

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Studium kompozitních materiálů na bázi epoxidových pryskyřic a uhlíkových
vláken

Domink Sedláček

Bakalářská práce

2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Dominik Sedláček**
Osobní číslo: **C16123**
Studijní program: **B2829 Anorganické a polymerní materiály**
Studijní obor: **Polymerní materiály a kompozity**
Název tématu: **Studium kompozitních materiálů na bázi epoxidových pryskyřic a uhlíkových vláken**
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte literární rešerši na problematiku kompozitních materiálů se zaměřením na uhlíková vlákna. V literární rešerši uveďte přehled typů uhlíkových vláken a jejich úprav. Zpracujte přehledně výčet nejdůležitějších pojiv (pryskyřic) používaných ve spojení s uhlíkovými vlákny.
2. Připravte vzorky s epoxidovou matricí a uhlíkovou výztuží s rozdílně upraveným uhlíkovým vláknem.
3. Otestujte a zhodnoťte vliv úpravy vlákna na výsledné mechanické vlastnosti kompozitu.
4. Výsledky diskutujte.
5. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 "Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu".

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Večeřa, CSc.

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Jan Pejchar

VUT Brno

Datum zadání bakalářské práce:

21. prosince 2018

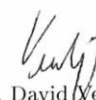
Termín odevzdání bakalářské práce:

4. července 2019



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



Ing. David Veselý, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 10. 7. 2019

Dominik Sedláček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval své rodině, která mi byla oporou a umožnila studium. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Pejcharovi, který mi zajistil výrobu vzorků a konzultoval problémy a výsledky. Na závěr bych velice rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Večeřovi CSc. za vedení mé bakalářské práce.

ANOTACE

Práce se v teoretické části zabývá druhy, definicí a dělením kompozitů. Uvádí rozdílné typy výztuží a matric, se zaměřením na epoxidové matrice a uhlíková vlákna. Déle uvádí příklady úpravy povrchu vláken a rozdílného uspořádání vláken.

V experimentální části se věnuje porovnání různých druhů uhlíkových tkanin. Jmenovitě Standardní uhlíkové tkaniny, tkaniny ze spreadovanými prameny a jednosměrné pásy uhlíku. Na kompozitech, připravených z těchto tkanin byly provedeny mechanické zkoušky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozitní materiály, spreadovaný uhlík, uhlíkový kompozit

TITLE

Study of composite materials on a basis of epoxy resins and carbon fibers

ANNOTATION

In the theoretical part, the thesis deals with, types, definition and sorting of the composite. It lists different kinds of reinforcements and matrixes, focusing on epoxy matrix and carbon fiber. Next, the thesis illustrates examples of surface treatment and different fiber arrangements.

In the experimental part, the thesis deals with comparing of different types of carbon fibers. Namely standard carbon fabrics, fabrics with spreading strands and one-way carbon bands. Mechanical experiments were performed on composites prepared out of these fabrics.

KEYWORDS

composite material, spreading carbon, carbon composite

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam zkratk	12
Úvod	13
1 Teorie	14
1.1 Definice kompozitu.....	14
1.1.1 Rozdělení kompozitu	14
1.1.1.1 Podle dispergované fáze	14
1.1.1.2 Podle typu matrice	15
1.1.1.3 Podle tvaru dispergovaných částic.....	15
1.1.2 Zvláštnosti vláknny vyztužených kompozitů	16
1.1.2.1 Anizotropie	16
1.1.2.2 Synergický efekt	16
1.1.2.3 Paradox vláknité struktury	16
1.1.2.4 Paradox zatížení délky	17
1.2 Matrice	17
1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice.....	17
1.2.2 Epoxidové pryskyřice	19
1.2.3 Vinylesterové pryskyřice	21
1.2.4 Fenolické pryskyřice.....	22
1.3 Výztuž.....	23
1.3.1 Skelná vlákna	25
1.3.2 Polymerní vlákna	27
1.3.3 Uhlíková vlákna.....	29
1.3.4 Srovnání vláken	31

1.3.5	Úprava vláken	31
1.3.5.1	Organosilany	31
1.3.5.2	Aramidová vlákna	32
1.3.5.3	Uhlíková vlákna	32
1.3.6	Spreading	32
2	Praktická část	34
2.1	Vzorky	34
2.1.1	Tkaniny	34
2.1.2	Výroba	34
2.1.3	Tělesa	35
2.2	Zkoušky	36
2.2.1	Tahová zkouška	36
2.2.2	Ohyb.....	37
2.2.3	Rázová houževnatost	37
2.2.4	Mikroskop.....	37
3	Výsledky.....	38
3.1	Tah	38
3.2	Ohyb.....	40
3.3	Rázová houževnatost Charpy.....	42
3.4	Mikroskop.....	44
	Závěr	45
	Použitá literatura	46
	Přílohy.....	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vliv průměru skelného vlákna na pevnost [4].....	17
Obrázek 2: Nenasycený PES.....	18
Obrázek 3: Nenasycený PES před vytvrzením	18
Obrázek 4: Vytvrzený nenasycený PES.....	19
Obrázek 5: Epoxidová pryskyřice	19
Obrázek 6: I. část Reakce Bisfenolu A s Epichlorhydrinem.....	20
Obrázek 7: II. část Reakce Dehydrochlorace	20
Obrázek 8: Prodlužovací reakce EP.....	20
Obrázek 9: Vytvrzovací reakce EP s aminem.....	21
Obrázek 10: Bisfenol A epoxid-vinylesterová pryskyřice	21
Obrázek 11: Novolak	22
Obrázek 12: Rezol.....	22
Obrázek 13: Druhy plátňových vazeb [4]	24
Obrázek 14: Zvlákňování skla [4].....	25
Obrázek 15: Struktura aramidů	27
Obrázek 16: Zvlákňování aramidů [4]	28
Obrázek 17: Krystalická struktura aramidů ve srovnání s ostatními polymery [4]	28
Obrázek 18: Výroba CF z PAN [4].....	30
Obrázek 19: Vliv teploty zpracování CF vlákna na mez pevnosti a modul pružnosti [4] ...	31
Obrázek 20: Průběh spreadingu [12].....	33
Obrázek 21: a) Původní pramen, b) spread 12 mm, c) spread 20 mm [12]	33
Obrázek 22: Úhel ve spreadované (horní) a Standardní tkanině (spodní) [6].....	33
Obrázek 23: Fúzní prosycování desek + Vytvrzené vzorky ještě ve formě desek	35
Obrázek 24: Vzorky pro tahové zkoušky.....	36
Obrázek 25: Porušení tahem	39
Obrázek 26: Mez pevnosti v tahu	39
Obrázek 27: Modul pružnosti v tahu.....	40
Obrázek 28: Porušení tlakem	41
Obrázek 29: Mez pevnosti v ohybu	41
Obrázek 30: Modul pružnosti v ohybu	42
Obrázek 31: Porušení rázem	43
Obrázek 32: Charpy	43

Obrázek 33: Standardní tkanina 20X	44
Obrázek 34: Spreadovaná tkanina 20X.....	44
Obrázek 35: Průběh ohyb spreadovaná tkanina	53
Obrázek 36: Průběh tah spreadovaná tkanina	53
Obrázek 37: Průběh ohyb Standardní tkanina.....	53
Obrázek 38: Průběh tah 4 Standardní 4 jednosměrná tkanina	54
Obrázek 39: Průběh ohyb jednosměrná tkanina.....	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Složení vybraných druhů skel [5]	26
Tabulka 2: Vlastnosti vybraných druhů skel [5]	26
Tabulka 3: Vlastnosti polyamidů [5]	29
Tabulka 4: Porovnání vybraných druhů vláken	31
Tabulka 5: Vlastnosti použitých tkanin [9,10,11]	34
Tabulka 6: Vlastnosti pryskyřice a tužidla 25 °C [7,8]	34
Tabulka 7: Velikosti vzorků	36
Tabulka 8: Výsledné přepočtené hodnoty	38
Tabulka 9: Spread. 8 tah + ráz.	49
Tabulka 10: Spread. 8 ohyb	49
Tabulka 11: Spread. 4 tah + ráz.	49
Tabulka 12: Spread. 4 ohyb	49
Tabulka 13: Standard 8. tah + ráz.	50
Tabulka 14: Standard. 8 ohyb	50
Tabulka 15: Standard. 4 tah + ráz.	50
Tabulka 16: Standard. 4 ohyb	50
Tabulka 17: Jednosměr. 8 tah + ráz.	51
Tabulka 18: Jednosměr. 8 ohyb.	51
Tabulka 19: Jednosměr. 4 tah + ráz.	51
Tabulka 20: Jednosměr. ohyb	51
Tabulka 21: Spread. 4	52
Tabulka 22: Spread. 8	52
Tabulka 23: Standard. 4	52
Tabulka 24: Standard. 8	52
Tabulka 25: Jednosměr. 8	52

SEZNAM ZKRATEK

PES	Polyester
EP	Epoxidová pryskyřice
VE – R	Vinylesterová pryskyřice
Bisfenol A	2,2-bis(4-hydroxyfenyl)propan
Urotropin	Hexametylentetramin
PA66	Nylon
PAN	Polyakrylonitril
CF	Uhlíkové vlákno (carbon fiber)
Aramid	Aromatický polyamid

ÚVOD

Vláknové kompozitní materiály jsou rychle se prosazující skupinou materiálů v průmyslu. Pro své vlastnosti, mezi které patří především: vysoká mechanická pevnost při nízké hmotnosti. Vláknové kompozitní materiály se uplatňují všude tam, kde se využijí tyto jejich hlavní přednosti, například: v letectví, větrné elektrárny, sportovní náčiní, kosmonautika.

V rámci získání nejlepších vlastností výsledného produktu se využívají různé druhy vláken a jejich kombinace. Nejpoužívanějšími druhy vláken jsou skelná vlákna, aramidová vlákna a uhlíková vlákna, z těchto vláken se vyrábí tkaniny, které se používají na výrobu kompozitů. Pro zlepšení vlastností se mohou vlákna chemicky nebo mechanicky upravit.

Tyto kompozitní materiály se zpravidla vyskytují ve formě tkanin, které se vrství a prosicují polymerní pryskyřicí s následným vytvrzením do souvislého výrobku

1 TEORIE

1.1 Definice kompozitu

Podle obecné definice je kompozit: „*Jakýkoliv materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál.*“ [1] podle této definice jsou prakticky všechny materiály kompozity což je z hlediska vnímání kompozitu v moderní podobě nepřesné.

Druhá definice je daleko přesnější: „*Kompozitní materiál je kombinace dvou a více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky v nich si zachovávají svou identitu (tzv vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí vzájemnou součinností. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.*“ [2]

Pomocí těchto definic lze říci že: Kompozit je materiálový systém skládající se nejméně ze dvou fází, z nich musí být jedna pevná tvořící výztuž a druhá spojitá tvořící matrici. Dále pak můžeme použít rozdělení pro částicové a vláknové kompozity. Částicové kompozity mají poměr délky ku průměru přibližně roven jedné a vláknové kompozity mají poměr délky ku průměru v řádech stovek, tisíců i vyšších. Pevnost je u vláknových kompozitů také dána uspořádáním vláken, vyskytuje se u nich anizotropie. [2]

1.1.1 Rozdělení kompozitu

1.1.1.1 Podle dispergované fáze

❖ Kompozit I. typu

- Disperze je tvořena pevnými částicemi (jedním nebo více druhy). V praxi nejzastoupenější typ. Příklady: lamináty, železobeton, slitiny.

❖ Kompozit II. typu

- Disperze je tvořena kapalinou. Ta je uzavřena v pórech, ty mohou být uzavřené nebo otevřené. V praxi se příliš často nevyskytují. Příklady: čerstvé dřevo, pěny s mazacím olejem.

❖ Kompozit III. typu

- Disperze je plynná. Jedná se o různé pěny kovové, polyuretanové a jiné lehčené materiály. [1,2]

1.1.1.2 Podle typu matrice

- ❖ Kompozity s kovovou maticí
- ❖ Kompozity s polymerní maticí
- ❖ Kompozity s keramickou (nebo jinou anorganickou) maticí [1,2]

1.1.1.3 Podle tvaru dispergovaných částic

Podle druhu částic nebo jejich uspořádání často vykazují anizotropii.

❖ Částicové kompozity

- Jsou tvořeny částicemi jejichž rozměry jsou si podobné. Dají se dále dělit podle tvaru částic
 - Izomerické – částice ve tvaru kuličky nebo zrna
 - Neizometrické – částice ve tvaru destiček nebo jehliček. Ty se mohou uspořádat nahodile nebo mohou být orientované

❖ Vlákňové kompozity

- Jsou tvořeny vlákny jejichž délka mnohonásobně překonává jejich průměr
- Vlákna postrádají ohybovou tuhost
- Mohou se dále dělit na:
 - Spojitá vlákna – prakticky nejsou uvnitř kompozitu přerušena. Mohou být uspořádána stejným směrem nebo utkány do tkanin či pletenin
 - Dlouhá vlákna – uvnitř kompozitu jsou přerušena, ale při lomu kompozitu se přelomí. Mohou se uspořádat v jenom směru, nahodile v rovině nebo nahodile v prostoru
 - Krátká vlákna – uvnitř kompozitu přerušena. Při lomu kompozitu nedojde k poruše vláken, ale jejich vytažení z matrice (pevnost vlákna je vyšší než adheze k maticí). Mohou být uspořádána stejně jako dlouhá vlákna

❖ Laminát

- Je tvořen pomocí několika vrstev spojených v jedno těleso. Jednotlivé vrstvy mohou být tvořeny z jednoho nebo několika předchozích typů [1,2]

1.1.2 Zvláštnosti vláknny vyztužených kompozitů

1.1.2.1 Anizotropie

Anizotropie znamená, že materiál vykazuje rozdílné chování při působení síly z rozdílných stran. Běžné materiály anizotropii prakticky nevykazují, oproti tomu pro kompozity je naprosto typické. Pokud je směr vláken ve směru působící síly je výsledná pevnost nejvyšší, pokud ale síla působí kolmo na směr uspořádání vláken je pevnost nejnižší. [1,2,4]

1.1.2.2 Synergický efekt

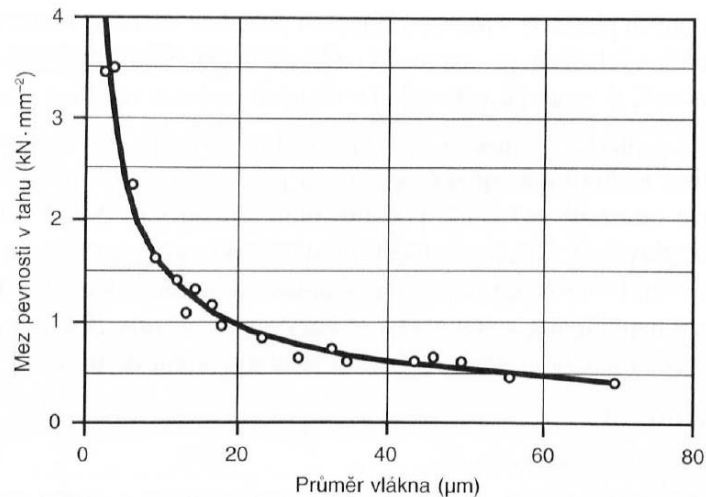
„Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně (G. Slayter)“ [4]

Pro kompozit je charakteristický tzv. synergický efekt. Což znamená, že poměrový součet vlastností je menší, než jsou skutečné vlastnosti. My se při výrobě materiálu snažíme docílit co nejvyššího synergického efektu.[2]

1.1.2.3 Paradox vláknité struktury

„Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí tím je jeho pevnost vyšší (A. A. Griffith).“ [4]

Tento paradox se dá vysvětlit krystalizací a orientací krystalů ve směru osy vlákna. Dále funguje vlastnost, že čím menší je průměr vlákna tím je pevnější. V praxi se nejčastěji používají vlákna s průměrem 14 μm . Menší průměry již mohou vnikat do plic a být tak karcinogenní.[4]



Obrázek 1: Vliv průměru skelného vlákna na pevnost [4]

1.1.2.4 Paradox zatížení délky

„Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost“ [4]

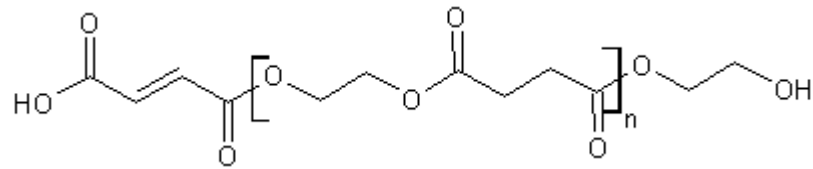
Pevnost vlákna klesá s jeho zatěžovanou délkou. To lze vysvětlit tím, že na větší vzdálenosti se vyskytuje také více poruch. Podobnou myšlenku můžeme aplikovat i na průměr vlákna. Můžeme tedy říci, že čím kratší a tenčí bude vlákno tím je jeho pevnost vyšší.[4]

1.2 Matrice

Matrice je spojitá část kompozitu. Dá se také nazývat pojivem. Zajišťuje tvarovou stálost, přenos sil mezi částmi vlákna i mezi jednotlivými vlákny a chrání vlákna před okolními vlivy. Pro výrobu kompozitů se využívá polymerní matrice. Polymer je v tomto případě termoplast nebo reaktoplast. Důležitými vlastnosti je adheze k vláknu a smáčivost. Tyto vlastnosti se dají zlepšovat mocí úpravy povrchu vlákna a volbou nejlepšího systému vlákno matrice. [4]

1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Jedná se o kondenzát diolu a dikarboxylové kyseliny, z níž aspoň jedna látka obsahuje dvojnou vazbu. Výsledný polymer je rozpuštěn v reaktivním rozpouštědle, nejčastěji styrenu. Pro nastartování síťovací reakce se využívá různých systémů iniciátorů, urychlovačů a podmínek. [4]

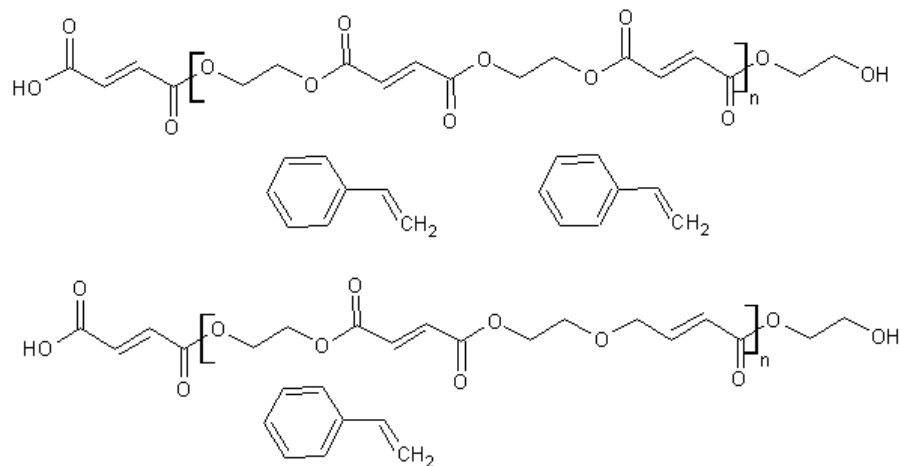


Obrázek 2: Nenasycený PES

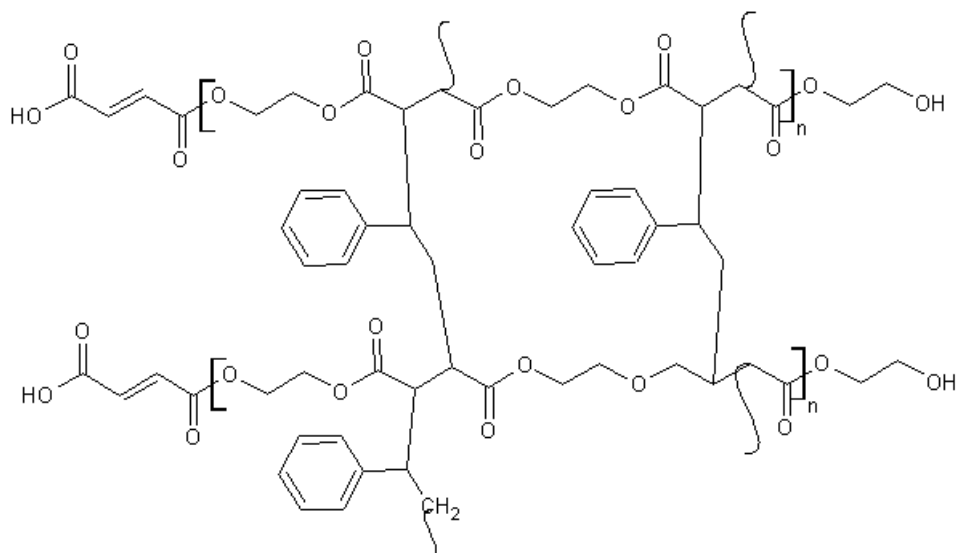
Polykondenzační reakce se provádí v tavenině nebo v roztoku. Nejčastější suroviny jsou 1,2-propylenglykol, neopentylglykol a jako kyseliny izomery kyseliny ftalové, kyseliny fumarové a kyseliny maleinové. Mohou se používat i jiné kyseliny a glykoly. Výsledná pryskyřice pak bude mít rozdílné vlastnosti, jako houževnatost, teplená odolnost a jiné. [3]

Pro vlastnosti pryskyřice je důležitý polymerační stupeň a obsah kopolymerovatelných dvojných vazeb. Viskozita výsledného systému je pak závislá na obsahu styrenu jako reakčního rozpouštědla. To se pohybuje v rozmezí 30 – 50 %. Čím více styrenu použijeme tím může být vytvrzená pryskyřice křehčí. [4]

Vytvrzování probíhá radikálovým mechanismem na dvojných vazbách. Jako iniciátorů se využívá nejčastěji organických peroxidů. Peroxid volíme podle způsobu vytvrzení, za tepla, za studena nebo aktivování pomocí UV. Podle zvoleného peroxidu se volí i urychlovač. [3,4]



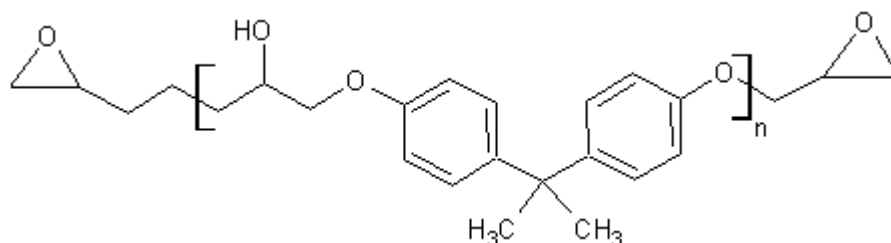
Obrázek 3: Nenasycený PES před vytvrzením



Obrázek 4: Vytvrzený nenasyčený PES

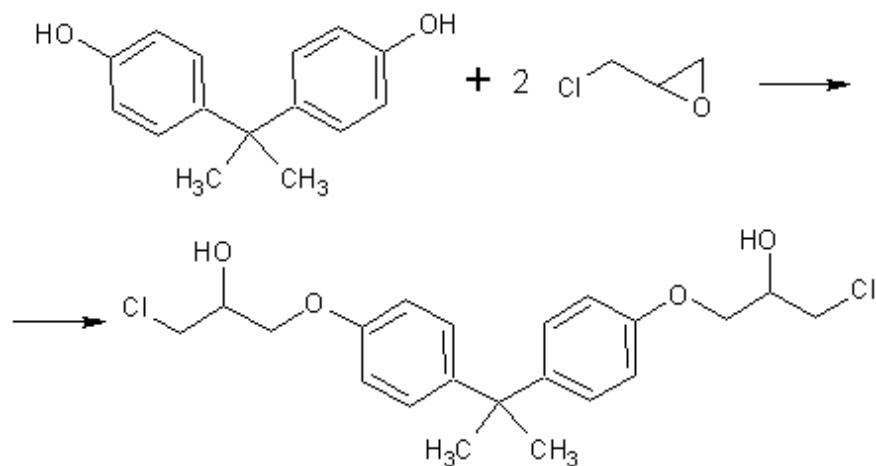
1.2.2 Epoxidové pryskyřice

Jedná se o sloučeniny obsahující v sobě alespoň 1 nejčastěji však 2 oxiranové (glicidylové) skupiny. Jedná se o viskózní kapalné až tuhé látky. Síťovací reakce probíhá pomocí tvrdidla obsahující aktivní vodíkový iont, který je schopen reagovat s oxiranovou skupinou. [3,4]

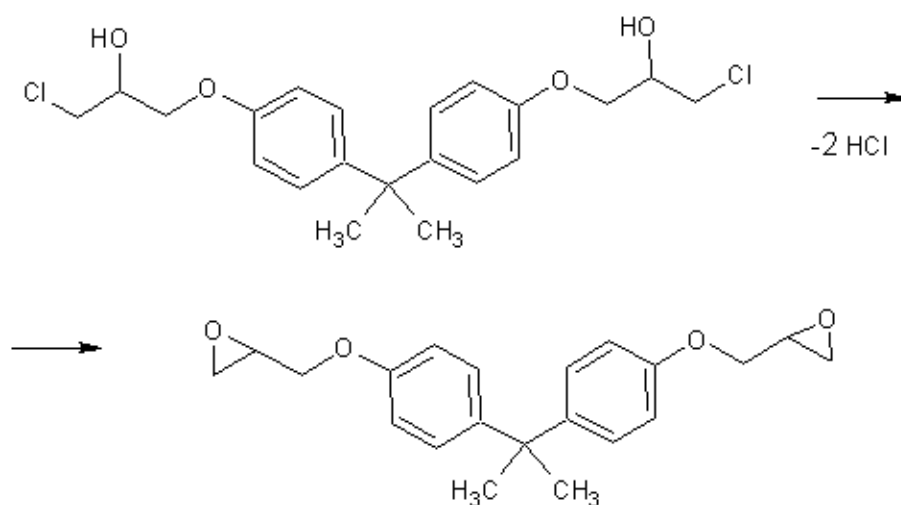


Obrázek 5: Epoxidová pryskyřice

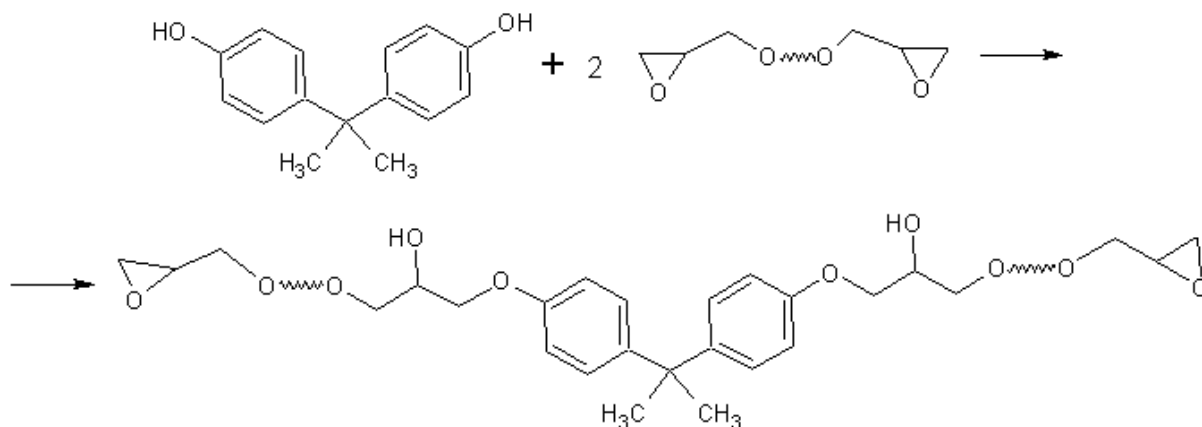
Vyrábí se kondenzační reakcí epichlorhydrinu, nejčastěji s bisfenoly, nejčastěji pak s bisfenolem A v alkalickém prostředí. Při kondenzaci dochází současně ke dvěma následným reakcím, první je reakce epichlorhydrinu na fenolický hydroxyl za vzniku dichlorhydrinether a druhá následná reakce kdy se z dichlorhydrinetheru odštěpuje chlorovodík a vzniká oxiranová skupina. Reakce se provádí v zásaditém prostředí, kde se výsledný chlorovodík neutralizuje a tím se posouvá rovnováha ve směru produktů. Pokud zajistíme vysoký molární přebytek epichlorhydrinu výsledná EP bude mít krátké řetězce a čím bude přebytek menší tím delší řetězec EP vyrobíme. V současné době je vyráběn prakticky jen jednostupňové EP (bisfenol A diglycidylether) a více molekulární varianty se vyrábí prodlužováním tohoto řetězce. [3]



Obrázek 6: I. část Reakce Bisfenolu A s Epichlorhydrinem



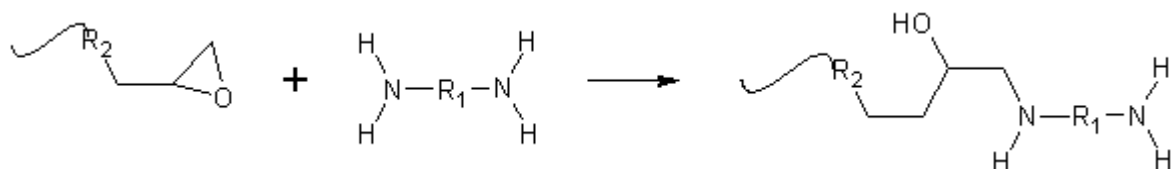
Obrázek 7: II. část Reakce Dehydrochlorace



Obrázek 8: Prodlužovací reakce EP

Vlastnosti EP se odvíjí od délky řetězce a použitých komponent. Výsledné vlastnosti jsou pak dány použitým systémem. EP mají širokou paletu vlastností od vysoce tvrdých hustých sítí až po méně husté a houževnaté sítě.[14]

Vytvrzování se děje polyadičním mechanismem, který je oproti radikálovému pomalejší. K vytvrzování se používají činidla obsahující reaktivní vodík, nejčastěji aminy nebo anhydridy dikarboxylových kyselin. Adice probíhá otevřením oxiranového kruhu, naadováním aktivního vodíku na kyslík a spojením obou molekul volnými vazbami. Dále je důležité zachovat stechiometrický poměr tvrdidla a pryskyřice jinak nedojde k dokonalému vytvrzení systému. Výsledné vlastnosti vytvrzené pryskyřice jsou dány použitou pryskyřicí a tvrdidlem. [3,4]

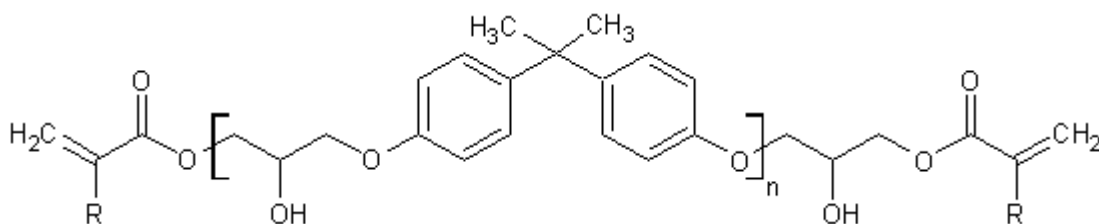


Obrázek 9: Vytvrzovací reakce EP s aminem

Oxiranový kruh je schopen reagovat s primárními i sekundárními aminy. Hustota sítě je tedy dána počtem aminových skupin tvrdidla. Čím více aminových skupin tím bude výsledná síť hustší.

1.2.3 Vinylesterové pryskyřice

Jedná se oligomerní řetězec, který je na koncích modifikovaný kyselinou akrylovou. Nejzastoupenější skupinou jsou epoxyakryláty, připravované esterifikací EP pomocí kyseliny akrylové nebo methakrylové. Dále existují i polyesterakryláty (modifikujeme polyester z hydroxylovými koncovými skupinami) a polyurethanakryláty (kyselinou akrylovou modifikujeme konce polyurethanů). Je pro ně charakteristické, že se pro síťování se využívá reakce dvojných vazeb zbytku kyseliny metakrylové a reaktivního rozpouštědla.



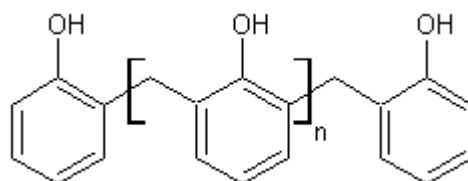
Obrázek 10: Bisfenol A epoxid-vinylesterová pryskyřice

Pro aplikace se využívají jejich roztoky v reaktivním rozpouštědle (nejčastěji styrenu) jako 60–70 % roztoky. Síťování probíhá radikálovým mechanismem na methakrylátových skupinách. Využívají se zde opět iniciátory a urychlovače podle použití systému. Pro VE-R na bázi bisfenolu-A nebo novolakové VE-R se může využít vytvrzování pomocí polyizokyanátů, které je však doplňkové a pouze zvyšuje hustotu sítě. [3,4]

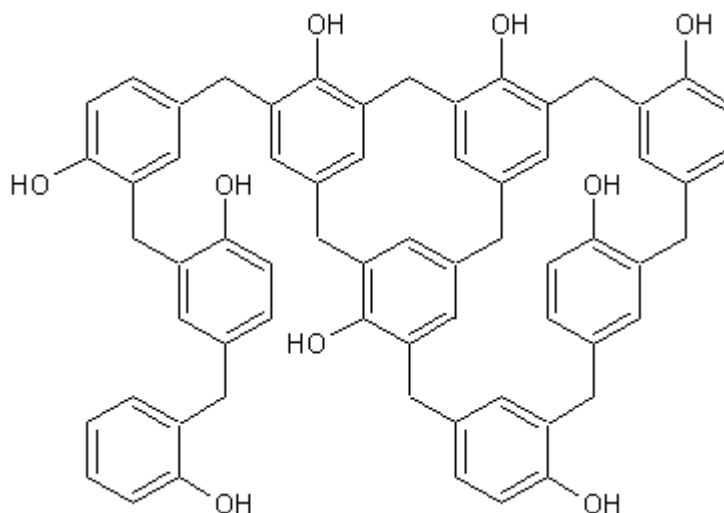
1.2.4 Fenolické pryskyřice

Jedná se o pryskyřice na bázi fenolu a formaldehydu. V závislosti na podmínkách syntézy vznikají buď přímo zesíťované rezoly nebo lineární novolaky.

Vyrábí se kondenzací, rezoly alkalicky katalyzovanou za přebytku formaldehydu a novolaky naopak kyselou katalyzovanou za přebytku fenolu. Pro použití matrice do kompozitu se vyrábí molekuly s relativně malou molekulovou hmotností rezoly 200 – 600 g·mol⁻¹ novolaky 250 – 900 g·mol⁻¹. Reakce probíhá na benzenovém jádře v orto a para poloze. Tyto reaktivní místa reagují s formaldehydem a za odštěpení vody a vzniká dle podmínek rezol nebo novolak.



Obrázek 11: Novolak



Obrázek 12: Rezol

Kapalné rezoly připravené pro výrobu kompozitů stále obsahují reaktivní methylenové skupiny, tyto skupiny jsou citlivé na teplo a přítomnost kyselin. Mohou při skladování samovolně síťovat. Toto způsobuje, že rezoly nejsou dlouhodobě skladovatelné a mají expirační dobu. Vytvrzení pak dochází kyselou katalýzou za zvýšené teploty.

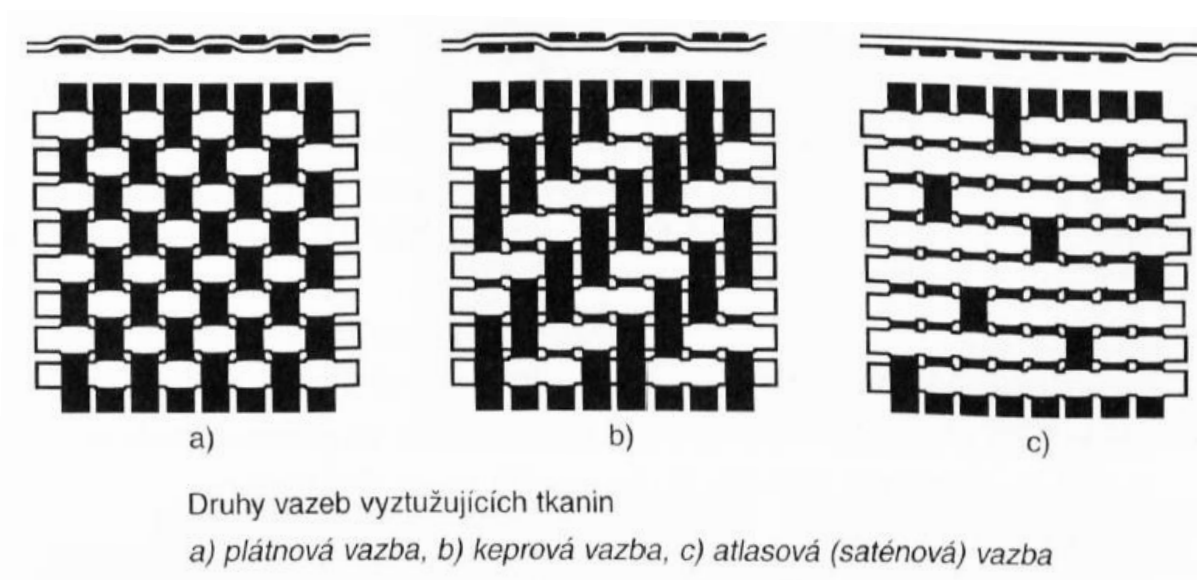
Novolaky neobsahují žádné termoreaktivní skupiny a vytvrzují se tak pomocí přídavku urotropinu. K vytvrzení dochází za zvýšené teploty, kdy se urotropin rozkládá a spojuje roztavené řetězce methylenovými můstky. Při reakci se uvolňuje amoniak. [3,4]

1.3 Výztuž

Výztuž poskytuje kompozitu jeho mechanickou pevnost a tuhost. Nejčastějšími variantami výztuží jsou:

- ❖ Roving (pramenec)
 - Jedná se o rovnoběžná nestočena vlákna uložená v jednom pramenci. Tento pramenec je prakticky základní výstup z výroby vláken a nadále se zpracovává na ostatní typy tkanin.
- ❖ Rohož ze sekaných vláken
 - Jedná se o netkanou tkaninu z krátkých pramenců nasekaných na délku 25 – 100 mm. Vlákna jsou slisována do vrstev postříkána pojivem a vysušena. Vzniklá „plst“ je navíjena a připravena k použití.
- ❖ Rohož z kontinuálních vláken
 - Je podobná rohoži z krátkých vláken, jen zde jsou vlákna dlouhá a tím pádem vytváří ve vrstvách smyčky, které se do sebe více zaplétají.
- ❖ Krátká vlákna
 - Jedná se o vlákna 0,1 – 5 mm dlouhá používaná jako plnivo.
- ❖ Tkaniny
 - Plošné útvary z navzájem pravoúhle uložených pramenců (útků na osnově). Působí jako výztuž v obou směrech. Kombinací různých pramenců o různém počtu vláken můžeme docílit zvýšené pevnosti v jednom směru. Tkaniny se také zpracovávají lépe než jednosměrné tkaniny, avšak pevnost v jednom směru je snížena, protože na jeden směr je menší počet vláken než u jednosměrných tkanin, kdy jsou na požadovaný směr orientována všechna vlákna.
 - Existuje několik variant vazeb
 - Plátňová vazba: nejjednodušší, manipulace s ní je jednoduchá, prostorová stálost a malý otřep při řezání.
 - Keprová vazba: má vyšší pevnost a tuhost ve výsledném laminátu, což je způsobeno nižším zvlněním jednotlivých pramenců. Je i ohebnější než plátňová vazba, a proto se hodí na tvarově složitější výrobky.

- Atlasová vazba: má ještě menší zvlnění a velmi dobrou řasitelnost. Díky tomu je vhodná pro prostorově složitě výrobky a lze s ní dosáhnout velmi hladkého povrchu.
- Jednosměrná tkanina: obsahuje vlákna v jednom směru a útky, které slouží pouze pro fixaci vláken v osnově, jsou tvořeny jen malým podílem vláken oproti osnově. Je vhodná pro výrobky namáhané v jednom směru.
- Směsná tkanina: útky a osnova jsou z rozdílného materiálu např.: skelná a uhlíková vlákna.
- Hybridní tkanina: využívá se kombinace různých druhů vláken pro své kladné vlastnosti. Ve tkanině se pravidelně střídají tyto druhy vláken.



Obrázek 13: Druhy plátňových vazeb [4]

❖ Jednosměrné pásy

- Jedná se o pásy vláken, která jsou fixována pouze pomocí jemných nití. Na rozdíl od jednosměrné tkaniny, kde se vyskytují i útky, zde se nevyskytují. Tyto pásy se dají ukládat ve vrstvách pod vzájemně rozdílnými úhly. Tím se dá docílit materiálu o přesných pevnostních charakteristikách v daném směru namáhání.

❖ Úplety

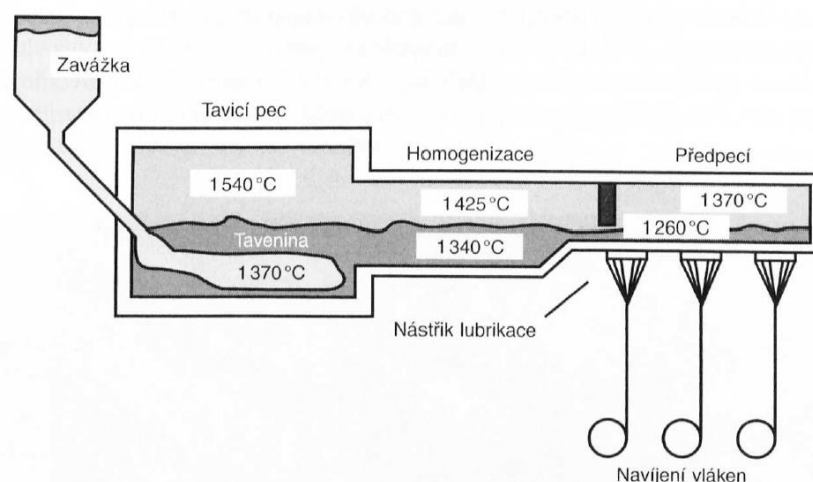
- Jedná se o pletené výrobky, vyráběné z jednoho nebo více druhů vláken. Pletení umožňuje připravit různé geometrické útvary např.: punčošky.

❖ Trojrozměrné tkaniny

- Využívají se pro výrobky s nutností vysoké přesnosti uložení jednotlivých vláken v trojrozměrném prostoru. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že jednotlivá vlákna se vždy nenacházejí v ideální poloze vůči zatížení a tím dochází k zeslabení oproti použití tkanin nebo jednosměrných pásů. Dále pro výskyt vláken ve spoustě různých orientací nedochází k tak ideálnímu prosycení což rovněž snižuje pevnost u koncového výrobku.

1.3.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna se vyrábí zvlákňováním z taveniny SiO_2 a dalších oxidů. Nejčastějšími jsou oxidy Al, Ca, Mg, B s malým zastoupením alkalických kovů Na a K. Po protlačení taveniny zvlákňovací hlavou, nastává ještě za tepla, dlužení těchto vláken na požadovaný průměr. Při dlužení dochází až k 40 000 násobnému prodloužení a zmenšení průměru z 2 mm na 10–14 μm . Dlužení se děje pomocí velice rychlého odtahu a rychlému navíjení na cívku. Rychlost odtahu je až $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při navíjení se vyváří pramence o určitém počtu jednotlivých vláken. Vlákna se v pramenci vůči sobě chovají silně abrazivně, je proto nutné před svedením do pramence vlákna lubrikovat. Tato lubrikace se na konci výroby odstraní a nahradí se úpravou pro snadnější smáčení epoxidem nebo tuto funkci plní už od počátku a na konci se nenahrazuje. Po lubrikaci a svedení do jednotlivých pramenců se pramence navinou na cívku odkud se převáží k dalšímu zpracování. [4,5,14]



Obrázek 14: Zvlákňování skla [4]

Vlákna se vyrábí z různých poměrů vstupních materiálů. Podle této kombinace mají pak vlákna mírně odlišné vlastnosti.

Tabulka 1: Složení vybraných druhů skel [5]

	sklo E	sklo S	sklo C	sklo ACR	křemenné sklo
SiO ₂	52–56	65	64–68	64	99,9
Al ₂ O ₃	12–16	25	3–5	1	-
CaO	16–25	-	11–15	5	-
MgO	0–5	10	2–3	-	-
TiO ₂	-	-	-	3	-
ZrO ₂	-	-	-	13	-
B ₂ O ₃	5–10	-	4–6	-	-
Na ₂ O * K ₂ O	<0,8	<0,3	až 10	14	-

Tabulka 2: Vlastnosti vybraných druhů skel [5]

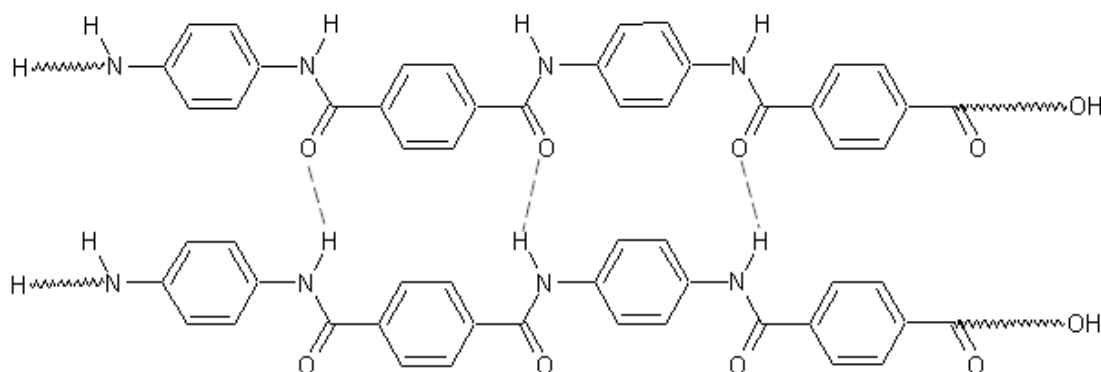
	sklo E	sklo S	sklo C	sklo ACR	křemenné sklo
Průměr / μm	9–13	9–13	9–13	-	8,9
Hustota / g*cm ⁻³	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
Modul pružnosti / GPa	72,4	85,5	69	75	69
Pevnost v tahu / MPa	až 3 450	až 4 600	až 3 000	1 700	3 450
Prodloužení / %	4,8	5,7	4,8	-	5
Souč. tepelné roztažnosti	5	5,6	7,2	-	-
Teplota měknutí / °C	800	970	750	-	980

Skelná vlákna jsou levná varianta, avšak dražší varianta aramidových nebo CF má lepší vlastnosti. [5]

1.3.2 Polymerní vlákna

Pro využití v kompozitech se používají jak přírodní vlákna, tak syntetická. Z přírodních vláken jsou to např.: bavlna, konopí nebo hedvábí. Jsou obnovitelná, ale nedosahují pevnostních vlastností syntetických vláken. Jsou velmi náchylné na vlhkost a probíhá u nich biologická koroze. [4]

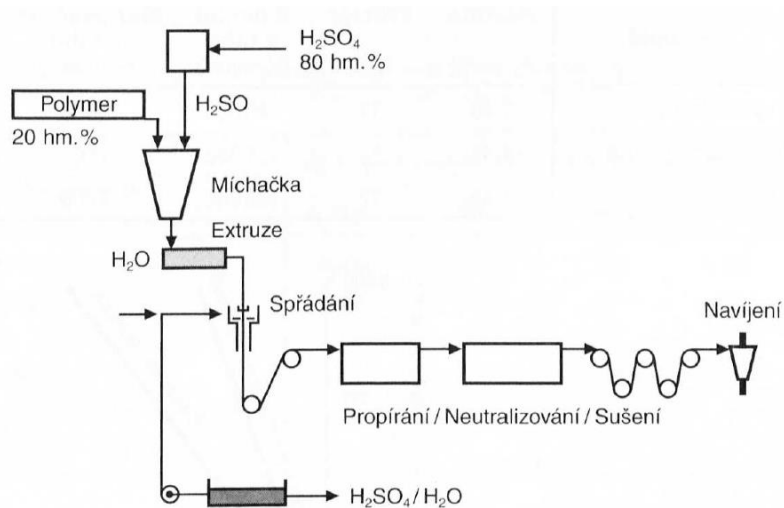
Ze synteticky připravených vláken jsou pro výrobu kompozitů nejvyužívanější aramidy, což jsou polykondenzáty aromatické dikyseliny (kyseliny orto-, meta- a tere-ftalové) a aromatického diaminu. Přítomnost benzenových jader ve spojení se silnou kovalentní vazbou vytváří velice pevnou makromolekulu. Přítomnost vodíků vázaných na dusík dále způsobují vazbu vodíkovými můstky na kyslík přítomný na řetězci, čímž vytváří velké procento krystalů okolo 95 % což dále způsobuje vysokou pevnost vlákna. [3,4]



Obrázek 15: Struktura aramidu

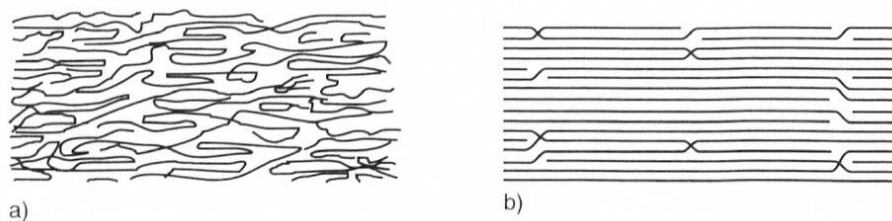
Vyrábí se kondenzací chloridů dikarboxylových kyselin a aromatických diaminů v prostředí vhodných rozpouštědel nebo na fázovém rozhraní. [3,5]

Aramidy nevytváří taveninu. S výhodou se aramidová vlákna vyrábí mokřím zvlákněním roztoku aramidu v koncentrované kyselině sírové do ledové vody. Při toku v roztoku kapilárou zaujímají krystaly tvar paralelně uspořádaných tyčinkových krystalů. [4,5,13]



Obrázek 16: Zvlákňování aramidů [4]

Pevnost se ještě zvyšuje prodloužením vláken za tepla.



Orientace řetězců

a) normální organická vlákna s řetězci se záhyby a kolísáním jejich orientace (krystalické a amorfní oblasti)

b) aramidové vlákno s dlouhými přímými úseky bez záhybů, orientovanými podél osy vlákna (struktura vysoce krystalická)

Obrázek 17: Krystalická struktura aramidů ve srovnání s ostatními polymery [4]

Nejznámějším Aramidem je Kevlar (což je obchodní název firmy Du Pont) chemicky poly-para-fenyltereftalamid a druhým je Nomex (Du Pont) chemicky poly-metha-fenylizoftalamidu. Existuje více druhů Kevlaru a odlišují se číslováním. [5]

Tabulka 3: Vlastnosti polyamidů [5]

	Pevnost v tahu /MPa	Modul pružnosti v tahu / GPa	Prodloužení / %	Hustota / g*cm ⁻³
Kevlar 29	3600	80	4,0	1,44
Kevlar 49	3600	130	2,5	1,44
Kevlar 149	3400	146	2	1,47
Nomex	700	17,3	22,6	1,4
PA 66	900	5	13,5	1,14

V tabulce je i pro porovnání uveden i PA 66, který není aramidem a je zde uveden pro porovnání.

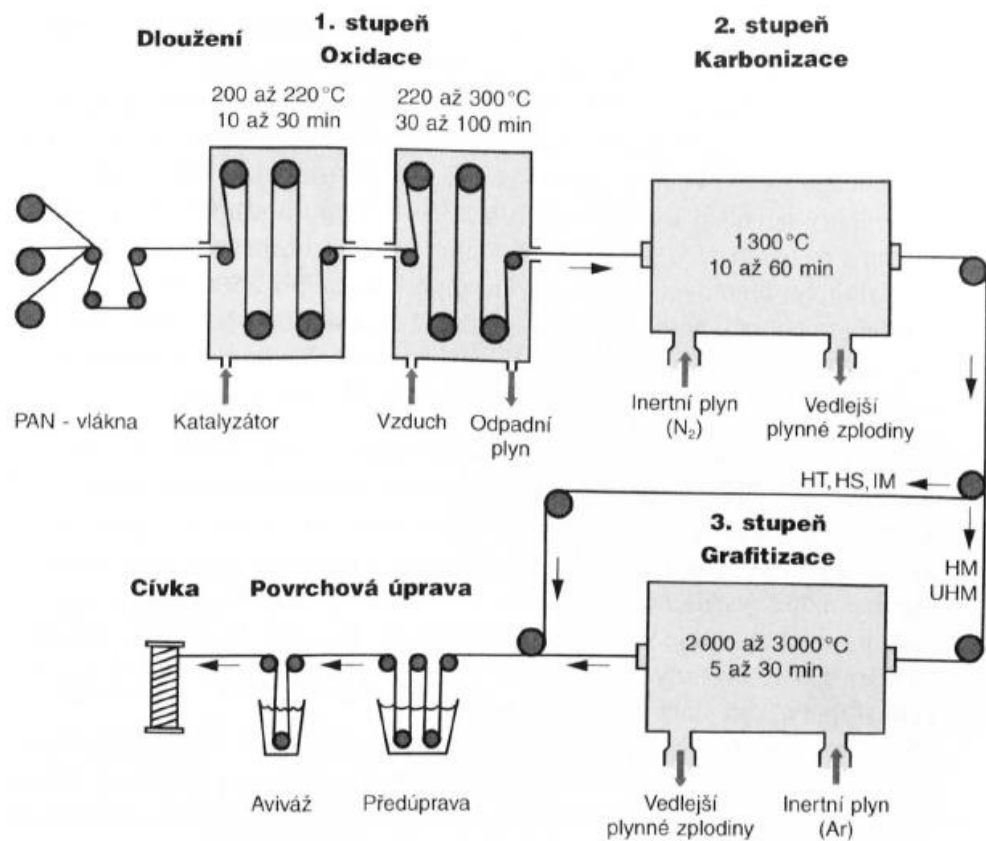
1.3.3 Uhlíková vlákna

Jedná se o nejpevnější dlouhá známá vlákna. Mají extrémně vysokou tuhost a pevnost, přičemž mají velice malou tažnost. Vyrábí se ze 3 materiálů celulózy, PAN a různých smol tažením. Připravená vlákna se poté za vysoké teploty a inertní atmosféře zbavují všech ostatních prvků kromě uhlíku. Výsledný obsah je více jak 90 % C, < 7 % N, < 1 % O a < 0,3 % H. [2,4]

CF má vysokou pevnost díky tomu, že je v mikrostruktuře vlákno tvořeno z vrstev grafenu. Tyto vrstvy jsou uspořádány ve směru osy vlákna. Grafenová vrstva je tvořena uhlíky uspořádaných do šestiúhelníkových struktur v jedné vrstvě. Tyto uhlíky jsou spojeny silnými kovalentními vazbami a vrstva je díky tomu pevná a kompaktní. Jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou spojeny pomocí slabých van der Waalsových sil, které jsou kolmé na osu vlákna. Tato orientace vrstev se děje díky materiálové paměti dloužených krystalů. Ta je zachována a převedena na krystaly grafitu, které jsou pak rovněž uspořádány v ose vlákna a ne nahodile, jak je tomu u přírodního grafitu. Tato skutečnost je podpořena tím, že je vlákno celou dobu výroby pod zatížením čímž se rovněž pomáhá vzniku orientovaných krystalů.

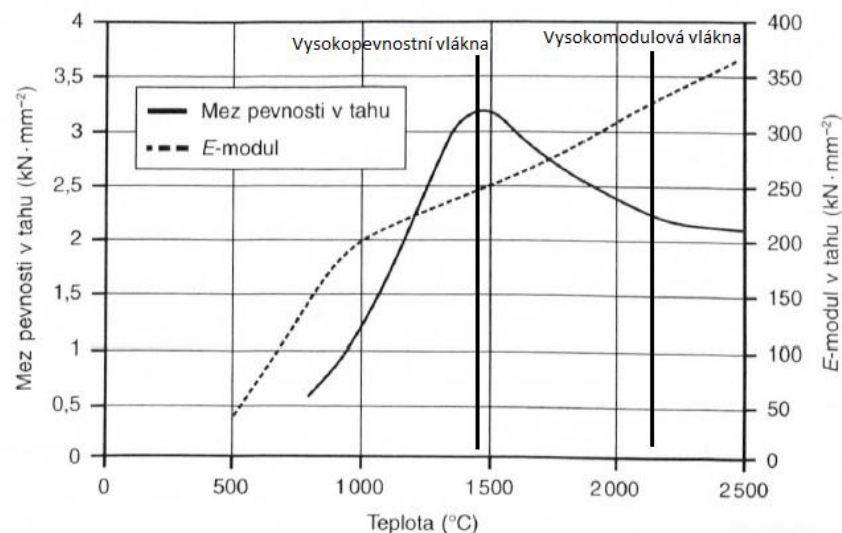
Nejčastější výroba je z PAN vláken a probíhá následujícím způsobem. Vysoce dloužená PAN vlákna s vysokou krystalinitou, kde jsou krystalické útvary uspořádány v ose vlákna prochází 2 až 3 stupni. První stupeň je stabilizace (nízkoteplotní oxidace): při teplotě 200 – 300 °C za přítupu vzduchu. Druhý stupeň je karbonizace: probíhá v inertní atmosféře při teplotě 1 000 – 1 500 °C. Třetím stupněm se již dostáváme k tzv: grafitovým vláknům, nazývá se grafitizace:

probíhá v inertní atmosféře za teplot 2 000 – 3 000 °C. Po těchto stupních následuje povrchová úprava a navíjení na cívku. [1,4,13]



Obrázek 18: Výroba CF z PAN [4]

Ve druhém stupni vznikají tzv: vysokopevnostní vlákna s vysokou mezí pevnosti více než 5 000 MPa. Po grafitizaci ve třetím stupni vznikají tzv: vysoko modulová vlákna s menší mezí pevnosti v tahu ale s vysokým modulem pružnosti až přes 400 GPa. Standardní CF mají pevnost v tahu okolo 3 500 MPa a modul pružnosti v tahu okolo 230 GPa. Hustota CF se pohybuje od 1,6 – 2 g *cm⁻³. [1,4]



Obrázek 19: Vliv teploty zpracování CF vlákna na mez pevnosti a modul pružnosti [4]

1.3.4 Srovnání vláken

V následující tabulce jsou uvedeny příklady nejpoužívanějších typů vláken. Je vždy uveden jeden zástupce a jeho parametry. V závorce je uvedena maximální hodnota, která odpovídá maximální možné hodnotě u daného typu vlákna.

Tabulka 4: Porovnání vybraných druhů vláken

	Pevnost v tahu/MPa	Modul pružnosti/GPa	Hustota/g*cm ⁻³
Skelné vlákno E	3 450 (až 4 600)	72,4	2,54
Kevlar 29	3 600	80 (až 146)	1,44
Standardní CF	3 500 (až 5 000)	230 (až 400)	1,8

1.3.5 Úprava vláken

Pro nejlepší vlastnosti kompozitu je důležitý přenos síly mezi vláknem a matricí. Většina plastových matric je odlišného chemického složení, než vyztužující vlákna proto se využívá látek, které zlepšují spojení mezi matricí a vláknem. Toho se dosahuje pomocí předúpravy vláken pomocí tzv. apretury. [4]

1.3.5.1 Organosilany

Využívají se pro zlepšení povrchových vlastností skelných vláken. Mechanismus funguje pomocí silanu, který obsahuje reaktivní skupinu (např.: amin) a alkoxylovou skupinu. Na povrchu

vláken se vyskytuje zbytková vlhkost ta reaguje s alkoxylovou skupinou a vzniká alkohol a silanol. Sinanol se poté pomocí skupin HO- váže na povrch skla vodíkovými můstky.

Pro výsledné spojení vlákna silanu a matrice se využívá výše zmíněných reaktivních skupin, ty jsou schopny reagovat s oxiranovým kruhem v epoxidové pryskyřici. Tím se zajistí pevná vazba mezi těmito složkami. [1,4]

1.3.5.2 Aramidová vlákna

Běžně se zde nevyužívají prostředky pro zlepšení adheze. Samotné vlákno je dostatečně polární, takže při kontaktu s matricí dochází velmi dobrému smáčení povrchu a tím i dobrého spojení matrice vlákno.

Problémem tohoto spojení mohou být lubrikace, které jsou nutné pro zpracování. To se dá odstranit vypíráním v lázni. Toto se využívá pro přesné a namáhané výrobky (npř. kosmonautika, letectví, armáda)

Pokud je potřeba zvýšení adheze, dá se aramidové vlákno upravit působením proudu elektronů, čímž se na povrchu vytvoří fenylové radikály, ty reagují s kyslíkem za vzniku peroxidů. Druhý způsob je využití studené plazmy. [4]

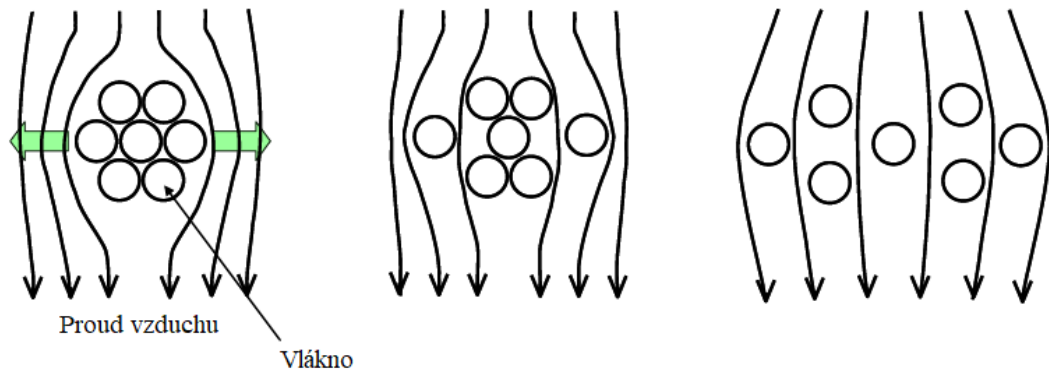
1.3.5.3 Uhlíková vlákna

Povrch vláken obsahuje ještě dostatečné množství reaktivních skupin, které zde zůstaly po výrobě. Využívá se zde lubrikace obsahující epoxidy, která usnadní zpracování vláken při výrobě tkanin a jiných textilních výrobků.

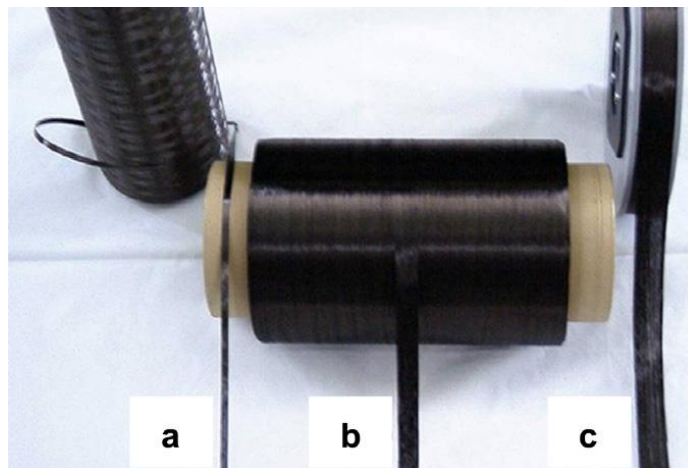
Pro zlepšení povrchových vlastností se může využít oxidace nebo plazmatická úprava. Tyto úpravy zvýší podíl polárních skupin a tímlepší smáčivost povrchu. [4]

1.3.6 Spreading

Jedná se o mechanickou úpravu pramenců vláken. Při této úpravě dochází k rozšíření pramene a jeho zúžení. Úprava se provádí pomocí proudění vzduchu přes pramen vláken. Takto upravený pramen je poté použit pro vytvoření tkaniny. [6,12]

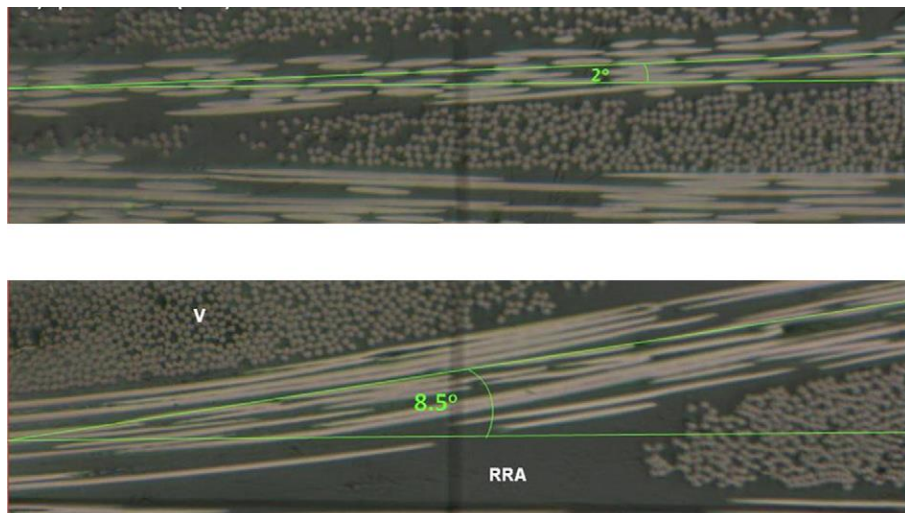


Obrázek 20: Průběh spreadingu [12]



Obrázek 21: a) Původní pramen, b) spread 12 mm, c) spread 20 mm [12]

Výsledná tkanina může být díky této úpravě tenčí a zároveň díky širším pásům je i méně zvlněná. Dále se snižuje úhel mezi útkem a osnovou.



Obrázek 22: Úhel ve spreadované (horní) a Standardní tkanině (spodní) [6]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Vzorčky

2.1.1 Tkaniny

Na výrobu vzorků byly použity následující tkaniny:

- Spreadovaná tkanina – DYF 25/160 P (tkanina se spreadovými prameny)
- Standardní tkanina – U GG-160 P
- Jednosměrná tkanina – SIGRATEX® C U80-0/SO (jednosměrné pásy uhlíku)

Tyto tkaniny byly vyprány pro své podobné vlastnosti a častý výskyt v praxi.

Tabulka 5: Vlastnosti použitých tkanin [9,10,11]

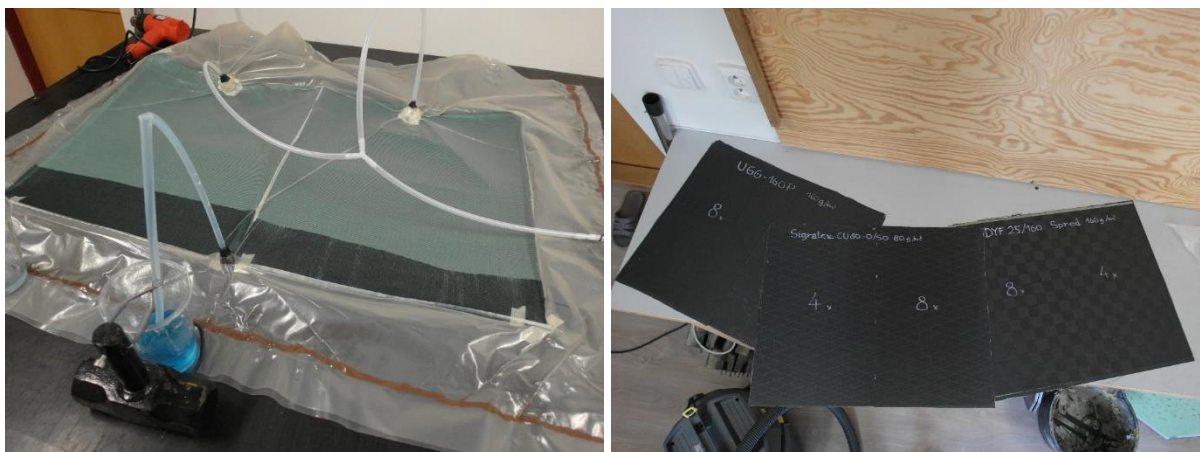
název	U GG-160 P	DYF 25/160 P	C U80-0/SO
typ	standard	spread	jednosměrná
Plošné zatížení/g*m ⁻³	160	160	80
tloušťka/mm	0,16	0,16	-
počet vláken v prameni	3000	150000	12000
Koce útků/konce*cm ⁻¹	4	0,4	1
Mez pevnosti/MPA	3950	9400	4900
modul pružnosti/Gpa	238	240	230

2.1.2 Výroba

Vzorčky byly vyrobeny externě pomocí metody vakuové infuze. Na všechny vzorky byl využit stejný systém pryskyřice a tvrdidla. Jednalo o systém MGS 285 což je nízkomolekulární pryskyřice na bázi bisfenolu A a tvrdidla H 286. poměr míchání hmotnostní 100/40 a objemový 100/50. Prosycené desky byly následně vytvrzovány 12 hodin při teplotě 60 °C.

Tabulka 6: Vlastnosti pryskyřice a tužidla 25 °C [7,8]

	Pryskyřice MGS 285	Tvrdilo H 286
hustota/g*cm ⁻³	1,18-1,23	0,94-0,97
viskozita/mPa*s	600-900	50-100
ekvivalent epoxidu	165-170	-
hodnota epoxidu	0,56-0,65	-
amidové číslo/mgKOH	-	460-550



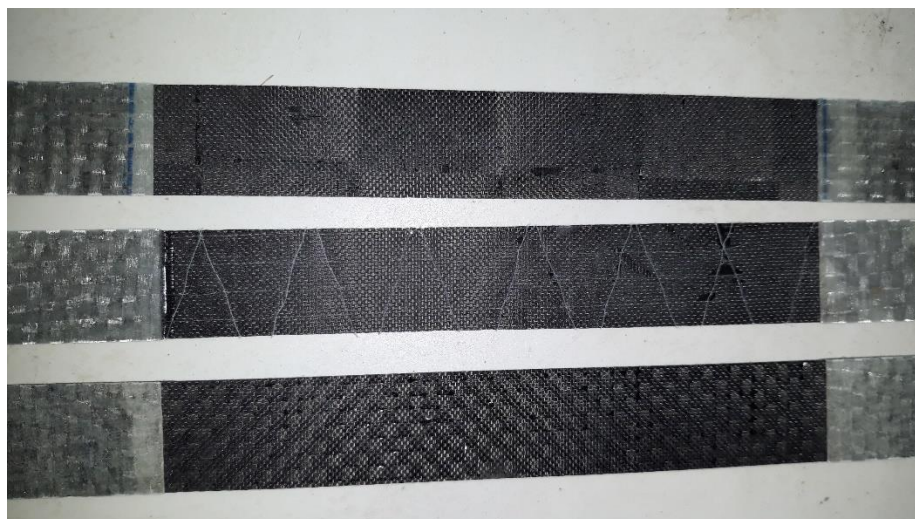
Obrázek 23: Fúzní prosycování desek + Vytvrzené vzorky ještě ve formě desek

Zhotovené desky byly ve společnosti Synpo a.s v Pardubicích rozřezány pomocí vodního paprsku s abrazivem, aby se minimalizovala možnost vzniku delaminací na řezných plochách.

Před rozřezáním na jednotlivé vzorky byly na desky přilepeny pásy skelného laminátu o rozměrech 200 mm na 65 mm s tloušťkou $0,9 \pm 0,1$ mm v místech budoucích příložek. Tyto příložky byly vyrobeny pomocí metody vakuového lisování ze skelné tkaniny a systému pryskyřice 520 a isoforondiaminu. Tento systém byl změkčen 20 % dioktylfthalátu. Pásy byly přilepeny pomocí komerčního dvojsložkového lepidla „BISON Epoxy Universal“. Takto připravené desky byly předány pro výsledné rozřezání na jednotlivé vzorky.

2.1.3 Tělesa

Testování tahem bylo provedeno dle normy ČSN EN 2561 těleso A. Díky povaze testovaných vzorků nebylo, možno dodržet tloušťku zkušebního tělesa $2 \pm 0,2$ mm a pro použití spreadované tkaniny s šířkou útku 25 mm bylo po konzultaci rozhodnuto o tělese 250 na 20 mm s velikostí příložek, podle výše psané normy, 65 ± 15 mm. Tloušťka vozku byla dána počtem vrstev.



Obrázek 24: Vzorky pro tahové zkoušky

Vzorky shora dolů: Spreadovaná tkanina; Jednosměrná tkanina; Standardní tkanina

Pro testování pevnosti v ohybu byla zkouška inspirována normou ČSN EN 2562 těleso A. Pro povahu testovaných vzorků nebylo možné dodržet normovanou tloušťku $2 \pm 0,2$ mm. Pro test byly použity vzorky o rozměrech 100 na 10 mm a tloušťce dané počtem vrstev.

Pro otestování rázové houževnatosti byla velikost vzorku dána normou pro provozování přístroje. Ta stanovila velikost tělesa 80 na 10 mm. Tloušťka byla dána počtem vrstev materiálu.

Tabulka 7: Velikosti vzorků

Zkouška	Šířka/mm	Délka/mm
Tah	20	250
Ohyb	10	100
Charpy	10	80

2.2 Zkoušky

2.2.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 2561. Pro 4 vrstvá tělesa byl použit přístroj MTS-4/M s maximální silou 20 kN. Stejný přístroj byl použit pro vzorky 8 vrstvé spreadované tkaniny. Pro 8 vrstvé Standardní a jednosměrné tkaniny nebyl přístroj s maximální silou 20 kN dostačující. Proto byl využit přístroj Zwick Z030 s maximální silou 30 kN. Rychlost pohybu čelistí $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Zkouška je statická. Vzorek umístění do kleští je namáhán konstantní deformací a sleduje se napětí ve vzorku. Zkouška trvá až do přetržení vzorku. Z výsledných hodnot se poté vyhodnotí modul pružnosti a mez pevnosti tělesa.

2.2.2 Ohyb

Ohybová zkouška byla provedena na stroji MTS-4/M podle normy ČSN EN 2562. Zvoleno bylo těleso A. vzdálenost podpěr byla nastavena na 80 mm rychlost posunu $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jedná se o statickou zkoušku, při které je těleso namáháno v trojbokém ohybu, dokud nedojde k jeho porušení tlakem. Z naměřených hodnot se určí modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu.

2.2.3 Rázová houževnatost

Měříme energii, která se spotřebuje na porušení vzorku při dopadu kladiva. Určuje se rozdílem potenciální energie kladiva (po nárazu a před nárazem). Rázová houževnatost je pak tato energie vztažená na průřez. Měření proběhlo pomocí přístroje Pendulum impact tester 501 j-3 s maximální dopadovou energií 4 J.

2.2.4 Mikroskop

Kompozity byly podrobeny zkoumání pod mikroskopem při 20násobném zvětšení. Úkolem pozorování bylo zjistit úhel, který mezi sebou svírají útky a osnova. Tento úhel může napovědět kolik síly se kompozitem přenáší v přímém směru a kolik se přenese na kolmou složku síly.

3 VÝSLEDKY

Tabulka 8: Výsledné přepočtené hodnoty

	Spreadovaná tkanina	Standardní tkanina	Jednosměrná tkanina
Počet vláken v pramenci	15000	3000	12000
konce útků/cm	0,4	4	1
1 vrstva	12000	24000	24000
4 vrstvy			
mez pevnosti v tahu/Pa	9250,4	7030,5	12074,2
modul pružnosti v tahu/kPa	438,9	290,3	410,4
Rázová houževnatost charpy/J*m-2	0,504	0,388	-
mez pevnosti v ohybu/Pa	3799,8	-	-
modul pružnosti v ohybu/kPa	248,7	164,0	230,6
8 vrstev			
mez pevnosti v tahu/Pa	5376,3	4165,3	8573,3
modul pružnosti v tahu/kPa	216,4	283,0	475,9
Rázová houževnatost charpy/J*m-2	0,2319	0,1307	0,3768
mez pevnosti v ohybu/Pa	1524,1	1386,5	1458,2
modul pružnosti v ohybu/kPa	153,3	106,2	157,9

Ve výsledné Tabulce 6 jsou uvedeny všechny hodnoty vztažené na jedno vlákno a využívají se k tvorbě následujících grafů: (obrázek) 26, 27, 29, 30, 32.

Veškerá absolutní data měření jsou uvedena v přílohách A, B, C.

Příklady průběhů jednotlivých měření v příloze E.

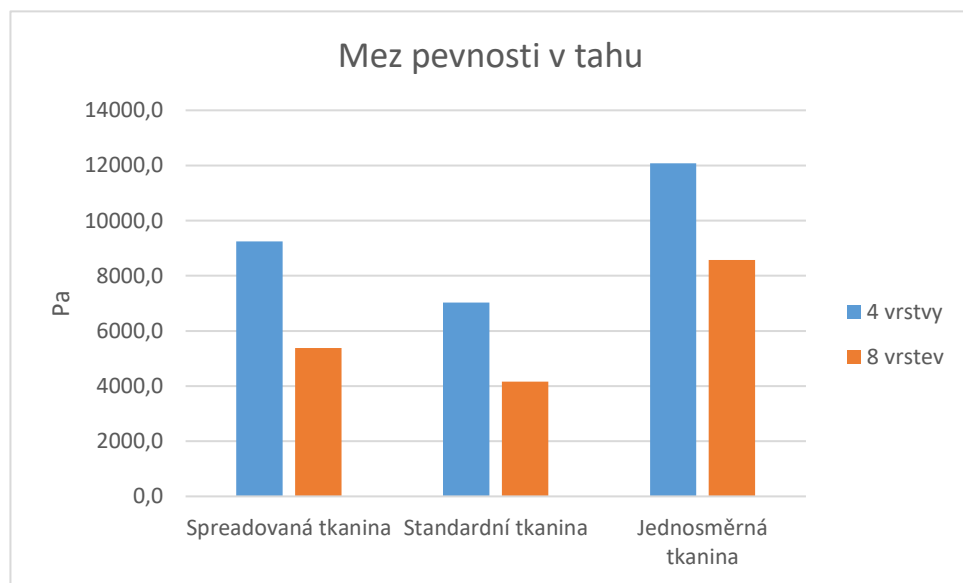
3.1 Tah

Při zkoušce tahem docházelo často k porušení na více jak jednom místě. Nejčastěji pak na 2 místech současně. Toto chování lze vysvětlit povahou materiálu, když dojde k selhání v jednom místě, energie se šíří druhým koncem materiálu do místa, kde se nachází slabší místo a zde dojde k porušení rázem. U jednosměrné tkaniny se aplikoval stejný princip jen díky chybějícím příčným výztužím došlo k šíření energie na všechny strany a tím k totální destrukci.

Vzhledem k omezené maximální síle trhačky 30 kN nedošlo k porušení všech vzorků 8 vrstvé jednosměrné tkaniny. Data meze pevnosti v tahu byla tak průměrována ze 4 přetržených vzorků.



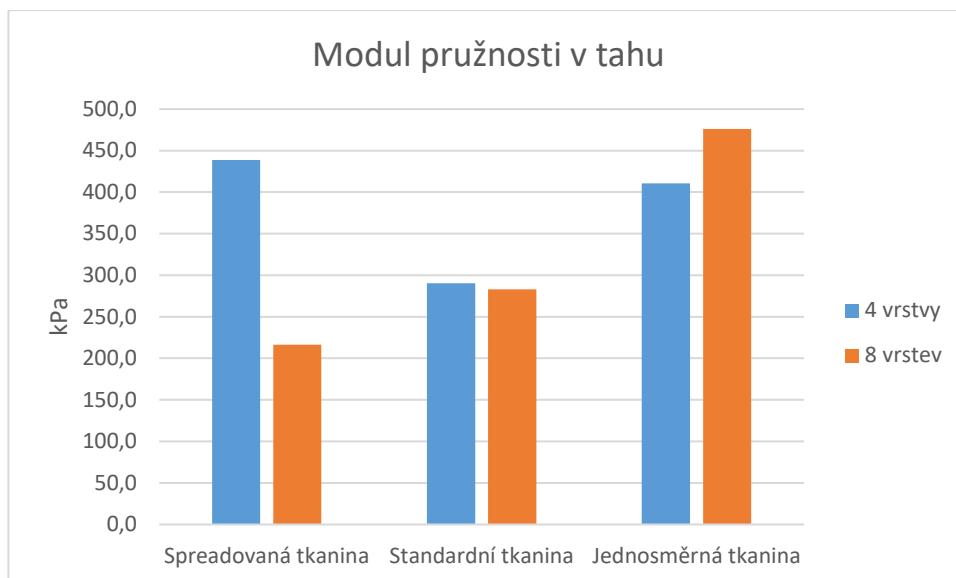
Obrázek 25: Porušení tahem



Obrázek 26: Mez pevnosti v tahu

Z grafu je patrné, že po přepočtu meze pevnosti vykazuje spreadovaná tkanina vyšší mez pevnosti, a to přibližně o 30 % u 4 vrstev a 29 % u 8 vrstev než standardní tkanina. Naproti tomu má spreadovaná tkanina zhruba o 24 % menší hodnotu meze pevnosti. U 8 vrstvé tkaniny je vidět podobná tendence kdy má spreadovaná tkanina o 37 % menší hodnotu.

Dále je patrné na všech typech, že 4 vrstvy mají po přepočtu na vlákno vyšší pevnost než 8 vrstev, a to přibližně pro spread 72 %, Standard 69 % a jednosměrné 40 %. Což nám říká, že každá další vrstva se bude méně podílet na výsledné mezi pevnosti.



Obrázek 27: Modul pružnosti v tahu

Z grafu je vidět, že po přepočtu na jednotlivé vlákno se výrazně liší moduly pružnosti mezi použitím 4 a 8 vrstev. U spreadované tkaniny jde o 100 % rozdíl, u standardní 2 % rozdíl a u jednosměrné o 14 % nárůst hodnoty modulu pružnosti. Vzorky z 8 vrstev vykazují stoupavou tendenci od nejnižších hodnot spreadované tkaniny o nejvyšší hodnoty jednosměrné tkaniny. Vzhledem ke spreadované tkanině se jedná o 24 % pokles ku Standardní tkanině a 55 % pokles vůči jednosměrné tkanině. 4 vrstvé vzorky vykazují tendenci jinou, zde má nejvyšší hodnotu spreadovaná tkanina, jednosměrná má hodnotu o 7 % nižší a standardní má hodnotu o 51 % nižší.

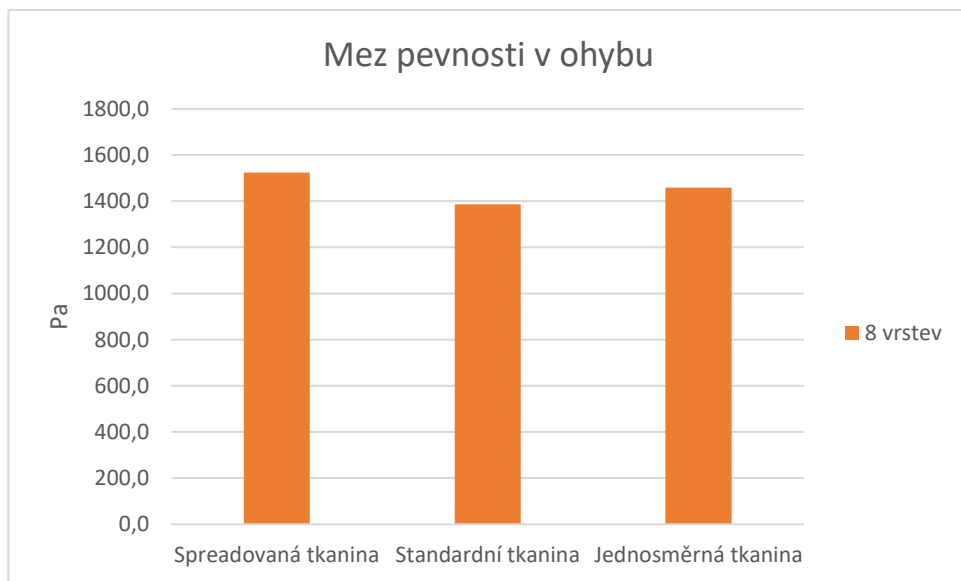
3.2 Ohyb

K porušení nejčastěji nedocházelo v jednom kroku, ale postupným porušením jednotlivých vrstev. K porušení celého materiálu najednou došlo pouze u 3 vzorků standardní tkaniny v 8 vrstvách. U 4 vrstevých vzorků došlo k porušení pouze u spreadované tkaniny, u standardní a jednosměrné k poruše nedošlo. U 8 vrstevých vzorků došlo k poruše všech vzorků. Výjimku tvořily vzorky jednosměrné tkaniny, u kterých došlo k porušení 4 vzorků.

U některých vzorků nebyl vyhodnocovací program schopen určit mez pevnosti, ta byla tak určena manuálně. Tím je zde nejvyšší chybovost způsobená jak malou silou (vůči rozsahu přístroje), tak chybou na kliknutí.

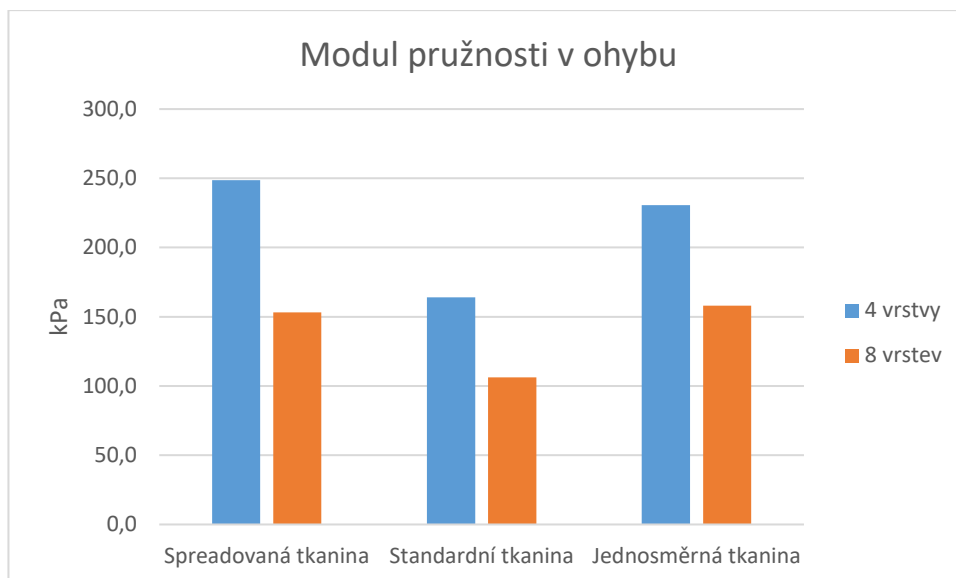


Obrázek 28: Porušení tlakem



Obrázek 29: Mez pevnosti v ohybu

Jelikož při zkoušce ohybem nedošlo k porušení 4 vrstevých vzorků u Standardní tkaniny a jednosměrné tkaniny je v grafu uvedena pouze mez pevnosti osmivrstvých vzorků. Zde je patrné, že po přepočtu na jedno vlákno má nejvyšší hodnotu spreadovaná tkanina, a to o zhruba 10 % oproti standardní tkanině a 4 % oproti jednosměrné. Díky velké relativní chybě měření jsou tyto výsledky málo průkazné. Mez pevnosti 4 vrstvé spreadované je zhruba 150 % oproti osmivrstvé.



Obrázek 30: Modul pružnosti v ohybu

Při přepočtu na jedno vlákno má nejvyšší hodnotu modulu pružnosti spreadovaná tkanina ve 4 vrstvách, a to přibližně o 50 % oproti standardní a 8 % oproti jednosměrné. U 8 vrstevých vzorků je patrné, že spreadovaná tkanina má hodnotu modulu pružnosti vyšší než standardní a to zhruba 44 % ale je o 3 % menší oproti jednosměrné tkanině.

Při srovnání 4 a 8 vrstev je vidět stejná tendence jako u modulu pružnosti v tahu kdy je po přepočtu na vlákno vidět, že 4 vrstvá tkanina vykazuje přibližně 62 % spread, 54 % standard, 46 % jednosměrná vyšší hodnoty než 8 vrstvá. To nám říká, že každá přidaná vrstva se podílí méně na výsledném modulu pružnosti.

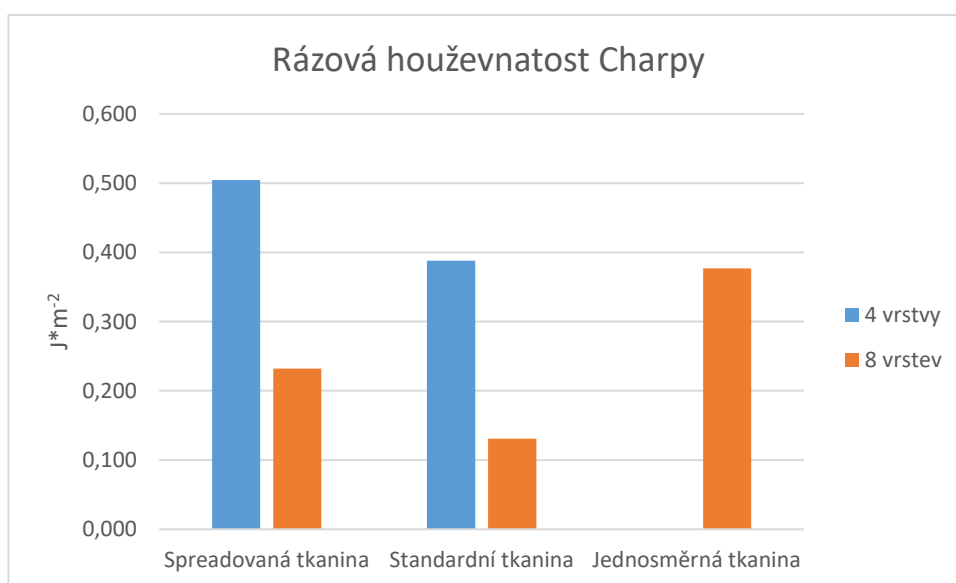
3.3 Rázová houževnatost Charpy

Při zkoušce na rázovou houževnatost docházelo u standardní tkaniny a jednosměrné tkaniny k rozlomení na 2 části. Nestalo se tak pouze o 2 vzorků z 10ti, to platí jak pro 8 vrstev tak pro 4 vrstvy. Neplatí to pro 4 vrstvou jednosměrnou tkaninu, ta měla natolik velký průhyb a pružnost, že nedocházelo k jejímu porušení. Pro spreadovanou tkaninu platil přesný opak, většina vzorků zůstala po porušení v jednom kuse spojená neprasklými vlákny.

Měření rázové houževnatosti Charpy je dále zatíženo vekou chybou měření od 10 do 20 %. Tato chyba však díky velkým rozdílům nehraje podstatnou roli.



Obrázek 31: Porušení rázem

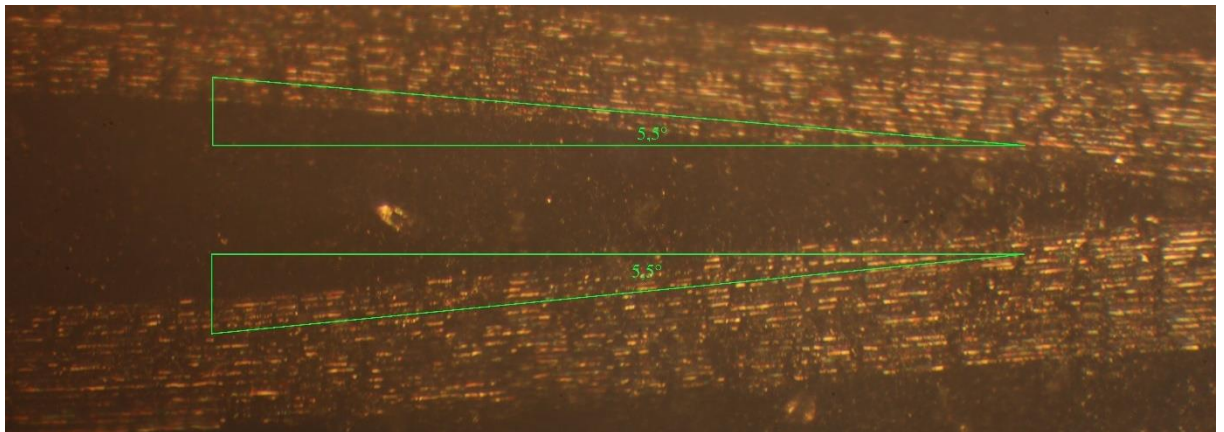


Obrázek 32: Charpy

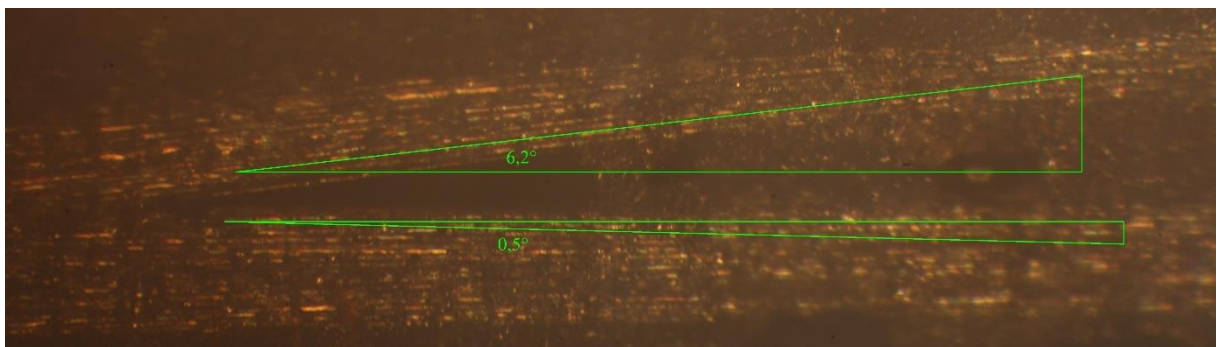
Z grafu je patrné, že spreadovaná tkanina vykazuje vyšší hodnoty houževnatosti než standardní tkanina, a to zhruba pro 4 vrstvy o 30 % a pro 8 vrstev o 77 %. Při porovnání s jednosměrnou tkaninou můžeme použít pouze 8 vrstvé vzorky ze kterých je patrné, že má jednosměrná tkanina zhruba o 39 % vyšší hodnotu rázové houževnatosti než spreadovaná tkanina.

Při porovnání mezi 4 a 8 vrstvou tkaninou je vidět po přepočtu na jedno vlákno, že 4vrstvá vykazuje vyšší hodnoty než 8 vrstvá. To platí jak pro spradovanou tak pro standardní tkaninu. Jedná se zhruba o 117 % pro spreadovanou a 196 % pro standardní tkaninu.

3.4 Mikroskop



Obrázek 33: Standardní tkanina 20X



Obrázek 34: Spreadovaná tkanina 20X

Při 20násobném zvětšení jsou od sebe rozeznatelné jednotlivé vrstvy i vlákna a dají se poměrně jednoduše změřit úhly, které mezi sebou svírají útky a osnova. Tím pádem je vidět celkový úhel který je 11° u Standardní tkaniny. Pro spreadovanou tkaninu je tento úhel $6,7^\circ$.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vypracovat rešerši na téma kompozitních materiálů. V první části byl definován kompozit, popsány jeho druhy a uvedeny zvláštnosti kompozitů vyztužených dlouhými (nekonečnými) vlákny. V následující části byl uveden souhrn nejpoužívanějších pojiv pro vláknové kompozity. Byl uveden seznam různých druhů tkanin a pletenin využívaných pro prostorové použití. V další část byla věnována různým druhům dlouhých vláken využívaných pro přípravu kompozitů. Poslední část je věnována různým druhům povrchových a jiných úprav pro lepší vlastnosti výsledného kompozitu.

V experimentální části byly připraveny vzorky kompozitů připravené z různých typů tkaniny o různém počtu vrstev. U těchto vzorků byly provedeny mechanické zkoušky: tahem, ohybem a rázová houževnatost Charpy. Výsledky byly mezi sebou vzájemně porovnány, při vztažení hodnot na jedno vlákno. V absolutních hodnotách nelze tkaniny mezi sebou porovnávat. Hodnoty modulů mají vlákna velice podobná, avšak počet těchto vláken ve vrstvě se v každé tkanině liší.

Při porovnání pevnosti různých vrstev bylo zjištěno, že po přepočtení hodnot na jedno vlákno mají 4 vrstvé vyšší hodnoty než 8 vrstvé. Konkrétně: mez pevnosti v tahu: 40 – 72 %, rázová houževnatost Charpy: 117 – 196 %, modul pružnosti v ohybu: 46 – 62 % a mez pevnosti v ohybu 149 %. Toto neplatí pro hodnoty modulu pružnosti v tahu, kde tato vlastnost platí pro spreadovanou tkaninu kde byla hodnota vyšší o 102 %, standardní má hodnoty zhruba stejné, liší se o 2 % a jednosměrná tkanina má dokonce hodnoty vyšší o 14 %.

Při porovnání různých tkanin po přepočtu na jedno vlákno je zřejmé, že spreadovaná tkanina má vyšší hodnoty než standardní tkanina. Toto platí jak pro 4 vrstvé, tak pro 8 vrstvé kompozity. Konkrétně: (4 vrstvá; 8vrstvá) mez pevnosti v tahu: 31 %;29 %, rázová houževnatost: 30 %; 77 %, mez pevnosti ohybu: (8) 9 %, modul pružnosti v ohybu: 51 %; 44%. Výjimka je pouze u modulu pružnosti v tahu, kde má 8 vrstvá standardní tkanina vyšší hodnotu modulu pružnosti o 24 % než 8 vrstvá speradovaná tkanina. Při porovnání spradované a jednosměrné tkaniny vychází pro každé hodnoty jinak, u tahových zkoušek vychází hodnoty vyšší pro jednosměrnou. Konkrétně: (4 vrstvá; 8 vrstvá) mez pevnosti: 24 %; 38 %; modul pružnosti: 4 vrstvá vyšší o 7 %; 8 vrstvá nižší o 55 %. V ohybových vlastnostech má vyšší hodnotu spreadovaná tkanina, konkrétně: (4vrstvy; 8vrstev) 8 %; 4 %. Tyto rozdíly jsou vzhledem k chybě měření zanedbatelné. U rázové houževnatosti má vyšší hodnoty jednosměrná, konkrétně 8 vrstvá o 39 %.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [2] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
- [3] ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů*. Vyd. 3., dopl. a upr. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-761-2.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] VLÁKNA PRO KOMPOZITY. *Web.archive.org* [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20100401025714/http://www.volny.cz/zkoriek/vlakna.pdf>
- [6] Ultra-lightweight carbon fibre/thermoplastic composite material using spread tow technology. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2013, (50), 91-97 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813000449?via%3Dihub>
- [7] *LAMINA ČNÍ PRYSKYŘICE L 285 TUŽIDLA 285, 286, 287* [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/7/3801ead7cb8f67913c1b13e44001bf82c9015a49.pdf>
- [8] *Tužidlo H 286* [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/products/3649/e8cab310fae30e19c96a5a8ec093d3d64e573234.pdf>
- [9] G. Angeloni [tištěné]. *WOVEN FABRIC DATA SHEET DYF 25 - 160 P*. ©2009. [cit. 2019-06-29]
- [10] G. Angeloni [tištěné]. *WOVEN FABRIC DATA SHEET GG 160 P*. ©2009. [cit. 2019-06-29]
- [11] TORAY [tištěné]. *T700S COMMERCIAL DOCUMENTATION*. ©2012 [cit. 2019-06-29]

- [12] Experimental studies of thin-ply laminated composites. *Composites Science and Technology* [online]. 2007, (67), 996-1008 [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353806002168>
- [13] *Engineered materials handbook: Composites*. 3. METALS PARK, OHIO 44073: ASM International, 1989. ISBN 0-87170-279-7.
- [14] ASTRÖM, B. T. *Manufacturing of polymer composites*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an Informa business, 2017. ISBN 978-1-138-45958-8. Monografie.

PŘÍLOHY

Příloha A – Absolutní hodnoty spreadovaná tkanina.....	49
Příloha B – Absolutní hodnoty Standardní tkania.....	50
Příloha C – Absolutní hodnoty jednosměrná tkania	51
Příloha D – Data rázová honževnatost	52
Příloha E – Grafi průběhu měření	53

PŘÍLOHA A – ABSOLUTNÍ HODNOTY SPREADOVANÁ TKANINA

Tabulka 9: Spread. 8 tah + ráz.

Spredivaná tkanina 8 vrstev	mez pevnosti v tahu/MPa	Modul pružnosti v tahu/GPa	charpy/kJ*m ⁻²
Průměr	516,12	20,77	44,53
Min	448,36	18,80	40,07
Max	564,56	22,22	49,67
Směrodatná odchylka	37,17	1,06	3,39
% odchylka	7,20 %	5,08 %	7,61 %

Tabulka 10: Spread. 8 ohyb

Spredivaná tkanina 8 vrstev	mez pevnosti v ohybu/MPa	průhyb/mm	modul pružnosti v ohybu/GPa
Průměr	292,62	6,83	29,42
Min	197,80	5,24	27,44
Max	318,89	7,64	33,41
Směrodatná odchylka	40,55	0,77	2,31
% odchylka	13,86 %	11,33 %	7,86 %

Tabulka 11: Spread. 4 tah + ráz.

Spredivaná tkanina 4 vrstvy	mez pevnosti v tahu/MPa	Modul pružnosti v tahu/GPa	charpy/kJ*m ⁻²
Průměr	444,02	21,07	48,41
Min	389,97	20,07	41,45
Max	473,98	21,89	51,91
Směrodatná odchylka	26,02	0,74	4,18
% odchylka	5,86 %	3,49 %	8,64 %

Tabulka 12: Spread. 4 ohyb

Spredivaná tkanina 4 vrstvy	mez pevnosti v ohybu/MPa	průhyb/mm	modul pružnosti v ohybu/GPa
Průměr	364,78	16,96	23,87
Min	232,38	14,84	21,45
Max	341,07	19,88	27,36
Směrodatná odchylka	72,12	1,83	2,69
% odchylka	19,77 %	10,81 %	11,25 %

PŘÍLOHA B – ABSOLUTNÍ HODNOTY STANDARDNÍ TKANINA

Tabulka 13: Standard 8. tah + ráz.

Standardní tkanina 8 vrstev	mez pevnosti v tahu/MPa	Modul pružnosti v tahu/GPa	charpy/kJ*m ⁻²
Průměr	799,73	54,34	50,20
Min	723,35	53,03	43,07
Max	834,17	54,93	58,49
Směrodatná odchylka	32,98	0,57	5,74
% odchylka	4,12 %	1,05 %	11,43 %

Tabulka 14: Standard. 8 ohyb

Standardní tkanina 8 vrstev	mez pevnosti v ohybu/MPa	průhyb/mm	modul pružnosti v ohybu/Gpa
Průměr	532,43	9,76	40,79
Min	730,10	8,20	44,18
Max	431,77	13,17	36,04
Směrodatná odchylka	86,48	9,76	2,59
% odchylka	16,24 %	19,07 %	6,34 %

Tabulka 15: Standard. 4 tah + ráz.

Standardní tkanina 4 vrstvy	mez pevnosti v tahu/MPa	Modul pružnosti v tahu/GPa	charpy/kJ*m ⁻²
Průměr	674,93	27,87	74,47
Min	602,11	24,24	51,10
Max	708,61	30,22	92,69
Směrodatná odchylka	40,00	2,32	13,84
% odchylka	5,93 %	8,32 %	18,59 %

Tabulka 16: Standard. 4 ohyb

Standardní tkanina 4 vrstvy	mez pevnosti v ohybu/MPa	průhyb/mm	modul pružnosti v ohybu/Gpa
Průměr	Nedošlo k porušení ohybem		31,48
Min			28,96
Max			33,67
Směrodatná odchylka			1,82
% odchylka			5,79 %

PŘÍLOHA C – ABSOLLUTNÍ HODNOTY JEDNOSMĚRNÁ TKANIA

Tabulka 17: Jednosměr. 8 tah + ráz.

Jednosměrná tkanina 8 vrstev	mez pevnosti v tahu/MPa	Modul pružnosti v tahu/GPa	charpy/kJ*m ⁻²
Průměr	1646,08	91,38	144,69
Min	1486,32	78,35	107,31
Max	1732,82	94,99	192,73
Směrodatná odchylka	99,10	5,16	29,31
% odchylka	6,02 %	5,65 %	20,25 %

Tabulka 18: Jednosměr. 8 ohyb.

Jednosměrná tkanina 8 vrstev	mez pevnosti v ohybu/MPa	průhyb/mm	modul pružnosti v ohybu/Gpa
Průměr	559,93	22,16	60,65
Min	508,33	19,52	53,07
Max	605,42	24,58	66,96
Směrodatná odchylka	44,91	2,25	5,20
% odchylka	8,02 %	10,15 %	8,58 %

Tabulka 19: Jednosměr. 4 tah + ráz.

Jednosměrná tkanina 4 vrstvy	mez pevnosti v tahu/MPa	Modul pružnosti v tahu/GPa	charpy/kJ*m ⁻²
Průměr	1159,12	39,40	Nedošlo k porušení rázem
Min	1052,67	34,87	
Max	1228,42	45,88	
Směrodatná odchylka	52,31	3,42	
% odchylka	4,51 %	8,67 %	

Tabulka 20: Jednosměr. ohyb

Jednosměrná tkanina 4 vrstvy	mez pevnosti v ohybu/MPa	průhyb/mm	modul pružnosti v ohybu/Gpa
Průměr	Nedošlo k porušení ohybem		44,27
Min			36,36
Max			54,12
Směrodatná odchylka			7,48
% odchylka			16,91 %

PŘÍLOHA D – DATA RÁZOVÁ HONŽEVNATOST

Tabulka 22: Spread. 8

n	a/mm	b/mm	J	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
1	9,71	1,66	0,706	43,82
2	10	1,69	0,801	47,43
3	10	1,64	0,671	40,92
4	9,94	1,66	0,747	45,29
5	10,02	1,66	0,661	40,07
*6	9,99	1,66	0,974	58,75
7	9,66	1,66	0,824	49,67
*8	9,73	1,39	0,652	33,28

Tabulka 21: Spread. 4

n	a/mm	b/mm	J	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
*1	9,89	0,94	0,216	23,99
*2	9,54	0,93	0,654	73,75
*3	9,58	1,14	0,283	25,88
4	9,6	0,99	0,489	51,42
*5	9,55	0,95	0,248	27,28
6	9,58	0,97	0,482	51,91
7	9,6	0,99	0,464	48,86
*8	9,57	0,95	0,314	33,44
*9	9,57	0,97	0,324	34,58
10	9,55	0,94	0,372	41,45

Tabulka 24: Standard. 8

n	a/mm	b/mm	J	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
1	9,87	1,53	0,739	48,96
2	9,73	1,61	0,916	58,49
3	9,78	1,63	0,79	49,54
4	9,76	1,62	0,897	56,7
5	9,98	1,64	0,705	43,07
6	9,95	1,62	0,899	55,78
*7	9,93	1,59	0,59	37,34
*8	9,97	1,64	1,037	64,2
9	9,95	1,66	0,712	43,11
10	9,76	1,61	0,722	45,95

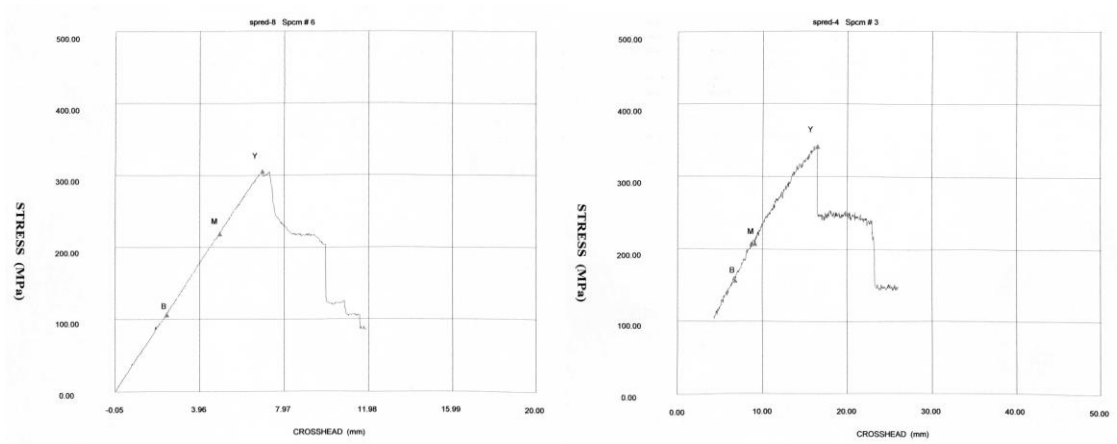
Tabulka 23: Standard. 4

n	a/mm	b/mm	J	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
1	9,86	0,9	0,629	70,93
2	9,79	0,9	0,45	51,1
3	9,82	0,9	0,638	72,16
4	9,8	0,92	0,794	88,1
5	9,78	0,91	0,639	71,79
*6	9,79	0,91	1,042	116,99
*7	9,73	0,97	0,313	33,12
8	9,79	0,86	0,502	59,59
9	9,78	0,89	0,778	89,4
10	9,83	0,93	0,847	92,69

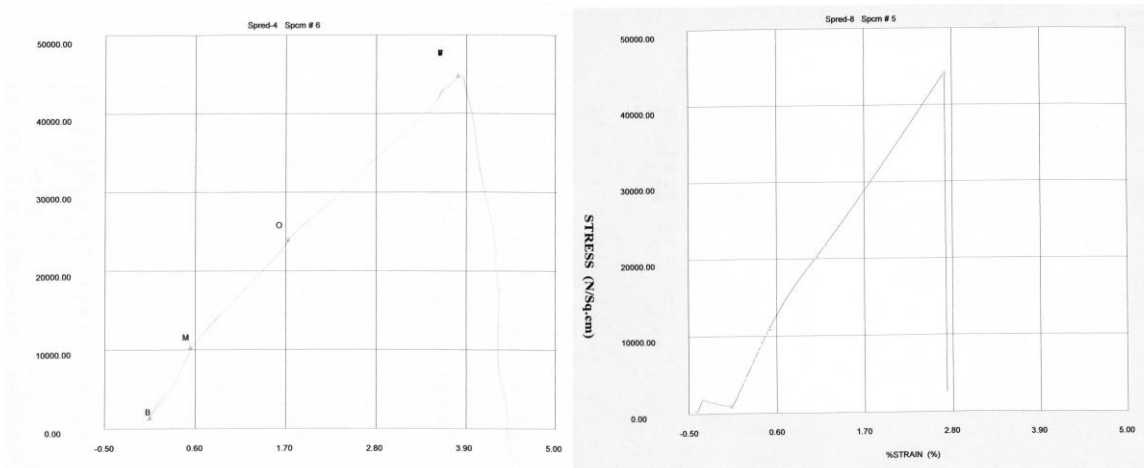
Tabulka 25: Jednosměr. 8

n	a/mm	b/mm	J	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
1	9,82	0,89	1,002	114,64
2	9,84	0,84	0,965	116,75
3	9,36	0,81	1,116	148,17
4	9,4	0,84	1,084	137,32
5	9,39	0,81	0,816	107,31
6	9,4	0,83	1,426	182,81
7	9,42	0,83	1,102	140,91
8	9,87	0,85	1,053	125,51
9	9,82	0,86	1,628	192,73
10	9,84	0,83	1,476	180,71

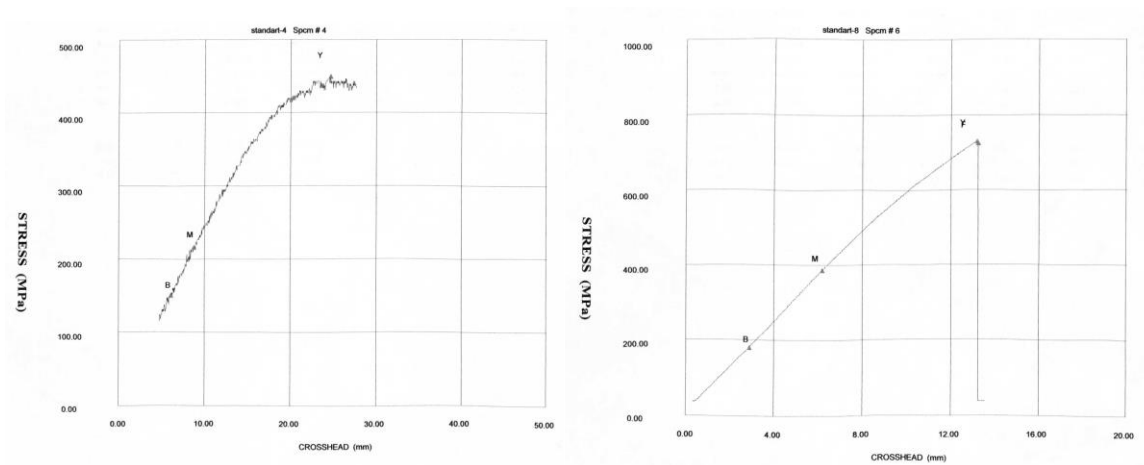
PŘÍLOHA E – GRAFY PRŮBĚHU MĚŘENÍ



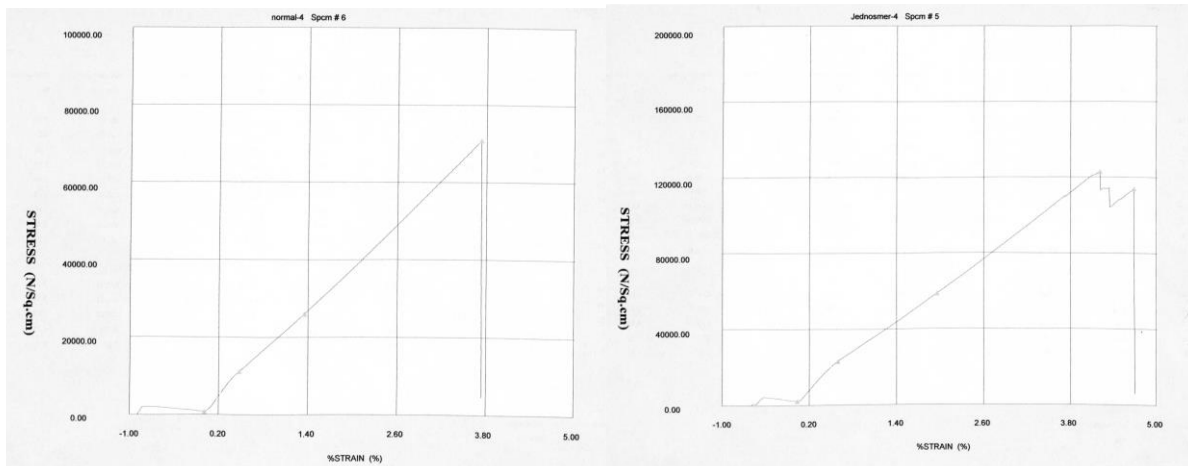
Obrázek 35: Průběh ohyb spreadovaná tkanina



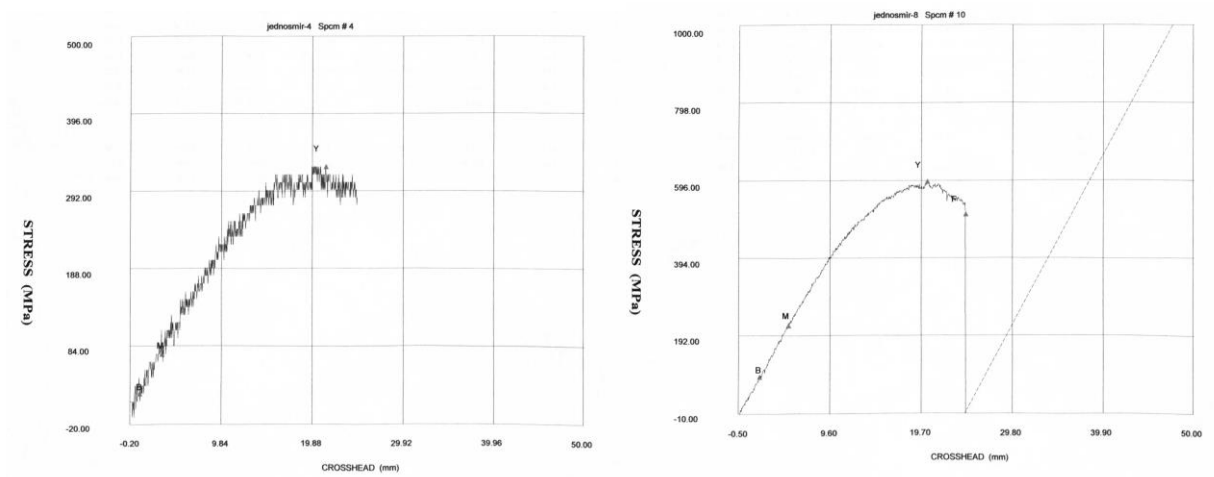
Obrázek 36: Průběh tah spreadovaná tkanina



Obrázek 37: Průběh ohyb Standardní tkanina



Obrázek 38: Průběh tah 4 Standardní 4 jednosměrná tkanina



Obrázek 39: Průběh ohyb jednosměrná tkanina