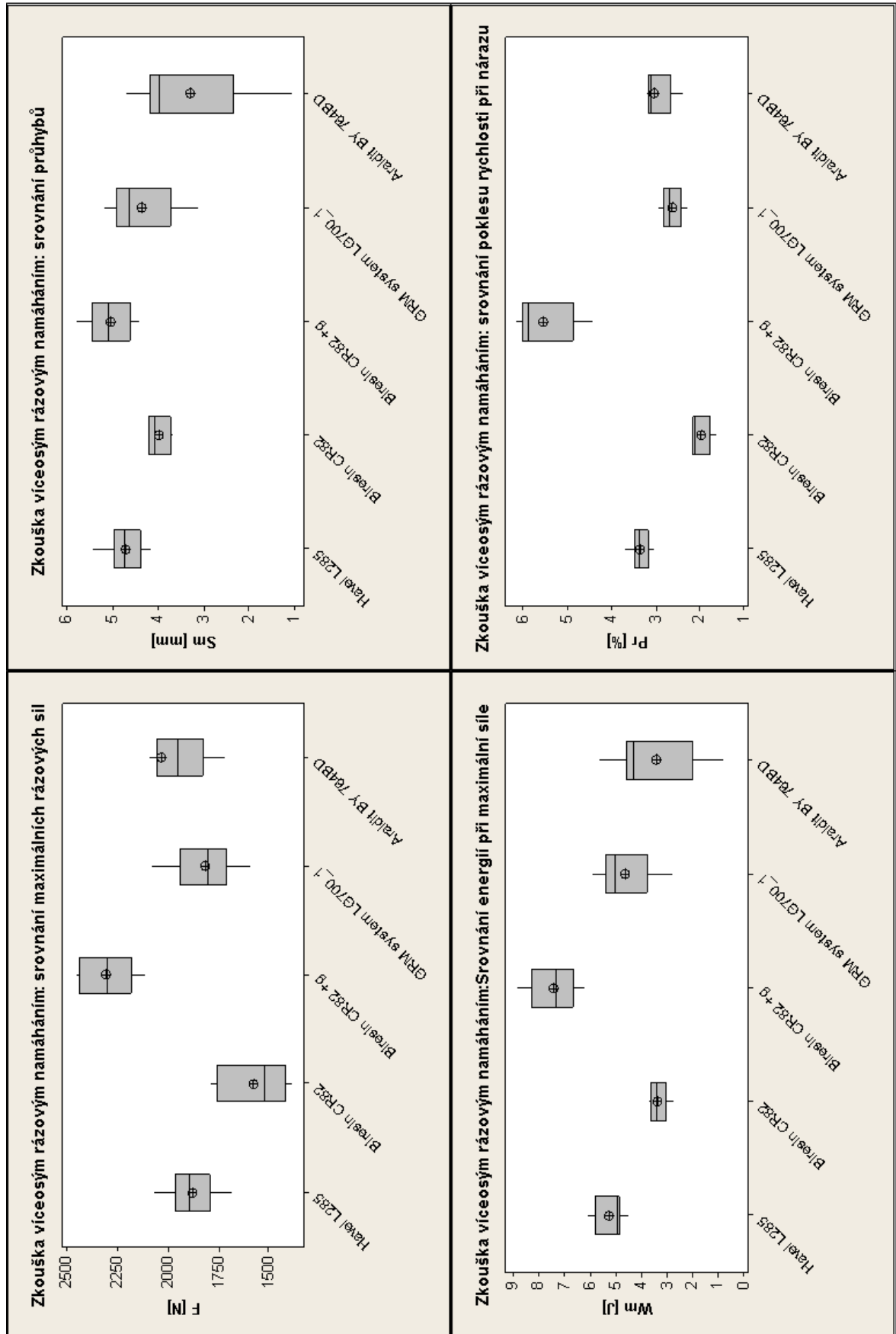


Obrázek 87-Grafy hodnot zkoušky rázové houževnatosti v tahu

Tabulka 43- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek víceosým namáháním

	Havel L285	Biresin CR82	Biresin CR82+gelcoat	GRM systém LG700	Araldit GY 764BD
[N]	Maximální rázová síla - F				
\bar{x}	1881,32	1577,22	2310,15	1817,74	2033,26
s	±115,04	±176,01	±136,95	±151,46	±347,64
v	6,11	11,16	5,93	8,33	17,1
s_x	36,38	78,71	61,25	50,49	115,88
[mm]	Průhyb při maximální rázové síle – Sm				
\bar{x}	4,73	4	5,06	4,38	3,32
s	±0,39	±0,24	±0,5	±0,69	±1,21
v	8,21	6,1	9,79	15,71	36,38
s_x	0,12	0,11	0,22	0,23	0,4
[J]	Energie při maximální rázové síle – Wm				
\bar{x}	5,25	3,37	7,43	4,64	3,43
s	±0,54	±0,37	±0,95	±0,99	±1,65
v	10,37	11,1	12,84	21,35	48,08
s_x	0,17	0,17	0,42	0,33	0,55
[%]	Pokles rychlosti po nárazu – Pr				
\bar{x}	3,35	1,99	5,53	2,63	3,04
s	±0,19	±0,22	±0,69	±0,23	±0,46
v	5,73	11,25	12,54	8,65	15,21
s_x	0,06	0,1	0,31	0,08	0,15

U zkoušky vícerým rázovým namáháním nebyl naměřeny výrazné rozdíly spotřebované síly u jednotlivých zkoušek. U vzorku z Birezinu CR82 s brstvou biresinu byly naměřeny hodnoty síly výrazně vyšší, než u ostatních vzorků. To znamená, že značná část síly se spotřebuje na proražení gelcoatu. Gelcoat tedy zvyšuje odolnost proti působící síle při vícerým rázovým namáháním. Zároveň k proražení vzorku se spotřebuje větší množství energie a změna rychlosti je také výrazně vyšší než u vzorků bez gelcoatu.



Obrázek 88--Grafy hodnot zkoušky vícovým namáháním

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zjistit pro společnost Kordárna plus a.s., jaké komerčně dostupné epoxidové pryskyřice jsou nejvhodnější pro výrobu kompozitů spolu s tkaninami, které zmíněná společnost vyrábí. Bylo provedeno celkem šest druhů mechanických zkoušek. Tři druhy zkoušek statických (tah, tlak, ohyb) a tři zkoušky dynamické (zkouška rázové houževnatosti, rázová houževnatost v tahu, a zkouška víceosým namáháním). Byly použity dva druhy výztuží od firmy Kordárna Plus a.s. s vazbou plátno a kepr.

Zkouškou v tahu bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti obou tkanin jsou téměř shodné. Proto u dalších zkoušek nebyl kladen takový důraz na porovnávání tkanin, ale na zjištění rozdílností vlastností kompozitů z jednotlivých pryskyřic.

Po stránce technologické se velmi dobře pracovalo s pryskyřicí GRM systém LG700, má nižší hustotu než ostatní porovnávané pryskyřice, lépe prosycovala matici a také nebyl takový problém s tvořením vzduchových bublin jako u ostatních pryskyřic.

Nejvyšší hustotu měla pryskyřice Biresin CR82. Ta by se dala použít pro výrobky, kde potřebujeme mít pohledové obě strany. Kvůli vyšší hustotě nedojde při zalisování k takovému úniku pryskyřice a kompozit je po vytvrzení hladký z obou stran. Také se dá vytvořit větší vrstva pryskyřice na povrchu kompozitu, následně vybrousit do hladka a vyleštit, nebo zalakovat. Naopak nevýhodou je větší náchylnost na tvoření vzduchových bublin.

Výhody obou výše popsaných pryskyřic splňovala pryskyřice Havel L285, která byla hustší než GRM systém LG700, ale nebyl problém s tvorbou bublin a dobře prosycovala tkaninu.

Měřením bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti kompozitů z jednotlivých pryskyřic se liší jen minimálně. Z vybraných pryskyřic po stránce mechanických vlastností může být použita libovolná pryskyřice.

Z ekonomického hlediska se ceny pryskyřic pohybují následovně: Araldit GY 764BD 391,7kč/kg, Havel L 285 352,5kč/kg, GRM systém Lg700 395,3kč/kg, Biresin CR82 580kč/kg. Z tohoto pohledu je nejvýhodnější použít pryskyřici Havel L285, naopak použití pryskyřice Biresin CR82 je nevýhodné.

Po celkovém shrnutí je po stránce ekonomické, stránce mechanických vlastností a z pohledu zpracovatelnosti nejvýhodnější použít pryskyřici GRM systém LG700.

Do budoucna by bylo vhodné provést porovnání tkanin Kordcarbon s tkaninami jiných zahraničních výrobců. Zjistilo by se, jestli tkanina Kordcarbon je na srovnatelné úrovni s konkurencí za mnohem nižší cenu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] A.P.MOURITZ , A.G.Gibson. *Fire properties of polymer composite materials: Solid mechanics and it's applications*. The Netherlands: Springer, 2006. 143. ISBN 1-4020-5355-X(HB).
- [2] KRATOCHVÍL B. ŠVORČÍK V. VOJTĚCH D. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VSCHT, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [3] MICHEL BIRON. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites: Technical information for plastic users*. BH.
- [4] JANČAŘ JOSEF. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003
- [5] ŠUBA O. *Dimenzování a navrhování výrobků z plastů*, VUT v Čs. Redakci VN MON, 1988
- [6] M. GUAGLIANO M.H. ALIBADI. *Fracture and Damage Composites*. Boston: WIT press, 2006. Advances in Fracture Mechanics, Vol. 8. ISBN 1-85312-669-1.
- [7] CHARLES A. HARPER. *Handbook of Plastics , Elastomers and Composites*. McGraw-Hill, 2004. fourth edition.
- [8] P.K. MALLICK. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, manufacturing and design*. New York: CRC Press, 2007.
- [9] RADOMÍR NEDBAL. *Strojírenská technologie: pracovní sešit pro 1. ročník SPŠ Zlín*. Zlín: SPŠ Zlín.
- [9] *Česká technická norma: ČSN EN ISO 527-4*. Český normalizační institut, 1998.
- [10] TAOUFIK BOUKHAROUBA, MIMOUN ELBOUJDANI, GUY PLUVINAGE. *Damage and Fracture mechanics: Failure Analysis of Engineering Materials and Structures*. Business media B. V.: Springes science, 2009. ISBN 978-90-481-2668-2, 978-90-481-2669-9.
- [11] MINORU TAYA. *Electronic composites*. Washington: Cambridge university, 2009. ISBN 0-521-84174-7, 13 978-0-521-84174-0.
- [12] ŠUBA O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. UTB v Academia centrum, 2006.
- [13] LUKOVICS. *Lukovics, I.:Konstrukční materiály a technologie*. VUT v Brně, 1992.
- [14] ŠTERNSSCHUSS A ZVONARĚ V. SLEZÁK O. KUČERA, M. *Polyesterové skelné lamináty*. SNTL, 1961.
- [15] REJMAN M. *Co a jak s polyesterovými skelnými lamináty*. SNTL, 1972.
- [26] GOTTFRIED W. EHRENSTEIN. *Polymerní kompozitní materiály*. 2006. Scientia, Praha 2009
- [37] KUSL F. KRAMERIUS, F. *Příručka pro domácí dílnu*. SNTL, 1973.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

t- tloušťka zkušební vzorku [mm]

s- šířka zkušební vzorku [mm]

E-modul pružnosti [Mpa]

σ -Mez pevnosti v tahu [MPa]

σ_t -Mez pevnosti v tlaku [MPa]

σ_o -Mez pevnosti v tahu [MPa]

ΔL - Deformace při max. tahu [%]

W-práce na mezi pevnosti [J]

Sm- Průhyb při maximální působící síle [mm]

Wm- Energie při maximální síle [J]

Pr - Pokles rychlosti po nárazu [%]

Am –Rázová houževnatost při maximální síle [kJ/m²]

Ab-Rázová houževnatost celková [kJ/m²]

e₊ - Vzdálenost těžiště v ohybu [mm]

e₋ - Vzdálenost těžiště v ohybu [mm]

l –délka tělesa [mm]

\bar{x} - aritmetický průměr [-]

s-směrodatná odchylka [-]

v-variční koeficient [-]

s_x-chyby měření [-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- geometrické znázornění tvaru, geometrie a délky výztuže [2]	13
Obrázek 2- Vlastnosti vybraných matric [4]	14
Obrázek 3- Vlastnosti vybraných výztuží [4]	15
Obrázek 4- Chemický popis karbonizace PAN při výrobě grafitových vláken z PAN prekurzorů [4]	16
Obrázek 5- Schémata z vláken utkaných tkanin.....	16
Obrázek 6-Vlastnosti vybraných druhů vláken [4].....	17
Obrázek 7 – Mechanické chování a) izotropního, b) ortotropního a c) obecně anizotropního plošného prvku	19
Obrázek 8-Separace formy voskem.....	20
Obrázek 9- nanášení směsi epoxidové pryskyřice s iniciátorem	21
Obrázek 10-Kladení Tkaniny a prosovování	21
Obrázek 11- Schéma metody odsávání vzduchu pomocí vaku [4].....	22
Obrázek 12- schéma metody tlakového vaku [4]	23
Obrázek 13- schéma metody autoklávu [4]	24
Obrázek 14- schéma navíjecího zařízení [4]	25
Obrázek 15- Schéma lisování kompozitních materiálů.....	26
Obrázek 16 – Znázornění hlavních os (ox, oy) ortotropního materiálu[16]	28
Obrázek 17- zkušební těleso pro zkoušku tahem[16]	29
Obrázek 18- Pracovní diagram [9]	30
Obrázek 19 – zkušební vzorek před a po zkoušce tlakem[9]	32
Obrázek 20- Průběh ohybových momentů při zkoušce tří- a čtyřbodovým ohybem[16].....	33
Obrázek 21- Vliv směru smykových napětí na způsob zatížení[16].....	34
Obrázek 22- Zkušební těleso ke stanovení interlaminární pevnosti ve smyku [16].....	35
Obrázek 23- Ohybové přetvoření zkušební tělesa pro určení interlaminární smykové pevnosti [9]	35
Obrázek 24-Zkouška říbodovým ohybem ke stanovení interlaminární smykové pevnosti [16].....	35
Obrázek 25 – Průběh poškozování u homogenních a vláknitých materiálů [16].....	37
Obrázek 26 – Charpyho kladivo a zkušební vzorek [9]	38
Obrázek 27- Uhlíková tkanina KORDCARBON, vazba plátno	41
Obrázek 28-Uhlíková tkanina KORDCARBON, vazba kepr	41

<i>Obrázek 29- Výroba karbonové desky technologií ručního laminování.....</i>	43
<i>Obrázek 30-Odformovaný plát uhlíkového kompozitu.</i>	44
<i>Obrázek 31-Měření a následné dělení kompozitového plátu na jednotlivá zkušební tělesa.....</i>	44
<i>Obrázek 32-Schema zkušebního tělesa pro zkoušku tahem, vpravo 3D model</i>	45
<i>Obrázek 33- Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku ohybem.</i>	46
<i>Obrázek 34- Scéma zkušebního tělesa pro zkoušku tlakem</i>	47
<i>Obrázek 35- Schéma zkušebního tělesa pro rázovou zkoušku.</i>	48
<i>Obrázek 36-Schéma zkušebního tělesa pro rázovou zkoušku v tahu.</i>	49
<i>Obrázek 37- Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku vícerym rázovým namáháním.....</i>	49
<i>Obrázek 38-Zkušební stroj Zwick 1456</i>	50
<i>Obrázek 39 -Zkušební stroj Zwick/roell HIT50P.....</i>	51
<i>Obrázek 40 - Zkušební stroj Zwick/Roell HIT230F.....</i>	52
<i>Obrázek 41- Zkouška tahem v okamžiku roztržení zkušebního tělesa.</i>	53
<i>Obrázek 42- Zkouška tahem.</i>	54
<i>Obrázek 43-Zkušební těleso po zkoušce tlakem, vpravo zkušební přípravek (tělo přípravku čtvercového průřezu, opěrná deska, karbonové zkušební těleso, šroub M5)</i>	54
<i>Obrázek 44- Zkušební těleso po zkoušce tlakem, pohled 2.</i>	54
<i>Obrázek 45- Charpppyho kladivo pro zkoušku rázové houževnatosti.</i>	55
<i>Obrázek 46- Zkušební tělesa po Zkoušce rázové houževnatosti v tahu.</i>	56
<i>Obrázek 47-Zkušební tělesa po zkoušce víceosým rázovým namáháním.</i>	56
<i>Obrázek 48- Vzorek pro ohybovou zkoušku s průřezem obdélníkového tvaru</i>	57
<i>Obrázek 49-Graf závislosti napětí na deformaci, p. Havel,</i>	59
<i>Obrázek 50- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,.....</i>	60
<i>Obrázek 51- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,.....</i>	61
<i>Obrázek 52- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,.....</i>	62
<i>Obrázek 53- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,.....</i>	63
<i>Obrázek 54- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel,.....</i>	64
<i>Obrázek 55- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Biresin, 2v.....</i>	65
<i>Obrázek 56- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM system 1v.....</i>	66
<i>Obrázek 57- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM system.....</i>	67
<i>Obrázek 58- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM system.....</i>	68

Obrázek 59- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Biresin.....	69
Obrázek 60- Graf závislosti napětí na deformaci, Araldit.....	70
Obrázek 61- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice Havel L285.	71
Obrázek 62- Graf závislosti napětí na deformaci, pryskyřice GRM systém.	72
Obrázek 63- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Havel L285.....	73
Obrázek 64- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Biresin CR82.....	74
Obrázek 65- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Biresin.....	75
Obrázek 66- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, GRM systém.	76
Obrázek 67-- Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce ohybem, Araldit,.....	77
Obrázek 68-Graf závislosti působící síly na čase, Havel L285.	78
Obrázek 69- Graf závislosti působící síly na čase, Araldit GY 764BD.	79
Obrázek 70- Graf závislosti působící síly na čase, Araldit GY 764BD.	80
Obrázek 71- Graf závislosti působící síly na deformaci, GRM systém LG700.	81
Obrázek 72- Graf závislosti působící síly na deformaci Biresin CR82.	82
Obrázek 73- Graf závislosti působící síly na deformaci, Araldit GY 764BD.	83
Obrázek 74- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, Havel L285.	84
Obrázek 75- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, Biresin CR82.....	85
Obrázek 76- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, GRM systém LG700.....	86
Obrázek 77- Závislost filtrované síly $F[N]$ na standardní dráze $s[mm]$, Araldit GY 764BD.....	87
Obrázek 78- Graf - rázová houževnatost v tahu Araldit Havel L285.....	88
Obrázek 79- Graf - rázová houževnatost v tahu Biresin CR82.	89
Obrázek 80- Graf - rázová houževnatost v tahu, Biresin CR82 a vrstva gelcoatu.....	90
Obrázek 81- Graf - rázová houževnatost v tahu, GRM systém LG700.....	91
Obrázek 82- Graf - rázová houževnatost v tahu, Araldit GY 764BD.	92
Obrázek 83-Grafy hodnot zkoušky tahem.....	94
Obrázek 84-Grafy hodnot zkoušky tlakem.....	96
Obrázek 85--Grafy hodnot zkoušky ohybem.....	98
Obrázek 86-Grafy hodnot zkoušky rázové houževnatosti.....	100
Obrázek 87-Grafy hodnot zkoušky rázové houževnatosti v tahu.....	102
Obrázek 88--Grafy hodnot zkoušky vícerym namáháním.....	104

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1- Technické specifikace stroje Zwick 1456</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 2-Technické specifikace stroje Zwick/roell HIT50P</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 3-Technické specifikace stroje Zwick/Roell HIT230F</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 4-Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 5- -Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 6- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 7- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 8- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 9- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 10- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 11- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 12- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 13- Naměřené hodnoty zkoušky tahem.</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 14- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 15- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 16- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 17- Naměřené hodnoty zkoušky tlakem.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 18- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 19- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 20- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 21- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 22- Naměřené hodnoty zkoušky ohybem.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 23-Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 24- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 25- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 26- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 27- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka 28- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 29- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 30- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 31- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 32- Hodnoty naměřené zkouškou rázové houževnatosti v tahu</i>	<i>87</i>

<i>Tabulka 33- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním</i>	88
<i>Tabulka 34- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním</i>	89
<i>Tabulka 35- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním</i>	90
<i>Tabulka 36- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním</i>	91
<i>Tabulka 37- Hodnoty naměřené zkouškou víceosým namáháním</i>	92
<i>Tabulka 38 -Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek v tahu</i>	93
<i>Tabulka 39- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek v tlaku</i>	95
<i>Tabulka 40- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek v ohybu</i>	97
<i>Tabulka 41- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek rázové houževnatosti pro jednotlivé typy materiálů.</i>	99
<i>Tabulka 42- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek rázové houževnatosti v tahu</i>	101
<i>Tabulka 43- Srovnání naměřených hodnot jednotlivých zkoušek víceosým namáháním</i>	103