

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní technologie  
Studijní specializace: Bez specializace

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Testování polymerních sít'ovin používaných v zemědělství**

Autor: Bc. Ondřej Vach  
Vedoucí práce: Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej VACH**  
Osobní číslo: **S19N0078K**  
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Téma práce: **Testování polymerních síťovin používaných v zemědělství**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Polymerní materiály a jejich výroba, zvláště PO, konkrétně PE HD
2. Materiálové charakteristiky (krátkodobé, dlouhodobé)
3. Způsob výroby síťovin
4. Mezní stavy testovaných materiálů
5. Metody testování polymerních materiálů
6. Návrh vhodného testu (v korelaci na reálné podmínky)
7. Příprava vzorků a přípravků
8. Experiment
9. Vyhodnocení
10. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK, *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd.*, Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.

*Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití [online]. Vyd. 2.*, Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006., Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-617-6/pagesimg/069.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pagesimg/069.html) ISBN 80-7080-617-6.

HORROCKS, A.R. a S.C. ANAND., *Handbook of Technical Textiles [online]. 2000.*, Woodhead Publishing, 2000 , 2000 Dostupné z: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTT00001/viewerType:toc//root\\_slug:handbook-technicaltextiles/url\\_slug:textiles-in-civil-engineering?b-q=geomembranes%20%20%20%22geosynthetics%22&btaxonomy=13@@@geosynthetics@@@48&b-subscription=true&b-off-set=10&b-rows=10&b-](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTT00001/viewerType:toc//root_slug:handbook-technicaltextiles/url_slug:textiles-in-civil-engineering?b-q=geomembranes%20%20%20%22geosynthetics%22&btaxonomy=13@@@geosynthetics@@@48&b-subscription=true&b-off-set=10&b-rows=10&b-)

BROŽEK, J., *Fyzikální chemie polymerů. 1.st.*, Praha: VŠCHT Praha, 2019.

JANČÁŘ, J., NEZBEDOVÁ, E., *E. Zkoušení plastů. 1.st ed.* , Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2007. ISBN 978-80-214-3452-3. Praha: VŠCHT Praha, 2019.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Eva Nezbedová, CSc.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**



**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2020

# PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Bc. Vach	Jméno Ondřej		
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	<b>N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní technologie</b>			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Chochoolatý, Ph.D.	Jméno Ondřej		
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - MIVTK			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Testování polymerních síťovin používaných v zemědělství			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	MIVTK	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-------	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	83	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	81	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Předmětem diplomové práce bylo zkoumání PE-HD sítí a jejich chování při zvýšených teplotách a vlhkosti společně s konstantním zatížením. Tedy přesně takovým podmínkám jako se sítě na baleném senu obvykle nacházejí. Cílem bylo získat metodiku, kterou by bylo možno rychle ověřovat případné změny ve výrobě PE-HD síťovin. Pro ověření bylo využito porovnání sítí dvou nejznámějších výrobců na světě. Práci byla ověřena funkčnost nové metodiky. Byly získány reálné podklady pro data, podle kterých by se mohla výroba nových produktů a jejich kvalita rychleji a přesněji ověřovat.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	<p>Polymery, polyolefiny, polyethylen, PE-HD, tečení, stárnutí polymerů zemědělské síťoviny</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Vach	Name Ondřej		
<b>STUDY PROGRAMME</b>	<b>N0715A270014 – Materials science and manufacturing technology</b>			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Chocholatý, Ph.D.	Name Ondřej		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - MIVTK			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Testing of polymer nets used in agriculture			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	83	<b>TEXT PART</b>	81	<b>GRAPHICAL PART</b>	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The subject of the diploma thesis was the investigation of PE-HD nets and their behavior at elevated temperatures and humidity together with a constant load. So exactly the same conditions as nets on baled hay are usually found. The aim was to obtain a methodology that could quickly verify changes in the production of PE-HD nets. A comparison of the networks of the two most famous manufacturers in the world was used for verification. The work verified the functionality of the new methodology. Real data were obtained for data according to which the production of new products and their quality could be verified faster and more accurately.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Polymers, polyolefins, polyethylene HD, creep, polymer degradation, agricultural nets</p>

## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřeji Chocholatému za jeho odborné vedení a cenné rady při řešení problémů, dále paní doc. Evě Nezbedové za pomoc při zpracování teoretické části a za poskytnutí předběžných výpočtů napětí.

Nesmím zapomenout poděkovat také panu Ing. Petru Benešovi, Ph.D. a panu Ing. Davidu Bricínovi za pomoc při praktických měřeních.

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS-2021-030 “Vývoj nových materiálů, aplikace moderních metod jejich zpracování, ekologické výroby, svařování a testování“.

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>- 10 -</b>
<b>2</b>	<b>POLYMERNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>- 11 -</b>
2.1	HISTORIE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ .....	- 11 -
2.2	STRUKTURA A VLASTNOSTI POLYMERŮ .....	- 12 -
2.2.1	<i>Propustnost světla</i> .....	- 13 -
2.2.2	<i>Makromolekuly polymerů</i> .....	- 13 -
2.3	SYNTÉZY POLYMERŮ .....	- 15 -
2.4	DĚLENÍ POLYMERŮ .....	- 16 -
2.4.1	<i>Plasty</i> .....	- 16 -
2.4.2	<i>Elastomery</i> .....	- 17 -
2.4.3	<i>Dělení polymerů podle složení</i> .....	- 17 -
2.4.4	<i>Dělení polymerů podle nadmolekulární struktury</i> .....	- 17 -
2.4.5	<i>Dělení podle druhu přísad</i> .....	- 19 -
2.5	VYUŽITÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ .....	- 20 -
<b>3</b>	<b>POLYOLEFINY</b> .....	<b>- 21 -</b>
3.1	POLYPROPYLEN (PP) .....	- 21 -
3.2	POLYETHYLEN (PE) .....	- 21 -
3.2.1	<i>Výroba polyethylenu</i> .....	- 23 -
<b>4</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ POLYETHYLENU</b> .....	<b>- 30 -</b>
4.1	VYTlačOVÁNÍ .....	- 30 -
4.1.1	<i>Princip a popis vytlačování</i> .....	- 31 -
4.2	VSTŘIKOVÁNÍ .....	- 32 -
4.2.1	<i>Princip a popis vstřikování</i> .....	- 32 -
4.2.2	<i>Rozdíl vstřikování PE-HD a PE-LD</i> .....	- 33 -
4.3	VYFUKOVÁNÍ .....	- 33 -
4.3.1	<i>Princip a popis vyfukování</i> .....	- 33 -
4.4	VÁLCOVÁNÍ .....	- 34 -
4.4.1	<i>Princip technologie</i> .....	- 34 -
4.5	NANÁŠENÍ .....	- 34 -
4.5.1	<i>Princip</i> .....	- 34 -
	VÝROBA PÁSKŮ A VLÁKEN .....	- 35 -
4.5.2	<i>Výroba folií</i> .....	- 35 -
4.6	VÝROBA SÍŤOVIN .....	- 36 -
<b>5</b>	<b>MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ</b> .....	<b>- 38 -</b>
5.1	VYSOKO-ELASTICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ .....	- 39 -
5.2	ZKOUŠKY KRÁTKODOBÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ .....	- 39 -
5.2.1	<i>Tahová zkouška</i> .....	- 40 -
5.2.2	<i>Tlaková zkouška</i> .....	- 42 -
5.2.3	<i>Ohybová zkouška</i> .....	- 43 -
5.2.4	<i>Zkouška rázová</i> .....	- 43 -
5.2.5	<i>Smyková zkouška</i> .....	- 44 -
5.2.6	<i>Další metody krátkodobých testů polymerů</i> .....	- 44 -
5.3	ZKOUŠKY DLOUHODOBÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ .....	- 45 -
5.3.1	<i>Tečení</i> .....	- 45 -
5.3.2	<i>Relaxace</i> .....	- 47 -
5.3.3	<i>Zkoušky únavy</i> .....	- 47 -
5.3.4	<i>Zkoušky stárnutí</i> .....	- 48 -



<b>6</b>	<b>MEZNÍ STAVY</b>	<b>- 49 -</b>
6.1	TRVALÁ DEFORMACE	- 49 -
6.1.1	<i>Mez kluzu</i>	- 50 -
6.1.2	<i>Lomy</i>	- 51 -
6.2	ÚNAVA	- 51 -
6.3	STÁRNUTÍ POLYMERŮ	- 52 -
6.3.1	<i>Biologická koroze</i>	- 52 -
6.3.2	<i>Koroze v kapalinách</i>	- 52 -
6.3.3	<i>Vliv ozonu</i>	- 53 -
6.3.4	<i>Vliv nečistot v atmosféře</i>	- 53 -
6.3.5	<i>Fotooxidace</i>	- 53 -
6.3.6	<i>Termooxidace</i>	- 54 -
6.4	SYNERGICKÝ EFEKT	- 54 -
<b>7</b>	<b>METODY TESTOVÁNÍ PE-HD SÍŤOVIN DNES</b>	<b>- 55 -</b>
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>- 56 -</b>
8.1	SPOLEČNOST JUTA A.S.	- 56 -
8.2	EXPERIMENT	- 56 -
8.3	ZVOLENÝ ZPŮSOB TESTOVÁNÍ	- 57 -
8.3.1	<i>Stroje využitě ke zkoušení</i>	- 57 -
8.3.2	<i>Výroba přípravku</i>	- 60 -
8.4	ZVOLENÝ TYP ZÁVAŽÍ	- 62 -
8.5	PŘÍPRAVA VZORKŮ	- 63 -
8.6	ZKOUŠENÍ	- 63 -
8.6.1	<i>Tahové zkoušky</i>	- 63 -
8.6.2	<i>Zkoušky tečení</i>	- 65 -
8.6.3	<i>Pozorování na světelném mikroskopu</i>	- 69 -
8.6.4	<i>Pozorování na konfokálním mikroskopu</i>	- 70 -
8.6.5	<i>Tahové zkoušky po tečení</i>	- 72 -
<b>9</b>	<b>VYHODNOCENÍ</b>	<b>- 73 -</b>
9.1	VYHODNOCENÍ ZKOUMANÝCH VZORKŮ	- 73 -
9.2	VYHODNOCENÍ ZKOUMANÝCH METOD TESTOVÁNÍ	- 74 -
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>- 75 -</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM ZDROJŮ</b>	<b>- 76 -</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>- 79 -</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>- 80 -</b>
<b>14</b>	<b>PŘÍLOHY</b>	<b>- 81 -</b>

## Přehled použitých zkratk, názvů a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FST	Fakulta strojní
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
PE	Polyethylen
PA	Polyamid
PET	Polyethylentereftalát
PP	Polypropylen
PC	Polykarbonát
PSU	Polysulfon
PF	Fenolmaldehydová pryskyřice
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kyselina sírová
HCL	Kyselina chlorovodíková
HF	Kyselina fluorovodíková
HNO <sub>3</sub>	Kyselina dusičná
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen
PE-LD	Nízkohustotní polyethylen
PE-LLD	Lineární nízkohustotní polyethylen
PE-UHMW	Ultravysokomolekulární polyethylen
MoO <sub>3</sub>	Oxid molybdenový
CrO <sub>3</sub>	Oxid chromový
SiO <sub>2</sub>	Oxid křemičitý
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
LiAlH <sub>4</sub>	Tetrahydridohlinitan lithný
TiCl <sub>4</sub>	Chlorid titaničitý

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problémem rozdílného chování síťovin využívaných v zemědělství za zvýšených teplot. Teoretická část práce je zaměřena na rozbor polymerů, jejich základních vlastností. Dále se soustředí na rozbor polyolefinů, především PE-HD. Zkoumá strukturu, vlastnosti, mezní stavy, a degradaci polymerních materiálů.

Teoretická část dále popisuje specifické mechanické vlastnosti a chování polymerů. Poté zpracovává typy krátkodobých a dlouhodobých zkoušek s jejich provedením. Jsou zmíněny především ty zkoušky, které se v praxi a část v naší praktické části využívají.

Důležitou součástí teoretické části je samotná výroba PE-HD sítí. Přes základní principy výroby polymerních materiálů až k samotné výrobě polotovarů určených k výrobě síťovin. Kapitola je následně zakončena nastíněním procesu výroby z polotovarů do formy sítí.

Praktická část práce se věnuje ověření možného návrhu metodiky zrychlení testování síťovin z PE-HD v praxi. V této části jsou zmíněny typy, provedení zkoušek, provedení výpočtů a průběh výroby nutných přípravků k jejímu provedení. Dále jsou uvedena zařízení nutná k provedení pokusů a zařízení použita k vyhodnocení vzorků.

Testování standardním způsobem probíhá od 3 do 6 měsíců. Praktická část a výsledky z ní dávají dobré předpoklady ke snížení nutného časového rozpočtu zkoušek o více než 75 %.

## 2 Polymerní materiály

Polymer je molekula sestávající se z částí, monomerů, které se neustále opakují, to nám umožňuje o polymerech tvrdit, že jsou to makromolekuly. Přičemž monomer má za vhodných podmínek vždy snahu spojovat se v makromolekuly tvořící polymery. [1,2]

### 2.1 Historie polymerních materiálů

Polymery byly jedním z nejrychleji rostoucích materiálů se týče použití od jejich objevení. Bylo to dáno hlavně faktem, že byly schopny levně zastoupit původní materiály s dobrou reprodukovatelností.

Slovo polymer zavedl švédský chemik JJ Berzelius. Věda o polymerech je poměrně novou disciplínou a koncept polymerů je velkou myšlenkou především 20. století. A to i přes to že první polymer na bázi nitrocelulózy vznikl už v letech 1862. Vývoj pokračoval a rozmach připisujeme hlavně 20. letům 20. století a poté samozřejmě rozmachu materiálů během 2. světové války a raketově po válce až do dnešní doby.

Z hlediska historie existuje několik zásadních milníků ve vzniku polymerů, které ovlivnily celý svět. Asi jedním z největších byl objev bakelitu, což byl první syntetický termosetický polymer, který v roce 1907 dokázal vytvořit vědec Baekeland polykondenzací fenolu s formaldehydem. Toto datum můžeme brát jako pomyslný zlom, po kterém se i všeobecná veřejnost začala o tento typ materiálů zajímat.

Co se týče české stopy ve vývoji polymerů, tak by bylo vhodné zmínit jméno českého vynálezce a chemika Ottu Wichterleho, který je považován za zakladatele makromolekulární chemie. Vděčíme mu za vynález měkkých kontaktních čoček nebo polyamidového vlákna s obchodním názvem silon. Snad každý dnes zná silonky nebo punčochy ze silonu.

Vývoj polymerů rozdělujeme tedy na několik etap, na již popsané začátky experimentování koncem 19. století. Poté první etapa začínající stoletím 20. Jako zástupce této etapy již zmíněný bakelit, dále PVC, PS, PE, PA, PET, PP, PC a mnoho dalších. Dále období pokračuje etapou zatím neukončenou, která zahrnuje 60. a 70. léta, kde nalezneme například materiál Kevlar nebo PSU.

Dnešní svět si bez polymerů nedokážeme představit. Téměř jakýkoliv předmět denní potřeby je vyroben z plastu. Z hlediska udržitelnosti jsou polymery velice diskutované téma. Po celém světě se v určité míře zakazuje jejich využití pro jednorázové účely. A nejde jen o případný budoucí nedostatek, ale ekologické znečišťování přírody nebo postupný rozklad látek z polymerů do našeho vodstva. V použití polymerů můžeme do budoucna čekat ještě veliké změny. [16, 2]

## 2.2 Struktura a vlastnosti polymerů

Na užitných vlastnostech polymerů má velký význam především vzájemné uspořádání makromolekul. Tavenina polymerů je amorfní, to znamená, že makromolekuly jsou neuspořádané. Poklesem teploty taveniny a procesem tuhnutí se makromolekuly buď uspořádávají, tyto polymery nazýváme jako částečně krystalické nebo se makromolekuly neuspořádají a takto neuspořádané makromolekuly poté tvoří amorfní polymery.

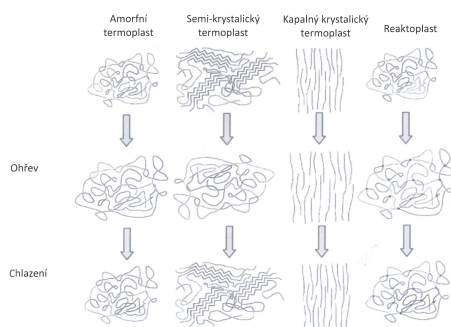
U amorfních polymerů nejsou molekuly lineární, molekuly nekystalizují, většinou jsou průhledné. Termoplasty (PVC, PC, PS)

U částečně krystalických jsou makromolekuly částečně lineární, částečně zkrystalizované a většina koncových výrobků je neprůhledných.

Z termoplastů například (PE, PP nebo PA)

U reaktoplastů jsou makromolekuly již kompletně zesíťované, což znemožňuje jejich pohyb, a proto se zvýšením teploty netaví.

Všeobecně je o výrobcích z polymerů známo několik základních fyzikálních vlastností. Těmi jsou nízká tvrdost, tuhost, hustota, vodivost nebo kapacita a na druhou stranu vysoká tepelná roztažnost nebo opotřebení. Avšak na téměř každou vlastnost se dá využít příklad polymeru, který bude mít právě vlastnost opačnou. Je tedy patrné že rozmanitost těchto materiálů je obrovská. [4, 13]

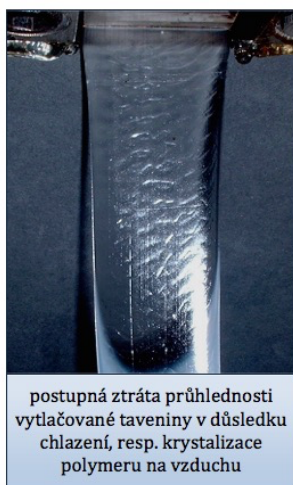


Obr. 1 Nadmolekulární soustavy dle typu polymeru [2]

### 2.2.1 Propustnost světla

U semikrystalických termoplastů se nejčastěji setkáváme s mléčným zákalem, přičemž jeho působnost se s tloušťkou materiálu zvyšuje. Ale není tomu tak úplně vždy, speciálními přísadami jsme schopni polymer zprůhlednit. Docílíme tak tím, že přísady vytvoří velmi malé krystalické oblasti, a tak nedochází k rozptylu světla a materiál se zdá být průhledný.

Zajímavostí jsou amorfní polymery, které jsou bezbarvé a čiré vždy, nedochází zde totiž ke krystalizaci. Dobře je to patrné na obr. č. 2. Materiál je zde vytlačován z extruderu v amorfní čiré podobě. Postupně dochází ke krystalizaci a ztrátě průhlednosti. [4, 13]



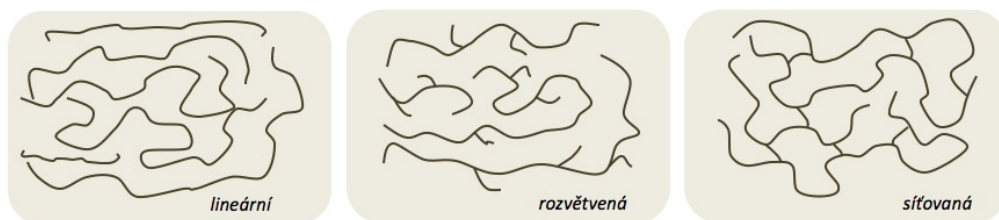
Obr. 2 Porovnání propustnosti světla amorfní vs krystalický stav [13]

### 2.2.2 Makromolekuly polymerů

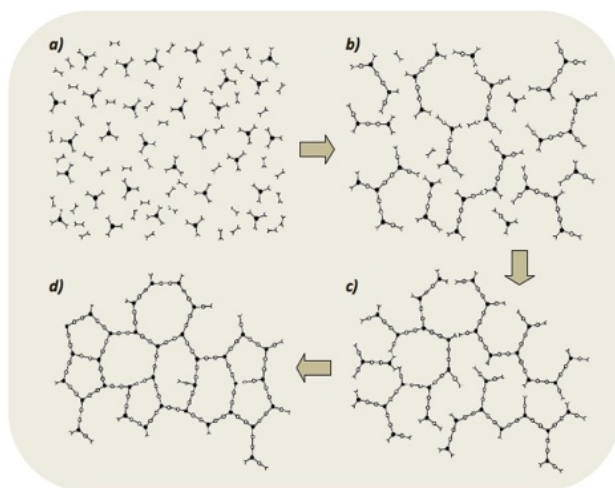
Na zmíněných obecných vlastnostech polymerů velmi záleží. Jsou odrazem jejich molekulové, nadmolekulární a chemické struktury. Makromolekuly tvoří velké množství malých jednoduchých monomerních jednotek. Zásadní pro tvorbu makromolekuly jsou atomy uhlíku, na ty se váží další atomy například kyslíku, dusíku, vodíku, chloru nebo fluoru.

Makromolekuly rozlišujeme podle tvaru, a to na lineární, rozvětvené a síťované. Lineární a rozvětvené tvary nalezneme u termoplastů, síťované u reaktoplastů. Lineární tvar vznikne spojením monomerů se dvěma funkčními skupinami. Tvar rozvětvený má na základní řetězce navázané ještě krátké řetězce boční, tzv. substituenty. To sice zhoršuje jejich pohyblivost, ale také způsobuje vzájemné oddálení makromolekul a díky tomu zde dochází k poklesu mechanických vlastností.

Síťovaný tvar vzniká z tvaru lineárního přidáním chemických vazeb. Tím se omezí možnost pohybu makromolekul, a to i za zvýšených teplot. Zároveň se tím zvýší materiálová tvrdost, pevnost, pružnost, a to vše na úkor snížené tažnosti.



Obr. 3 Tvary makromolekul [13]



Obr. 4 Schéma vzniku reaktoplastu (síťovaný typ) [13]

Velikost molekul označovaná v chemii jako molární hmotnost je dalším velmi důležitým parametrem, který u polymerů sledujeme. Molární hmotnost nám určujeme další fyzikálně mechanické vlastnosti vzniklého polymeru. Čím bude molární hmotnost vyšší, tím lepší bude mít materiál mechanické vlastnosti, tepelnou odolnost nebo zvýšený modul pružnosti. Naopak tažnost a tím pádem zpracovatelnost bude u materiálů vyrobených z těchto makromolekul horší.

Pokud se podíváme na polyethylen. Tak u něho je vstupní surovinou ethen, ten má molární hmotnost 28 g/mol. Polymerací ethenu vzniká polyethylen. S tím, jak roste velikost hlavního řetězce, roste i jeho molární hmotnost. Jakmile molární hmotnost překročí hranici 100 000 g/mol, považujeme již materiál za polyetylen.

Chemické vazby v makromolekulách dělíme na primární a sekundární. Primární chemické vazby jsou velmi silnými vazbami, nejčastěji užívaným typem je kovalentní vazba. Sekundární síly jsou slabší a jsou způsobené především rozdílnými potenciály nábojů v molekulách. Tyto síly také ovlivňují výsledné vlastnosti vzniklého polymeru. [4,1]

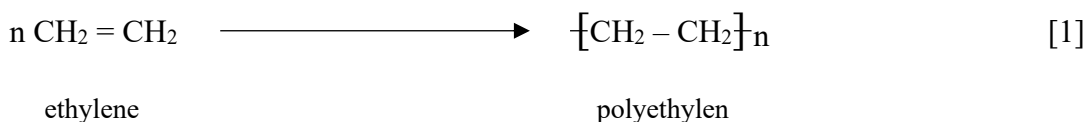
## 2.3 Syntézy polymerů

Makromolekuly polymerů jsou složeny ze shodných jednotek, která se neustále opakují. Slovo polymer tento jev přímo značí. Předpona poly- proto znamená mnoho a -mer opakující se jednotku. Opakujících se společných jednotek je v polymerních řetězcích okolo  $10^3$  až  $10^5$ . Z chemického hlediska jsou polymery nejčastěji sloučeniny vodíku a uhlíku.

Polymerní materiály vznikají třemi různými způsoby.

Prvním způsobem je polymerizace. Je to asi nejvyužívanější způsob vzniku polymerů. Jde o chemickou reakci nenasycených monomerů, které obsahují dvě vazby, ty se otevírají a napojují na konce polymerního řetězce bez vzniku dalších vedlejších produktů. Například polymery typu PE, PS, PVC nebo PP. [4,1]

Náš zkoumaný polyetylen vzniká právě polymerací ethenu. Znázorněnou v chemické rovnici. č. 1. Různé druhy výroby PE budou shrnuty v dalších kapitolách této práce. [4]



Dalším možným způsobem vzniku polymeru je polykondenzace. Polykondenzace je pozvolná kondenzace monomerů. Během reakce dochází ke vzniku polymeru a dalších vedlejších produktů jako je například voda. Významné zástupce zde tvoří materiály typu PET, PF nebo PA.

Posledním a třetím možným vznikem polymerů je polyadice, to je taktéž chemická reakce monomerů. Během reakce dochází k přesmyku atomu vodíku z jednoho monomeru na druhý. Zástupcem této skupiny jsou například silikony nebo polyuretany. Při této reakci nevznikají žádné další vedlejší produkty.

Všem třem typům syntéz polymerů říkáme i přes jejich různé typy vzniku polymerizace.

[4,3,2]



## 2.4 Dělení polymerů

Polymery dělíme na plasty a elastomery. Základní rozdělení je definováno tak, že na plast na deformaci nereaguje pouze elasticky ale i plasticky.

### 2.4.1 Plasty

Plasty jsou materiály, které se dají tlakem případně teplem tvarovat a jsou složeny z makromolekulárních látek. Základní surovinou pro výrobu plastů je ropa, případně uhlí nebo zemní plyn. Za standartních okolních podmínek se plast nachází v pevném tuhém stavu. Při zvyšování teploty přechází do taveniny a je možné z něj vyrábět různé tvary.

Mezi hlavní nedostatky plastů patří hořlavost, vznik elektrického náboje, omezená tvrdost, nízká teplotní odolnost optická nestálost nebo malá houževnatost. Pro zlepšení těchto vlastností a modifikaci se využívá světelných a tepelných stabilizátorů, plniv, maziv, ředidel, barviv a dalších dle finální koncepce daného materiálu.

Příkladem může být stéran zinečnatý. Ten se využívá jako mazivo. Je méně viskózní než použitý polymer a segreguje na vnějším povrchu granulí na styku se strojem, tím tak předchází slepování při výrobě.

Plasty dále dělíme teplotního chování na:

- **Termosety** – za účasti činidla, nebo vlivem tlaku a teploty tuhne a síťuje do finální podoby, tu není možné po dokončení síťování měnit
- **Termoplasty** – zvyšující se teplotou se taví, po ochlazení tuhne

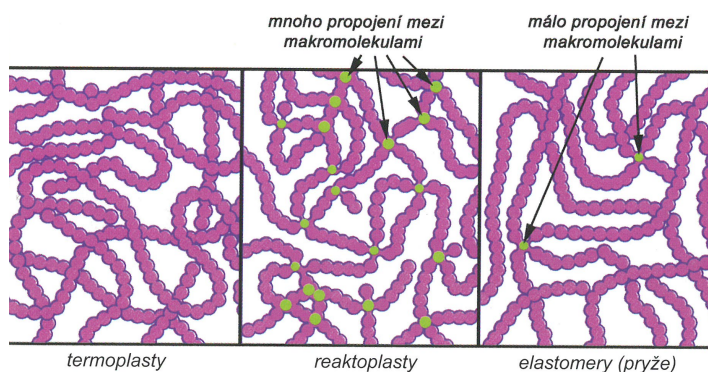
Termosety mají při využívání u kompozitních materiálů značnou převahu. Mají totiž tu přednost, že i za normálního stavu jsou nízkomolekulární a v tekutém stavu. Jejich viskozita je zároveň i ve formě taveniny nižší než viskozita taveniny termoplastů. Termosety tak snadněji smáčejí výztuž. Také energetické nároky na zpracování jsou nižší v porovnání s termoplasty i stonásobně menší. V minulosti i dnes se jako termosety nejčastěji využívají pryskyřice polyesterové a epoxidové.

Termoplasty jsou za normální teploty v pevném stavu, až po zahřátí materiálu na hodnoty okolo 200 °C se z termoplastů stává tavenina. Termoplast jako pojivo se v minulosti téměř nevyskytoval. V dnešní době se využívá ve spojení s krátkými (do 0,2 mm) a dlouhými (do 25 mm) nebo nekonečně dlouhými vlákny. Každá forma výztuhy je vhodná pro určité zpracování a má své specifické finální vlastnosti. [3,2]

## 2.4.2 Elastomery

Tento druh materiálu tvoří úplně odlišnou skupinu polymerů z pohledu jejich mechanických vlastností. I malou působící silou je materiál schopen se protáhnout, aniž by se poškodil. Elastomery mají vysoký podíl elasticity a elastické deformace. Jedním z nejznámějších přírodních elastomerů je kaučuk.

Materiál je to velice homogenní, i proto se elastomery jako kompozitní materiál využívají především s částicovou výztuží. Příkladem mohou být černé saze nebo křemičitan vápenatý. Velice často se materiál výztuže kombinuje. U materiálu poté dochází ke zvýšení pevnosti, elektrické nebo teplotní vodivosti či stálosti nebo vzhledu. Vulkanizací kaučuku vzniká pryž, která má dle množství síry buď povahu měkkou nebo tvrdou. Nejčastěji kaučuk vulkanizujeme sírou nebo selenem. Významné použití má elastomer jako matrice pro kompozitní materiál sloužící k výrobě pneumatik. [2, 17, 4]



Obr. 5 Porovnání struktur makromolekul polymerů [4]

## 2.4.3 Dělení polymerů podle složení

Polymery dělíme dle složení na homopolymery a kopolymery. A to v závislosti na tom, zda-li se makromolekula skládá ze základních stavebních jednotek stejného druhu (homopolymery) nebo se v řetězci nachází různé další typy merů (kopolymery). Příkladem homopolymeru může být například zkoumaný polyetylen. Kopolymery dále ještě dělíme v závislosti na tom, zda řetězec střídají s určitou periodicitou, či nepravidelně. [8, 2]

## 2.4.4 Dělení polymerů podle nadmolekulární struktury

Vlastnosti polymerů jsou také zásadně ovlivňovány uspořádáním makromolekul ve struktuře polymeru. Pokud budeme polymer zahřívat, začnou nám makromolekuly kolem jednotlivých vazeb rotovat a nejpravděpodobnějším tvarem bude v tu chvíli postavení ve tvaru “klubka“. Tedy nepravidelné amorfní uspořádání.

Při následném procesu ochlazení se amorfní polymer a jeho makromolekuly více či méně uspořádávají. Podle toho rozlišujeme, zda-li je polymer amorfní či krystalický.

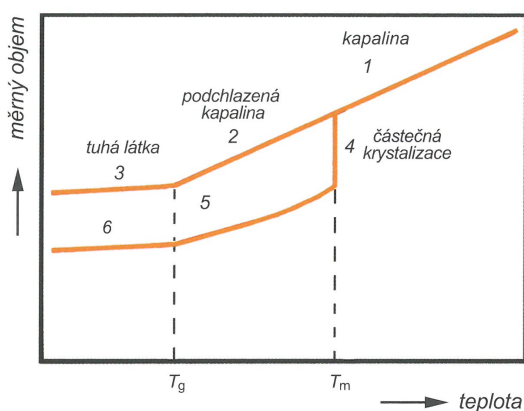
- Amorfní – Pro tento typ polymeru platí neuspořádanost makromolekul.
- Krystalické – Také většinou nazývané jako semikrystalické, jelikož 100 % krystality nelze v reálných podmínkách dosáhnout. Makromolekuly zde vytváří uspořádané oblasti obklopené zbytkem amorfního stavu. Aby se makromolekuly uspořádali do uspořádaného tvaru je nutná jejich chemická a strukturní pravidelnost. Jakmile by byla jejich struktura mírně odlišná, makromolekuly se neuspořádají a zůstávají v amorfním stavu. Celkový podíl uspořádaných makromolekul vůči amorfnímu neuspořádanému stavu nazýváme stupněm krystalinity.

Amorfní a krystalický typ se v závislosti na teplotě liší nejenom svými vlastnostmi ale také svým měrným objemem. Ten je se zvyšující se teplotou rostoucí. U krystalického polymeru ale skokově.

K porozumění změn uvedených na obr. č. 6 je potřeba zmínit následujících jednotek.

- $T_g$  – teplota skelného přechodu
- $T_m$  – teplota přechodu krystalické fáze

Při teplotě  $T_g$  dochází u amorfních látek k přechodu z podchlazené kapaliny do tuhého stavu. Při teplotě  $T_m$  dojde u semikrystalických polymerů ke skokové změně měrného objemu a z kapaliny se velmi rychle stane látka tuhá. Detailní popis přechodu a rozdílů nalezneme na přiloženém grafu. [8, 2, 4, 10]



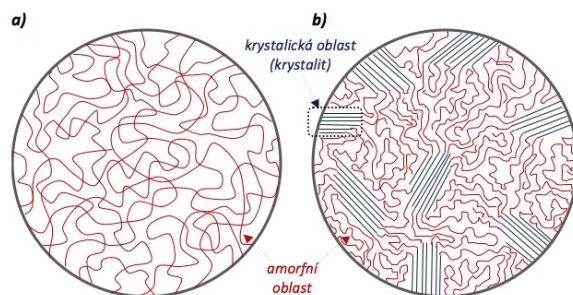
Obr. 6 Teplotní závislosti měrného objemu amorfního a semikrystalického polymeru [4]

#### 2.4.5 Dělení podle druhu přísad

Polymery rozlišujeme na plněné (aditované) a neplněné (neaditované). Neplněným polymer obsahuje pouze takové množství přísad, které neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice. U polymeru plněného je tomu přesně naopak. Zde jej přímo ovlivňuje a mění tak jeho mechanické a fyzikální vlastnosti, případně má za úkol materiál zlevnit.

U plněných polymerů je makromolekulární látka stavebním kamenem polymeru, do které jsou poté přidávány různé přísady. Přísady jsou různé, nejčastěji mají formu stabilizátorů, plniv, barviv, maziv, iniciátorů, změkčovadel, tvrdidel, zpomalovačů hoření nebo nadouvadel. Velmi častými aditivy jsou:

- **Plniva** – Například grafit snižuje třecí odpor. Práškové kovy zlepšují elektrickou a tepelnou vodivost.
- **Světelné stabilizátory** – Zpomalují degradační proces. Zásadně zvyšují UV odolnost, velmi důležité aditivum pro skupinu polyolefinů. Záření sami pohlcují nebo odrážejí.
- **Maziva** – Pomáhají při technologických procesech zpracování. Hmota neulpívá na stěnách formy. Nejčastěji používané jsou vosky, Ca či Zn
- **Barviva** – Slouží k obarvení směsi, používají se v poměru maximálně 10 %. Dále je rozdělujeme na organická a anorganická
- **Změkčovadla** – Zlepšují tvárnost a houževnatost ale snižují pevnost a tvrdost.
- **Tvrdidla, Iniciátory** – Urychlují proces síťování. Využívají se u reaktoplastů k urychlení reakce a rychlejšímu vzniku příčných vazeb.
- **Zpomalovače hoření** – Při případném vzplanutí zpomalují proces hoření a fungují samozhášivě.
- **Nadouvadla** – Využívají se k výrobě lehčených pěnových plastů. Přidávají se ve velmi malém množství do základního materiálu a při zahřátí se mění v plyn, který plast roztáhne a “odlehčí“. [4, 14, 13, 20]



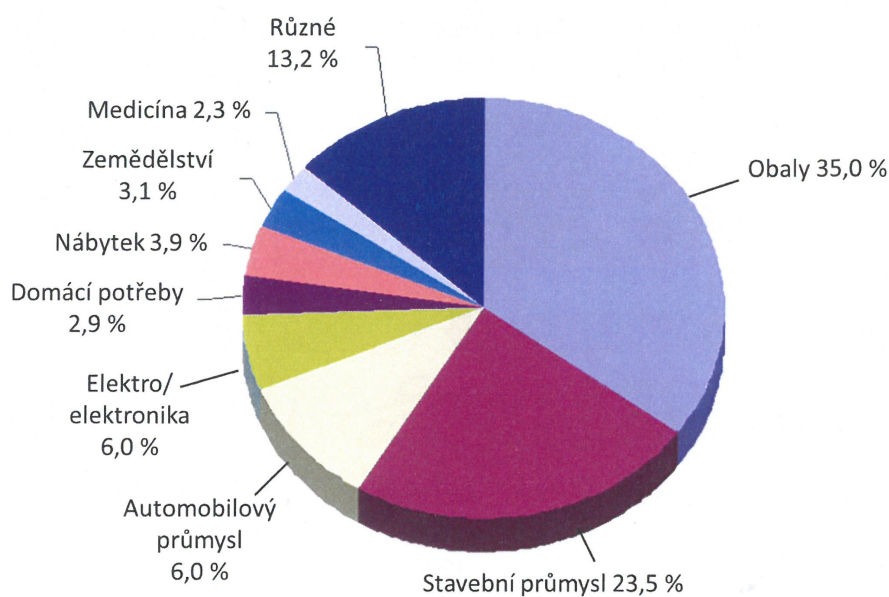
Obr. 7 Typy nadmolekulární struktury polymerů a - amorfní b – semikrystalická [4]

## 2.5 Využití polymerních materiálů

Využití polymerů je obrovské. Přes stavební průmysl, obalové hospodářství, automobilový průmysl, nebo elektro, domácí potřeby. Na trhu se vyskytují polymery pro různé aplikace, různé typy zpracování s rozdílnými vlastnostmi.

V současné době existuje zhruba několik tisíc různých druhů plastů, ale uplatnění má jen hrstka z nich. Z celosvětové produkce polymerů, tak více jak 70 % procent z celkové produkce zabírá výroba tří skupin polymerů, a to především polyolefinů, styrenových hmot a výroba polyvinylchloridu. Také je ale nutné říct, že další vývoj neustále probíhá, přičemž je drahý a firmám se více vyplácí experimentovat s již ověřenými polymery.

Zajímavostí pro strojní konstruktéry může být fakt, že až 55 % obratu obráběcích strojů tvoří právě obrábění polymerů. [1, 10]



Obr. 8 Využití polymerů napříč odvětvími v Německu [1]

### 3 Polyolefiny

Jednou z nejdůležitějších a největších skupin syntetických polymerů je právě skupina polyolefinů. Do této skupiny spadají dva z hlediska objemu produkce velmi významné polymery a to námi zkoumaný polyethylen (PE) a také polypropylen (PP). Hlavními důvody jsou možnost využití levných petrochemických surovin jako jsou ropa a zemní plyn k jejich výrobě, dále jejich specifické užité vlastnosti a možnost velice dobré a snadné zpracovatelnosti, a to velmi širokou škálou technologií. Jen pro představu spotřeba PE v roce 1999 dosáhla 38,8 mil. tun. a spotřeba PP byla kolem 28 mil. tun. Dle průzkumu z roku 2014 tvoří tato skupina přibližně 50 % výroby všech syntetických plastů. A trend z let minulých ukazuje, že růst spotřeby těchto polymerů neustává.

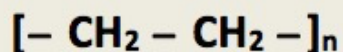
Polyolefiny vznikají polymerací uhlovodíků, takzvaných olefinů (alkenů). Olefiny získáváme převážně rektifikací ropy a krakováním zemního plynu. Tato skupina polymerů obsahuje pouze jednu dvojnou vazbu umístěnou na prvním uhlíku. [1, 2, 10]

#### 3.1 Polypropylen (PP)

Polypropylen je krystalický neprůhledný termopolymer, který je cenově jedním z nejdostupnějších polyolefinů. Do této skupiny spadá například i velice dostupný polyetylen nebo polytetrafluoretylen. PP se získává katalytickou polymerací propylenu. Díky své nepolární struktuře má dobré elektroizolační vlastnosti, také je pevný a houževnatý. Na termoplasty má poměrně vysoký bod tání a vysokou teplotu použití (kolem 135 °C). Je nerozpustný ve všech organických rozpouštědlech. Z polypropylenu vyrábíme vstřikováním trubky, folie, duté nádoby a obalové materiály (ty tvoří zhruba 50 % z celkového trhu). Většina plastových trubek pro rozvod vody ve stavbách je právě z polypropylenu. [2, 18]

#### 3.2 Polyethylen (PE)

Polyethylen je ze skupiny polyolefinu jejím nejvýznamnějším zástupcem. Jedná se o semikrystalický materiál. Obsahuje proto části uspořádaných a části neuspořádaných makromolekul. Uspořádané molekuly jako krystality a neuspořádané makromolekuly označujeme jako tzv. amorfní stav. Vzhledem k tomu, že se jedná o semikrystalický materiál, závisí mechanické, chemické a další vlastnosti převážně na podílu těchto dvou fází, dále také na prostorovém uspořádání monomerních jednotek v řetězci makromolekuly a na relativní molekulové hmotnosti. Podíl dvou rozdílných fází charakterizujeme jako stupeň krystalinity. Obecný vzorec polyetyleny je uveden na obrázku č. 9.



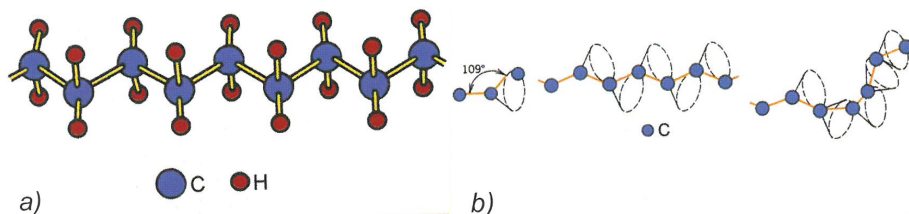
**Obr. 9** Obecný vzorec polyetylenu

Obecně je polyetylen látka, která je při dostatečně tenkých vrstvách ohebná, elastická, téměř průhledná a částečně s mléčným zákalem. Se zvětšující se tloušťkou materiálu přechází mléčný zákal do barvy bílé. Teplota tání polyetylenu se pohybuje kolem 105–136 °C. Polyetylen má vysokou tažnost a houževnatost, současně je velmi dobře stálý a odolný vůči chemickým činidlům a kyselinám jako jsou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HF nebo HNO<sub>3</sub>. Zhruba do teplot 50 °C se nerozpouští v rozpouštědlech, nad tyto teploty se rozpouští například v chlorovaných nebo aromatických rozpouštědlech. Polyetylen je nenavlhavý, nepolární, korozivzdorný, odolný vůči nízkým teplotám. Velice dobré jsou jeho dielektrické a elektroizolační vlastnosti, které se využívají v elektrotechnice.

Nejběžněji používaným typem je bezesporu polyetylen vysokohustotní. Ten dosahuje zvýšené chemické i mechanické odolnosti, a to i za zvýšených teplot. Dříve se polyetylen rozděloval dle způsobu přípravy na nízkotlaký a vysokotlaký PE, takovéto označení ale nebylo dostatečné, a proto se dnes označuje polyetylen podle rozvětvení a krystalinity makromolekul. Hlavní dvě skupiny tak představuje polyetyleny rozvětvené a lineární. Lineární jakožto vysokohustotní s označením PE-HD a rozvětvený s označením PE-LD. Tyto dvě skupiny se vyskytují nejčastěji.

Poté ještě existují některé další typy, které se ale nevyrábějí v takové míře. Další skupinou jsou například PE-LLD nebo PE-UHMW. Druh polyetyleny určujeme při výrobě.

Primární vazbou u PE je vazba kovalentní, která vzniká překryvem valenčních orbitalů jednotlivých atomů. V řetězcích nalezneme vazby C–C a C – H. Z jednoho atomu uhlíku tak vycházejí dvě vazby C-H a dvě vazby C-C. Uhly mezi jednotlivými vazbami jsou přibližně 109°. Při zatěžování materiálu se řetězce přeorientují ve směru působící síly. Tento jev je umožněn rotací kolem vazeb C-C. [2, 15]

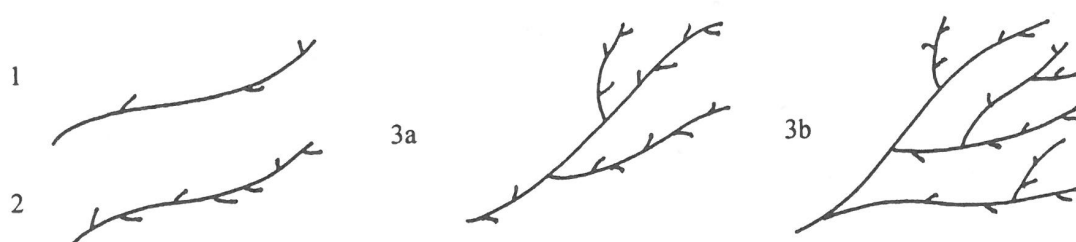


Obr. 10 Typické uspořádání atomů vodíku a uhlíku v makromolekule (a), Rotace kolem vazeb C-C umožňuje změny tvaru (b) [4]

### 3.2.1 Výroba polyethylenu

Základní surovinou pro výrobu polyethylenu je ethylen. Jak jsme již zmínili, získáváme jej z ropy či zemního plynu. Jedná se o bezbarvý velmi reaktivní plyn s bodem varu  $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ . PE se z etylenu vyrábí za využití mimořádných podmínek, či použitím účinných katalyzátorů. První syntéza PE byla provedena Hansem von Peckmannem zahříváním diazomethanu. V dnešní době vyrábíme PE především kopolymerací etylenu s  $\alpha$  – olefiny za přítomnosti katalyzátorů.

Základní charakteristiku a rozdíly materiálů PE-HD a PE-LD vyčteme z tabulky č. 1. Z tabulky je patrné, že i nepatrné zvýšení hustoty vede k drastickým změnám na poli mechanických vlastností. Též se nám zvyšuje teplota tání. Zároveň nepoměrně roste i stupeň krystalinity, který se u PE-HD může pohybovat až okolo 95 %. Z této tabulky tak můžeme usuzovat, že vyráběný PE-HD může mít v závislosti na výrobě rozdílné vlastnosti. Důležité je také doplnit, že při podílu 100 % krystalické fáze by polyetylen dosahoval  $1\text{ g/cm}^3$ , u 100 % podílu amorfní fáze by hustota PE dosahovala  $0,855\text{ g/cm}^3$  [2, 10, 8, 19]



Obr. 11 Struktura makromolekul dle typu PE. PE-HD (1), PE-LLD (2), PE-LD (3a i 3b) [2]



Tab. 1 Charakteristika PE-LD a PE-HD [2]

Typ polyetylenu	Zkratka	Stupeň krystalinity [%]	Husota [g/cm <sup>3</sup> ]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
Polytelyn vysokohustotní	PE-HD	65 - 95	0,954 – 0,970	125 – 136	700 – 1400	20 -23
Polyetylen nízkohustotní	PE-LD	50 – 70	0,915 – 0,935	105 - 115	200 - 400	9 - 15

### 3.2.1.1 Polyetylen rozvětvený (PE-LD)

Polyetylen rozvětvený neboli nízkohustotní je jedním z nejstarších průmyslově vyráběných PE. PE-LD se vyrábí radikálovou polymerací při vysokých teplotách (200–300 °C) a extrémně vysokých tlacích. Využitím vysokých teplot a tlaků je dosaženo vyššího rozvětvení na základním řetězci. To je způsobeno především zamezením schopnosti krystalizace. Ve většině struktury látky tak převládá amorfni fáze.

V dnešní době se využívají dva hlavní procesy výroby radikálovou polymerací:

- radikálová polymerace v trubkových reaktorech (200-350 MPa)
- radikálová polymerace v autoklávových reaktorech (100–210 MPa)

V obou případech se k iniciaci polymerace ethenu využívají směsi různých organických iniciátorů. Nejčastěji akylů a ecyperoxidů. Ty poté iniciují samotnou polymeraci ethenu za různých teplot. Pro zlepšení vlastnosti PE-LD se využívá přidání polárních modifikátorů do nástřiku monomeru, nejčastěji aldehydy, alkoholy nebo ketony.

PE-LD je pevný, ohebný a měkký polymer. Díky své struktuře dosahuje vyšších tažností na úkor snížené pevnosti v tahu. Oproti PE-HD má lepší rázovou i vrubovou houževnatost, nižší teplotu tání okolo 105 °C, nižší pevnost a nižší teplotní tvarovou stálost. Tento druh PE se využívá pro výrobu obalových materiálů, dopravních pytlů, různých typů fólií, dále krytů nebo tenkých sáčků. Je zde vyjmenovaný pouhý zlomek, jelikož aplikací PE-LD je mnoho.

Střední molekulová hmotnost PE-LD se pohybuje okolo 30 000 – 300 000. Nejznámější obchodní značky jsou Lupolen (BASF), Bralen (Slovnaft) nebo Hostalen (Hoechst). V ČR se PE-LD nevyrábí. [2, 8, 20, 15]

### 3.2.1.2 Polyetylen lineární (PE-HD)

Polyetylen lineární neboli vysokohustotní je nízkotlaký typ PE. Řetězec PE-HD je méně rozvětvený, obsahuje méně postranních řetězců, proto se často využívá pojmu lineární typ PE. Oproti PE-LD nabízí vyšší míru krystality, z toho důvodu také vyšší mechanické vlastnosti a chemickou odolnost. Z mechanických vlastností je to zvýšení pevnosti, tuhosti a tvrdosti, klesá zde ale tažnost a houževnatost. Dále zde vzrůstá tepelná odolnost a tvarová stálost i ze vyšších teplot. Z hlediska výroby je zpracovatelnost díky struktuře mírně horší.

#### Využití PE-HD

Od zhruba druhé poloviny 20. století se tento typ polyethylenu stal důležitým artiklem pro výrobu lahví, kontejnerů, domácích potřeb, objemných nádob určených pro odpadové hospodářství, využití má ale také v průmyslu, stavebnictví, automotive a významnou roli hraje také v zemědělství. Vyrábějí se z něho například kryty motorů, nádrže na pohonné hmoty, sítě, tkaniny, popruhy a lana nebo sáčky a tašky. Pro nás tedy hraje velice významnou roli a je v současné době neodmyslitelným materiálem. Z celkové produkce plastů v EU tvoří odhadem 12 %. [2, 19, 20]

#### Výroba surového PE-HD

PE-HD je v současné době vyráběn třemi základními technologickými postupy. Těmi jsou výroba přes roztok, suspenzi nebo přes plynnou fázi.

Nejstarším způsobem je dodnes stále široce využívaný proces suspenzní.

Tab. 2 Rozdíly v podmínkách výroby PE-HD [2]

Proces	Suspenzní	Roztokový	Plynná fáze
Teplota [°C]	85 - 110	140 - 300	90 - 100
Tlak [MPa]	2 - 3	3 - 20	1 - 2
Konverze [%]	95 - 98	95	2

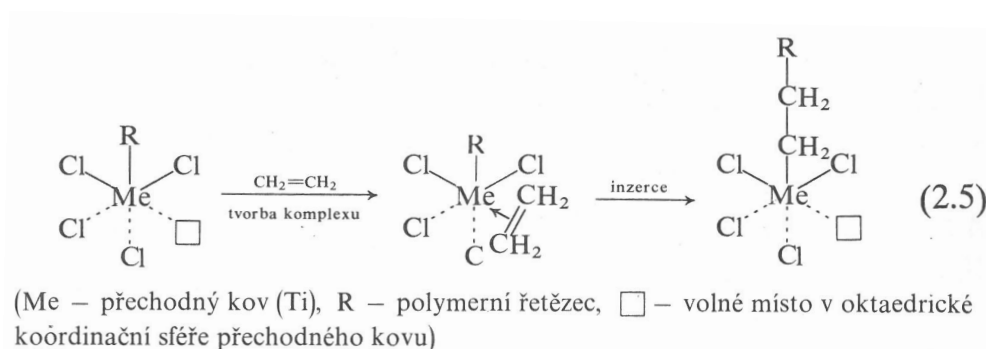
Polymerační procesy dělíme dle použitého katalytického systému.

Novinkou jsou metallocenové katalyzátory, někdy označované také jako katalyzátory tzv. Kaminského typu.

Dalším typem jsou katalyzátory vyvinuté firmou Phillips, tyto katalyzátory jsou založeny na  $\text{CrO}_3$  na alumosilikátovém nosiči ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Reakce probíhá na základě polyinsertce.

Katalyzátor společnosti Standart Oil Company funguje na principu částečně redukováného  $\text{MoO}_3$  na  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ten je poté aktivován sodíkem nebo  $\text{LiAlH}_4$ .

Nejvíce využívaným typem katalyzátoru je ale Zieglerův katalyzátor. Ten využívá reakce organokovových sloučenin se sloučeninami přechodných kovů. Nejběžnější  $\text{TiCl}_4 - \text{AlR}_3$ , kde R = alkyl.



Obr. 12 Vazba mezi kovem a alkylem se koordinací olefinu oslabí, to umožní vsunutí monomerů mezi kov a alkyl [2]

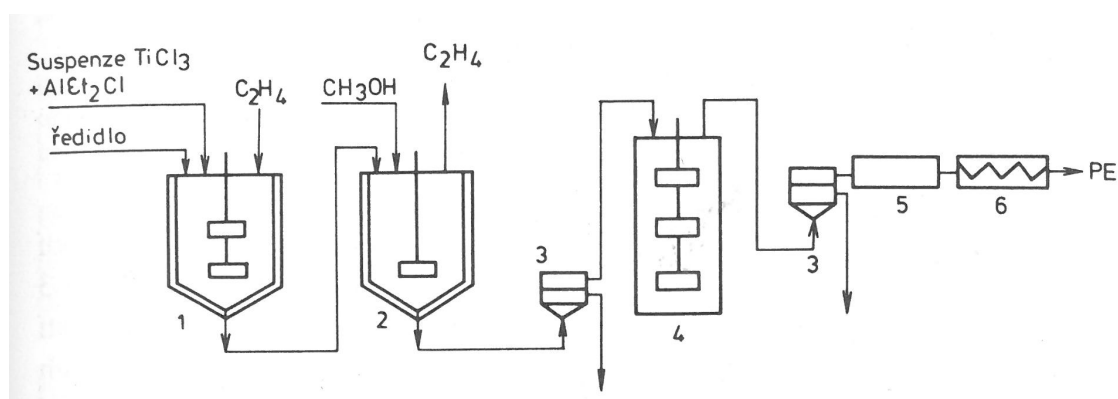
- **Suspenzní postupy**

Suspenzním postupem výroby dochází ke srážecí polymeraci monomeru, v našem případě ethenu za působení uhlovodíkového rozpouštědla. Teplotu procesu je potřeba udržovat, takovou, aby se polymer v rozpouštědle nerozpouštěl. Celková teplota procesu nesmí přesáhnout teplotu tání polymeru. Aby celková hustota PE-HD byla nižší je zapotřebí udržovat i nižší teplotu procesu a naopak.

Podle bodu varu rozlišujeme uhlovodíky využití v reakci na těžké a lehké. Nižší bod varu znamená lepší podmínky pro polymer a jeho rozpustnost v rozpouštědle ale nutno dodat, že díky tomu musí probíhat polymerace při vyšších tlacích. Zástupcem nižšího typu uhlovodíku je isobutan, ten se nejčastěji vyskytuje ve spojení se smyčkovým kontinuálním reaktorem.

Isobutan není samozřejmě jediný, který se na polymeraci účastní, nachází se zde suspenze katalyzátoru v isobutanu, dále ethen a komonomer. Výhodou využití smyčkového reaktoru je možnost dobrého odvodu reakčního tepla, suspenze totiž v reaktoru cirkuluje v trubkách o průměru kolem 0,6 m a dlouhých 200 m. Vstupní látky jsou v průběhu do procesu dodávány. Vznikající částice polymeru v reaktoru odhadem 2 hodiny rostou. Konverze vstupního ethenu je kolem 97 %. Celkový objem nově vzniklého polymeru v suspenzi je kolem 40 %. Výhodou této volby výroby je možnost dobré separace a recyklace rozpouštědla a možnost jednoduše regulovat molekulovou hmotnost vzniklého polymeru změnou teploty procesu polymerace. Zmíněný proces využívá například společnost Phillips Petroleum Company.

Další možností je použití těžkých uhlovodíků ve spojení se smyčkovým (Solvay) nebo kontinuálně míchaným reaktorem (Hoechst). Kontinuálně míchaný reaktor rovněž umožňuje měnit molekulovou hmotnost vzniklého PE-HD. Využívá k tomu změny teplot a tlaku v procesu výroby. Přičemž molekulová hmotnost PE-HD stoupá s tlakem a klesá s teplotou. [2, 10]



Obr. 13 Výrobní zařízení pro přípravu PE v suspenzi Polymerační reaktor (1), Rozkladný reaktor (2), Odstředivka (3), Extraktor (4), Sušárna (5), Extrudér (6) [2]

- **Roztokový postup**

Tento postup využívá rozpustnosti PE-HD ve vyšších uhlovodících před jeho bodem teploty tání. Díky tomu je roztoková polymerace umožněna. Samotný proces probíhá kolem 150 až 300 °C. Tlak je rozdílný od 0,3 až do 20 MPa a to hlavně díky využití různých typů komonomerů, rozpouštědel a různé velikosti konverzí monomerů na polymer.

Technologie pomocí roztokového postupu je technologií kontinuální s využitím Zieglerových katalyzátorů a vodíku, který slouží jako regulátor molekulové hmotnosti.

Výsledná konverze ethenu dosahuje okolo 95 %, přičemž zdržení v samotném reaktoru je velmi malé, okolo 10 minut. Roztok, který opouští reaktor obsahuje kolem 17 až 25 % procent polymeru. Katalyzátor, rozpouštědlo a nezreagované monomery jsou následně z roztoku odstraněny a recyklovány pro nové použití.

Nevýhodou procesu výroby v roztoku je získaný nízký bod tání vzniklého polymeru. Výhodou je možnost získat polymer s širokou škálou rozmezí hustot.

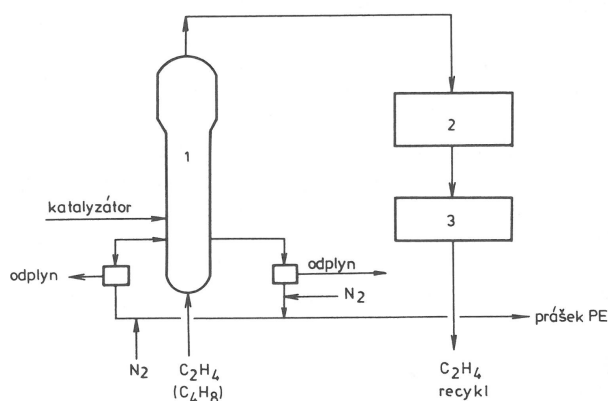
Výrobci se liší v použití různých typů rozpouštědel, mezi nejznámější patří společnosti DuPont, DSM, Dow nebo Mitsui. [2, 10]

- **Polymerace v plynné fázi**

Monomer je polymerován ve fluidní vrstvě v plynné fázi, a to bez využití kapalného média. Jedná se o novinku ve výrobě PE. Jsme díky této technologii schopni ekonomicky a s nízkými investičními náklady PE vyrábět velmi flexibilně. Technologie umožňuje vyrábět jak PE-HD tak i PE-LLD, a to s různou molekulovou hmotností a hustotou.

Proces polymerace v plynné fázi s názvem Unipol patří a je patentován firmou Union Carbide.

Velmi nízké hodnoty využitých katalyzátorů (zhruba 1 ku 1 milionu PE) při výrobě zapříčiňují to, že z výsledného produktu nemusí být odseparovány. [2, 10]



**Obr. 14** Výroba PE postupem společnosti Union Carbide, Reaktor (1), Vzduchový chladič (2), Kompresor (3) [2]

## Nadmolekulární struktura PE-HD

Zmíněným termínem rozumíme studium morfologie a prostorového uspořádání makromolekul. Morfologii nejčastěji zkoumáme za pomoci přímé zobrazovací metody, nejčastěji optickou polarizační mikroskopií (POM), dále konfokálními laserovými mikroskopy (CLSM). Získané předpoklady dále ověřujeme například využití difrakce rentgenového záření (XRD).

Vlákna, případně lamely nebo skládané útvary jako jsou sférolity či shish-kebab tvoří řetězce semikrystalických polymerů. PE-HD je semikrystalický polymer, který obsahuje dlouhé řetězce, které jsou uspořádané převážně do pravidelných struktur s menším množstvím struktur amorfních. Proces výroby, zejména dlužení, temperace a proces zchlazení významně ovlivňuje výslednou morfologii PE-HD.

Při dlužení polymeru dochází i přes to, že je vazebný úhel mezi uhlíky  $90^\circ$  k napřimení a paralelní orientaci makromolekuly. Temperací, neboli tepelnou stabilizací, je poté nutné paralelní orientaci stabilizovat a zabránit tak možnému smotání a smrštění vláken do původního stavu.

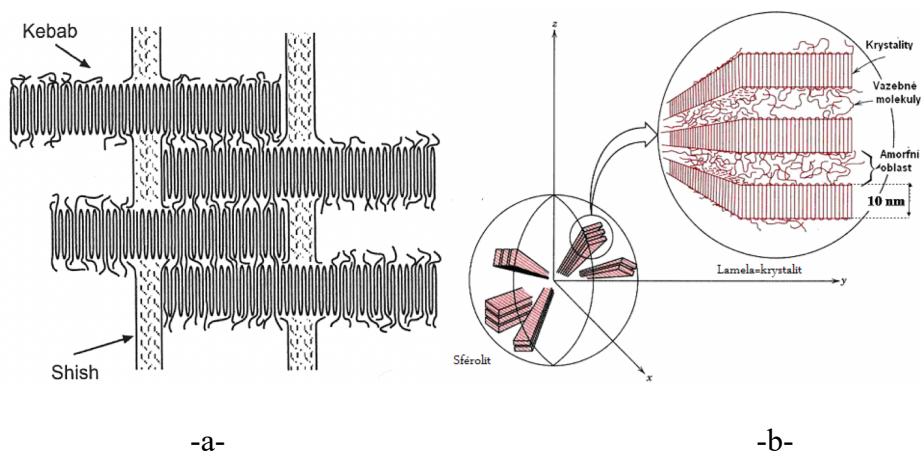
Lamela je uspořádání dlouhých řetězců, ty se po určité délce ohýbají. Rozměry takto vzniklých lamel jsou následující. Šířka okolo 1 nm, tloušťka mezi 10–15 nm. Nejvyšší stupeň krystalinity lze připravit s pomalou krystalizací z roztoku. Příklad struktury lamel PE je uveden na obr. 15.



Obr. 15 Možná struktura lamely PE [22]

Pokud nejsou vhodné podmínky (ochlazení z taveniny je pomalé), řetězce se nejčastěji skládají do forem skládaných útvarů jako jsou již zmíněné sférolity nebo shish-kebab.

Shish-kebab je specifický krystalický strukturní útvar, který vzniká tokem lineárního mírně rozvětveného PE. Jádrem takové struktury je vláknité s velkým podílem napřimených řetězců uvedených na obr. 16.



Obr. 16 Struktura shish-kebab (a), sférolitická struktura (b) [22]

Sférolity jsou svojí strukturou lamelární útvary, které mají tzv. symetrickou superstrukturu. Lamely rostou od středu, ze samotného zárodku sférolitu. Vznikají ochlazením taveniny, ve které se nachází polymerní řetězce ve formě klubek, které neměly vhodné podmínky pro tvorbu lamel. Sférolitickou struktura je typickou nadmolekulární strukturou právě PE-HD, dále polyamidů nebo glykolů. Struktura se pod mikroskopem jeví jako soustava prstenců, které rostou směrem k pozorovateli.

Polyethylen z krystalografického hlediska obecně nalezneme ortorombické a monoklinické struktury. Výjimečně za vysokých tlaků v laboratorních podmínkách dosažené struktury hexagonální. Monoklinickou struktura vzniká nejčastěji po dloužení PE. [11, 21, 22]

## 4 Zpracování polyethylenu

Základními technologiemi zpracování polyethylenu jsou technologie vytlačování, vstřikování a vyfukování. Tyto tři zmíněné technologie tvoří až 80 % procent jeho celkového zpracování. Po představení všech možných technologiích zpracování bude osvětlena výroba vláken a vznik síťovin. [11, 7, 1, 14]

### 4.1 Vytlačování

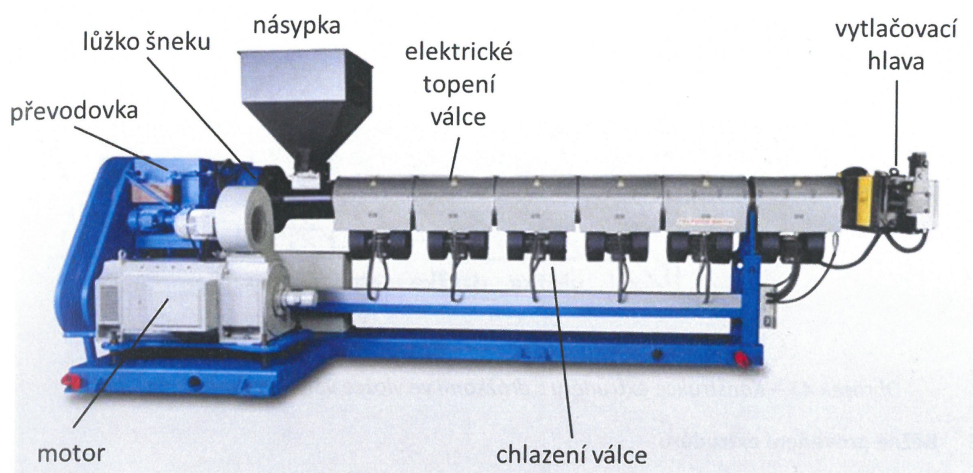
Technologie vytlačování je průběžná kontinuální metody výroby, což přináší výhody ve formě možnosti aplikace automatizovaných procesů. Dále je proces s PE dobře reprodukovatelný. Nejčastějším produktem vytlačování jsou fólie, trubky nebo profily. [11,7,1, 14]

#### 4.1.1 Princip a popis vytlačování

K této technologii nejčastěji využíváme jedno či více šnekových strojů. Do šneku se materiál ve formě granulátu dostane násypkou. Šnek poté granulát, dopravuje, promíchává a zároveň ohřívá. Na konci se poté už nachází tavenina. Ta má menší objem než granulát. K dosažení správného procesu výroby je proto zapotřebí udržovat jistý tlak na konci šneku. Šnek proto rozdělujeme na dvě části. Tou první je část plnicí, ta má za úkol dopravit co nejvíce granulátu do další fáze šneku. Druhá fáze šneku, tlaková má za úkol granulát zahustit, dobře promísit a vytvořit konstantní plnicí tlak. Aby mohl šnek tyto dvě funkce dobře plnit, je potřeba aby jeho geometrie byla v průřezu proměnná. V plnicí fázi musí proto být závit šneku dostatečně hluboký a ve fázi tlakové musí být celkový objem závitu menší. Kompresní poměr mezi jednotlivými fázemi bývá u PE mezi 1:3 až 1:5. Délka šneku bývá kolem 15 – 20 násobku průměru šneku. Průměry šneků bývají různé, nejčastěji ale od 45 do 150 mm. Šnek bývá nejčastěji vyroben z nitridačních ocelí a v tolerancích okolo H7/f7 k válci. Typy šneků se liší a každý typ má většinou svoji specifickou skupinu využití. Některý se hodí na střední a menší profily, jiný zase k výrobě drátů a velkých profilů nebo trubek.

Konec šneku předtím, než vstoupí do formovací hlavy je zakončen krátkým kuzelem a sadou sítí, které mají za úkol zvětšit tlak a zlepšit kvalitu výsledného materiálu.

K ohřevu se využívá nejčastěji odporových pásů, které se nacházejí ve válci a ohřívají tak směs nacházející se uvnitř stroje. Násypku je potřeba chladit, nejčastěji vodou nebo vzduchem, aby nedocházelo k natavení granulátu už uvnitř násypky. Výkonnost šnekových strojů měříme v hodnotách množství/ 1 otáčka šneku. Výkonnost roste se zvoleným průměrem exponenciálně. [11, 7, 1, 14]



Obr. 17 Vytlačovací stroj, extruder [1]



## 4.2 Vstřikování

Je další důležitou technologií pro zpracování polyethylenu. Umožnění této technologie je hlavně díky širokému pásu, ve kterém je PE dobře tekutý. Technologie je taktéž zautomatizovatelná, ale už se nejedná o kontinuální proces. Výroba probíhá v několika fázích, menší výrobky jsou nejčastěji vyráběny ve skupině v jedné šarži. Procesem vstřikování vyrábíme různé a tvarově odlišné výrobky. Podstatnou možností je výroba s integrací kovu, nebo jiného plastu rovnou do procesu výroby. V dnešní době takto vyrábíme například různé typy ručních nástrojů, kryty s kovovými vložkami nebo například zubní kartáčky. [11, 7, 1, 14]

### 4.2.1 Princip a popis vstřikování

Granulát se v tomto případě dopraví přes dávkovací zařízení a roztaví v tavicí komoře a vstříkne se, nejčastěji pomocí pístu do předpřipravené formy. Vstříkнутá tavenina poté odevzdá teplo formě a dochází k tunutí. Aby nedošlo k deformacím spojených se snižováním teploty je forma do doby ochlazení pod tlakem. Tavicí komora bývá nejčastěji osazena pístovým nebo šnekovým mechanismem. Tyto mechanismy zlepšují kvalitu vstřikovaného PE a zaručují jeho dokonalé promíchání, prohrátí a zároveň snižují riziko přehřátí PE a jeho možnou následnou degradaci.

Jakmile je materiál dostatečně ochlazen dojde k otevření formy a vyjmutí, případně automatickému vysunutí materiálu pomocí vyhazovačů z formy ven. Forma je poté dále ošetřena pro další použití. V průběhu celého procesu je forma ochlazována nejčastěji kanálky uvnitř formy. Chladicí médium může být demineralizovaná voda nebo olej.

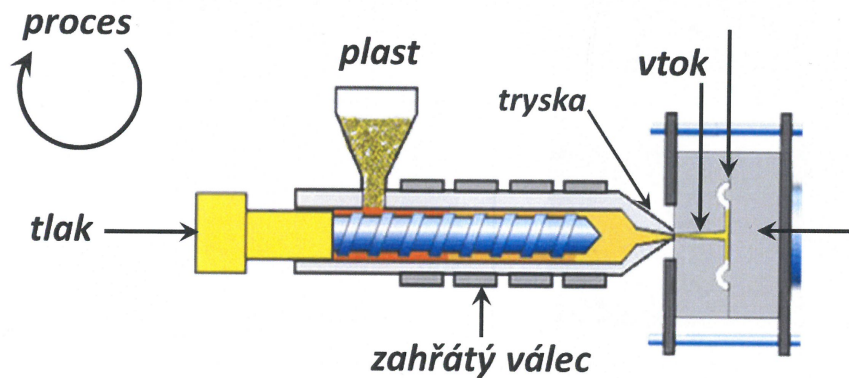
Celý pracovní cyklus v závislosti na velikosti formy, množství vstříkнутé taveniny a složitosti zabere okolo jednotek, někdy desítek vteřin.

Forma stroje je pro každý typ výrobku jedinečná. Obsahuje vtokové kanálky, nálitky, nebo například odvzdušňovací prostory. Pro formu také platí pravidla pro zaoblení jednotlivých rohů formy nebo nejmenší možné tloušťky pro díry uvnitř formy. Podle množství vyráběných výstřiků se formy vyrábějí buď to z epoxidu, hliníku nebo pro velkosériovou výrobu z oceli, nejčastěji cementační třídy 12 a 14. Na nejvíce namáhané části poté využíváme oceli nástrojové třídy 19.

Požadavky na stále modernější stroje jsou nejčastěji v dostatečném tlaku a kontroly směsi. [11, 7, 1, 14]

#### 4.2.2 Rozdíl vstřikování PE-HD a PE-LD

PE obecně je velmi vhodný materiál pro vstřikování. Jeho mechanické vlastnosti umožňují vyjímání výstřiku z formy i přes vedlejší výstupky, které se nacházejí mimo směr otevírání formy. U PE-HD se tato možnost díky vyšší pevnosti snižuje. Vždy nejčastěji v závislosti na makromolekulární struktuře, stupně krystalinity atd. PE-LD umožňuje proto lepší vyjímatelnost z formy. [1, 11, 14]



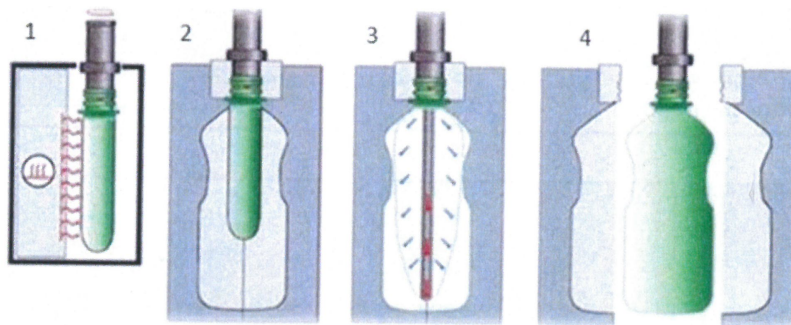
Obr. 18 Vstřikovací stroj [1]

#### 4.3 Vyfukování

Je technologický proces zpracování, ve kterém je vstupní surovinou předpřipravený polotovar, preforma. Ten vstupuje do formy ohřátý a je poté za pomoci tlaku v uzavřené formě vyfouknut do požadovaného rozměru. Nejčastěji tuto technologii využíváme pro vznik různých tvarů lahví nebo folií. Technologie se dá kombinovat i s procesem vytlačování, kdy extruder polotovar předpřipraví a není tak potřeba preformy využít. Proces je buď to cyklický nebo kontinuální v závislosti na stupňovitosti výroby. Automatizace je u této technologie samozřejmostí. [11, 1, 14]

##### 4.3.1 Princip a popis vyfukování

Technologie spočívá v dloužení materiálu s následným vyfouknutím na stěny formy. Existují dvě varianty vyfukování, a to varianta jednostupňová a dvoustupňová. Jednostupňová varianta s využitím procesu vytlačování a poté vyfukování v jedné formě. Varianta dvoustupňová s využitím preformy, kterou si továrna předem vyrobí nebo nakoupí. Formy jsou kovové a v průběhu dochází k jejich ošetřování a chlazení vodou nebo vzduchem. [1, 11,14]



Obr. 19 Dvoustupňová varianta vstřikovacího zařízení [1]

## 4.4 Válcování

Válcování je další možnou technologií zpracování PE-HD. PE-LD se válcováním nezpracovávají, zejména díky tomu, že je velký problém se zvýšenou přilnavostí k povrchu válců. PE-HD má ale teploty tání a skelných přechodů umístěné výše. Proto se ke zpracování válcováním využít dá. Válcováním vyrábíme především fólie. [11,14]

### 4.4.1 Princip technologie

Granulát se nejprve smíchá s aditivami, nejčastěji oleji. Které umožní jeho lepší plastifikaci. K té dochází ohřátím granulátu ve dvouválcí při 150–160 °C po dobu okolo 10 minut. Válcování posléze probíhá na tříválcí. Získaná fólie dosahuje tloušťek okolo 0,3 až 0,8 mm. [11,14]

## 4.5 Nanášení

Pro specifické použití se PE nanáší na nosiče v podobě papíru, tkanin nebo celofánu. Vytváří tak spojení s dobrou mechanickou a chemickou odolností. [11,14]

### 4.5.1 Princip

Nanášení probíhá různými způsoby. Buď to probíhá z roztoku, ve kterém je PE za pomoci rozpouštědla rozpuštěn, přičemž výpary rozpouštědla jsou absorpčním zařízením vráceny zpět a recyklovány. Nebo se využívá taveniny. U výroby nanášením z taveniny rozlišujeme proces hlavně podle toho o jaký PE se jedná. U PE-LD je tavenina dostatečně tekutá, a tak je možné využít stejných strojů jako pro nanášení roztokem. U PE-HD je tekutost nižší a tak je zapotřebí nožových natíracích strojů, které rovnoměrně taveniny na páscech rozprostřou. [11,14]

## Výroba pásků a vláken

Výroba vláken není u PE obvyklá, v minulosti se využívala v minimální míře, jelikož tenká vlákna z PE-LD měla malou tepelnou odolnost se špatnými mechanickými vlastnostmi a to i přes jejich dobrou chemickou odolnost. S nástupem PE-HD došlo ke zvýšení mechanických vlastností a tepelných odolností se zachováním odolnosti chemické. To samé platí i pro výrobu pásky. Dnes se pásky a vlákna vyrábějí dvěma způsoby.

Tím prvním způsobem je výroba pásků a vláken za pomoci technologie vytlačování. Využitím šnekového vytlačovacího stroje s hlavou s tenkou štěrbínou vznikají vlákna nebo pásky dle nastavení. Ihned po vytlačení z extruderu dochází k ochlazení vlákna (pásky). Aby se při následném namáhání materiál neprotahoval je zapotřebí jej dlužit v odtahovacím zařízení. Poté je materiál protažen temperační jednotkou, zde dojde k orientaci materiálu a následně se materiál stabilizuje v lázni druhého odtahového zařízení.

Druhým a dnes častějším způsobem výroby vláken a pásků je využití monoaxiálně orientovaných folií z PE-HD. Folie jsou na řezacím stroji nařezány na stejně široké pásky. Tyto pásky se poté dále temperují a orientují v dlužícím zařízení. Tento krok přidá páskům své specifické mechanické vlastnosti. Pokud mají být výsledným produktem vlákna, jsou pásky dále rozštěpeny. [14, 23, 8]

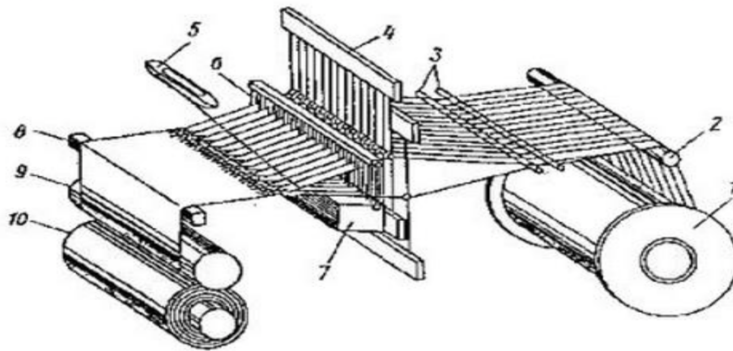
### 4.5.2 Výroba folií

Folie jsou vyráběny jak technologií vytlačování, tak technologií vyfukování.

Pro technologii vytlačování se využívá širokoštěrbinové hlavy, do které je z vytlačovacího stroje pod tlakem přivedena tavenina PE-HD. Volba vytlačovací hlavy tavenině určuje finální tvar. Pás taveniny vycházející z hlavy extruderu je poté odtažen tříválcovým chladícím strojem. V chladících válcích dojde k rychlému ochlazení taveniny. Rychlost ochlazování má významný vliv na získané výsledné mechanické a optické vlastnosti folie. Proto je důležité, aby mezi ochlazovacími válci a odtahovaným pásem folie byl dobrý kontakt. Čím menší tloušťku folie má, tím snadněji dojde k jejímu ochlazení. Po ochlazení přechází folie do válečkového dopravníku. Poté dojde k oříznutí okrajů folie na stanovenou vzdálenost. Takto vyrobené folie navijíme rovnou do svitků nebo nařezeme na předem stanovenou velikost a ukládáme na sebe.



Pro zjednodušení si na obrázku č. 21 ukážeme, jak výroba tkanin s jednoduchým vzorem na základním tkalcovském stavu probíhá. Pro tkaniny s malým počtem osnovních nití, pásků je zapotřebí dvou listů. Pohybem listů nahoru a dolů v horizontální ose vzniká mezi pásy pásku a nití klínovitá mezera. Mezi tuto mezeru se za pomoci člunku zanesení útek, který vytváří nový paprsek. Jakmile projde útek celou délkou klínovité mezery je paprsek přiražen za pomoci bidla směrem k čelu tkaniny. Následně dojde k prohození směru pohybu listů. Mezera vznikne na druhé straně a znovu dojde k protažení člunku a vytvoření nového útku. Proces se neustále opakuje a vzniklá tkanina se navíjí na svitek. [24, 14, 12]



Obr. 21 Schéma tkalcovského stroje [24]

## 5 Mechanické vlastnosti polymerů

Polymery jsou velmi specifický materiál. Na rozdíl od kovů požadujeme od polymerů odlišné materiálové vlastnosti. Například tvrdost polymerů není ve většině aplikací rozhodující. Mechanické vlastnosti polymerů dělíme podle časového hlediska na vlastnosti krátkodobé a dlouhodobé. Mechanické charakteristiky dále dle směru působení síly a dle rychlosti jakou je tato síla na zkušební těleso vyvinuta. Rozhodující mechanicko-fyzikální vlastnostmi polymerů jsou:

- Pevnost
- Houževnatost
- Tažnost
- Ohybová tuhost
- Vzpěrná tuhost
- Otěruvzdornost

Stanovení krátkodobých vlastností netrvá déle než několik minut. U dlouhodobých materiálových vlastností je potřeba materiál zkoušet násobně déle, a to až k hranici  $10^5$  hodin.

U polymerů obecně je deformační chování složitější, než je tomu u materiálů kovových. Hlavní deformace zde tvoří pouze složky elastické (vratné) a plastické (nevratné) ale také složka vysoko-elastická. Ta se nejvíce projevuje právě u zkoušek dlouhodobých, například u creepu, česky tečení.

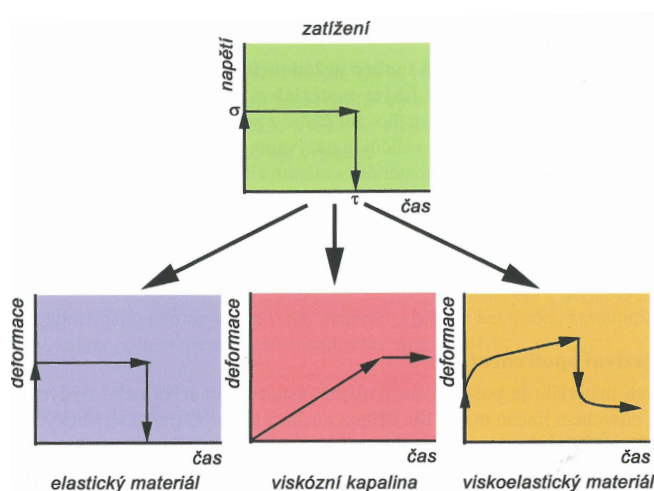
Polymery se ve většině případu při krátkodobém zatěžování chovají jako pevný a tuhý materiál. Jakmile je ale budeme zatěžovat stejnou silou dlouhodobě, zjistíme, že deformace budou ve výsledku větší a materiál bude více tvárný, právě díky vysokoelasticitě. Proto při navrhování a dimenzování materiálu z polymerů vycházíme především ze vlastností dlouhodobých. Ze získaných krátkodobých vlastností není možné vycházet. Zkoušení poté probíhá nejlépe přímo na hotovém výrobku za podmínek, které se nejvíce budou podobat podmínkám provozním. [13, 25, 4]

## 5.1 Vysoko-elastické chování polymerů

Vysoko-elastické chování způsobuje u polymerů tečení již za standardních teplot. Polymery se tak chovají jako viskózní kapaliny a z části jako elastická tělesa. Pokud vysokoelastický materiál okamžitě zatížíme, získáme dvě složky deformační odezvy.

Složku elastickou okamžitou a složku pomalou následnou, která je v materiálu trvalá.

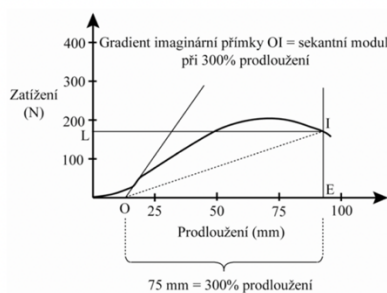
Rozdíl mezi elastickou, viskózní kapalinou a vysoko-elastickou látkou můžeme pozorovat na obrázku č. 22. Vidíme zde rozdíl při odlehčení napětí a následnou odezvu materiálu. [4, 2, 1]



Obr. 22 Porovnání chování různých typů materiálů [4]

## 5.2 Zkoušky krátkodobých vlastností polymerů

Na začátku zkoušek tahem, tlakem i ohybem se u polymerních materiálů může na začátku grafu vyskytnout nelineární oblast. Nazýváme jí patou grafu. Důvodem nejčastěji bývá uvolnění v různých místech přenosu síly nebo prokluzování. Proto je na grafu často provádět korekci. Korekci provedeme u lineární paty jejím prodloužením k ose X. U paty nelineární vyhledáme inflexní bod a vedeme jím přímkou znovu k ose X. Od průsečíku přímek a osy X poté odměřujeme vzdálenosti a bereme bod jako bod tzv. nulové deformace. [9]



Obr. 23 Kompenzace paty v grafu [9]



### 5.2.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška ověřuje tahové vlastnosti polymerů. Tahové vlastnosti polymerů jsou jejich důležitou základní charakteristikou. Zkušební těleso je u tahové zkoušky uchyceno v čelistech stroje a natahováno. Pokud zkušební těleso namáháme jednoose, je možné průběh normálového napětí sledovat pomocí deformační křivky. Tato křivka vychází ze záznamu, který se ukládá do grafu. Graf má vždy dvě osy a zaznamenává průběh působící síly v závislosti na poměrném prodloužení zkušebního tělesa. Síla se na tahovém stroji zaznamenává pomocí dynamometru. Poměrné prodloužení nejčastěji pomocí pohybu příčnicku zkušebního stroje.

Pokud budeme zkoušet charakteristiku daného materiálu, a ne již vyrobeného produktu, bude zapotřebí nejprve vyrobit zkušební těleso. Zkušební těleso má přesně dané parametry, které by se měli dodržet. Zkušební tělesa z termoplastů připravujeme lisováním, vstřikováním, případně obráběním.

Výrobu zkušebních těles specifikují následující normy:

ČSN EN ISO 293:1992 – výroba lisováním

ČSN EN ISO 294-1:1999 – výroba vstřikováním

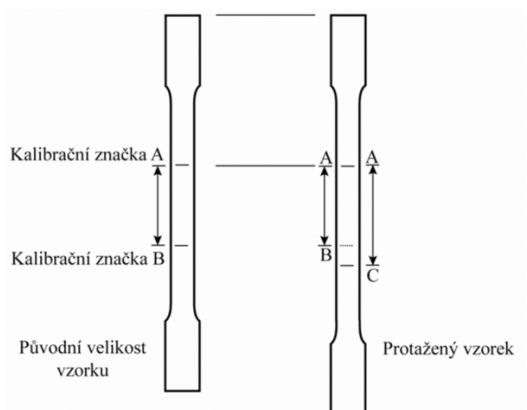
ČSN EN ISO 2818:1998 – výroba obráběním

Přesnou metodiku a stanovení charakteristik z tahové zkoušky uvádí následující dvě normy:

ČSN EN ISO 527-1 – uvádí základní principy tahové zkoušky

ČSN EN ISO 527-2 – uvádí podmínky pro tvářené plasty

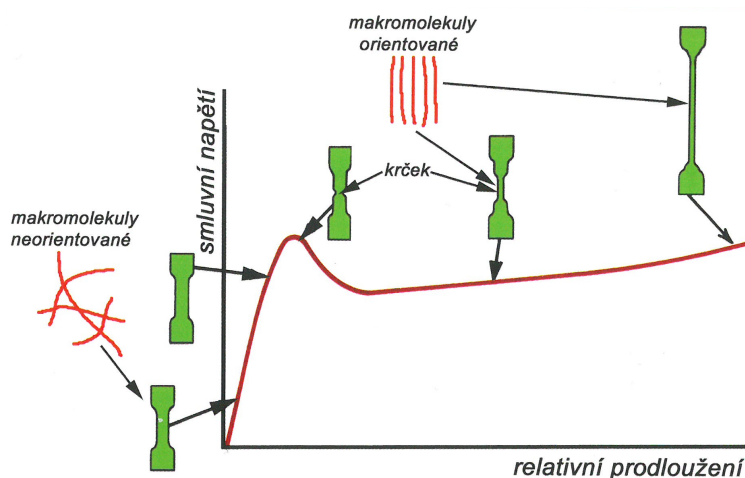
Celkově existuje až 6 typů standardních zkušebních těles ale nejčastěji se využívá typ 1A. Tvar zkušebního tělesa je uveden na obr. č. 24. Na tělísku rozlišujeme dvě základní části, část pracovní a část upínací. Na část pracovní zpravidla upínáme snímače, které měří prodloužení. Tím je zaručena objektivnost měření, jelikož průřez v pracovní části je všude stejný. Čím větší upínací délka tělíška je, tím přesnější výsledky jsou. Pokud snímač nejde z důvodu kluzkého povrchu přichytit, je zapotřebí do materiálu udělat zářezy. Poté je ale potřeba tyto zářezy průběžně kontrolovat, aby nezasahovaly do výsledků zkoušek. [9, 4, 5, 6]



**Obr. 24 Základní tvar zkušební tělíska pro tahovou zkoušku [9]**

Extenzometry zpravidla využíváme do 50 % celkového prodloužení zkušební tělíska. Pokud testujeme určitou sérii různých zkušebních těles je zapotřebí umístit snímače na stejné místo. A to především ze dvou důvodů. Tím prvním je, že se těleso neprodlužuje rovnoměrně. Uprostřed vzorku je prodloužení zpravidla větší než na krajích vzorku. Druhým důvodem je skutečnost, že dochází k mírnému pohybu tělesa v čelistech. Aktuálně se snímače vyrábějí jak dotykové, tak bezdotykové (laserové, optické).

Z výsledků tahových zkoušek je možné získat hodnoty smluvního napětí a poměrného či jmenovitého prodloužení. Na obr. č. 25 je typický průběh tahového zatížení termoplastů. Napětí roste do meze kluzu, poté dochází k oslabení van der Walsových sil a k orientaci makromolekul v ose tahu. Tím pádem k poklesu napětí a zvětšení prodloužení. Při vyčerpání slabých vazeb a přeorientaci makromolekul zbývají síly kovalentní, které způsobí další mírný vzestup napětí. Nakonec dochází překonání síly k vytvoření nového povrchu a k lomu v materiálu. Nejčastěji na místě s největší koncentrací napětí, tedy s defektem. [9, 4, 5, 6]



**Obr. 25 Stádia deformace polymerního materiálu [4]**

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad [2]$$

$F$  ... síla N

$S_0$  ... průřez tělesa mm<sup>2</sup>

Hookův zákon elasticity říká, že deformace je přímo úměrná napětí a platí pouze do lineární závislosti, na grafu označené jako lineární křivka závislosti napětí na prodloužení.

$$\sigma = E * \varepsilon [Pa] \quad [3]$$

$\sigma$  ... normálové napětí Pa

$E$  ... Youngův modul pružnosti Pa

$\varepsilon$  ... relativní prodloužení bezrozměrná jednotka

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} [ ] \quad [4]$$

$\Delta L_0$  ... zvětšení počáteční měřené délky zkušebního tělesa mm

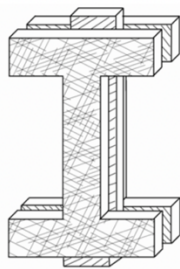
$L_0$  ... počáteční délka mm

Tažnost neboli relativní prodloužení převedené na procenta.

$$A = \varepsilon * 100 [\%] \quad [5]$$

### 5.2.2 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška je opakem zkoušky tahové. Při této zkoušce je zkušební těleso stlačováno silou na jeho plochu. V závislosti na tloušťce rozlišujeme dva typy zkušebních těles. První typ A, kdy tělísko má více jak 3,2 mm a jeho délka je dvojnásobkem šířky a druhý typ B pro průměry menší. Tenká zkušební tělíska typu B je potřeba ochránit před možným ohybem a vybočením využitím protivzpěrného přípravku uvedeného na obr. č. 26. Tlakovou zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 604.



Obr. 26 Protivzpěrný přípravek [9]

Stlačení je vyhodnocováno pomocí kompresometru, zařízení je přímým opakem extenzometru. Data z něj poté zobrazujeme v grafu, kde sledujeme závislost síly na stlačení. Výsledkem měření je získání pevnosti v tlaku při lomu u tuhých materiálů a standartní pevnosti v tlaku u materiálů houževnatých. Podmínkou zkoušky je, že zkušební těleso musí být přesné a musí svírat s plochou stroje pravý úhel, dále musí být těleso vycentrováno, aby zatížení bylo v ose vzorku. Poslední podmínkou je zaručení, že zkoušené těleso bude mít maximální kontakt. Kontakt zaručujeme použitím kovových membrán, které jsou samo nastavitelné ve směru přenosu síly. [9,4]

### 5.2.3 Ohybová zkouška

Pro ohybovou zkoušku využíváme dvou způsobů její realizace. Tím prvním je zjištění ohybového zatížení pro vetknutý nosník a tím druhým je zjištění ohybového napětí pro opřený nosník (bodový ohyb). Technologie opřené nosníku je nejvyužívanějším typem ohybové zkoušky. Vzorek je staticky podepřen ze spodní strany zleva i zprava. Zatěžování probíhá ze strany opačné. Zatížení může být jedno, ale i dvou bodové. Graf vzniká vynesemím hodnoty průhybu závislého na využitém napětí.

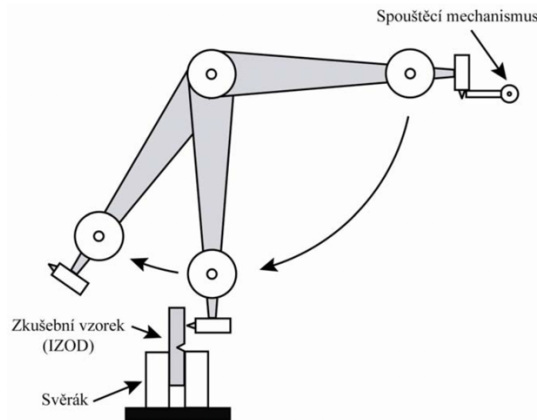
Na rozdíl od tahové a tlakové zkoušky můžeme pozorovat rozdíly v homogenním a nehomogenním vzorku. Napjatost je totiž u ohybové zkoušky největší na povrchu. V případě, že nedojde u vzorku k porušení, je zaznamenána hodnota dosažená při limitní deformaci (5 %). [9]

### 5.2.4 Zkouška rázová

Rázová zkouška je zkouškou krátkodobou dynamickou. Pro provedení rázové zkoušky využíváme metody dle Charpy ČSN EN ISO 179 nebo dle Izoda ČSN EN ISO 180. Zkušební tělesa jsou opatřena přesně definovaným vrubem a velikostí. Krátkodobým dynamickým zatížením dojde k iniciaci trhliny a následnému dolomení. Měřením získáme energii potřebnou k přeražení zkoušeného tělesa, tedy houževnatost. Lom poté dále vyhodnocujeme a určujeme podíl houževnaté a křehké oblasti.

Zkušebními zařízeními jsou kyvadlové stroje s tloukem. Kyvadlo s tloukem je v určité výšce zajištěno, vzorek je vložen do předem stanoveného otvoru (Izod) nebo předem definovaného dvoubodového uložení (Charpy). Poté dojde k odjištění a přeražení vzorku tloukem. Ten poté vystoupá na opačné straně do určité výšky. Výška se odečítá za pomoci stupnice, která se nachází v ose kloubu kyvadlového stroje. Po odečtení tak získáme práci potřebnou k přeražení vzorku.

Podle umístění vrubu rozlišujeme přípravu na širší či užší stranu. Dále podle tvaru na U nebo V vrub. [9]



Obr. 27 Rázové kladivo a zkouška dle Izoda [9]

### 5.2.5 Smyková zkouška

Existuje několik typů zkoušení smyku v polymerních materiálech. Nejčastěji se využívá metody trhání. Tato metoda je zmíněna, jelikož se využívá především u fólií.

Technologie provedení metody je obdobná jako u metody tahové. Zkušební tělísko je umístěno do stroje a natahováno opačným směrem. Rozdílem je geometrie zatěžovaného zkušebního tělíska, která je přesně daná. Uprostřed se nachází ostrý 90° úhel. Geometrie je patrná na obr. č. 28. Zkoušku specifikuje norma ČSN EN ISO 6382-1 a -2.



Obr. 28 Geometrie zkušebního tělesa pro smyk [9]

Další možnou metodou je využití metody, kdy zkušební vzorek je naříznut žiletkou a dvě “nohavice“ vzorku jsou natahovány proti sobě. [9]

### 5.2.6 Další metody krátkodobých testů polymerů

- **Zkouška rázem v tahu** – Obdobná zkouška rázové metody, s tím rozdílem, že těleso je zatěžováno dynamicky na tah.

- **Zkouška padajícím závažím** – Zkušební těleso kruhového nebo čtvercového průřezu je položeno nad důlek do kterého ze stanovené výšky dopadne kulový trn. Zatížení kulového trnu se mění. Měříme deformace, případně míru roztržení u křehkých polymerů. Metoda není často využívána díky nepřesnostem.
- **Zkoušení povrchových vlastností** – U polymerů můžeme měřit například tvrdost, opotřebení nebo tření.

Tvrdost velice podobně jako u materiálů kovových. S násobně nižším zatížením a indentorem nejčastěji ve formě kuličky.

Opotřebení se provádí u průhledných zkušebních materiálů. Kruhová destička je u této metody obrušována brusnými kolečky. Vyhodnocujeme množství procházejícího světla před a po provedení zkoušky.

U tření je zkušebním tělesem pás polymerního materiálu, na kterém se nacházejí “sáně“ ze stejného nebo jiného materiálu. Saněmi je po povrchu pohybováno a stanovujeme statický, případně kinetický koeficient tření vztažený k hmotnosti sání. [9]

### 5.3 Zkoušky dlouhodobých vlastností polymerů

Velmi důležité zkoušky pro navrhování a dimenzování dílů z polymerních materiálů jsou právě zkoušky dlouhodobé.

#### 5.3.1 Tečení

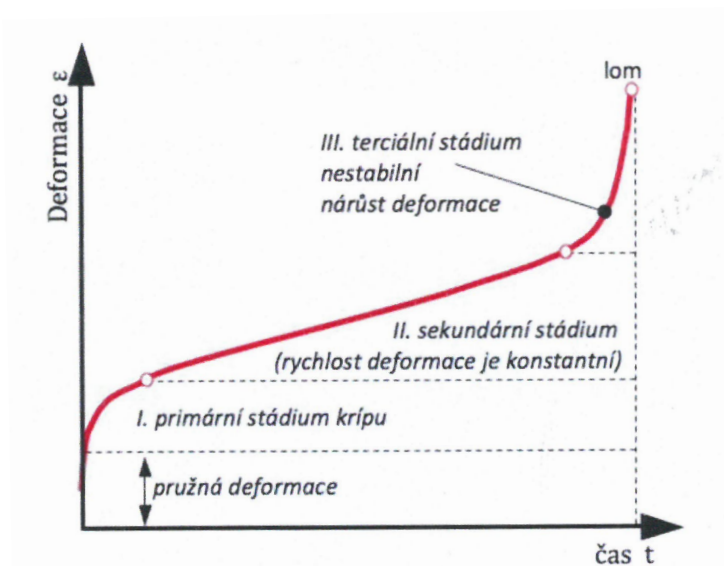
Česky tečení, někdy označená zkouška jako creep. Zkouška dlouhodobým zatížením vzorku sleduje nevratné změny vyvolané důsledkem viskózní deformace. Zkoušku stanovuje norma ČSN EN ISO 899. U této zkoušky není požadováno testování do porušení. Na rozdíl od kovových a keramických materiálů dochází k malému tečení již za běžných teplot.

Existují tři typy zkoušky tečení. Nejčastěji využívanou je zkoušení tečení v tahu, dále v ohybu a tlaku.

Při všech těchto zkouškách je zapotřebí dlouhodobě pozorovat a zaznamenávat změny v pohybu zkušební tělesa pod konstantním zatížením.

U tahové a ohybové zkoušky je počítat s tím je, že je nejprve důležité zjistit hodnoty meze pevnosti materiálů. Poté nejčastěji experimentálně realizovat krátkodobější testy zatížení s různou zátěží. Zátěž pravidelně snižovat a pozorovat změny v tečení materiálu. Důležité je také zvolení správného snímače deformace pro konkrétní potřeby. Z těchto hodnot posléze sestavit graf a uvažovat získané hodnoty v případném chování v životnosti navrhovaného dílu.

Průběh tečení materiálu zaznamenává závislost relativního prodloužení na čase. Přičemž rozlišujeme dva typy průběhů. Tím prvním je průběh, kdy zatížení je nízké a proces tečení se po určité době zpomalí, případně úplně zastaví. Průběhem druhým naznačeným na obr. č. 29 je zatěžování již dostatečným napětím společně se zvýšenou teplotou a výsledkem je konstantní vzestup deformace (tečení materiálu), zakončené lomem. [9, 1, 4, 6]



Obr. 29 Obecná křivka tečení [1]

Z grafu můžeme vyčíst pásmo označené jako sekundární tečení. Sekundární tečení je fáze, která probíhá přibližně podobnou rychlostí. Rychlost tečení je závislá nejvíce na teplotě a na napětí. Relativní prodloužení je možné vypočítat pomocí rovnice níže uvedené.

$$\varepsilon = K * \sigma^n * \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad [6]$$

Q – aktivační energie tečení

k – Boltzmannova konstanta

K – materiálová konstanta

n – koeficient hodnot od 1 do 20

Pokud je teplota konstantní, vyjadřuje se rovnice v logaritmickém tvaru.

$$\log \varepsilon = C + n \log \sigma \quad [7]$$

U termoplastů probíhá tečení pomalu. Postupně dochází k přeskupování makromolekul ve směru zatěžování. To je projevem především vysoko-elastického chování. [9, 1, 4, 6]

### 5.3.2 Relaxace

Je opačnou zkouškou zkoušky tečení. Zkouška reprodukuje vývoj součásti, která je konstantně zatěžována po delší dobu. Metody vhodná pro testování polymerních materiálů využívaných jako materiály těsnící.

Firmy vyrábějící termoplasty často tuto zkoušku provádí, ale nespolehají na ní tolik jako na zkoušku tečení. Zkouška relaxace je prováděna zkouškou HDT tedy zjištěnou teplotou průhybu při ohřevu.

U zkoušky HDT je zkušební těleso ponořeno do olejové lázně a tříbodově zatíženo na ohyb. Přičemž sledujeme průhyb zkušebního tělesa. Dochází ke zvyšování teploty lázně. Průhyb se zvětšuje a při dosažení hodnoty 0,25 mm se zkouška zastavuje a je stanovena hodnota HDT. Zkouška je velmi často automatizovaná. Ohřev nesmí překročit 2 °C/min. [9, 5, 4]

### 5.3.3 Zkoušky únavy

Zkoušky únavy spočívají ve střídání cyklického zatěžování a relaxace. U termoplastů je využíváno nízkých hodnot zkoušených napětí. Stejně jako u materiálů kovových vzniká únava iniciací trhliny, striaci, růstem trhliny s následným dolomením. Nejčastěji pro tento typ zkoušení využíváme namáhání tahem.

Zkušební těleso je stejné jako využívané pro zkoušku tahem. Zatěžování probíhá s nízkou frekvencí okolo 3 Hz. Těleso zatěžujeme silou pod mezí krátkodobé pevnosti. Napětí je vždy do přetržení a odečtení hodnoty cyklů stejné. Postupně jej snižujeme. Tím se zvyšuje počet cyklů. Získané hodnoty poté přeneseme do grafu a body vhodnou spojnicí trendu propojíme. Získanou křivku nazýváme jako křivka S-N. Zkoušku blíže specifikuje norma ČSN EN 64 0618. [9,5,4]



#### 5.3.4 Zkoušky stárnutí

U polymerů dochází vlivem vnějšího prostředí, především změnou teplot a působením UV-záření k poklesu mechanických a estetických vlastností. Stárnoucí proces nejčastěji ovlivňujeme výrobním procesem nebo vyztužováním.

Existuje velké množství zkoušek stárnutí. Většinou se jedná o zkoušky dlouhodobějšího charakteru. Záleží na vlastnosti materiálu, kterou budeme chtít na materiálu testovat. Obecně zkoušky stárnutí rozdělujeme do dvou hlavních skupin.

První skupinou je zatěžování zkušebního tělesa v korozních komorách. Korozní komory jsou zařízení, která jsou schopna reprodukovat a simulovat různé klimatické podmínky. Od záporných přes vyšší hodnoty teplot. Dále různé typy vlhkostí, salinitu, UV-záření, simulovat déšť atd. Díky korozním komorám jsme schopni cyklicky měnit prostředí, nastavit si podmínky zkoušení dopředu. Sledujeme v nich změnu materiálu před a po jejím vložení. Některé typy umožňují i sledování v průběhu.

Druhou skupinou jsou zkoušky, kde je materiál ponořen do média, nejčastěji o zvýšené teplotě a konstantně zatěžován do porušení. [9,4,19]

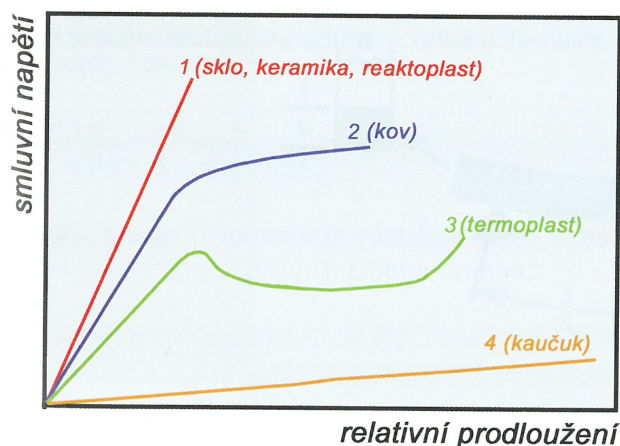
## 6 Mezní stavy

Mezní stavem polymeru rozumíme jeho degradaci při jeho používání. Označujeme jej jako soubor nežádoucích změn, díky kterým se materiál pro danou aplikaci stane nevyhovujícím. Zkoumání mezních stavů je důležitým předpokladem k vytvoření výrobků, které budou schopny odolávat veškerým vnějším i vnitřním vlivům. A to minimálně po dobu jejich předpokládané životnosti.

Mechanické, chemické, teplotní, a vysoce energetické zatěžování jsou nejčastějším důvodem degradačního procesu. [4, 2, 8]

### 6.1 Trvalá deformace

Deformací rozumíme změnu tvaru materiálu nejčastěji vlivem mechanického namáhání. To jak velkou velikost deformace získáme závisí především na délce, druhu a velikosti namáhání. Druhy namáhání byly již podrobně specifikovány v předchozích kapitolách práce. Nejčastějším typem namáhání v praxi je jejich spojení. V některých částech tak může docházet, k tahu, v jiných k tlaku, krutu, ohybu nebo smyku.



Obr. 30 Tahové diagramy různých materiálů [4]

Oproti pružné (elastické) vratné deformaci se materiál do původního tvaru nevrací. U termoplastů je trvalá deformace spojená se získáním nevratné orientace makromolekul. Té je umožněno díky slabým van der Walsovým silám. U zatíženého termoplastu tak začne vznikat tzv. krček, což je jeho zúžení. Tím dojde k přechodnému poklesu smluvního napětí. Makromolekuly se dále usměrní a základní pevné kovalentní vazby způsobí, že materiál se stává mechanicky odolnější. Velikost těchto fází je závislá na zvolené výrobě, zejména využití postupu dloužení a temperování, dále na typu mikrostruktury a podílu krystalické fáze.

Modul pružnosti je obecně u termoplastů velmi malý. Se zvyšující se teplotou se ještě snižuje. [4, 2, 1, 8]

### 6.1.1 Mez kluzu

Mez kluzu je stanovena jako napětí, které je potřebné k získání trvalé deformace materiálu. Přičemž rozlišujeme mez kluzu smluvní a výraznou. Výrazná mez kluzu je maximum získaného napětí z tahového diagramu. Nejčastěji se ale využívá mez kluzu smluvní, jelikož ta je ve většině případech rozhodující. Ta se stanovuje jako 0,2 % meze kluzu výrazné. Značíme jí jako  $R_{p0,2}$ .

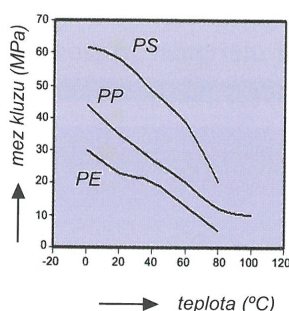
Mez kluzu je ovlivněna několika zásadními faktory. Nejdůležitějšími faktory jsou vliv teploty, rychlost zatěžování a struktura materiálu.

#### 6.1.1.1 Vliv struktury

Struktura makromolekul s velikostí podílu krystalické fáze hraje velkou roli při ověřování meze kluzu. Mez kluzu zvyšujeme u termoplastů technologickými postupy výroby a aditováním plnivů nebo vyztužovačů.

#### 6.1.1.2 Vliv teploty

Mez kluzu s rostoucí teplotou u termoplastů klesá. Z grafu je patrné, že přechod do skelné fáze znamená významný skok a snižování meze kluzu u termoplastů.



Obr. 31 Závislost meze kluzu PE na teplotě

#### 6.1.1.3 Vliv rychlosti zatěžování

Pro získání plastické deformace je důležité, aby došlo k přeskupení makromolekul ve směru namáhání a povolení van der Walsových sil. K přeskupení je zapotřebí určitý čas. Jakmile zvýšíme rychlost zatěžování, zvýšíme tak i plastickou deformaci a mez kluzu také poroste. Při velmi vysoké rychlosti zatěžování se proto termoplasty mohou zachovat jako materiály křehké.

Pro výpočet meze kluzu v závislosti na rychlosti využíváme následujícího vzorce. Kde rychlost zatěžování  $\dot{\epsilon}$  je definovaná jako relativní deformace  $\epsilon$  za čas  $\tau$ .  $K$  je konstanta a  $m$  koeficient, který vyjadřuje citlivost materiálu na rychlost zatěžování. [4, 2, 1, 8]

$$R_p = K * \varepsilon^m \quad [8]$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\tau} * \varepsilon \quad [9]$$

### 6.1.2 Lomy

Tahové diagramy končí lomem zkušebního tělesa. Laboratorní podmínky jsou ale velice odlišné od podmínek reálných. Velikosti zkušebních těles neodpovídají reálným tvarům, jsou vhodné vyloženě jen pro porovnání s materiály jiného druhu. Velmi často tak dochází k lomům i před překročením meze pevnosti, někdy i meze kluzu.

#### 6.1.2.1 Vliv defektů

Defekty jsou v materiálech přítomny vždy. Pečlivou kontrolou výroby a správně zvolenými parametry výroby můžeme docílit ke snížení defektů, ale nikdy ne k jejich 100 % eliminaci. Nejobvyklejšími vlivy jsou:

- Vrypy a rýhy
- Póry a dutiny
- Nečistoty
- Mikrotrhliny

Defekty jsou v materiálu koncentrátoři napětí a budou s největší pravděpodobností iniciátory vzniku lomu. [4, 2, 1, 8]

## 6.2 Únava

Únava materiálu je souborem postupných změn vlastností vlivem vnitřních či vnějších namáhání. Únavu rozdělujeme podle typu zatížení na statickou a dynamickou. V reálných podmínkách narazíme nejčastěji na únavu dynamickou. Dochází tedy ke změnám namáhání v průběhu životnosti materiálu.

Známe tři základní stupně únavy:

- V prvním stupni dojde ke změnám mechanických vlastností materiálu.
- V druhém stupni dojde k iniciaci únavové trhliny.
- V posledním stádiu dojde k pomalému růstu trhliny a k dolomení materiálu. [4, 2]

## 6.3 Stárnutí polymerů

Stárnutí polymerů, neboli jeho degradace je souhrnem všech nevratných změn, které materiál v průběhu jeho života potkají. Rychlost a sílu degradace ovlivňují faktory, které jsou závislé na chemické struktuře polymeru. Degradaci polymerů zvyšujeme přidávkem látek, které chemickou strukturu vylepší. Mohou jimi být například plnidla, změkčovadla, stabilizátory a další.

Stárnutí rozdělujeme podle typu degradace na vnitřní a vnější. Pro vnitřní skupinu jsou typické změny ve vnitřní struktuře jako jsou uvolnění vnitřního napětí nebo odloučení fází. Mezi vnější řadíme takové, u kterých lze na první pohled vyzorovat určité změny. Jsou jimi například únavové praskliny, termooxidace, fotooxidace, nebo různé povrchové vady.

Obecně mezi nejdůležitější vlivy, které způsobují stárnutí polymerů patří: kyslík, ozon, teplota, mikroorganismy, voda, světlo a atmosferické nečistoty. Pro praktickou část práce budou stěžejní především typu termo a foto oxidace za působení vody. Ostatní budou zmíněny pouze okrajově. [4, 7, 2, 19]

### 6.3.1 Biologická koroze

Hlavní příčinou vzniku biologické koroze je vliv mikroorganismů jako jsou bakterie, živočichové či plísňe. Nejčastěji bývají napadány polymery přírodního původu, případně polymery, kterou jsou aditované přísadami přírodního původu.

V dnešní době se biologické koroze využívá v náš prospěch a je velkým tématem možné náhrady plastových materiálů každodenní potřeby, nejčastěji těch jednorázových. Existují proto materiály, biopolymery na bázi škrobu jako je například PLA vzniklý z kyseliny polymléčné. Tyto materiály jsou poté v přírodě rozložitelné a nezatežují tak tolik životní prostředí. [24]

### 6.3.2 Koroze v kapalinách

Polymery jsou všeobecně poměrně odolné vůči vodným roztokům. Často je proto nalezneme tam, kde by kovy selhaly. Princip koroze v kapalinách spočívá v bobtnání polymeru. Tento jev je způsoben molekulami kapaliny, které způsobí oddálení makromolekul polymeru od sebe.

Jednoduchou pomůckou pro zjištění koroze příslušného polymeru v kapalinách slouží určení a porovnání polaritý látek. Jakmile jsou rozdílné, s největší pravděpodobností nebude k bobtnání docházet. Voda je látka polární. PE, stejně jako polypropylen nebo polystyren látkou nepolární. Voda jej tedy nebude narušovat. [4, 24]

### 6.3.3 Vliv ozonu

Vliv ozonu je nebezpečný hlavně pro kaučuky, kterým způsobuje povrchové trhliny na jeho povrchu. Působení se týká především nenasycených kaučuků. Butylkaučuky nebo chloroprenové kaučuky jsou v násobku odolnější. [24]

### 6.3.4 Vliv nečistot v atmosféře

Nečistoty v atmosféře dělíme na plynné a tuhé. Tuhé za účasti povětrnostních podmínek polymery poškozují zejména abrazivně a zhoršují tak mechanické a estetické vlastnosti. Plynné látky typu oxidu síry, dusíku nebo uhlovodíku způsobují problémy polymerům, které jsou citlivé na hydrolyzu. Ve spojení se vzdušnou vlhkostí tak může docházet k rozkladu na monomery a tak k oslabení materiálu. [13, 26]

### 6.3.5 Fotooxidace

Neboli vliv světelného záření, nejvíce UV. Tedy ultrafialového záření s vlnovou délkou pod 400 nm. To v materiálu způsobuje narušení vazby mezi dvěma atomy a rozpad makromolekuly na celky, které poté snadno reagují s kyslíkem obsaženým ve vzduchu.

Při dopadu UV záření dochází k absorpci záření. Vazby se poté dostávají do excitovaného stavu a stanou se nestabilními. Vazby se snaží získanou energii deexcitovat nejčastěji právě rozštěpením vazby v makromolekulách. Celý proces je kyslíkem zesílen vznikem kyslíkatých sloučeniny, které jsou schopné záření ještě více absorbovat.

Fotooxidační stárnutí začíná vždy na povrchu, s časem prostupuje více do hloubky materiálu. Ve struktuře polymeru dochází k větvení a síťování makromolekul. Takto narušený materiál ztrácí svou pružnost a zvyšuje svoji křehkost. Postupně dochází k celkové destrukci polymeru.

Drtivá většina polymerů a výjimkou není ani PE-HD se řadí do skupiny polymerů, které mají nízkou odolnost vůči UV paprskům. UV-degradaci ale můžeme předcházet, a to aditováním materiálu sazeami,  $ZnO_2$ , nebo  $TiO_2$ . Částice poté v materiálu vytváří nepropouštějící bariéru, od které se UV paprsky odrazí nebo je absorbují a nevpustí tak do struktury polymeru. [4, 19, 2]

### 6.3.6 Termooxidace

Termooxidace je velmi zásadní degradační proces polymerů, který probíhá u termoplastů ve spojení působení zvýšené teploty a vzdušného kyslíku. Platí pravidlo, že se zvyšující se teplotou se nám zvyšuje i rychlost oxidace a snižuje korozní odolnost. Termooxidace probíhá krátce a intenzivně už při samotném procesu výroby, tu lze snížit využitím ohřevu ve vakuu.

Termooxidace je autokatalický proces, při kterém dochází ke vzniku hydroperoxidů a jejich rozkladných produktů. Ty poté tvoří a jsou iniciátory radikálové řetězové reakce. Proces má tři fáze.

- Fáze iniciační

Drtivá většina polymerů oxiduje za zvýšených teplot autooxidací, kdy dojde ke vzniku volného radikálu. Proto fáze iniciační.

- Fáze propagace

Reakcí radikálu a oxidu vzniká hydroperoxid.

- Fáze terminace

V této fázi probíhá další reakce volných radikálů vzniklých odštěpením za pomoci hydroperoxidu.

U PE-HD je proces velmi závislý na chemickém složení, struktuře materiálu a dále na zastoupení oxidů ve zkoušené atmosféře. Podíl amorfni a krystalické fáze značně ovlivňuje vývoj oxidace materiálu. První složka, která se pro oxidaci vyčerpá je složka amorfni. Amorfni složka proto chrání složku krystalickou před její tepelnou oxidací. Proto není jednoduché zvolit správnou vhodnost krystalinity, struktury, výrobního procesu a chemického složení pro danou aplikaci. [4, 2, 24]

## 6.4 Synergický efekt

Procesy stárnutí materiálu probíhají ve většině případů s kombinovaným typem degradace. Nejčastěji to může být spojení termooxidace s fotooxidací za působení konstantního namáhání. Vydrž materiálu do jeho porušení půjde tímto spojením násobně dolů. Tomuto jevu nazýváme synergickým efektem. [28]

## 7 Metody testování PE-HD síťovin dnes

Aktuálně používané metody testování PE-HD síťovin jsou velmi zdoluhavým a vždy ne 100 % přesným procesem. Proces testování dosud spočíval v odeslání vzorků nového typu síťoviny k zemědělcům, kteří se nachází v oblastech s vyšší průměrnou teplotou, než je v ČR obvyklá. Vybraní zemědělci poté za pomoci balíkovacího stroje seno síťovinou zabalí. Balíky naplněné senem poté nechají po delší dobu na poli vystavené místním podmínkám. Běžně okolo 3–6 měsíců. Po uplynutí smluvené doby balíky rozbalí a sítě zašlou zpět k otestování.

Většinou se provádí tahové zkoušky, před a po expozici. Hlavním problémem testování výroby nových typů materiálů síťovin je především doba potřebná k získání výsledků a porovnání se vzorky předcházejícími. Dalšími nevýhodami jsou:

- Možná chybovost při nesprávné manipulaci se vzorky a při transportu.
- Špatná reprodukovatelnost podmínek pro další vzorky. Nikdy nebudeme schopni reprodukovat podmínky u všech vzorků stejně.
- Znemožnění testování přímo ve výrobě.
- Drahá logistika.

Příklady výsledků získaných doposud využívanou metodou jsou uvedeny v tabulce č. 3. Výsledky pochází od výrobce síťovin Juta, která si nechala analýzu provést poté co bylo zjištěna zvýšená degradace materiálu vlivem zvýšených teplot a UV-záření. V tabulce uvedené tažnosti ukazují rapidní snížení tažnosti a pevnosti síťovin po expozici. V sloupci s názvem průměr balíku jsou uvedeny hodnoty zvětšení balíků za uvedenou dobu. Hodnoty označené tučně červeně jsou hodnoty referenční. [29]

Tab. 3 Vzorky získané uvedenou metodikou [29]

Pevnost		Tažnost		Průměr. Balíku	
zk. po 4 řetízích		zk. po 1 řetízku		po balení	25.02.21
[N]	[%]	[N]	[%]	XII.2020 [m]	[m]
1 458,56	9,2	1 504,29	8,7	1,55	1,7
1 507,43	15,7	1 359,02	10,3		
2 253,27	17,1			1,55	1,7
1 576,73	10,2				
1 789,20	15,8			1,55	1,8
1 188,72	14,0	1 524,76	12,2	1,5	1,8
1 414,78	10,9	2 228,86	15,5		
1 689,53	11,8			1,5	1,65-1,70
1 673,24	13,6			1,6	neuveveno
<b>2 156,30</b>	<b>17,1</b>	<b>2 404,67</b>	<b>18,1</b>		



## 8 Experimentální část

Praktická část diplomové práce se proto bude zabývat návrhem a testováním nové metody pro rychlé ověřování změn ve výrobě PE-HD sítí. V našem případě zkoumáním jednotlivých hlavních pásků, ze kterých se síť skládají. Funkčnost zvolené metody bude ověřena porovnáním síťovin vyrobených rozdílnými výrobci. Vyhodnocení experimentu proběhne jak v rovině samotného porovnání vzorků, tak bude zhodnocena metoda samotná a její využitelnost.

PE-HD síť mají velmi široké využití zejména v zemědělském a potravinářském průmyslu. Síťoviny se konkrétněji využívají k balení balíků slámy, k ochranně sadů a vinné révy před ptactvem. PE-LD poté většinou ve formě různých balících folií, ať už potravinářských, tak balících ochranných stretch folií.

### 8.1 Společnost Juta a.s.

V České republice je největším výrobcem síťovin společnost Juta, která má velmi široké pole působnosti. Společnost Juta je rozdělena do několika výrobních divizí. Každá se věnuje vlastnímu sortimentu produktů, ale základ, tedy zpracování polymerních materiálů zůstává stejný. Společnost vyrábí geotextilie, síťoviny, lana, motouzy umělé trávníky, netkané i tkané textilie, paropropustné folie, dále různé typy izolačních materiálů a mnohem více. Výrobku je nespočet. Juta má velkou výhodu, tím, že jsou schopni svými stroji zboží přidat velkou přidanou hodnotu. Příkladem může být právě výroba síťovin, která u nich probíhá od vytvoření samotné folie, přes nařezání, až po splétání do finálního produktu. Jednotlivé divize tak mezi sebou profitují a doplňují se.

Nejenom proto dnes firma dosahuje stamilionových ročních zisků a vyváží výrobky po celém světě. [29, 30]

### 8.2 Experiment

V práci bude testována a porovnávána síťovina společnosti Juta a.s. a to konkrétně vzorek společnosti Juta 42 a vzorek síťoviny Tama 41. Tama plastic industry holding ltd. je izraelská konkurenční společnost, která také vyrábí obdobné produkty jako společnost Juta a.s.

Experiment bude spočívat v porovnání mechanických dlouhodobých vlastností těchto sítí za pomoci zkoušek tečení. Dále dojde k porovnání maximálních napětí a tažnosti získaných z tahových zkouškách provedených před a po využití těchto vzorků při tečení. Také bude pozorována výsledná struktura a změny na vzorcích. Následně bude probíhat vyhodnocení zkoušek, metodiky a objasnění možných nedostatků materiálů a jejich pravděpodobných příčin.

### **8.3 Zvolený způsob testování**

Vzhledem k tomu, že polymery jsou látky vysoko-elastické a tato složka je důležitým parametrem pro výběr vhodného materiálu budoucího výrobku, tak jsou polymery velmi často zkoušeny na creep. Tečení je pomalá deformace materiálu, která se provádí ve specializovaných zkušebnách, kde je na vzorek působeno konstantním napětím za zvolených klimatických podmínek.

Pro praktickou část diplomové práce bylo využito korozní komory, ve které byly vzorky pásků síťovin konstantně cyklicky teplotně a vodní parou zatěžovány. Pro orientaci v problematice byla nejprve spočtena teoretická hodnota napětí na jednom prutu, pásku PE HD, kterou stlačené seno a sláma dokáže nejpravděpodobněji vyvinout. Poté byly jednotlivé pásy podrobeny tahové zkoušce. Z těchto zkoušek jsme napětí porovnali s vypočtenými a udělali sérii zkoušek tečení.

Abychom jsme měli co nejvíce relevantních dat pro naše zkoušení, bylo zapotřebí do korozní komory umístit co možná nejvíce vzorků zatížených rozdílnými hodnotami napětí. Proto bylo zapotřebí sestavit přípravek, který bude dostatečně tuhý, odolný agresivnímu prostředí a bude se na něj dát zavěsit vzorků co možná nejvíce.

Problémem druhým bylo vyřešit zajištění dostatečného počtu závaží, které se bude dát v průběhu dalších zkoušek měnit a upravovat podle potřeby.

#### **8.3.1 Stroje využití ke zkoušení**

Velmi důležitými zkušebními stroji pro naše experimenty byly korozní komora, trhací stroj, dále světelný a konfokální mikroskop použitý pro jejich následnou analýzu a porovnání.

### 8.3.1.1 Korozní komora

Pro simulaci prostředí se zvýšenou teplotou byla zvolena korozní komora německé společnosti VLM GmbH typ Climacorr CC 1000TL 40/80. Jedná se o jednu z nejvyšších řad korozních komor, které VLM vyrábí. Korozní komora se nachází přímo na fakultě ZČU a je uvedena na obr. č. 32.



Obr. 32 Korozní komora Climacorr společnosti VLM

Tento typ korozní komory umožňuje simulovat nejenom teploty od  $-30$  do  $+80$  °C, ale také vlhkost, tlak, pH a salinitu prostředí. Do zařízení se také dají napojit různé externí přístroje pro záznam z měření, případně zařízení, která by ovlivňovala průběh. Proces, podmínky, cykly a konečná délka pokusu se zadává přes dotykovou obrazovku přístroje. Ten si poté podmínky mění přesně tak, jak byly vyžádány. Vana přístroje je vyrobena z odolného sklolaminátu, a to proto, aby nedošlo vlivem koroze, teplot a soli k jejímu poškození. Zároveň prostor o objemu 1000 l je dostatečný pro provádění většiny, a i našich pokusů. [31]

### 8.3.1.2 Trhací stroj

Tahový neboli trhací stroj je zařízení určené k provádění tahových zkoušek. Na katedře materiálu se nacházejí trhací stroje do s určením do 5 kN a stroje do 500 kN. Pro naši potřebu testování polymerních sítovin byl zvolen tahový stroj společnosti Zwick/Roell Z005 s maximální tahovou silou 5kN uvedený na obr. č. 33. Stroj umožňuje provádění tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 6892-1. K pohybu čelistí využívá pohonu statického elektromechanického.



**Obr. 33 Tahový stroj Zwick/Roell Z005 [32]**

Tahový stroj a program k němu určený umožňuje zaznamenat pohyb čelistí, vzorku a změnu v napětí. Tyto hodnoty poté dát do grafu a vytvořit tak tahovou křivku závislosti prodloužení materiálu na napětí. [32]

### **8.3.1.3 Světelný mikroskop**

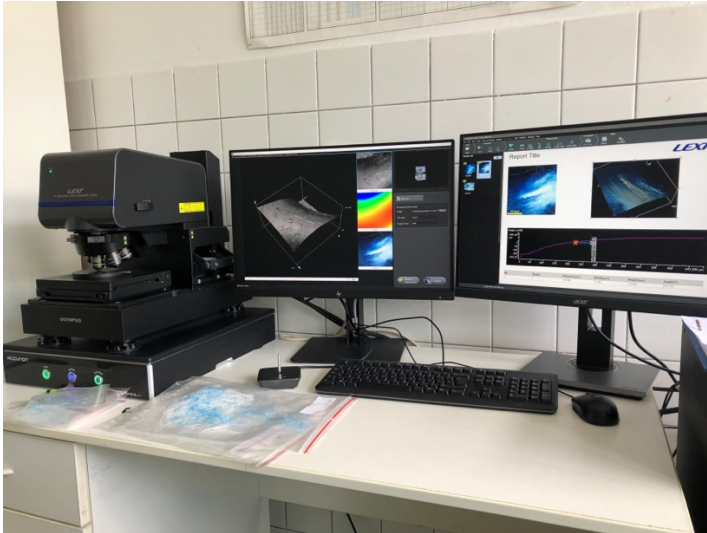
Na katedře se nachází větší množství světelných mikroskopů. K pořízení snímku bylo využito světelného mikroskopu Nikon, který disponuje dostatečným zvětšením a zároveň umožňuje přenos digitalizovat pomocí digitální snímací kamery do obslužného počítače.

### **8.3.1.4 Konfokální mikroskop**

Jelikož struktura vzorků PE-HD je velmi členitá, tak vzorky nejsou srovnané do jedné hloubky ostrosti. I díky tomu bylo zapotřebí provést vyhodnocení za pomoci 3D konfokálního mikroskopu. Konfokální mikroskop společnosti Olmypus pracuje za technologie CLSM, tedy za pomoci rozmítavého laserového paprsku, který rastruje povrch za pomoci clony do všech bodů roviny. Pomocí rekonstrukčního počítače je poté snímek složen do 3D modelu. Tyto data jsou poté přenesena do analyzačního softwaru, ve kterém jsme schopni provádět měření a vytáhnout si ze snímku podstatná data.

Konfokální mikroskop OLS5000 umožňuje nejenom vytvoření 3D mapy pomocí laseru, ale také přidání snímků a propojení barevných dat s mapou. Výsledkem je tedy 3D barevná mapa snímaného povrchu.

Aby snímky byly co možná nejostřejší, je dobré mít mikroskop umístěný na anti vibrační podložce, v našem případě od výrobce Halcyonics. Sestava mikroskopu je uvedena na obr. č. 34. [33]



Obr. 34 Konfokální mikroskop Olympus s antivibrační podložkou

### 8.3.2 Výroba přípravku

Aby mohla zkouška tečení proběhnout bylo zapotřebí vymyslet vhodný přípravek, pomocí kterého by bylo možné vyhodnotit co možná nejvíce PE-HD pásků naráz. Zároveň přípravek musel splňovat podmínku dostatečné tuhosti, odolnosti proti tečení, vyšším teplotám a především korozivzdornosti.

Byl proto zvoleno vyrobit přípravek z měděných profilů trubek, které budou naměřeny, nařezány na požadované délky a pospojovány nerozebíratelným spojem. V našem případě pájeny pomocí tavidla a cínem.

V první fázi projektu bylo zapotřebí naměřit si samotnou velikost korozní komory. Byly zjištěny rozměry výška x šířka x hloubka = 900 x 600 x 1100. Pro přípravek byla zvolena velikost o 100 mm menší. Postranní měděné trubky a podpěrné “nohy“ přípravku, které budou při testování zatěžovány především na tah byly zvoleny o průměru 22 mm s tloušťkou materiálu 1 mm. Pro hlavní profil, na kterém budou vzorky zavěšené a bude tak zaznamenávat největší možné riziko průhybu konstrukce byla zvolena měděná trubky o průměru 32 mm s tloušťkou stěny 1,5 mm.

Měděné trubky byly nařezány na vypočtené délky, očištěny, odhrotovány. Povrch určený k pájení byl smirkovým papírem zdrsňen. Následně natřen tenkou vrstvou tavidla. To samé na druhé straně spoje. Tedy vždy na vnější i vnitřní straně. Poté byly trubky do sebe vloženy, přichyceny do stanovené pozice a vzdálenosti a došlo ke spájení spoje. K pájení byla využita plynová přenosná pistole s cínem určeným pro pájení měděných trubek.



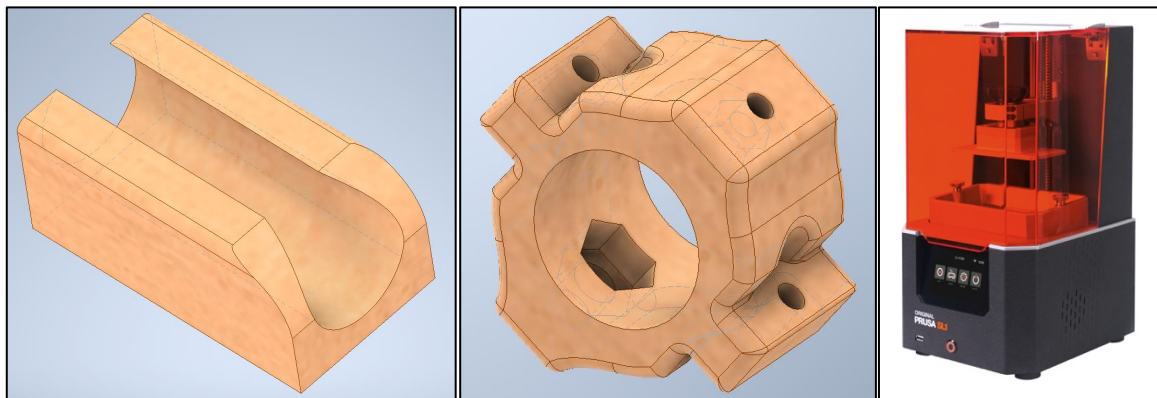
**Obr. 35** Použitá sestava k pájení měděných trubek [34]

Před spájením hlavní nosné trubky vzorků bylo zapotřebí vymyslet systém uchycení vzorků, který by do budoucna mohl být do přesné výškové pozice v rozmezí do zhruba 5 cm nastavitelný. Bylo zvoleno využití háků s metrickým závitem, přičemž do měděné trubky se vyříznul závit stejný, zajištění proti jeho povolení bylo vymyšlenou formou matky.

Následně bylo potřeba vymyslet systém přesného odměřování od předem stanovené pozice. K tomu jsme využili ocelové nerezové lanko a přípravku, který byl vytisknut na 3D stereo litografické tiskárně. Lanko bylo uchyceno na měděný přípravek. Od tohoto lanka poté probíhala veškerá měření PE-HD pásků z korozní komory. Nakonec byl na konstrukci přidělaný nohy, které zvýšili stabilitu přípravku v komoře. Pomocné nohy byla také vyrobené pomocí 3D tisku. Finální podobu přípravku možno vidět na obr. č. 36.



Obr. 36 Přípravek sloužící k testování většího množství jednotlivých PE-HD pásků



Obr. 37 Modely pro 3D tisk v programu Autodesk Inventor s ukázkou 3D tiskárny Prusa SL1

## 8.4 Zvolený typ závaží

Jako závaží bylo nakonec vybráno polypropylenových odpadních trubek s hrdlem zakončených dřevým víčkem, které bylo zajištěny nerez vruty z obou stran. Do horní části nádob byly vyrobeny průchozí díry, do kterých se následně přidělal z jedné strany metrický šroub o dostatečné délce, který byl z druhé strany zajištěn pojistnou matkou. Do těžiště nádoby byl na šroub poté přidělán háček, který propojil vzorek se závažím. Takto vyrobené nádoby byly naplňovány podle potřeby kovovými šrouby různých průměrů a vah. Přesného závaží tak bylo dosaženo navážením a přeskládáním těchto šroubů. K vážení bylo využito digitální váhy s přesností na 1g.

Vyrobené závaží položené na zvážení na digitální váze je možno si prohlédnout na obr. č. 38.



Obr. 38 Připravené 5 N závaží

## 8.5 Příprava vzorků

Pro přípravu vzorků, jednotlivých PE-HD pásků, bylo zapotřebí pásy ze sítí rozplést. Dále naměřit na zhruba stejně dlouhé velikosti, případně zakrátit. Poté byly na obou koncích vytvořena oka. Z jedné strany byla tato oka přichycena do přípravku a ze strany druhé k připravenému závaží. Pro další měření byla vždy využity pásy nové.

Celkově jsme zkoušeli vzorky od dvou společností, společnosti Juta označené Juta 42 a Tama 41. Jednalo se o sítě, které byly nové, neexponované UV ani vyšším teplotám či napětí. U izraelské společnosti Tama poté ještě pro porovnání vzorky, které byly celé jedno období jako sítě vystavené v mírném podnebném pásmu, tedy v rozsahu teplot od 10 do maximálně do 25 °C, po většinu času vystavené UV-záření. Napětí na jednom vlákne bylo vypočteno jako 5,83 MPa.

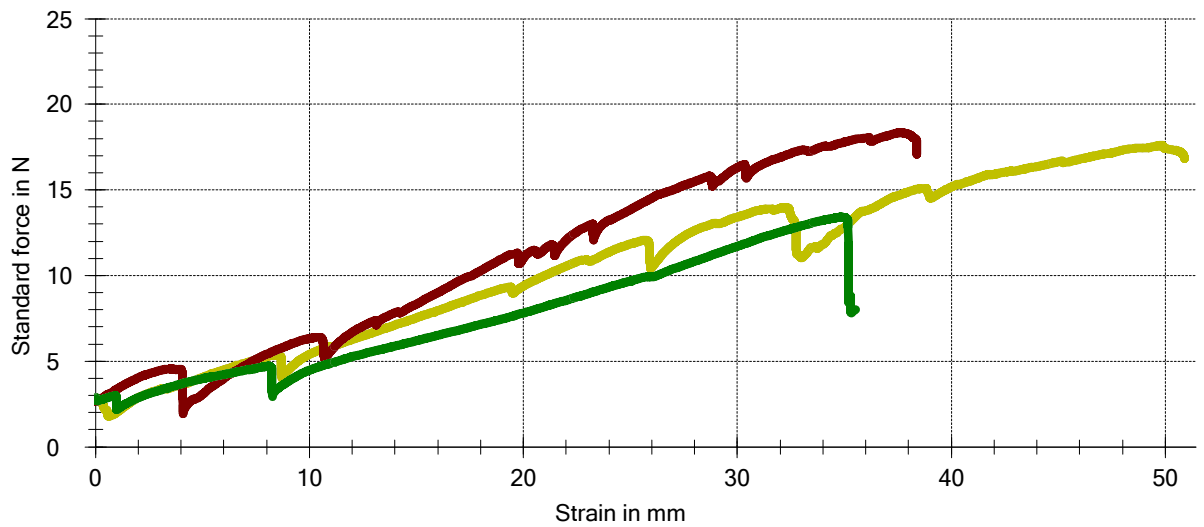
## 8.6 Zkoušení

V této kapitole budou popsány průběhy měření a jejich předběžné výsledky. Celkový závěr bude poté uveden v kapitole vyhodnocení.

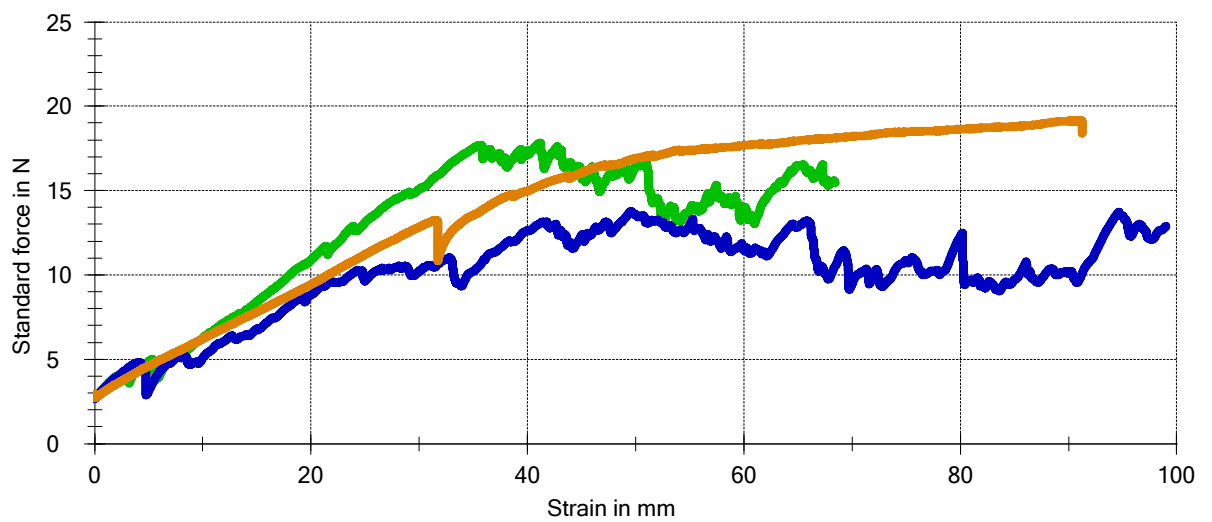
### 8.6.1 Tahové zkoušky

Pro porovnání výsledků před a po zkoušce tečení bylo zapotřebí provést tahové zkoušky. Byly zkoumány vlastnosti materiálu jako tažnost, průběhy křivek jako takové. U porovnání jsme pozorovali především změny ve ztrátě tažnosti a změny v potřebné síle k přetržení vzorku. Tahové zkoušky byly prováděny vždy na jednotlivých páscích, ověřovány ze skupiny stejně zatěžovaných. Předzatižení bylo pro všechny vzorky shodně 3 N. Rychlost zatěžování byla stanovena 15 mm/min.

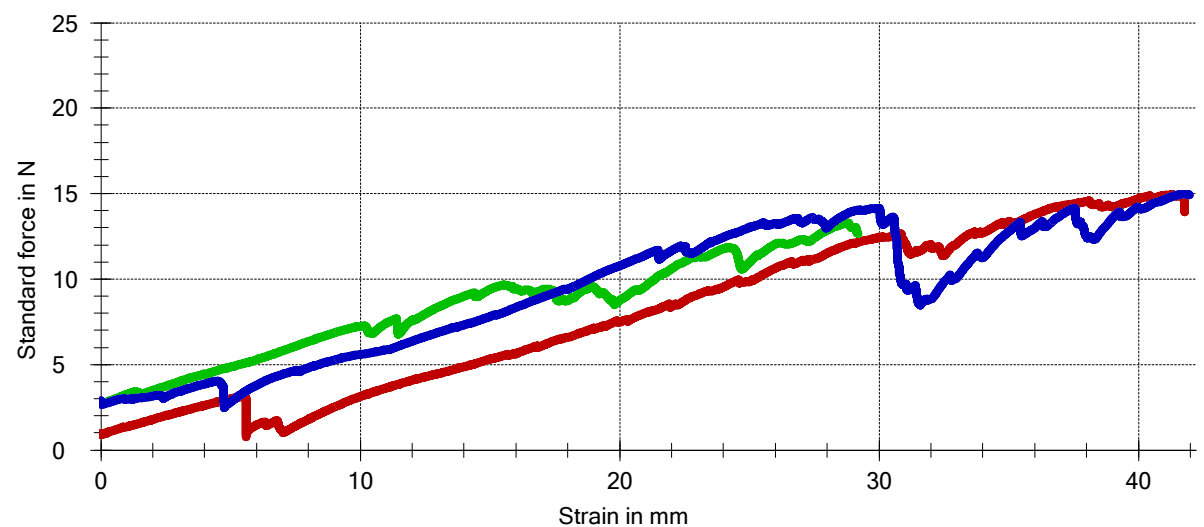




Obr. 39 Tahová zkouška vzorku Juta 42



Obr. 40 Tahové zkoušky vzorku Tama 41



Obr. 41 Tahová zkouška vzorku Tama ROK

Z výsledků tahových zkoušek a přepočtu průměrných hodnot síly na průřez bylo patrné, že mez pevnosti pásků Tama 41 byla o 14 MPa větší. Tažnost u těchto vzorků byla téměř dvojnásobně větší než u vzorku Juta 42. Tama pásky po roce používání vykázali o 15 % nižší pevnost s téměř o 60 % nižší tažností.

### 8.6.2 Zkoušky tečení

Po tahových zkouškách došlo na provedení testovacích sérií tečení všech vzorků. Z počátku bylo předpokládáno, že by vlákna mohla vydržet konstantní zatěžování silou 7,5 N. Po zavěšení všech závaží ale došlo u některých vzorků k takovému prodloužení, že by již nebylo dále co měřit. Největší problém s tímto zatížením a následným prodloužením měli vzorky Tama 41, u jednoho z pásků u vzorků Juta 42 došlo k přetržení.

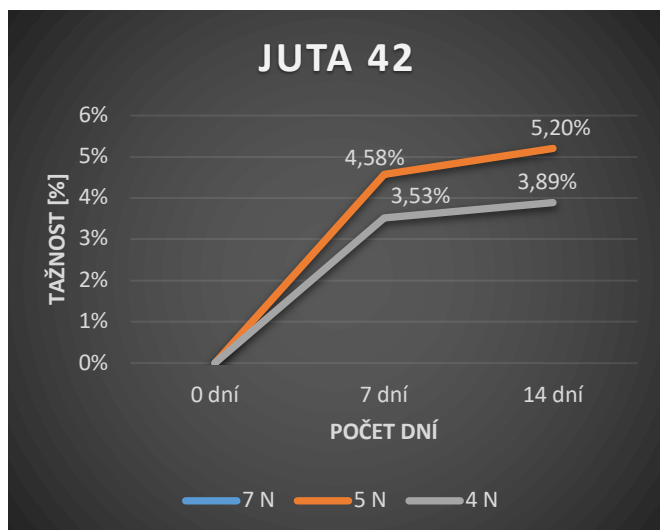
První zkouška tak byla hned v počátku předělána. Vzorky pásků byly vyměněny za nové. Maximální zatížení bylo stanoveno na 7 N, přičemž další vzorky byly zatíženy ještě 5 N ke srovnání.

Z této zkoušky vyšly po týdnu zajímavé skutečnosti. Vzorky Juta 42 zatěžování 7 N po dobu týdnu nevydrželi, u všech vzorků došlo k přetržení viz. obr. č. 42. Juta 42 se zatížením 5 N zatížení vydrželi, s tažností okolo 4,5 %. Vzorky Tama zatížení 7 N vydržely s tažností v průměru kolem 15 %, při zatížení 5 N okolo 5,5 %. Vzorky Tama ROK zatížení 7 N nevydržely a u zatížení 5 N došlo k tažnosti 3,8 %.

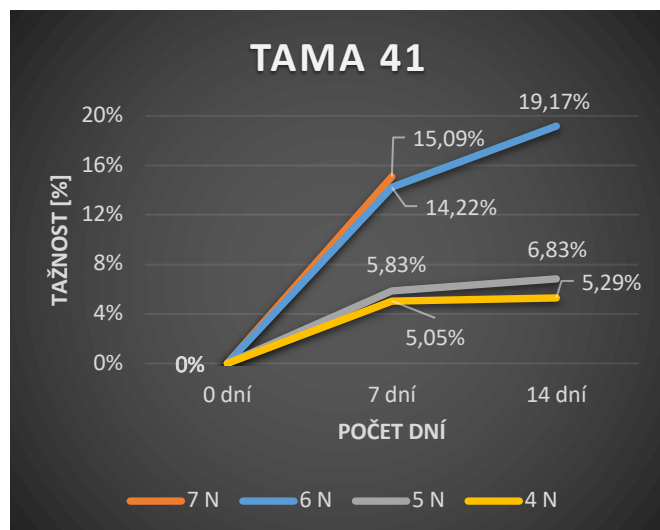


Obr. 42 Výsledek průběhu zkoušky se 7 a 5 N závažím

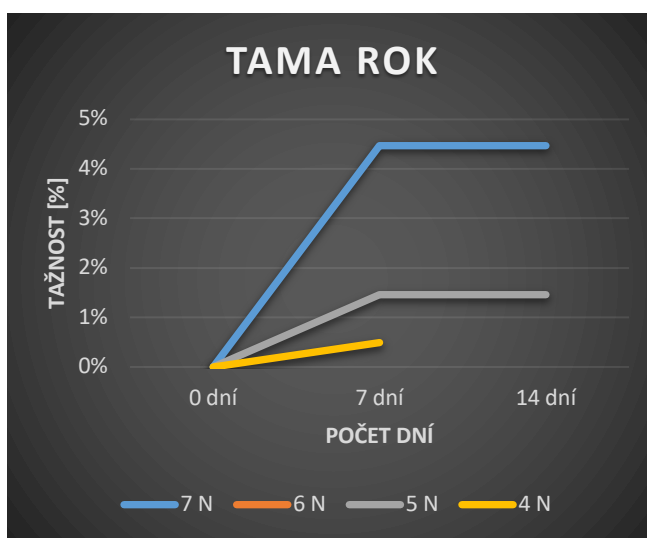
U další zkoušky byly závaží v závislosti na výsledku předchozího měření pozměněna. PE-HD pásky byly zatěžovány 6, 5, 4 N u vzorků Tama 41 a 5 a 4 N u vzorků Juta 42. Pro vzorky Tama ROK byly zvoleny závaží o síle 6 a 4 N. Vzorky byly po dobu dvou týdnů cyklicky v korozní komoře zatěžovány.



a



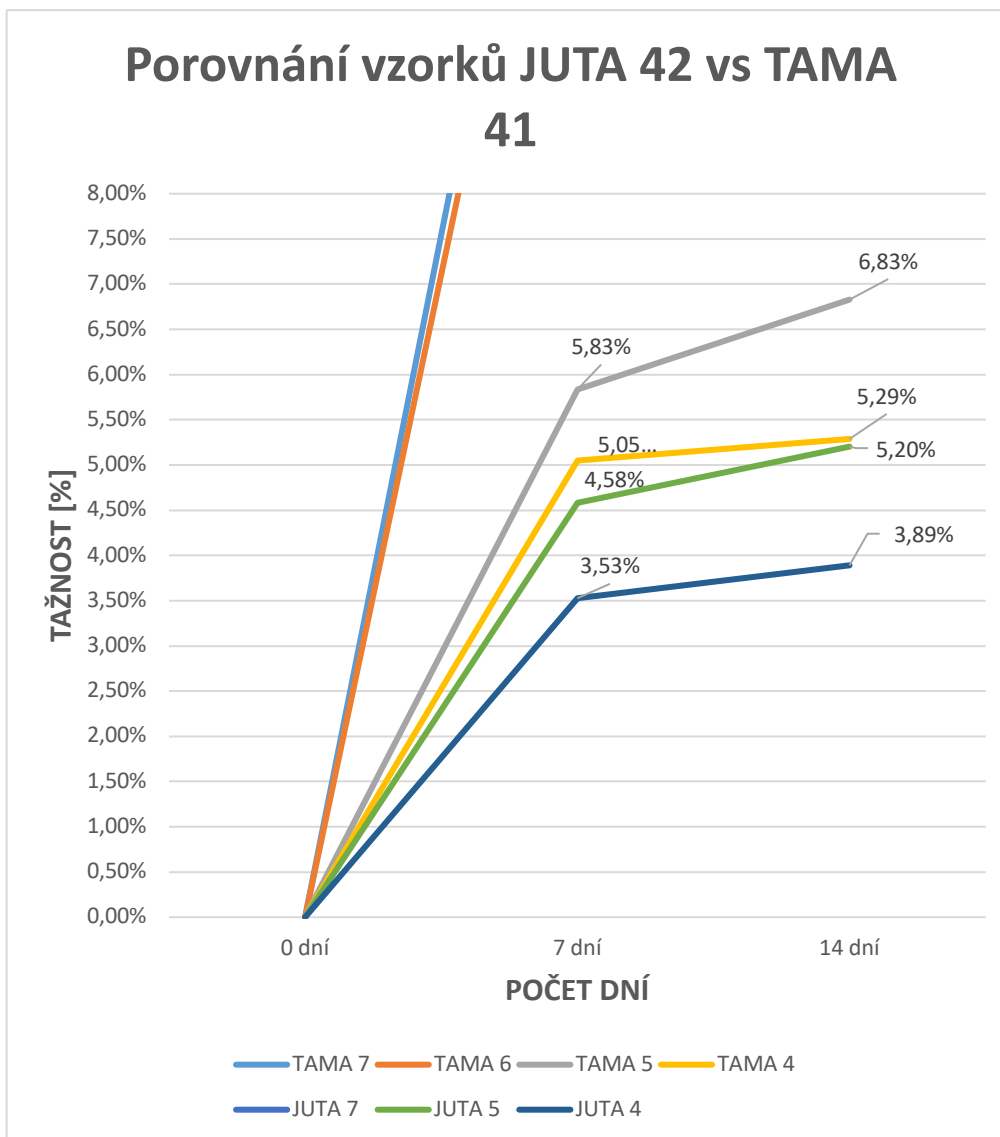
b



c

**Obr. 43** Průběhy tažností v závislosti na počtu dní (a) - Juta 42, (b) - Tama 41, (c) Tama ROK

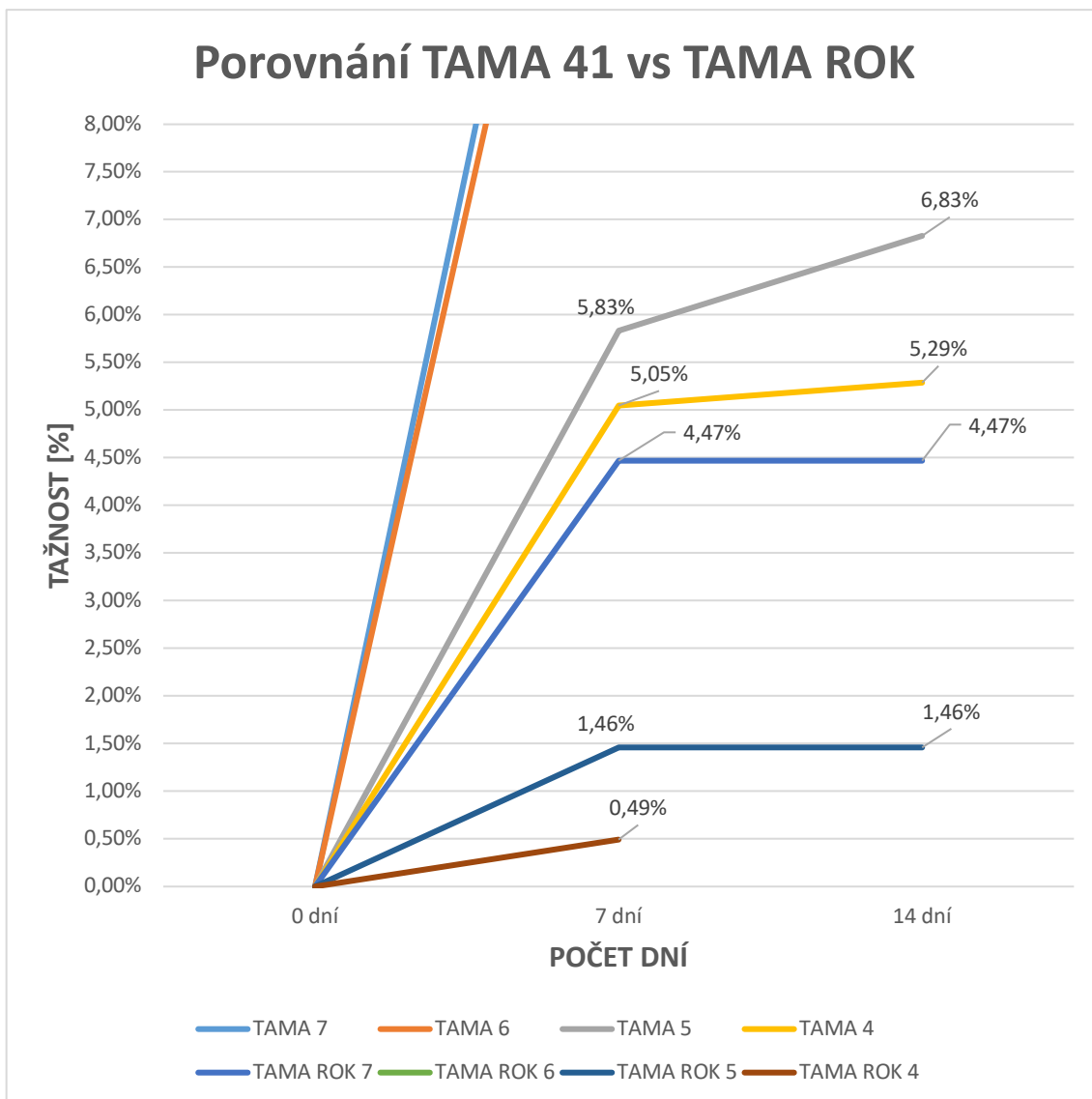
Pro lepší přehled byly vytvořeny porovnávací grafy, na kterých jsou dobře patrné rozdíly v tažnostech materiálu. Prvním srovnáním na obr. č. 44 je porovnání vzorku Juta 42 se vzorky Tama 41. Na druhém obr. č. 45 jsou porovnány vzorky Tama 41 a vzorky Tama ROK. Hodnoty pro obě porovnání jsou uvedeny vždy v tabulkách pod obrázky. Výsledky byly u stejných podmínek při testování zprůměrovány. Číselné označení za názvem vzorku značí použité zatížení.



Obr. 44 Grafické porovnání vzorků Tama 41 se vzorky Juta 42

Tab. 4 Vypočtené hodnoty z experimentu využité v grafu

Porovnání TAMA 41 vs JUTA 42							
	TAMA 7	TAMA 6	TAMA 5	TAMA 4	JUTA 7	JUTA 5	JUTA 4
<b>0 dní</b>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>7 dní</b>	15,09%	14,22%	5,83%	5,05%		4,58%	3,53%
<b>14 dní</b>		19,17%	6,83%	5,29%		5,20%	3,89%



Obr. 45 Grafické porovnání vzorků Tama 41 se vzorky Tama ROK

Tab. 5 Vypočtené hodnoty z experimentu využitě v grafu

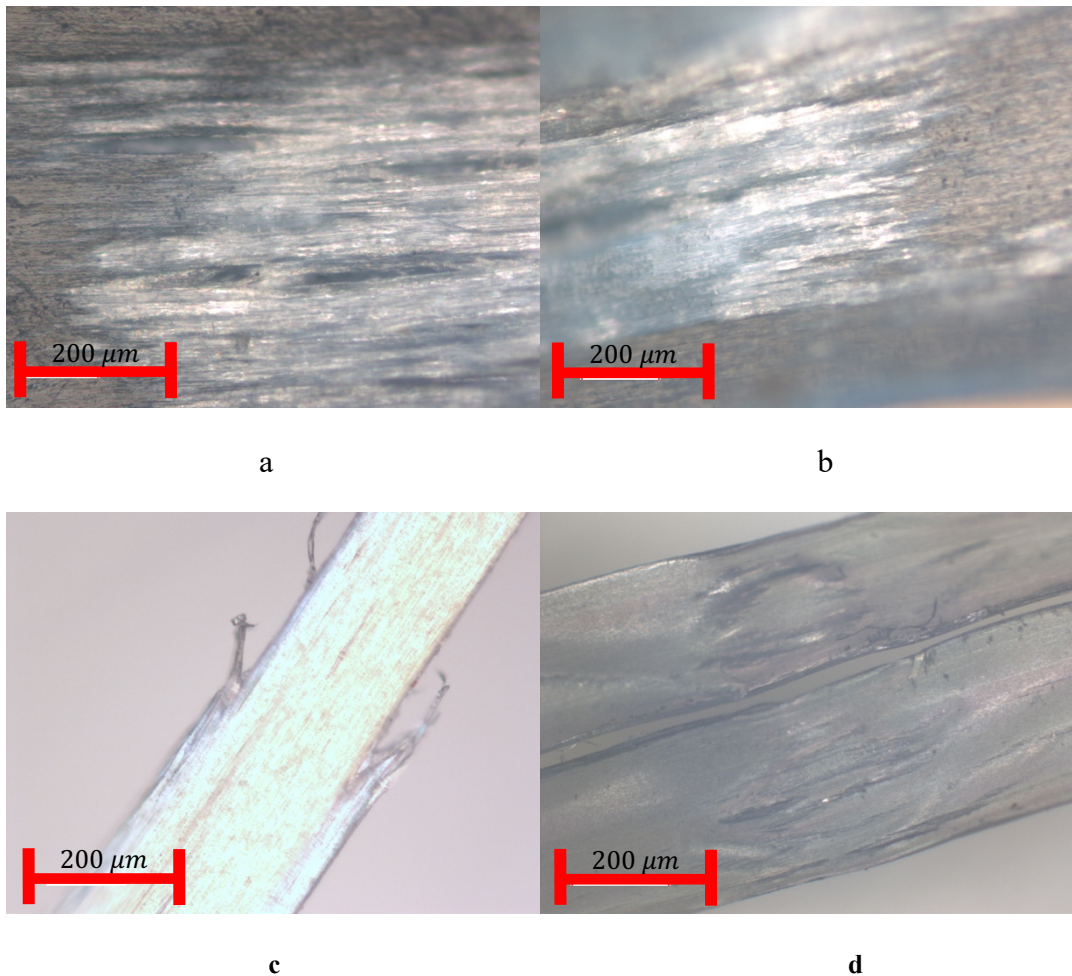
Porovnání TAMA 41 vs TAMA ROK								
	TAMA 7	TAMA 6	TAMA 5	TAMA 4	TAMA ROK 7	TAMA ROK 6	TAMA ROK 5	TAMA ROK 4
<b>0 dní</b>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>7 dní</b>	15,09%	14,22%	5,83%	5,05%	4,47%		1,46%	0,49%
<b>14 dní</b>		19,17%	6,83%	5,29%	4,47%		1,46%	

### 8.6.2.1 Podmínky v korozní komoře

Korozní komora byla nastavena na cyklus proměnlivých teplot s proměnlivou vlhkostí. Cyklus byl rozdělen na dva kroky. Prvním krokem bylo udržování 40 °C teploty s nastavenou 100 % relativní vlhkostí vzduchu. Následoval krok ochlazování na teplotu 23 °C s běžnou vlhkostí. První krok trval vždy 8 h, následující krok hodin 16. Po 24 h se tedy oba kroky znovu opakovaly.

### 8.6.3 Pozorování na světelném mikroskopu

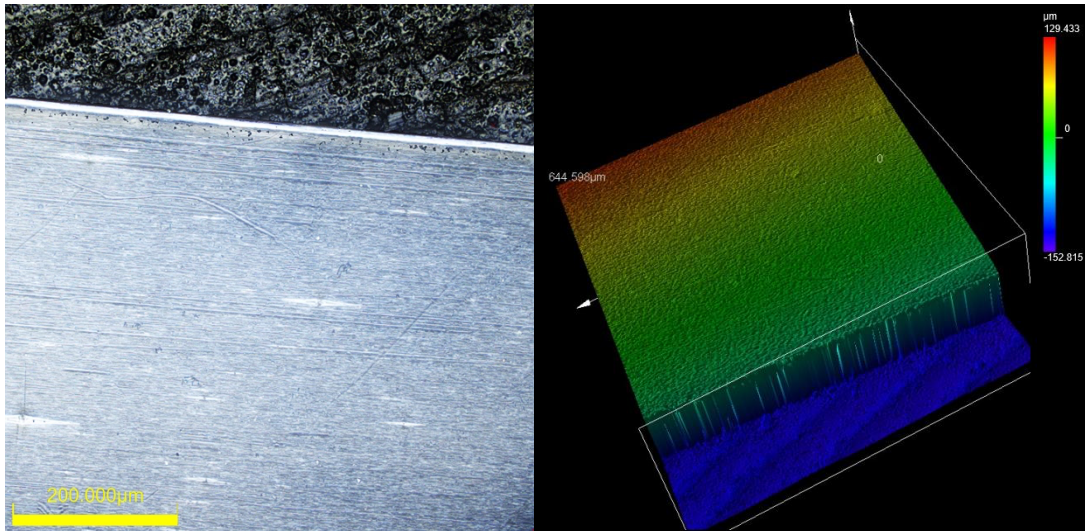
Vzorky byly po vyndání z korozní komory pozorovány na světelném mikroskopu. Byly ověřovány především ty části, ve kterých došlo na první pohled k poškození nebo k vytvoření krčku. Iniciátorem těchto částí byly zejména místa, kde byl předtím materiál v řetízku ohnutý. U všech vzorků docházelo u pásku k částečnému rozpadu nebo rozčlenění pásku na menší segmenty vlásků. U vzorků Tama 41 byla ale struktura takto postižených míst jemnější, nenacházeli se zde ostré přechody a rozdělení. Struktury jsou zachycené na obr. č. 46. Zachycení vzorků v jednotné hloubce ostrosti bylo i s přípravkem na uchycení dosti složité až nemožné. Proto byly další vzorky pozorovány pod konfokálním mikroskopem.



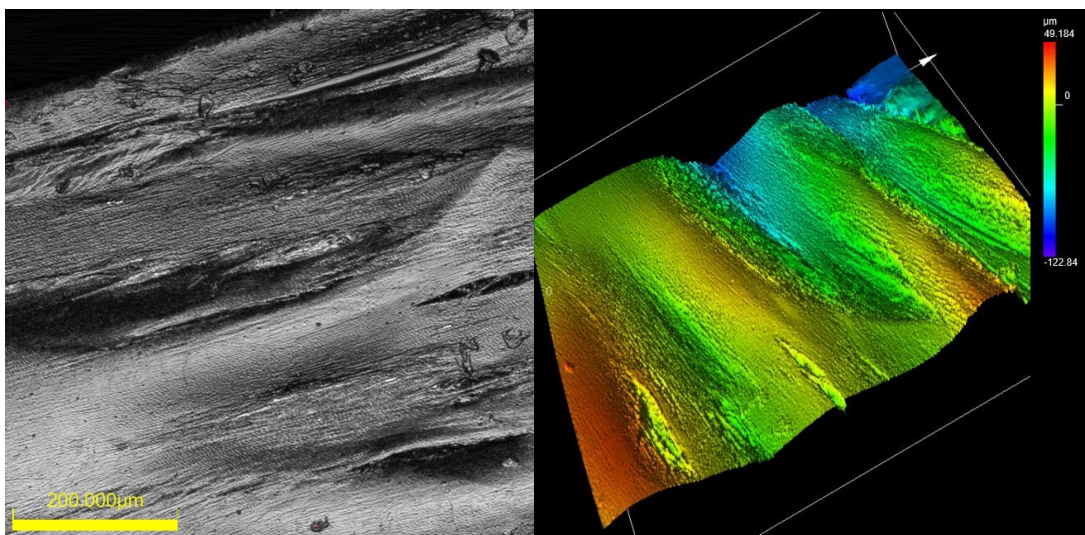
**Obr. 46** Mikrostruktury PE-HD pásků po týdnu zatěžování a - Tama 41 7 N, b - Tama 41 5 N, c - Juta 42 7 N (přetrženo), d - Juta 42 5 N

#### 8.6.4 Pozorování na konfokálním mikroskopu

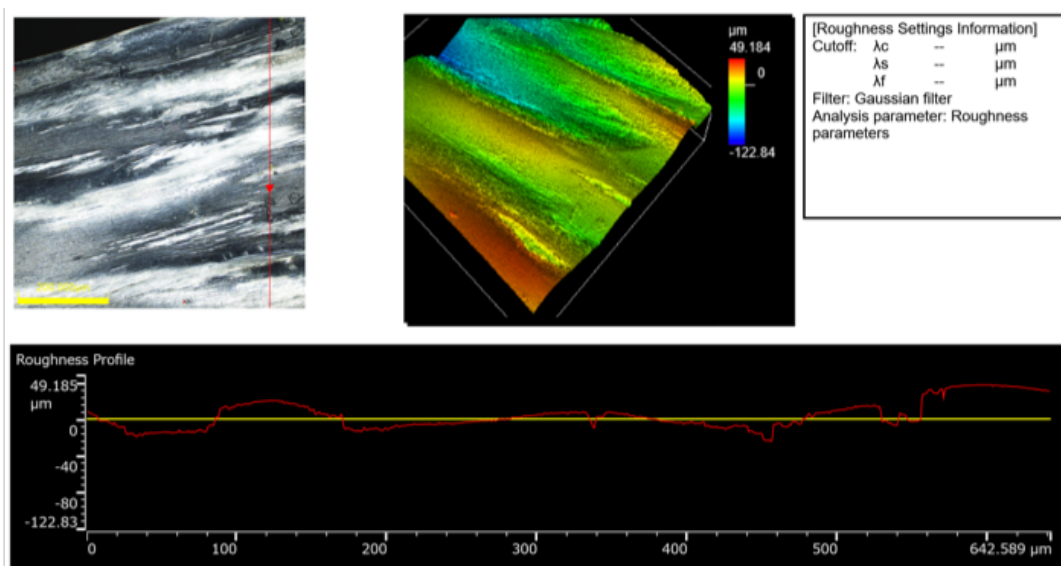
Konfokální mikroskop je vhodným přístrojem pro analýzu struktury povrchu. Umožňuje zachytit nejen 3D zvětšený povrch, ale také informaci o pozici propojit s barevným skenem. S takto získanou informací bylo dále pracováno v analyzačních programech, v těch je možné nechat spočítat například drsnost, vybarvit povrch podle zobrazované hloubky, měřit v různých osách, provádět řezy nebo převést 3D obraz na 2D s ostrým obrazem ve všech hloubkách ostrosti.



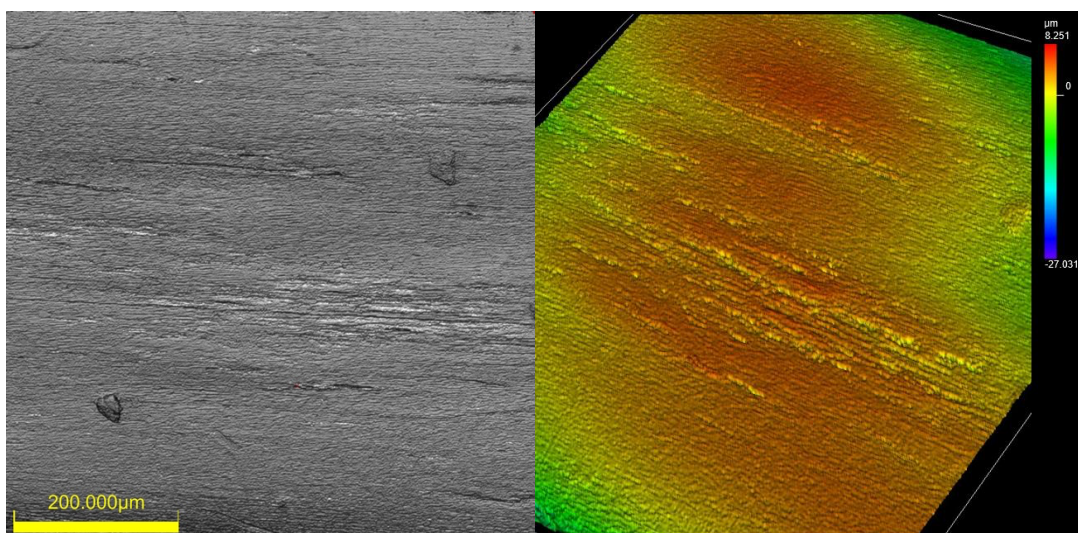
Obr. 47 Vzorek Juta 42 před zkoušením



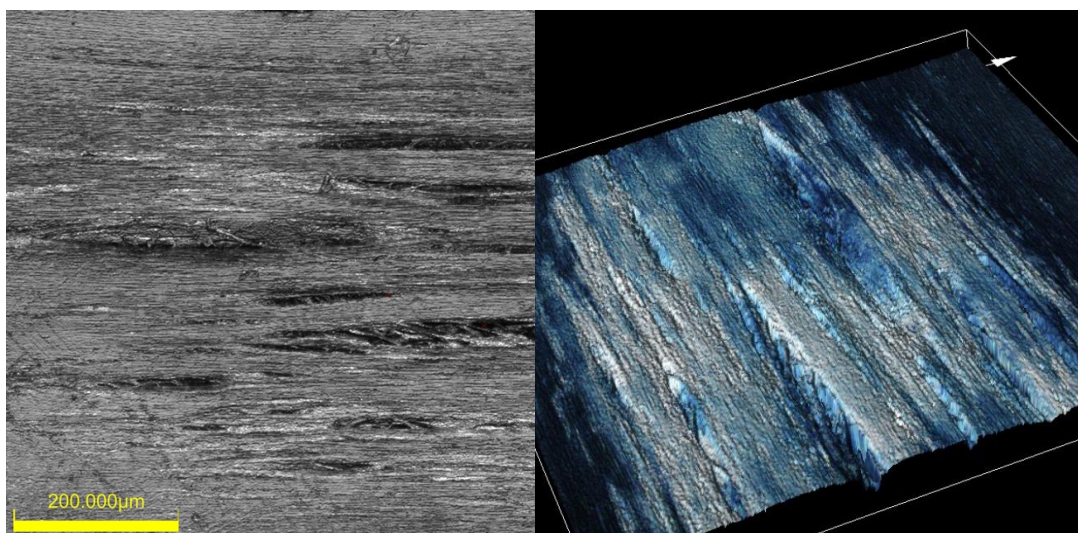
Obr. 48 Vzorek Juta 42 - 2 týdny 5 N



Obr. 49 Profilometrický rozbor povrchu Juta 42 - 2 týdny 5 N

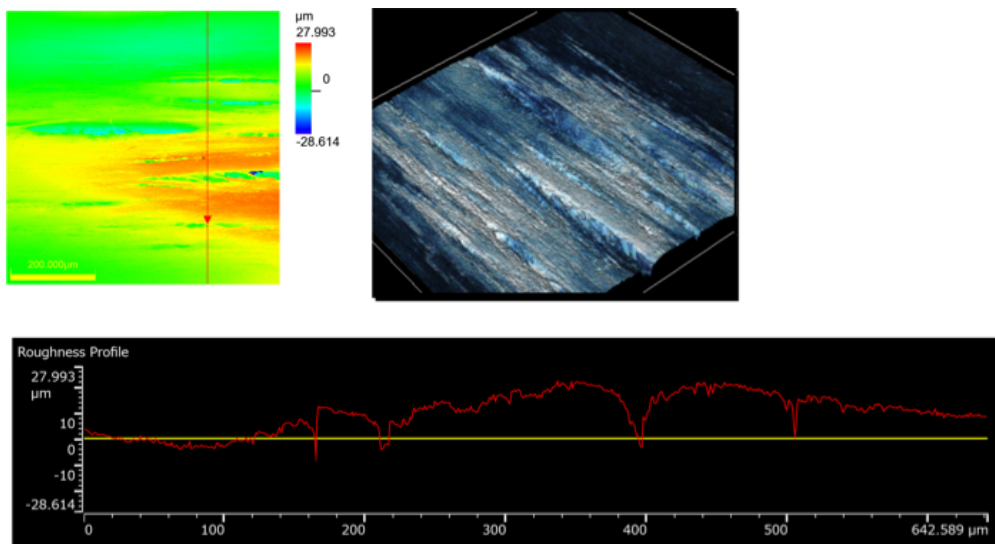


Obr. 50 Vzorek Tama 41 před zkoušením

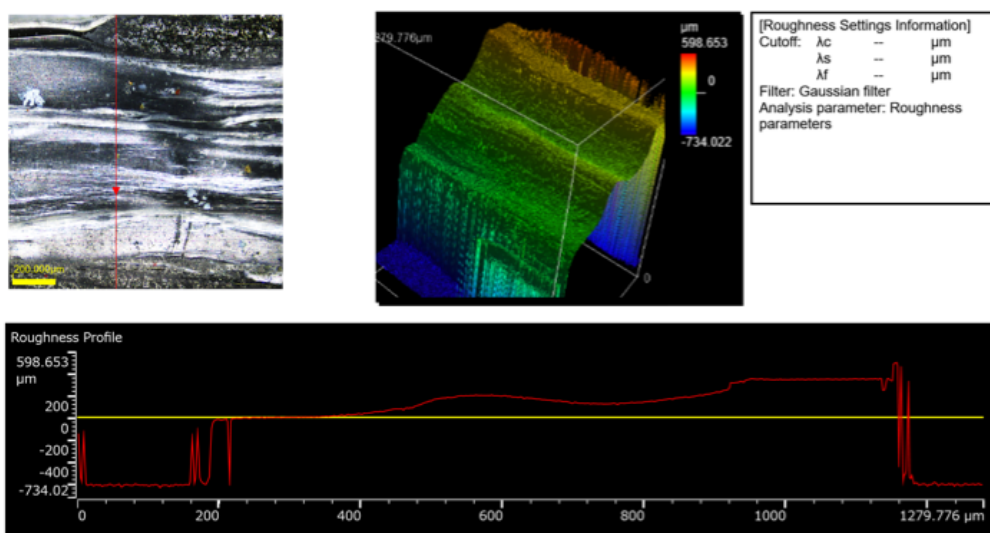


Obr. 51 Vzorek Tama 41 - 2 týdny 6 N





Obr. 52 Profilometrický rozbor povrchu Tama 41 - 2 týdny 6 N



Obr. 53 Profilometrický rozbor Tama ROK - 2 týdny 4 N

### 8.6.5 Tahové zkoušky po tečení

Pásky byly po dvoutýdenním zatížení podrobeny tahovým zkouškám. Přičemž jsme sledovali především ztrátu tažnosti a změnu velikosti meze pevnosti v porovnání s tahovými zkouškami na začátku. Hodnoty byly zprůměrované.

Tab. 6 Tabulka porovnání výsledků z tahových zkoušek před a po 2 týdenním zatížením

Označení	Počet vzorku	Počet řetízků	Pásek			Napětí na jedno vlákno [Mpa]	Tahovka a prodloužení před [Mpa] / [mm]	Tahovky a prodloužení po		
			šíře [mm]	tloušťka [μm]	průřez [mm]			600g [Mpa] / [mm]	500g [Mpa] / [mm]	400g [Mpa] / [mm]
TAMA 41	41	89	1	74,5	0,0745	5,83	227 / 85	253 / 35	239 / 36	254 / 60
JUTA 42	42	73	2	38,6	0,0772	5,68	213 / 42	0	241 / 33,5	254 / 42
TAMA ROK	41	89	1	74,5	0,0745	5,83	193 / 37,3	238 / 23	0	0

Hodnoty z tahových zkoušek byly zpracovány do tabulky č. 5. Aby se výsledky získaných sil při překročení meze pevnosti daly porovnat, byly převedeny podle jednotlivých průřezů pásků na hodnoty napětí. Vzhledem k většímu množství tahových grafů budou tyto grafy přiloženy v příloze č.1.

## 9 Vyhodnocení

Vyhodnocení proběhne ve dvou krocích, nejprve budou shrnuty výsledky konkrétních vzorků. Poté proběhne vyhodnocení testované metody zrychleného testování s možnými dopady na vliv výroby a bude probrána blízká budoucnost dalšího výzkumu této metody.

### 9.1 Vyhodnocení zkoumaných vzorků

Z prvních tahových zkoušek vykonaných před samotným dlouhodobým zatěžováním je patrné, že nejvyšší mezní pevnost zaznamenal v průměru vzorek Tama 41, zároveň tento vzorek dosáhl i největšího prodloužení. V průměru dvakrát vyššího než vzorek Juta 42. Z křivek závislosti síly na prodloužení je zřejmé, že u vzorků Juta 42 byly průběhy téměř lineární křivkou s 4 až 5 ti výraznými změnami kluzu, ve kterých došlo ke skokovému prodloužení a snížení napětí. U vzorků Tama 41 docházelo k těmto změnám v průměru neustále, přičemž vzorek vydržel násobně delší prodloužení. O obou vzorků můžeme z tahových zkoušek tvrdit, že se jedná o polymery houževnaté. Třetím vzorkem pro porovnání byly PE-HD pásky Tama ROK. Pokud vzorky porovnáme se Vzorky Tama 41 tak zjistíme, že došlo k poklesu prodloužení a meze pevnosti. Pokud ale vezmeme v potaz skutečnost, že tyto vzorky byly více než půl rok exponované termooxidací, fotooxidací a konstantnímu napětí, tak se nejedná o špatný výsledek. Tahové diagramy provedené po korozních komorách jsou k náhledu v příloze práce.

Z provedených měření v korozních komorách za zvýšených teplot, vlhkosti a napětí můžeme objektivně konstatovat, že měření jsou schopna replikovat působení mnohonásobně delší a to i testování se zapojením reálných zemědělců, kde se na výsledky čeká od 3 měsíců a déle. Výsledky z proběhlých měření jsou tak více než uspokojivé.

Z první řady provedených testů bylo patrné značných rozdílů mezi výrobky Juta 42 a Tama 41. Tama Rok ve většině případech výsledky už jen potvrdil. Výdrž vzorků Juta 42 byla výrazně nižší. První test se zatížením 7 N nevydržel ani jeden vzorek. U všech vzorků došlo vlivem vyčerpání energie v dlouhodobém testu k přetržení. Na rozdíl od vzorků Juta 42, vzorky Tama 41 zatížení i s vyšší tažností překonaly. Pokud se podíváme na rozdíly u vzorků

komplexně, tak zjistíme že tažnost Tama 41 byla oproti vzorkům Juta 42 o 20–30 % větší. Maximálních tažností jsme získali u vzorků Tama 41. Hodnota tažnosti se pohybovala při zatížení o síle 7 a 6 N okolo 20 % procent a i přes to se nejednalo o hodnoty hraniční. Po následných tahových zkouškách bylo zjištěno, že tažnost nebyla zatěžováním vyčerpána. Došlo sice k jejímu snížení o odhadem 50 %, ale zároveň také k zvýšení meze pevnosti o 10 % v porovnání se vzorkem nezkoušeným.

U vzorků Tama Rok pochopitelně vycházeli hodnoty meze pevnosti jako nejnižší. Ale tažnost byla u tahových zkoušek před dlouhodobým testováním srovnatelná se vzorky Juta 42. Pokud se podíváme na tečení vzorků Tama Rok, tak zjistíme, že od 1. týdne se hodnoty prodloužení již vůbec nezměnily. Došlo k úplnému zastavení růstu prodloužení a to jak u vzorků zatěžovaných silou 5 tak i 7 N. Porovnáním vzorků od společnosti Tama bylo zjištěno, že data se velmi výrazně liší, ale mechanické vlastnosti, především dobrá pevnost i po roce přetrvávají.

Po expozici byly výsledky pozorování pod světelným a konfokálním mikroskopem značně rozdílné. U vzorků Tam 41 byly pozorované trhliny jemnější, s větší koncentrací. Trhliny byly vedené vždy v podélném směru tažení vzorků. Podrobnějším zkoumáním bylo zjištěno, že pásy vzorků Tama 41 se pod vyšším zatížením začnou v místě koncentrace napětí rozdělovat na jednotlivé nitky. U vzorku Juta 42 trhliny neměly vždy podélný charakter, zakončení trhlín bylo ostré, trhliny byly větší s menší koncentrací.

Rozdílné výsledky mezi vzorky Juta 42 a Tama 41 jsou použitou metodikou výrazně patrné. Za rozdíly mohou být zodpovědné některé z uvedených příčin. První příčinou může být rozdílný podíl krystalické a amorfní fáze vstupující do výroby folií, další příčinou je možná aditace látek podporující např. teplotní stabilizaci, světelnou stabilizaci nebo změkčovadla. Možným faktorem je také rozdílný výrobní postup, zejména proces dloužení a temperace. Svoji roli v následné termo a foto oxidaci budou hrát také rozdílné povrchy pásek. Pásek Tama 41 a Juta 42 mají sice průřez stejný, ale povrch je u Juta 42 téměř dvojnásobný. UV-světlo a oxidy se tak snadněji do materiálu dostanou a více jej degradují.

## 9.2 Vyhodnocení zkoumaných metod testování

Rozsah hodnocení a získaná data z výsledků testování potvrzují správnost zvolené metodiky. Kombinace tahových zkoušek, tečení a průběžná analýza vzorků se ukázala jako velmi dobré řešení pro testování PE-HD pásek používaných v sít'ovinách.

Zvolené hodnoty teplot, vlhkosti a zatížení v korozních komorách se jeví jako ideální pro potřebu dosažení rychlejších výsledků provedených při vývoji nových modifikací výroby nebo materiálu. Metodika by se dala do výroby a následné kontroly jakosti rychle doplnit. Zapotřebí by bylo pouze dokoupení dostatečně velké korozní komory, poté vyrobení přípravku a výroba sady závaží která by se dala snadno a přesně měnit podle aktuální potřeby. Příkladem můžou být přípravky a závaží vyrobená a popsána v kapitole 7.3, pojmenované jako “Zvolený způsob testování”.

V blízké budoucnosti bude další výzkum metody přesunut na VŠCHT, kde bude metoda a její dopady na materiál zkoumány dál. Do metody mohou být do budoucna přidány vlivy působení UV-zářením, přidáním generátorů UV světla do korozních komor nebo provedení a porovnání chemických analýz testovaných vzorků.

## 10 Závěr

Zvolenou metodikou testování PE-HD síťovin používaných v zemědělství bylo ověřeno, že pro otestování změn ve výrobě není nutné využití dodnes běžných zdlouhavých procesů. Dosud byly totiž vzorky PE-HD síťovin zatěžovány tak, že byly testujícím zemědělcům v zemích s vyšším teplotním průměrem, než je v ČR prototypy zaslány. Ty poté síťovinami balícím strojem slámu zabalili. Následně po několika měsících exponování (3-6 měsíců) balíky rozbalili a část síťovin zaslali zpět k otestování. Celková doba této metody testování je však velmi zdlouhavá. Východisko nabízí zvolená metoda testování PE-HD sítí popsána v této práci. Proces se dá za pomoci uvedených metod kvalitně simulovat. Může tak dojít k významnému zkrácení doby a usnadnění logistiky při testování nových procesů výroby a materiálů. Což velmi úzce souvisí s možným budoucím navýšením konkurenceschopnosti a stability v tomto odvětví na všech trzích.

## 11 Seznam zdrojů

- [1] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Teorie zpracování plastů a kompozitů. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [2] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] VOJTĚCH, Dalibor. Materiály a jejich mezní stavy. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [5] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. Nauka o materiálech. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [6] KULIŠ, Zdeněk. Plasticita a creep I: plasticita. Praha: České vysoké učení technické, 1986. ISBN Plasticita a creep.
- [7] ŠTĚPEK, Jiří. Polymery v obalové technice. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Makromolekulární látky.
- [8] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [9] JANČÁŘ, Josef a Eva NEZBEDOVÁ. Zkoušení plastů [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2007 [cit. 2021-5-25]. ISBN 978-80-214-3452-3.
- [10] ŠŇUPÁREK, Jaromír. Makromolekulární chemie: úvod do chemie a technologie polymerů. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2006. ISBN 80-7194-863-2.
- [11] TOMIS, František. Polyetylén. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Makromolekulární látky.
- [12] HORROCKS, A.R. a S.C. ANAND. Handbook of Technical Textiles [online]. 2000 [cit. 2021-5-25]. Woodhead Publishing, 2000 Dostupné z: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTT00001/viewerType:toc//root\\_slug:handbook-technical-textiles/url\\_slug:textiles-in-civil-engineering?b-q=geomembranes%20%20%20%22geosynthetics%22&b-taxonomy=13@@@geosynthetics@@@48&b-subscription=true&b-off-set=10&b-rows=10&b-group-by=true&b-sort-on=default&b-content-type=all\\_references&issue\\_id=kpHTT00001](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTT00001/viewerType:toc//root_slug:handbook-technical-textiles/url_slug:textiles-in-civil-engineering?b-q=geomembranes%20%20%20%22geosynthetics%22&b-taxonomy=13@@@geosynthetics@@@48&b-subscription=true&b-off-set=10&b-rows=10&b-group-by=true&b-sort-on=default&b-content-type=all_references&issue_id=kpHTT00001).

- [13] ING. BĚHÁLEK, Luboš, Ph.D. Polymery [online]. 2016 [cit. 2021-5-25]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [14] LENFELD, Petr. Technologie 2 [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/index.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm)
- [15] Polyethylen. FTP Plastics s.r.o. [online]. , 2 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: [https://www.vyrobyzplastu.cz/fotky33000/fotov/\\_ps\\_176POLYETHYLEN.pdf](https://www.vyrobyzplastu.cz/fotky33000/fotov/_ps_176POLYETHYLEN.pdf)
- [16] FELDMAN, Dorel. Polymer History. Designed Monomers and Polymers [online]. 2012, 11(1), 1-15 [cit. 2021-5-25]. ISSN 1568-5551. Dostupné z: doi:10.1163/156855508X292383
- [17] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [18] SLÁDEČEK, Martin. Vliv modifikace polypropylénu na jeho výsledné mechanické vlastnosti. Zlín, 2013. DP. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [19] Kadhim, L.F.. Mechanical properties of high density polyethylene/chromium trioxide under ultraviolet rays. International Journal of Applied Engineering Research, 2017. 12. 2517-2526.
- [20] ZHONG, Xiuhua, Xudong ZHAO, Yongkang QIAN a Yan ZOU. Polyethylene plastic production process. Insight - Material Science [online]. 2018, 1(1), 1-8 [cit. 2021-5-25]. ISSN 2630-4708. Dostupné z: doi:10.18282/ims.v1i1.104
- [21] GEDDE, Ulf W. Polymer physics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, c1999. ISBN 0-412-62640-3.
- [22] HORSKÁ, Pavlína. Optimalizace povrchových úprav polymerů pro mikroskopická pozorování. Brno, 2011. DP. VUT Brno.
- [23] HORÁKOVÁ, Marta. Technologie zpracování plastů, příprava polymerních směsí [online]. Liberec: FS Liberec [cit. 2020-5-25]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2874349/>
- [24] DUFKOVÁ, Petra. Textilní zkušební ústav [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/412/zaklady-textilnich-technologiei/technologie-tkani/Princip-vyroby-tkaniny.html>
- [25] NEZBEDOVÁ, Eva. Krátkodobé a dlouhodobé vlastnosti termoplastů s krátkými vlákny [online]. In: . Brno, s. 30 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/prednaska2012.pdf>
- [26] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie, Hydrolyza* [online]. c2021 [cit. 25. 05. 2021]. Dostupný z <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hydrol%C3%BDza&oldid=19826770>

- [27] BOŠKA, Vít. Vliv zrychleného tepelného stárnutí na mechanické vlastnosti termoplastů. Plzeň, 2019. DP. ZČU.
- [28] HASAN, Fariha, Aamer Ali SHAH, Abdul HAMEED a Safia AHMED. Synergistic effect of photo and chemical treatment on the rate of biodegradation of low density polyethylene by Fusarium sp. AF4. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2007, 105(3), 1466-1470 [cit. 2021-5-25]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.26328
- [29] JUTA [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://www.juta.cz>
- [30] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie, Juta (podnik)* [online]. c2021 [cit. 25. 05. 2021]. Dostupný z [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Juta\\_\(podnik\)&oldid=19803315](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Juta_(podnik)&oldid=19803315)
- [31] VLM [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <http://www.vlm-labtec.com/Home-33537,1-en.html>
- [32] ZwickRoell [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/pre-owned-market/pre-owned-z005-allroundline-5-kn/>
- [33] ZČU. RICE má nejmodernější konfokální mikroskop v Evropě [online]. 2018 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://vedavyzkum.cz/z-domova/z-domova/rice-ma-nejmodernejsi-konfokalni-mikroskop-v-evrope>
- [34] Panfitinka [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://eshop.panfitinka.cz/pasta-pro-mekke-pajeni-cu-trubek-a-tvarovek>

## 12 Seznam obrázků

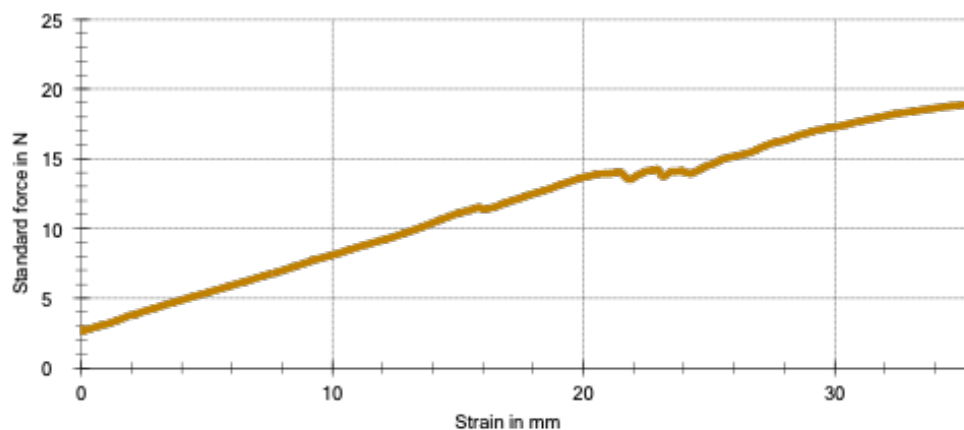
Obr. 1 Nadmolekulární soustavy dle typu polymeru [2] .....	12 -
Obr. 2 Porovnání propustnosti světla amorfni vs krystalický stav [13] .....	13 -
Obr. 3 Tvary makromolekul [13] .....	14 -
Obr. 4 Schéma vzniku reaktoplastu (síťovaný typ) [13] .....	14 -
Obr. 5 Porovnání struktur makromolekul polymerů [4] .....	17 -
Obr. 6 Teplotní závislosti měrného objemu amorfniho a semikrystalického polymeru [4] .....	18 -
Obr. 7 Typy nadmolekulární struktury polymerů a - amorfni b - semikrystalická [4] .....	20 -
Obr. 8 Využití polymerů napříč odvětvími v Německu [1] .....	20 -
Obr. 9 Obecný vzorec polyetylenu .....	22 -
Obr. 10 Typické uspořádání atomů vodíku a uhlíku v makromolekule (a), Rotace kolem vazeb C-C umožňuje změny tvaru (b) [4] .....	23 -
Obr. 11 Struktura makromolekul dle typu PE. PE-HD (1), PE-LLD (2), PE-LD (3a i 3b) [2] .....	23 -
Obr. 12 Vazba mezi kovem a alkylem se koordinací olefinu oslabí, to umožní vsunutí monomerů mezi kov a alkyl [2] .....	26 -
Obr. 13 Výrobní zařízení pro přípravu PE v suspenzi Polymerační reaktor (1), Rozkladný reaktor (2), Odstředivka (3), Extraktor (4), Sušárna (5), Extruder (6) [2] .....	27 -
Obr. 14 Výroba PE postupem společnosti Union Carbide, Reaktor (1), Vzduchový chladič (2), Kompresor (3) [2] .....	28 -
Obr. 15 Možná struktura lamely PE [22] .....	29 -
Obr. 16 Struktura shish-kebab (a), sférolitická struktura (b) [22] .....	30 -
Obr. 17 Vytlačovací stroj, extruder [1] .....	31 -
Obr. 18 Vstřikovací stroj [1] .....	33 -
Obr. 19 Dvoustupňová varianta vstřikovacího zařízení [1] .....	34 -
Obr. 20 Schéma výroby folii vyfukováním, rozdil strojů v polohách vyfouknuté folie [13] .....	36 -
Obr. 21 Schéma tkalcovského stroje [24] .....	37 -
Obr. 22 Porovnání chování různých typů materiálů [4] .....	39 -
Obr. 23 Kompenzace paty v grafu [9] .....	39 -
Obr. 24 Základní tvar zkušebního tělíska pro tahovou zkoušku [9] .....	41 -
Obr. 25 Stádia deformace polymerního materiálu [4] .....	41 -
Obr. 26 Protivzpěrný přípravek [9] .....	42 -
Obr. 27 Rázové kladivo a zkouška dle Izoda [9] .....	44 -
Obr. 28 Geometrie zkušebního tělesa pro smyk [9] .....	44 -
Obr. 29 Obecná křivka tečení [1] .....	46 -
Obr. 30 Tahové diagramy různých materiálů [4] .....	49 -
Obr. 31 Závislost meze kluzu PE na teplotě .....	50 -
Obr. 32 Korozní komora Climacorr společnosti VLM .....	58 -
Obr. 33 Tahový stroj Zwick/Roell Z005 [32] .....	59 -
Obr. 34 Konfokální mikroskop Olympus s antivibrační podložkou .....	60 -
Obr. 35 Použitá sestava k pájení měděných trubek [34] .....	61 -
Obr. 36 Přípravek sloužící k testování většího množství jednotlivých PE-HD pásků .....	62 -
Obr. 37 Modely pro 3D tisk v programu Autodesk Inventor s ukázkou 3D tiskárny Prusa SL I .....	62 -
Obr. 38 Připravené 5 N závaží .....	63 -
Obr. 39 Tahová zkouška vzorku Juta 42 .....	64 -
Obr. 40 Tahová zkouška vzorku Tama 41 .....	64 -
Obr. 41 Tahová zkouška vzorku Tama ROK .....	64 -
Obr. 42 Výsledek průběhu zkoušky se 7 a 5 N závaží .....	65 -
Obr. 43 Průběhy tažnosti v závislosti na počtu dní (a) - Juta 42, (b) - Tama 41, (c) Tama ROK .....	66 -
Obr. 44 Grafické porovnání vzorků Tama 41 se vzorky Juta 42 .....	67 -
Obr. 45 Grafické porovnání vzorků Tama 41 se vzorky Tama ROK .....	68 -
Obr. 46 Mikrostruktury PE-HD pásků po týdnu zatěžování a - Tama 41 7 N, b - Tama 41 5 N, c - Juta 42 7 N (přetřeno), d - Juta 42 5 N .....	69 -
Obr. 47 Vzorek Juta 42 před zkoušením .....	70 -
Obr. 48 Vzorek Juta 42 - 2 týdny 5 N .....	70 -
Obr. 49 Profilometrický rozbor povrchu Juta 42 - 2 týdny 5 N .....	71 -
Obr. 50 Vzorek Tama 41 před zkoušením .....	71 -
Obr. 51 Vzorek Tama 41 - 2 týdny 6 N .....	71 -
Obr. 52 Profilometrický rozbor povrchu Tama 41 - 2 týdny 6 N .....	72 -
Obr. 53 Profilometrický rozbor Tama ROK - 2 týdny 4 N .....	72 -



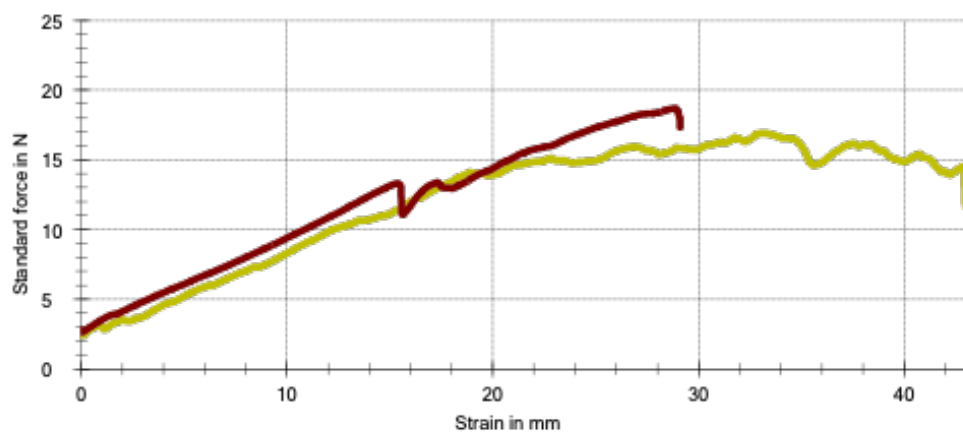
### 13 Seznam tabulek

Tab. 1 Charakteristika PE-LD a PE-HD [2].....	- 24 -
Tab. 2 Rozdíly v podmínkách výroby PE-HD [2] .....	- 25 -
Tab. 3 Vzorky získané uvedenou metodikou [29] .....	- 55 -
Tab. 4 Vypočtené hodnoty z experimentu využité v grafu .....	- 67 -
Tab. 5 Vypočtené hodnoty z experimentu využité v grafu .....	- 68 -
Tab. 6 Tabulka porovnání výsledků z tahových zkoušek před a po 2 týdenním zatížením-	72 -

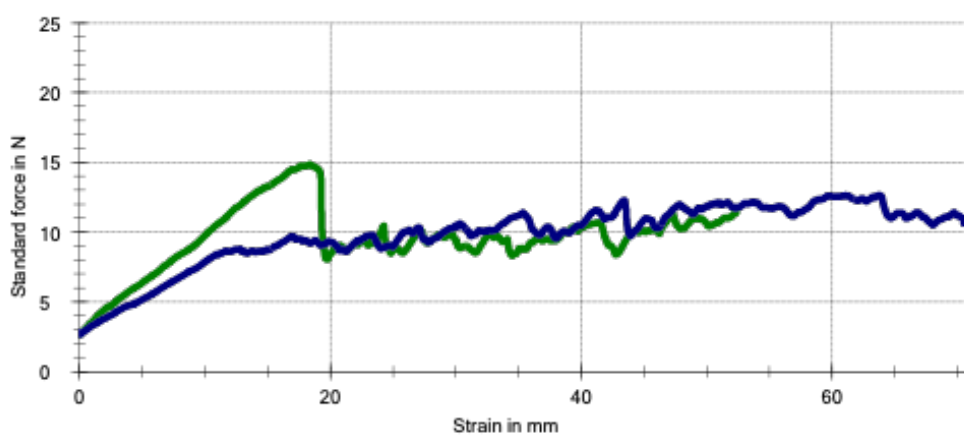
## 14 Přílohy



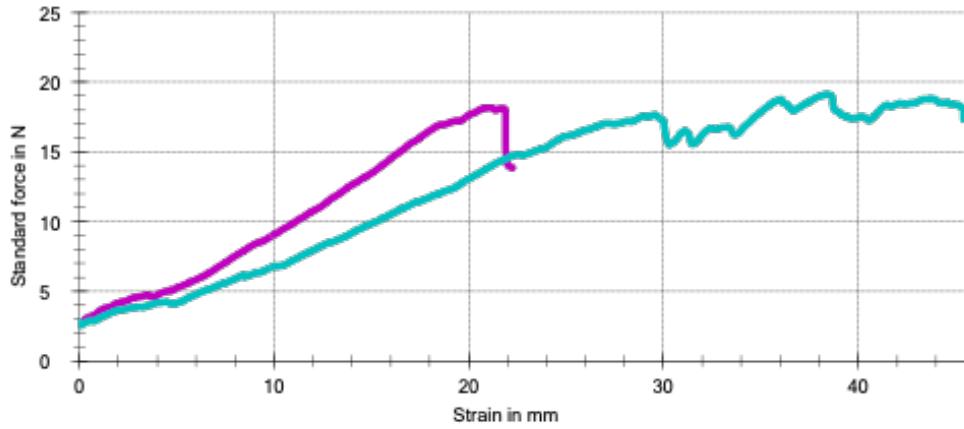
Tama 41 – 2 týdny 6 N



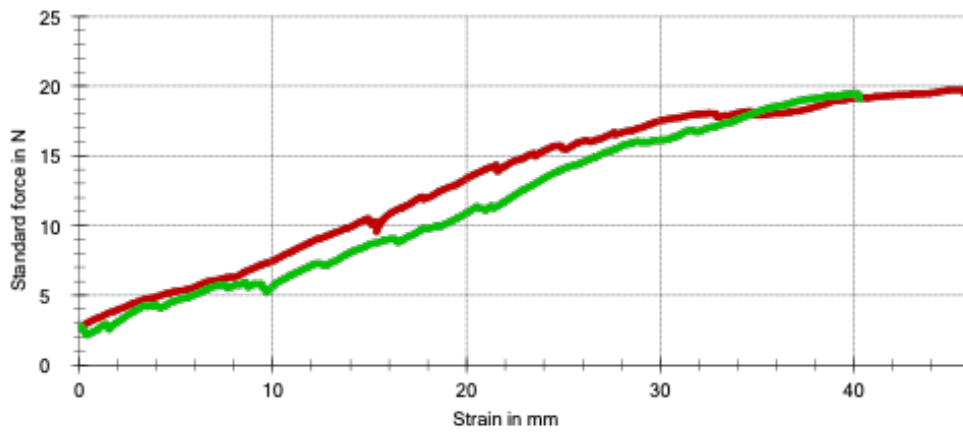
Tama 41 – 2 týdny 5 N



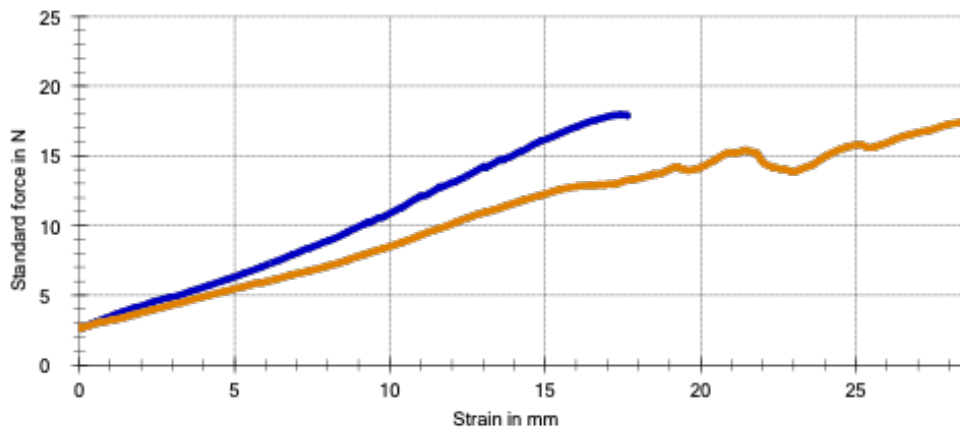
Tama 41 – 2 týdny 4 N



Juta 42 – 2 týdny 5 N



Juta 42 – 2 týdny 4 N



Tama ROK – 2 týdny 6 N