

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv řízení dotlaku a viskozity taveniny na kvalitu dílů z plastů

**Influence of holding pressure control and melt viscosity on quality
of plastic parts**

Roman Paclt

KSP -TP -753

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld - TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. Aleš Ausperger - TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	68
Počet tabulek	3
Počet příloh	13
Počet obrázků	31

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146080196

Datum: 27.5.2005



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Roman P A C L T
Studijní program	M2301 Strojní inženýrství
Obor	2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Vliv řízení dotlaku a viskozity taveniny na kvalitu dílů z plastů

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s technologií vstřikování dílů z termoplastů v podniku Peguform Bohemia, k. s., Liberec a Peguform Bohemia, k. s., Libáň
2. Rozbor problematiky řízení vstřikovacího cyklu pomocí diagramu p-v-T
3. Výběr dílu a nástroje pro experimentální měření dotlaku a hmotnosti
4. Provedení experimentů pro změnu viskozity taveniny a přepínání dotlaku
5. Optimalizace procesu pro vybranou vstřikovací formu
6. Vyhodnocení výsledků a doporučení pro výrobu

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva cca 50 stran
- grafické práce

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- /1/ SOVA, A. - KREBS, J. A KOL. : Termoplasty v praxi, Verlag Dashöfer, Praha, 1999-2004
- /2/ HERBERT, K. : Mold Engineering, Verlag Hanser, 1995
- /3/ MALLOY, R. A. : Plastic Parts design for Injection Moulding, Hanser, 1994
- /4/ Firemní materiály

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Konzultant diplomové práce: Ing. Aleš Ausperger

L.S.

doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry

doc. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne 15. 2. 2005

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedeném lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 - Strojní inženýrství
Diplomant: Roman Paclt
Téma práce: Vliv řízení dotlaku a viskozity taveniny na kvalitu dílů z plastů
Influence of holding pressure control and melt viscosity
on quality of plastic parts
Číslo DP: KSP - TP - 753
Vedoucí DP: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld - TU v Liberci
Konzultant: Ing. Aleš Ausperger - TU v Liberci

Abstrakt:

Tato diplomová práce rozebírá problematiku řízení vstřikovacího cyklu. Zaměřuje se na posouzení výhod použití tlakových čidel pro přepínání na dotlak v porovnání s konvenčním způsobem, kdy je přepnutí dáno nastavenou dráhou šneku. Zkoumá vliv způsobu řízení v kombinaci se změnou viskozity taveniny na stabilitu procesu. Zároveň popisuje význam p-v-T diagramu v procesu vstřikování a možnosti jeho využití pro řízení cyklu.

Abstract:

This diploma thesis deals with the injection moulding cycle problems. It aims to advantages of usage of pressure sensors for switching-over to holding pressure compared with a common way, when the switching-over is determinate by setting up a value of a screw track. It investigates an influence of the way of control combined with change of melt viscosity on process stability. At the same time it describes signification of p-v-T curves for injection moulding process and its application for a cycle control.

Místopřísazné prohlášení

Místopřísazně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 27. května 2005

.....

Roman Pačt

Dolní Krupá 23

29501

Poděkování:

Děkuji všem, kteří mi během psaní diplomové práce pomáhali a radili, zejména pak vedoucímu DP, doc. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi.

Dále bych rád poděkoval své rodině za morální i materiální podporu během mého studia.



OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	8
1 ÚVOD.....	10
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2.1 Vstřikovací cyklus.....	12
2.1.1 Vlivy vybraných technologických parametrů na průběh velikosti vnitřního tlaku.	14
2.1.2 Dotlak a jeho vliv na kvalitu výrobku.....	17
2.1.3 Viskozita taveniny jako důsledek teploty	18
2.3 Diagram p-v-T.....	19
2.3.1 Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T.....	25
2.3.2 Průběh p-v-T diagramu při sníženém dotlaku a vlivu omezené tuhosti formy.....	27
2.3.3 Odlišnost průběhu křivek p-v-T podle místa měření stavových veličin....	28
2.4 Vstřikovací stroje.....	30
2.4.1 Součásti a parametry vstřikovacích strojů.....	30
2.4.2 Řízení a regulace strojů.....	32
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	36
3.1 Obsah a cíl experimentu.....	36
3.2 Výrobek.....	36
3.3 Materiál.....	37
3.4 Vstřikovací stroj.....	40
3.5 Forma.....	42
3.6 Čidla.....	42
3.7 Technologické parametry při experimentu.....	44
3.7.1 Základní technologické parametry.....	45
3.7.2 Změny technologických parametrů.....	46
4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	48
4.1 Získaná data.....	48
4.2 Srovnání tlakových profilů při různých nastaveních stroje.....	49
4.3 Srovnání hmotností výstřiků při různých nastaveních stroje.....	53
4.4 Transformace naměřených křivek do diagramu p-v-T.....	56



5 DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	61
5.1 Posouzení vlivu přepnutí a viskozity plastu na výrobek.....	61
5.2 Posouzení významu diagramu p-v-T.....	63
6 ZÁVĚR.....	65
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
8 SEZNAM PŘÍLOH.....	68



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	hodnota dyn.viskozity při $T = 0K$ [Pa·s]
b_i	materiálové konstanty Taitovy rovnice
D	smyková rychlost [s^{-1}]
D_ξ	průměr šneku [cm]
E	aktivační energie viskózního toku [J/ kg]
EPDM	etylen-propylen-dienový terpolymer
LŘ	levé řízení
m_d [g]	hmotnost vyrobeného dílu [g]
MFR	Hmotnostní index toku taveniny [g / 10 min]
$m_{př}$	hmotnost plastu v dutině formy při přepnutí na dotlak [g]
$m_{stř}$	průměrná hodnota hmotnosti vyrobeného dílu [g]
m_t	teoretická hmotnost výstřiku a vtokového zbytku [g]
m_v	hmotnost vtokového zbytku [g]
N.B	nepřeraženo (při zkoušce vrubové houževnatosti)
P	velikost polštáře [mm]
p	tlak [MPa]
p_{bar}	barometrický tlak [MPa]
PD	přístrojová deska
PE	polyethylen
p_i	tlak v dutině formy [MPa]
p_{i1}	tlak na čidlo 1
p_{i2}	tlak na čidlo 2
p_{m1}	velikost maximálního vnitřního tlaku na čidlo 1 [MPa]
p_{m2}	velikost maximálního vnitřního tlaku na čidlo 2 [MPa]
p_{mv}	velikost maximálního tlaku uvnitř plastikačního válce [MPa]
PP	polypropylén
$p_{př1}$	velikost vnitřního tlaku při přepnutí na dotlak na čidlo 1 [MPa]
$p_{př2}$	velikost vnitřního tlaku při přepnutí na dotlak na čidlo 2 [MPa]
p_v	tlak ve vstřikovacím válci [MPa]
p_{vs}	tlak vstřikovací [MPa]
p-v-T	tlak–měrný objem–teplota (diagramy p-v-T)
Q_p	plastikační kapacita [kg/hod]
Q_v	vstřikovací kapacita [cm^3]
s	dráha [mm]



$s_{př}$	dráha šneku v okamžiku přepnutí na dotlak [mm]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$], [K]
t	čas [s]
t_d	doba dotlaku [s]
$t_{d,p}$	doba dotlaku izobarického [s]
$t_{d,v}$	doba dotlaku izochorického [s]
t_c	doba cyklu [s]
T_f	teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]
T_r	teplota viskózního toku [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	teplota skelného přechodu (teplota zesklenní) [$^{\circ}\text{C}$]
t_{ch}	doba chlazení [s]
t_m	doba manipulace [s]
T_m	teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]
t_{pl}	doba plastikace [s]
$T_{př}$	přechodová teplota [K]
t_{s1}	doba strojní pro uzavření formy [s]
t_{s2}	doba strojní pro přisunutí plastikační jednotky [s]
t_{s3}	doba strojní pro otevření formy [s]
t_v	doba plnění formy [s]
T_{vs}	vstřikovací teplota [$^{\circ}\text{C}$]
v	měrný objem [m^3/kg], [cm^3/g]
v_{40}	měrný objem plastu při $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [m^3/kg], [cm^3/g]
v_f	měrný objem plastu v dutině formy [m^3/kg], [cm^3/g]
$v_{vpř}$	měrný objem hmoty ve válci při přepnutí [m^3/kg], [cm^3/g]
v_{vs}	rychlost posuvu šneku při vstřiku [m / s]
R	ekvivalent plynové konstanty [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
Z	velikost zdvihu šneku [mm]
β	součinitel objemové stlačitelnosti [Pa^{-1}]
γ	součinitel teplotní objemové roztažnosti [K^{-1}]
Δv_{\max}	maximální velikost změny měrného objemu (smrštění) [m^3/kg]
Δm_i	přírůstek hmotnosti plastu natlačeného do dutiny formy [g]
Δm_k	konečný přírůstek hmotnosti plastu natlačeného do dutiny formy [g]
η	dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_{zD}	zdánlivá dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
π	vnitřní tlak v plastu [MPa]
σ	směrodatná odchylka hmotnosti [g]
τ	smykové napětí [Pa]



1 ÚVOD

Rozvoj moderních plastů a jejich masové využití jsou v historickém měřítku velmi nedávnou záležitostí datovanou do minulého století. Přesto si dnes život bez plastů už těžko kdo dovede představit. Plasty našly uplatnění snad ve všech oblastech lidského konání. Díky svým velkým možnostem uplatnění plasty pokrývají široké spektrum průmyslových oborů, jako je stavebnictví, automobilový průmysl, elektronika, obalová technika, spotřební průmysl atd. Plasty postupně nahradily řadu dosud používaných materiálů, jako např. dřevo, keramiku, sklo nebo kovové materiály. Svými mechanickými vlastnostmi se sice nevyrovnají kovům, ale v jejich prospěch hovoří především nesrovnatelně nižší hustota, nižší cena, menší energetické nároky na výrobu a obecně dobrá zpracovatelnost.

Nejrozšířenějším druhem zpracování plastů, konkrétně termoplastů, je technologie vstřikování. Rozvoj této technologie klade stále vyšší nároky na úroveň zařízení, zejména na úroveň řízení a regulace strojů. Snaha po zlevnění a zefektivnění výroby při zachování, nebo dokonce zlepšení stávající kvality vstřikovaných dílů je příčinou hledání stále nových řešení způsobu řízení vstřikovacího cyklu. Technický pokrok dovoluje použití stále dokonalejších technologií díky nimž jsme schopni zaručit bezporuchový chod s malým podílem zmetkovitosti v celkovém objemu výroby. Díky novým poznatkům a jejich aplikacím ve výrobním procesu jsme tedy schopni zaručit dobrou reprodukovatelnost a stabilitu procesu vstřikování.

V České republice působí mnoho firem zabývajících se vstřikováním dílů z termoplastů. Mezi ně patří i firma Peguform Bohemia, která vyrábí a dodává plastové díly pro automobilový průmysl. Peguform Bohemia sídlí v Liberci a má pobočky v Nymburku a v Libáni. Díky spolupráci s firmou Peguform, konkrétně se závodem v Libáni vznikla předložená diplomová práce. Závod Libáň se specializuje na výrobu interiérových dílů do automobilů. Vyrábí se zde např. dveřní výplně nebo komponenty do přístrojové desky. Mezi jejich hlavní odběratele patří automobilky Škoda a Suzuki. Firma Peguform Bohemia reprezentuje špičku v tvrdé konkurenci českého plastikářského průmyslu a snaží se neztratit své výsadní postavení na trhu neustálým zdokonalováním výrobních postupů.

Diplomová práce si klade za cíl ověřit a vyhodnotit přínosy nové metody v řízení vstřikovacího cyklu, která by mohla posunout proces automatizace o krok



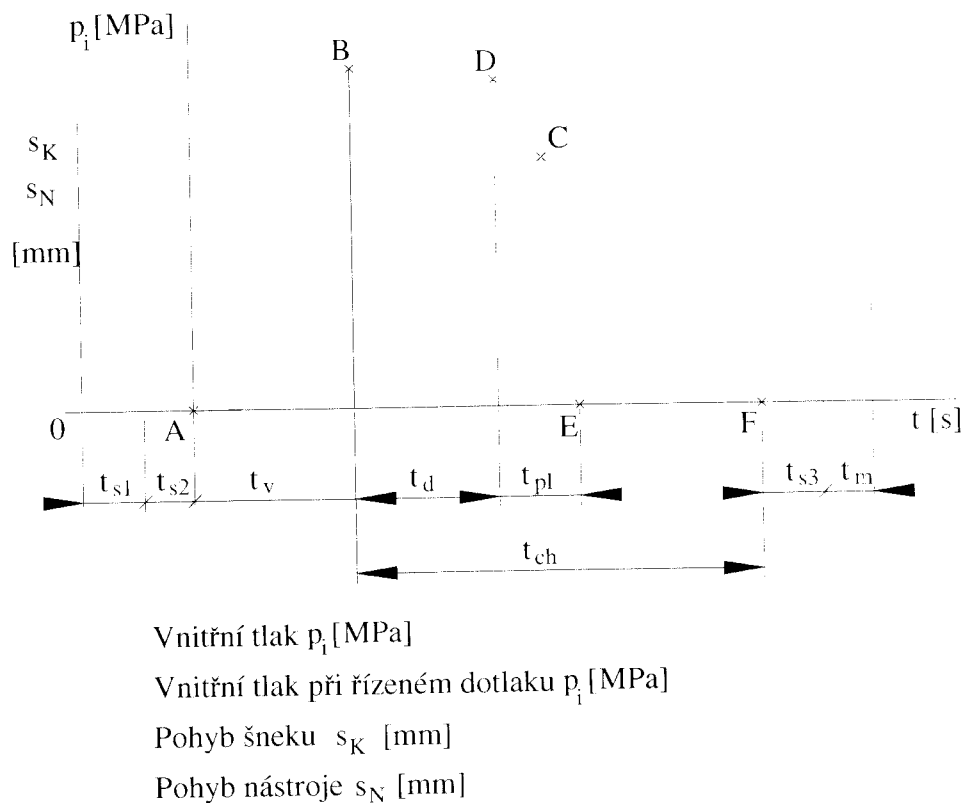
dopředu a zaručit trvalou stabilitu procesu při výrobě vstřikovaných dílů. Nová technologie kontroly a řízení procesu spočívá v používání tlakových čidel umístěných v dutině formy pro posouzení ideálního okamžiku pro přepnutí na dotlak ve snaze zvýšit konečnou kvalitu dílů. Tento způsob přepínání by v případě úspěšného nasazení nahradil stávající postup, kdy je přepnutí na dotlak odvozeno od nastavené hodnoty dráhy šneku. Dalším cílem diplomové práce je posouzení vlivu viskozity, jako funkce teploty taveniny, na průběh a výsledek vstřikování a určení optimálního nastavení stroje pro zabezpečení maximální stability procesu. Diplomová práce rozebírá obecné možnosti řízení vstřikovacího cyklu v souvislosti s možnostmi stroje a možnostmi využití p-v-T diagramu pro řízení vstřikovacího cyklu a hodnocení průběhu stavových veličin v průběhu cyklu.



2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1. VSTŘIKOVACÍ CYKLUS [1]

Vstřikování je děj, který se opakuje, a proto ho nazýváme dějem cyklickým. Za počátek vstřikovacího cyklu považujeme uzavření formy. Vstřikovací cyklus můžeme popsat např. pomocí tzv. tlakového diagramu (viz obr. 1). V tomto diagramu je zobrazena závislost tlaku v dutině formy p_i na čase t . Dále do tohoto grafu zakreslujeme také pohyb (dráhu) šneku a pohyb formy. Vstřikovací cyklus rozdělujeme do několika časových úseků a definujeme důležité časové okamžiky.



Obr. 1: Tlakový diagram

- **Doba t_{s1}**

V této fázi se otevřená a prázdná dutina formy uzavírá přísouvací silou F_p a uzamyká mnohem větší uzavírací silou F_u , která zaručuje to, že se při plnění a dotlaku forma nepootevře.



- **Doba t_{s2}**

V tomto časovém úseku se k formě přisune tavicí komora vstříkovací jednotky. Stejně jako t_{s1} je i t_{s2} dobou činnosti stroje.

- **Doba t_v**

V bodě **A** začíná vlastní vstřík. Čas t_v se nazývá časem plnění formy. Dochází k axiálnímu pohybu šneku a k nárůstu tlaku v dutině formy. Tato fáze končí v bodě **B**, kde je dosaženo maximální hodnoty vnitřního tlaku.

- **Doba t_{ch}**

Je to čas chlazení, který probíhá až do otevření formy. Dělí se na dobu chlazení při plném a při klesajícím vstříkovacím tlaku. Během této doby nastává okamžik úplného zatuhnutí vtoku, označený písmenem **C**. Dochází v něm k přerušení toku taveniny mezi tavicí komorou a dutinou formy.

- **Doba t_d**

Časový úsek označovaný jako doba dotlaku. Tato fáze zabezpečuje dodávku taveniny do dutiny formy, která kompenzuje úbytek objemu v důsledku smršťování materiálu s klesající teplotou. Může se jednat o tlak konstantní, velikosti tlaku v bodě **B**, nebo o tlak pomalu klesající. Doba dotlaku končí v bodě **D**. Bod **D** může ležet nejdále na bodu **C**, protože za bodem **C** už by byl dotlak v důsledku zatuhnutí vtoku bezúčelný. Za bodem **D** dochází k prudkému poklesu tlaku v důsledku smrštění a odlehnutí výstříku od stěn formy. Vlastnosti výstříku jsou rozhodujícím způsobem určovány úrovní termodynamických veličin v bodě **C** (tlak, teplota). Proto se dá úroveň tlaku v tomto bodě ovlivnit řízeným průběhem dotlaku (na obrázku znázorněno zeleně). Vysoký tlak v tomto bodě může zapříčinit vysoká vnitřní pnutí způsobující samovolné praskání součástí. Naopak nízký tlak je příčinou vzniku propadlin. O fázi dotlaku budu podrobně pojednávat v další části diplomové práce.

- **Doba t_{pt}**

V bodě **D** začíná plastikace nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet a zároveň se posouvá dozadu. Teplo potřebné pro plastikaci je předáváno ze stěn válce, dále vzniká třením o stěnu válce, třením o plochu šneku, třením mezi plastem a také přeměnou z hnětací práce. Plastikace je ukončena v bodě **E**, kdy se zastaví rotační pohyb šneku. Následuje odsunutí tavicí komory od formy (doba t_k), které zaručuje to, aby nedocházelo k nežádoucímu přechodu tepla do chladnoucího materiálu a naopak, aby se neochlazovala tryska tavicí komory.



- **Doba t_{s3}**

Doba t_{s3} je strojní doba potřebná k otevření formy po potřebném zchladnutí součásti. Počátek je v bodě F.

- **Doba t_m**

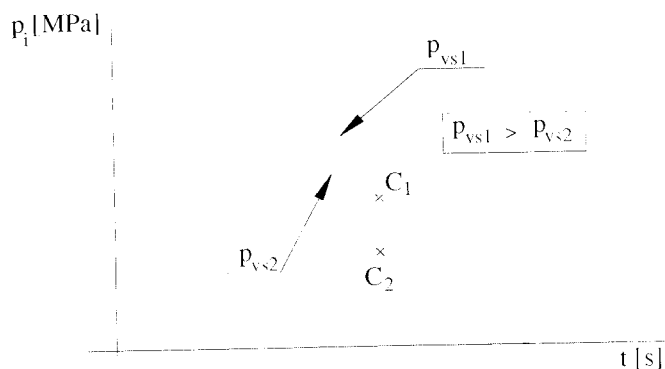
Doba manipulace následuje po otevření formy, pokud je součást vyjímána manipulátory.

2.1.1 VLIVY VYBRANÝCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA PRŮBĚH VELIKOSTI VNITŘNÍHO TLAKU [3, 6, 5]

Průběh tlaku v dutině formy je ovlivňován různými technologickými parametry, jejichž změny vyvolávají příslušnou odezvu ve tvaru tlakového diagramu. Nejdůležitějšími z těchto parametrů jsou:

- a) vnější vstřikovací tlak (\rightarrow rychlost vstřikování)
- b) teplota taveniny (vstřikovací teplota)
- c) teplota formy
- d) doba dotlaku a okamžik přepnutí na dotlak

ad a) Velikost vstřikovacího tlaku ovlivňuje velikost tlaku v dutině formy (viz obr. 2). Důležitá je zejména hodnota vnitřního tlaku v bodě zatuhnutí vtoku C. Tento bod určuje výsledné vlastnosti součásti. Okamžik zatuhnutí vtoku se při různých hodnotách vstřikovacího tlaku nemění, ovšem mění se hodnota vnitřního tlaku v tomto bodě. Čím vyšší je vstřikovací tlak, tím vyšší je i tlak v dutině formy v celém zobrazeném průběhu, tj. i v okamžiku zatuhnutí vtoku.

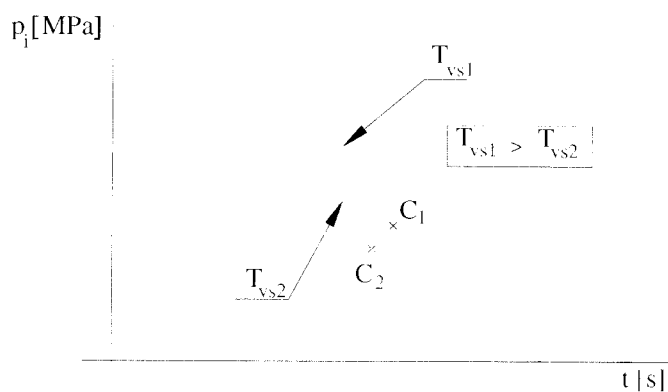


Obr. 2: Vliv vnějšího vstřikovacího tlaku p_{vs} na průběh vnitřního tlaku p_i



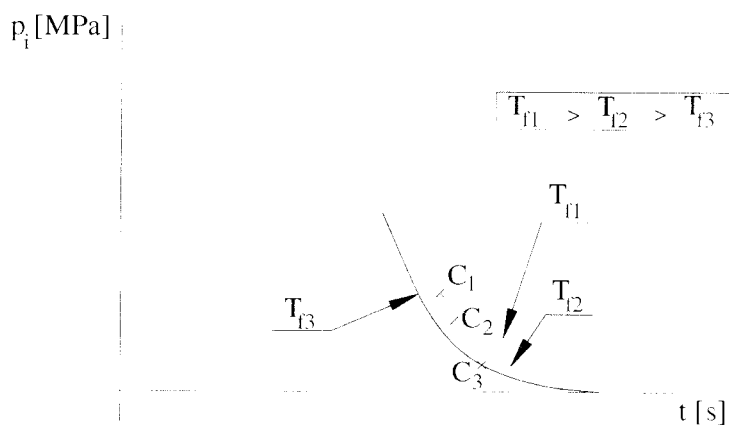
Vyšší tlak způsobuje zmenšení výsledného měrného objemu součástí. Se zmenšující se hodnotou měrného objemu roste hmotnost dílu a dochází ke zmenšení smrštění. Vnitřní tlak při sníženém vstřikovacím tlaku je menší a vykazuje zpoždění.

ad b) Zvýšení vstřikovací teploty má za následek zvýšení vnitřního tlaku (viz obr. 3). Klesne totiž viskozita taveniny a dojde ke zmenšení tlakových ztrát. Vnitřní tlak v okamžiku zatuhnutí vtoku formy se při rostoucí teplotě rovněž zvyšuje a tím roste i hmotnost a měrný objem výrobku se zmenšuje. Zároveň se okamžik zatuhnutí vtoku oddaluje.



Obr. 3: Vliv velikosti vstřikovací teploty T_{vs} na průběh vnitřního tlaku p_i

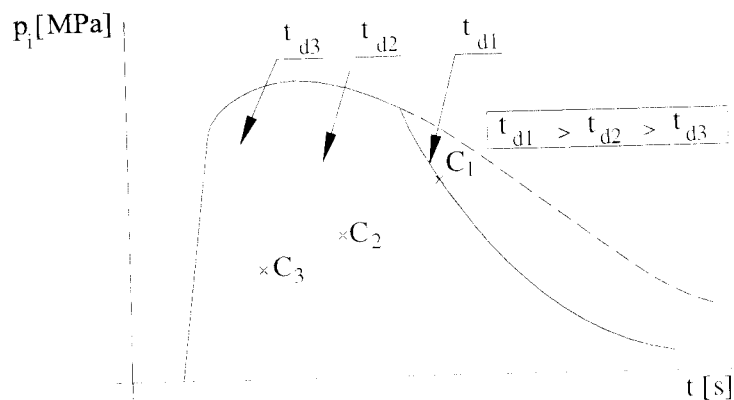
ad c) Vliv teploty formy na velikost vnitřního tlaku není příliš velký. Zvýšení teploty formy má za následek zvýšení vnitřního tlaku (viz obr. 4).



Obr. 4: Vliv velikosti teploty formy T_f na průběh vnitřního tlaku p_i

Doba zatuhnutí vtoku se prodlužuje. To má za následek pokles vnitřního tlaku v tomto bodě a tudíž zmenšení hmotnosti vstříkovaného dílu a zvětšení jeho smrštění. Zvýšení teploty formy má příznivý vliv na snížení vnitřního pnutí výrobků.

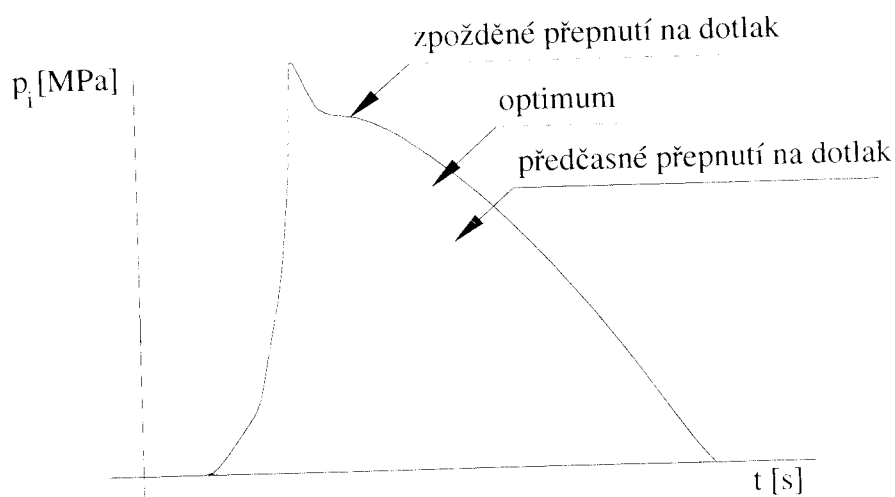
ad d) Zkrácením doby dotlaku dochází k dřívějšímu a rychlejšímu poklesu vnitřního tlaku a klesá hodnota vnitřního tlaku v okamžiku zatuhnutí vtoku i hodnota tlaku zbytkového (viz obr. 5). Je-li naopak dotlak příliš dlouhý, je zbytkový tlak příliš vysoký a může docházet k problémům při vyhazování výrobku z formy.



Obr. 5: Vliv doby dotlaku t_d na průběh vnitřního tlaku p_i

Přepnutí na dotlak musí být načasováno přibližně na okamžik, kdy je forma zaplněna taveninou. Na obr. 6 je znázorněna optimální varianta a dále průběh tlakové křivky v případě, že dojde k předčasnému, nebo naopak k opožděnému přepnutí na dotlak. Při opožděném přepnutí dochází k prudkému zvýšení tlaku ve formě. Tlaková špička způsobí zvýšenou hmotnost a rozměry výstřiku a také zvýšené namáhání formy, které by mohlo vést až k jejímu pružnému prohnutí (tzv. dýchnutí formy) a z toho plynoucího přeplnění formy [5]. Výstřik je po dýchnutí pružně stlačen a po vyjmutí z formy nepatrně expanduje a v jeho povrchových vrstvách vznikne tahové vnitřní pnutí. Po náhlém poklesu tlaku za tlakovou špičkou může navíc dojít ke zpětnému toku taveniny do válce, což zvětšuje orientaci makromolekul.

Je-li přepnutí na dotlak předčasné, je tlak ve formě nízký a hmotnost výstřiku se zmenšuje. Může dojít i k tomu, že tavenina nedoteče do vzdálených a složitých míst ve formě a výsledkem je neúplný výstřik.



Obr. 6: Vliv doby přepnutí na dotlak na průběh vnitřního tlaku p_i

2.1.2 DOTLAK A JEHO VLIV NA KVALITU VÝROBKU [1]

Jak již bylo řečeno, průběh tlaku během doby chladnutí má značný vliv na kvalitu výstřiku. Konkrétně na jeho vnitřní stav [1], čímž je myšlena struktura výstřiku, stupeň orientace makromolekul, vnitřní pnutí, atd. Výše dotlaku a jeho trvání se odvíjí od rychlosti chladnutí a velikosti smrštění hmoty. Vysoký dotlak způsobuje zvětšení rozměrů a hmotnosti výrobku, ale i vyšší stupeň orientace makromolekul, a to zejména v blízkosti vtoku. Je-li dotlak ukončen předčasně, hrozí nebezpečí vzniku propadlin a vnitřních dutin. Může také dojít ke zpětnému toku materiálu z dutiny formy směrem k trysce. Dříve se průběh dotlaku nedal řídit a po jeho vypnutí docházelo k volnému poklesu. Dala se nastavit pouze jeho jedna úroveň. Dnes se průběh dotlaku řídí na strojích s optimalizací procesu. Lze ho snižovat buď ve více stupních a nebo plynule podle diagramu p - v - T . Po skončení dotlaku se tlak oleje, působícího na šnek, ustálí na hodnotě zpětného tlaku. K chladnutí plastu dochází hned při plnění formy a od tohoto okamžiku se stavové veličiny (tlak, měrný objem, teplota) v různých místech s časem neustále mění. Charakter těchto změn je dán vstřikovacím tlakem, teplotou formy, teplotou taveniny, velikostí a průběhem dotlaku, vstřikovací rychlostí a tvarem výrobku. Výsledkem je nerovnovážný stav ztuhlého materiálu, jemuž se nejde vyhnout, ale jehož rozsah lze alespoň omezit. Cílem řízení fáze dotlaku je tedy dosáhnout co nejkvalitnějšího výrobku bez vnějších a vnitřních vad, pnutí, apod.



2.1.3 VISKOZITA TAVENINY JAKO DŮSLEDEK TEPLoty [1, 3, 4, 5, 8]

Teplota taveniny je vedle tlaku nejdůležitější veličinou při procesu vstřikování [8]. Každý plast lze vstřikovat v určitém teplotním intervalu. Čím vyšší použijeme teplotu taveniny, tím nižší vstřikovací tlak je třeba k úplnému zaplnění formy. Snižuje se totiž viskozita taveniny a to má za následek zmenšení tlakových ztrát v komoře a ve vtokových kanálech. To se odrazí v nižším vnitřním pnutí ve výrobku. Dále nehrozí nebezpečí neúplných výstřiků, protože se zvyšuje zabíhavost taveniny. Při zpracování plastů se tedy při snaze o zvýšení viskozity taveniny musí zvýšit její vstřikovací teplota. V této části se proto pokusím velmi stručně vysvětlit, co je to viskozita a její vazby na teplotu a smykovou rychlost.

Viskozita kapalin je základní tokovou (reologickou) charakteristikou, která určuje odpor kapaliny proti tečení [4]. Kapaliny, které mají velikost viskozity nezávislou na smykové rychlosti se nazývají newtonské. Taveniny plastů se jako newtonské kapaliny nechovají, chovají se jako strukturně plastické kapaliny. Jejich viskozita v závislosti na smykové rychlosti není konstantní. Zjednodušeně lze říci, že viskozita taveniny s rostoucí smykovou rychlostí klesá. Proto ji nazýváme viskozitou zdánlivou, pro níž platí, že:

$$\eta_{zd} = \frac{\tau}{D} \quad (1)$$

kde η_{zd} [Pa·s] je zdánlivá dynamická viskozita, τ [Pa] je smykové napětí a D [s^{-1}] je smyková rychlost.

Další veličinou, na které je viskozita plastů závislá je teplota. Přibližně lze závislost viskozity taveniny plastů popsat Arrheniovou rovnicí (2), která má ovšem platnost pouze při vysokých teplotách, kde se chování taveniny blíží chování newtonské kapaliny.

$$\eta = A \cdot e^{\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (2)$$

kde η [Pa·s] je dynamická viskozita, A [Pa·s] je hodnota dyn.viskozity při $T = 0K$, E [J/ kg] je aktivační energie viskózního toku, R [J/ kg·K] je plynová konstanta a T [K] je termodynamická teplota.

Z rovnice (2) je zřejmé, že viskozita newtonských kapalin s rostoucí teplotou klesá podle exponenciální funkce. Taveniny plastů se blíží svým chováním



newtonským kapalinám pouze při vysokých teplotách. V porovnání s newtonskou kapalinou klesá u tavenin plastů hodnota viskozity s rostoucí teplotou o trochu rychleji, a to zvláště v oblastech pod teplotou zhruba $T_g + 100$ °C pro amorfni termoplasty a pod teplotou T_m pro semikrystalické termoplasty.

Velký vliv na kvalitu výstřiku má tzv. teplotní homogenita taveniny. Homogenitu určuje především konstrukce šneku a doba po kterou je tavenina ve styku se stěnou plastikačního válce. Pro zkvalitnění výrobků a zoptimalizování výroby není nejvhodnější použít co nejvyšší teplotu taveniny a dlouhý čas plastikace. Nevýhodou vysoké teploty taveniny je prodloužení doby cyklu v důsledku prodloužení doby chlazení. Při dlouhé plastikaci a ohřívání taveniny na vyšší teplotu může také dojít k nevratné teplotní degradaci plastu. Degradace se projevuje změnou barvy výrobku (žloutnutí, hnědnutí). Dochází i k většímu smrštění. Další vadou vyskytující se v souvislosti s přehnanou tekutostí taveniny je vznik přetoků a otřepů. Vznikají tak, že se tavenina dostane i mimo tvarovou dutinu do mezery mezi jednotlivými částmi formy, kde ztuhne v podobě tenké blány. Někdy se stává, že při otevření formy vytahuje vtokový kužel z trysky vlákno nebo tavenina z trysky dokonce vytéká.

Je nutné si uvědomit, že velikost teploty taveniny je v přímé souvislosti s velikostí vstřikovacího tlaku. Při stejném vnějším tlaku v hydraulice dosáhneme vyššího tlaku v plastikačním válci a hlavně v dutině formy. Jestliže je stroj regulován, dochází při změně teploty taveniny k automatickému zmenšení tlaku v hydraulice tak, aby vstřikovací tlak ve válci a v dutině formy dosáhl optimální úrovně.

2.3. DIAGRAM p-v-T [1, 2, 3, 9]

Plasty mají ve srovnání s jinými konstrukčními materiály poměrně velký součinitel teplotní roztažnosti a jsou vysoce stlačitelné v roztaveném stavu [2]. Proto se objem, který má materiál, mění se změnou tlaku i teploty. Spencer a Gilmore rozvinuli stavové rovnice, které popisují expanzi a smrštění plastů. Tato rovnice je v našich zeměpisných šířkách známa spíše jako **modifikovaná stavová rovnice van der Waalsova** a má tvar:

$$(p + \pi) \cdot (v - \omega) = R \cdot T \quad (3)$$

kde značí p [MPa] - vnější tlak, π [MPa] - vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě, v [m^3/kg] - měrný objem polymeru, ω [m^3/kg] - měrný objem



polymeru při 0 K, T [K] - termodynamická teplota, R [kJ/(kg·K)] - materiálová konstanta polymeru obdobná individuální plynové konstantě.

Za předpokladu, že známe hodnoty π , ω a R pro daný polymer, můžeme pomocí stavové rovnice spočítat např. měrný objem nebo hustotu polymeru při určitých hodnotách tlaku a teploty. Hodnoty vnitřního tlaku π a měrného objemu ω pro 0 K lze buď najít v materiálových listech, nebo je lze přibližně spočítat. Odvození vztahů pro výpočet je následující:

• **Odvození ω**

Vycházíme z předpokladu, že $\pi \gg p$ a začneme upravením rovnice (3), za předpokladu $p = 0$ dostaneme:

$$v - \omega = \frac{R \cdot T}{\pi} \quad \text{a po úpravě:} \quad (4)$$

$$v = \frac{R \cdot T}{\pi} + \omega \quad \text{dále derivujeme podle } T, \text{ kdy } p = \text{konst.:} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{\pi} \quad \text{po úpravě platí, že:} \quad (6)$$

$$\pi = \frac{R}{\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p} \quad \text{dále platí po úpravě rovnice (4), že:} \quad (7)$$

$$\omega = v - \frac{R \cdot T}{\pi} \quad \text{s dosazením za } \pi \text{ z rovnice (7) dostaneme:} \quad (8)$$

$$\omega = v - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot T \quad (9)$$

Současně platí následující výraz, kde se levá strana rovnice rovná součiniteli teplotní objemové roztažnosti:

$$\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \gamma [K^{-1}] \quad (10)$$



Je tedy zřejmé, že měrný objem ω lze spočítat z měrného objemu v , z teploty T a ze součinitele γ , jak ukazuje následující rovnice:

$$\omega = v \cdot (1 - \gamma \cdot T) \quad (11)$$

• Odvození π

Předpoklad pro odvození vnitřního tlaku je zanedbání měrného objemu ω , neboť $v \gg \omega$. Tento předpoklad by byl oprávněný u plynů, pro tuhé látky musíme počítat s určitou chybou.

Vycházíme tedy ze zjednodušené rovnice:

$$v + \pi = \frac{R \cdot T}{v} \quad \text{dále derivujeme podle } v, \text{ kde } T = \text{konst.:} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{R \cdot T}{v^2} \quad \text{dosadíme za } T \text{ z původní rovnice, což vede na:} \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{(p + \pi)}{v} \quad \text{z této rovnice vyjádříme } \pi: \quad (14)$$

$$\pi = -\frac{1}{\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T} - p \quad (15)$$

Současně platí následující výraz, kdy se levá strana rovnice rovná součiniteli objemové stlačitelnosti:

$$-\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = \beta [Pa^{-1}] \quad (16)$$

Měrný objem ω lze spočítat z tlaku p při známém měrném objemu v za použití součinitele objemové stlačitelnosti β .

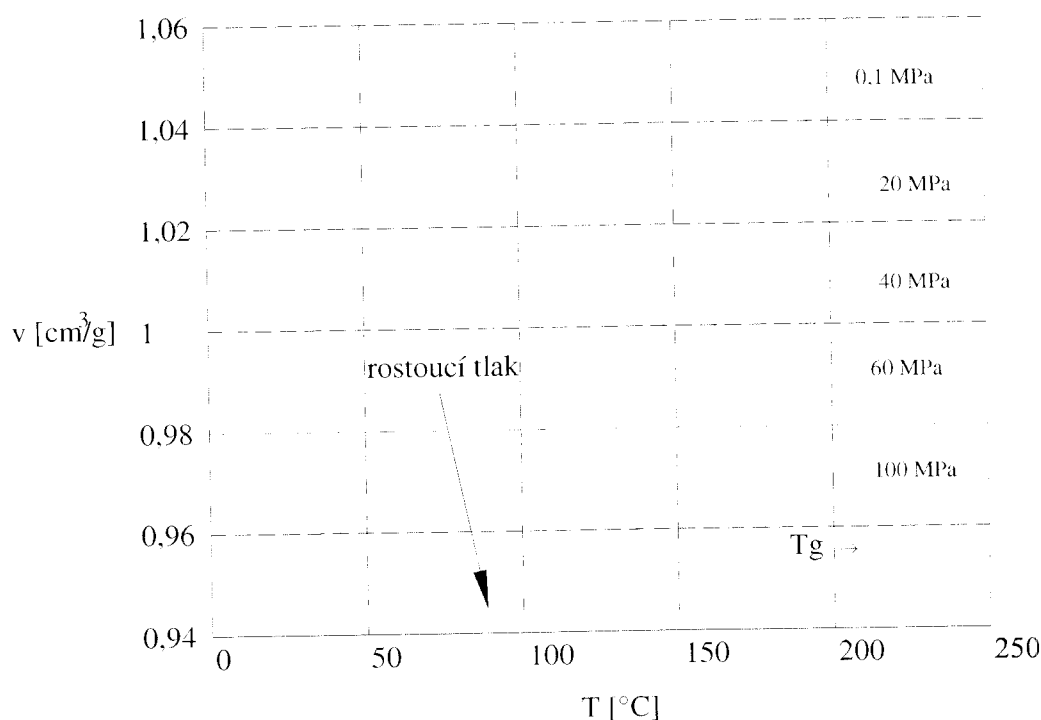
Při aplikaci stavové rovnice je nutné znát hodnoty R , ω , a π . V souřadnicích měrný objem – teplota jsou křivky konstantního tlaku přímky. Je však nutné si uvědomit, že jejich průběh není hladký, protože vlivem skokově se měnících vlastností v v závislosti na teplotě vykazují zlomy. Tyto zlomy jsou vázány na přechodové teploty. Proto mají uvedené tři konstanty jiné hodnoty v závislosti na tom, ve které oblasti se teplota právě pohybuje. U amorfních termoplastů rozlišujeme oblast nad a pod T_g . U semikrystalických plastů je pak nutno při výpočtech rozlišovat



oblast pod T_g , pak oblast nad T_g až do teploty asi 40°C pod T_m , další oblastí je rozmezí teplot 40°C pod T_m až k hranici T_m a poslední, čtvrtou oblastí, kterou považujeme za stabilní, je teplotní pásmo nad T_m .

Van der Waalsova Rovnice ukazuje, že tlak, teplota a měrný objem jsou na sobě závislé veličiny a každému tlaku a teplotě přísluší jedna hodnota měrného objemu. Vztah mezi tlakem, teplotou a měrným objemem se dá určit experimentálně. Logickým důsledkem této závislosti je tedy užívání p-v-T diagramu při procesu vstřikování. Diagram p-v-T je běžně zobrazován ve dvojrozměrném formátu, kde měrný objem je funkcí teploty při různých konstantních hodnotách tlaků.

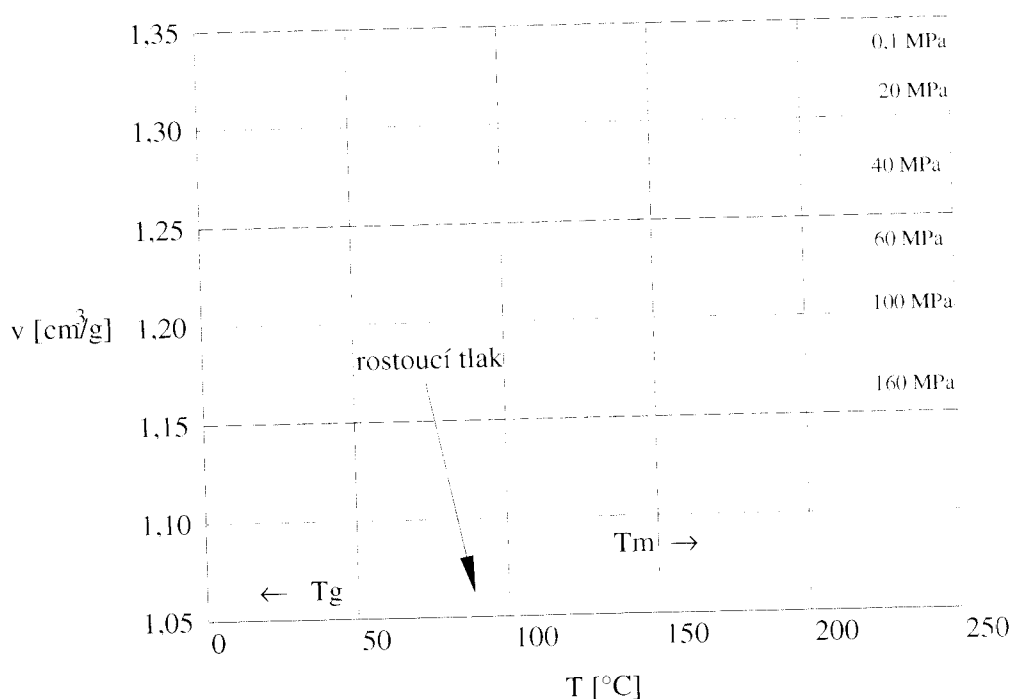
Křivky v p-v-T diagramu ukazují, že plasty jsou vysoce stlačitelné při teplotách a tlacích vyskytujících se během vstřikovacího procesu. Procesní proměnné, jako vstřikovací tlak (přesněji řečeno tlak v dutině formy) nebo dotlak, by potom měly mít významný vliv na rozměry součástí a smrštění. Průběh p-v-T diagramu pro amorfní plasty, jako je např. polystyren (viz obr. 7), je velmi odlišný od průběhu diagramu pro semikrystalické plasty, jako je například polypropylen (viz obr. 8).



Obr. 7: Diagram p-v-T pro polystyren



Stejně jako amorfni, tak i semikrystalické polymery vykazují růst měrného objemu s rostoucí teplotou v důsledku teplotní roztažnosti a pokles měrného objemu s rostoucím tlakem (při konstantní teplotě) v důsledku stlačení. Oproti amorfním plastům, vykazují však semikrystalické plasty skokový průběh měrného objemu při jejich teplotě tání (T_m).



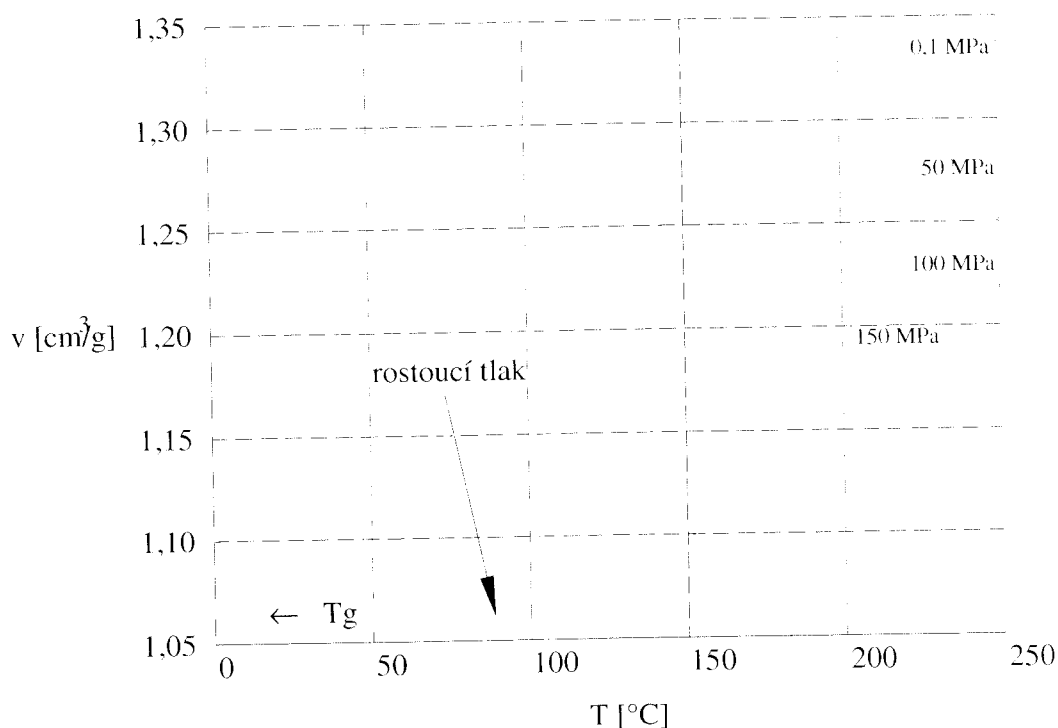
Obr. 8: Diagram p-v-T pro polypropylen

Během chladnutí semikrystalických plastů v dutině formy, amorfni tavenina chladne a tuhne jakmile se dostane na krystalizační teplotu. Výrazný pokles měrného objemu je spojen s fázovou přeměnou projevující se přiblížením molekul blíže k sobě a zaujmutím daných poloh v krystalové struktuře.

Během této přeměny se amorfni tavenina přemění na částečně uspořádanou semikrystalickou strukturu, což objasňuje větší smrštění semikrystalických plastů v porovnání s amorfními. Smrštění semikrystalických plastů může být několikrát větší než smrštění amorfniých plastů. Objemová smrštitivost plastů může být určena teoreticky, jestliže známe p-v-T diagram polymeru a podmínky vstřikovacího procesu.



Van der Wallsova stavová rovnice zcela přesně nezachycuje chování plastů. Izobary v souřadnicích měrný objem - teplota mají tvar přímek, které se ostře lámou v oblastech přechodových teplot. Pro lepší přiblížení se realitě je dnes používanější tzv. **dvouoborová modifikovaná Taitova rovnice** (z angl. Double-domain Modified Tait equation). Při použití Taitovy rovnice jsou přímky izobar mírně zaobleny tak, aby se co nejvíce blížily skutečnosti. U semikrystalických plastů jsou navíc ostré zlomy izobar na spodní hranici oblasti krystalizace nahrazeny exponenciálními křivkami, jak je to vyobrazeno na obr. 9.



Obr. 9: Diagram p-v-T pro polypropylen vycházející z Taitovy rovnice

Taitova rovnice obsahuje spoustu konstant, specifických pro konkrétní materiál, které by měly být zjistitelné z materiálových listů. Výhody Taitovy rovnice jsou zřejmé z její aplikace v různých simulačních programech. Taitovu rovnici simulační programy využívají pro výpočet objemu jako funkce tlaku a teploty při smršťování hmoty v dutině formy během fáze dotlaku. Taitova rovnice má dosti komplikovaný tvar:

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_1(T, p) \quad (17)$$



přičemž platí následující vztahy:

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{pro } T > T_{pr} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= b_7 \cdot e^{(b_8 \bar{T} - b_9 \cdot p)} \end{aligned} \right\} \text{pro } T < T_{pr} \quad (19)$$

kde p [Pa] značí tlak, v [m^3/kg] měrný objem polymeru, T [K] je termodynamická teplota, $T_{pr} = b_5 + b_6 \cdot p$ je přechodová teplota, $\bar{T} = T - b_5$, $C = 0,0894$ je univerzální konstanta a b_i jsou materiálové konstanty pro daný polymer.

Přechodovou teplotou je u amorfních termoplastů myšlena teplota zesklenní T_g a u semikrystalických termoplastů teplota tání T_m při konkrétním tlaku p . Tím je přesně určena teplota, kde se jednotlivé izobary „lámou“.

2.3.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS V DIAGRAMU p - v - T [1]

Vstřikovací cyklus zakreslený do p - v - T diagramu vytváří uzavřený obrazec, jak je patrné z obr. 10. Jde o p - v - T diagram pro amorfní plast s izotropními vlastnostmi. Průběh diagramu je výrazně jednodušší než v případě semikrystalického polypropylénu, se kterým byly prováděny experimenty, nicméně pro ilustraci a vysvětlení dostatečně vyhovuje. Průběh lze rozdělit do čtyř fází, které jsou v následujícím textu popsány.

- **Ohřev a plastikace**

Začátek vstřikovacího procesu je v bodě **0**, kterému odpovídá teplota okolí (20°C) a barometrický tlak označený jako p_1 . Následuje ohřev, probíhající pro zjednodušení při barometrickém tlaku až do bodu **1**. Plastikace je ukončena v bodě **2**, kde již tlak narostl na hodnotu p_2 v důsledku hnětací práce a účinku zpětného tlaku.

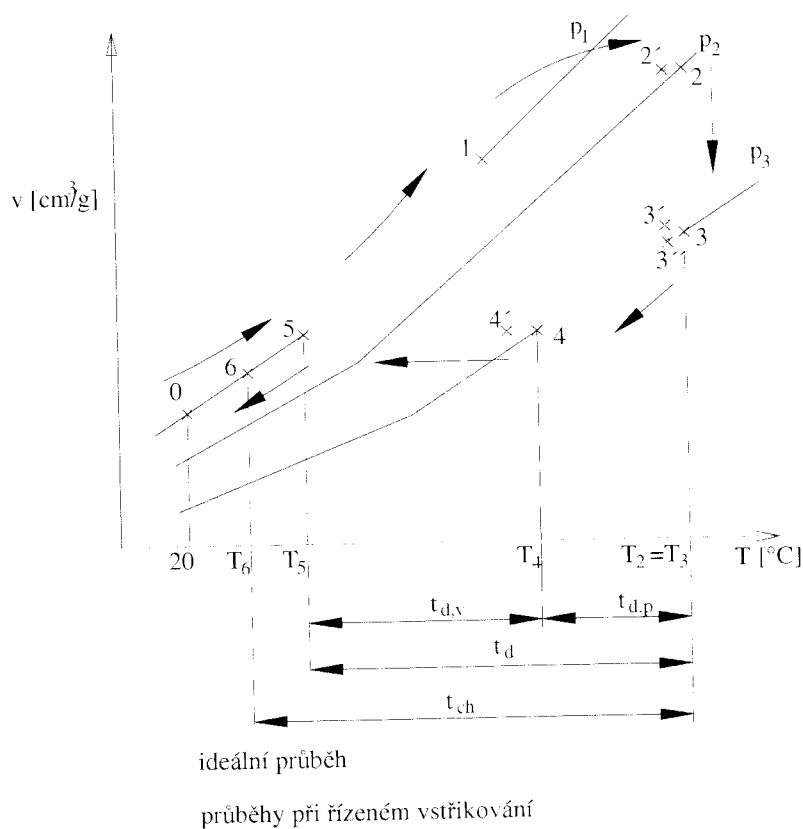
- **Plnění dutiny formy a komprese hmoty**

Tento úsek začíná v bodě **2** prudkým nárůstem tlaku vyvolaným axiálním pohybem šneku, přičemž pro zjednodušení uvažujeme děj izotermický. Tlak stoupá až na hodnotu p_3 v bodě **3**.



• Dotlak

Dotlak probíhá ve dvou částech. Mezi body 3 a 4 se jedná o dotlak izobarický. Přísluší mu hodnota tlaku p_3 a čas $t_{d,p}$. V bodě 4 se dotlak změní na izochorický, tj. dotlak při konstantním měrném objemu. Tato fáze, časově vymezená dobou $t_{d,v}$, končí v bodě 5, kde tlak dosáhne počáteční hodnoty p_1 . Poloha tohoto bodu, potažmo hodnoty stavových veličin v tomto bodě, zásadně ovlivňují kvalitu výstřiku a jeho vlastnosti (mechanické vlastnosti, přesnost, hmotnost).



Obr. 10: Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T

Na obr. 10 jsou modře a zeleně zakresleny křivky, po kterých se hodnoty veličin pohybují v případě, že je průběh vlastního vstřiku a dotlaku řízený. Vycházíme z předpokladu, že při opakování vstřikovacího cyklu se termodynamické veličiny polymeru mění. Když je např. před vlastním vstřikem teplota taveniny o něco nižší, plastikace skončí v bodě 2'. Kdybychom nemohli proces řídit pomocí p-v-T diagramu, ale choval by se podle předem nastavených parametrů stroje, došlo by



k tomu, že by se křivka nekontrolovaně posunula. Z bodu 2' by křivka pokračovala vlivem nárůstu tlaku při plnění dutiny formy svisle dolů až na izobaru p_3 , do bodu 3'. Pokud by byla nastavena pevná doba dotlaku, byly by body 4, 5 posunuty doleva dolů. Abychom zachovali vlastnosti výstřiku dané především polohou bodu 5, musíme se pomocí regulace mikroprocesorem do tohoto bodu opět dostat. To můžeme uskutečnit dvěma způsoby. První způsob, na obrázku zobrazen modře, spočívá v tom, že se v závislosti na výchozí poloze bodu 2' mění velikost izobarického dotlaku na hodnotu v bodě 3'. Doba izobarického dotlaku $t_{d,p}$ je v tomto případě shodná s ideálním průběhem. Druhý způsob je jednodušší, protože se nemusí měnit výše dotlaku. Na obrázku je znázorněn zeleně. V bodě 2' se začne zvyšovat tlak až na hodnotu p_3 . Následuje zkrácená doba izobarického dotlaku, takže se v bodě 4 opět napojíme na původní křivku. Zkrácení řídí počítač na základě teploty taveniny a hodnoty tlaku změřené před plněním formy v bodě 2'. Podobná situace může nastat nejen při kolísání teploty taveniny, ale i při změně výchozí hodnoty tlaku taveniny nebo při kombinaci obojího.

- **Chladnutí formy**

Mezi body 5 a 6 dochází k chladnutí výrobku ve formě bez působení dotlaku a ke zvyšování jeho tuhosti. V bodě 6 se forma otevírá a výrobek je vyhozen. V oblasti mezi bodem 6 a bodem 0 chladne výrobek již mimo formu a postupně dosáhne teploty okolí, tedy výchozího bodu 0.

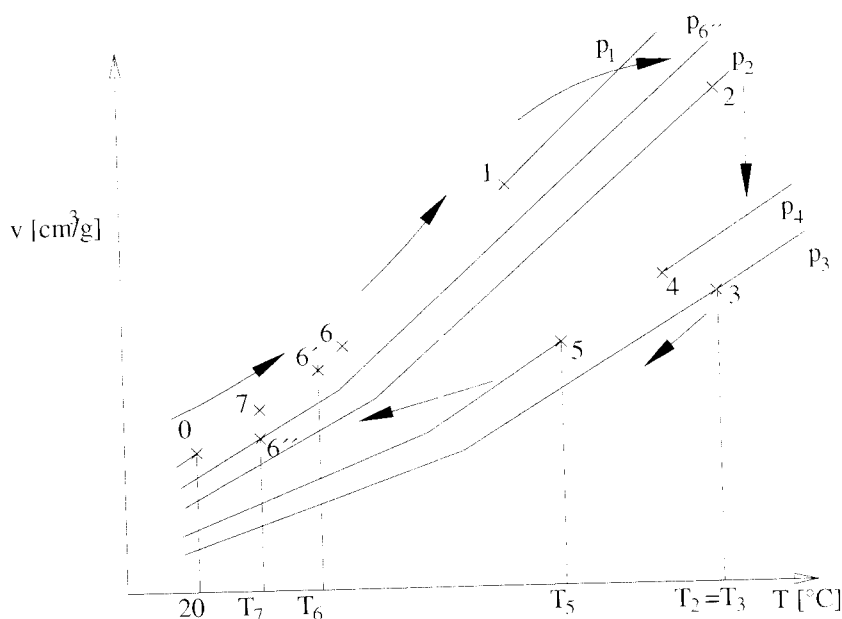
2.3.2 PRŮBĚH p-v-T DIAGRAMU PŘI SNÍŽENÉM DOTLAKU A VLIVU OMEZENÉ TUHOSTI FORMY [3]

V předchozí kapitole byl popsán průběh diagramu p-v-T, který odpovídá použití dotlaku o velikosti vstřikovacího tlaku. Pokud však na stroji nastavíme dotlak snížený, tvar diagramu se musí zákonitě změnit. Průběh diagramu je stejný jako v předchozím případě až do bodu 3, kde se dosáhne maximálního tlaku p_3 .

Další stádium tvoří přechod na dotlak. Na obr. 11 je určen úsekem mezi body 3 a 4, tedy přechod na nižší úroveň tlaku taveniny. Dochází zde ke zvýšení měrného objemu, které je doprovázeno nejen snížením teploty taveniny, ale částečně i zpětným výtokem hmoty plastu z tavicí komory. Úsek mezi body 4 a 5 je izobarický a kopíruje izobaru označenou jako p_4 . V bodě 5 končí izobarický dotlak a dochází zde k zatuhnutí vtoku.

Pokud by byla forma ideálně tuhá, došlo by po zatuhnutí vtoku k tomu, že by ochlazování probíhalo za konstantního objemu, tudíž mezi body 5 a 6. Je to způsobeno tím, že se od tohoto okamžiku, při předpokladu stálého tvaru dutiny formy, velikost hmotnosti plastu a i objem plastu již nemění. Ve skutečnosti však, se snižováním vnitřního tlaku, dochází vlivem dřívějších elastických deformací formy ke zmenšení objemu její dutiny. Buď dojde ještě před otevřením formy k poklesu vnitřního tlaku až na úroveň tlaku atmosferického (úsek 5-6'), nebo tlak poklesne do bodu 6'' na izobaru $p_{6''}$, tedy na hodnotu rovnající se zbytkovému tlaku ve výrobku, což je vlastně velikost vnitřního pnutí.

Úsek 6''-7 představuje otevření formy, kdy tlak poklesne na tlak atmosferický a dochází k vyhození výrobku z dutiny formy. Další úsek, kdy výrobek chladne za atmosferického tlaku proběhne již mimo formu.



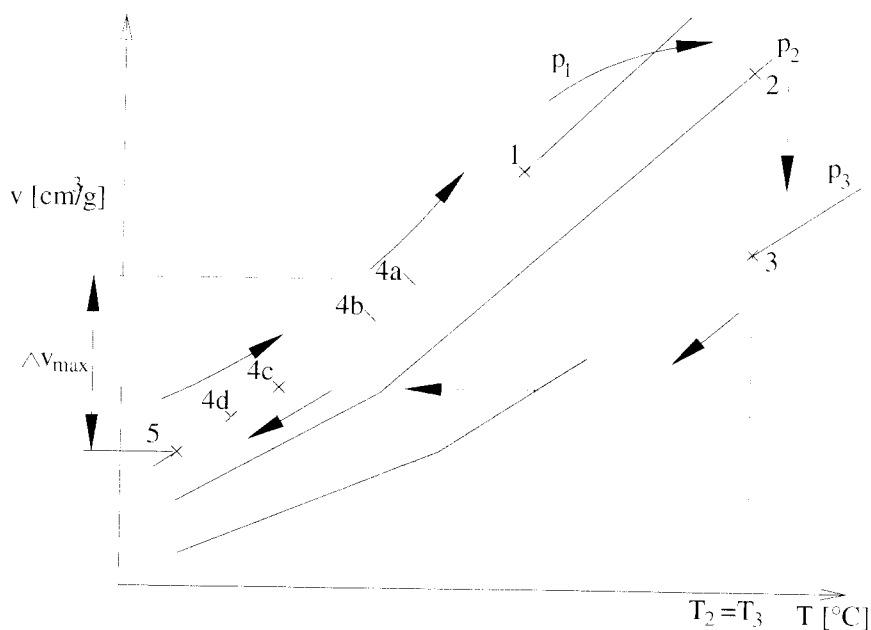
Obr. 11: Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T- vliv sníženého dotlaku a omezené tuhosti formy

2.3.3. ODLIŠNOST PRŮBĚHU KŘIVEK p-v-T PODLE MÍSTA MĚŘENÍ STAVOVÝCH VELIČIN [5]

Tvar p-v-T diagramu ovlivňuje také místo na výstřiku, ve kterém jsou stavové veličiny sledovány. V povrchových vrstvách výrobku dochází k rychlejšímu ochladnutí, zatímco ve vrstvách vnitřních se tavenina ochlazuje pomaleji. Na obr. 12 jsou přibližně znázorněny průběhy v p-v-T diagramu, které odpovídají jednotlivým



místům ve výrobku od povrchu stěny směrem ke středu. Vlastní vstřík reprezentovaný úsekem 2 – 3 je pro všechna místa přibližně stejný ovšem od fáze dotlaku, tedy v průběhu chlazení, se křivky oddělují. Na povrchu tělesa (křivka 3 – 4d) dojde k prudkému ochlazení hmoty při mírném poklesu tlaku, což je zapříčiněno stykem horké taveniny se studenou formou. Průběh veličin během chladnutí uvnitř dílu je reprezentován křivkou 3- 4a. Zde je rychlost poklesu teploty výrazně menší, ale tlak klesá rychleji než v předchozím případě. Body 4a až 4d odpovídají okamžikům, kdy tlak hmoty dosáhne hodnoty tlaku atmosferického a kde dochází k otevření formy. Na povrchu tělesa je při tom teplota nejnižší a uvnitř tělesa je teplota nejvyšší. Mimo formu pak díl chladne, jak na povrchu, tak uvnitř, na teplotu okolí až do bodu 5. Při ochlazování mimo formu dochází současně se změnou teploty i ke změně měrného objemu, tj. ke změně smrštění. Jak je zřejmé z obr. 12, smrštění na povrchu výrobku je menší než smrštění uvnitř výrobku. To má za následek vnitřní pnutí po ochlazení výrobku. Pro doplnění je v obrázku zakótována maximální hodnota změny měrného objemu Δv_{\max} určující smrštění povrchové vrstvy výrobku po vyjmutí z formy. Z p-v-T diagramu tedy mimo jiné vyplývá, že vnitřní pnutí je menší u výrobků s tenkými a rovnoměrnými stěnami, u nichž se efekt nerovnoměrného ochlazování a tudíž i nerovnoměrného smršťování na povrchu a uvnitř stěn tolik neprojevuje.



Obr. 12: Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T, průběh v různých místech výstřiku

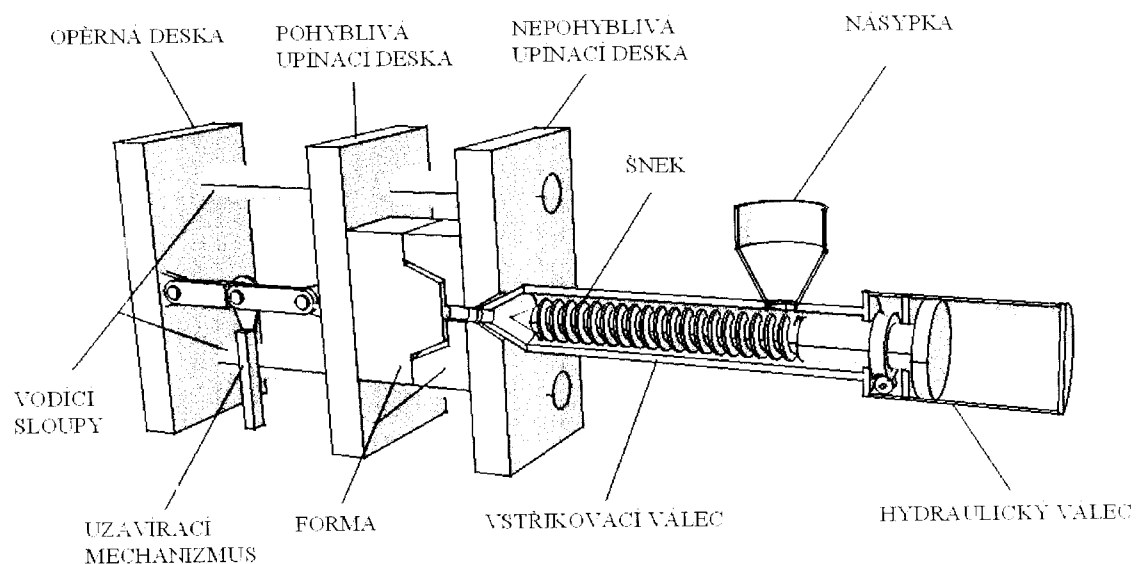


2.4. VSTŘIKOVACÍ STROJE [4]

Vstřikovací stroje se dělí na pístové a šnekové. Dnes se však pro vstřikování termoplastů používají hlavně šnekové vstřikovací stroje. Vstřikovací stroj je znám již od roku 1872. Princip funkce stroje spočívá v roztavení granulovaci směsi, která je přivedena přes násypku do plastikačního válce. Plast je taven jednak teplem vznikajícím třením mezi rotujícím šnekem a plastikačním válcem a jednak teplem vznikajícím v topných tělesech umístěných na stěně válce. Roztavená směs je po plastikaci axiálním pohybem šneku natlačena přes trysku do formy, kde tuhne v konečný výrobek..

2.4.1. SOUČÁSTI A PARAMETRY VSTŘIKOVACÍCH STROJŮ [4]

Stroj se skládá z těchto dvou základních částí: plastikační a vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a formy (nástroje). Vstřikovací stroj je popsán na obr. 13.



Obr. 13: Zjednodušený řez šnekovým vstřikovacím strojem

Vstřikovací a plastikační jednotka je tvořena šnekem, jehož konstrukce výrazně ovlivňuje kvalitu vstřikování. Vývojem v konstrukci strojů se dospělo k tzv.



diferenciálnímu šneku, který je charakterizován kompresním poměrem. Kompresní poměr je dán podílem objemu drážky šneku pod násypkou a objemu drážky šneku u trysky na jednu otáčku. Tento poměr je nejčastěji realizován postupným snižováním hloubky drážky podél šneku. Kompresní poměr u šneků vstřikovacích strojů nabývá hodnot v rozmezí od 1,5 do 4,5. Šneky jsou obvykle rozděleny do tří pásem. První pásmo šneku umístěné nejbližší násypce je nazýváno jako vstupní nebo dopravní. Má nejhlubší drážku s konstantní hloubkou. Střední pásmo je označováno jako kompresní či přechodové. V tomto pásmu se průměr jádra zvětšuje a tím se zmenšuje hloubka drážky. Díky tomu zde dochází k nejintenzivnějšímu tání granulátu vlivem jeho stlačování, hnětení a ohřevu. Posledním úsekem na šneku je pásmo homogenizační neboli výstupní. Hloubka drážky tohoto pásma je již opět konstantní. Zde dochází k procesu homogenizace taveniny a její dopravě před čelo šneku. Obvodová rychlost pro polymery s dobrou tekutostí jako je např. PP bývá okolo 1 m/s. Pohon šneku je realizován buď elektromotory nebo hydraulickými motory s plynule měnitelnými otáčkami. Šneky pro zpracování běžných plastů se vyrábějí z nitridačních ocelí. Při použití materiálu, který má například jako plnivo skleněná vlákna je dobré použít šneky vyložené pláštěm z oteruvzdorných slitin (Cr- Co- V). Šnek je umístěn v plastikačním válci, který je vyhříván topnými pásy, plnicí část bývá chlazená. Tavenina je do formy přiváděna vstřikovací tryskou, která bývá opatřena uzavíracím mechanismem, aby při odsunu plastikační jednotky nedocházelo k vytékání taveniny z válce.

Uzavírací jednotka slouží k uzavření a uzamknutí formy během cyklu. Skládá se z opěrné desky pevně spojené s ložem stroje, dále z pohyblivé upínací desky, na kterou je upnuta pohyblivá část formy a z upínací desky, na kterou je připojena nepohyblivá část formy. Další součástí jsou vodící sloupy. Uzavření a uzamčení formy vyvoluje uzavírací a přidržovací mechanismus a to buď hydraulický, nebo mechanický.

Každý stroj je charakterizován mnoha parametry, které hrají rozhodující úlohu při výběru stroje pro konkrétní aplikaci. Ty nejdůležitější jsou:

- **Vstřikovací kapacita Q_v [cm^3]**

Jedná se o maximální objem taveniny, který šnek vystříkne při jednom zdvihu. Velikost tohoto parametru je dána objemem, který odpovídá násobku plochy čela šneku a maximálního posuvu šneku. Někdy se můžeme setkat i s hodnotou udávající



maximální možnou hmotnost výrobku při jednom zdvihu. Ta je však platná pouze pro jeden konkrétní plast. Nejčastěji je údaj vztažen na standardní polystyren.

- **Uzavírací síla, přidržovací síla [kN, MN]**

Uzavírací síla (přisouvací) je mnohem menší než přidržovací (uzamykací). Uzavírací síla je síla, která pouze přisune pohyblivou část formy k její pevné části. Naproti tomu přidržovací síla musí udržet formu v uzavřeném stavu během vstřikování a dotlaku.

- **Plastikační kapacita Q_p [kg/hod]**

Důležitý údaj, ukazuje množství hmoty v kilogramech, které je stroj schopen zplastikovat za jednu hodinu.

- **Vstřikovací tlak p_{vs} [MPa]**

Tlak taveniny vyvolaný pohybem šneku. Pokud známe plochu čela šneku, lze z něj spočítat vstřikovací sílu, tj. sílu, kterou působí čelo šneku na taveninu.

2.4.2 ŘÍZENÍ A REGULACE STROJŮ [4, 7]

Abychom mohli plynule řídit vstřikovací cyklus, je třeba účinně regulovat hydraulický nebo elektrický systém. Hlavním požadavkem je rychlé, plynulé, přesné a reprodukovatelné nastavení tlaku či rychlosti. V oblasti regulace se uplatňují analogové a digitálně řízené hydraulické prvky. Výhodou digitálních prvků je snazší a přesnější reprodukovatelnost parametrů. Důležité je také to, aby byla zachována konstantní teplota oleje, protože jejím kolísáním by docházelo k ovlivnění viskozity oleje a tudíž i ke kolísání velikosti hydraulických ztrát.

Aby mohlo docházet k regulaci jednotlivých parametrů nejen v hydraulickém systému, ale v celém stroji, musí být stroj vybaven čidly, která snímají různé veličiny na různých místech. Teplotní čidla pracují na principu termoelektrických článků nebo odporových teploměrů a jsou regulována analogovými nebo číslicovými regulátory, popř. prostřednictvím mikroprocesoru. Regulační systém reguluje teplotu oleje, teplotu formy či teplotu stěny válce a to v jednotlivých segmentech umístěných podél osy válce. U některých strojů je také možnost snímat přímo teplotu taveniny. Ke snímání tlaku se dnes používají čidla odporová tenzometrická, odporová polovodičová nebo piezoelektrická s křemenným krystalem. Ke sledování dráhy šneku se používají snímače potenciometrické, indukční nebo digitální kódovaná pravítka.



Řízení vstřikovacího stroje zahrnuje nastavení, snímání a sledování strojních a technologických parametrů spolu s jejich následnou regulací tehdy, když odchylky překročí přípustnou toleranci [4].

Strojní parametry jsou určující pro technologické parametry a nastavujeme je na stroji. Jde o teplotu jednotlivých zón vstřikovacího válce, teplotu formy, tlak kapaliny, a to jednak při vstřikování, dále při dotlaku a zpětný tlak při plastikaci. Dalšími strojními parametry jsou otáčky šneku při plastikaci, rychlost posuvu šneku při vstřikování (vstřikovací rychlost), délka posuvu šneku, rychlost uzavírání a otevírání formy, délky časových úseků cyklu atd.

Technologické parametry určují stav plastu, popř. jeho časový průběh. Mezi technologické parametry patří např. teplota taveniny ve formě, doba vstřiku taveniny do formy, doba chlazení hmoty ve formě, rychlost proudění taveniny, doba dotlaku, teplota formy atd.

Rozdíl mezi řízením a regulací spočívá v tom, že při řízení jsou parametry ručně či automaticky nastavené a nedochází ke zpětnému hlášení o skutečném stavu strojních a technologických veličin. Při kolísání skutečných hodnot tedy nelze automaticky jejich odchylku upravit. Narozdíl od řízení pod pojmem regulace rozumíme ruční nebo strojní nastavení požadovaných hodnot parametrů s tím, že při určité odchylce skutečných hodnot se automaticky provádí korekce vedoucí ke stabilizaci procesu. Regulace procesu vstřikování vede k jeho automatizaci, to znamená, že celý proces probíhá rovnoměrně bez zásahu člověka.

Automatizace vstřikovacích strojů existuje v různých stupních. U strojů s nejnižším stupněm automatizace je nastaven časový sled operací nutný k automatickému provozu (plastikace, uzavření formy, vstřik, dotlak, chlazení výstřiku, otevření formy). Ručně se zde nastavuje požadovaná hodnota vstřikovacího tlaku, dotlaku, zpětného tlaku, velikosti vstřikovací dávky a uzavírací síly. Tyto stroje jsou samy schopny regulovat pouze teplotu válce. Stroje tohoto typu umožňují přepnutí na dotlak podle dráhy šneku či času vstřiku, nebo je možné přepínat podle hodnoty tlaku v hydraulice nebo přímo ve formě (srovnáním těchto dvou metod se budu podrobně zabývat v experimentální části mé diplomové práce).

Střední stupeň automatizace již umožňuje automatické řízení cyklu a také jeho programování. Jedná se například o řízení průběhu vstřikovací rychlosti, dotlaku, brzdného tlaku, atd. Předpokladem tohoto stupně řízení je vyspělejší hydraulika a přidání tlakových a teplotních čidel. Součástí těchto typů strojů je také komplex

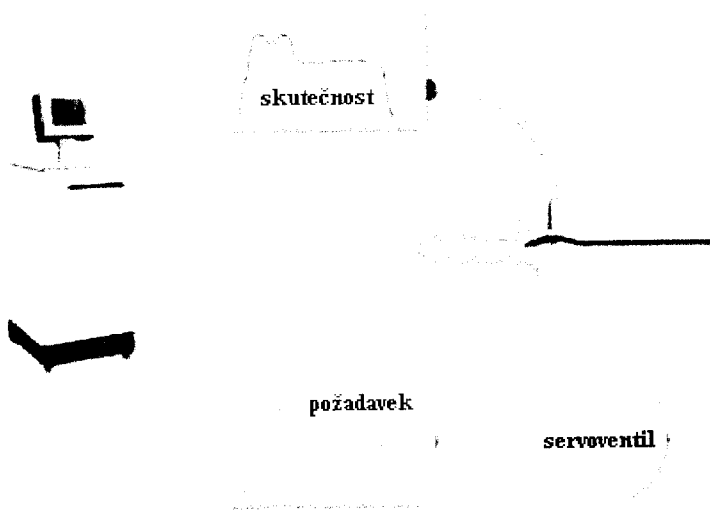


ovládacích prvků nutných k nastavení parametrů obsluhou a signalizačních prvků, upozorňujících například na poruchy některých důležitých částí stroje. Při použití strojů s možností automatického řízení je zaručena vyšší úroveň reprodukovatelnosti, to znamená, že výrobky mají menší rozptyl vlastností (např. hmotnosti). Je tudíž zaručena vyšší celková kvalita produkce. Ovládání moderních vstřikovacích strojů je elektronické s použitím mikroprocesorových systémů, které řídí činnost všech součástí vstřikovacího stroje na základě programu. Mikroprocesorový systém umožňuje jednak snadné a rychlé ovládání včetně displeje, hlášení poruch stroje, řízení vstřikovacího cyklu, uložení programů pro používané typy forem a připojení k centrálnímu počítači, který řídí a kontroluje celou skupinu strojů.

Vstřikovací stroje tohoto typu umožňují adaptivní regulaci podle diagramu p-v-T. Tento způsob regulace je označován jako vyšší. Proces je řízen podle stavu hmoty. Systém koriguje vstřikovací cyklus na základě p-v-T diagramu, optimalizuje jeho průběh a udržuje nastavené parametry.

Regulace tlaku a vstřikovací rychlosti umožňuje přesné udržení tlaku v dutině formy. Obvykle je ke snímání tlaku použit snímač v hydraulickém, nebo vstřikovacím válci, přičemž se využívá „podobnosti“ průběhu tlaku ve válci a v dutině formy. Kdybychom chtěli řídit průběh tlaku v dutině formy ještě přesněji, museli bychom umístit tlaková čidla přímo do formy a připojit je na regulační systém, který by v krátkých časových okamžicích reagoval příslušnou odezvou v hydraulice tak, aby bylo dosaženo optimálních okamžitých hodnot stavových veličin a tím byla zaručena kvalita výstřiku.

Příkladem řízení stroje pomocí tlakových čidel je použití systému Dynamic Feed (viz obr. 14), firmy Synventive, o jehož zavedení do výroby uvažuje firma Peguform Bohemia. Jedná se o technologii, která podle výrobce výrazně zdokonaluje vstřikovací proces. Je užívána zejména u vstřikování do nástrojů s velkým množstvím dutin (kavit), popř. u vstřikování velkých dílů, kde je používáno metody kaskádového vstřikování. Dynamic Feed umožňuje řízené otvírání vtoků podle úrovně tlaku na jednotlivých tryskách tak, aby docházelo k optimalizaci procesu a zmenšila se zmetkovitost. Je také možné řídit průběh tlakového profilu a to až u šestnácti trysek najednou. Jednotlivé programy lze uložit pro další použití a pro rychlou změnu při obměně vyráběného dílu. Důsledkem použití této technologie je i snížení ceny nástrojů.



Obr. 14: Schéma řízení vstřikování pomocí technologie Dynamic Feed

Regulace strojů je dnes už samozřejmostí. Díky prudkému rozvoji elektroniky lze stále rychleji a přesněji ovlivňovat průběh vstřikovacího cyklu. V některých případech je však nutné uvážit, zda se investice do drahých snímačů a elektronického zařízení vyplatí.



3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 OBSAH A CÍL EXPERIMENTU

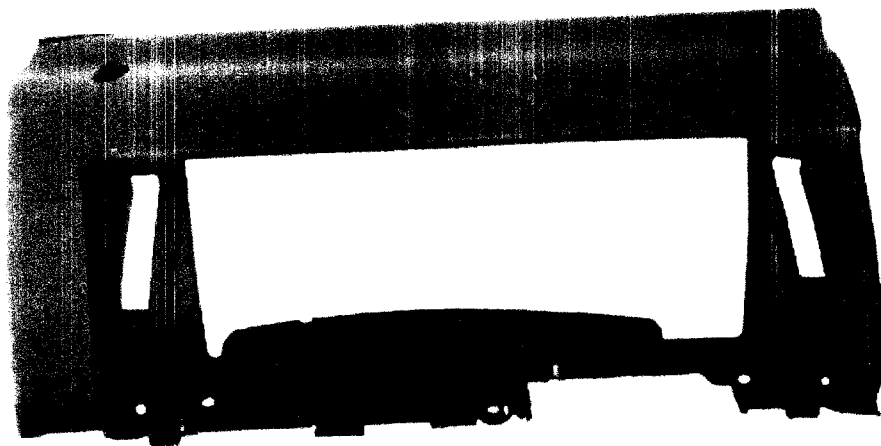
Náplň experimentu mé diplomové práce vyplývala ze zadání od firmy Peguform Bohemia, jehož základním úkolem bylo porovnání dvou metod řízení vstřikovacího procesu. Jednalo se o srovnání dvou technologických způsobů přepnutí na dotlak. První způsob řízení spočívá v tom, že vstřikovací stroj přepne na fázi dotlaku v časovém okamžiku, kdy šnek dosáhne předem nastavené dráhy (dále přepnutí od dráhy), ve druhém případě dochází k přepnutí na dotlak při dosažení předem nastaveného tlaku uvnitř nástroje (přepnutí od tlaku). Firma Peguform Bohemia při výrobě standardně používá přepnutí od dráhy šneku a výsledek a závěry této diplomové práce by měly pomoci rozhodnout, zda je výhodnější používat tento konvenční způsob i nadále, nebo je lépe přejít na způsob přepínání od tlaku. Přejít k tomuto modernějšímu řízení by představoval velké finanční investice, protože je třeba snímat tlak čidly, jejichž cena se pohybuje v řádu statisíců korun za kus. Zároveň by tato varianta obnášela náklady spojené s montáží čidel do forem a zajištěním optimální komunikace čidel se strojem. Z těchto důvodů je nutné posoudit, zda je přepínání od tlaku lepší a výhodnější z hlediska kvality výrobku, opotřebení stroje a nástroje, nebo se dá využít k levnější či rychlejší výrobě. Součástí experimentu je navíc i posouzení vlivu viskozity taveniny na průběh a výsledek vstřikovacího procesu a transformace získaných dat z měření do p-v-T diagramu spojená s rozбором průběhu stavových veličin během cyklu. Konkrétní postup experimentu je popsán v následujících kapitolách.

3.2 VÝROBEK

Pro účely experimentu byl zvolen výrobek, který Peguform Bohemia Libáň dodává mladoboleslavské automobilce Škoda Auto a. s. Byla to **kapsa přístrojové desky vnější pro levé řízení** do automobilu Škoda Octavia A5 (viz obr. 15). Kapsa má vnější rozměry 260 x 540 x 250 mm s tloušťkou stěny 2,5 mm a její předepsaná hmotnost je 594,8 g s tolerancí ± 6 g. Z hlediska technologičnosti konstrukce je kapsa navržena tak, aby nedocházelo k tvorbě tepelných uzlů při chladnutí výrobku. Tloušťka stěny je téměř na celém výrobku stejná. Pro větší pevnost je kapsa na nevhledové straně opatřena vyztužujícími žebry. Ta jsou umístěna zejména

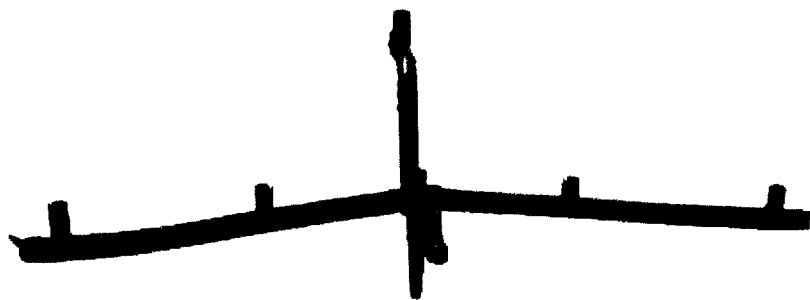


v místech, která jsou určena pro montážní účely a jsou vystavena většímu mechanickému namáhání (díry pro šrouby, výstupky, apod.). Vzhledová strana kapsy je pro lepší estetický dojem opatřena jemným dezénem, který rozptyluje odražené světlo a dodává povrchu matnější a příjemnější vzhled.



Obr. 15: Kapsa přístrojové desky vnější pro levé řízení

Plast je do výstřiku přiváděn studeným vtokovým systémem, který ústí do dutiny formy na čtyřech místech. Vtokový zbytek je ukázán na obrázku 16. Ztuhlá část plastu z vtokového kůlu je v dolní části obrázku, čtyři ramena vedou ke čtyřem ústím a sedm válcových výběžků slouží k přidržení vtoku při otvírání formy.



Obr. 16. Vtokový zbytek kapsy přístrojové desky

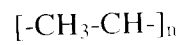
3.3 MATERIÁL [1, 11, 12]

Kapsa přístrojové desky je v interiéru automobilu velmi exponovaným objektem, proto jsou na použitý materiál kladeny vysoké estetické nároky. Zároveň je za čelním sklem automobilu přístrojová deska vystavena velkým výkyvům teplot.



Z tohoto důvodu musí být teplota použitelnosti plastu v intervalu teplot, které odpovídají tomuto druhu aplikace.

Pro interiérové prvky v automobilovém průmyslu je ideálním plastem polypropylen. Je to z důvodu ideální kombinace ceny plastu a jeho materiálových vlastností. Polypropylen je semikrystalický termoplast, který řadíme mezi polyolefiny. Strukturální vzorec má následující tvar:



Polypropylen výrazně křehne pod teplotou zesklenní T_g , kterou překročí asi při $-10\text{ }^\circ\text{C}$. Má poměrně vysokou teplotu tání ($170\text{ }^\circ\text{C}$) a dobře odolává korozi chemickými činidly a také organickým rozpouštědly. Rozpouští se v chlorovaných aromatických uhlovodících při teplotách nad $90\text{ }^\circ\text{C}$. Má nízkou odolnost proti UV záření a proto je nutné plnit jej světelnými stabilizátory (nejčastěji grafitem). Polypropylen je nepolární a z toho vyplývají nejen jeho dobré elektroizolační vlastnosti, ale i malá navlhavost. Vlastnosti čistého polypropyleny se dají výrazně ovlivnit podle aplikačních požadavků, a to různými druhy vystužujících a nevystužujících plniv nebo modifikací kaučuky, čímž se dosahuje snížení teploty zesklenní a zvýšení houževnatosti.

Polypropylen se zpracovává prakticky všemi technologiemi vyvinutými pro zpracování termoplastů [1]. Nejčastěji vstřikováním, vyfukováním a vytlačováním. Vyrábí se z něj fólie, nádoby, kelímky, obaly, různé kufry a zavazadla a velké uplatnění má také v automobilovém průmyslu, kde se používá na výrobu krytů světlometů, nádržek, prvků topení, nárazníků a již zmiňovaných interiérových prvků.

Pro výrobu kapsy PD v Peguformu Libáň se používá materiál **PP compound 7705**, který dodává holandská pobočka firmy Saudi Basic Industries Corporation (SABIC). V některých materiálových databázích se PP compound 7705 skrývá pod jeho starším názvem Keltan TP 7705. Důležité materiálové hodnoty jsou uvedeny v tab. 1. Tento materiál kombinuje poměrně vysokou odolnost proti poškrábání, tuhost, houževnatost a tekutost v roztaveném stavu. Jedná se o kopolymer polypropyleny modifikovaný elastomerem EPDM (etylen-propylen-dienový terpolymer) s přísadkou minerálního plniva (20% talku). Modifikace elastomerem EPDM účinně zvyšuje nízkoteplotní houževnatost, protože se teplota skelného přechodu T_g posouvá směrem dolů, hluboko pod bod mrazu. Na druhou stranu snižuje hodnotu modulu pružnosti, meze kluzu a pevnost v tahu.



Tab. 1: Materiálová data pro PP compound 7705 [11]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Testovací metoda
Hmotnostní index toku taveniny- MFR	25	g / 10 min	ISO 1133
Hustota	1040	kg / m ³	ISO 1183
Součinitel délkové teplotní roztažnosti	8·10 ⁻⁵	K ⁻¹	metody firmy SABIC
Smrštění (24 hodin po vstřikování)	0,8	%	
Zkouška tahem			
Mez kluzu	23	MPa	ISO 527
Napětí při přetržení	17	MPa	
Deformace při přetržení	50	%	
Vrubová houževnatost- metoda Izod			
při 23 °C	20	kJ / m ²	ISO 180/4A
při 0 °C	6	kJ / m ²	
Vrubová houževnatost- metoda Charpy			
při 23 °C	N.B.	kJ / m ²	ISO 179/1eA
při -40 °C	N.B.	kJ / m ²	
Teplotní vlastnosti			
Odolnost za tepla dle Vicata 10N (VST/A)	130	°C	ISO 306/A
Tepelná odolnost dle ISO/R 75	105	°C	ISO 75/B
Interval teploty tání	145-170	°C	-
Teplota degradace	>300	°C	-
Samozápalná teplota	>365	°C	-

EPDM obsahuje kromě ethylenu a propylenu asi 5% dienového monomeru s nekonjugovanými dvojnými vazbami. Elastomer tvoří s polypropylenem disperzní globulární systém, v němž částice elastomeru jako minoritní fáze mají poměrně jednotnou velikost a jsou dobře rozptýleny [1]. Čím menší jsou částice dispergovaného elastomeru, tím je účinek snížení T_g větší.

Talek, nebo také mastek- $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$, je vedle vápence a slídy nejčastěji používaným minerálním plnivem u polypropylenu. Do matrice se přidává ve formě jemného prášku (částice do 10 μm). Měrná hmotnost talku se pohybuje v rozmezí 2700 až 2800 $kg \cdot m^{-3}$. Výrazně zvyšuje hodnotu modulu pružnosti polypropylenu (1,5 až 2 násobně), ale snižuje tažnost a houževnatost. Zároveň díky příznivé ceně plast celkově zlevňuje.



3.4 VSTŘIKOVACÍ STROJ [13, 15]

Při vstřikování kapsy do přístrojové desky byl použit stroj **KM-1000 6100 MC**, který vyrobila firma **Krauss Maffei** (viz příloha 12). Nejdůležitější parametry stroje uvádí tab 2.

Tab.2: Technické parametry vstřikovacího stroje KM-1000 6100 MC

UZAVÍRACÍ JEDNOTKA		
Uzavírací síla	10000	kN
Rozměr upínacích desek (v x š)	1960 x 1740	mm
Světlost mezi sloupy (v x š)	1400 x 1120	mm
Výška formy (min. – max.)	700 - 1400	mm
Maximální světlost mezi deskami	2400	mm
Zdvih hydraulického vyhazovacího systému	250	mm
VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA		
Průměr šneku	95	mm
Vstřikovací tlak	179,5	MPa
Maximální objem zdvihu	3369	cm ³
Otáčky šneku (jmenovité / maximální)	116 / 153	min ⁻¹
Rychlost posuvu šneku pro PE (jmenovitá / maximální)	83 / 109	g / s

Tento stroj umožňuje díky displeji a klávesnici ovládacího panelu velmi snadné a uživatelsky nenáročné nastavení všech důležitých vstřikovacích parametrů, které jsou během cyklu snímány a korigovány regulačním systémem, takže je docíleno plně automatického provozu při dobré reprodukovatelnosti cyklů.

- **Nastavení plastikace**

Plastikace je nastavitelná v 11 stupních profilu, kde každý stupeň je dán otáčkami a náporovým tlakem hmoty před čelem šneku. Zároveň se zadává délka dráhy plastikace. Po plastikaci je tavenina v plastikačním válci pod určitým tlakem. Aby se tavenina odlehčila, je šnek po konci plastikace hydraulicky o kousek vrácen do polohy, ve které je tlak ve válci roven předem nastavené hodnotě. Proto se při změně viskozity taveniny výchozí poloha šneku liší od zadané polohy.

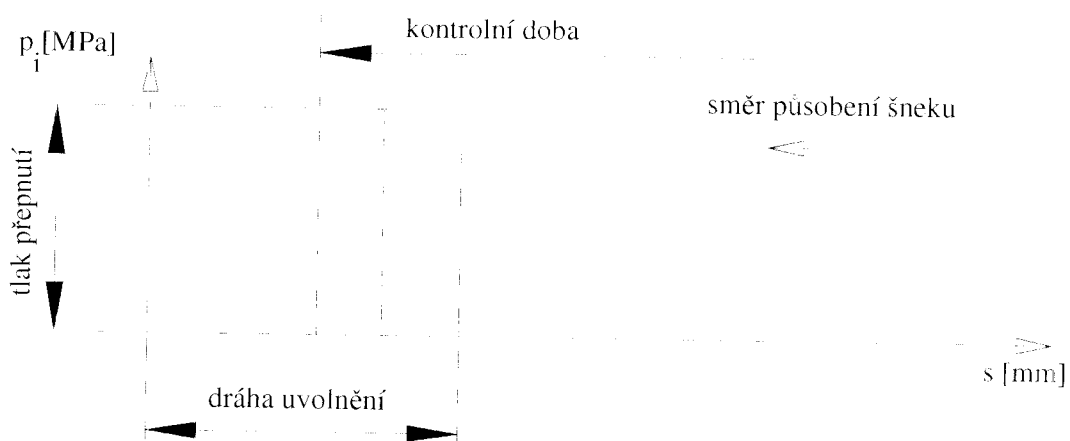
- **Nastavení průběhu vstřikovací fáze**



Průběh vstřikovací fáze lze v nastavení rozdělit až na 10 různě dlouhých úseků (stupňů profilu), kdy každému úseku odpovídá jiná hodnota vstřikovacího tlaku a vstřikovací rychlosti. Přepínání mezi jednotlivými stupni profilu je odvozeno od dráhy šneku a délky intervalů lze libovolně nastavit. Je nutné zdůraznit, že dráha šneku začíná na určité kladné hodnotě dané pozicí po plastikaci a během vstřiku a dotlaku klesá směrem k nule! Pro zabezpečení správné funkce se na stroji zadává ještě tzv. kontrolní doba, po jejímž uplynutí stroj přepne na dotlak bez ohledu na to, zda již byla čidly regulačního systému odečtena poloha šneku určená pro přepnutí.

- **Nastavení průběhu fáze dotlaku**

Průběh dotlaku může být zadán stejně jako vstřikování až deseti různými stupni profilu. Oproti nastavování průběhu vstřikování se pro dotlak volí pouze hodnoty tlaku, nikoliv rychlosti, a hodnoty tlaků uvnitř jednotlivých profilů se nemění skokem, nýbrž lineárně rostou či klesají v průběhu celého intervalu. Start dotlaku lze iniciovat buď dosažením nastavené hodnoty dráhy šneku, času, tlaku hmoty v plastikačním válci, nebo vnitřního tlaku v dutině nástroje (pokud jsou k dispozici speciální čidla). Při přepínání na dotlak od velikosti vnitřního tlaku je nutné citlivě nadefinovat tzv. dráhu uvolnění, která určuje místo, kde senzory začnou porovnávat vnitřní tlak s hodnotou přepnutí. Toto je nutné proto, aby se tlaková špička, která by mohla nastat na počátku vstřikování, nevyhodnotila jako přepínací signál a nedocházelo k přepnutí předčasně. I u přepínání tlakem je nutné nastavit kontrolní dobu pro případné ukončení vstřikovací fáze při poruše. Schéma principu tlakového přepínání je znázorněn na obr. 17.



Obr. 17: Schéma přepnutí na dotlak stroje KM-1000 6100 MC



- **Nastavení plastikace**

Pro tuto fázi lze naprogramovat opět v až deseti intervalech dráhy šneku jednak otáčky šneku a jednak náporový tlak, kterým při plastikaci působí čelo šneku na zplastikovanou taveninu.

- **Nastavení teploty**

Teplota je nastavitelná podél celého plastikačního válce opět v deseti délkových intervalech a pomocí zpětné vazby je po dobu výroby kontrolována a regulována.

Pro zajištění trvalé kvality výroby je stroj vybaven řadou bezpečnostních mechanismů, které při překročení dovolených odchylek od hodnot tlaků, rychlostí, teplot nebo polohy zastaví, nebo v nouzovém režimu dokončí vstřikovací cyklus a příslušným hlášením vyrozumí obsluhu o poruše. Tato opatření zároveň chrání stroj a formu před poškozením.

3.5 FORMA [16]

Použitá forma je vybavena horkým rozvodem s třemi topnými pásmy, který přechází do studeného rozvodu se čtyřmi vedlejšími kanály, které ústí z boku do stěn výrobku. Jedná se o dvoudeskový nástroj, kde pevná část váží kolem 2100 kg a odjížděcí část má hmotnost asi 3800 kg. Chlazení je zajištěno čtyřmi temperačními kanály na pevné straně a šesti kanály na straně pohyblivé. Teplota temperačního média je 40 °C. Forma je vybavena dvěma hydraulickými tahači pro ovládání vyhazovačů, šikmých tahačů jader a čelistí.

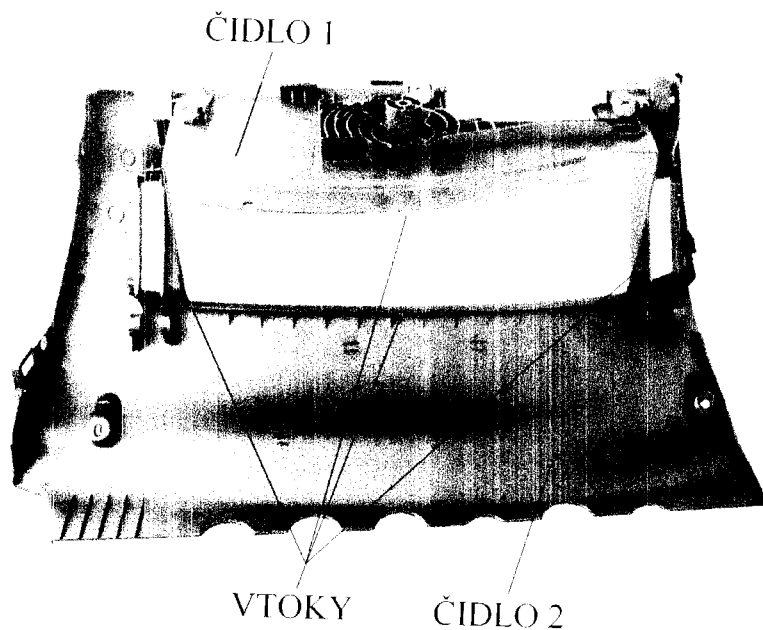
Pracoviště je pro zvýšení stupně automatizace vybaveno robotem REMAK, který je naprogramován na vyjmutí výrobku a vtokového zbytku z formy po jejím otevření. Dalším prvkem na pracovišti je dopravníkový pás, kam robot pokládá výstřiky a vtokové zbytky.

3.6 ČIDLA [6, 14]

K měření tlaku v nástroji byla použita dvě tlaková čidla umístěná v otvorech předvrtaných do stěny formy. Byla umístěna z nevhledové strany výrobku, protože zanechávají na povrchu výstřiku stopu podobnou stopě po vyhazovačích. Na obr. 18 je popsána poloha obou čidel. Čidlo 1 bylo umístěno blíže ústí vtoků a čidlo 2 dále od



vtoků. Díky těmto čidlům bylo možné řídit okamžik přepnutí na dotlak a později přímo na displeji stroje odečíst hodnoty maximálního tlaku v nástroji, tlaku při přepnutí na dotlak a zobrazit závislost vnitřního tlaku na čase.



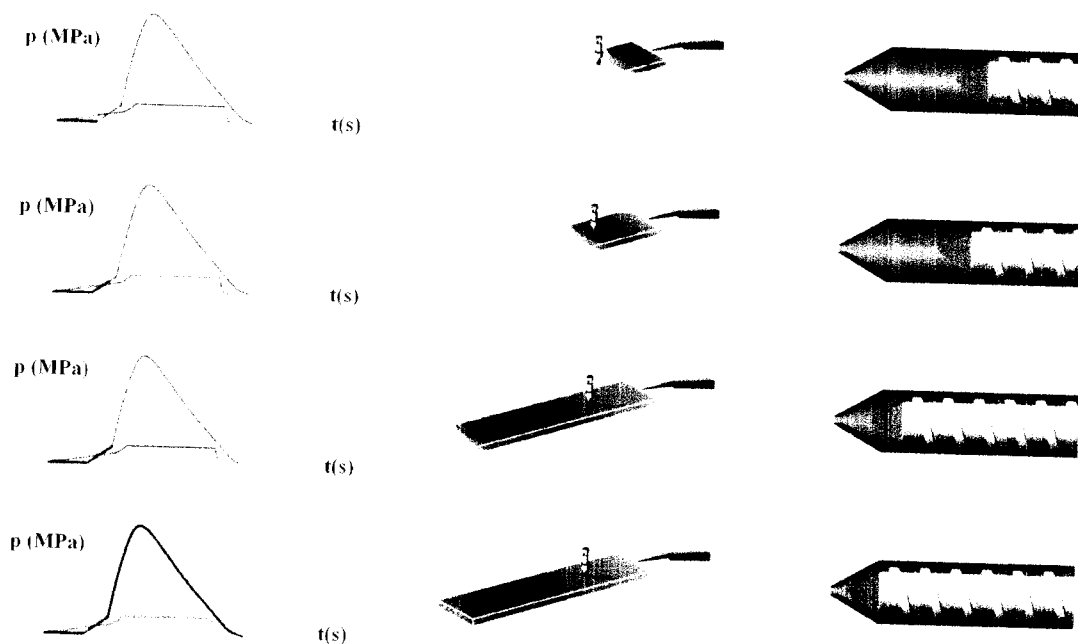
Obr. 18: Poloha čidel vůči vtokům v rámci výstřiku

Použitá čidla dodala firma **Kistler**. Pracují na piezoelektrickém principu, kde se využívá vlastností krystalu křemene. Křemen má příhodné fyzikální vlastnosti, které se hodí pro měření tlaků a sil při vstřikování. Jakmile se křemen v senzoru zatíží, vznikne náboj, který je přímo úměrný tlaku resp. síle. Dnes jsou čidla s krystaly velmi přesná, citlivá a stabilní i při vysokých teplotách.

Na obr. 19 je znázorněn průběh tlaku v hydraulice (červeně) a tlaku v dutině formy (modře) v různých okamžicích během vstřikovacího cyklu. Zároveň je zde zachycena aktuální poloha šneku a množství taveniny ve formě včetně polohy čela taveniny vůči měřicímu čidlu. První znázorněná pozice znázorňuje okamžik počátku plnění dutiny formy, kdy narůstá tlak v hydraulice, ale protože čelo taveniny ještě nedoteklo k čidlu, měřený tlak v dutině formy žádný růst nevykazuje. Druhá pozice zachycuje okamžik, kdy tavenina již dosáhla čidla a měřený tlak začíná růst. Dalším okamžikem je přepnutí na dotlak, kdy dochází ke zlomu tlakových křivek a během fáze dotlaku pak k prudkému nárůstu tlaku. To je způsobeno tím, že dutina formy je již zaplněna a tavenina je v ní dále stlačována. Pokles tlakové křivky po dosažení

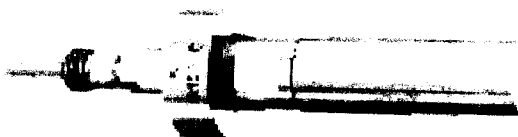


maxima je důsledkem chladnutí plastu, kdy dochází ke zvyšování tlakových ztrát důsledkem zvyšování viskozity taveniny.



Obr. 19: Průběh měření vnitřního tlaku p_i v čase t čidly Kistler [6]

Při měření byla tedy použita dvě čidla Kistler typu **6151 B C 1200** (viz obr. 20). S rozsahem 0 – 200 MPa (2000 bar) a citlivosti 95 pF / MPa. Při přetížení snesou tato čidla zatížení maximálně 250 MPa. Průměr spodní části čidla, přicházející do styku s taveninou, je 8 mm. Součástí příslušenství je ještě kabel, přípojka a montážní prvky.



Obr. 20: Čidlo Kistler, řady 6151

3.7 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY PŘI EXPERIMENTU

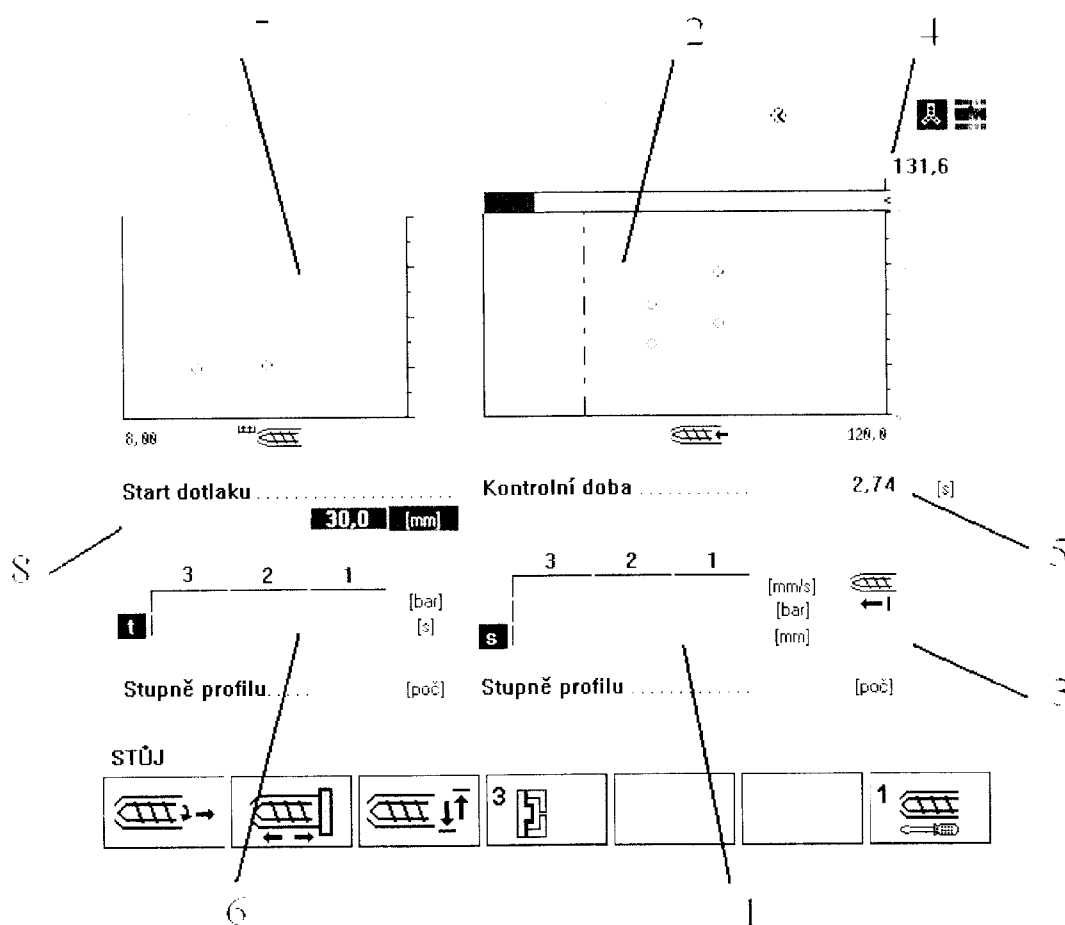
Při měření jsem vycházel z osvědčených technologických parametrů, podle kterých je vnější kapsa v Peguformu Libáň vyráběna. Základní technologické parametry jsou přehledně zobrazeny v příloze 13. Během jednotlivých měření byla



měněna pouze teplota taveniny a způsob přepnutí na dotlak. Všechny ostatní parametry zůstaly zachovány.

3.7.1 ZÁKLADNÍ TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY

Na výřezu z displeje stroje (viz obr. 21) je znázorněno nastavení stroje, kdy dochází k **přepnutí na dotlak od dráhy a teplota taveniny je 220°C**. Toto nastavení je shodné se základním nastavením.



Obr. 21: Základní nastavení technologických parametrů na displeji stroje

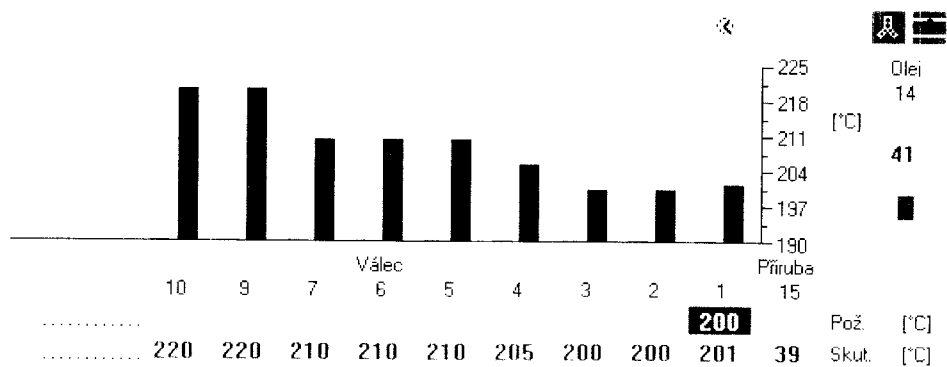
- **Velikosti vstřikovacího tlaku a vstřikovací rychlosti** jsou nastaveny ve třech stupních (pozice 1). Rychlost i tlak jsou po skocích postupně snižovány v místech určených nastavenou pozicí šneku. Grafická závislost nastaveného vstřikovacího tlaku a vstřikovací teploty na dráze šneku je označena pozicí 2. Dalším parametrem je dráha plastikace, což je i výchozí poloha šneku před vstřikováním (pozice 3). Na displeji je znázorněna kromě jmenovité výchozí polohy šneku i poloha



skutečná, která musí ležet v toleranci $\pm 10\%$ z jmenovité hodnoty (pozice 4). Dále je zde zobrazena i skutečná hodnota doby fáze vstřikování (pozice 5).

- **Fáze dotlaku** se také nastavuje ve třech stupních. Třem hodnotám tlaků odpovídají tři časové intervaly (pozice 6). Průběh velikosti nastaveného dotlaku v čase je pak zobrazen v grafu (pozice 7). Přepnutí na dotlak je nastaveno v okně označeném pozicí 8. V základním nastavení je voleno přepnutí dráhou, ve vzdálenosti 30 mm.

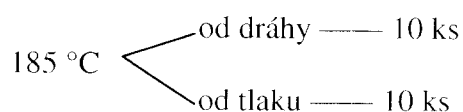
- **Teplota válce** se v podélné ose plastikačního válce nastavovala od nízké teploty pod násypkou až po určenou hodnotu v blízkosti vstřikovací trysky, jak je vyobrazeno na obr. 22.

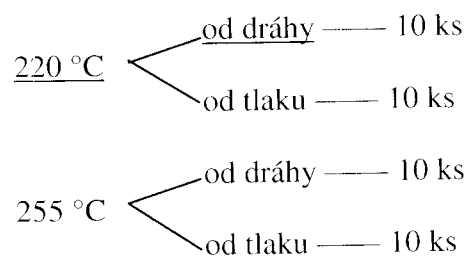


Obr. 22: Základní nastavení teploty válce na displeji stroje

3.7.2 ZMĚNY TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ

Při určitém nastavení stroje bylo vyrobeno vždy 10 kusů, a to pro 3 různé vstřikovací teploty (185 °C , 220 °C , 255 °C) při přepínání na dotlak jednak od dráhy a jednak od vnitřního tlaku. Celkem tedy 60 kusů výrobků podle následujícího rozdělení, kde podtržené hodnoty reprezentují teplotu a způsob řízení přepnutí při základním nastavení:





Přepínání na dotlak bylo v případě řízení podle dráhy, jak už bylo uvedeno dříve, vždy nastaveno na polohu šneku 30 mm a u řízení pomocí čidla na vnitřní tlak $140 \cdot 10^5$ Pa (140 bar). K přepínání na dotlak sloužilo vzdálenější z dvou použitých čidel (čidlo 2). Dráha povolení činila 35 mm.



4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

4.1 ZÍSKANÁ DATA

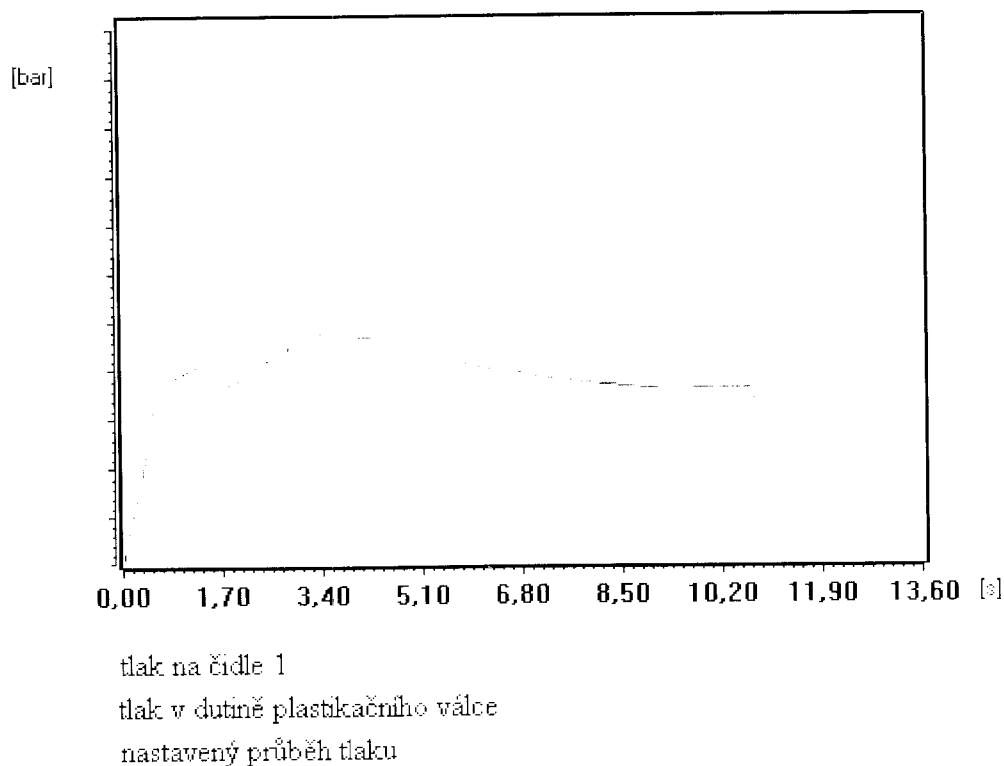
Pro další zpracování byly během měření zaznamenány tyto funkční závislosti a hodnoty:

- tlakový profil uvnitř plastikačního válce: $p_v = p_v(t)$
- tlakový profil uvnitř nástroje snímáný čidlem umístěným
 - blíže k vtoku: $p_{i1} = p_{i1}(t)$
 - dále od vtoku: $p_{i2} = p_{i2}(t)$
- dráha šneku: $s = s(t)$
- rychlost posuvu šneku při vstřiku: $v_{vs} = v_{vs}(t)$
- doba cyklu: t_c [s]
- doba vstřiku: t_v [s]
- doba chlazení: t_{ch} [s]
- velikost polštáře: P [mm]
- velikost zdvihu šneku: Z [mm]
- velikost vnitřního tlaku při přepnutí na dotlak na čidlech 1 a 2: $p_{př1}$ [MPa], $p_{př2}$ [MPa]
- velikost maximálního vnitřního tlaku na čidlech 1 a 2: p_{m1} [MPa], p_{m2} [MPa]
- velikost maximálního tlaku uvnitř plastikačního válce: p_{mv} [MPa]
- hmotnost vyrobeného dílu a hmotnost vtokového zbytku: m_d [g], m_v [g]

Hmotnost dílu a vtokového zbytku byla zjištěna vážením na digitální váze. Ostatní hodnoty byly získány v digitální podobě přímo ze stroje. Bohužel nešlo tato data získat ve formátu, se kterým by se dalo dále pracovat ve standardních textových nebo tabulkových počítačových aplikacích. Ze stroje šlo na disketu uložit pouze to, co bylo aktuálně zobrazeno na displeji ve formátu obrázku (bmp). Z tohoto důvodu je také tlak v grafech v jednotkách barů a nikoliv pascalů či megapascalů. Dále je nutné zdůraznit, že grafické závislosti tlaků ve válci a v nástroji na čase a grafy závislosti polohy a rychlosti šneku na čase reprezentují vždy jen jeden díl vyrobený při určité kombinaci nastavení parametrů a nikoliv průměrný průběh vypočítaný z deseti vzorků statistického souboru.

4.2 SROVNÁNÍ TLAKOVÝCH PROFILŮ PŘI RŮZNÝCH NASTAVENÍCH STROJE

Tlakové diagramy představují závislost vnitřního tlaku v dutině formy na čase. Průběh vnitřního tlaku je odrazem tlaku hmoty v plastikačním válci, který je zase odvozen od tlaku oleje v hydraulice. Na obr. 23 jsou pro názornost tyto tři různé tlakové profily společně vyobrazeny. Hodnoty tlaků nastavených na stroji jsou charakteristické přímkovým průběhem, a to buď konstantním, nebo postupně se snižujícím. Průběh tlaků v dutině formy je naproti tomu charakterizován zaoblenými křivkami s mírným zakolísáním v oblasti přepnutí na dotlak. Hodnota tlaku v plastikačním válci se pohybuje mezi oběma výše popsány. Z počátku se pohybuje velmi hluboko pod nastavenou hodnotou a v závěrečné fázi dotlaku se téměř úplně přibližuje hodnotě tlaku nastavenému na stroji. To je způsobeno zpožděním při přenosu tlaku z hydrauliky do taveniny plastu.



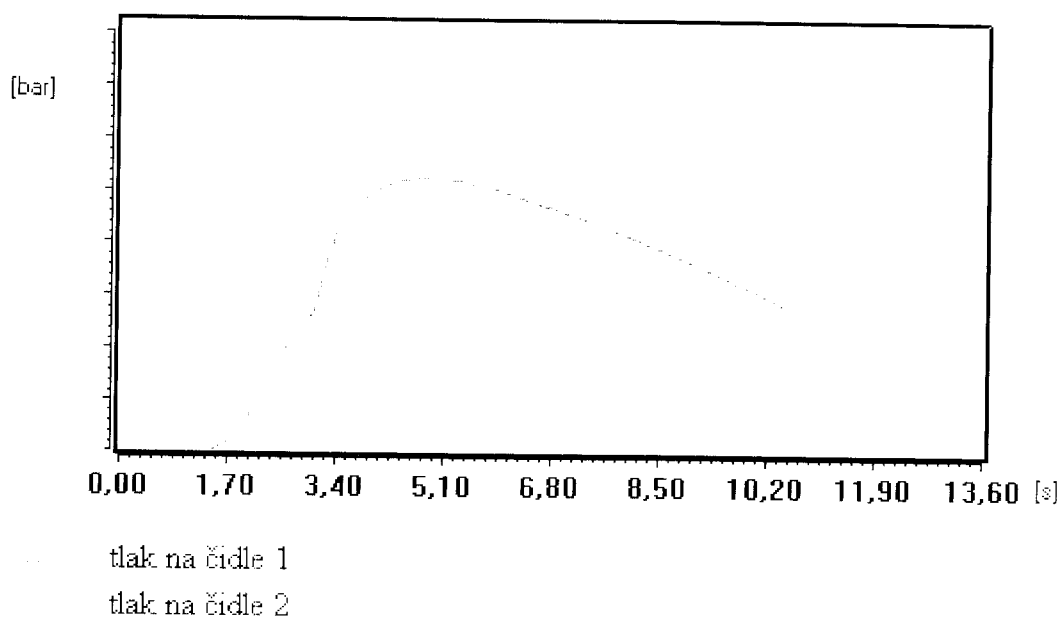
Obr. 23: Porovnání tlakového profilu nastaveného, profilu v plastikačním válci a na čidle 1 při přepnutí dráhou a vstřikovací teplotě 220 °C



Faktory, které ovlivňují průběh vnitřního jsou: průběh vstřikovací rychlosti, poloha měřicího čidla, teplota taveniny, teplota formy, okamžik přepnutí na dotlak, atd. Z tvaru tlakových profilů a mezních hodnot lze částečně posoudit, zda je cyklus řízen optimálně, popř. jaké parametry je nutné nastavit k jeho optimalizaci. Srovnáním jednotlivých profilů a jejich konfrontací s parametry výrobků (v našem případě se střední hmotností výrobků a směrodatnou odchylkou hmotnosti) je tedy možné posoudit vlivy měněných parametrů na průběh a výsledek výrobního cyklu.

- **Porovnání tlakových profilů v různých místech formy pro tři vstřikovací teploty**

V kapitole 3.6 bylo popsáno v kterých místech formy byl měřen vnitřní tlak. V grafech na obr. 24, 25 a 26 je znázorněn průběh tlaků pro jednotlivé teploty taveniny na čidle 1 (blíže ke vtoku) a na čidle 2 (vzdálenějším) pro případ přepínání na dotlak od dráhy šneku..

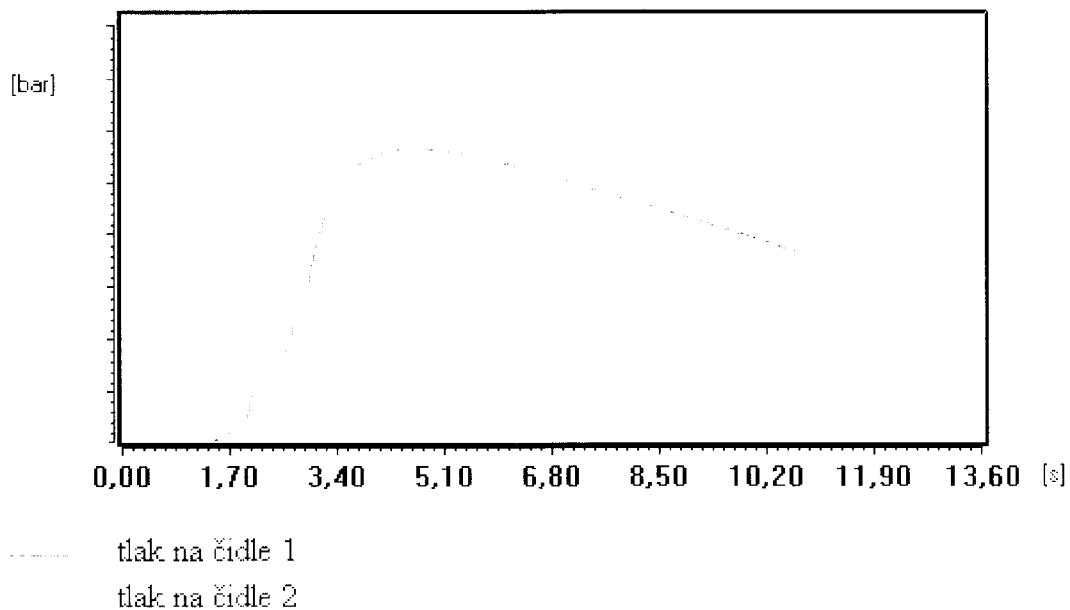


Obr. 24: Porovnání tlakových profilů na čidle 1 a na čidle 2 při přepnutí dráhou a vstřikovací teplotě 185°C

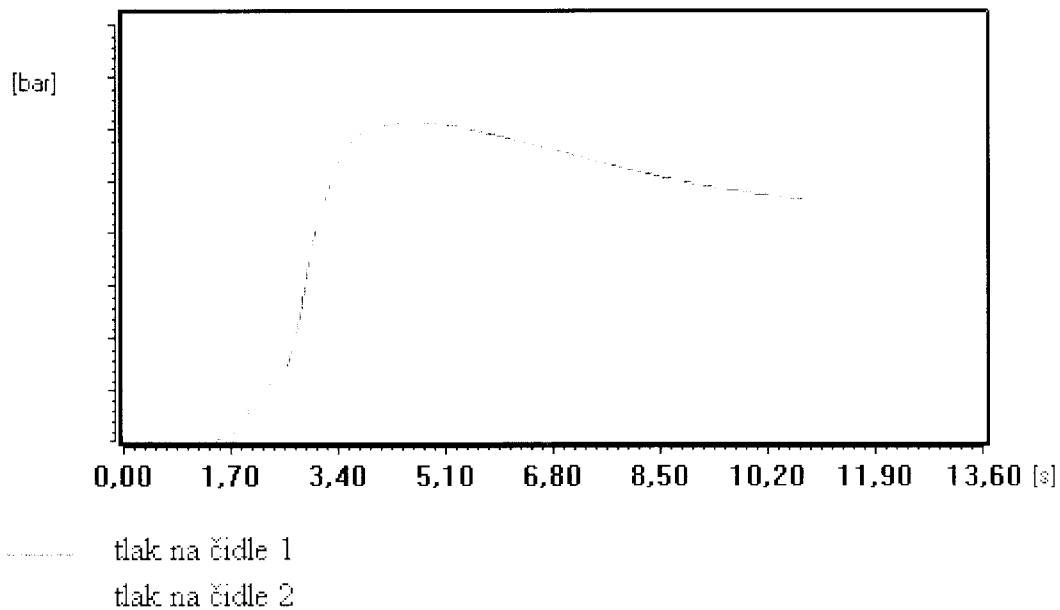
Experimentálně zjištěný průběh na čidle 1 je charakteristický tím, že tlak začíná růst dříve než tlak v odlehlejší poloze měření. Je to způsobeno tím, že tavenina doteče k bližšímu čidlu o něco dříve. Nejdelší prodlevu mezi tímto okamžikem v měřených místech vykazuje graf pro vstřikovací teplotu 185 °C (0,5 sekundy). Nejkratší prodleva naopak nastává při vstřikovací teplotě 250 °C



(0,25 sekundy), což souvisí s větší tekutostí plastu za vyšších teplot. Zároveň se na čidle 1 vyskytuje vyšší maximální tlak. To je způsobeno nižšími tlakovými ztrátami blíže vtoku danými jednak menší vzdáleností od zdroje tlaku, a také tím, že hmota ve vzdálenějším místě tuhne dříve než hmota u vtoku.



Obr. 25: Porovnání tlakových profilů na čidle 1 a na čidle 2 při přepnutí dráhou a vstřikovací teplotě 220°C

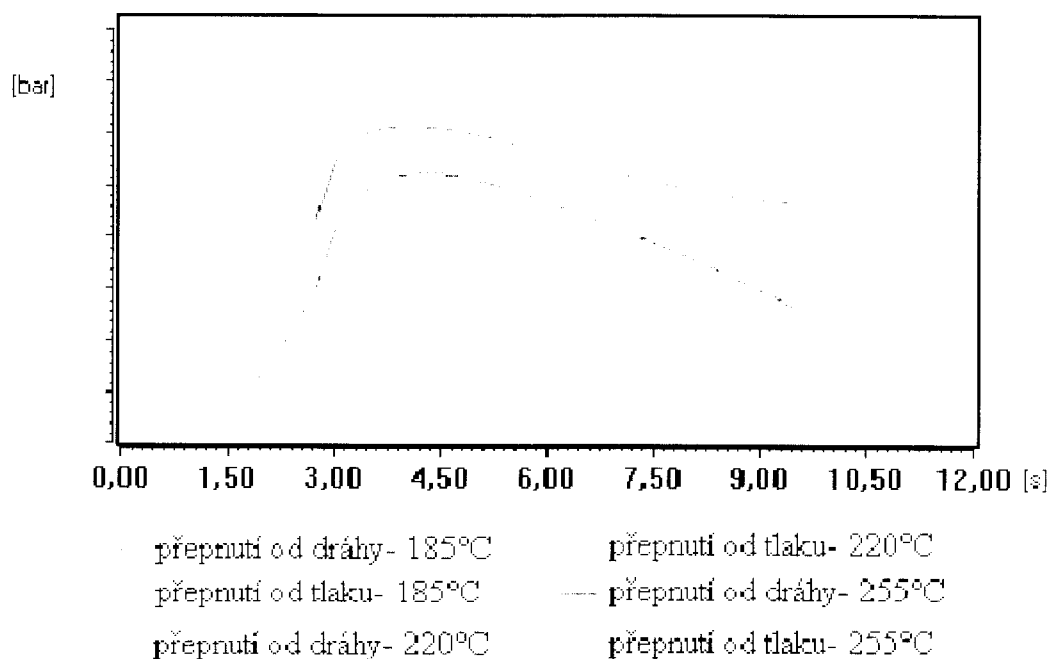


Obr. 26: Porovnání tlakových profilů na čidle 1 a na čidle 2 při přepnutí dráhou a vstřikovací teplotě 255°C

Jestliže srovnáme rozdílnost průběhů na dvou různých místech ve formě v souvislosti s velikostí vstřikovací teploty, lze vysledovat, že průběhy na čidlech 1 a 2 jsou si tím podobnější, čím vyšší je vstřikovací teplota. To je způsobeno nižšími tlakovými ztrátami s přibývajícím teplotou taveniny, tj. se snižující se viskozitou taveniny a vyšší homogenitou hmoty při vstřikování.

- **Porovnání tlakových profilů při různých teplotách a při přepínání na dotlak od dráhy a od měření tlaku**

Na obr. 27 je znázorněn průběh vnitřních tlaků při třech zkoumaných teplotách taveniny měřený na čidle 1. Je zřejmé, že s rostoucí teplotou taveniny (a tím i se snižujícími se tlakovými ztrátami a zvyšující se tekutostí) se tlakové křivky posouvají k vyšším hodnotám a zvětšuje se jak velikost maximálního tlaku, tak hodnota tlaku v okamžiku skončení dotlaku.



Obr. 27: Porovnání tlakových profilů při různých vstřikovacích teplotách v kombinaci s přepínáním od dráhy a od tlaku (měřeno na čidle 1).

V počátku vstřiku je náběh všech křivek prakticky totožný, ovšem v okolí bodu přepnutí na dotlak (čas $t = 2,7$ s) se křivky dělí. Zatímco zeleně a žlutě označené křivky pro vstřikovací teplotu 185 °C nabývají v oblasti přepnutí lokálního maxima a po přepnutí vykazují viditelný pokles, tak při teplotě střední a nejvyšší (220 °C a 255 °C) jsou křivky v oblasti přepnutí na dotlak mnohem hladší. Zakolísání vnitřního



tlaku v oblasti přepnutí u teploty vstřikování 185 °C je zřejmě důsledek toho, že během velmi krátké doby vstřiku, kdy je regulována rychlost šneku, roste tlak v plastikačním válci na mnohem vyšší hodnotu než při optimální (vyšší) teplotě taveniny a při přepnutí na dotlak, kde je regulován pouze tlak v plastikačním válci, dochází k jeho prudkému poklesu. Při zvýšení teploty taveniny klade materiál během průchodu tryskou menší odpor a proto se křivka vyhlazuje.

Rozdíly mezi průběhem křivek pro přepínání na dotlak od dráhy a od měření tlaku jsou velmi malé a křivky se v grafu často úplně překrývají. Obdobně jako u porovnávání průběhů profilů na čidle 1 a 2, i zde platí pravidlo, že čím vyšší je teplota taveniny, tím menší jsou rozdíly mezi jednotlivými profily.

Tabulky se všemi naměřenými hodnotami maximálních vnitřních tlaků v dutině formy a hodnot přepínacích tlaků v obou měřených bodech při všech třech vstřikovacích teplotách a obou technologických způsobech přepnutí na dotlak jsou uvedeny v přílohách č. 5, 6, 7 a 8.

4.3 SROVNÁNÍ HMOTNOSTÍ VÝSTŘÍKŮ PŘI RŮZNÝCH NASTAVENÍCH STROJE

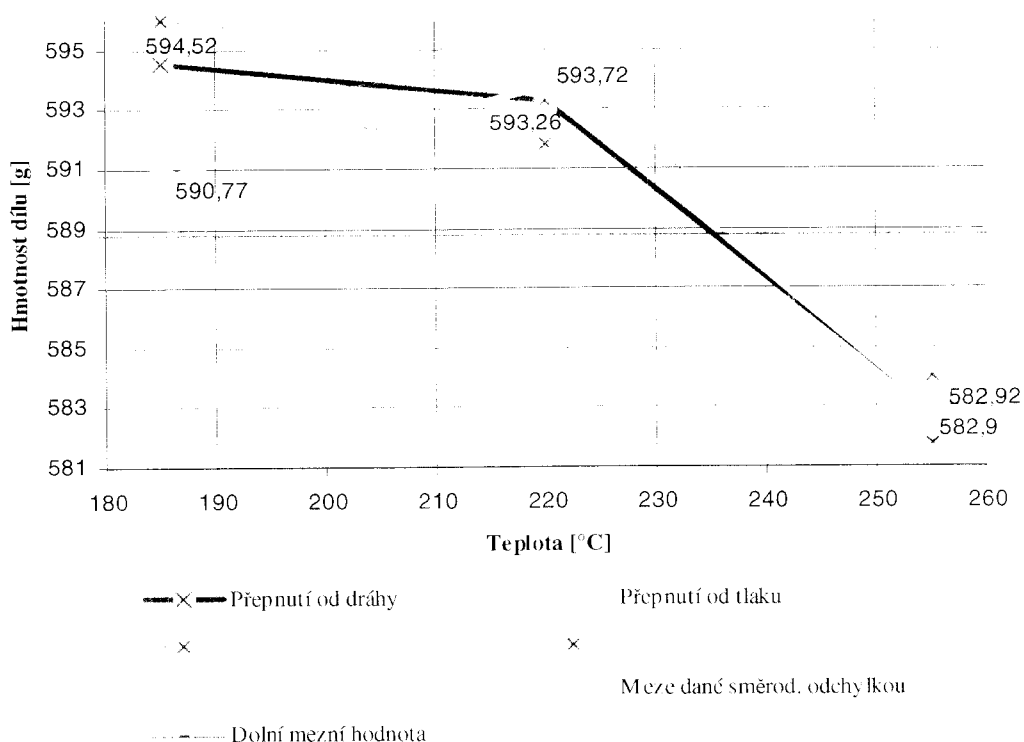
Výsledek srovnání průměrných hmotností vstřikovaných dílů odebraných během experimentu ve výrobě je zobrazen na obr. 28. Jednalo se přesně o ty výrobky, u kterých bylo prováděno měření. Modře je zakreslen průběh při přepnutí na dotlak od dráhy šneku a červeně při přepnutí od měření vnitřního tlaku. Čárkovaně jsou vyznačeny hmotnosti, které se liší od průměrné hodnoty $m_{stř}$ o $\pm 3\sigma$, kde σ [g] je směrodatná odchylka. Směrodatná odchylka je vedle aritmetického průměru hlavním parametrem tzv. normálního (Gaussova) rozdělení, používaného k vyjádření náhodných veličin. Interval $m_{stř} \pm 3\sigma$ určuje pásmo, ve kterém se při daných parametrech pohybuje hmotnost vyrobených součástí s pravděpodobností $P = 0,9973$. Jedná se o tzv. pravidlo tří sigma.

Křivky grafu jsou tvořeny přímkami proloženými třemi naměřenými body, aby bylo možné vysledovat klesající a rostoucí trendy hmotnosti v závislosti na viskozitě taveniny (teplotě taveniny).

Zatímco pro přepnutí od dráhy je tendence křivky v celém sledovaném teplotním intervalu klesající, při řízení procesu od měření vnitřního tlaku přísluší maximální hmotnost výrobku teplotě 220 °C. Zlom při střední teplotě je způsoben sčítáním dvou faktorů, které mají vliv na konečné množství hmoty vstříknuté a



dotlačené do dutiny formy. Se zmenšující se teplotou taveniny jednak klesá měrný objem taveniny a proto roste hmotnost vyráběné součásti, zároveň však také roste podle exponenciální funkce viskozita taveniny.



Obr. 28: Graf závislosti hmotnosti vstřikovaného dílu na vstřikovací teplotě

Zvýšení viskozity taveniny plastu zvětšuje odpor kladený materiálem při průtoku úzkou tryskou a rozvodem a tím naopak snižuje množství taveniny vstupující do dutiny formy. Výsledkem je nelineární průběh závislosti hmotnosti součásti na vstřikovací teplotě, který je v grafu zjednodušeně rozdělen do dvou přímkových intervalů.

Rozdíly mezi hmotnostmi výrobků při řízení procesu od dráhy šneku a od měření tlaku se jednoznačně zmenšují s rostoucí teplotou. Je to zřejmě způsobeno větší homogenitou a vyšší tekutostí teplejší taveniny. Při vyšší teplotě taveniny dochází k opožděnému tuhnutí hmoty v dutině formy a tím je zmenšen vliv načasování okamžiku přepnutí na dotlak. Při nejvyšší zkoušené vstřikovací teplotě byly naměřeny nejnižší hmotnosti dílu, a to při obou dvou způsobech přepínání. To

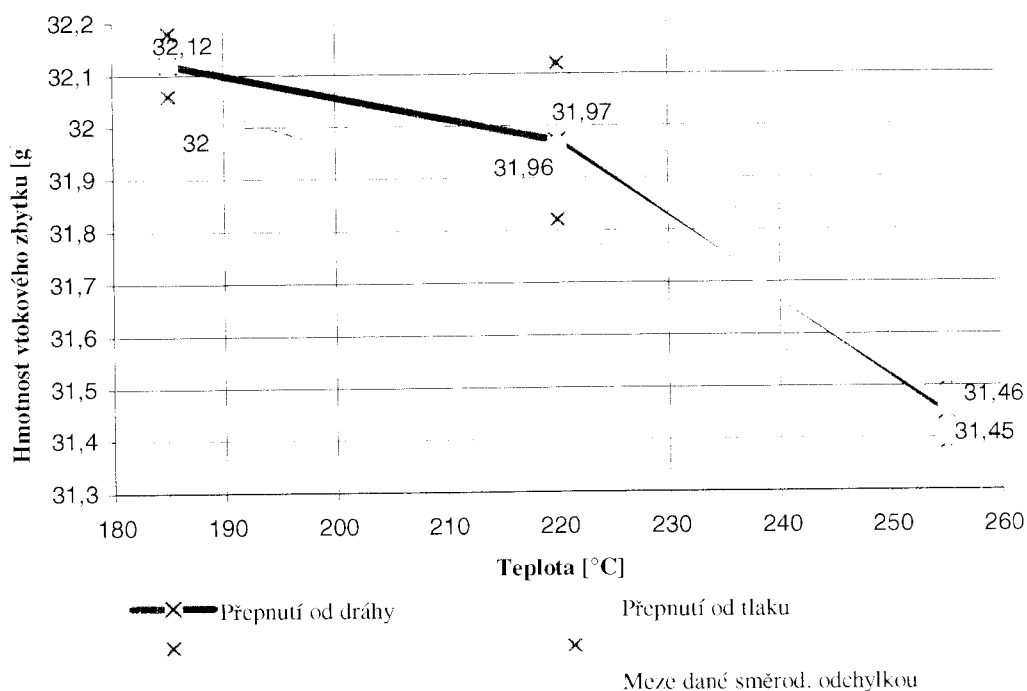


je zapříčiněno již zmíněným nárůstem měrného objemu taveniny při zvyšování její teploty. Zároveň to vypovídá o větším smrštění výrobku, neboť při předpokladu, že hustota již vychladlého dílu je při použití různých vstřikovacích teplot přibližně stejná, se s ubývající hmotností úměrně zmenšuje i objem součástí.

Velikost směrodatné odchylky určuje to, s jak vysokou reprodukovatelností jsme schopni daný výrobek při daných technologických parametrech vyrábět. Z obr. 28 je možné vysledovat, že při přepínání na dotlak od dráhy šneku se směrodatná odchylka s rostoucí teplotou zvyšuje. Při přepínání na dotlak od měření tlaku nabývá minima při vstřikovací teplotě 220 °C: $\sigma = 0,29 \text{ g}$ ($3 \cdot \sigma = 0,87 \text{ g}$). Maximální hodnotu nabývá směrodatná odchylka při teplotě vstřikování 185 °C, pro přepínání od měření tlaku, a to $\sigma = 0,76 \text{ g}$ ($3 \cdot \sigma = 2,28 \text{ g}$).

Pro doplnění je zde navíc ještě předložen graf znázorňující závislost hmotnosti na vstřikovací teplotě pro vtokový zbytek (viz obr. 29). Průběh křivek pro vtokový zbytek přibližně odpovídá průběhu křivek pro výstřik. To dokazuje správnost měření a podporuje výsledky měření.

Kompletní tabulky jednotlivých hmotností součástí a vtoků s příslušnými směrodatnými odchylkami při měnící se vstřikovací teplotě a způsobu přepínání na dotlak jsou uvedeny v příloze č. 1.



Obr. 29: Graf závislosti hmotnosti vtokového zbytku na vstřikovací teplotě



4.4 TRANSFORMACE NAMĚŘENÝCH KŘIVEK DO DIAGRAMU p-v-T

Při transformaci naměřených tlakových křivek do p-v-T diagramu byla použita Taitova rovnice vyjadřující měrný objem jako funkci tlaku a teploty: $v = v(p, T)$. Přesný tvar této rovnice je popsán v kapitole 2.3. Tato rovnice velmi přesně popisuje teplotní chování polymerů a to zejména v oblastech přechodových teplot.

Nejprve bylo nutné vytvořit síť izobar, do které bylo možné diagram cyklu umístit. Bohužel nikde, tj. v databankách materiálů, databázích výrobce použitého plastu, v interním materiálovém listě firmy Peguform, atd., nebyla dostupná p-v-T data pro konkrétní materiál součásti. K vytvoření diagramu byla nakonec použita p-v-T data velmi podobného materiálu, získaná z materiálové databáze simulačního programu MoldFlow, který diagram využívá při simulování vstřikování pro výpočet smrštění hmoty ve formě. V tab. 3. jsou uvedeny všechny konstanty Taitovy rovnice, které byly použity při výpočtu.

Tab.3. Data p-v-T použítá při výpočtu

Označení	Velikost	Jednotka
b_{1m}	0,001096	m^3 / kg
b_{2m}	$7,462 \cdot 10^{-7}$	$m^3 / (kg \cdot K)$
b_{3m}	$9,107 \cdot 10^7$	Pa
b_{4m}	0,004931	K^{-1}
b_{1s}	0,001032	m^3 / kg
b_{2s}	$5,328E \cdot 10^{-7}$	$m^3 / (kg \cdot K)$
b_{3s}	$1,341 \cdot 10^8$	Pa
b_{4s}	0,005084	K^{-1}
b_5	443,15	K
b_6	$5,1 \cdot 10^{-8}$	K / Pa
b_7	$6,4 \cdot 10^{-5}$	m^3 / kg
b_8	0,1096	K^{-1}
b_9	$8,829 \cdot 10^{-9}$	Pa^{-1}

Náhradní materiál je vyráběn stejným výrobcem jako skutečně použitý plast, a to pod názvem Keltan EX1759. Stejně jako u původního plastu jde o kopolymer polypropylenu modifikovaný elastomerem EPDM, ale místo přídavku 20 % talku je



plněn zhruba stejným množstvím křídý. Jak oblast teploty tání, tak hustota za pokojové teploty ($1,0474 \text{ g / cm}^3$) jsou pro oba plasty téměř shodné.

Při tvorbě vlastních křivek jsem kromě p-v-T dat vycházel z tlakových profilů v dutině formy a v plastikačním válci, grafu závislosti dráhy šneku na čase, objemu dutiny formy, průměru šneku a vstřikovací teploty. Ukázka grafu závislosti dráhy šneku na čase je uvedena v příloze 10.

Velkým handicapem při sestavování p-v-T diagramu bylo to, že nebylo během měření možné sledovat pomocí teplotních čidel teplotu v dutině formy. Kdyby byla taková čidla k dispozici, měly by vytvořené p-v-T diagramy mnohem vyšší vypovídací hodnotu.

• Fáze plnění dutiny formy

Pro popis této fáze jsem vycházel z předpokladu, že se během velmi krátkého času plnění dutiny formy nemění teplota taveniny a po celou dobu se drží na hodnotě vstřikovací teploty. Dále jsem pro zjednodušení předpokládal, že před plněním dutiny se tlak hmoty rovná tlaku barometrickému. První bod křivky je tedy dán měrným objemem v_1 dopočítaným z Taitovy rovnice, který odpovídá vstřikovací teplotě T_{vs} a barometrickému tlaku p_{bar} :

$$v_1 = v(p_{bar}, T_{vs}) \quad (19)$$

Druhý (konečný) bod plnění přímky je pak dán měrným objemem v_2 , který odpovídá teplotě taveniny dané vstřikovací teplotou a tlaku při přepnutí p_{pr} , který byl změřen na příslušném čidle.

$$v_2 = v(p_{pr}, T_{vs}) \quad (20)$$

• Fáze dotlaku

Při výpočtu jednotlivých bodů pro sestavení křivky popisující dotlak jsem zvolil dělení v časových intervalech 0,5 sekundy a v počátku dotlaku, kde se tavenina velmi prudce ochlazuje, dělení dokonce 0,125 s. Hodnoty potřebné k výpočtu průběhu p-v-T křivky byly odečteny z příslušných grafů.

V prvním kroku jsem pro každý časový bod spočítal přírůstek hmotnosti plastu natlačeného do dutiny formy Δm_i podle následujícího vztahu:



$$\Delta m_i = \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot \left(\frac{s_{př}}{v_{vpř}} - \frac{s_i}{v_{vi}} \right) \quad (21)$$

kde D_s značí průměr šneku, $s_{př}$ je dráha šneku v okamžiku přepnutí na dotlak, $v_{vpř}$ je měrný objem hmoty ve válci při přepnutí vypočtený z Taitovy rovnice za vstřikovací teploty a přepínacího tlaku ve válci odečteného z příslušného grafu, s_i je dráha šneku v příslušném měřeném bodě a v_{vi} je měrný objem ve válci v tomtéž časovém okamžiku vypočítaný rovněž z Taitovy rovnice.

Měrný objem plastu v dutině formy v jednom ze sledovaných bodů v_{fi} je dán vztahem:

$$v_{fi} = \frac{V_f}{m_{př} + \Delta m_i} \quad (22)$$

kde V_f značí objem dutiny formy včetně studeného rozvodu a $m_{př}$ je hmotnost plastu v dutině formy v okamžiku přepnutí. Ta je určena jako rozdíl teoretické hmotnosti výstřiku a vtokového zbytku m_t po ukončení fáze dotlaku a konečné (maximální) hodnoty hmotnostního přírůstku Δm_k v témže okamžiku:

$$m_{př} = m_t - \Delta m_k \quad (23)$$

Jako výchozí bod pro odhad hmotnosti při přepnutí jsem tedy volil tzv. teoretickou hmotnost m_t tvořenou součtem ekvivalentních hmotností součástí a vtokového zbytku. Tato hmotnost je spočítána jako součin objemu formy včetně studeného rozvodu ($V_f = 587,54 \text{ cm}^3$) a měrného objemu plastu při 40 °C a barometrickém tlaku ($v_{40} = 0,963 \text{ g/cm}^3$).

$$m_t = V_f \cdot v_{40} = 610 \text{ g} \quad (24)$$

Teoretická hmotnost nahrazuje ve výpočtu skutečnou konečnou hmotnost výstřiku a vtokového zbytku proto, že plast má po vychladnutí vlivem působení velkých tlaků během vstřikování mnohem vyšší hustotu, než by odpovídalo téže teplotě a tlaku v p-v-T diagramu, který je do jisté míry idealizovaný a tento jev nezohledňuje. Kdyby se vycházelo ze skutečné hmotnosti a tudíž skutečné hustoty výstřiku, nacházeli bychom se v p-v-T diagramu v mnohem nižší oblasti teplot, která neodpovídá skutečnosti. Teplota 40 °C odpovídá teplotě temperačního média.

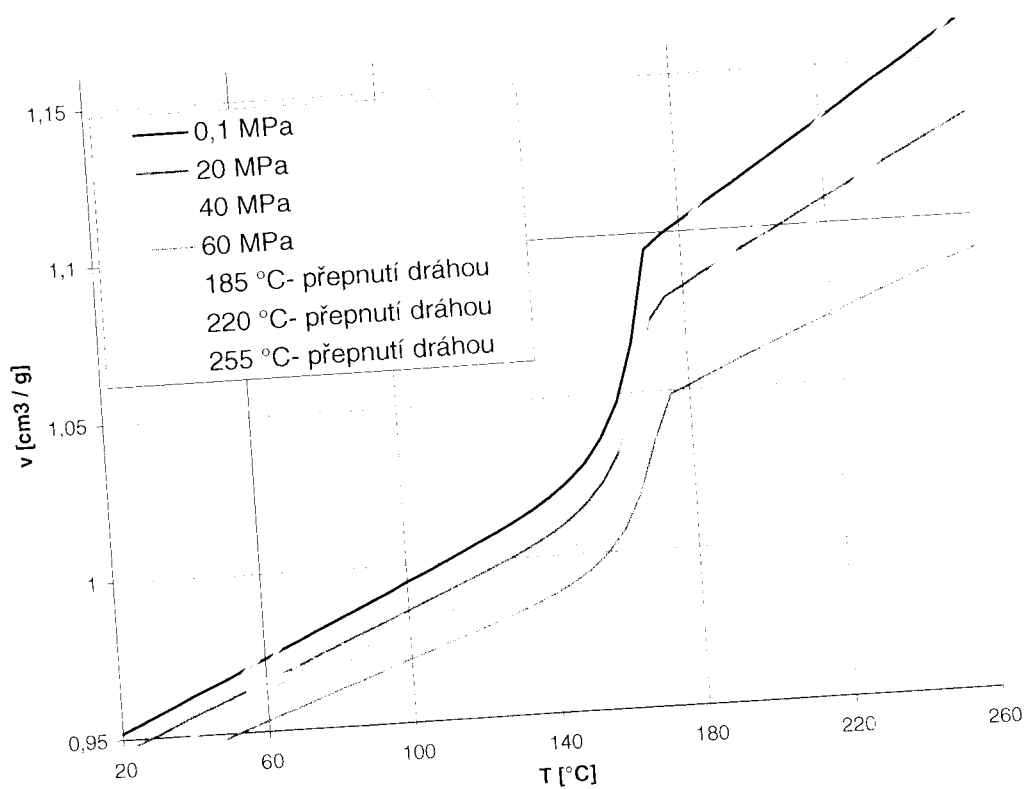


Teplotu taveniny plastu ve formě jsem vypočítal pro jednotlivé body pomocí Taitovy rovnice. Kvůli složitosti vztahu by bylo velmi obtížné vyjádřit teplotu explicitně jako funkci vnitřního tlaku a měrného objemu, tj. ve tvaru: $T_f = T_f(v_f, p_i)$. Z tohoto důvodu jsem dopočítal hodnoty numericky pomocí aplikace Microsoft Excel.

- **Ukončení dotlaku**

Při ukončení dotlaku tlak v plastikačním válci i v dutině formy prudce klesá. Snímače tlaku v nástroji zaznamenávaly tlak pouze v průběhu působení šneku na taveninu. V okamžiku ukončení dotlaku tedy křivky tlakového profilu končí a další průběh stavových veličin lze jen předpokládat. Zjednodušeně je tento průběh dokreslen izotermou, končící na hodnotě barometrického tlaku.

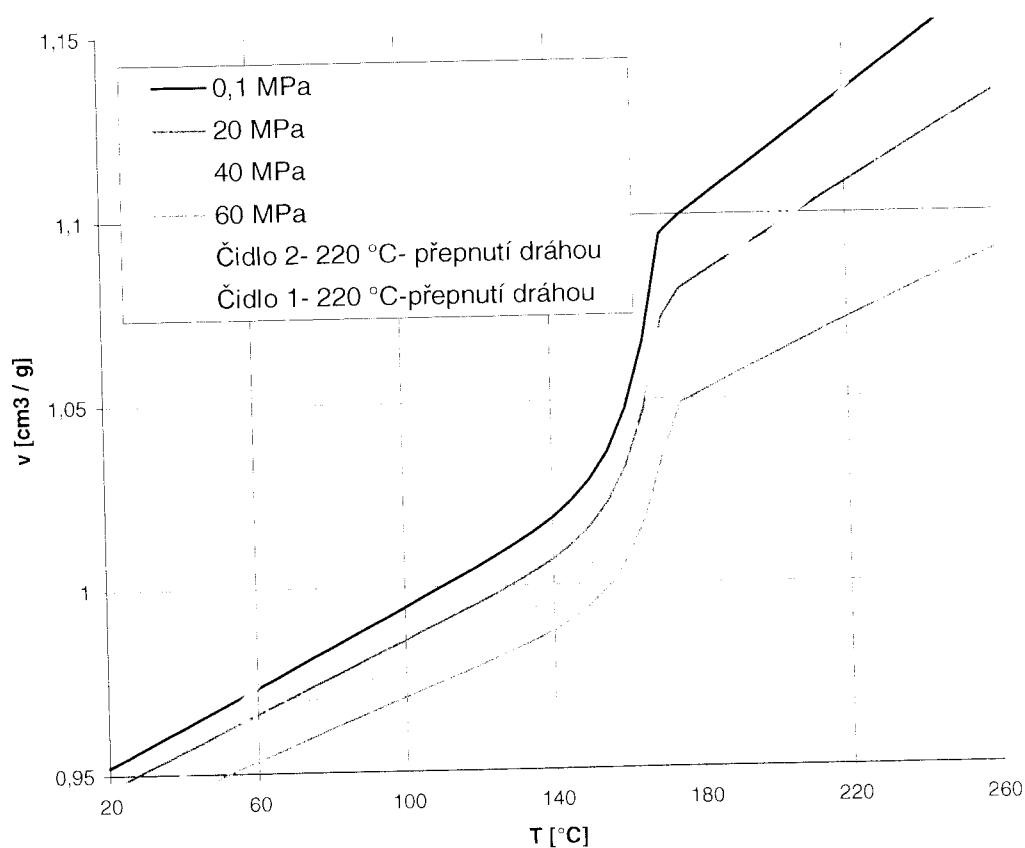
Na obr. 30 a 31 jsou znázorněny diagramy p-v-T tak, jak byly vypočteny z dříve uvedených předpokladů a vztahů. Jsou zde uvedeny průběhy při řízení přepnutí od dráhy šneku a porovnán vliv tří různých vstřikovacích teplot (viz obr. 30) a průběhy pro čidlo 1 a pro čidlo 2 (viz obr. 31).



Obr. 30: Diagram p-v-T, srovnání průběhů na čidlo 2 pro různé vstřikovací teploty při přepínání na dotlak od dráhy šneku

Při zvýšení vstřikovací teploty se křivky v p-v-T diagramu posouvají směrem doprava k vyšším teplotám a také níže k vyšším tlakům. Zvyšuje se jak samotná teplota taveniny při plnění dutiny formy, tak i teplota taveniny při ukončení fáze dotlaku.

Porovnáme-li průběhy křivek v p-v-T diagramu pro čidlo 1 a pro čidlo 2, je zde stejně jako u srovnání tlakových křivek patrná velká podobnost průběhů s tím, že na bližším čidle 1 jsou v celém průběhu o něco vyšší tlaky. Zároveň je v okamžiku skončení fáze dotlaku v místě čidla 1 o něco vyšší okamžitá teplota.



Obr. 31: Diagram p-v-T, srovnání průběhů na čidle 1 a na čidle 2 pro vstřikovací teplotu 220 °C při přepínání na dotlak od dráhy šneku

Obdobně jako jako grafy na obr. 30 a 31 by šly vytvořit i další p-v-T diagramy pro všechny kombinace technologických parametrů realizované během experimentu. To však nebylo cílem diplomové práce, a proto to již zde není uvedeno. Není však problém na základě uvedené metodiky p-v-T diagramy vytvořit.



5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Tato diplomová práce se snaží vyřešit problém nasazení moderní technologie pro vstřikování, a to použití tlakových čidel v procesu vstřikování. Porovnával jsem zde výsledky měření, kdy k přepnutí na dotlak docházelo při nastavené hodnotě dráhy šneku a postup, kdy byla impulsem pro přepnutí na dotlak určená hodnota vnitřního tlaku v dutině formy. Jako hodnotící kritérium jsem zvolil hmotnost vstřikovaného výrobku a také směrodatnou odchylku vypočtenou ze statistického souboru 10-ti kusů. Směrodatná odchylka ukazuje na přesnost výrobní metody. Vyšší přesnost z hlediska hmotnosti zabezpečuje menší zmetkovitost výroby a vyšší homogenitu všech důležitých vlastností výrobků. Kromě vlivu způsobu řízení bylo experimentálně zjištěno, jaký vliv má viskozita taveniny na výslednou hmotnost výrobku.

5.1 POSOUZENÍ VLIVU ZPŮSOBU PŘEPNUTÍ NA DOTLAK A VISKOZITY PLASTU NA VÝROBEK

Výsledky srovnání hmotností pro dva odlišné způsoby přepínání ukazují, že pro řízení tlakem je rozptyl hmotností menší pouze pro vstřikovací teplotu 220 °C. To znamená, že vliv přepínání pomocí čidel na dobrou reprodukovatelnost hmotnosti při výrobě není zdaleka jednoznačný. Oblastí, kde se naopak výhoda použití čidel při všech třech vstřikovacích teplotách jednoznačně potvrdila, je vysoká reprodukovatelnost přepínacích i maximálních tlaků na obou měřených místech v nástroji. Přehled těchto tlaků a jejich směrodatných odchylek je uveden v přílohách č. 5, 6, 7, 8 a 9. Důvod, proč rozptyl tlaků při přepínání na dotlak od měření tlaku je v porovnání s přepínáním od dráhy vždy menší narozdíl od rozptylů hmotností, kde toto většinou neplatí, by se dal vysvětlit následující hypotézou. Při přepínání od měření tlaku je výsledná hmotnost výrobku mnohem více ovlivněna teplotou taveniny než při přepínání od dráhy šneku. To potvrzuje fakt, že tlakové křivky, jak je vidět z obr. 27, mají při změně teploty značně odlišné průběhy. Proto se i při malém zakolísání teploty taveniny mění vnitřní tlak a tím i poloha přepnutí. Naproti tomu řízení od dráhy šneku není v tomto ohledu tak citlivé a tím se vliv teploty taveniny snižuje.

Viskozita taveniny má přímý vliv na kvalitu součástí. Viskozita tavenin plastů klesá jednak s rostoucí hodnotou smykové rychlosti, a také se zvyšující se teplotou. Vyšší teplota taveniny zaručuje, že výrobek bude mít vlivem nízké viskozity a tím



dobré tekutosti homogenní strukturu, nebude docházet ke vzniku studených spojů nebo neúplného výstřiku. Může však docházet k potížím spojeným s nedostatečným ochlazením hmoty během cyklu. Čím nižší je viskozita, tím menší odpor klade hmota při průtoku do dutiny formy a tím je také ovlivněna výsledná hmotnost výrobku.

Obecně lze říci, že pro výrobce je výhodné snížit hmotnost výrobku co nejnižší tak, aby ušetřil na materiálu, ale zároveň musí splnit přísná kritéria odběratele, která zahrnují mimo jiné i předpis maximální a minimální hmotnosti součástí. Navíc je nutné držet se doporučených zpracovatelských teplot daného plastu.

Pro zvolenou součást je předepsaná hmotnost $594,8 \pm 6$ g. Horní mezní hmotnost je tedy 600,8 g a dolní mezní hmotnost výrobku je 588,8 g. Z grafu na obr. 28 je zřejmé, že horní mezní hmotnost není překročena při žádné ze vstřikovacích teplot. Při zvyšování teploty vstřikování však dojde k překročení dolní mezní hmotnosti a to jak při přepínání od dráhy šneku, tak při přepínání od měření tlaku. Kdybychom vycházeli z předpokladu, že hodnota hmotnosti výstřiku zmenšená o trojnásobek směrodatné odchylky nesmí překročit dolní mezní hodnotu hmotnosti, pak maximální možná teplota vstřikování při přepínání od dráhy šneku by činila $230,5$ °C a při přepínání od tlaku $232,4$ °C. Jedná se o vstřikovací teploty, při kterých dochází k maximální úspoře materiálu a při tom je zaručena předepsaná hmotnost výrobku. Hodnota je dána průsečíkem dolní mezní hodnoty hmotnosti (označené zeleně) a dolní meze dané směrodatnou odchylkou (čárkovaně). Odečteným teplotám odpovídají střední hodnoty hmotnosti $m_{sif2} = 590,15$ g pro přepnutí od dráhy šneku a $m_{sif1} = 589,89$ g pro přepnutí od měření tlaku, což odpovídá úspoře 4,03 g na materiálu jednoho kusu výrobku oproti předepsané hmotnosti a 3,37 g oproti současnému standardnímu nastavení.

Obdobná situace nastává v bodě daném teplotou $187,5$ °C při přepínání od tlaku, kde je střední hmotnost součásti $m_{sif3} = 590,98$ g. V tomto případě by úspora plastu na výrobek činila 3,82 g oproti předepsané hmotnosti a 2,28 g oproti současnému standardnímu nastavení.

Zajímavé by bylo posoudit vliv velikosti dotlaku na výslednou hmotnost součástí. Dá se předpokládat, že se snižujícím se dotlakem by se hmotnost součástí snižovala a zároveň by se snížila hodnota maximálního tlaku v dutině formy, čímž by se zmenšovalo vnitřní pnutí ve výrobku a namáhání formy, tudíž i opotřebení nástroje.



Pro rozhodnutí, zda je výhodné přejít ve výrobě vnější kapsy na přepínání od tlaku pomocí čidel Kistler, je kromě zhodnocení současných výsledků měření nutné také odhadnout jejich budoucí vývoj. Měření probíhala na relativně novém stroji, který je zatím velmi spolehlivý. Díky současnému nastavení je tedy při řízení přepnutí na dotlak od dráhy šneku zaručena vysoká stabilita procesu a je zaručen bezproblémový chod s prakticky nulovou zmetkovitostí. Lze však předpokládat, že s přibývajícím opotřebením stroje se stabilita procesu zhorší. Problémem u produkce na starších strojích potom může být např. vznik nedostříknutého výrobku, jako důsledek opotřebením šneku, kdy původně nastavené hodnoty plastikačního zdvihu a dráhy přepnutí přestávají vyhovovat. Tato obtíž se řeší přeseřazením dráhy přepnutí, což na jistou dobu problém vyřeší. Tento problém by byl použitím čidel vyřešen a bezporuchový chod stroje by se prodloužil.

5.2 POSOUZENÍ VÝZNAMU DIAGRAMU p-v-T

Pro účely vyhodnocení problému a také pro srovnání teorie s praxí byly jako doplněk této diplomové práce zhotoveny p-v-T diagramy, které zachycují časový úsek od počátku plnění dutiny formy do ukončení fáze dotlaku.

Průběh p-v-T diagramu se značně liší od idealizovaného tvaru. V idealizovaném diagramu se po přepnutí na dotlak křivka pohybuje po izobaře a po zatuhnutí vtoku přechází na izochoru. Již z tlakových křivek bylo zřejmé, že fáze dotlaku není charakterizována konstantním tlakem. Z počátku dotlaku tlak prudce roste až na maximální hodnotu, která v případě vstřikovací teploty 255 °C dokonce více než třikrát převyšuje velikost tlaku při přepnutí. Z grafů na obr. 30 a 31 je možné vysledovat, že toto maximum se pohybuje blízko spodní hranice oblasti tání, resp. tuhnutí. Za tímto místem je plast již v tuhém stavu, dochází k zatuhnutí vtoku a tlak začíná klesat. V okamžiku, kdy končí fáze dotlaku, se ale vnitřní tlak pohybuje stále ještě vysoko nad tlakem přepínacím. Rozpor s ideálním průběhem p-v-T diagramu plyne patrně z toho, že idealizovaný průběh diagramu, se kterým se můžeme setkat v literatuře a skriptech, vyplývá spíše z průběhu tlaku v plastikačním válci s předpokladem, že v dutině formy je průběh obdobný. V plastikačním válci je průběh tlaku ve fázi dotlaku skutečně téměř konstantní. Diagramy p-v-T, které jsou zde předloženy navíc reprezentují povrchovou vrstvu materiálu, která se chová odlišně než materiál uvnitř stěny výrobku. Tento problém však nelze nijak řešit, protože umístění čidel je dáno požadavkem, aby nezasahovala do materiálu výrobku.



V diagramech je přes všechny nedostatky velmi názorně zobrazen průběh měrného objemu při plnění formy a fázi dotlaku. Měrný objem během celého sledovaného intervalu klesá. To znamená, že je neustále doplňována hmota do dutiny formy. Z diagramů lze také odhadnout velikost smrštění dílu, které následuje po ukončení dotlaku, kdy výrobek chladne již bez jeho působení.



6 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce je zaměřena na problematiku optimalizace vstřikovacího procesu. Teoretická část práce přehlednou formou shrnuje poznatky z procesu vstřikování týkající se vlivů vybraných vstřikovacích parametrů na průběh vnitřního tlaku a na výslednou strukturu a vlastnosti výrobku. Dále se podrobně zabývá významem a průběhem p-v-T diagramu a vlivy doprovodných faktorů při vstřikování na jeho výsledný tvar. Součástí teoretické části je i popis současných možností řízení vstřikovacího cyklu ve vztahu k úrovni řízení a regulace vstřikovacích strojů.

Experimentální část posuzuje stabilitu procesu při dvou různých způsobech řízení okamžiku přepnutí na fázi dotlaku. První způsob představuje přepnutí na dotlak odvozené od nastavené hodnoty dráhy šneku. Druhý způsob využívá k přepnutí na dotlak vnitřní tlak v dutině formy snímaný speciálními tlakovými čidly. Současně je v experimentální části vyhodnocen vliv viskozity na výsledek vstřikovacího cyklu. Kritériem pro určení stability byla výsledná hmotnost součástí a její směrodatná odchylka. Doplnkem diplomové práce je transformace tlakových křivek do p-v-T diagramu a rozbor chování stavových veličin během vstřikování.

Hlavním přínosem diplomové práce je ověření použití tlakových čidel při vstřikování jako prostředku pro vyhodnocení optimálního okamžiku pro přepnutí na fázi dotlaku.

Klady a zápory použití čidel v porovnání s konvenčním přepínáním od dráhy šneku vyplývající z porovnání hmotností a rozptylu hmotností při různých vstřikovacích teplotách se dají shrnout následovně:

- (+) vyšší procesní stabilita při standardní vstřikovací teplotě (220 °C)
- (-) nižší procesní stabilita při extrémních hodnotách vstřikovacích teplot (185 °C a 255 °C)
- (-) větší citlivost čidel na výkyvy teploty taveniny
- (+) nižší rozptyl přepínacích i maximálních tlaků při všech zkoumaných vstřikovacích teplotách.
- (-) vysoké pořizovací náklady senzorů a příslušenství
- (+) dlouhodobější záruka udržení stabilního procesu při předpokladu eliminace vlivu opotřebení stroje na kvalitu výroby



Pro dokreslení průběhu vstřikovacího cyklu byly jako součást diplomové práce sestrojeny p-v-T diagramy. Ty slouží ke zhodnocení závislosti tří stavových veličin: měrného objemu, teploty a tlaku. Výsledné grafy názorně zobrazují poměrně složité termodynamické chování plastu uvnitř dutiny formy a pomáhají tak k přesnějšímu popisu vstřikovacího děje.

Tato diplomová práce ve svém důsledku dává návod pro rozhodnutí, zda přejít na modernější způsob výroby, tj. používání tlakových čidel v dutině nástroje pro přepínání na fázi dotlaku. Každopádně ověřila dobrou funkčnost této technologie.



7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Krebs, J.: Termoplasty v praxi. Copyright© by Dashofer Holding Ltd., 2004
- [2] Malloy, Robert A.: Plastic Part Design for injection Molding. New York: Hanser 1994.
- [3] Krebs, J.: Teorie a technologie zpracování plastů. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci 1981.
- [4] Štěpek, J.; Zelinger, J.; Kuta, A.: Technologie zpracování a vlastnosti plastů. Praha: SNTL 1989.
- [5] Kolouch, J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. Praha: SNTL 1986.
- [6] Katalog Kistler. Zúrig 2003.
- [7] <http://www.synventive.com>
- [8] Krebs, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů. Liberec: Technická univerzita v Liberci 2001.
- [9] Beiter, K.: Incorporating Dimensional Requirements into Material. Stanford 1996.
- [10] Dluhoš J.: Materiály a technologie- plasty a vybrané nekovové materiály. Ostrava: Pedagogická fakulta OU 1993.
- [11] Interní materiálový list č.: 802 firmy Peguform Bohemia
- [12] <http://www.sabic.cz>
- [13] Technická dokumentace stroje Krauss Maffei KM-1000 6100 MC
- [14] <http://www.kistler.com>
- [15] Technologický výrobní postup vnější kapsy PD LŘ. Peguform Libáň
- [16] Šafařík, V.: Nástroje pro tváření kovů a plastů, cvičení. Liberec: VŠST 1991.



8 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hmotnosti kapsy přístrojové desky při různých vstřikovacích teplotách
- Příloha 2 Srovnání dob cyklů t_c [s] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 3 Srovnání dob vstřiku t_v [s] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 4 Srovnání velikostí polštáře P [mm] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 5 Srovnání tlaků přepnutí na dotlak v dutině nástroje na čidle 1: $p_{př1}$ [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 6 Srovnání tlaků přepnutí na dotlak v dutině nástroje na čidle 2: $p_{př2}$ [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 7 Srovnání maximálních tlaků v dutině nástroje na čidle 1: p_{m1} [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 8 Srovnání maximálních tlaků v dutině nástroje na čidle 2: p_{m2} [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 9 Srovnání maximálních tlaků hmoty ve válci p_{mv} [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení
- Příloha 10 Dráha šneku během cyklu na výřezu z displeje stroje ($T_{vs} = 220$ °C, přepnutí od dráhy)
- Příloha 11 Rychlost šneku během počátku fáze plnění dutiny formy na výřezu z displeje stroje ($T_{vs} = 220$ °C, přepnutí od dráhy)
- Příloha 12 Vstřikovací jednotka stroje KM-1000 6100 MC
- Příloha 13 Základní technologické parametry pro výrobu kapsy vnější přístrojové desky pro levé řízení

Příloha 1 Hmotnosti kapsy přístrojové desky při různých vstřikovacích teplotách

$T_{vs} = 185\text{ °C}$	přepnutí na dotlak od dráhy šneku		přepnutí na dotlak od tlaku	
Číslo měření	Hmotnost výrobku [g]	Hmotnost vtoku [g]	Hmotnost výrobku [g]	Hmotnost vtoku [g]
1.	594,24	32,14	591,90	32,07
2.	594,08	32,12	591,57	32,05
3.	595,37	32,12	591,11	32,03
4.	595,20	32,13	590,71	32,02
5.	594,82	32,17	590,32	32,01
6.	594,60	32,12	589,98	32,00
7.	594,09	32,10	591,28	31,97
8.	594,57	32,11	590,62	31,97
9.	594,32	32,09	590,84	31,93
10.	593,93	32,10	589,36	31,96
Průměr [g]	594,52	32,12	590,77	32,00
Směrodatná odchylka [g]	0,49	0,02	0,76	0,04

$T_{vs} = 220\text{ °C}$	přepnutí na dotlak od dráhy šneku		přepnutí na dotlak od tlaku	
Číslo měření	Hmotnost výrobku [g]	Hmotnost vtoku [g]	Hmotnost výrobku [g]	Hmotnost vtoku [g]
1.	592,35	32,00	593,70	32,04
2.	593,77	31,96	593,86	32,00
3.	592,96	32,01	594,07	31,97
4.	593,32	31,91	594,17	31,94
5.	593,15	31,99	593,77	31,95
6.	593,88	32,04	593,62	31,94
7.	592,88	32,03	593,32	31,93
8.	593,20	31,97	593,82	31,95
9.	593,26	31,91	593,56	31,93
10.	593,85	31,88	593,29	31,95
Průměr [g]	593,26	31,97	593,71	31,96
Směrodatná odchylka [g]	0,48	0,05	0,29	0,03

Příloha 1 (pokračování) Hmotnosti kapsy přístrojové desky při různých vstřikovacích teplotách

$T_{vs} = 255 \text{ }^\circ\text{C}$		přepnutí na dotlak od dráhy šneku		přepnutí na dotlak od tlaku	
Číslo měření	Hmotnost výrobku [g]	Hmotnost vtoku [g]	Hmotnost výrobku [g]	Hmotnost vtoku [g]	Hmotnost výrobku [g]
1.	583,30	31,46	583,72	31,48	583,30
2.	582,92	31,49	583,30	31,48	583,26
3.	583,26	31,46	583,26	31,45	583,31
4.	583,31	31,41	583,46	31,44	582,34
5.	582,34	31,42	582,80	31,46	582,18
6.	582,18	31,44	582,81	31,48	582,92
7.	582,92	31,46	582,38	31,41	582,98
8.	582,98	31,44	582,57	31,45	582,95
9.	582,95	31,46	582,21	31,46	582,86
10.	582,86	31,44	582,68	31,45	
Průměr [g]	582,90	31,45	582,92	31,46	
Směrodatná odchylka [g]	0,38	0,02	0,49	0,02	

Příloha 2 Srovnání dob cyklů t_c [s] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_{vs} = 185 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_{vs} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_{vs} = 255 \text{ }^\circ\text{C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	60	59,9	60,1	60,1	60,4	60,1
	2.	60	59,9	60,1	60	60,1	60,1
	3.	60	59,9	60,1	60	60	60,3
	4.	60	59,9	60,1	59,9	60	60
	5.	60	59,9	60	60	60	60
	6.	60	59,9	60	60	60	60
	7.	60	59,9	60	59,9	60	60
	8.	60	59,9	60	59,9	60	60
	9.	59	59,9	60	60	60	60
	10.	60	59,9	60	60	60	60
Průměrná doba cyklu t_c [s]		60,02	59,9	60,05	59,98	60,05	60,05
Směrodatná odchylka [s]		0,103	0	0,053	0,063	0,127	0,097

Příloha 3 Srovnání dob vstřiku t_v [s] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_{vs} = 185 \text{ } ^\circ\text{C}$		$T_{vs} = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$		$T_{vs} = 255 \text{ } ^\circ\text{C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	2,72	2,72	2,74	2,69	2,76	2,77
	2.	2,71	2,72	2,73	2,69	2,77	2,76
	3.	2,71	2,71	2,74	2,69	2,77	2,76
	4.	2,71	2,73	2,74	2,69	2,76	2,77
	5.	2,71	2,72	2,74	2,70	2,75	2,76
	6.	2,70	2,72	2,73	2,70	2,75	2,76
	7.	2,70	2,72	2,73	2,71	2,75	2,76
	8.	2,70	2,72	2,73	2,71	2,75	2,78
	9.	2,70	2,72	2,72	2,71	2,74	2,78
	10.	2,70	2,72	2,72	2,71	2,73	2,77
Průměrná doba cyklu t_v [s]		2,71	2,72	2,73	2,70	2,75	2,77
Směrodatná odchylka [s]		0,007	0,005	0,008	0,009	0,013	0,008

Příloha 4 Srovnání velikostí polštáře [mm] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_v = 185 \text{ } ^\circ\text{C}$		$T_v = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$		$T_v = 255 \text{ } ^\circ\text{C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	17,9	17,8	16,3	17,1	10,9	10,7
	2.	17,5	17,8	16,0	17,4	11,0	10,9
	3.	17,5	17,9	16,3	17,6	11,4	10,5
	4.	17,4	17,3	16,2	17,5	11,4	10,8
	5.	17,6	17,6	16,2	17,1	11,2	11,0
	6.	17,3	17,6	16,2	16,5	11,2	11,3
	7.	17,3	17,3	16,2	16,4	10,9	10,9
	8.	17,4	17,4	16,0	15,7	10,5	10,2
	9.	17,4	17,4	15,4	15,4	10,4	10,1
	10.	17,2	17,3	15,4	15,9	10,6	10,2
Průměrná velikost polštáře [mm]		17,5	17,5	16,0	16,7	11,0	10,7
Směrodatná odchylka [mm]		0,20	0,23	0,34	0,80	0,36	0,40

Příloha 5 Srovnání tlaků přepnutí na dotlak v dutině nástroje na čidle 1: $p_{př1}$ [MPa]
pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_{vs} = 185 \text{ °C}$		$T_{vs} = 220 \text{ °C}$		$T_{vs} = 255 \text{ °C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	17,4	17,1	19,0	17,0	16,7	16,4
	2.	16,7	17,1	18,5	17,1	16,7	16,4
	3.	16,7	17,1	18,8	17,1	16,6	16,4
	4.	16,7	17,1	18,7	17,2	16,6	16,4
	5.	16,7	17,1	18,6	17,2	16,3	16,4
	6.	16,6	17,1	18,6	17,2	16,3	16,5
	7.	16,5	17,0	18,5	17,3	16,1	16,5
	8.	16,5	17,1	18,4	17,2	15,9	16,5
	9.	16,5	17,1	17,6	17,2	15,8	16,4
	10.	16,3	17,1	17,4	17,2	15,7	16,4
Průměrná velikost tlaku $p_{př1}$ [MPa]		16,7	17,1	18,4	17,2	16,3	16,4
Směrodatná odchylka [MPa]		0,29	0,03	0,51	0,08	0,38	0,05

Příloha 6 Srovnání tlaků přepnutí na dotlak v dutině nástroje na čidle 2: $p_{př2}$ [MPa]
pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_{vs} = 185 \text{ °C}$		$T_{vs} = 220 \text{ °C}$		$T_{vs} = 255 \text{ °C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	14,4	13,9	14,3	13,7	14,0	13,9
	2.	13,6	13,9	13,9	13,8	14,1	13,8
	3.	13,6	13,7	14,3	13,8	14,0	13,8
	4.	13,4	14,0	14,0	13,7	14,0	13,8
	5.	13,6	13,8	13,8	13,9	13,6	13,9
	6.	13,3	13,8	13,9	13,9	13,6	13,9
	7.	13,0	13,8	13,8	13,9	13,6	13,8
	8.	13,3	13,7	13,3	13,8	13,4	14,0
	9.	13,4	13,8	13,7	13,8	13,2	13,8
	10.	13,0	13,8	13,4	13,8	13,0	13,7
Průměrná velikost tlaku $p_{př2}$ [MPa]		13,5	13,8	13,8	13,8	13,7	13,8
Směrodatná odchylka [MPa]		0,40	0,09	0,33	0,07	0,37	0,08

Příloha 7 Srovnání maximálních tlaků v dutině nástroje na čidle 1: p_{m1} [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_{vs} = 185\text{ °C}$		$T_{vs} = 220\text{ °C}$		$T_{vs} = 255\text{ °C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	39,1	38,4	41,9	42,0	45,5	45,7
	2.	39,1	38,4	42,1	42,1	45,6	45,8
	3.	39,2	38,4	42,1	42,2	45,6	45,6
	4.	39,1	38,4	42,2	42,1	45,7	45,6
	5.	39,2	38,5	42,1	42,1	45,7	45,7
	6.	39,1	38,4	42,2	42,1	45,8	45,7
	7.	39,1	38,4	42,2	42,1	45,8	45,7
	8.	39,1	38,4	42,2	42,1	45,8	45,6
	9.	39,1	38,5	42,2	42,1	45,8	45,7
	10.	39,0	38,4	42,1	42,2	45,9	45,7
Průměrná velikost tlaku p_{m1} [MPa]		39,1	38,4	42,1	42,1	45,7	45,7
Směrodatná odchylka [MPa]		0,06	0,04	0,09	0,06	0,12	0,06

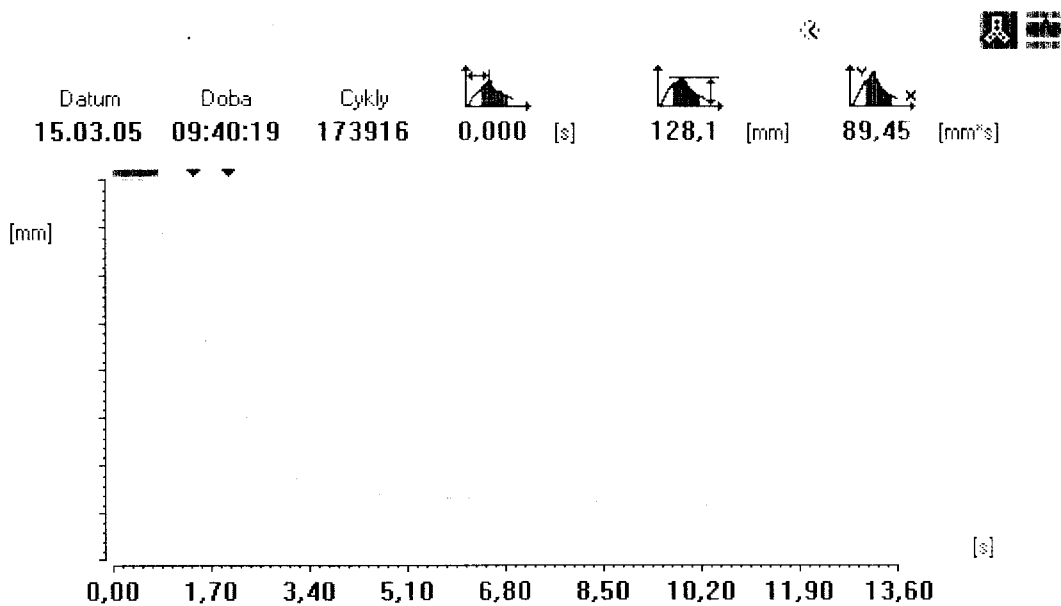
Příloha 8 Srovnání maximálních tlaků v dutině nástroje na čidle 2: p_{m2} [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_{vs} = 185\text{ °C}$		$T_{vs} = 220\text{ °C}$		$T_{vs} = 255\text{ °C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	37,3	36,6	40,5	40,6	44,6	44,8
	2.	37,3	36,6	40,7	40,8	44,8	44,9
	3.	37,5	36,6	40,8	40,8	44,8	44,8
	4.	37,5	36,6	40,8	40,8	44,9	44,8
	5.	37,5	36,7	40,8	40,8	44,9	44,9
	6.	37,5	36,6	40,8	40,7	44,9	44,9
	7.	37,5	36,6	40,9	40,8	44,9	44,9
	8.	37,4	36,6	40,9	40,8	45	44,8
	9.	37,4	36,7	40,8	40,8	45	44,9
	10.	37,3	36,6	40,8	40,9	45,1	44,9
Průměrná velikost tlaku p_{m2} [MPa]		37,4	36,6	40,8	40,8	44,9	44,9
Směrodatná odchylka [MPa]		0,09	0,04	0,11	0,08	0,14	0,05

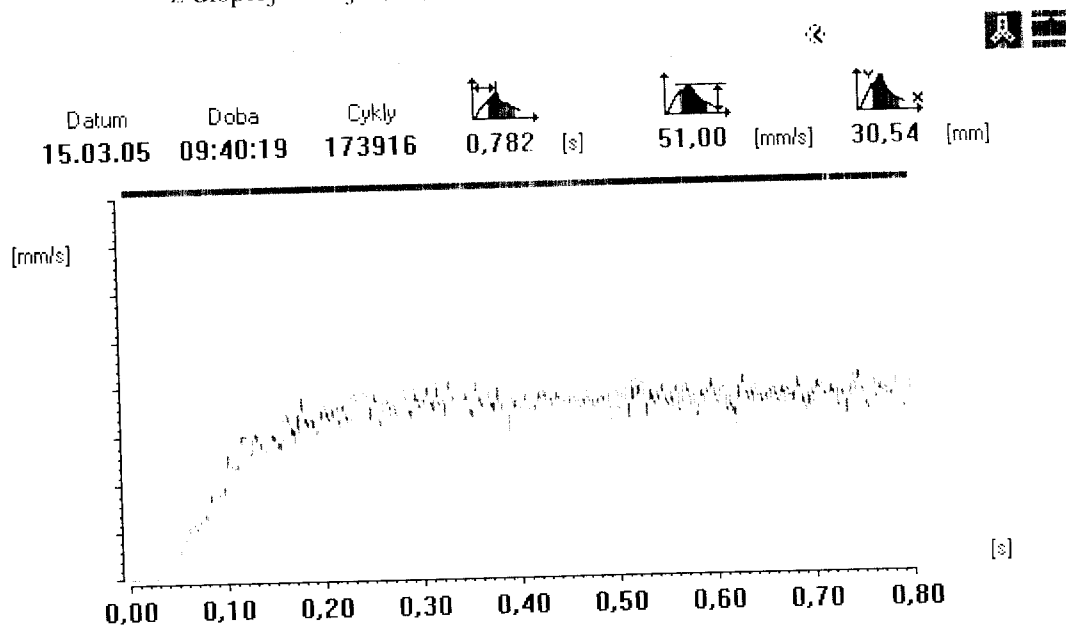
Příloha 9 Srovnání maximálních tlaků hmoty ve válci p_{mv} [MPa] pro různé vstřikovací teploty a způsoby řízení

Vstřikovací teplota		$T_{vs} = 185 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_{vs} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_{vs} = 255 \text{ }^\circ\text{C}$	
Způsob přepnutí na dotlak		od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku	od dráhy šneku	od tlaku
Číslo měření	1.	66,3	68,1	59,3	58,7	59,0	59,4
	2.	66,0	68,1	58,6	58,9	59,2	59,2
	3.	65,9	68,2	58,8	58,7	59,0	59,2
	4.	65,9	68,3	58,7	58,8	59,3	59,0
	5.	65,9	68,2	58,6	58,8	59,3	59,2
	6.	65,7	68,2	58,6	58,9	59,5	59,2
	7.	65,9	68,3	58,7	58,9	59,5	59,1
	8.	65,7	68,4	58,8	58,9	59,7	59,0
	9.	65,9	68,3	58,8	58,7	59,9	59,0
	10.	65,7	68,3	58,7	58,8	59,9	59,1
Průměrná velikost tlaku p_{mv} [MPa]		65,9	68,2	58,8	58,8	59,4	59,1
Směrodatná odchylka [MPa]		0,18	0,10	0,21	0,09	0,33	0,13

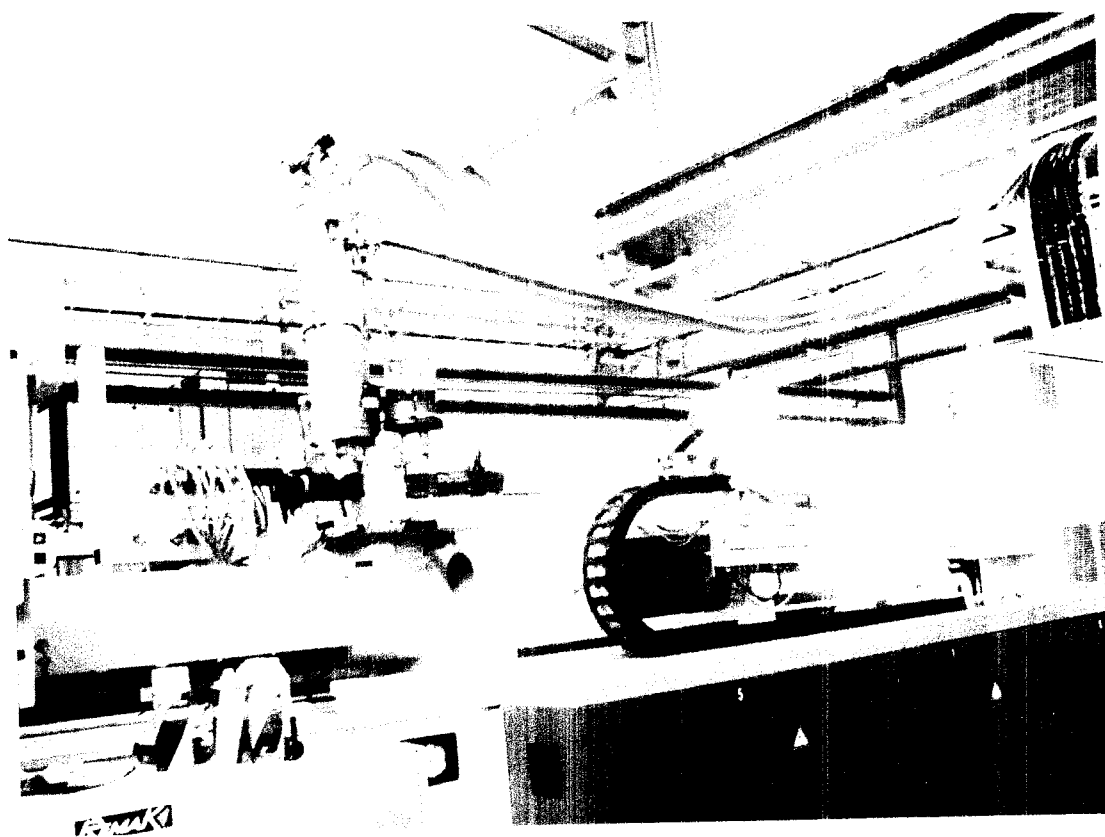
Příloha 10 Dráha šneku během cyklu na výřezu z displeje stroje ($T_{vs} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$, přepnutí od dráhy)



Příloha 11 Rychlost šneku během počátku fáze plnění dutiny formy na výřezu
z displeje stroje ($T_{\text{ss}} = 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$, přepnutí od dráhy)



Příloha 12 Vstřikovací jednotka stroje KM-1000 6100 MC



Příloha 13 Základní technologické parametry pro výrobu kapsy vnější přístrojové desky pro levé řízení

P-70-15-01 F01A Strana 1 z 1		Nastavení základních technologických parametrů		Venture PEGUFORM	
Zakazník	ŠKODA AUTO a. s. Ml. Boleslav	Stroj	KM 1 000/6 100 MC automat		
Výrobek	Kapsa PD vnější LR	Material	SABIC PP compound 7705		
Č. výrobku	113 600 11 01/02/03 00		Onyx	1 1525 0303	
Násobnost	1x		Ivory	1 1525 0503	
Váha výrobku (g)	6	594 8g	Prísady	ne	Acnat 1 1525 0703
Váha zdvihu (g)	5	629 1g	Množství (g)		
SUSENÍ	ANO				
Teplota (°C)	10	80			
Čas (hod)	min	2 hod			
TEPLOTY (°C)					
Pod náspkou	10	50			
Valec	10	200	200	200	205 210 210 210 220
Spíčka	10	220			
Horký rozvod	10	210	210	210	
Temperace formy	10	pevná strana 4 x 40°C	čelisti	pohyblivá strana 6 x 40°C	Sibry
TLAKY					
Uzavírací tlak (kN)	300	9 500			
Pásmo	10	10	9	8	7 6 5 4 3 2 1
vstřikovací tlak (bar)	10				
vstř. rychlost (mm/s)	5				95 100 130
vstř. dráha (mm)	10				30 35 45
Dotlak (bar)	5				50 70
Čas dotlaku (sec)					45 48 55
Odpor šneku (bar)	5				4 2 2
Přepnutí na dotlak		vypnuto			
CASY (sec.)					
	%	min. max.			
Vstřik	10	2,7	2,4	3,0	
Dotlak		8	8,0	8,0	
Plastikace	50	10,5	5,3	15,8	
Chlazení	7	26	24,2	27,8	
Cyklus	3	60	58,2	61,8	
Přepnutí na dotlak		vypnuto			
DRAHY (mm)					
	%	min. max.			
Plastikace	10	120	108	132	
Polštář	20	15	12	18	
Dekomprese 1		20/20			
Dekomprese 2		vypnuto			
Přepnutí na dotlak	10	30	27	33	
RUZNÉ					
Šnekování (ot/min)	±	100			
Vyhazovač		ne			
Tahací jader		Pevná strana		Pohyblivá strana	
				1 x čelist	
				1 x vyhazování	
Priorita tahaču					
Kaskády vzduch. vent.		1	2	3	4 5 6
Dráha start					
stop					
Otevřít při dotlaku-DT					
Poznámky:					
Program robota č.2					
Otevření nástroje pro robota musí být 1 000 mm!!!					
Funkce nástroje a/zavření 1/ vyhazovač - poloha vstřik			b/otevření 1/ odjeti s pohybem mech.čelisti		
2/ čelist(hydr.) - poloha vstřik			2/ čelist(hydr.) - poloha odběr		
3/ zavření formy s pohybem mech.čelisti			3/ vyhazovač - poloha odběr		
Vystavil Javurek J Datum: 1.10.2004 Index 01					

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 27. 5. 2005

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis 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 thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license 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 thesis to full amount.

I compiled the thesis on my own with use of acknowledged sources and on the basis of consultation with the the head of the thesis and consultant.

Date: 27. 5. 2005

Signature: