

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství



# Bakalářská práce

Kompozity a rotační spékání

2019

Ondřej Polák



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Polák** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459598**  
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
 Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
 Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
 Studijní obor: **bez oboru**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kompozity a rotační spékání**

Název bakalářské práce anglicky:

**Composite materials and rotomoulding**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Úvod - princip kompozitů
- 2) Princip rotačního spékání
- 3) Návrh a provedení pilotního experimentu přípravy kompozitu metodou rotačního spékání
- 4) Zhodnocení, závěr

Seznam doporučené literatury:

ŘEHULKA, Z. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů a polymerů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-822-5.  
 MACHEK, V.; SODOMKA, J. Polymery a kompozity s polymerní matricí. Praha 6: Nakladatelství ČVUT, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.  
 Časopisecká literatura - vyhledání je součástí práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc., ústav materiálového inženýrství FS**

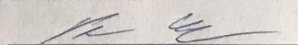
Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

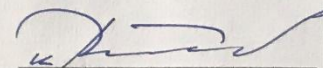
Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
 prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
 podpis vedoucí(ho) práce

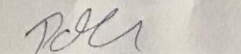
  
 prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
 podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
 podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25.4.2019  
 Datum převzetí zadání

  
 Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, v přiloženém seznamu jsou uvedeny veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

V Praze dne:

podpis:

# Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Prof. RNDr. Petrovi Špatenkovi CSc. za jeho odbornou pomoc a rady při vypracování. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Zdeňce Jeníkové a paní Zoye Ghanem, MSc. za pomoc v laboratořích při práci na praktické části bakalářské práce. V neposlední řadě děkuji firmě Surface-treat za veškerý dodaný materiál na praktickou část mé práce.

## Anotace

Autor:	Ondřej Polák
Název BP:	Kompozity a rotační spékání
Rozsah práce:	38 stran
Školní rok vyhotovení:	2019
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav materiálového inženýrství
Vedoucí BP:	Prof. RNDr. Petr Špatenka CSc.
Klíčová slova:	Kompozity, Rotomolding, Polyethylen, Skleněné vlákno, Adheze, Zkouška tahem
Abstrakt:	Tato práce se zabývá studiem vývoje nového kompozitního materiálu vyráběného pomocí beztlakové technologie. Konkrétně se jedná o technologii rotačního spékání (rotomolding). Předmětem práce je vyrobit vzorky s dvěma různými druhy materiálu a ty následně porovnat pomocí zkoušky na tah. V závěru práce jsou shrnuty výsledky s ohledem na další možnosti zlepšení tohoto materiálu.

# Annotation

Author	Ondřej Polák
Title of the thesis:	Composites and Rotational Molding
Extent of the thesis:	38 pages
School year of creation:	2019
University:	Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Institute of Material Engineering
Supervisor:	Prof. RNDr. Petr Špatenka CSc.
Keywords:	Composites, Rotomolding, Polyethylene, Glass Fibre, Adhesion, Tensile Testing
Abstract:	This thesis focuses on the study of a development of a new composite material created by the means of pressureless technology. Specifically, the technology concerned is rotational molding (rotomolding). The aim of the thesis is to create samples using two different materials and consequently compare those materials via tensile testing. Results are summarized in the conclusion and possible further improvements of this material are suggested.

# Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Anotace .....	5
Annotation .....	6
Obsah .....	7
I Úvod .....	8
II Teoretická část .....	9
1 Kompozitní materiály .....	9
1.1 Rozdělení kompozitů.....	10
1.2 Matrice.....	11
1.2.1 Polymerní matrice .....	11
1.2.2 Kovové matrice.....	14
1.2.3 Keramické matrice .....	14
1.2.4 Uhlíkové matrice.....	14
1.3 Výztuže.....	14
1.3.1 Rozdělení výztuže podle velikosti .....	15
1.3.2 Rozdělení výztuže podle tvaru.....	15
1.3.3 Rozdělení výztuže podle materiálu .....	16
2 Adheze v kompozitech.....	19
3 Rotační spékání.....	20
4 Zkouška tahem.....	21
III Praktická část .....	23
5 Seznámení s problematikou .....	23
6 Výroba vzorků .....	24
7 Příprava vzorků.....	28
8 Zkouška tahem.....	29
8.1 Naměřené hodnoty.....	30
8.2 Vyhodnocení výsledků ze zkoušky tahem .....	33
9 Optické hodnocení .....	34
10 Shrnutí práce .....	37
Použitá literatura .....	38

# I Úvod

Tato práce vznikla na základě výzkumu potenciálního zlepšení pevnosti kompozitních materiálů, které se skládají z polyethylenové matrice s příměsí skleněných vláken. Z předešlých výzkumů je patrné zlepšení vlastností materiálů při přidání modifikovaných (plazmově upravených) skleněných vláken. To znamená, že dosud se upravoval pouze povrch plniva. [1] Tato práce se také zabývá zmíněnou problematikou, ovšem pro daný materiál takový, kdy se jedná o plazmou upravený polyethylen a ne povrch skleněného vlákna. Tedy o upravenou matici materiálu.

Důvodů tohoto snažení je více, protože potenciál kompozitů složených nejen ze skleněných vláken a polyethylenu je velký v mnoha odvětvích. Je mnoho sportovních i průmyslových odvětví, kde je stále kladen větší a větší důraz na co nejmenší hmotnost materiálu a přitom co nejlepší mechanické vlastnosti. Kompozity při správném spojení dvou materiálů toho mohou dosáhnout.

Dalším možným budoucím využitím tohoto kompozitu je 3D tisk. Náš výzkum probíhá pomocí vytváření vzorků v rotomoldingu. Jedná se tedy o takzvanou beztlakovou formu výroby vzorků. Proto je možné, že by se do budoucna mohl tento druh materiálu využívat pro 3D tisk.

Koncept této práce spočívá v tom, že bylo vyrobeno 5 vzorků ve složení 95% polyethylenu a 5% skleněných vláken a dalších 5 vzorků se stejným procentuálním složením, ale použitý polyethylen byl plazmově upravený. Následně byly vzorky obou materiálů zkoumány na pevnost v tahu.

V poslední části je shrnuto závěrečné porovnání a vyhodnocení obou druhů vzorků, a dále hodnocení dalšího možného postupu při vytváření těchto nových kompozitních materiálů.

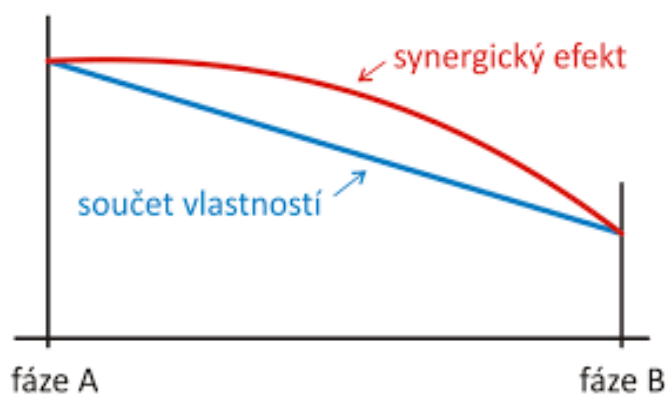


## II Teoretická část

### 1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály v dnešní době patří mezi perspektivní materiály, které se už dlouhou dobu používají nejen ve strojírenství, ale v mnoha průmyslových odvětvích na celém světě. Tyto materiály jsou sice hojně využívány a jsou jimi nahrazovány starší, už více méně dokonale prozkoumané materiály, ale odvětví kompozitů má stále velký prostor pro výzkum, protože jejich potenciál a možné budoucí využití je mnohonásobně vyšší, než jaké bylo doposud. Což naznačuje to, že výzkum a vývoj těchto materiálů bude dále v nemalé míře pokračovat.

Kompozitní materiál je takový materiál, který obsahuje nejméně dvě složky (fáze, materiály). Tyto složky musí mít odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Zásadní vlastností kompozitu je to, že výsledná kvalita mechanických vlastností po spojení dvou fází je vyšší než kdybychom sečetli kvalitativní hodnoty mechanických vlastností v poměru jednotlivých fází. Těto vlastnosti se říká synergický efekt, jehož znázornění lze vidět na obr. 1.



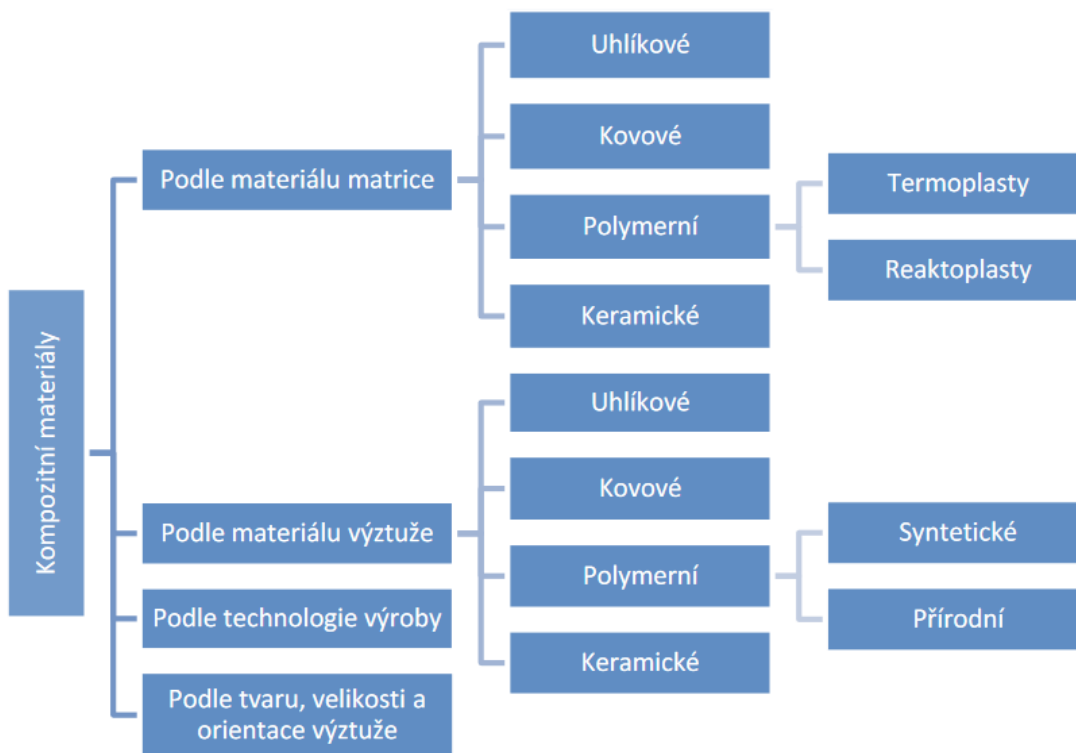
Obr. 1 Synergický efekt [1]

Tyto vlastnosti nám do jisté míry umožňují vytvářet si kompozity dle vlastní potřeby na jednotlivá řešení. Například správný výběr matrice, výztuže a skladba kompozitu jsou základní parametry materiálu, které nám mohou hodně pomoci ve výrobě materiálu „na míru“. Na kvalitu kompozitních materiálů má vliv hlavně adheze mezi matricí a výztuží, tedy jak dobrou přilnavost mají tyto dvě složky vzájemně mezi sebou.

Pro lepší adhezi se používají upravovaná vlákna. Povrch vláken se chemicky nebo mechanicky upraví tak, aby na rozhraní matrice a výztuže byla adheze co nejvyšší.

## 1.1 Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály se dělí dle mnoha parametrů. Nejčastější a zřejmě i nejvíce vypovídající dělení je dělení podle druhu použitých fází. To znamená, jaká fáze byla použita na materiál matrice a výztuž. Dále se mohou kompozity dělit např. dle tvaru, velikosti, orientace výztuže v matrici nebo podle technologie výroby. Základní rozdělení jsem uvedl do obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení kompozitů [2]

## 1.2 Matrice

Pod pojmem matrice se rozumí materiál, kterým je prosycen systém vláken a partikulárních komponent tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Vzniklá surovina se označuje kompozit. [3]

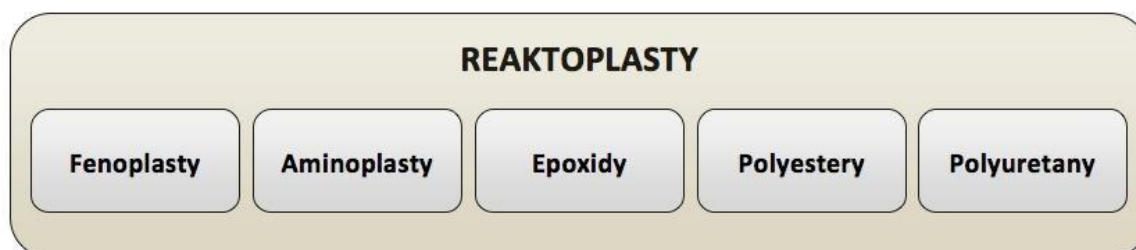
Matrice by měla hlavně spojovat vyztužovací fázi a chránit jí před okolními vlivy okolí. Dále přenáší síly a rozkládá je mezi výztuž.

### 1.2.1 Polymerní matrice

Polymerní matrice jsou tvořeny hlavně termoplasty nebo reaktoplasty. Všeobecné vlastnosti těchto matric jsou nízká hustota, houževnatost a hlavně korozivzdornost.

#### Reaktoplastové matrice

Reaktoplasty jsou polymery, které nevratnou chemickou reakcí (vytvrzováním, jež proběhne zahřátím nebo přidáním vytvrzovacího prostředku) přecházejí z lineárního viskózního stavu do síťovaného stavu. Vytvrzováním ztrácí materiál termoplastický charakter, je netavitelný a nerozpustný. [4] Základní rozdělení reaktoplastů je uvedeno na obr. 3.



Obr. 3 Základní rozdělení reaktoplastů [4]

#### Termoplastové matrice

Termoplastové matrice umožňují opakované přetváření díky jejich struktuře, jež je tvořena dlouhými lineárními řetězci spojenými mezimolekulárními silami a fyzikálním zapletením řetězců. Umožňují také velmi produktivní výrobu, neboť dosahují kratší doby výrobního cyklu na rozdíl od reaktoplastů, které je nutné vytvrdit.

Trendem ve vývoji kompozitních materiálů s polymerní maticí je snaha o přechod z reaktoplastových matric na matrice termoplastové. Důvodem je lepší zpracování matric a možnost recyklovatelnosti velkosériově vyráběných dílů. Termoplastové matrice umožňují dlouhodobou skladovatelnost a mají velmi dobrou houževnatost. [2]

Stojí přitom za zmínění, že 73 % z celkového objemu výroby představuje jen 5 druhů plastů a to polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS) a polyethylentereftalát (PET). [4]

### Polyethylen (PE)

Polyethylen je nepolární, a tedy nenavlhavý plast, který má výborné elektroizolační a dielektrické vlastnosti. Polyethylen má hustotu menší než voda. Velmi málo se používá pro konstrukční aplikace, protože jeho pevnost je nejnižší ze všech standartně používaných termoplastů, navíc jeho teplota zeskení je  $-120^{\circ}\text{C}$ . Další nedostatek PE je to, že je velice citlivý na UV záření a musí být tedy pro venkovní použití upravován (např. přidáním sazí). Velkou výhodou PE je jeho vynikající odolnost proti rázovému namáhání. Mezi hlavní výhody PE patří nízká cena, dobrá dostupnost a dobré vlastnosti pro zpracování a výrobu.

Polyethylen je nejrozšířenějším obalovým materiálem, používá se pro technické výrobky a spotřební zboží jako jsou izolační pláště kabelů, potrubí pro zavlažovací systémy v zemědělství, fólie, tašky, pytle, lahvičky, kanystry, nádoby, přepravky, nádrže na dešťovou vodu nebo žumpy, apod. [4]

### Polypropylen PP

Vlastnostmi se polypropylen značně blíží vysokohustotnímu polyethylenu. Jedná se o nepolární plast a obdobně jako polyethylen bude odolávat polárním rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a solím. Odolnost PP je vyšší než v případě PE hlavně za vyšších teplot. Naproti tomu teplotu zeskení má PP už okolo  $-15^{\circ}\text{C}$  a, tedy snáší velice špatně nízké teploty. Jedná se o hořlavý plast. PP má nejnižší hustotu ze všech plastů (kromě odlehčovaných). Na druhé straně má vyšší pevnost, tuhost, tvrdost a odolnost proti oděru. Vzhledem k vyšší teplotě tání má lepší tvarovou stálost za zvýšených teplot. Také lépe odolává vzniku napěťových trhlinek než polyethylen.

Z polypropylenu se vyrábějí obalové materiály, vlákna (např. pro koberce), lahve a velmi často různé duté předměty. Díky jeho lepším vlastnostem se využívá i ve strojírenství, a to například na výrobu nárazníků nebo součástí do kuchyňských robotů, vodních armatur, vrtulí ventilátorů, kanalizačních systémů, bazénů, atd. Není vhodný pro venkovní použití. [4]

### Polyvinylchlorid PVC

Jedná se o amorfnní termoplast. Je lehce navlhavý a jeho dielektrické vlastnosti jsou horší oproti PE, ovšem chemická odolnost je srovnatelná. Má vysokou teplotu zeskení (85°C), z čehož vyplývá, že je za běžných teplot pevný a křehký (má malou rázovou houževnatost). Dokáže odolávat teplotám maximálně 65°C. Stejně jako v případě PE nedokáže bez úpravy odolávat UV záření. Velký problém PVC je jeho zpracování, protože se zpracovává za teplot 180°C, ale v rozmezí 190-200°C se rozkládá. [4]

PVC materiál je buď měkkčený (PVC-P) nebo neměkkčený (PVC-U). Z měkkčeného typu se vyrábí například chirurgické rukavice, hračky, ubrusy, obaly knih, atd. Neměkkčený materiál se zpracovává především na kanalizační roury, okapové žlaby a okenní rámy. [4]

### Polystyren PS

Jedná se o amorfnní lineární termoplast. Mezi výhody polystyrenu patří dobrá propustnost světla, vynikající izolační a dielektrické vlastnosti a odolávání účinkům alkoholů, olejů a zásad. Je nenavlhavý, jeho teplota zeskení je 95°C a je tedy za běžných podmínek pevný a křehký. Maximální teplota pro použití PS je 80°C. Polystyren se nepoužívá pro venkovní aplikace, protože i když má dobrou odolnost proti oxidaci, tak ve venkovních podmínkách žloutne a křehne. [4]

Polystyren je sice transparentní, ale zároveň také velice křehký. Proto je jeho použití omezené na výrobu spotřebního zboží jako například kelímky, misky, obaly na CD, atd. [4]

### Polyethylentereftalát PET

Jedná se o termoplast, který může být v podobě amorfnní nebo semikrystalické. Má dobré mechanické vlastnosti a teplotu zeskení 75°C. Pro použití za běžných podmínek je tedy křehký. Vzhledem k tomu, že má vyšší tepotu tání, tak se dá krátkodobě používat až do 200°C (dlouhodobě pouze do 100°C). Tento materiál má vysokou propustnost světla a je navlhavý. [4]

Z polyethylentereftalátu se vyrábějí především vlákna pro výrobu tkanin a lan. Mezi další výrobky patří folie a nápojové láhve. Využívá se i v průmyslu na technické výlisky (např. díly elektromotorů). [4]

### 1.2.2 Kovové matrice

Jako kovové matrice se nejčastěji používají lehké kovy nebo slitiny. Mezi nejvíce používané patří slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Ovšem mohou ji tvořit i slitiny železa, niklu, kobaltu a mědi. Důležité jsou pro tyto matrice především teploty, které se nesmějí při práci s těmito materiály přesáhnout. Je to přibližně 400°C u hliníku, 600°C u slitin titanu, u slitin na bázi železa potom 1000-1150°C. Nevýhodou kovových matic je většinou cena. Ovšem její výhody jsou pro některé aplikace zásadní. Kovové matrice totiž zajišťují dobré elektrické a vodivé vlastnosti, nehořlavost, pevnost ve smyku, tepelnou odolnost a tvárnost. Dalšími výhodami těchto matic jsou povlakování a tvarování. [2,5]

### 1.2.3 Keramické matrice

Keramické matrice mají vysokou tepelnou a chemickou odolnost. Další jejich výhodou je dobrá pevnost v tahu za vysokých teplot. To je jedna z hlavních výhod oproti kovovým maticím. Keramické matrice jsou ale bohužel křehké a mají špatný přenos zatížení do vláken. Navíc jsou limitované tím, že maximální podíl v kompozitu může být 50%, jelikož čím větší je podíl vláken v kompozitu, tím více se stává matrice pórovitou. Nejvhodnějším tvarem pro použití keramické matrice jsou jehličkové částice. [5,6]

### 1.2.4 Uhlíkové matrice

Uhlíkové matrice mají hlavní využití v aplikacích, kde je potřeba extrémně vysoká tepelná odolnost. Proto se používají pro třecí prvky brzd letadel nebo jako izolace raketoplánů. Zastoupení mají i v lékařském odvětví a to mezi implantáty. [5,6]

## 1.3 Výztuže

Výztuž by měla zlepšovat mechanické vlastnosti materiálu. Je pevnější než matrice, navíc je tvrdší a tvoří nespojitou fázi kompozitu. Jako výztuž se používá více druhů materiálů s různými tvary. Nejčastějšími tvary jsou vlákna nebo částice, které jsou nejčastěji ve tvaru kuliček, hranolů nebo nepravidelných částic. Vlákna mají vždy jeden rozměr mnohonásobně větší než druhý a dosahují mnohem větší pevnosti, než když je materiál ve větších rozměrech v celistvé podobě. Čím menší je průměr vlákna, tím roste jeho pevnost. To je dáno tím, že čím je menší vlákno, tím jsou menší přirozené defekty. Pevnost vlákna je závislá i na jeho délce. Při použití vláken platí, že ve směru, v kterém jsou nejvíce orientovaná vlákna, je pevnost kompozitu největší. Proto se v praxi vlákna

záměrné skládají po směru největšího zatížení. Velikost vláken je omezena na minimální rozměr 5  $\mu\text{m}$ . Důvod tohoto omezení není jen technologie výroby, ale hlavně riziko zdravotních problémů. Nejvíce nebezpečný je průnik vláken do plic. Používaná vlákna jsou skleněná, uhlíková, polymerní, kovová, či keramická. V některých případech se však můžeme setkat i s využitím vláken přírodních. [2]

### 1.3.1 Rozdělení výztuže podle velikosti

#### Makrokompozity

Použití makrokompozitů je především ve stavebnictví. Výztuže se totiž pohybují v řádu centimetrů. Klasické příklady makrokompozitu jsou železobeton a polymerbetony se šterkem nebo drceným kamenem.

#### Mikrokompozity

U mikrokompozitů se rozměry výztuže pohybují řádově v  $\mu\text{m}$ . Jejich hlavní využití je ve strojírenství.

#### Nanokompozity

Nanokompozity jsou takové kompozity, které mají velikost výztuže v řádech nm. V těchto případech je velký problém s rozložením výztuže v matrici.

### 1.3.2 Rozdělení výztuže podle tvaru

#### Částicové

Částicové výztuže se přidávají do kompozitů za účelem zvýšení pevnosti. Existuje mnoho druhů částicových příměsí. Ať už co se týče velikosti nebo tvaru částic. Co se týče velikosti, neměli by být částice příliš velké, protože by negativně ovlivňovali pevnost. V opačném případě, když jsou částice moc malé, je velice obtížné dosáhnout správného rozložení výztuže uvnitř kompozitu. Nejčastěji používané částice jsou o rozměrech 1-10  $\mu\text{m}$ . U tvarově rozdílných částic dosahují nejlepších výsledků anizometrické tvary. Konkrétně jehlice, disky a destičky. [7]

## Vláknové

U kompozitů s vláknovou výztuží jde především o rozložení vláken uvnitř kompozitu. Uspořádání vláken může být například jednoosé (vlákna jdou rovnoběžně jedním směrem), dvouosé (vlákna se kříží pod  $90^\circ$  úhlem), víceosé nebo neuspořádané. U vláknových kompozitů je velká výhoda v tom, že se negativní mechanické vlastnosti jednotlivých složek neprojevují. Tedy pokud je kompozit tvořen z křehké matrice i výztuže, má dobrou odolnost proti křehkému lomu. [7]

### 1.3.3 Rozdělení výztuže podle materiálu

#### Skleněná vlákna

Skleněná vlákna sice nedosahují tak dobrých mechanických vlastností jako vlákna uhlíková, ale mají velice dobrou odolnost proti vlivům korozního prostředí. Této vlastnosti se využívá u kompozitů pro venkovní použití nebo například v leteckém průmyslu, kde se vrchní vrstva vyrábí pomocí kompozitu se skleněnými vlákny. Slouží jako ochranná vrstva pro spodní vrstvy, kde je využit kompozit s uhlíkovými vlákny. Navíc je jejich cena nižší než v případě uhlíkových vláken. [8]

Skleněná vlákna se vyrábí tažením z trysek. Výroba začíná ve sklářské peci, ve které se roztaví všechny složky požadovaného materiálu. Teplota v peci se pohybuje kolem  $1400^\circ\text{C}$ . Tavenina se poté až několik dní čirí. Až po tomto procesu se vede roztavený materiál kanálky do spřádacích trysek. Teplota taveniny při průchodu tryskami musí být taková, aby materiál ihned po opuštění trysky ztuhl. Vlákna mají po opuštění trysek průměr okolo 2 mm. Až následným navíjením se vlákna kalibrují na zvolený průměr. Tímto procesem se mohou natáhnout až na 40 000násobnou délku a navíjecí rychlost může dosáhnout až 180km/h. Následně se vlákna povrchově upravují, aby se ochránil jejich křehký povrch. [3]



V současné době se již používá široká škála vláken:

#### Alkalická vlákna (A-glass)

Tento materiál se již na vlákna používá jen ve výjimečných případech. Vlákna mají špatnou odolnost proti alkáliím. Z tohoto skla se v dnešní době spíše vyrábějí lahve a okenní tabule.

#### Elektrická vlákna (E-glass)

V současnosti nejčastěji používaná vlákna. Jejich využití se blíží 90% celkové produkce. Jejich největší zajímavostí a výhodou je to, že jsou průchodná pro radiové signály. Proto jsou často používány pro letecký a vojenský průmysl.

#### Chemická vlákna (c-glass)

Jak napovídá jejich název, jsou tato vlákna nejčastěji používána v chemickém průmyslu. Jejich největší výhodou je, že mají výbornou korozní odolnost.

#### Dielektrická vlákna (D-glass)

Tato skleněná vlákna byla vyvinuta speciálně pro využití v radiotechnice. Nejdůležitější vlastností těchto vláken je jejich nízká dielektrická konstanta.

#### Nízkoztrátová vlákna (L-glass)

Vlákna s označením L mají nízký disipační faktor, to znamená, že zajišťují dobrou výměnu energie. Navíc mají také nízkou dielektrickou konstantu. Díky těmto vlastnostem se využívají jako přenašeče signálu.

#### Odporová vlákna (R-glass)

R vlákna mají lepší mechanické vlastnosti než E vlákna a navíc mají větší odolnost proti vysokým teplotám. V amerických normách najdeme tato vlákna označovaná jako S-glass.

#### Zirkonová vlákna (Z-glass)

Zirkonová skla mají zvýšenou odolnost proti alkalickým látkám, proto se vlákna z těchto skel využívají do chemického průmyslu. [8]

Charakteristika	A -glass	C -glass	D -glass	E -glass	R -glass	S -glass
Youngův modul [GPa]	73,0	74,0	55,0	71,0	86,0	85,0
Mez pevnosti v tahu [GPa]	3,1	3,1	2,5	3,4	4,4	4,5
Hustota [g /cm <sup>3</sup> ]	2,5	2,5	2,2	2,5	2,5	2,5

Obr. 4. Vlastnosti skleněných vláken

### Přírodní vlákna

Přírodních vláken existuje mnoho různých druhů, ale pro vyztužování plastů jsou vhodná pouze vlákna rostlinná. Dobrých výsledků je tedy možno dosáhnout například pomocí vláken z konopí, lnu, sisalu, ramie a bavlny. Mezi velké výhody přírodních vláken patří nízká hustota (tedy i hmotnost) a malá abrazivita při mechanickém opracování. Dále je jejich výhodou snadná ekologická likvidace, dobrá dostupnost materiálů z přírody a i to, že nezpůsobují zdravotní problémy při vdechnutí vláken. Naopak mezi nevýhody patří velká citlivost na vlhkost. Přírodní vlákna do sebe vsakují okolní vlhkost, a tím se výrazně snižuje adheze mezi vláknem a matricí. Další nevýhodou jsou omezené možnosti zpracování, hlavní omezení je teplotní. Přírodní vlákna mají sice nízkou pořizovací cenu, ale předběžné úpravy pro vylepšení povrchu matrice (kvůli zlepšení adheze) je nákladné. [3,9]

### Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají extrémně velkou pevnost a tuhost. Bohužel neupravená vlákna dosahují velmi špatné adheze. Je tedy nutné vlákna povrchově upravovat. Povrchová úprava vláken nezajišťuje pouze lepší adhezi mezi matricí a pojivem, ale také je chrání před vnějšími vlivy (vlhnutí). Některé povrchové úpravy dokonce zabraňují shlukům při výrobě kompozitů, což je kladná vlastnost, protože shluky výztuže snižují kvalitu zejména u kompozitů, kde jsou použita krátká vlákna.

Použití uhlíkových vláken zasahuje především do tří odvětví. Nejvíce se vlákna používají pro průmyslovou výrobu (větrné elektrárny, tlakové nádoby, automobily, stavby v moři, lodě). Další uplatnění nacházejí v letectví a pro výrobu sportovních potřeb. [3,10]

## 2 Adheze v kompozitech

Adheze je jeden z nejdůležitějších pojmů u kompozitů. Jedná se o přilnavost mezi fázemi, tedy jaké je možné dosáhnout přilnavosti mezi matricí a výztuží. Kompozity dávají dohromady lepší vlastnosti dvou materiálů (fází), ale právě rozhraní mezi fázemi je nejslabším místem v kompozitních materiálech. Z toho vyplývá, že mechanické vlastnosti daného kompozitu budou především záviset na adhezi mezi danými fázemi.

Právě proto se klade u nově vznikajících kompozitů důraz především na dobrou vzájemnou adhezi materiálů. Popřípadě se vybírají metody, které adhezi zlepšují. Soudržnost výztuže a matrice v kompozitním materiálu je vždy závislá především na možnostech přenosu sil na jejich rozhraní. Tyto síly je možné rozdělit dle jejich zdroje na mechanické zaklínění, fyzikální působení či na chemické a fyzikálně chemické působení. [3]

Pro zlepšení adheze je tedy potřeba mechanicky nebo chemicky modifikovat alespoň jednu fázi kompozitu.

### 3 Rotační spékání

Rotační spékání(lisování), také známé jako rotomolding nebo rotocasting, je jednou z nejdůležitějších technologií pro zpracování polymerů pro výrobu dutých výrobků bez napětí. Jedná se tedy o beztlakovou technologii výroby plastových, nebo kompozitních součástí. Postup výroby je takový, že se do otevíratelné kovové formy nasype plastový prášek (nejčastěji PE, dále PP, PA, PCA, PVC,..), ta se zahřívá (až na 200-400°C) a pomalu otáčí vertikálně i horizontálně. Prášek se postupně nataví na horké stěny formy a vytvoří tak vnitřní otisk formy. Současné zahřívání a otáčení rozděljuje a taví plasty na vnitřních plochách formy. Výsledkem je výrobek, který je bezešvý a po celém svém obvodu má stejnou tloušťku stěny.

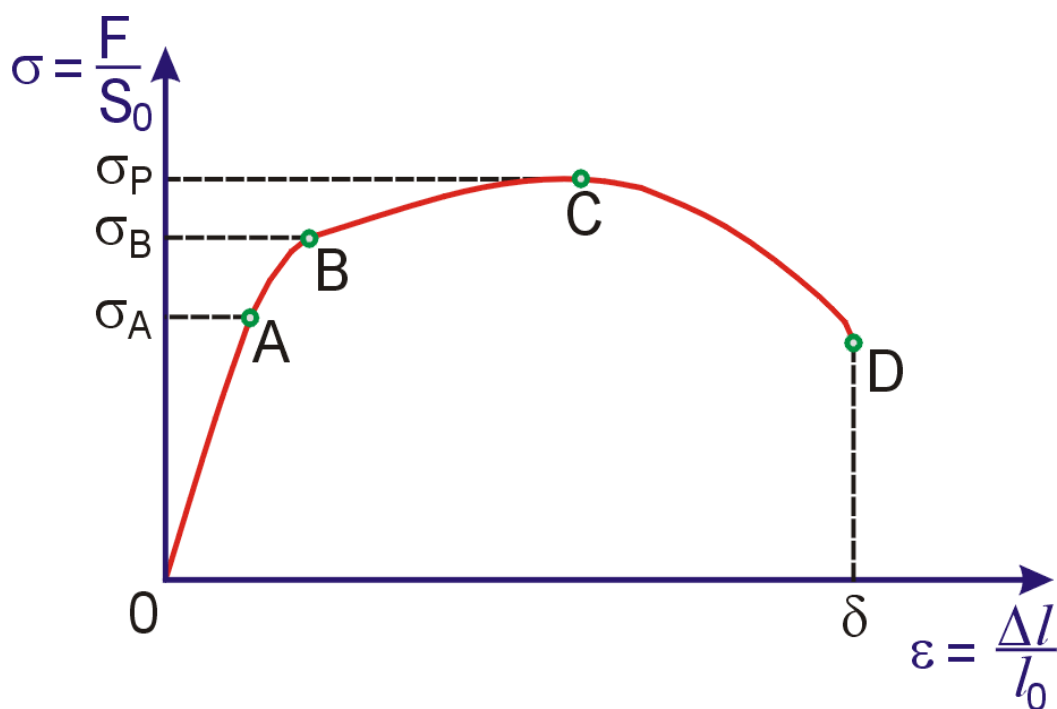
Po upečení se forma s výrobkem chladí proudem vzduchu (ev. i vodní mlhou nebo vodní sprchou), pak se forma otevře a hotový výrobek vyjme ven. Rotační lisování má čtyři základní kroky: nakládání, vytápění, chlazení a vykládání.

Proces je relativně pomalý, ale protože cena forem je výrazně nižší než např. u vstřikování, lze snadno vyrábět i malé série výrobků. Ideální aplikace pro rotační lisování jsou typicky složité duté formy vyráběné v relativně malých šaržích. Rotomolding je tedy ideálně vhodný pro výrobu dutých, složitých tvarů v širokém rozsahu velikostí od sluchadlových součástí až po průmyslové nádrže s kapacitou nad 75 metrů krychlových.

Tato metoda se dá využít pro téměř každý trh na světě, ale zatím není moc rozšířená. Rotační lisování je méně prozkoumaný proces pro termoplastické kompozity. Nabízí mnoho možností flexibility designu a škály produktů. Rotační lisování se hodí k dutým, složitým formám více než jakýkoli jiný proces. [11,12]

## 4 Zkouška tahem

Pomocí zkoušky tahem určujeme závislost tahového napětí na deformaci. Napětí se určuje pomocí poměru síly a plochy průřezu zkušební tělesa. Dalším výstupem je potom deformační poměr prodloužení zkušební tělesa. Poměr je dán rozměrem po zkoušce ku původní délce tělesa. Tahová zkouška je tzv. destruktivní zkouška, tedy zkušební vzorek je při testu zničen. Zkouška probíhá, dokud není těleso úplně přetrženo. Zkouška tahem se provádí na trhacím stroji. Stroj pracuje pomocí dvou nad sebou uložených sklíčidel, do kterých se upne zkušební těleso. Horní sklíčidlo je umístěné napevno a nehýbe se, zatímco dolní sklíčidlo se pohybuje zadanou rychlostí a roztahuje vzorek směrem dolů. Do počítače se zaznamenává aktuální síla. Pomocí dvou již výše zmíněných poměrů se vykresluje graf tahové křivky (viz. obr.15). [3,13]

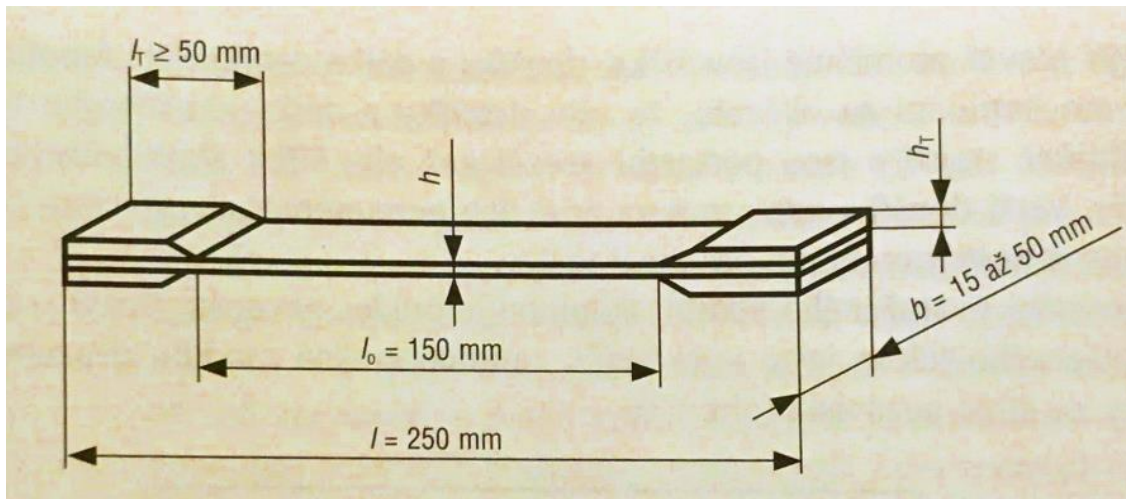


Obr. 5 Tahový diagram [14]

Z počátku je až do bodu A křivka lineární, to představuje stav, kdy je materiál ve svojí plastické části. Tedy kdybychom zkoušku přerušili v tomto bodě, materiál by se vrátil bez poškození do svého předchozího tvaru. Napětí v bodě A se označuje jako mez úměrnosti. Do dosažení napětí v bodu B se materiál stále chová elasticky a tedy po odstranění napětí se vrátí do své původní délky. Avšak mezi body A a B se již materiál chová nelineárně. Napětí v bodě B se označuje jako mez pružnosti (nebo mez elasticity).

Po překročení tohoto napětí se již materiál dostává ze svého plastického stavu a po odebrání zatížení (napětí) zůstane trvale deformován. [13]

Zkušební tvary pro kompozity jsou dány normami (např. ČSN EN ISO 527-1 až 5). Tyto normy zohledňují stavbu kompozitů a jejich zvolené fáze. Například u některých kompozitů se volí metoda se zesílením pro upnutí. Příklad zkušebního tělesa pro zkoušku v tahu jednosměrně, dle doporučení ČSN EN ISO 527, je vidět na obr. 6. [3]



Obr. 6. Příklad zkušebního tělesa

*Materiál zesílení má mít modul pružnosti přibližně rovný modulu zkušebního tělesa a zesílení má být na konci ve směru k měrné délce tělesa zkoseno, aby se snížil vliv koncentrace napětí. [3]*

## III Praktická část

### 5 Seznámení s problematikou

Praktická část této bakalářské práce se zabývá výrobou a následným zkoušením kompozitních vzorků. Zvolené materiály pro vznik kompozitu byly nakonfigurovány tak, aby se prozkoumala další část kompozitů, které mohou vzniknout beztlakovou metodou. V našem případě se jedná o rotomolding. V předchozích bakalářských, magisterských a diplomových pracech se zkoušely například kompozity s přírodními, nebo skleněnými vlákny. U skleněných vláken se jednalo ovšem s násobně menšími rozměry. Tato práce tedy z velké části vzniká hlavně kvůli porovnání dílčích výsledků. Po porovnání všech prací může ústav materiálového inženýrství zvolit nejvhodnější metodu pro budoucí pokračování výzkumu například pro 3D tisk kompozitů. Ovšem „otevřít“ se může i cesta do jiných průmyslových odvětví.

První skupina pěti vzorků je vyrobena z neupraveného polyethylenového prášku s přidáním 5% skleněných vláken. Polymer použitý pro tuto studii je lineární polyethylen s nízkou hustotou (LLDPE). PE prášek použitý v této studii byl Surpass RMS 244-U / UG (průměrný průměr částic 300  $\mu\text{m}$ ). Specifická hmotnost a teplota tání polymeru jsou 0,935 g  $\text{cm}^{-3}$ , 124 ° C.

Jako skleněná vlákna byly použity svazky skleněných vláken. Jedno vlákno má průměr 17micrometrů a délku 6milimetrů. Průměr svazku je mnohonásobně vyšší. Délka se nemění.

Druhá skupina pěti vzorků se skládala z plazmově upraveného polyethylenového prášku s příměsí 5% skleněných vláken. Plazmová úprava byla provedena v laboratorním zařízení LA 650, jako pracovní plyn byl použit vzduch, doba úpravy byla 9 minut. Pracovní tlak byl řízen automaticky pomocí připouštění vzduchu - tlak během modifikace byl 100 Pa. Skleněná vlákna byla použita pro oba druhy vzorků stejná.

## 6 Výroba vzorků

Výroba všech vzorků se lišila pouze tak, že u poloviny z nich byl použit nemodifikovaný polyethylen a u druhé poloviny polyethylen modifikovaný.

Všechny vzorky byly vytvářeny pomocí rotomoldingového stroje (obr. 7).



*Obr. 7 Rotomoldingový stroj*

Díky zkušenostem paní inženýrky Ghanem jsem věděl, že pro dosažení 4milimetrové tloušťky stěny je potřeba do formy o rozměrech 96x96x240 nasypat 240 gramů směsi jedné z našich dvou zvolených materiálů. Tedy pokud zvolený poměr byl 95% polyethylenu a 5% skleněných vláken, směs byla tvořena 228 gramy polyethylenu a 12 gramy svazků ze skleněných vláken. Forma použitá pro výrobu všech vzorků je vyfocena na obr. 8.

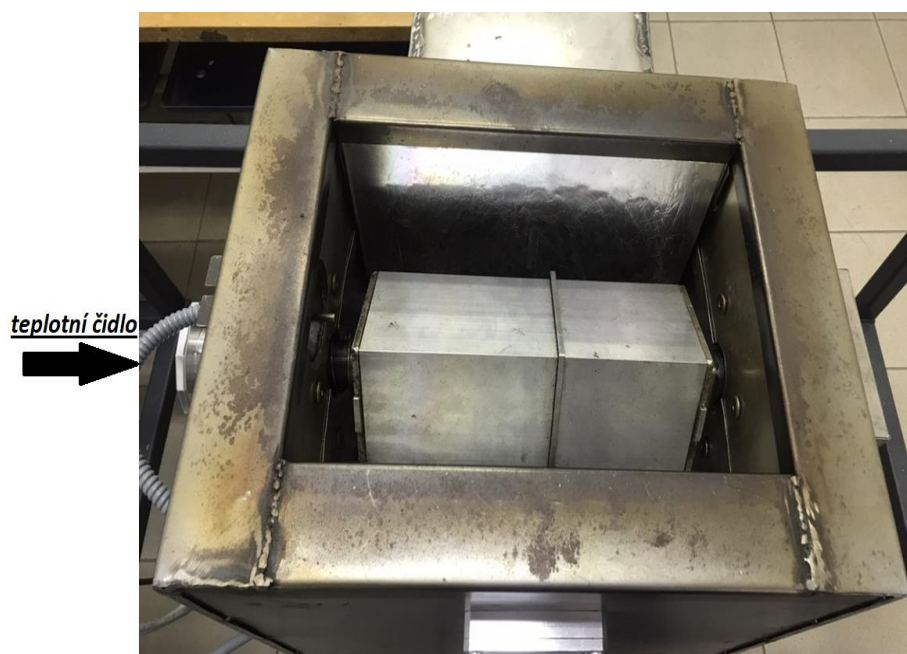




*Obr. 8 Použitá forma na vzorky*

Před vložením směsi do formy pro rotomolding (rotační spékání) je zapotřebí materiály řádně promíchat kvůli obavám z nedostatečného promíchání fází, pokud by míchání bylo závislé pouze na otáčení a naklápění formy v rotomoldingu. Jelikož laboratoř nedisponovala žádným mísícím přístrojem, tak jsem na smíchání dvou fází použil kuchyňský mixér. Pro dokonalé smíchání fází je zapotřebí minimálně pěti minut míchání.

Výsledná správně promíchaná směs se vloží do formy. Ta se uzavře víkem a dvěma pěry. Následně se uzavřená forma vloží do přístroje (rotomoldingu) (obr. 9). Poté se musí do formy umístit teplotní čidlo, podle kterého se po zapnutí řídí celý proces.



*Obr. 9 Forma umístěná do rotomoldingu*

Nastavení rotomoldingu jsem měl následující:

Zapnutí rotace formy při 100 stupních v peci (stroji).

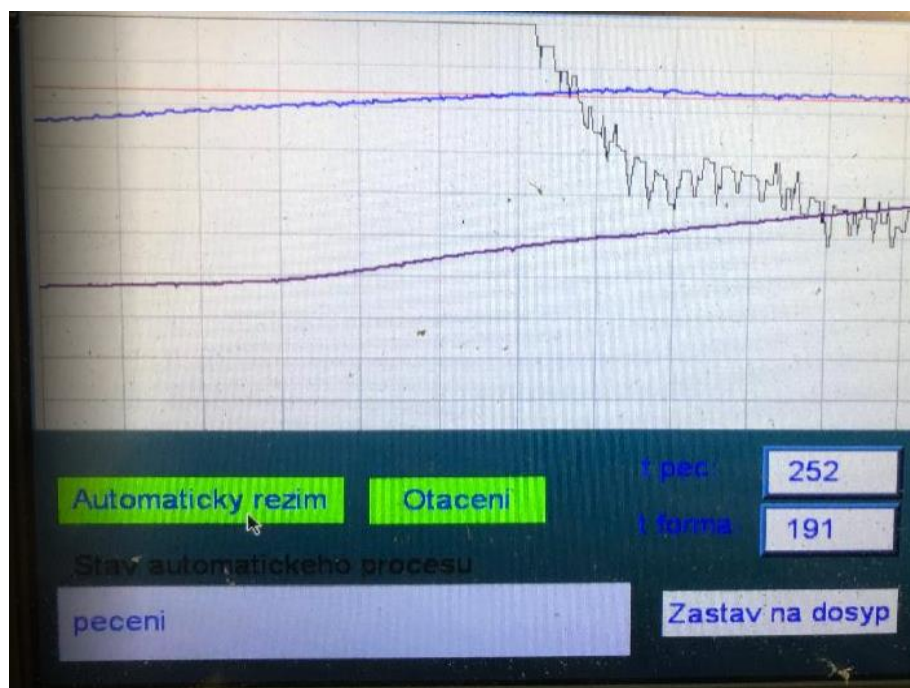
Zapnutí kývání stroje při 110 stupních v peci (stroji).

Konec ohřevu při 250 stupních ve formě.

Začátek chlazení při 250 stupních ve formě.

Konec chlazení, rotace i kývání při 100 stupních ve formě.

Důležité je v pravidelných intervalech sledovat graf na obrazovce rotomoldingu. (obr. 10) Na grafu je vyhodnocována teplota pece (modrá křivka), teplota formy (fialová křivka) a příkon stroje (černá křivka). Červená křivka ukazuje teplotu 250°C. Teplota formy i pece musí stoupat i klesat plynule (téměř lineárně), nesmí se na grafu tvořit skokové výchyly.



Obr. 10 Průběh ohřívání formy

Na obrázku je vidět, že obě teploty jsou bez skokových změn, tedy vzorek je správně vyroben. Skokové změny příkonu jsou dány reakcí na udržení teploty v peci ve správném rozmezí. Výroba jednoho vzorku trvá cca 90 minut. Záleží na předešlé teplotě pece.

Po vyndání formy a jejím vychlazení může být vzorek vyjmut. (viz. obr. 11)



*Obr. 11 Vzorek s nemodifikovanou maticí*

Pro porovnání a uvědomění si, jak je plynulý průběh teplot důležitý je přiloženy obr. 12. Při výrobě tohoto vzorku se zřejmě na sondu natavil materiál a v rotomoldingu začala prudce klesat a stoupat teplota.

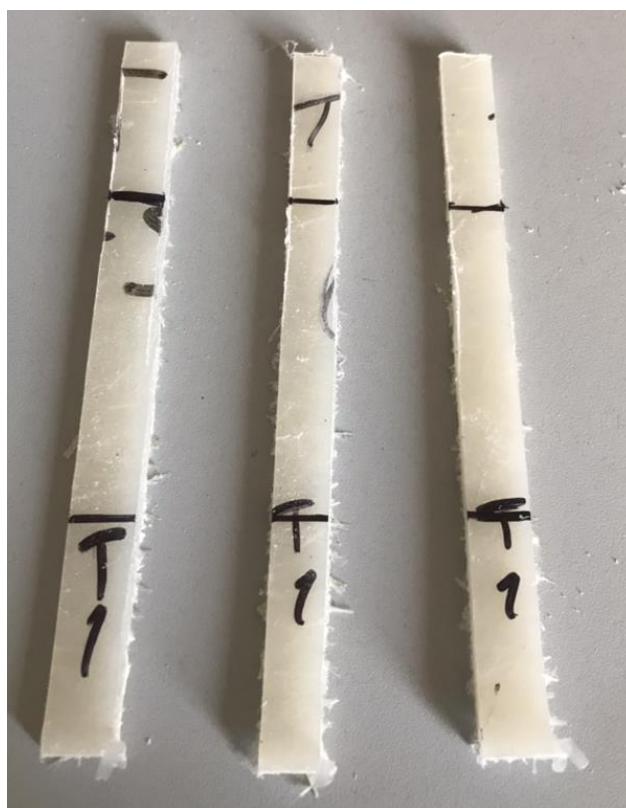


*Obr. 12 Poškozený vzorek*

## 7 Příprava vzorků

Kvádrový vzorek je potřeba nejdříve rozřezat na jednotlivé stěny. Z každé ze čtyř bočních stěn je potřeba vyrobít jeden vzoreček na „trhačku“ (zkouška tahem). Tedy ve výsledku bylo zhotoveno 40 vzorečků na zkoušku tahem. Polovina z nich s modifikovaným a druhá polovina s nemodifikovaným polyethylenem.

Vzorky byly vytvářeny řezáním na kotoučové pile. Snažil jsem se docílit rozměrů 10x4x celá délka stěny kvádrů, je totiž za potřebí, aby rozdíl mezi sklíčovými na trhacím stroji byl minimálně 6 centimetrů. Je tedy potřeba využít celé délky, aby zbyl dostatek místa na upnutí na obou stranách.



Obr. 13 Zkušební tělesa na zkoušku tahem



## 8 Zkouška tahem

Všech 40 vzorečků podstoupilo zkoušku tahem. Ta probíhala tak, že se vždy vzoreček upnul do sklíčidel tak, že střed délky vzorečku byl uprostřed mezi nimi. Celková vzdálenost mezi sklíčidly byla 6 cm. Na měřených šesti centimetrech se naměřil na čtyřech místech průřez daného vzorečku. A nejmenší z nich se poznamenal pro budoucí výpočty. Nejmenší průřez se používá z toho důvodu, že po celé délce vzorečku působí stejné napětí, tedy místo s nejmenším průřezem je nejvíce namáhané.

Pro moje měření byl použit trhací stroj viz obr. 14.



*Obr. 14 Trhací soustava*

## 8.1 Naměřené hodnoty

Tabulky s naměřenými hodnotami:

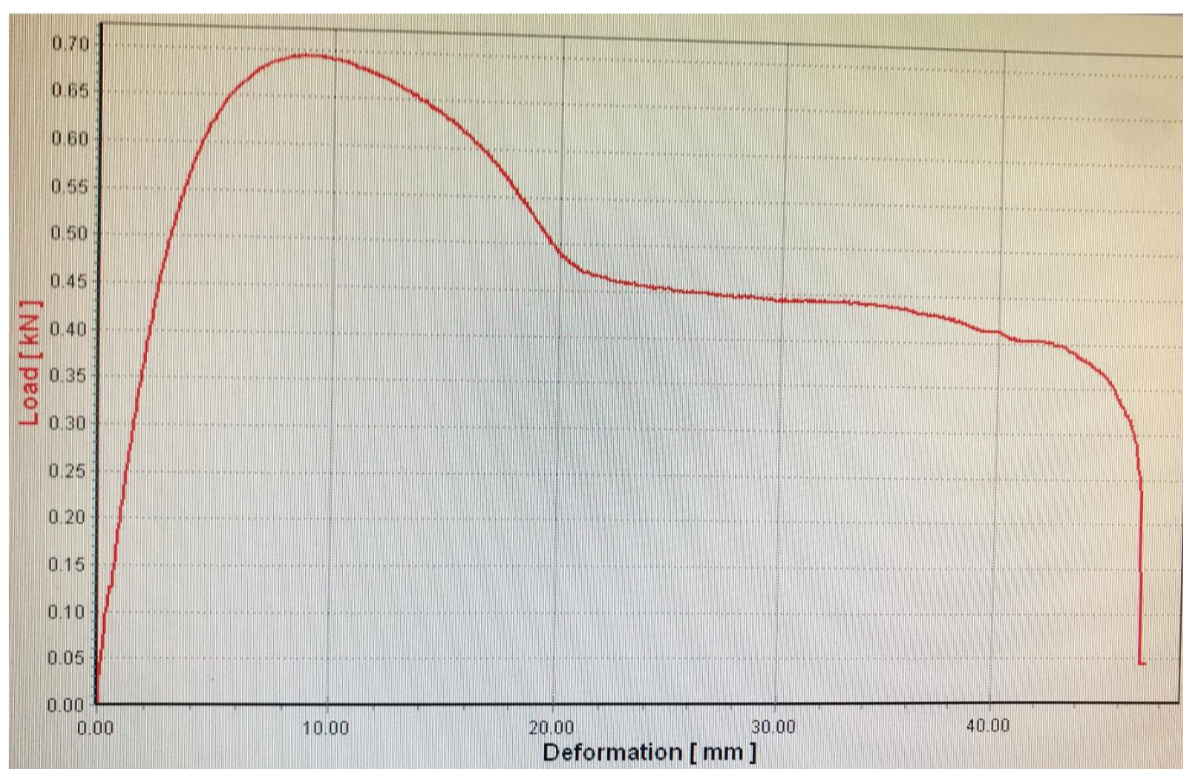
95% nemodifikovaného polyethylenu + 5% skleněných vláken			
Vzorek číslo 1	Min. průřez [mm <sup>2</sup> ]	Max. síla [N]	Zatížení [Pa]
1.1	40,3	740	18,36
1.2	40,59	740	18,23
1.3	40,85	720	17,62
1.4	44,67	820	18,35
Vzorek číslo 2			
2.1	40,28	770	19,11
2.2	35,34	750	21,22
2.3	44,4	870	19,59
2.4	41	850	20,73
Vzorek číslo 3			
3.1	43,05	790	18,35
3.2	42,84	850	19,84
3.3	39,59	720	18,19
3.4	36,27	680	18,75
Vzorek číslo 4			
4.1	47,08	840	17,84
4.2	37,83	750	19,83
4.3	36,4	690	18,96
4.4	35,6	670	18,82
Vzorek číslo 5			
5.1	42	800	19,05
5.2	39,48	750	19
5.3	36,8	690	18,75
5.4	39	790	20,26

Tabulka 1 Naměřené hodnoty vzorků s nemodifikovaným PE

95% modifikovaného polyethylenu + 5% skleněných vláken			
Vzorek číslo 6	Min. průřez [mm <sup>2</sup> ]	Max. síla [N]	Zatížení [Pa]
6.1	42,9	820	19,11
6.2	39	780	20
6.3	35,49	690	19,44
6.4	40,17	790	19,67
Vzorek číslo 7			
7.1	44,4	860	19,37
7.2	38,54	750	19,46
7.3	38,13	740	19,41
7.4	40,74	810	19,88
Vzorek číslo 8			
8.1	45,92	850	18,51
8.2	40,4	780	19,31
8.3	37,44	770	20,57
8.4	38	800	21,05
Vzorek číslo 9			
9.1	45,58	860	18,87
9.2	38,8	750	19,33
9.3	38,54	740	19,2
9.4	38,6	730	18,91
Vzorek číslo 10			
10.1	41,1	760	18,49
10.2	39	770	19,74
10.3	38,64	770	19,93
10.4	40	780	19,5

Tabulka 2 Naměřené hodnoty s modifikovaným polyethylenem

Na obrázku 15. je znázorněn typický průběh napětí z tahové zkoušky tohoto kompozitu. U většiny testovaných vzorků se projevila drobná mez kluzu, která je vidět i na tomto grafu. U materiálu z plastu je oproti kovovým materiálům, které po překročení maximálního zatížení zpravidla rychle praskají, delší časová prodleva, kdy už je materiál porušen (natažen), ale k úplnému prasknutí dochází až po větším natažení vzorku. Samozřejmě jde o stav, kdy už materiál ztratil veškeré své vlastnosti. Jde o plastický stav. U obou vzorků, modifikovaného i nemodifikovaného, byl průběh napětí srovnatelný. Tedy diagramy u všech 40 vzorků byly srovnatelné.



Obr. 15 Tahový diagram



## 8.2 Vyhodnocení výsledků ze zkoušky tahem

Průměrné hodnoty vzorků s nemodifikovaným polyethylenem:

Vzorek 1-1.3	18,14 MPa
Vzorek 2-2.3	20,163 Mpa
Vzorek 3-3.3	18,783 Mpa
Vzorek 4-4.3	18,863 Mpa
Vzorek 5-5.3	19,265 Mpa
Průměrná hodnota všech vzorků s nemodifikovaným polyethylenem	19,0425 Mpa

*Tabulka 3 Zprůměrované naměřené hodnoty s nemodifikovaným PE*

Průměrné hodnoty vzorků s modifikovaným polyethylenem:

Vzorek 6-6.3	19,555 MPa
Vzorek 7-7.3	19,53 MPa
Vzorek 8-8.3	19,86 MPa
Vzorek 9-9.3	19,078 MPa
Vzorek 10-10.3	19,415 MPa
Průměrná hodnota všech vzorků s modifikovaným polyethylenem	19,4875 MPa

*Tabulka 4 Zprůměrované naměřené hodnoty s modifikovaným PE*

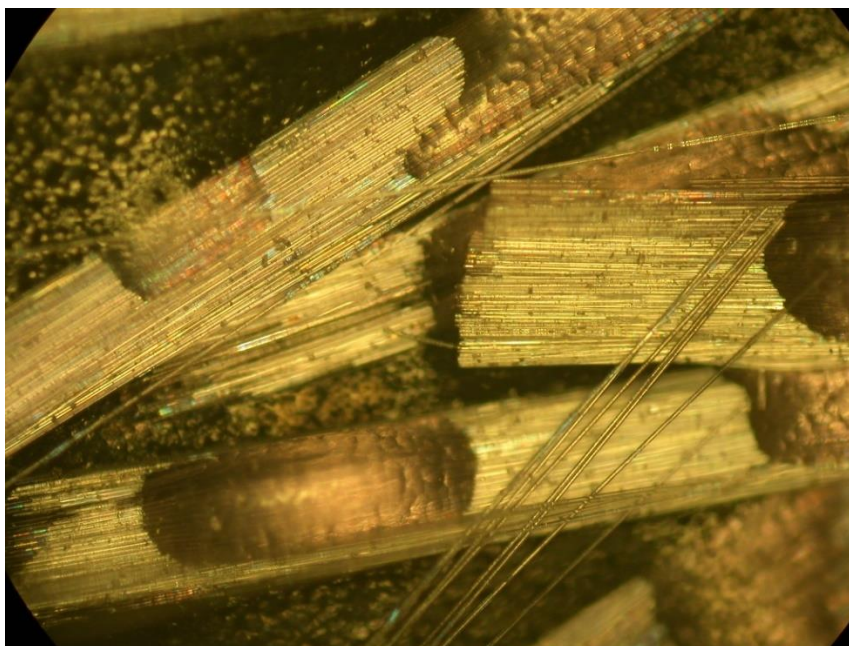
Jak je vidět v tabulkách 3 a 4, tak výsledný rozdíl u zprůměrovaných hodnot není příliš velký. Výsledná pevnost materiálů se liší o méně než půl megapascalu. I když na první pohled by se dalo říci, že plazmová úprava zvětšuje pevnost materiálu, na základě mých výsledků to nelze zcela potvrdit. Vzorečky na trhací zkoušku nebyly připraveny vyřezáním vodním paprskem, což zajišťuje rovný a kvalitní řez, ale byly vyřezány pomocí kotoučové pily. Pomocí pily se bohužel nedá docílit tak kvalitního řezu ani dokonalé přesnosti rozměru vzorku. Tyto dvě okolnosti mohly ovlivnit výsledky.

## 9 Optické hodnocení

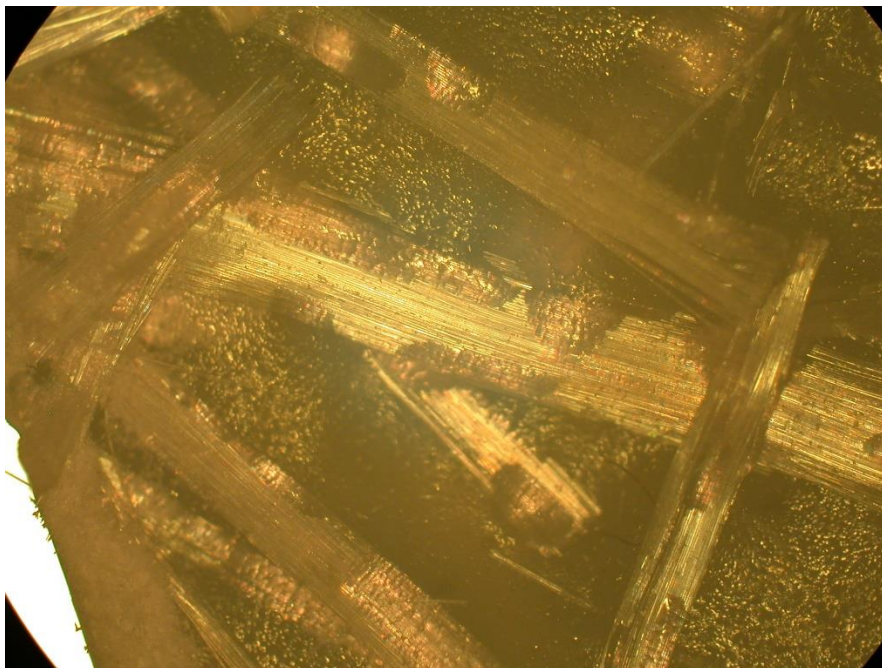
Poslední test se zabíral zkoumáním kompozitu v řezu pomocí mikroskopu. Zajímalo nás především to, jestli se v matrici nenachází bublinky a jak vypadá rozhraní mezi fázemi. Všechny zkoumané vzorky byly vytvářeny z neporušeného kompozitu. Tedy byl zkoumán nově zhotovený kompozit ne jeho části po trhací zkoušce.

Pod mikroskopem bylo zkoumáno několik vzorků s upraveným i neupraveným materiálem. Dobrý výsledek vykazovaly oba materiály při hledání bublinek ve výbrusech, protože se ve stěnách vzorku bublinky téměř nevyskytovaly. Jediná místa, kde se ve vzorcích tvořily bublinky, byly ostré hrany. To je ovšem známý fakt, že se při rotomoldingu nemají používat tvary s ostrými hranami.

Při pozorování povrchů jsem se zaměřil především na vnitřní povrch vzorku. Protože venkovní povrch (obr. 11), který se dotýkal formy, je hladký (spojitá matrice) a neobsahuje žádná vlákna. Kdežto vnitřní povrch formy je přesycen vlákny, která nejsou řádně spojena matricí (viz obr. 16 – mikroskopická fotka je pořízena s objektivem při 20násobném zvětšení, stejně jako obr. 17,18,19,20). Tímto problémem se již zabývají další studenti ve svých pracích. Zkoušejí přidání další vrstvy čisté matrice, nebo kompozitu s nižším obsahem vláken. Na obr. 16 je znázorněna stejně směřovaná strana jako na obr. 17, ale na této fotografii se jedná o kompozit s nemodifikovanou matricí. Na obr. 17 je polyethylen modifikován. Jak je vidět na snímcích, oba materiály se chovají velice podobně.

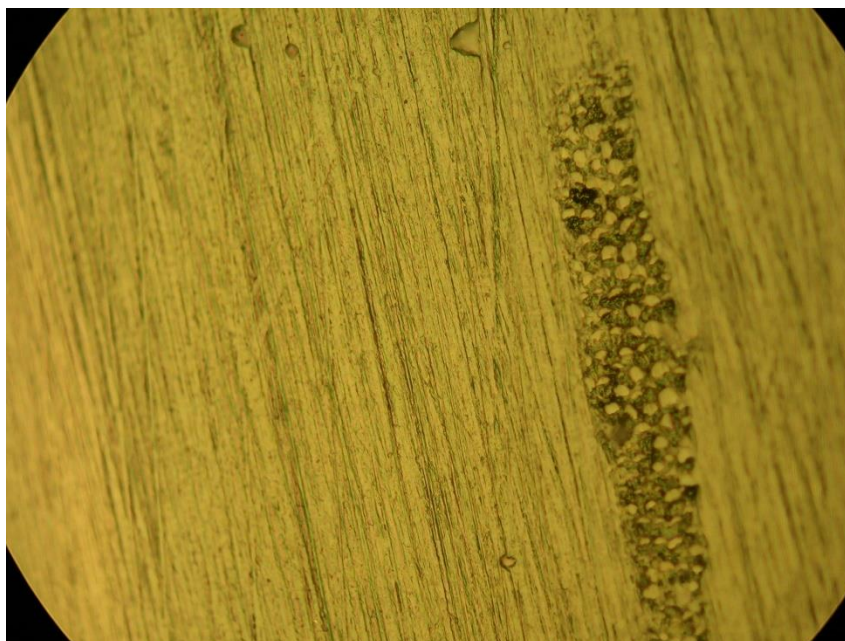


Obr. 16 Vnitřní strana vzorku s modifikovaným polyethylenem



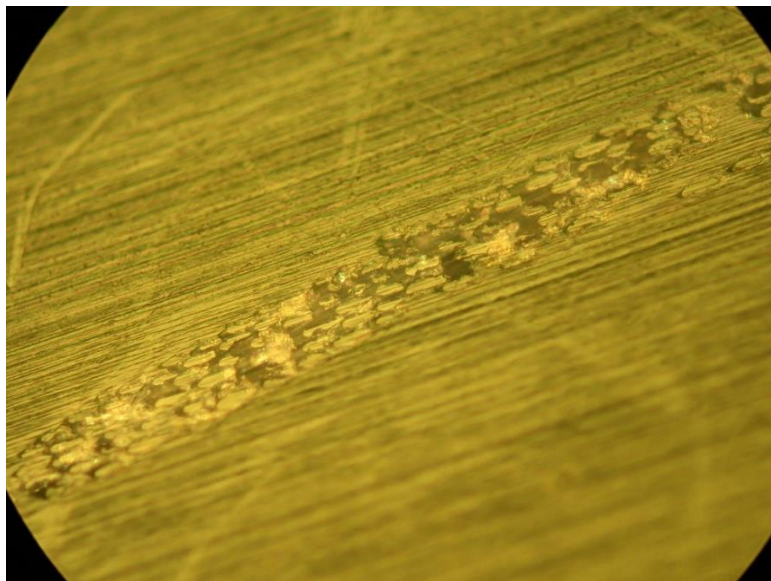
*Obr. 17 Vnitřní strana vzorku s nemodifikovaným polyethylenem*

Další problém tohoto výzkumu spočíval v tom, jak je již popsáno o kapitole výše, že vlákna byla spletena do svazků. Na obr. 18 a 19 je vidět řez plochami vzorků, kde je vyfocen svazek vláken. Uprostřed svazku je vidět, že matrice nevyplňuje prostory mezi vlákny. Obr.18 je pořízen ze vzorku s modifikovanou matricí a obr. 19 ze vzorku s nemodifikovanou matricí. Oba snímky jsou pořízeny s 20násobným zvětšením.



*Obr. 18 Řez svazku vláken v modifikované matrici*

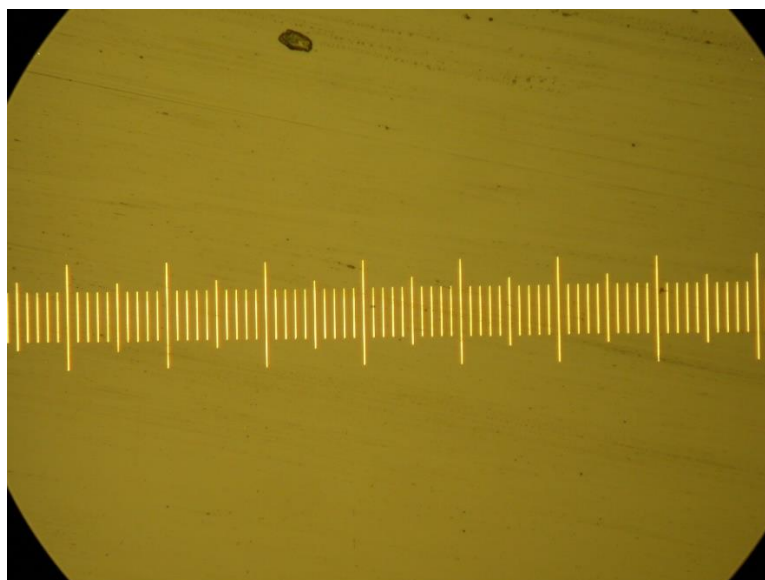




*Obr. 19 Řez svazku vláken v nemodifikované matrici*

Na obr. 18 a 19 je názorně vidět, kde byl zásadní problém této práce. Uprostřed svazku vláken jsou vidět tmavé části, tyto části jsou vzduchové kapsy. Je tedy zřejmé, že se matrice nedostala mezi jednotlivá vlákna a tím vznikají vzduchové bubliny, které naopak negativně ovlivňují výsledné vlastnosti materiálů.

Pro lepší představení velikosti zkoumaných vzorků je na obr. 20 zobrazen ve stejném zvětšení ethalon o rozměru 1mm. Mezi delšími čárkami na ethalonu je rozmezí 0,1 mm. Jelikož jsou všechny snímky pořízeny při stejném zvětšení, lze si pomocí tohoto obrázku představit jednotlivé velikosti daných tvarů a objektů na ostatních snímcích z mikroskopu.



*Obr. 20 Měřicí ethalon*

## 10 Shrnutí práce

Tato práce se zabývala možným rozdílem mezi výslednými vlastnostmi obyčejného a plazmou upraveného polyethylenu v kompozitu se skleněnými vlákny. Cílem práce bylo porovnat výsledné hodnoty z trhací zkoušky a obrázky z řezu pořízené mikroskopem. Ze snímků z mikroskopu se hodnotilo převážně pozorování rozložení vláken. Nakonec se ukázalo že většina vlastností, které nás zajímaly, byly patrné už pouhým pohledem oka. Hlavní námi pozorovaný stav byl rozložení vláken v matrici. Vlákna nebyla, jak se dalo očekávat při tvorbě vzorku rotomoldingem, uspořádána žádným směrem, ale hlavně se shlukovala především na vnitřní stěně vzorku. Při bližším pozorování mikroskopem se odhalil důvod malého nárustu pevnosti. Bylo to způsobeno tím, že vlákna byla svázána do svazků a nebyla jednotlivě oddělena.

Z výsledků tahové zkoušky vyplynulo, že plazmové modifikace matrice vedly ke zlepšení mechanických vlastností vyrobených vzorků. Zlepšení z hlediska pevnosti nebylo výrazné. Navazující práce by se měla zabírat stejnou problematikou, ale při použití jednotlivě oddělených vláken. Zde by se dal očekávat výraznější rozdíl a posun k lepším hodnotám pevnosti takto složeného kompozitu.

V oblasti dané problematiky v odvětví 3D tisku je tato práce je zatím pouze malý základem pro pozdější výzkumy kompozitů pro toto odvětví. Proto se z ní nedají v této fázi vyvodit žádné kvalitně odůvodnitelné a podložené závěry.

## Použitá literatura

- [1] MACHÁŇ, L. (2015). Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou maticí. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=111135](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111135)
- [2] HÁJEK, T. (2016). Problematika adheze u kompozitů s polymerní maticí. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66266/F2-DP-2016-Hajek-Tomas-DP%20Hajek.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR1wBgesSHZgF3OFUwRmuSBWfCW5gM70DUBOZu54Mo-I0QE-fQtFNsxnn6M>
- [3] EHRENSTEIN, G. W. (2006). *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6
- [4] BĚHÁLEK, L. (2016). *Polymery*. Code Creator, s.r.o. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [5] JANOVEC, J., CEJP, J. a STEIDL, J., *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3
- [6] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity: Matrice*. In: *Kompozity* [online]. [cit. 2015-08-20]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/matrice.pdf>
- [7] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály -druhy a jejich užití*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 80-737-2279-8.
- [8] HULL, D., CLYNE, T. W. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, Cambridge 1996, xvi, 326p. ISBN 0-521-38855-4
- [9] THOMAS, S., JOSEPH, K., MALHOTRA, S. K., GODA, K., a SREEKALA, M.S. (2012). *Polymer composites*. Vol. 1. ISBN 978-3-527-32624-2
- [10] XIE, Y., HILL, C. A. S., XIAO, Z., MILITZ, H. a MAI, C. (2010). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*: Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Science Direct*. Vol. 41., Iss. 7, str. 806-819. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>
- [11] *JEC Composites Magazine*. (Září 2009). Carbon fiber: Investing cautiously. Iss. 51, str. 18-19.
- [12] EBNEAJJAD, S. (2015). *Fluoroplastics: Rotational Molding and Linings*. *Science Direct*. Vol. 2, str. 348-369. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3197-8.00012-2>
- [13] NUGENT, P. (2017). *Applied Plastics Engineering Handbook: 15 - Rotational Molding*. *Science Direct*. str. 321-343. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00015-8>
- [14] *Pevnost a lom látek*. (n.d.). Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK. Dostupné z: [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/2\\_6](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6)