

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

**MONITORIZACE VISKOELASTICKÝCH JEVŮ BĚHEM PROCESU
VYTLAČOVÁNÍ PARIZONU**

**MONITORING OF VISCOELASTIC EFFECTS DURING
THE PROCESS OF PARISON EXTRUSION**

Autoreferát disertační práce

Liberec 2009

Ing. Petr Kůsa

Autor:	Ing. Petr Kůsa
Studijní program:	P2303 Strojírenská technologie
Studijní obor:	2303V002 Strojírenská technologie
Zaměření:	Zpracování plastů
Školící pracoviště:	Katedra strojírenské technologie
Školitel:	prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Před obhajobou je možné se s doktorskou prací seznámit na děkanátě Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec.

Recenzenti:

doc. Ing. Josef Krebs, CSc.

doc. Ing. Jozef Horváth, CSc.

Slovenská technická univerzita v Bratislavě

doc. Ing. František Greškovič, CSc.

Technická univerzita v Košicích

Termín a místo obhajoby:

© Ing. Petr Kůsa - 2009

ISBN 978-80-7372-513-6



Anotace

Téma práce: **Monitorizace viskoelastických jevů během procesu vytlačování parizonu**

Disertační práce se zabývá vlivem technologických, materiálových a konstrukčních parametrů extruze na rozměrové změny vytlačovaného profilu v souvislosti s tokovými vlastnostmi polymerních tavenin. Předmětem monitorizace je parizon, který tvoří polotovar pro výrobu dutých těles z plastů metodou extruzního vyfukování. V teoretické části práce je proveden rozbor procesu extruze polymerů s ohledem na viskoelastické vlastnosti polymerních tavenin. Experimentální část je zaměřena na porovnání analyzovaných typů polymerů v různých režimech extruze. Výstupem je analýza rozměrových změn z hlediska parametrů extruze. Cíle disertační práce jsou zaměřeny do oblasti teoretického popisu vytlačování, vlivu parametrů extruze na viskoelastické jevy, zejména rozměrové změny parizonu a matematický popis jejich závislosti.

Klíčová slova: Extruze, vytlačování, viskoelastická, parizon, rozměrové změny

Abstract

Theme of dissertation: **Monitoring of viscoelastic effects during the process of parison extrusion**

This doctoral thesis deals with the effects of the technological, material and structural parameters of extrusion on the dimensional changes of the extruded profile with regard to the flow rate properties of polymeric melts. The monitoring focuses on a parison, a semi-finished product used to manufacture hollow bodies from plastics by means of extrusion blow molding. The theoretical part of the thesis analyzes the process of polymers extrusion while considering the viscoelastic properties of polymeric melts. The experimental part comprises comparison of the analyzed polymer types in various extrusion modes. The comparison results in an analysis of dimensional changes in light of extrusion parameters. This dissertation thesis is aimed at the areas of the theoretical description of extrusion, of the effects of extrusion parameters on viscoelastic actions – especially on the dimensional changes of the parison - and of the mathematic description of their interdependence.

Keywords: Extrusion, viscoelasticity, parison, dimensional changes

Annotation

Thema der Dissertation: **Monitorisieren von viskoelastischen Effekten während des Prozesses einer Schlauchkopf-Extrusion**

Die Dissertationsarbeit behandelt die Wirkung von technologischen, materiellen und Konstruktionsparametern der Extrusion auf Maßänderungen des extrudierten Profils im Zusammenhang mit den Fließeigenschaften von Polymerschmelzen. Der Gegenstand des Monitorisierens ist ein Schlauchkopf, welcher das Vorprodukt zur Herstellung von Kunststoffhohlkörpern mittels Extrusionsblasens darstellt. Im theoretischen Teil der Arbeit wurde eine Analyse des Prozesses einer Polymerextrusion im Hinblick auf die viskoelastischen Eigenschaften der Polymerschmelzen vorgenommen. Der experimentale Teil orientiert sich auf den Vergleich der analysierten Typen von Polymeren in verschiedenen Extrusionsmodi. Das Ergebnis ist eine Analyse der Maßänderungen aus der Sicht der Extrusionsparametern. Die Ziele der Dissertation orientieren sich auf den Bereich einer theoretischen Beschreibung der Extrusion, der Auswirkung der Extrusionsparameter auf die viskoelastischen Effekte – vor allem die Maßänderungen des Schlauchkopfes – sowie einer mathematischen Beschreibung deren Abhängigkeit.

Schlagwörter: Extrusion, Viskoelastizität, Schlauchkopf, Maßänderungen



OBSAH

1 ÚVOD	5
1.1 Rozměrové změny parizonu během extruze	5
1.2 Cíle disertační práce	6
2 EXTRUZNÍ VYFUKOVÁNÍ A VYTLAČOVÁNÍ PARIZONU	7
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	9
3.1 Experimentální zařízení	9
3.2 Výběr materiálů pro experiment	9
3.3 Snímání profilu parizonu	9
3.3.1 Postup měření	10
3.4 Naměřené hodnoty	11
3.4.1 Polymer PE-HD Liten BB 29	11
3.4.2 Polymer PE-LD Bralen RB 2-62	11
3.4.3 Polymer PP homopolymer Mosten GB 005	12
3.4.4 Polymer PP kopolymer Tiplen R 659	12
3.5 Regresní analýza – matematický popis jevu	13
3.6 Hodnocení a diskuse výsledků	15
3.7 Možnost eliminace projevu narůstání po extruzi	19
4 ZÁVĚR	20
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	22
6 SEZNAM PUBLIKACÍ	24

1 ÚVOD

V současné době celosvětového nárůstu spotřeby plastů je kladen důraz na rozvoj zpracovatelských technologií, a to jak z hlediska technického, tak i ekologického. Plasty vynikají výbornou zpracovatelností a příznivými mechanickými vlastnostmi vzhledem ke své hmotnosti. Proto je stále ve větší míře nacházíme v prakticky každém odvětví lidské činnosti.

Duté výrobky z plastů nacházejí uplatnění zejména v balení, uchování a přepravě tekutin nebo sypkého zboží. Mezi extruzně vyfukovaná tělesa můžeme zařadit láhve, kanistry, zásobníky, ale také trubky, tuby nebo technické výrobky jako je vzduchové potrubí automobilu. Značná část těchto výrobků se používá v obalovém průmyslu jako ochrana před poškozením balených výrobků. Zvyšující se požadavky na kvalitu zejména technických výrobků přináší nutnost zlepšovat řízení procesu a tím i výslednou kvalitu výrobků.

Disertační práce se zabývá zkoumáním průvodních jevů, ke kterým dochází při vytlačování plastového profilu, parizonu, který je polotovarem pro technologii extruzního vyfukování. Zejména pak narůstáním jeho rozměrů po opuštění vytlačovací hubice jako důsledku viskoelastických vlastností polymerů.

Je nepochybné, že stále ještě nejsou k dispozici spolehlivé metody umožňující předvídání těchto rozměrových změn na základě dobře definovaných reologických vlastností. Proto se tato práce snaží detailněji objasnit příčiny těchto jevů a najít takové možnosti jejich eliminace, které by se uplatnily v průmyslové praxi.

1.1 Rozměrové změny parizonu během extruze

Již samotný fakt, že parizon je během extruze a před tvarováním ve formě vystaven vlivu okolního prostředí přináší řadu technologických komplikací. Jednou z nich je narůstání jeho průměru po extruzi a prodlužování délky vlivem gravitace. Jelikož tyto děje probíhají současně a navíc se vzájemně ovlivňují je velmi obtížné předpovídat rozměrový profil parizonu a tím také kvalitu a rovnoměrné rozložení tloušťky stěny finálního výrobku.

Jelikož uvedené jevy do značné míry ovlivňují stabilitu technologie extruzního vyfukování je patrný silný tlak ze strany zpracovatelů zajistit možnost předpovídání rozměrů parizonu a tím nejen zvýšit stabilitu technologie, ale i usnadnit konstrukci nástrojů pro vytlačování.

1.2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je analyzování dějů souvisejících se změnami rozměrů parizonu po opuštění vytlačovací hubice. Dále nalézt a popsat závislost rozměrových změn, zejména narůstání průměru parizonu se základními technologickými parametry a nastavením vytlačovacího stroje. V neposlední řadě také zohlednit volbu typu polymeru a jeho vliv na zkoumané jevy.

Jednotlivé cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Teoretický rozbor procesu extruze na základě současných znalostí. Definice viskoelastických vlastností polymerních tavenin, následných jevů a jejich důsledky pro technologii extruze.
2. Možnosti eliminace průvodních viskoelastických jevů spojených s extruzí a monitorizace vlivu technologických, materiálových a konstrukčních parametrů na proces extruze s ohledem na :
 - Geometrii vytlačovací trysky nástroje – konstrukční parametr
 - Smykovou rychlost vytlačované taveniny (otáčky šneku) – technologický parametr.
 - Vliv typů polymerů na chování jejich tavenin po extruzi (narůstání) – materiálový parametr.
3. Nalezení vhodného matematického popisu narůstání průměru parizonu vzhledem k jeho délce ve vztahu k rozvoji teoretického základu a rovněž k možnosti uplatnění výsledků v praxi.

Konečnou praktickou aplikací výsledků disertační práce je uplatnění matematického popisu narůstání parizonu pro adaptivní řízení regulace tloušťky stěny parizonu inovované řady vyfukovacích strojů společnosti GDK spol. s r.o.. Vzhledem k závažnosti problematiky je „Vývoj systému řízení vyfukovacího stroje“ součástí dotační podpory v rámci projektu OPPI Inovace – Inovační projekt

2 EXTRUZNÍ VYFUKOVÁNÍ A VYTLAČOVÁNÍ PARIZONU

Extruzní vyfukování plastů tvoří technologickou skupinu jejíž produkty jsou dutá tělesa rozmanitých tvarů a vlastností. Principem technologie je tvarování polotovaru – parizonu do tvaru uzavřeného tělesa. Tato kontinuálně vytlačovaná trubka, resp. její ústřížky jsou tvarovány přetlakem vzduchu v chlazené formě. Po vyjmutí výrobku z formy dochází k oddělení technologického odpadu – přetoků, které mohou být opětovně zpracovány. Uvedený princip umožňuje značnou variabilitu výrobků, jak z ohledu designu, tak i typu polymeru [3, 5].

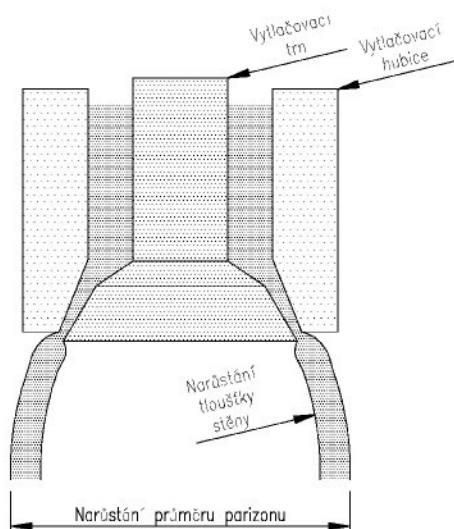
Formováním parizonu se rozumí průtok taveniny plastu štěrbinou vytlačovací hlavy. Tato štěrbina je tvořena kombinací vytlačovací hubice a vytlačovacího trnu. Uvedené součásti tvoří výstupní část vytlačovací hlavy. Průtok taveniny tímto mezikružím reprezentuje několik významných aspektů, které mají přímý vztah k toku taveniny [1]:

1. Narůstání tloušťky stěny parizonu – tavenina polymeru okamžitě po opuštění vytlačovací hlavy dosáhne větší tloušťky stěny než je šířka štěrbin.
2. Narůstání průměru parizonu – výsledný průměr parizonu je po opuštění hlavy větší než je průměr vytlačovací hubice (viz. obr. 1).
3. Prodlužování parizonu – gravitace působící na tekoucí parizon ovlivňuje jeho prodlužování a současně také vede ke zmenšování průměru a tloušťky stěny (viz. obr. 2).

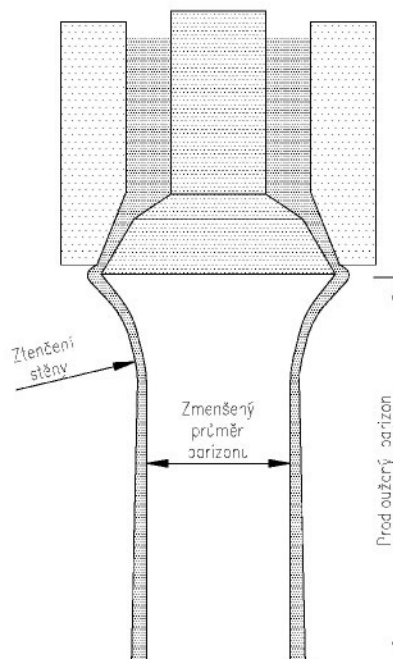
Uvedené děje souvisí s viskoelastickým chováním polymerů. Viskoelasticitu lze vysvětlit jako mechanické chování, u kterého jsou vztahy mezi napětím a deformací časově závislé. Nikoli jako klasické elastické chování, u něhož deformace (resp. odlehčení) nastává ihned v okamžiku kdy začne působit napětí (resp. působit přestane). Když na viskoelastický materiál působí napětí, je možno pozorovat tři deformační reakce. Je to počáteční elastická reakce, pak následuje zpožděná (časově závislá) pružnost (rovněž plně vratná) a nakonec viskózní deformace (tok), která je nevratná [2, 3, 5].

Faktory ovlivňující narůstání a prodlužování parizonu můžeme rozdělit do dvou základních skupin. První z nich je stavba polymeru (distribuce molekulové hmotnosti, molekulová hmotnost a délka molekulového řetězce). Druhou skupinou jsou technologické parametry procesu vyfukování. Zejména se jedná o zpracovatelskou teplotu, smykovou rychlost, geometrii vytlačovací hubice a trnu. Významnou roli zde zaujímá čas, resp. doba vytlačování, která poskytuje prostor pro prodlužování parizonu [1].

Základní vztah mezi napětím a deformací, popisující viskoelastické chování, bude obsahovat členy zahrnující rychlost deformace, velikosti napětí i deformaci. V případě, že mezi těmito členy existuje přímá úměrnost, jedná se o lineární viskoelasticitu. Častěji se ovšem projevuje složitější nelineární viskoelastické chování [5, 8].



Obr. 1 Narůstání parizonu [1]



Obr. 2 Prodloužení parizonu [1]

Citlivost taveniny na smyk má vztah k formovatelnosti (schopnosti deformace). Viskozita taveniny plastu se mění v závislosti na tom, jakým je při zpracování vystavována smykovým rychlostem. Ve vytlačovacím stroji při střední smykové rychlosti, je tavenina středně viskózní. Když je protlačována vysokou rychlostí přes úzkou štěrbinu vytlačovací hlavy je její smyková rychlost vysoká a viskozita nízká. V další fázi když materiál visí pod hlavou jako parizon a nepůsobí na něj prakticky žádný smyk, jeví se polymer jako vysoce viskózní [1].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Hlavním cílem experimentální části byla monitorizace rozměrových změn vytlačovaného parizonu. Zejména pak sledování narůstání jeho průměru, sledování vlivu technologických parametrů a eliminace narůstání v důsledku gravitační síly.

3.1 Experimentální zařízení

Pro účely experimentu byla využita plastikační jednotka typ VS25, která je instalována na vyfukovacím stroji typ GM 251 (výrobce: GDK spol. s r.o., Karlovy Vary) pro výrobu dutých těles z plastů. Vyfukovací stroj byl upraven tak, aby bylo možno co nejlépe sledovat rozměrové změny vytlačovaného parizonu. Volba testovaných polymerů byla provedena s ohledem na použití při technologii extruzního vyfukování [23].

3.2 Výběr materiálů pro experiment

Pro experiment byly vybrány čtyři základní materiály, které jsou běžně používány pro výrobu dutých těles technologií extruzního vyfukování. Materiály byly zvoleny tak, aby svými vlastnostmi z velké části pokryly oblast vlastností běžně používaných polyolefinů [27, 28].

- PE-HD Liten BB – 29
- PE-LD Bralen RB 2-62
- PP homopolymer Mosten GB 005
- PP kopolymer Tiplen R 659

3.3 Snímání profilu parizonu

K pořízení snímků byl použit měřicí systém ARAMIS [29]. Jedná se o optický měřicí systém pro bezkontaktní měření deformací. Princip měření je založen na fotogrammetrické korelaci zobrazení. Tento přístroj umožňuje stanovit deformaci materiálu na základě posunutí bodů povrchu materiálu mezi nedeformovaným stavem a stavem povrchu při deformaci (téměř v libovolném počtu kroků). Systém ARAMIS je vybaven dvěma kamerami, které snímají povrch tělesa ze dvou směrů. Prováděné měření tak může probíhat ve 3D souřadnicích. Kamery jsou osazeny čipy, které dovolují snímání rychlé sekvence snímků (ARAMIS HS – High Speed). To umožňuje použití systému především pro měření velmi rychlých dějů, např. rázových zkoušek, rychlého deformačního zatěžování, ale systém lze využít i pro statické zatěžování.

Jelikož proces vytlačování parizonu je kontinuální a nelze jej zastavit a definovat tak fasety, z kterých by byly následně vypočítány 3D souřadnice těchto faset, byl v našem případě systém ARAMIS využit pouze pro záznam procesu. Tudiž mohla být použita pouze jedna z jeho kamer.

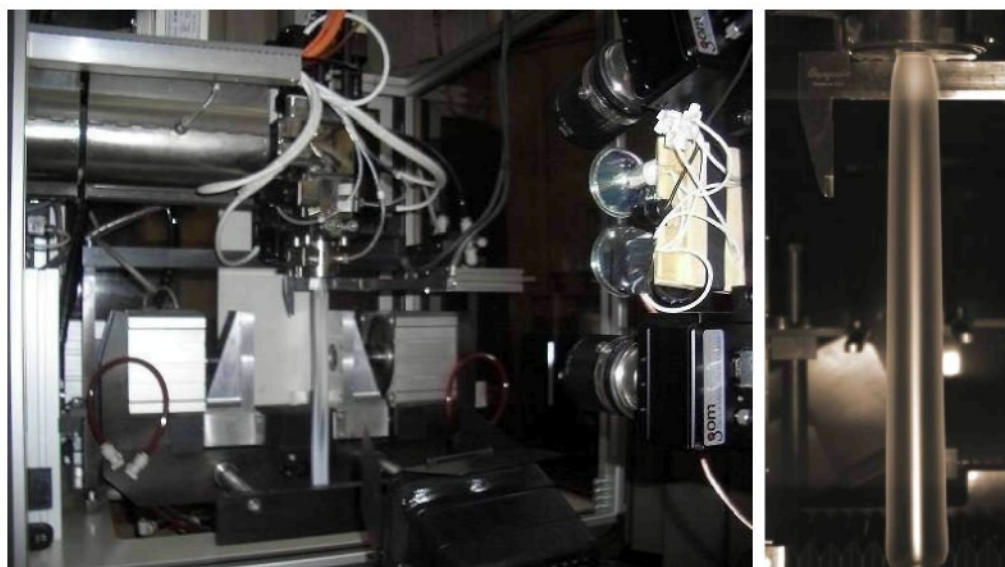
3.3.1 Postup měření

Pro daný experiment bylo stanoveno, že snímání parizonů (vzorků) probíhá za podmínek kontinuální extruze při otáčkách šneku 30 min^{-1} , 60 min^{-1} a 90 min^{-1} . Z každé skupiny otáček byly nasnímány 3 vzorky parizonu, pro 3 různé velikosti štěrby vytlačovací hlavy a 4 typy polymerů. Celkem bylo tedy pořízeno 108 ks vzorků. Za účelem grafických výstupů a hodnocení byla použita vždy průměrná hodnota trojice vzorků pořízených za stejných podmínek. Po každé změně technologických parametrů (otáček šneku) bylo vždy nutné čekat na stabilizaci vytlačovacího procesu. Před samotným snímáním bylo nutné pečlivě nastavit kameru, protože poloha kamery musí být kolmá na směr vytlačování parizonu a musí být dobře zaostřená tak, aby byla jasně viditelná hranice parizonu při následném odměřování. Dále je důležité i správné nasvícení prostoru, ve kterém je parizon vytlačován, to zajišťuje osvětlovací aparatura. Tato dávková konverze snímků byla provedena pomocí softwaru IrfanView.

Samotné odměřování rozměrů parizonu následně probíhalo za pomoci softwaru Image-Pro Plus. Kalibrace jednotlivých snímků byla prováděna změřením známého rozměru, k čemuž sloužila stupnice posuvného měřítka, která byla připevněna na vytlačovací hubici tak, aby byla na snímcích jasně viditelná. Nejdříve byl proměřen celý profil parizonu, což znamenalo proměření průměrů od vytlačovací hubice až po jeho konec. Parizon byl proměřen vždy při délce 210 mm, to odpovídá maximální možné délce, kterou bylo možno na snímku zobrazit. Jednotlivé vzorky parizonu byly proměřeny tak, že do vzdálenosti 30 mm od ústí vytlačovací hubice byla vzdálenost měřících míst 2 mm. Zbývající část vzorku byla rozdělena na úseky o délce 10 mm.

Dále byl proměřován průměr parizonu v místě 6 mm pod vytlačovací hubicí v závislosti na jeho délce. Průměry v těchto místech byly měřeny vždy po přírůstku délky parizonu o 20 mm.

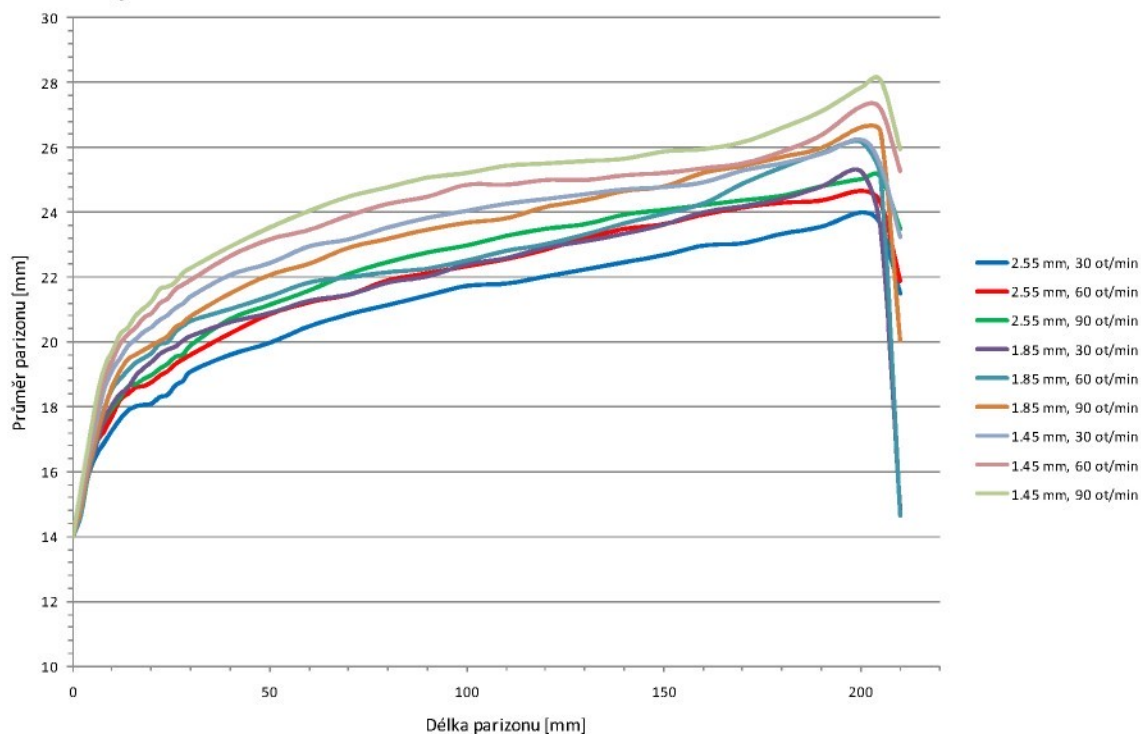
Nastavení teplotního režimu bylo provedeno na základě doporučení výrobce polymerů a konzultace s výrobcem vytlačovacího stroje.



Obr. 3 Snímání parizonu

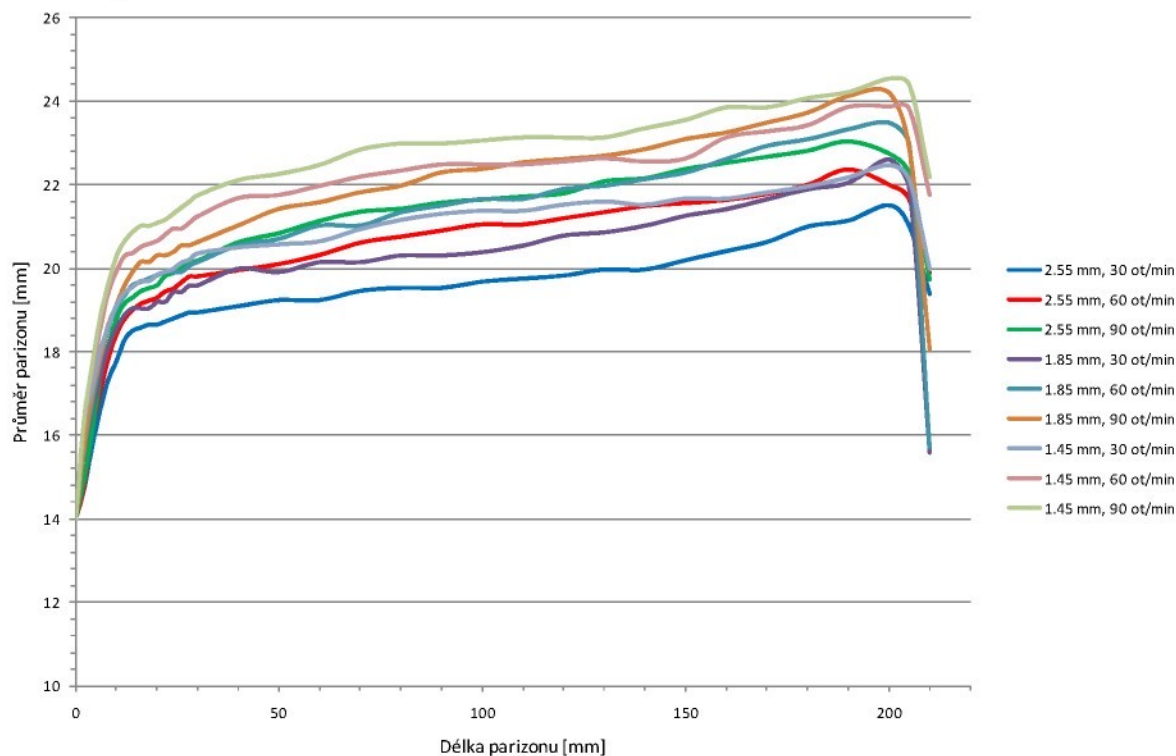
3.4 Naměřené hodnoty

3.4.1 Polymer PE-HD Liten BB 29



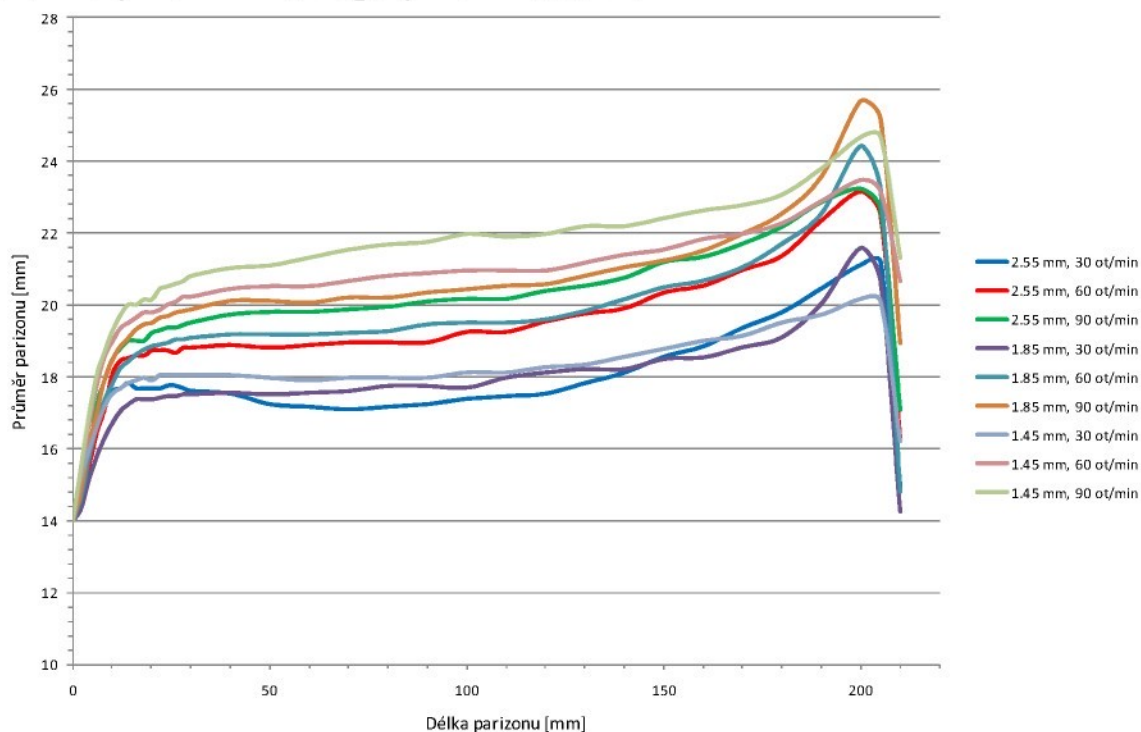
Obr. 4 Vliv velikosti štěrbinu na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

3.4.2 Polymer PE-LD Bralen RB 2-62



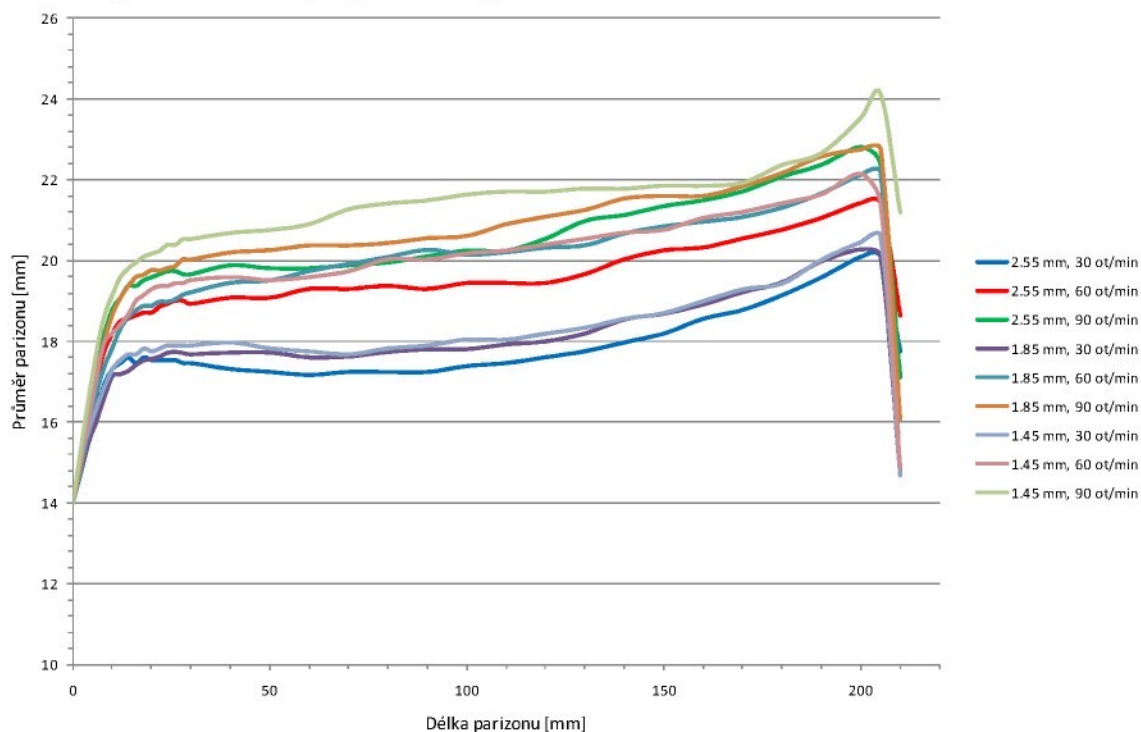
Obr. 5 Vliv velikosti štěrbinu na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

3.4.3 Polymer PP homopolymer Mosten GB 005



Obr. 6 Vliv velikosti štěrby na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

3.4.4 Polymer PP kopolymer Tiplen R 659



Obr. 7 Vliv velikosti štěrby na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

3.5 Regresní analýza – matematický popis jevu

Za účelem nalezení matematického vztahu popisu narůstání a změny geometrie vytlačovaného parizonu v závislosti na určitých technologických parametrech byla vybrána metoda regresní analýzy [21, 22].

K volbě regresního modelu pro popis narůstání průměru parizonu byla použita empirická volba. Po posouzení bodového grafu byla zvolena vícenásobná regresní analýza pomocí regresní logaritmické funkce.

Obecný tvar vícenásobné regresní analýzy pomocí logaritmického modelu je následující:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots \beta_n \cdot x_n$$

η - vysvětlovaná proměnná

β - koeficienty

x - vysvětlující proměnné

Protože míra narůstání průměru parizonu D se postupně mění s časem čili při konstantní rychlosti vytlačování s délkou parizonu, musí být délka parizonu zastoupena v rovnici jako jedna z vysvětlujících proměnných. Délkou L se míní vzdálenost místa zjišťovaného průměru od vytlačovací hubice. Jako další vysvětlující proměnnou jsou otáčky šneku n a velikost štěrbin vytláčovací hlavy h , která souvisí se smykovou rychlostí vytlačované taveniny polymeru. Do rovnice se dále musí promítnout vliv použitého materiálu, a to takovým parametrem, který je vyjádřen číselně. Jako nejvhodnější materiálový parametr se jeví index toku taveniny ITT .

Výsledky analýz jsou uvedeny v následující tabulce spolu s obecnými rovnicemi:

Tab. 1 Souhrn výsledků regresní analýzy – výsledné rovnice

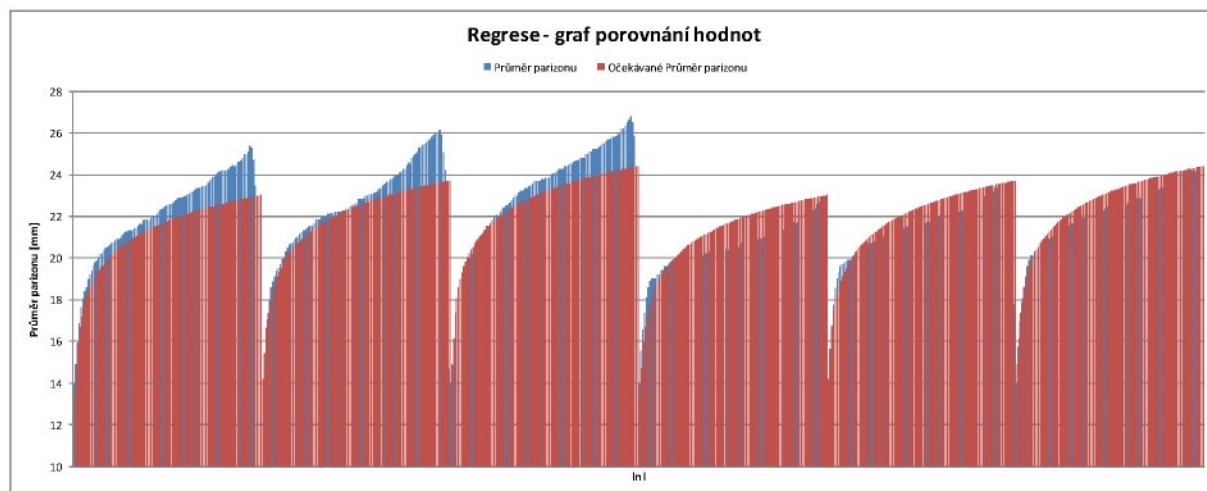
<i>Souhm regresních logaritmických rovnic</i>		
<i>Obecné rovnice</i>		
Polymer	Rovnice	Kvalita modelu
PE	$D = 15,97 + 1,7 \ln L + 0,02 n - 1,03 h - 0,7 ITT$	84,12%
PP	$D = 13,87 + 1,07 \ln L + 0,04 n - 0,6 h$	72,85%
<i>Rovnice pro jednotlivé materiály</i>		
Polymer	Rovnice	Kvalita modelu
PE-HD Liten BB 29	$D = 15,84 + 2,09 \ln L + 0,02 n - 1,67 h$	89,47%
PE-LD Bralen RB 2-62	$D = 14,6 + 1,32 \ln L + 0,02 n - 0,4 h$	85,28%
PP Mosten GB 005	$D = 14,1 + 1,12 \ln L + 0,04 n - 0,8 h$	72,29%
PP Tiplen R 659	$D = 13,65 + 1,02 \ln L + 0,04 n - 0,41 h$	73,81%

Poznámka: Rovnice platí pouze pro vytlačovací hubici Ø14mm a parizon o délce 210 mm.

Výsledkem regresní analýzy je poznatek, že citlivost taveniny polymeru na narůstání je ovlivněna rostoucími otáčkami šneku vytlačovacího stroje (zvyšují smykovou rychlost). Výrazněji se uvedená citlivost projevuje u PP (0,04 n), kde koeficient otáček šneku dosahuje oproti PE (0,02 n) dvojnásobné hodnoty.

Záporný koeficient zvětšující se šířky vytlačovací štěrby naopak celkové narůstání průměru parizonu snižuje (snižuje se smyková rychlost). Nejmarkantněji se projevuje u lineárního HD-PE Liten BB 29 (-1,67 h). Naopak nejmenší citlivost vykazují rozvětvený PE-LD Bralen RB 2-62 (-0,40 h) a kopolymer PP Tiplen R 659 (-0,41 h).

Koeficient délky parizonu představuje citlivost taveniny na kompenzaci narůstání průměru parizonu vlivem vlastní hmotnosti. Čím je uvedený koeficient nižší, tím je celkový nárůst průměru parizonu menší, resp. dochází ke kompenzaci viskoelastického narůstání. Nejnížší koeficient (1,02 ln L) obsahuje rovnice pro kopolymer PP Tiplen R 659, který je tedy nejcitlivější na nežádoucí protažení vlivem vlastní hmotnosti.



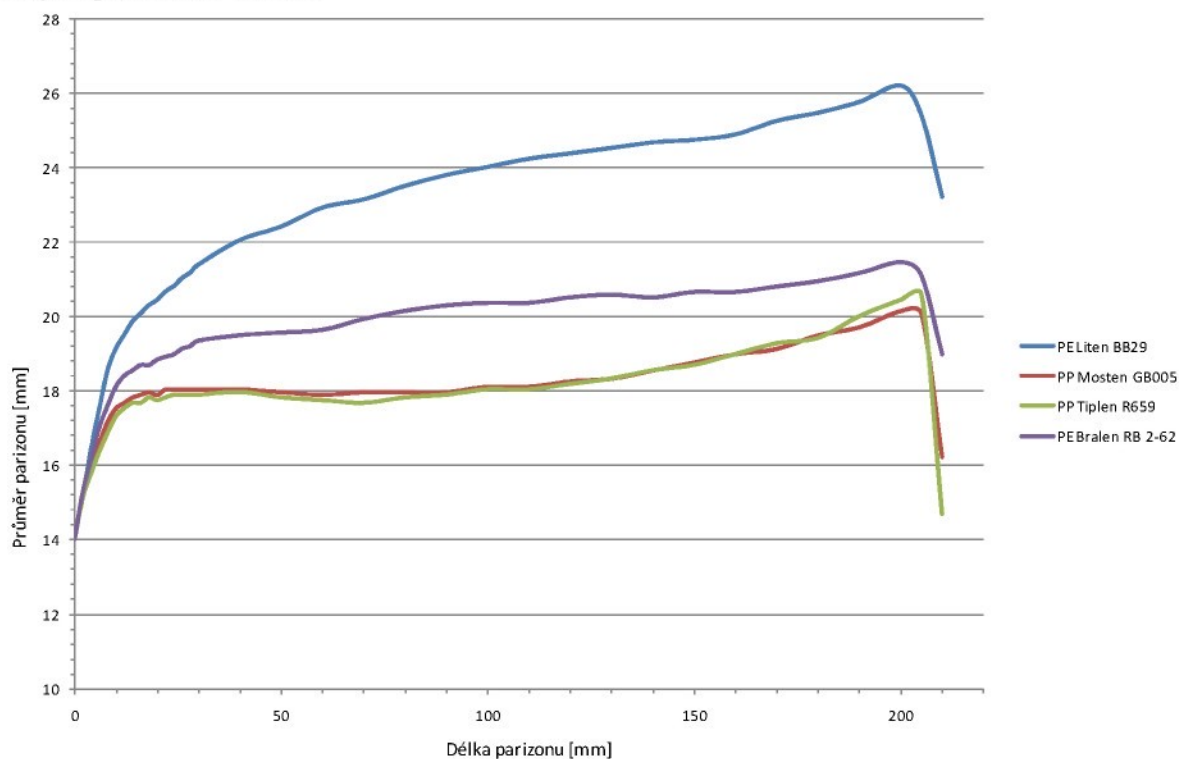
Obr. 9 Ukázka grafického výstupu regresní analýzy

3.6 Hodnocení a diskuse výsledků

Z uvedených výstupů experimentálního měření vyplývají následující závěry. Byl potvrzen vliv otáček šneku na narůstání průměru parizonu, a to u všech použitých materiálů (Viz. tab. 2 a 3). Pro teorii, ale i pro výrobní proces se potvrdil předpoklad, že jev narůstání lze jednoznačně ovlivňovat nastavením otáček šneku nebo velikostí výstupní štěrbiny vytlačovací hlavy. Oba tyto parametry souvisí se změnou smykové rychlosti vystupující taveniny.

Z průběhů je patrný i rozdílný průběh narůstání u polypropylenu a polyetylénu. U polyetylénu, po počátečním prudkém nárůstu, dochází k pozvolnému ustálenému narůstání. Oproti tomu u polypropylénu po prudkém počátečním nárůstu k dalšímu narůstání již téměř nedochází. Závěrem lze tedy konstatovat, že vhodným výběrem materiálu lze zásadně ovlivnit míru narůstání průměru parizonu (Viz. tab. 3).

Jako příklad uvádím vliv volby typu polymeru na rozměrové změny parizonu za určitých parametrů extruze



Obr. 8 Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrbina 1.45 mm, 30 ot/min.

Tab. 2 Soubor naměřených hodnot

Vzdálenost hubice [mm]	Štěrbina vytlačovací hubice [mm]	Otáčky šneku [1/min]	PE Liten BB-29		PE Bralen 2-62		PP Mosten GB005		PP Tiplen R 659	
			Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]
6	1,45	30	17,54	25,25%	17,02	21,60%	16,59	18,47%	16,37	16,90%
		60	17,90	27,86%	17,54	25,25%	17,75	26,82%	17,10	22,12%
		90	18,27	30,47%	17,83	27,34%	18,05	28,90%	17,75	26,82%
	1,85	30	16,85	20,39%	17,38	24,12%	15,78	12,75%	16,03	14,52%
		60	17,03	21,63%	17,77	26,92%	16,65	18,96%	16,73	19,53%
		90	17,10	22,16%	17,85	27,49%	16,98	21,30%	17,20	22,88%
	2,55	30	16,54	18,11%	16,60	18,55%	16,73	19,51%	16,37	16,90%
		60	16,90	20,72%	17,04	21,68%	16,44	17,45%	17,02	21,60%
		90	17,05	21,76%	17,33	23,77%	17,18	22,72%	17,46	24,73%
20	1,45	30	20,46	20,88%	18,85	13,05%	17,90	9,39%	17,75	9,92%
		60	20,90	21,40%	19,65	15,13%	19,80	14,61%	19,29	15,66%
		90	21,26	21,40%	20,09	16,18%	20,17	15,13%	20,17	17,22%
	1,85	30	19,39	18,11%	19,20	13,01%	17,38	11,37%	17,56	10,89%
		60	19,67	18,86%	19,83	14,73%	18,85	15,71%	18,88	15,33%
		90	19,91	20,03%	20,31	17,56%	19,51	18,05%	19,77	18,36%
	2,55	30	18,11	11,26%	18,64	14,61%	17,68	6,78%	17,54	8,35%
		60	18,77	13,35%	19,30	16,18%	18,74	16,43%	18,70	12,00%
		90	18,99	13,87%	19,59	16,18%	19,23	14,61%	19,58	15,13%
50	1,45	30	22,43	14,09%	19,58	5,22%	17,97	0,52%	17,97	1,57%
		60	23,16	16,18%	20,75	7,83%	20,53	5,22%	20,53	8,87%
		90	23,53	16,18%	21,26	8,35%	21,12	6,78%	21,12	6,78%
	1,85	30	20,89	10,73%	19,91	5,10%	17,52	1,00%	17,52	-0,28%
		60	21,41	12,47%	20,70	6,23%	19,18	2,34%	19,18	2,15%
		90	22,08	15,52%	21,42	7,93%	20,12	4,34%	20,12	2,45%
	2,55	30	19,98	13,38%	19,23	4,17%	17,24	-3,13%	17,24	-2,09%
		60	20,86	14,94%	20,10	5,74%	18,82	0,52%	18,82	0,80%
		90	21,15	15,46%	20,83	8,87%	19,81	4,18%	19,81	1,65%
100	1,45	30	24,04	11,48%	20,38	5,74%	18,12	1,04%	18,05	0,52%
		60	24,84	12,00%	21,48	5,22%	20,97	3,13%	20,17	-2,61%
		90	25,21	12,00%	22,07	5,74%	21,99	6,26%	21,63	3,65%
	1,85	30	22,39	10,73%	20,39	3,39%	17,70	1,34%	17,80	2,02%
		60	22,52	7,87%	21,66	6,80%	19,51	2,34%	20,14	6,85%
		90	23,69	11,52%	22,37	6,80%	20,44	2,34%	20,61	3,55%
	2,55	30	21,74	12,53%	19,67	3,13%	17,39	1,04%	17,39	1,04%
		60	22,34	10,57%	21,05	6,78%	19,25	3,13%	19,43	4,42%
		90	22,98	13,05%	21,64	5,74%	20,18	2,61%	20,24	3,05%
200	1,45	30	26,23	15,66%	21,48	7,83%	20,17	14,61%	20,46	17,22%
		60	27,25	17,22%	22,87	9,92%	23,48	17,96%	22,14	14,07%
		90	27,84	18,79%	22,94	6,26%	24,70	19,31%	23,53	13,57%
	1,85	30	25,26	20,46%	22,61	15,86%	21,59	27,77%	20,26	17,57%
		60	26,17	26,13%	23,48	13,03%	24,42	35,09%	22,11	14,10%
		90	26,64	21,03%	24,19	13,03%	25,68	37,43%	22,75	15,27%
	2,55	30	24,00	16,18%	21,49	13,05%	21,12	26,62%	20,09	19,31%
		60	24,66	16,56%	22,00	6,78%	23,16	27,91%	21,41	14,09%
		90	25,03	14,61%	22,73	7,83%	23,23	21,84%	22,80	18,27%

Poznámka : Vyčíslené procento změny průměru parizonu se vztahuje pro vytlačování tryskou o průměru 14 mm a hodnoty pro určitou délku parizonu jsou přepočítány na rozměrovou změnu v bodě 6 mm pod tryskou.

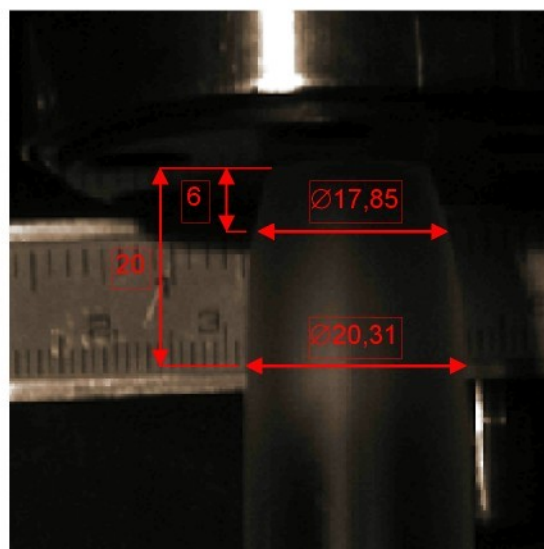
Výsledky jsou rozděleny dle jednotlivých typů polymerů do přehledných tabulek obsahujících jednak naměřenou hodnotu průměru parizonu a také procentuální vyjádření jeho narůstání.

Díky rozvětvené molekulární struktuře vykazuje největší míru narůstání polyetylén PE-LD Bralen RB 2-62. Narůstání polyethylénu PE-HD Liten BB 29 již nedosahuje hodnot narůstání PE-LD, avšak míra jeho narůstání je v porovnání s polypropylénem vyšší. Potvrdil se předpoklad, že Polypropylén Tiplen R 659 má díky nižší hodnotě ITT větší přírůstek narůstání ve srovnání s materiálem Mosten GB 005.

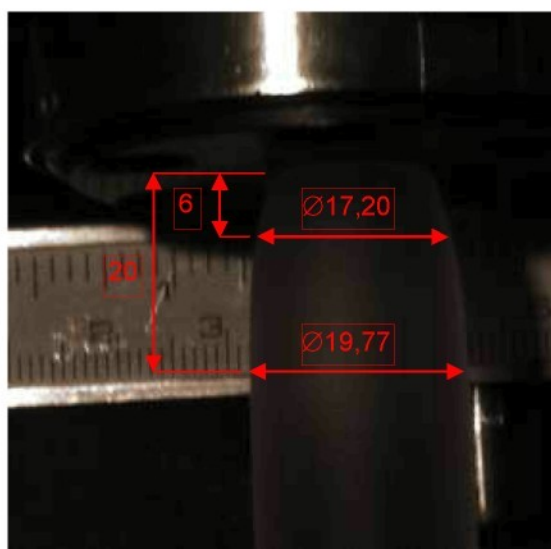
Tab. 3 Narůstání průměru parizonu v závislosti na volbě polymeru.

Typ polymeru	ITT	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]
PE-HD Liten BB-29	0,15	30	16,85	20,39%
		60	17,03	21,63%
		90	17,10	22,16%
PE-LD Bralen 2-62	2	30	17,38	24,12%
		60	17,77	26,92%
		90	17,85	27,49%
Homopolymer PP Mosten GB005	5	30	15,78	12,75%
		60	16,65	18,96%
		90	16,98	21,30%
Kopolymer PP Tiplen R 659	2	30	16,03	14,52%
		60	16,73	19,53%
		90	17,20	22,88%

Poznámka: Uvedené hodnoty jsou naměřeny ve vzdálenosti 6 mm pod vytlačovací tryskou pro střední šířku štěrbinu 1.85 mm.



Obr. 9 Snímek parizonu PE-LD Bralen RB 2-62, 90 ot./min., štěrba 1.85 mm



Obr. 10 Snímek parizonu PP Tiplen R 659, 90 ot./min., štěrba 1.85 mm

Z průběhů je patrný i rozdílný průběh narůstání u polypropylénu a polyetylénu. U polyetylénu, po počátečním prudkém nárůstu, dochází k pozvolnému ustálenému narůstání. Oproti tomu u polypropylénu po prudkém počátečním nárůstu k dalšímu narůstání již téměř nedochází (viz. Tabulka 4).

Tab. 4 Charakter narůstání průměru parizonu ve střední části v závislosti na volbě polymeru.

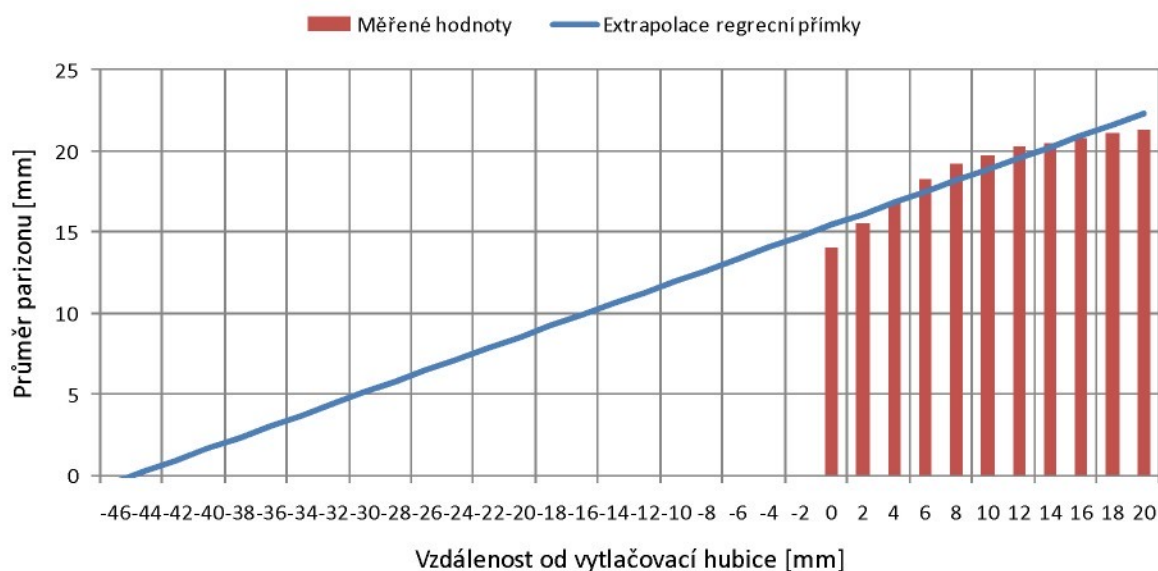
Typ polymeru	ITT	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]	Rozdíl narůstání ve srovnání s PE Liten BB-29 [%]
PE-HD Liten BB-29	0,15	30	20,89	10,73%	-
		60	21,41	12,47%	-
		90	22,08	15,52%	-
PE-LD Bralen 2-62	2	30	19,91	5,10%	-5,63%
		60	20,70	6,23%	-6,24%
		90	21,42	7,93%	-7,59%
Homopolymer PP Mosten GB005	5	30	17,52	1,00%	-9,73%
		60	19,18	2,34%	-10,13%
		90	20,12	4,34%	-11,18%
Kopolymer PP Tiplen R 659	2	30	17,52	-0,28%	-11,01%
		60	19,18	2,15%	-10,32%
		90	20,12	2,45%	-13,07%

Poznámka: Uvedené hodnoty jsou naměřeny ve vzdálenosti 50 mm pod vytlačovací tryskou pro střední šířku štěrbinu 1.85 mm.

Nejvyšší absolutní míru nárůstu ve střední části parizonu vykazuje materiál PE-HD Liten BB-29 na rozdíl od rozvětveného PE-LD Bralen RB 2-62, který vykazoval největší hodnoty narůstání ihned po opuštění vytlačovací hubice. Tento rozdíl v chování je dán rozdílným ITT, kdy je zřejmé, že HD-PE s indexem toku 0,15 je výrazně méně citlivý na protahování parizonu vlivem vlastní hmotnosti (viz. Tabulka 4).

3.7 Možnost eliminace projevu narůstání po extruzi

Zejména vliv geometrie vytlačovací trysky je důležitým faktorem ovlivňující narůstání taveniny polymeru po extruzi. Následující grafické výstupy demonstrují pomocí lineární regrese výpočet Bagleyho korekce na jejímž základě je možné stanovit úpravu geometrie trysky, tak aby bylo možné narůstání taveniny eliminovat. Jako příklad uvádím výpočet korekce pro různá technologická nastavení. Základním předpokladem pro správné určení korekce je stanovení rozhodující vzdálenosti od trysky, kde proběhla většina rozměrových změn – došlo k relaxaci napětí ve vytlačovaném polymeru. Uvedená vzdálenost se liší s typem zpracovávaného materiálu, kde vodítkem je hodnota ITT.



Obr. 11 Extrapolace lineární regresní přímky

Průsečík lineární regresní přímky udává hodnotu délky vytlačovací hubice, která by způsobila eliminaci narůstání vytlačovaného profilu. Jak již bylo uvedeno, důležitým parametrem je správná volba vzdálenosti parizonu od vytlačovací hubice. V tomto případě jsem vycházel z faktu, že nejvýznamnější část narůstání (relaxace napětí) proběhne do 5 vteřin poté, co parizon opustí vytlačovací hubici.

4 ZÁVĚR

Všechny oblasti lidské činnosti se neustále rozvíjejí a zdokonalují. Nejinak je tomu i v oblasti vytlačování plastů. Snaha o rozšíření teoretických znalostí je cestou pro aplikace v praxi. Výsledkem tohoto úsilí je zdokonalený nebo inovovaný technologický proces i finální produkt.

Disertační práce je zaměřena do oblasti extruzního vyfukování a zabývá se zkoumáním průvodních jevů, ke kterým dochází při vytlačování parizonu, zejména pak narůstáním jeho rozměrů po opuštění vytlačovací hubice jako důsledku viskoelastických vlastností polymerů. Teoretická část disertační práce se zabývá rozбором procesu extruze, definicí viskoelastických vlastností polymerních tavenin, následných jevů po extruzi a jejich důsledků pro následné zpracovatelské technologie.

Experimentální část disertační práce byla zaměřena na rozbor a posouzení vlivu technologických, materiálových a konstrukčních parametrů na proces extruze. Provedená měření zohlednila volbu typů polymerů z hlediska chování jejich tavenin po extruzi. Volba polymerů pro experiment byla provedena s ohledem na jejich vlastnosti tak, aby pokryla širokou škálu běžně používaných materiálů pro technologii extruzního vyfukování. Dalším parametrem experimentu byla geometrie vytlačovací trysky reprezentovaná proměnnou šířkou vytlačovací štěrbiny spolu se změnou smykové rychlosti vytlačované taveniny pomocí nastavených otáček šneku vytlačovacího stroje.

Metodika měření spočívala v pořizování snímků systémem ARAMIS a následným vyhodnocením s grafickými výstupy obsahujícími změny průměru parizonu v závislosti na jeho délce.

Následující fáze experimentu se soustředila na možnosti eliminace průvodních viskoelastických jevů spojených s extruzí a nalezení vhodného matematického popisu narůstání průměru parizonu. Pro matematický popis uvedeného jevu byla využita metoda regresní analýzy. Takto vytvořené modely zohledňují vliv volby polymeru, geometrii vytlačovací hlavy a smykové rychlosti a je možné s jejich pomocí „odhadnout“ průměr parizonu v určitém místě po délce parizonu.

Snahou teoretického přístupu (matematický popis) v oblasti reologie a monitorizace viskoelastických jevů bylo formulovat matematický model, který by popsal geometrickou změnu polymerní taveniny, včetně problematiky nenewtonovského chování, elasticity, viskozity a přechodových jevů při zahájení nebo ukončení toku.

Je nepochybné, že práce je začátkem v této oblasti a další disertační práce zabývající se uvedenou problematikou budou pokračovat. Díky novým zjištěným poznatkům bylo možné nejenom zmapovat vliv vybraných parametrů procesu na efekt deformace parizonu, ale hlavně tento proces matematicky popsat, což má dopad jak na teoretickou, tak i na praktickou stránku výstupů, které jsou a budou používány pro řízení vyfukovacích strojů (rozšíření platnosti na další oblasti aplikace v průmyslové praxi).

Přínos pro praxi a vědu

Na základě provedených analýz viskoelastických jevů spojených s extruzí parizonu je možné konstatovat, že mezi přínosy disertační práce patří:

- Nalezení metodiky monitorizace rozměrových změn vytlačovaného parizonu, kterou lze uplatnit v následujících experimentech i praxi.
- Pomocí matematického modelu - logaritmických regresních rovnic - je možné předpovídat rozměrové změny vytlačovaného parizonu a tím usnadnit konstrukci jak nástrojů pro vytlačování, tak i konstrukci výrobku samotného.
- Ověření způsobu ovlivňování rozměrů, především pak průměru parizonu pomocí technologických parametrů, začlenění výsledků do teoretického vědního základu.
- Výsledky experimentu usnadňují vhodnou volbu polymeru pro konkrétní požadovaný profil parizonu v závislosti na tokových vlastnostech jeho taveniny.
- Výsledky je možné považovat za podklad pro tvorbu simulačních SW, jejichž výstupy by dovedly předpovědět viskoelastické jevy při namáhání polymerních tavenin.

Další postupy

Další postupy experimentů spadají především do oblasti výzkumu nepopsaných závislostí na technologických, materiálových či geometrických parametrech:

- Experimentální měření a vyhodnocení viskoelastických jevů se změněnou geometrií trysky a definice odlišného viskoelastického chování s konvergentní či divergentní tryskou.
- Do oblasti proměnných zahrnout i další parametry, které ovlivňují proces vytlačování parizonu či extruze obecně (tlak, teplota, konstrukční parametry vytlačovacího stroje apod.).
- Nalezení obecného matematického modelu pro jednotlivé skupiny polymerů (nejen polyolefinů) určujících deformační chování jejich tavenin.

Praktická aplikace

Praktickým výstupem disertační práce je uplatnění výsledků výrobcem vyfukovacích strojů při inovačním vývoji adaptivního systému řízení v rámci projektu OPPI Inovace – Inovační projekt. V praxi byla uplatněna metodika monitorizace rozměrových změn parizonu a byl implementován matematický popis jevu viskoelastického narůstání parizonu, který umožní provádět automatické korekce systému regulace tloušťky stěny parizonu u technologie extruzního vyfukování.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROSATO, D. – ROSATO, A. – Di MATTIA, D: *Blow molding handbook*. Munich 2004: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-22017-8
- [2] RAUWENDAAL, CH. : *Polymer extrusion*. 3.vyd., Hanser/Gardner Publications, 1994, ISBN 1-56990-140-6
- [3] KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3
- [4] MEISSNER, B – ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů*. SNTL/ALFA Praha 1987
- [5] LENFELD, P.: *Technologie II. – část 2. Zpracování plastů*. Liberec: TU v Liberci 2005. ISBN 80-7372-037-X
- [6] LENFELD, P. a kolektiv: *Strojírenská technologie – vybrané prezentace*, TU v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-326-2
- [7] BĚHÁLEK, L.: *Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi*. - za podpory projektu In-TECH (reg.č. CZ.04.1.03/3.2.15.2/0215) Evropského sociálního fondu (ESF projekt v Opatření 3.2)
- [8] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [9] WHITE, J. – POTENTE, H.: *Screw Extrusion*. Munich 2003: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-19624-2
- [10] THIELEN, M: *Extrusion Blow Molding*. Munich 2001: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-21948
- [11] KREBS, J. *Teorie a technologie zpracování plastů*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, Liberec, 1981.
- [12] SOVA, M - KREBS, J. a kol.: *Termoplasty v praxi*. Praha: Dashofer, 2004. ISBN 80-86229-15-7.
- [13] LENFELD, P.: *Inovace konstrukce vyfukovacího stroje GM 2500 a zvyšování efektivity technologie extruzního vyfukování – technická studie*. Liberec 2009
- [14] TOMIS, F. - RULÍK, F. : *Gumárenské a plastikářské stroje*, Skripta VUT Brno, 1981
- [15] TOMIS, F. : *Stroje a zařízení v technologii plastických hmot*, 1.vyd. SVTL Bratislava, 1964
- [16] TOMIS, F. : *Gumárenská a plastikářská technologie, Zpracovatelské procesy*, Skripta VUT Brno, 2.vyd., 1986
- [17] KŮSA, P. : *Vliv konstrukce vstupní zóny na výkonové charakteristiky plastikační jednotky vyfukovacího stroje*. Diplomová práce, TU v Liberci, 2003. V45/03S
- [18] DUŠEK, P.: *Monitorizace procesu vyfukování*. Diplomová práce, TU v Liberci, 2008

- [19] HABR, J. : *Monitorizace rozměrových změn vytlačovaného profilu*. Diplomová práce, TU v Liberci, 2009
- [20] KŮSA, P.: *Zpracování plastů vytlačováním*. Prezentace na semináři firmy Velox CMS, Střítež u Jihlavy, 2008.
- [21] CYHELSKÝ, L. - HINDLS, R. - KAHOUNOVÁ, J.: *Elementární statistická analýza*. 2. vyd. Management Press, Praha 1999. ISBN 80-7261-003-1.
- [22] HENDL, J.: *Přehled statistických metod zpracování dat*. Portál, Praha 2006. ISBN 80-7367-123-9
- [23] www.gdk.cz (duben 2009)
- [24] www.chemwide.com (únor 2009)
- [25] www.fluent.com (duben 2009)
- [26] www.polymerwide.com (březen 2009)
- [27] www.chemopetrol.cz (únor 2009)
- [28] www.slovnaft.sk (únor 2009)
- [29] www.3d-digitizing.eu (březen 2009)

6 SEZNAM PUBLIKACÍ

1. LENFELD, P. – KŮSA, P. – PACLT, R.: *Monitoring of Extrusion Blow Moulding Proces*. In: Mezinárodní konference PRO-TECH-MA 08. Košice, červen 2008, SR, p. 239 – 244, CD, Rec. Ing. I. Gajdoš, Ph.D. ISSN 1335-2393
2. PACLT, R. - LENFELD, P. – KŮSA, P.: *Design of the cooling/heating system for the injection molds*. In: Acta Mechanica Slovaca – Mezinárodní konference PRO-TECH-MA 08, Košice, 6-8.7.2008, s. 339-344. ISSN 1335-2393, Rec: doc. Ing. F. Greškovič, CSc.
3. SEIDL, M. - LENFELD, P. – KŮSA, P.: *The structure of plastic molded part with using conventional cooling and CO₂ cooling*. In: Acta Mechanica Slovaca – Mezinárodní konference PRO-TECH-MA 08, Košice, 6-8.7.2008, s. 393-398. ISSN 1335-2393 Rec. Ing. I. Gajdoš, Ph.D.
4. KŮSA, P.: *Zpracování plastů vytlačováním*. Prezentace na semináři firmy Velox CMS, Střítež u Jihlavy, 2008.
5. CHROMEC, O. - KŮSA, P.: *Extrusion blow moulding technology*. Prezentace na semináři firmy Galsoft-Service, Lviv, Ukraine, 2009.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



DISERTAČNÍ PRÁCE

**Monitorizace viskoelastických jevů během
procesu vytlačování parizonu**

2009

Ing. Petr Kůsa

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Obor 23-03V Strojírenská technologie

zaměření
Zpracování plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**Monitorizace viskoelastických jevů během
procesu vytlačování parizonu**

**Monitoring of Viscoelastic Effects during Parison
Extrusion**

Ing. Petr Kůsa

Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	142
Počet obrázků:	135
Počet tabulek:	19
Počet příloh:	0

Anotace

Téma práce: Monitorizace viskoelastických jevů během procesu vytlačování parizonu

Disertační práce se zabývá vlivem technologických, materiálových a konstrukčních parametrů extruze na rozměrové změny vytlačovaného profilu v souvislosti s tokovými vlastnostmi polymerních tavenin. Předmětem monitorizace je parizon, který tvoří polotovar pro výrobu dutých těles z plastů metodou extruzního vyfukování. V teoretické části práce je proveden rozbor procesu extruze polymerů s ohledem na viskoelastické vlastnosti polymerních tavenin. Experimentální část je zaměřena na porovnání analyzovaných typů polymerů v různých režimech extruze. Výstupem je analýza rozměrových změn z hlediska parametrů extruze. Cíle disertační práce jsou zaměřeny do oblasti teoretického popisu vytlačování, vlivu parametrů extruze na viskoelastické jevy, zejména rozměrové změny parizonu a matematický popis jejich závislosti.

Klíčová slova: Extruze, vytlačování, viskoelastická, parizon, rozměrové změny

Abstract

Theme of dissertation: Monitoring of viscoelastic effects during the process of parison extrusion

This doctoral thesis deals with the effects of the technological, material and structural parameters of extrusion on the dimensional changes of the extruded profile with regard to the flow rate properties of polymeric melts. The monitoring focuses on a parison, a semi-finished product used to manufacture hollow bodies from plastics by means of extrusion blow molding. The theoretical part of the thesis analyzes the process of polymers extrusion while considering the viscoelastic properties of polymeric melts. The experimental part comprises comparison of the analyzed polymer types in various extrusion modes. The comparison results in an analysis of dimensional changes in light of extrusion parameters. This dissertation thesis is aimed at the areas of the theoretical description of extrusion, of the effects of extrusion parameters on viscoelastic actions – especially on the dimensional changes of the parison - and of the mathematic description of their interdependence.

Keywords: Extrusion, viscoelasticity, parison, dimensional changes

Annotation

Thema der Dissertation: Monitorisieren von viskoelastischen Effekten während des Prozesses einer Schlauchkopf-Extrusion

Die Dissertationsarbeit behandelt die Wirkung von technologischen, materiellen und Konstruktionsparametern der Extrusion auf Maßänderungen des extrudierten Profils im Zusammenhang mit den Fließeigenschaften von Polymerschmelzen. Der Gegenstand des Monitorisierens ist ein Schlauchkopf, welcher das Vorprodukt zur Herstellung von Kunststoffhohlkörpern mittels Extrusionsblasens darstellt. Im theoretischen Teil der Arbeit wurde eine Analyse des Prozesses einer Polymerextrusion im Hinblick auf die viskoelastischen Eigenschaften der Polymerschmelzen vorgenommen. Der experimentale Teil orientiert sich auf den Vergleich der analysierten Typen von Polymeren in verschiedenen Extrusionsmodi. Das Ergebnis ist eine Analyse der Maßänderungen aus der Sicht der Extrusionsparametern. Die Ziele der Dissertation orientieren sich auf den Bereich einer theoretischen Beschreibung der Extrusion, der Auswirkung der Extrusionsparameter auf die viskoelastischen Effekte – vor allem die Maßänderungen des Schlauchkopfes – sowie einer mathematischen Beschreibung deren Abhängigkeit.

Schlagwörter: Extrusion, Viskoelastizität, Schlauchkopf, Maßänderungen

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations.

Datum / Date: 15.9.2009

Podpis / Signature :

Poděkování:

Děkuji všem, kteří mi poskytli cenné rady a připomínky při vypracování mé disertační práce, především pak prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi.

Dále děkuji Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D a Ing. Jiřímu Habrovi za pomoc při realizaci experimentů.

Poděkování v neposlední řadě patří také mé rodině za podporu během studia, bez jejich pomoci a tolerance by tato práce nevznikla.



1. ÚVOD.....	10
1.1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	12
2. ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ VYTLAČOVÁNÍM - EXTRUZE.....	13
2.1 VYTLAČOVACÍCH STROJE	13
2.2 JEDNOŠNEKOVÁ PLASTIKAČNÍ JEDNOTKA.....	14
2.3 KONSTRUKCE PLASTIKAČNÍ JEDNOTKY – VYTLAČOVACÍHO STROJE	15
2.3.1 Pracovní válec	16
2.3.2 Šnek – funkce a rozdělení, geometrie	16
2.4 POHYB MATERIÁLU VE ŠNEKU	19
2.4.1 Plastikační výkon	22
2.4.2 Q - p charakteristika	23
2.5 SIMULACE PROCESU VYTLAČOVÁNÍ	25
3. VLASTNOSTI, STRUKTURA A MORFOLOGIE PLASTŮ	26
3.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ.....	26
3.2 MOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	27
3.3 NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA - MORFOLOGIE	29
3.4 TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ	32
4. REOLOGICKÉ VLASTNOSTI TAVENIN PLASTŮ.....	33
4.1 RELAXACE A VISKOELASTICITA POLYMERNÍCH TAVENIN	36
4.2 TOK POLYMERNÍCH TAVENIN.....	39
4.2.1 Smykový tok	39
4.2.2 Tlakový tok.....	39
4.2.3 Smyk.....	40
4.2.4 Elongační tok.....	40
4.2.5 Tok materiálové zátoky polymeru	41
4.2.6 Smyková rychlost.....	41
4.2.7 Smykové přetvoření	41
4.2.8 Smykové napětí.....	42
4.2.9 Normálová napětí při ustáleném toku.....	43
4.2.10 Dynamická viskozita	43
4.2.11 Newtonovské tekutiny.....	43
4.2.12 Nenewtonovské tekutiny.....	44
4.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TOKOVÉ VLASTNOSTI POLYMERU.....	45
4.3.1 Distribuce molekulové hmotnosti	45
4.3.2 Index toku taveniny.....	47
5. PRŮVODNÍ JEVY SPOJENÉ S EXTRUZÍ PARIZONU.....	48
5.1 TVAROVÁNÍ PARIZONU.....	48
5.2 NARŮSTÁNÍ PARIZONU	52
5.2.1 Vliv materiálu na narůstání parizonu.....	54
5.2.2 Vliv geometrie trysky na narůstání parizonu	57
5.2.3 Vliv technologických parametrů na narůstání parizonu	57
5.3 NÁSLEDKY NARŮSTÁNÍ A PROTAHOVÁNÍ PARIZONU	59
5.4 MOŽNOSTI ELIMINACE NARŮSTÁNÍ A PROTAHOVÁNÍ PARIZONU.....	59
5.5 TOKOVÁ NESTABILITA A PORUCHY POVRCHU	60
5.5.1 Shark skin	61
5.5.2 Lom taveniny.....	62
5.5.3 Cyklická změna rozměrů a vibrace.....	63
5.6 TECHNOLOGICKÉ KOMPLIKACE.....	63
5.6.1 Komplikace způsobené polymerním materiálem	64
5.6.2 Komplikace způsobené strojem	65
5.6.3 Komplikace způsobené technologickými problémy	66



6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	68
6.1 VÝBĚR MATERIÁLŮ PRO EXPERIMENT	69
6.1.1 PE-HD LITEN BB 29	69
6.1.2 PE-LD BRALEN RB 2-62	70
6.1.3 Homopolymer PP MOSTEN GB 005.....	70
6.1.4 Kopolymer PP TIPLÉN R 659	70
6.2 PARAMETRY A NASTAVENÍ VYTlačOVACÍHO STROJE VS 25	71
6.3 SNÍMÁNÍ PROFILU PARIZONU	72
6.3.1 Popis snímacího zařízení	73
6.3.2 Popis použitého software	74
6.3.3 Postup měření	75
6.4 PE-HD LITEN BB29 – NAMĚŘENÉ HODNOTY	78
6.4.1 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,45 mm.....	78
6.4.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm.....	79
6.4.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm.....	80
6.4.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrbin vytláčovací hlavy.....	81
6.5 PE-LD BRALEN RB 2-62 – NAMĚŘENÉ HODNOTY	82
6.5.1 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,45 mm.....	82
6.5.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm.....	83
6.5.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm.....	84
6.5.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrbin vytláčovací hlavy.....	85
6.6 HOMOPOLYMER PP MOSTEN GB 005 – NAMĚŘENÉ HODNOTY	86
6.6.1 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,45 mm.....	86
6.6.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm.....	87
6.6.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm.....	88
6.6.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrbin vytláčovací hlavy.....	89
6.7 KOPOLYMER PP TIPLÉN R 659 – NAMĚŘENÉ HODNOTY	90
6.7.1 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,45 mm.....	90
6.7.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm.....	91
6.7.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm.....	92
6.7.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrbin vytláčovací hlavy.....	93
6.8 HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	94
6.8.1 Efekt smykové rychlosti na narůstání průměru parizonu.....	94
6.8.2 Efekt volby polymeru na narůstání průměru parizonu	94
6.9 MATEMATICKÝ POPIS JEVU	106
6.9.1 Regresní analýza.....	106
6.9.2 Výběr regresního modelu.....	106
6.10 REGRESNÍ ANALÝZA – NARŮSTÁNÍ PRŮMĚRU PARIZONU.....	109
6.10.1 Výstup regresní analýzy pro PE	109
6.10.2 Výstup regresní analýzy pro PP	110
6.11 SOUHRN VÝSLEDKŮ REGRESNÍ ANALÝZY	112
6.12 DISKUSE VÝSLEDKŮ	115
6.12.1 PE-HD Liten BB29.....	116
6.12.2 PE-LD Bralen RB 2-62.....	120
6.12.3 Homopolymer PP Mosten GB 005.....	124
6.12.4 Kopolymer PP Tiplén R 659.....	128
6.13 MĚŘENÍ ROZMĚROVÝCH ZMĚN TLOUŠTKY STĚNY PARIZONU.....	132
6.14 MOŽNOST ELIMINACE NARŮSTÁNÍ ZMĚNOU DÉLKY TRYSKY	134
7. ZÁVĚR.....	137
7.1 PŘÍNOS PRO PRAXI A VĚDU	138
7.2 DALŠÍ POSTUPY	139
7.3 PRAKTICKÁ APLIKACE.....	139
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	140
9. SEZNAM PUBLIKACÍ.....	142



Seznam použitých zkratk a symbolů

α	[st.]	stoupání závitu šneku
v_a	[m.s ⁻¹]	absolutní rychlost materiálu vůči pevné soustavě
k		Bagleyho korekce
P_c	[Pa]	celkový tlakový spád v kapiláře
D_e		Debořino číslo
l	[mm]	délka parizonu
DMH		distribuce molekulové hmotnosti
η	[Pa.s]	dynamická viskozita
HS		high speed (vysokorychlostní)
h	[m]	hloubka závitu šneku
Q	[kg.hod ⁻¹]	hmotnostní průtok vytlačovaného polymeru
ρ	[g/cm ³]	hustota
ITT		index toku taveniny
R^2		koeficient determinace
π		Ludolfovo číslo
MFR	[g/10min]	melt flow rate (hmotnostní index toku taveniny)
MVR	[cm ³ /10 min]	melt volume rate (objemový index toku taveniny)
η_N	[Pa.s]	newtonská viskozita
PE-LD		nízkohustotní polyetylen
u_0	[m.s ⁻¹]	obvodová rychlost šneku
n	[min ⁻¹]	otáčky šneku
VS25		plastikační jednotka typ VS25 (GDK spol. s r.o.)
i		počet chodů závitu šneku
PA		polyamid
PE		polyetylen
PET		polyethylentereftalát
PC		polykarbonát
PMMA		polymethylmetakrylát
POM		polyoxymetylen
PP		polypropylen
PS		polystyren
PVC		polyvinylchlorid
L/D		poměr délky a průměru šneku
L/D		poměr délky a průměru vytlačovací trysky
B_p		poměr narůstání průměru parizonu
B_t		poměr narůstání tloušťky stěny
p	[MPa]	protitlak (tlak na konci šneku)
D	[mm]	průměr parizonu
PID		regulátor s proporcionální, součtovou i derivační konstantou
v_r	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost materiálu vůči šneku
v_{ax}	[m.s ⁻¹]	rychlost dopravy materiálu ve směru osy x



A	[m ²]	smyková plocha
D, γ	[s ⁻¹]	smyková rychlost
F	[N]	smyková síla
τ	[Pa]	smykové napětí
γ		smykové přetvoření
s	[m]	stoupání šneku
D _p	[mm]	střední průměr parizonu po výstupu z hubice
D _d	[mm]	střední průměr vytlačovací hubice
ρ	[kg.m ³]	sypná hustota vstupního materiálu
e	[m]	šířka hřebene šneku
h _d	[mm]	šířka stěrbiny vytlačovací hubice
φ	[1/(Pa.s)]	tekutost
T-CH		tepelně – chladicí jednotka
t	[°C]	teplota
T _m	[°C]	teplota tání
T _f	[°C]	teplota viskózního toku
T _g	[°C]	teplota zesklnění
TPE		termoplastické elastomery
TPU		termoplastické polyuretany
h _p	[mm]	tloušťka stěny parizonu po výstupu z hubice
PND		typ formátu souboru
φ	[st.]	úhel třecích poměrů mezi materiálem, šnekem a válcem
η	[Pa.s]	viskozita taveniny polymeru
P	[Pa]	viskózní odpor v kapiláře
D	[m]	vnější průměr šneku
GM251		vyfukovací stroj typ GM251 (GDK spol. s r.o.)
PE-HD		vysokohustotní polyetylen
η_{zd}	[Pa.s]	zdánlivá viskozita

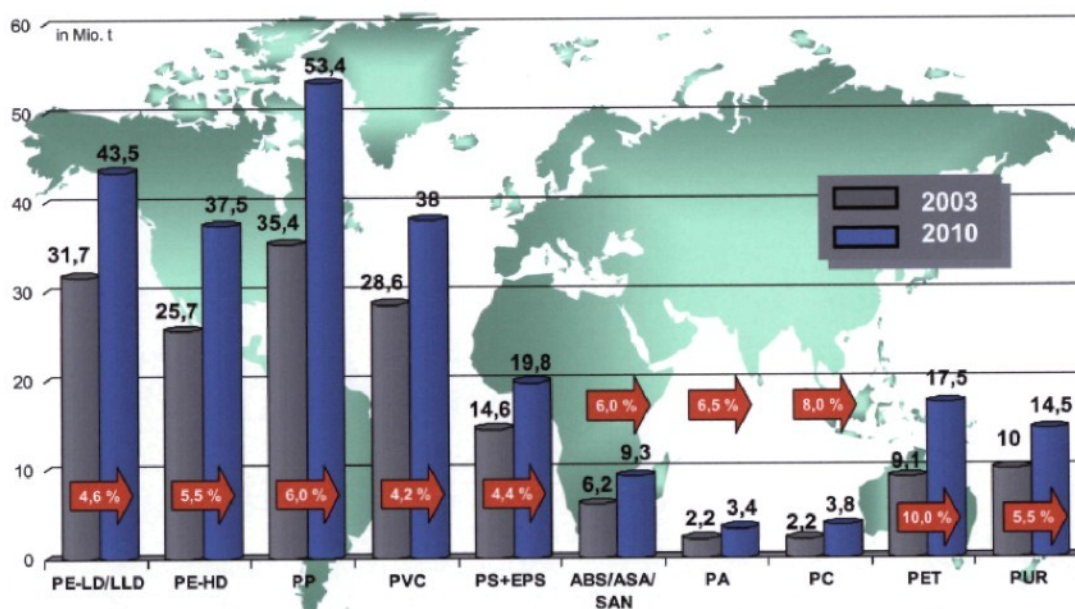


1. Úvod

V současné době celosvětového nárůstu spotřeby plastů je kladen důraz na rozvoj zpracovatelských technologií, a to jak z hlediska technického, tak i ekologického. Plasty vynikají výbornou zpracovatelností a příznivými mechanickými vlastnostmi vzhledem ke své hmotnosti. Proto je stále ve větší míře nacházíme v prakticky každém odvětví lidské činnosti.

V průběhu 20. století pronikly do každodenního života obyvatel všech průmyslových zemí syntetické makromolekulární látky – polymery. Před 90 lety v podstatě - kromě přírodních polymerů (kaučuk, celulóza, kaseinové hmoty) - neexistovaly, ale dnes nacházejí použití téměř ve všech oborech lidské činnosti. Tvoří základ velkého množství materiálů nazývaných termoplasty, reaktoplasty a kaučuky. Staly se pro své specifické vlastnosti nenahraditelnými v celé řadě odvětví. Různé aplikace plastů využívají jejich snadné zpracovatelnosti, nízké měrné hmotnosti, odolnosti proti korozi, dobrých tepelně izolačních i elektroizolačních vlastností a také příznivé ceny. Není snad oboru lidské činnosti, kam by plasty nepronikly, stačí se jen rozhlédnout kolem sebe na předměty z plastů a pokusit se říci, z jakého materiálu by ten či onen objekt mohl být vyroben, pokud by plasty nebyly k dispozici. Zjistíme, že řada výrobků by byla nerealizovatelná, a pokud by se vyrobily z klasických materiálů (kovy, dřevo, keramika), tak jen s velmi sníženými nároky na vzhled, tvar, životnost, hmotnost, výrobní náklady, atd. Proto můžeme plasty z hlediska použití zařadit mezi významné konstrukční materiály [17].

Z celkového objemu světové produkce plastů představuje skoro 80 % jen šest druhů plastů a 70 % výroby jen tři druhy, a to polyolefiny (PE a PP), styrenové hmoty (PS, ABS, atd.) a polyvinylchlorid (PVC) [13].



Obr. 1-1: Světová produkce v roce 2003 a výhled do roku 2010 [13]

Na druhé straně není pochyb o tom, že plasty s sebou přinášejí řadu ekologických problémů. To platí zejména pro obaly, které se po krátkém čase po výrobě stávají součástí odpadu. Z tohoto hlediska nabývá v současnosti na svém významu celý obor recyklace plastových odpadů, počínaje sběrem, tříděním a zpracováním jak tříděných, tak i směsných plastových odpadů.

Technologie extruzního vyfukování je metoda pro výrobu dutých těles z plastů. Principem je tvarování polotovaru (parizonu) do tvaru uzavřeného tělesa. Tato kontinuálně vytlačovaná trubka, resp. její ústřižky jsou tvarovány přetlakem vzduchu v chlazené formě. Po vyjmutí výrobku z formy dochází k oddělení technologického odpadu – přetoků, které mohou být opětovně zpracovány. Uvedený princip umožňuje značnou variabilitu výrobků, jak z ohledu designu, tak i typu polymeru [3, 5].

Na rozdíl od technologie zpracování plastů vstřikováním není pro technologii extruzního vyfukování vytvořen dostatečný teoretický základ z hlediska závislosti viskoelastických vlastností polymerů na technologické parametry a řízení technologického procesu jako celku. Konstrukční návrhy nástrojů pro vytlačování a technologická optimalizace jsou stále doménou empirie a zkušeností.

Disertační práce se zabývá zkoumáním průvodních jevů, ke kterým dochází při vytlačování parizonu. Zejména pak narůstáním jeho rozměrů po opuštění vytlačovací hubice jako důsledku viskoelastických vlastností polymerů.

1.1 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je analyzování dějů souvisejících se změnami rozměrů parizonu po opuštění vytlačovací hubice. Dále nalézt a popsat závislost rozměrových změn, zejména narůstání průměru parizonu se základními technologickými parametry a nastavením vytlačovacího stroje. V neposlední řadě také zohlednit volbu typu polymeru a jeho vliv na zkoumané jevy.

Jednotlivé cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- a) Teoretický rozbor procesu extruze na základě současných znalostí. Definice viskoelastických vlastností polymerních tavenin, následných jevů a jejich důsledky pro technologii extruze.
- b) Možnosti eliminace průvodních viskoelastických jevů spojených s extruzí a monitorizace vlivu technologických, materiálových a konstrukčních parametrů na proces extruze s ohledem na:
 - Geometrii vytlačovací trysky nástroje – konstrukční parametr
 - Smykovou rychlost vytlačované taveniny (otáčky šneku) – technologický parametr.
 - Vliv typů polymerů na chování jejich tavenin po extruzi (narůstání) – materiálový parametr.
- c) Nalezení vhodného matematického popisu narůstání průměru parizonu vzhledem k jeho délce ve vztahu k rozvoji teoretického základu a rovněž k možnosti uplatnění výsledků v praxi.

Konečnou praktickou aplikací výsledků disertační práce je uplatnění matematického popisu narůstání parizonu pro adaptivní řízení regulace tloušťky stěny parizonu inovované řady vyfukovacích strojů společnosti GDK spol. s r.o.. Vzhledem k závažnosti problematiky je „Vývoj systému řízení vyfukovacího stroje“ součástí dotační podpory v rámci projektu OPPI Inovace – Inovační projekt.

2. Zpracování plastů vytlačováním - extruze

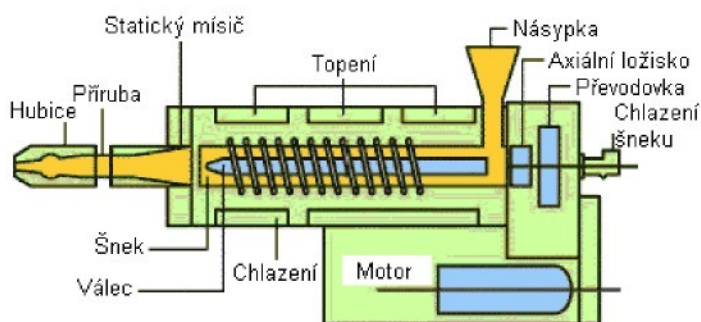
Jednou z nejrozšířenějších technologií zpracování plastů je vytlačování neboli extruze. Je charakterizovaná jako technologický proces kontinuálního tváření polymeru ve stavu taveniny přes nástroj (vytlačovací hlavu), který mu uděluje příslušný tvar. Ten je za hlavou zafixován buď snížením teploty materiálu (termoplasty), nebo naopak zvýšením teploty pro odstartování nevratného chemického procesu v příslušném zařízení – vulkanizace profilů z kaučukových směsí ve vulkanizační lázni [3, 5].

Zařízením, kterým je tento proces realizován se nazývá vytlačovací stroj – extruder. Hlavní funkční částí je plastikační jednotka, která polymer roztaví a dopraví před vytlačovací hubici za současného vyvození odpovídajícího tlaku pro protlačení taveniny přes trysku (profilovací otvor).

Vytlačování se používá hlavně pro výrobu desek, fólií, trubek, hadic, opláštování vodičů nebo různých tuhých či těsnících profilů apod. Rovněž také k výrobě polotovarů pneumatik v gumárenském průmyslu. Velké uplatnění nachází při výrobě regranulátů a směsí polymerů, barvicích koncentrátů, koncentrátů aditiv apod. Využívá se také k zásobování kalandrů válcovacích linek [14,15].

2.1 Vytlačovacích stroje

Vytlačovací stroje lze dělit dle různých konstrukčních nebo technologických hledisek. Nejvíce používanou skupinu tvoří jednošnekové vytlačovací stroje, kde je vstupní materiál taven a dopraven rotujícím šnekem k vytlačovací hubici, kde je již ve formě taveniny formován dle tvaru ústí vytlačovací hubice [20].

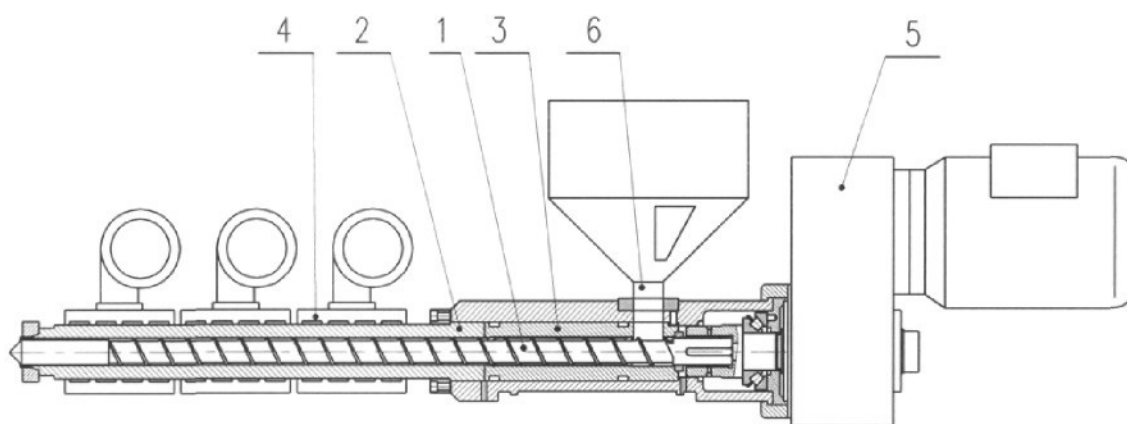


Obr. 2-1: Vytlačovací stroj, základní komponenty

2.2 Jednošneková plastikační jednotka

Základním funkčním prvkem je šnek, který má na svém povrchu vytvořen jeden nebo i více kanálů ve tvaru šroubovice, jimiž prochází zpracovávaný materiál. Rotací šneku, naplněného materiálem, vzniká pohyb, který má při splnění určitých předpokladů axiální složku způsobující posouvání materiálové zátky podél osy šneku.

Na šnekovou plastikační jednotku je tedy rovněž možné pohlížet jako na čerpadlo, schopné kontinuálně dodávat taveninu po plastikaci do nástroje (formy) nebo vytlačovacích hlav.



Obr. 2-2: Schéma šnekové plastikační jednotky.

1 - Šnek s míchací sekci, 2 - Pracovní válec, 3 - Drážkovaná vstupní zóna, 4 - Topná a chladicí pásma, 5 - Pohon s axiálním uložením šneku, 6 - Plnicí otvor s násypkou

Šneková plastikační jednotka může zpracovávat materiál různých forem zrnitosti. Nejběžnější formou jsou granule různých tvarů, závislých na technologii jejich výroby. Z hlediska ekonomiky provozu je obvyklé a nutné zpracovávat recyklovaný materiál vzniklý drcením zmetků či technologického odpadu jako jsou vtokové soustavy nebo přetoky. Méně obvyklou formou vstupního materiálu je prášek jako produkt prvovýroby.

Pro správnou funkci plastikační jednotky je dominantní vliv tření. Základní podmínkou činnosti šnekové plastikační jednotky je existence vyššího součinitele tření materiálu vůči válci než vůči šneku. Pro zvýšení součinitele tření a omezení vlivu formy zrnitosti zpracovávaného materiálu se používají drážkované vstupní zóny, které převádějí problematiku tření materiálu vůči válci do oblasti vnitřního tření materiálu [17].

2.3 Konstrukce plastikační jednotky – vytlačovacího stroje

Charakteristickým rozměrem plastikační jednotky je průměr šneku D a poměr L/D , což je poměr délky šneku vůči jeho průměru. Otáčející se šnek pod násypkou nabírá vstupující polymer a dopravuje jej do pracovního válce. Prostor pod násypkou se nazývá vstupní zóna plastikační jednotky. Tento prostor je chlazen, aby se plast předčasně netavil v otvoru násypky. Tím je zajištěna plynulá dodávka materiálu a současně stabilní provoz jednotky s optimálním výtlačným množstvím plastikovaného polymeru [3,5].

Moderní plastikační jednotky jsou poháněny kompaktními motor-převodovkami. Takové celky již velmi často obsahují i axiální zajištění dutého výstupního hřídele převodovky. Konstrukce axiálního uložení musí zajistit přenos značných reakčních sil do rámu stroje, které jsou vyvozeny vytlačovaným materiálem působícím na čelo šneku. Velikost tlaku na výstupu z plastikační jednotky je sledována tlakovým snímačem. Překročení maximálního dovoleného tlaku způsobí odstavení stroje. To může být způsobeno např. ucpáním následných zařízení, filtračního síta nebo poškozením topného tělesa. Temperaci pracovního válce zajišťují tepelně-chladicí jednotky se systémem chlazení pomocí axiálního ventilátoru. Výhodou tohoto systému je jednoduchost a spolehlivost. Naopak účinnost chlazení je malá. Pro její zvýšení lze do těchto jednotek zabudovat hliníkové nebo měděné chladiče. Existují i jiné způsoby temperace. U gumárenských vytlačovacích strojů se často používá temperace pomocí teplotnosných médií. Nevýhodou je složitost těchto systémů a nutnost investic do temperačních jednotek. Regulace teploty jednotlivých pásem je tvořena soustavou termočlánku, spínacího elementu topného tělesa a vlastního regulátoru teploty. Topná pásma osazená tepelně-chladíci jednotkami jsou řízena třípolohovou PID regulací, ostatní dvoupolohovou. Blok s regulací teploty je obvykle umístěn do ovládacího rozvaděče spolu s řídicím systémem, který zajišťuje řízení a ovládání stroje. V silovém rozvaděči je také umístěna napájecí soustava s hlavním vypínačem a frekvenčním měničem. Moderní typy měničů frekvence s vektorovým řízením umožňují precizní ovládání asynchronního motoru pohonu extruderu. Během provozu je tak možno monitorovat provozní parametry pohonu, jako je velikost zatížení, spotřebovávaný výkon či výstupní frekvence (otáčky šneku) [14, 17].

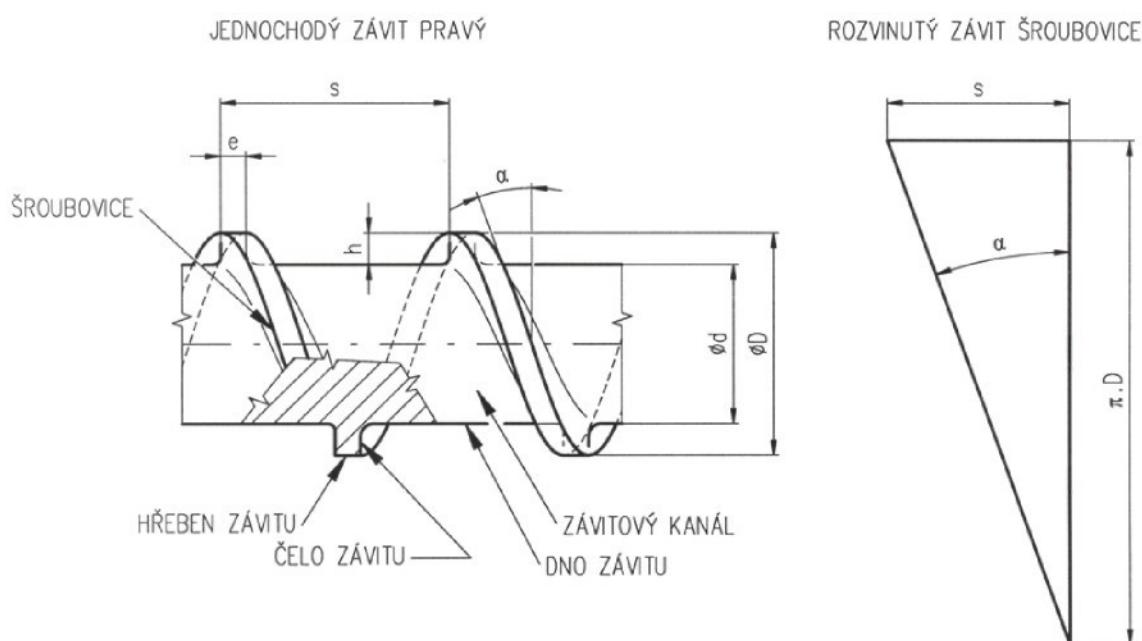
2.3.1 Pracovní válec

Pracovní válec je rozdělen do několika samostatně temperovaných pásem. Prostor pod násypkou je obvykle vybaven drážkovanou vstupní zónou. V pracovním válci plast postupně přechází do stavu taveniny. Plastikace je způsobena jednak teplem, které je přijímáno ze stěny válce, a dále teplem vznikajícím třením hmoty o stěny válce i o povrch šneku. Běžné provedení pracovních válců je z nitridační ušlechtilé oceli. Při zpracování abrazivních materiálů je nutné speciální provedení válce. V praxi se toto provedení nazývá bimetalické [14,15].

2.3.2 Šnek – funkce a rozdělení, geometrie

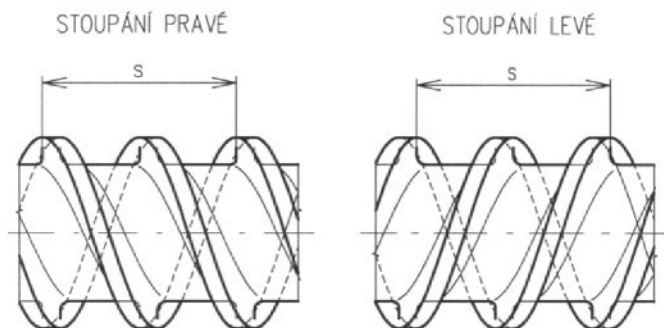
Šnek je rozhodující funkční prvek plastikační jednotky. Vstupující materiál dopravuje, taví, homogenizuje a vytváří potřebný tlak pro protlačení polymeru přes ústí vytlačovací hlavy.

Geometricky je vytvořen jako kombinace šroubových ploch, které tvoří kanál šneku. Základní křivkou, která se uplatňuje při konstrukci geometrie šneku je šroubovice. Každou šroubovou plochu je možné si představit jako sít' prostorových křivek – šroubovic. Vytlačovací šnek vznikne připojením profilu kanálu ke šroubovici [14, 15, 17].



Obr. 2-3: Profil šneku

Připojíme-li jeden profil, vznikne jednochodý šnek, připojíme-li více profilů, vznikne šnek vícechodý.



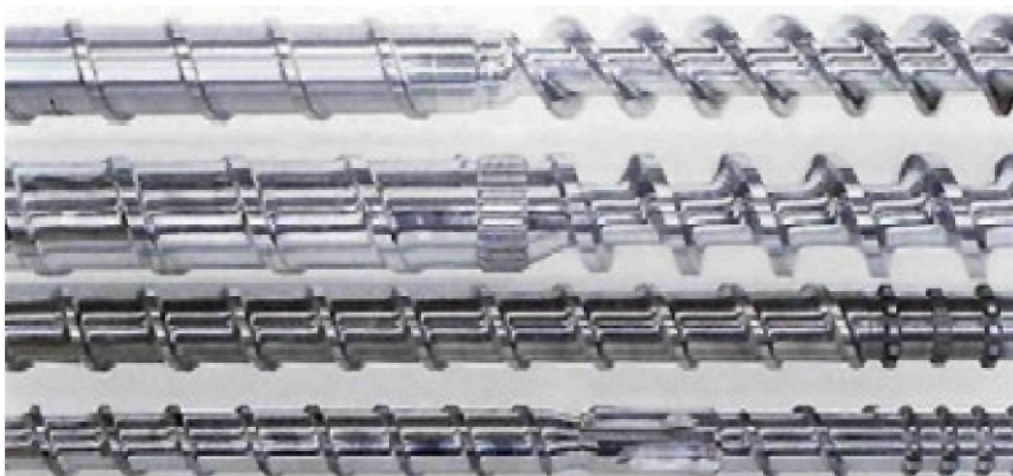
Obr. 2-4: Profil dvouchodého šneku

Nejjednodušší geometrii má konvenční třízónový šnek s konstantním stoupáním závitu, který je tvořen dopravní zónou, kompresní zónou a vytlačovací zónou. Délky jednotlivých zón se vyjadřují jako násobky průměru šneku.



Obr. 2-5: Konvenční třízónový šnek

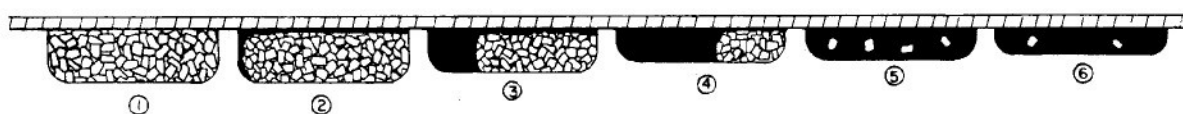
Alternativou konvenčním šnekům jsou šneky s proměnlivým stoupáním. Tyto šneky se uplatňují při zpracování viskózních tavenin plastů, nebo při zpracování kaučukových hmot. Obvykle mají konstantní hloubku závitu (nebo jen malou změnu) a příslušné hodnoty kompresního poměru se dosahuje změnou stoupání [15, 17, 20].



Obr. 2-6: Různá provedení šneků

Šneky jsou charakterizovány kompresním poměrem. Ten udává poměr objemu šnekového závitu pro jedno stoupání na konci šneku a objem jednoho závitu pod násypkou. Kompresní poměr kompenzuje rozdíl sypné hustoty vstupního materiálu a hustoty taveniny, dále ovlivňuje hnětací práci a tavicí schopnost šneku. Volbu kompresního poměru ovlivňuje nejen zpracovávaný materiál, ale i uspořádání vytlačovacího stroje. Pro stroje s drážkovanou vstupní zónou je číselné vyjádření kompresního poměru v rozmezí 1,1 až 1,5. U konvenčního provedení může tento poměr dosahovat až hodnot kolem 4 [3, 5].

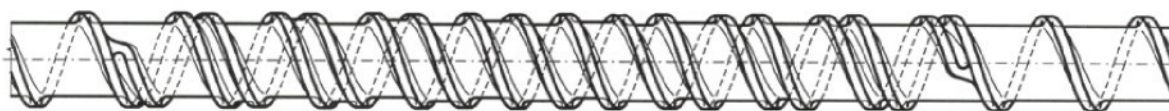
V případě volby nevhodné geometrie šneku se neroztaví všechny materiál a neroztavené částice se dostanou až do vytlačovaného výrobku. To je důsledkem malého tavicího výkonu šneku. Možnou příčinou je příliš hluboký závit nebo krátký šnek.



Obr. 2-7: Průběh tavení v konvenčním šneku [1]

Další skupinu ve vývojové řadě tvoří bariérové šneky. Smyslem bariéry je oddělení taveniny od neroztavené hmoty za účelem zlepšení kvality materiálu nebo u gumárenských šneků zlepšení plastikace kaučukové směsi. Bariérové šneky se používají především u výkonných geometrií v kombinaci s drážkovanými vstupními zónami. Základním typem je tzv. Mailleferův šnek. Druhý závit, tj. Mailleferův závit má snížený hřeben, přes šterbinu mezi

hřebenem a vnitřním povrchem válce se protlačuje tavenina, přičemž neroztavené částice neproniknou. Primární kanál je neprůchodný a materiál je v něm zadržován až do úplného roztavení. Materiál se postupně odtavuje v zužujícím se slepém primárním kanálu a vzniklá tavenina plní rozšiřující se kanál sekundární. Často používaným typem bariérového šneku je šnek Barrův. Vyznačuje se tím, že na rozdíl od šneku Mailleferova má sekundární kanál stejnou šířku, ale jeho hloubka se směrem ke konci zvětšuje. Zvýšení hloubky kanálu na konci šneku má za následek snížení hnětací práce, a tím i menší sklon k přehřívání taveniny [1, 15, 17, 20].

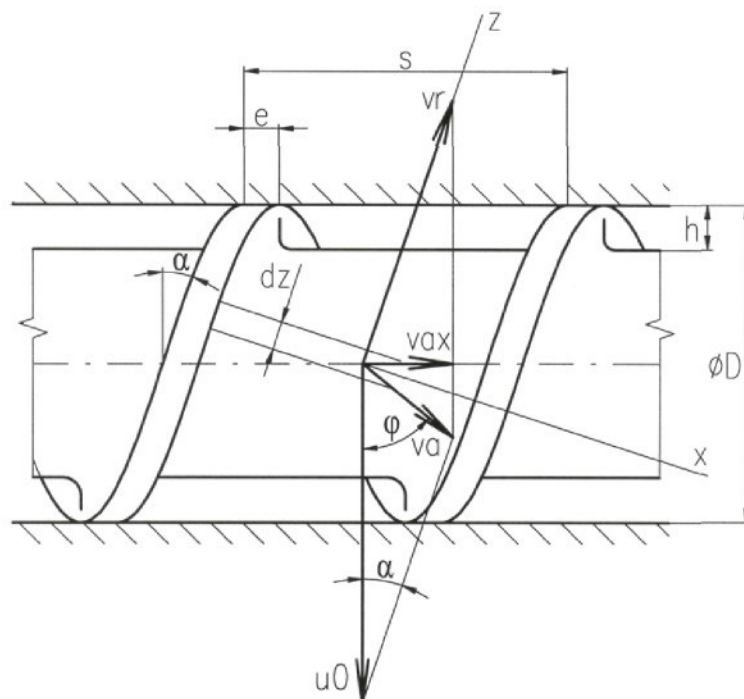


Obr. 2-8: Ukázka Mailleferova šneku s neúplným dvouchodým závitem

2.4 Pohyb materiálu ve šneku

Materiál vstupuje do šneku ve formě sypkého materiálu a vystupuje ve formě taveniny na konci šneku. Přejít mezi těmito fázemi se odehrává v určitém přechodovém intervalu. Matematický popis tohoto procesu je velmi obtížně zvládnutelný, neboť pro tuhou fázi materiálu platí jiné zákonitosti pohybu než pro taveninu. Zatímco u tuhé fáze se veškeré změny odehrávají na styčných plochách materiálu, šneku a válce, u taveniny se veškeré změny rychlosti přenášejí do celého objemu [14, 15].

Pohyb tuhého materiálu ve zcela zaplněném šnekovém kanálu je vyvozován účinkem třecích sil. Při silném zjednodušení se vlastně jedná o pohyb tuhého tělesa po nakloněné rovině (závit rozvinutý do roviny).

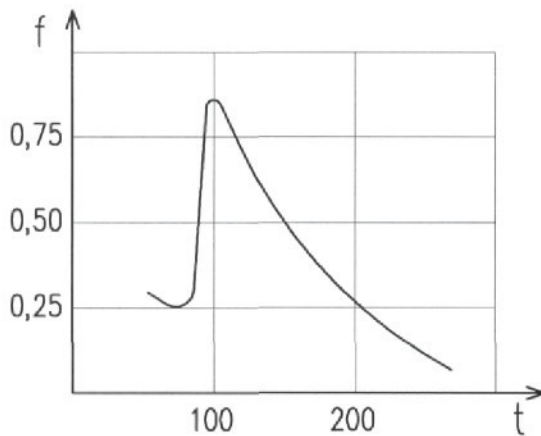


Obr. 2-9: Rozklad rychlostí na povrchu šneku ve vstupní zóně [17]

V rychlostním obrazci na obrázku značí u_0 obvodovou rychlost šneku, v_r relativní rychlost materiálu vůči šneku, v_a absolutní rychlost materiálu vůči pevné soustavě (válci). Doprava materiálu ve směru osy šneku se uskutečňuje pouze osovou složkou v_{ax} absolutní rychlosti v_a . Úhel α je úhel stoupání závitu a úhel φ vyjadřuje vliv třecích poměrů mezi materiálem, šnekem a válcem.

Jak už bylo řečeno, vyjadřuje úhel φ vliv třecích poměrů. Bude-li tření materiálu vůči válci malé, resp. se bude blížit 0 (materiál klouže po stěně válce), pak bude úhel $\varphi = 0$, tj. i $v_{ax} = 0$, tzn., že materiál nebude postupovat ve směru osy (bude se točit se šnekem) a výkon šneku je nulový. Kdyby se podařilo zajistit, aby se materiál se šnekem neotáčel, tj. aby se $\varphi = 90^\circ$, pak by šnek měl teoreticky maximální výkon (materiál by se pouze posouval jako matice po šroubu). Reálný výkon je někde mezi těmito hodnotami.

Z teoretického výpočtu i praktických zkušeností plyne, že výkon plastikační jednotky ve vstupní (dopravní) zóně je tím větší, čím větší je součinitel tření materiálu vůči válci a čím menší je tření materiálu vůči šneku. Proto musí být povrch šneku leštěn a šnek v dopravní zóně chladný, neboť součinitel tření plastu na kovu závisí na teplotě [15, 17].



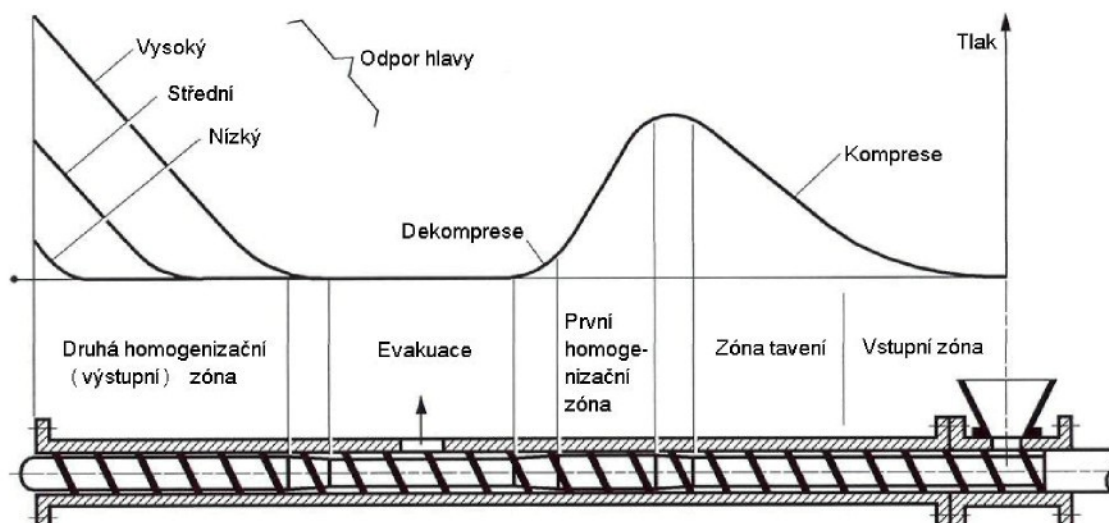
Obr. 2-10: Závislost koeficientu tření PE-HD na teplotě.

f - koeficient tření, t - teplota [°C]

Moderní vytlačovací stroje dosahují vysokých výkonů tak, že se součinitel tření materiálu vůči válci zvyšuje účinkem drážkování vstupní zóny. Princip funkce drážkování spočívá v tom, že se granule materiálu zaklíní v drážkách vhodného tvaru a tak v podstatě dojde k zdrsnění třecí plochy (vnitřního povrchu válce). Drážkování, stručně řečeno, omezuje otáčení materiálu se šnekem, posuv materiálu ve směru osy šneku se zvětší, a tím také hmotnostní průtok taveniny polymeru [14, 17].

V přechodovém pásmu šneku (kompresní zóna šneku) vlivem zmenšující se hloubky závitů dochází ke stlačování materiálu a jeho přechodu do stavu taveniny jak vlivem tepelné energie z temperačního systému vytlačovacího stroje, tak i vlivem tepla, vzniklého třením materiálu o stěny válce a účinkem disipace energie ve vznikající tavenině (hnětací práci). Kanál šneku je zde zaplněn zčásti tuhým a zčásti roztaveným materiálem.

Jednotlivé zóny konvenčního šneku se však navzájem výrazně ovlivňují, takže zatímco vliv dopravní zóny konvenčního šneku s hladkou vstupní zónou na následující zóny je zanedbatelný, naopak vliv drážkované zóny bývá rozhodující. Názorně to lze vidět z průběhu tlakových křivek po délce šneku [14, 15].



Obr. 2-11: Průběhu tlaku po délce šneku (plastikační jednotka s evakuací) [6]

2.4.1 Plastikační výkon

Množství zpracovaného plastu závisí na konstrukci stroje, geometrii šneku, technologickém režimu a vlastnostech polymeru. Výsledný tok Q je vektorovým součtem smykového toku a toků tlakových (zpětných) [3, 5, 11].

Smykový tok Q_1 je množství roztavené hmoty, kterou získáme vytlačováním při konstantních otáčkách a teplotě při volném výtoku – bez vytlačovací hlavy. Je důsledkem tření mezi hmotou a otáčejícím se šnekem.

Tlakový tok Q_2 vzniká ve šneku, pokud materiál musí překonávat nějakou překážku na jeho konci např. vytlačovací hlavu.

Tlakový tok Q_3 vzniká ve vůli mezi šnekem a pracovním válcem.

Pokud tavenina vytéká bez tlaku, tak se v bilanci neobjeví tlakové toky a výtlačné množství (smykový tok) je přímo úměrné otáčkám šneku.

$$Q_1 = a_1 \cdot n \quad [2.1]$$

a_1 - výtlačné množství vztažené na 1 otáčku šneku, zahrnuje geometrii šnekového kanálu, nikoli však délku šneku, reologii a teplotu polymeru

n - otáčky šneku

V případě, že je vytlačovací stroj vybaven vytlačovací hlavou můžeme odvodit vztah pro tlakový tok Q_2

$$Q_2 = -a_2 \cdot h^{m+2} \cdot \Phi \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)^m \quad [2.2]$$

a_2 - vliv konstrukčních parametrů šneku

h - hloubka profilu ve výstupní zóně šneku

Φ - koeficient tekutosti - odpovídá smykové rychlosti za působení určitého smykového napětí

m - exponent mocninového zákona - vyjadřuje odchylku tokového chování od Newtonovského

Δp - tlakový spád od konce šneku na začátek výstupního pásma

ΔL - délka šneku odpovídající tlakovému spádu

Analogie platí při odvozování Q_3 - toku odpovídajícímu vůli mezi šnekem a válcem, pouze přiřadíme konstantu a_3 zahrnující geometrické rozměry vůle.

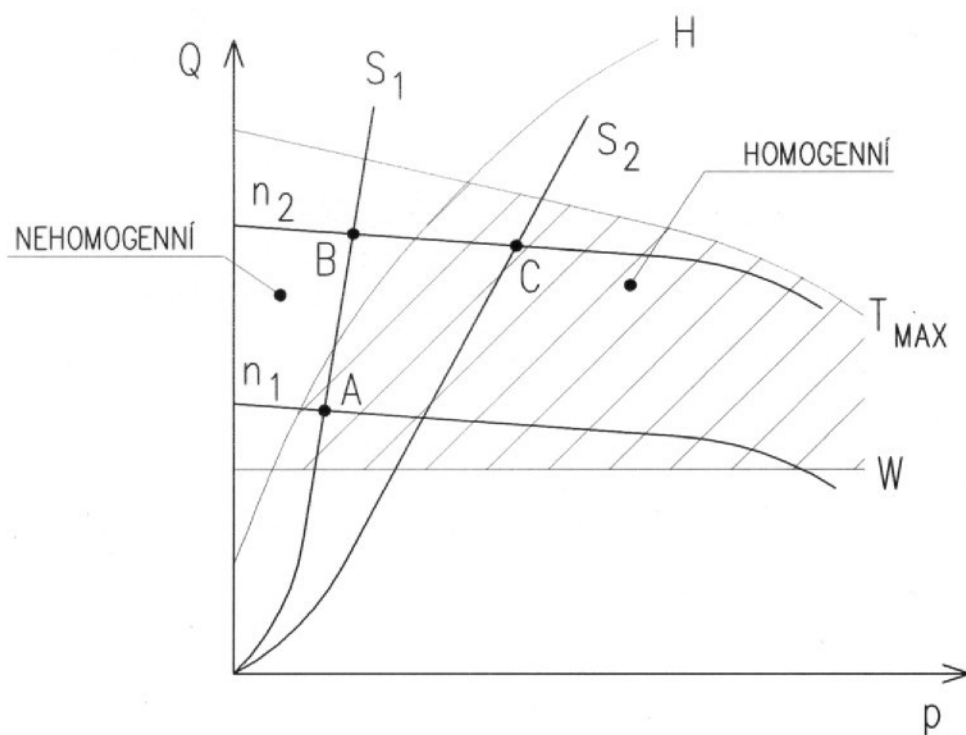
Vektorovým součtem smykového a tlakových toků získáme výtlačné množství. Uvedená rovnice je také matematickým vyjádřením charakteristiky šneku.

$$Q = a_1 \cdot n - (a_2 + a_3) \cdot h^{m+2} \cdot \Phi \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} \right)^m \quad [2.3]$$

Skutečné množství získané taveniny ovšem závisí také na geometrii vytlačovací hlavy. Spojením charakteristik šneku a vytlačovací hlavy obdržíme charakteristiku vytlačovacího stroje. Průsečík obou křivek představuje při daných otáčkách maximální množství plastu za jednotku času, kterého můžeme na daném zařízení dosáhnout [5, 11, 12].

2.4.2 Q-p charakteristika

Zobrazí-li se graficky rovnice pro hmotnostní průtok, dostaneme tzv. $Q - p$ charakteristiku šneku, resp. sít' charakteristik pro různé otáčky šneku. Z průběhu charakteristiky můžeme usuzovat na chování vytlačovacího stroje při různých provozních podmínkách [14, 17, 20].



Obr. 2-12: Q - p charakteristika vytlačovacího stroje [17]

Q - hmotnostní průtok, W - přímka hospodárnosti, p - protitlak, H - křivka homogenity, A, B, C - provozní body charakteristiky, n_1 , n_2 - otáčky šneku, T_{MAX} - křivka maximální teploty, S1, S2 - charakteristika hlavy

K dostatečné plastikaci je nezbytný určitý minimální protitlak p na konci šneku, který u daného šneku závisí na jeho otáčkách a odporu vytlačovací hlavy. Pracovní body charakteristiky stroje ležící vpravo od křivky homogenity H poskytují homogenní vytlačovaný materiál. Zatímco body nacházející se vlevo vyjadřují, že bylo vytlačováno velké množství materiálu za nízkého tlaku a byl získán nehomogenní materiál.

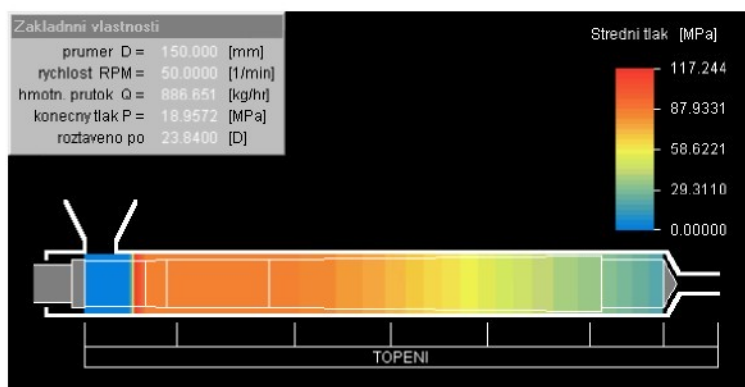
Pracuje-li šneková plastikační jednotka při otáčkách n_1 s odpovídající charakteristikou hlavy S_1 , jeho výkonnost Q i protitlak p jsou dány průsečíkem v bodě A. Zvětšením otáček šneku na n_2 vzroste hmotnostní průtok a provozní bod se přesune po charakteristice hlavy S_1 do průsečíku B, který již leží v oblasti nehomogenity. Možným řešením je umělé zvýšení protitlaku p na konci šneku zvětšením odporu hlavy. V tomto případě se bude pracovat s charakteristikou hlavy S_2 , jejímž průsečíkem s křivkou n_2 je pracovní bod C, který opět leží v homogenní oblasti. Se zvyšujícími se otáčkami a odporem na vytlačovací hlavě roste hnětací práce a tím také dochází ke zvyšování teploty

zpracovávaného materiálu. Plasty mohou bez poškození snášet jen určitou teplotu, proto překročení křivky T_{MAX} směrem nahoru vede k poškození (degradaci) materiálu. Přímka W omezuje zdola pracovní diagram z důvodu hospodárnosti provozu. Hmotnostní průtok Q nacházející se pod touto přímkou lze bez potíží dosáhnout i se stroji s menším průměrem šneku.

2.5 Simulace procesu vytlačování

Přestože se šnek navenek jeví jako poměrně jednoduché strojní zařízení, procesy, které v něm během vytlačování probíhají (doprava, tavení, míchání, disipace energie, tepelné procesy) jsou velmi složité a řešení složitých diferenciálních rovnic je klasickým způsobem neproveditelné [17, 25].

V posledních letech vyvinuly specializované softwarové firmy simulační programy, které umožňují procesy ve šneku namodelovat. Nejsou ale ještě zcela spolehlivé a výsledky se musí brát s určitou rezervou. Současně mají charakter jakýchsi kontrolních výpočtů, neumožňují navrhnout optimální geometrii šneku pro dané podmínky a pro daný materiál. Návrh geometrie šneku je stále doménou empirie a zkušeností. Výsledkem počítačové simulace jsou pak křivky, znázorňující průběhy tlaků, teplot, tavení, spotřeby energií atd.



Obr. 2-13: Výstup ze simulace procesu extruze

3. Vlastnosti, struktura a morfologie plastů

Chemická a fyzikální podstata plastů vychází z jejich chemické struktury, uspořádanosti, velikosti a tvaru makromolekul. Plasty patří do skupiny vysokomolekulárních látek vzniklých některou z polyreakcí. Například chemická struktura vyjadřující typ atomů a způsob, jak jsou vzájemně spojeny ovlivňuje jejich hustotu. Tvar makromolekul, jejich velikost a uspořádanost má významný vliv na mechanické vlastnosti plastů. Chemická struktura plastů nesouvisí pouze s vlastnostmi plastů (mechanickými, fyzikálními, bariérovými apod.), ale také se způsobem jak je lze technologicky zpracovávat a převádět na finální produkt [5, 6].

3.1 Rozdělení plastů

Polymerní látky je možno členit na základě mnoha rozmanitých kritérií. Rozdělení do tří základních kategorií je podle jejich aplikace a konstrukční složitosti vyráběných dílů:

- *Plasty pro široké použití:* Polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF)
- *Plasty pro inženýrské aplikace:* Polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylén (POM), polymethylmetakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice
- *Plasty pro špičkové aplikace:* Polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI)

Dále na základě teplotního chování:

- *Termoplasty:* Při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních neneutronovských kapalin, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání T_m (semikrystalické plasty), resp. teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty). Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. K termoplastům patří většina

zpracovávaných hmot, jako je polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), apod.

- *Reaktoplasty*: V první fázi zahřívání rovněž měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury (výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu), k tzv. vytvrzování. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, apod.
- *Kaučuky, pryže a elastomery*: Polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází rovněž k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury, probíhá tzv. vulkanizace. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální reakce.

Mezi další kritéria patří například nadmolekulární struktura, polarita, chemická struktura nebo množství a druh plniv či přísad.

3.2 Molekulární struktura

Hustota plastů je v porovnání s kovy menší, to je dáno jejich chemickým složením. Z chemického hlediska jsou to látky organické a jejich podstatou je makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu. Základním prvkem řetězce makromolekuly je mnohokrát opakující se monomerní jednotka, kterou tvoří prvky s malou atomovou hmotností, zejména uhlík a vodík [3, 5, 6].

Základní rozdělení makromolekul dle jejich struktury:

- *Lineární*: Vznikají řazením monomerních jednotek za sebou. Z termodynamických důvodů jsou však stočeny do spirály, či klubíčka. Lineární makromolekuly se mohou z prostorových důvodů více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak kompaktnější prostor. Polymery tak mají vyšší hustotu (např. PE-HD). Plasty s lineárními makromolekulami jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivost makromolekul),

v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě tavenin dobrou zpracovatelností.

- **Rozvětvené:** Vyznačují se bočními větvemi na základním řetězci. Rozvětvené makromolekuly se na rozdíl od lineárních nemohou v důsledku bočních větví jedna ke druhé dostatečně přiblížit. Proto se vyznačují nižší hodnotou hustoty (např. PE-LD). Uspořádanost jejich shluků je nízká a tudíž hůře krystalizují a mají tedy i nižší stupeň krystalinity. Rozvětvení zhoršuje i pohyblivost makromolekul a tím tedy i tekutost v roztaveném stavu. Boční řetězce, které způsobují oddálení sousedních makromolekul mají za následek pokles mezimolekulárních sil a tím zhoršení většiny mechanických vlastností.
- **Zesíťované:** Vznikají propojením řetězců makromolekul vazbami, tím vzniká prostorová síť, která vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost proti zvýšené teplotě, avšak nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Síť mohou být řídké (elastomerní kaučukovité polymery) nebo husté (reaktoplasty).

Lineární



Rozvětvený krátkými řetězci



Rozvětvený dlouhými řetězci



Žebříkovitě rozvětvený



Hvězdicově rozvětvený



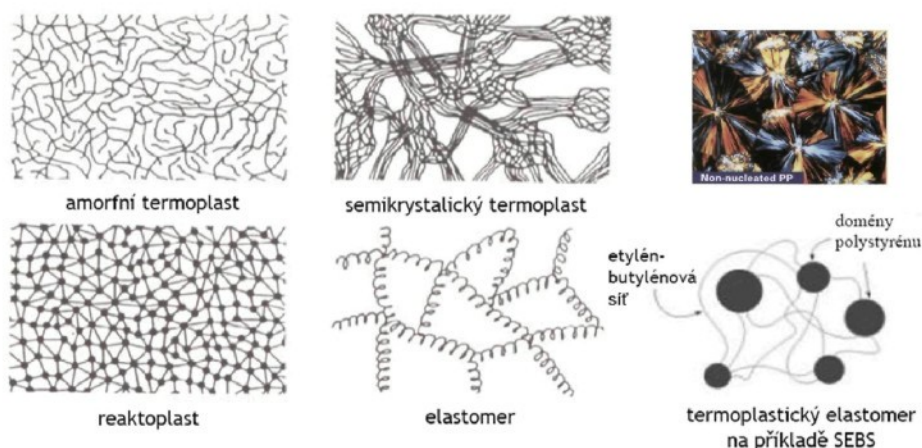
Zesíťovaný



Obr. 3-1: Molekulární struktura plastů – tvar makromolekul [2]

3.3 Nadmolekulární struktura - morfologie

Podle stupně uspořádanosti makromolekul rozdělujeme plasty na krystalické a amorfní. Lineární makromolekuly vytváří narozdíl od rozvětvených makromolekul uspořádanější nadmolekulární strukturu a zesíťované makromolekuly strukturu neuspořádanou. Termoplasty tak mohou mít amorfní nebo semikrystalickou nadmolekulární strukturu, zatímco reaktoplasty pouze strukturu amorfní [3, 5, 6].



Obr. 3-2: Nadmolekulární struktura plastů [6]

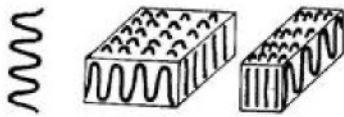
Rozdělení polymerů dle jejich nadmolekulární struktury (morfologie) :

- *Amorfní*: Makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Základním morfologickým útvarem této struktury jsou globuly (neboli klubíčka), které jsou vytvořeny z chaoticky stočených makromolekul. Do této skupiny patří např. PVC, PS, PMMA, PC, apod. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4 až 1,6) průhledné, resp. dle propustnosti světla čiré (92 % propustnosti světla), transparentní anebo průhledné (60 % propustnosti světla). Součinitel teplotní roztažnosti α je menší, než u semikrystalických polymerů. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesíťování T_g .



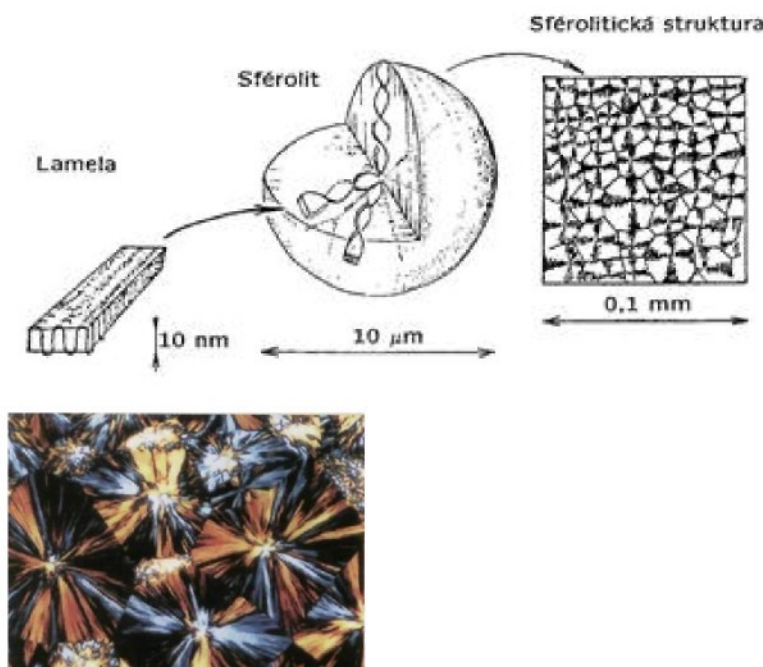
Obr. 3-3: Globula, uspořádání globul svazek

- *Krystalické*: Plasty, které vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90 %) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Nemůže nikdy dosáhnout 100 %, proto se krystalické plasty označují jako semikrystalické. Základním morfologickým útvarem jsou tzv. lamely, fibrily. Do této skupiny patří PE, PP, PA, PTFE, POM, atd. Jsou charakterizovány houževnatostí materiálu, pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Semikrystalické plasty jsou mléčně zakalené, index lomu je větší. Použitelnost semikrystalických plastů je do teploty tání T_m . Pak již dochází k jejich samovolné deformaci.

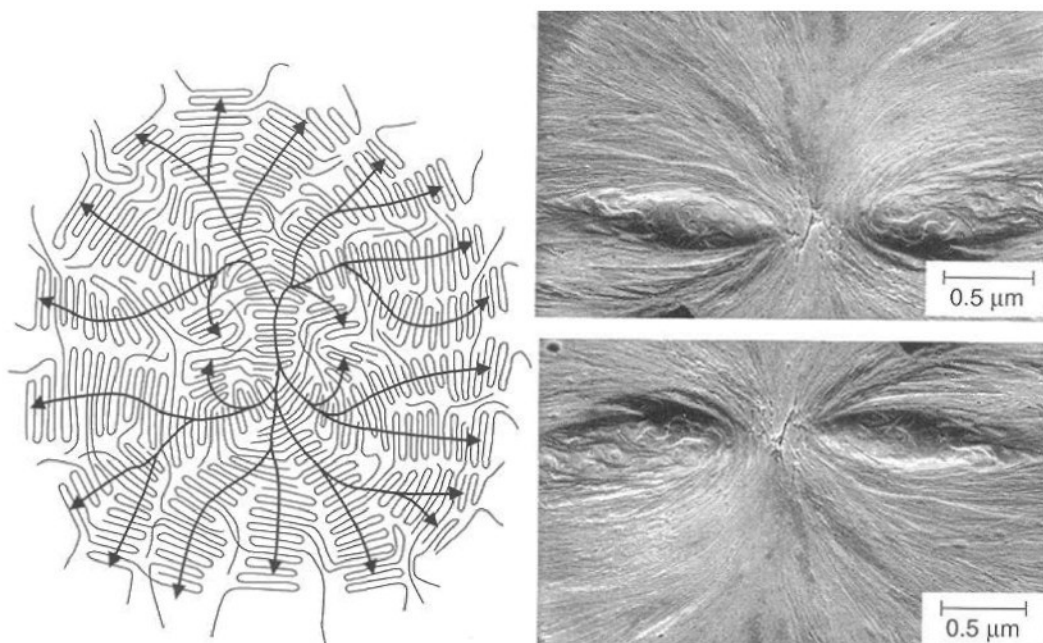


Obr. 3-4: Proužek, lamela, fibrila

U reálných výrobků se při tuhnutí tavenin polymerů vytvářejí polykrystalické útvary nazývané sférolity. Jedná se o shluky lamel, které vychází ze společného centra.

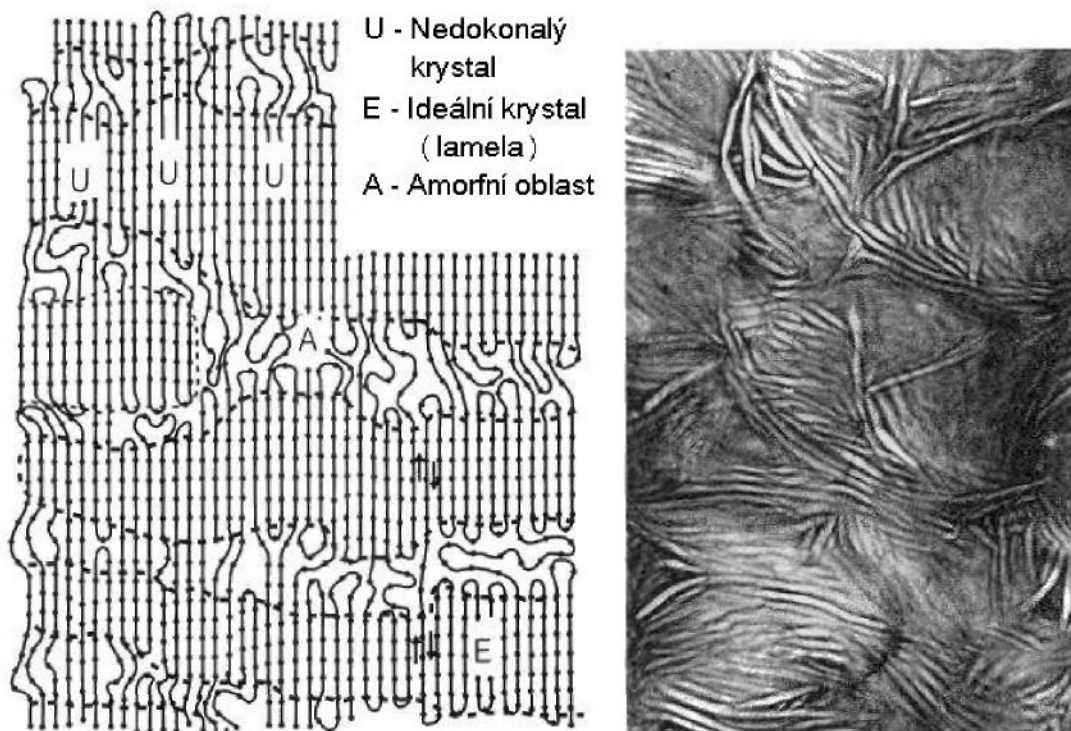


Obr. 3-5: Tvorba sférolitu pohled v polarizovaném světle [6]



Obr. 3-6: Sféroilitická struktura [6]

Krystalizující polymery nemají v reálných podmínkách technologického zpracování možnost dokonalé krystalizace. To znamená, že krystalizace se nezúčastní veškerá polymerní hmota, ale krystalizuje jen určité procento polymeru. Část takového polymeru je krystalická, zbylá část zůstává v amorfním stavu.



Obr. 3-7: Semikrystalická struktura [6]

Pro vznik semikrystalické struktury je nutná tvorba krystalizačních zárodků (tzv. nukleace), na nichž teprve poté rostou krystality. K nukleaci dochází při ochlazování taveniny, která má amorfni strukturu. Hlavní prvky nadmolekulární struktury se utvářejí v průběhu chlazení resp. ohřevu výrobku a to ve formě nebo mimo ni. Je-li krystalizace spojena s přeměnou fáze (polymer přechází ze stavu kapalného do tuhého) hovoříme o tzv. primární krystalizaci. Ta však ještě může pokračovat ve stavu tuhém (často i během několika měsíců) a nazývá se sekundární krystalizací. Jsou s ní spojeny nejen změny rozměrů, ale i vlastností výrobků a je tudíž jevem nežádoucím. Podmínky tuhnutí nejsou ve všech částech výrobku stejné a krystalizace je nerovnoměrná. Z technologického hlediska vzniká nesourodý, anizotropní materiál [3, 5].

3.4 Termodynamické vlastnosti plastů

Tepelné vlastnosti plastů jsou při zpracování plastů extruzí velmi důležité. Do vstupní části vytlačovacího stroje je polymer dodáván v tuhé fázi (granule, prášek, drt' recyklátu), poté je v přechodovém pásmu zahříván a přechází do stavu taveniny. Na výstupu z vytlačovacího stroje dochází k materiálové a teplotní homogenizaci, v tomto stavu je tavenina připravena k dalšímu zpracování. Poté co tavenina opustí vytlačovací hubici je opětovně chlazena a přechází zpět do stavu tuhého tělesa. Během celého procesu polymer podstupuje složité děje spojené se změnami fáze. Teplotní vlastnosti polymerů jsou rozhodující pro schopnost správné analýzy a popisu extruze jako celku [2].

4. Reologické vlastnosti tavenin plastů

Reologické chování taveniny hraje důležitou roli prakticky při všech zpracovatelských technologiích. Reologie popisuje závislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí, a protože smyková rychlost přímo ovlivňuje viskozitu taveniny, má tak na její tokové chování zásadní vliv. Grafickým vyjádřením těchto závislostí jsou *tokové křivky* (obr. 4-8, 4-9).

Reakce polymerních tavenin na působení napětí může za určitých podmínek vykazovat chování tuhého tělesa. Zda se látka (tavenina) chová jako tuhé těleso nebo kapalina určuje *Debořino číslo* [4].

$$De = \frac{\lambda}{\theta} \quad [4.1]$$

λ - relaxační čas [s]

θ - doba pozorování [s]

Relaxační čas je doba, za kterou při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého proběhne 63% všech napětíových změn. Relaxační charakteristiky určující paměť taveniny jsou ovlivněny velikostí a pružností polymerních řetězců. Například pro vodu $\lambda = 10^{-2}$ [s] a pro tuhou látku $\lambda = 10^2$ [let]. Pokud je De velmi malé, pak se látka chová jako kapalina. V případě, že je De velmi velké, pak chování látky vykazuje vlastnosti tuhého tělesa.

Matematickým vyjádřením tokových vlastností nízkomolekulárních kapalin při laminárním proudění je *Newtonův zákon*.

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [4.2]$$

τ - smykové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]

η - dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

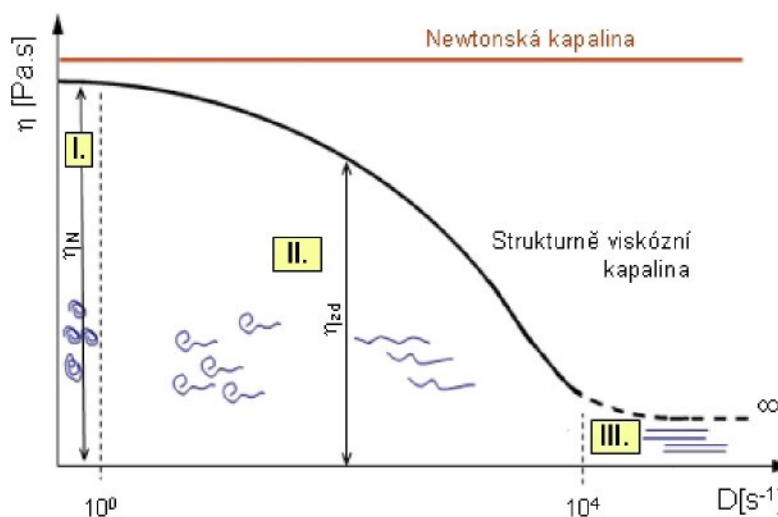
dv / dx – gradient smykové rychlosti [s^{-1}]

$\dot{\gamma}$ - smyková rychlost [s^{-1}]

U Newtonovských kapalin je dynamická viskozita při konstantní teplotě nezávislá na smykové rychlosti. Taveniny polymerů patří do kategorie

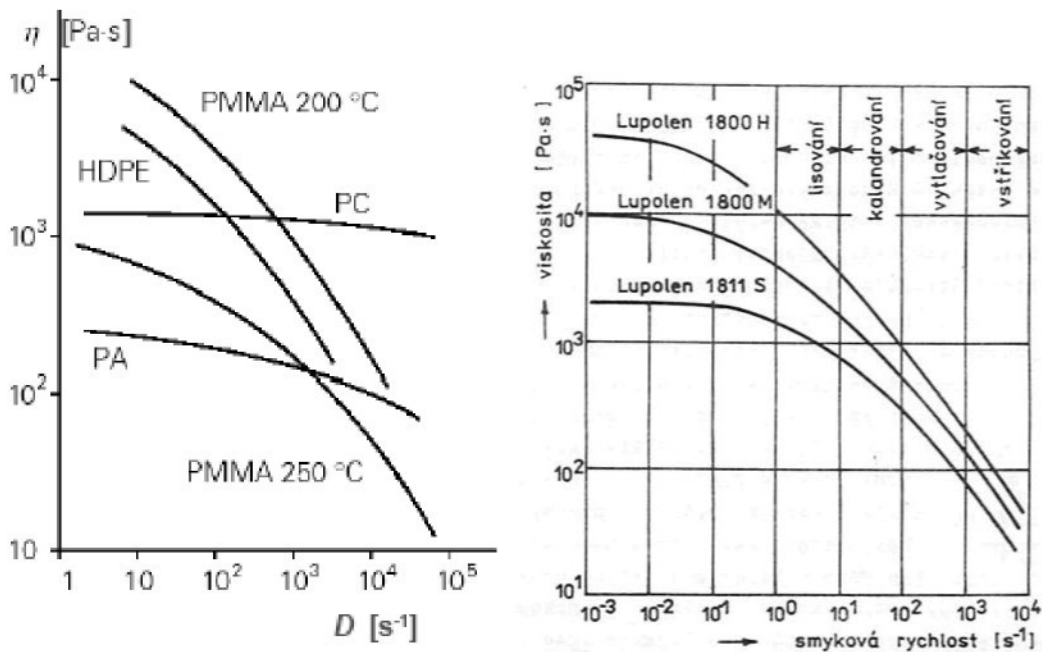
nenewtonovských kapalin a jejich viskozita je tudíž závislá na smykové rychlosti. Graficky ji lze rozdělit do tří oblastí [6, 13]:

- *I. Oblast maximální newtonovské viskozity:* Při nízkých smykových rychlostech lze považovat viskozitu za konstantní rovnou maximální newtonovské viskozitě. Makromolekuly mají tvar volně sbalených klubíček, což odpovídá maximální entropii systému.
- *II. Oblast strukturní viskozity:* V této oblasti dochází zvyšováním smykové rychlosti k poklesu viskozity. Taková viskozita je označována jako zdánlivá. Pokles viskozity je způsoben rozbalováním klubíček makromolekul ve směru toku což způsobuje jejich snadnější pohyb při toku.
- *III. Oblast nekonečného smyku:* Tato oblast odpovídá extrémním smykovým rychlostem, v nichž se viskozita stává opět na této rychlosti nezávislou. Tato viskozita je označována jako viskozita při nekonečném smyku a odpovídá stavu zcela rozbalených klubíček makromolekul. Tohoto stavu však v praxi nelze dosáhnout.



Obr. 4-1: Závislost dynamické viskozity tavenin na smykové rychlosti

Závislost viskozity různých typů tavenin na smykové rychlosti demonstruje obr. 4-2. Uvažovány jsou konstantní teploty.



Obr. 4-2: Závislost dynamické viskozity tavenin na smykové rychlosti rozdílných materiálů [3, 8]

Zpracovatelské technologie leží v oblasti strukturní viskozity čili v oblasti středních smykových rychlostí. Stejně tak technologie vyfukování je reologickým chováním taveniny ovlivňována a to zejména v té části procesu, kde dochází k tvorbě polotovaru (vytlačování parizonu). Citlivost taveniny na smyk je však u každého materiálu jiná viz. obr. 4-2. Uvedená závislost má vztah k formovatelnosti (schopnosti deformace) a také k výkonovým parametrům technologie extruzního vyfukování. Ve vytlačovacím stroji při střední smykové rychlosti, je tavenina středně viskózní. Když je dále protlačována vysokou rychlostí štěrbinou vytlačovací hlavy, její smyková rychlost se zvýší a nastane pokles viskozity. V další fázi procesu visí tavenina ve formě parizonu pod hlavou a nepůsobí tak na ni žádný smyk, tavenina se proto jeví jako vysoce viskózní [2, 10].

V oblasti středních a vyšších smykových rychlostí lze závislost smykového napětí na smykové rychlosti popsat *mocninovým vztahem* [3, 5]:

$$\dot{\gamma} = \Phi \cdot \tau^m \quad [4.3]$$

Φ – koeficient tekutosti – odpovídá smykové rychlosti při určité hodnotě smykového napětí

m – exponent mocninového zákona – odchylka tokového chování od Newtonovského ($m=1$)

Druhý tvar mocninového zákona lze formulovat:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad [4.4]$$

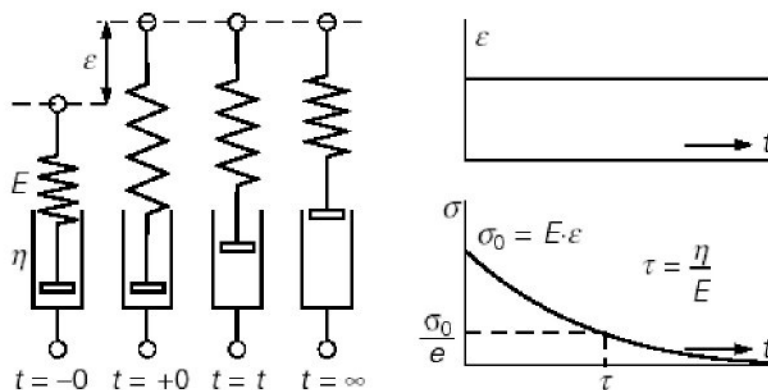
K – index konzistence – odpovídá smykovému napětí při jednotkové smykové rychlosti

n – index toku – odchylka tokového chování od Newtonovského ($n \neq 1$)

Tokové chování Newtonských kapalin je charakterizováno pouze jedinou reologickou konstantou – dynamickou viskozitou η , která je funkcí pouze teploty. Pro pseudoplastické kapaliny je k popisu chování nutná dvojice konstant. Jednou z nich je Φ a m , druhou možností je K a n . Koeficient tekutosti Φ a index konzistence K jsou funkcí teploty taveniny plast, indexy m a n závisí na druhu plastu a pro určitý rozsah teplot je možno je považovat za konstantní [3, 5].

4.1 Relaxace a viskoelasticita polymerních tavenin

Vlastností viskoelastických látek je relaxace, což je uvolňování napětí v tělese, které bylo deformováno na konstantní hodnotu deformace. Napětí v plastu vykazuje časovou závislost. Relaxace se znázorňuje Maxwellovým modelem – kombinací pístu a pružiny zapojených do série [3, 5].



Obr. 4-3 : Maxwellův model [3, 5]

$$\tau_{(t)} = \gamma \cdot G_{r(t)} \quad [4.5]$$

$\tau(t)$ – časově závislé napětí [Pa]

γ – deformace tělesa

$G_r(t)$ – relaxační modul - časově závislý modul pružnosti (exponenciálně se zmenšuje s časem)

Rychlost relaxace napětí po zastavení toku nezávisí o modelů na tom, jaká byla předchozí smyková rychlost. V praxi má však větší smyková rychlost při toku často za následek rychlejší relaxaci smykových i normálových napětí po zastavení toku. Tento jev patrně souvisí se změnami struktury taveniny účinkem velkých smykových rychlostí. Pokles obsahu fyzikálních uzlů (zapletenin) je možným vysvětlením [4].

Taveniny polymerů se vyznačují elasticitou, která se projevuje zvětšováním rozměrů po výstupu z vytlačovací hlavy nebo trysky, přičemž míra zvětšení je dána tlakem, kterým je tavenina tryskou protlačována. Elastické zvětšování rozměrů představuje určitou energii, kterou je nutno předat tavenině prostřednictvím vytlačovacího tlaku.

Celkový použitý tlakový rozdíl (spád) P_c se při toku viskoelastické taveniny kapilárou spotřebuje nejen na překonání viskózních odporů P v kapiláře, ale i na překonávání elastického odporu taveniny P_e při jejím vtlačování do kapiláry a na její vytlačování z kapiláry [3, 4].

Tlakovou bilanci lze vyjádřit vztahem:

$$P_c = P + P_e \quad [4.6]$$

P – tlaková ztráta pro překonání viskózního odporu [Pa]

P_e – tlaková ztráta pro překonání elastického odporu [Pa]

Po dosazení:

$$P_c = 2\tau \cdot \frac{L}{R} + P_e \quad [4.7]$$

P_c – celkový tlakový spád [Pa]

L/R – geometrie trysky [1]

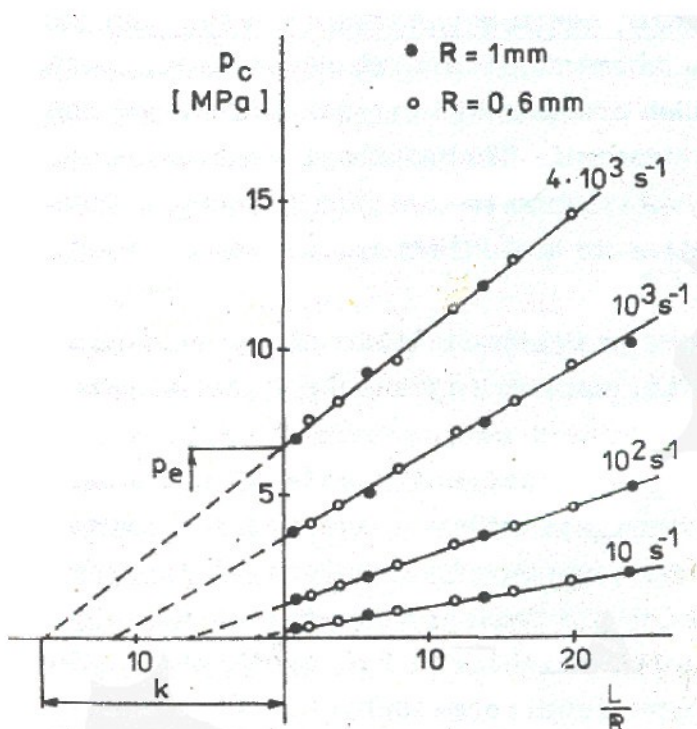
τ – smykové napětí [MPa]

Při konstantní hodnotě smykového napětí τ a tlakové ztrátě P_e je celkový tlakový rozdíl P_c lineární funkcí geometrie kapiláry $\frac{L}{R}$. Tlakový spád P_e na délce kapiláry nezávisí, avšak hodnota P s její délkou roste.

Pro výpočet tlakového spádu je zavedena tzv. *Bagleyho korekce*, která odpovídá podílu $\frac{L}{R}$ prodloužené trysky. Po zavedení korekce lze vztah 4.7 uvést:

$$P_c = 2\tau \cdot \left(\frac{L}{R} \right) + k \quad [4.8]$$

k – Bagleyho korekce



Obr. 4-4 : Stanovení Bagleyho korekce [3]

Korekce k je stanovena experimentálně měřením závislosti objemového průtoku taveniny na tlakovém spádu P_c za použití kapilár různého poměru $\frac{L}{R}$. Vynesením závislosti tlakového spádu na geometrii kapilár pro zvolené

smykové rychlosti a extrapolací přímek na hodnotu $\frac{L}{R} = 0$ zjistíme hodnotu tlakového spádu P_e připadajícího na elastické narůstání profilu. Další extrapolací do oblasti záporných hodnot pro $P = 0$ lze odečíst hodnotu korekce k , která má význam efektivní hodnoty $\frac{L}{R}$ odpovídající tlakové ztrátě P_e . Experimentálně stanovené hodnoty k s rostoucí smykovou rychlostí vzrůstají a dle typu polymeru nabývají hodnot od 1 až cca 15.

Jev narůstání je v podstatě způsoben elastickým zotavením po ukončení toku, uvolněním elastické deformační energie obsažené v tavenině před výstupem z kapiláry [3, 4, 5].

4.2 Tok polymerních tavenin

Znalost tokových vlastností polymerů je důležitá pro analýzu procesu extruze, dále umožňuje také optimalizaci konstrukce šneků, vytlačovacích strojů a procesních podmínek [2, 9].

4.2.1 Smykový tok

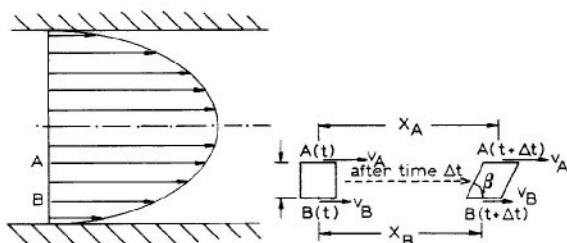
Smykový (unášivý) tok je způsoben relativním pohybem jedné nebo více ploch v kontaktu s plochou, na jejímž povrchu se nachází tekutina. Změna rychlosti je v tomto případě pouze v kolmém směru. Dvě hlavní plochy, které přichází do styku s polymerem během extruze jsou povrch šneku a povrch pracovního válce. Zatímco šnek rotuje v pracovním válci jsou oba tyto povrchy v relativním pohybu způsobujícím smykový tok taveniny polymeru. Viz. také popis v kapitole 2.4.1.

4.2.2 Tlakový tok

Jedná se o tok způsobený přítomností gradientu tlaku v tavenině neboli místními rozdíly v tlaku během extruze (viz. také popis v kapitole 2.4.1). Tlakem řízený tok má parabolický rychlostní profil a charakterizuje tok v trubce. Pohyb taveniny polymeru vytlačovací hlavou je také způsoben pouze tlakovým tokem čili rozdílným tlakem na vstupu a na výstupu z hlavy. Průtok taveniny je určen tlakem na vstupu do vytlačovací hlavy, který je nazýván vytlačovacím tlakem.

4.2.3 Smyk

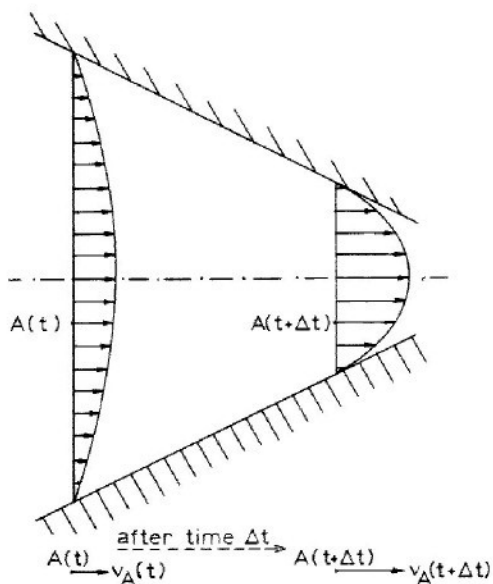
Smykem se rozumí vznik rozdílu rychlostí ve směru kolmém na směru toku. Tavenina je namáhána smykem pokud dojde k vytvoření rychlostního profilu dle následujícího obrázku:



Obr. 4-5: Rychlostní profil a namáhání taveniny smykem v kruhovém kanálu [2]

4.2.4 Elongační tok

Elongačním tokem se rozumí vznik rozdílu rychlostí ve směru toku. Změna rozdílu rychlostí částice je pouze ve směru jejího toku (ve smyku je nulová). K elongaci dochází, jestliže proběhne změna rychlostního profilu dle následujícího obrázku:



Obr. 4-6: Rychlostní profil taveniny v konvergentním kruhovém kanálu [2]

4.2.5 Tok materiálové zátky polymeru

Tento typ toku nastane, jestliže se jednotlivé elementy tekutiny pohybují stejnou rychlostí – nepůsobí na ně smyk. Tok zátky polymeru se netýká toku polymerních tavenin, ale užívá se k popisu pohybu tuhé fáze polymeru (granulátu) ve vstupní zóně jednošnekových vytlačovacích strojů kde je po splnění určitých předpokladů základem jeho pohybu viz kapitola 2.4.

4.2.6 Smyková rychlost

Smyková rychlost je rozdíl rychlosti za jednotku času ve směru kolmém vzhledem ke směru toku. Rychlost smyku neboli smyková rychlost je jedním z nejdůležitějších parametrů v oblasti zpracování polymerních tekutin. Smyková rychlost se označuje řeckým písmenem gama s tečkou, která označuje časovou

derivaci $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$. Na základě obrázku č. 4-5 je smyková rychlost dána [2, 9]:

$$\dot{\gamma}_{AB} = \frac{v_A - v_B}{AB} \quad [4.9]$$

Rovnice 4.9 však platí pouze pro velmi malé normálové vzdálenosti AB. Přesněji lze smykovou rychlost vyjádřit:

$$\dot{\gamma}_{AB} = \lim_{AB \rightarrow 0} \frac{v_A - v_B}{AB} = \frac{dv(x)}{dy} \quad [4.10]$$

Z rovnice 4.10 je zřejmé, že lokální smyková rychlost je rovna lokálnímu gradientu rychlostního profilu. To znamená, že pokud je znám rychlostní profil, pak může být také definována smyková rychlost.

4.2.7 Smykové přetvoření

Smykové přetvoření je bezrozměrné číslo udávající přesunutí elementu polymeru v kolmém směru vzhledem ke směru toku za určitou časovou jednotku. Označuje se řeckým písmenem gama a jeho vztah ke smykové rychlosti je následující [2, 9]:

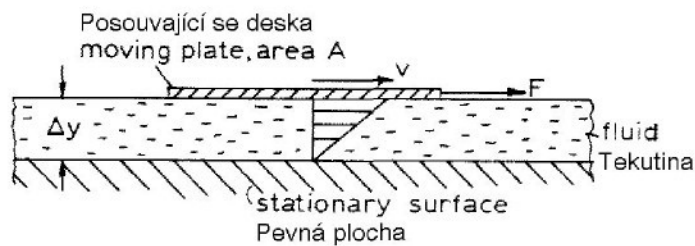
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{a} \quad \gamma = \int \dot{\gamma} dt \quad [4.11]$$

Na základě obrázku č. 4-5 může být smykové přetvoření definováno:

$$\gamma_{AB} = \frac{x_A - x_B}{AB} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \Big|_{AB} = \tan \beta \quad [4.12]$$

4.2.8 Smykové napětí

Jedná se o napětí potřebné k dosažení určité smykové deformace. V případě, že je tekutina namáhána smykem, je k dosažení deformace potřebná určitá síla. Tato síla působí na danou plochu, kde způsobuje smykové napětí. Smykové napětí se označuje řeckým písmenem tau. Jednoduchý příklad působícího smykového napětí je vyznačen na následujícím obrázku [2, 9]:



Obr. 4-7: Jednoosá smyková deformace [2]

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [4.13]$$

Smyková rychlost je v tomto případě dána:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{\Delta y} \quad [4.14]$$

v – rychlost pohybu desky

4.2.9 Normálová napětí při ustáleném toku

Normálová napětí vynikající při smykové deformaci jsou úměrná druhé mocnině smykové deformace. Z teorie viskoelastických kapalin plyne analogický vztah, kdy rozdíly normálových napětí jsou úměrné druhé mocnině smykové rychlosti. Měření normálových napětí představuje tedy jednu z cest ke studiu elasticity tavenin [2, 9].

4.2.10 Dynamická viskozita

Dynamická viskozita je mírou odolnosti proti toku. Číselně je vyjádřena poměrem smykového napětí ke smykové rychlosti [2, 9]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [4.15]$$

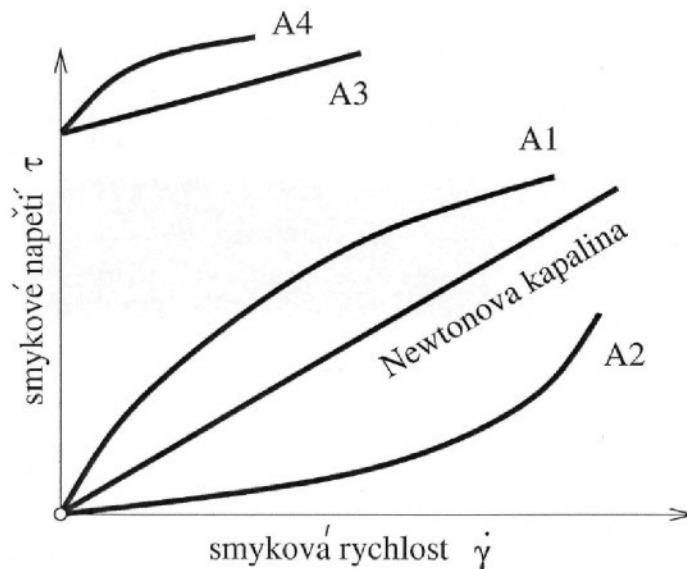
Dynamická viskozita je označována řeckým písmenem eta a jednotkou Pa·s. Za účelem stanovení dynamické viskozity tekutiny musí být nejprve určena smyková rychlost pro určitou smykovou deformaci a také odpovídající smykové napětí. Převrácená hodnota dynamické viskozity $\varphi = \frac{1}{\eta}$ se nazývá *fluidita* (tekutost). Pro účely stanovení viskozity se používají speciální přístroje – reometry.

4.2.11 Newtonovské tekutiny

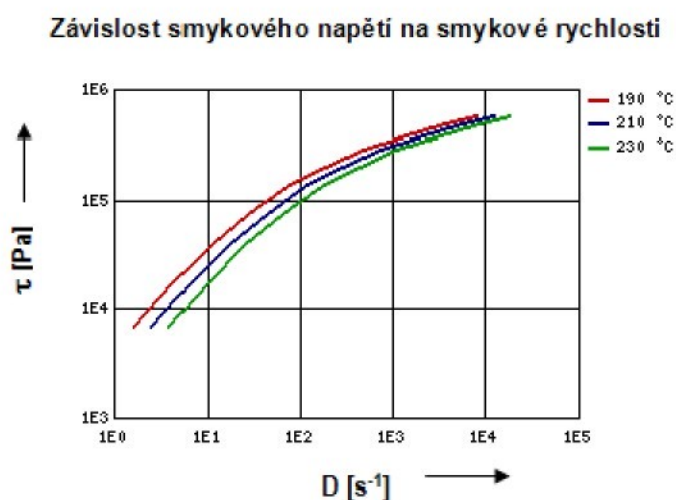
Jedná se o tekutiny, u kterých je viskozita nezávislá na smykové rychlosti. Mnoho nízkoviskózních tekutin a plynů se chová jako Newtonovská tekutina. Pokud znázorníme smykové napětí ve vztahu ke smykové rychlosti, pak Newtonovská tekutina vykazuje lineární závislost (obr. 4-8). Znázornění závislosti smykového napětí na smykové rychlosti nazýváme *toková křivka* [2, 10].

4.2.12 Nenewtonovské tekutiny

Narozdíl od Newtonovských tekutin je u nenewtonovských tekutin viskozita závislá na smykové rychlosti. Taveniny vysokoviskózních (pseudoplastických) polymerů se chovají tak, že viskozita klesá s růstem smykové rychlosti. Dilatanční polymery se naopak chovají tak, že viskozita se smykovou rychlostí roste. Uvedené závislosti jsou graficky uvedeny na obr. 4-8 [2, 3, 9].



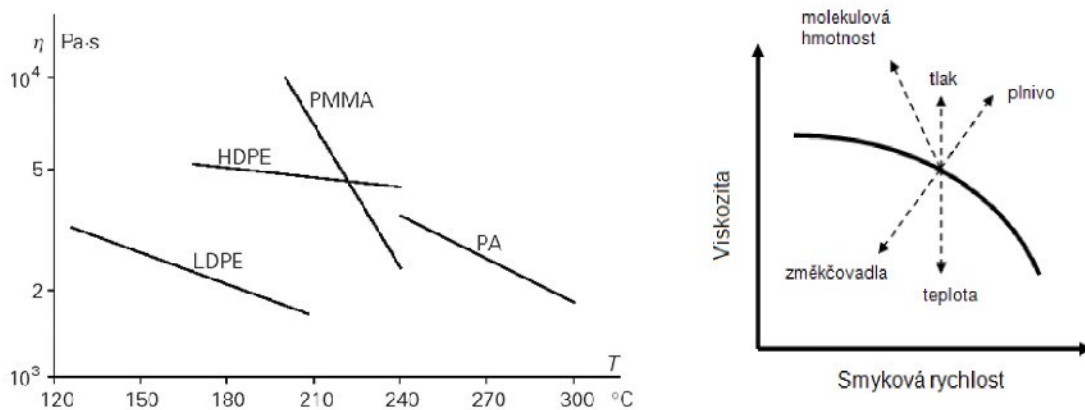
Obr. 4-8: Tokové křivky kapalin : A1 – pseudoplastická kapalina, A2 – dilatantní kapalina, A3 – Binghamova kapalina, A4 – Cassonova kapalina. [4]



Obr. 4-9: Tokové křivky (POM – BASF Ultraform H4320) [6]

4.3 Faktory ovlivňující tokové vlastnosti polymeru

Tak jako u všech polymerních materiálů, má zvýšení teploty za následek snížení viskozity, zatímco zvýšení tlaku má opačný účinek. Další faktory ovlivňující viskozitu jsou znázorněny na obr. 4-10.



Obr. 4-10: Vliv teploty a dalších vybraných faktorů na viskozitu polymeru

Jak je patrné z obrázku, tak zpracovatelnost do značné míry závisí také na molekulové hmotnosti (délce řetězce). Jakékoli prodloužení řetězce způsobí zvýšení počtu zapletených míst, což vede ke zvýšení viskozity [3, 4, 5].

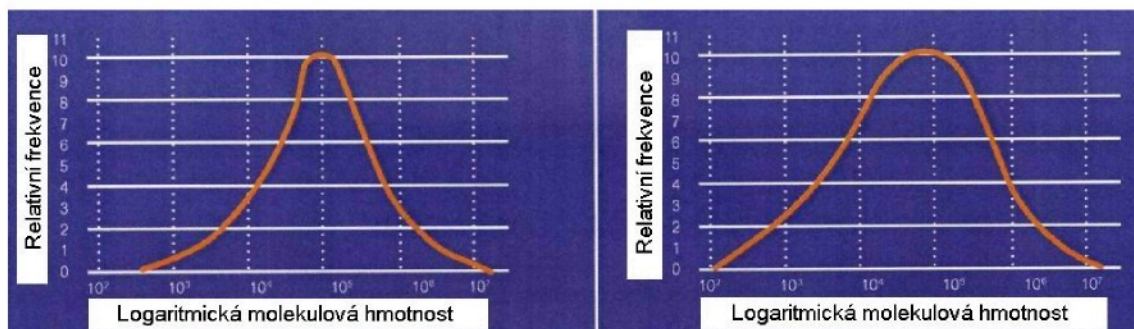
4.3.1 Distribuce molekulové hmotnosti

Molekuly ve vzorku polymeru nemají stejnou délku a mohou se skládat ze stovek až milionů monomerních jednotek. Tyto rozdíly zahrnuje vliv distribuce molekulové hmotnosti (Obr. 4-11) [2, 27, 28].

Úzká distribuce znamená, že všechny řetězce mají podobnou délku a naopak široká distribuce znamená značné rozdíly v délce molekuly. Distribuce molekulové hmotnosti ovlivňuje jak zpracovatelské vlastnosti, tak i vlastnosti konečného výrobku. Nízké a střední molekulové frakce odpovídají za snadnější technologické zpracování a vyšší tvrdost výrobku. Naopak vysokomolekulární frakce zabezpečují dobré mechanické vlastnosti jako je rázová pevnost, odolnost proti krípu, krutu a korozi za napětí.

Čím je distribuce molekulových hmotností užší, tím je:

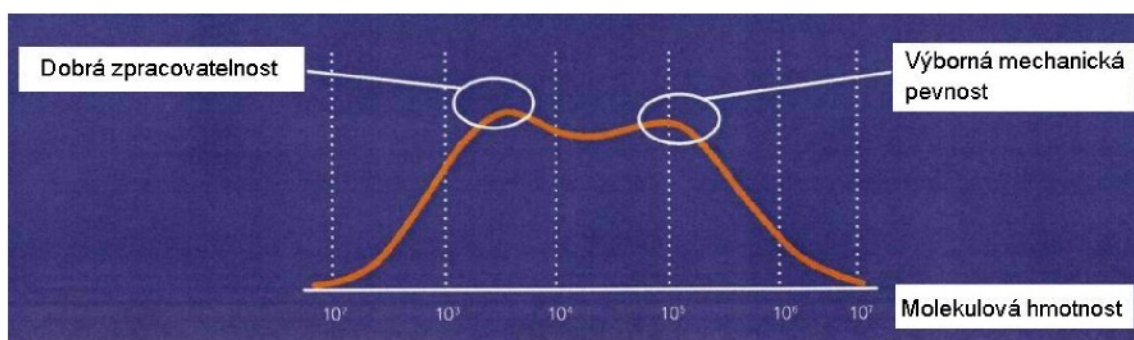
- Horší technologická zpracovatelnost
- Nižší vnitřní pnutí
- Vyšší tažnost taveniny



Obr. 4-11: Úzká (vlevo) a široká (vpravo) distribuce molekulových hmotností PE-HD [28]

Výsledkem uvedených vlastností je, že toková křivka materiálu s širokou distribucí molekulových hmotností je odlišná od tokové křivky materiálu s úzkou distribuční křivkou.

Jednou z nejdůležitějších vlastností PE-HD je jeho vysoká mechanická pevnost spolu s jeho lehkou zpracovatelností. Právě těchto vlastností je možné dosáhnout použitím bimodálního PE-HD. Nízkomolekulární komponenty zajišťují dobrou zpracovatelnost, zatímco vysokomolekulární poskytují vynikající mechanickou pevnost (Obr. 4-12)



Obr. 4-12: Distribuce molekulových hmotností bimodálního PE-HD [28]

4.3.2 Index toku taveniny

V praxi se tokové vlastnosti roztavených polymerů posuzují na základě *indexu toku taveniny (ITT)*. Normou jsou definovány následující vyjádření indexu toku taveniny [7]:

- *MFR – Hmotnostní index toku taveniny* [g/10 min] – (melt flow rate)
- *MVR – Objemový index toku taveniny* [cm³/10 min] – (melt volume rate)

V případě MFR udává množství taveniny v gramech, které proteče tryškou za 10 minut při předepsaných podmínkách zkoušky. Měří se na vytlačovacím plastometru při dohodnuté teplotě taveniny, při konstantní hodnotě tlakového spádu a s použitím standardní trysky (L = 8 mm, D = 2,1 mm). Vyšší hodnota ITT označuje polymer s vyšší tekutostí.

Jedná se v podstatě o technologickou zkoušku určenou k posouzení vhodnosti použití určitého polymeru pro danou technologii. Index toku taveniny je vhodný zejména pro hodnocení stejnoměrné kvality materiálu, porovnání plněných a neplněných plastů a dále také pro hodnocení kvality výrobního procesu [3, 5, 7].

5. Průvodní jevy spojené s extruzí parizonu

Formování parizonu představuje průtok taveniny plastu štěrbinou vytlačovací hlavy. Tato štěrbina je tvořena kombinací vytlačovací hubice a vytlačovacího trnu. Tyto součásti tvoří výstupní část vytlačovací hlavy. Průtok taveniny tímto mezikružím reprezentuje několik důležitých aspektů, které mají přímý vztah k toku taveniny [2, 9]:

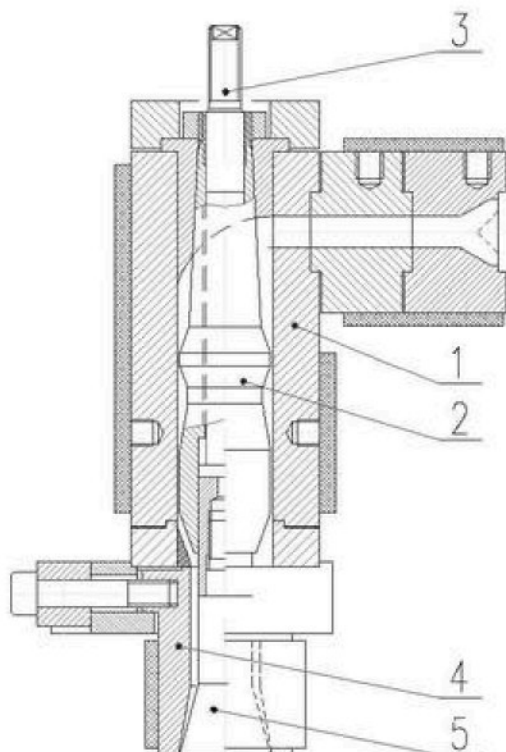
- Tlaková ztráta (tlakový spád)
- Síly působící na vytlačovací trn
- Distribuce rychlostí toku taveniny v mezikruhovém štěrbině

Vytlačovací hubice tvarující parizon je v podstatě zónou spotřeby tlaku, který byl vytvořen zónách předcházejících – dochází k tlakové ztrátě. Tlak ve vytlačovací hlavě představuje sílu potřebnou k protlačení taveniny plastu štěrbinou vytlačovací hubice a není určen vytlačovacím strojem jako takovým, ale právě vytlačovací hlavou a hubicí. Parametry ovlivňující tlak ve vytlačovací hubici jsou:

- Geometrie tokových cest vytlačovací hlavy
- Tokové vlastnosti taveniny polymeru
- Rozložení teploty v polymeru
- Průtok taveniny plastu vytlačovací hlavou

5.1 Tvarování parizonu

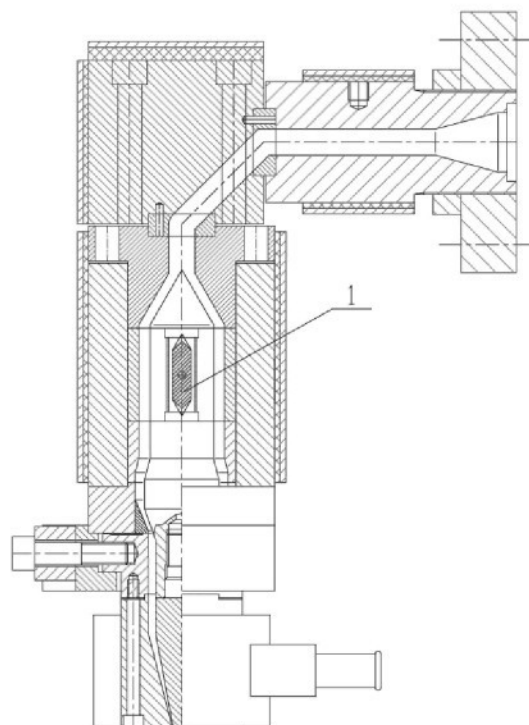
Za účelem tvarování parizonu se používají příčné vytlačovací hlavy. Jejich konstrukce na chování parizonu významný vliv. Pokud se k rozložení toku použije dělič taveniny, vytvoří se na výstupu z děliče svarové linie. Nedojde k obnovení homogenního toku taveniny a z tohoto důvodu může dojít ke stranovému zeslabení parizonu a ve svém důsledku také na vyfukovaném výrobku v blízkosti svarové linie [1, 2].



Obr. 5-1: Vytlačovací hlava s pinolou [23]

1 – Těleso hlavy, 2 – Pinola (Jádro), 3 – Táhlo

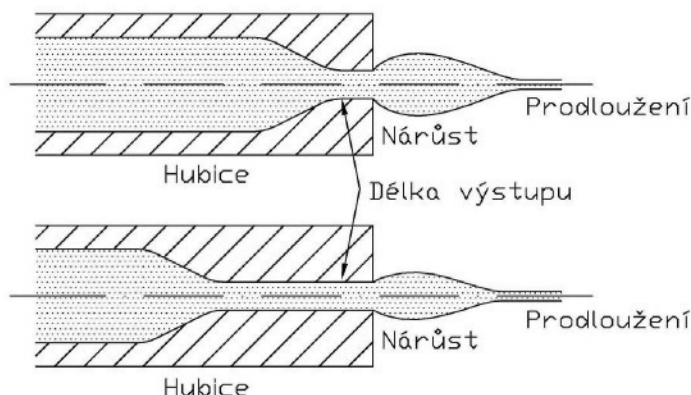
4 – Vytlačovací hubice, 5 – Vytlačovací trn

Obr. 5-2: Vytlačovací hlava s děličem
taveniny [23]

1 – Dělič taveniny

Tok taveniny v hlavě ovlivňuje vlastnosti parizonu také vlivem změn smykové rychlosti v určitých partiích hlavy. Účinky tohoto vlivu jsou nejvýraznější u rozvětvených lineárních polymerů s velkou molekulovou hmotností. Je to důsledkem zatím zcela nevysvětlených molekulárních mechanismů, ale působení vysoké smykové rychlosti mění strukturu taveniny a snižuje intenzitu interakcí mezi molekulami. Tomuto ději se také říká „rozplétání molekul“. Tento vliv je vratný a je-li plast, v němž vlivem smyku změny nastaly, zahříván po nějakou dobu nad teplotou tání, obnoví se struktura, jaká byla před působením smyku. Čas, který je k takové obnově potřebný je však často mnohem delší než doba průchodu taveniny hlavou a prodlevy před samotným tvarováním parizonu ve formě. Tavenina tedy může prodělat značné změny působením smyku ve vytlačovací hlavě. Změny vlivem smyku snižují pružnost a mohou také způsobit pokles viskozity, zvláště pokud jde o polymery s rozvětveným řetězcem [1, 2, 10].

Další způsob, kterým tok v hlavě ovlivňuje chování parizonu je orientace molekul. Ta nastává v místě výstupu z hlavy při narůstání parizonu. Nenewtonské chování plastů tok taveniny hlavou komplikuje. Tok na vstupu do hlavy, kde se proudnice rychle sbíhají, působí ve směru toku značné napětí. To způsobuje intenzivní orientaci molekul, a jestliže by mohla tavenina ihned vytékat přes nějakou trysku, bylo by narůstání zvláště intenzivní. V případě, že za vstupním otvorem následuje dlouhá přímá sekce (např. kapilární, nebo přímá mezikruhová), uskuteční se proces molekulární relaxace vedoucí k destrukci orientace, k níž došlo ve vstupu. Jestliže je hlava delší, míra narůstání bude menší (obr. 5-3). Působení smyku v hubici současně způsobuje určitou axiální orientaci. Také ve velmi dlouhé štěrbině stále zůstává výrazné narůstání způsobené tímto smykovým tokem (Tab. 5-1). Jestliže je součástí hlavy nějaká rozšířená nebo zúžená část, bude tam působit napětí, které způsobí určitou orientaci, jejíž směr závisí na detailech konstrukce. Z těchto důvodů je narůstání parizonu citlivou záležitostí při konstrukci vytlačovacích hlav.

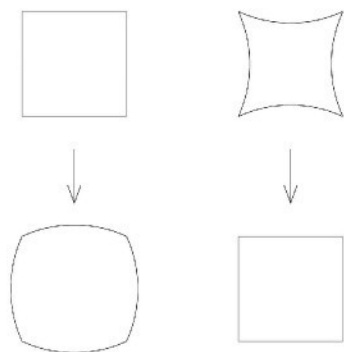


Obr. 5-3 : Vliv tvaru trysky na tvar vytlačovaného výrobku.[2]

Tab. 5-1: Vliv smykové rychlosti na poměr narůstání za hubicí při teplotě 200 °C [1]

Plast	Smyková rychlost [s^{-1}]			
	10	100	400	700
PMMA	1,17	1,27	1,31	-
LDPE	1,45	1,58	1,71	1,96
HDPE	1,49	1,92	2,15	-
PP-kopolymer	1,52	1,84	2,1	-
PP-homopolymer	1,61	1,9	2,05	-
PS	1,22	1,4	-	-
PVC	1,35	1,5	1,52	1,53

Vliv na chování taveniny má také tvar ústí hlavy - trysky (Obr. 5-4). Vliv tvaru trysky souvisí se stavem taveniny a s konstrukcí celé hlavy (délky výtokového kanálu, atd.). Pomalé chlazení může mít výrazný vliv na rozměry vytlačovaných výrobků, zejména u silnostěnných dílů. Pod pojmem pružnost taveniny se rozumí to, že se materiál vlivem smrštění nezúží jednoduchým proporcionálním způsobem. Výskyt těchto chyb je výrazně menší u kruhových vytlačovaných profilů, proto význam tohoto vlivu u vytlačování parizonu klesá [1, 2].



Obr. 5-4: Vliv tvaru trysky na tvar vytlačovaného výrobku. [1]

V současnosti neexistuje spolehlivá metoda předvídání těchto vlastností pro danou hlavu, formu, typ plastu a dané provozní podmínky. Další komplikace spočívá v tom, že jakmile tavenina opustí hubici, aby vytvořila parizon, začne na ni působit tíhová síla, která způsobí jeho protažení. Výsledkem je vytvoření parizonu, který má ve své horní části menší tloušťku než dole. Tvar parizonu v okamžiku vyfukování je tedy výsledkem souběžně probíhajících procesů protahování a narůstání.

Vzhledem ke složité situaci a ke složitým reologickým vlastnostem taveniny není možné vyprojektovat vyfukovací stroj s plastikační jednotkou a hlavou tak, aby měl parizon požadovaný tvar a rozměry v okamžiku vyfukování. Tyto rozměry ale mají rozhodující význam a vliv na rovnoměrnost tloušťky stěny výsledného produktu. Z tohoto důvodu jsou soudobé vyfukovací stroje obvykle vybaveny zařízením pro regulaci tloušťky stěny parizonu. To umožňuje měnit geometrii výstupu z hlavy (mezikruží) v průběhu vytlačování parizonu a tím regulovat rozměry a tvar parizonu tak, aby odpovídaly požadavkům. Programování profilu parizonu nemůže kompenzovat takové vlastnosti plastu, které jsou pro daný proces zásadně nevhodné. Proto je užitečné podrobněji prozkoumat proces narůstání a protahování parizonu [1, 2, 10].

5.2 Narůstání parizonu

Tloušťku stěny vyfukovaného výrobku je možno uvést do vztahu s poměrem narůstání parizonu. V souladu s Obr. 5-5 je narůstání parizonu dáno rovnicí [1]:

$$B_t = \frac{h_p}{h_d} \quad [5.1]$$

a narůstání průměru parizonu:

$$B_p = \frac{D_p}{D_d} \quad [5.2]$$

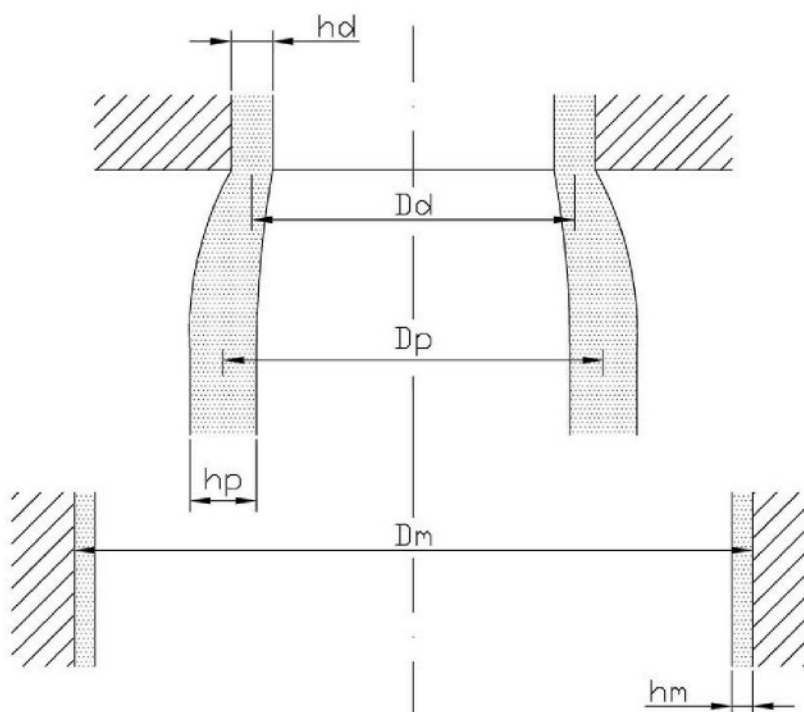
Pomocí vztahu:

$$B_t = B_p^2 \quad [5.3]$$

dojdeme k výrazu:

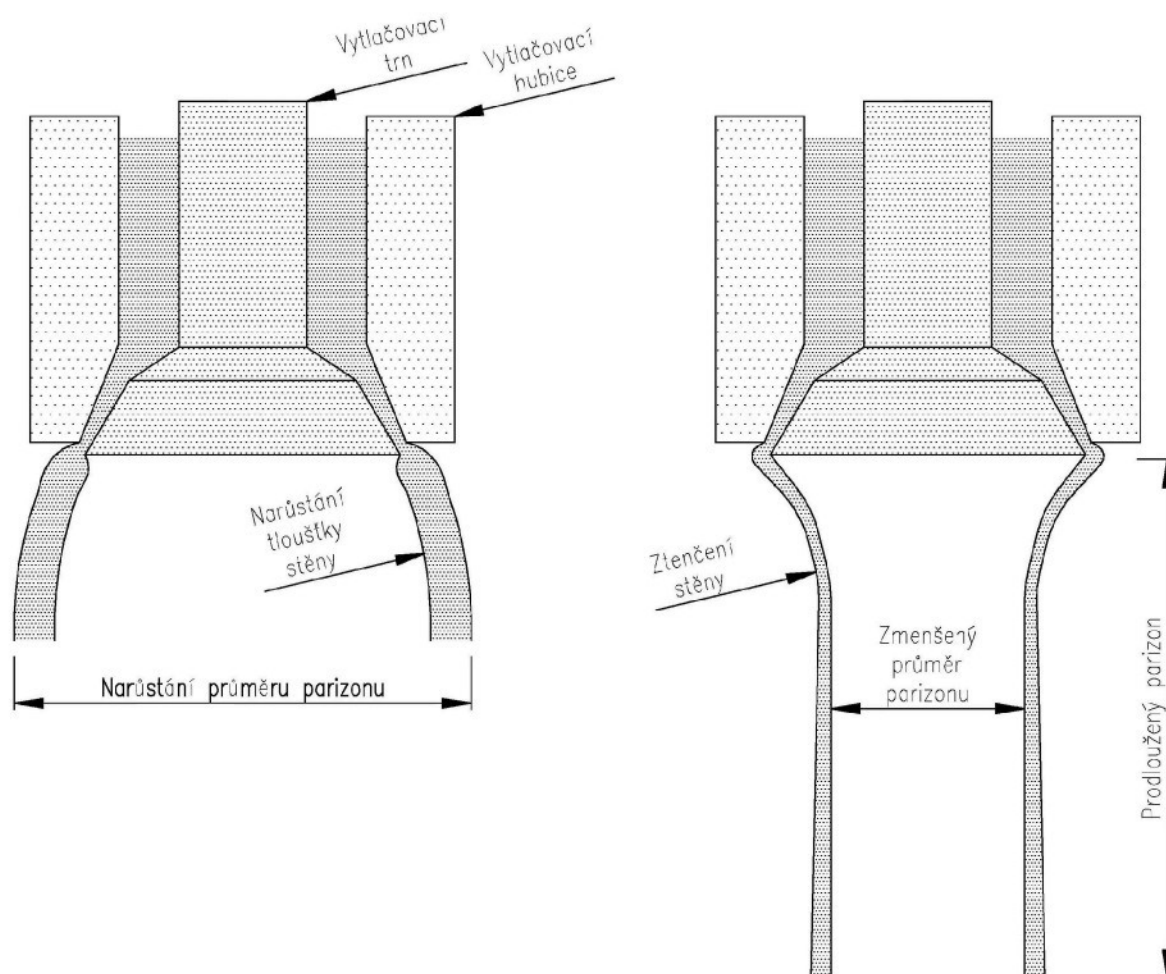
$$h_p = h_d \cdot B_p^2 \quad [5.4]$$

Poměr narůstání B_p závisí na vratné deformaci, kterou je možno experimentálně měřit.



Obr. 5-5: Vztah tloušťky, poměru narůstání parizonu a vyfukovaného výrobku [1]

Parizon je ve formě taveniny vytlačován svisle do volného prostoru a na jeho chování se projevuje vliv gravitační síly. Gravitační síla způsobuje deformaci, které říkáme protažení nebo prodloužení parizonu. Toto protažení může v extrémním případě způsobit i tzv. ztenčení parizonu, což znamená, že vlivem vlastní tíhy může dojít i k nekontrolovatelnému zmenšení tloušťky stěny parizonu i jeho průměru (obr. 5.6). Protahování parizonu se začne projevovat až při dosažení určité délky, protože s rostoucí délkou roste hmotnost parizonu a tudíž i velikost gravitační síly, která na něj působí. Proto je protahování u krátkého parizonu prakticky zanedbatelné ale naopak u parizonu dlouhého je to jev, se kterým je nutné počítat, jelikož by mohl vážně narušit stabilitu procesu vyfukování.



Obr. 5-6: Viskoelastické jevy - narůstání, protažení a ztenčení parizonu [1]

K těmto jevům dochází v důsledku charakteristických vlastností polymerů:

- viskoelastická
- reologie tavenin polymerů

O tom, jak se jednotlivé jevy budou projevovat, rozhoduje několik faktorů :

- výběr materiálu (hustota, ITT, molekulová hmotnost, distribuce molekulových délek apod.
- technologické parametry (teplota, tlak, smyková rychlost, čas)
- geometrie a materiál trysky (tvar tokového kanálu, materiál trysky, drsnost povrchu, délka kanálu apod.)

Složitost uvedeného jevu (narůstání průměru, narůstání tloušťky stěny a protahování) se projevuje tím, že působí současně a vzájemně se ovlivňují. Tím je možnost jakékoliv předpovědi tvaru a rozměrů parizonu (pro určitou vytlačovací hlavu) záležitostí značně složitou a dosud neexistuje spolehlivá metoda, která by na základě známých reologických vlastností umožňovala s dostatečnou přesností předpovědět tyto geometrické změny. Proto se používají metody empirické, například pořizování videozáznamů délky parizonu v závislosti na čase [1, 10].

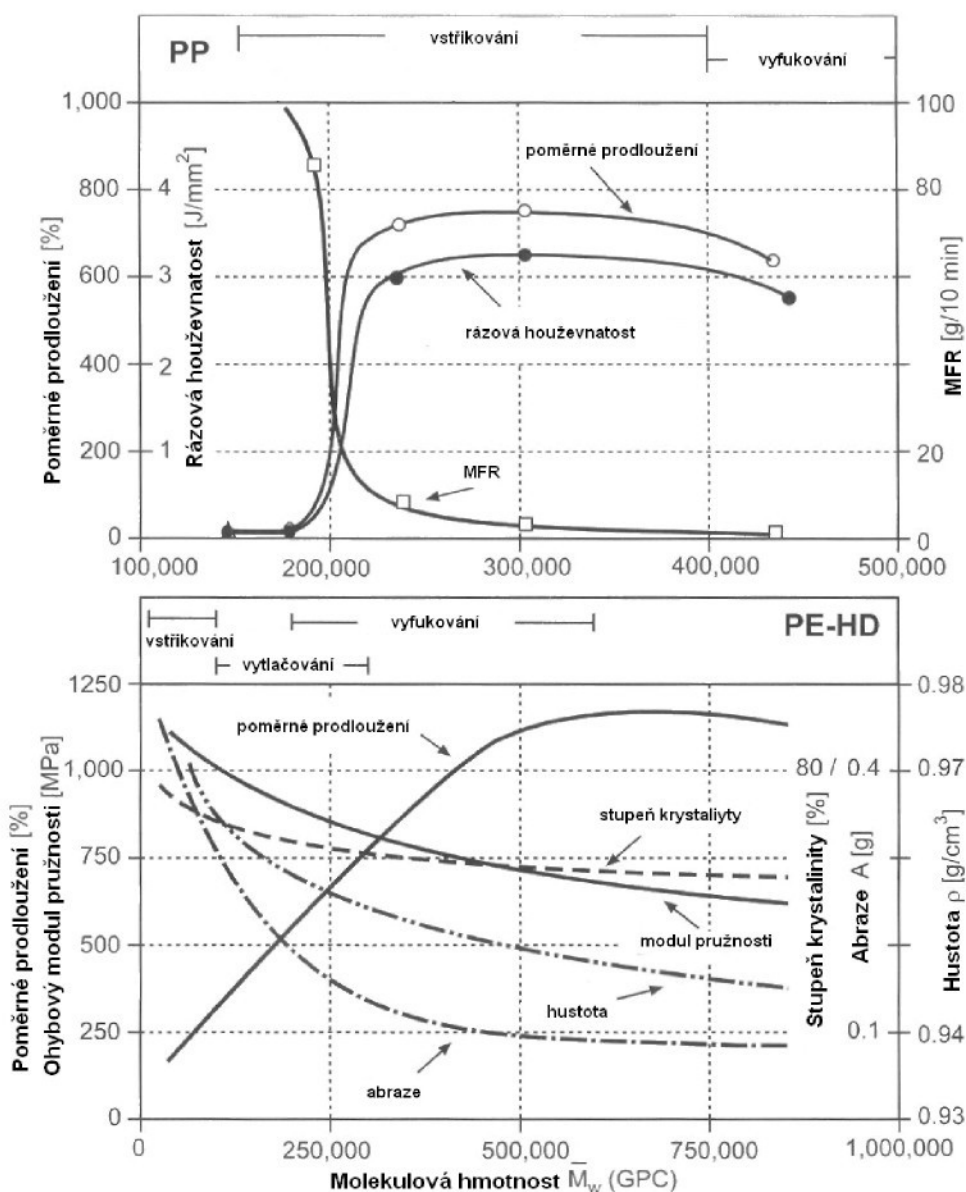
5.2.1 Vliv materiálu na narůstání parizonu

Výběr materiálu má na narůstání a protahování parizonu zásadní vliv. Tak jak se jednotlivé materiály od sebe liší svými vlastnostmi, tak se liší i jejich míra narůstání a protahování. V průmyslové praxi se ve většině případů extruzního vyfukování používají polyolefiny a to zejména polyetylén a polypropylén. Důvodů rozdílného narůstání rozdílných materiálů je více. Jsou způsobeny například rozdílnou hustotou, molekulovou hmotností, velikostí intermolekulárních sil, atd. Liší se nejen narůstání a protahování dvou rozdílných materiálů, ale do určité míry se může lišit i narůstání u dvou stejných materiálů, například dvou polyetylénů. Z toho vyplývá, že na narůstání nemá vliv pouze chemické složení plastu, ale i molekulární struktura (tvar makromolekul) a distribuce molekulových hmotností [1, 2].



Hustota plastů je dána jejich chemickým složením, a protože jejich základem jsou látky s nízkou atomovou hmotností (konkrétně uhlík a vodík), což způsobuje mimo jiné i menší intermolekulární síly, je jejich hustota nízká. Nejmenší hustotu vykazují právě u vyfukování hojně používané polyolefiny. Hustota polymeru vzroste zabudováním atomů o vyšší atomové hmotnosti do makromolekuly. Takovými prvky může být například chlór (např. u PVC). Hustotu mohou ovlivnit i aditiva přidaná do polymerní matrice, a podle hustoty samotného aditiva mohou výslednou hustotu plastu zvýšit nebo snížit.

Molekulová hmotnost je součtem hmotností jednotlivých atomů obsažených v molekule. Také je měřítkem velikosti (délky) makromolekulárního řetězce, protože podíl celkové molekulové hmotnosti k molekulové hmotnosti strukturní jednotky udává polymerační stupeň. Růst molekulové hmotnosti způsobuje změny vlastností plastu (obr. 5.7). Zvyšují se tak mechanické vlastnosti jako například mez pevnosti, zvyšuje se odolnost proti abrazi, chemická odolnost, tvrdost, snižuje se křehkost a zvyšuje se viskozita taveniny. Na druhou stranu se snižuje index toku taveniny (ITT) a schopnost tavení. Odpovídající molekulová hmotnost je základním předpokladem dosažení očekávaných vlastností plastů. Rozdíly molekulové hmotnosti vstupního materiálu (granulátu) způsobují významné změny vlastností konečného výrobku [2, 3, 4].



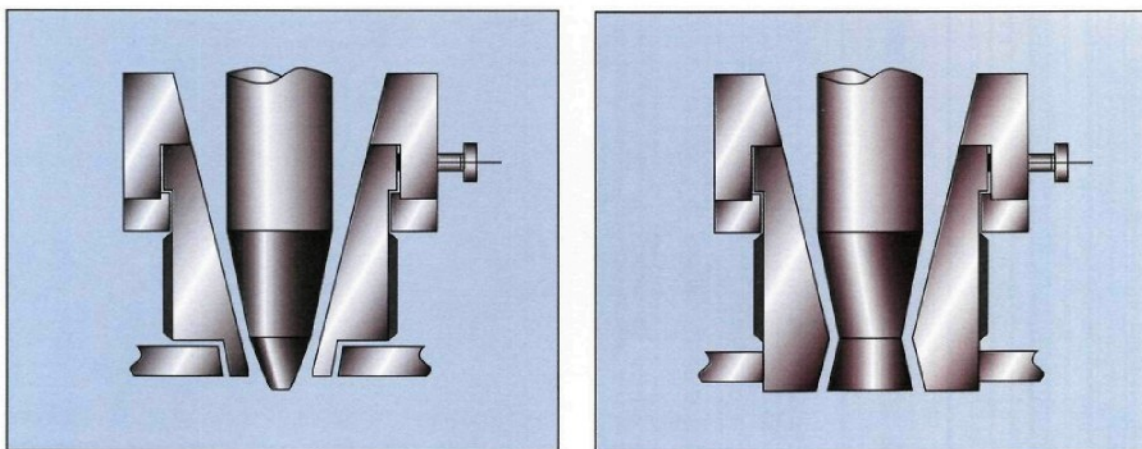
Obr. 5-7: Vliv molekulové hmotnosti na vybrané vlastnosti u PP a PE-HD [6]

S rostoucím průtokem se narůstání zvětšuje v důsledku větší míry orientace makromolekul ve vytlačovací hlavě. Tato orientace je silně ovlivněna tvarem makromolekul a zejména pak jejím rozvětvením a distribucí molekulových hmotností (DMH). U plastů s lineárními molekulami má rozšíření DMH za následek větší narůstání. Avšak plasty které mají podobné hodnoty DMH mohou mít značně odlišné narůstání. To může souviset s faktem, že narůstání je velmi citlivé na přítomnost malých, analytickými metodami nezjistitelných množství materiálů s vysokou molekulovou hmotností. Silně rozvětvené plasty mají větší sklon k narůstání. Tento závěr ovšem není možno generalizovat v případě, když dochází ke změně jak rozvětvení, tak i DMH [2, 4].

5.2.2 Vliv geometrie trysky na narůstání parizonu

Jelikož narůstání parizonu je proces elastické relaxace, způsobené orientací molekul v hlavě, má také tvar tokového kanálu silný vliv na narůstání průměru a tloušťky. Čím budou tokové kanály hlavy delší, tím bude míra narůstání menší (viz obr 5.3). Ovšem i ve velmi dlouhé štěrbině zůstává narůstání způsobené působením smyku, které způsobuje axiální orientaci [1, 10].

Poměry narůstání parizonu za hubicí jsou silně ovlivněny geometrickými parametry. Jedná se o úhel rozbíhavosti (v případě trysky typu „A“ - divergentní) nebo sbíhavosti (v případě trysky typu „V“ - konvergentní), který svírá vnější stěna hubice podél tokové cesty. Rozbíhání způsobuje napínání taveniny v tangenciálním směru, což by mělo zmenšit narůstání průměru tím, že působí proti axiální orientaci, vznikající v důsledku smykového toku.



Obr. 5-8: Typy trysek (vlevo typ V, vpravo typ A)

Při konstrukčních návrzích vytlačovacích hubic je tedy nutné přihlížet k vlivu navrhované geometrie na narůstání taveniny. Protože vhodnou geometrií vytlačovací hubice lze narůstání do určité míry eliminovat [1, 10].

5.2.3 Vliv technologických parametrů na narůstání parizonu

Nastavení technologických parametrů vždy závisí na několika faktorech výrobního procesu extruzního vyfukování, například na druhu použitého materiálu, na velikosti výrobku, na délce pracovního cyklu, atd. [1, 10]

Volba teplotního profilu závisí na použitém materiálu. Výrobce udává pásmo doporučených zpracovatelských teplot. Například pro PE-HD jsou to teploty



okolo 170°C, na rozdíl od PP kde je pásmo zpracovatelských teplot okolo 200°C. Vliv teploty na narůstání parizonu je takový, že s klesající teplotou se narůstání s určitým zpožděním zvětšuje. Teplota má velký vliv i na jeho protahování, protože čím vyšší teplotu parizon má, tím snáze se protahuje. Příliš vysoká teplota pak může vést k nekontrolovanému protahování, což způsobí destabilizaci celého procesu. Vytlačování parizonu pokládáno za izotermní proces jelikož čas, který je vytlačovaný parizon vystaven chladnutí od okolního vzduchu před uzavřením formy je relativně krátký a tudíž nedochází k velkému poklesu teploty (většinou méně než 5°C).

Jak už bylo zmíněno, zvětšování objemu taveniny, čili narůstání parizonu, je způsobeno viskoelasticitou taveniny polymeru. Taveniny termoplastů jsou značně stlačitelné a elastické zvětšování rozměrů představuje určitou energii, kterou je nutné tavenině dodat prostřednictvím vytlačovacího tlaku. Z toho vyplývá, že narůstání závisí na tlaku, kterým je tavenina hubicí vytlačována. Celkový tlak je tedy spotřebován jednak na vlastní viskózní tok taveniny kapilárou tj. na vytvoření rychlostního profilu v kapiláře a s tím spojené překonávání viskózních odporů, které se vlivem tření později změní v teplo a také na překonávání elastického odporu taveniny při jejím vtlačování do kapiláry a na její vytlačování z kapiláry, což se projevuje jako kinetická energie vytékající taveniny. To vše je příčinou toho, že k dosažení určité objemové průtokové rychlosti je potřeba vynaložit větší množství práce, což znamená působit větším tlakem, než jaký by odpovídal samotnému viskóznímu toku v hubici.

S viskoelasticitou materiálu souvisí i časová závislost průvodních jevů narůstání a protahování parizonu. Například u PE-HD při 170°C nastává 70 až 80% narůstání v průběhu prvních 5 sekund po opuštění hubice a zbytek proběhne do 3 minut. Oproti tomu u PP o teplotě 190°C se v prvních okamžicích projeví jen 50% narůstání a k dokončení tohoto jevu by bylo dosaženo za dobu delší než 10 minut. Čas je důležitý také u protahování parizonu. V tomto případě se dá říci, že čím delší dobu bude parizon vytlačován před samotným vyfouknutím ve formě, tím déle bude probíhat jeho samovolné protahování a výsledné protažení a ztenčení stěny bude větší [1, 2].

5.3 Následky narůstání a protahování parizonu

Narůstání a protahování parizonu má významný vliv na kvalitu vyfukovaného dílu. Tyto děje přímo ovlivňují tloušťku stěny parizonu a tím i tloušťku stěny vyfukovaného výrobku. Tloušťka stěny pak rozhoduje o použitelnosti výrobku, protože má velký vliv na tak důležité vlastnosti, jakými jsou například pevnost, tuhost a propustnost plynů [1, 2].

Tvorbu záhybů, zřasení či zvrásnění je možné hodnotit jako borcení parizonu. To nastává v okamžiku, kdy v horní části není tavenina schopna odolávat tangenciálnímu napětí od vlastní tíhy. Tvorba těchto záhybů je nežádoucí, protože může způsobit zřasení finálního výrobku. K tvorbě záhybů pravděpodobně nejvíce přispívá extrémní narůstání průměru parizonu a úzká štěrbina na výstupu z hlavy. Na tvorbu záhybů má negativní vliv i zvýšená teplota. Tavenina vytékající z hubice může mít také povrchové nepravidelnosti (povrchové vady), které mohou zhoršit kvalitu povrchu finálního vyfukovaného tělesa. Tento efekt se projevuje nad kritickým smykovým napětím, což rychlost vyfukovacího procesu omezuje. Borcení parizonu se nejčastěji vyskytuje u vysokoviskózních plastů s úzkou distribucí molekulových hmotností.

Kvalita a cena vyfukovaného výrobku silně závisí na poměrech narůstání parizonu. Jestliže je zvětšení průměru malé, mohou být výsledkem neúplné a nesouměrné výrobky. Na druhé straně, bude-li průměr velký, může se polymer zachytit ve formě, nebo se mohou vytvořit záhyby. Ty mohou způsobit zřasení v části úchopu kontejnerů nebo další povrchové či vzhledové vady [1, 10].

5.4 Možnosti eliminace narůstání a protahování parizonu

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že velikost narůstání nejvíce závisí na druhu použitého plastu a na technologických podmínkách, hlavně na tlaku a teplotě. Například u polyetyleny, který se k vyfukování používá nejčastěji, může tento nárůst parizonu činit někdy až dvojnásobek oproti rozměrům hubice. Avšak nejen vhodnou volbou materiálu a změnou technologických parametrů procesu lze narůstání a tím tedy i tloušťku stěny ovlivnit. U moderních vyfukovacích strojů lze řídit tloušťku stěny v závislosti na jeho délce. Tloušťka parizonu se nastavuje axiálním pohybem trnu v hubici, nebo naopak pohybem

hubice při konstantní poloze trnu. Další možností je také přitlačování prstenců v hubici na parizon, čímž dochází ke změně tloušťky. Při stanovení šterbiny mezi trnem a hubicí je tedy nutné s narůstáním objemu taveniny počítat [1, 10].

Elektronicky řízeným systémem regulace tloušťky stěny je možné ovlivňovat tloušťku stěny parizonu v jeho jednotlivých částech, tak jak je to nutné pro zachování rovnoměrného rozložení materiálu ve výrobku. Regulace se skládá z elektronické jednotky, která je propojena s mechanickými částmi řízení – vytlačovací trn, držák trnu, hubice. To umožňuje regulovat tloušťku stěny parizonu v 12 – 250 bodech (dle instalovaného řízení). Nevýhodou je, že po celém obvodu průřezu parizonu je tloušťka stěny stejná. Parizon je tedy možné regulovat pouze ve vertikálním směru. Pro regulaci tloušťky stěny v průřezu je nutné profilovat vytlačovací trn. Zde však dochází k zesílení tloušťky stěny po celé délce parizonu. Při výrobě tvarově komplikovanějších výrobků se proto používá systém parciální regulace tloušťky stěny parizonu, který pomocí pístnic deformujících kroužek umožňuje regulaci tloušťky stěny v horizontálním i vertikálním směru [10].

5.5 Toková nestabilita a poruchy povrchu

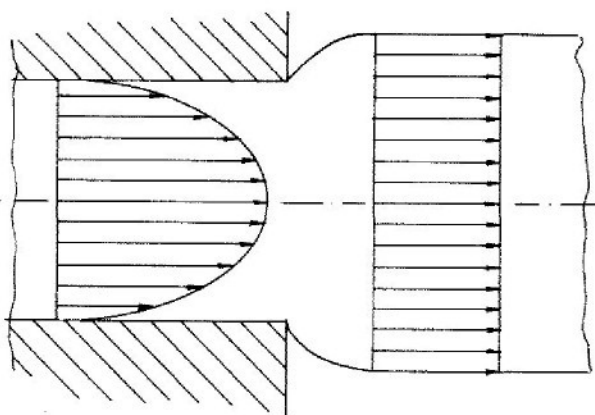
Tavenina vytékající z hubice může mít také vady povrchu nebo praskliny. Tedy povrchové nepravidelnosti, které mohou negativně ovlivnit povrch vyfukovaného dutého tělesa. Tento efekt se projeví nad kritickým smykovým napětím v hubici a často je to faktor, který omezuje rychlost procesu vytlačování. Toto borcení parizonu se nejčastěji vyskytuje u plastů s velkou viskozitou, které mají úzkou distribuci molekulových hmotností. Někdy je možno toto borcení eliminovat zvýšením teploty, nebo snížením rychlosti vytlačování, ale v každém z obou případů prodloužíme celkovou dobu cyklu stroje. Praskání taveniny uvnitř parizonu je možno omezit instalací ohřevu vnitřních součástí hlavy. Podrobné vysvětlení příčin těchto jevů není známé, ale víme, že k tomu přispívají tyto faktory [2, 16]:

- Tvar tokových kanálů hlavy
- Konstrukční materiál hlavy
- Typ plastu.

5.5.1 Shark skin

Porucha kvality povrchu zvaná shark skin se projevuje tvorbou pravidelného zvrásnění kolmo ke směru vytlačování. Méně vážnou poruchou související s efektem shark skin je výskyt matného povrchu vytlačovaného profilu a nemožnost dosažení lesklého vzhledu. Tento efekt je obecně spojován s tokem polymeru vytlačovací hubicí nebo přímo s jeho samotným výtokem. Příčina je v první řadě dávana do souvislosti s teplotou polymeru a rychlostí vytlačování. Faktory jako smyková rychlost, rozměry ústí hubice, jakost povrchu a geometrie hubice nemají na uvedený efekt významný vliv [2].

Shark skin efekt souvisí s rychlou změnou rychlostí povrchových vrstev extrudátu v okamžiku, kdy opouští vytlačovací trysku viz Obr. 5-9. Jestliže je protažení taveniny na výstupu příliš velké, pak se na povrchových vrstvách mohou vyskytnout typické vyvýšeniny a zvrásnění. Vysokoviskózní polymery s úzkou distribucí molekulové hmotnosti jsou citlivější na nestability spojené s efektem shark skin.



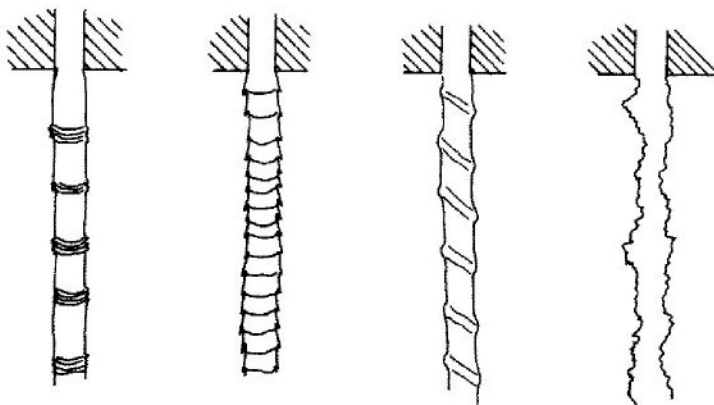
Obr. 5-9: Změna rychlostního profilu při výstupu extrudátu z hubice [2]

Shark skin efekt může být do značné míry redukován snížením rychlosti vytlačování a zvýšením teploty vytlačovací hubice (poslední topné zóny). Také výběr polymeru se širokou distribucí molekulových hmotností přispívá k redukci shark skin efektu. Další variantou je použití lubrikantů ať už ve formě aditiv do základního materiálu nebo formou koextruze vnější nízkoviskózní vrstvy.

5.5.2 Lom taveniny

Lom taveniny (melt fracture) je vážná deformace vytlačovaného profilu (extrudátu) a může se projevovat v jedné z následujících forem (Obr. 7-10) [2, 16]:

- Tvorba spirály a zatočení
- Pravidelné zvlnění
- Náhodné poruchy povrchu



Obr. 5-10: Různé formy lomu taveniny (melt fracture) [2]

V případě lomu taveniny se nejedná pouze o povrchové vady jako v případě shark skin efektu, ale je spojen s celým objemem taveniny. Mechanismus vzniku lomu taveniny nemusí být pro všechny polymery stejný. Například lineární polymery mají tendenci ke vzniku lomu taveniny působením smykového toku v ústí vytlačovací hubice, zatímco rozvětvené polymery se začínají porušovat již ve sbíhajících se (konvergentních) kanálech vytlačovací hlavy.

Obecně lze říci, že spouštěcím mechanismem lomu taveniny je překonání kritického smykového napětí na povrchu vytlačovací hubice. Absolutní hodnota tohoto napětí se může pohybovat v rozmezí 0,1 až 0,4 MPa [2, 16].

Řešení problémů týkajících se lomu taveniny může spočívat v úpravě konstrukce tokových cest – usměrnění toku. Dále zvýšením teploty vytlačovací hubice a snížením průtočného množství. Příznivým jevem je také použití polymeru s nízkou molekulovou hmotností nebo nižší viskozitou a vnitřním lubrikantem [2].

5.5.3 Cyklická změna rozměrů a vibrace

Uvedený typ nestability se objevuje v technologických procesech, kde je extrudát vystaven vlivům okolního prostředí jako například vytlačovaný parizon při technologii extruzního vyfukování, vyfukování fólií a vytlačování vláken či profilů. Tato porucha se projevuje pravidelně cyklickými změnami rozměrů a vibracemi. Pro tvorbu nestabilit je potřebné překonat určitou hodnotu kritického příčného protažení taveniny v ústí vytlačovací hlavy, kdy je polymer ještě ve stavu taveniny. Následuje rychlé ochlazení ve volném prostoru s příznaky nestabilit poté co je extrudát např. zachycen odtahovým zařízením. Faktorem, který napomáhá vzniku nestability je snižující se odolnost polymeru proti příčné deformaci a zvyšující se smykové napětí.

Problematika je do značné míry ovlivněna faktem, že celkové množství hmoty mezi ústím vytlačovací hlavy a odtahem se může s časem měnit. Rychlost odtahu je sice konstantní, ale rozměry extrudátu se mohou měnit (např. vlivem viskoelasticity). Čím je vzdálenost vytlačovací hlavy od odebíracího nebo odtahového zařízení větší, tím je také větší pravděpodobnost vzniku cyklických rozměrových nestabilit. Jak je patrné, tak uvedené nestability se nemohou objevit v případě, že tavenina je chlazená (přechází do tvaru finálního výrobku) ihned po opuštění vytlačovací hubice.

Obecně lze říci, že mechanismus vzniku tokových nestabilit je založen na lomu taveniny a efektivní cestou eliminace je úprava tokových cest vytlačovací hlavy spolu s volbou polymeru, případně použitím vhodných aditiv [2, 9].

5.6 Technologické komplikace

Pokud se při provozu technologie vyskytnou komplikace, je důležitá rychlá a přesná diagnostika, aby bylo možné minimalizovat prostoje nebo nekvalitní výrobu. Důležitými předpoklady pro úspěšné řešení problémů jsou jednak dobré vybavení (technologické a měřicí) a také znalost technologie samotné. Zdroje komplikací lze rozdělit do několika kategorií [2, 9].

5.6.1 Komplikace způsobené polymerním materiálem

Záměna materiálu může způsobit technologické problémy, které přímo souvisí s vlastnostmi plastů, jako jsou např. tokové či tepelné. Následkem je pak nevyhovující kvalita povrchu vytlačovaných profilů, rozměrová odchylka nebo změna mechanických vlastností. Při podezření na komplikace způsobené vstupním materiálem je vhodné nejprve zkontrolovat průvodní materiálovou dokumentaci (certifikáty a zkušební protokoly) a ubezpečit se, že používáme správný typ polymeru. Zde jsme většinou bohužel pouze odkázáni na dokumentaci dodanou výrobcem nebo distributorem materiálu. Navíc se jednotlivé výrobní šarže mohou svými vlastnostmi v určitém intervalu lišit a tím být zdrojem komplikací ve výrobě [2, 9].

Vlivem tepelného (ohřev) nebo mechanického (hnětení) namáhání polymerů, případně stykem s chemikáliemi a účinem okolního prostředí dochází ke změnám jejich vlastností. Tyto negativní změny označujeme obecně jako degradace, která může být tepelná, chemická, termooxidační, vlivem povětrnosti a UV záření, apod. Odolnost proti zvýšeným teplotám se projevuje dvěma způsoby. Na jedné straně může polymer po tepelném namáhání měknout, to znamená, že se začne chovat jako pseudoplastická kapalina nebo dojde ke změně jeho struktury. V případě změny struktury existují dva mechanismy degradace. Může se jednat buď o depolymerizaci, kterou nedoprovází změna chemického složení – pouze se štěpí na nízkomolekulární produkty (PMMA, PTFE) anebo některé polymery zase destruuje – odštěpuje boční řetězce nebo nízkomolekulární zplodiny jako vodu, chlorovodík nebo alkoholy. Příkladem je PVC, které se rozkládá za vzniku chlorovodíku. Destrukce se také může projevit vznikem příčných vazeb – sítují (závěrečná fáze destrukce PVC) [2, 9].

Koroze není pouze fenomén kovů, ale označuje také znehodnocování polymerů účinkem okolního prostředí. Například mechanické namáhání snižuje korozní odolnost některých polymerů (PE, PS, PMMA, PVC, PA). Je-li navíc tato látka současně vystavena působení chemického činidla nebo atmosféry je korozní účinek ještě vyšší. Tomuto jevu říkáme koroze za napětí. Typickým projevem je vznik trhlinek na výrobku, které mohou vést až k jeho porušení zejména v ohybech nebo nejvíce namáhaných částech. Koroze za napětí

polymerů je také ovlivněna kvalitou a způsobem zpracování. Například při vytlačování PS za příliš vysokých teplot dochází k jeho depolymerizaci, vzniklé páry monomerního styrenu současně účinkují s napětím vyvolaným ve vytlačovacím stroji. Výsledkem je poškození polymeru, limitním faktorem je zde teplota zpracování. Současné polymery jsou víceméně proti degradaci chráněny pomocí aditiv a stabilizátorů [2, 4, 8].

5.6.2 Komplikace způsobené strojem

Mechanické změny vytlačovacího stroje mají za následek změnu jeho chování. Může se jednat o různorodé poruchy nebo opotřebení. Nejčastějším typem poruch jsou závady v systému topení a chlazení pracovního válce dále pak pohonu a řízení. Následkem je pak přehřívání taveniny, nebo naopak neschopnost správně regulovat teplotní režim. Potíže při rozběhu extruderu nebo hlučnost naznačují problémy v oblasti pohonu. Na všechny typy problémů je však potřeba pohlížet globálně a vzít v úvahu jednak výkonové parametry stroje, typ zpracovávaného materiálu, technologická doporučení, geometrii šneku, apod. Běžnou příčinou je porucha topného tělesa nebo nedostatečný kontakt čidla s měřenou plochou např. z důvodu kontaminace plastem a to hlavně na vytlačovacích hlavách, kde je nutná častá manipulace [2, 9].

Další oblastí pro potenciální poruchy je pohon šneku, který se obvykle skládá z vlastního motoru a jeho řízení, převodovky a axiálního uložení šneku. Možnou poruchou může být netěsnost převodové skříně nebo komory axiálního ložiska. Moderní pohony vytlačovacích strojů jsou obvykle vybaveny asynchronními motory s měničem frekvence, kde je možno využít jeho diagnostiky při sledování provozních parametrů (zatížení, apod.). Zjednodušeně se dá říci, že opotřebení způsobuje větší provozní vůli mezi šnekem a válcem. Často se opotřebení šneku objevuje nejen na hřebeni, ale i na konci kompresní zóny a to hlavně u šneků s velkým kompresním poměrem. Opotřebení v kompresní zóně omezuje tavící schopnost šneku a vede k teplotní nehomogenitě a kolísání tlaku. Opotřebení hřebene má za následek pokles výtlačného množství a rovněž teplotní nestabilitu způsobenou zhoršenou výměnou tepla mezi zpracovávanou taveninou a válcem. Extrudery opatřené extrémně účinnými drážkovanými vstupními zónami také způsobují nadměrné

opotřebení šneku v oblasti pod násypkou, kde je materiál uzavřen a drážkami posouván vpřed. Pokud dojde k nadměrnému opotřebení v této oblasti, může to mít za následek nepravidelné plnění šneku a s tím spojenou nestabilitu vytlačování, pulzace a pokles výkonu. Opotřebení lze diagnostikovat po demontáži šneku a případně vstupní zóny. Pokud má opotřebení vliv na plastikační výkon stroje, pak bude beze sporu po demontáži patrné pouhým okem. Nicméně lze doporučit provádět pravidelné měření průměru šneku po jeho délce. To nám může dát informaci o progresi opotřebení a časově tak odhadnout čas výměny nebo renovace. Míra opotřebení a doba životnosti souvisí zejména s konstrukcí plastikační jednotky (nitridované nebo bimetalické provedení), zpracovávaným materiálem (s plnivem nebo bez něho) a technologickými parametry (otáčky šneku) [2, 9].

5.6.3 Komplikace způsobené technologickými problémy

Změny výkonnosti vytlačovacích strojů jsou možná nejčastějším technologickým problémem. Možným důvodem proč se nestabilita při vytlačování tak často objevuje je fakt, že existuje velmi mnoho rozličných příčin. Jako příklady můžeme uvést: nepravidelný tok materiálu v násypce, nedostatečná tavící schopnost šneku – tuhé části ve vytlačovací zóně, teplotní nehomogenita zpracovávaného materiálu ve vytlačovací hubici, změny teploty pracovního válce a šneku, nerovnoměrné otáčky šneku, nestabilita rychlosti odtahu výrobku, lom taveniny, opotřebení šneku nebo válce, nedostatečná schopnost homogenizace polymeru, nízký protitlak na vytlačovací hubici, nedostatečná schopnost extruderu vytvořit dostatečný tlak taveniny, atd. Při řešení uvedených problémů bývá změna geometrie šneku až poslední možností. Nejprve je vhodné se soustředit na vytlačovací stroj jako takový a posoudit, zda všechny jeho uzly pracují správně. Zejména pohon šneku musí zajistit konstantní otáčky stejně jako pohon následných zařízení dále správná funkce regulace teploty apod. [2, 9]

Nestabilita s vyšší frekvencí než jsou otáčky šneku je často spojena s nestabilitou toku taveniny ve vytlačovací hubici (lom taveniny). Může být také způsobena nestabilitou pohonu šneku nebo teplotní nehomogenitou. Nestabilita shodná s otáčkami šneku se objevuje poměrně zřídka. Souvisí obvykle s



plněním šneku ve vstupní zóně nebo také s nízkým protitlakem ve vytlačovací hubici. Četnost nestability, která je nižší, než otáčky šneku často souvisí s rozpadem tuhých částic polymeru během jeho tavení v kompresní zóně šneku. Materiálová zátka se dostatečně rychle netaví a nevytvoří se tak vrstva taveniny mezi šnekem a tuhou fází zpracovávaného materiálu. Uvedená komplikace je spojena s geometrií šneku, zejména vysokým kompresním poměrem nebo velmi účinným chlazením šneku. Řešením je snížení kompresního poměru šneku nebo použití šneku bariérového. Nestabilita objevující se v rozsahu řádově minut může být způsobena teplotní nestabilitou pracovního válce. Uvedená teplotní nestabilita nemusí být zřejmá z údajů na regulátorech teploty. Významnou roli zde hraje správné umístění teplotních čidel – v ideálním případě by čidla měla být umístěna ve středu topné zóny a co nejbližší k plastru.

Náhodná nestabilita bývá spojena s nepravidelným plněním šneku. Některé typy extruderů jsou citlivé na stálou výšku vstupního materiálu v násypce – stroje bez nuceného plnění (hladká vstupní zóna). Situaci navíc komplikuje zpracování nestandardních forem vstupního materiálu – drť recyklátu, prášek.

6. Experimentální část

Hlavním cílem experimentální části byla monitorizace rozměrových změn vytlačovaného parizonu (Obr. 6-1). Zejména pak sledování narůstání jeho průměru a sledování vlivu technologických parametrů. Dále pomocí regresní analýzy zobecnit závislost narůstání průměru parizonu na zvolených technologických parametrech.

Pro účely experimentu byla využita plastikační jednotka typ VS25, která je instalována na vyfukovacím stroji typ GM 251 (výrobce: GDK spol. s r.o., Karlovy Vary) pro výrobu dutých těles z plastů. Základem této technologie je tvarování vhodného polotovaru (kontinuálně vytlačované trubky - parizonu) přetlakem vzduchu v chlazené formě do tvaru uzavřeného tělesa. Vyfukovací stroj byl upraven tak, aby bylo možno sledovat rozměrové změny vytlačovaného parizonu. Volba testovaných polymerů byla provedena s ohledem na použití při technologii extruzního vyfukování.

Pro záznam sledovaných jevů byl použit systém ARAMIS a veškeré záznamy profilů parizonů byly vyhodnoceny a zpracovány v grafické podobě. K rozboru vlivu použitého materiálu a vybraných technologických parametrů byl použit logaritmický model regresní analýzy.



Obr. 6-1: Snímek sledovaného parizonu

6.1 Výběr materiálů pro experiment

Pro experiment byly vybrány čtyři základní materiály, které jsou běžně používané pro výrobu dutých těles technologií extruzního vyfukování. Materiály byly zvoleny tak, aby svými vlastnostmi z velké části pokryly oblast vlastností běžně používaných polyolefinů [26, 27, 28].

- PE-HD Liten BB – 29
- PE-LD Bralen RB 2-62
- Homopolymer PP Mosten GB 005
- Kopolymer PP Tiplen R 659

6.1.1 PE-HD LITEN BB 29

Vysokohustotní kopolymer polyetylénu výrobce Unipetrol RPA Litvínov je určen pro zpracování metodou vyfukování a vytlačování. Je velmi dobře zpracovatelný, vykazuje dobrou houževnatost, tuhost a odolnost vůči tenzoaktivním látkám. Je vhodný pro výrobu dutých předmětů do objemu 120 litrů, jako jsou lahve, kanystry, sudy, trubky pro beztlaké aplikace, apod.

Tab. 6-1: Základní vlastnosti materiálu PE-HD Liten BB – 29 [27]

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT (190/ 2,16)	g/10 min	0,15	ISO 1133
Hustota	kg/m ³	950	ISO 1183
Napětí na mezi kluzu	MPa	25	ISO 527
Ohybový modul	MPa	1050	ISO 178
Vrbová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m ²	12	ISO 179
Teplota měknutí dle Vicata	°C	125	ISO 306
Tvrdost Shore D	-	60	ISO 868



6.1.2 PE-LD BRALEN RB 2-62

Nízkohustotní polyetylén bez aditiv výrobce Slovnaft Petrochemicals, s.r.o. Bratislava je určen pro vyfukování malých nádob (do 2000 ml), vytlačování desek a profilů. Je vhodný též na vstřikování a napěňování. Doporučené zpracovatelské teploty jsou v rozmezí 150 až 165°C.

Tab. 6-2: Základní vlastnosti materiálu PE-LD Bralen RB 2-62 [28]

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT (190/ 2,16)	g/10 min	2	ISO 1133
Hustota	kg/m ³	918	ISO 1183-2
Napětí v tahu při přetrhnutí	MPa	12	ISO 527-1,2
Teplota měknutí dle Vicata	°C	95	ISO 306
Tvrdost Shore D	-	46	ISO 868

6.1.3 Homopolymer PP MOSTEN GB 005

Homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností výrobce Unipetrol RPA Litvínov je vhodný pro vstřikování, vytlačování, pro výrobu tkacích pásků, provazů, motouzů a k výrobě fólií pro následné tvarování.

Tab. 6-3: Základní vlastnosti materiálu homopolymer PP Mosten GB 005 [27]

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT (230/ 2,16)	g/10 min	5	ISO 1133
Hustota	kg/m ³	-	ISO 1183
Napětí na mezi kluzu	MPa	34	ISO 527
Ohybový modul	MPa	1550	ISO 178
Vrubová houževnatost Charpy 23°C	kJ/m ²	4	ISO 179
Teplota měknutí dle Vicata	°C	157	ISO 306

6.1.4 Kopolymer PP TIPLÉN R 659

Statický kopolymer výrobce TVK Plc. Polymer Business Unit, Hungary je vhodný pro extruzní vyfukování a vstřikování. Obsahuje nukleační činidlo a vyznačuje se vysokou transparentností a leskem. Doporučené zpracovatelské teploty jsou 185 až 230°C.

Tab. 6-4: Základní vlastnosti materiálu kopolymer PP Tiplen R 659 [28]

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
ITT (230/ 2,16)	g/10 min	2	ISO 1133
Hustota	kg/m ³	-	ISO 1183-2
Napětí v tahu při přetrhnutí	MPa	29	ISO 527-1,2
Ohybový modul	MPa	950	ISO 178
Vrubová houževnatost Izod 23°C	kJ/m ²	24	
Tvrdost Rockwell	stupnice R	78	ISO 2039/2

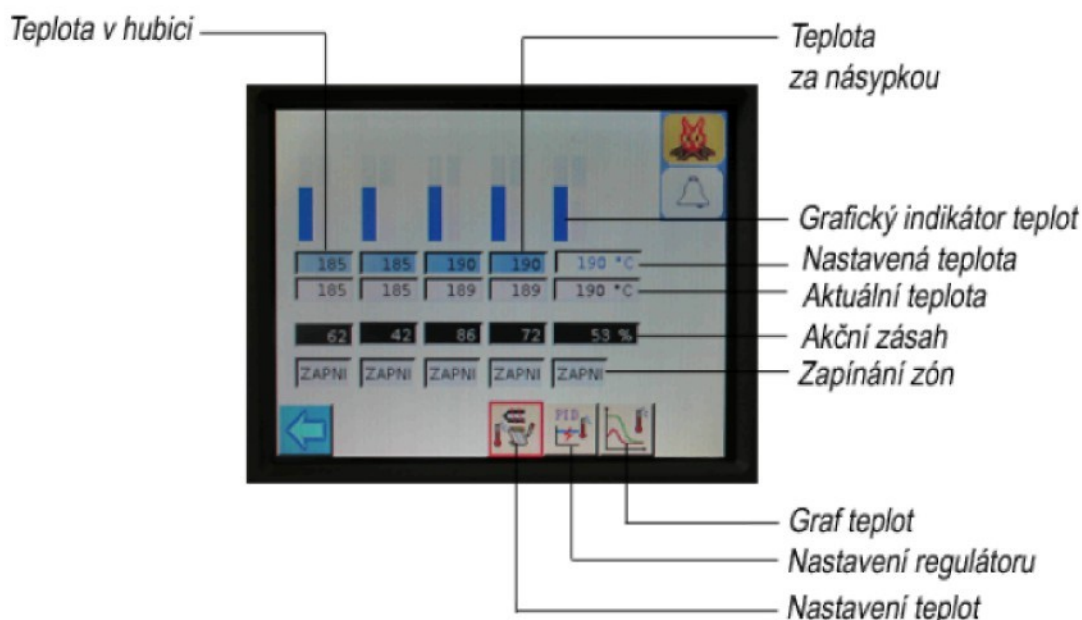
6.2 Parametry a nastavení vytlačovacího stroje VS 25

Vytlačovací stroj VS 25 je komponentem vyfukovacího stroje GM 251 pro výrobu dutých těles z plastů. Plastikační jednotka se skládá z temperovaného pracovního válce, drážkované vstupní zóny, konvenčního třízónového šneku o průměru 25 mm s míchací sekci a kompaktního pohonu o výkonu 3,7 kW s asynchronním motorem řízeným frekvenčním měničem. Instalována byla jednocestná vytlačovací hlava určená pro zpracování polyolefinů včetně vícepolohové regulace tloušťky stěny parizonu řízené servopohonem. Komplet obsahoval celkem pět topných zón, z toho dvě na vytlačovacím stroji s třípolohovou PID regulací a tři na vytlačovací hlavě s dvupolohovou PID regulací teploty. Řízení vytlačovacího stroje a nastavení technologie bylo provedeno prostřednictvím řídicího systému stroje GM 251.

Po zapnutí hlavního vypínače a přepnutím napájení do polohy I (zapnuto) byl vyfukovací stroj GM 251 uveden do pohotovostního stavu. Dotykový displej poté zobrazil úvodní obrazovku, která umožnila přístup ke všem potřebným nastavením, stavům stroje a aktuálním časům v automatickém režimu. Dále byl spuštěn temperační okruh stroje, jehož součástí je i ochlazování prostoru pod násypkou, tak aby byla zaručena plynulá dodávka granulátu a nedocházelo k jeho předčasnému natavování. Vyfukovací forma byla z důvodu snadnějšího snímání celého parizonu ze stroje odstraněna.

Nastavením spínače topení do polohy I (zapnuto) bylo možné v ručním režimu na obrazovce zvolit ikonu "Nastavení teplot", čímž se zobrazila obrazovka umožňující nastavení teplot pro jednotlivé topné zóny. Současně

byla zobrazena informace o aktuálních teplotách jednotlivých zón a indikace akčního zásahu do regulované soustavy. Po dosažení a ustálení žádaných teplot vytlačovacího stroje bylo možné zahájit experiment.



Obr. 6-2: Nastavení teplotního režimu vytlačovacího stroje

Stroj GM 251 umožňuje vícepolohovou regulaci tloušťky stěny parizonu. Její nastavení je možné provést návratem na úvodní obrazovku a stisknutím ikony „Nastavení profilu“. Křivka na obrazovce zobrazuje aktivně uložený profil, podle kterého je parizon vytlačován z hubice. V našem případě byla tloušťka stěny (velikost štěrby vytlačovací hlavy) postupně nastavena na hodnoty 1.45 mm, 1.85 mm a 2.55 mm. Rozsah uvedených hodnot odpovídá změnám tloušťky stěny vyfukovaných výrobků do objemu cca 250 ml [18, 19, 23].

6.3 Snímání profilu parizonu

Snímání geometrických a rozměrových změn vytlačovaného parizonu probíhalo bezdotykovým způsobem (obr. 8-5) pomocí systému ARAMIS [29].

6.3.1 Popis snímacího zařízení

K pořízení snímků byl použit měřicí systém ARAMIS firmy GOM GmbH (obr. 6-3). Jedná se o optický měřicí systém pro bezkontaktní měření deformací. Princip měření je založen na fotogrammetrické korelaci zobrazení. Tento přístroj umožňuje stanovit deformaci materiálu na základě posunutí bodů povrchu materiálu mezi nedeformovaným stavem a stavem povrchu při deformaci (téměř v libovolném počtu kroků). Systém ARAMIS je vybaven dvěma kamerami, které snímají povrch tělesa ze dvou směrů. Prováděné měření tak může probíhat ve 3D souřadnicích. Kamery jsou osazeny čipy, které dovolují snímání rychlé sekvence snímků (ARAMIS HS – High Speed). To umožňuje použití systému především pro měření velmi rychlých dějů, např. rázových zkoušek, rychlého deformačního zatěžování, ale systém lze využít i pro statické zatěžování [19, 25, 29].

Jelikož proces vytlačování parizonu je kontinuální a nelze jej zastavit a definovat tak fasety, ze kterých by byly následně vypočítány 3D souřadnice, byl v našem případě systém ARAMIS využit pouze pro záznam procesu. Tudiž mohla být použita pouze jedna z jeho kamer.

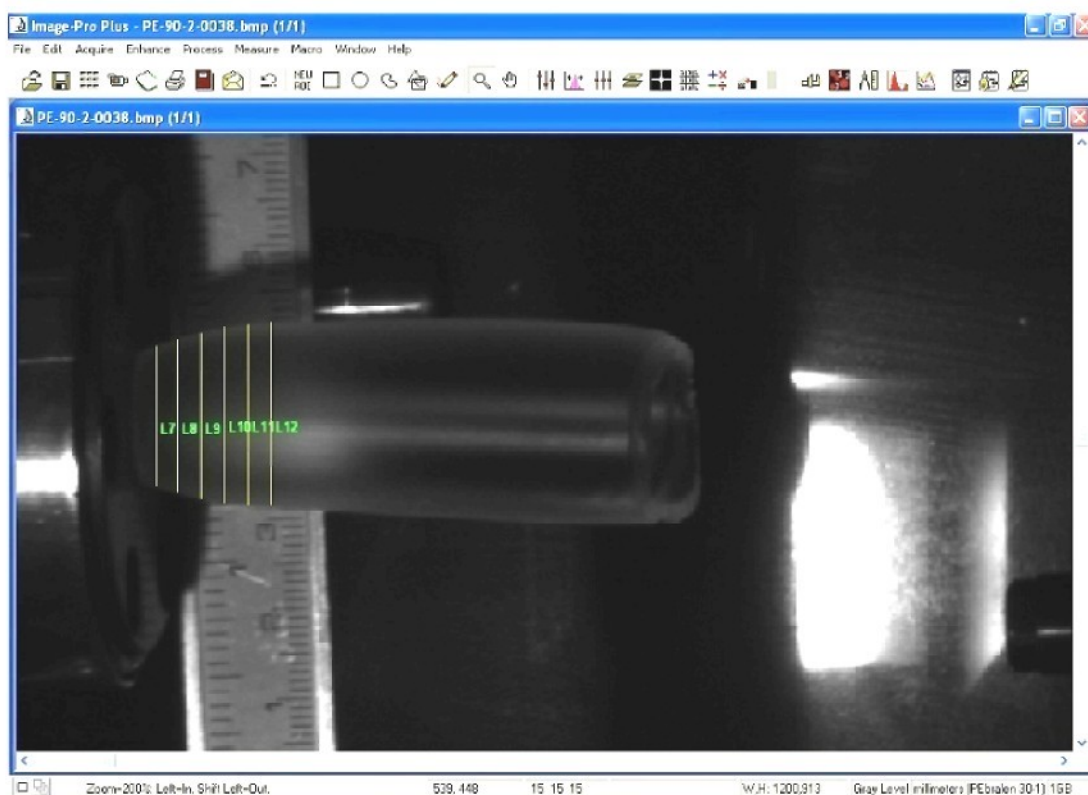
S přihlédnutím k rychlosti celého děje postačovalo nastavení snímkovací frekvence 6 snímků za sekundu, přičemž jednotlivé snímky byly uvedeny ve formátu PND.



Obr. 6-3: Sestava systému ARAMIS [29]

6.3.2 Popis použitého software

K odměřování rozměrů parizonu ze snímku, byl použit software Image-Pro Plus (verze 4.5.0.29) firmy Media Cybernetics, Inc (Obr. 6-4). Jedná se o software, který je založen na principu přiřazení rozměru pixelu (určení měřítka) na jednotlivých snímcích. Toto přiřazení je označeno jako kalibrace. Kalibrace snímku se provádí tak, že je na snímku odměřena vzdálenost, u které je rozměr předem známý. Touto kalibrací je tedy určen rozměr pixelu daného snímku. Pro přesnost odměřování je důležité, aby snímky byly pořízeny v kolmém směru na měřené rozměry. Délkový rozměr na snímku lze určit například pomocí úsečky nebo vzdálenosti dvou bodů. Po otevření snímku a jeho kalibraci je možné odměřovat jednotlivé rozměry. Výsledky jsou automaticky zaznamenávány do tabulky. Tabulku naměřených dat lze následně exportovat do různých vyhodnocovacích softwarů, např. do Excelu.



Obr. 6-4:: Uživatelské prostředí softwaru Image-Pro Plus

6.3.3 Postup měření

Pro daný experiment bylo stanoveno, že snímání parizonů (vzorků) probíhá za podmínek kontinuální extruze při otáčkách šneku 30 min^{-1} , 60 min^{-1} a 90 min^{-1} . Z každé skupiny otáček byly nasnímány 3 vzorky parizonu, pro 3 různé velikosti štěrbin vytláčovací hlavy a 4 typy polymerů. Celkem bylo tedy pořízeno 108 ks vzorků. Za účelem grafických výstupů a hodnocení byla použita vždy průměrná hodnota trojice vzorků pořízených za stejných podmínek. Po každé změně technologických parametrů (otáček šneku) bylo vždy nutné čekat na stabilizaci vytlačovacího procesu v rozsahu minimálně 5 minut. Před samotným snímáním bylo nutné pečlivě nastavit kameru, protože poloha kamery musí být kolmá na směr vytlačování parizonu a musí být dobře zaostřena tak, aby byla jasně viditelná hranice parizonu při následném odměřování. Dále je důležité i správné nasvícení prostoru, ve kterém je parizon vytlačován, to zajišťuje osvětlovací aparatura. Po nasnímání všech vzorků byly všechny snímky nahrány z paměti systému na pevný disk počítače. Jelikož odměřovací software Image-Pro Plus nepodporuje formát PND, který je výstupním formátem snímků u systému ARAMIS, bylo nutné nejprve provést dávkovou konverzi na podporovaný formát BMP. Tato dávková konverze snímků byla provedena pomocí softwaru IrfanView (verze 4.20).

Samotné odměřování rozměrů parizonu následně probíhalo za pomoci softwaru Image-Pro Plus. Kalibrace jednotlivých snímků byla prováděna změřením známého rozměru, k čemuž sloužila stupnice posuvného měřítka, která byla připevněna na vytláčovací hubici tak, aby byla na snímcích jasně viditelná. Nejdříve byl proměřen celý profil parizonu, což představovalo měření průměrů po celé jeho délce. Parizon byl proměřen vždy při délce 210 mm, což odpovídá maximální možné délce, kterou bylo možno na snímku zobrazit. Jednotlivé vzorky parizonu byly proměřeny tak, že do vzdálenosti 30 mm od ústí vytláčovací hubice byla vzdálenost měřících míst 2 mm. Zbývající část vzorku byla rozdělena na úseky o délce 10 mm. Změna vzdálenosti měřících míst byla dána faktem, že až 80% tvarových změn se odehrává ihned poté, co parizon opustí vytláčovací hubici. Naměřené rozměry byly poté exportovány do Excelu a z těchto dat byly pak následně vytvořeny grafické profily parizonů.



Dále byl proměřován průměr parizonu v místě 6 mm pod vytlačovací hubicí v závislosti na jeho délce. Průměry v těchto místech byly měřeny vždy po přírůstku délky parizonu o 20 mm.

Prováděná měření probíhala ve třech fázích. V první z nich jsem stanovil základní postupy a principy měření. Na základě vyhodnocení dosažených výsledků jsem vypracoval konkrétní postupy a systém pro provedení následných experimentů.

V následující fázi byla experimentální měření prováděna ve spolupráci se školitelem prof. Dr. Ing. Petrem Lenfeldem a Ing. Jiřím Habrem, který se v rámci své diplomové práce na experimentech podílel.

Podmínky měření: Teplota $T = 22$ [°C], relativní vlhkost $\varphi = 55$ [%]

Datum měření: 9.2.2009

Po vyhodnocení předchozí fáze jsem v experimentu pokračoval s rozšířením parametrů extruze, zejména o vlivy související s geometrií trysky a doplnil jsem také měření tloušťky stěny vytlačovaného parizonu.

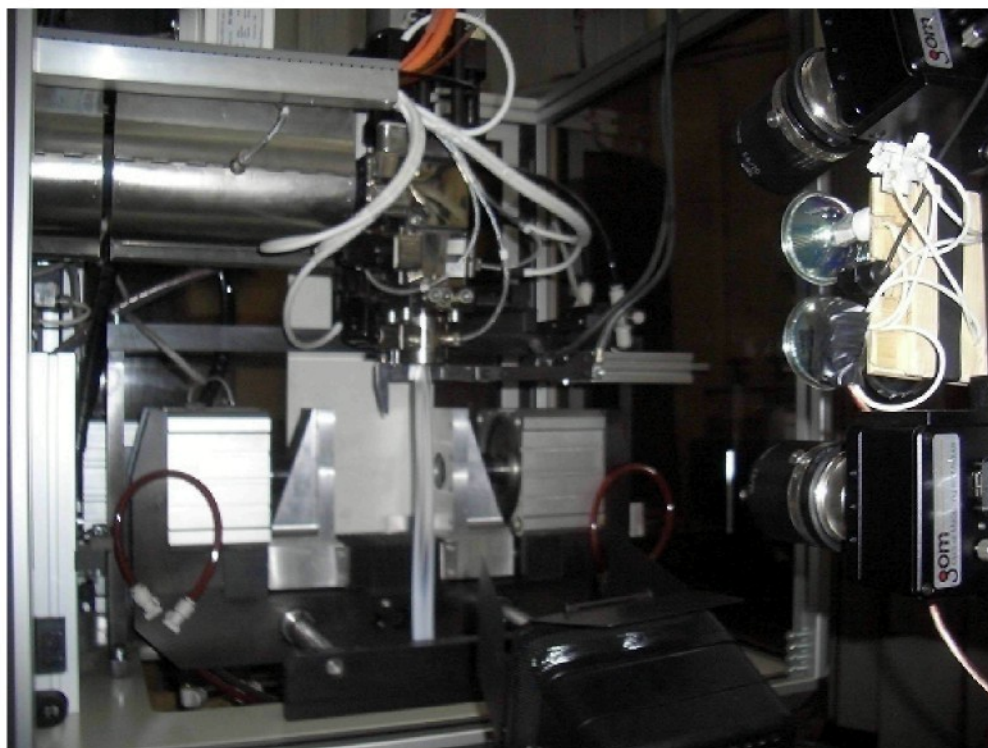
Podmínky měření: Teplota $T = 24$ [°C], relativní vlhkost $\varphi = 57$ [%]

Datum měření: 13.7.2009

Nastavení teplotního režimu bylo provedeno na základě doporučení výrobce polymerů a konzultace s výrobcem vytlačovacího stroje. Následující tabulka ukazuje rozložení teplot pro jednotlivé materiály směrem od vstupní zóny k vytlačovací hubici.

Tab. 6.5: Nastavení teplot a regulace tloušťky stěny pro jednotlivé materiály

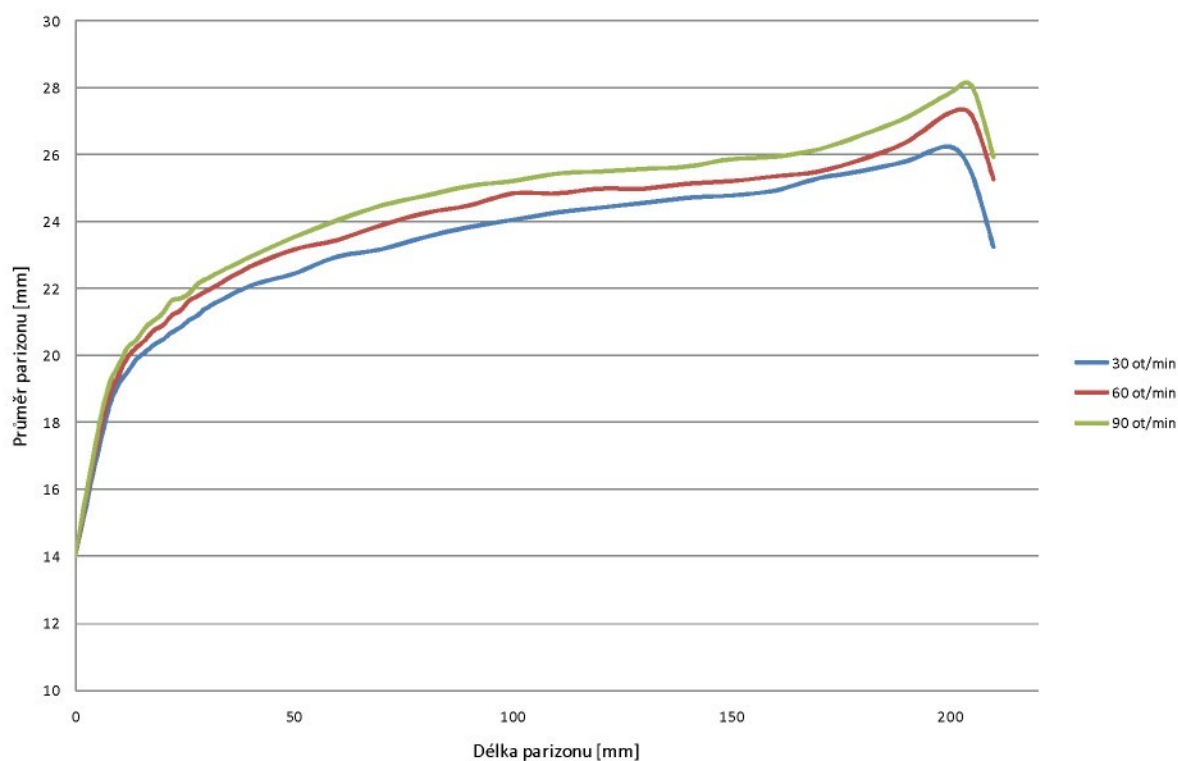
Materiál	Teplota v jednotlivých zónách [°C]				
	Vstupní zóna	Pracovní válec	Vytlačovací hlava	Vytlačovací hlava	Tryska
PE-HD Liten BB 29	195	190	190	185	185
PE-LD Bralen RB 2-62	135	135	135	135	135
Homopolymer PP Mosten GB 005	195	190	190	185	185
KopolymerTiplen R 659	195	190	190	185	185



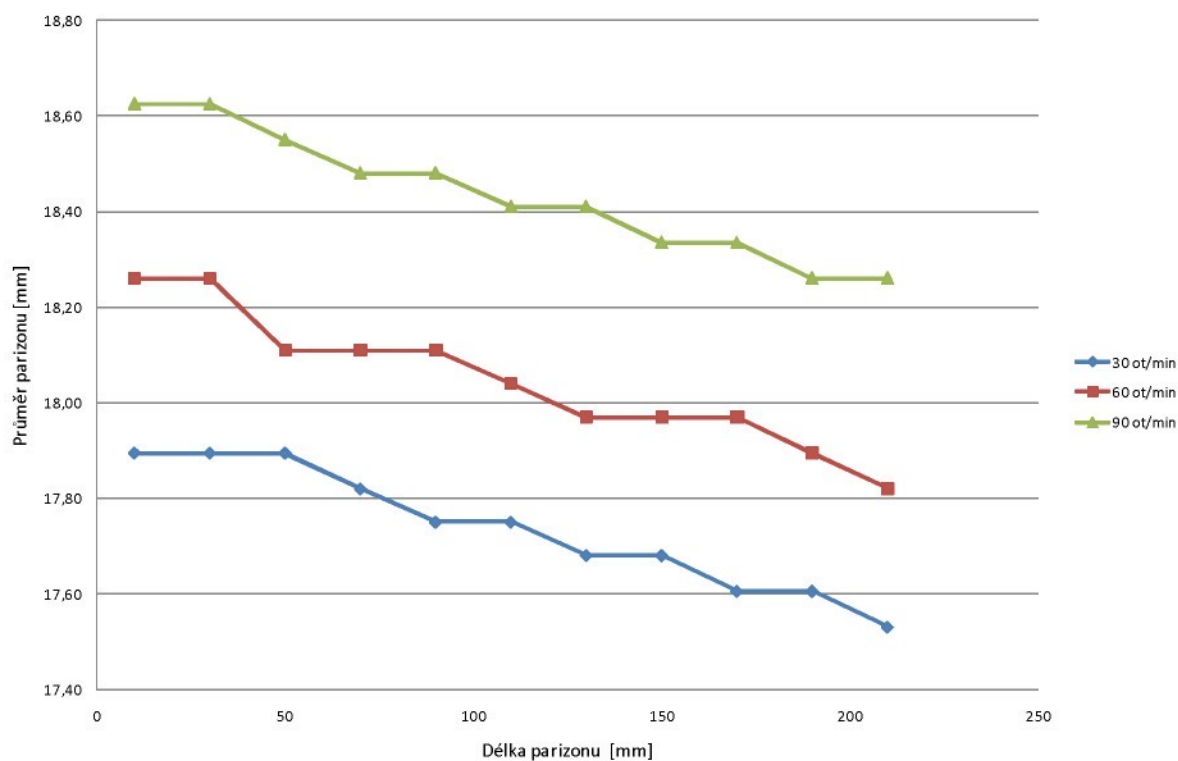
Obr. 6-5: Snímání parizonu

6.4 PE-HD Liten BB29 – naměřené hodnoty

6.4.1 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,45 mm

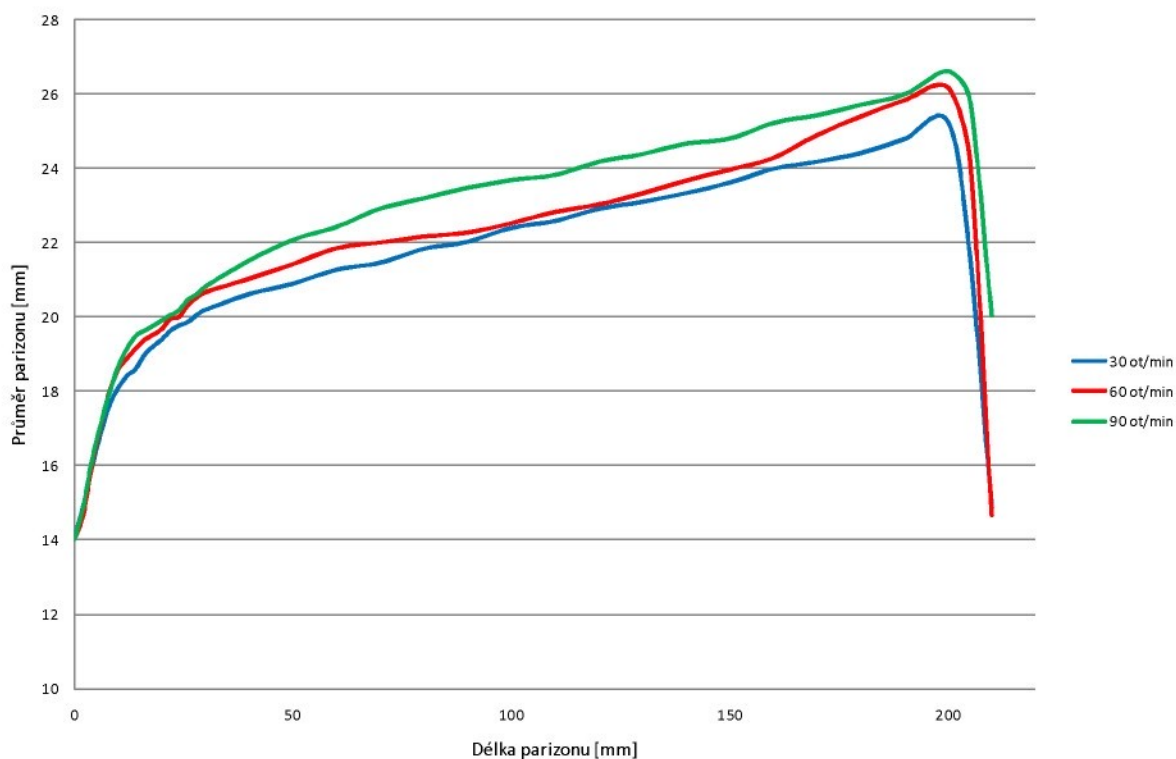


Obr. 6-6: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Liten BB29

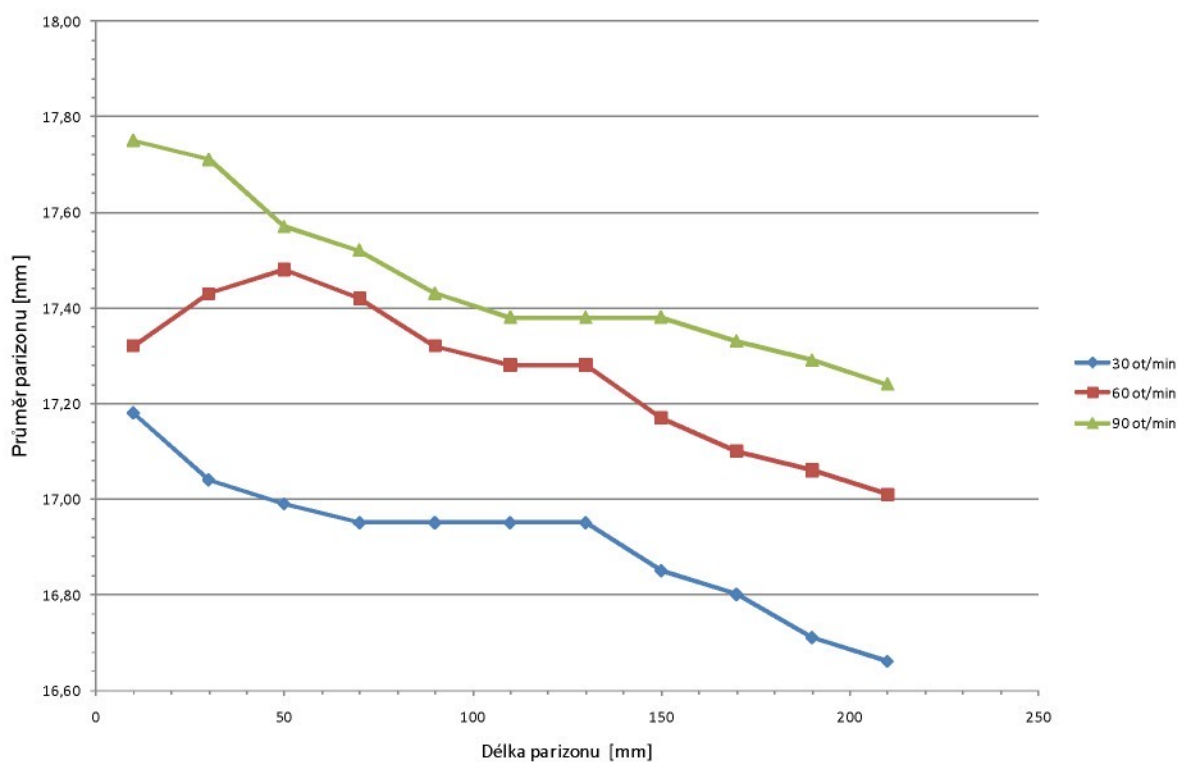


Obr. 6-7: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Liten BB29

6.4.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm

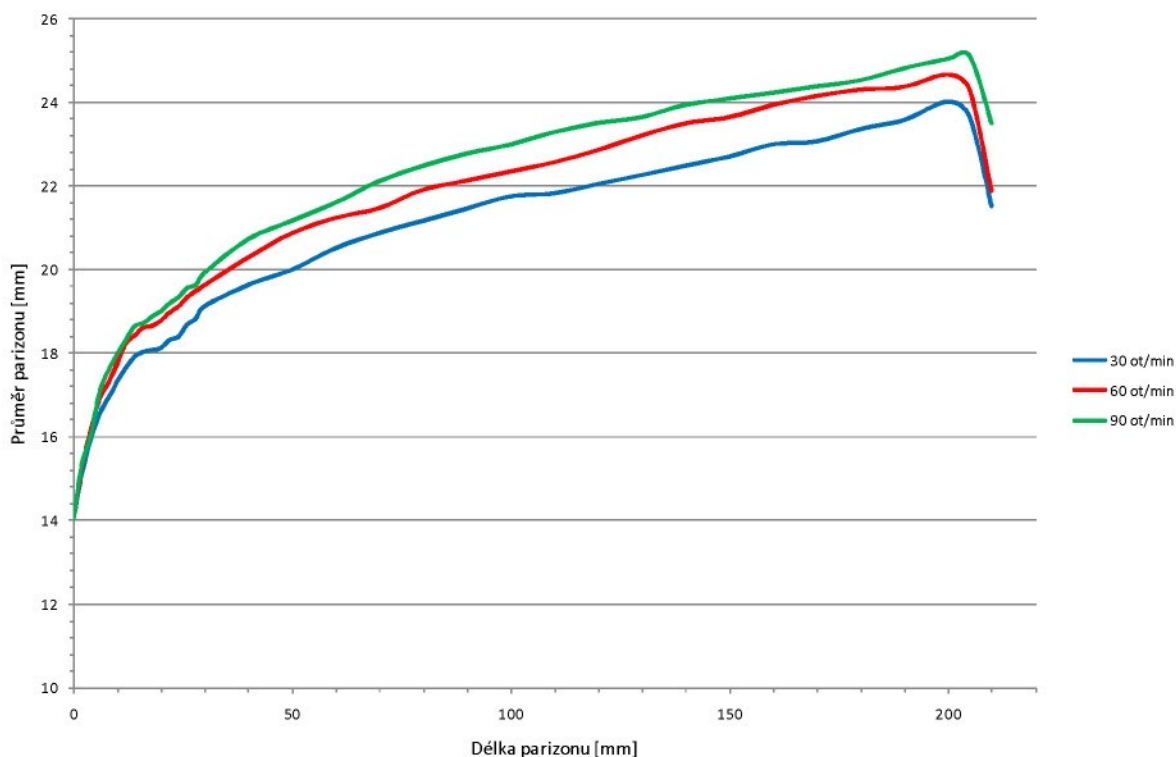


Obr. 6-8: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Liten BB29

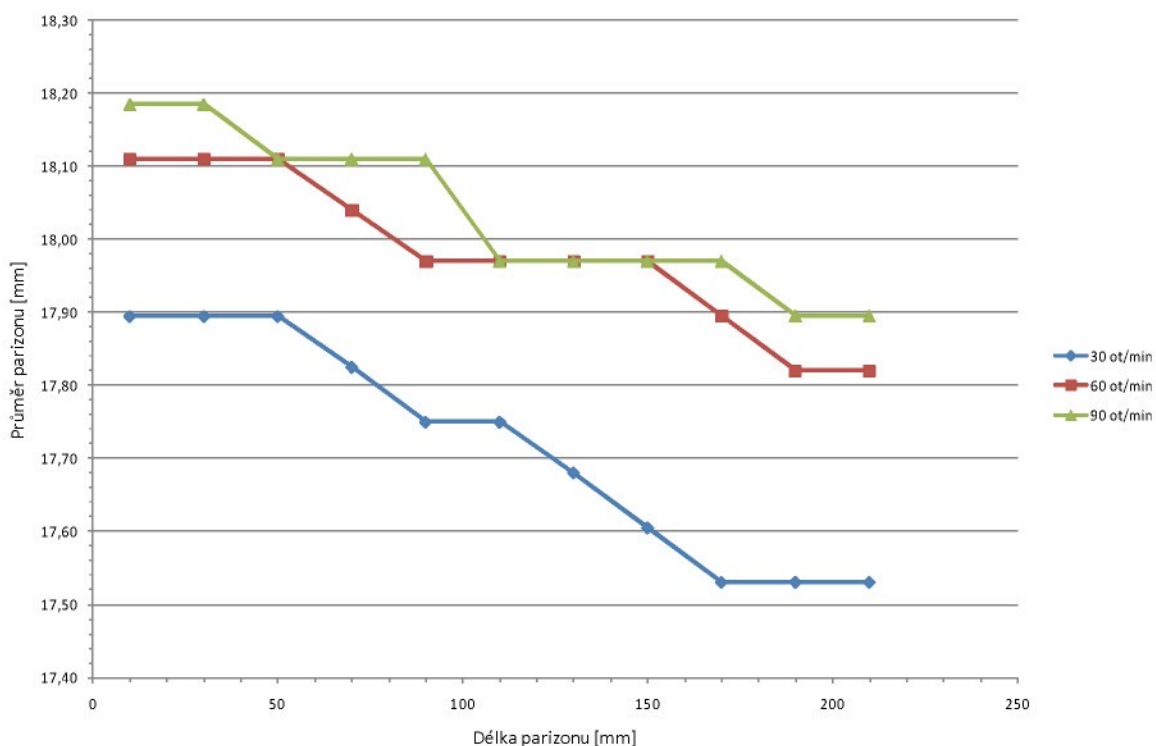


Obr. 6-9: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Liten BB29

6.4.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm

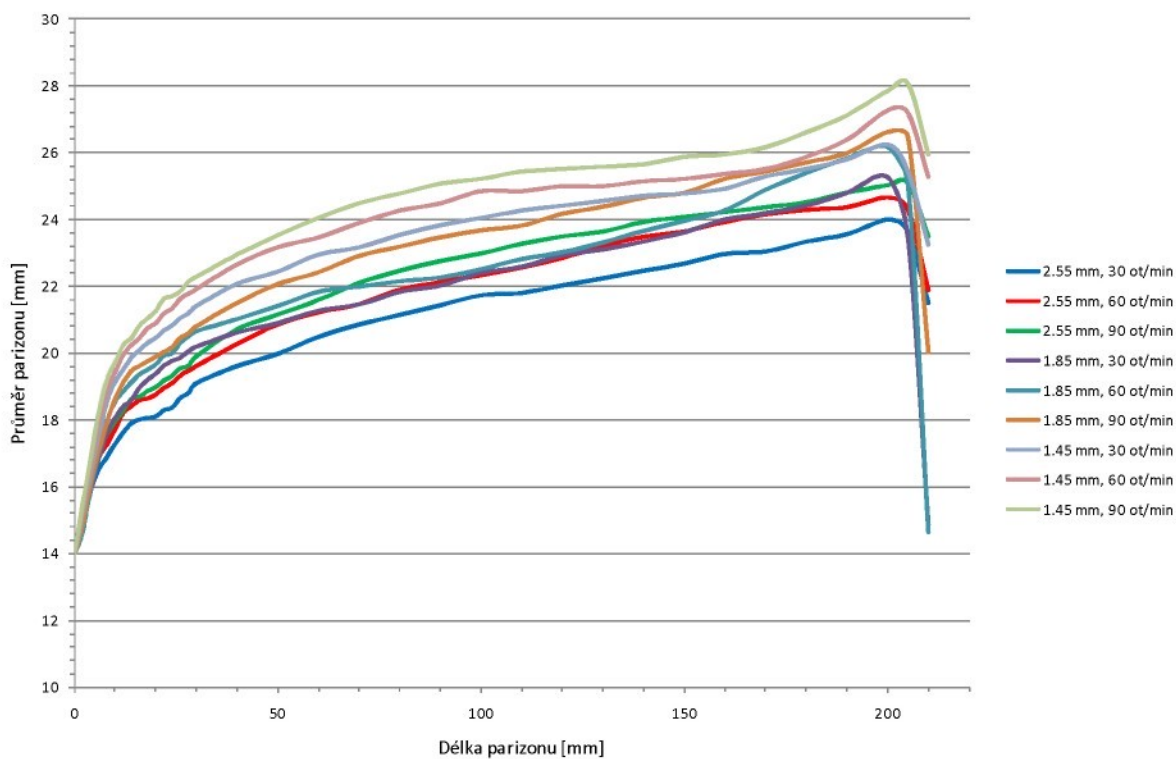


Obr. 6-10: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Liten BB29



Obr. 6-11: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Liten BB29

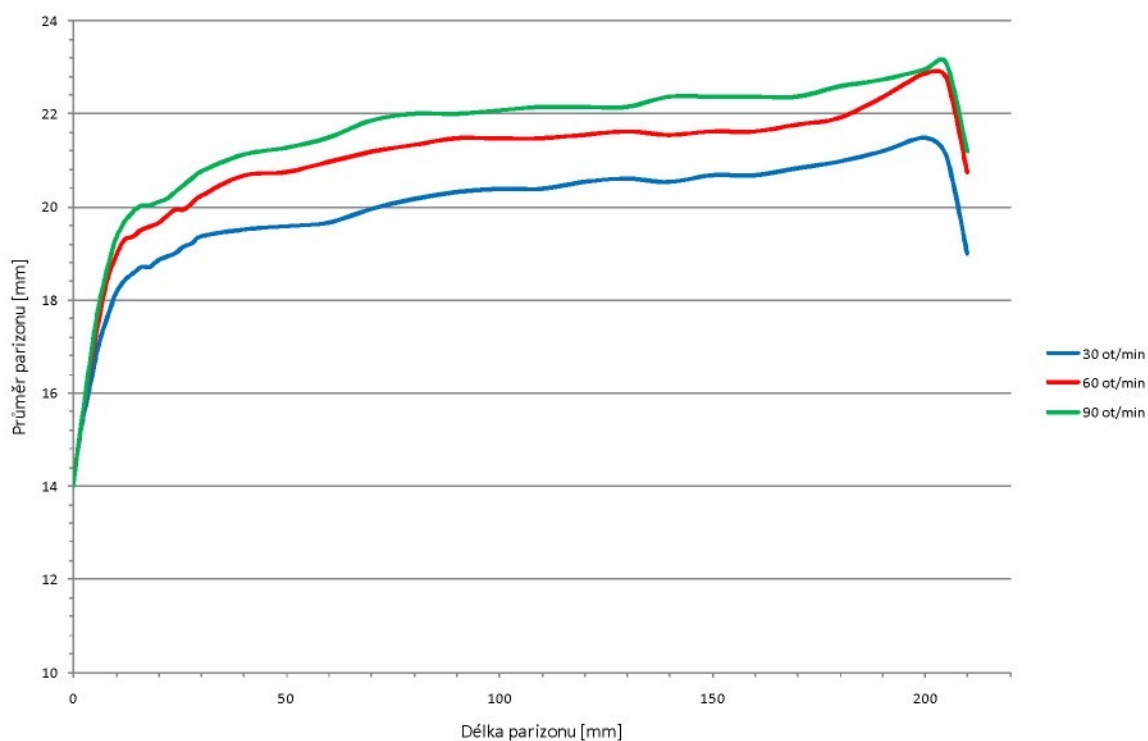
6.4.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrbině vytlačovací hlavy



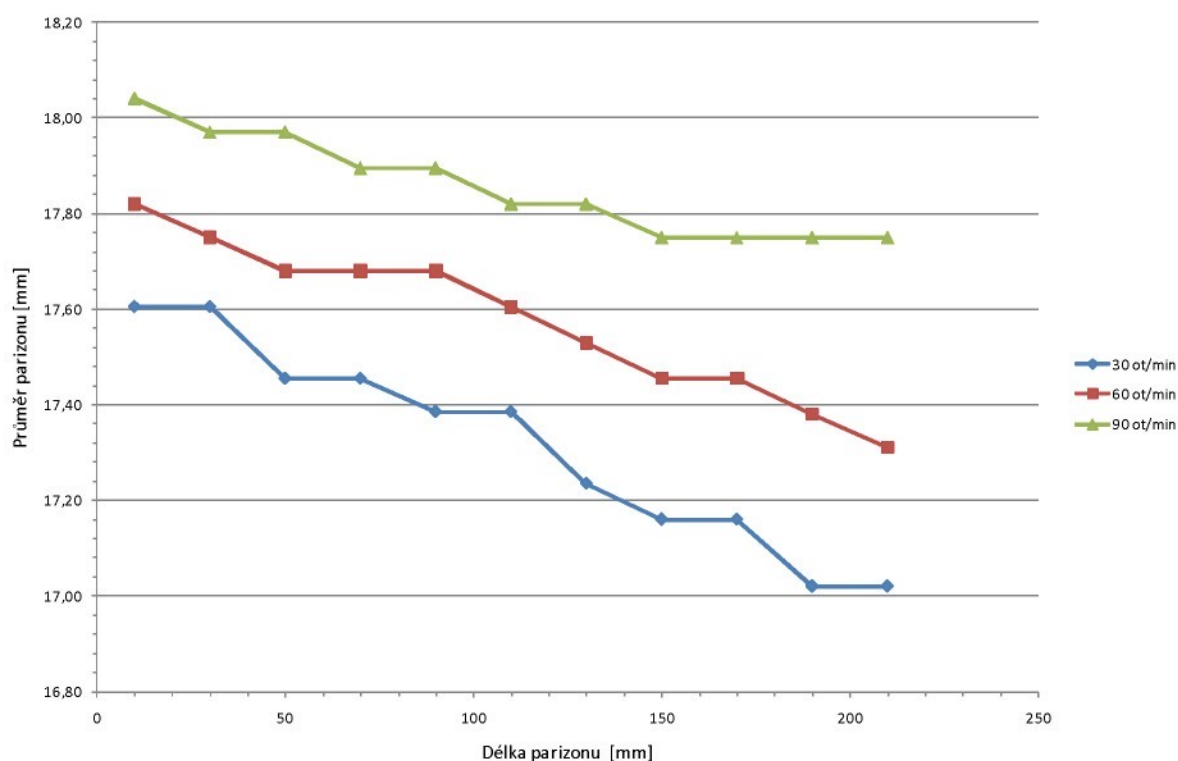
Obr. 6-12: Vliv velikosti štěrbině na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

6.5 PE-LD Bralen RB 2-62 – naměřené hodnoty

6.5.1 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,45 mm

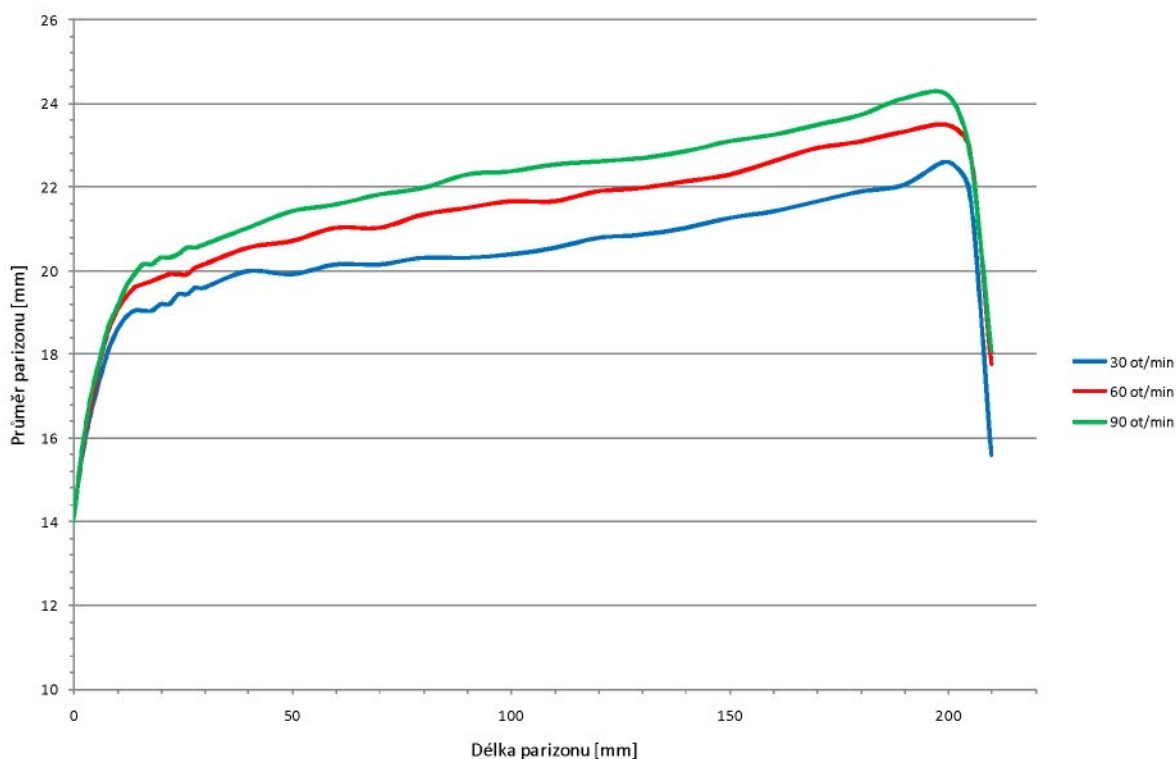


Obr. 6-13: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Bralen 2-62

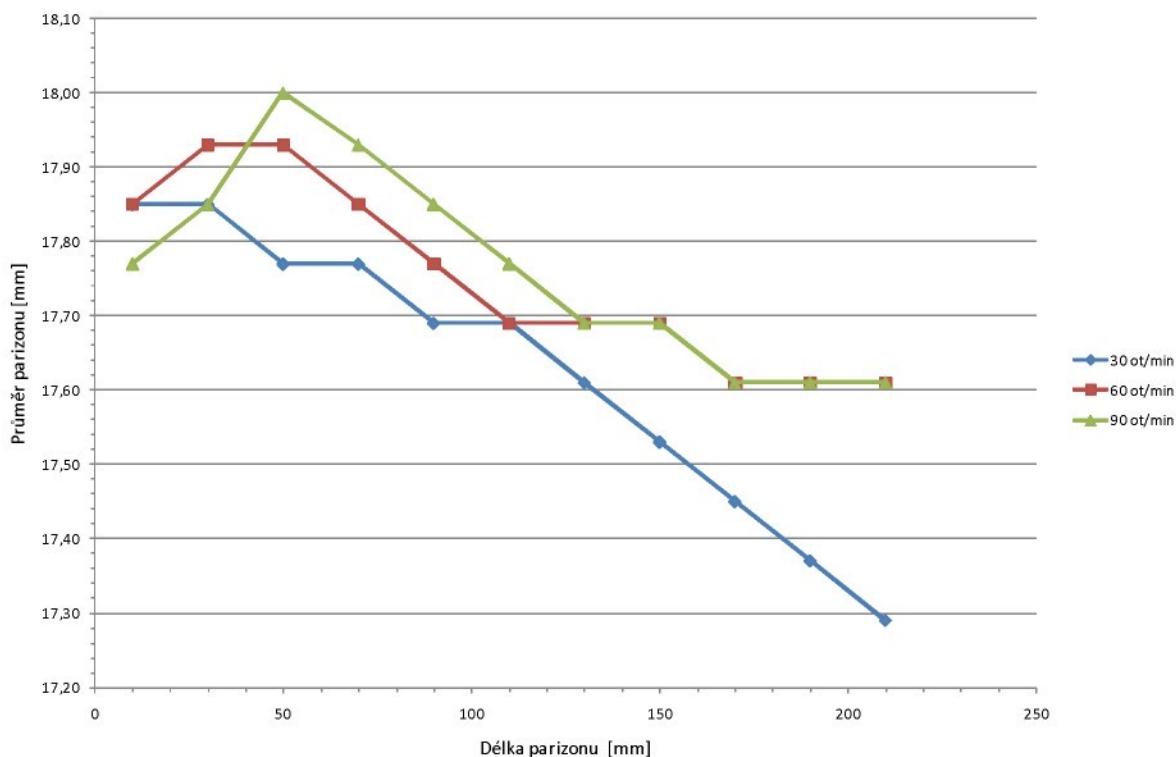


Obr. 6-14: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Bralen 2-62

6.5.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm

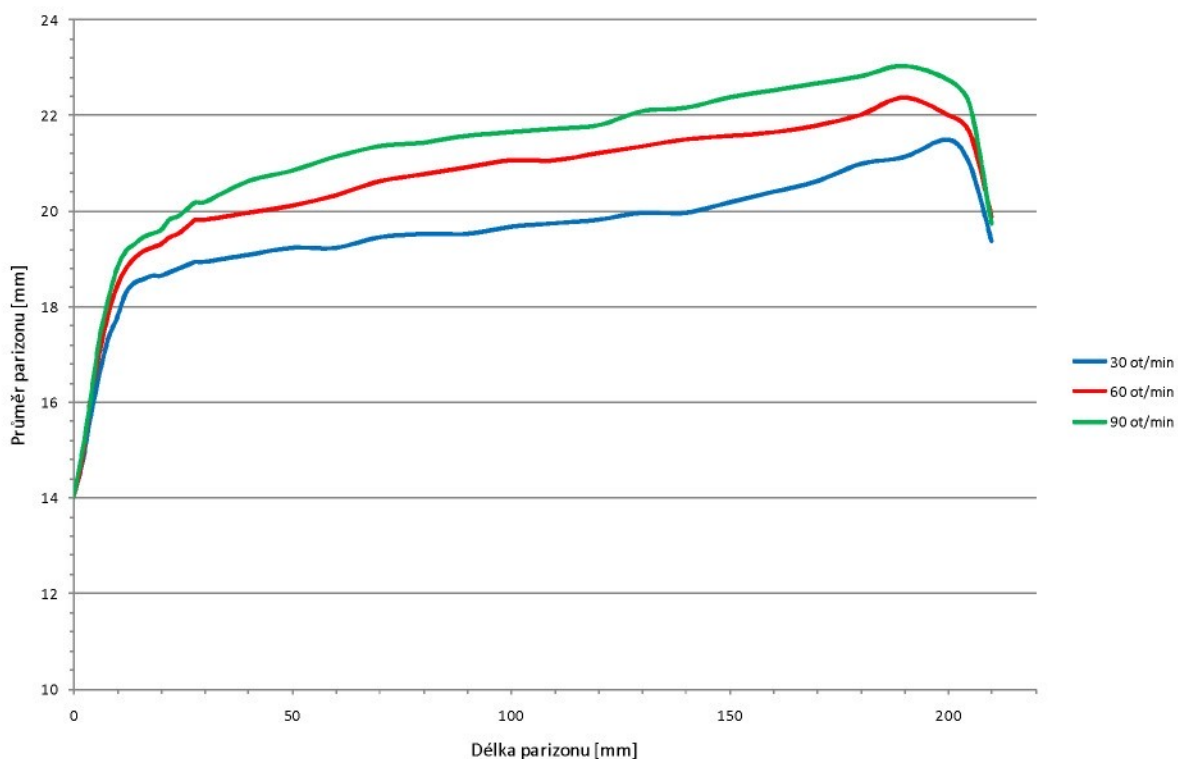


Obr. 6-15: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Bralen 2-62

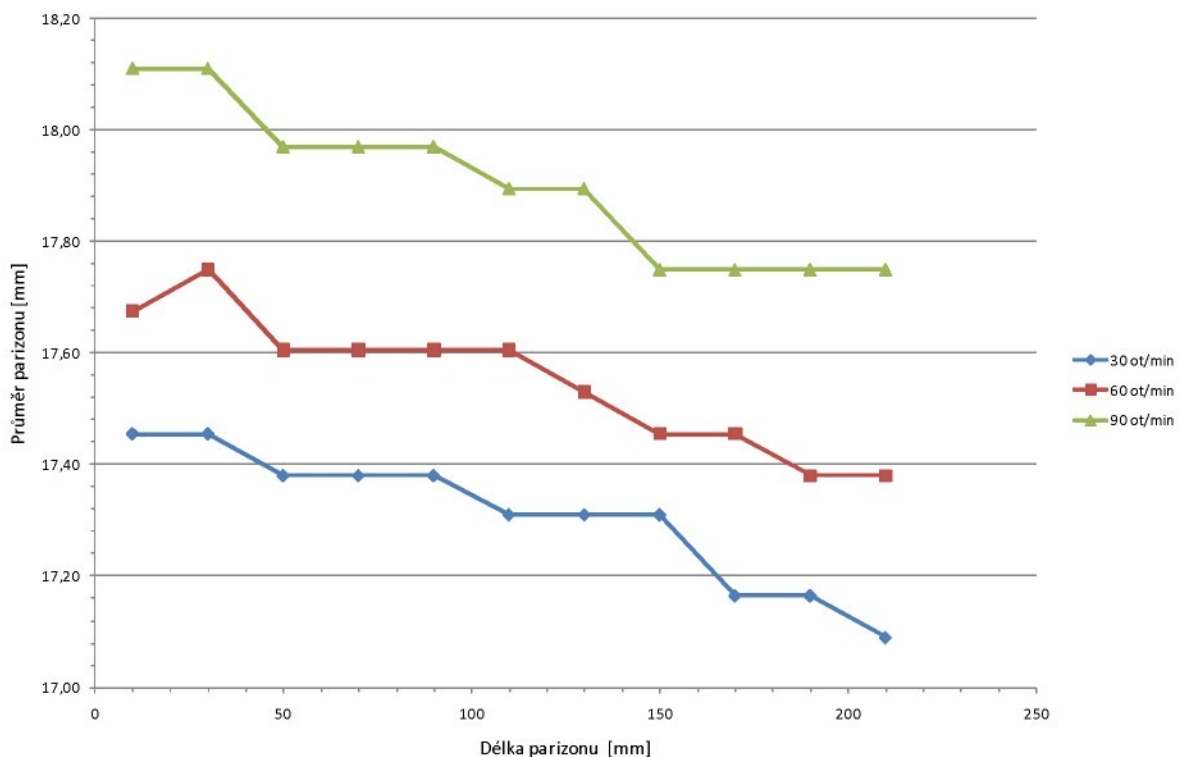


Obr. 6-16: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Bralen 2-62

6.5.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm

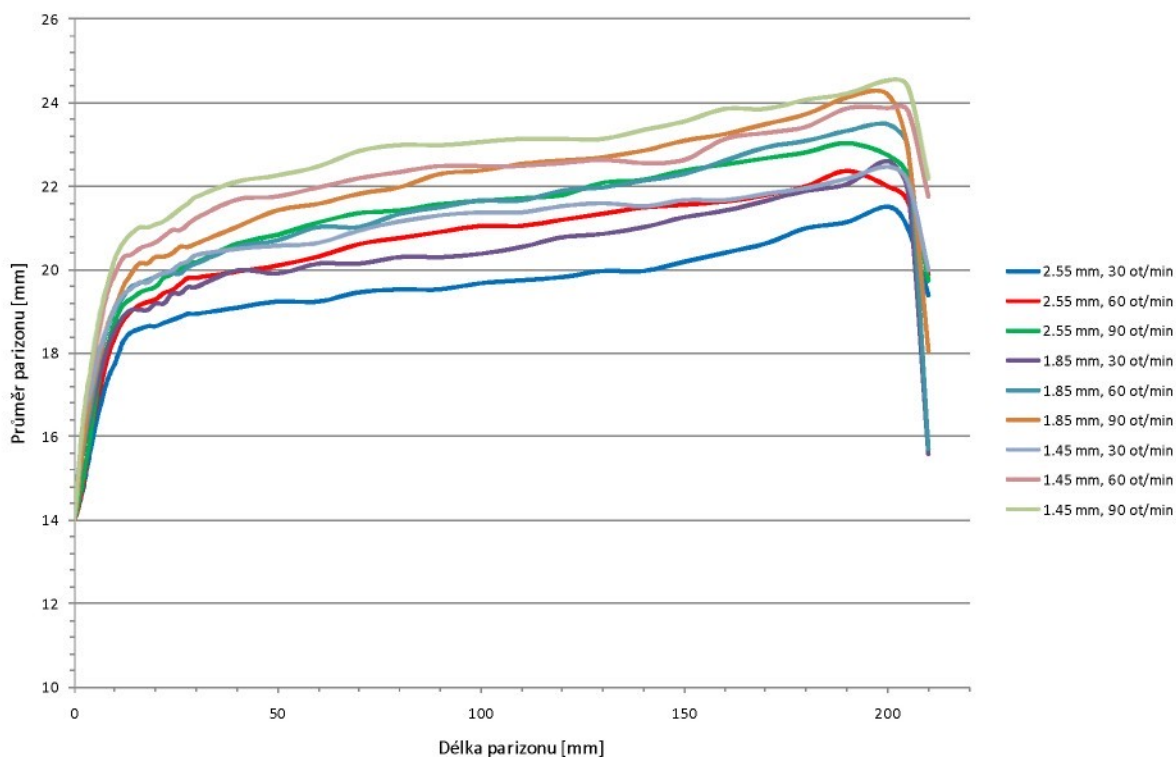


Obr. 6-17: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Bralen 2-62



Obr. 6-18: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Bralen 2-62

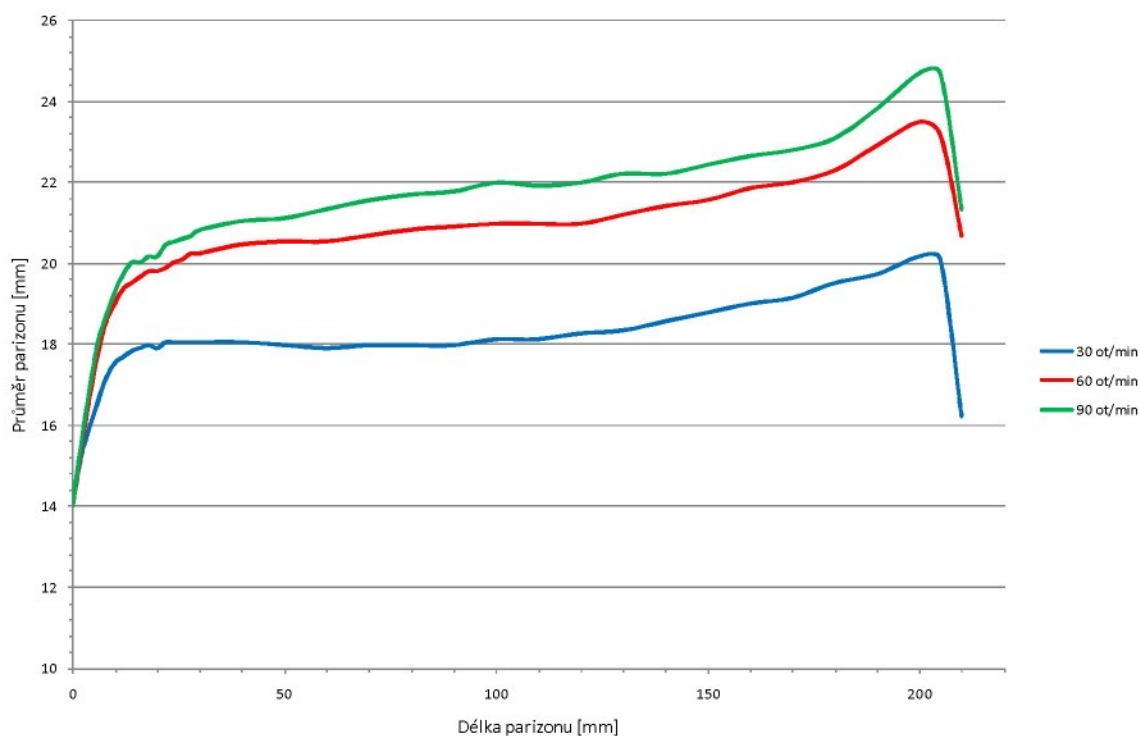
6.5.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrby vytlačovací hlavy



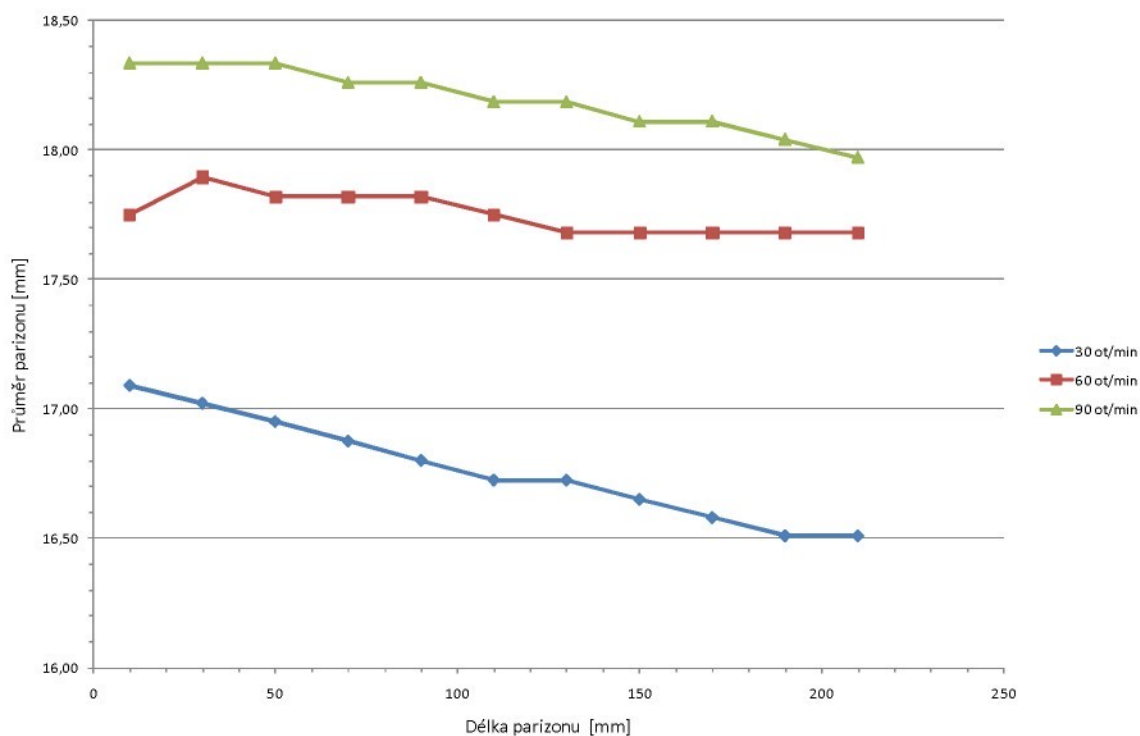
Obr. 6-19: Vliv velikosti štěrby na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

6.6 Homopolymer PP Mosten GB 005 – naměřené hodnoty

6.6.1 Profil parizonu při vytlačování šterbinou 1,45 mm

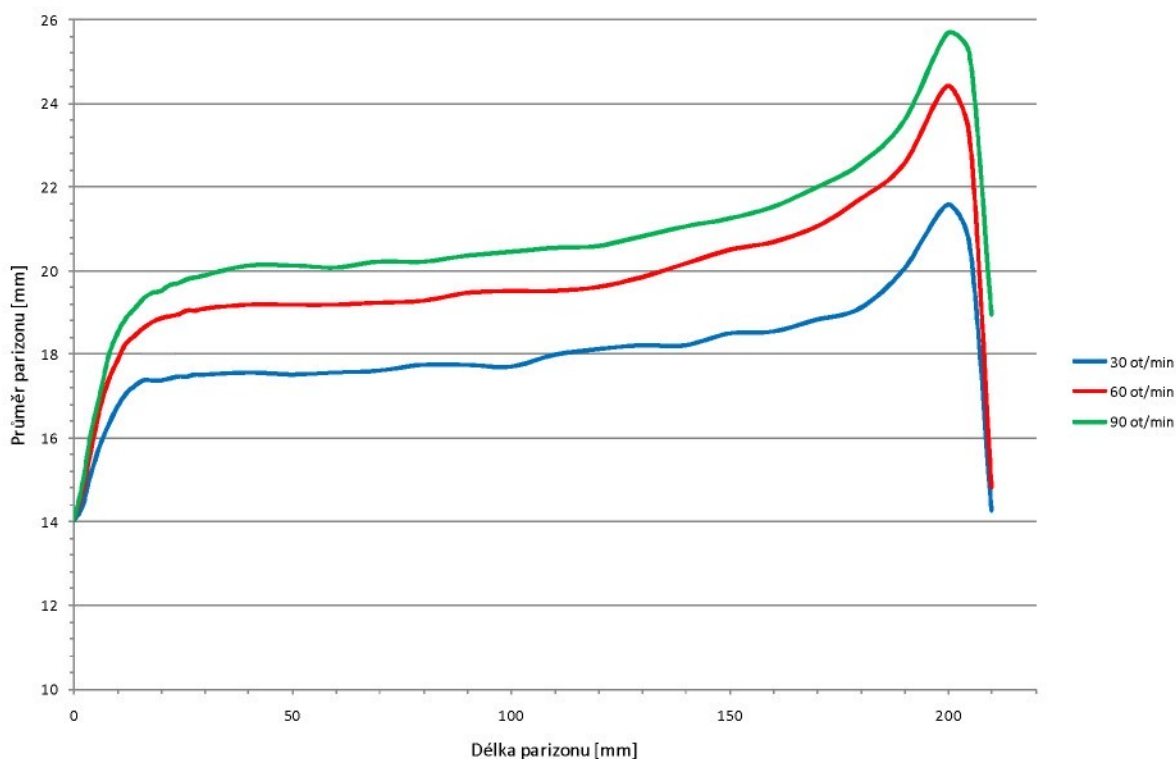


Obr. 6-20: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Mosten GB005

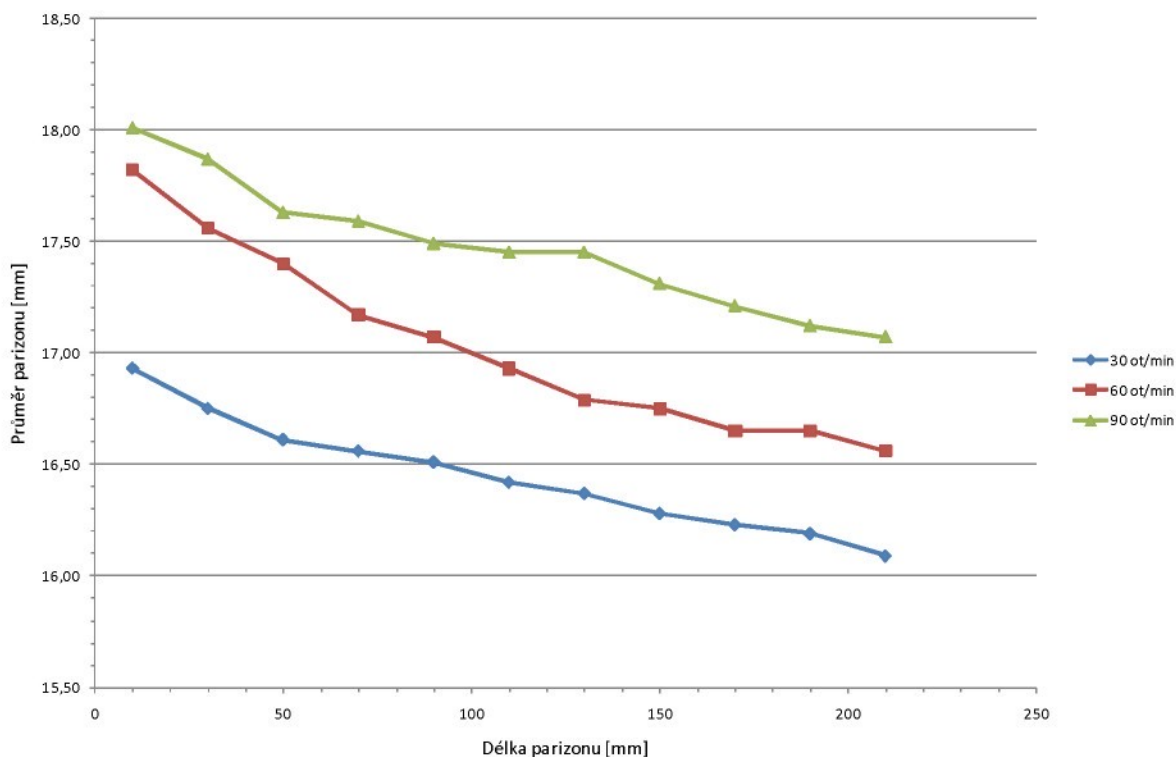


Obr. 6-21: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdál. 6 mm pod hlavou – Mosten GB005

6.6.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm

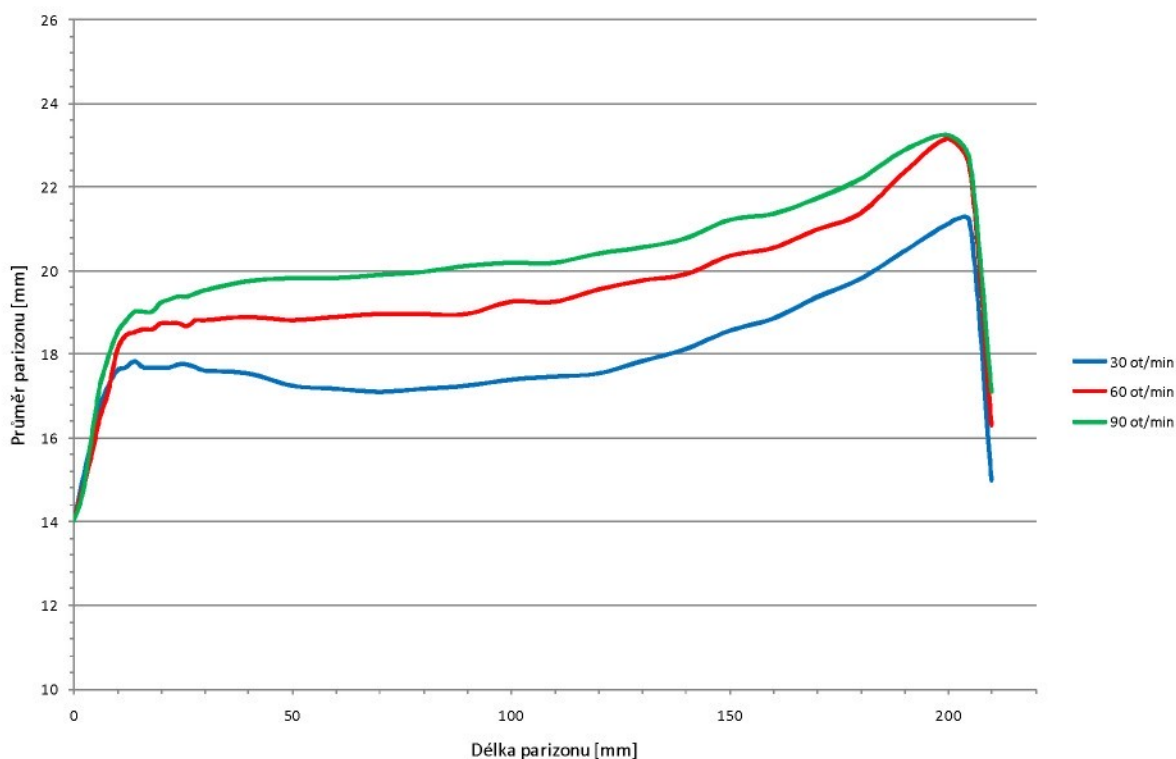


Obr. 6-22: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Mosten GB005

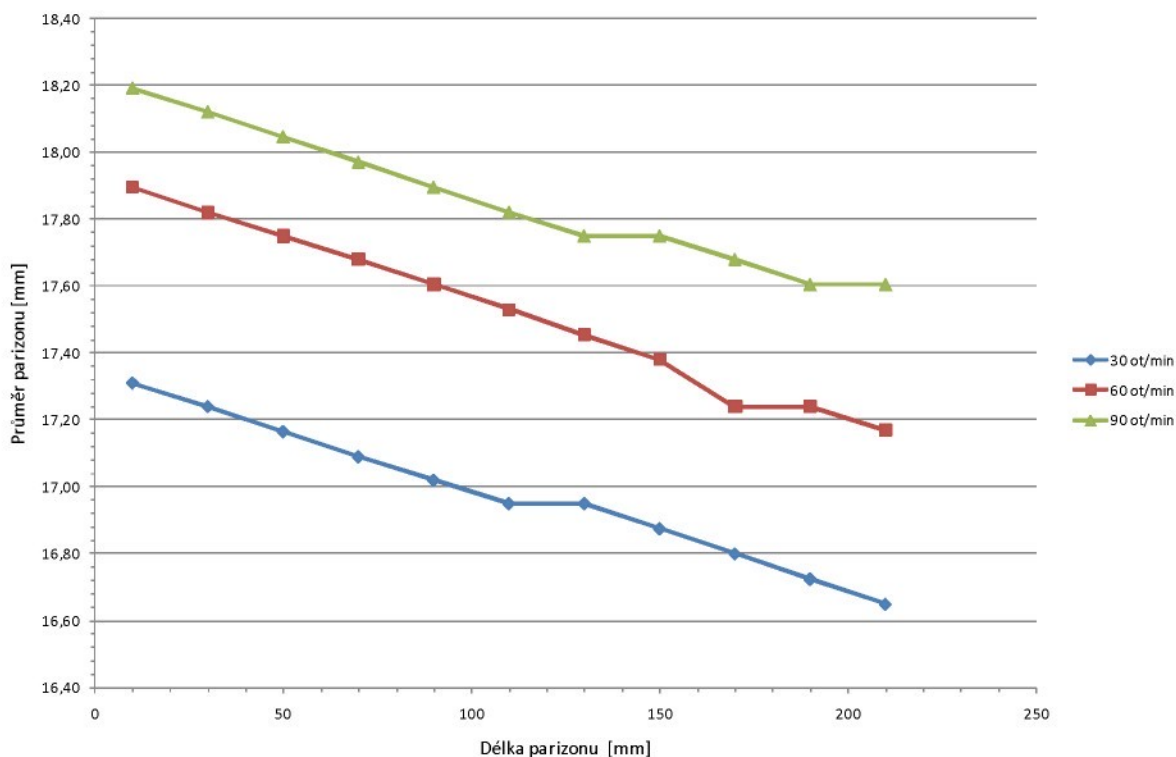


Obr. 6-23: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdál. 6 mm pod hlavou – Mosten GB005

6.6.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm

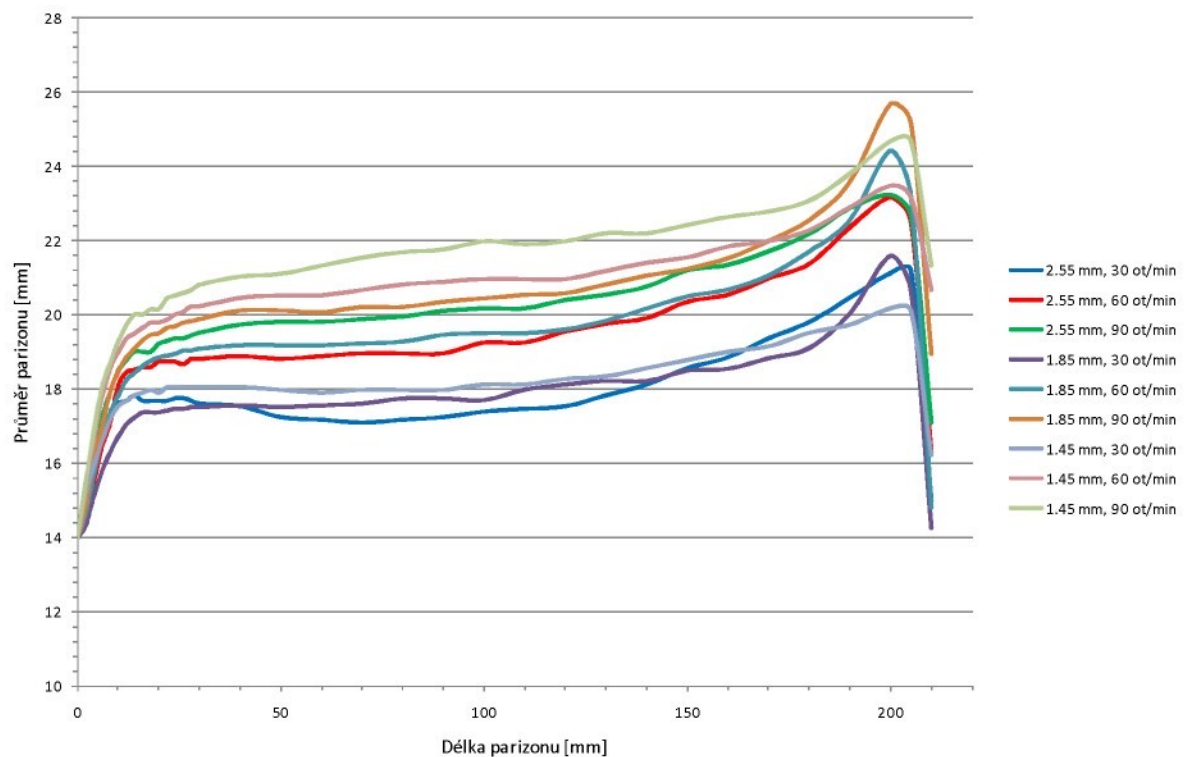


Obr. 6-24: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Mosten GB005



Obr. 6-25: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdál. 6 mm pod hlavou – Mosten GB005

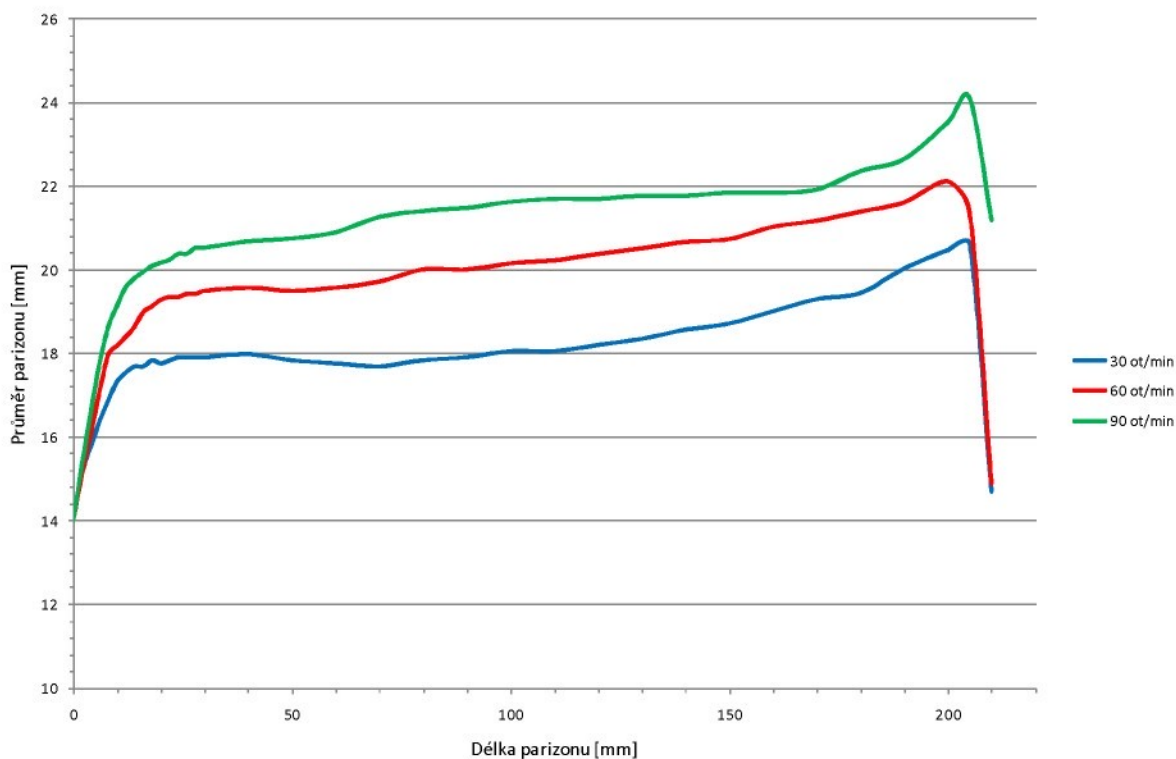
6.6.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrby vytlačovací hlavy



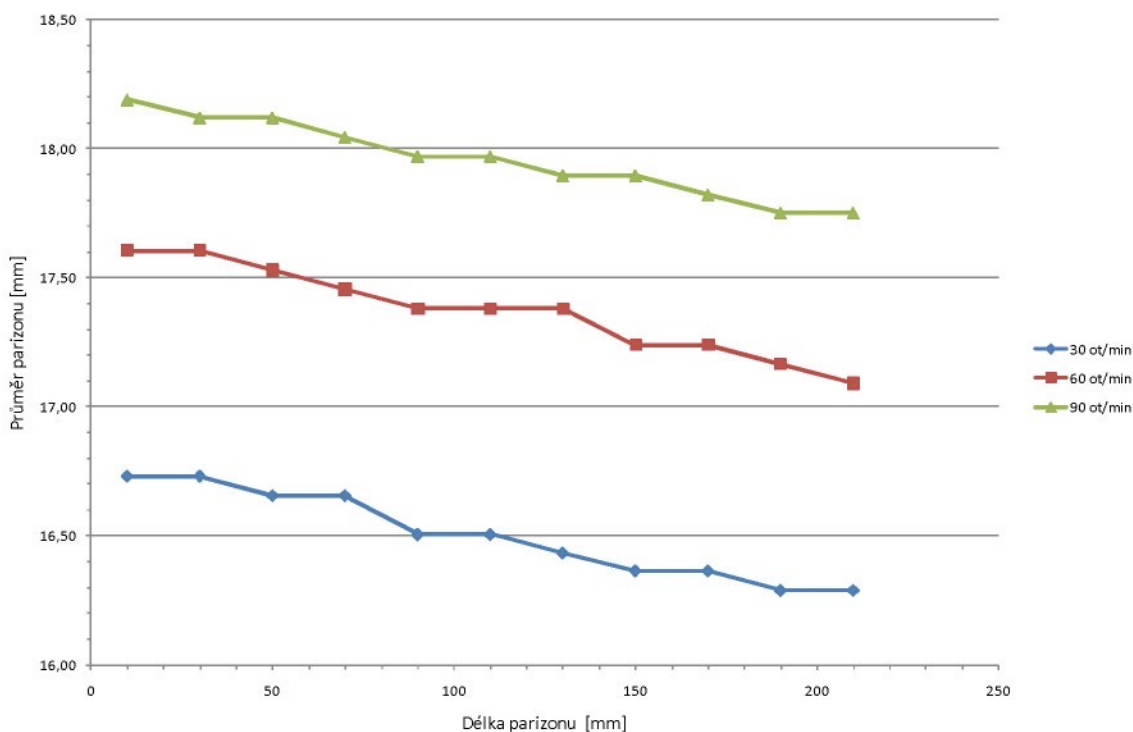
Obr. 6-26: Vliv velikosti štěrby na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

6.7 Kopolymer PP Tiplen R 659 – naměřené hodnoty

6.7.1 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,45 mm

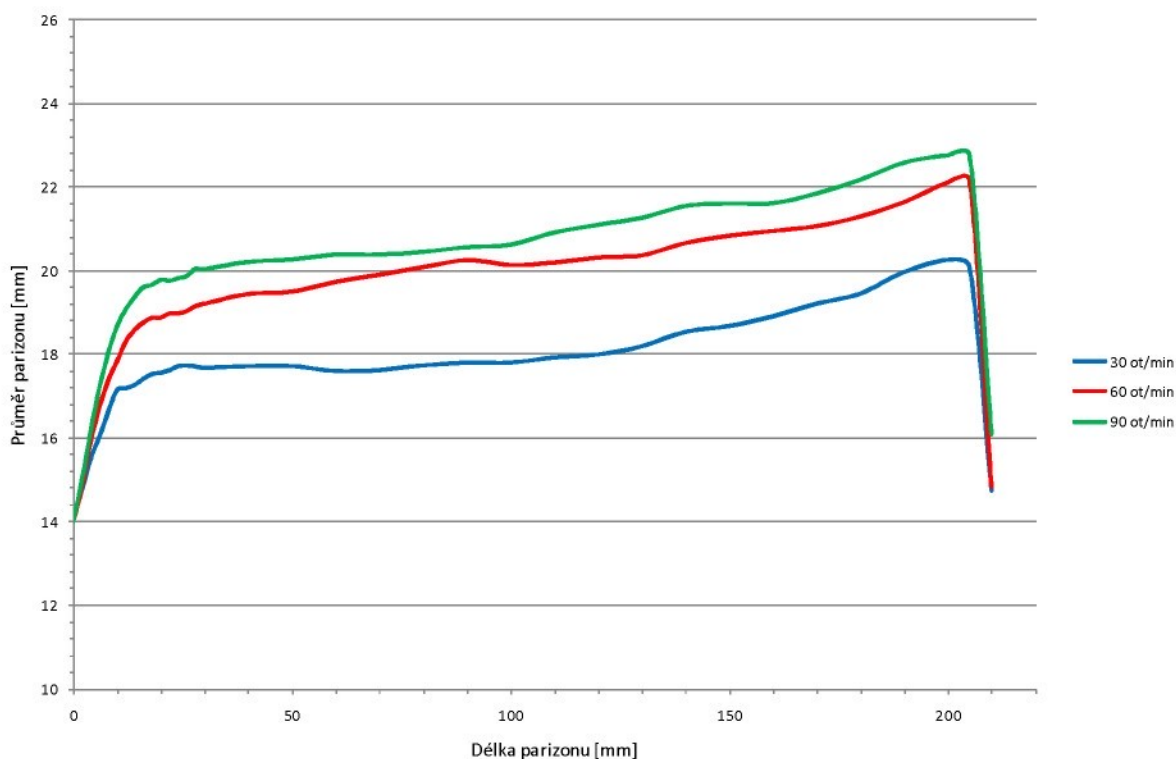


Obr. 6-27: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Tiplen R659

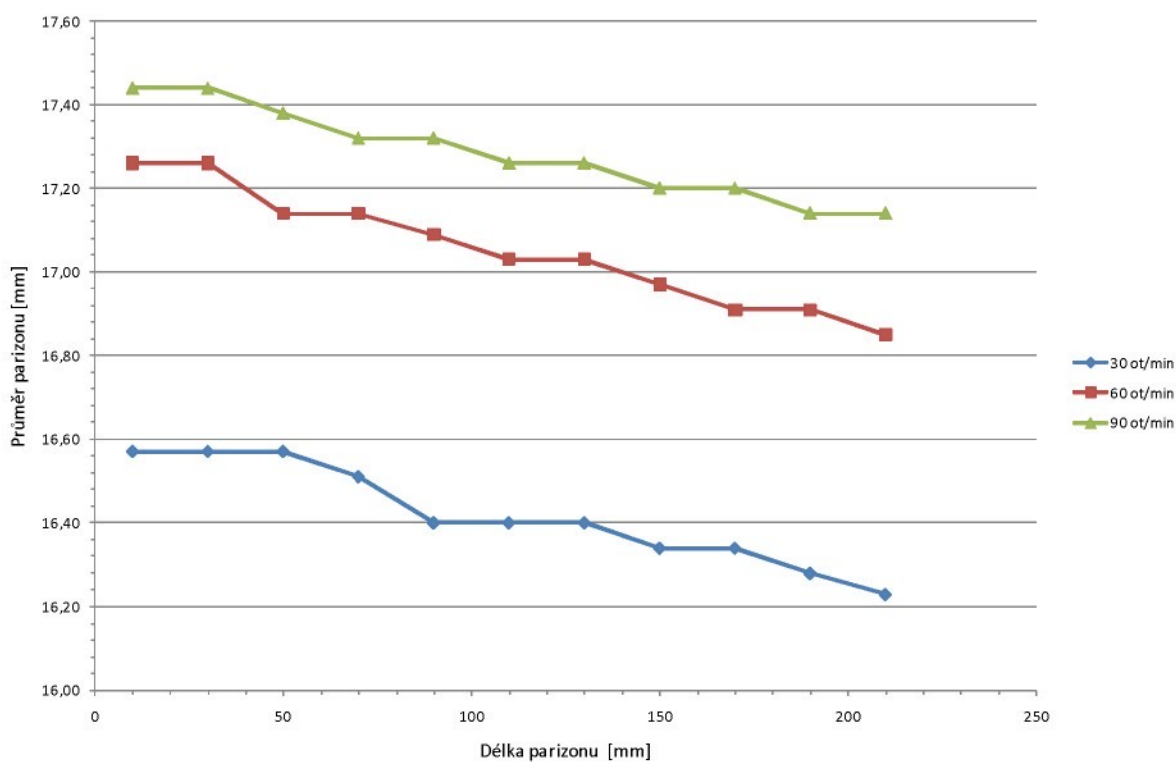


Obr. 6-28: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Tiplen R659

6.7.2 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 1,85 mm

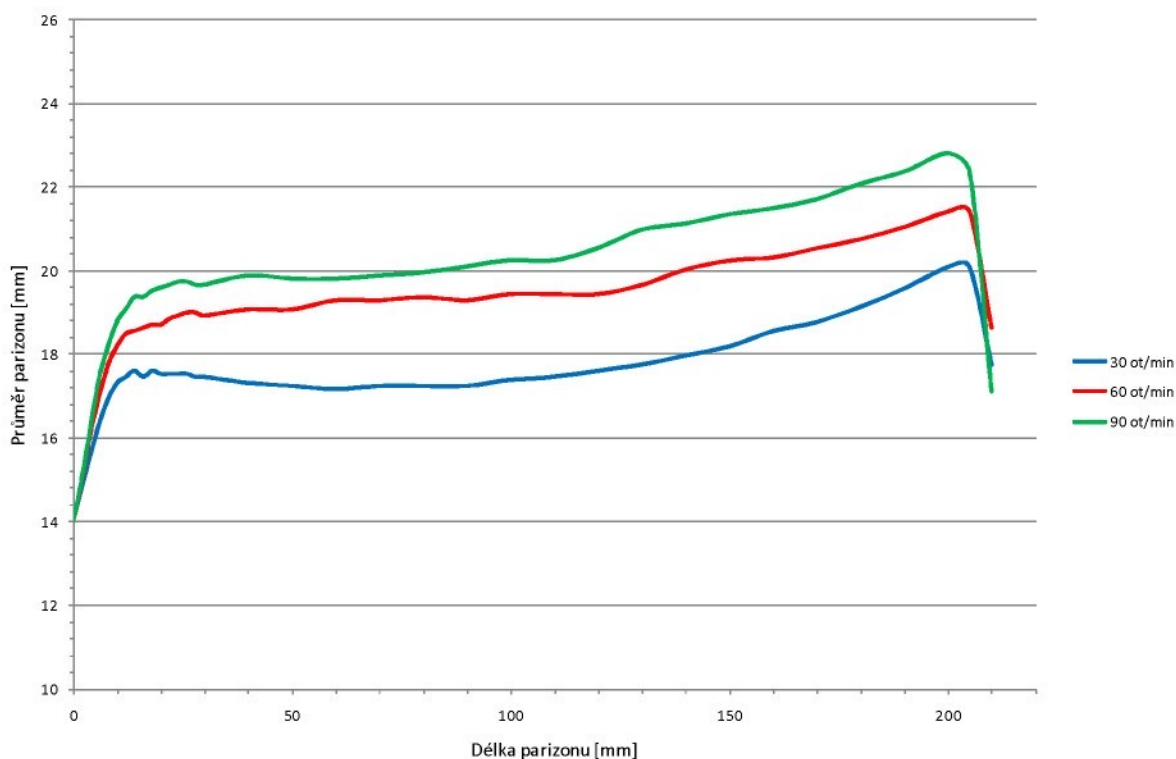


Obr. 6-29: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Tiplen R659

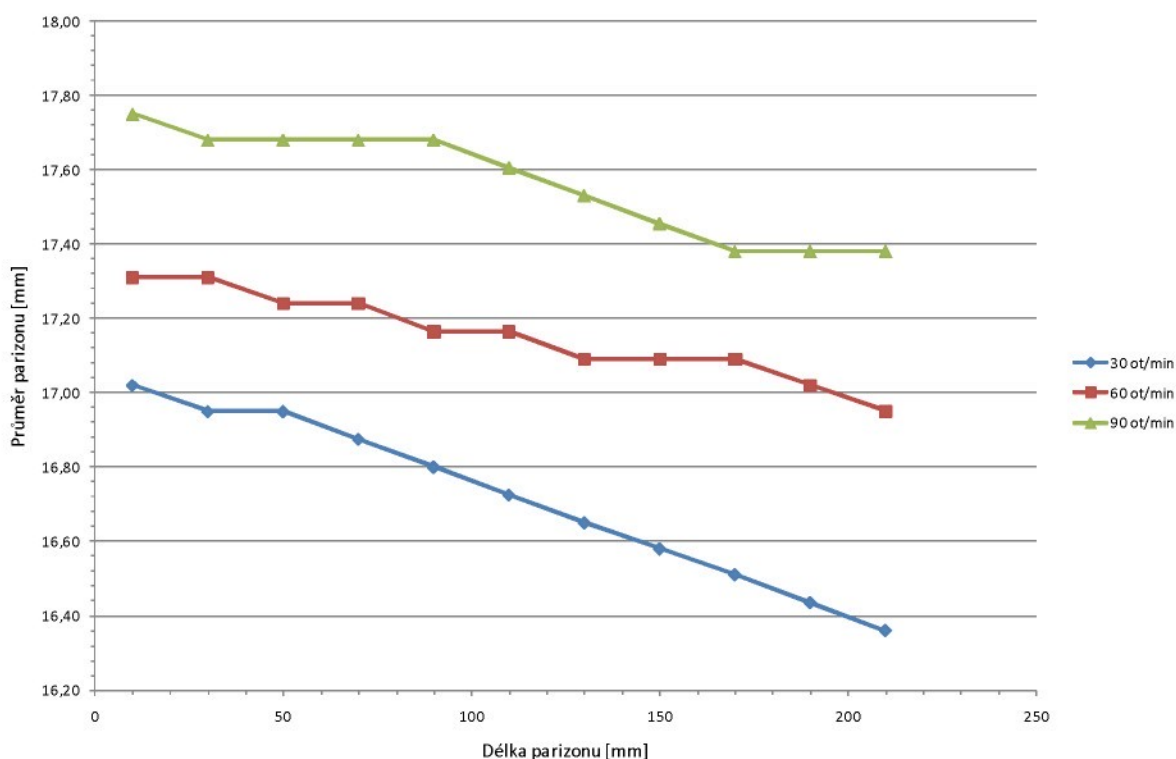


Obr. 6-30: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Tiplen R659

6.7.3 Profil parizonu při vytlačování štěrbinou 2,55 mm

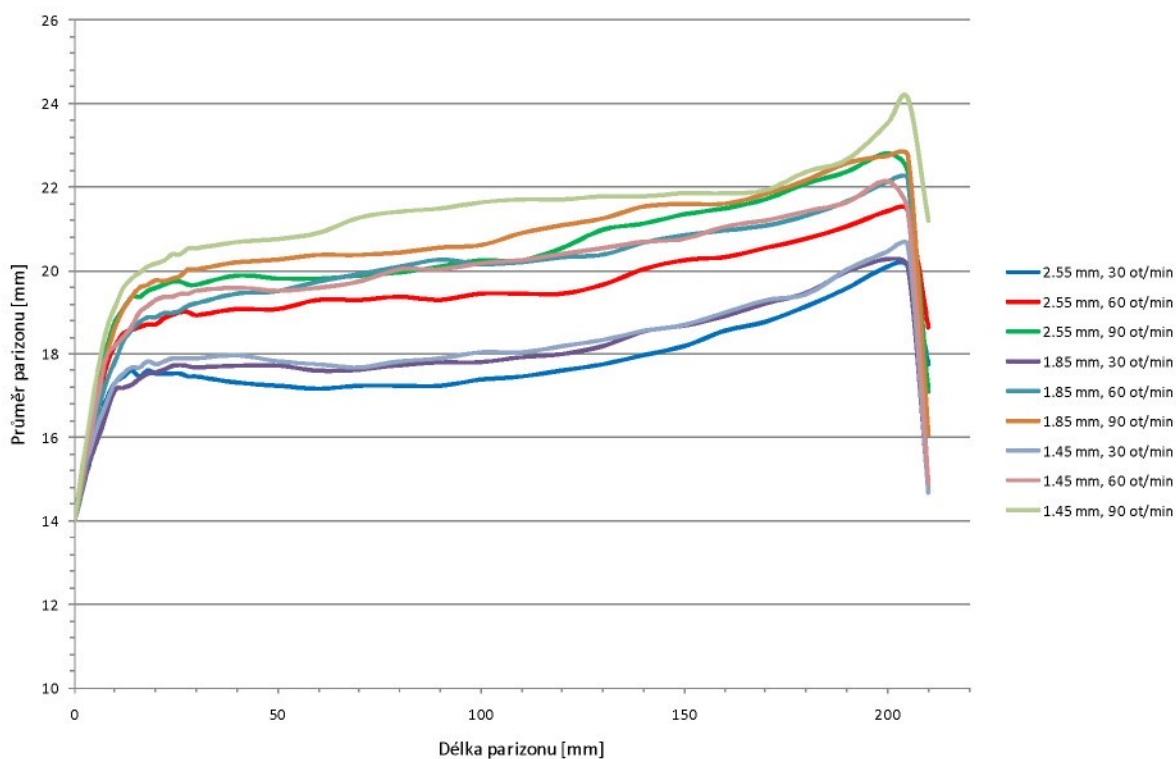


Obr. 6-31: Velikost průměru parizonu po délce v závislosti na otáčkách šneku – Tiplen R659



Obr. 6-32: Závislost průměru parizonu na délce ve vzdálenosti 6 mm pod hlavou – Tiplen R659

6.7.4 Narůstání parizonu v závislosti na velikosti štěrby vytlačovací hlavy



Obr. 6-33: Vliv velikosti štěrby na narůstání průměru parizonu při různých otáčkách šneku

6.8 Hodnocení výsledků

6.8.1 Efekt smykové rychlosti na narůstání průměru parizonu

Z uvedených výstupů experimentálního měření vyplývají následující závěry. Byl potvrzen vliv otáček šneku na narůstání průměru parizonu, a to u všech použitých materiálů. Zejména u polypropylénu je tento vliv značný. Pro teorii, ale i pro výrobní proces se potvrdil předpoklad, že jev narůstání lze jednoznačně ovlivňovat nastavením otáček šneku nebo velikostí výstupní štěrbiny vytlačovací hlavy. Oba tyto parametry souvisí se změnou smykové rychlosti vystupující taveniny. Uvedený poznatek lze doložit pomocí obrázků:

č.: 6-12 (PE-HD Liten BB29)

č.: 6-19 (PE-LD Bralen RB 2-62)

č.: 6-26 (homopolymer PP Mosten GB 005)

č.: 6-33 (kopolymer PP Tiplen R659).

Konkrétní číselné vyjádření hodnot narůstání průměru parizonu obsahují tabulky č. 6-10 až 6-13. Komplexní hodnocení je provedeno v kapitole 6.12.

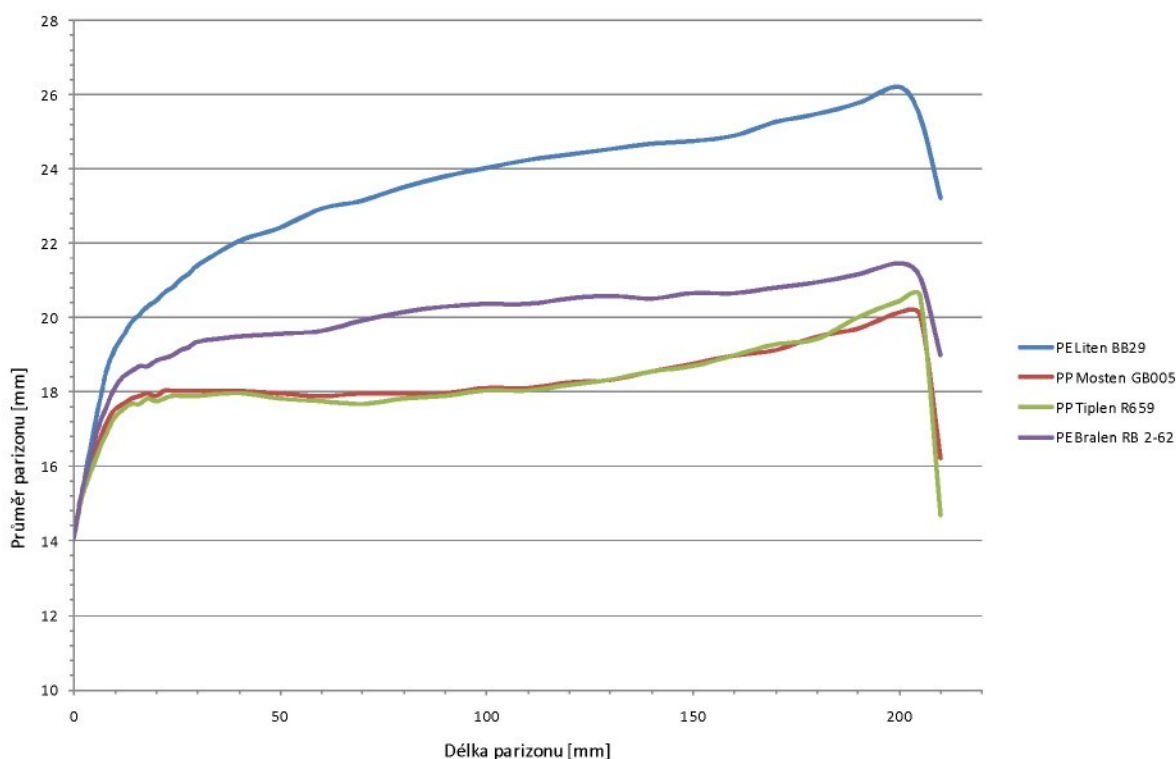
6.8.2 Efekt volby polymeru na narůstání průměru parizonu

Vliv použitého materiálu na narůstání parizonu je zřejmý z obr. 6-34 až obr. 6-42. Obrázky ukazují rozdílné tendence k narůstání u jednotlivých materiálů. Experiment prokazuje skutečnost, že polyetylény vykazují větší míru narůstání oproti polypropylénu (viz. tabulka č. 6.6). Díky rozvětvené molekulární struktuře vykazuje největší míru narůstání polyetylén PE-LD Bralen RB 2-62. Narůstání polyetylénu PE-HD Liten BB 29 již nedosahuje hodnot narůstání PE-LD, avšak míra jeho narůstání je v porovnání s polypropylénem vyšší. Potvrdil se předpoklad, že polypropylén Tiplen R 659 má díky nižší hodnotě ITT větší přírůstek narůstání ve srovnání s materiálem Mosten GB 005.

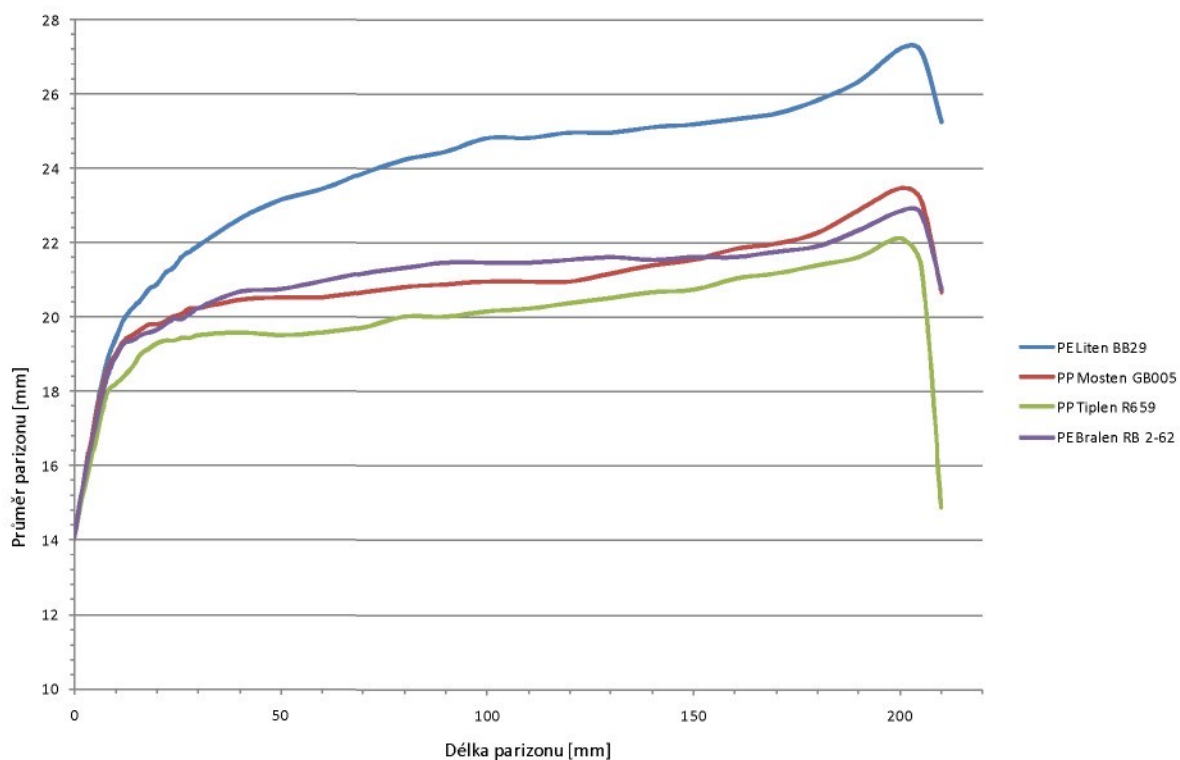
Tab. 6.6: Narůstání průměru parizonu v závislosti na volbě polymeru.

Typ polymeru	ITT	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]
PE-HD Liten BB-29	0,15	30	16,85	20,39%
		60	17,03	21,63%
		90	17,10	22,16%
PE-LD Bralen 2-62	2	30	17,38	24,12%
		60	17,77	26,92%
		90	17,85	27,49%
Homopolymer PP Mosten GB005	5	30	15,78	12,75%
		60	16,65	18,96%
		90	16,98	21,30%
Kopolymer PP Tiplen R 659	2	30	16,03	14,52%
		60	16,73	19,53%
		90	17,20	22,88%

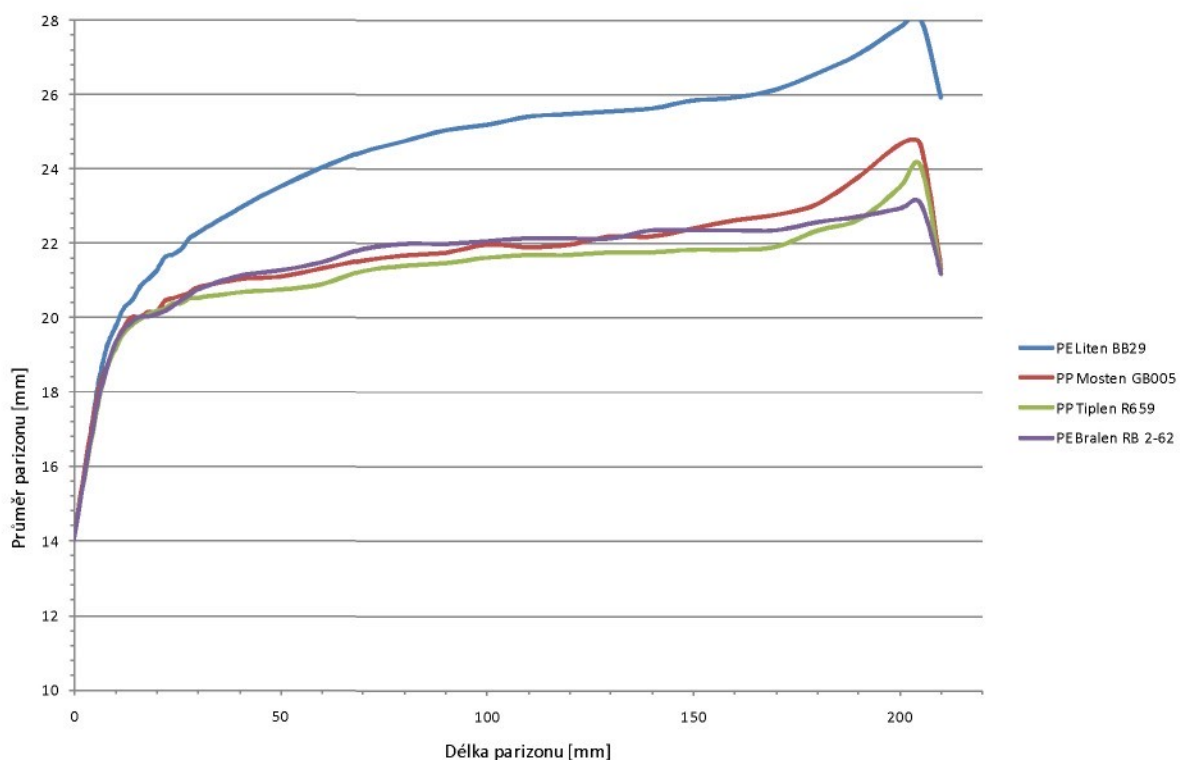
Poznámka: Uvedené hodnoty jsou naměřeny ve vzdálenosti 6 mm pod vytlačovací tryskou pro střední šířku štěrby 1.85 mm.



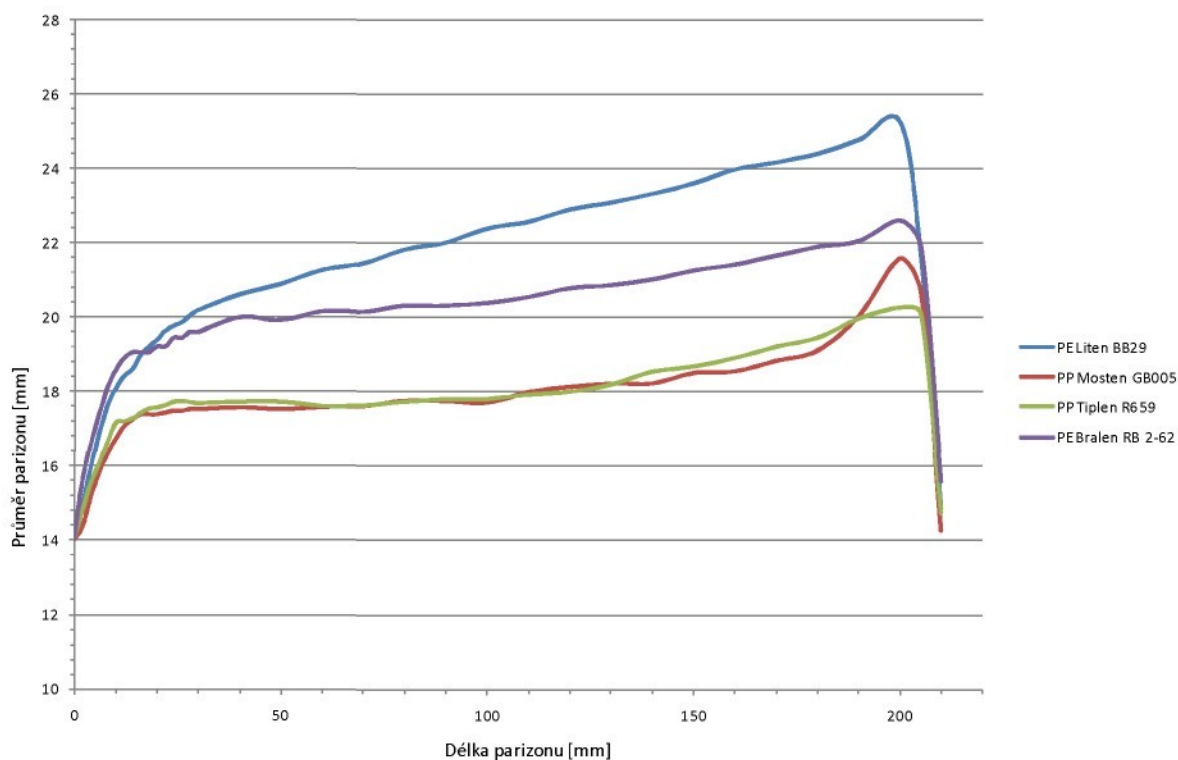
Obr. 6-34: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrbina 1.45 mm, 30 ot/min.



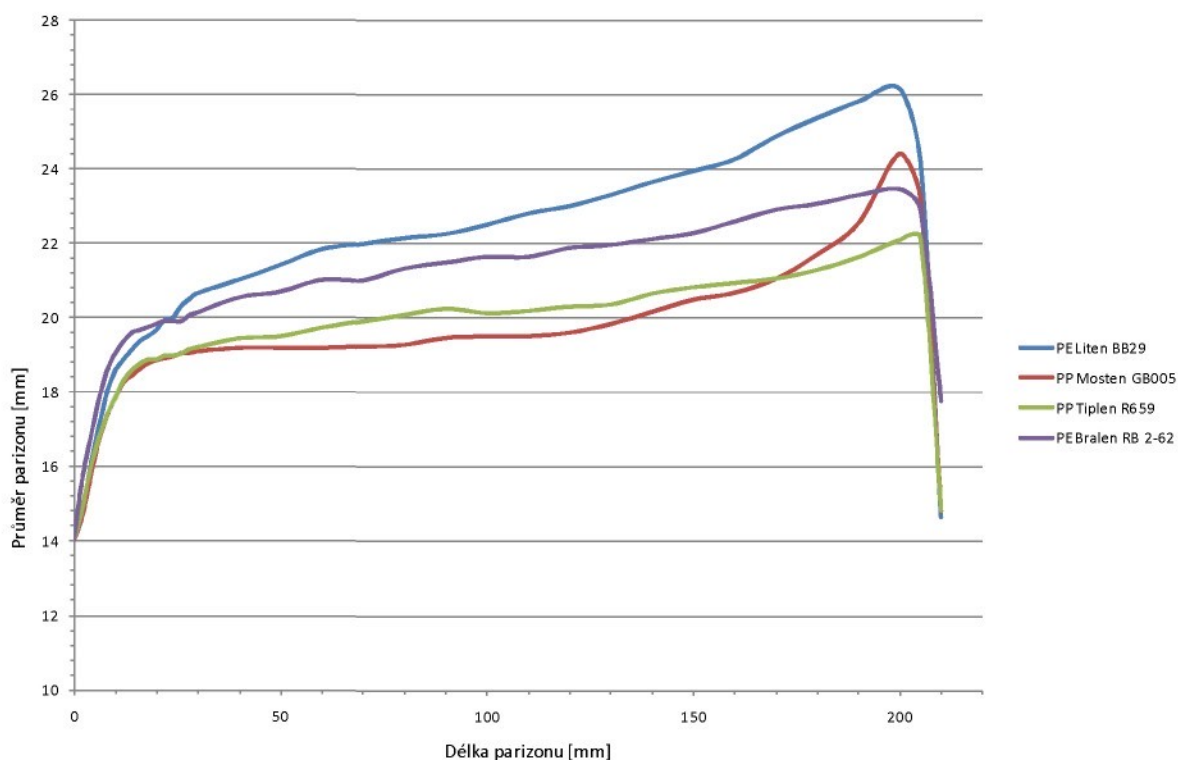
Obr. 6-35: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrba 1.45 mm, 60 ot/min.



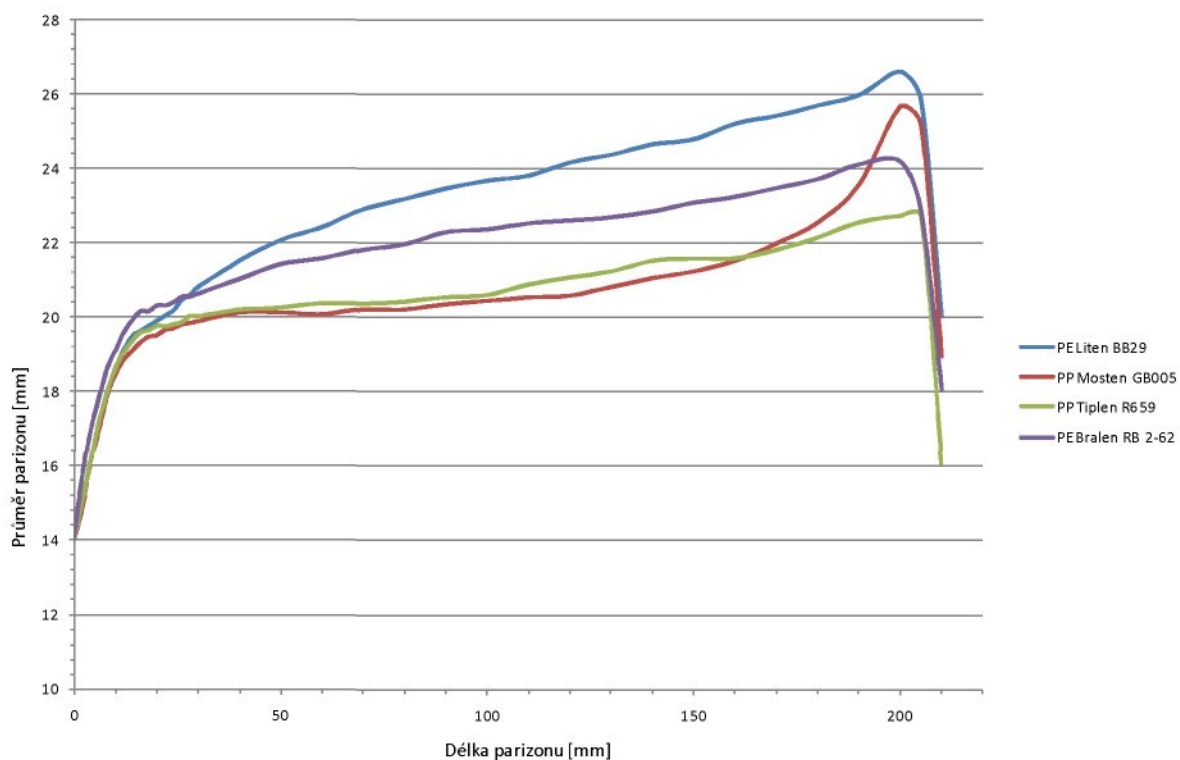
Obr. 6-36: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrba 1.45 mm, 90 ot/min.



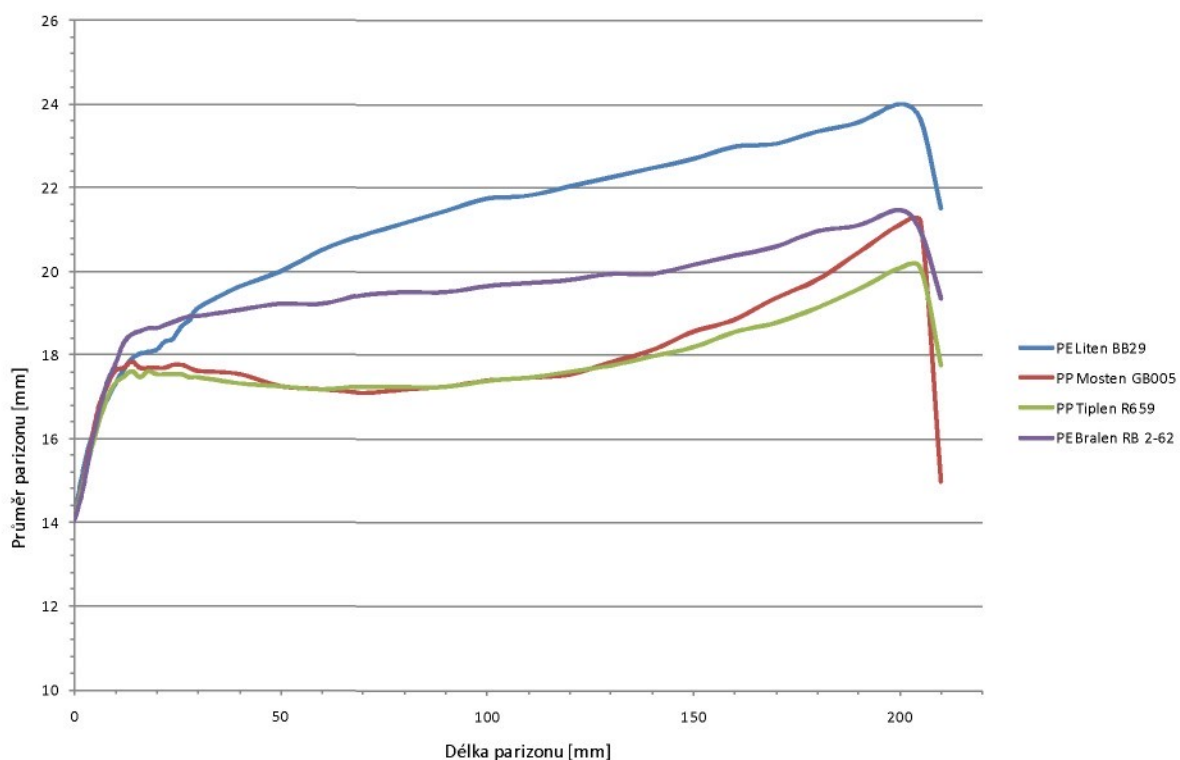
Obr. 6-37: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrbina 1.85 mm, 30 ot/min.



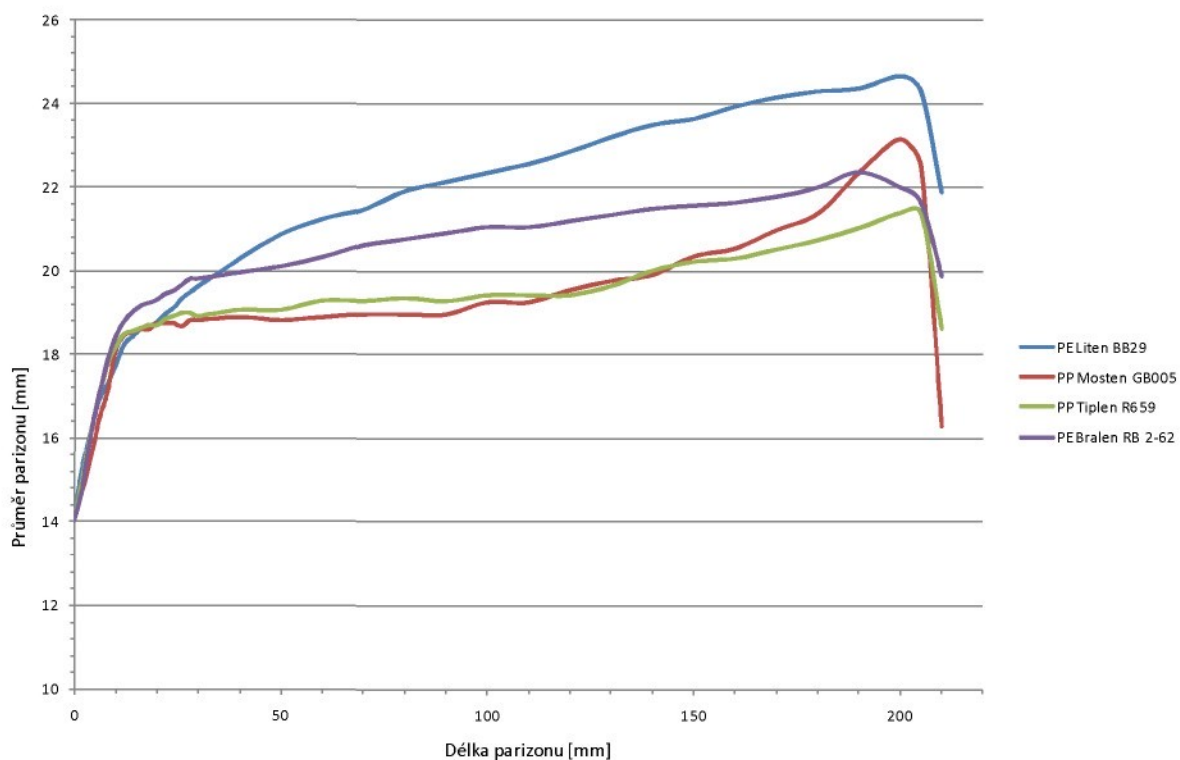
Obr. 6-38: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrbina 1.85 mm, 60 ot/min.



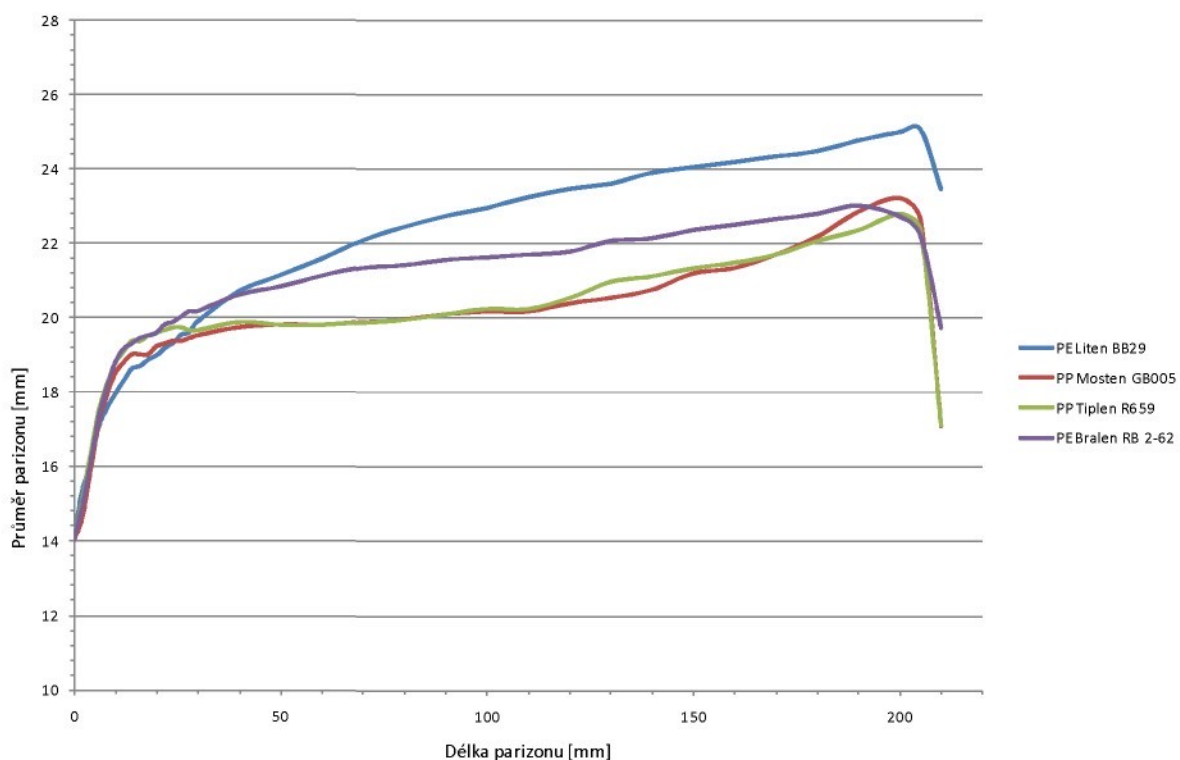
Obr. 6-39: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrba 1.85 mm, 90 ot/min.



Obr. 6-40: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrba 2.55 mm, 30 ot/min.



Obr. 6-41: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrba 2.55 mm, 60 ot/min.



Obr. 6-42: Vliv typu polymeru na narůstání průměru parizonu – štěrba 2.55 mm, 90 ot/min.

Z průběhů je patrný i rozdílný průběh narůstání u polypropylénu a polyetylénu. U polyetylénu, po počátečním prudkém nárůstu, dochází k pozvolnému ustálenému narůstání. Oproti tomu u polypropylénu po prudkém počátečním nárůstu k dalšímu narůstání již téměř nedochází (viz. Tabulka 6.7).

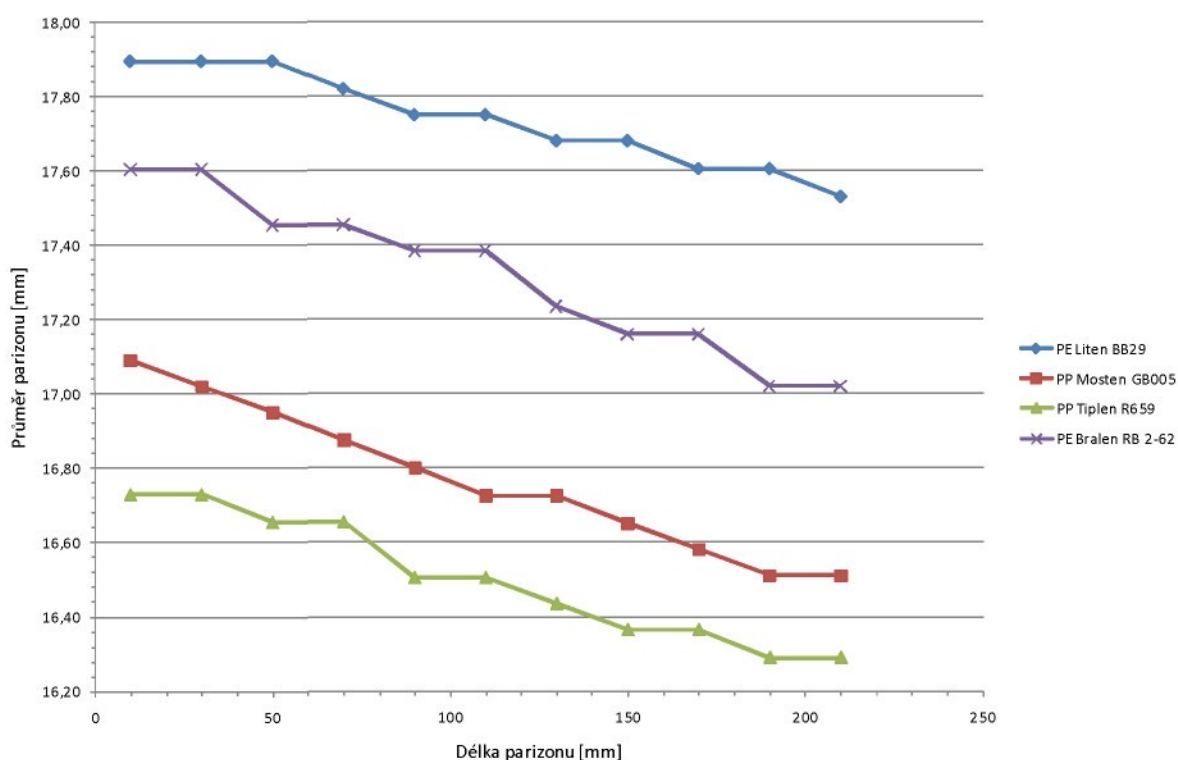
Tab. 6.7: Charakter narůstání průměru parizonu ve střední části v závislosti na volbě polymeru.

Typ polymeru	ITT	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]	Rozdíl narůstání ve srovnání s PE Liten BB-29 [%]
PE-HD Liten BB-29	0,15	30	20,89	10,73%	-
		60	21,41	12,47%	-
		90	22,08	15,52%	-
PE-LD Bralen 2-62	2	30	19,91	5,10%	-5,63%
		60	20,70	6,23%	-6,24%
		90	21,42	7,93%	-7,59%
Homopolymer PP Mosten GB005	5	30	17,52	1,00%	-9,73%
		60	19,18	2,34%	-10,13%
		90	20,12	4,34%	-11,18%
Kopolymer PP Tiplen R 659	2	30	17,52	-0,28%	-11,01%
		60	19,18	2,15%	-10,32%
		90	20,12	2,45%	-13,07%

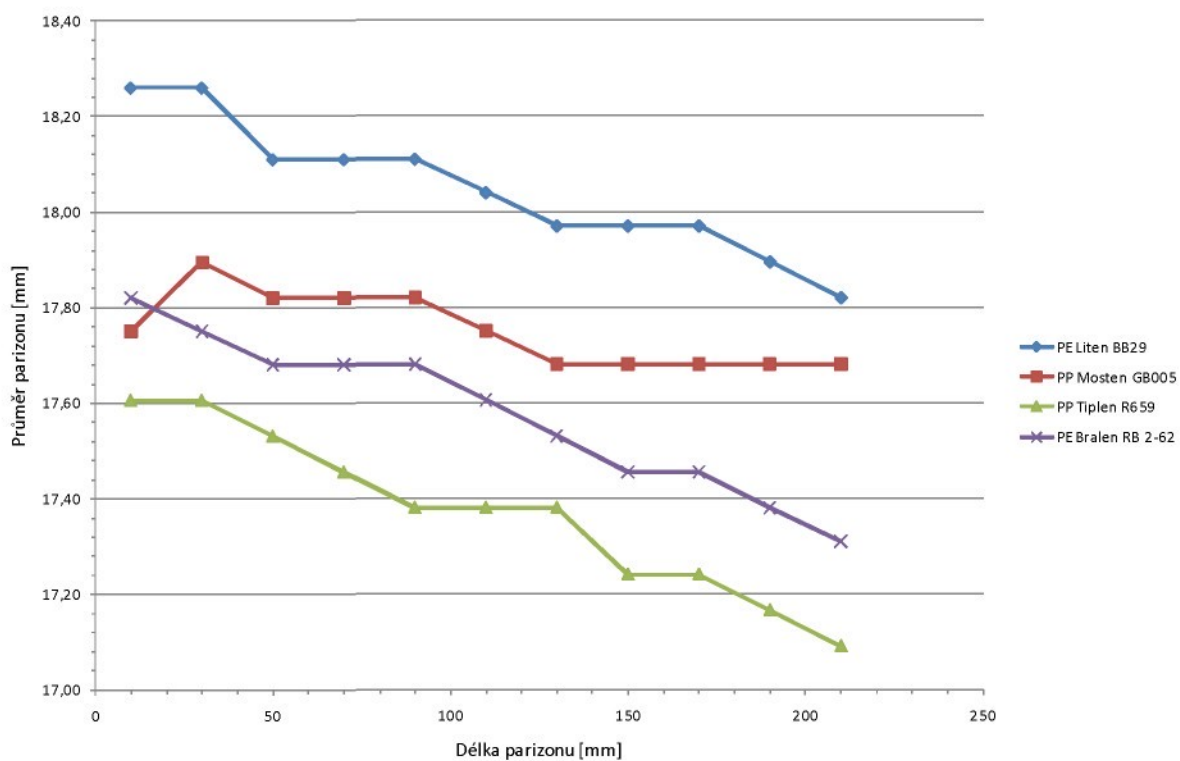
Poznámka: Uvedené hodnoty jsou naměřeny ve vzdálenosti 50 mm pod vytlačovací tryskou pro střední šířku štěrbinu 1.85 mm.

Nejvyšší absolutní míru nárůstu ve střední části parizonu vykazuje materiál PE-HD Liten BB-29 na rozdíl od rozvětveného PE-LD Bralen RB 2-62, který vykazoval největší hodnoty narůstání ihned po opuštění vytlačovací hubice. Tento rozdíl v chování je dán rozdílným ITT, kdy je zřejmé, že HD-PE s indexem toku 0,15 je výrazně méně citlivý na protahování parizonu vlivem vlastní hmotnosti (viz. Tabulka 6.7).

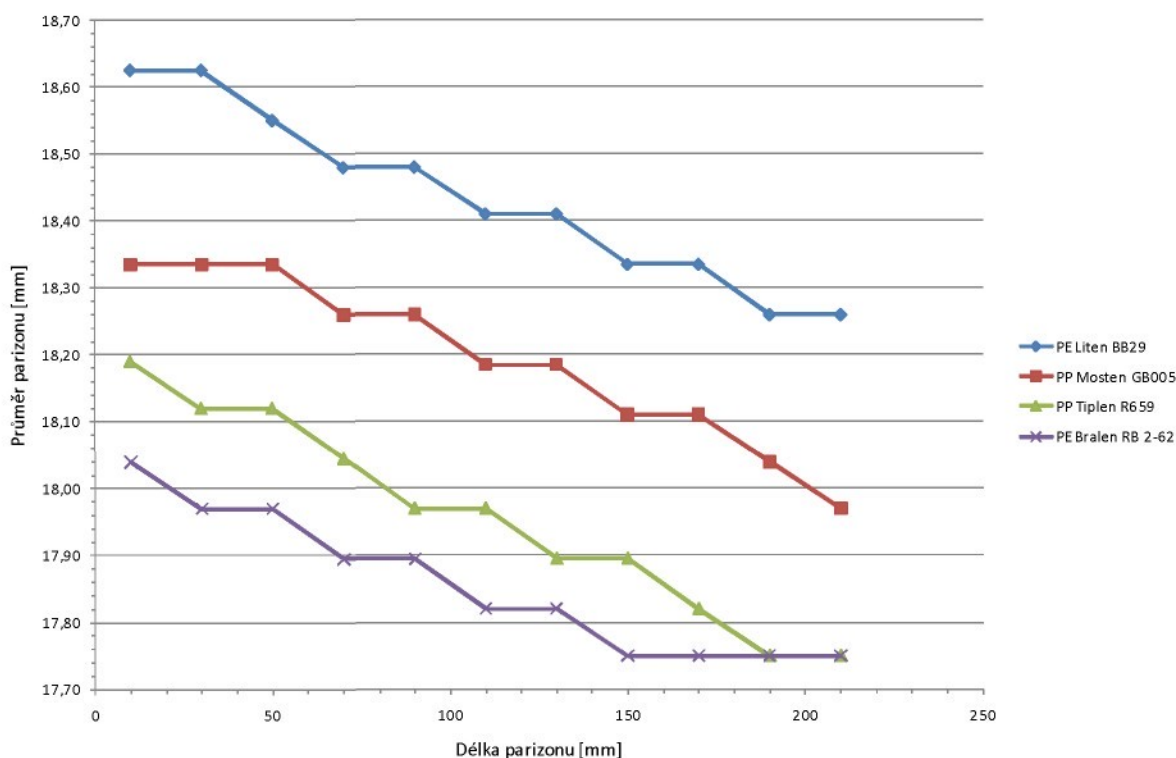
Závěrem lze tedy konstatovat, že vhodným výběrem materiálu lze zásadně ovlivnit míru narůstání průměru parizonu. Další závěry a hodnocení obsahuje kapitola 6.12.



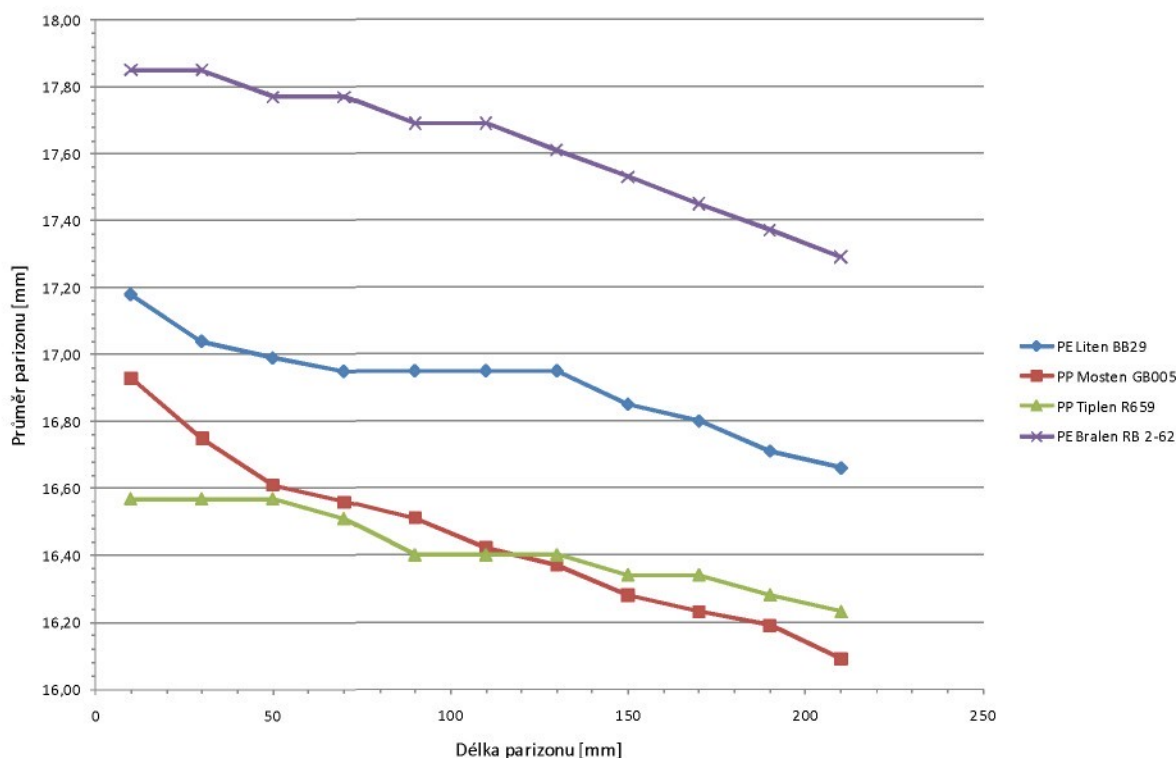
Obr. 6-43: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 1.45 mm, 30 ot/min.



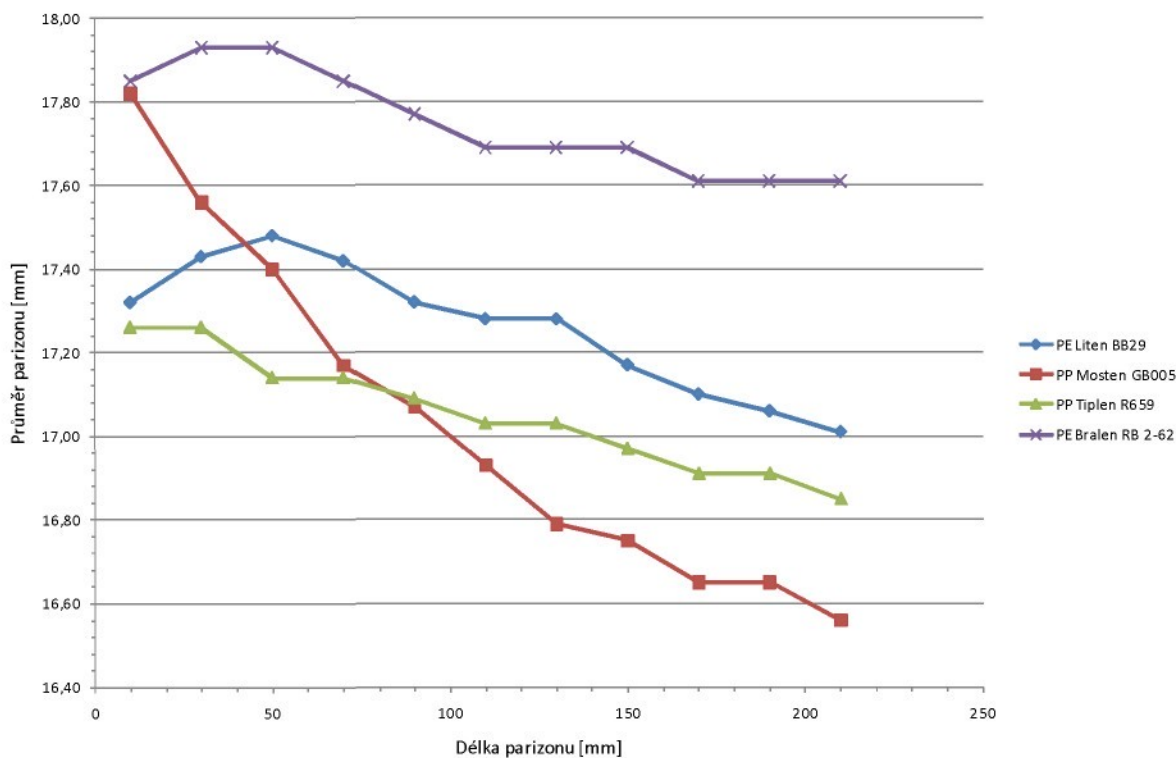
Obr. 6-44: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 1.45 mm, 60 ot/min.



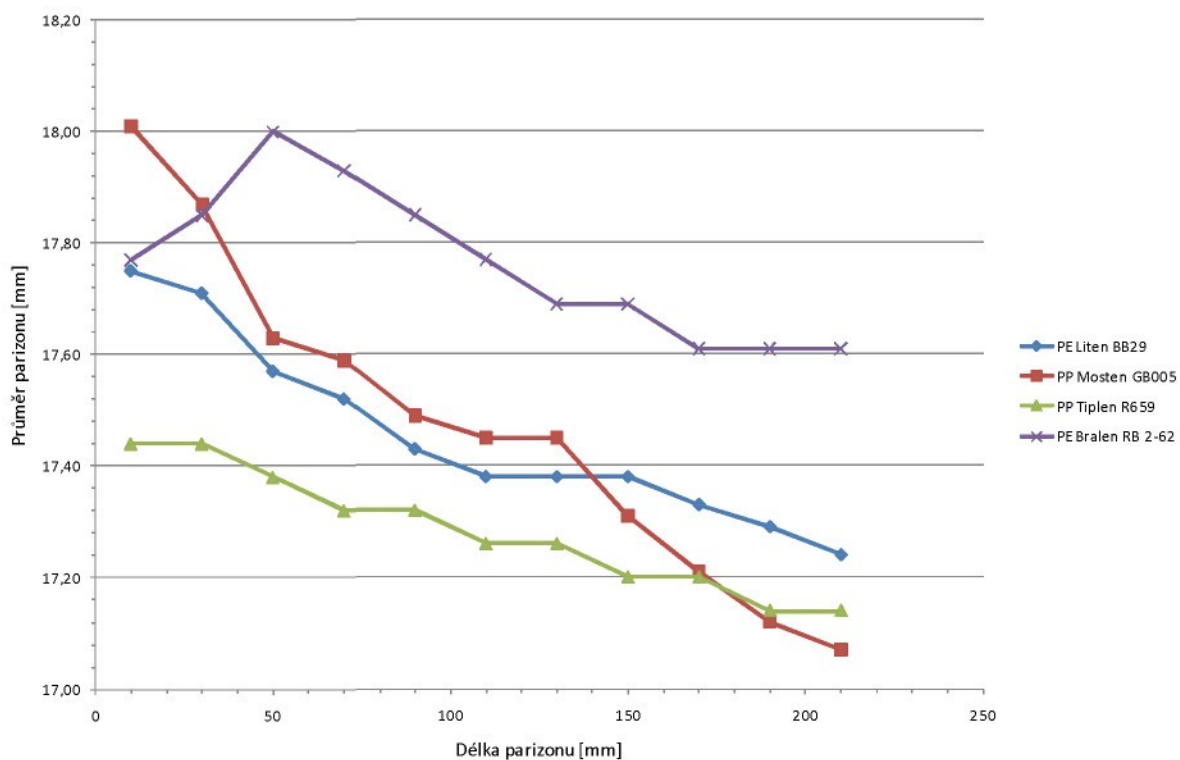
Obr. 6-45: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 1.45 mm, 90 ot/min.



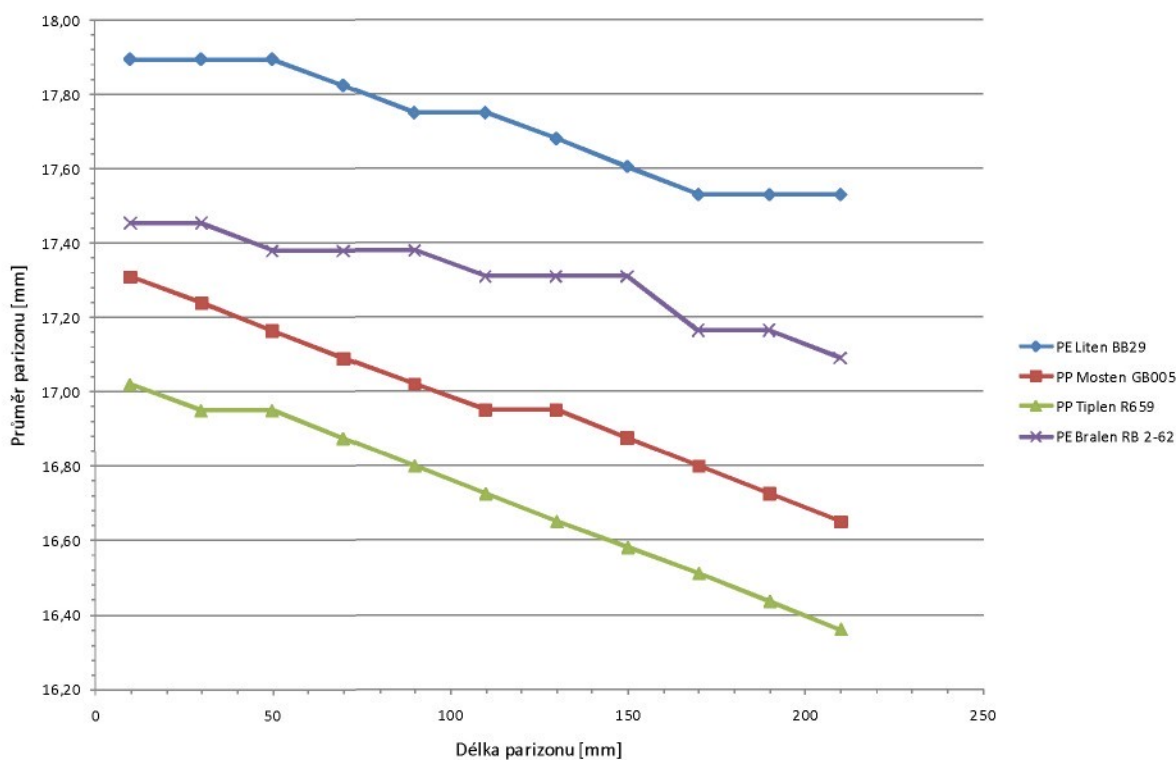
Obr. 6-46: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 1.85 mm, 30 ot/min.



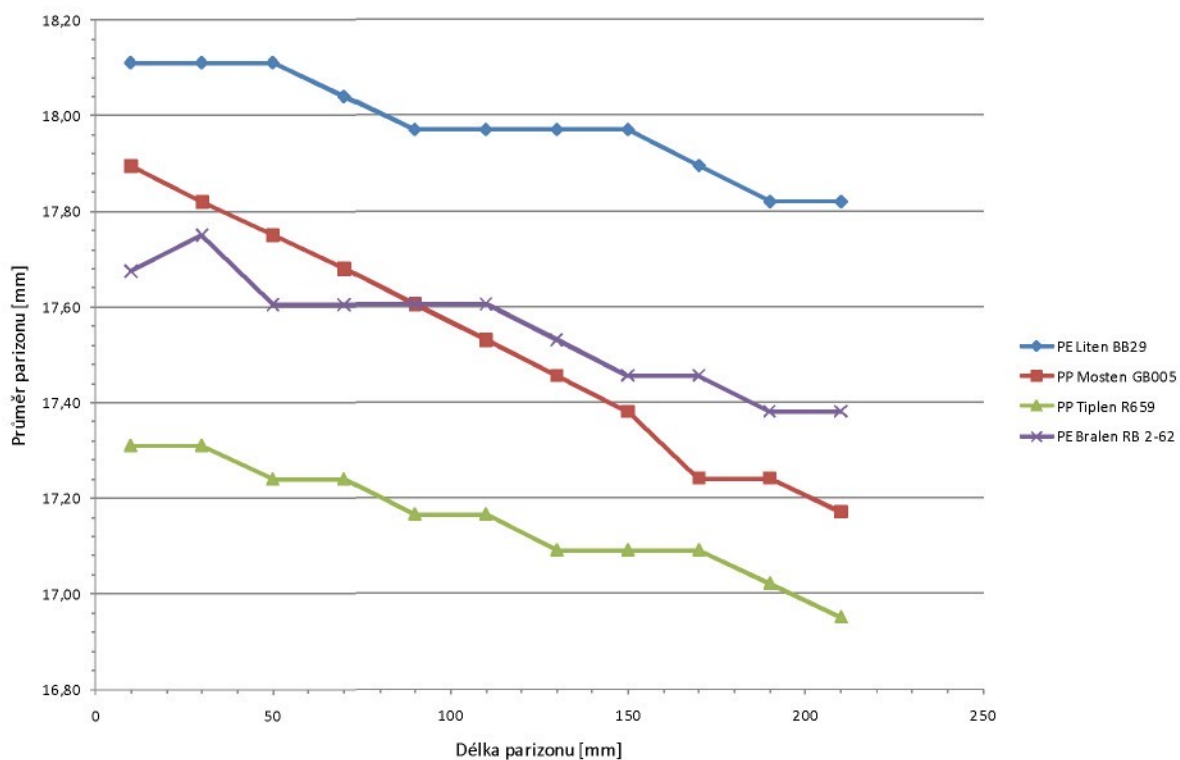
Obr. 6-47: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 1.85 mm, 60 ot/min.



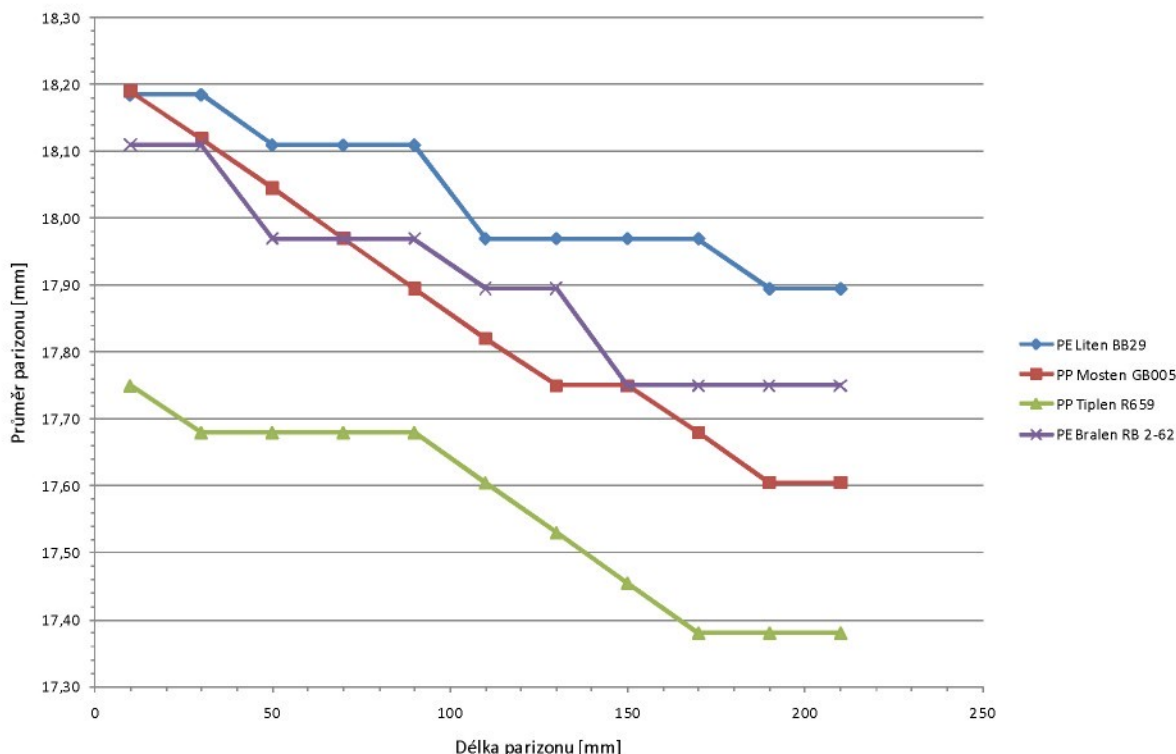
Obr. 6-48: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 1.85 mm, 90 ot/min.



Obr. 6-49: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 2.55 mm, 30 ot/min.



Obr. 6-50: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 2.55 mm, 60 ot/min.



Obr. 6-51: Vliv vzrůstající délky parizonu na jeho průměr v určitém místě 6 mm pod hubicí pro různé typy polymerů štěrbina 2.55 mm, 90 ot/min.

Na výše uvedených průbězích (obr. 6-43 až obr. 6-51) je zobrazeno, jaký vliv má vzrůstající délka vytlačovaného parizonu na jeho průměr v určitém měřeném místě. Křivky v grafech mají klesající charakter, což potvrzuje skutečnost, že zvyšující se délka parizonu při současném působení gravitační síly způsobuje protahování a ztenčení parizonu. Snižuje tak míru narůstání průměru parizonu při všech použitých rychlostech vytlačování. Proces narůstání parizonu je do určité míry kompenzován ztenčením parizonu při jeho protahování v důsledku vlastní hmotnosti.

Z grafů je dále patrné, že největší zmenšení průměru parizonu v důsledku rostoucí délky vykazuje PP Mosten GB 005, který má ze všech použitých materiálů nejvyšší index toku taveniny. Tento závěr dokazuje poznatek, že k většímu protahování a ztenčení parizonu jsou náchylné materiály s vyšším indexem toku taveniny.

6.9 Matematický popis jevu

Tato část disertační práce se zabývá nalezením určité matematické či statistické metody, kterou by bylo možné zpracovat naměřená data a jejímž výsledkem by bylo nalezení jednoduchého empirického resp. matematického vztahu. Tento empirický vztah by měl umožňovat rychlý „odhad“ průměru parizonu v závislosti na určitých technologických podmínkách a druhu použitého materiálu [21, 22].

6.9.1 Regresní analýza

Za účelem nalezení matematického vztahu popisu narůstání a změny geometrie vytlačovaného parizonu v závislosti na určitých technologických parametrech byla vybrána metoda regresní analýzy.

Regresní analýza je souhrn statistických metod a postupů, určených k detailnímu pochopení závislostí mezi dvěma či více proměnnými. Slouží k odhadu hodnot nebo středních hodnot nějaké proměnné odpovídajících určitým hodnotám jedné nebo více vysvětlujících proměnných.

Regresní analýzu lze rozdělit na dva základní typy - na jednoduchou regresní analýzu a vícenásobnou regresní analýzu. Jednoduchá regresní analýza popisuje závislost dvou číselných proměnných, z nichž jedna je příčina (vysvětlující proměnná) a druhá je důsledek (vysvětlovaná proměnná). Vícenásobná regresní analýza popisuje závislost více číselných proměnných, z nichž více je příčinami (vysvětlující proměnné) a jen jedna je důsledek (vysvětlovaná proměnná) [21, 22].

6.9.2 Výběr regresního modelu

Regresní model je zjednodušeným zobrazením reality. Závislost se snaží popsat pomocí konkrétní rovnice (v grafu určitou křivkou). Regresní model zahrnuje dvě složky:

- Deterministická složka – vliv vysvětlující proměnné
- Náhodná složka – všechny ostatní (nepopsané) vlivy

Deterministická složka popisuje závislost pouze mezi hlavními proměnnými, tedy těmi, co jsou pozorovány. Je vyjádřena konkrétní funkcí.

Náhodná složka popisuje závislost vysvětlované proměnné na neznámých nebo nepozorovaných proměnných a popisuje i vliv náhody. Nelze ji funkčně vyjádřit.

Výběr vhodného modelu je důležitým krokem regresní analýzy, protože má rozhodující vliv na kvalitu modelu. Nejvhodnějším modelem je takový model, jehož funkční hodnoty se nejvíce blíží hodnotám skutečným (naměřeným). Funkce procházející nejbližše všem bodům je vždy jen jedna a k jejímu nalezení slouží metoda nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců tedy v regresní analýze slouží jako nástroj k bodovému odhadu parametrů výběrové regresní funkce [21, 22].

Existuje řada funkcí, u kterých lze jejich parametry pomocí metody nejmenších čtverců odhadnout:

- Regresní přímka
- Regresní parabola
- Regresní hyperbola
- Regresní polynom
- Regresní logaritmická funkce, atd.

Při volbě nejlepšího modelu lze použít dva postupy:

- Apriorní volba – model je zvolen na základě praktické nebo teoretické znalosti závislosti.
- Empirická volba – Nejvhodnější model se volí posouzením bodového grafu nebo pomocí nástrojů regresní analýzy.

Pokud není počet pozorování příliš velký, nemusí tento postup vést k nalezení vhodné funkce pro popis závislosti v základním souboru a popisuje pouze závislost v souboru výběrovém.

K volbě regresního modelu pro popis narůstání průměru parizonu byla použita empirická volba. Po posouzení bodového grafu byla zvolena vícenásobná regresní analýza pomocí regresní logaritmické funkce.

Cílem bylo navržení co možná nejpřesnějšího, ale zároveň co nejjednoduššího modelu, který by byl obecně platný a jeho parametry snadno interpretovatelné.

Obecný tvar vícenásobné regresní analýzy pomocí logaritmického modelu je následující:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots \beta_n \cdot x_n \quad [6.1]$$

η - vysvětlovaná proměnná

β - koeficienty

x - vysvětlující proměnné

Protože míra narůstání průměru parizonu D se postupně mění s časem čili při konstantní rychlosti vytlačování s délkou parizonu, musí být délka parizonu zastoupena v rovnici jako jedna z vysvětlujících proměnných. Délkou L se míní vzdálenost místa zjišťovaného průměru od vytlačovací hubice. Jako další vysvětlující proměnnou jsou otáčky šneku n a velikost štěrbin vytlačovací hlavy h , která souvisí se smykovou rychlostí vytlačované taveniny polymeru. Jejich vliv na narůstání byl prokázán v kapitole 6.8. Do rovnice se dále musí promítnout vliv použitého materiálu, a to takovým parametrem, který je vyjádřen číselně. Jako nejvhodnější materiálový parametr se jeví index toku taveniny ITT .

Tvar regresní analýzy po dosazení vysvětlujících proměnných potom je:

$$D = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln L + \beta_2 \cdot n + \beta_3 \cdot h + \beta_4 \cdot ITT \quad [6.2]$$

D - vysvětlovaná proměnná (průměr parizonu)

β - koeficienty

L - délka v místě zjišťovaného průměru

n - otáčky šneku

h - velikost štěrbin vytlačovací hlavy

ITT - index toku taveniny použitého materiálu (MFR)

6.10 Regresní analýza – narůstání průměru parizonu

S přihlédnutím na naměřená data a s ohledem na praxi bylo výhodnější provést regresní analýzu zvlášť pro polyetylény a zvlášť pro polypropylény. Tím vznikly dvě základní rovnice. Hlavními důvody tohoto rozhodnutí byly:

- rozdílné podmínky při stanovování ITT (rozdílná teplota)
- téměř totožná míra narůstání u polypropylénů i přes rozdílné ITT
- vyšší přesnost regresního modelu

Regresní analýza byla provedena pomocí softwaru Microsoft Excel (verze 2007) v záložce data (data – analýza – analýza dat – regrese). V Excelu je řada statistických termínů chybně přeložena do češtiny, v následujících výstupech regrese jsou již uvedeny správné výrazy.

6.10.1 Výstup regresní analýzy pro PE

Tab. 6.8: Výstup regresní analýzy pro PE

Regresní statistika	
Kor_koef	0,917177934
R^2	0,841215363
R^2 upraveno	0,840197513
Sm_chyba	1,106831959
Pozorování	629

ANOVA					
	St_volnosti	SS	MS	F	Hodnota P
Regrese	4	4049,922254	1012,480563	826,4628065	1,1829E-247
Rezidua	624	764,4480389	1,225076985		
Celkem	628	4814,370293			

	Koeficienty	Sm_chyba	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95,0%	Horní 95,0%
Konstanta	15,97986428	0,257878754	61,96657941	8,409E-269	15,47344898	16,48627958	15,47344898	16,48627958
ln L	1,702535159	0,031892593	53,38340318	8,2033E-235	1,63990535	1,765164968	1,63990535	1,765164968
otáčky n	0,019839437	0,001802445	11,00696027	7,11385E-26	0,016299845	0,023379029	0,016299845	0,023379029
ITT	-0,698956822	0,047711228	-14,64973434	5,54919E-42	-0,792650838	-0,605262806	-0,792650838	-0,605262806
šterbina h	-1,035263776	0,09709584	-10,6622877	1,69239E-24	-1,225937952	-0,844589601	-1,225937952	-0,844589601

Výsledná rovnice regresní logaritmické funkce pro PE je:

$$D = 15,98 + 1,7 \cdot \ln L + 0,02 \cdot n - 1,04 \cdot h - 0,7 \cdot ITT \quad [6.3]$$



D - průměr parizonu [mm]

L - délka v místě zjišťovaného průměru [mm]

n - otáčky šneku [min^{-1}]

h - velikost štěrbin vytláčovací hlavy [mm]

ITT - index toku taveniny použitého materiálu (MFR)

Kvalita modelu se posuzuje podle koeficientu determinace R^2 , který vystihuje, jak přesně data přiléhají ke křivce regresního modelu. Čím vyšší je jeho hodnota, tím je model vhodnější. V tomto případě činí 0.841, to znamená, že model odpovídá naměřeným hodnotám na 84.1%. Jinak řečeno, daným modelem bylo vysvětleno 84.1% příčin změn průměru parizonu.

6.10.2 Výstup regresní analýzy pro PP

Tab. 6.9: Výstup regresní analýzy pro PP

Regresní statistika	
Kor_koef	0,854137415
R^2	0,729550724
R^2 upraveno	0,727817075
Sm_chyba	1,093941839
Pozorování	629

ANOVA

	$St_volnosti$	SS	MS	F	Hodnota P
Regrese	4	2014,386145	503,596536	420,817962	1,479E-175
Rezidua	624	746,7462584	1,19670875		
Celkem	628	2761,132403			

	Koeficienty	Sm_chyba	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95,0%	Horní 95,0%
Konstanta	13,71615972	0,269096896	50,9710811	1,291E-224	13,1877145	14,2446049	13,1877145	14,2446049
$\ln L$	1,071283743	0,031521173	33,9861633	4,323E-144	1,00938332	1,13318417	1,00938332	1,13318417
otáčky n	0,039471739	0,001781454	22,1570411	1,0894E-80	0,03597337	0,04297011	0,03597337	0,04297011
ITT	0,045712719	0,029079278	1,57200324	0,11645668	-0,0113924	0,10281782	-0,0113924	0,10281782
šterbina h	-0,602227384	0,095965065	-6,2754856	6,5225E-10	-0,790681	-0,4137738	-0,790681	-0,4137738

Výsledná rovnice regresní logaritmické funkce pro PP je:

$$D = 13,72 + 1,07 \cdot \ln L + 0,04 \cdot n - 0,6 \cdot h + 0,05 \cdot ITT \quad [6.4]$$

Ověření existence závislosti narůstání na ITT materiálu:

Testovaná hypotéza $H_0: \beta_4 = 0$

Při rozhodování o tom, zda je hodnota testové statistiky v kritickém oboru, není nutné hledat kvantil t-rozdělení, ale je možné využít p-hodnoty (Hodnota



P). Je-li p-hodnota menší než α , H_0 zamítneme na hladině významnosti α . Protože p-hodnota byla rovna 0.116, byla tedy větší než $\alpha = 0.05$, znamená to, že platí $H_0: \beta_4 = 0$.

Tím bylo prokázáno, že míra narůstání u polypropylénu nezávisí na ITT a rovnici bylo možné zjednodušit odebráním členu ITT .

Tab. 6.10: Výstup regresní analýzy pro PP bez ohledu na ITT

Regresní statistika	
Kor_koef	0,85351021
R ²	0,72847968
R ² upraveno	0,72717638
Sm_chyba	1,0952286
Pozorování	629

ANOVA

	St_volnosti	SS	MS	F	Hodnota P
Regrese	3	2011,428845	670,476282	558,951163	1,9729E-176
Rezidua	625	749,7035581	1,19952569		
Celkem	628	2761,132403			

	Koeficienty	Sm_chyba	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95,0%	Horní 95,0%
Konstanta	13,8744152	0,249850034	55,5309721	7,497E-244	13,38376804	14,3650624	13,383768	14,3650624
ln L	1,07149425	0,031557966	33,9532102	5,249E-144	1,009521762	1,13346673	1,00952176	1,13346673
otáčky n	0,03947727	0,001783545	22,1341564	1,3497E-80	0,035974807	0,04297974	0,03597481	0,04297974
šterbina h	-0,60195951	0,096077794	-6,26533444	6,9284E-10	-0,790633892	-0,41328513	-0,79063389	-0,41328513

Po opětovně provedené regresi je výsledná rovnice následující:

$$D = 13,87 + 1,07 \cdot \ln L + 0,04 \cdot n - 0,6 \cdot h \quad [6.5]$$

Po provedené kontrole výpočtem se kvalita modelu po odebrání členu ITT významně nesnížila a činí 72.8%.

6.11 Souhrn výsledků regresní analýzy

Pro úplnost byly regresní analýzou určeny rovnice pro jednotlivé materiály. Výsledky těchto analýz jsou uvedeny v následující tabulce spolu s obecnými rovnicemi:

Tab. 6.11: Souhrn výsledků regresní analýzy – výsledné rovnice

<i>Souhrn regresních logaritmických rovnic</i>		
<i>Obecné rovnice</i>		
Polymer	Rovnice	Kvalita modelu
PE	$D = 15,97 + 1,7 \ln L + 0,02 n - 1,03 h - 0,7 ITT$	84,12%
PP	$D = 13,87 + 1,07 \ln L + 0,04 n - 0,6 h$	72,85%
<i>Rovnice pro jednotlivé materiály</i>		
Polymer	Rovnice	Kvalita modelu
PE-HD Liten BB 29	$D = 15,84 + 2,09 \ln L + 0,02 n - 1,67 h$	89,47%
PE-LD Bralen RB 2-62	$D = 14,6 + 1,32 \ln L + 0,02 n - 0,4 h$	85,28%
PP Mosten GB 005	$D = 14,1 + 1,12 \ln L + 0,04 n - 0,8 h$	72,29%
PP Tiplen R 659	$D = 13,65 + 1,02 \ln L + 0,04 n - 0,41 h$	73,81%

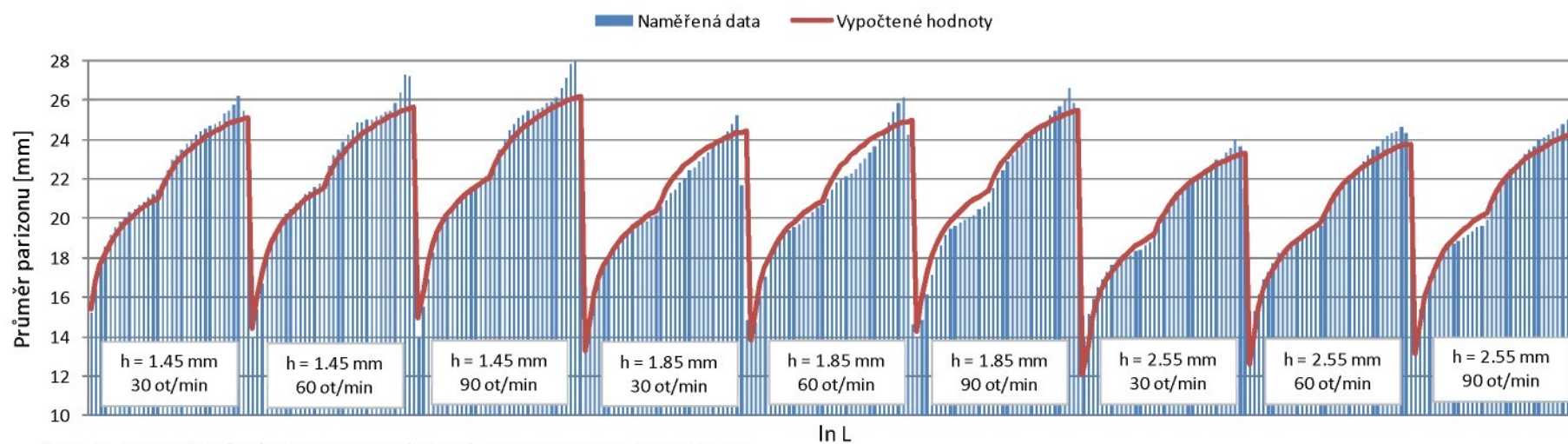
Poznámka: Rovnice platí pouze pro vytlačovací hubici Ø14mm a parizon o délce 210 mm.

Výsledkem regresní analýzy je poznatek, že citlivost taveniny polymeru na narůstání je ovlivněna rostoucími otáčkami šneku vytlačovacího stroje (zvyšují smykovou rychlost). Výrazněji se uvedená citlivost projevuje u PP (0,04 n), kde koeficient otáček šneku dosahuje oproti PE (0,02 n) dvojnásobné hodnoty.

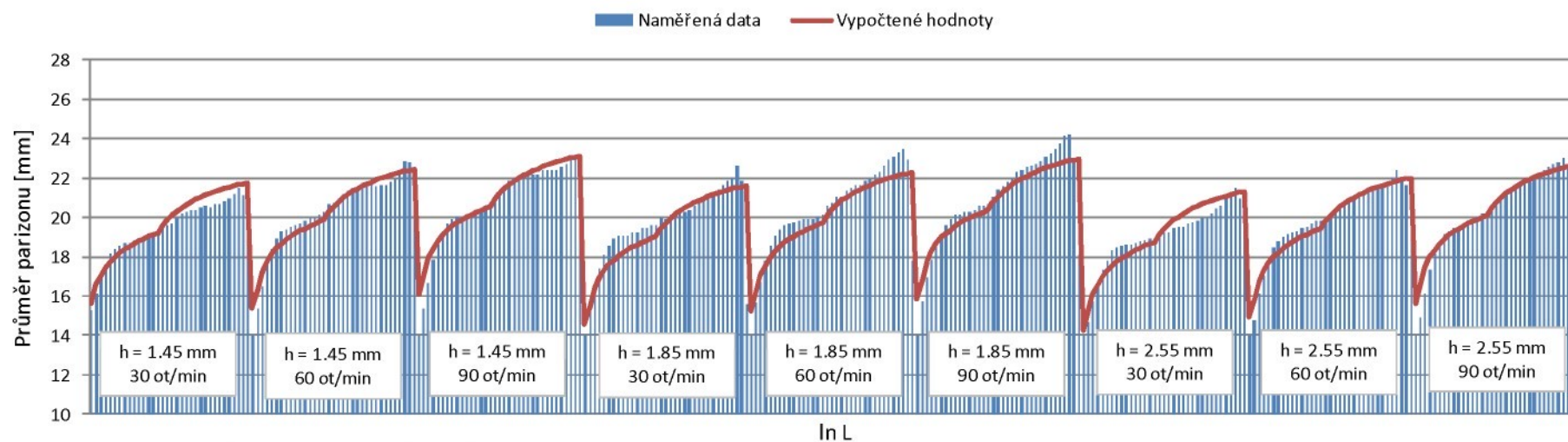
Záporný koeficient zvětšující se šířky vytlačovací štěrbiny naopak celkové narůstání průměru parizonu snižuje (snižuje se smyková rychlost). Nejmarkantněji se projevuje u lineárního HD-PE Liten BB 29 (-1,67 h). Naopak nejmenší citlivost vykazují rozvětvený PE-LD Bralen RB 2-62 (-0,40 h) a kopolymer PP Tiplen R 659 (-0,41 h).

Koeficient délky parizonu představuje citlivost taveniny na kompenzaci narůstání průměru parizonu vlivem vlastní hmotnosti. Čím je uvedený koeficient nižší, tím je celkový nárůst průměru parizonu menší, resp. dochází ke kompenzaci viskoelastického narůstání. Nejnižší koeficient (1,02 ln L) obsahuje rovnice pro kopolymer PP Tiplen R 659, který je tedy nejcitlivější na nežádoucí protažení vlivem vlastní hmotnosti.

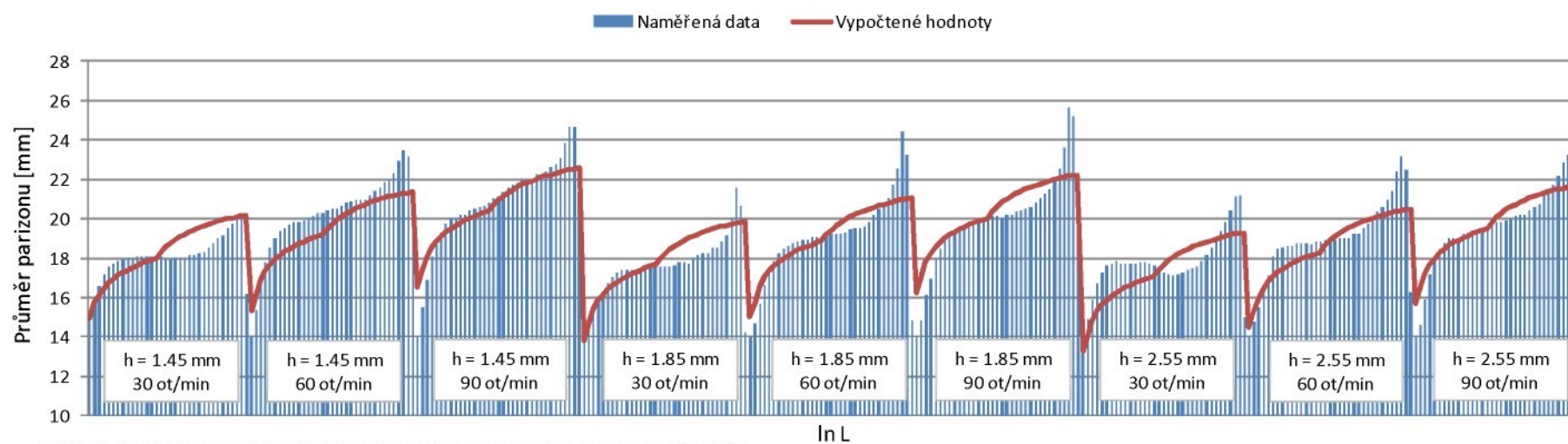
Následující obrázky (6.52 až 6.55) představují grafické výstupy regresní analýzy pro jednotlivé typy polymerů.



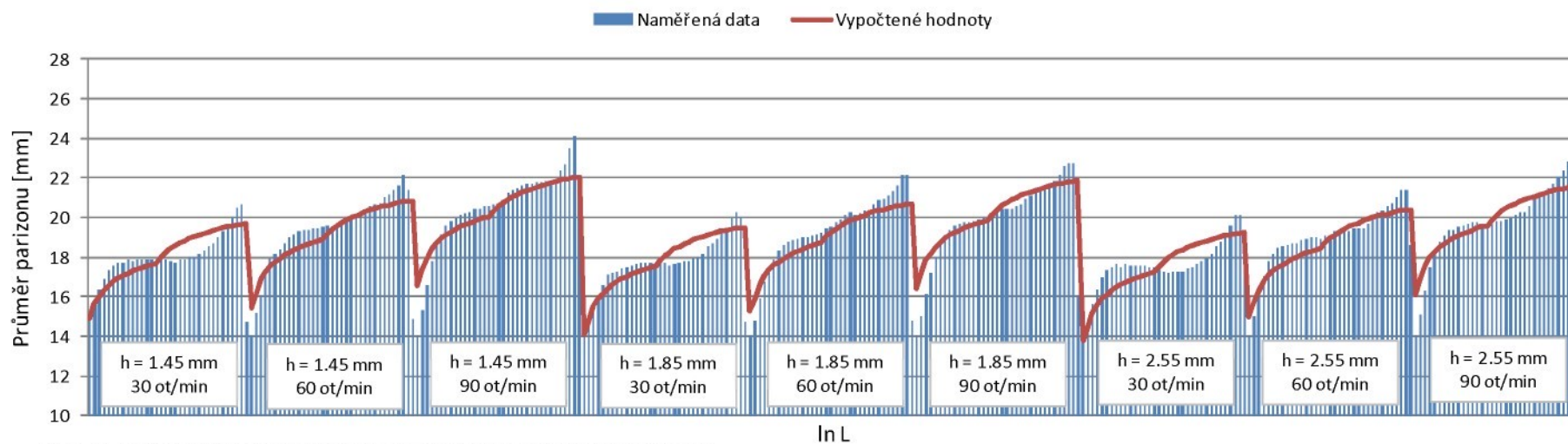
Obr. 6-52 Grafické výstupy regresní analýzy pro HD-PE Liten BB-29



Obr. 6-53 Grafické výstupy regresní analýzy pro LD-PE Bralen 2-62



Obr. 6-54 Grafické výstupy regresní analýzy pro PP Mosten GB 005



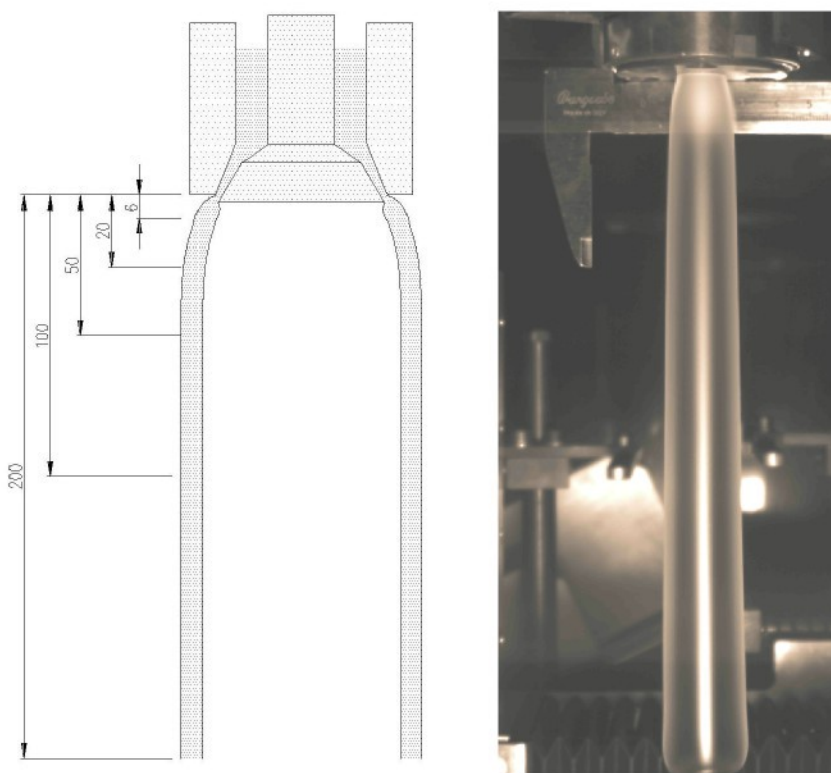
Obr. 6-55 Grafické výstupy regresní analýzy pro PP Tiplen R659

6.12 Diskuse výsledků

Následující kapitola se zabývá detailním rozбором rozměrových změn (narůstání) parizonu v závislosti na jeho délce. Z předchozího hodnocení experimentálních výsledků vyplývá vliv jednotlivých testovaných parametrů. Míra významnosti těchto parametrů je dána velikostí koeficientů obecných logaritmických rovnic (Tab. 6.11).

Výsledky jsou rozděleny dle jednotlivých typů polymerů do přehledných tabulek obsahující jednak naměřenou hodnotu průměru parizonu a také procentuální vyjádření jeho narůstání. Tabulky jsou doplněny zobrazením průběhu procentuální změny narůstání po celé délce parizonu. Procentuální hodnota změny průměru se vztahuje pro vytlačování tryskou o průměru 14 mm. Hodnoty procentuální změny pro určitou délku parizonu jsou přepočítány na rozměrovou změnu v bodě 6 mm pod tryskou.

Součástí vyhodnocení je také grafické porovnání skutečných profilů vytlačovaných parizonů s profily vytvořenými pomocí logaritmických modelů regresní analýzy. Pro znázornění logaritmických modelů byly použity obecné rovnice, uvedené v tab. 6.11.



Obr. 6-56: Znázornění měřících míst průměru parizonu v závislosti na jeho délce

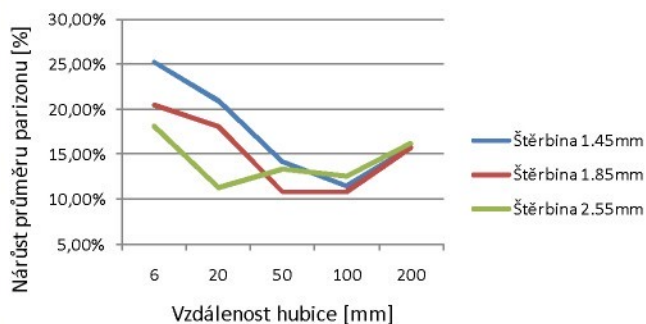


6.12.1 PE-HD Liten BB29

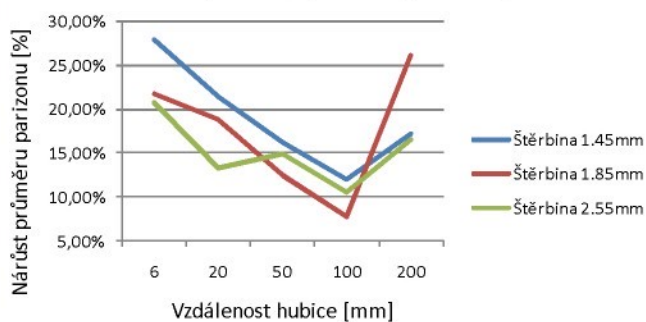
Tab. 6-12: PE-HD Liten BB-29 - hodnoty

PE-HD Liten BB-29				
Vzdálenost hubice [mm]	Štěrba vylačovací hubice [mm]	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]
6	1,45	30	17,54	25,25%
		60	17,90	27,86%
		90	18,27	30,47%
	1,85	30	16,85	20,39%
		60	17,03	21,63%
		90	17,10	22,16%
	2,55	30	16,54	18,11%
		60	16,90	20,72%
		90	17,05	21,76%
20	1,45	30	20,46	20,88%
		60	20,90	21,40%
		90	21,26	21,40%
	1,85	30	19,39	18,11%
		60	19,67	18,86%
		90	19,91	20,03%
	2,55	30	18,11	11,26%
		60	18,77	13,35%
		90	18,99	13,87%
50	1,45	30	22,43	14,09%
		60	23,16	16,18%
		90	23,53	16,18%
	1,85	30	20,89	10,73%
		60	21,41	12,47%
		90	22,08	15,52%
	2,55	30	19,98	13,38%
		60	20,86	14,94%
		90	21,15	15,46%
100	1,45	30	24,04	11,48%
		60	24,84	12,00%
		90	25,21	12,00%
	1,85	30	22,39	10,73%
		60	22,52	7,87%
		90	23,69	11,52%
	2,55	30	21,74	12,53%
		60	22,34	10,57%
		90	22,98	13,05%
200	1,45	30	26,23	15,66%
		60	27,25	17,22%
		90	27,84	18,79%
	1,85	30	25,26	20,46%
		60	26,17	26,13%
		90	26,64	21,03%
	2,55	30	24,00	16,18%
		60	24,66	16,56%
		90	25,03	14,61%

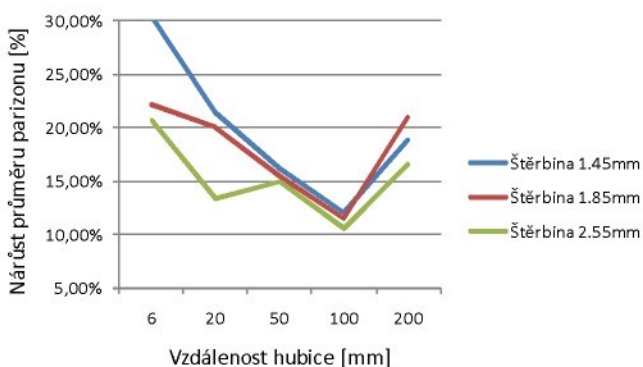
Narůstání průměru parizonu při 30 ot./min



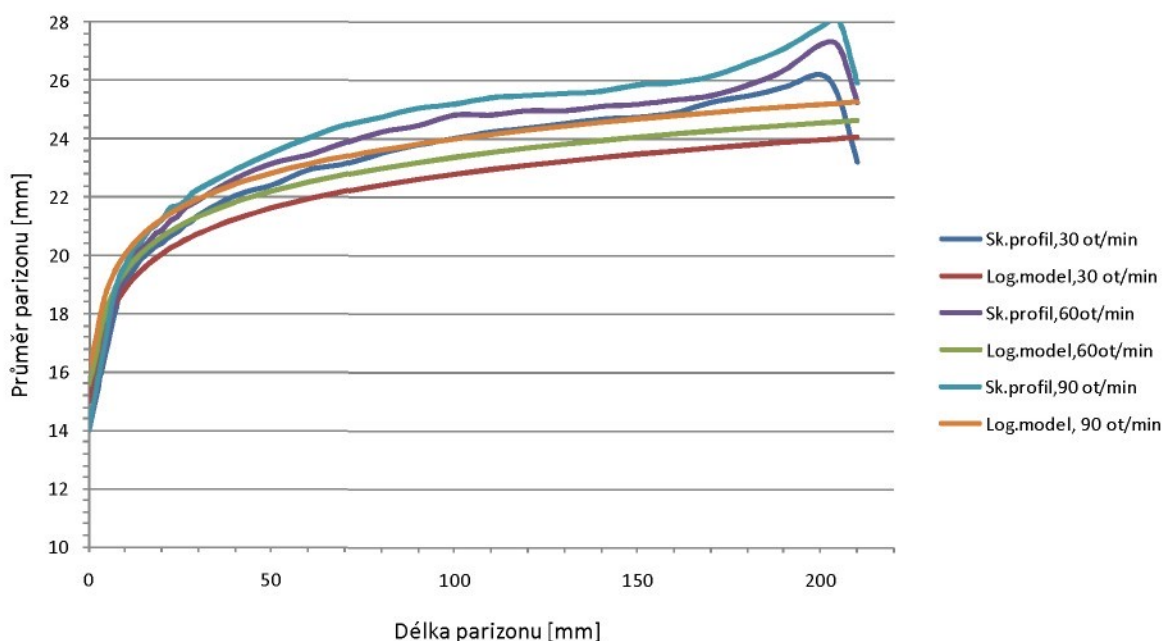
Narůstání průměru parizonu při 60 ot./min



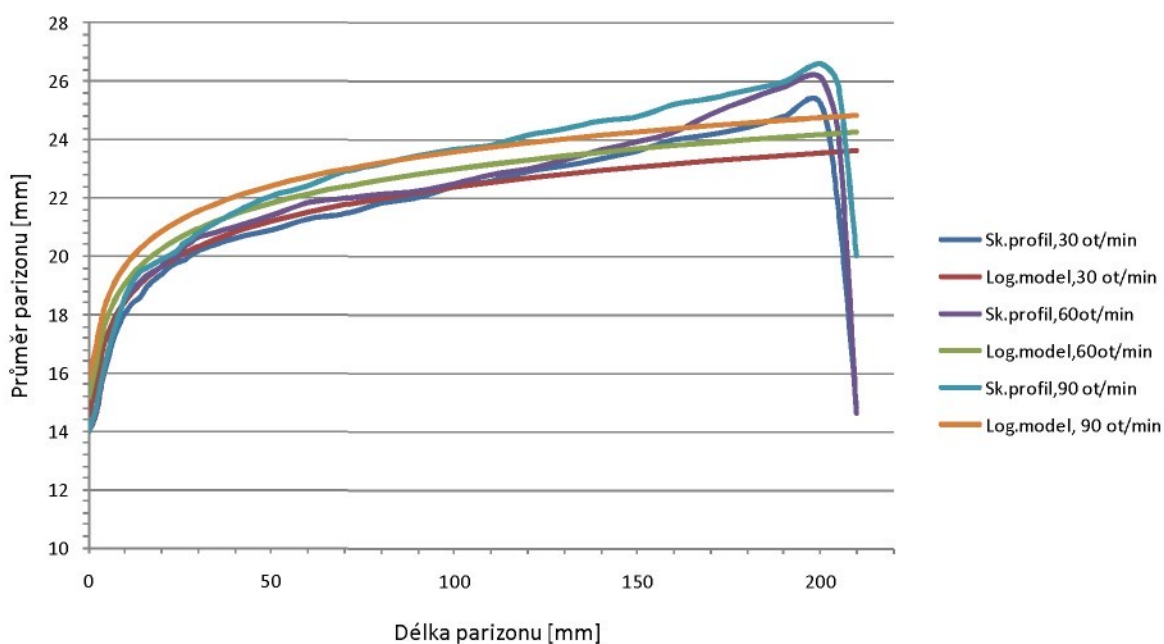
Narůstání průměru parizonu při 90 ot./min



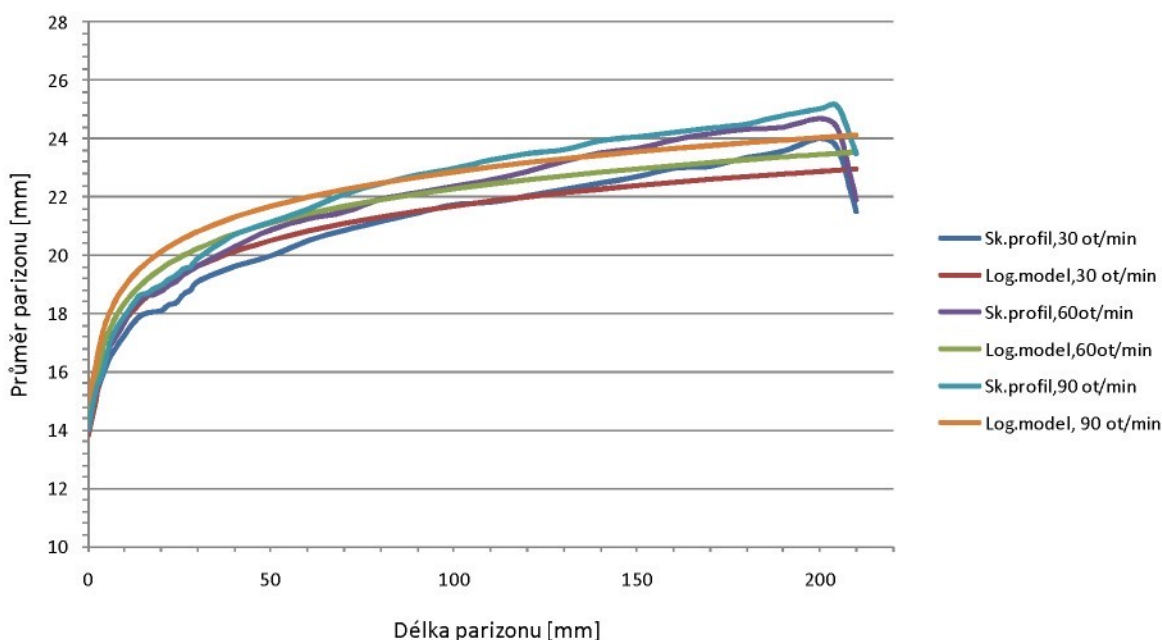
Obr. 6-57: PE-HD Liten BB-29 – narůstání parizonu



Obr. 6.58: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE-HD Liten BB 29 při vytlačování štěrbinou 1.45 mm



Obr. 6.59: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE-HD Liten BB 29 při vytlačování štěrbinou 1.85 mm



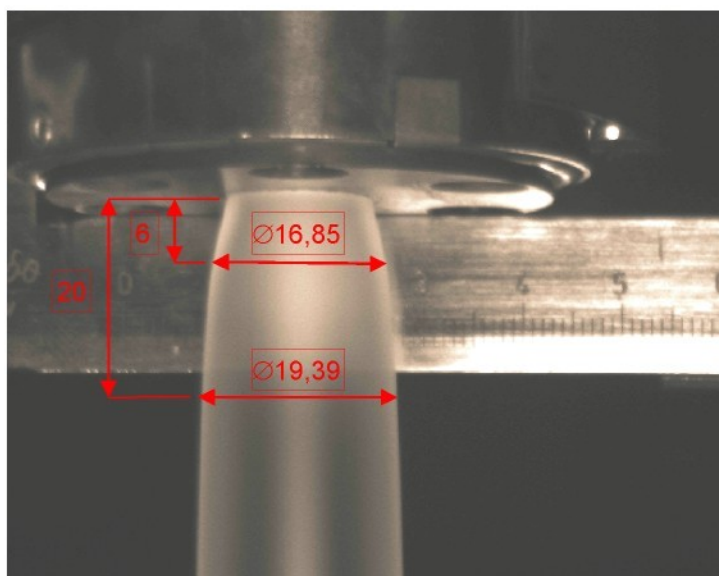
Obr. 6.60: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE-HD Liten BB 29 při vytlačování štěrbinou 2.55 mm

Z porovnání skutečného profilu parizonu a logaritmického modelu je patrné, že logaritmický model téměř odpovídá průběhu narůstání průměru parizonu, což dokazuje i vyšší „kvalita“ regresního modelu ($R^2=84,12\%$) u rovnice platné pro polyetylény.

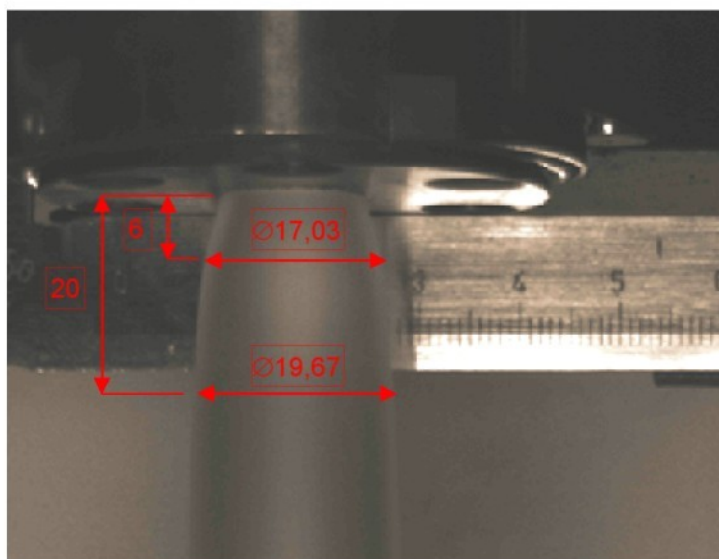
Vzájemným porovnáním průběhů s různými velikostmi vytlačovací štěrbiny je patrná následující závislost. Při vytlačování štěrbinou o šířce 1.45 mm se většina rozměrových změn odehraje již do vzdálenosti cca 35 mm od trysky, zatímco při vytlačování štěrbinou o šířce 2.55 je potřebná vzdálenost až 50 mm.

Vliv rozdílu smykové rychlosti na narůstání průměru parizonu vyjádřený pomocí otáček šneku je patrný, ale nehraje významnou roli. Tento fakt potvrzuje také koeficient otáček šneku v obecné rovnici pro PE, který činí pouze 0,02.

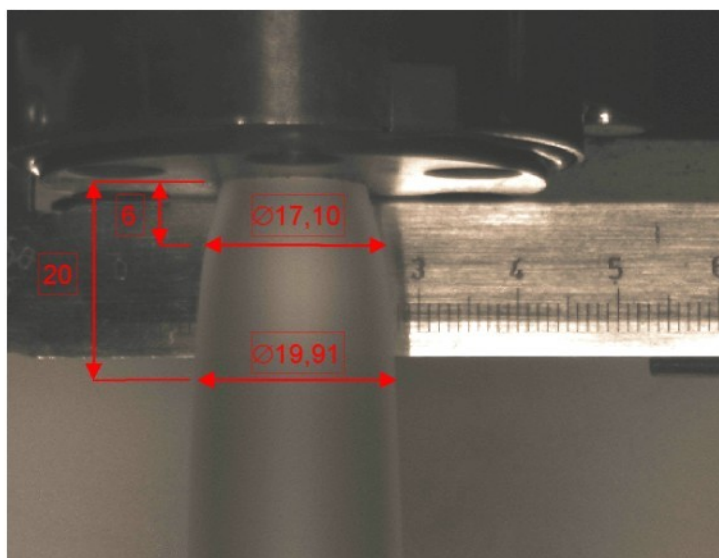
Průběhy procentuálního vyjádření rozměrové změny vykazují s rostoucí délkou klesající tendenci. Výkyv rozměru v oblasti délky 200 mm je dán deformací parizonu při ručním oddělování od vytlačovací hlavy a praxi se neprojevuje.



Obr. 6.61: Snímek parizonu PE-HD Liten BB 29, 30 ot./min., štěrbina 1.85 mm



Obr. 6.62: Snímek parizonu PE-HD Liten BB 29, 60 ot./min., štěrbina 1.85 mm

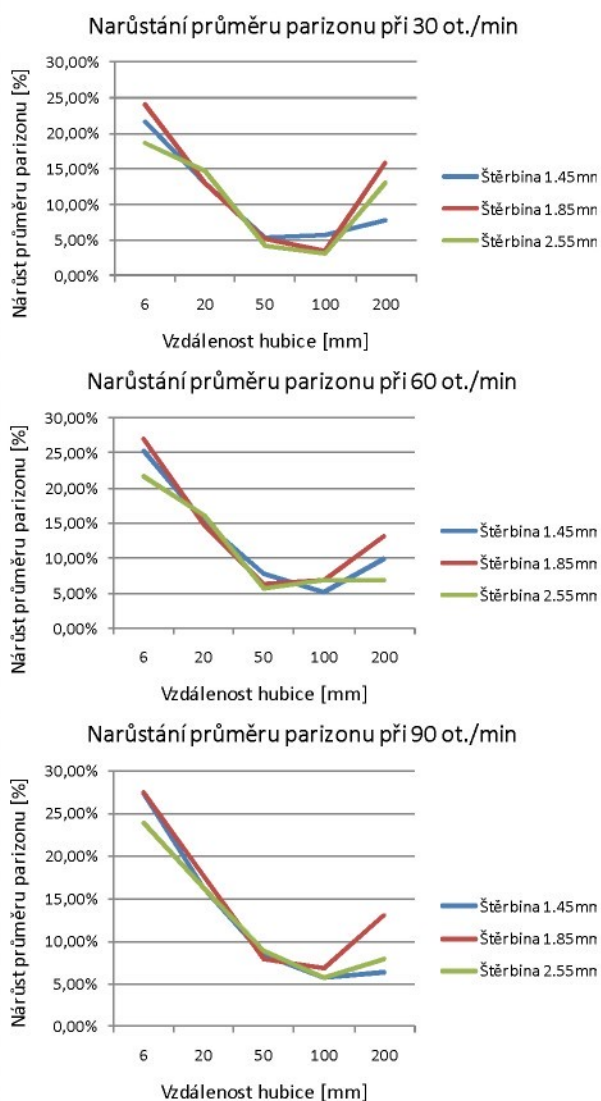


Obr. 6.63: Snímek parizonu PE-HD Liten BB 29, 90 ot./min., štěrbina 1.85 mm

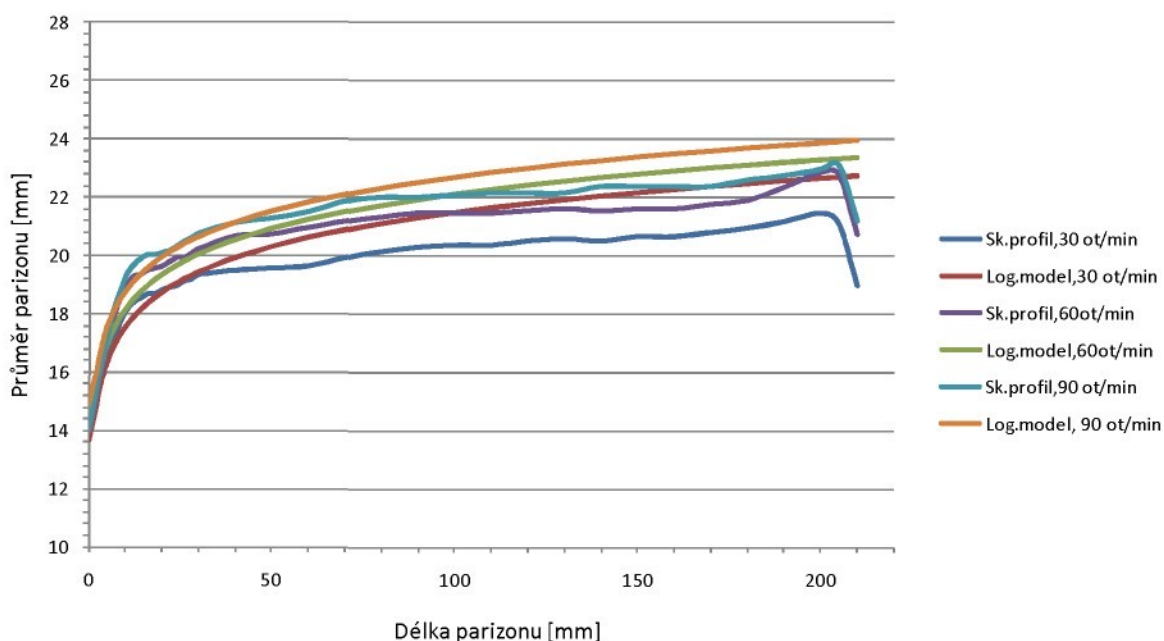
6.12.2 PE-LD Bralen RB 2-62

Tab. 6-13: PE-LD Bralen RB 2-62 - hodnoty

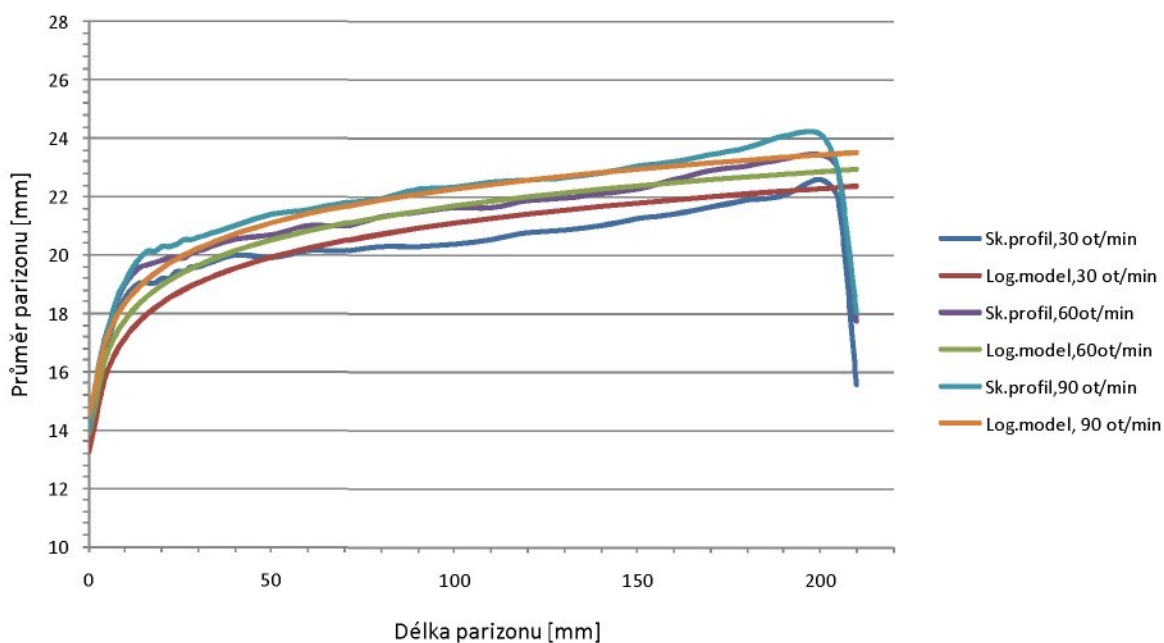
PE-LD Bralen 2-62				
Vzdálenost hubice [mm]	Štěrbina vytlačovací hubice [mm]	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]
6	1,45	30	17,02	21,60%
		60	17,54	25,25%
		90	17,83	27,34%
	1,85	30	17,38	24,12%
		60	17,77	26,92%
		90	17,85	27,49%
	2,55	30	16,60	18,55%
		60	17,04	21,68%
		90	17,33	23,77%
20	1,45	30	18,85	13,05%
		60	19,65	15,13%
		90	20,09	16,18%
	1,85	30	19,20	13,01%
		60	19,83	14,73%
		90	20,31	17,56%
	2,55	30	18,64	14,61%
		60	19,30	16,18%
		90	19,59	16,18%
50	1,45	30	19,58	5,22%
		60	20,75	7,83%
		90	21,26	8,35%
	1,85	30	19,91	5,10%
		60	20,70	6,23%
		90	21,42	7,93%
	2,55	30	19,23	4,17%
		60	20,10	5,74%
		90	20,83	8,87%
100	1,45	30	20,38	5,74%
		60	21,48	5,22%
		90	22,07	5,74%
	1,85	30	20,39	3,39%
		60	21,66	6,80%
		90	22,37	6,80%
	2,55	30	19,67	3,13%
		60	21,05	6,78%
		90	21,64	5,74%
200	1,45	30	21,48	7,83%
		60	22,87	9,92%
		90	22,94	6,26%
	1,85	30	22,61	15,86%
		60	23,48	13,03%
		90	24,19	13,03%
	2,55	30	21,49	13,05%
		60	22,00	6,78%
		90	22,73	7,83%



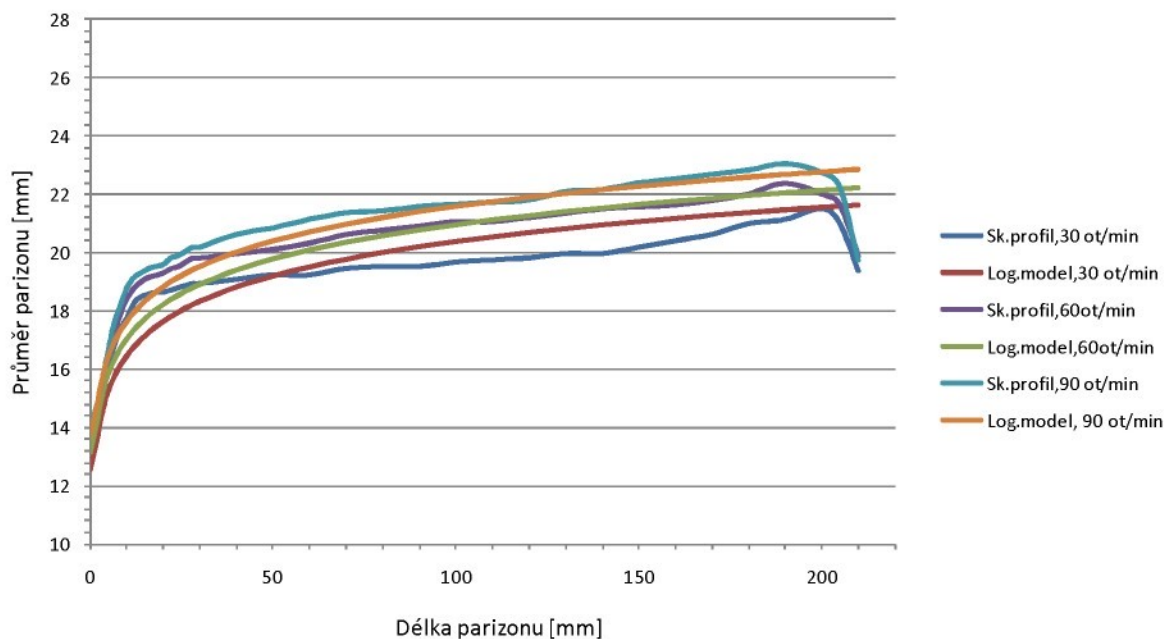
Obr. 6-64: PE-LD Bralen RB 2-62 – narůstání parizonu



Obr. 6.65: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE-LD Bralen RB 2-62 při vytlačování štěrbinou 1.45 mm



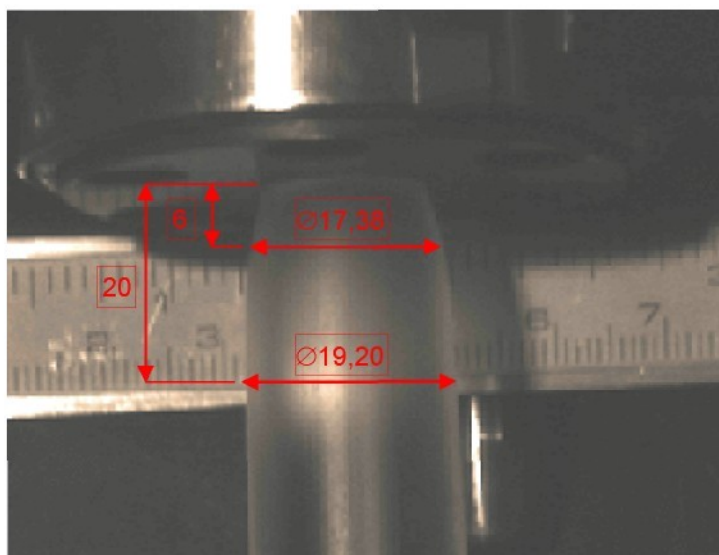
Obr. 6.66: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE-LD Bralen RB 2-62 při vytlačování štěrbinou 1.85 mm



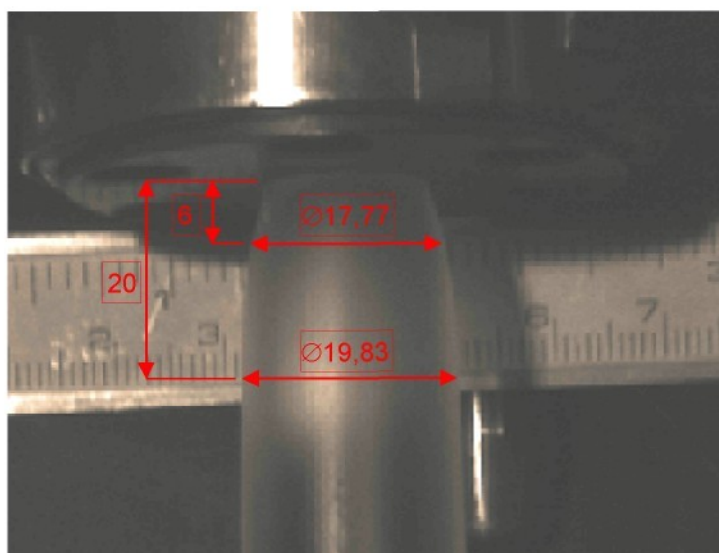
Obr. 6.67: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PE-LD Bralen RB 2-62 při vytlačování štěrbinou 2.55 mm

Průběhy logaritmických modelů na základě obecné rovnice pro PE opět ukazují vysokou míru shody s reálným průběhem ($R^2=84,12\%$). Obecně lze říci, že absolutní míra narůstání PE-LD Bralen RB 2-62 je v porovnání s PE-HD Liten BB 22 menší (viz Tab. 6.7) zejména díky nižšímu indexu toku a tím i větší citlivosti na protažení vlivem vlastní hmotnosti. Patrným rozdílem v chování obou polyetylénů je fakt, že většina rozměrových změn u PE-LD Bralen RB 2-62 proběhne již ve vzdálenosti do 20 mm za tryskou (ústím vytlačovací hubice).

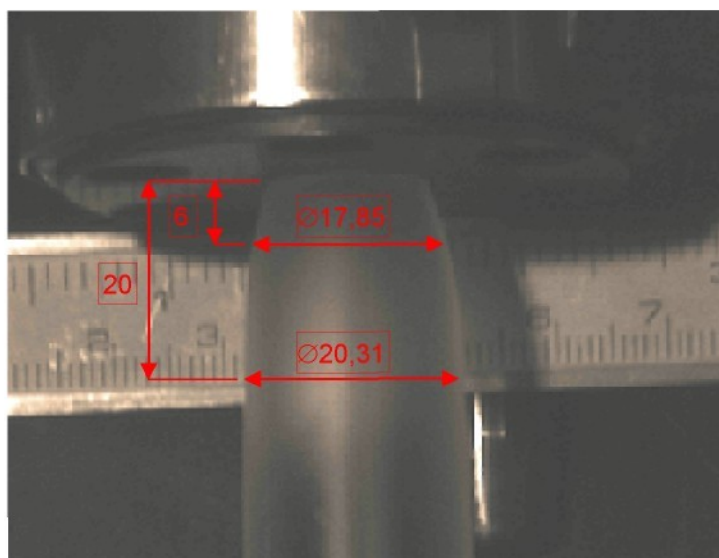
Hodnocení vlivu otáček šneku na narůstání průměru parizonu je srovnatelné jako v případě vytlačování PE-HD Liten BB 29, jelikož koeficient zohledňující tento vliv dosahuje hodnoty 0,02 n pro oba typy PE.



Obr. 6.68: Snímek parizonu PE-LD Bralen RB 2-62, 30 ot./min., štěrbina 1.85 mm



Obr. 6.69: Snímek parizonu PE-LD Bralen RB 2-62, 60 ot./min., štěrbina 1.85 mm



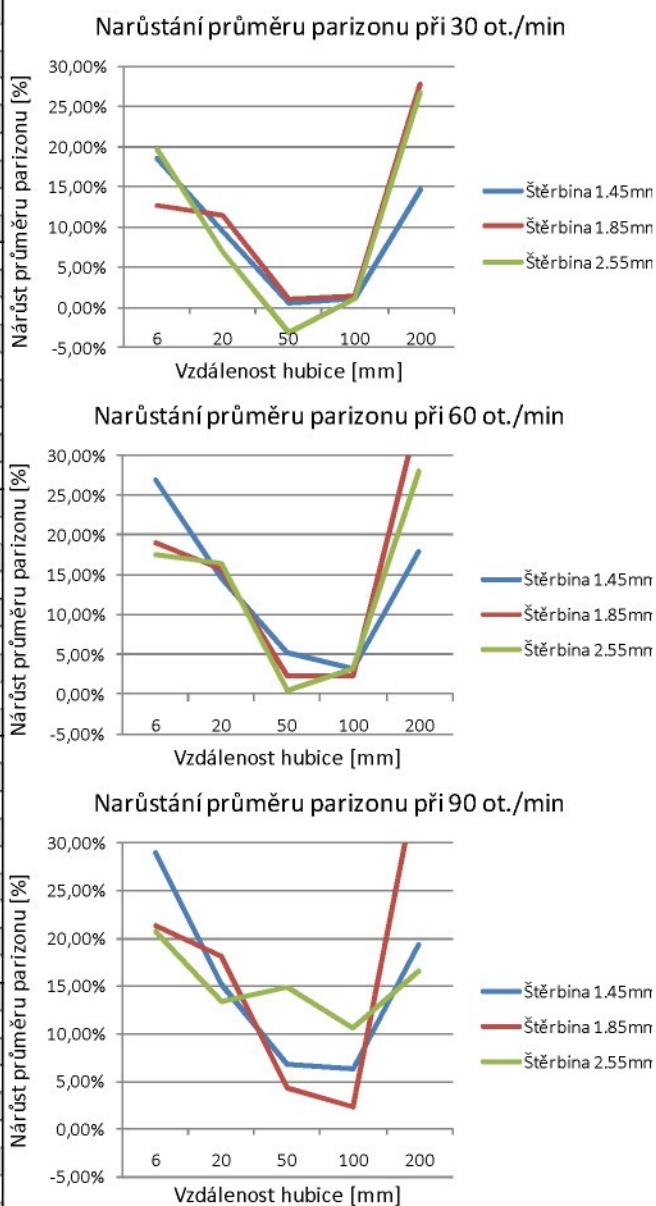
Obr. 6.70: Snímek parizonu PE-LD Bralen RB 2-62, 90 ot./min., štěrbina 1.85 mm



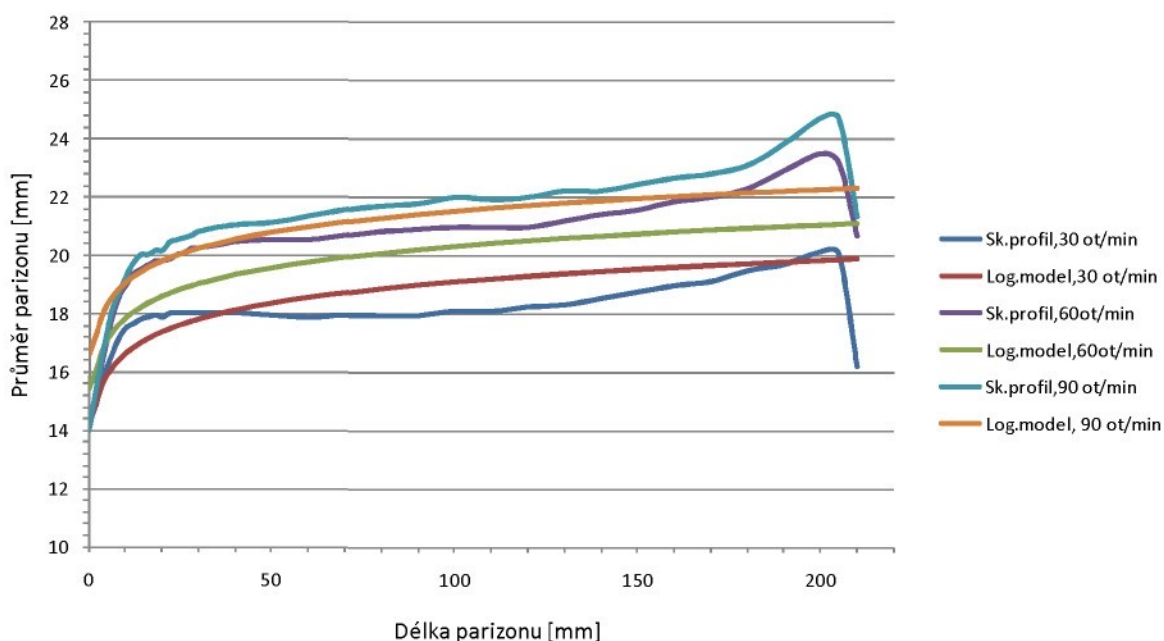
6.12.3 Homopolymer PP Mosten GB 005

Tab. 6-14: Mosten PP GB 005 - hodnoty

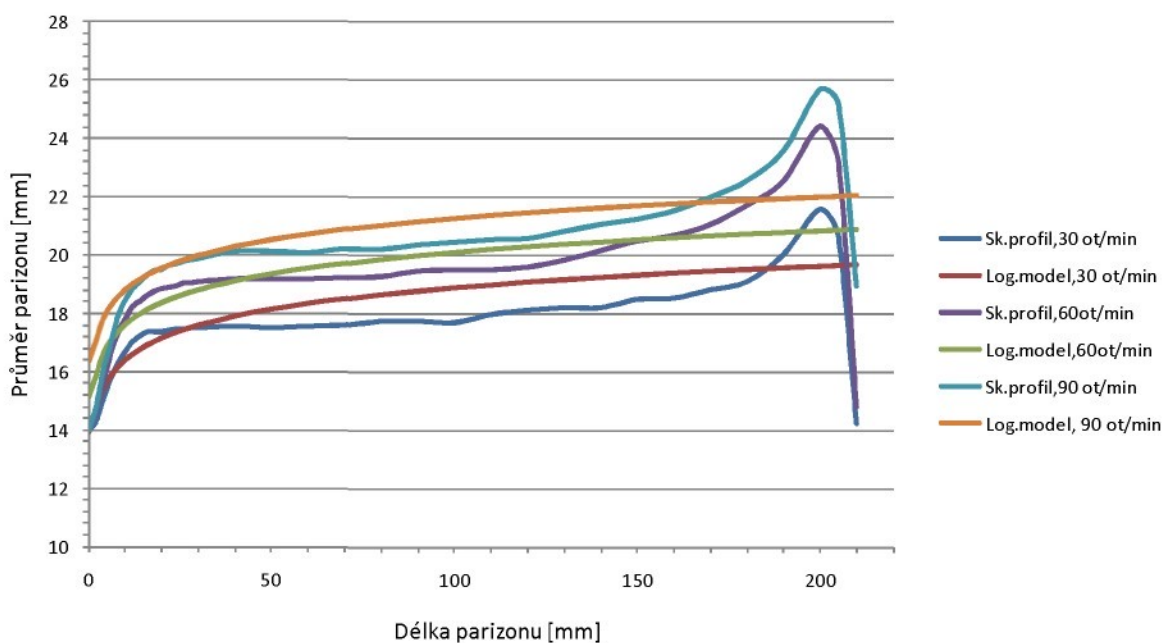
Homopolymer PP Mosten GB005				
Vzdálenost hubice [mm]	Štěrbina vytlačovací hubice [mm]	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]
6	1,45	30	16,59	18,47%
		60	17,75	26,82%
		90	18,05	28,90%
	1,85	30	15,78	12,75%
		60	16,65	18,96%
		90	16,98	21,30%
	2,55	30	16,73	19,51%
		60	16,44	17,45%
		90	17,18	22,72%
20	1,45	30	17,90	9,39%
		60	19,80	14,61%
		90	20,17	15,13%
	1,85	30	17,38	11,37%
		60	18,85	15,71%
		90	19,51	18,05%
	2,55	30	17,68	6,78%
		60	18,74	16,43%
		90	19,23	14,61%
50	1,45	30	17,97	0,52%
		60	20,53	5,22%
		90	21,12	6,78%
	1,85	30	17,52	1,00%
		60	19,18	2,34%
		90	20,12	4,34%
	2,55	30	17,24	-3,13%
		60	18,82	0,52%
		90	19,81	4,18%
100	1,45	30	18,12	1,04%
		60	20,97	3,13%
		90	21,99	6,26%
	1,85	30	17,70	1,34%
		60	19,51	2,34%
		90	20,44	2,34%
	2,55	30	17,39	1,04%
		60	19,25	3,13%
		90	20,18	2,61%
200	1,45	30	20,17	14,61%
		60	23,48	17,96%
		90	24,70	19,31%
	1,85	30	21,59	27,77%
		60	24,42	35,09%
		90	25,68	37,43%
	2,55	30	21,12	26,62%
		60	23,16	27,91%
		90	23,23	21,84%



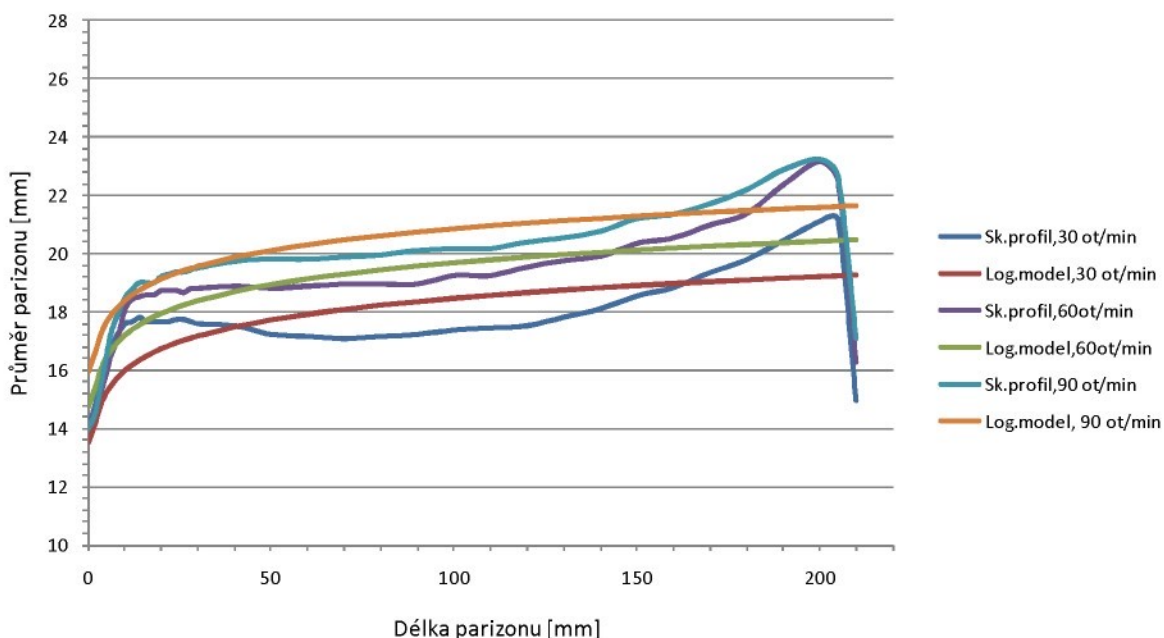
Obr. 6-71: PP Mosten GB 005 – narůstání parizonu



Obr. 6.72: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Mosten GB 005 při vytlačování štěrbinou 1.45 mm



Obr. 6.73: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Mosten GB 005 při vytlačování štěrbinou 1.85 mm

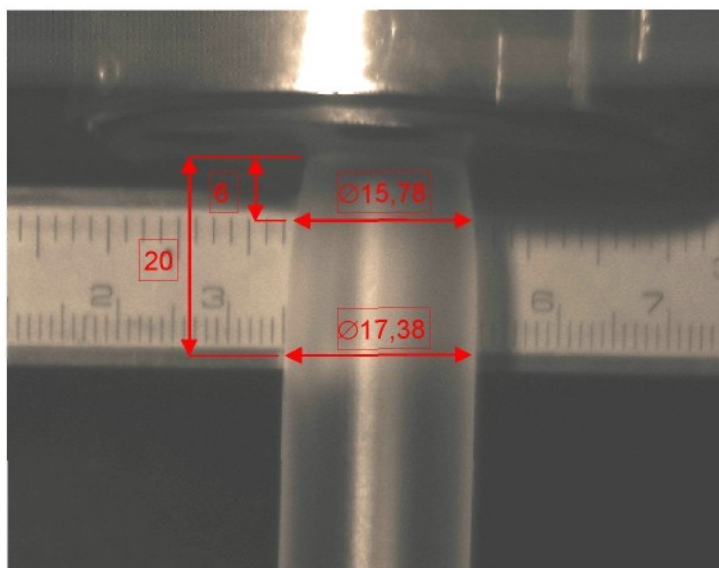


Obr. 6.74: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Mosten GB 005 při vytlačování štěrbinou 2.55 mm

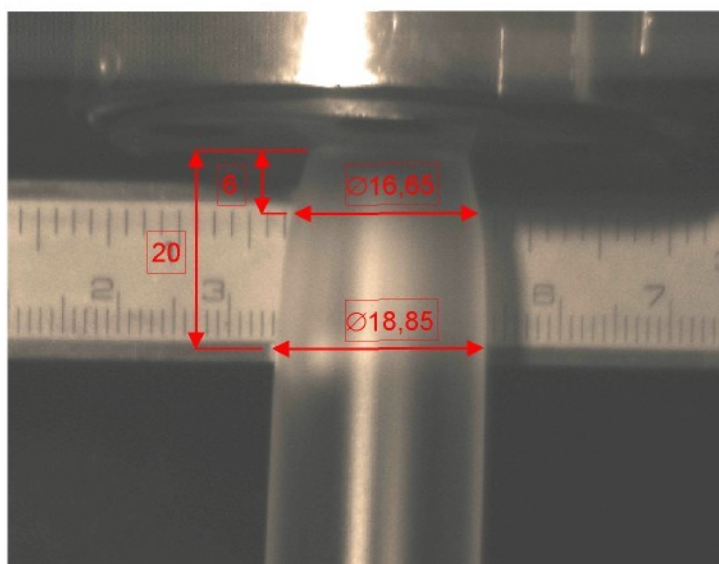
Z porovnání skutečného profilu parizonu a logaritmického modelu je patrné, že skutečný průběh vykazuje odchylky v délce parizonu od 50 do 100 mm. Absolutní hodnota odchylky dosahuje až hodnoty 1 mm, přičemž důvodem je změna délky parizonu (protažením) vlivem vlastní hmotnosti. Celkově je charakter průběhu narůstání ve srovnání s polyetylény odlišný (viz. Hodnota koeficientu pro $\ln L$ v tabulce 6.11), kdy po prudkém počátečním nárůstu k dalšímu narůstání již téměř nedochází. Tomu odpovídá i nižší „kvalita“ modelu pro polypropylény ($R^2=72,85\%$).

Z hlediska matematického vyhodnocení je patrná odchylka koncových oblastí (obr. 6.67), kde dochází k náhlému zvětšení průměru parizonu v délce 200 mm, které logaritmický model nezohledňuje. Tento faktor však výrazně nesnižuje přesnost modelu ve střední části parizonu, který je z hlediska procesu (uzavření ve formě a následné vyfouknutí) nejvýznamnější. Vysvětlení tohoto jevu je již uvedeno v kapitole 6.12.1.

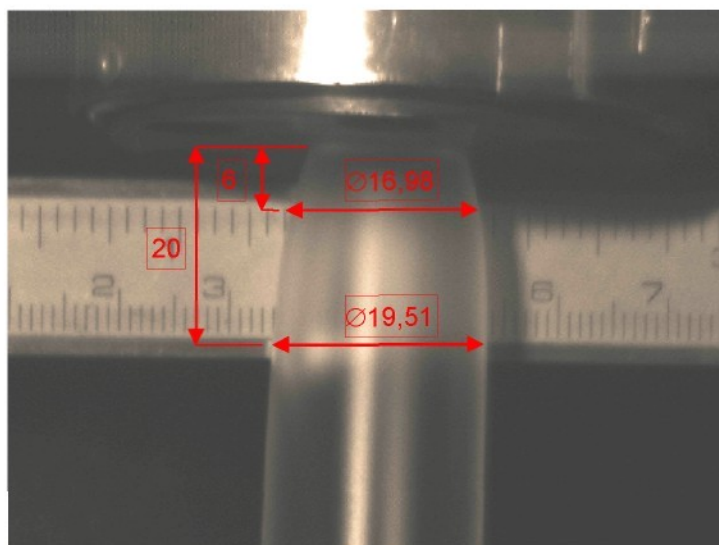
Výsledky regresních analýz také potvrzují skutečnost, že vliv otáček šneku je u polypropylénů větší, než u polyetylénů. Tento rozdíl dokazují nejen vlastní průběhy, ale i rozdílné velikosti koeficientů u otáček v jednotlivých rovnicích (viz. Tab. 6.11). Tyto koeficienty jsou u polypropylénů dvojnásobné oproti koeficientům v rovnicích určených pro polyetylény.



Obr. 6.75: Snímek parizonu PP Mosten GB 005, 30 ot./min., štěrbina 1.85 mm



Obr. 6.76: Snímek parizonu PP Mosten GB 005, 60 ot./min., štěrbina 1.85 mm

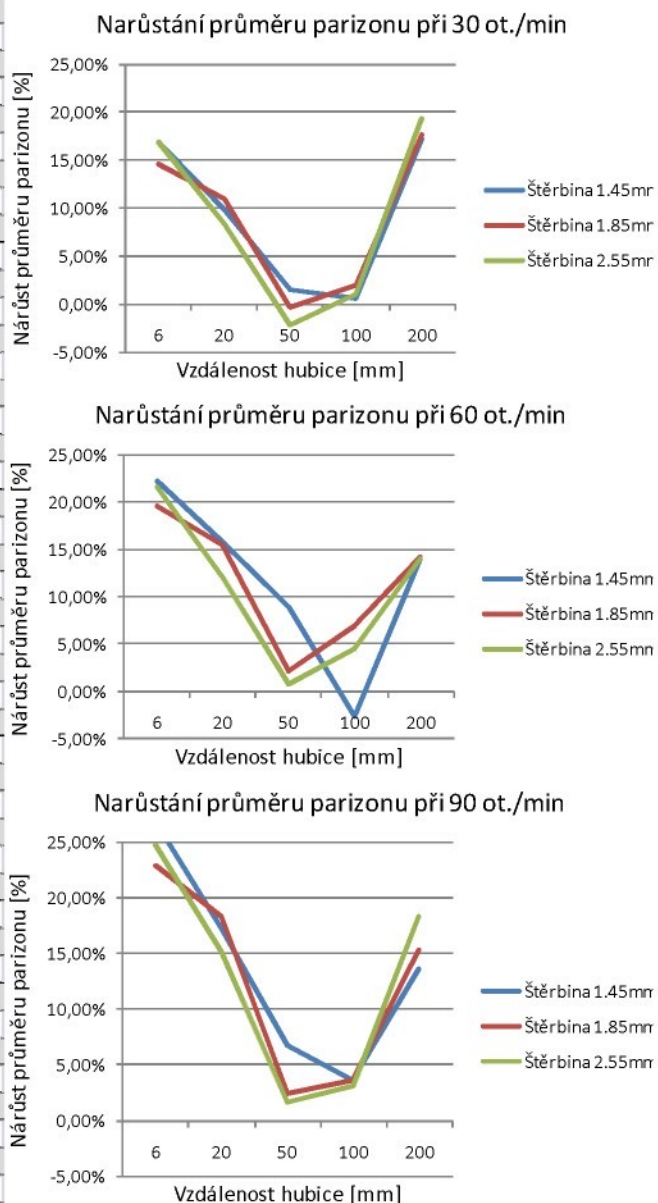


Obr. 6.77: Snímek parizonu PP Mosten GB 005, 90 ot./min., štěrbina 1.85 mm

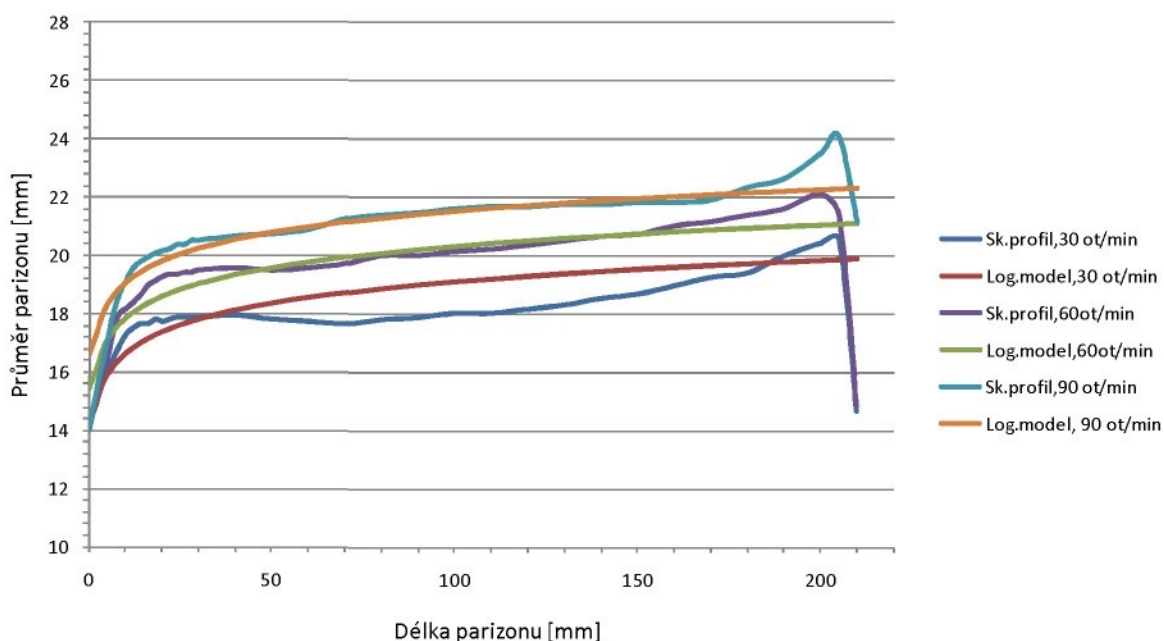
6.12.4 Kopolymer PP Tiplen R 659

Tab. 6-15: PP Tiplen R 659 - hodnoty

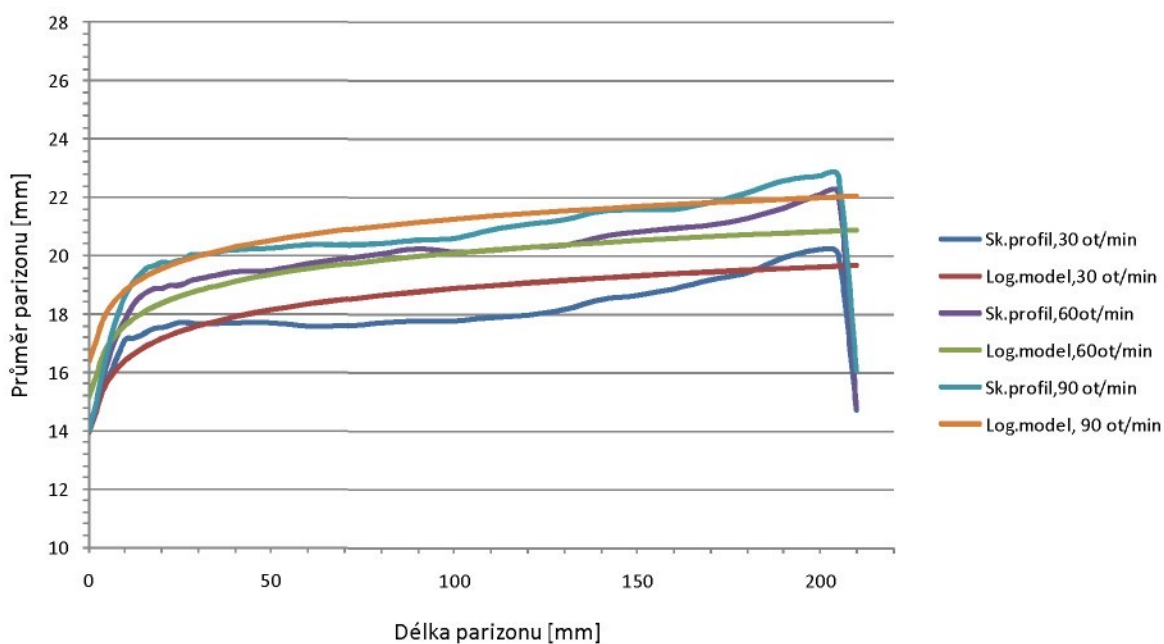
Kopolymer PP Tiplen R 659				
Vzdálenost hubice [mm]	Štěrbina vytlačovací hubice [mm]	Otáčky šneku [1/min]	Průměr parizonu [mm]	Nárůst průměru parizonu [%]
6	1,45	30	16,37	16,90%
		60	17,10	22,12%
		90	17,75	26,82%
	1,85	30	16,03	14,52%
		60	16,73	19,53%
		90	17,20	22,88%
	2,55	30	16,37	16,90%
		60	17,02	21,60%
		90	17,46	24,73%
20	1,45	30	17,75	9,92%
		60	19,29	15,66%
		90	20,17	17,22%
	1,85	30	17,56	10,89%
		60	18,88	15,33%
		90	19,77	18,36%
	2,55	30	17,54	8,35%
		60	18,70	12,00%
		90	19,58	15,13%
50	1,45	30	17,97	1,57%
		60	20,53	8,87%
		90	21,12	6,78%
	1,85	30	17,52	-0,28%
		60	19,18	2,15%
		90	20,12	2,45%
	2,55	30	17,24	-2,09%
		60	18,82	0,80%
		90	19,81	1,65%
100	1,45	30	18,05	0,52%
		60	20,17	-2,61%
		90	21,63	3,65%
	1,85	30	17,80	2,02%
		60	20,14	6,85%
		90	20,61	3,55%
	2,55	30	17,39	1,04%
		60	19,43	4,42%
		90	20,24	3,05%
200	1,45	30	20,46	17,22%
		60	22,14	14,07%
		90	23,53	13,57%
	1,85	30	20,26	17,57%
		60	22,11	14,10%
		90	22,75	15,27%
	2,55	30	20,09	19,31%
		60	21,41	14,09%
		90	22,80	18,27%



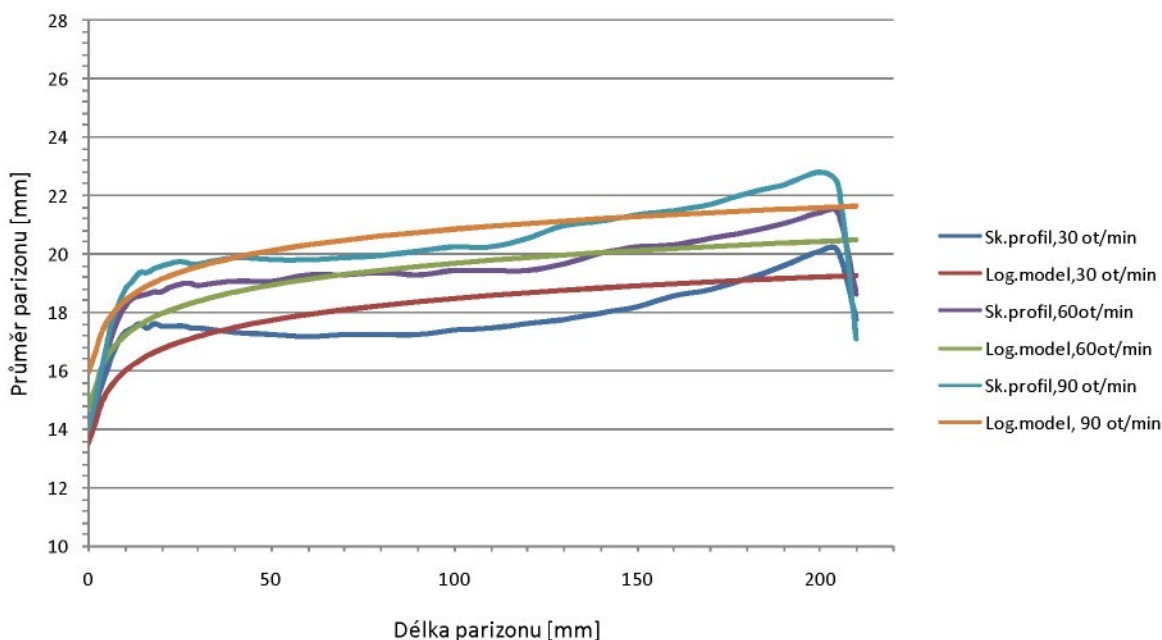
Obr. 6-78: PP Tiplen R 659 – narůstání parizonu



Obr. 6.79: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Tiplen R 659 při vytlačování štěrbinou 1.45 mm



Obr. 6.80: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Tiplen R 659 při vytlačování štěrbinou 1.85 mm

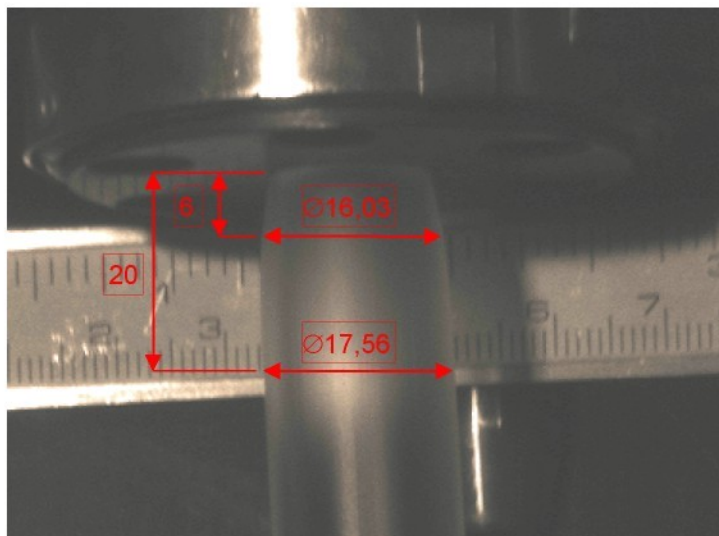


Obr. 6.81: Porovnání reálného profilu parizonu s profilem vytvořeným pomocí logaritmického modelu u materiálu PP Tiplen R 659 při vytlačování šterbinou 2.55 mm

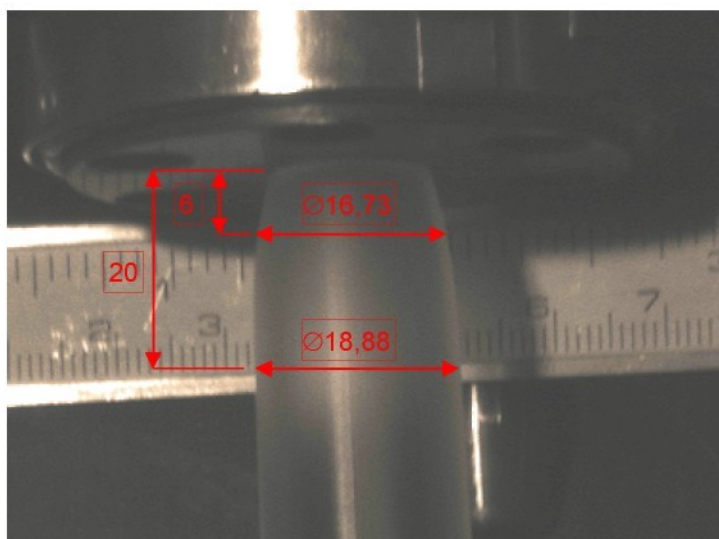
Průběhy logaritmických modelů na základě obecné rovnice pro PP vykazují obdobný průběh ve srovnání s PP Mosten GB 005. Obecně lze říci, že absolutní míra narůstání je v porovnání s polyetylény menší (viz. Tab. 6.6) a významná část rozměrových změn se odehrává do vzdálenosti 15 až 20 mm pod vytlačovací tryskou.

Vliv otáček šneku na narůstání parizonu je opět významnější v porovnání s polyetylény, kdy absolutní rozdíl narůstání v určitém bodě činí až 3 mm po změně rychlosti vytlačování o 60 min^{-1} . Tento fakt může být zdrojem významných technologických komplikací, jelikož smyková rychlost se nemění pouze s otáčkami šneku, ale také s velikostí vytlačovací šterbiny.

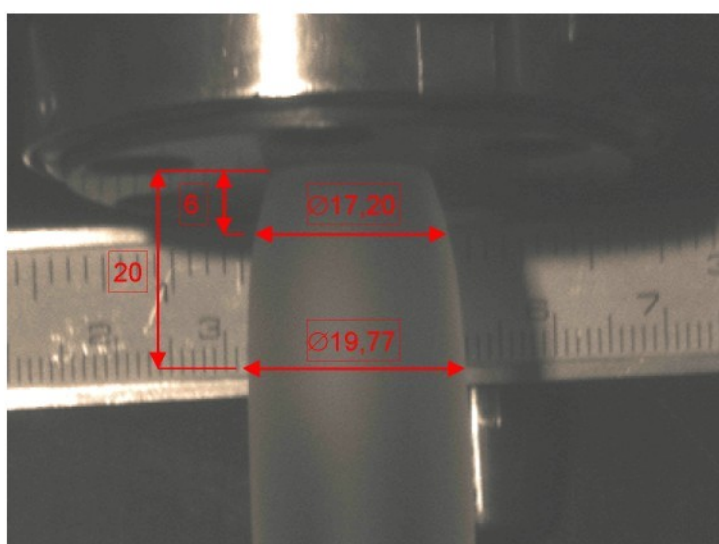
Průběh procentuální změny má výrazně klesající tendenci a ve střední části vzorku parizonu dosahuje až záporných hodnot. Vysvětlením je nízká hodnota indexu toku spolu se současným protahováním parizonu způsobeným vlastní tíhou. Deformace tvaru v oblasti okolo 200 mm délky parizonu je způsobena ručním způsobem oddělení vzorku od vytlačovací hlavy.



Obr. 6.82: Snímek parizonu PP Tiplen R 659, 30 ot./min., štěrba 1.85 mm



Obr. 6.83: Snímek parizonu PP Tiplen R 659, 60 ot./min., štěrba 1.85 mm



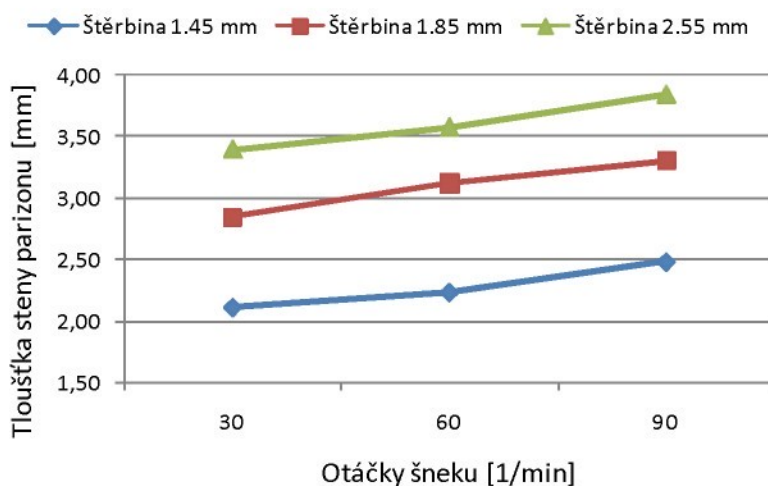
Obr. 6.84: Snímek parizonu PP Tiplen R 659, 90 ot./min., štěrba 1.85 mm

6.13 Měření rozměrových změn tloušťky stěny parizonu

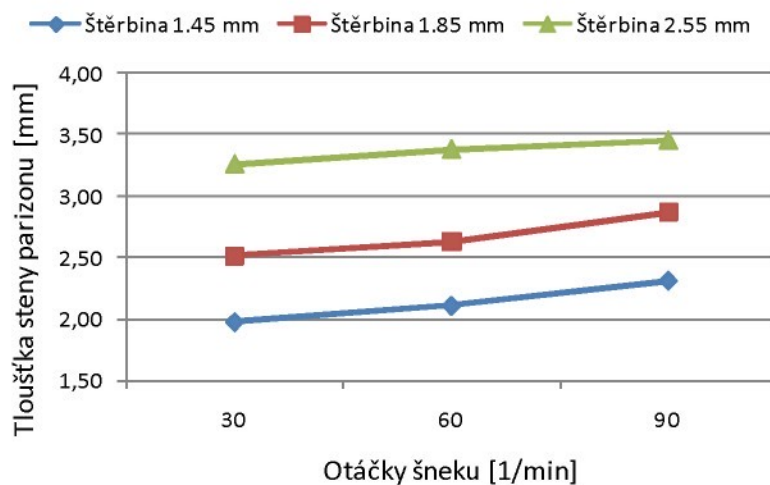
Nad rámec hlavního experimentu bylo také provedeno měření a vyhodnocení změn tloušťky stěny parizonu po opuštění vytlačovací hubice. Měření probíhalo za podmínek ustálené extruze, tak že pro každé parametry byly odebrány tři vzorky. Poté byly vychlazeny a každý z nich byl proměřen ve čtyřech protilehlých místech, řezy vzorků byly provedeny 20 mm od ústí trysky. Dosažené hodnoty byly nakonec zprůměrovány a vyneseny do následující tabulky:

Tab. 6-16: Přehled naměřených tloušťek stěn parizonu

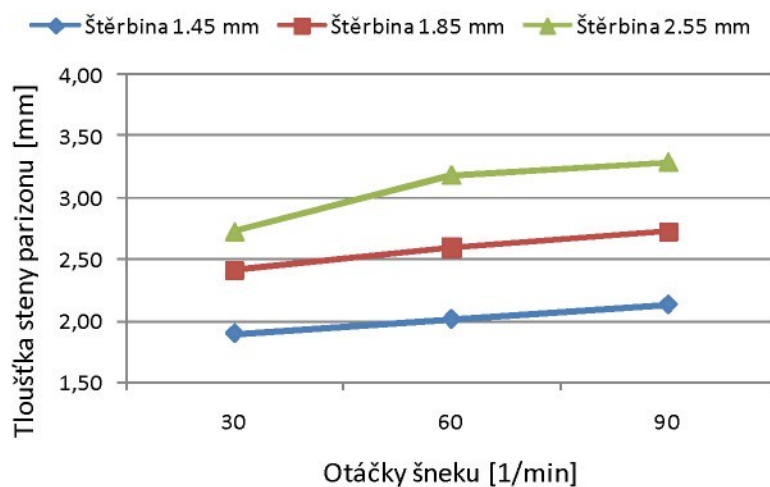
Štěrba vytlačovací hubice [mm]	Otáčky šneku [1/min]	PE-HD Liten BB-29		PE-LD Bralen 2-62		PP Mosten GB005		PP Tiplen R 659	
		Tloušťka stěny parizonu [mm]	Nárůst tloušťky stěny [%]	Tloušťka stěny parizonu [mm]	Nárůst tloušťky stěny [%]	Tloušťka stěny parizonu [mm]	Nárůst tloušťky stěny [%]	Tloušťka stěny parizonu [mm]	Nárůst tloušťky stěny [%]
1,45	30	2,11	45,60%	1,98	36,21%	1,89	30,52%	1,88	29,74%
	60	2,23	54,05%	2,11	45,17%	2,01	38,45%	1,95	34,74%
	90	2,48	71,03%	2,31	58,97%	2,13	46,55%	2,06	42,16%
1,85	30	2,85	54,05%	2,51	35,68%	2,41	30,34%	2,36	27,57%
	60	3,12	68,78%	2,63	41,96%	2,59	40,20%	2,51	35,41%
	90	3,31	78,65%	2,87	55,14%	2,72	47,09%	2,68	45,00%
2,55	30	3,39	33,09%	3,26	27,75%	2,72	6,72%	2,89	13,24%
	60	3,57	40,15%	3,38	32,45%	3,18	24,80%	3,01	17,99%
	90	3,84	50,74%	3,45	35,25%	3,29	28,97%	3,14	23,09%



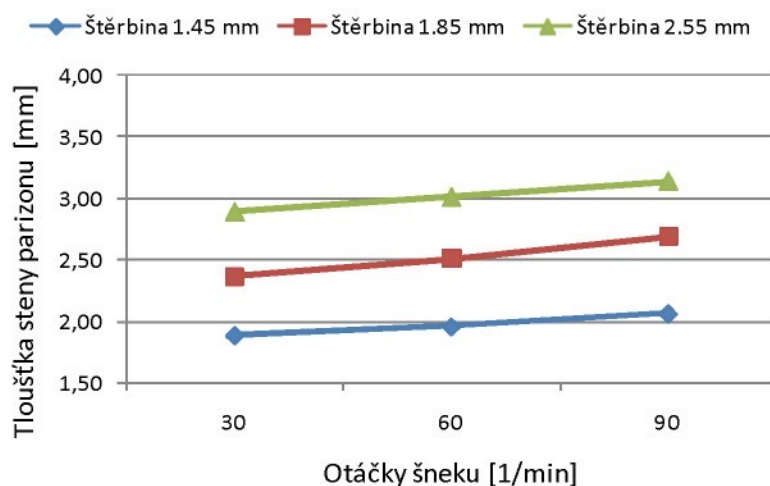
Obr. 6.85: Narůstání tloušťky stěny v závislosti na otáčkách šneku pro PE-HD Liten BB-29



Obr. 6.86: Narůstání tloušťky stěny v závislosti na otáčkách šneku pro PE-LD Bralen RB 2-62



Obr. 6.87: Narůstání tloušťky stěny na otáčkách šneku pro homopolymer PP Mosten GB 005



Obr. 6.88: Narůstání tloušťky stěny na otáčkách šneku pro kopolymer PP Tiplen R 659

6.14 Možnost eliminace narůstání změnou délky trysky

Vzhledem k časové náročnosti řešeného úkolu nebylo možné zcela prozkoumat tak obsáhlé téma, jakým je narůstání objemu taveniny vytlačovaného parizonu v rámci jedné disertační práce. Z tohoto důvodu by bylo vhodné se tímto tématem i nadále zabývat a získat tak ucelenější pohled na tuto problematiku, například formou zadání dalších disertačních prací na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci.

Zejména vliv geometrie vytlačovací trysky je důležitým faktorem ovlivňující narůstání taveniny polymeru po extruzi. Následující grafické výstupy demonstrují pomocí lineární regrese výpočet Bagleyho korekce na jejímž základě je možné stanovit úpravu geometrie trysky, tak aby bylo možné narůstání taveniny eliminovat (viz. kapitola 4.1). Jako příklad uvádím výpočet korekce pro různá technologická nastavení. Základním předpokladem pro správné určení korekce je stanovení rozhodující vzdálenosti od trysky, kde proběhla většina rozměrových změn – došlo k relaxaci napětí ve vytlačovaném polymeru. Uvedená vzdálenost se liší s typem zpracovávaného materiálu, kde vodítkem je hodnota ITT.

Příklad 1 :

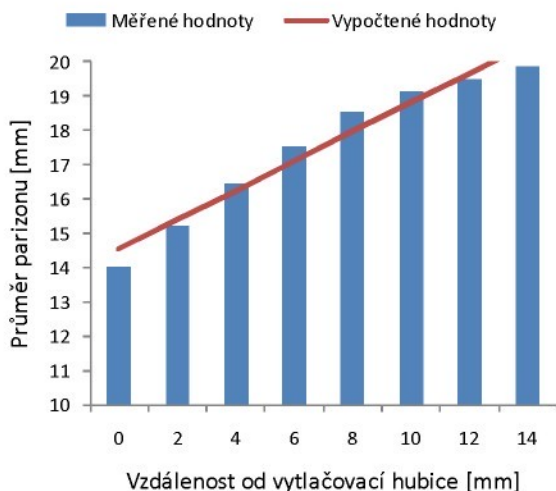
Tab. 6-17: Lineární regrese pro PP Tiplen R 659 (ITT=2) do vzdálenosti 14 mm od štěrby 1.45 mm po otáčky šneku 90 min^{-1}

Regresní statistika	
Kor_koef	0,976909817
R ²	0,954352791
R ² upraveno	0,946744923
Sm_chyba	0,494583325
Pozorování	8

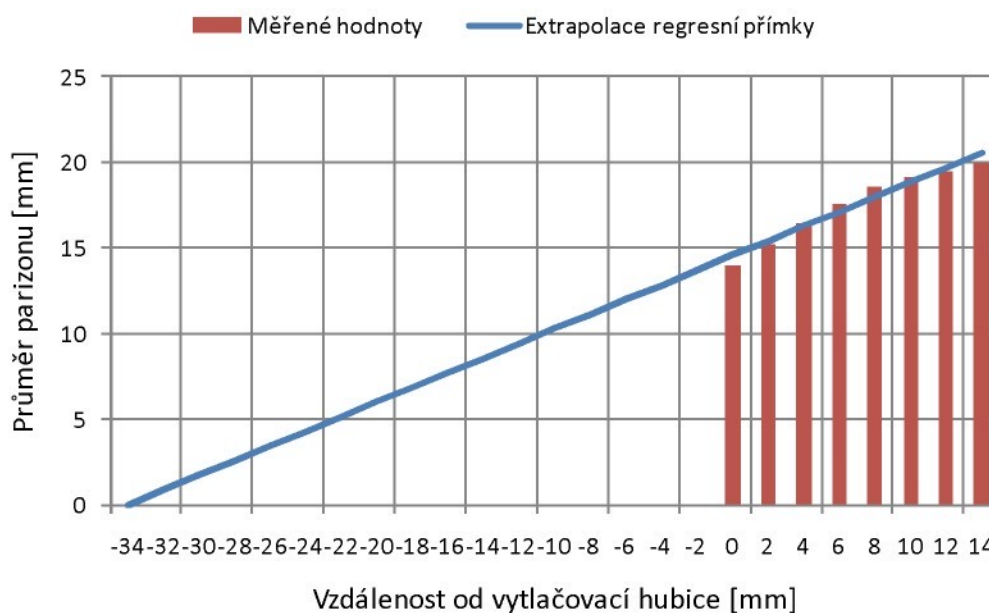
ANOVA

	St_vlnosti	SS	MS	F	Hodnota P
Regrese	1	30,68491385	30,68491385	125,4428663	3,02462E-05
Rezidua	6	1,467675991	0,244612665		
Celkem	7	32,15258985			

	Koeficienty	Sm_chyba	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95,0%	Horní 95,0%
Konstanta	14,54002708	0,319252163	45,54402053	7,50624E-09	13,75884518	15,32120898	13,75884518	15,32120898
Vzdálenost L	0,42737372	0,038157932	11,20012796	3,02462E-05	0,334004625	0,520742816	0,334004625	0,520742816



Obr. 6-89: Grafický výstup lineární regrese



Obr. 6-90: Extrapolace lineární regresní přímky

Průsečík lineární regresní přímky udává hodnotu délky vytlačovací hubice, která by způsobila eliminaci narůstání vytlačovaného profilu. Jak již bylo uvedeno, důležitým parametrem je správná volba vzdálenosti parizonu od vytlačovací hubice. V tomto případě jsem vycházel z faktu, že nejvýznamnější část narůstání (relaxace napětí) proběhne do 5 vteřin poté, co parizon opustí vytlačovací hubici.

Příklad 2 :

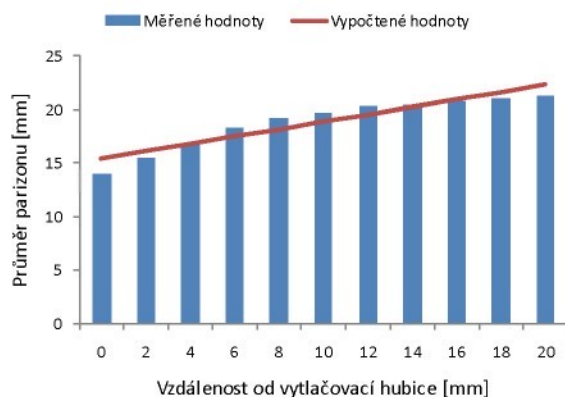
Tab. 6-18: Lineární regrese pro Liten BB-29 (ITT=0,15) do vzdálenosti 14mm od štěrby 1.45 mm po otáčky šneku 30 min⁻¹

Regresní statistika	
Kor_koef	0,940611943
R^2	0,884750827
R^2 upraveno	0,871945363
Sm_chyba	0,86903368
Pozorování	11

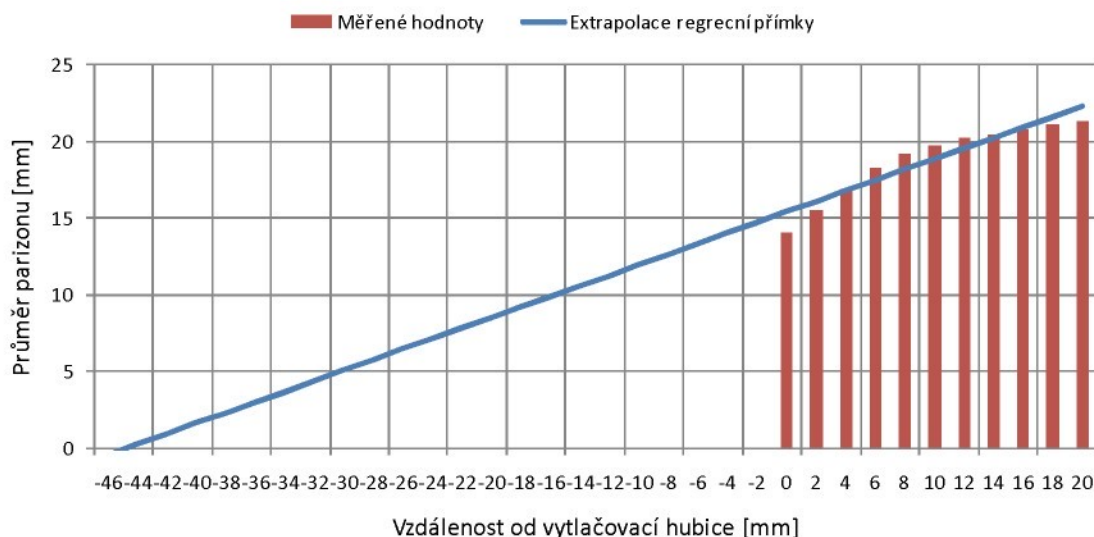
ANOVA

	St_vlnosti	SS	MS	F	Hodnota P
Regrese	1	52,17937631	52,17937631	69,09166645	1,62823E-05
Rezidua	9	6,796975827	0,755219536		
Celkem	10	58,97635214			

	Koeficienty	Sm_chyba	t Stat	Hodnota P	Dolní 95%	Horní 95%	Dolní 95,0%	Horní 95,0%
Konstanta	15,41069841	0,490201107	31,43750227	1,63581E-10	14,30178647	16,51961035	14,30178647	16,51961035
Vzdálenost L	0,34436825	0,041429555	8,312139704	1,62823E-05	0,250648085	0,438088415	0,250648085	0,438088415



Obr. 6-91: Grafický výstup lineární regrese



Obr. 6-92: Extrapolace lineární regresní přímky

7. Závěr

Všechny oblasti lidské činnosti se neustále rozvíjejí a zdokonalují. Nejinak je tomu i v oblasti vytlačování plastů. Snaha o rozšíření teoretických znalostí je cestou pro aplikace v praxi. Výsledkem tohoto úsilí je zdokonalený nebo inovovaný technologický proces i finální produkt.

Disertační práce je zaměřena do oblasti extruzního vyfukování a zabývá se zkoumáním průvodních jevů, ke kterým dochází při vytlačování parizonu, zejména pak narůstáním jeho rozměrů po opuštění vytlačovací hubice jako důsledku viskoelastických vlastností polymerů. Teoretická část disertační práce se zabývá rozбором procesu extruze, definicí viskoelastických vlastností polymerních tavenin, následných jevů po extruzi a jejich důsledků pro následné zpracovatelské technologie.

Experimentální část disertační práce byla zaměřena na rozbor a posouzení vlivu technologických, materiálových a konstrukčních parametrů na proces extruze. Provedená měření zohlednila volbu typů polymerů z hlediska chování jejich tavenin po extruzi. Volba polymerů pro experiment byla provedena s ohledem na jejich vlastnosti tak, aby pokryla širokou škálu běžně používaných materiálů pro technologii extruzního vyfukování. Dalším parametrem experimentu byla geometrie vytlačovací trysky reprezentovaná proměnnou šířkou vytlačovací štěrbiny spolu se změnou smykové rychlosti vytlačované taveniny pomocí nastavených otáček šneku vytlačovacího stroje.

Metodika měření spočívala v pořizování snímků systémem ARAMIS a následným vyhodnocením s grafickými výstupy obsahujícími změny průměru parizonu v závislosti na jeho délce.

Následující fáze experimentu se soustředila na možnosti eliminace průvodních viskoelastických jevů spojených s extruzí a nalezení vhodného matematického popisu narůstání průměru parizonu. Pro matematický popis uvedeného jevu byla využita metoda regresní analýzy. Takto vytvořené modely zohledňují vliv volby polymeru, geometrii vytlačovací hlavy a smykové rychlosti a je možné s jejich pomocí „odhadnout“ průměr parizonu v určitém místě po délce parizonu.

Snahou teoretického přístupu (matematický popis) v oblasti reologie a monitorizace viskoelastických jevů bylo formulovat matematický model, který by popsal geometrickou změnu polymerní taveniny, včetně problematiky newtonovského chování, elasticity, viskozity a přechodových jevů při zahájení nebo ukončení toku.

Díky novým poznatkům bylo možné nejen zmapovat vliv vybraných parametrů procesu na efekt deformace parizonu, ale hlavně tento proces matematicky popsat, což má dopad jak na teoretickou, tak i na praktickou stránku výstupů, které jsou a budou využívány pro řízení vyfukovacích strojů (rozšíření platnosti na další oblasti aplikace v průmyslové praxi).

Je nepochybné, že práce otevírá nový pohled na danou problematiku a určuje směr dalšího postupu při sledování a popisu viskoelastických jevů. Další disertační práce v této oblasti budou následovat a jejich výsledky pomohou nalézt komplexní rozbor tak obsáhlého tématu jako je tok polymerních tavenin.

7.1 Přínos pro praxi a vědu

Na základě provedených analýz viskoelastických jevů spojených s extruzí parizonu je možné konstatovat, že mezi přínosy disertační práce patří:

- Nalezení metodiky monitorizace rozměrových změn vytlačovaného parizonu, kterou lze uplatnit v následujících experimentech i praxi.
- Pomocí matematického modelu - logaritmičeských regresních rovnic - je možné předpovídat rozměrové změny vytlačovaného parizonu a tím usnadnit konstrukci jak nástrojů pro vytlačování, tak i konstrukci výrobku samotného.
- Ověření způsobu ovlivňování rozměrů, především pak průměru parizonu pomocí technologických parametrů, začlenění výsledků do teoretického vědního základu.
- Výsledky experimentu usnadňují vhodnou volbu polymeru pro konkrétní požadovaný profil parizonu v závislosti na tokových vlastnostech jeho taveniny.
- Výsledky je možné považovat za podklad pro tvorbu simulačních SW, jejichž výstupy by dovedly předpovědět viskoelastické jevy při namáhání polymerních tavenin.



7.2 Další postupy

Další postupy experimentů spadají především do oblasti výzkumu nepopsaných závislostí na technologických, materiálových či geometrických parametrech:

- Experimentální měření a vyhodnocení viskoelastických jevů se změnou geometrií trysky a definice odlišného viskoelastického chování s konvergentní či divergentní tryskou.
- Do oblasti proměnných zahrnout i další parametry, které ovlivňují proces vytlačování parizonu či extruze obecně (tlak, teplota, konstrukční parametry vytlačovacího stroje apod.).
- Nalezení obecného matematického modelu pro jednotlivé skupiny polymerů (nejen polyolefinů) určujících deformační chování jejich tavenin.

7.3 Praktická aplikace

Praktickým výstupem disertační práce je uplatnění výsledků výrobcem vyfukovacích strojů při inovačním vývoji adaptivního systému řízení v rámci projektu OPPI Inovace – Inovační projekt. V praxi byla uplatněna metodika monitorizace rozměrových změn parizonu a byl implementován matematický popis jevu viskoelastického narůstání parizonu, který umožní provádět automatické korekce systému regulace tloušťky stěny parizonu u technologie extruzního vyfukování.



8. Seznam použité literatury

- [1] ROSATO, D. – ROSATO, A. – Di MATTIA, D.: *Blow molding handbook*. Munich 2004: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-22017-8
- [2] RAUWENDAAL, CH. : *Polymer extrusion*. 3.vyd., Hanser/Gardner Publications, 1994, ISBN 1-56990-140-6
- [3] KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3
- [4] MEISSNER, B – ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů*. SNTL/ALFA Praha 1987
- [5] LENFELD, P.: *Technologie II. – část 2. Zpracování plastů*. Liberec: TU v Liberci 2005. ISBN 80-7372-037-X
- [6] LENFELD, P. a kolektiv: *Strojírenská technologie – vybrané prezentace*. TU v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-326-2
- [7] BĚHÁLEK, L.: *Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi*. - za podpory projektu In-TECH (reg.č. CZ.04.1.03/3.2.15.2/0215) Evropského sociálního fondu (ESF projekt v Opatření 3.2)
- [8] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [9] WHITE, J. – POTENTE, H.: *Screw Extrusion*. Munich 2003: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-19624-2
- [10] THIELEN, M.: *Extrusion Blow Molding*. Munich 2001: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-21948
- [11] KREBS, J. *Teorie a technologie zpracování plastů*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, Liberec, 1981.
- [12] SOVA, M - KREBS, J. a kol.: *Termoplasty v praxi*. Praha: Dashofer, 2004. ISBN 80-86229-15-7.
- [13] LENFELD, P.: *Inovace konstrukce vyfukovacího stroje GM 2500 a zvyšování efektivity technologie extruzního vyfukování – technická studie*. Liberec 2009
- [14] TOMIS, F. - RULÍK, F. : *Gumárenské a plastikářské stroje*. Skripta VUT Brno, 1981
- [15] TOMIS, F. : *Stroje a zařízení v technologii plastických hmot*. 1.vyd. SVTL Bratislava, 1964



- [16] TOMIS, F. : *Gumárenská a plastikářská technologie, Zpracovatelské procesy*. Skripta VUT Brno, 2.vyd., 1986
- [17] KŮSA, P. : *Vliv konstrukce vstupní zóny na výkonové charakteristiky plastikační jednotky vyfukovacího stroje*. Diplomová práce, TU v Liberci, 2003. V45/03S
- [18] DUŠEK, P.: *Monitorizace procesu vyfukování*. Diplomová práce, TU v Liberci, 2008
- [19] HABR, J. : *Monitorizace rozměrových změn vytlačovaného profilu*. Diplomová práce, TU v Liberci, 2009
- [20] KŮSA, P.: *Zpracování plastů vytlačováním*. Presentace na semináři firmy Velox CMS, Střítež u Jihlavy, 2008.
- [21] CYHELSKÝ, L. - HINDLS, R. - KAHOUNOVÁ, J.: *Elementární statistická analýza*. 2. vyd. Management Press, Praha 1999. ISBN 80-7261-003-1.
- [22] HENDL, J.: *Přehled statistických metod zpracování dat*. Portál, Praha 2006. ISBN 80-7367-123-9
- [23] www.gdk.cz (duben 2009)
- [24] www.chemwide.com (únor 2009)
- [25] www.fluent.com (duben 2009)
- [26] www.polymerwide.com (březen 2009)
- [27] www.chemopetrol.cz (únor 2009)
- [28] www.slovnaft.sk (únor 2009)
- [29] www.3d-digitizing.eu (březen 2009)



9. Seznam publikací

1. LENFELD, P. – KŮSA, P. – PACLT, R.: *Monitoring of Extrusion Blow Moulding Proces*. In: Mezinárodní konference PRO-TECH-MA 08. Košice, červen 2008, SR, p. 239 – 244, CD, Rec. Ing. I. Gajdoš, Ph.D. ISSN 1335-2393
2. PACLT, R. - LENFELD, P. – KŮSA, P.: *Design of the cooling/heating system for the injection molds*. In: Acta Mechanica Slovaca – Mezinárodní konference PRO-TECH-MA 08, Košice, 6-8.7.2008, s. 339-344. ISSN 1335-2393, Rec: doc. Ing. F. Greškovič, CSc.
3. SEIDL, M. - LENFELD, P. – KŮSA, P.: *The structure of plastic molded part with using conventional cooling and CO₂ cooling*. In: Acta Mechanica Slovaca – Mezinárodní konference PRO-TECH-MA 08, Košice, 6-8.7.2008, s. 393-398. ISSN 1335-2393 Rec. Ing. I. Gajdoš, Ph.D.
4. KŮSA, P.: *Zpracování plastů vytlačováním*. Prezentace na semináři firmy Velox CMS, Střítež u Jihlavy, 2008.
5. CHROMEČ, O. - KŮSA, P.: *Extrusion blow moulding technology*. Prezentace na semináři firmy Galsoft-Service, Lviv, Ukraine, 2009.