

Problematika tvarování různých typů polymerních folií i plněných

Bc. Ondřej Štěrbá

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Štěrba**
Osobní číslo: **T130016**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Problematika tvarování různých typů polymerních folií i plněných**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na dané téma ze zdrojů z internetu i impaktovaných časopisů.
2. Na základě rešerše navrhnete a připravte a podle pokynů ohodnotte vlastnosti připravených vrorků a shrnutím výsledků doporučte optimální postup a podmínky pro tvarování jednotlivých materiálů

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **Mleziva, Snuparek., Polymery, výroba, výroba, struktura a použití, Sobotáles, Praha 2000**
2. **Stepek, Zelinger, Kuta, Technologie zpracování a vlastnosti plastů, SNTL/Alfa Praha 1989**
3. **další zdroje z internetu a impaktovaných časopisů**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Alice Tesaříková Svobodova

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 9. února 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Štěrba Ondřej

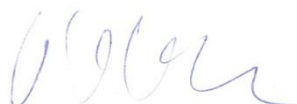
Obor: Výrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 30. 4. 2015



.....

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

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

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

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

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

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

³⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce sleduje možnosti tvarování různých typů polymerních folií, čistých a s různými typy plniv s různou koncentrací. Diplomantem budou navrženy dvě až tři tvarovací formy s takovým tvarem, aby bylo možno posoudit výsledek tvarování založené na tvarech běžně užívaných forem pro komerčně používané tvarované výrobky. Z čistých polymerních matric i z připravených předsměsí budou připraveny různými zpracovatelskými technikami folie a ty pak budou použity pro tvarování. Výsledky budou zhodnoceny jak vizuálně, tak pomocí některého z normovaných hodnocení.

Klíčová slova: Tvarování, folie, polymer

ABSTRACT

Diploma work observes possibilities of shaping of various types of polymer films, without and with different fillers with various concentration. Two of three shaping forms with the shape appropriate for the shaping result evaluation will be proposed and prepared. The shape will correspond with the shapes commonly used for the shaping technology in industry. Films processed by several engineering technologies from the neat polymer matrices and prepared mixtures with filler will be produced. And consequently used for shaping. The result will be evaluated either by „eye“ observation or by some method based on the standard evaluation process.

Keywords: polymer films, shaping, polymer

Rád bych poděkoval vedoucí práce Ing. Alici Tesaříkové Svobodové za konzultace a cenné rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji paní doc. Ing. Dagmar Meřínské Ph. D. za aktivní podporu v laboratoři.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a převzaté poznatky jsem řádně citoval.

Rovněž prohlašuji, že odevzdaná diplomová práce je shodná s verzí, kterou jsem nahrál do IS/STAG

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 PLASTY JAKO POLYMERNÍ MATERIÁLY A JEJICH ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.1.1 Podle teplotního chování.....	13
1.1.2 Podle druhu přísad.....	14
1.1.3 Podle nadmolekulární struktury	14
1.2 PŘÍPRAVA SYNTETICKÝCH POLYMERŮ	15
1.2.1 Monomer	16
1.2.2 Polymerace	16
1.2.3 Polykondenzace.....	17
1.2.4 Polyadice	17
1.3 PLNIVA.....	18
1.3.1 Aktivní plniva.....	19
1.3.2 Neaktivní plniva	19
1.3.3 Částicová plniva	19
1.3.4 Vyztužující	19
1.3.5 Nanoplňiva	19
1.4 MATERIÁLY PRO VÝROBU FOLIÍ	20
1.4.1 Polypropylen (PP)	20
1.4.2 Polyamid (PA).....	22
1.4.3 Polyvinylchlorid (PVC)	23
1.4.4 Polyetylén (PE)	24
1.4.5 Polyetylentereftalát (PET).....	25
1.4.6 Polystyren (PS).....	26
2 TECHNOLOGIE VÝROBY FOLIÍ.....	28
2.1 VYTLAČOVÁNÍ	28
2.1.1 Vytlačovací stroje.....	28
2.1.2 Vytlačování folií.....	29
2.2 VYFUKOVÁNÍ FOLIÍ	30
2.2.1 Válcování folií (kalandrování)	32
2.2.2 Lití folií	34
3 TVAROVÁNÍ POLYMERŮ	35
3.1 TVAROVÁNÍ FOLIÍ ZA TEPLA	35
3.1.1 Pozitivní a negativní tvarování s předtažením	36
3.1.2 Negativní vakuové tvarování bez předtažení	37
4 ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	38
4.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	38
4.2 TAHOVÉ ZKOUŠKY	38
4.2.1 Modul pružnosti(podleYoungva modelu).....	39
4.2.2 Mez úměrnosti $R_u(\sigma U)$	40
Hookův zákon.....	40

4.2.3	Mez pružnosti (elasticity) R_e (σ_E).....	40
4.2.4	Mez kluzu RK (σ_K).....	40
4.2.5	Mez pevnosti v tahu	41
4.3	ZKOUŠKY ODOLNOSTI PROTI PRŮRAZU	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
5	POSTUP A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	44
6	PŘÍPRAVA A ZPRACOVÁNÍ SMĚSÍ.....	46
6.1	POPIS A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ:.....	48
6.1.1	LDPE (Low-density-polyethylen).....	48
6.1.2	Malenizovaný PE	48
6.1.3	Jíl (Cloisite 25A).....	48
6.1.4	Oxid titaničitý.....	49
6.2	VÝROBA GRANULÁTU	49
6.3	VYTLAČOVÁNÍ FÓLIÍ	50
6.4	TVAROVÁNÍ VZORKŮ.....	53
6.5	NASTAVENÍ TVAROVACÍHO STROJE	55
6.6	VYHODNOCENÍ TVAROVÁNÍ	57
6.6.1	Folie s plnivem Cloisite 25A.....	58
6.6.2	Folie s plnivem oxidu titaničitým	58
6.6.3	Folie s plnivem uhličitanu vápenatým	58
7	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	59
7.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	59
7.2	MĚŘENÍ PEVNOSTI V TAHU	60
7.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TVÁŘENÍ	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
7.3.1	Folie s plnivem MAPE.....	63
	3% MAPE, tvárník č. 1	64
	7% MAPE, tvárník č. 1	66
	7% MAPE, tvárník č. 2.....	67
7.3.2	Zhodnocení měření.....	76
	ZÁVĚR	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	78
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	82
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

ÚVOD

Polymery provází lidskou civilizaci po celou dobu její existence. V celém průběhu dějin nastalo mnoho změn, jak politických, geografických tak, z našeho pohledu nejdůležitější, technologických. Polymery jako konstrukční materiály mají své zastoupení již v době kamenné, postupem času se rozšiřovaly až po dobu železnou, kde zaznamenáváme mírný pokles spotřeby tak unifikovaného materiálu. S nástupem nových technologií ve 20. a 21. století se „plasty“ dostávají opět do popředí a nové trendy naznačují, že se stanou světově nejpoužívanějším konstrukčním materiálem.

Jako každé konstrukční nebo technologické řešení, mají i polymery své výhody a nevýhody. Malá tuhost, pevnost, sklon k tečení za studena (creep) jsou největšími nedostatky „materiálu budoucnosti“. Výzkumné týmy a laboratoře po celém světě se snaží mechanické vlastnosti neustále zdokonalovat a vylepšovat. Na druhou stranu většina technických aplikací vyžaduje nízkou hmotnost, snadnější zpracování, čemuž polymery naprosto vyhovují.

Škála výrobků a polotovarů vyráběných z polymerních materiálů je velmi široká, nejčastěji je můžeme najít v automobilovém, stavebním, elektrotechnickém a potravinářském průmyslu. Jednotlivá odvětví neustále optimalizují technologii výroby a konstrukci tak, aby byl dán prostor novým materiálům, především kompozity zažívají prudký rozvoj. Na rozdíl od produktů vyrobených z kovů, skla či dřeva jsou produkty vyráběné z polymerů převážně tenkostěnné. Aby bylo dosaženo požadovaných mechanických vlastností, jsou hojně používána žebra a výztuže.

Výše uvedené informace naznačují, že deformace polymerů jsou přímo závislé na době zatěžování a působící teplotě.

Ve zpracování polymerů je k dispozici mnoho technologií a postupů, nejčastěji je však používána metoda vstřikování. Pro výrobu fólií se upřednostňují metody válcování, vytlačování vyfukování a lití. Jedná se o kontinuální procesy, zabezpečující vysokou produktivitu a stálou jakost. Takto vyrobené materiály jsou dále zpracovávány metodami na hotové výrobky např. lisováním, tvarováním za tepla i studena, upravovány dezénováním apod.

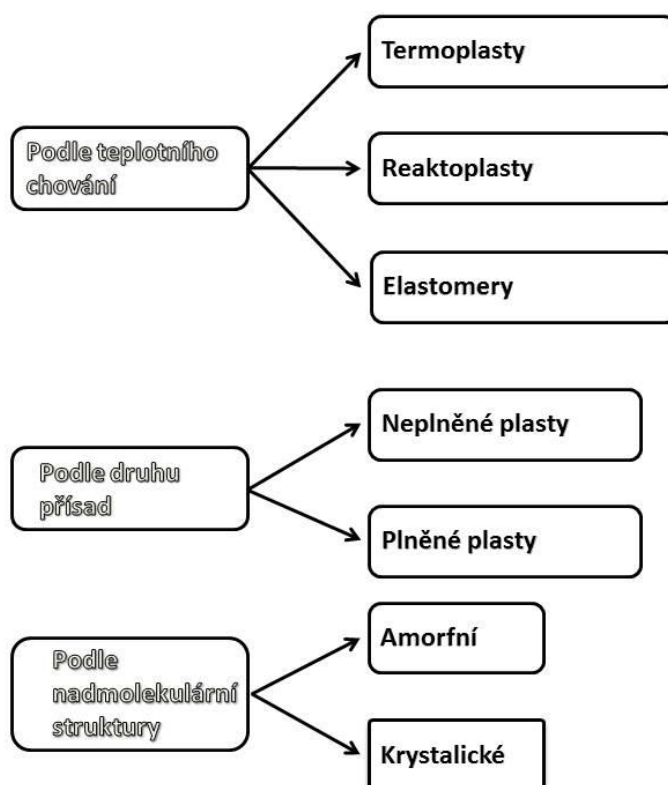
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PLASTY JAKO POLYMERNÍ MATERIÁLY A JEJICH ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ

V moderní době nabízí světový trh různorodé druhy plastů. Průmysl a technická praxe využívá, jen několik desítek druhů. Polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid jsou polymery, jejichž spotřeba zaujímá cca 70% světové produkce. Sortiment termoplastů se neustále rozšiřuje. Nové polymery vznikají modifikací a vylepšení stávajících materiálů. Širší sortiment materiálů klade větší důraz na znalost vlastností, ale dokáže udržet přijatelnou cenu materiálu na různé výrobky.

Nejdůležitějšími parametry jsou při volbě konstrukčního materiálu především jeho zpracovatelnost, technologické podmínky a hlavně pořizovací cena. Chemická a fyzikální struktura polymerů předurčuje odolnost a vlastnost budoucího výrobku. Konečnou vlastnost produktu je možné ovlivnit i způsobem zpracování a výrobními podmínkami. [1]

Rozdělení polymerních materiálů (Obr. 1) není přesně stanoveno, je mnoho kritérií ovlivňující seřazení podle nejdůležitějších parametrů.

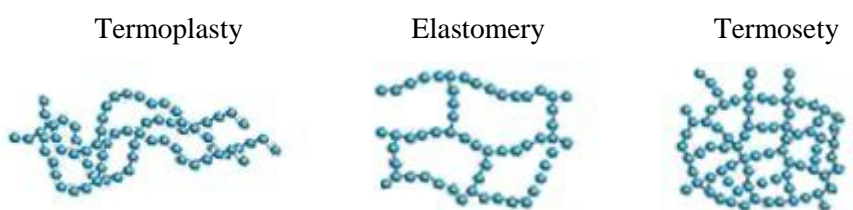


Obr. 1 Základní rozdělení polymerů

1.1 Základní rozdělení polymerů

1.1.1 Podle teplotního chování

Polymery lze rozdělit podle mnoha kritérií, technická literatura a většina zdrojů, příkládají velkou váhu rozlišení plastů podle teplotního chování. Jednotlivé typy mají i rozdílnou strukturu (Obr. 2). [2]



Obr. 2 Struktura polymerů podle teplotního rozdělení[3]

Termoplasty jsou polymerní materiály, které mění své skupenství a vlastnosti při dodání, nebo odběru tepla. Tato vlastnost umožňuje jejich zpracování tvářecími a tvarovacími technologiemi. Oproti reaktoplastům můžeme procesy změny teplot a tvaru opakovat. Základní vlastnosti materiálu se po několika cyklech mění, dochází k degradaci. Zásadní teplotní hranicí u semikrystalických plastů je bod T_t , ochlazením pod tuto teplotu přejde termoplast do tuhého stavu. V případě amorfních plastů je teplota tuhnutí označována T_f . Nejčastěji zastoupené polymery jsou Polypropylen (PP), Polyetylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC), Polystyren (PS) a jiné.[1]

Reaktoplasty představují teplem tvrditelné polymery, v minulosti nazývané termosety. Stejně jako termoplasty měknou při ohřívání, dají se dobře tvářet, ale jen omezenou dobu. Při ohřevu prostorově zesílují, což je nevratná chemická reakce. Další ohřev nemá smysl, plast se stal vytvrzeným, je neroztavitelný a nerozpustný. Chemická změna reaktoplastu může být vyvolána i zářením, nebo použitím katalyzátoru. Nejčastěji používanými reaktoplasty jsou fenolformaldehydové, epoxidové pryskyřice a hmoty na bázi polyesteru. [1]

Elastomery je nadskupina pro kaučuky (pryže), mají podobné zpracovatelské vlastnosti jako reaktoplasty. Elastomer je, jak už název napovídá, elastický polymer, který má vysokou úroveň pružné deformace a objemovou stabilitu. Všechny elastomery se skládají ze dvou složek (Báze + Aktivační složka). Po zahřátí je můžeme snadněji tvářet, ale jen po určitý časový interval. Polymer je z vulkanizován za pomoci ohřevu. Reakce je nevratná a po vulkanizaci dostáváme velmi pružný a elastický materiál. [2]

1.1.2 Podle druhu přísad

Přísady zvané plniva mají za úkol vylepšit například mechanické vlastnosti, ochránit materiál před chemickými vlivy, snížit výrobní cenu polymeru, zvýšit odolnost proti hoření, nebo jen upravit tvarovou stálost.

Kovová, uhlíková, nebo skelná vlákna zvyšují pevnost v tahu. Důležitý je i poměr množství polymeru a výztuže, tato hodnota dosahuje maximálně 50-ti procent. Podmínkou je, aby vlákna či textilní rohože byla obalena vrstvou polymeru.

Nejčastěji jsou plniva použita pro snížení ceny. Kovové prášky podporují dobrou tepelnou vodivost.

Kompletní výčet plniv je velmi rozsáhlý, to naznačuje, že polymery jsou velmi unifikovány a všestranný materiál, který lze přizpůsobit mnoha podmínkám. [4]

Neplněné plasty mají vlastnosti, které nejsou ovlivněny množstvím přísad.

Plněné plasty mají upravené fyzikální a mechanické vlastnosti. Funkci pojiva plní makromolekulární látka. Přísadou mohou být nejen plniva, ale také stabilizátory, barviva, maziva, tvrdidla, iniciátory, nadouvadla. [4]

1.1.3 Podle nadmolekulární struktury

Rozhodujícím parametrem rozdělení stupeň uspořádanosti.

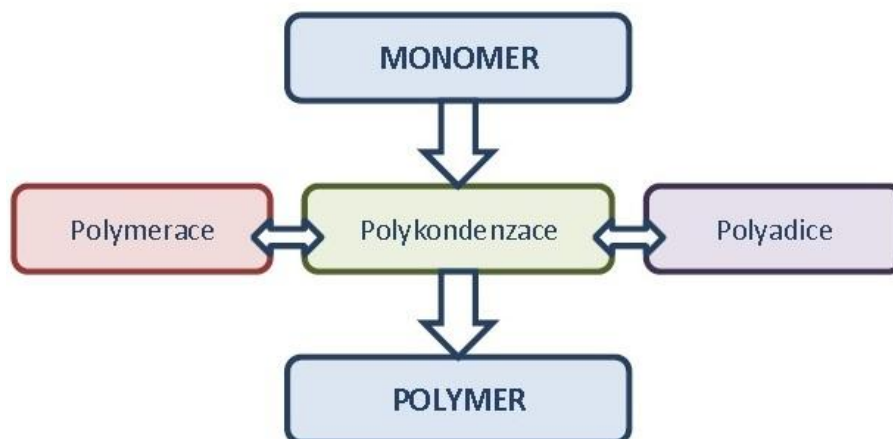
Amorfni struktura se vyznačuje nepravidelnou krystalickou strukturou molekul. Toto uspořádání příznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti, zejména pevnost, křehkost, modul pružnosti, tvrdost. Nízká hodnota indexu lomu světla poukazuje na čirost, nebo průhlednost materiálu. Součinitel teplotní roztažnosti α je rovněž malý v porovnání s krystalickými

polymery. Vhodnost aplikace těchto materiálů je do teploty zesklennění T_g . Základní typy plastů s amorfni strukturou jsou polystyren (PS), polykarbonát (PC), polymethylmethakrylát (PMMA). [1]

Krystalické, nebo-li semikrystalické plasty mají částečně uspořádanou strukturu mezi částmi amorfni struktury. Zvyšující se stupeň krystalinity znamená vyšší Youngův modul, pevnost a houževnatost materiálu. Hodnoty stupně krystalinity se pohybují v rozmezí 40-90 %, hodnota znázorňuje relativní podíl uspořádaných oblastí. Index lomu je vyšší než u amorfni platů, tím se snižuje průhlednost a materiál je spíše mléčně zbarven. Mezi zástupce krystalických plastů patří především polypropylen (PP), polyetylen (PE), polytetrafluorethylen (PTFE).[1, 2]

1.2 Příprava syntetických polymerů

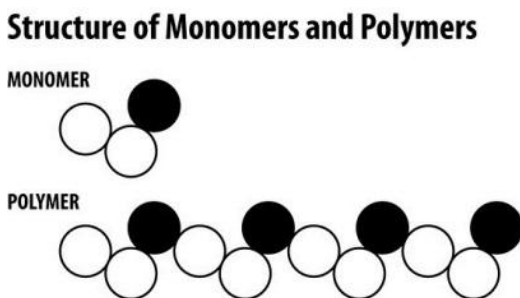
Primárními zdroji pro výrobu plastů je ropa a zemní plyn, jinak řečeno fosilní zdroje. Tato nejzákladnější a nejdůležitější „bohatství“ přírody jsou ale omezená, proto jimi musíme šetřit a zvýšit úsilí o recyklaci použitých plastů. Ropa a zemní plyn jako zdroje energie obsahují mnoho chemických látek, používaných napříč celým životem moderní lidské populace. Pro výrobu polymerů si bereme jen část prvků (acetylen, propylen, ethylen, styren, vinyl-chlorid, butadien). Pomocí chemického průmyslu je dále zpracováváme na polymerní materiály. (PP, PVC, ABS, PA a další) (Obr. 3). Dalším zpracováním například, vytlačováním, vstřikováním, válcováním a jinými technologickými procesy vyrábíme konečné výrobky jako vlákna, trubky, nádoby, elastomerní předměty, povlaky a adheziva.[5]



Obr. 3 Schéma výroby syntetických polymerů

1.2.1 Monomer

Výchozí látka pro výrobu polymerů (makromolekulárních látek), (Obr. 4). Aby mohl polymer vzniknout, musí monomer chemicky reagovat s okolními molekulami a vytvořit s nimi meziatomové vazby. [5]

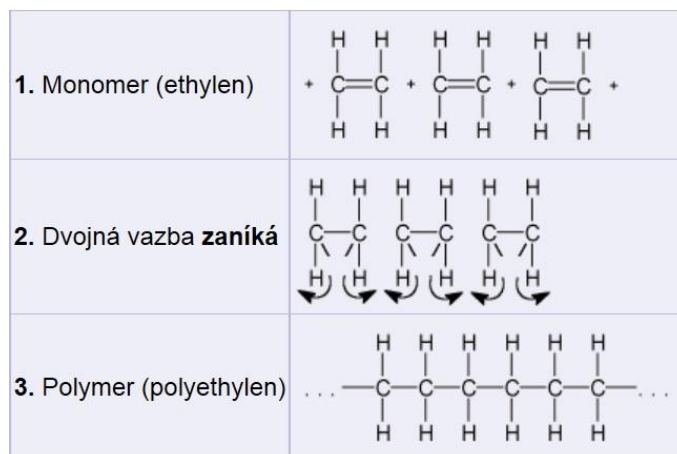


Obr. 4 Struktura monomeru a polymeru[6]

1.2.2 Polymerace

Polymerace (Obr. 5) někdy nazývaná i polymerizace je chemický proces, při které se molekuly monomeru slučují. Reakce má za následek vznik makromolekulární látky bez možného vzniku vedlejšího produktu. Podmínkou takto vzniklého polymeru je monomer s alespoň jednou dvojnou vazbou. Polymerizaci řadíme mezi nejzákladnější princip výroby polymerů. [5]

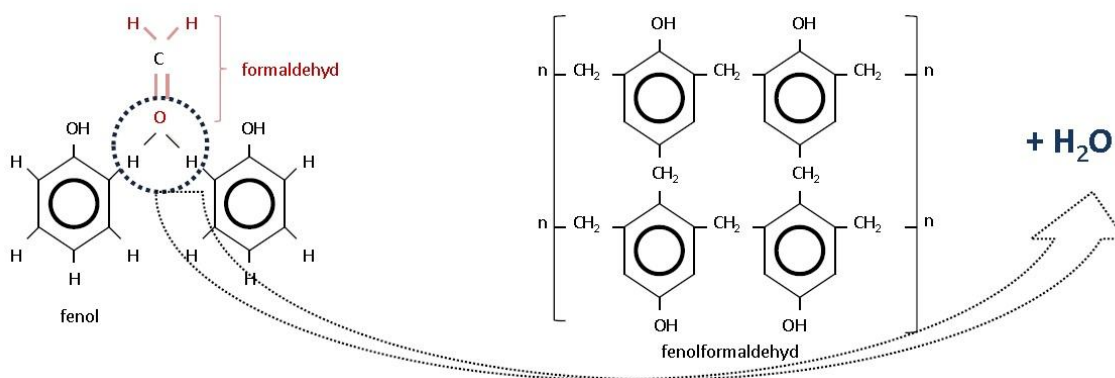
Při polymerizaci se používá jednoho monomeru (homopolymerizace), nebo více polymerů (kopolymerizace), řetězová polymerace je typický chemický proces pro výrobu PVC, PS, PP, PE a další.



Obr. 5 Polymerace

1.2.3 Polykondenzace

Je to také chemická reakce, při níž se molekuly monomeru slučují a tvoří makromolekulární látky. V tomto případě ale pro úspěšné zahájení chemické reakce musí monomer obsahovat alespoň dvě reaktivní skupiny. Reakce je kontinuální, z monomeru vzniká dimer, dále trimer a postupně polymer. Vedlejším produktem reakce jsou jiné prvky, například voda, nebo amoniak. Polykondenzací, (Obr. 6) se hlavně vyrábí polyestery, polyamidy, polykarbonáty. [5]

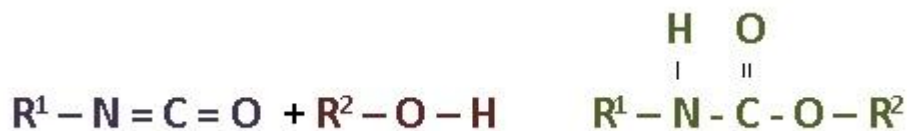


Obr. 6 Polykondenzace

1.2.4 Polyadice

Při chemickém jevu polyadice se monomery nejen vzájemně spojují, ale vytvářejí adiční reakce. Ty mohou vytvářet jen molekuly s vhodnou funkční skupinou, nejméně však dvě.

Reakce (Obr. 7) je velmi podobná polymeraci, s tím rozdílem, že není zachována struktura produktu ve srovnání se strukturou výchozí látky. Zjednodušeně se dá říct, že celá reakce je založena na přesunu atomů vodíku (H). Příkladem je příprava polyuretanu nebo epoxidů. [5]

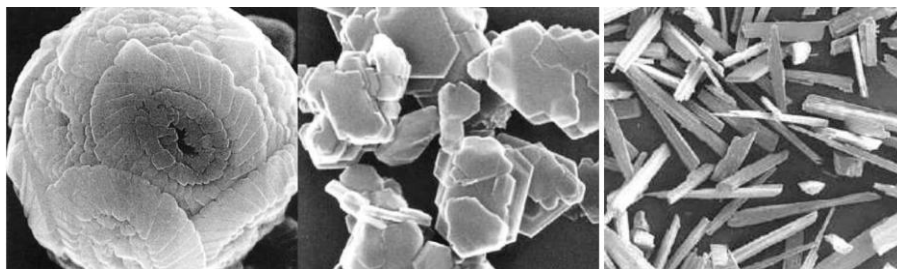


Obr. 7 Polyadice

1.3 Plniva

Pro plnění polymerů se používá široká škála přírodních a syntetických anorganických i organických prvků, představují přísady, které mají vliv na vlastnosti polymerních materiálů (mechanické vlastnosti, tokové vlastnosti taveniny, povrchový vzhled a další). Dále slouží jako prostředek pro snížení ceny základního materiálu, případně zvyšují pevnost, houževnatost, tuhost, odolnost vůči oděru, jejich odolnost vůči teplu, ohni, korozi a stárnutí. Plniva se nejčastěji používají pro reaktoplasty a kaučuky, ale v poslední době se rozšiřuje i řada plněných termoplastů či termoplastických elastomerů. V případě použití velkých částic mohou nastat větší rozdíly. Hlavní rozdělení plniv je možno odvodit podle jejich působení na polymer (aktivní, pasivní). Adheze mezi polymerem a plnivem určuje celkovou aktivitu. [6, 7]

Z jiného pohledu je možné plniva též rozdělit na částicová, vyztužující a nanoplňiva, podle tvaru (Obr. 8) na sférická, destičková a vláknitá.



Obr. 8 Vápenec (sférické), Mastenec (destičkové), Wollastonit (časticové) [8]

Rozměry částic sahají od nanometrů (nanoplňiva) do několika milimetrů. Vnitřní struktura dělí částice plniv na duté, plné, nebo pórovité. Nejčastěji jsou plňiva používána pro polymery PVC, PP a PA. Zvýšená spotřeba plniv je přímo úměrná se zvyšující se výrobou polymerů. [8]

1.3.1 Aktivní plňiva

Hlavní předností a použitím aktivních plniv je zdokonalení hlavně mechanických vlastností. Rozměr jejich částic je menší než u pasivních plniv. Lze ho dále zmenšovat procesy, které ovlivní rozměry a upraví povrch. [6, 7]

1.3.2 Neaktivní plňiva

Největším přínosem neaktivních (plnicích) plniv je vyplnění prostoru v polymerních směsích, tím dosahujeme nižší ceny a redukuje hustotu. Požadavkem na neaktivní plňiva je zachování anizotropních vlastností a zamezení chemických vlastností s polymerem. Velikost částic plniv je rozhodující parametr při jejich rozlišení. Dále nelze plňiva přesně rozdělit na aktivní nebo pasivní, pro každý polymer jsou chápány jiným způsobem, a navíc jejich aktivitu/neaktivitu lze upravit či změnit adekvátní modifikací.[9]

1.3.3 Částicová plňiva

Do skupiny částicových plniv patří balotina (skleněné kuličky), mastek, kaolin, vápenec, saze, koks. Dochází především ke změně viskozity (zhoršuje se tekutost), tvrdosti, tepelné odolnosti. Kluzné vlastnosti, tepelnou vodivost a vnitřně izolační odpor upravují MoS₂, grafit a kovová vlákna. [10]

1.3.4 Vyztužující

Hlavním představiteli vyztužujících plniv jsou vlákna vyráběná z různých materiálů (sklo, uhlík, nerezové kovy, titanové kovy, alkalické kovy, karbidy kovů, minerální vlna, vlákna aromatických polymerů). Vyšší mechanické vlastnosti, sníženou průtažnost, větší stálost za vyšších teplot, menší těkavost za studena vykazují kompozity s delšími vlákny. [10]

1.3.5 Nanoplňiva

Pro získání ještě lepších mechanických a fyzikálních vlastností polymerů je nutné použití nanoplňiv. Rozměry částic těchto prvků se pohybují kolem 10⁻⁹ m, na rozdíl od běžných plniv, kde je velikost 10⁻⁶ m. Vlastnosti typu tuhost, rozměrová stabilita, odolnost proti

hoření, transparentnost dosahují lepších výsledku a posouvají polymery, jako konstrukční materiály do nových odvětví průmyslu.

Použití nanočástic doprovází i problémy s jejich zpracování a zvyšují nároky na výrobní technologie. Hlavním problémem je získání a příprava rovnoměrně promíchané směsi základní složky s plnivem, slučitelnost chemických struktur obou složek je velmi nízká. Tato negativní vlastnost brání širšímu používání nanoplňiv.[11]

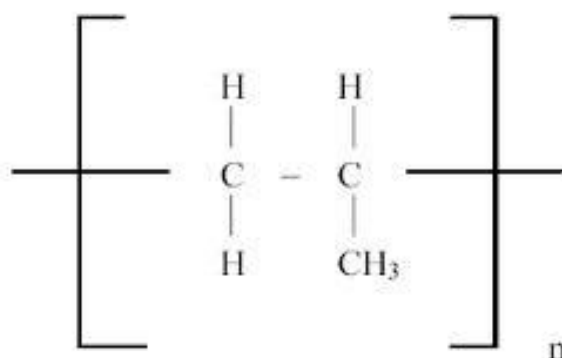
Značně dominantními druhy nanoplňiv jsou jíly a nanotrubičky na bázi oxidu křemičitého SiO₂.

1.4 Materiály pro výrobu folií

Polymerů používaných v technické praxi je mnoho druhů. V následující kapitole je zpracován přehled těch nejpoužívanějších. Termoplasty tvoří většinu polymerů zpracovávaných v průmyslu. Folie a se vyrábějí především metodami válcování, vyfukování, vytlačování a lití. [8]

1.4.1 Polypropylen (PP)

Polypropylen (Obr. 9) se vyrábí pomocí chemické reakce monomeru propylen. Běžně je k dispozici ve formě monomeru nebo kopolymeru. Spadá do skupiny polyolefinů. Charakteristická je methylo-vá skupina (CH₃). Prostorové uspořádání těchto skupin k hlavnímu uhlíkovému řetězci (-C-C-) rozděluje polymer na ataktický, izotaktický a syndiotaktický.



Obr. 9 Polypropylen

Stupeň krystality je celkem vysoký (kolem 60-75%), což polymer zakaluje, omezuje průhlednost a propustnost plynů a par. Jeho použití je doporučeno dlouhodobě do 110°C,

avšak teplota tání je až na hodnotě 160 až 170°C. Polypropylen vykazuje podobné vlastnosti jako polyetylen. Velkým rozdílem však je nízká houževnatost, malá odolnost proti nízkým teplotám (0°C, kopolymer až -40°C), povětrnostním podmínkám a oxidaci. Na druhou stranu vyniká výbornou odolností proti oděru, tím pádem i tvrdostí.

Dobře snáší i působení různorodých chemikálií. V průmyslu se cení snadné dělení, obrábění, tváření a svařování. Dále je vhodný pro použití, jako základní materiál, pro vstřikované výrobky. [8, 9]

Výčet výrobků z polypropylenu je velmi široký, počínaje nádobami, lehčenými deskami, tyče, reklamní tabule, končí bazény, septiky součásti automobilů a nábytkem.

Výborné vlastnosti polypropylenu umožňují výrobu obalů v autoklávech za působení tepla. Menší problém vzniká při svařování tohoto materiálu. Lakování, nebo koextruze polyetylenem řeší tento nedostatek.

Balící folie s průmyslovým označením BOPP (*Biaxial oriented polypropylen* – biaxiálně orientovaný polypropylen) jsou velmi častou aplikací polypropylenu. (Obr. 10). Dodává potřebnou tuhost a odolnost proti vlhkosti. Odolnosti proti působení vyšších teplot je využito při výrobě kelímků na kávu a horké nápoje, metodou vyfukování, nebo lisování.[9]



Obr. 10 BOPP Balící folie[10]

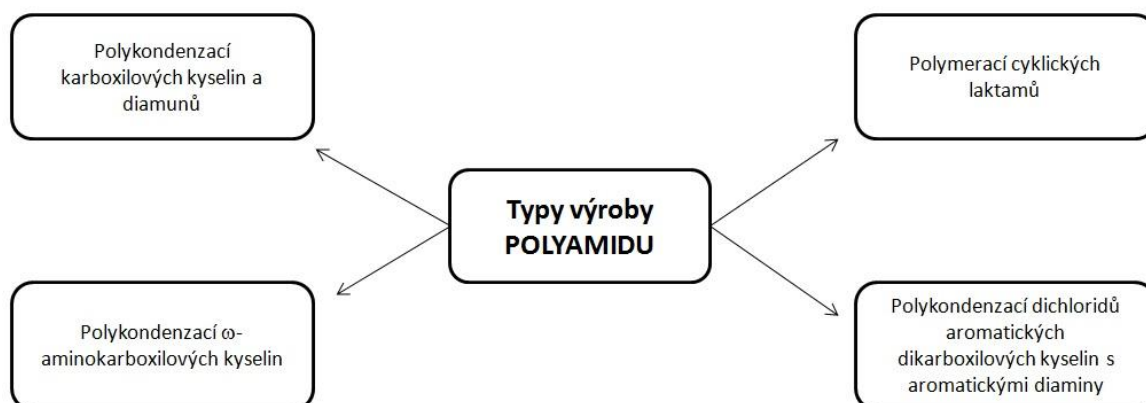
1.4.2 Polyamid (PA)

Dusíkaté skupiny jsou hlavní části makromolekulárních řetězců polyamidů. Základními chemickými prvky polyamidu jsou uhlík, kyslík, dusík, vodík (Obr. 11). Přidáním dalších chemických prvků získáme více druhů, které jsou popsány v dalším textu.



Obr. 11 Polyamid, strukturní vzorec

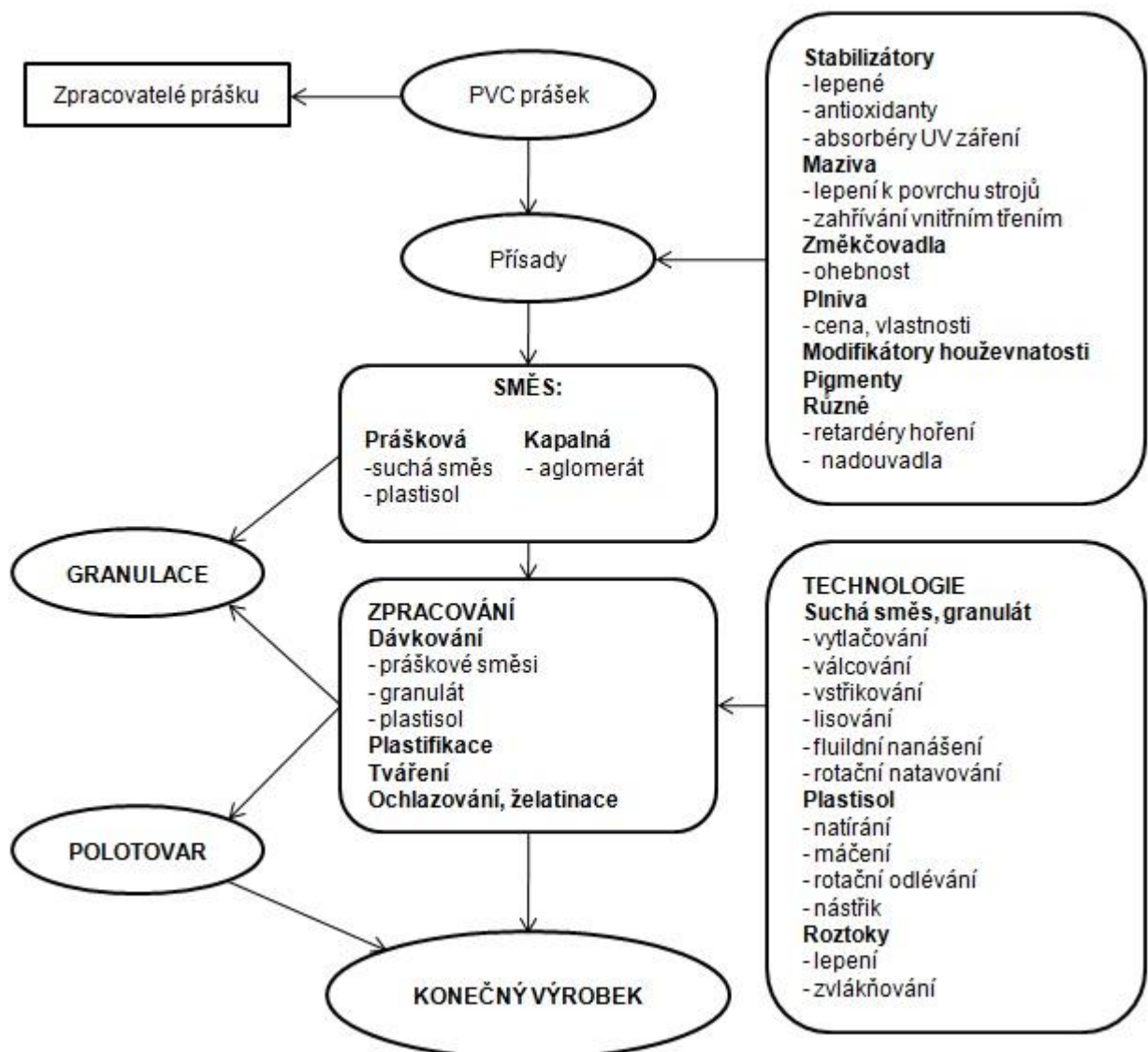
Jedná se o lineární polymery a je možné je rozdělit do čtyř skupin podle postupu výroby (Obr. 12). Nejrozšířenější skupinou a zároveň nejznámější jsou polyamidy s alifatickými řetězci. Výchozí monomery mají zásadní vliv na konečné vlastnosti polyamidů. Výrobci používají polyamidy především z důvodu vysoké houževnatosti, tvrdosti, dobrých elektroizolačních vlastností, odolnosti proti oděru. Tyto vlastnosti jsou velmi příznivé nejen pro výrobu plastových výrobků, ale i vláken. Již bylo zmíněno, že polymery vytlačují typické konstrukční materiály jako ocel nebo slitiny hliníku. V automobilovém průmyslu našly polyamidy využití při výrobě ozubených kol, součástí motoru a části karoserie, které byly v minulosti vyráběny z kovů. Dále se užívají jako izolátory v elektrotechnickém průmyslu. Polyamidová vlákna tvoří základní části lan, airbagů nití a dalších výrobků. Vlákna jsou i vhodné pro výrobu látek pro průmyslové použití a textilu. Další rozšířenou aplikaci polyamidů je balicí folie, například v potravinářství. Chrání produkty před okolními plyny, teplotami a nečistotami (balicí folie). [12]



Obr. 12 Typy výroby polyamidu

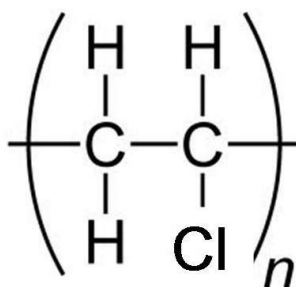
1.4.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Patří mezi nejznámější a nejrozšířenější polymery, spadá do skupiny vinylových polymerů. V objemu výroby se řadí za polyetylen a polypropylen. Jeho výroba je prováděna základními a velmi rozšířenými metodami (vytlačováním, vstřikováním, vakuovým tvarováním, válcováním). PVC (Obr. 13) velmi dobře reaguje se změkčovadly, stabilizátory, modifikátory a mazivy. Této vlastnosti se využívá při produkci elastických výrobků (rukavice, fólie, hračky). Novodur je opak měkčeného PVC, nepoužívá se změkčovadel. Je nutné ale použití stabilizace proti teplotní a fotooxidační degradaci. PVC je samozhášivý, odolný chemikáliím, povětrnostním vlivům. Pro svůj lesk a čírost je hojně využíván ve stavebnictví (dveře, ozdobné panely). [13]



Obr. 13 Schéma výroby PVC [13]

PVC (Obr. 14) je produkován polymerací monomeru (vinylchlorid), který je zdravotně závadný. Výstupem z procesu je bílá hmota ve formě prášku, nebo zrna. Výsledná struktura polymeru jsou řetězce, zřídka rozvětvená forma.



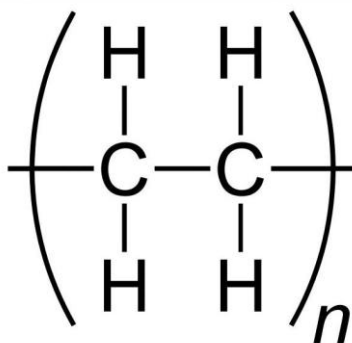
Obr. 14 Polyvinylchlorid, strukturní vzorec [14]

V poslední fázi výroby PVC jsou do směsi vinylchloridu rovnoměrně rozmíchána plniva, změkčovadla, maziva, stabilizátory, vždy podle použití hotového výrobku.

Vlastnosti PVC jsou přímo závislé na jeho molární hmotnosti, kterou ovlivňuje teplota polymerace. Dalším faktorem ovlivňující vlastnosti je velikost zrn, kterou je možné ovlivnit metodou polymerace. Velikost zrn je rozhodující pro volbu metody zpracování.[13]

1.4.4 Polyetylén (PE)

Polyetylen (Obr. 15) je termoplast, který vzniká polymerací ethenu a patří do skupiny polyolefinů. Základní vlastnosti jsou přímo úměrné hodnotám strukturních parametrů. Lineární **HDPE** je vysoko-hustotní polyetylen s menší houževnatostí a vyšší tvrdostí. Vyšší hustota znamená horší obrobiteľnosť, ale vyšší tuhosť, pevnosť a tvrdosť. Polyetylen s vyšší hustotou má lineární makromolekuly s malým počtem větví. Pravým opakem je rozvětvený polymer PE s nižší hustotou (LDPE), kde se makromolekuly shlukují v rozvětvené soustavě. Rozvětvený, nízko-hustotní, LDPE je měkký, pevný, ohebný a má vysoce rozvětvenou strukturu.



Obr. 15 Polyetylen, strukturální vzorec[15]

Jako ostatní materiály má i polyetylen nevýhody jako sklon k oxidaci, nízký bod měknutí, voskový vzhled, náchylnost na poškrábání, hořlavost. Z mechanických vlastností postrádá dostatečně velkou pevnost v tahu.

Přednosti materiálů z PE spočívají v dobrých elektroizolačních vlastnostech, nízké nasákavosti, minimální propustnost kapalin, vhodnost pro balení potravin. V průmyslu se s ním můžeme setkat v podobě trubek na rozvod vody, sudy, přepravky, obklady na stěny, části přepravních linek, tyče a desky jako polotovary pro třískové obrábění.[16]

1.4.5 Polyethylentereftalát (PET)

Při základním rozdělení rozlišujeme krystalický a amorfní PET.

Krystalický PET není vhodný pro širší využití v praxi. Nemá optimální mechanické vlastnosti, vysoká tvrdost a křehkost omezuje jeho širší uplatnění.

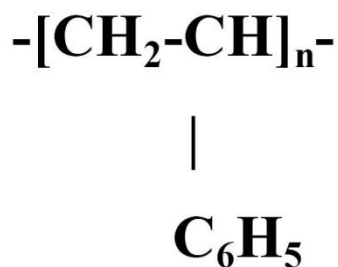
Amorfní PET je pravým opakem. Má velké zastoupení ve výrobě lahví, folií a vláken. Hlavní předností je tvarová stálost, transparentnost a mechanická pevnost i u folií. Další odvětví, kde je PET polymer zpracováván, je textilní průmysl. Polymerní vlákna odolávají proti mačkání lépe než textil, málo navlhají a rychle usychají. Teplotní odolnost vláken se pohybuje od -60 do 130 °C. V praxi se ale využívá do teploty 80°C, která představuje teplotu skelného přechodu (T_g). Mechanická pevnost přímo závisí na stupni polymerace. Ve srovnání s polyamidem mají PET vlákna lepší stálost při působení světelných paprsků. Samotná vlákna se vyrábí z taveniny, která je čerpána do zvlákňovací hubice s přidávanými tryskami. Fólie z PET jsou produkovány litím. Folie jsou transparentní a nacházejí uplatnění jako balicí materiál a v elektrotechnice. Jako konstrukční materiály vyniká ve vysoké tuhosti a houževnatosti.

Nenasycený trojfunkční typ PET polymeru se zpracovává i ve vyztuženém provedení. Skelná vlákna se používají nejčastěji jako výztuž, pro více namáhané části je možné použít i uhlíková vlákna. Jejich obsah se pohybuje mezi 10 až 45% ve výjimečných případech až 60%. Vyšší obsah vláken se do kompozitu přidává při použití minerálních plniv než u částicových.[17]

1.4.6 Polystyren (PS)

Amorfní a ataktický polymer (Obr. 16), který nemůže krystalizovat z důvodu nepravidelnosti v makromolekulárním řetězci. Jeho výroba se provádí ve většině případů polymerací styrénu blokovou technologií. Další možností polymerace je suspenzní, nebo emulzní metoda.

K hlavním přednostem patří výborná tuhost a pevnost, průhlednost, optické vlastnosti, malá nasákavost a výborná zpracovatelnost. Mezi nevýhody můžeme zařadit velkou křehkost, nízkou chemickou odolnost, malá odolnost proti korozi. Pevnost jen velmi málo ovlivňuje působení tepla. Díly z polyesteru lze aplikovat do prostředí, kde po delší dobu působí teplota i 90°C. Dielektrické a elektrické vlastnosti jsou na vysoké úrovni při absenci polární skupiny v makromolekule. Polyester je odolný vůči kyselinám, alkoholům tukům, solím. [18]



Obr. 16 Polystyren, strukturní vzorec[18]

Většina polyesterů je vhodná pro použití v potravinářském průmyslu, stavebnictví a elektrotechnice. Výrobky používáme nejčastěji jako nádoby, obaly, CD-Disky, hračky, kuchyňské potřeby. Polystyren je vhodný i pro použití plniv pro zdokonalení jeho vlastností. Polyester je vyráběn běžnými metodami jako vstřikování, vyfukování, vytlačování a tepelné tvarování. Granulát je potřebné sušit v sušárnách.

Polotovary a výrobky z polyesteru je možné i velmi kvalitně spojovat lepením, ale i svařováním. K dalším dokončovacím metodám patří i lakování, potiskování a pokovování.[18]

2 TECHNOLOGIE VÝROBY FOLIÍ

Technologie výroby folií

Výroba fólií z polymerních materiálů je pojata jako velkoobjemová. Využívá především kontinuální způsoby výroby jako vytlačování, vyfukování, válcování, nebo lití. Tyto technologie mohou být použity zvlášť.

2.1 Vytlačování

Tato technologie pracuje na principu formování materiálu přes širokoštěrbinovou hlavu. Směs polymeru a dalších prvků je působením tlaku a tepla přeměněna na taveninu a vytlačena k dalšímu zpracování. Technologie vytlačování slouží buď k výrobě konečného výrobku, nebo polotovaru, který je dále zpracováván dalšími postupy. Tlak na taveninu vytváří závit šroubu, nebo plocha pístu. Vytlačovací stroje jsou vestavěny do kompletní výrobní linky, která obsahuje další příslušenství pro zpracování polymerů, např. odtah, řezání, formování tvaru, kalibrace rozměrů.[19]

2.1.1 Vytlačovací stroje

Nejdůležitější částí vytlačovacího stroje (Obr. 17) je samotný šnek, který svým rozměrem určuje konečnou velikost celého zařízení.

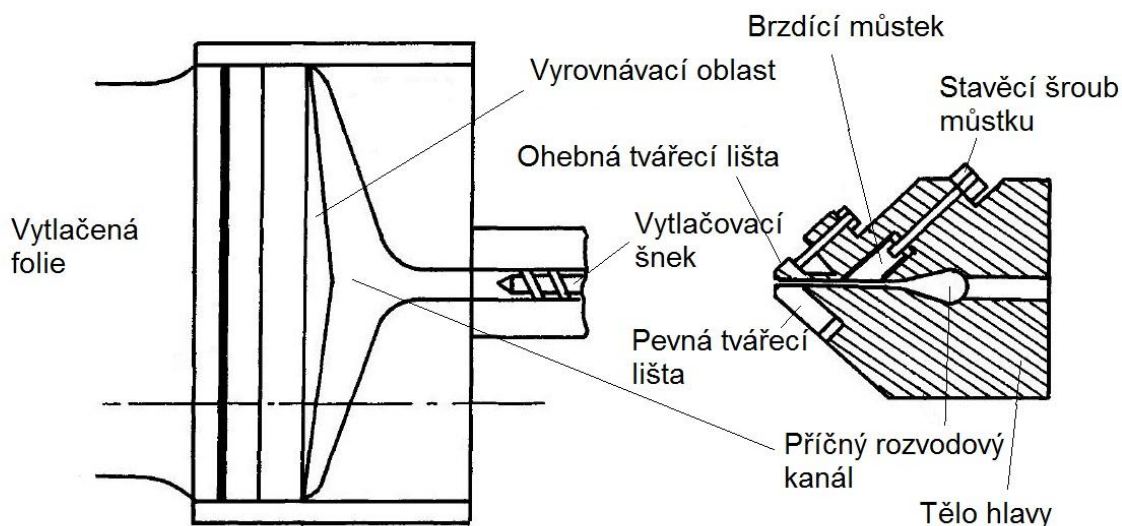


Obr. 17 Vytlačovací stroj [20]

V technické praxi se uplatňuje poměr mezi délkou a průměrem. Samotný povrch je upravován broušením, leštěním a pokovováním pro dosažení co nejdokonalejší jakosti povrchu. Stěna válce se naopak zdrsňuje tak, aby s ní měl polymer větší hodnotu tření než se šnekem. Rotace šneků doprovází tlakové a teplotní namáhání. Dostatečný přísun tepla zajišťují odporové topné pásy. Samotný proces transformuje mechanickou energii a stříhové namáhání na tepelnou energii. Jednotlivé zóny zařízení jsou vytápěny na jiné hodnoty teplot, proto jsou stroje osazeny měřicím zařízením, které vyhodnocuje teplotu podél šneku, zasílá signály do řídicí jednotky. Ta následně upraví hodnotu výhřevu dle nastavení. Vytlačovací stroje mohou být podle výbavy osazeny dalším příslušenstvím, např. snímáním výstupního tlaku, vývěvou a jiným. Vše záleží na specifikaci výroby a ceně zařízení.[19]

2.1.2 Vytlačování folií

Folie můžeme definovat jako plošné útvary s rozměrem jedné strany v průřezu maximálně 1 mm. V procesu vytlačování folie je nutné připojit k ústí vytlačovacího stroje hlavu se širokou štěrbinovou drážkou (Obr. 18).

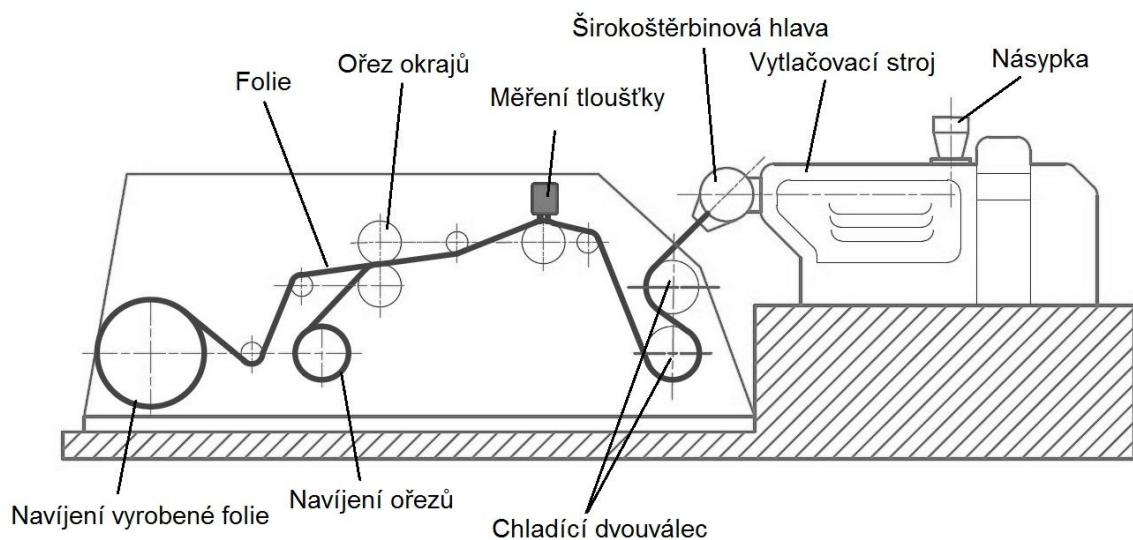


Obr. 18 Širokoštěrbinová hlava

Proces výroby je složitý a vyžaduje zapojení více operací. Proto je výrobní linka (Obr. 19) sestavena z více zařízení. Tavenina proudící od šneků prochází upravenou hlavou a vytváří tenkostěnný profil o velké šířce. Polymer je po vytlačení ze zařízení odtažován rotujícím válcem. Sílu vytlačované folie lze upravit korekcí pohyblivé čelisti na vytlačovací hlavě, nebo rychlostí otáčení na válci. Chlazení probíhá na soustavě kladek.[21]

Rychlost chlazení folie má značný vliv na pozdější mechanické vlastnosti, vzhled a strukturu. Tyto parametry dále ovlivňuje povrch válců, který je chromován a leštěn tak, aby nedocházelo k přilepení polymeru a narušení povrchu. Pro ještě lepší vlastnosti je možné dovybavit zařízení přítlačnými válci.

Další operace lze označit jako dokončovací. Patří zde zejména ořez rozšířených okrajů, měření délky, tloušťky, navíjení hotové folie, řezání na požadovanou délku.[21]



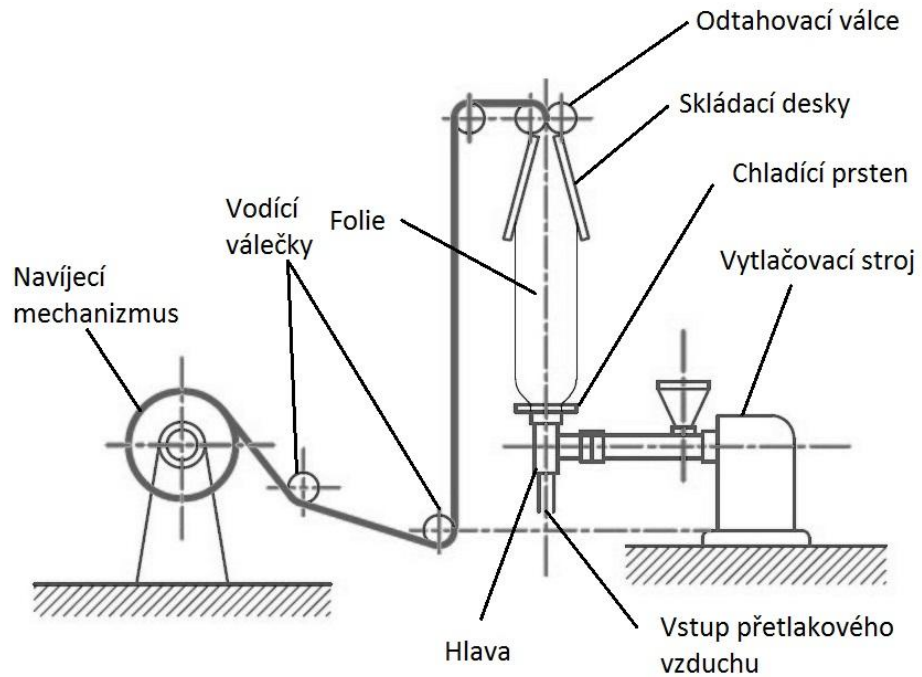
Obr. 19 Výrobní linka tenkých folií [21]

2.2 Vyfukování folií

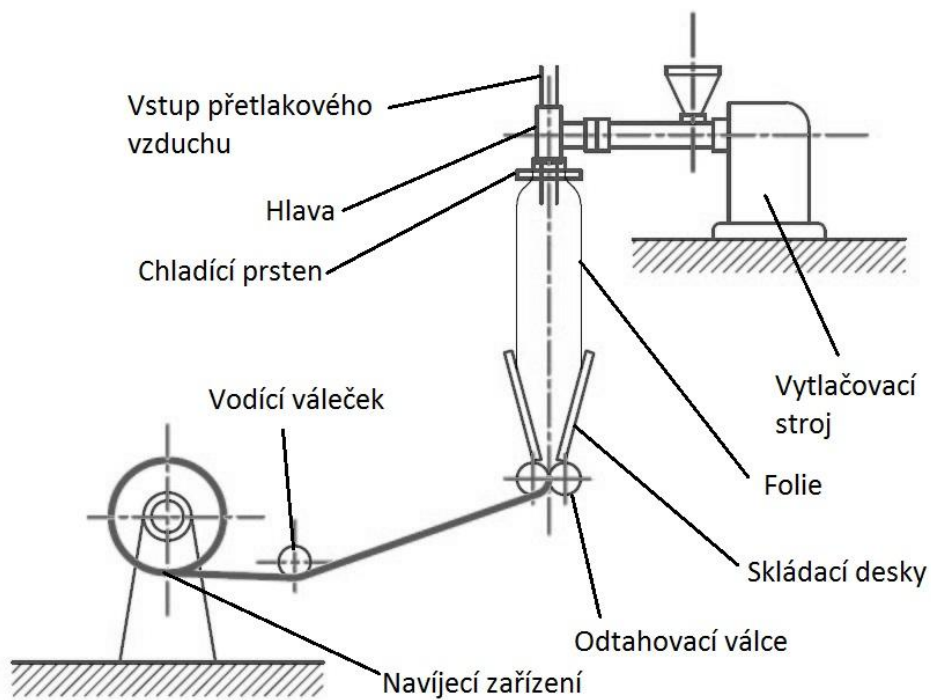
Základní zpracování granulátu obstarává vytlačovací stroj, který je osazen vyfukovací hlavou. Vytlačená folie ve tvaru uzavřeného profilu je mírným přetlakem vyfouknuta a ochlazená vzduchem. Chlazení je vyladěno tak, aby vzduch proudil rovnoměrně kolem celého obvodu folie. Skládací desky dále stahují hotovou folii na odtahový válec. Vzdálenost mezi vyfukovací hlavou a odtahovacím válcem je nastavitelná pro použití široké škály folií o různých tloušťkách a materiálech. Rychlost odtahu může regulovat konečnou sílu folie.

Uspořádání výrobních linek (Obr. 20, 21, 22.) je velmi různorodé, do procesu mohou být zařazeny zařízení pro ořez folie, potiskování a navíjení na válce.

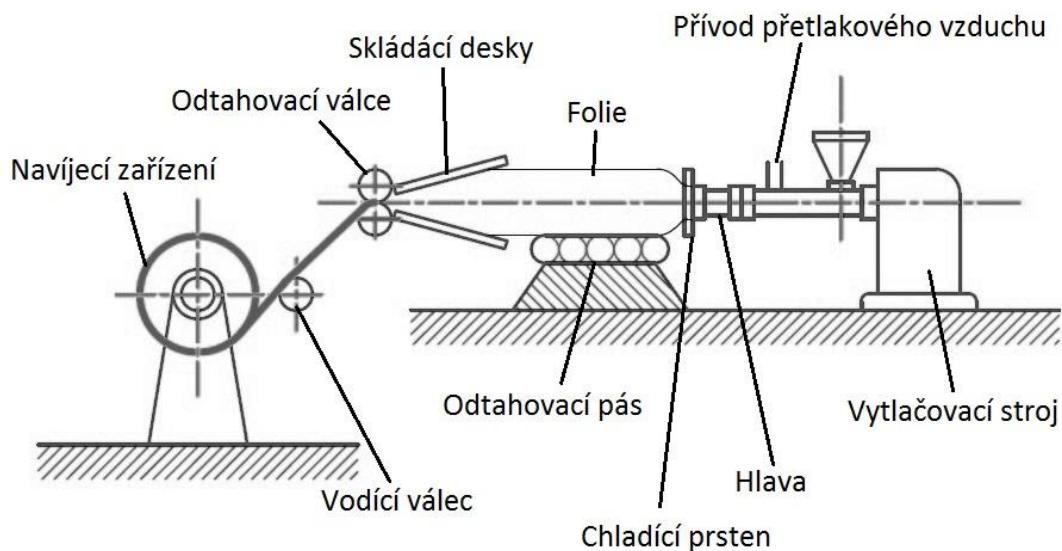
Podle směru vyfukování folie z hlavy se metoda dělí na horizontální nebo vertikální vyfukování.



Obr. 20 Vyfukování folie vertikální (směrem vzhůru)



Obr. 21 Vyfukování folie vertikální (směrem dolů)



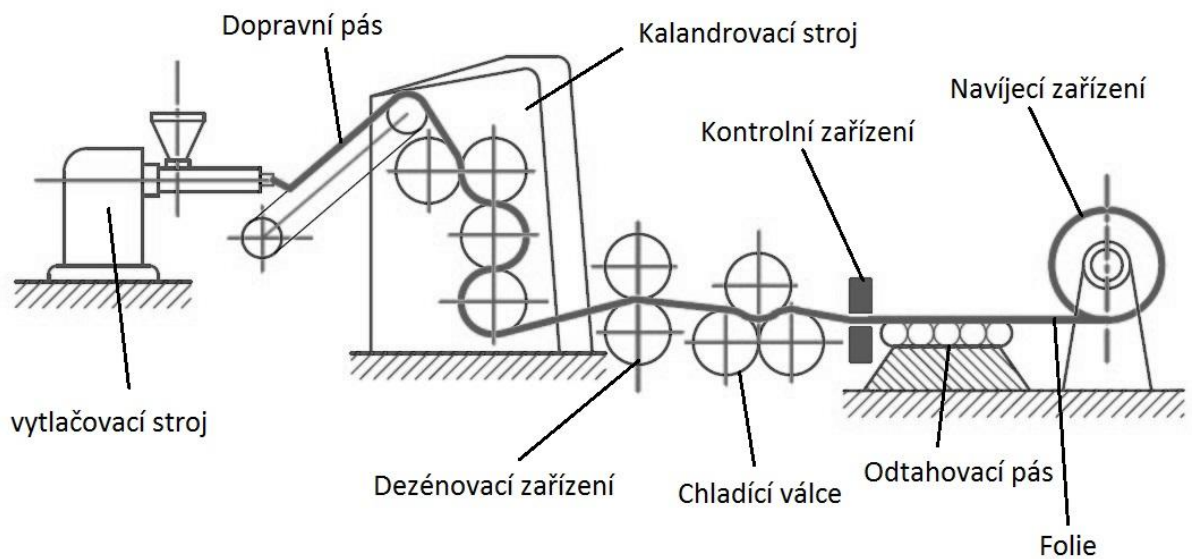
Obr. 22 Vyfukování folie horizontální

2.2.1 Válcování folií (kalandrování)

Nejproduktivnější metoda výroby desek a folií z termoplastů, hlavně měkčeného a neměkčeného PVC. Hlavní částí zařízení je sestava vyhřívaných válců kalandrů. Základní princip spočívá ve tváření plastu v mezeře mezi válci, tváření podporují i smykové síly, generované rozdílnými obvodovými rychlostmi válců. Mezera je odborně nazývána skus nebo štěrbinu a veškeré změny v plastu probíhají v její těsné blízkosti.

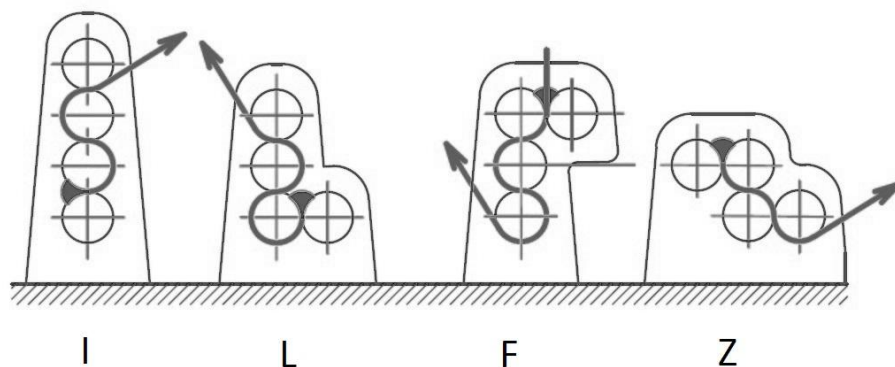
Směs je připravována na dvouválci, nebo ve vytlačovacím stroji. Pro předvýrobní operace a ohřev směsi u PVC se využívá dvouválec, vytlačovací stroj je upřednostněn při předvýrobě folií.

Hlavní část linky (Obr. 23), pro výrobu folií je kalandrovací stroj. Při vstupu materiálu z hnětiče, nebo dvouválce do zařízení, narazí na první dvojici válců (štěrbinu). Celá dávka se nezpracuje najednou, ale nahromadí se před válci. Nejedná se o výrobní vadu, ale o metodu, kdy se směs promíchává a hněte. Tento postup se opakuje před dalšími sestavami válců. Válce jsou vyhřívány olejem nebo párou a předávají plastu teplo, které je pro tváření důležité. Po každém promíchání a hnětení dostává folie přesnější tvar a lepší jakost povrchu. Nejjednodušší stroje jsou konstruovány se třemi páry víceválců a obecně platí, že čím více válců, tím kvalitnější povrch.[22]



Obr. 23 Linka na výrobu fólií kalandrováním

Dalším důležitým parametrem je vzájemné uspořádání válců v lince. Konstrukční uspořádání do písmene I je k vidění u starších strojů. Postupem času se přešlo na výhodnější a efektivnější uspořádání do písmene F, L, nebo Z (Obr. 24).



Obr. 24 Uspořádání válců

Kvalitu fólií a desek ovlivňují i samotné mechanické a geometrické vlastnosti samotných válců. Požadavky jsou velmi vysoké, důraz se klade především na kruhovitost, drsnost

povrchu, tvrdost a tuhost v ohybu. Při výrobě válců je nutné počítat i s roztažností materiálu při vysokých teplotách a tvarových deformacích. Jakosti povrchu válce je docíleno nanesením vrstvy chromu a zaleštěním. Nejčastějším materiálem pro jejich výrobu je šedá litina, která snáší vibrace a je stálá i při změně teplot. Další variantou jsou výkovky z chromomolybdenových ocelí. Problémovým prvkem bývá konstantní teplota na povrchu válce, hlavně na krajích válce. Obvodová rychlost na válcích se pohybuje v rozmezí 10 až 100 m/min. Další kapitolou je bezpečnost, kdy rotující válce jsou velmi nebezpečné pro obsluhu, proto je na zařízení dostatek bezpečnostních vypínačů a bezpečnostních zařízení.[23]

2.2.2 Lití folií

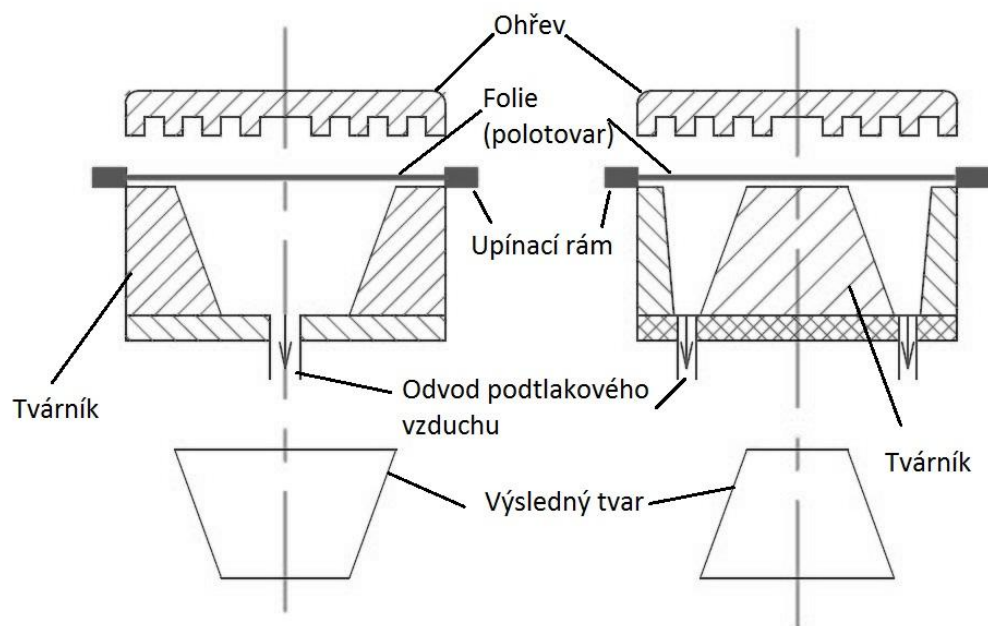
Jedná se o kontinuální výrobní postup, při kterém se polymer v kapalně formě lije na kovový pás, nebo rotující buben. Síly působící na formu jsou velmi malé. Na litou hmotu je kladeno mnoho požadavků, především nízká viskozita, krátká doba přechodu do tuhého stavu, fyzikální vlastnosti. K tuhnutí směsi dojde ochlazením. Fólie vyráběné metodou lití jsou velmi tenké (0,01 až 0,1mm)

Další možností jsou mokré způsoby výroby folií, které se uplatňují při výrobě celofánových folií. Vstupní surovinou je vodný roztok xantogenát celulosy. Základní princip spočívá v lití skrz trysku do srážecí lázně. Tenký film folie, který vznikl koagulací, se čistí a neutralizuje. V konečné fázi je celofán sušen na soustavě válců vyhřívaných párou.[24]

3 TVAROVÁNÍ POLYMERŮ

Tvarování polymerů jsou technologie, které pomocí formy nebo matrice mění tvar polotovaru (folie, desky, trubky, dutá tělesa) v omezeném rozsahu. Proces může být doprovázen tepelnými změnami v polymeru. Z počátku dochází k ohřívání, po ukončení tvářecího procesu k ochlazení. Toky materiálu během zpracování jsou jen v omezeném měřítku. Tvarováním za tepla je možné zpracovávat pouze termoplasty.

Tvarovací stroje lze podle použité technologie rozdělit na mechanické, hydraulické a pneumatické. Rozšířenou variantou jsou kombinované stroje např. pneumaticko - mechanické. U tvarování folií rozeznáváme pozitivní a negativní tvarování (Obr. 25). Síla zpracované folie je od 0,1mm. V průmyslu je častěji používáno negativní tvarování pomocí vakua, předtaženým tvárníkem, tlakovým nebo stlačeným vzduchem. [25]



Obr. 25 Pozitivní a negativní tvarování

3.1 Tvarování folií za tepla

Tvarování za tepla zahrnuje následující operace: ohřev, tvarování, chlazení, vyjmutí, dokončovací zpracování vylisku.

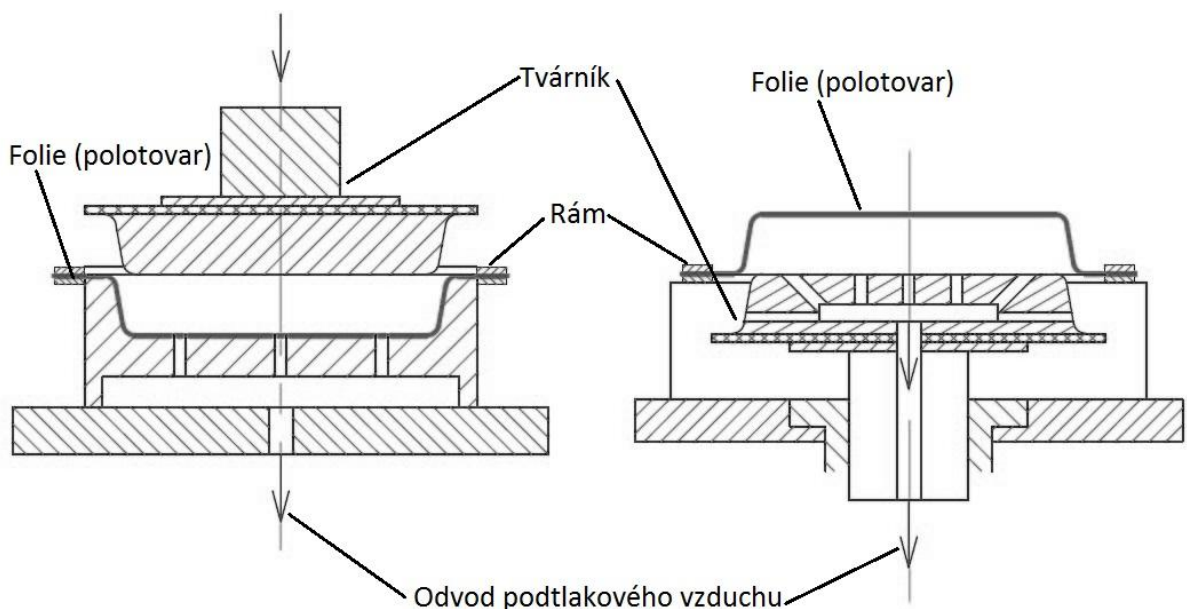
Deska plastu je upnuta do rámu a její ohřev zajišťují infračervené zářiče, nebo elektrické topné spirály. Folie jsou ohřívány jednostranně, silnější desky oboustranně. Rychlost, intenzita a čas ohřevu je závislá na vstupním materiálu folie, tvaru budoucího výrobku a fy-

zikálních vlastnostech. Při výrobě složitějšího tvaru se množství tepla může rozdělit do oblastí podle stupně přetvoření. Chlazení je další důležitou částí procesu, ale zabírá mnoho času. Proto se formy vyrábí z oceli a jsou vybaveny chladicími kanály. Dále je možné povrch výrobku chladit proudícím vzduchem, nebo vodní mlhou. Mezi dokončovací metody patří hlavně opracování okrajů, za které byla folie či deska upnuta v rámu. Opracování se provádí pásovými pilami, vysekávacími noži a okružními pilami.

Stroje pro vakuové tvarování jsou konstruovány v mnoha variantách. Využívá se kombinací cyklů ohřevu a tvarování tak, aby byl stroj vytížen na maximum. Základní části jsou stejné (lože, upínací rám, ohřívací a chladicí zařízení, podtlakový systém). Důležité je jejich uspořádání a počet vyráběných výrobků během jednoho cyklu.

3.1.1 Pozitivní a negativní tvarování s předtažením

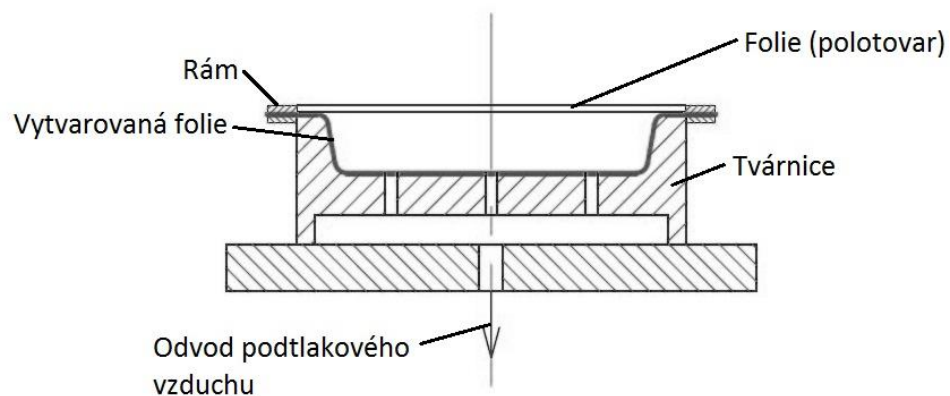
Nejčastěji používané technologie (Obr. 26). Ohřátá deska je před samotným tvářením předepnuta tvárníkem nebo stlačeným vzduchem. Poté je pomocí nízkotlakého zařízení vytvářena podle matrice. [26]



Obr. 26 Pozitivní a negativní tvarování s předtažením

3.1.2 Negativní vakuové tvarování bez předtažení

Jednoduchá metoda vakuového tvarování, není nutné používat pomocný tvárník. Pro vytvarování výrobku stačí jen tvárnice. Předehřátá folie upnutá v rámu, je pomocí vakua vytvarována přesně podle tvárnice. Nevýhodou metody (Obr. 26) je zeslabení stěny folie v místě rohů. Výrobek je tak oslaben proti mechanickému namáhání.



Obr. 27. Negativní tvarování bez razníku

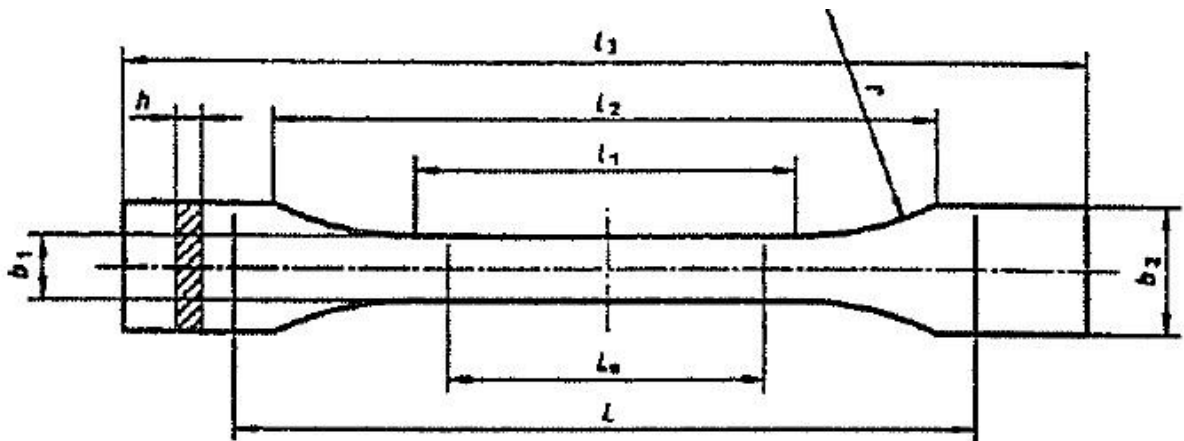
4 MĚŘENÍ, HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Polymerní materiály jsou od svých počátků podrobovány testům prokazující jejich vlastnosti a možnosti použití. Hlavní rozdělení zkoušek je mechanické, fyzikální, chemické. Rozhodující jsou testy mechanické, které jsem upřednostnil v diplomové práci. Veškeré zkoušení je už od přípravy vzorku vedeno normami ISO pro objektivitu testů ze všech částí světa.[27]

4.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa jsou přímo připravována vstřikováním, nebo lisováním. Další možností je zkušební tělísko získat přímo z předem vyrobeného materiálu. Vzorek získáme vyseknutím, vyřezáním, nebo obrobením. Při procesu je nutné se vyvarovat mechanického nebo tepelného ovlivnění vzorku. Před zkoušením se opticky vzorky zkontrolují. Rozměry vzorku jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 527.

Zkušební tělíska (Obr. 28) se v některých případech vystavují stejnému prostředí tak, aby bylo měření reprodukovatelné. Vzorky mají stejnou teplotu, vlhkost a další vlastnosti. Tato metoda se nazývá kondicionování.[28]

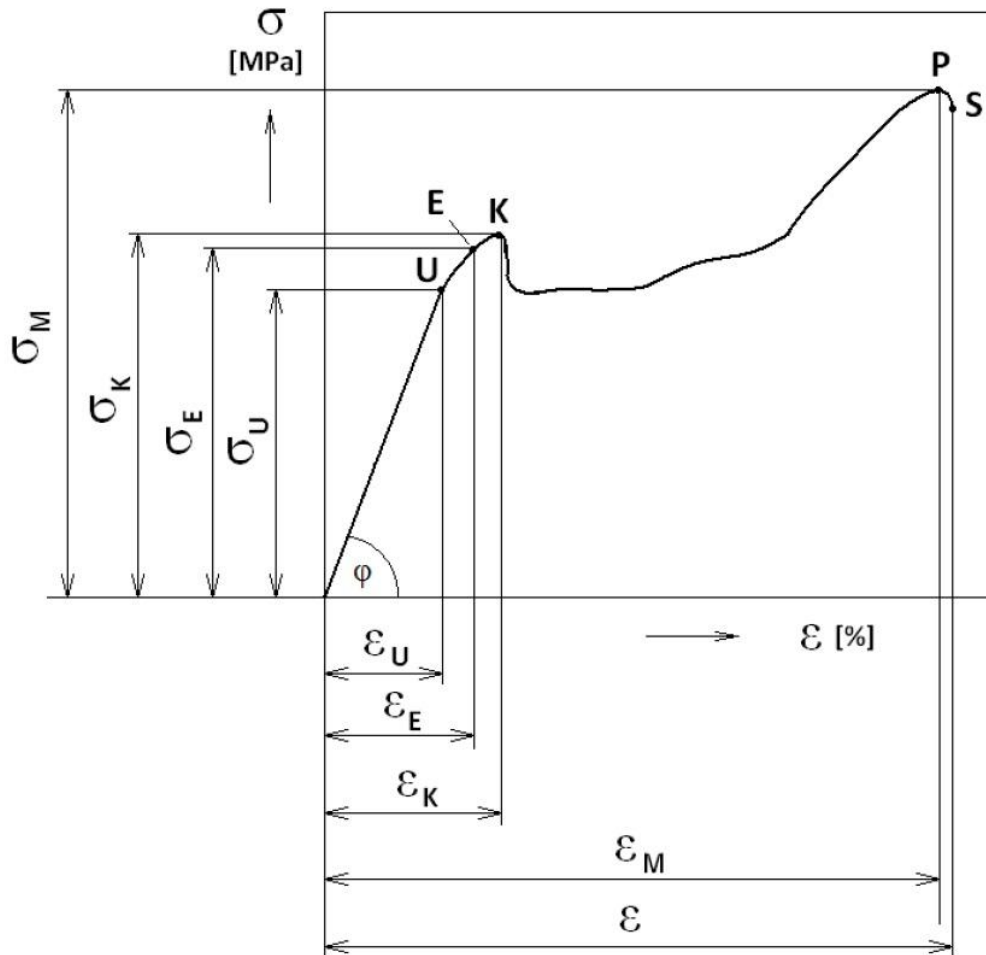


Obr. 28 zkušební vzorek (pevnost v tahu) [27]

4.2 Tahové zkoušky

Tahová zkouška je nejčastěji používaná metodika testování mechanických vlastností nejen plastových materiálů ale i ocelí, litin a dřeva. Zkušební tělísko je vystaveno jednoosému

zatížení, které se lineárně navyšuje, až po roztržení samotného vzorku. Anizotropie plastů způsobuje nerovnoměrné napětí v tahu napříč průřezem. Výsledky ze zkoušek zaznamenáváme do tahových diagramů (Obr. 29).



Obr. 29 Tahový diagram[28]

4.2.1 Modul pružnosti (podle Youngva modelu)

Modul pružnosti v tahu je poměr mezi napětím a vyvolanou deformací, výsledná hodnota není konstantního charakteru, záleží na vlivech při měření

$$E = \frac{R(\sigma)}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}]$$

$R(\sigma)$ – napětí v tahu [MPa]

ε -deformace [-]

4.2.2 Mez úměrnosti R_u (σu)

Stav, kdy hodnoty přetvoření jsou přímo úměrné napětí. Tato závislost vychází z Hookova zákona. Mez úměrnosti nelze v reálném prostředí přesně změřit, proto se definuje jako smluvní hodnota s odchylkou od lineární závislosti.

Hookův zákon

$$\varepsilon = kR(\sigma) \quad [-]$$

$$\varepsilon \text{ - poměrné prodloužení} \quad [-]$$

$$k \text{ - směrnice přímky (součinitel úměrnosti)} \quad [-]$$

$$R(\sigma) \text{ - napětí v tahu} \quad [\text{MPa}]$$

4.2.3 Mez pružnosti (elasticity) R_e (σE)

Nastává po překročení meze úměrnosti. Deformace v tělese stoupá rychleji než napětí. Deformace neustane v celém rozsahu, když napětí přestane působit. Vzniká tím plastická deformace, která je nevratná.

Mez pružnosti je stav, kdy úplně zmizí deformace při nejvyšším napětí.

$$R_E = \frac{F_E}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

$$F_E \text{ - síla tahové zkoušky v bodě E} \quad [\text{N}]$$

$$S_0 \text{ - Plocha průřezu vzorku} \quad [\text{m}^2]$$

4.2.4 Mez kluzu R_k ($\sigma \kappa$)

Počátek velkého rozšíření plastických deformací. Přírůstek napětí je velmi malý a pomalý, naopak prodloužení narůstá. Mez kluzu lze chápat jako stav, kdy je v tělese nejmenší napětí doprovázené trvalými deformacemi.

$$R_K = \frac{F_K}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

F_K - síla tahové zkoušky v době K [N]

S_0 - Plocha průřezu vzorku [m²]

4.2.5 Mez pevnosti v tahu

Mez pevnosti je hodnota, při které dochází k mechanickým poruchám na vzorcích. Pokračující navyšování zatížení má za následek tvorbu zúženého místa, která se vytváří v místě s největší hustotou strukturních poruch. Mez pevnosti je nejčastěji uváděná hodnota v materiálových listech různých materiálů.

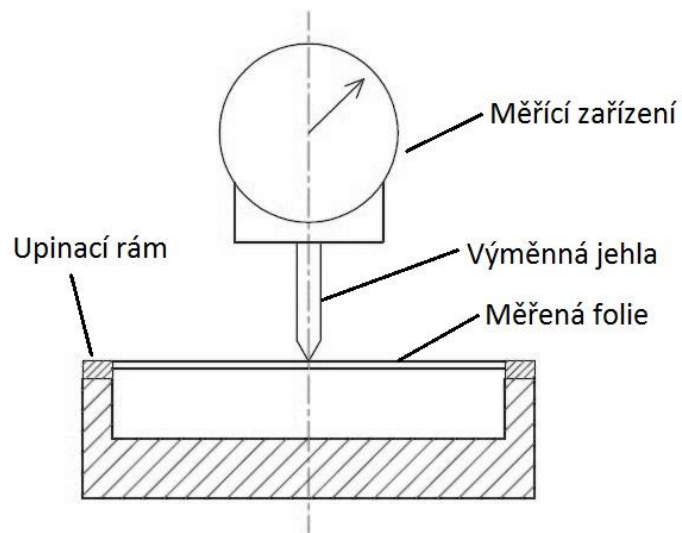
$$R_M = \frac{F_{MAX}}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

F_{MAX} – maximální síla tahové zkoušky [N]

S_0 - Plocha průřezu vzorku [m²]

4.3 Zkoušky odolnosti proti průrazu

Zkoušky odolnosti proti průrazu (Obr. 30) se provádí podle normy EN 14477. Zkoušky se provádějí u folií, které se používají především jako balicí materiál. Folie je upnuta do rámu, výměnná jehla tlačí na její povrch a měřicí zařízení odečítá hodnoty.



Obr. 30 Zkouška odolnosti proti průrazu

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POSTUP A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část diplomové práce se zabývá celým procesem výroby polymeru s příměsí plniv, jeho zpracování do tvaru folie, tvarováním zkušební vzorku a následné vyhodnocení mechanických a zpracovatelských vlastností.

Na samém počátku práce bylo rozhodnuto o zpracování HDPE (High-densitypolyethylene). Pro zdokonalení mechanických vlastností byla použita plniva oxid titaničitý (TiO_2) a jíla, pro kompatibilizaci plniv a polymerní matrice pak malenizovaný polyetylen. Přesně navážené směsi byly zpracovány vytlačovacím strojem do formy strun určených ke granulaci. Drtícím zařízením se polotovar zpracoval do formy granulátu pro další zpracování.

Výroba folie byla provedena na vytlačovacím stroji ve spojení s odtahovacím zařízením, kde materiál dostal konečný tvar a ochladil se na nižší teploty. Již po předcházejících procesech byl znatelný rozdíl ve struktuře a vlastnostech vyrobených polymerů.

Aby mohla začít výroba vzorků, musely být role folie nařezány na požadované rozměry tak, aby se vešla do tvarovacího stroje. Tvar vyfouklého vzorku kopíruje matrici o tvaru komolého kužele a zajišťuje malý rozptyl rozměrů. Tvarovací zařízení má velmi širokou škálu nastavení od nahřívacích teplot, přes rozdělení teplot do polí, intenzitu chlazení a dobu ohřevu.

Samotné tvarování je jednoduchý proces, kdy matrice napne upnutou folii v rámu. Ta se předejde pod teplotu tání či tečení polymeru a pak vakuová pumpa vytvoří podtlak a folie přilne k matrici tak, že kopíruje její povrch. Po ukončení tvarování přejde matrice do původní polohy. Ochlazená folie je vyjmuta z upínacího rámu a celý proces se opakuje na dalším vzorku.

Celkem je k tváření připraveno 320 vzorků folie. Každý vzorek obsahuje minimálně 8 tvářených dílů. Na každý vzorek je tvarovací stroj nastaven jiným způsobem. Proměnlivé hodnoty jsou teplota a čas ohřevu. Na proces tvarování navazuje vysekávání zkušebních tělísek pro mechanické zkoušky.

Před vyseknutím vzorku je folie ještě upravena rozstřihnutím a rozvinutím kuželového tvaru. Vysekávání provádí tvarový nůž, na který tlačí pohyblivá část vysekávacího stroje.

Měření pevnosti v tahu a vyhodnocení výsledků je závěrečnou a nejdůležitější částí diplomové práce. Provádí se na měřícím zařízení ZWICK a převádí do tabulek programem TestExpert II. Velké množství naměřených hodnot se seřadí podle priority a nejlogičtějšího uspořádání.

O výsledku práce přesně vypoví grafy vytvořené ze vstupních dat. Jestli práce splní očekávání a výsledky budou odpovídat předpokladům, shrne závěr.

6 PŘÍPRAVA A ZPRACOVÁNÍ SMĚSÍ

Příprava a zpracování směsí je jedním z prvních kroků k výrobě plastových výrobků. Po smíchání HDPE a plniv bylo přichystáno šestnáct směsí (Tab. 1) o různých koncentracích. V našich laboratorních podmínkách je nejpřesnější a nejdostupnější metoda měření množství složek ve směsi pomocí hmotnostních zlomků. Jednotlivé hodnoty je možné vyjádřit i procenty.

Tab. 1 Složení směsí

Číslo směsi	Malenizovaný Polyethylen Priex ADDCOMP MAPE[%]	Jíl Cloisite 25A [%]	oxid titaničitý (TiO ₂) [%]	Uhličitan vápenatý (CaCO ₃)[%]
1.	3	5	-	-
2.	3	10	-	-
3.	3	-	-	5
4.	3	-	-	10
5.	7	5	-	-
6.	7	10	-	-
7.	7	-	-	5
8.	7	-	-	10
9.	15	5	-	-
10.	15	10	-	-
11.	3	-	5	-
12.	3	-	10	-
13.	7	-	5	-
14.	7	-	10	-
15.	15	-	5	-
16.	15	-	10	-

Pro dosažení vysoké přesnosti byly směsi váženy na stolní laboratorní váze KERN PCB 6000-1 (Obr. 31).



Technické parametry

<i>Rozsah vážení</i>	<i>Do 6000 g</i>
<i>Dělení váhy</i>	<i>0.1 g</i>
<i>Opakovatelnost</i>	<i>0.1 g</i>
<i>Linearita</i>	<i>±0,3 g</i>

Obr. 31 Laboratorní váha KERN PCB 6000-1

Rovnoměrného rozložení jednotlivých komponent ve směsi je problematické dosáhnout. Laboratorní vybavení nezahrnuje hnětiče nebo mechanické míchačky. Jednotlivé prvky se promísily ručně, poté strojně v násypce vytlačovacího stroje. Dalším mícháním směs prošla při samotném vytlačování. Granulát s plnivou byl promíchán mezi dvěma šneky a vytlačen do strun. Ten problém se v malém měřítku projevil již při vytlačování folií. Ve struktuře vyrobené folie se vyskytují místa, kde docházelo k nerovnoměrnému rozložení směsi a plniv.

6.1 Popis a základní vlastnosti jednotlivých prvků:

6.1.1 LDPE (Low-density-polyethylen)

LITEN FB 85 F je kopolymer s širokou distribucí molekulových hmotností, vhodný pro výrobu tubulárních folií o doporučené tloušťce nad 10 μm . Typickou aplikací je výroba technických izolačních folií pro stavebnictví, obalových folií, pytlů na odpad, apod.[30]

6.1.2 Malenizovaný PE

Kopolymer polyethylenu s obchodním označením PRIEX®12031. Obsahuje vysoký podíl kyseliny maleinové. Zavádí polaritu, která zvyšuje slučitelnost s jinými polárními plnivy. Pomáhá k lepšímu spojování směsí polymeru s dřevitými moučkami, přírodními vlákny nebo minerálními polyolefiny. Zároveň podporuje snížení změny pigmentu při deformaci hotového výrobku. Výhody: Zdokonalené mechanické vlastnosti, dobrý poměr cena / výkon[30]

6.1.3 Jíl (Cloisite 25A)

Jíly typu Cloisite 25A jsou přísady do směsí polymerů určené pro zlepšení fyzikálních vlastností. Plnivo je složeno z organicky modifikovaných vrstevnatých křemičitých, hořčičnatých a hlinitých nanodestiček. Obdélníkový tvar destiček má rozměry přibližně 1 x 150 mm. Snadnou mísitelnost a disperzi s termoplasty podporuje chemicky modifikovaný povrch.

Vlastnosti vylepšené použitím jílu:

- vyšší modul pružnosti v tahu a ohybu
- lepší rozměrová stabilita
- odolnější proti hoření
- vyšší odolnost proti tepelné deformaci
- Materiálový list je přiložen v příloze

6.1.4 Oxid titaničitý

V přírodě se vyskytuje v minerálních formách, pro potřeby průmyslu se připravuje „umě-
lou“ cestou. Pro svůj výrazný jas a vysoký index lomu je využíván jako pigment.

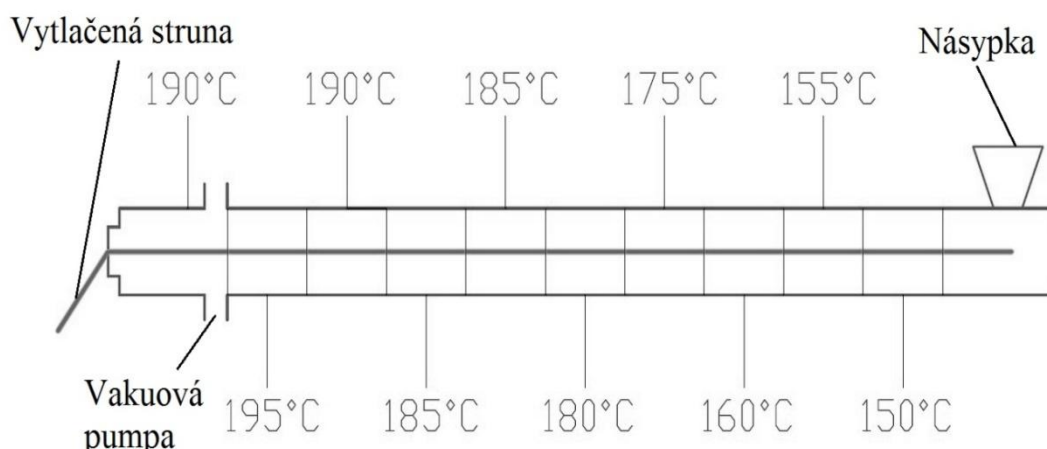
Vyšší koncentrace TiO_2 zvyšují stabilitu proti UV záření, zároveň zlepšuje odolnost proti
rázové houževnatosti.

6.1.5 Uhličitan vápenatý CaCO_3

Uhličitan vápenatý se řadí mezi neaktivní plniva, která přímo neovlivňují mechanické
vlastnosti polymerů. Jsou přidávány pro snížení ceny za účelem nižší ceny polymeru. Mů-
že ale vylepšit tvrdost a tuhost folie.

6.2 VÝROBA GRANULÁTU

Mezi poslední procesy přípravného zpracování plastů patří granulace. Tato metoda vytvoří
z polymeru rovnoměrně zpracované granule. Základem je struna zpracovaná vytlačovacím
strojem. Ten je osazen přímou hlavou s tryskou tvaru kužele, která dává vytlačovanému
materiálu výsledný tvar. Rychlost hlavních šneků byla nastavena na 30 ot/min, podávacích
šneků na 21 ot/min. Nastavení vytlačovacího stroje bylo zvoleno s přihlédnutím na přede-
šlé zkušenosti s materiálem HDPE. Ohřev pracovní části stroje zprostředkovává vytápění
napájené elektrickou energií. Princip spočívá v průchodu proudu topnou spirálou o velkém
elektrickém odporu. Celá činná délka šneku je rozdělena na deset topných zón (Obr. 32),
s rozdílnými teplotami.



Obr. 32 Rozdělení teplot na vytlačovacím stroji

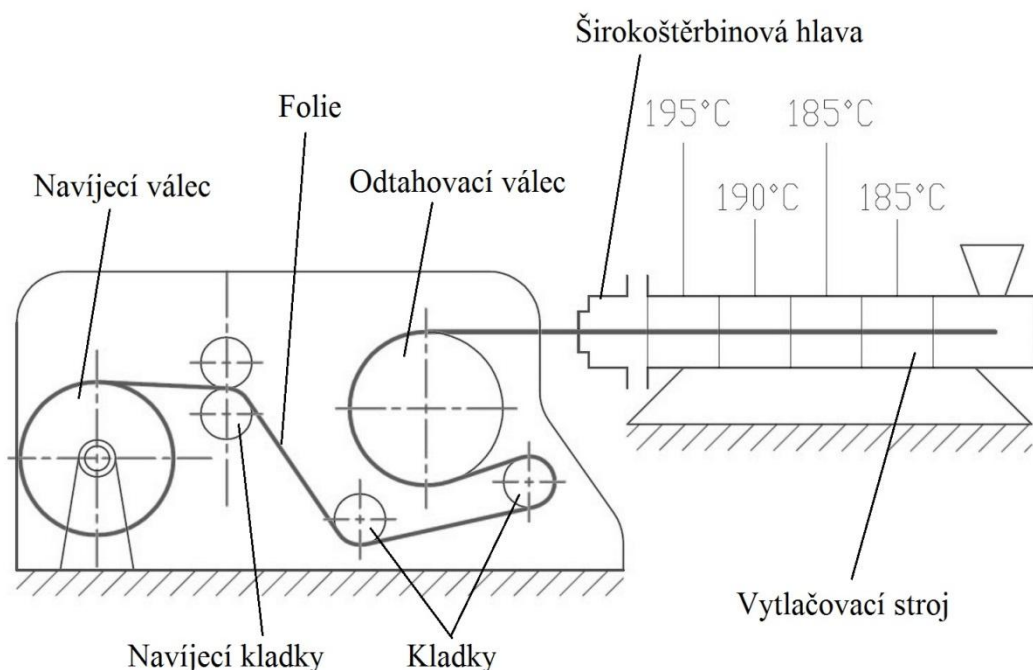
Vytlačované struny nebylo nutné chladit ve vodní lázni, dostatečné bylo chlazení vzduchem, který proudil podél odtahovacího pásu. Rychlost odtahu byla nastavena tak, aby průměr struny nepřesáhl rozměr vstupních otvorů granulovacího stoje.

Z dlouhé struny je vyroben granulát pomocí nožového mlýnu. Ten strunu nadrtí na jemné granule, které se snáze zpracují při vytlačování folie.

Již v této fázi práce je znatelný rozdíl mezi jednotlivými vzorky. Již při základním porovnání rozdílů je viditelné, že každá struna má rozdílnou barvu, kterou ovlivnily plniva. Dalším poznatkem je rozdílná houževnatost a tvrdost, kterou můžeme detekovat hmatem, nebo jednoduchým vrypy do povrchu. Rozdílná tvrdost je znatelná i při mletí strun.

6.3 Vytlačování fólií

Výroba vzorků polymerní fólie kopíruje v malém měřítku postupy používané v průmyslu. Vyrobený granulát je zpracováván ve vytlačovací stroji, na kterém je instalovaná širokoštěbinová hlava (Obr. 33). Zařízení je určeno pro výrobu tenkých i tlustých fólií podle zpracovávaného materiálu. Vytápění pracovní části stroje funguje na stejném principu a s podobným nastavením jako při vytlačování v kap. 5.2.



Obr. 33 Linka na výrobu fólií

Folie (Obr. 34), kterou produkuje širokoštěrbinová hlava, je odtahována válcem a dále temperována na teploty dle směsi.



Obr. 34 Vytlačená folie

Temperování a dotvarování folie provádí odtahovací válec vyhříváný topným tělesem, popřípadě i chlazen vodou, která proudí vnitřními kanály. Pro jednotlivé vzorky bylo nastavení teploty mírně rozdílné. Při překročení optimální teploty, se folie začínala lepit na povrch válce. Vysokou přilnavost folie mohl též způsobovat opotřeбенý povrch odtahovacího válce. Naopak nedostatečný ohřev měl negativní vliv na tvarování a navíjení. Folie se zasekávala mezi dvěma válci a nebyla dostatečně pružná.

Dalším nedostatkem výroby byla horší jakosti vyráběných folií. Širokoštěrbinová vytlačovací hlava je po stránce konstrukční na menší úrovni. Folie měla nepravidelně silnou tloušťku napříč celou šířkou. Z předešlé vytlačované směsi zůstaly zbytky taveniny na okrajích. Komplikace navíc přidávalo odtahovací zařízení. U nastavení kolem hodnoty 1,1m/min docházelo k nerovnoměrné rychlosti válce, což opět zapříčinilo nerovnoměrnou sílu folie ale v podélném směru.

Tab. 2 Nastavení odtahovacího zařízení

Číslo směsi	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Teplota temperování odtahovacího válce [°C]	100	100	105	105	120	120	105	110
Rychlost odtahu [m/min]	1.3	1.1	1.4	1.2	1.4	1.2	1.4	1.1
Číslo směsi								
Číslo směsi	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b
Teplota temperování odtahovacího válce [°C]	125	120	120	120	115	115	115	115
Rychlost odtahu [m/min]	1.4	1.1	1.4	1.1	1.4	1.1	1.4	1.1
Číslo směsi								
Číslo směsi	9a	9b	10a	10b	11a	11b	12a	12b
Teplota temperování odtahovacího válce [°C]	1.3	1.1	1.1	1.4	115	115	120	125
Rychlost odtahu [m/min]	115	115	115	115	1.4	1.1	1.2	1.3
Číslo směsi								
Číslo směsi	13a	13b	14a	14b	15a	15b	16a	16b
Teplota temperování odtahovacího válce [°C]	120	120	120	120	125	125	125	130
Rychlost odtahu [m/min]	1.4	1.1	1.4	1.1	1.3	1.1	1.4	1.1

Typ a – tenká varianta folie, Typ b – silnější varianta folie

6.4 Tvarování vzorků

Na rozdíl od vytlačování a válcování, laboratorní zařízení pro tvarování pracuje na principu diskontinuálního procesu výroby. Laboratoř je vybavena pneumatickým tvarovacím strojem FORMECH 508 FS s mechanickým pohybem tvárníku (Obr. 35). Základní parametry zařízení jsou uvedeny v tab. 3. Vzorky budou vyráběny pozitivním tvarováním za tepla.



Obr. 35 Tvarovací stroj FORMECH

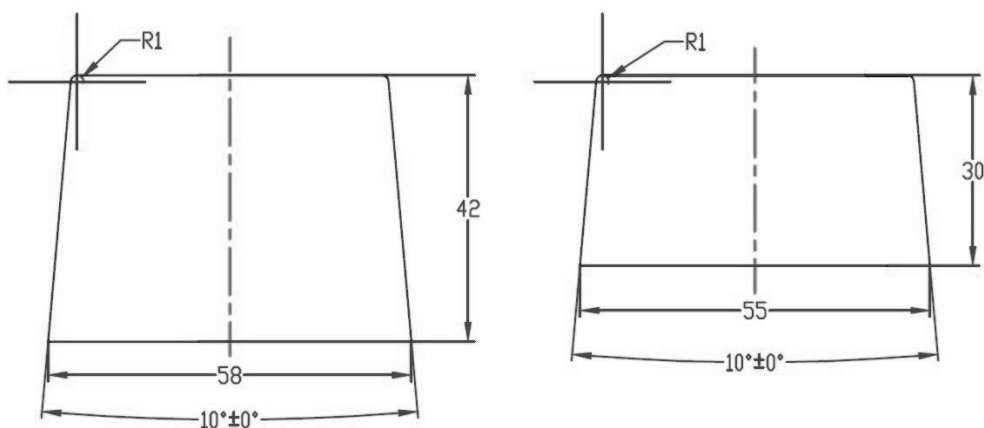
Tvarování folie je jednoduché, s velkými možnostmi nastavení. Předpřipravený vzorek folie o minimálním rozměru 140 x 140 mm se umístí mezi rozvírací rámy, které zajistí rovnoměrné upevnění a napnutí. Topné těleso se po kolejničích přesune nad folii a rovno-

měrně ji nahřeje. Poté se topné těleso vrátí do původní pozice a ze spodní části zařízení vyjíždí matrice, která určí tvar vzorku. Po napnutí folie matricí je zapnuta vakuová pumpa, která vytvoří podtlak mezi matricí a folií. Na závěr je možné hotový výrobek i zařízení ochladit ventilátorem. Chlazení bylo použito jen při tvarování folií s větší silou.

Tab. 3 nastavení tvářecího stroje

Maximální rozměry folie	482x432	[mm]
Maximální výška výlisku	290	[mm]
Maximální síla folie	6	[mm]
Počet vytápěcích zón	4	[-]
Výkon topných těles	3,5	[KW]
Podtlak	5	[BAR]

Na každý vzorek je nastavení upraveno vždy 5x. Hodnoty nastavení jsou voleny tak, aby vyrobené vzorky měly co nejlepší tvar, kvalitní povrch, nevznikaly vady a měly rovnoměrné síly stěn. Z nastavení stroje jsou i patrné maximální a minimální teploty pro tváření dané folie. Stroj umožňuje nastavit teplotu ohřevu rozdělenou do čtyř částí. Pro rozměr folie 140 x 140mm je dostačující nastavit střední pole. Další možností nastavení je doba ohřevu folie. Ta je přesně odpočítávána na ovládacím panelu stroje. Tvárníky mají tvar komolého kužele (Obr. 36).



Obr. 36 Rozměry kuželů, matrice (zleva typ 1, zprava typ 2).

Výsledný tvar vzorku je závislý na zručnosti obsluhy. Důležité je vhodně načasovat zapnutí vakuové pumpy a pohyb tvárníku směrem vzhůru. Optimalizací tvarování lze odbourat tvorbu přehybů na stěně folie. U některých typů směsí bylo nemožné tyto vady odbourat, proto byly folie označeny za nevhodné pro tvarování.

6.5 Nastavení tvarovacího stroje

Tvarovací stroj nebyl zatím používán. Nastavení optimálních podmínek bylo záležitostí dlouhého zkoušení a testování. Základní nastavitelné hodnoty jsou teplota, délka ohřevu a chlazení. Vše je přehledně znázorněno na dotykovém displeji s možností uložení dat.

Hlavní veličinou je teplota ohřevu, která se uvádí v % z maximálního výkonu topného tělesa. Na stroji je možné nastavit teplotu v deseti různých hodnotách. Pro účely vyhodnocení měření a tvarování, i pro pozdější rozšiřování znalostí problematiky jsou takto uváděné hodnoty nevhodné.

Mnohem lepší variantou je měřit teplotu přímo na povrchu folie. Avšak po změření několika vzorků bylo zjištěno, že teplota prudce klesá po odtahu ohřívacího zařízení. Samotně měření je prováděno ručně bez možnosti jakkoliv automatizace či nastavení pevného cyklu odtáhnutí – měření v daný časový okamžik. Výsledky vykazovaly velké rozdíly a bylo zřetelné, že jsou neadekvátní.

Další možností je převod výkonu topného zařízení uváděné v % na °C, tab. 4. Opět se po několika sadách měření prokázalo, že chyby v měření jsou neúměrně velké. Navíc konečnou teplotu folie ovlivňuje doba ohřevu. Pro představu o rozmezí teplot je uvedena tabulka, která uvádí teplotu přímo na topných spirálách podle jednotlivých stupňů nastavení na tvarovacím stroji.

Tab. 4 Tabulka převodu výkonu

Výkon ohřevu stroje[%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Teplota na topném tělese. [°C]	85	101	124	143	189	211	223	230	235	240

Pro měření takto vysokých teplot posloužil infračervený teploměr pro bezdotykové měření teploty HAZET typ 1991-1s rozmezím měření teplot od -55°C do 550°C (Obr. 37)



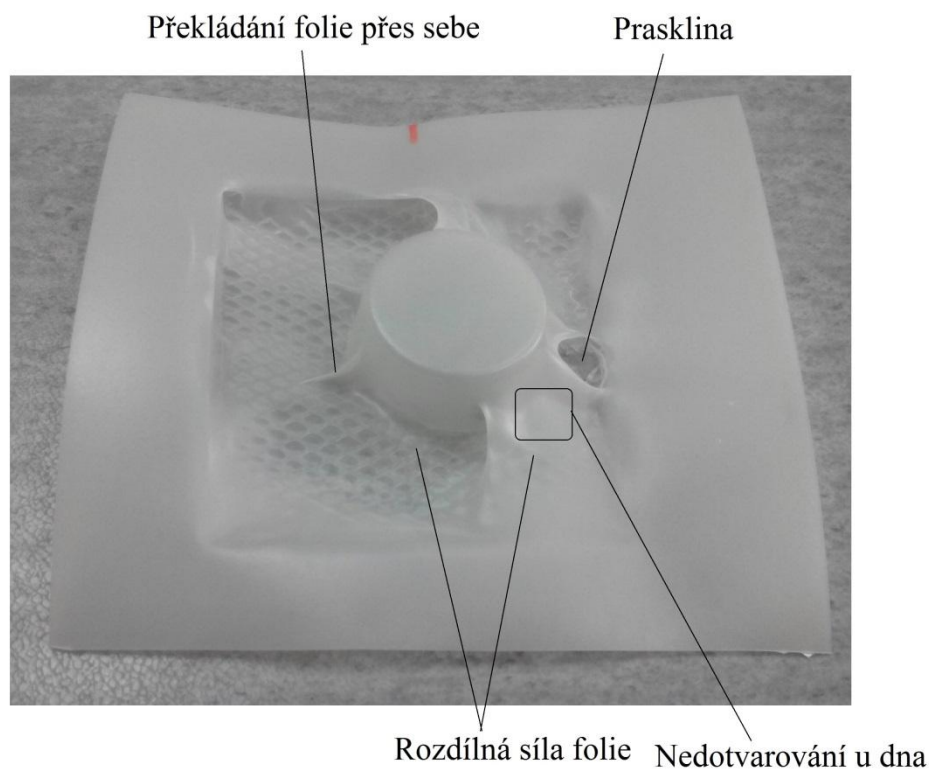
Obr. 37 Teploměr HAZET

S nastavením teploty ohřevu úzce souvisí doba ohřevu. Obě nastavení vzájemně nejvíce ovlivňovala výsledek tváření. Funkce chlazení ventilátorem byla použita především pro folie se silnějším průřezem (nad 0,5 mm). Tenké folie se spolehlivě chladily vlivem okolní teploty v laboratoři a tvárníkem, který nebyl nijak tepelně temperován.

Během tvarování se folie chovala vždy jiným způsobem v závislosti na nastavení stroje a materiálu. Vznikaly pěkné vzorky bez povrchových vad a jiných defektů. Odladit takové nastavení bylo někdy složité, proto se vyrobilo i mnoho zmetkových vzorků. Jakost povrchu, protržení folie, překládání folie přes sebe, nerovnoměrná síla stěny, to jsou základní typy vad, které doprovázely výrobu (Obr. 38).

Celkem bylo zpracováno 16 různých směsí polyetyleny a plniv. Z každé směsi se vytlačovací metodou vyrobilo 32 druhů folií (menší a větší síla stěny). Jednotlivé folie byly tvářeny pěti různými nastaveními pomocí dvou tvárníků. Aby byl výsledek konečného měření

věrohodný a bez velkého rozptylu hodnot, muselo se od každého vzorku vytvarovat 8-10 ks. Celkem se tedy vytvarovalo cca 2900 vzorků.



Obr. 38 Typy vad

6.6 Vyhodnocení tvarování

Výsledné nastavení tvářecího stroje FORMECH 508 FS je velmi rozmanité. Folie mají různé vlastnosti při jiných stupních nastavení. Všechna data jsou zapracována v tabulkách přílohy P2. Vyhodnocení obsahuje rozřazení nastavení stroje podle tvářené folie, výběr nejvhodnějších nastavení a poznámky k průběhu tváření. Některé typy plniv ovlivnily folie natolik, že nejsou vhodné pro tvarování. Nastavení procesu vyžaduje více zkoušek a tvářených součástí. Výběr některých nastavení stroje je bráno jako nejlepší možnost, která se podařila odladit a neodráží kvalitní výsledek tvarování.

Na tvarování má velký vliv nastavení stroje pro daný materiál, ale ve velké míře i zručnost obsluhy. Vertikální posuv podložky tvárníku není nijak automatizován a na rychlosti jejího pohybu částečně závisí konečný výsledek. Podobný problém tkví ve spouštění vakuové pumpy, čas zapnutí a doba odsávání je koordinována obsluhou. Navíc bylo po několika sériích tvarování zjištěno, že je efektivnější po odsunu ohřívacího zařízení z dosahu tváře-

né folie nejprve zapnout vakuovou pumpu a nechat folii prohnout směrem dolů. Následně pomalým posuvem vtlačit tvárník do folie. Vakuové čerpadlo se nechá v chodu do té doby, dokud folie zcela nepřilne k tvárníku.

V průběhu tvarování byly zpracovávány folie, které se obtížně tvarovaly. Nejčastější vadou bylo nedotvarování u spodní hrany kuželového tvárníku. Dále folie tvořila nechtěná žebra přeložením dvou vrstev přes sebe. K protržení folie docházelo vlivem příliš malé nebo velké intenzity ohřevu.

6.6.1 Folie s plnivem Cloisite 25A

Plniva Cloisite 25A, neboli jíl, mají na folie rozdílný vliv. Pokud je jíl doplněn 7% MAPE je výsledek tvarování výborný. Vzorky mají tvar bez poruch či defektů i při více úrovních nastavení. Rovněž proces tvarování probíhá bez problémů. V případě většího podílu MAPE (15%) se vlastnosti rapidně zhorší. Tvarování doprovází řada problémů. Hlavně překládání folie přes sebe a deformace folie. Důležité je i množství tepla, které folie pro své tváření absorbuje. V hromadné výrobě by vzrostly náklady na energii.

6.6.2 Folie s plnivem oxidu titaničitým

Nevhodné folie pro tváření. Je velmi obtížné najít optimální výkon ohřívacího zařízení a dobu ohřevu. Většina vzorků se nevytvaruje v celé délce, folie během procesu tváření ztuhne. Při použití vyšších teplot ohřevu je folie protrhnuta působením podtlaku. Dále je síla stěny komolého kužele nerovnoměrně silná, což dále zkresluje další měření. Nejvhodnější variantou je vzorek 14a se složením 7% MAPE, 5% oxidu titaničitého.

6.6.3 Folie s plnivem uhličitanu vápenatým

Folie s obsahem uhličitanu vápenatého jsou vhodné pro tváření pouze u vzorku č.3b (3% MAPE, 5% CaCO₃, síla folie 0,6mm) a u vzorku 7b (7% MAPE, 5% CaCO₃, síla folie 1,2mm). Uhličitan je vhodný pouze v menších koncentracích a pro větší sílu folie. Zbylé vzorky bylo problémové tvarovat. Opět se vyskytovaly problémy s překládáním folie.

7 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

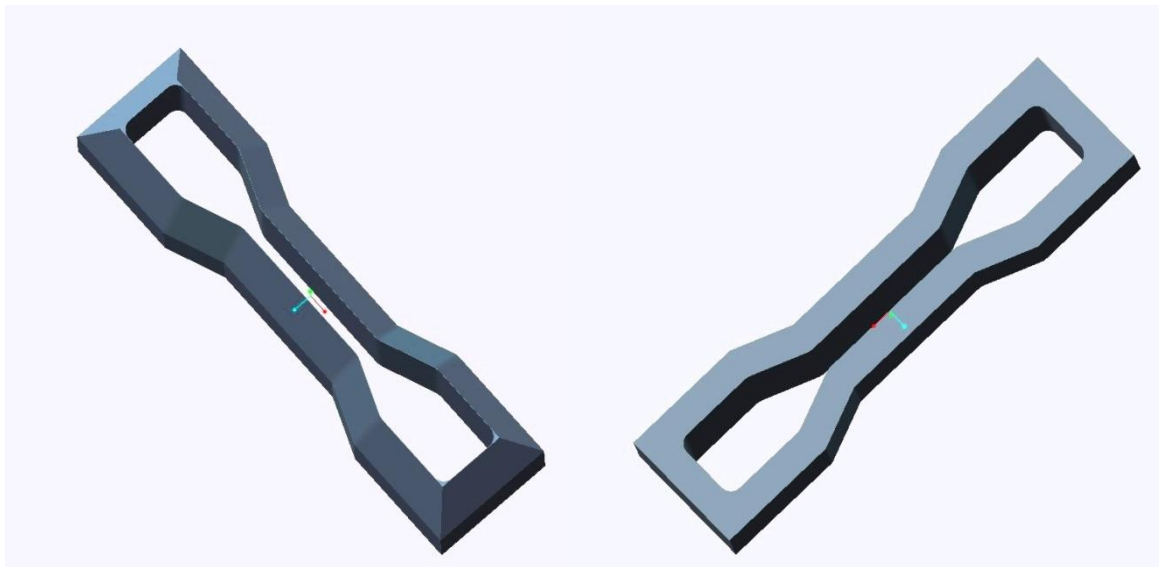
Cílem diplomové práce je porovnání mechanických vlastností folií z vysoko-hustotního polyetyleny. Vlivem použití plniv nebudou výsledky shodné. Již během výroby folie a tvarování vzorků byly bez přesného měření znát rozdíly v jednotlivých směsích.

Vysekané vzorky budou zkoušeny na pevnost v tahu, což je jedna z nejzákladnějších zkoušek u všech materiálů. Na výsledek měření bude mít rovněž velký vliv tvar zkušebního vzorku, které budou vysekávány z rozvinutého kužele. Je nutné předpokládat s různou silou stěny a hranou mezi čelem a stěnou komolého kužele, která může ovlivnit celý proces měření.

Prioritním cílem celé práce je srovnání pevnosti v tahu plněných a neplněných folií. Proto bude jako první vystavena testování folie z čistého HDPE a následovat budou plněné folie. Pro možnosti porovnání výsledků se údaje zaznamenají do přehledných tabulek s vyznačením možné chyby měření.

7.1 Příprava zkušebních vzorků

Vzorky jsou připravovány metodou vysekávání pomocí tvarového nože (Obr. 39). Metoda je velmi rychlá při použití rozvinuté folie.



Obr. 39 Tvarový nůž

Folie se umístí na pracovní lože vysekávacího stroje (Obr. 40) a pohyblivá část vertikálním pohybem zatlačí na nůž. Hotový zkušební vzorek je vyjmut z dutiny nože a celý proces se opakuje.



Obr. 40 Vysekávací stroj

Vytvarované vzorky mají ale tvar komolého kužele. Celá plocha se musí rozvinout, což je velmi složité. Povrch rozvinutého tělesa není dokonale rovný, hrana u čela tvoří příčný ohyb, pata vzorku nelze optimálně vytvarovat do roviny. Proto se vzorek nařízne z více stran tak, aby byl dosažen nejkvalitnější rozvin. Některé vzorky se musí dodatečně dotvarovat přiložením desky se závažím.

Vysekávací nůž byl vyroben metodou CNC frézování z vysoce legované chromové oceli EN 1.2080, ČSN 19 436. Pro zvýšení životnosti byl nástroj zakalen na 60 HRc.

7.2 Měření pevnosti v tahu

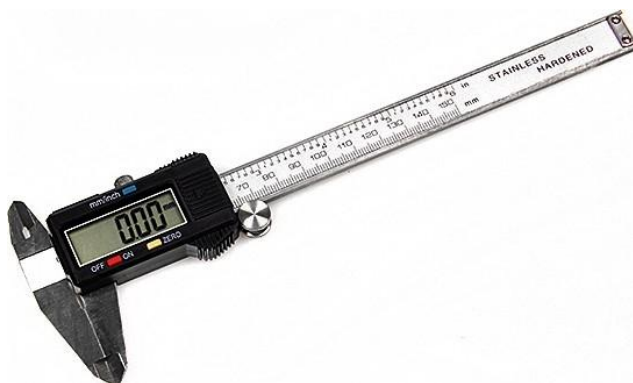
Poslední a nejdůležitější částí projektu je měření mechanických vlastností materiálů vzorků. Základním parametrem většiny dnes používaných materiálů je pevnost v tahu podle normy ČSN EN ISO 527-1. Proto se tento typ zkoušek použije i nyní. Vzorky ve tvaru písmene I jsou přichystány. Každá série měřená na stroji ZWICK obsahuje 8-10 vzorků (Obr. 41). Ty jsou upínány do samosvorných čelistí. Protážení vzorku provádí posuvné lože stroje poháněné kuličkovými šrouby.

Proces je po celou dobu nastaven na stejné hodnoty a prováděn v laboratorních podmínkách.



Obr. 40 Měřicí zařízení ZWICK

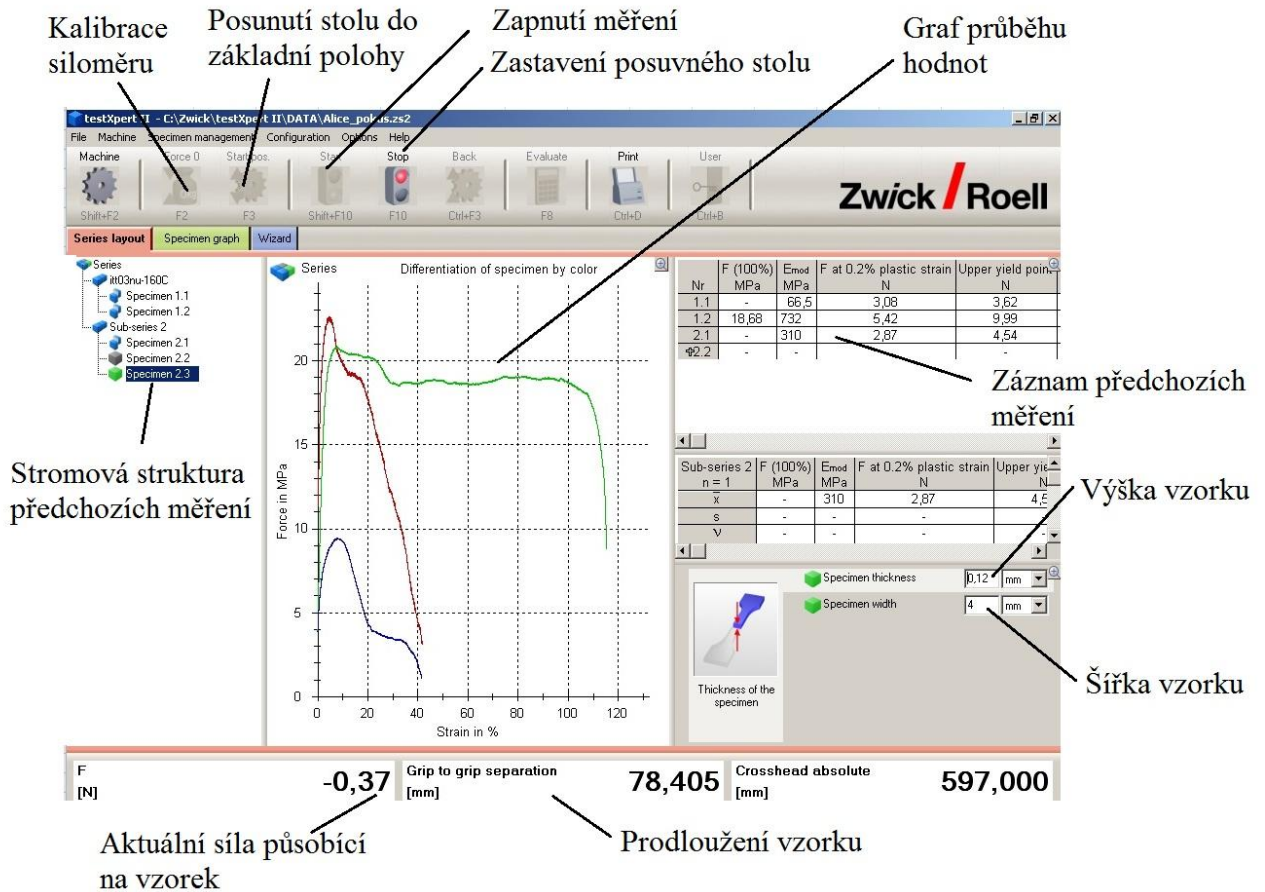
Před každým měřením je kontrolována tloušťka vzorku posuvným měřidlem (Obr. 42). Ty mají rozdílnou tloušťku stěny, proto je měřena jen ta nejmenší hodnota.



Obr. 41 Digitální posuvné měřidlo

Rozdílná síla materiálu je u každé směsi v jiné části. Ve většině případu se ale vyskytují u dna vytvarovaného vzorku, nebo těsně pod horní hranou. Na začátku projektu se počítalo se značným vlivem horní hrany vzorku na konečné mechanické vlastnosti. Výsledek je zcela opačný, hrana je společně s čelem nejpevnější část, což potvrdily mechanické zkoušky. Tento poznatek byl znatelný již v průběhu měření.

Měřicí zařízení Zwick využívá softwarové podpory programu TestXpert II (Obr. 42). Jednoduchý a na obsluhu nenáročný program nabízí široké možnosti nastavení. Po jednoduchém zaškolení a nastavení parametrů lze rychle měřit potřebné hodnoty. Data se zaznamenávají do tabulek. Nabízí se jednoduchá možnost, jak tabulky kopírovat do MS EXCEL. Po upnutí vzorku do čelistí se kalibroval siloměr, aby se zamezilo zkreslení měření. Při měření nebyl používán tenzometr, nedovolovala to malá délka vzorků (70mm).



Obr. 42 TestXpertII

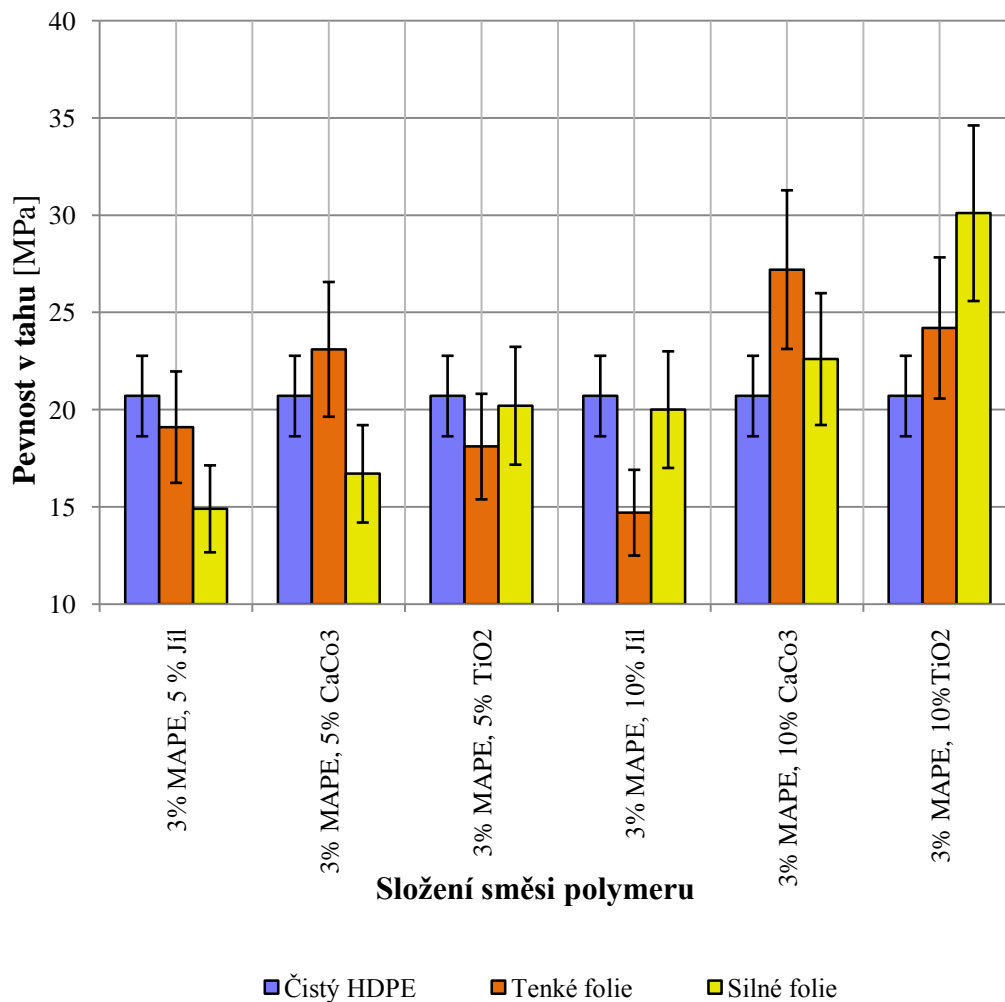
Spuštěním posuvu se začne vzorek protahovat a software počítač začne zaznamenávat výsledky, vše končí přetržením vzorku a vyhodnocením dat.

První série měření se soustředila na HDPE bez jakýchkoliv plniv a příměsí. K naměřeným hodnotám se budou postupně srovnávat pevnosti v tahu folií s plnivem. Předpokládá se, že plněné folie budou mít vyšší hodnoty pevnosti. Funkcí FORCE jsou čelisti uvedeny do původní pozice, zbytky vzorků vyjmuty z čelistí a měření se může opakovat.

7.2.1 Folie s plnivem MAPE

Od plniva MAPE se očekává z pohledu mechanických vlastností, vyšší pevnost než u čistého HDPE. Výrobce rovněž udává lepší reologické vlastnosti. Procentuální zastoupení ve směsích je 3%, 7% a 15%, ale zároveň je doplněn dalšími typy plniv. Následující grafy určí jaká koncentrace MAPE je nejvýhodnější ve spojení s ostatními plnivem.

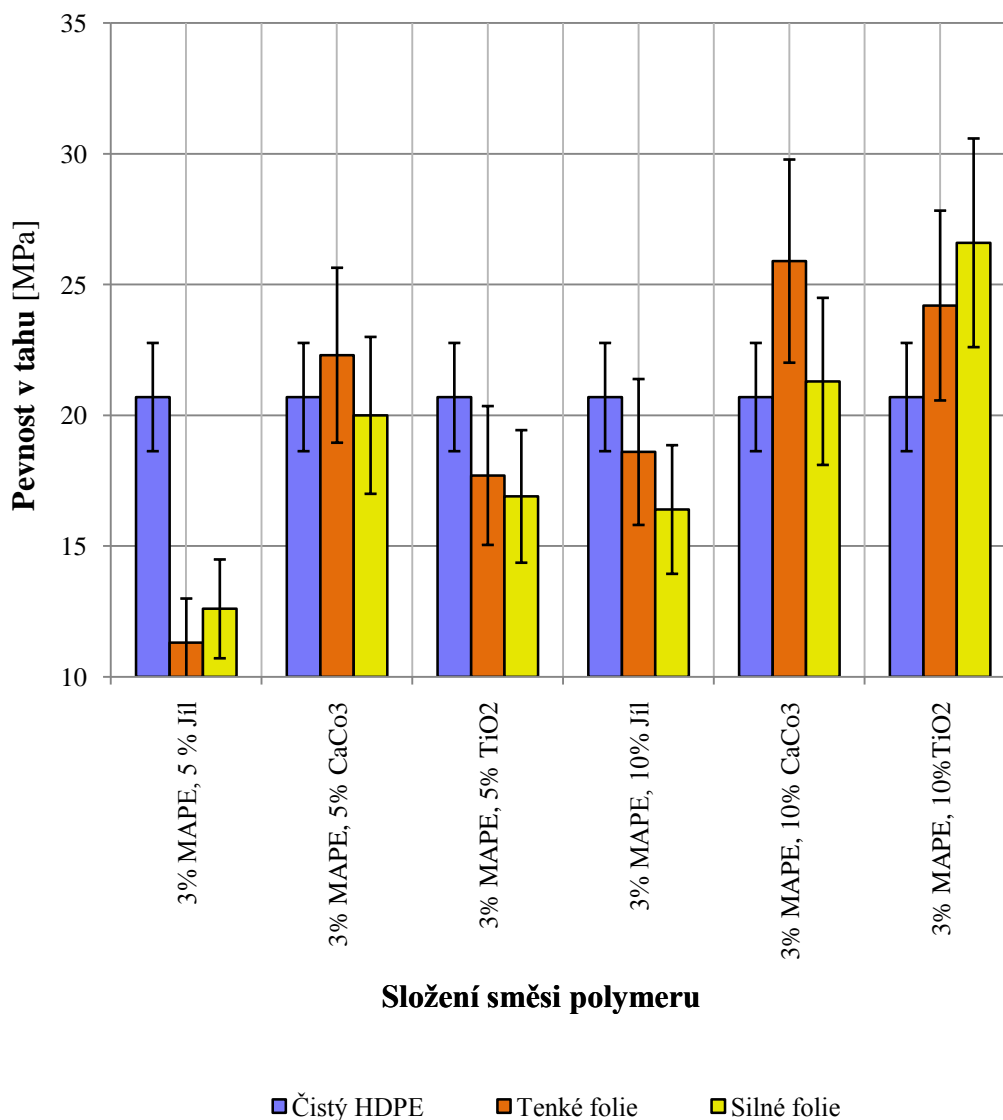
3% MAPE, tvárník č. 1



Kopolymer polyethylenu (MAPE) má příznivý vliv na mechanické vlastnosti tenkých i tlustých folií za předpokladu vyšší koncentrace plniva uhličitanu vápenatého (CaCO_3) a oxidu titaničitého (TiO_2). Ve spojení s jílem (10%) a ostatními plnivými o koncentraci 5% jsou výsledky buď stejné, nebo ještě horší.

Rozptyly hodnot se drží v rozmezí 10% u HDPE bez plniv a 15% u polymerů s jedním typem plniv. Vyšší hodnoty rozptylu lze přičítat nepřesnosti rozměrů vytlačované folie a rozměrových nepřesností tvarovaných výrobků. Dále rozptyl rozšíří chyby při měření.

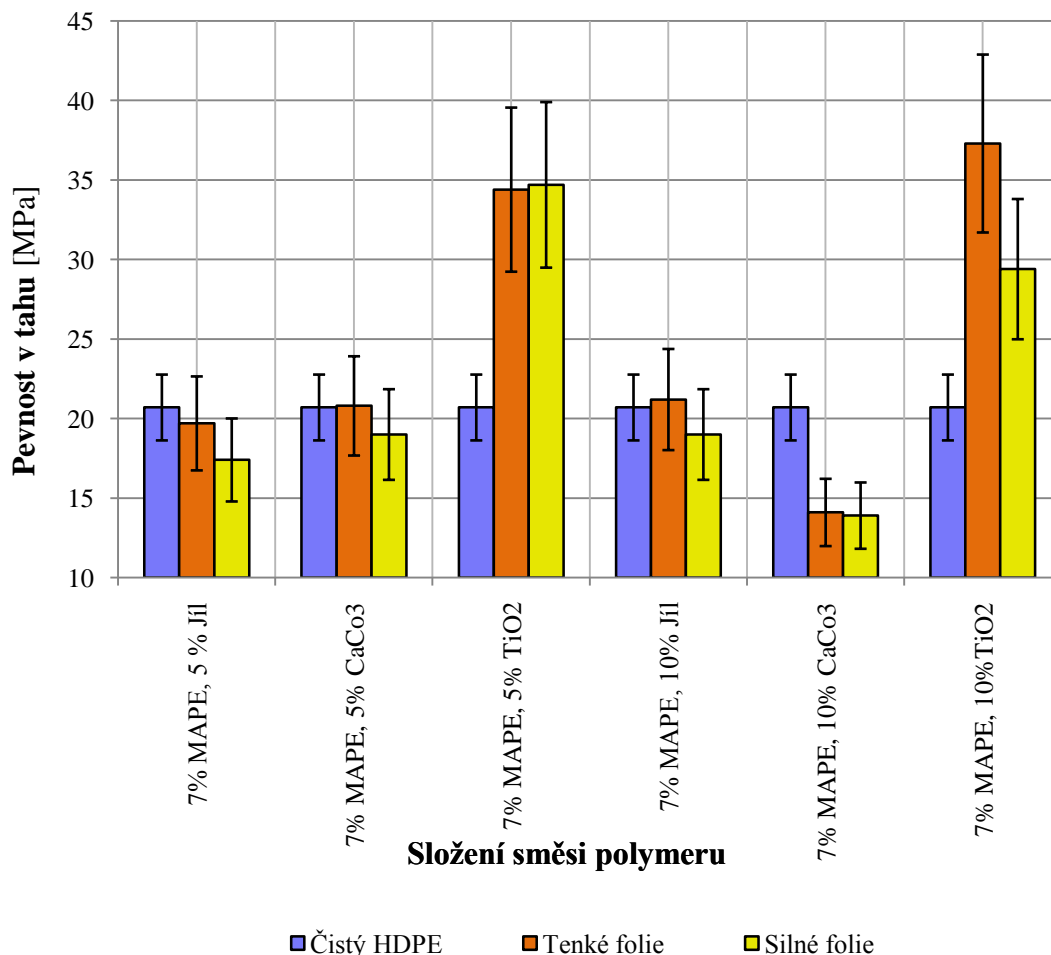
3%MAPE, tvárník č. 2



Nárůsty a poklesy pevnosti v tahu „čistých“ a plněných vzorků sledují trend z předešlého grafu. Kratším prodloužením folie bylo dosaženo nižších hodnot pevností. U všech ostatních měření se situace opakovala. Větší prodloužení zajišťuje větší pevnost. Slabšími zástupci plněných folií jsou ty, které mají přimíchán jílu (5%, 10%) a oxid titaničitý (5%).

Folie s 3%MAPE a 5% jílu se již při tváření protrhávala a síla stěny nebyla vždy konstantní. Nejhorší folie pro tváření se během celého projektu jeví ty s plnivem TiO_2 . Až na výjimky bylo velmi složité najít optimální nastavení tvářecího stroje. V pevnostních charakteristikách drží ale vyšší hodnoty.

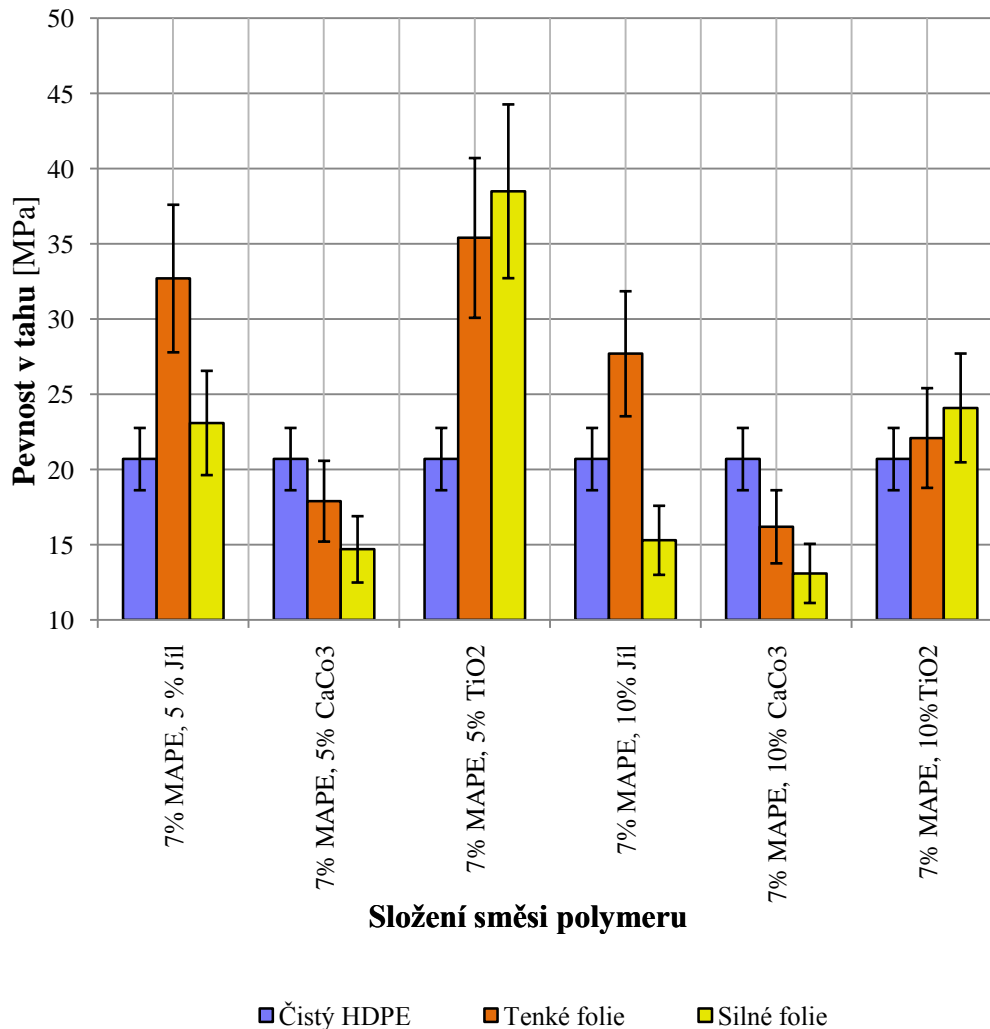
7% MAPE, tvárník č. 1



Srovnání polymeru HDPE s plnivem MAPE a oxidem titaničitým (TiO₂) oproti zbylým typům folií nejlépe prokazuje přínos plniv na bázi titanu. Rozdíl pevnosti v porovnání s uhlíčanem a jílem je enormní. V kombinaci s vyšším protažením zkušebního tělíska při tváření je rozdíl znát jak v 5% tak i v 10% koncentraci.

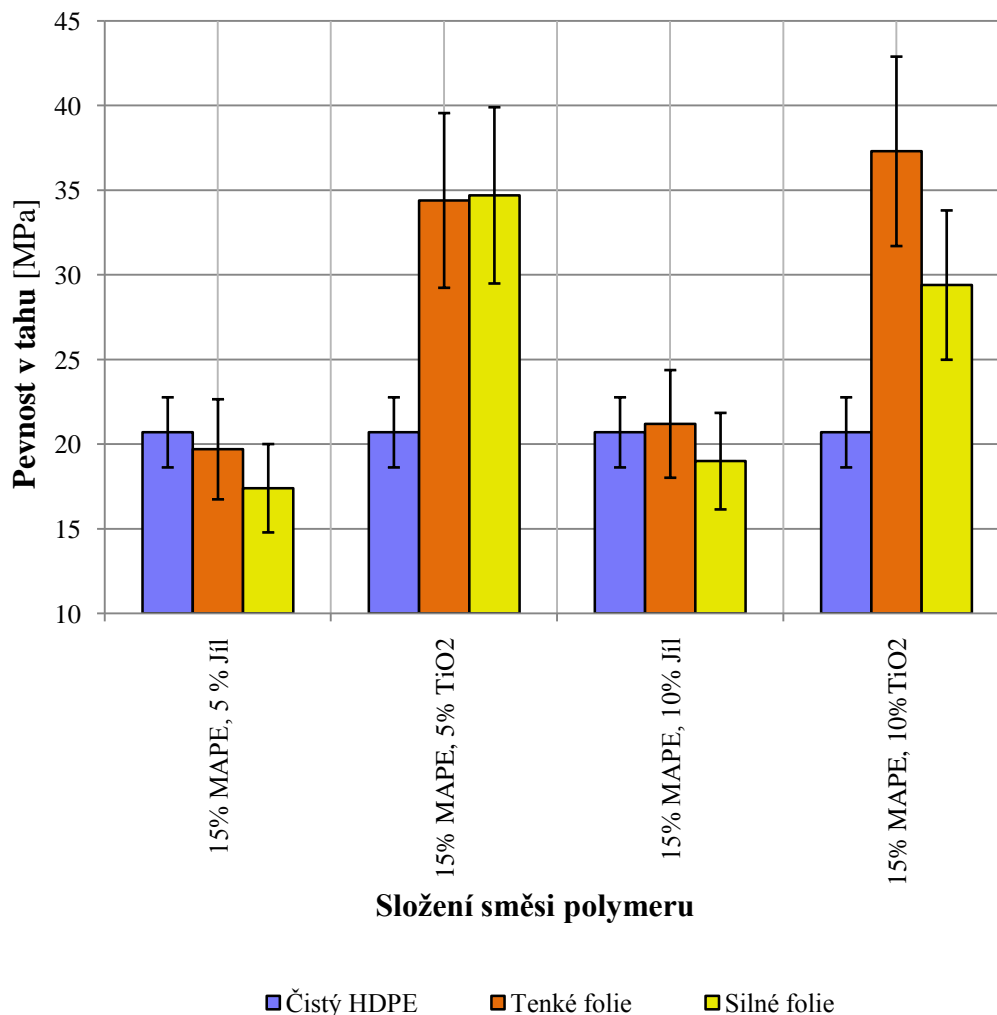
Paradoxní je, že folie s nejlepšími mechanickými vlastnostmi jsou naopak z výrobního hlediska nejhorší. Při tvarování nastávalo mnoho problémů se seřízením stroje. Bylo obtížné odladit optimální poměr intenzity ohřevu a dobu ohřevu. Buď se folie přehřála a při tvarování praskla. Nebo byla intenzita ohřevu zase nízká a došlo k protržení. Po zjištění nejvýhodnějšího nastavení problémy neustaly. Na povrchu se tvořily místa se zeslabenou stěnou, folie se přehýbala přes sebe a v neposlední řadě se nedotvarovala u dna tvárníku.

7% MAPE, tvárník č. 2



Překvapivý nárůst pevnosti v tahu nastal u folie obsahující plnivo jílu (5%) a MAPE (7%). Hodnoty v případě použití tenké folie překročily i pevnost směsi s větším podíle TiO₂ (10%). Tento poznatek je zajímavý hlavně pro výrobní odvětví. Při zachování pevnosti stačí použít méně plniva (jílu). Důležitějším aspektem je jednoduchý proces tvarování, nenáročný na přesnost nastavení. Stejně chování je pozorovatelné u směsi 7% MAPE, 5% TiO₂, kde není znatelný rozdíl mezi vzorkem vyrobeným tvárníkem č.1., nebo č.2. Výsledky jsou oproti předešlému grafu více rozdílné i při použití stejných směsí.

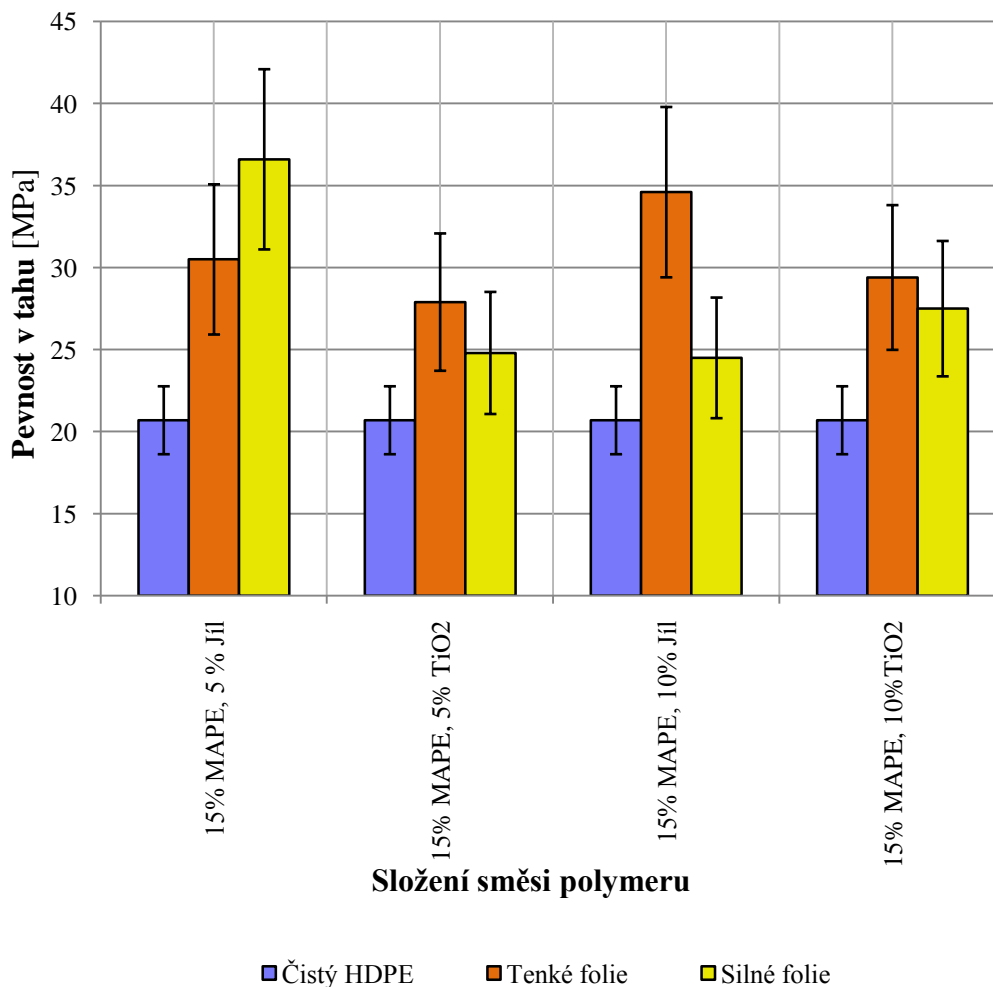
15% MAPE, tvárník č. 1



Kombinace polymeru HDPE, kopolymeru polyethylenu (MAPE) a oxidu titaničitého (TiO_2) dominuje již ve třetím grafickém porovnání z hlediska mechanických vlastností. Posun hodnot směrem vzhůru můžeme pozorovat jak u podílu 5% TiO_2 , tak i u podílu 10% TiO_2 . Pevnost v tahu je takřka dvojnásobná bez rozdílu tloušťky folie.

Větší množství MAPE s jíly je kontraproduktivní u směsi 15%MAPE a 5% jílu. Tento materiál se nevyrovná ani HDPE bez jakýchkoliv plniv. U procentuálního podílu 15% MAPE, 10% jíl je výsledek opět diskutabilní. Přínos plniv v těchto případech není podložen ani v případě, že do porovnávání zahrneme možnost chyby v měření vyznačené v grafu.

15% MAPE, tvárník č. 2

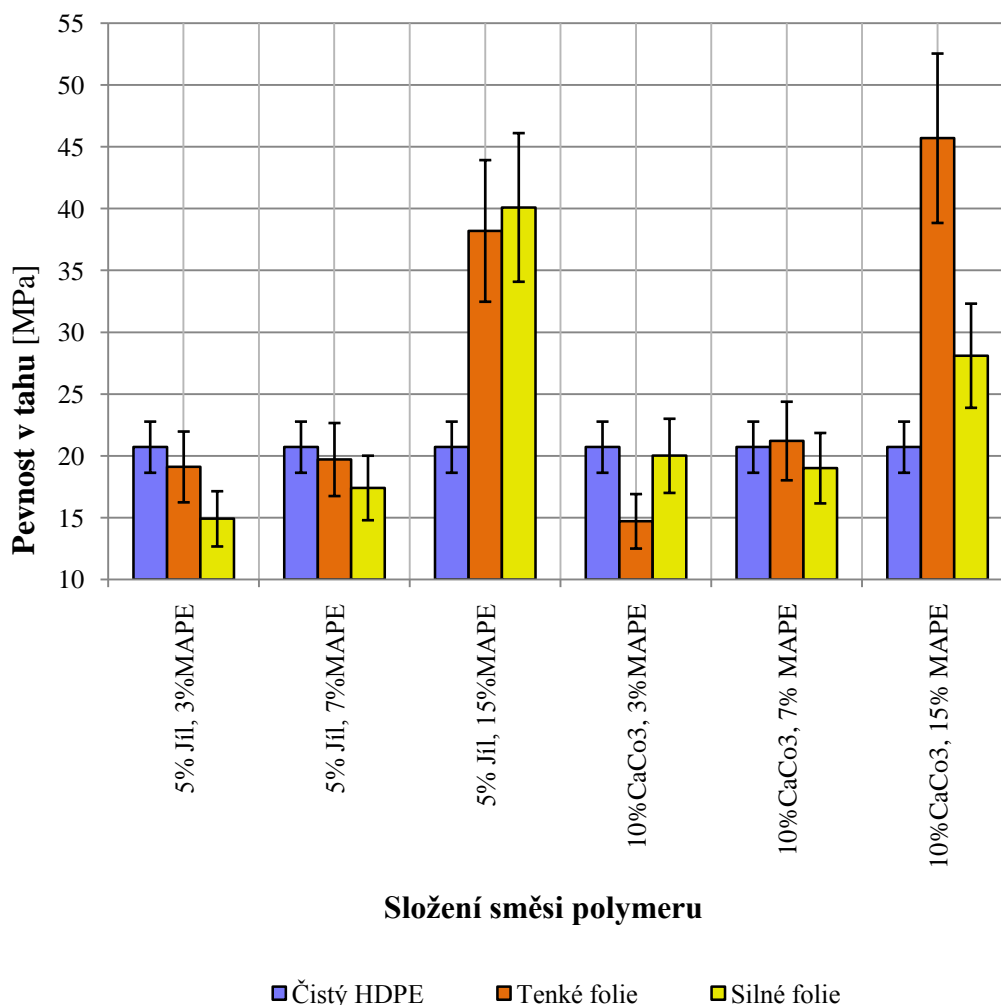


Graf jasně ukazuje fakt, že nelze jednoznačně určit, která plniva jsou přínosem a která ne. Opět se potvrdil vliv metody zpracování polymeru a místo, ze kterého byl vzorek vyseknut. Oproti předchozímu porovnání je nárůst pevnosti v tahu znatelný u všech vzorků. Dokonce i Cloisite 25A, jíl který měl v minulých srovnáních průměrnou, až podprůměrnou pevnost, dosáhl velmi slušných výsledků.

7.2.2 Folie s plnivem Jílu (Cloisite 25A)

Od plniva Cloisite 25A (Jílu) se očekává především vyšší modul pružnosti v tahu a ohybu. Bude zajímavé, jak se bude chovat v kombinaci s ostatními polymery.

Jíl 5%, 10% (Cloisite 25A), tvárník č. 1

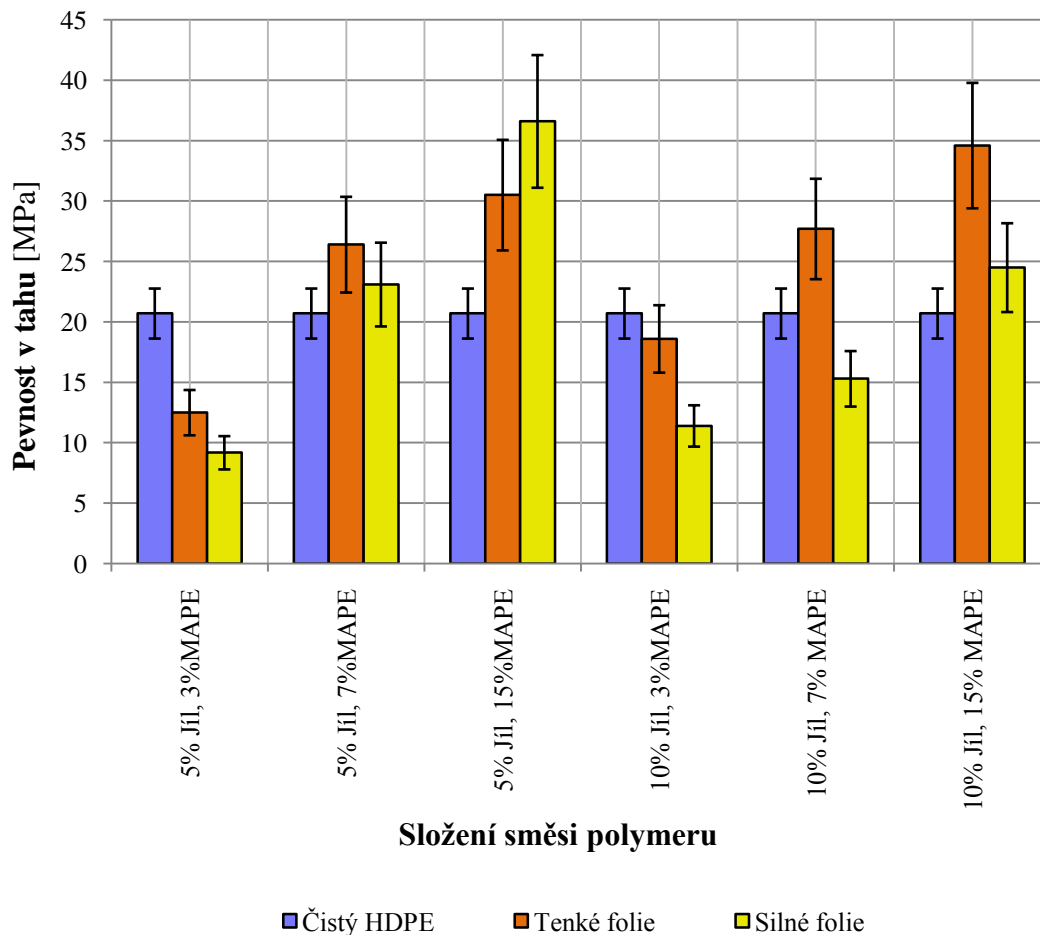


Na předešlé skvělé výsledky plniva MAPE nyní navázal Cloisite 25A. Menším nedostatkem je nutnost větší koncentrace MAPE, což zvyšuje náklady na vstupní materiály. Velmi stabilní se podle grafu zdá směs 5% Cloisite 25A a 7% MAPE, kdy ani rozdílná síla folie nemá velký vliv na konečné výsledky. Jiná situace by nastala při zvýšení podílu jílu z 5% na 10%. Srovnatelný výsledek je dosažen pouze u tenké folie. Větší síla folie (0,8 mm) svou pevností propadla na polovinu hodnoty.

Zbylé výsledky nejsou žádným přínosem z pohledu mechanických vlastností. Hodnoty končí většinou pod pevností čistého HDPE. Použití takto plněných folií je neopodstatněné.

Celkově se folie s příměsí Cloisite 25A nevyzpytatelně tvarují. Vše záleží na síle folie a nastavení tvářecího stroje.

Jíl 5%, 10% (Cloisite 25A), tvárník č. 2



Znatelný rozdíl pevností z předešlého grafu se srovnal do stabilnějších hodnot. Asi polovina výsledků je pod úrovní pevnosti HDPE bez příměsí plniv, proto je můžeme rovnou jako konstrukční materiály vyřadit.

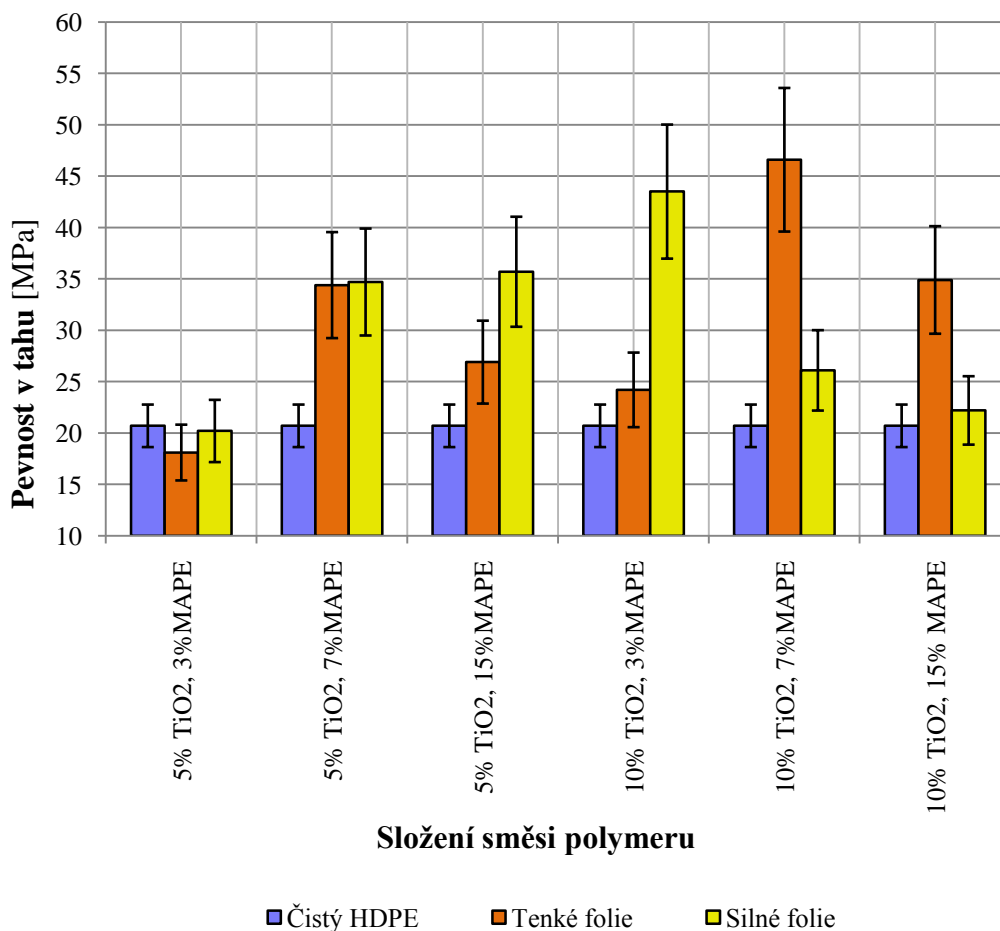
Další výsledky mají jen velmi malý přírůstek pevnosti a použití takto upravených folií do praxe je velmi sporné. Navíc chyba v měření může i některý z těchto vzorků posunout mezi nevýhodné pro výrobu.

Jen kombinace 5% jílu a 3% MAPE má s jistotou náskok v pevnosti takový, že lze uvažovat o rentabilitě jejich použití. U poměru 10% jílu a 15% MAPE je v případě tváření silné folie nejisté, že hodnoty mechanických vlastností posuneme dostatečně výše.

7.2.3 Folie s plnivem Oxidu titaničitého TiO_2

Vyšší koncentrace TiO_2 zvyšují především stabilitu proti UV záření. Z mechanických vlastností zlepšuje odolnost proti rázové houževnatosti. Opět se jedná o plnivo, které nemá přímý vliv na pevnost v tahu.

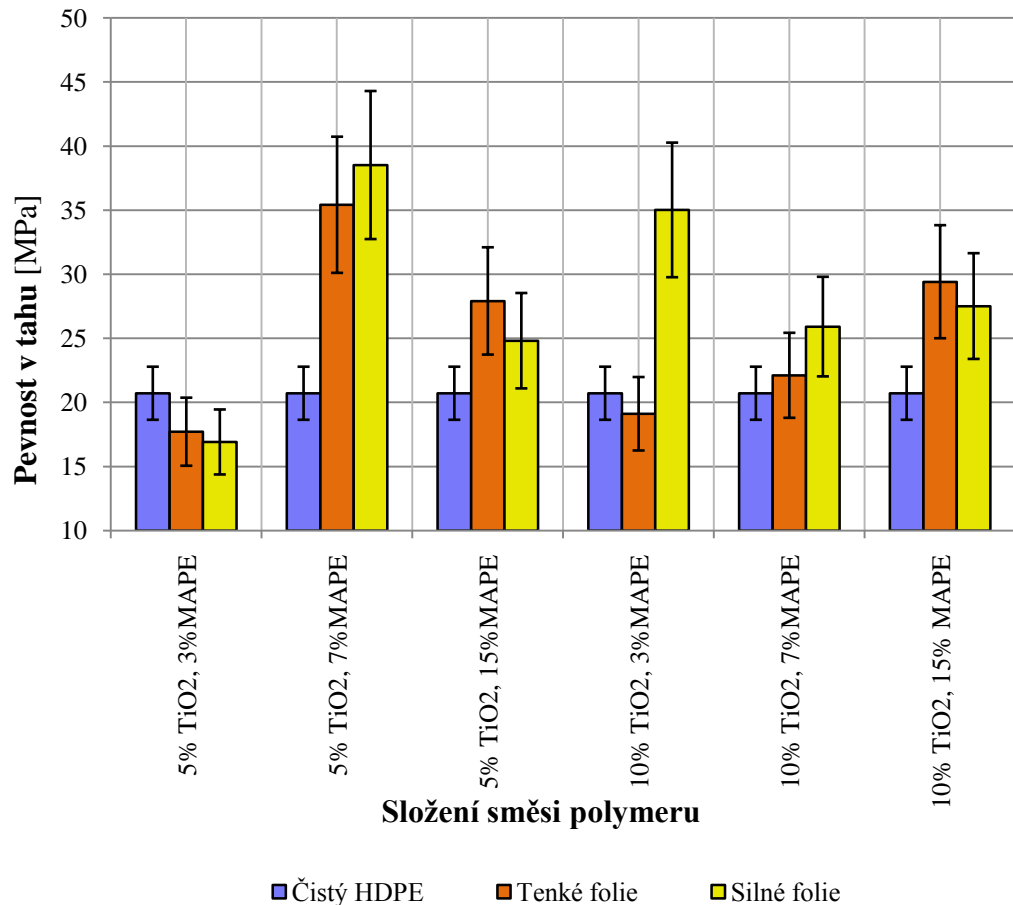
Oxid titaničitý 5%, 10% (TiO_2) tvárník č. 1



Oxid titaničitý byl dosud brán jako jedno z nejlepších plniv pro získání vyšší pevnosti. Rovnoměrnost vlastností s přihlédnutím na sílu folie je nejlépe dosaženo u vzorku s 5% TiO_2 a 7% MAPE. U takto vyráběné folie můžeme v případě potřeby měnit sílu bez zásahu do nastavení výrobního zařízení. Vzorek 5% TiO_2 a 3% MAPE má samozřejmě stejnou vlastnost, ale pro svou nízkou pevnost vůči čistému polyetyleny není logické jeho používání. Zbylé výsledky jsou z pohledu zvyšování pevnosti polymeru přínosem. Jen musí být brán ohled na to, jaké výrobky a za jakých podmínek je chceme vyrábět.

Množství a výhody kompatibilizátoru MAPE nelze dávat do poměru jeho množství a nárůstu pevnosti. Plniva se ovlivňují vzájemně a na jiné tloušťky folie reagují rozdílně.

Oxid titaničitý 5%, 10% (TiO_2) tvárník č. 2

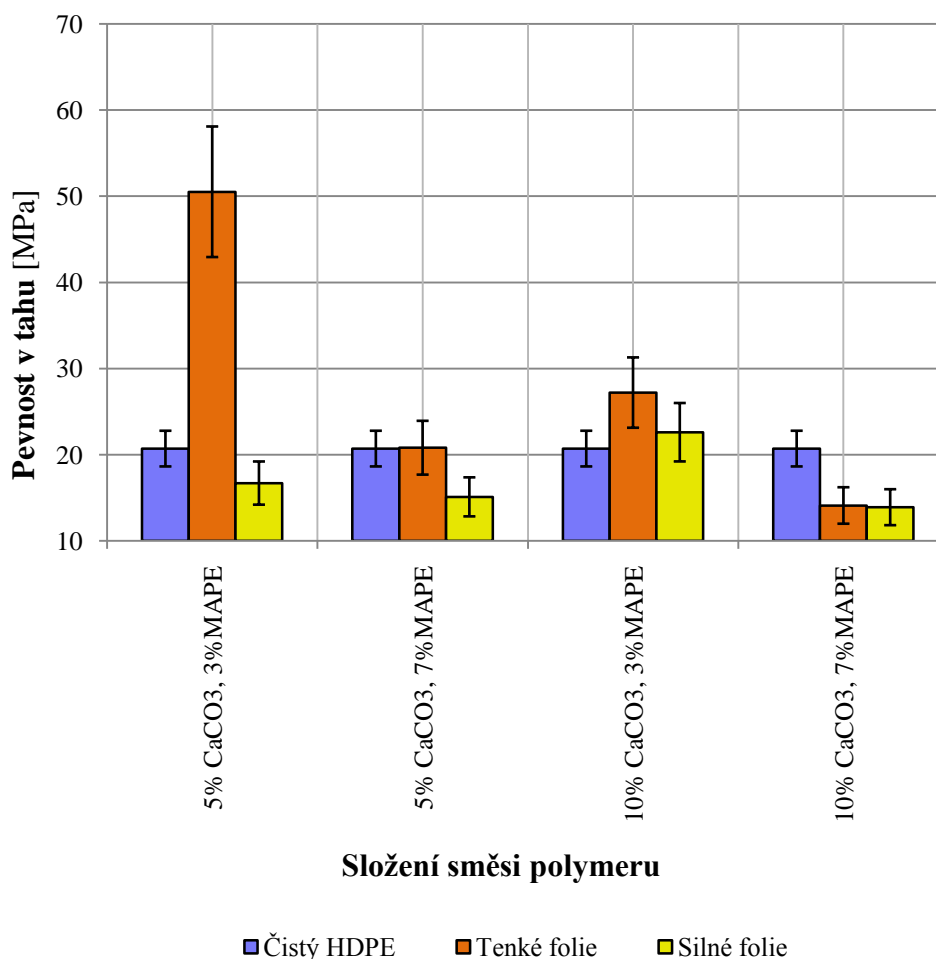


S přihlédnutím na výsledky v předešlém grafu, kde byly použity stejné folie o stejném složení, ale tvářeny nižším tvárníkem je možné říci, že výsledky dopadly, až na pár případů stejně. Pozitivum lze spatřovat ve srovnání vlastností tenkých a silných folií o stejném složení.

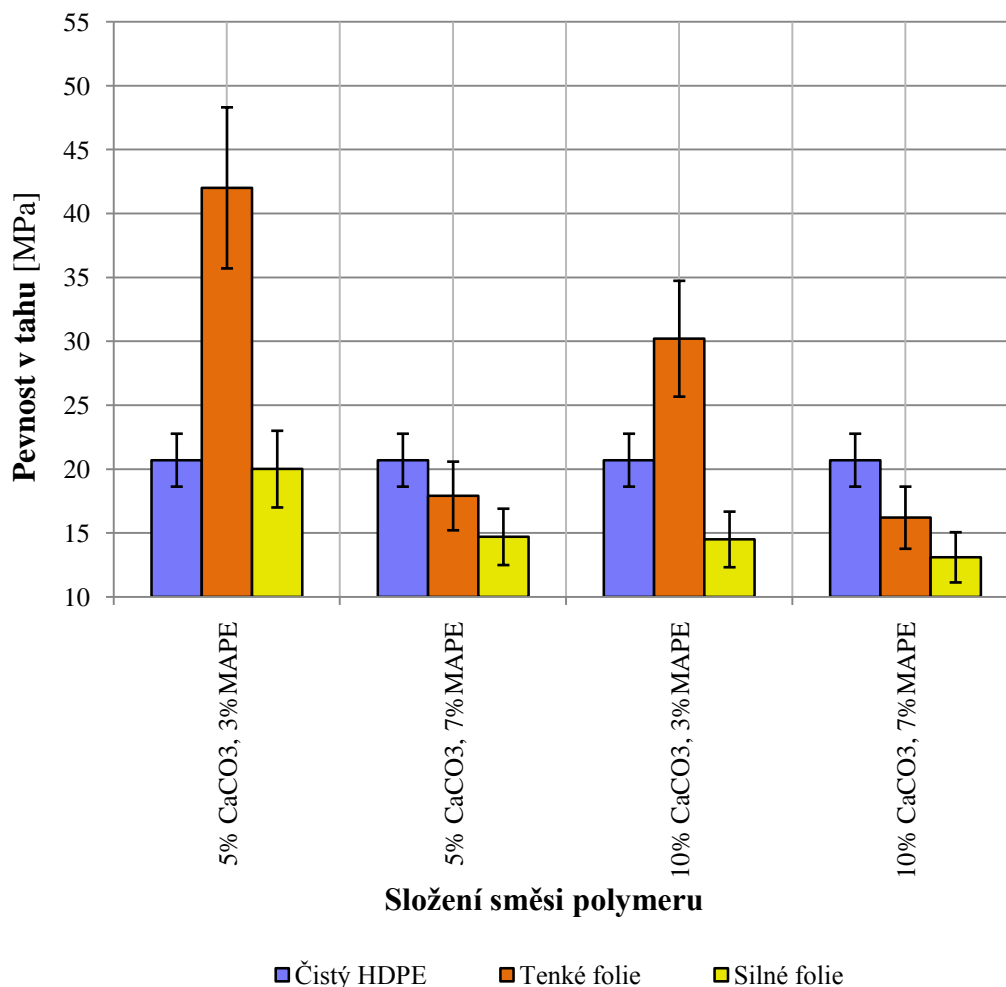
7.2.4 Folie s plnivem uhličitanu vápenatého CaCO_3

Uhličitan je neaktivní plnivo, které se přidává za účelem snížení ceny směsi. Mezi mechanické vlastnosti, které vylepšuje, patří tuhost a tvrdost.

Uhličitan vápenatý 5%, 10% (CaCO_3), tvárník č. 1



Použití uhličitanu vápenatého je hodně diskutabilní. Zatím nebylo zaznamenáno rapidní zlepšení mechanických vlastností. Naměřeny byly spíše horší výsledky. Plnivo by bylo výhodnější za předpokladu, že by pouze snížilo výrobní cenu folie a to v poměru 5 % CaCO_3 a 3% MAPE. Pouze tento případ má přínos pro začlenění plniva do výroby. Velkou výjimkou je koncentrace 5% CaCO_3 a 3% MAPE, kde výsledek je diametrálně rozdílný od zbytku hodnot, ale jen u silné folie. Velký rozdíl hodnot by mohl být brán jako hrubá chyba při měření, ale stejný jev se zopakoval při měření stejné folie, která byla vytvarována menším tvárníkem v dalším grafu.

Uhličitan vápenatý 5%, 10% (CaCO₃), tvárník č. 1

Bez rozdílných výsledků lze hodnotit výsledky s předešlým grafem. Hodnoty pevností se pohybují v rozmezí 20% oproti foliím tvářeným vyšším tvárníkem.

Uhličitan vápenatý o poměru 10% spolu s MAPE (7%) je nejhorší výsledek celkem. Silná folie má pouze 50% pevnosti čistého HDPE. Podobný propad mechanických vlastností je znatelný při poměru 5% uhličitanu. Jedinou výhodou této folie je její výborná zpracovatelnost tvářecími metodami. Zbylé vzorky jsou po stránce mechanických vlastností na dobré úrovni, ale potýkají se s problémy při tvarování. Především praskají teplem a má nerovnoměrnou sílu folie po přetvoření.

7.2.5 Zhodnocení měření

Výsledky tahové zkoušky jako celek nejsou příliš přehledné a nevypovídají o různorodosti plněných folií. Mnohem efektivnější je rozdělení do skupin podle použitých plniv, nebo podobných vlastností. Srovnání hodnot je tak jednodušší a přehlednější.

Integrovaný software TestXpect II nabízí celou škálu měřených veličin tahové zkoušky. Pro naše potřeby postačí pevnost v tahu a případný rozptyl hodnot pro určení odchylky měření.

Pro možnosti srovnání mechanických vlastností plněných folií byly změřeny hodnoty u „čistého“ polymeru bez plniv a příměsí. Pevnost v tahu je 20,7 MPa s rozptylem hodnot $s = 1,97$ Mpa.

Při zběžném pohledu na výsledky je zřetelné, že většina folií tvářených tvárníkem č.1 mají větší hodnoty pevnosti v tahu ve srovnání s tvárníkem č.2. Poznatek se plně aplikuje a rozdělí hodnoty na dvě samostatné skupiny. Výsledky mechanických zkoušek se různí podle množství a druhu plniv. Proto se data dále roztřídí podle aplikovaných přísad.

Pokud začneme porovnávat vliv kompatibilizátoru MAPE, tak lze s jistotou říci, že ne ve všech případech její přidání do polymeru znamenalo lepší mechanické vlastnosti. Pouze při množství 15% a použití tvárníku č. 2 byl nárůst pevnosti ve všech foliích. Zbylé výsledky jsou různými kombinacemi nárůstu a poklesu podle přidaného plniva velikostí tvárníku.

Jíl, neboli Cloisite 25A je výborné plnivo pouze ve spojení s MAPE. V těchto případech lze pozorovat znatelné zvýšení pevnosti. Další hodnoty se drží těsně pod nebo nad průměrem čistého HDPE, podle přidaného dalšího plniva.

Oxid titaničitý TiO₂ prokázal svou dominanci ve srovnání nárůstu pevnosti v tahu. Až na pár vzorků se všechny ostatní posunuly pevností daleko nad čistý polyetylen.

Uhličitán vápenatý je brán především jako plnivo snižující výrobní cenu polymeru. Při jeho aplikaci do folií se tvrzení výrobců plniv potvrdilo. I když ve spojení s MAPE o koncentraci 3% se pevnost v tahu zvýšila na hodnoty, které mají ostatní vyztužující plniva.

V každé sadě měření je zohledněna možná chyba. Další nepřesnosti se do výsledků promítnou již z procesu výroby vzorku. Tyto chyby ale nedokážeme zohlednit v grafech.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou porovnání mechanických vlastností plněných a neplněných folií. Teoretická část obsahuje základní informace o výrobě polymerů, plnivech a základních typech polymerů. Dále shrnuje základní mechanické vlastnosti všech konstrukčních materiálů.

Praktická část se zabývá především přípravou směsí, výrobou folií, tvářením a vysekáváním vzorků. Při laboratorních přípravě byly použity metody vytlačování, mletí, tvarování, vysekávání. Projekt by měl být přínosem hlavně pro případné používání folií v praxi, tak i pro obsluhu tvářecího stroje, který byl zařazen do laboratorního vybavení před nedávnem. Za předpokladu, že budou použity stejná plniva a stejné podmínky při zpracování, může být proces uplatněn i v praxi.

Plniva se používají v polymerech především pro zdokonalení mechanických vlastností, proto byly směsi srovnány i s „čistým“ HDPE. Přínosem plniv je nižší cena při zpracování polymerů, zdokonalování mechanických designérských a uživatelských vlastností.

V průběhu laboratorních prací se rozdíly mezi jednotlivými foliemi začaly čím dál více projevovat. Již při výrobě strun a jejich mletí byly pozorovatelné rozdíly ve směsích bez použití jakéhokoliv měřicího zařízení. Tyto poznatky byly utvrzeny při vytlačování folie přes širokoštěrbinovou hlavu, kde bylo nutné poprvé korigovat nastavení pro každou folii na rozdílné hodnoty.

Nárůst rozdílů se projevil u tváření folií na stroji FORMTECH, které probíhalo pomocí dvou nástrojů podobného tvaru, ale rozdílné výšky. Některé druhy folií šlo vytvarovat pomocí širšího rozmezí nastavení, další naopak vyžadovaly přesné seřízení. Našly se i vzorky, které po vytvarování byly zmetkové. Přesto se z jejich pláště vysekl vzorek a začlenil se do porovnávací sady zkušebních tělísek.

Měření pevnosti v tahu mělo za úkol zhodnotit veškerou předešlou práci. Především se získaly užitečná data pro následné vyhodnocení. Naměřených hodnot bylo hodně a samy o sobě nevypovídaly o možnostech a vlastnostech vzorků. Až jejich seřazení do přehledných tabulek a jejich porovnání mezi sebou dalo skutečný přehled. Výsledky mnohdy potvrdily očekávání, ale vyskytly se i případy, kdy se polymery chovaly jiným způsobem.

Po celou dobu prací vznikaly různé nepřesnosti a nepředvídatelné výsledky, proto se v průběhu prací částečně měnil pohled na jejich styl a posloupnost. Naměřené hodnoty lze považovat za reálné, je však nutné počítat s chybami v měření.

Při používání různých typů plniv nelze předpokládat, že se v konečném výrobku projeví jen ty nejlepší vlastnosti. Různé kombinace mají různé konečné výsledky, proto je jedinou zárukou získání věrohodných znalostí výroba zkušebních vzorků a jejich podrobení testům.

Při používání různých typů plniv nelze předpokládat, že se v konečném výrobku projeví jen ty nejlepší vlastnosti. Různé kombinace mají různé konečné výsledky. Proto je jedinou zárukou získání věrohodných znalostí výroba zkušebních vzorků a jejich podrobení testům.

Nedílnou součástí laboratorních prací byla optimalizace tvarování folie. Tvarovací operace se prováděly na stroji FORMTECH 508 FS pracujícím na principu tvarování pomocí vakua. Obsluha stroje je jednoduchá, ale nastavení vyžaduje zkušenost obsluhy a obecnou znalost teplotních parametrů tvarovaných materiálů. Výsledky tvarování jsou hodně ovlivnitelné obsluhou stroje. Výroba vzorků probíhala pomocí dvou tvárníků tvaru komolého kužele s rozdílnou výškou.

Použitím vyššího tvárníku bylo dosaženo vyšší pevnosti folie. Každý typ folie byl vystaven deseti různým nastavením teploty a doby ohřevu. Z těchto parametrů byl vybrán ten nejvhodnější a označen v tabulce přílohy P2. Některé folie byly ovšem nevhodné pro tvarovací operace a proto nebylo dosaženo výroby kvalitního vzorku. Přesto se do celkového hodnocení zaznamenal nejlepší možný výsledek. Tyto folie by bylo nejspíš možné tvarovat se stejně dobrým výsledkem jako ostatní. Vyžadovalo by to ale hlubší zkoumání možností nastavení a nejspíš i změnu konstrukce tvarovacího stroje. Mezi špatně tvarovatelné folie lze zařadit především ty s plnivem oxidu titaničitého (TiO_2).

Mezi foliemi se našly i vzorky, které byly velmi dobře tvarovatelné ve větším rozptylu nastavení. Především plnivo Cloisite 25A (jíl) poskytlo tvarování nejlépe s kompatibilizátorem MAPE.

Seznam použité literatury

- [1] LENDFELD, P. Technická univerzita Liberec: Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. [online]. Technická Univerzita Liberec [cit. 2015-01-06]. Dostupné z:http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [2] ŠTĚPEK, J, J ZELINGER a A KUTA. *Technologie zpracování a vlastností plastů*. Vyd. 1. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989, 637 s.
- [3] YU, Edited by Yiu-WingMai and Zhong-Zhen. *Polymer nanocomposites*. Repr. BocaRaton [etc.]: CRC Press, 2006. ISBN 18-557-3969-0.
- [4] CANTOR, Kirk. *Blown Film Extrusion An Introduction*. Cincinnati: Hanser-Gardner Publications, 2006. ISBN 9783446227415.
- [5] BELGACEM, Mohamed Naceur a Alessandro GANDINI. *Monomers, polymers and composites from renewable resources*. 1st ed. Boston: Elsevier, 2008, viii, 552 p., [1] p. of plates. ISBN 9780080453163.
- [6] Graphics. [online]. [cit. 2015-01-10]. Dostupné z: http://need-media.smugmug.com/Graphics/Graphics/17024036_Bdmf8C/1423277693_w9NJQXC#!I=123277693&k=w9NJQXC
- [7] WYPYCH, George. *Handbook of fillers*. 3rd ed. Toronto: ChemTecPub, 2010. ISBN 9781895198416.
- [8] ROTHON, R. *Particulate-filled polymer composites*. New York: J. Wiley, 1995, xii, 375 p. ISBN 0470235098.
- [9] Polymer and fillers. [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: [http://polymer-filler.blogspot.cz/2008/08/chapter-1-introduction fillers.html](http://polymer-filler.blogspot.cz/2008/08/chapter-1-introduction-fillers.html)>10
- [10] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů*. 1.vyd. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3
- [11] TOLINSKI, Michael. *Additives for polyolefins: getting the most out of polypropylene, polyethylene and TPO*. 1st ed. Oxford: William Andrew Publishing, 2009. ISBN 9780815520511.
- [12] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti, a použití*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 544 s. ISBN 80-85920-72-7

- [13] SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. Praha: VerlagDashöfer, 1999-2001, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 80-86229-15-7.
- [14] THE POLYMERISATION OF ALKENES. . [online]. [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: <http://www.chemguide.co.uk/organicprops/alkenes/polymerisation.html>
- [15] FormulasofInorganic and OrganicCompounds. a Kristina Bonnett BONNETT. [online].[cit.2015-02-01]. Dostupné z: http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Quantum_Mechanics/09._The_Hydrogen_Atom/Atomic_Theory/Chemical_Compounds/Formulas_of_Inorganic_and_Organic_Compounds
- [16] KISSIN, Y. *Polyethylene: end-use properties and theirphysicalmeaning*. xi, 140 pages. ISBN 9781569905203.
- [17] MERNA, Jan. Polymery-úvod. [online]. Ústav polymerů, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.merna.eu/MMC/Polymery-uvod.pdf>
- [18] WILLIAMS, Edited by Peter A. *Renewableresourcesforfunctionalpolymers and biomaterials*. Cambridge, UK: RSC Pub, 2011. ISBN 9781849732451.
- [19] J.L.White, *TwinScrewExtrusion: Technology and Principles*, HanserPublishers, New York (1991) ISBN 3446156917
- [20] Twin-Screw-Extruder. [online]. [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://image.made-in-china.com/2f0j00pZgEFoCInLcS/Kaichi-Parallel-Twin-Screw-Extruder-SHJ-75-.jpg>
- [21] EDITORS IN CHIEF, By K. *Encyclopediaofmaterials science and technology*. Amsterdam: Elsevier, 2001. ISBN 9780080523583.
- [22]]DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [23] TOMIS, František; RULÍK, František. *Gumárenské a plastikářské stroje*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1981. 216 s
- [24] LENFELD, Petr Lenfeld. *Odlévání* [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm
- [25] ASHBY, M a David R JONES. *Engineeringmaterials 2: anintroduction to microstructures and processing*. Fourthedition. pages cm. ISBN 9780080966687.

- [26] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. *Výrobní stroje a zařízení*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 264 s. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [27] HYLTON, Donald C. *Understanding plastic testing*. Munich: Hanser Publishers, c2004, xi, 93 s. ISBN 1-56990-366-2.
- [28] RYBNÍKÁŘ, F., et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.
- [29] Zdeněk DITRYCH a Zdeněk SKÁCEL. *Analýza zkoušení plastických hmot*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. ISBN 04-628-65.
- [30] Unipetrol: Charakteristika-polyolefiny [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Polyolefiny/Stranky/product-detail.aspx?product=LITEN FB 85 F>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

T_t	<i>Oblast teploty tečení [°C]</i>
T_f	<i>Teplota tání krystalického podílu [°C]</i>
PP	<i>Polypropylen</i>
PE	<i>Polyetylen</i>
PVC	<i>Polyvinylchlorid</i>
PS	<i>Polystyren</i>
T_g	<i>Teplota zesklnění [°C]</i>
PC	<i>Polykarbonát</i>
$PMMA$	<i>Polymethylmethakrylát</i>
$PTFE$	<i>Polytetrafluorethylen</i>
ABS	<i>Akrylonitrilbutadienstyren</i>
H	<i>Vodík</i>
PA	<i>Polyamid</i>
MoS_2	<i>Disulfid molybdenu</i>
SiO_2	<i>Oxid křemičitý</i>
CH_3	<i>Methylová skupina</i>
C	<i>Uhlík</i>
$BOPP$	<i>Biaxiálně orientovaný PP Obalová folie</i>
$HDPE$	<i>Vysoko hustotní polyetylen</i>
$LDPE$	<i>Nízko hustotní polyetylen</i>
PET	<i>Polyethylentereftalát</i>
E	<i>Modul pružnosti [MPa]</i>
$R_{(\sigma)}$	<i>Napětí v tahu [MPa]</i>
ε	<i>Deformace, poměrné prodloužení [-]</i>

k	<i>Směrnice přímky [-]</i>
R_e	<i>Mez pružnosti [MPa]</i>
F_e	<i>Síla tahové zkoušky v bodě E [N]</i>
S_o	<i>Plocha průřezu vzorku [m²]</i>
R_k	<i>Mez kluzu [MPa]</i>
F_k	<i>Síla tahové zkoušky v době K [N]</i>
R_m	<i>Mez pevnosti v tahu [MPa]</i>
F_{max}	<i>Maximální síla tahové zkoušky [N]</i>
TiO_2	<i>Oxid titaničitý [-]</i>
EN	<i>Evropská norma [-]</i>
g	<i>Gram [-]</i>
μm	<i>Mikrometr [-]</i>
mm	<i>Milimetr [-]</i>
$\check{C}SN$	<i>Česká státní norma [-]</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Základní rozdělení polymerů</i>	12
<i>Obr. 2 Struktura polymerů podle teplotního rozdělení[3]</i>	13
<i>Obr. 3 Schéma výroby syntetických polymerů</i>	15
<i>Obr. 4 Struktura monomeru a polymeru[6]</i>	16
<i>Obr. 5 Polymerace</i>	17
<i>Obr. 6 Polykondenzace</i>	17
<i>Obr. 7 Polyadice</i>	18
<i>Obr. 8 Vápenec (sférické), Mastenec (destičkové), Wollastonit (částicové) [8]</i>	18
<i>Obr. 9 Polypropylen</i>	20
<i>Obr. 10 BOPP Balicí folie[10]</i>	21
<i>Obr. 11 Polyamid, strukturní vzorec</i>	22
<i>Obr. 12 Typy výroby polyamidu</i>	22
<i>Obr. 13 Schéma výroby PVC [13]</i>	24
<i>Obr. 14 Polyvinylchlorid, strukturní vzorec [14]</i>	24
<i>Obr. 15 Polyetylen, strukturní vzorec[15]</i>	25
<i>Obr. 16 Polystyren, strukturní vzorec[18]</i>	26
<i>Obr. 17 Vytlačovací stroj [20]</i>	28
<i>Obr. 18 Širokoštěrbinová hlava</i>	29
<i>Obr. 19 Výrobní linka tenkých folií [21]</i>	30
<i>Obr. 20 Vyfukování folie vertikální (směrem vzhůru)</i>	31
<i>Obr. 21 Vyfukování folie vertikální (směrem dolů)</i>	31
<i>Obr. 22 Vyfukování folie horizontální</i>	32
<i>Obr. 23 Linka na výrobu fólií kalandrováním</i>	33
<i>Obr. 24 Uspořádání válců</i>	33
<i>Obr. 25 Pozitivní a negativní tvarování</i>	35
<i>Obr. 26 Pozitivní a negativní tvarování s předtažením</i>	36
<i>Obr. 27. Negativní tvarování bez razníku</i>	37
<i>Obr. 28 zkušební vzorek (pevnost v tahu) [27]</i>	38
<i>Obr. 29 Tahový diagram[28]</i>	39
<i>Obr. 30 Zkouška odolnosti proti průrazu</i>	42
<i>Obr. 31 Laboratorní váha KERN PCB 6000-1</i>	47
<i>Obr. 32 Rozdělení teplot na vytlačovacím stroji</i>	49

<i>Obr. 33 Linka na výrobu folií</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 34 Vytlačená folie</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 35 Tvarovací stroj FORMECH</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36 Rozměry kuželů, matrice (zleva typ 1, zprava typ 2).</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37 Teploměr HAZET</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38 Typy vad</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39 Tvarový nůž</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 40 Měřicí zařízení ZWICK.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 41 Digitální posuvné měřidlo</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 42 TestXpertII.....</i>	<i>62</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Složení směsí.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 2 Nastavení odtahovacího zařízení.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 3 nastavení tvářecího stroje.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 4 Tabulka převodu výkonu.....</i>	<i>55</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1 Materiálový list – Cloisite 25A

Příloha P2 Optimální nastavení tvářecího stroje při tváření plněných folií

Příloha P2 Optimální nastavení tvářecího stroje při tváření plněných folií

Plniva:3% MAPE, 5% Jíl,				Průměrná síla: 0,1 mm
vzorek 1a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	30	Folie se lepí na matrici, nekvalitní povrch
	2	70	25	Folie se lepí na matrici, nekvalitní povrch
	3	70	20	Nedotvarování součástí u dna
	4	70	35	Nestabilní a tenký povrch
	5	60	35	Optimální nastavení
Tvárník č. 2	6	70	20	Nedotvarování součástí u dna
	7	70	25	Optimální nastavení
	8	70	30	Dobré nastavení
	9	70	35	Dobré nastavení
	10	60	35	Dobré nastavení

Plniva:3% MAPE, 5% Jíl,				Průměrná síla: 0,9 mm
vzorek 1b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	60	80	Přehřátí folie a její protržení
	2	60	90	Optimální nastavení
	3	70	80	Dobré nastavení
	4	60	80	Nevytvaruje se, protržená folie
	5	70	50	Dobré nastavení
Tvárník č. 2	6	70	20	Nedotvarování součástí u dna
	7	70	25	Optimální nastavení
	8	70	30	Dobré nastavení
	9	70	35	Dobré nastavení
	10	60	35	Dobré nastavení

Plniva:3% MAPE,10% Jíl,				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 2a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	20	Přehřátí folie a její protržení, nedotvarování dna součásti.
	2	70	25	Optimální nastavení
	3	70	15	Nedotvarování dna součásti
	4	70	10	Nedotvarování dna součásti, trhání folie, malá teplota ohřevu.
	5	60	25	Nedotvarování dna součásti, výskyt trhlin.
Tvárník č. 2	6	70	20	Nedotvarování dna součásti, výskyt trhlin.
	7	70	25	Výskyt trhlin, deformace tvaru
	8	70	15	Optimální nastavení
	9	70	10	Nedotvarování dna součásti, trhání folie
	10	60	35	Nedotvarování dna součásti

Folie není vhodná pro tvarování

Plniva:3% MAPE,10% Jíl,				Průměrná síla: 0,9mm
vzorek 2b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	90	80	Přehřátí folie a její protržení
	2	70	90	Optimální nastavení
	3	70	100	Folie se lepí na tvárník, nekvalitní povrch
	4	70	70	Nevytvaruje se- malý ohřev
	5	70	60	Dobré nastavení
Tvárník č. 2	6	70	80	Optimální nastavení.
	7	70	90	Přehřátí folie, lepí se na tvárník
	8	70	100	Přehřátí folie, protržení, lepí se na tvárník
	9	70	70	Dobré nastavení
	10	70	60	Dobré nastavení

Plniva: 3% MAPE, 5% Uhličitan vápenatý CaCO ₃				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 3a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	40	Nevytvaruje se
	2	60	30	Nevytvaruje se, nekvalitní povrch
	3	60	25	Nevytvaruje se, nekvalitní povrch
	4	50	15	Nevytvaruje se, protržení folie
	5	80	25	Nevytvaruje se.
Tvárník č. 2	6	70	40	Nevytvaruje se, protržení folie
	7	60	30	Nevytvaruje se- malý ohřev, nekvalitní povrch
	8	60	25	Nevytvaruje se- malý ohřev
	9	50	35	Přehřátí folie a její protržení
	10	80	15	Nevytvaruje se- malý ohřev

Nevhodná pro tvarování, nedotvarován se, nebo se protrhne teplem, folie níže dobře tvarovatelná

Plniva: 3% MAPE, 5% Uhličitan vápenatý CaCO ₃				Průměrná síla: 0,6mm
vzorek 3b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	60	Dobrý vzorek
	2	70	70	Nedotvarování dna součásti, nerovnoměrně vytvarovaná
	3	70	50	Nedotvarování dna součásti, nerovnoměrně vytvarovaná
	4	70	40	Nerovnoměrně vytvarovaná, zvlněné dno
	5	70	30	Nerovnoměrně vytvarovaná, nedotvarování dna součásti
Tvárník č. 2	6	70	60	Dobré nastavení
	7	70	70	Nerovnoměrně vytvarovaná
	8	70	50	Nerovnoměrně vytvarovaná
	9	70	40	Nerovnoměrně vytvarovaná
	10	60	30	Nedotvarování dna součásti

Plniva: 3% MAPE, 10% Uhličitan vápenatý CaCO ₃				Průměrná síla: 0,1mm
vzorek 4a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	40	Nevytvaruje se, nekvalitní povrch
	2	60	30	Nevytvaruje se, nekvalitní povrch
	3	60	25	Nevytvaruje se, nekvalitní povrch
	4	50	35	Nevytvaruje se, protržení folie
	5	80	15	Nevytvaruje se.
Tvárník č. 2	6	70	40	Nevytvaruje se, protržení folie
	7	60	30	Nevytvaruje se, nekvalitní povrch
	8	60	25	Nevytvaruje se, nekvalitní povrch
	9	50	35	Přehřátí folie a její protržení, deformace tvaru
	10	80	15	Nevytvaruje se- malý ohřev

Rozdílná tloušťka folie, protrhává se

Plniva: 3% MAPE, 10% Uhličitan vápenatý CaCO ₃				Průměrná síla: 0,6mm
vzorek 4b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	60	Dobré nastavení
	2	70	70	Nedotvarování dna součásti, nerovnoměrný tvar
	3	70	50	Nedotvarování dna součásti, nerovnoměrný tvar
	4	70	40	Nerovnoměrný tvar, zvlněné čelo
	5	70	30	Nedotvarování dna součásti, nerovnoměrný tvar
Tvárník č. 2	6	70	60	Dobré nastavení
	7	70	70	Nerovnoměrně vytvarovaná
	8	70	50	Nerovnoměrně vytvarovaná
	9	70	40	Nerovnoměrně vytvarovaná
	10	60	30	nedotvarování dna součásti

Plniva: 7% MAPE, 5% jíł				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
5a	1	60	25	Po ohřevu se folie zvlní, překládá se přes sebe během tváření
	2	60	30	Překládá se přes sebe během tváření
	3	60	35	Překládá se přes sebe během tváření, nejméně ze všech vzorků
	4	60	40	Folie se trhá teplem, bez přehybů
	5	50	40	Folie se trhá teplem, překládá se přes sebe během tváření
Tvárník č. 1	6	60	25	Po ohřevu se folie zvlní, překládá se přes sebe během tváření
	7	60	30	Překládá se přes sebe během tváření
	8	60	35	Překládá se přes sebe během tváření, nejméně ze všech vzorků
	9	60	40	Folie se trhá teplem
	10	50	40	Folie se trhá teplem, překládá se přes sebe během tváření
Tvárník č. 2	6	60	25	Po ohřevu se folie zvlní, překládá se přes sebe během tváření
	7	60	30	Překládá se přes sebe během tváření
	8	60	35	Překládá se přes sebe během tváření, nejméně ze všech vzorků
	9	60	40	Folie se trhá teplem
	10	50	40	Folie se trhá teplem, překládá se přes sebe během tváření

Plniva: 7% MAPE, 5% jíł				Průměrná síla 0,9 mm
vzorek	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
5b	1	70	80	Dobré tvarování
	2	80	80	Dobré tvarování
	3	90	80	Dobré tvarování, optimální nastavení
Tvárník č. 1	5	70	25	Překládá se přes sebe během tváření
	6	80	30	Překládá se přes sebe během tváření
	7	90	35	Optimální nastavení
Tvárník č. 2	5	70	25	Překládá se přes sebe během tváření
	6	80	30	Překládá se přes sebe během tváření
	7	90	35	Optimální nastavení

Folie velmi vhodné pro tvarování

Plniva: 7% MAPE, 10% jíł				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 6a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	50	40	Dobré tvarování, mírně se překládá přes sebe během tváření
	2	60	35	Dobré tvarování
	3	60	40	Po ohřevu vznikají pukliny, tvar je ale dobrý.
	4	70	30	Dobrý tvar bez puklin
	5	70	35	Dobrý tvar bez puklin, optimální nastavení
Tvárník č. 2	6	50	40	Dobré tvarování, mírně se překládá přes sebe během tváření
	7	60	35	Dobré tvarování
	8	60	40	Po ohřevu vznikají pukliny, tvar je ale dobrý.
	9	70	30	Dobré tvarování
	10	70	35	Dobré tvarování, optimální nastavení

Plniva: 7% MAPE, 10% jíł				Průměrná síla 1 mm
vzorek 6b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	80	Dobrý vzorek bez vad.
	2	70	90	Dobrý vzorek bez vad.
	3	80	90	Dobrý vzorek bez vad, optimální nastavení
	4	90	90	Protrhnutí folie vakuem
	5	80	110	Nerovnoměrný tvar, nedotvarované dno
Tvárník č. 2	6	70	80	Dobrý vzorek bez vad.
	7	70	90	Dobrý vzorek bez vad.
	8	80	90	Dobrý vzorek bez vad optimální nastavení
	9	90	90	Překládá se přes sebe během tváření
	10	80	110	Nerovnoměrný tvar a síla folie

Folie velmi vhodné pro tvarování

Plniva: 7% MAPE, 5%Uhlíčitan vápenatá CaCo ₃				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 7a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	50	Překládá se přes sebe během tváření
	2	80	50	Překládá se přes sebe během tváření
	3	90	50	Překládá se přes sebe během tváření
	4	100	50	Po ohřevu vznikají pukliny, tvar je ale dobrý.
	5	90	60	Optimální nastavení
Tvárník č. 2	6	70	50	Překládá se přes sebe během tváření
	7	80	50	Překládá se přes sebe během tváření
	8	90	50	Překládá se přes sebe během tváření
	9	100	50	Po ohřevu vznikají pukliny, tvar je ale dobrý.
	10	90	60	Optimální nastavení

Folie velmi vhodné pro tvarování

Plniva: 7% MAPE, 5%Uhlíčitan vápenatá CaCo ₃				Průměrná síla 1.2 mm
vzorek 7b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	90	Nevytvaruje se
	2	90	100	Dobré tvarování, pěkný povrch
	3	100	100	Dobré tvarování, pěkný povrch, optimální nastavení
	4	100	110	Dobré tvarování, pěkný povrch
	5	100	120	Dobré tvarování, pěkný povrch, velké zeštíhlení stěny
Tvárník č. 2	6	80	90	Nevytvaruje se
	7	90	100	Dobré tvarování, pěkný povrch
	8	100	100	Dobré tvarování, pěkný povrch
	9	100	110	Dobré tvarování, pěkný povrch
	10	100	120	Dobré tvarování, optimální nastavení

Plniva: 7% MAPE, 10%Uhlíčan vápenatá CaCo ₃				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 8a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	100	50	Překládá se přes sebe během tváření
	2	90	55	Překládá se přes sebe během tváření
	3	90	60	Překládá se přes sebe během tváření, Nedotvarování dna součásti
	4	80	45	Optimální nastavení
	5	80	50	Překládá se přes sebe během tváření
Tvárník č. 2	6	700	50	Překládá se přes sebe během tváření
	7	90	55	Optimální nastavení
	8	90	60	Překládá se přes sebe během tváření, Nedotvarování dna součásti
	9	90	65	Překládá se přes sebe během tváření
	10	80	50	Nedotvarování dna vzorku

Folie se často deformuje a překládá přes sebe

Plniva: 7% MAPE, 10%Uhlíčan vápenatá CaCo ₃				Průměrná síla 0,8 mm
vzorek 8b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	80	Překládá se přes sebe během tváření
	2	100	80	Dobrý vzorek, malé přehnutí u dna
	3	100	85	Dobrý vzorek, malé přehnutí u dna
Tvárník č. 2	4	100	90	Optimální nastavení
	5	100	95	Po ohřevu vznikají pukliny, přehřátá folie
	6	70	70	Nedotvarování dna součásti
	7	80	70	Překládá se přes sebe během tváření
	8	80	75	Překládá se přes sebe během tváření
	9	90	80	Překládá se přes sebe během tváření, praská vysokým ohřevem
	10	100	80	Optimální nastavení

Plniva: 15% MAPE, 5% Jíl				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 9a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	100	60	Překládá se přes sebe během tváření
	2	100	65	Překládá se přes sebe během tváření
	3	100	75	Překládá se přes sebe během tváření
	4	100	85	Překládá se přes sebe během tváření, nejlepší výsledek
	5	100	90	Překládá se přes sebe během tváření
Tvárník č. 2	6	70	60	Folie praská
	7	80	60	Folie se nedotvarovala – malý ohřev
	8	90	60	Folie se nedotvarovala – malý ohřev
	9	100	60	Folie se nedotvarovala – malý ohřev
	10	60	60	Nedotvarování dna vzorku – nejlepší nastavení

Folie se obtížně nahřívá, spotřebovává hodně tepla a rychle se ochlazuje.

Plniva: 7% MAPE, 5%Uhlíčan vápenatá CaCO ₃				Průměrná síla 1.1 mm
vzorek 9b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	60	Překládá se přes sebe během tváření
	2	80	60	Dobry vzorek
	3	90	60	Překládá se přes sebe během tváření
	4	100	60	Překládá se přes sebe během tváření
	5	60	80	Po ohřevu vznikají pukliny, přehřátá folie
Tvárník č. 2	6	70	60	Dobry vzorek
	7	80	60	Překládá se přes sebe během tváření
	8	90	60	Překládá se přes sebe během tváření
	9	100	60	Překládá se přes sebe během tváření
	10	60	60	Nedotvarování dna součásti

Plniva: 15% MAPE, 10% Jíl				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 10a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	90	50	Překládá se přes sebe během tváření, Nedotvarování dna součásti
	2	90	55	Nedotvarování dna součásti
	3	90	60	Nedotvarování dna součásti
	4	90	65	Optimální nastavení
	5	90	70	Protrhne se teplem
Tvárník č. 2	6	90	50	Nedotvarování dna součásti
	7	90	55	Nedotvarování dna součásti
	8	90	60	Nedotvarování dna součásti
	9	90	65	Optimální nastavení
	10	80	70	Překládá se přes sebe během tváření

Velmi obtížně tvarovatelné folie, obtížně se tvarují za všech podmínek

Plniva: 15% MAPE, 10% Jíl				Průměrná síla 0,6 mm
vzorek 10a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	90	60	Nedotvarování dna součásti
	2	90	65	Nedotvarování dna součásti
	3	80	75	Nedotvarování dna součásti
	4	70	85	Nejlepší nastavení, přesto nedotvarované
	5	70	95	Nedotvarování dna součásti
Tvárník č. 2	6	90	70	Překládá se přes sebe během tváření, praská podtlakem
	7	80	65	Nedotvarování dna součásti
	8	80	70	Nedotvarování dna součásti
	9	80	75	Nedotvarování dna součásti
	10	70	75	Nejlepší nastavení, přesto nedotvarované

Plniva: 3% MAPE, 5% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 11a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	80	Nedotvarování dna součásti
	2	70	90	Dobré vzorky- nejlepší nastavení
	3	70	95	Dobré vzorky
	4	100	40	Dobré vzorky
	5	100	50	Dobré vzorky
Tvárník č. 2	6	80	80	Nedotvarování dna součásti
	7	80	90	Nedotvarování dna součásti, praská podtlakem
	8	80	85	Vzorky praskají
	9	70	90	Některé vzorky praskají, nejlepší nastavení
	10	100	50	Vzorky praskají

Plniva: 3% MAPE, 5% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,9 mm
vzorek 11b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	85	Vzorky se protrhávají
	2	80	80	Vzorky se protrhávají
	3	70	85	Vzorky se nevytvarovaly
	4	70	90	Nedotvarování dna součásti
	5	70	85	Mírně přehnutá folie, nejlepší výsledek
Tvárník č. 2	6	80	70	Nedotvarování dna součásti
	7	80	80	Nedotvarování dna součásti
	8	80	85	Vzorky praskají
	9	70	90	Mírně přehnutá folie, nejlepší výsledek
	10	70	80	Nedotvarování dna součásti

Různá síla stěny na folii, časté protrhnutí folie, nevhodná pro tvarování

Plniva: 3% MAPE, 10% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 12a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	85	80	Nedotvarování dna součásti
	2	75	90	Dobré vzorky- nejlepší nastavení
	3	75	95	Dobré vzorky
	4	100	45	Dobré vzorky
	5	100	55	Dobré vzorky
Tvárník č. 2	6	85	80	Nedotvarování dna součásti
	7	80	95	Nedotvarování dna součásti, praská podtlakem
	8	85	85	Vzorky praskají
	9	75	90	Některé vzorky praskají, nejlepší nastavení
	10	100	50	Vzorky praskají

Plniva: 3% MAPE, 10% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,9 mm
vzorek 12b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	95	85	Vzorky se protrhávají
	2	80	90	Vzorky se protrhávají
	3	75	85	Vzorky se nevytvarovaly
	4	75	90	Nedotvarování dna součásti
	5	80	85	Mírně přehnutá folie, nejlepší výsledek
Tvárník č. 2	6	80	70	Nedotvarování dna součásti
	7	80	80	Nedotvarování dna součásti
	8	90	85	Vzorky praskají
	9	75	90	Mírně přehnutá folie, nejlepší výsledek
	10	70	80	Nedotvarování dna součásti

Různá síla stěny na folii, časté protrhnutí folie, nevhodná pro tvarování

Plniva: 7% MAPE, 5% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 13a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	70	Překládá se přes sebe během tváření
	2	80	75	Překládá se přes sebe během tváření
	3	90	60	Překládá se přes sebe během tváření
	4	90	55	Překládá se přes sebe během tváření
	5	90	50	Mírně přehnutá folie, nejlepší výsledek
Tvárník č. 2	6	90	70	Překládá se přes sebe během tváření
	7	100	70	Překládá se přes sebe během tváření
	8	80	70	Překládá se přes sebe během tváření
	9	90	50	Dobré vzorky
	10	80	60	Mírně přehnutá folie, nejlepší výsledek

Folie není vhodná pro tvarování, nedotvaruje se za jakýchkoliv podmínek, stanovení nejvhodnějšího nastavení není úplně přesné.

Plniva: 7% MAPE, 5% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,5 mm
vzorek 13b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	70	Čelo má větší sílu než kužel, nedotvaruje se. Některé folie se trhají, některé ne
	2	70	80	Nedotvaruje se, nepravidelná síla stěny
	3	60	100	Nedotvaruje se, nepravidelná síla stěny - nejlepší nastavení
	4	60	105	Nedotvaruje se, nepravidelná síla stěny
	5	50	110	Nedotvaruje se, nepravidelná síla stěny
Tvárník č. 2	6	70	70	Nedotvaruje se, dobře odskočí z razníku
	7	80	70	Nedotvaruje se, Některé vzorky se protrhly
	8	70	85	Nedotvaruje se u dna
	9	70	90	Nedotvaruje se, některé vzorky se protrhnou
	10	60	110	nedotvaruje se – nejlepší varianta

Plniva: 7% MAPE, 10% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 14a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	65	Překládá se přes sebe během tváření
	2	80	70	Překládá se přes sebe během tváření
	3	80	75	Dobrý vzorek
	4	80	80	Optimální nastavení
	5	80	85	Folie se trhá
Tvárník č. 2	6	80	65	Překládá se přes sebe během tváření
	7	80	70	Překládá se přes sebe během tváření
	8	80	75	Dobrý vzorek
	9	80	80	Dobrý vzorek
	10	80	85	Optimální nastavení

Nejlepší varianta folie plněná oxidem titaničitým. Folie o síle 0,5mm , vzorek 14b

Plniva: 7% MAPE, 10% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,5 mm
vzorek 14b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	95	Překládá se přes sebe během tváření
	2	70	90	Nedotvarování dna součásti
	3	80	70	Folie praská
	4	80	60	Dobrý vzorek
	5	80	65	Nejlepší nastavení
Tvárník č. 2	6	70	95	Nedotvarování dna součásti
	7	60	95	Nedotvarování dna součásti
	8	70	85	Nedotvarování dna součásti
	9	70	80	Nedotvarování dna součásti
	10	70	90	Nejlepší nastavení

Plniva: 15% MAPE, 5% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 15a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	90	Nedotvaruje se, překládá se přes sebe
	2	80	95	Folie se teplem prothla
	3	90	70	Dobrý vzorek
	4	70	100	Optimální nastavení
	5	70	105	Folie se teplem prothla
Tvárník č. 2	6	80	80	Nedotvaruje se, překládá se přes sebe
	7	80	85	Nedotvaruje se, překládá se přes sebe
	8	80	90	Dobrý vzorek
	9	70	100	Dobrý vzorek – nejlepší nastavení
	10	70	105	Překládá se přes sebe během tváření

Nevhodná folie pro tvarování. Folie se často prothává, nebo se nedotvaruje

Plniva: 15% MAPE, 5% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,6 mm
vzorek 15b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	80	Překládá se přes sebe během tváření
	2	90	65	Nedotvarování součásti – nejlepší nastavení
	3	90	70	Folie se teplem prothla
	4	60	105	Nevytvaruje se
Tvárník č. 2	5	80	65	Překládá se přes sebe během tváření
	6	80	70	Folie se teplem prothla
	7	80	75	Dobrý vzorek
	8	70	80	Dobrý vzorek – nejlepší nastavení

Plniva: 15% MAPE, 10% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,1 mm
vzorek 16a	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	70	105	Překládá se přes sebe během tváření
	2	80	80	Folie se teplem protrhla
	3	80	75	Folie se teplem protrhla
	4	70	85	Nedotvarování dna součásti
	5	70	95	Nejlepší nastavení
Tvárník č. 2	6	70	105	Překládá se přes sebe během tváření
	7	80	100	Folie se teplem protrhla
	8	80	90	Folie se teplem protrhla
	9	80	80	Dobrý vzorek
	10	70	95	Dobrý vzorek

Nevhodná folie pro tvarování. Folie se často protrhává, nebo se nedotvaruje

Plniva: 15% MAPE, 10% Oxid titaničitý				Průměrná síla 0,7 mm
vzorek 16b	č. měření	Teplota ohřevu [% z max. výkonu]	Čas ohřevu [s]	Vzhled vzorku, komentář k výrobě
Tvárník č. 1	1	80	105	Folie se teplem protrhla
	2	90	80	Folie se teplem protrhla
	3	90	70	Nedotvarování dna součásti
	4	70	100	Folie se teplem protrhla
	5	70	95	Nejlepší nastavení
Tvárník č. 2	6	80	95	Nedotvarování dna součásti
	7	80	105	Nedotvarování dna součásti
	8	90	80	Folie se teplem protrhla
	9	90	70	Dobrý vzorek
	10	70	100	Folie se teplem protrhla