

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



Disertační práce

Vliv podmínek vstřikování na smrštění
výstřiků z termoplastů

2003

Ing. Pavel Hiseň

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



Disertační práce

Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiků z termoplastů

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071438

2003

Ing. Pavel Hisem

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Obor 23-03V Strojírenská technologie

zaměření

Tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiků z termoplastů

**Influence of injection moulding conditions on the shrinkage
of thermoplastics mouldings**

Ing. Pavel Hisem

Školitel: doc. Ing. Josef Krebs, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	136
Počet obrázků:	65
Počet tabulek:	37
Počet příloh:	7

Anotace

Téma práce: Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiků z termoplastů

Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou vlivu podmínek vstřikování na výrobní a dodatečné smrštění výstřiků z termoplastů. Důraz je kladen na dva materiály: ABS (akrylonitril-butadién-styrén) a na talkem plněný elastomerem modifikovaný polypropylén. Oba materiály se používají pro výrobu lakovaných dílů v automobilovém průmyslu.

V experimentální části je na vstřikovaných zkušebních tělesech tvaru desky hodnocen vliv tloušťky stěny, teploty taveniny a teploty formy na smrštění, přičemž dodatečné smrštění je stanoveno po temperování. Doba a teplota temperace byla stanovena tak, aby přibližně odpovídala průběhu teploty během lakování reálných vstřikovaných dílů.

Pro materiál ABS a vybrané podmínky vstřikování byla provedena numerická simulace procesu vstřikování zkušebních těles a odhad výrobního smrštění s využitím specializovaného programu *STRIMFLOW*. Výsledky experimentálně získané byly porovnány s výsledky získanými pomocí numerické simulace.

Závěry disertační práce poskytují informace o výrobním a dodatečném smrštění zvolených materiálů a lze je použít i pro odhad následných rozměrových změn po lakování vstřikovaných dílů.

Annotation

Theme of presented work: Influence of injection moulding conditions on the shrinkage of thermoplastics mouldings

The presented thesis is concerned with the problems of injection moulding conditions on moulding shrinkage and the post-moulding shrinkage of thermoplastic mouldings. The thesis places emphasis on two materials: ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) and elastomer modified talc - filled polypropylene. Both materials are used for manufacturing of lacquered parts in the automobile industry.

The experimental part evaluates effect of the wall thickness, melt temperature and the mould temperature on the shrinkage, when the post-moulding shrinkage of injection moulded slab specimens is determined after annealing. Annealing time and temperature was set like imitated real temperature course during painting process of real injection moulded parts.

Specialized software *STRIMFLOW* was used for numeric simulation of injection moulding of ABS specimens and assessment of their moulding shrinkage. Results obtained by experiment were compared with *STRIMFLOW*-simulation for selected moulding conditions.

Results of the thesis offers information about the moulding shrinkage and the post-moulding shrinkage of elected materials and it is useful for assessment of the lacquered mouldings deformation.

autor: Ing. Pavel HISEM

Název disertační práce:

Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiků z termoplastů

Influence of injection moulding conditions on the shrinkage of thermoplastic mouldings

Klíčová slova - Keywords

smrštění - shrinkage

výrobní smrštění - moulding shrinkage

dodatečné smrštění - post-moulding shrinkage

výstřik - injection moulded part

vstřikování - injection moulding

termoplasty - thermoplastics

ABS (akrylonitril-butadién-styrén) - ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene)

polypropylén - polypropylene

talek - talc

temperování - annealing

technologické parametry - technological parameters

numerická simulace - numeric simulation

lakování - painting

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	7
1 ÚVOD	11
2 TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1 Fyzikální popis procesu vstřikování termoplastů	13
2.1.2 Vstřikovací cyklus	17
2.2 Smrštění výstřiků z termoplastů	17
2.2.1 Fyzikální vlivy na smrštění výstřiků z termoplastů	19
2.2.1.1 Konformace řetězce a nadmolekulární struktura polymerů	19
2.2.1.2 Stlačitelnost a teplotní roztažnost termoplastů	22
2.2.1.3 Reologické vlastnosti termoplastů	23
2.2.1.4 Orientace makromolekul	30
2.2.1.5 Obsah plniv	32
2.2.1.6 Krystalizace	33
2.2.1.7 Vnitřní pnutí	37
2.2.1.8 Navlhavost a nasákavost	39
2.2.1.9 Botnění a uvolňování nízkomolekulárních látek	40
2.2.2 Vliv technologických parametrů vstřikování na smrštění	41
2.2.2.1 Vliv vstřikovacího tlaku a doby plnění dutiny formy	41
2.2.2.2 Vliv dotlaku	43
2.2.2.3 Vliv teploty formy a doby chlazení	44
2.2.2.4 Vliv teploty taveniny	45
2.2.3 Vliv konstrukce výrobku a formy na smrštění	46
2.2.3.1 Vliv tvaru výrobku a tloušťky stěny	46
2.2.3.2 Vliv konstrukce vtokového kanálu a ústí vtoku	47
2.2.3.3 Vliv konstrukce temperačních okruhů formy	47
2.3 Rozměrová přesnost výstřiků	49
2.3.2 Dosažitelná přesnost	51
2.3.3 Anizotropie změn rozměrů	52
2.4 Analýza procesu vstřikování z hlediska výpočtu smrštění	52
2.4.1 Odhad smrštění pomocí p-v-T diagramu a stavové rovnice	53
2.4.1.2 p-v-T diagramy termoplastů	54
2.4.1.3 Stavové rovnice termoplastů	56
2.4.2 Počítačová simulace procesu vstřikování	57
2.4.2.1 Popis simulačního programu STRIMFLOW	58
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	60
3.1 Záměr experimentálních prací	60
3.2 Charakteristika zkoušených materiálů	61



3.2.1	Akrylonitril-butadién-styrén (ABS).....	61
3.2.1.1	Terluran HH-112	62
3.2.2	Polypropylen modifikovaný elastomerem a talkem.....	62
3.2.2.1	Izotaktický polypropylén	62
3.2.2.2	Modifikace polypropylénu.....	63
3.2.2.3	Minerální plnivo – talek.....	64
3.2.2.4	Kelburon 95610 (R-EMPP)	64
3.2.2.5	Masterbatch – Kelburon 20MBTU	65
3.3	Vstřikovací stroj a nástroj	65
3.4	Volba parametrů experimentu.....	67
3.4.1	Materiálové parametry	67
3.4.2	Konstrukční parametry	67
3.4.3	Volba technologických parametrů vstřikování	67
3.5	Průběh temperace výstřiků	71
3.6	Stanovení výrobního, dodatečného a celkového smrštění	72
3.6.2	Výrobní smrštění	73
3.6.3	Dodatečné smrštění	74
3.6.4	Celkové smrštění	75
3.7	Statistické vyhodnocení naměřených dat faktorovou analýzou rozptylu.....	75
4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	76
4.1	Vyhodnocení smrštění výstřiků z ABS Terluran HH-112	77
4.2	Vyhodnocení výstřiků z polypropylénu	88
4.2.1	Smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610MTU10	88
4.2.2	Smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%	100
4.2.2.2	Tahová zkouška a zkouška rázové a vrubové houževnatosti.....	112
4.2.2.3	Doplňkové měření smrštění ve směru tloušťky stěny výstřiku	114
4.3	Numerická simulace procesu vstřikování programem STRIMFLOW	115
4.3.1	Konstrukce modelu a definice procesu vstřikování	115
4.3.2	Vyhodnocení výsledků numerické simulace.....	116
5	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	122
5.1	Vliv parametrů vstřikování na smrštění výstřiků z ABS Terluran HH-112.....	125
5.2	Vliv obsahu talku a parametrů vstřikování na smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610.....	127
5.2.1	Smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610MTU10 (10% talku)	127
5.2.2	Vliv obsahu talku na smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610.....	129
5.2.3	Vliv obsahu talku na mechanické vlastnosti PP Kelburon 95610.....	130
6	ZÁVĚR.....	132
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	134
8	SEZNAM PŘÍLOH	136

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

α	izobarický koeficient teplotní roztažnosti [K^{-1}]
α	střední součinitel délkové teplotní roztažnosti [$^{\circ}C^{-1}$]
α	hladina významnosti statistického testu
β	izotermický koeficient stlačitelnosti [Pa^{-1}]
ΔL	dráha příčnicku [mm]
Δv	rozdíl měrného objemu v diagramu $p-v-T$ [$cm^{-3} \cdot g^{-1}$]
ε	poměrné prodloužení [%]
ε_B	poměrné prodloužení při přetržení [%]
ε_M	poměrné prodloužení na mezi pevnosti [%]
ε_r	tažnost [%]
Φ	konstanta mocninového zákona - koeficient tekutosti [s^{-1}]
γ	smyková deformace [1]
γ_0	počáteční smyková deformace v čase $t=0$ [1]
$\gamma_{píst}$	smyková deformace pístu reologického modelu [1]
$\gamma_{pruž}$	smyková deformace pružiny reologického modelu [1]
γ_{∞}	limitní rovnovážná hodnota smykové deformace v čase $t \gg \theta$ [1]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [s^{-1}]
η_n	konstantní viskozita v oblasti nízkých smykových rychlostí [$Pa \cdot s$]
η_{zd}	zdánlivá viskozita [$Pa \cdot s$]
η	dynamická viskozita [$Pa \cdot s$]
η_{∞}	viskozita při nekonečném smyku [$Pa \cdot s$]
φ_k	objemový zlomek krystalické fáze v čase t [1]
φ_{km}	objemový zlomek krystalické fáze na konci primární krystalizace [1]
π, ω, R'	parametry Van der Waalsovy stavové rovnice
θ	relaxační doba - Maxwellův model [s]
θ	retardační doba - Kelvinův model [s]
θ_i	relaxační doba i -tého prvku Maxwellova generalizovaného modelu [s]
θ_i	retardační doba i -tého prvku Kelvinova generalizovaného modelu [s]
σ	tahové napětí [MPa]
σ_M	napětí na mezi pevnosti [MPa]
τ	smykové napětí [$N \cdot m^{-2}$], [Pa]
τ_0	počáteční smykové napětí v čase $t=0$ [$N \cdot m^{-2}$]
$\tau_{píst}$	smykové napětí pístu reologického modelu [$N \cdot m^{-2}$]
$\tau_{pruž}$	smykové napětí pružiny reologického modelu [$N \cdot m^{-2}$]

A, B	označení tvarových dutin formy
a_k	vrubová houževnatost [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]
A_k	energie, spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa s vrubem [J]
b	šířka zkušebního tělesa v místě vrubu [mm]
b_k	šířka vrubu [mm]
C	konstanta rovnice teplotní závislosti viskozity - součinitel teplotní závislosti
$c_1, c_{2,L}, c_{2,G}$	parametry gWLF rovnice
D	gradient rychlostí [s^{-1}]
F	síla [N]
$f(t)$	kontinuální distribuční funkce (spektrum) retardačních dob Kelvinova generalizovaného modelu
F_{max}	maximální síla (tahová zkouška) [N]
F_p	velikost přidržovací síly [kN]
G	modul pružnosti ve smyku [Pa]
$g(t)$	kontinuální distribuční funkce (spektrum) relaxačních dob Maxwelllova generalizovaného modelu
G_e	modul pružnosti ve smyku připojené pružiny Maxwelllova generalizovaného modelu [Pa]
G_i	modul pružnosti ve smyku i-tého prvku Maxwelllova generaliz. modelu [Pa]
h_k	tloušťka zkuš. tělesa v místě vrubu [mm]
J_0	poddajnost pružiny v generalizovaném Kelvinově modelu [Pa^{-1}]
J_i	poddajnost i-tého prvku Kelvinova generalizovaného modelu [Pa^{-1}]
K	konstanta mocninového zákona - index konzistence [Pa]
K, n	parametry Avramiho rovnice
K_0	konstanta rovnice teplotní závislosti viskozity - materiálová konstanta
L	délka toku taveniny
$\log a_T$	posuvný faktor při časově teplotní superpozici relaxačního modulu
$\log a_{\tilde{T}_0}$	posuvný faktor ve zvolené referenční teplotě $\tilde{T}_0$ (gWLF rovnice)
$\log E$	logaritmus modulu pružnosti [Pa]
m	hmotnost výstřiku [g]
N	počet center nukleace při primární krystalizaci
n, m	konstanty (součinitele) mocninového zákona - index toku
n_s	otáčky šneku [min^{-1}]
p	tlak [MPa], [Pa]
p_d	dotlak [MPa]
p_H	hydraulický tlak [MPa]
p_i	tlak v dutině formy [MPa]
p_v	vstřikovací tlak [MPa]

$p-v-T$	tlak–měrný objem–teplota (diagramy $p-v-T$)
Q	objemový průtok taveniny plastu [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
r_{max}	maximální rychlost růstu krystalických zárodků [m s^{-1}]
s	posuv šneku [mm]
S_L	lineární (délkové) smrštění [%]
S_M	výrobní smrštění [%]
S_{min}	minimální tloušťka stěny výstřiku [mm]
S_{Mn}	výrobní smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny [%]
S_{Mp}	výrobní smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny [%]
S_P	dodatečné smrštění [%]
S_{Pn}	dodatečné smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny [%]
S_{Pp}	dodatečné smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny [%]
S_T	celkové smrštění [%]
S_{Tn}	celkové smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny [%]
S_{Tp}	celkové smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny [%]
S_V	objemové smrštění [%]
t	čas [s], [h]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$], [K]
$\dot{T}$	rychlost ochlazování [$\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$]
T°	referenční teplota (298 K stavová rovnice) [K]
$\tilde{T}_0$	referenční teplota (gWLF rovnice) [K]
$t_{0,5}$	poločas krystalizace [s]
t_d	doba dotlaku (doba doplňování dutiny formy) [s]
T_F	teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	teplota viskózního toku [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	teplota skelného přechodu (teplota zesklenní) [$^{\circ}\text{C}$]
t_{ch}	doba chlazení [s]
T_k	krystalizační teplota [K]
T_k	teploty jednotlivých pásem tavicí komory [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	teplota tání krystalitů [$^{\circ}\text{C}$]
T_{m1}, T_{m2}	teploty temperačního média obou částí formy [$^{\circ}\text{C}$]
T_p	doba plastikace [s]
$T_{r,max}$	teplota při maximální rychlosti růstu krystalických zárodků [K]
t_S	doba zatuhnutí vtoku [s]
T_t	teplota taveniny při výstupu z trysky [$^{\circ}\text{C}$]
T_{tr}	teplota trysky [$^{\circ}\text{C}$]
t_v	doba plnění formy (doba vstřiku) [s]
v	měrný objem [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{g}^{-1}$], [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

v	rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v°	měrný objem při teplotě T° (298 K) a atmosférickém tlaku [$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$]
V_0	počáteční objem vzorku - výpočet X [m^3]
v_θ, B, C, v_r	parametry Taitovy stavové rovnice
V_∞	limitní hodnota objemu vzorku - výpočet X [m^3]
v_C	měrný objem výstřiku v bodě „C“ (diagram p - v - T) [$\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$],
v_E	měrný objem výstřiku v bodě „E“ (diagram p - v - T) [$\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$],
V_f	objem dutiny formy při 23°C [cm^3]
V_t	objem vzorku v čase t - výpočet X [m^3]
V_v	objem výstřiku při 23°C [cm^3]
X	relativní objemová změna (konverze) během primární krystalizace [1]
ABS	akrylonitril-butadién-styrén
ANOVA	analýza rozptylu (Analysis of Variance)
CA	acetát celulosy
EPDM	Etylén-Propylén-Dien-Monomer
EPR	etylén-propylénový kaučuk
EVA	etylén-vinyl-acetát
gWLF	generalizovaná Williamsova–Landelova–Ferryho (rovnice)
IT	stupeň přesnosti
IPE	lineární polyetylén
PA	polyamid
PC	polykarbonát
PE	polyetylén
PMMA	polymetylmetakrylát
POM	polyoxymetylén
PP	polypropylén
PP+EPDM	polymerní směs PP a EPDM
PP-B	polypropylén - blokový kopolymer
PP-H	polypropylén - homopolymer
PS	polystyrén
PTFE	polytetrafluoretylén
PUR	polyuretan
PVC	polyvinylchlorid
R-EMPP	reaktorově elastomerem modifikovaný polypropylen
rPE	rozvětvený polyetylén
SAN	styrén-akrylonitril
TEM	transmisní elektronový mikroskop
TP	termoplast
WLF	Williamsova–Landelova–Ferryho (rovnice)

1 ÚVOD

Termoplasty se zejména od druhé poloviny dvacátého století zařadily mezi rovnocenné a mnohdy nepostradatelné konstrukční materiály ve všech průmyslových odvětvích. Z hlediska výrokové základny plastových dílců a součástí je rozhodující technologií vstřikování termoplastů. Vývoj této technologie odráží na jedné straně technický pokrok v oblasti strojírenství, elektrotechniky a výpočetní techniky, na druhé straně je to snaha vyrábět co nejlevněji a s minimálními nároky na spotřebu energií. V praxi to znamená přechod na účinnější systémy řízení a regulace výrobního procesu. Je to zejména bezodpadové vstřikování plastů, snížení časů a spotřeby materiálů při uvádění strojů do provozu a dosažení optimálního režimu, zavádění recyklace a zpracování technologického i užitkového plastového odpadu. Snaha o docílení špičkové kvality výrobků vede k maximální automatizaci výrobních pružných systémů s cílem vyloučení lidského faktoru z technologického procesu, k vytváření nových systémů řízení, k automatizaci a optimalizaci procesu vstřikování. Dále pak k využívání výpočetní techniky jak v oblasti konstruování výrobku a formy, tak i v konstrukci vstřikovacího stroje, v návrhu vlastního technologického procesu, v plánování organizace výroby a při zkoušení a kontrole jakosti.

Jedním z největších odběratelů vstřikovaných výrobků je automobilový průmysl. Velký důraz je zde kladen na rozměrovou přesnost a její další reprodukovatelnost ve výrobním procesu, protože výrobky se mnohdy dále kompletují. Jsou to výrobky s dobrými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, často značně členitých tvarů. I přes neustálý vývoj vstřikovací techniky se mohou vyskytovat nedostatky, které ovlivňují kvalitu finálního výrobku, proto jsou nezanedbatelnou částí objemu výroby zmetky a to jak z důvodu kvality povrchu, tvaru, tak i rozměru. Rozměrová přesnost a stálost komplikuje použití výrobků v technicky náročných aplikacích, nebo při kompletaci kombinovaných plastových dílů, kdy musejí jednotlivé součásti dosahovat přesných rozměrů.

V současné době se značně zvýšil počet vyráběných vstřikovaných dílů, které se povrchově upravují lakováním vodou ředitelnými laky, při kterém jsou vystaveny určité teplotní zátěži zejména během sušení a vytvrzování laků. Vlivem tohoto dodatečného tepelné zatížení dochází ke strukturním změnám ve výstřiku, které se projevují dodatečnými změnami rozměrů. Velká část lakovaných dílů se vyrábí pro automobilový průmysl, kde jsou velké nároky na rozměrovou přesnost.

Pro určení výrobního a dodatečného a celkového smrštění plastů při vstřikování a podmínek pro jejich stanovení byly definovány a zavedeny normalizované zkoušky. Výsledky těchto zkoušek slouží především jako podklady při konstrukci forem pro vstřikování, kdy rozměry dutiny vstřikovací formy jsou konstruovány s ohledem na míru smrštění zpracovávaného materiálu, a musí být o tuto míru větší. Velikost smrštění plastů

je v materiálových listech nejčastěji udávána buď v poměrně velkém rozmezí hodnot, nebo jako jedna hodnota při dohodnutých podmínkách vstřikování. Většinou v nich ale není uvedena velikost dodatečného smrštění, která je důležitá hlavně při montáži a slícování jednotlivých dílů z nichž některé prošly lakovacím procesem a tedy intenzivní teplotní zátěží. Tyto rozměrové změny mají například vliv na montáž nárazové lišty a lícování zkompletovaných lakovaných nárazníků na karoserii vozu.

Smrštění vstřikovaných dílů není materiálovou konstantou, ale je ovlivněno interakcí mnoha technologických faktorů. Míra rozměrových změn výrobků závisí především na vlastnostech vstupního materiálu, tvaru výrobku a technologických podmínkách procesu vstřikování. Problematika rozměrové přesnosti a stálosti finálního výrobku v závislosti na podmínkách vstřikování je tématem této disertační práce. Je zde řešena závislost výrobního, dodatečného a celkového smrštění na vybraných materiálových, konstrukčních a technologických parametrech výstřiků ve tvaru desky – zkušebních těles – vyráběných ze dvou vybraných materiálů, amorfního (ABS) a semikrystalického (R-EMPP) termoplastu, používaných při výrobě lakovaných dílů automobilů.

Pro řešení této práce jsem si stanovil tyto cíle:

- Vypracování teoretického rozboru sledované problematiky výrobního a dodatečného smrštění výstřiků z termoplastů.
- Provedení simulačních výpočtů pro vybraný materiál a podmínky vstřikování simulačním programem *STRIMFLOW*. Vyjádření možností tohoto simulačního programu v oblasti určování smrštění výstřiků z termoplastů.
- Provedení experimentálních měření a vyhodnocení vzájemných závislostí vlivu vybraných technologických parametrů vstřikovacího cyklu, tloušťky stěny výstřiku a množství minerálního plniva (pro R-EMPP) na velikost výrobního a dodatečného a celkového smrštění pro vybrané materiály.

2 TEORETICKÁ ČÁST

Problematika smrštění výstřiků z termoplastů je vzhledem k velkému množství působících faktorů poměrně složitá a v odborné literatuře je jí věnováno poměrně málo pozornosti. Smrštění je děj, jehož výsledek je dán interakcí velkého množství parametrů (typu zpracovávaného materiálu, termodynamických podmínek, tvaru výrobku, vstřikovacích parametrů aj.) a liší se dle polohy v dutině formy. Některé z parametrů mají výsadní postavení, jiné lze zase považovat za procesně nevýznamné, jejich vliv ale nelze nikdy chápat separátně. V mnoha případech se může vliv některých parametrů na smrštění navzájem umocňovat, u jiných naopak působí proti sobě.

Pro popsání konkrétního působení těchto vlivů je nezbytné pochopení fyzikálních zákonitostí dějů odehrávajících se v materiálu vstřikovaného výrobku během procesu vstřikování a i po skončení tohoto procesu.

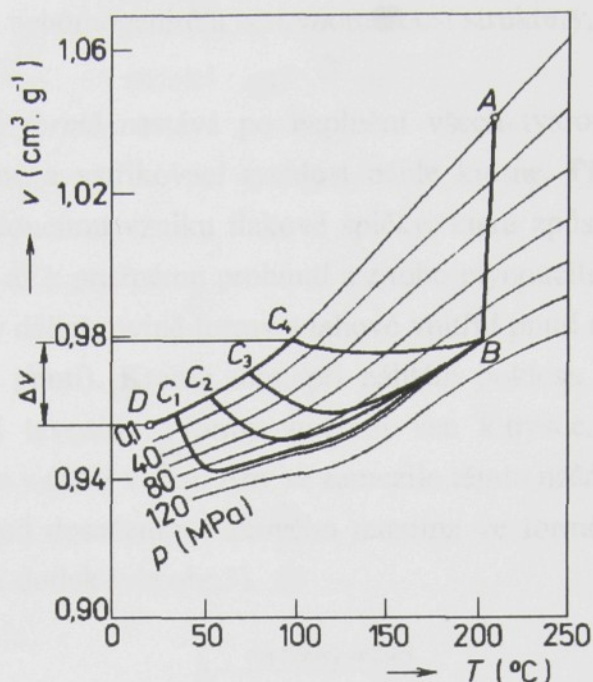
2.1 Fyzikální popis procesu vstřikování termoplastů [1, 2]

Z hlediska zpracovávaného plastu má vstřikovací proces tyto hlavní fáze: *plastikace materiálu v tavicí komoře stroje, vstříknutí taveniny do formy, dotlak a chladnutí hmoty ve formě, vyjmutí výstřiku z formy.*

Pro popis procesu vstřikování je vhodné použít diagram p - v - T (tlak – měrný objem – teplota), který ukazuje vzájemnou závislost tří hlavních stavových veličin u daného typu polymeru. Na obr. 1 je uveden průběh vstřikování v diagramu p - v - T polystyrenu, běžného amorfního termoplastu. Pro jednoduchost je uvažován téměř rovnovážný diagram, tak jak odpovídá pomalému ochlazování. Při rychlém ochlazování, jaké se vyskytuje při vstřikování termoplastů, jsou křivky poněkud posunuty, posunutí je závislé na rychlosti ochlazování. Křivky zvýrazněné tlustou čarou znázorňují schematický průběh změn během vstřikovacího procesu.

Plastikace materiálu v tavicí komoře stroje

V první fázi procesu vstřikování je termoplast plastikován v tavicí komoře. Při plastikaci se šnek otáčí a současně posouvá zpět. Plast ve formě granulí vstupuje do procesu s teplotou $T = 20\text{ °C}$ při atmosférickém tlaku a pak následuje jeho ohřev a tavení vlivem elektrického topení tavicí komory a třením hmoty při hnětení šnekem. Pro jednoduchost je možno předpokládat, že ohřev probíhá při atmosférickém tlaku. Plastikace je skončena v bodě A . Bod A představuje výchozí stav plastu před vstříknutím do formy a je důležité, aby tavenina plastu byla v tomto bodě dostatečně homogenní a její teplota byla pro jednotlivé vstřikovací cykly udržována co nejpřesněji. Tato teplota totiž přímo ovlivňuje viskozitu taveniny, velikost a průběh tlaku ve formě, dobu chladnutí výstřiku, stupeň orientace makromolekul aj., a tím i rozměry a vlastnosti výstřiků.

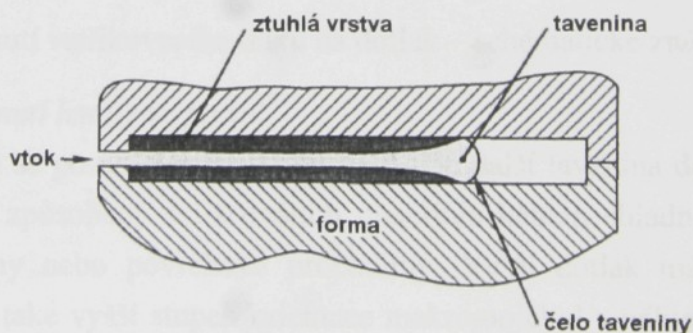


Obr. 1. Průběh vstřikování v diagramu p - v - T polystyrenu [1]

Vstříknutí taveniny do formy

Úsek A - B na obr. 1 reprezentuje vstřikovací fázi, kterou lze rozdělit na dvě části: plnění formy a stlačení hmoty ve formě. Teplota taveniny klesne přitom jen nepatrně, tlak prudce vzroste z atmosférického až na vstřikovací.

Plnění formy se provádí vstříknutím taveniny do uzavřené formy axiálním posuvem šneku. Plnění probíhá dostatečně velkou rychlostí, aby se zabránilo předčasnému chladnutí a tuhnutí hmoty. Při správném plnění nevteká tavenina do formy volným paprskem, ale postupně ji vyplňuje za vzniku plastického jádra (viz obr. 2).

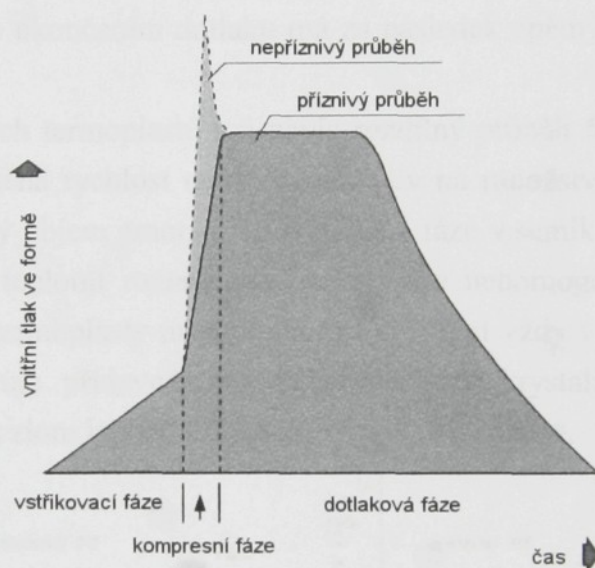


Obr. 2. Mechanismus plnění dutiny formy [3]

Na stěně formy vniká téměř okamžitě ztuhlá vrstva plastu, která plastické jádro částečně tepelně izoluje. V jednotlivých vrstvách výstřiku se v důsledku rozdílných teplot, smykových rychlostí a rychlostí toku mění viskozita taveniny a dochází k nerovnoměrné orientaci makromolekul a případně plniv. I když se jedná o děj velmi rychlý, je nutné počítat s ochlazováním polymeru a s měnícími se tlakovými poměry v tekoucí tavenině v závislosti na délce toku. Rychlé změny tlaku, teploty a viskozity taveniny během plnění

formy mají za následek nehomogenitu a nerovnoměrnost struktury, orientaci a vnitřní pnutí výstřiků.

Slačení hmoty ve formě nastává po naplnění všech tvarových dutin formy, tlak taveniny prudce stoupne a vstřikovací rychlost náhle klesne. Při pozdním přepnutí na dotlak dochází k nežádoucímu vzniku tlakové špičky, která způsobuje vysoké namáhání formy, které může vést až k pružnému prohnutí a z toho plynoucího přeplnění formy. Dále může vzniknout otřep v dělicí rovině formy a tahové vnitřní pnutí na povrchu výstřiku (viz kap. 2.2.1.7, expanzní pnutí). Kromě toho při náhlém poklesu tlakové špičky nastane zpětný tok chladnoucí taveniny z formy směrem ven k trysce, což zvyšuje orientaci makromolekul, zejména v okolí vtoku. Aby se zamezilo těmto nežádoucím jevům, je nutné v určitém okamžiku před dosažením tlakového maxima ve formě snížit vstřikovací tlak posouvající šnek na tzv. dotlak (viz obr.3).



Obr. 3. Vliv přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak – schématické znázornění [4]

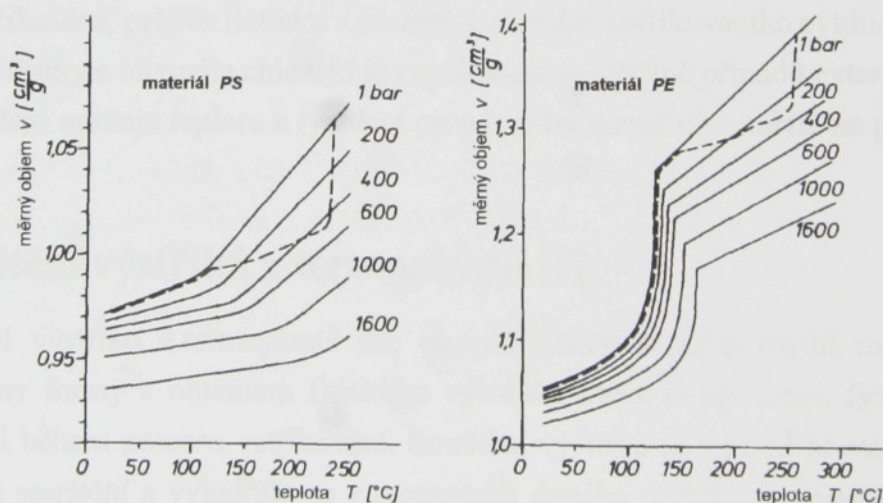
Dotlak a chlazení hmoty ve formě

Během dotlaku se po ukončení vstřiku dotlačuje další tavenina do formy a nahrazuje tak úbytek objemu způsobený smršťováním materiálu během chlazení, aby ve výstřiku nevznikaly staženiny nebo povrchové propadliny. Vyšší dotlak má za následek větší rozměry výstřiku a také vyšší stupeň orientace makromolekul v některých partiích, neboť ve fázi dotlaku má již tavenina poměrně vysokou viskozitu. Na obr.1 úseky $B-C_1$ až $B-C_4$ odpovídají ochlazování a tuhnutí hmoty ve formě v různých místech výstřiku. Čára $B-C_1$ platí pro velmi rychle chladnoucí povrchové vrstvy (prudký pokles teploty při ještě nepatrném poklesu tlaku), čára $B-C_4$ pro pomalé chlazení vnitřku stěny (pomalý pokles teploty při rychlejším poklesu tlaku). Body C_1 až C_4 určují stav příslušného místa výstřiku při otevření formy, tj. při dosažení atmosférického tlaku. Povrch (C_1) má při tom nejnižší teplotu, jádro stěny (C_4) nejvyšší. Pro velikost objemových změn hmoty je nejdůležitější její termodynamický stav v okamžiku zatuhnutí vtokového kanálu, neboť již dále nemůže do dutiny formy nic přitékat ani odtékat. Po vyjmutí z formy pokračuje chlazení výstřiku

dále, až všechna místa mají stejnou teplotu (20°C). Rozdíl měrného objemu Δv mezi body C_4 a D představuje největší zmenšení měrného objemu ve výstřiku od okamžiku otevření formy do ochlazení výstřiku na 20°C , čili objemové smrštění (je asi 3x větší než lineární smrštění rozměru). Nejmenší zmenšení měrného objemu (nejmenší smrštění) bude mezi body C_1 a D . Tyto rozdíly ve smrštění jsou potom příčinou vzniku vnitřního pnutí. Čím budou na čáře atmosférického tlaku body C_1 , C_2 , C_3 a C_4 blíže u sebe, tím budou menší rozdíly smrštění a vnitřního pnutí (malá a rovnoměrná tloušťka stěn). Čím budou na čáře atmosférického tlaku body C_1 až C_4 více vlevo, tím menší bude průměrné smrštění výstřiku (delší chlazení ve formě za působení dotlaku).

Ideální křivka dotlaku má mít v celém svém průběhu sestupnou tendenci, tj. měrný objem se má stále snižovat. Jakékoliv přechodné zvětšení měrného objemu způsobené poklesem za tlakovou špičku ve formě způsobenou pozdním přepnutím na dotlak, nebo způsobené předčasným ukončením dotlaku má za následek zpětný tok taveniny a zvýšení orientace.

U semikrystalických termoplastů má navíc rozdílný průběh fáze chladnutí v různých místech výstřiku, zejména rychlost ochlazování, vliv na množství krystalické fáze a její strukturu. Různý měrný objem amorfni a krystalické fáze v semikrystalickém termoplastu s různými koeficienty teplotní roztažnosti tak zvyšuje nehomogenitu výstřiku a vnitřní pnutí. Semikrystalické termoplasty mají objemové smrštění vždy větší než je u amorfni, protože se zde objevuje přídavné smrštění způsobené krystalizací. Tím nastane při krystalizační teplotě T_m zlom izobar v diagramu p - v - T viz. obr. 4.



Obr. 4. Schématické znázornění průběhu vstřikování v diagramu p - v - T amorfniho (PS) a semikrystalického (PE) termoplastu [5]

Vyjmutí výstřiku z formy

Během procesu chladnutí taveniny klesá tlak v dutině formy až na hodnotu zbytkového tlaku, pod kterým se již ztuhlá hmota nachází v dutině formy před okamžikem otevření. Dostatečně vysoký zbytkový tlak je nezbytný pro eliminaci vzniku propadlin. Pokud je ovšem příliš vysoký, je pro vyhození výrobku zapotřebí zvýšené vyhazovací síly

a vzniká nebezpečí zdeformování výrobku při vyjímání z formy. Maximální teplota při vyhození výrobku z formy musí být taková, aby byl už dostatečně tuhý a při vyjímání z formy se nedeformoval. Po vyjmutí z formy (bod C) pak pokračuje chladnutí výstřiku mimo formu, až se jeho teplota vyrovná s okolní, což je dáno bodem D (viz. obr. 1). Tím je celý cyklus uzavřen.

Vzhledem k rychlým časovým změnám p , v , T zůstává většina oblastí struktury ve výstřiku ve stavu nerovnovážném. Nerovnovážnost struktury a nehomogenita výstřiku jsou tedy dány podstatou vstřikovacího procesu a nelze se jim vyhnout.

2.1.2 Vstřikovací cyklus [6]

Z hlediska vstřikovacího stroje popisuje vstřikovací proces tzv. vstřikovací cyklus. Vlastní vstřikovací cyklus tvoří sled po sobě jdoucích operací dle nastavených parametrů na vstřikovacím stroji. Jeho počátkem bývá zpravidla impuls k uzavření formy. Hlavní části vstřikovacího cyklu mají nejčastěji tento časový průběh: 1 - uzavření formy, 2 - přisunutí vstřikovací jednotky, 3 - plnění dutiny formy, 4 - dotlak, 5 - plastikace, 6 - odsunutí vstřikovací jednotky, 7 - otevření formy a vyhození výstřiku.

Moderní vstřikovací stroje jsou vybaveny mikropočítači, které umožňují přesné řízení a zpětnovazební regulaci vstřikovacího procesu a zabezpečují tak poloautomatický, nebo plně automatický provoz stroje a samočinné dodržování nastavených technologických parametrů, k nimž patří teplota vstřikované hmoty, průběh vstřikovacího tlaku, průběh rychlosti vstřikování, průběh dotlaku a časové rozčlenění vstřikovacího cyklu.

Teplota formy a intenzita chlazení je regulována ve většině případů externí temperační jednotkou, která udržuje teplotu a rychlost proudění temperačního média na požadovaných hodnotách.

2.2 Smrštění výstřiků z termoplastů [7]

Smrštění výstřiku z termoplastů lze obecně definovat jako rozdíl mezi objemem tvarové dutiny formy a objemem finálního výrobku, který je způsoben fyzikálními ději probíhajícími během procesu vstřikování. Smrštění výstřiků se v praxi převážně stanovuje jako délkové smrštění a vyjadřuje se v procentech daného rozměru tvarové dutiny formy, ojediněle se vyjadřuje také jako objemové smrštění. Vzájemný poměr mezi smrštěním délkovým (lineárním) a objemovým je přibližně 1:3.

Smrštění plastu není při vstřikování materiálovou konstantou, ale je závislé na tepelně mechanické historii výstřiku, tj. na technologickém režimu výroby a jeho geometrickém tvaru. Projevuje se hlavně v průběhu tuhnutí taveniny polymeru a v čase bezprostředně následujícím po vyjmutí výstřiku z formy. Objem výrobku po vyjmutí z formy a tím i

velikost jeho rozměrů je výsledkem dvou dějů, probíhajících současně v tvarové dutině formy v poslední části výrobního cyklu:

*smrštění tuhnoucí taveniny polymeru v důsledku snižování teploty
a elastického vyrovnávání vznikajících objemových deformací.*

Smrštění je způsobené kombinací teplotního smrštění, objemové relaxace a relaxace orientace makromolekul termoplastu a u semikrystalických termoplastů má navíc vliv krystalizace. Výsledný objem výstřiku je určen především jeho teplotou a tlakem v dutině formy v okamžiku zatuhnutí vtoku. Z p - v - T diagramu vyplývá, že pokud bude za konstantní teploty zatuhnutí vtoku zvýšen vnitřní tlak v okamžiku zatuhnutí, poklesne měrný objem (vzroste hustota a hmotnost) výstřiku a dojde k redukci míry smrštění, protože to bude více kompenzováno elastickým odpružením hmoty a naopak při snížení vnitřního tlaku dojde ke zvětšení míry smrštění.

Ve zmenšené intenzitě však pokračuje zmenšování objemu i po delším časovém odstupu od vyrobení součásti, a proto se celková hodnota smrštění (*celkové smrštění*) dělí na výrobní smrštění (měřené 16 až 24 hodin po vyrobení), zkráceně nazývané *smrštění*, a na smrštění měřené po temperování nebo po delším časovém odstupu od výroby – *dodatečné smrštění*, nazývané též jako *dosmrštění*. Dodatečné smrštění bývá obvykle několikanásobně nižší než smrštění výrobní a stanovuje se z rozdílu mezi rozměry vstřikovaného tělesa před a po dodatečné úpravě, kdy podmínkami pro dodatečnou úpravu mohou být kromě temperace například i podmínky pro úpravy povrchu, skladování nebo používání. Velikost dodatečného smrštění může být ovlivněna navlhavostí plastu popř. ztrátou nízkomolekulárních sloučenin. *Celkové smrštění* pak vyjadřuje rozdíl mezi rozměry výstřiku po dodatečné úpravě a rozměry tvarové dutiny formy.

Protože se vstřikované výrobky dávají do používání brzy po vyrobení, probíhá dodatečné smrštění často až souběžně s následujícími funkčními rozměrovými změnami. Jelikož se při vyšších teplotách dodatečné smrštění urychluje, dá se zčásti předem realizovat tepelným zpracováním (temperováním v horké komoře při teplotě dané konkrétnímu plastu) a omezit tak nežádoucí změny rozměrů během používání výrobků s vysokými požadavky na přesnost rozměrů. Podmínky temperování termoplastů je nutné stanovovat experimentálně s ohledem na tvar výrobku a jeho strukturu. Teplota temperování by neměla překročit teplotu, při které by mohlo dojít k tvarovým deformacím. Pokud není v příslušných materiálových normách jiné ustanovení tak pro amorfni termoplasty bývá teplota temperace odvozována od teploty odolnosti dle Vicata (snížená o 20°C), resp. pro semikrystalické termoplasty pak od střední teploty tání krystalické fáze (snížená o 40°C). Doba temperování závisí hlavně na tloušťce stěn a stanoví se zkušebně. Po skončení temperování musí dojít k pozvolnému ochlazování výrobků. Pro některé druhy termoplastů, zvláště semikrystalické (např. PA, POM) je výhodnější provádět temperování v kapalném prostředí, ve vodní nebo olejové lázni.

Je třeba dodat, že výrobní i dodatečné smršťení bývá anizotropní. Příčinou anizotropie smršťení jsou jednak vlivy struktury (orientace makromolekul, obsah plniva, stupeň krystalinity) a jednak vliv tvaru výstřiku. Výrobní i dodatečné smršťení rozlišujeme podélné (ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny) a příčné (ve směru kolmém ke směru toku taveniny).

Tváření termoplastů technologií vstřikování je složitý tepelně mechanický proces, na němž se podílí tvářecí stroj, forma a tvářený polymer. Objemové změny výstřiku a tím i délkového smršťení jsou tedy ovlivňovány mnoha materiálovými, konstrukčními a technologickými faktory, z nichž každý je zatížen určitým rozptylem. Rozbor vlivů jednotlivých faktorů na smršťení je uveden v následujících kapitolách.

2.2.1 Fyzikální vlivy na smršťení výstřiků z termoplastů

2.2.1.1 Konformace řetězce a nadmolekulární struktura polymerů [8, 9, 10]

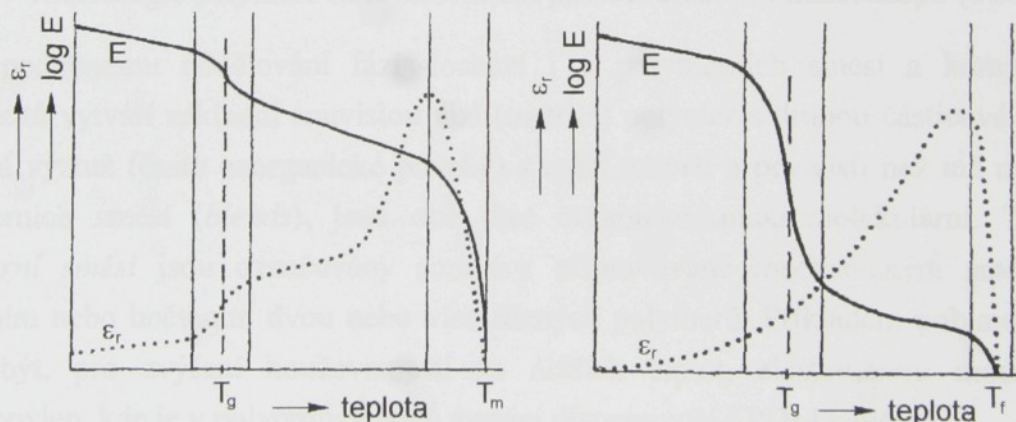
Na vlastnosti plastů včetně velikosti smršťení má velký vliv jejich nadmolekulární uspořádání – *morfologie polymerů*. Morfologie polymerů zahrnuje takové faktory, jako je tvar molekul, stupeň krystalizace, tvar krystalitů, jejich velikost, orientace molekul a plniv, fázovou strukturu polymerních směsí a kompozitů, doménovou strukturu blokových kopolymerů atd.

Obsahuje-li polymer pouze dvojvazné monomerní jednotky, mohou být jeho makromolekulární řetězce pouze lineární. Lineární polymery mají jednotlivé segmenty uspořádány v řadě za sebou do lineárních řetězců. Obsahuje-li polymer troj- a vícevazné monomerní jednotky, budou jeho řetězce rozvětvené nebo zesíťované. Zesíťované uspořádání molekul je nahodilé, amorfní a může vzniknout už v procesu přípravy polymeru (např. polykondazace reaktoplastů) a nebo až dodatečným pospojováním hotových lineárních řetězců prostřednictvím příčných vazeb (např. vulkanizace kaučuků, radiační síťování polyetylenu).

Polymerní řetězce jsou ohebné. Jejich ohebnost je podmíněna možností rotací kolem jednoduchých vazeb v řetězci. V důsledku vnitřních rotací se části řetězce – *segmenty* – dostávají navzájem do různých poloh, takže detailní tvar – *konformace* – řetězce se během času mění. Při vyšších teplotách, v tavenině probíhají konformační přeměny snadno a průměrný tvar řetězce se blíží neuspořádané, nahodile sbalené klubkovité konformaci. Tvar klubka se působením vnější síly snadno mění (stlačování, napřimování) a tento děj, který je vratný, je jednou z charakteristických vlastností polymerů a podmiňuje některé jejich vnější projevy, které se u jiných typů látek nevyskytují. K takovým projevům patří kaučukovité chování, orientace molekul, nelineární závislost viskozity taveniny na smykovém napětí atd. V některých časových a teplotních oblastech jsou konformační přeměny značně bržděny, a tento jev přispívá k výrazné viskoelasticitě polymerních soustav. Ke konformačním přeměnám dochází snadno za vyšších teplot a s klesající

teplotou se zpomalují. Chování plastů se obvykle posuzuje vzhledem k *přechodovým teplotám*, tedy teplotám při kterých dochází k výrazným změnám jejich vlastností.

U termoplastů mohou lineární molekuly, pod které budeme v tomto smyslu počítat i molekuly s rozvětvením, vytvářet více a nebo méně uspořádanou nadmolekulární strukturu. Plasty, které se vyznačují neuspořádanou strukturou tvoří skupinu *amorfních termoplastů*. *Semikrystalické termoplasty* jsou v tuhém stavu složeny ze dvou fází, *krystalické fáze* složené z *krystalitů* (pravidelně naskládané molekulární útvary) a *fáze amorfni* což jsou oblasti složeny jednak z úseků řetězců se strukturními poruchami a jednak z krystalizace schopných řetězců, které se nestačily uspořádat např. v důsledku rychlého ochlazení taveniny. Měrný objem krystalické fáze je nižší než měrný objem fáze amorfni. Relativní podíl krystalické fáze v látce udává *stupeň krystalinity*. Krystalické oblasti polymerů jsou tvrdé a tuhé, protože v nich jsou řetězce znehybněny ve stabilní konformaci a tuhost ztrácí teprve při *teplotě tání* krystalitů T_m (viz obr. 5). Nad T_m se hmota mění ve vysoce viskózní taveninu. Významnou charakteristikou amorfni materiálů je tzv. *teplota skelného přechodu* T_g (*teplota zesklenní*), při které se konformace řetězců již nemění. Pod ní se látka chová jako tvrdé sklo, nad ní má kaučukovité chování (viz obr. 5). U roztavených amorfni polymerů lze nalézt ještě jednu teplotní oblast, při níž intenzita změn vlastností narůstá. Je to *teplota viskózního toku* T_f (viz obr. 5), při které hmota ztrácí své kaučukovité elastické vlastnosti, modul pružnosti klesá na nulovou hodnotu a hmota se mění ve vysoce viskózní taveninu. Protože semikrystalické polymery obsahují určité množství amorfni podílů, lze i u nich stanovit teplotu zasklenní T_g charakterizovanou výraznější změnou vlastností (viz obr. 5).

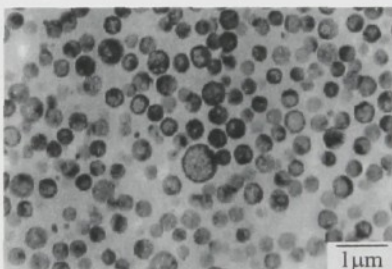


Obr. 5. Schématické průběhy závislosti tažnosti ε_r a logaritmu modulu pružnosti $\log E$ semikrystalických (vlevo) a amorfni (vpravo) polymerů na teplotě. [2]

Tyto změny se ovšem dotýkají jen amorfni složky hmoty. Při teplotě nad T_g se sice amorfni oblasti stávají kaučukovité elastické, což dává hmotě houževnatost, ale v důsledku velkých mezimolekulárních sil v krystalitech nemohou rotační pohyby segmentů rozrušit krystalickou strukturu. Hmota proto zůstává tuhá s poměrně vysokým modulem pružnosti. Výsledné vlastnosti semikrystalických polymerů vycházejí jako průměr mezi vlastnostmi amorfni a krystalické fáze za dané teploty.

Modifikací polymerů můžeme také výrazně ovlivnit jejich vlastnosti. Modifikací vlastností polymerů můžeme provádět kopolymerací, smícháním různých polymerů, přísadami, dodatečnými chemickými úpravami (např. síťování kaučuků) a kombinací těchto technik.

K oddělení fází a ke vzniku dvoufázových (nebo i vícefázových) systémů dochází i u blokových (popř. roubovaných) kopolymerů. Bloky se od sebe liší svými konstitučními nebo konfiguračními vlastnostmi. Tím je splněna podmínka pro odmišení bloků, tj. *fázovou separaci* bloků do oddělených oblastí, kterým se obvykle říká *domény*. Matrici vytváří ta fáze, která má výrazně větší objemový podíl bloků a druhá fáze je v matrici dispergována. V systému mohou, v jistém rozmezí složení, koexistovat i dvě kontinuální fáze. Morfologický výzkum jednoznačně prokázal, že podstatou houževnatosti tvrdých polymerů modifikovaných měkkým elastomerem je dvoufázová struktura, kdy v tvrdé matrici jsou uloženy ostrůvky elastomerní fáze. Například jak ukázaly snímky z elektronového mikroskopu znázorňující terpolymer ABS (roubovaný kopolymer), tvoří akrylonitril-styrénové bloky kontinuální fázi – matrici, a dispergovanou fázi tvoří elastomerní fáze butadien-styrénového kaučuku (viz obr. 6).



Obr. 6. Morfologie polymeru ABS zobrazená pomocí elektron. mikroskopu (TEM) [11]

K podobnému oddělování fází dochází i u polymerních směsí a kompozitů. U kompozitů vytváří základní souvislou fázi (matrici) polymer a druhou částicové plnivo či vláknitá výztuž (často anorganické povahy) s vyšší tuhostí a pevností než má matrice. U polymerních směsí (*blends*), jsou obě fáze organické, makromolekulární. Termínem *polymerní směs* jsou označovány soustavy připravované mechanickým směřováním, mícháním nebo hnětením dvou nebo více různých polymerů. Příkladem polymerní směsi může být, pro zvýšení houževnatosti za nižších teplot, elastomerem modifikovaný polypropylen, kde je v polypropylenové matrici dispergován EPDM kaučuk.

V polymerech se tedy mohou vyskytovat různě velké objemové podíly jednotlivých fází, přísad, resp. orientovaných oblastí, které se odlišují různými součiniteli délkové roztlačnosti a stlačitelnosti, hustotou, reologickými vlastnostmi, tuhostí atd. Změny v množství a vlastnostech jednotlivých fází se tak nutně promítají i do velikosti výrobního a dodatečného smrštění.

2.2.1.2 Stlačitelnost a teplotní roztažnost termoplastů [7, 12, 13]

Složitá struktura polymerů se mimo jiné projevuje i jejich stlačitelností. Stlačitelnost plastů se zvyšuje s rostoucí teplotou. Objemová stlačitelnost plastu se vyjadřuje pomocí *izotermického koeficientu stlačitelnosti* β [1/Pa].

$$\beta(p, T) = \frac{-1}{v(p, T)} \cdot \left(\frac{\partial v(p, T)}{\partial p} \right)_T \quad (1)$$

Velikost měrného objemu taveniny polymeru je v důsledku relativně vysoké *teplotní roztažnosti plastů* vždy podstatně větší než velikost měrného objemu polymeru, ochlazeného na normální teplotu. Objemové změny plastu v závislosti na změně teploty se vyjadřují pomocí *izobarického koeficientu teplotní roztažnosti* α . [1/K].

$$\alpha(p, T) = \frac{1}{v(p, T)} \cdot \left(\frac{\partial v(p, T)}{\partial T} \right)_p \quad (2)$$

Proces vstřikování je proto zákonitě provázen zmenšováním objemu – smršťováním. Během procesu vstřikování termoplastů se objemové změny spojené se změnou teploty částečně kompenzují objemovými změnami spojenými se snížením tlaku. Stlačitelnost a teplotní roztažnost plastů je dobře patrná na jejich p-v-T diagramech (viz kap. 2.4.1.2).

V oblasti p-v-T diagramu s konstantními koeficienty teplotní roztažnosti a stlačitelnosti lze vyjádřit závislost měrného objemu na teplotě a tlaku dle vztahu

$$v(T, p) = v^\circ \cdot \left(1 + \alpha \cdot (T - T^\circ) - \beta \cdot p \right) \quad (3)$$

kde v° je měrný objem při teplotě T° (298 K) a nulovém působícím tlaku [13].

Teplotní roztažnost plastů se nejčastěji vyjadřuje pomocí *středního součinitele délkové teplotní roztažnosti* α , udávajícího změnu délkové jednotky zkoušené látky při změně teploty o 1 °C pro daný teplotní interval. Součinitel teplotní délkové roztažnosti není u plastů konstantou, ale je funkcí teploty, kdy se zvyšující teplotou roste. V oblasti taveniny se také projevuje závislost na zvyšujícím se tlaku, kdy se s rostoucím tlakem koeficient teplotní roztažnosti snižuje. Pod teplotou T_g mají makromolekuly polymeru omezenou pohyblivost a nižší teplotní roztažnost než nad touto teplotou, kdy v důsledku tzv. Brownova mikropohybu dochází k zvýšené pohyblivosti segmentů makromolekul. U semikrystalických termoplastů klesá teplotní roztažnost s rostoucím obsahem krystalického podílu. Polymery s vyšším modulem pružnosti mají nižší teplotní roztažnost. Orientace makromolekul je příčinou anizotropie teplotní roztažnosti, která je menší ve směru orientace než ve směru kolmém [1]. Přidavkem plniv s malou roztažností, jako jsou např. skleněná vlákna, částice minerálů, grafit a jiných, se součinitel teplotní roztažnosti plastu snižuje. Stlačitelnost plastů bývá také, podobně jako u teplotní roztažnosti, v důsledku přidání prakticky nestlačitelných anorganických plniv snižena a může být též anizotropní.

2.2.1.3 Reologické vlastnosti termoplastů [2, 8]

Složitá struktura polymerů se projevuje i v jejich komplikovanějším deformačním chování. Hookeovská elasticita a newtonský tok jsou dva mezní případy reologického chování. Polymery se k jednomu či druhému extrému mohou podle vnějších podmínek více nebo méně přiblížit. Na vnější namáhání totiž polymery v tuhém stavu tak i polymerní taveniny reagují tak, že deformace zahrnuje vždy současně složku elastickou, plastickou (viskózní tok) a navíc ještě tzv. deformaci zpožděně elastickou. Celková deformace je tedy časově závislá. Takové deformační chování se nazývá viskoelastické. V procesu vstřikování působí na vstřikovaný termoplast poměrně velká smyková a normálová napětí při současných změnách jeho teploty. Tato působící napětí a teploty jsou v různých místech výstřiku rozdílné a tedy deformační chování se v těchto místech výstřiku liší, což bývá příčinou vzniku vnitřních pnutí. Vlivem uvolňování těchto pnutí vznikají další dodatečné rozměrové změny – dodatečné smrštění. U vícefázových materiálů mají jejich jednotlivé fáze rozdílné reologické vlastnosti s vlivem na rozměrové změny výstřiků.

Reálné systémy vykazují komplikované viskoelastické vlastnosti. Pro jejich pochopení je výhodné uvážit nejprve jednoduché kombinace elasticity a toku a znázorňovat si takové kombinace pomocí reologických modelů. Základními prvky reologických modelů jsou ocelová pružina, která je symbolem hookeovské elasticity a při deformaci se řídí rovnicí

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (4)$$

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

G - modul pružnosti ve smyku [Pa]

γ - smykovou deformaci

a symbolem newtonského viskózního toku je píst, což je válcová nádoba naplněná kapalinou o viskozitě η , ve které se může pohybovat tyčinka zakončená kuličkou nebo válečkem a jejíž pohyb se řídí rovnicí

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

kde značí η - dynamickou viskozitu [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

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

U obou prvků se rozměry volí tak, aby geometrické konstanty byly jednotkové.

Reologický model vytvořený paralelním spojením obou prvků se nazývá *Kelvinův*, popř. *Voigtův*, sériové spojení je model *Maxwellův*, sériové spojení prvku Kelvinova a Maxwellova je model *Tuckettův*. Čím větší je počet prvků v modelu, tím lépe vystihuje model reologické chování reálného systému.

Kelvinův model je znázorněn na obr. 7. Při paralelním spojení pružiny s pístem je přechod pružiny z jednoho deformačního stavu do druhého bržděn - zpoždován viskózním prvkem. Kelvinův model se tedy deformuje vratně, ale jeho elasticita není okamžitá, nýbrž

časově závislá. Je to elasticita bržděná, zpožděná. Deformace obou prvků jsou stejné a napětí přispívají aditivně k napětí celkovému.

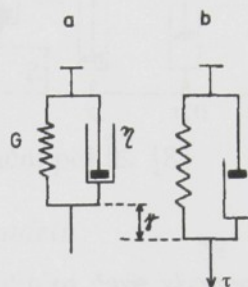
$$\gamma_{pruž} = \gamma_{pist} = \gamma \quad (6)$$

$$\tau_{pruž} + \tau_{pist} = \tau \quad (7)$$

kde τ je celkové napětí modelu, γ - jeho deformace.

Diferenciální rovnice Kelvinova modelu je:

$$G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \tau \quad (8)$$



Obr. 7. Kelvinův model, a - nedeformovaný, b - deformovaný účinkem napětí τ [8]

Kríp Kelvinova modelu:

Krípem se rozumí závislost deformace na čase při konstantním napětí. Napětí τ_0 se zavede skokem v určitém čase, zpravidla při $t = 0$. U reálných materiálů se kríp měří, u modelu jej lze vypočítat z diferenciální rovnice při zavedení příslušných podmínek.

Deformační odezva Kelvinova modelu:

$$\gamma(t) = \gamma_{\infty} \cdot (1 - e^{-t/\theta}) \quad (9)$$

$$\gamma_{\infty} = \frac{\tau_0}{G} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{\eta}{G} \quad (11)$$

Veličina θ má rozměr času a určuje rychlost přechodu z nedeformovaného stavu do stavu deformovaného. Nazývá se *retardační doba*. V čase t rovném retardační době θ dosáhne Kelvinův model při kríčovém pokusu 63,2% rovnovážné deformace. Pro časy $t \gg \theta$ nabývá deformace limitní rovnovážné hodnoty γ_{∞} , která je dána pouze vlastnostmi pružiny a nezávisí na viskozitě kapaliny v pistu.

Maxwellův model popisuje tok komplikovaný elasticitou nebo naopak elasticitou, která odeznívá tokem. Při sériovém spojení prvků je celková deformace rovna součtu deformací prvků, kdežto napětí je v obou prvcích a v celém modelu stejné (viz obr. 8).

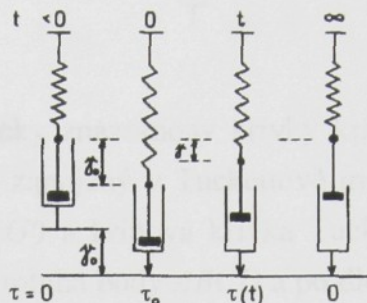
$$\gamma_{pruž} + \gamma_{pist} = \gamma \quad (12)$$

$$\tau_{pruž} = \tau_{pist} = \tau \quad (13)$$

Diferenciální rovnice Maxwellova modelu je:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\theta} = \frac{d\gamma}{dt} \cdot G \quad (14)$$

Veličina $\theta = \eta/G$ se nazývá *relaxační doba*.



Obr. 8. Maxwellův model a relaxační pokus [8]

Relaxace napětí Maxwellova modelu:

Při relaxačním pokusu se v určitém čase skokem vloží konstantní deformace γ_0 . Při vložení deformace pružina zareaguje okamžitě, zatímco deformace pístu je nulová. Vzniklé počáteční napětí τ_0 je dáno pouze hookeovskou odezvou pružiny. Během času se však píst tahem pružiny pohybuje, deformace pružiny klesá a tím klesá - relaxuje - napětí v modelu. Napětí Maxwellova modelu relaxuje při konstantní deformaci exponenciálně z počáteční hodnoty až na nulu pro čas $t \gg \theta$.

Závislost napětí na čase Maxwellova modelu:

$$\tau(t) = \tau_0 \cdot e^{-t/\theta} \quad (15)$$

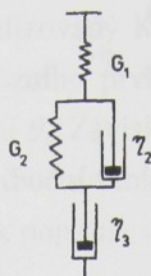
V čase t rovném relaxační době θ poklesne napětí na 36,8% počáteční hodnoty. Za čtyřnásobek relaxační doby zbývá v modelu jen 1,8% počátečního napětí. Relaxace je tím rychlejší, čím menší je viskozita kapaliny v pístu a čím je tuhost pružiny (její modul) větší. U reálných materiálů se časový průběh relaxace napětí stanovuje experimentálně.

Tuckettův model

Viskoelasticitu materiálu je možné komplexně znázornit *Tucketovým modelem*, který z kvalitativního hlediska dobře vystihuje chování skutečných polymerů. Tuckettův model (obr. 9) je sériové spojení pružiny s modulem G_1 , Kelvinova modelu s modulem G_2 a viskozitou η_2 a tokového prvku s viskozitou η_3 .

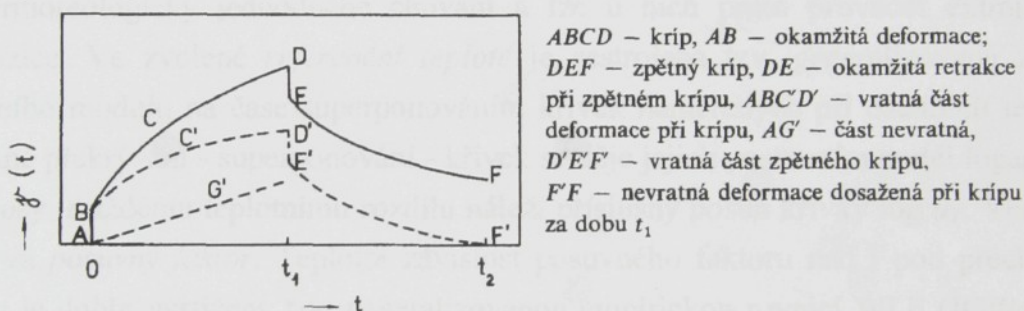
Deformace všech tří součástí Tuckettova modelu jsou aditivní, a model se tedy při krípu (toku) řídí rovnicí:

$$\gamma(t) = \tau_0 \cdot \left[\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \cdot (1 - e^{-t/\theta}) + \frac{1}{\eta_3} \cdot t \right] \quad (16)$$



Obr. 9. Tuckettův model [8]

Na obr. 10 jsou schématicky znázorněny křivky křípu a zpětného křípu v lineární časové stupnici. Tokový prvek zapojený v Tuckettově modelu se při konstantním napětí deformuje lineárně s časem (AG') a křivka křípu Tuckettova modelu je rovna součtu křivky $ABC'D'$ a přímky AG' . Probíhá body $ABCD$ a po dlouhých dobách se stává lineární, se směrnici τ_0/η_3 . Zpětný křip se skládá z okamžitého zotavení DE ideálně elastické pružiny a ze zpožděné elastického zotavení EF Kelvinova modelu, které dohromady dávají vratnou deformaci. Zbylá deformace je nevratná a zvětšuje se s dobou předchozího křípu, popř. s teplotou, při které byl křip proveden.



Obr. 10. Schéma vlastností Tuckettova modelu [8]

Relaxační a retardační spektrum

Přechody probíhající mezi dvěma elastickými stavy u reálných viskoelastických látek probíhají ve velice širokém časovém rozmezí, zpravidla nejméně čtyř až šesti řádů. Takové chování je možné popsat generalizovaným Maxwellovým modelem, ve kterém je k pružině paralelně připojen velký počet Maxwellových prvků, kde i -tý prvek má parametry G_i , θ_i . Relaxační modul generalizovaného modelu je součtem relaxačních modulů jednotlivých Maxwellových prvků a modulu připojené pružiny G_e .

$$G(t) = G_e + \sum_{i=1}^j G_i \cdot e^{-t/\theta_i} \quad (17)$$

Závislost G_i na θ_i se nazývá distribuce relaxačních dob nebo *relaxační spektrum*. Čím větší je počet prvků, tím lépe lze popsat naměřené závislosti. Při nekonečném počtu prvků přechází závislost G_i na θ_i na kontinuální distribuci $g(t)$ či spektrum relaxačních dob. Relaxační modul je dán vztahem

$$G(t) = G_e + \int_0^{\infty} g(\theta) \cdot e^{-t/\theta} d\theta \quad (18)$$

Retardační spektrum tvoří generalizovaný Kelvinův model. Tento model je sériové spojení pružiny s poddajností J_0 , viskózního prvku a velkého počtu Kelvinových prvků s poddajnostmi J_i a retardačními dobami θ_i . Závislost J_i na θ_i přechází s rostoucím počtem Kelvinových prvků na kontinuální distribuční funkci retardačních dob neboli na retardační spektrum $f(\theta)$. Křípová poddajnost je pak popsána vztahem

$$J(t) = J_0 + \frac{t}{\eta} + \int_0^{\infty} f(\theta) \cdot [1 - e^{-t/\theta}] \cdot d\theta \quad (19)$$

Spektra představují úplnou charakterizaci lineárního viskoelastického chování polymeru. Spektrum se ovšem musí nejprve získat z experimentálních údajů, změřených v širokém rozmezí dob či frekvencí.

Časově teplotní superpozice relaxačního modulu

Vzhledem k tomu, že závislosti relaxačních modulů polymerů změřené při různých teplotách mají přibližně stejný tvar lišící se jen svým umístěním v logaritmické časové ose, mají termoreologicky jednoduché chování a lze u nich proto provádět extrapolace a superpozice. Ve zvolené *referenční teplotě* je sestrojena tzv. generalizovaná závislost relaxačního modulu na čase superponováním křivek naměřených při ostatních teplotách. Vzájemné překrývání - superponování - křivek se děje jejich posunutím podél logaritmické časové osy. Každému teplotnímu rozdílu náleží příslušný posun křivky $\log a_T$. Veličina a_T se nazývá *posuvný faktor*. Teplotní závislost posuvného faktoru nad i pod přechodovou teplotou je dobře vystižena tzv. generalizovanou empirickou rovnicí WLF (*Williamsova–Landelova–Ferryho rovnice*). Generalizovaná rovnice WLF (rovnice gWLF) má pro jeden parametr ponechanou volnost nabýt pod přechodovou teplotou jinou hodnotu. Pro posuvný faktor vztažený ke zvolené referenční teplotě $\tilde{T}_0$ má gWLF rovnice tento tvar

$$\log a_T = \log a_{\tilde{T}_0} - c_1 \cdot \frac{T - \tilde{T}_0}{c_2 + T - \tilde{T}_0} \quad (20)$$

pro $T > \tilde{T}_0$: $c_2 = c_{2,L}$ a pro $T < \tilde{T}_0$: $c_2 = c_{2,G}$

Rovnice (20) gWLF má čtyři nastavitelné parametry: c_1 , $c_{2,L}$, $c_{2,G}$, $\tilde{T}_0$. Parametr $\tilde{T}_0$ má význam teploty, při které se teplotní koeficient posuvného faktoru – a tedy i hodnota c_2 – změní skokem. Zcela stejným způsobem jako u superpozice relaxačního modulu, lze provést časově teplotní superpozice dat v případě křípového modulu, křípové poddajnosti či zpětného křípu.

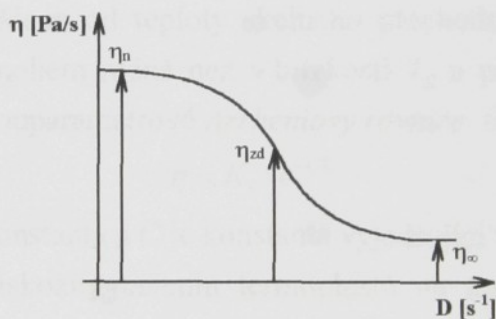
Tok polymerních tavenin

Taveniny plastů, vzhledem k jejich makromolekulárnímu charakteru, patří mezi newtonské kapaliny a vykazují tedy závislost viskozity na smykové rychlosti. Dynamická viskozita tavenin termoplastů klesá se zvyšujícím se smykovým napětím resp.

smykovou rychlostí a takové nenewtonské kapaliny se nazývají pseudoplastické (strukturně viskózní).

Při velmi nízkých rychlostech lze považovat viskozitu za konstantní, nezávisí na smykové rychlosti, stejně jako u newtonských kapalin. V oblasti strukturní viskozity je charakteristický pokles viskozity s narůstající smykovou rychlostí (viz obr. 11). Je to oblast tzv. zdánlivé viskozity η_{zd} . Při extrémně vysokých rychlostech se viskozita teoreticky opět může stát nezávislou na smykové rychlosti (viskozita při nekonečném smyku η_{∞}).

Tento charakter tokového chování zřejmě souvisí s řetězovým tvarem jejich molekul. V tavenině zaujímají makromolekuly tvar volně sbalených klubíček. Při velmi malých smykových rychlostech nastává při toku přemísťování klubíček jako celku, což odpovídá oblasti konstantní viskozity η_n . Zvyšováním smykové rychlosti dochází k rozvinování klubíček do směru toku. Více nebo méně rozbalené molekuly se pohybují snadněji, což se projevuje poklesem zdánlivé viskozity η_{zd} . V případě, že by došlo k dokonalému rozbalení všech molekul, pohybovaly by se po sobě jako hladké nitkovité útvary a viskozita by nabyla konstantní hodnoty η_{∞} . Tohoto stádia však u tavenin plastů nelze v praxi dosáhnout.



Obr. 11. Závislost viskozity na smykové rychlosti [2]

Nenewtonské chování tavenin se obecně popisuje vztahy mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí. Pro pseudoplastické nenewtonské kapaliny se k popisu chování používají rovnice, které podle počtu konstant rozlišujeme na modely dvouparametrické, tříparametrické atd. Nutné jsou min. dvě konstanty, které závisí na druhu plastu a jsou funkcí teploty taveniny. V oblasti středních a vyšších smykových rychlostí, tedy v oblasti zdánlivé viskozity, lze u polymerních tavenin popsat závislost smykového napětí na smykové rychlosti tzv. mocninovým zákonem (*Ostwald de Waelév model*), který lze zapsat dvěma tvary:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (21)$$

$$D = \Phi \cdot \tau^m \quad (22)$$

kde $\dot{\gamma}$ je smyková rychlost [s^{-1}] (derivace smykové deformace podle času); D je gradient rychlostí (dv/dy) [s^{-1}] (rozdíl rychlostí 2 sousedních vrstev dělený jejich vzdáleností) přičemž platí, že smyková rychlost $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] je totožná s gradientem rychlostí D [s^{-1}]; n a m

($m=1/n$) jsou konstanty nazývané součinitel mocninového zákona nebo též index toku, který vyjadřuje odchylku v chování taveniny od chování newtonské kapaliny.

Pro newtonské kapaliny je index toku $n=1$ (resp. $m=1$). Čím je n nižší respektive m vyšší než 1, tím je tavenina pseudoplastičtější (m se obvykle pohybuje v rozmezí od 2 do 4,5). Veličina K se nazývá index konzistence a udává (extrapolované) smykové napětí při jednotkové smykové rychlosti. Veličina Φ je koeficient tekutosti a odpovídá smykové rychlosti při jednotkovém smykovém napětí a je reciprokou hodnotou indexu konzistence $\Phi=1/K$. V logaritmických souřadnicích je funkce znázorněna přímkou se směrnici n (resp. m). Platnost mocninového zákona nesmí být ovšem extrapolována mimo oblast, ve které byla experimentálně ověřena. Mocninový zákon také neplatí v oblasti malých smykových rychlostí, tato oblast však není pro technickou praxi významná a pro oblast zpracovatelsky důležitých smykových rychlostí (asi od 1 do 10^4 s^{-1}) představuje tento dvouparametrový vztah dostatečnou a široce používanou aproximaci.

Teplotní závislost zdánlivé viskozity

Viskozita tavenin termoplastů se snižuje se zvyšující se teplotou. Teplotní oblast tavenin je dostatečně vzdálena od teploty skelného přechodu, takže viskozita se v této oblasti s teplotou mění mnohem méně než v blízkosti T_g a pro popis teplotní závislosti viskozity vyhovuje tvar dvouparametrové *Arrheniovy rovnice*

$$\eta = K_0 \cdot e^{-CT} \quad (23)$$

kde K_0 je materiálová konstanta a C je konstanta vyjadřující teplotní závislost.

Dále pro závislost viskozity tavenin termoplastů na teplotě platí, že při velkých smykových rychlostech je smykové napětí, při konstantním gradientu, méně závislé na teplotě než při malých smykových rychlostech.

Elastické projevy při toku tavenin

Při toku polymerních tavenin se také kromě převažujícího viskózního toku (nevratná deformace) projevuje i *elastické chování* (vratná deformace). Je způsobeno tím, že zapleteniny a smyčky vytvořené makromolekulami se projevují jako částečně fixující body a vytvářejí tzv. *fyzikální uzly*. Při rychle působícím zatížení pak dochází nejen k nevratnému toku, ale i k orientaci makromolekul a jejich segmentů ve směru toku, která se projevuje vznikem normálových napětí během toku, relaxací napětí po zahájení a zastavení toku a zpětným křípem po zastavení toku. Elastické projevy se během procesu vstřikování výrazně mění vlivem snižující se teploty a měnící se viskozity taveniny. Orientace se projevuje tím více, čím nižší je teplota procesu. Je-li pak polymer prudce ochlazen, orientovaný stav zamrzne. Při pozdějším ohřátí nad teplotu, při které se již může dostatečně uplatňovat Brownův pohyb, se materiál vrací do původního stavu před orientací a způsobuje změny tvaru resp. dodatečné smrštění materiálu.

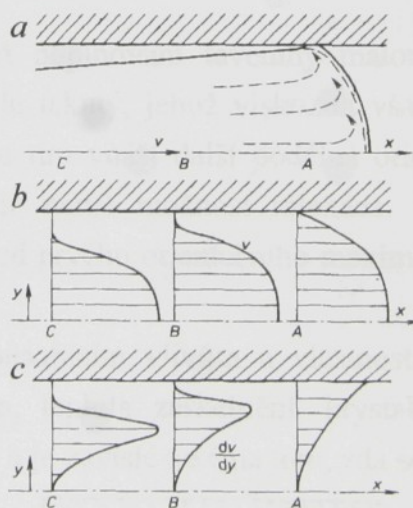
2.2.1.4 Orientace makromolekul [1, 7, 14]

Každá makromolekula se snaží, pokud má možnost, zaujmout pro ni energeticky nejvýhodnější polohu, tzn. s minimální hodnotou Gibbsovy energie. Proto páteř řetězce nezůstává napřímená, ale má tendenci se sbalovat do klubička, jak se děje u amorfních polymerů. Při ohřevu semikrystalických polymerů nad T_m tepelné kmity řetězců způsobí úplné vymizení charakteristického dvojlohu světla za nižších teplot běžně viditelného pod polarizovaným světlem, tzn., že i tavenina semikrystalických polymerů je amorfní.

Pokud viskózní tavenina polymeru termoplastu protéká tryskou stroje, zúženými kanály vtokového systému formy a vlastní dutinou formy, tak se v důsledku vysokých smykových napětí normálně nepravidelně zkroucené makromolekuly narovnávají ve směru toku. Tento jev se nazývá *orientace makromolekul*.

Pokud se takto deformovaná molekulární struktura rychle ochladí, znemožní se navrácení makromolekul do původního stavu a v příslušné části výrobku vznikne energeticky nestabilní orientovaná struktura. Důsledkem orientace makromolekulárních řetězců je vznik anizotropie vlastností výstřiku. Mimo jiné vytváří anizotropii mechanických vlastností, součinitele teplotní roztažnosti a smršťení.

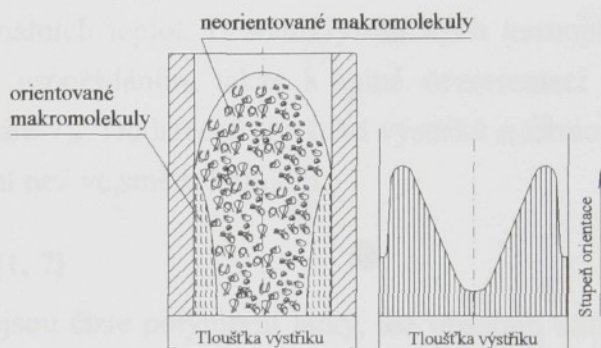
Stupeň orientace závisí na gradientu rychlosti a na viskozitě taveniny. Rozložení orientace ve výstřiku odpovídá gradientu smykových rychlostí, jenž se vytvoří při plnění formy. Při toku taveniny termoplastu přibližně stejného průřezu dochází k rozložení orientace znázorněné na obr. 12, kde je znázorněn ustálený průtok taveniny kanálem (stěnou výstřiku) v jediném okamžiku.



Obr. 12. Průtok taveniny termoplastu kanálem ve formě [1]

Ve třech místech kanálu (A, B, C) jsou zachyceny profily rychlosti taveniny v (obr. 12b) a profily smykové rychlosti dv/dy úměrné smykovým napětím, a tím stupni orientace (obr. 12c). Poněvadž jde o ustálený tok, označují profily v místech A, B, C také postupnou časovou změnu profilu rychlosti a profilu smykového napětí v jediném místě kanálu ve třech různých časech. Tenká vrstvička čela proudu taveniny (obr. 12a) je stykem se vzduchem zchladlá, vysokoviskózní, napíná se jako blána a makromolekuly v ní se

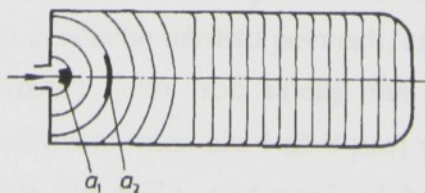
biaxiálně (ve dvou směrech, plošně) orientují. Jakmile se tato vrstvička dotkne chladné stěny kanálu (bod *A*), ihned ztuhne. Vzniklá tenká povrchová vrstva má malý stupeň orientace. K největší orientaci dochází v místě největšího gradientu smykových rychlostí na rozhraní mezi povrchovou vrstvou, a související vrstvou, která je od chladné stěny formy ztuhlou vrstvou termoplastu tepelně izolována a vrstvy taveniny zůstávají déle ve vysokoviskózním stavu. Nejmenší orientace je ve středu výstřiku, kde se v průběhu plnění formy udržoval poměrně rovnoměrný rychlostní a teplotní profil a orientované makromolekuly měly větší možnost relaxovat vzhledem k delší době, po kterou jsou ve stavu nízkoviskózní taveniny. V maximálně orientované přechodové vrstvě je však relaxace omezována zvětšováním viskozity taveniny, které je vyvoláno chlazením formy. Výsledkem je maximum orientace v podpovrchové vrstvě stěny výstřiku. Průběh primární orientace a následné relaxace během plnění formy vede k distribuci stupně orientace v průřezu výstřiku (viz. obr. 13).



Obr. 13. Orientace makromolekul při proudění viskózní taveniny polymeru kanálem [14]

Ve fázi dotlaku probíhá doplňování taveniny malou rychlostí převážně středem výstřiku, který zůstává nejdéle tekutý, jehož viskozita však pokračujícím ochlazením rychle stoupá. Do výstřiku se tím vnáší další podélná orientace, která vlivem relativně vysoké viskozity taveniny již nemá možnost relaxace. Vzniká tím druhé orientační maximum, které je na rozdíl od prvního orientačního maxima v blízkosti vtoku a ve středu výstřiku.

Vzhledem k více spolupůsobícím vlivům a vlastnostem jednotlivých plastů (druh materiálu, vstřikovací teplota, teplota zesklenní, krystalinita atd.) bývá někdy větší smrštění podélné, jindy příčné a je závislé také na tom, zda se vytváří dvouosá orientace.



Obr. 14. Postup plnění deskového výstřiku za vzniku příčné biaxiální orientace deformací objemového elementu taveniny a_1 na a_2 [1]

Při náhlém zvětšení průřezu, např. při vyústění vtoku do rovinné tvarové dutiny, dochází k roztahení čela taveniny i ve směru kolmém na směr toku, jak je patrné z obr. 14.

Dojde-li k ochlazení protažené částčky taveniny pod teplotu vzniku viskózního toku T_f nebo dokonce pod teplotu zesklenní T_g , dojde k zmrazení deformovaného stavu a ve výstřiku vznikne v příslušné oblasti dvouosá (biaxiální) příčná orientace. Dále od vtoku se už objemový element více neroztahuje, takže další příčná orientace už nenastává. Ve složitém tvaru výstřiku jsou poměry při proudění taveniny složitější, plnění formy nestejněměrné, a proto vzniká celá škála různě orientovaných oblastí co do stupně i směru.

Dezorientace, tj. snížení stupně orientace, vzniká jednak již při plnění formy jestliže smykové napětí přestane působit dříve, než tavenina ztuhne, a jednak dodatečně. Orientované struktury přetrvávají jen při teplotách pod teplotu zesklenní T_g . Při ohřevu nad T_g makromolekuly zvýší svou pohyblivost a snaží se zaujmout svoji rovnovážnější zkroucenou polohu a dochází tak k dezorientaci, projevující se smršťením v opačném směru než byla původní orientace makromolekul. Dodatečná dezorientace je vždy spjata s trvalými deformacemi a bývá vždy jen částečná. Menší dezorientace může nastat po dlouhé době i za normálních teplot. U semikrystalických termoplastů je navíc orientace fixována krystalickým uspořádáním, takže k úplné dezorientaci dochází až při zahřátí výrobku nad teplotou tání T_m . Dodatečné smršťení výstřiků z termoplastů je větší ve směru orientace makromolekul než ve směru kolmém.

2.2.1.5 Obsah plniv [1, 7]

Plasty většinou nejsou čisté polymerní látky, ale obsahují aditiva jako jsou tepelné a světelné stabilizátory, antioxidanty, plniva, změkčovadla, barviva a mnoho jiných, které upravují jejich vlastnosti. Na smršťení výstřiků z termoplastů má z uvedených přísad největší vliv obsah plniv v polymerní matrici. Je tomu tak především v důsledku řádově nižšího součinitele teplotní roztažnosti plniv oproti polymerním materiálům a používaným vyšším procentům plnění než u ostatních přísad. Vytváření takových heterogenních systémů se neobejde bez komplikací, často se musí volit kompromis mezi vlastnostmi a zpracovatelností. Podle typu plniva lze rozlišovat výstřiky vyztužené:

- částicovými plnivy
- vláknitými plnivy

Některá plniva zlepšují dimenzionální stabilitu (snižují smršťení v důsledku redukce součinitele teplotní roztažnosti), jiná mají význam zlevnění materiálu, vyztužujícím účinkem vláken lze zase docílit značného nárůstu pevnosti, zřídka kdy ale houževnatosti.

Plniva částicového charakteru jako jsou talek, jiná minerální plniva a skleněné mikrokuličky (většinou v rozměrovém intervalu 1 až 9 μm) v závislosti na procentu plnění zvyšují tuhost, pevnost zvyšují jen málo, podstatně však snižují tažnost a rázovou a vrubovou houževnatost. Tato plniva snižují teplotní roztažnost a tím i smršťení výstřiků, nezpůsobují orientaci a smršťení i vlastnosti výstřiků jsou více izotropické, a lze tedy dosáhnout zvláště vysoké rozměrové přesnosti a tvarové stability za tepla.

V tavenině semikrystalických polymerů částice plniva působí jako uměle vnesené zárodky krystalitů a ovlivňují tím morfologii matrice.

Vláknitá plniva (např. uhlíková nebo skleněná vlákna) lze pro jejich vyztužující účinek používat pro množství inženýrských aplikací. Mechanické i fyzikální vlastnosti vláknového kompozitu závisí především na dokonalém spojení vláken s matricí, distribuci délek a množství vláken a druhu matrice.

Plniva s nesymetrickým geometrickým tvarem se při vstřikování plastu jednostranně orientují ve směru toku taveniny, a tím přispívají k anizotropii teplotní roztažnosti, smrštění i mechanických vlastností. Smrštění bývá vždy menší ve směru orientace vláken než kolmo na směr orientace. Je to způsobeno tím, že možnost smršťování ve směru orientace vláken je silně potlačena, zatímco ve směru kolmém nikoliv. Následkem víření taveniny ve formě se v hotovém výstřiku vyskytují oblasti s různým stupněm orientace vláken, takže výsledná anizotropie nemusí být vždy výrazná.

2.2.1.6 Krystalizace [8, 15]

Krystalizace může nastat pouze u semikrystalických termoplastů a její vznik je podmíněn chemickou stavbou makromolekulárního řetězce. Makromolekuly se uspořádávají do tzv. proužků, které se k sobě těsně přikládají a skládají do tvaru lamel. Lamely jsou základním krystalickým útvarem a mohou vytvářet složitější útvary, tzv. sférolity. Při ochlazování vzniká krystalická struktura tím ochotněji, čím jsou řetězce makromolekul jednodušší a symetričtější (tzn. se symetricky uspořádanými substituenty), úseky řetězců ohebnější a čím je krystalografická jednotka podílející se na vzniku proužku kratší.

Kromě strukturních předpokladů jsou pro krystalizaci nutné i vhodné *kinetické podmínky*. Krystalizace především závisí na teplotě, s kterou souvisejí dva základní faktory rozhodující o rychlosti tvorby krystalické fáze – rychlost tvorby center krystalizace (krystalizačních zárodků) – *rychlost nukleace* a jejich následná *rychlost růstu*. Křivky znázorňující závislost rychlosti krystalizace polymerů na teplotě vykazují maxima mezi T_g amorfního podílu a T_m krystalické fáze. V oblastech pod T_g a nad T_m nedochází k nukleaci, takže krystalizace probíhá jen v teplotním intervalu vymezeném těmito teplotami.

U polymerů schopných krystalizace je možný mnohonásobný vratný přechod z amorfního do krystalického stavu a naopak. Kromě teploty je dalším faktorem ovlivňujícím krystalizaci velikost působícího tlaku, kdy se vlivem tlaku zmenšuje pohyblivost segmentů makromolekulárních řetězců polymeru a znesnadňuje se tak ukládání makromolekul do krystalitů.

Rychlost nukleace

Nukleace může být homogenní nebo heterogenní. Nukleace se označuje jako *homogenní*, jestliže v soustavě nejsou přítomny žádné předem vytvořené zárodky ani cizí povrchy. Při homogenní nukleaci vznikají krystalizační zárodky v důsledku termické

fluktuace hustoty matečné fáze. Homogenní nukleace nabývá měřitelné rychlosti teprve při značném podchlazení, nejčastěji kolem 70 °C. Jsou-li v soustavě přítomné cizí povrchy (náhodné nečistoty, zbytky katalyzátorů, zbytky krystalů neúplně roztaveného polymeru, stěny nádoby, záměrně přidané nukleační činidlo) a zárodek vzniká na nich, je vzniklý nový povrch menší a rovněž nukleační bariéra je v porovnání s homogenní nukleací menší. Nukleace tohoto typu se nazývá *heterogenní* – pro polymery je typická a dochází k ní již při menším podchlazení (10 až 30 °C).

Nukleace mnoha polymerů značně závisí na jejich teplotní historii. Malé uspořádané oblasti mohou v tavenině přetrvávat i po dlouhou dobu a po ochlazení pak působí jako předurčená centra krystalizace („samonukleace“). Jejich počet a rozměry závisejí na teplotě předešlé krystalizace a na teplotě a době, po kterou byl polymer taven. Například u izotaktického polypropylenu je nukleace heterogenní a prakticky okamžitá. Ihned po ochlazení taveniny na krystalizační teplotu vznikne jistý počet N center, od nichž rostou sférolity, při čemž N se v průběhu času nemění. Při nižší teplotě krystalizace je N větší, sférolity mohou narůst jen do menších rozměrů a vznikne jemnozrnější struktura. Zvýšení teploty a prodloužení doby tavení vede ke snížení N . Nukleaci je možno experimentálně sledovat např. polarizačním mikroskopem podle vzniku dvojlomných oblastí.

Rychlost růstu

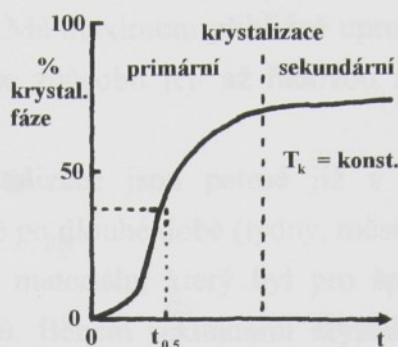
Při krystalizaci z taveniny se obvykle sleduje růst poloměru sférolitických superstruktur v polarizačním mikroskopu. Dílčí děje růstu jsou: difúze polymerních segmentů k povrchu rostoucího krystalu, difúze segmentů odmítaných krystalem od povrchu krystalu, adsorpce segmentů na povrchu krystalu za vzniku dvourozměrného zárodku (*sekundární nukleace*), skládání molekuly na povrchu v okolí přichyceného zárodku. Tento poslední krok je rychlý. Rychlost růstu určuje rychlost sekundární nukleace. Jakmile je zárodek vytvořen, zbytek molekuly se rychle naskládá na růstové ploše, při čemž zachovává přibližně stejnou periodu skládání, jakou má zárodek. Růst probíhá po vrstvách; obecně se může stát, že pro vytvoření jedné vrstvy je potřebná mnohonásobná nukleace, v každém případě však vzniká lamelární útvar. Rychlost sekundární nukleace a tedy i rychlost růstu má na teplotní závislosti výrazné maximum v oblasti mezi T_g a T_m podobně jako rychlost primární nukleace. Největší rychlosti růstu r_{max} [m s^{-1}] se dosahuje při teplotě $T_{r,max}$ [K], pro niž byly nalezeny přibližné empirické vztahy: $T_{r,max} \approx 0,82T_m \approx 1,3T_g$.

Celková rychlost krystalizace

Závislost stupně krystalizace (tj. obsahu krystalicky uspořádaných oblastí v semikrystalické soustavě) na době krystalizace vykazuje rysy typické pro dvoustupňový proces. V prvním stupni, při tzv. *primární krystalizaci*, proběhne největší část přeměny. Na něj pak navazuje mnohem pomalejší druhý stupeň, tak zvaná *sekundární krystalizace*.

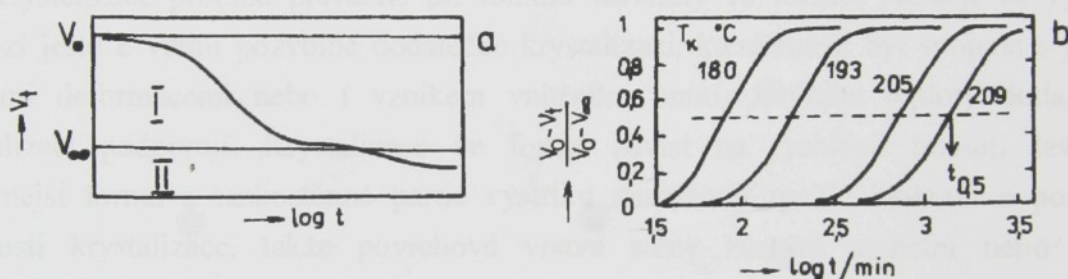
Primární krystalizace je charakterizována tvorbou krystalizačních zárodků a růstem sférolitů. Její celková rychlost se často charakterizuje *poločasem krystalizace* $t_{0,5}$, který

představuje dobu, během níž proběhne polovina krystalizačních změn a určuje se z *krystalizačních izoterm*, které mají charakteristický esovitý tvar (obr. 15). Krystalizace polymerů neproběhne úplně, ale vždy zůstává v materiálu určité množství nekrystalizované (amorfni) fáze (10 – 80 %).



Obr. 15. Krystalizační izoterma polymeru, T_k – krystalizační teplota [15]

Příklad teplotní závislosti objemu při izotermické krystalizaci ukazuje obr. 16.



Obr. 16. a – změna objemu při primární a sekundární krystalizaci jako funkce logaritmu doby krystalizace, I – oblast primární krystalizace, II – oblast sekundární kryst. b – závislost relativní objemové změny (konverze X) na logaritmu doby, při různých teplotách krystalizace T_k [8]

Počáteční objem vzorku je V_0 , s postupující krystalizací se objem zmenšuje a v čase t má hodnotu V_t . Po dostatečně dlouhé době proběhne primární krystalizační přeměna prakticky do rovnováhy a objem nabývá limitní hodnoty V_∞ . Stupeň přeměny (konverzi) X při primární krystalizaci lze definovat vztahem

$$X = \frac{V_0 - V_t}{V_0 - V_\infty} \quad (24)$$

kde X nabývá hodnoty od 0 do 1. Je-li φ_k objemový zlomek krystalické fáze v čase t a φ_{km} na konci primární krystalizace, pak

$$X = \frac{\varphi_k}{\varphi_{km}} \quad (25)$$

Závislost φ_k na době krystalizace je v principu možné vypočítat, je-li známa rychlost primární nukleace a rychlost růstu. Různá řešení lze zapsat obecně vztahem známým jako *Avramiho rovnice*:

$$X = 1 - \exp(-Kt^n) \quad (26)$$

kde parametry K , n , souvisejí s mechanismem krystalizace (např. n je při lineárním růstu menší než při růstu kulovém). Poločas krystalizace $t_{0,5}$ je doba potřebná pro dosažení konverze $X = 0,5$. Při sférolitickém růstu je primární krystalizace prakticky ukončena již asi za trojnásobek poločasu. Reciproká hodnota poločasu $1/t_{0,5}$ je jednoduchou mírou celkové rychlosti krystalizace. Má maximum přibližně uprostřed mezi T_g a T_m , kde změna teploty o několik stupňů může způsobit její až řádovou změnu. Veličina $1/t_{0,5}$ klesá s rostoucí molární hmotností.

Projevy sekundární krystalizace jsou patrné již v posledních stádiích primární krystalizace a projevují se ještě po dlouhé době (týdny, měsíce). Při sekundární krystalizaci dochází k uspořádávání toho materiálu, který byl pro špatnou krystalizační schopnost vypuzen z primárních krystalů. Během sekundární krystalizace se pomalu organizuje a částečně začleňuje do existujících lamel.

Krystalizace při vstřikování termoplastů

Krystalizace probíhá převážně při tuhnutí taveniny ve formě, později ve výrobku dochází ještě k velmi pozvolné dodatečné krystalizaci, která může být spojena s jistými trvalými deformacemi nebo i vznikem vnitřního pnutí. Zvýšené teploty dodatečnou krystalizaci podporují. Krystalizace ve formě závisí na rychlosti tuhnutí taveniny. Chladnější forma a tenkostěnné partie výstřiku znamenají rychlé ztuhnutí a potlačení možnosti krystalizace, takže povrchová vrstva stěny zůstává amorfni nebo jemně krystalická. Horká forma a silnostěnné partie dávají jemně krystalický povrch, pod povrchem jsou směrově uspořádané (orientované) drobné sférolity, uvnitř jádra stěny pak velké neuspořádané sférolity. Procento krystalinity přitom roste od povrchu k jádru stěny. Tyto morfologicky různé krystalické oblasti vznikají postupně (nejdříve na povrchu, nakonec uvnitř stěny) a mají každá různé smršťení. Odlišné smršťení mají i amorfni oblasti. Následkem těchto rozdílných smršťení vzniká ve výstřiku vnitřní krystalizační pnutí, které se dodatečnou krystalizací dále zvětšuje.

Přidáním nukleačního činidla (umělých krystalizačních zárodků) do polymeru se urychluje proces krystalizace tak, že v celém objemu výstřiku vznikne značně rovnoměrná jemná krystalická struktura s drobnými sférolity, s minimálním vnitřním pnutím. Tato struktura dává vyšší houževnatost než nepravidelná krystalická struktura, u které často vznikají na hranicích velkých sférolitů poruchy vedoucí až k lomu.

Rychlost krystalizace závisí zejména na teplotě zesklenní T_g daného termoplastu. Polymery s nízkou teplotou T_g mají rychlost krystalizace při normální teplotě dostatečně velkou, takže nabývají stabilní krystalické struktury poměrně rychle. Například u výstřiku z polyacetalů ($T_g = -30$ až -75 °C), vstřikovaných do „horké“ formy ($T_F > 80$ °C), jsou krystalizace a tím i smršťení skončeny prakticky do 48 hodin po vyjmutí z formy. U termoplastů s teplotou T_g blízké normální teplotě však pokračuje krystalizace a tím i dodatečné smršťení ještě dlouho po vyrobení součásti. Urychlení stabilizace rozměru lze dosáhnout dodatečnou tepelnou úpravou (temperováním), kterou se zrychlí průběh

krystalizace. Velikost dodatečného smršťování je tím větší, čím více byla krystalizace potlačena při vlastním procesu vstřikování rychlým ochlazováním (např. nízkou teplotou formy). Teplotu temperování volíme nad teplotou zesklennění T_g daného semikrystalického termoplastu a co nejblíže teplotě tání T_m . Účinnost temperování závisí na teplotě, přičemž horní mez je nutno volit opatrně s ohledem na nebezpečí tvarových deformací, vznikajících uvolňováním orientovaných oblastí.

Vlivem krystalizace dochází k většímu rozdílu měrných objemů roztaveného a tuhého plastu mezi semikrystalickými a amorfními termoplasty, a tedy i smršťování výstřiků semikrystalických termoplastů je větší než amorfních. Vyšší krystalinita u téhož polymeru dává vyšší hustotu (větší smršťování), vyšší modul pružnosti, vyšší pevnost a mez kluzu, vyšší mez únavy, vyšší tvarovou stálost za tepla, zlepšenou chemickou odolnost, nižší tažnost, nižší rázovou a vrubovou houževnatost a nižší navlhavost (u navlhavých plastů).

2.2.1.7 Vnitřní pnutí [1, 16]

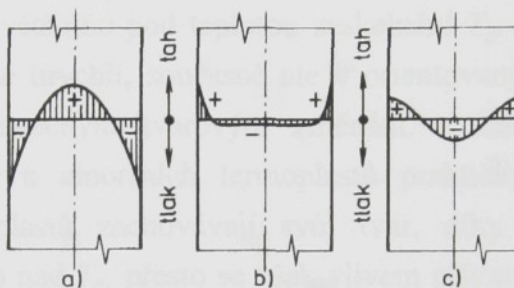
Vnitřním pnutím nazýváme stav napjatosti ve výrobku, který není vyvolán vnějším mechanickým zatížením, ale deformacemi makromolekul polymeru vlivem nerovnoměrných objemových změn během procesu vstřikování. Tyto lokální deformace plastu vznikají vždy při tuhnutí taveniny, když v důsledku termodynamických podmínek nemohlo dojít k vyrovnání stavu napjatosti relaxací materiálu. Stav napjatosti může být vnesen do výrobku i při dodatečných úpravách (např. dodatečnou krystalizací při temperování nebo botnáním při kondicionování). Vnitřní pnutí můžeme rozlišovat podle příčin jejich vzniku na ochlazovací, orientační, expanzní a krystalizační. Protože vzniklá vnitřní pnutí a jejich případná relaxace mají vliv na deformační chování výstřiků, mají tedy značný vliv i na jejich výrobní a dodatečné smršťování.

Ochlazovací pnutí vzniká nerovnoměrným ochlazováním různých částí výstřiku. Na povrchu stěn je ochlazení prudké a smršťování malé. V jádru stěny je ochlazování pomalejší a smršťování větší, ale smršťování se nemůže plně uplatnit, protože mu v tom brání ztuhlá povrchová vrstva. Po ztuhnutí celého průřezu je tedy v povrchové vrstvě tlakové pnutí a v jádru stěny tahové (obr. 17a). Ze stejných důvodů vzniká pnutí na rozích hranatých výstřiků, v ostrém ohybu stěny apod. Na vnější ploše ohybu je styk taveniny s chladnou stěnou formy větší, ochlazování intenzivnější a výsledné pnutí tlakové. Na vnitřní ploše ohybu a uvnitř rohuje tahové pnutí. Ochlazovací pnutí tahové vzniká také kolem zastříknutých kovových vložek a je způsobeno rozdílem teplotní roztažnosti kovové vložky a okolního plastu a smršťováním plastu. Je-li plastová vrstva kolem kovové vložky tenká, může snadno prasknout. Totéž se stává kolem otvorů vlivem smršťování okolního plastu na jádro. Vznik ochlazovacího pnutí je silně podporován nerovnoměrnou teplotou stěn formy.

Orientační pnutí vznikají jako následek rozdílné orientace ve výstřiku (viz kap. 2.2.1.4), bývají dosti velká a mohou vést k dodatečným nepravidelným deformacím a

trhlinám. Objevují se při nestejném stupni a směru orientace ve výrobku. Vznikají při tuhnutí taveniny po vytvoření orientované struktury během dalšího chladnutí materiálu následkem nestejné teplotní roztažnosti různě orientovaných oblastí ve výstřiku a jsou kolmá ke směru orientace (ve směru orientace se tato pnutí následkem zpevnění materiálu negativně neprojeví). Toto pnutí je tahové v místech vysokého stupně orientace, tlakové v okolních oblastech nižšího stupně orientace.

Při plnění formy je čelo proudu taveniny tvořeno chladnější vysokoviskózní povrchovou vrstvičkou, která se napíná jako blána a vzniká v ní biaxiální orientace (viz obr. 12a, kap. 2.2.1.4). Vzhledem k sousedním méně orientovaným vrstvám vzniká v této povrchové vrstvičce biaxiální tahové napětí. Jakmile tato vrstvička přilehne na stěnu formy, ihned ztuhne ještě ve stavu této napjatosti. Výsledkem je špička tahového pnutí na povrchu stěny výrobku, obr. 17b.



Obr. 17. Průběh tří druhů vnitřních pnutí napříč stěnou výstřiku,
a) ochlazovací pnutí, b) orientační pnutí, c) expanzní pnutí [1]

Expanzní pnutí se objevuje tehdy, jestliže je při otevření formy výstřik ve formě ještě pod tlakem, např. následkem pružné deformace formy způsobené nadměrným vstřikovacím tlakem. Po vyjmutí z formy výstřik expanduje pod tlakem vnitřních dosud ne zcela tuhých partií. Tato expanze je jen částečná, neboť jí brání tuhé a již pevné povrchové vrstvy. Výsledkem je tahové pnutí v povrchové vrstvě a tlakové pnutí v jádru stěny výstřiku, obr. 17c. U křehkých plastů to může mít za následek povrchové trhlinky ve směru orientace makromolekul.

Krystalizační pnutí vznikají následkem různého smršťování rozdílných krystalických oblastí a následkem dodatečné krystalizace (viz kap. 2.2.1.6). Při rychlém ochlazení taveniny na stěně formy dochází v povrchových vrstvách k potlačení krystalizace, kdežto ve středu stěny výrobku zůstávají podmínky k plnému rozvinutí krystalické struktury zachovány. Vznikající pnutí mezi oběma oblastmi je značné, neboť vedle objemových změn, způsobených rozdílným teplotním gradientem v průřezu výstřiku, přistupují ještě objemové změny vzhledem k rozdílné hustotě povrchových, rychle ochlazených oblastí a vnitřní části výstřiku, s plně rozvinutou krystalickou strukturou.

Všechna uvedená vnitřní pnutí se spolu superponují, jejich průměty v jednotlivých rovinách se algebraicky sčítají, takže výsledná napjatost je složitá a v objemu výrobku nerovnoměrně rozložená. Výsledkem spolupůsobení jednotlivých vnitřních pnutí bývá převážně tlakové pnutí v podpovrchové vrstvě a tahové pnutí uvnitř stěny, povrchová

vrstvička mívá tlakové nebo tahové pnutí. Kritická místa jsou v okolí vrubů, zářezů, vnitřních i vnějších hran, otvorů apod., neboť zde dochází ke koncentraci napětí.

Vlivem *relaxace napětí* se napětěvé špičky vnitřního pnutí časem snižují a pnutí se zčásti vyrovnává, zejména u houževnatých semikrystalických termoplastů s nižším stupněm krystalinity nad teplotou T_g . U termoplastů s vysokou krystalinitou a především u amorfních termoplastů hluboko pod teplotou T_g se vnitřní pnutí vyrovnává jen málo a je u nich spíše sklon ke vzniku prasklin. Tento sklon je podporován působením chemikálií, tenzoaktivního prostředí, slunečního záření a povětrnosti, termooxidačními vlivy apod., čili těmi vlivy, které snižují tažnost a houževnatost materiálu.

Pokud je tuhost výrobku menší než silový účinek vnitřního pnutí, dochází k rozměrovým a tvarovým změnám (např. prohnutí stěn) ihned po vyjmutí z formy. Je-li tuhost výrobku větší, dochází k uvedeným změnám až po tepelné úpravě, která se provádí u amorfních termoplastů většinou pod teplotou zesklenní T_g . Při temperování nad T_g se relaxace pnutí sice značně urychlí, současně ale v orientovaných výstřicích z amorfních termoplastů dochází k značným tvarovým změnám v důsledku relaxace orientace. Temperování nad T_g se u amorfních termoplastů prakticky neprovádí. Výstřiky ze semikrystalických termoplastů zachovávají svůj tvar, díky krystalické mřížce i při teplotách relativně vysoko nad T_g , přesto se však vlivem přítomného vnitřního pnutí často také deformují.

2.2.1.8 Navlhavost a nasákavost [7]

Navlhavost a nasákavost plastů je přijímání vody polymerem a popř. plnivý z okolního prostředí. Je-li plast uložen ve vlhkém ovzduší, mluvíme o *navlhavosti*, je-li uložen ve vodě, jde o *nasákavost*. V obou případech se však jedná o stejný proces sorpce vody. Polární polymery s hydrofilními skupinami v makromolekulách (např. PA, CA, PUR, PMMA) mají velkou sorpci vody, nepolární polymery (např. PE, PP, PS, PTFE) naopak velmi nízkou. Anorganická plniva (břidlicová nebo křemičitá moučka, talek, skleněná vlákna apod.) navlhavost a nasákavost snižují, kdežto organická plniva (dřevitá moučka, celulóza, papírová a bavlněná plniva) ji obvykle zvětšují, pokud nejsou ve zvláštních případech impregnovaná proti přijímání vlhkosti. Nedokonalá adheze polymeru k plnivu – např. anorganickému – má za následek sorpci vody vztlínavostí, příkladem mohou být sklem vyztužené plasty. Změkčovadla a nízkomolekulární podíly v polymerech vesměs zvětšují sorpci vody. U semikrystalických termoplastů se sorpce vody snižuje s rostoucím procentem krystalinity.

Sorpce vody je u daného polymeru tím rychlejší, čím je vyšší relativní vlhkost okolního prostředí, vyšší teplota (difúze vody do polymeru probíhá rychleji), větší poměr povrchu součásti k jejímu objemu (tenčí stěny), hrubší povrch (např. obrobený).

Sorpce vody probíhá směrem od povrchu dovnitř materiálu až do určitého rovnovážného stavu, kdy určité relativní vlhkosti okolního prostředí a určité teplotě

odpovídá určitý rovnovážný obsah vody v polymeru. U tenkostěnných součástí se rovnovážný obsah vody ustaví poměrně brzy v celém průřezu součásti (např. součást z PA o tloušťce stěny 1 mm dosáhne na vzduchu 20 °C a 65 % relativní vlhkosti rovnovážného obsahu vody do 2 měsíců), u tlustostěnných součástí to trvá mnohem déle (u podobné součásti o tloušťce stěny 5 mm za stejných podmínek asi 1,5 roku). Z toho důvodu mívají tlustostěnné součásti často nestejně rozdělený obsah vody. Při procesu navlhání bývá větší obsah vody v povrchových vrstvách než uvnitř průřezu stěny.

Difúze vody do hygroskopických plastů způsobuje zvětšování objemu a tím rozměrové nebo i tvarové změny výrobků. Přijímáním vody se rozměry plastové součásti zvětšují zhruba o objem absorbované vody, ubýváním vody se rozměry zase zmenšují. Výsledný účinek je obdobný jako při působení tepla, rozdíl spočívá pouze v rychlosti obou dějů. Pronikání vlhkosti probíhá nesrovnatelně pomaleji, a k vzniku příslušných změn proto dochází až po dostatečně dlouhém styku hygroskopického plastu se vzdušnou vlhkostí nebo vodou.

Sorpce vody je vratný děj: Jestliže navlhlou plastovou součást umístíme do suchého prostředí, ubývá obsah vody v polymeru až na hodnotu, která bude opět v rovnováze s novou relativní vlhkostí a teplotou okolního prostředí.

Vzhledem k tomu, že difúze vlhkosti neprobíhá rovnoměrně ve všech směrech, jsou rozdílné i změny rozměrů pro jednotlivé směry. Změny jednotlivých rozměrů závisejí na homogenitě výstřiků (rovnoměrném rozdělení a orientaci plniv, obsahu změkčovadel apod.), geometrii výrobku (hlavně tloušťce stěn) a jeho struktuře (zejména krystalinitě), podmíněné tepelně mechanickou historií výroby a dodatečnými úpravami. Sorpce vlhkosti způsobuje zvětšování rozměrů a tedy působí opačným směrem než smrštění, jehož účinek vlastně vyrovnává.

Obsah vody v plastu ovlivňuje nejen jeho rozměry, ale také snižuje jeho pevnost, modul pružnosti a tvrdost, zvyšuje tažnost a houževnatost, snižuje elektrické izolační vlastnosti. Změna těchto vlastností je opět vratná. Protože výrobky z plastů ihned po vystříknutí mají nulový obsah vody, urychlujeme někdy (hlavně u PA) jejich navlhnutí na potřebný rovnovážný obsah vody ponořením do vodní lázně na přesně stanovenou dobu (tzv. *kondicionace*).

2.2.1.9 Botnání a uvolňování nízkomolekulárních látek [7]

Podle svého chemického složení zvětšují téměř všechny plasty v prostředí určitých rozpouštědel, kyselin nebo zásad svůj objem, tj. *botnají*. Výrobci plastů uvádějí ve firemní literatuře údaje o chemické odolnosti většinou jen kvalitativně. Difúze těchto kapalin do plastů však probíhá podle stejných zákonitostí jako difúze vody, takže ke kvantitativnímu vyjádření chemické odolnosti plastu by bylo možno využít metodik používaných při stanovení nasákavosti.

Se vzrůstající teplotou dochází u některých polymerů k zvyšujícímu se *uvolňování nízkomolekulárních sloučenin*, provázenému zmenšováním objemu a tím i změnou rozměrů výrobku. Z povrchu odtékávají jednak přídavné látky (změkčovadla, maziva, stabilizátory), jednak monomery.

Z termoplastů dochází k nejvýraznějším úbytkům hmotnosti u derivátů celulózy, kde zvýšení teploty má za následek tékání změkčovadel. Maximální přípustné ztráty hmotností po 48 hodinovém skladování při 80 °C činí u acetátu celulózy 3–6 % a u acetobutyrátu celulózy 0,5–3,5 %. Dodatečné smrštění středně tvrdého esteru celulózy dosahuje až 25% hodnoty celkového smrštění a závisí především na tloušťce výstřiků.

Mezi náchylností polymeru k ztrátě změkčovadel a tepelnou odolností podle Vicata existuje definovatelný vztah. Typy s vyšší tepelnou odolností mají menší sklon k migraci změkčovadel za tepla a tím i menší dodatečné smrštění. Pro výrobu přesnějších výstřiků jsou proto vhodnější typy s vyšší odolností za tepla podle Vicata.

2.2.2 Vliv technologických parametrů vstřikování na smrštění [7]

Všechny technologické parametry, regulovatelné na vstřikovacím stroji, slouží k dosažení optimálního vztahu mezi teplotou a tlakem taveniny v dutině formy. *Základní parametry* jsou ty, které ovlivňují časový průběh těchto veličin bezprostředně. Ostatní slouží k citlivějšímu ovládání základních parametrů – lze je označit jako *vedlejší*.

Základními parametry jsou: teplota formy T_F , teplota taveniny při výstupu z trysky T_t , doba plnění formy (doba vstřiku) t_v , doba dotlaku (doba doplňování dutiny formy) t_d , doba chlazení t_{ch} , vstřikovací tlak p_v , dotlak p_d .

Vedlejšími parametry jsou: teploty temperačního média obou částí formy T_{m1} , T_{m2} , teploty jednotlivých pásem tavicí komory T_k a trysky T_{tr} , otáčky šneku n_s , doba plastikace T_p , doba manipulace t_m , zpětný tlak p_{zp} .

Rozměrovou stabilitu výstřiků ovlivňuje významně také velikost přidržovací síly F_p . Nedostatečná přidržovací síla je příčinou pootevírání formy a tím zvětšení rozptylu rozměrů, zejména rozměrů nevázaných formou.

Základní parametry ovlivňují strukturu výstřiků, tj. jeho orientaci, vnitřní pnutí a stupeň krystalinity semikrystalických termoplastů. Tyto parametry jsou tudíž rozhodujícími nejen pro velikost smrštění a rozměrovou stabilitu výstřiků, ale i pro jeho ostatní užitkové vlastnosti (mechanickou pevnost, tuhost, tvrdost, odolnost opotřebení aj.).

Účinek jednotlivých parametrů na smrštění je různý v závislosti na jejich aktuálních interakcích a nelze je uvažovat izolovaně. Tyto parametry spolu úzce souvisí a ve svých účincích se buď doplňují nebo si naopak odporují.

2.2.2.1 Vliv vstřikovacího tlaku a doby plnění dutiny formy [1, 7, 14]

Vstřikovacím tlakem se rozumí tlak, kterým působí jednotková plocha průřezu šneku nebo pístu na taveninu v tavicí komoře. Označuje se jako *vnější vstřikovací tlak*. Z hlediska

kvality výstřiku je však rozhodující tlak taveniny v dutině formy tzv. *vnitřní vstřikovací tlak*. Vzhledem k tlakovým ztrátám v tavicí komoře a formě je tlak v dutině formy vždy menší než vnější vstřikovací tlak resp. dotlak. Na vstřikovacích strojích se však většinou průběh tlaku nastavuje *tlakem hydraulickým*, což je tlak v hydraulickém válci axiálního pohonu šneku. Jeho průběh se pak pro jednotlivé fáze vstřiku resp. dotlaku řídí v závislosti na dráze šneku, čase, tlaku v dutině formy, nebo případně jejich kombinací. Pokud není v tavicí komoře čidlo pro měření tlaku, lze vnější vstřikovací tlak resp. dotlak určit výpočtem z tlaku hydraulického a ze vzájemného poměru plochy čela šneku a pístu hydraulického válce.

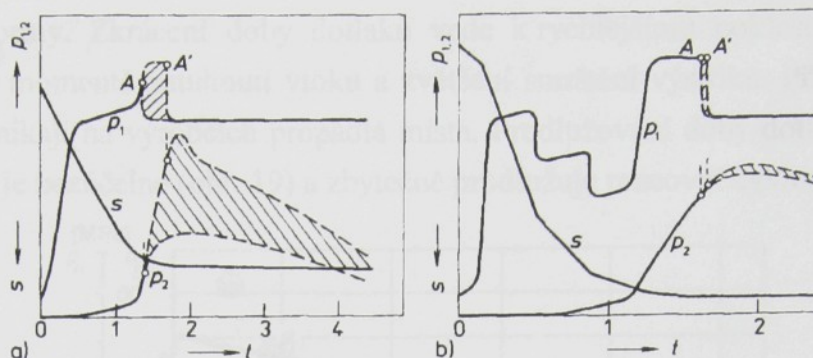
Doba plnění dutiny formy (doba vstřiku) je definována časovým intervalem, ohraničeným počátkem pohybu šneku (pístu) vpřed a okamžikem dosažení maximálního tlaku ve formě. Ovládání rychlosti dopředného pohybu šneku (*rychlosti vstřikování*) se děje regulací hydraulického tlaku nebo množstvím hydraulické kapaliny. Rychlost posuvu šneku a tedy rychlost proudění taveniny je určena velikostí vstřikovacího tlaku, který vytváří potřebný tlakový spád pro tok taveniny. Plnění musí být dostatečně rychlé, aby se zabránilo nežádoucímu zvyšování viskozity taveniny vlivem ochlazování. Vysoká vstřikovací rychlost má příznivý vliv na orientaci makromolekul ve výstřiku. V povrchových vrstvách je orientace sice mírně vyšší následkem zvýšeného smykového napětí, ale je podstatně menší v jádru průřezu, kde je následkem vyšší rychlosti nižší viskozita taveniny. Vliv orientace makromolekul na smrštění viz kap. 2.2.1.4. Nadměrná rychlost vstřikování způsobuje přehřátí a tepelnou degradaci materiálu. Optimální rychlost plnění závisí zejména na tloušťce výstřiku. Obecně platí, že výstřiky s velkou tloušťkou stěn vyžadují nižší rychlosti plnění a naopak.

Rychlost čela proudu taveniny ve formě má být v zásadě konstantní, aby se dosáhlo rovnoměrného a optimálního proudění s minimálními hydraulickými ztrátami. U jednoduchého výstřiku o stejné tloušťce stěny to vyžaduje přibližně konstantní rychlost posuvu šneku vpřed. U výstřiku s rozdílnými průřezy je účelné měnit rychlost posuvu šneku během vstřikovací fáze, aby rychlost proudu taveniny byla alespoň přibližně stejná.

Ke konci vstřiku je výhodné plynule zpomalit vstřikovací rychlost, aby mohl z formy uniknout vzduch a zabránilo se nadměrným tlakovým špičkám ve formě. Moderní vstřikovací stroje s optimalizací vstřikovacího procesu takové programování umožňují.

Průběh *posuvu šneku* s , hydraulického a vnitřního tlaku při vstřiku u konvenčních a moderních strojů je zřejmý z obr. 18. Při naplnění všech tvarových dutin formy tlak taveniny prudce stoupne a vstřikovací rychlost prudce poklesne. V určitém okamžiku před dosažením tlakového maxima ve formě je nutné snížit vstřikovací tlak posouvající šnek na tzv. dotlak. Je-li přepnutí na dotlak opožděné (obr. 18a, bod A'), stoupne tlak taveniny ve formě příliš vysoko a nastane přeplnění formy se všemi negativními důsledky (viz kap. 2.1). Výška vstřikovacího tlaku při pozdním přepnutí výrazně ovlivňuje vnitřní tlak ve fázi dotlaku. Je-li přepnutí na dotlak předčasné (obr. 18a, bod A), je tlak taveniny ve formě

nízký, hmotnost a rozměry výstřiku jsou menší (větší smrštění), případně může být výstřik neúplný (nedostřik).



Obr. 18. Průběhy tlaků v závislosti na čase při vstřikování termoplastů

a) u konvenčních strojů, b) u moderních strojů s optimalizací procesu vstřikování
 p_1 – tlak hydraulické kapaliny při vstřiku, p_2 – tlak taveniny ve formě, s – dráha posuvu šneku, t – čas, $A-A'$ – rozptyl okamžiku přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak v jednotlivých cyklech (odpovídající rozptyly průběhu tlaků jsou značeny šrafováním); dotlak je zachycen jen ve své počáteční fázi [1]

Moderní stroje mívají zabudován systém přesného přepínání vstřikovacího tlaku na dotlak, odvozený buď od posuvu šneku pomocí bezkontaktních spínačů, nebo od tlaku taveniny ve formě. Druhý způsob je velmi přesný a zaručuje dobrou reprodukovatelnost průběhu tlaku ve formě v každém cyklu (obr. 18b), vyžaduje však umístit drahé tlakové snímače do formy.

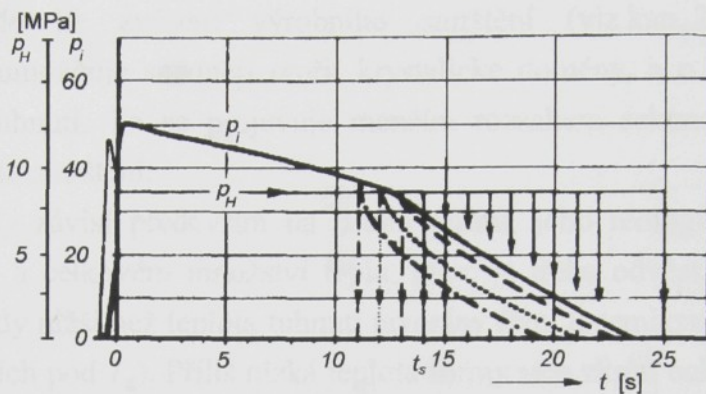
2.2.2.2 Vliv dotlaku [1, 3, 5, 7, 14]

Dotlak má velký vliv na strukturu výrobku a časově se překrývá s fází chladnutí výstřiku ve formě. Velikost dotlaku a jeho trvání mají odpovídat postupu smršťování hmoty ve formě. Zvýšení vstřikovacího tlaku a dotlaku vede k vyššímu stupni naplnění formy, vyvolává zmenšení volného objemu polymeru a tím se zmenšuje i smrštění.

Zvyšováním tlaku ve formě se zmenšuje pohyblivost segmentů makromolekulárních řetězců polymeru, čímž se zpomalují relaxační procesy orientovaného polymeru a zmenšuje se tak výrobní smrštění. U semikrystalických polymerů vyšší dotlak znesnadňuje ukládání makromolekul do krystalitů čímž se výrobní smrštění také snižuje. U strojů s optimalizací procesu lze průběh dotlaku během pracovního cyklu programovat. V první fázi bývá dotlak vyšší, aby se forma rychle naplnila, dokud je tavenina dobře tekutá. Ke konci se dotlak sníží, aby se omezila orientace v okolí vtoku a popř. snížil vysoký zbytkový tlak, a kleslo nebezpečí deformování výrobku vyhazovacím systémem.

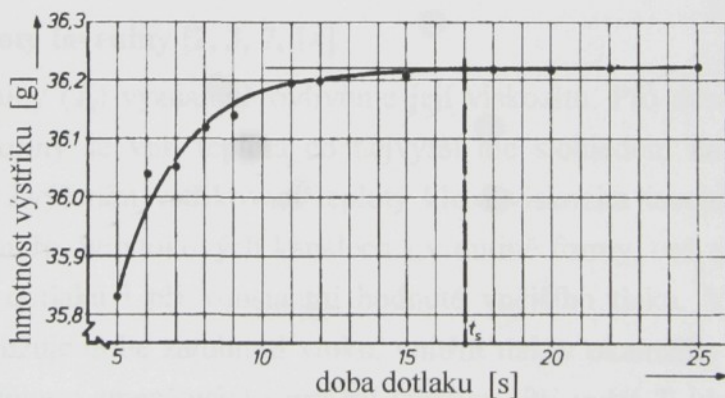
Velikost smrštění je dána velikostí měrného objemu, jenž má výstřik v čase, kdy došlo k zatuhnutí ústí vtoku. Čím je větší měrný objem v daném čase, tím větší bude smrštění, a naopak. Tlak ve formě klesá s rostoucí odlehlostí od ústí vtoku, a proto bude v místech vzdálenějších ústí vtoku za předpokladu stejné rychlosti ochlazování vždy nižší tlak a tím větší měrný objem než v místě bližším vtoku.

Účinnost dotlaku je omezena dobou zatuhnutí vtokové soustavy. Dotlak má v optimálním případě trvat tak dlouho, dokud neztuhne ústí vtoku, jímž se dotlačuje tavenina do formy. Zkrácení doby dotlaku vede k rychlejšímu poklesu tlaku v dutině formy, tzn. i v momentě zatuhnutí vtoku a zvětšení smrštění výstřiku. Při velmi krátkém dotlaku ale vznikají na výrobcích propadlá místa. Prodlužování doby dotlaku za okamžik zatuhnutí vtoku je bezúčelné (obr. 19) a zbytečně prodlužuje pracovní cyklus.



Obr. 19. Průběh tlaku v dutině formy (p_i) v závislosti na době dotlaku za konstantní výše hydraulického dotlaku (p_H), t_s – doba zatuhnutí vtoku [s]

Okamžik zatuhnutí vtoku lze experimentálně stanovit vážením výstřiků zhotovených při různých dobách dotlaku a zhotovením grafické závislosti *hmotnost výstřiku [g] – doba dotlaku [s]*, který je znázorněn na obr. 20. Pokud křivka začne nabývat monotónního průběhu, lze říci, že dotlak je již neúčinný z důvodu zatuhnutí vtoku.



Obr. 20. Stanovení bodu zatuhnutí vtoku t_s prostřednictvím křivky závislosti hmotnosti výstřiku na době dotlaku [s]

2.2.2.3 Vliv teploty formy a doby chlazení [2, 3, 7, 14]

Vyšší teplota formy (T_F) má pozitivní vliv na rychlost plnění dutiny formy a zabíhavost vstřikovaného plastu. Čím vyšší je T_F , tím vyšší je zabíhavost hmoty, výstřik chladne rovnoměrněji a rychleji probíhá relaxace orientace, což zvyšuje výrobní smrštění. Zvýšení T_F způsobuje nárůst vnitřního tlaku ve formě, který je mírný u výstřiků s menší tloušťkou a větší u tlustostěnných výstřiků s odpovídajícím vlivem na snižování smrštění. Současně se ale prodlužuje doba chlazení, a tím i doba vstřikovacího cyklu, která přímo

ovlivňuje ekonomické hledisko výroby. Vyšší T_F dále zlepšuje mechanické vlastnosti, tvarovou stabilitu výstřiku a zvyšuje kvalitu jeho povrchu.

Důležitá je také stejná teplota obou částí formy. Jestliže je totiž jedna polovina teplejší než druhá, tuhne hmota na chladnější části rychleji, což se projeví menším smrštěním hmoty než na opačné straně formy a dojde k deformaci výstřiku – tzv. *warp*.

U semikrystalických polymerů vzrůstá s rostoucí T_F podíl krystalické fáze, a tím hustota, což vede ke zvýšení výrobního smrštění (viz kap. 2.2.1.6). Vyšší T_F makromolekulám umožňuje snadněji tvořit krystalické domény, a o to rovnovážnější je stav hmoty po ztuhnutí. To se projevuje menším rozsahem sekundární krystalizace a redukcí dodatečného smrštění.

Volba výše T_F závisí především na druhu plastu, jeho reologických vlastnostech, vstřikovací teplotě a celkovém množství tepla, které je třeba odvést. Maximální teplota formy musí být vždy nižší než teplota tuhnutí taveniny (tzn. u semikrystalických polymerů pod T_m a u amorfních pod T_g). Příliš nízká teplota formy sice zkrátí ochlazovací fázi, a tím vstřikovací cyklus, ale to není prakticky vhodné z důvodu vzniku vysokého vnitřního pnutí ve výrobku, původce pozdějších deformací a zhoršení mechanických vlastností.

Doba chlazení se volí co nejkratší tak, aby teplota výrobku při vyhození z formy byla taková, aby byl už dostatečně tuhý a při vyjímání z formy se nedeformoval. Vlivy podstatně určující dobu chlazení jsou tloušťka stěny a teplota formy. Vliv teploty taveniny na dobu chlazení je menší.

2.2.2.4 Vliv teploty taveniny [2, 3, 7, 14]

Teplota taveniny (T_t) významně ovlivňuje její viskozitu. Pro dosažení co nejlepšího zaplnění dutiny formy se volí teplota co nejvyšší ale s ohledem na nebezpečí tepelné degradace plastu. Zvýšením vstřikovací teploty klesá viskozita taveniny a tím i tlakové ztráty v tavící komoře, ve vtokových kanálech i v dutině formy, což se projeví zvýšením vnitřního tlaku a dotlaku i při konstantní hodnotě vnějšího tlaku. Vlivem pomalejšího chladnutí se prodlužuje doba zatuhnutí vtoku, vnitřní tlak v okamžiku zatuhnutí vtoku se zvyšuje, což je příčinou zmenšování smrštění výstřiku. Při vyšší T_t klesá smykové napětí v tavenině, a snadněji probíhá relaxace orientace, což ve směru orientace vede k zvětšování výrobního smrštění a snižování dodatečného smrštění.

Teplota taveniny má u semikrystalických termoplastů vliv na rychlost krystalizace. V tavenině zůstává určité množství částečně uspořádaných makromolekul, které působí jako budoucí krystalizační zárodky a vyšší teplota taveniny jejich počet snižuje (viz kap. 2.2.1.6). Vyšší teplota taveniny tak může způsobovat částečné zpomalení krystalizace a připívat ke snižování smrštění semikrystalických termoplastů.

Celkový účinek teploty taveniny na smrštění není v důsledku rozdílných vlivů na vlastnosti polymeru zcela jednoznačný. Většinou vyšší teplota taveniny způsobuje menší smrštění výstřiků.

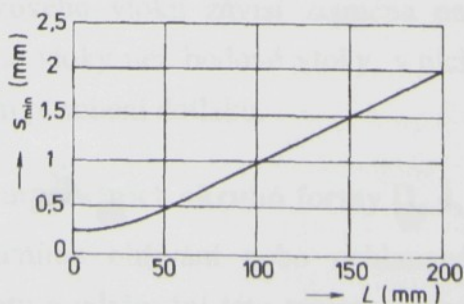
2.2.3 Vliv konstrukce výrobku a formy na smrštění

2.2.3.1 Vliv tvaru výrobku a tloušťky stěny [1, 7, 14, 16, 17]

Z konstrukčních požadavků na tvar výrobku se musí zohlednit především požadovaná tuhost a pevnost, požadované tolerance rozměrů a kvalita povrchu. Technologičnost tvaru vstřikovaných výrobků znamená dodržovat některé důležité zásady zejména rovnoměrnou tloušťku stěny, maximální možnou délku toku taveniny, zaoblení stěn, úkosity a umístění vtoku.

Rovnoměrnost tloušťky stěny je podmínkou pro stejnou a rovnoměrnou rychlost proudu taveniny ve formě, stejnou rychlost chlazení ve všech místech výstřiku, rovnoměrnější smrštění a minimální vnitřní pnutí. Jakékoli náhlé změny průřezu, ostré rohy představují překážky proudu taveniny a způsobují zavírání taveniny, různou orientaci makromolekul, následkem toho i vnitřní pnutí ve výrobcích a nerovnoměrné smrštění. Čím větší jsou poloměry zaoblení, tím menší hydraulické odpory musí tavenina při proudění překonávat a tím nižší jsou tlakové ztráty v dutině formy, vyšší tlak uvnitř formy pak ovlivňuje smrštění (viz kap. 2.2.2.1). Skutečnost, že tlak ve formě značně klesá se vzdáleností od ústí vtoku, nám vysvětluje, proč vznikají velké rozdíly ve smrštění na různých místech výstřiků složitých tvarů.

Četné zkoušky provedené za laboratorních podmínek i praktické zkušenosti ze sériové výroby souhlasně dokazují výraznou závislost smrštění na *tloušťce stěny*, zejména u semikrystalických termoplastů. Tlustší stěny chladnou pomaleji, procesy relaxace orientace se mohou lépe uplatnit a jejich smrštění je tedy větší než u tenkých stěn. Složitost optimální volby tloušťky stěny spočívá v tom, že musíme respektovat řadu hledisek, a to zejména hledisko funkční (mechanickou pevnost, elektrickou pevnost apod.), technologické (zabíhavost výchozího plastu v dutině formy, nebezpečí deformací, orientace a vnitřní pnutí) a ekonomické (doba chlazení, spotřeba materiálu aj.). Výsledná tloušťka stěny vychází buď z respektování rozhodujícího hlediska, nebo, a to nejčastěji, je kompromisem mezi všemi uvedenými požadavky. Minimální přípustná tloušťka stěny je určena požadovanou tuhostí, pevností a přesností rozměrů výrobku. Zároveň musí být dostatečně nadimenzována, aby tavenina dokonale vyplnila dutinu formy vzhledem k potřebné délce toku taveniny (viz obr. 21). V ideálním případě se snažíme o rovnoměrnost a minimalizaci tloušťek stěn.



Obr. 21. Závislost min. tloušťky stěny s_{min} na délce toku taveniny L , (materiál – PS) [1]

Ústí vtoku má být umístěno tak, aby tavenina vtékala do nejtlustšího průřezu výstřiku a tekla směrem k nejtenčímu místu. Umístíme-li vtok v místě tenčí stěny, ztuhne materiál v tenké stěně dříve než v tlusté, takže nelze již dotlačovat taveninu do pomalu chladnoucí tlusté stěny a nahrazovat tam objem materiálu zmenšující se tuhnutím. Výsledkem značného smrštění hmoty jsou vnitřní staženiny a povrchové propadliny v tlusté stěně. Hromadění materiálu v některých partiích výstřiku (např. v místech napojování žeber) má stejný negativní vliv jako značně různá tloušťka.

Prostorové zábrany smrštění, např. jádra, kovové zálisky apod., ovlivňují rovněž významně smrštění. Jádra (popř. kovové zálisky) zabraňují volnému smršťování materiálu a jsou proto příčinou zvýšení tahových pnutí ve výstřiku. Dodatečné smrštění rozměrů s omezeným smrštěním je v důsledku uvolňování vnesených pnutí proto větší. Předehřevem kovových zálisků a zvětšením hmoty plastu lze vnitřní pnutí snížit.

Výrobky bývají na stěnách rovnoběžných se směrem otevírání formy opatřeny technologickými úkosi, které slouží pro usnadnění vyjímání hotového výrobku z formy. Úkosi snižují potřebnou vyhazovací sílu a zabraňují deformacím působením vyhazovačů. Používané minimální vnitřní úkosi jsou 1 až 2° a vnější bývají menší: 0,5 až 1°. Také anizotropie smrštění je značně ovlivňována tvarovými faktory. S rostoucí tloušťkou stěn se rozdíl mezi smrštěním ve směru toku a ve směru kolmém na tok taveniny zmenšuje.

2.2.3.2 Vliv konstrukce vtokového kanálu a ústí vtoku [1, 7, 14, 18]

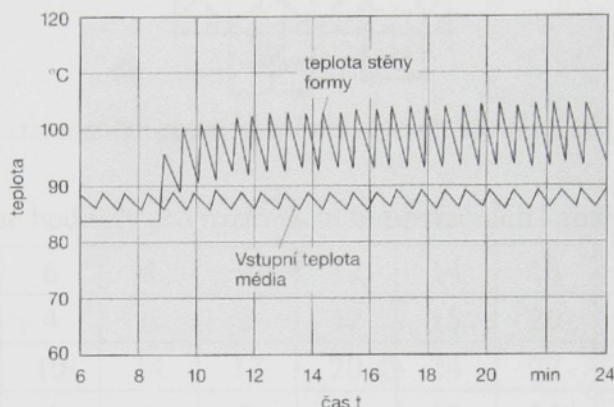
Průřez vtokových kanálů musí být dostatečně velký, aby byla jistota, že po naplnění formy zůstane jádro vtokového kanálu dostatečně dlouho v plastickém stavu a umožňovalo tak doplňování taveniny ve fázi dotlaku. Dráha toku od vstřikovací trysky k dutině (dutinám) vstřikovací formy má být co nejkratší, aby mohla být tavenina vstřikována co největší rychlostí a ke všem dutinám vstřikovací formy stejně dlouhá, aby byl ve všech dutinách formy stejný tlak taveniny. Pokud není dráha toku taveniny stejně dlouhá, docílí se stejných tlakových poměrů v jednotlivých tvarových dutinách korekcí velikostí ústí vtoku.

Na velikost smrštění má významný vliv velikost a tvar průřezu ústí vtoku, která ovlivňuje tlakové ztráty při průtoku taveniny plastu a dobu zatuhnutí vtoku. V případě obdélníkového průřezu má větší vliv tloušťka vtoku než jeho šířka, neboť tlakové ztráty v ústí vtoku závisejí na třetí mocnině jeho tloušťky, ale jen na první mocnině jeho šířky. Rovněž doba zatuhnutí takového vtoku závisí zejména na jeho tloušťce. Pro přesné výstřiky jsou výhodnější plné vtoky než bodové vtoky, v nichž tavenina rychle ztuhne, a předčasně tak často znemožní působení dotlaku.

2.2.3.3 Vliv konstrukce temperačních okruhů formy [1, 4, 7, 16]

Temperací formy rozumíme ohřívání nebo ochlazování tvářecí části formy na požadovanou provozní teplotu a udržování této teploty během výroby. K temperování se

převážně používají kapaliny, jako například voda a minerální oleje, které proudí v temperačních okruzích formy. Technologie vstřikování vyžaduje zajištění vhodného místního a časového rozložení teploty na povrchu tvarové dutiny. Teplota povrchu tvarové dutiny během vstřikovacího cyklu kolísá kolem střední hodnoty, která se ustaví po dostatečném počtu cyklů (viz obr. 22). V optimálním případě by měla mít teplota v každém bodě povrchu tvarové dutiny shodný časový průběh.



Obr. 22. Ustavení rovnovážné teploty na stěně formy [4]

Temperovací systém ve vstřikovací formě má splnit tyto dva základní úkoly:

- zajistit co nejrovnoměrnější teplotu na celém funkčním povrchu dutiny formy,
- odvádět teplo z dutiny formy naplněné taveninou plastu.

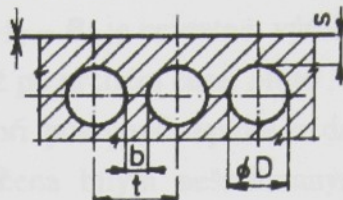
Ve většině případů v praxi se střetávají tři požadavky, které nutí zpravidla k hledání kompromisu. Jsou to:

1. Požadavek na vysokou technickou kvalitu výstřiků (včetně rozměrové stability). Tento požadavek vyžaduje stejnoměrné rozložení tepla ve formě a dosažení optimální teploty formy.
2. Požadavek na ekonomickou délku doby vstřikovacího cyklu, vyžadující rychlý odvod tepla z dutiny formy naplněné taveninou plastu.
3. Ohled na konstrukční zvláštnosti řešení vstřikovací formy (vyhazovací systém, čelisti, posuvná jádra atd.).

Který z uvedených faktorů při řešení temperovacího systému je dominující, o tom rozhoduje tvářený plast, konstrukce výstřiků a požadované vlastnosti výstřiků.

Fyzikálně ideální je provedení, kde se šířka temperovacích kanálů rovná šířce výstřiku a stěna kanálu leží co nejbližší ke stěně dutiny formy. Působením vstřikovacího tlaku by ale u širších výstřiků docházelo vlivem malé tuhosti stěny formy k deformacím a výstřik by měnil svůj tvar. Tuhost stěny lze zvýšit tím, že se fyzikálně ideální průřez kanálu přeruší výztužnými žebry. Tohoto typu kanálů se používá zejména tam, kde je chladicí médium vedeno ve spirále, ve smyčkách nebo křivkách. Předpokládá dobré slícování a pevné spojení těch částí formy, mezi nimiž kanál vzniká. Technicky snadno proveditelné a nejběžnější řešení je ve tvaru přímých kanálů kruhového průřezu (obr. 23). Aby se dosáhlo co nejstejnějšího odvodu tepla, doporučuje se dodržet vzájemné poměry mezi

tloušťkou stěny výstřiku, průměrem temperovacích kanálů, vzdáleností kanálů od povrchu dutiny formy a vzájemnou roztečí temperovacích kanálů podle tab. 1. Kanály se umísťují zpravidla tak, aby chladicí médium přicházelo do nejteplejšího místa na formě a aby se teplotní rozdíl ve směru toku zmenšoval.



Obr. 23. Schématické znázornění rozmístění chladících kanálů [16]

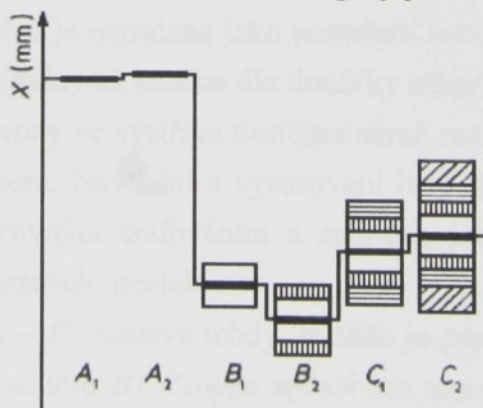
Tab. 1. Doporučované hodnoty pro rozmístění temperačních kanálů oproti tvarové dutině

ϕD [mm]	6	8	10	12	14	16	18	20
s [mm]	4	6	8	12	15	20	25	30
t [mm]	10	14	17	20	24	27	30	34
b [mm]	4	6	7	8	10	11	12	14

2.3 Rozměrová přesnost výstřiků [1, 7]

Pojem přesnost rozměrů výrobku zahrnuje výrobní přesnost (dodržení předepsaných rozměrů a tolerancí při výrobě) a funkční přesnost (zachování předepsaných rozměrů a tolerancí při funkci výrobku). Plastové výrobky se oproti výrobkům z kovů vyznačují změnou vlastností a rozměrů v čase a jejich rozměrová a tvarová stálost je podstatně horší.

Při zpracování termoplastů vstřikováním dochází k rozměrovým změnám výstřiků v důsledku ochlazování taveniny TP a vytváření stabilnějších strukturních stavů. Další rozměrové změny výstřiků souvisí s jejich používáním. Tyto změny rozměrů, ať už nastávají při výrobě nebo funkci výrobku, jsou trvalé nebo vratné. Následující schéma znázorňuje změny lineárních rozměrů výstřiků z TP při jejich výrobě a funkci.



Obr. 24. Schéma rozměrových změn a jejich tolerancí u výstřiku z plastů.

X – střední rozměr [mm], A_1 – rozměr ve formě, A_2 – rozměr ve formě po ohřevu formy na provozní teplotu, B_1 – rozměr výstřiku po smrštění, B_2 – rozměr výstřiku po dodatečném smrštění, C_1 – rozměr výstřiku po navlhnutí, C_2 – rozměr výstřiku po ohřátí na provozní teplotu. [1]

Výchozím rozměrem stanovíme základní střední rozměr ve formě A_1 , tedy vnitřní nebo vnější rozměr tvarové dutiny formy. Toleranční pole rozměru A_1 je znázorněna plným černým polem. Ohřevem formy na provozní teplotu ($A_1 - A_2$) zvětší forma svůj původní rozměr na hodnotu A_2 , přičemž je nutné uvažovat i zmíněnou výrobní toleranci.

Výrobní smrštění výstřiku $A_2 - B_1$ je nevratné, výrobek má poté rozměr B_1 . Zmenšení rozměru však výstřik dosáhne až po určitém čase, proto se smrštění výstřiku zjišťuje až po uplynutí 24 hodin skladování při pokojové teplotě a dané relativní vlhkosti. Tolerance smrštění je na obrázku vyznačena bílým nešrafovaným polem s ohledem na rozdíly smrštění způsobené různou tloušťkou stěny, rozdílnými technologickými podmínkami a anizotropií smrštění (vlivy struktury a tvaru výstřiku). Celková tolerance výstřiku je součet tolerance výrobního smrštění a výrobní tolerance formy, která je pochopitelně mnohem menší, proto se v mnoha případech ani neuvažuje.

Dodatečné smrštění $B_1 - B_2$ probíhá v následujících týdnech a měsících po vyrobení. Je způsobeno relaxací orientace, uvolňováním všech forem vnitřního pnutí a u semikrystalických polymerů dodatečnou krystalizací. Pokud je výrobek použit příliš brzy po vyrobení, často probíhá souběžně s následujícími funkčními rozměrovými změnami. Hodnota dodatečného smrštění bývá za normálních teplot asi 1/10 hodnoty smrštění při vstřikování, za vyšších teplot se zvyšuje. Jeho tolerance je vyznačena svisle šrafovaným polem.

Před zpracováním hydrokopických plastů je nezbytně nutné odstranit absorbovaný podíl vody. Toho se docílí sušením. Při vstřikování by se voda odpařovala, uzavírala by se v kritických místech formy a způsobovala by spálení povrchu výrobku. Rovněž by způsobila i pokles mechanických vlastností plastu. U některých plastů voda zapříčiňuje rozkladný proces makromolekul. Mezi navlhavé plasty lze zařadit PA, houževnatý PS, ABS. Při zpracování je tedy obsah vody v materiálu prakticky nulový. Výrobky z navlhavých polymerů potom zvětšují své rozměry následkem sorpce vody z okolního prostředí, tato změna rozměrů je označena jako **roztažení navlhnutím $B_2 - C_1$** . Protože je sorpce vody velmi pomalá (týdny až měsíce dle tloušťky stěny), bývá při změnách vlhkosti v okolním prostředí obsah vody ve výstřiku nestejně rozložen. Následkem jsou pak i nerovnoměrné změny rozměrů. Navlhání a vysušování jsou děje vratné. Tolerance těchto změn je znázorněna vodorovným šrafováním a zahrnuje jak vlivy struktury, tak vlivy kolísání okolní vlhkosti v běžných mezích.

Roztažení ohřevem $C_1 - C_2$ nastává tehdy, jestliže je provozní teplota výrobku vyšší než teplota při stanovení rozměru B_1 . Změna způsobená teplotní roztažností polymeru je vratná: při ohřevu nastává expanze, při ochlazování smršťování. Součinitel teplotní roztažnosti se u jednotlivých druhů plastů liší. Tolerance je znázorněna šikmě šrafovaným polem a zahrnuje rozptyl způsobený nehomogenitou struktury, anizotropií teplotní roztažnosti a nerovnoměrným rozdělením teplot v objemu výstřiku. Při výpočtu rozměrů

výstřiků, je třeba brát v úvahu, že při delším ohřevu nad teplotu 60°C nastává u navlhavých plastů vysušování, při teplotách 70 - 80°C je obsah vody v plastu už téměř roven nule.

Celková tolerance rozměrů výstřiku při jeho funkci je dána součtem tolerancí všech jeho dílčích rozměrových změn, výrobních i funkčních. Šířka tolerančních polí pro jednotlivé rozměrové změny, zejména u smrštění a dodatečného smrštění, je ovlivněna také rozptylem technologických podmínek v jednotlivých výrobních cyklech. Čím je tento rozptyl menší, tím jsou menší odchylky ve struktuře jednotlivých výstřiků a užší tolerance jejich rozměrů.

2.3.2 Dosažitelná přesnost [1, 7]

Výrobní tolerance rozměrů výrobků z plastů stanovuje ČSN 64 0006 *Tolerance a mezní úchytky rozměrů pro výrobky z plastických hmot*.

Stupeň přesnosti IT zahrnuje pouze toleranci smrštění při vstřikování, která se zjišťuje měřením výstřiku uloženého 24 hodin na vzduchu o teplotě 20°C a relativní vlhkosti 65%. Ostatní rozměrové změny zde zahrnuty nejsou.

Dosažitelná přesnost je při běžných technologických podmínkách následující:

IT 10 až IT 12 – u amorfních tuhých TP (PS, SAN, PVC, PC) a u reaktoplastů,

IT 11 až IT 13 – u semikrystalických tuhých TP (IPE, PP, PA, POM),

IT 14 až IT 16 – u měkkých TP (rPE, EVA, měkčený PVC, kaučukovité TP).

Větší přesnosti (nižšího stupně IT) se dosahuje vždy u menších rozměrů. Větší přesnost (asi o jeden stupeň IT) je vždy u rozměrů vázaných formou (kolmo ke směru otevírání formy) než u rozměrů nevázaných formou (ve směru otevírání formy). Ve směru otevírání formy může rozměry výstřiku ovlivnit pružná deformace formy následkem náhlého vysokého vstřikovacího tlaku.

Na moderních vstřikovacích strojích s optimalizací vstřikovacího procesu a s optimálním tepelným režimem vstřikovací formy lze dosáhnout přesnosti rozměrů větší o jeden i dva stupně IT oproti vstřikovacím strojům konvenčním (stroje bez zpětnovazební regulace). Nejpokrokovější jsou v současné době systémy kontrolující stav viskozity taveniny, které regulují chod stroje tak, aby viskozita taveniny – jako rozhodující faktor – byla stále stejná. Tyto regulační systémy se nazývají zpětnovazební nebo adaptivní.

Výrobní cykly nemohou nikdy probíhat zcela stejně a tedy objemy jednotlivých výrobků a jejich rozměry se budou navzájem lišit. K hodnocení *stability vstřikovacího procesu* je výhodné použít *měření hmotnosti výstřiků*. Výhodou kontroly stability vstřikovacího procesu pomocí kontroly hmotnosti je skutečnost, že vážení následuje bezprostředně po vyrobení výstřiků a získané výsledky nejsou tedy ovlivňovány pozdějšími vlivy (teplota, vlhkost). Hmotnost výstřiků je při konstantní hustotě přímo úměrná jeho objemu, tj. jeho rozměrům a tedy i velikosti smrštění. Rozptyl hmotnosti je proto za určitých podmínek kritériem rozptylu rozměrů a smrštění. Výhody vážení před měřením rozměrů není nutno blíže rozvádět. Korelace mezi rozptylem hmotností a

rozptylem rozměrů existují především u rozměrů vázaných formou, zejména pak rozměrů ležících ve směru toku taveniny. Jsou to rozměry, jejichž velikost závisí přímo na účinnosti tlaku v tvarové dutině formy. Tato skutečnost je v souladu s názorem většiny autorů, kteří za nejvýznamnější faktor ovlivňující vstřikovací proces označují tlakové poměry ve formě.

2.3.3 Anizotropie změn rozměrů [1, 2, 14, 16]

Orientace makromolekul, plniva či krystalických útvarů u semikrystalických polymerů vede k utváření směrovosti vlastností struktury – anizotropie. Dalším určujícím faktorem je směr a charakter proudění taveniny, které je mimo jiné dáno typem a polohou vtoků. Smrštění ve směru toku taveniny (podélné) se i u neplněných polymerů od velikosti příčného smrštění liší. Vzhledem k interakci mnoha vlivů bývá v některých případech větší smrštění podélné, jindy zase příčné s tím, že větší difference mají semikrystalické polymery než polymery amorfni. Dodatečné smrštění u neplněných polymerů je větší ve směru orientace makromolekul než kolmo na ní.

U polymerů plněných částicovými plnivý, jako jsou např. mikrokuličky či prášky, se rozdíl mezi příčným a podélným smrštěním zmenšuje, a při obsahu kolem 40% plniva je smrštění již izotropní. Polymery plněné částicemi nepravidelného tvaru nebo vlákny mají podélné smrštění (ve směru orientace) menší nežli příčné (kolmo na směr orientace). Vlivy na orientaci výstřiků, způsobující anizotropii smrštění, podrobněji rozebírá kap. 2.2.2.

2.4 Analýza procesu vstřikování z hlediska výpočtu smrštění

Vstřikování termoplastů je složitý tepelně mechanický proces, při kterém působí mnoho faktorů ovlivňujících konečné rozměry výstřiku a tedy i jeho smrštění. Pro výpočet míry smrštění se vychází ze znalosti velikosti základních stavových termodynamických veličin – tlaku, měrného objemu (resp. hustoty) a teploty. Velikost smrštění je z převážně určena velikostí těchto veličin v okamžiku zatuhnutí vtokového ústí, protože od tohoto okamžiku se hmotnost výstřiku již nemění. Zejména u semikrystalických termoplastů je nutné uvažovat význam vlivu struktury výstřiku, která je v nerovnovážném stavu i po zatuhnutí vtoku a má tendenci se postupně stabilizovat. Zahrnutí strukturních vlivů do analýzy smrštění výstřiků je však poměrně obtížné a z těchto důvodů je i velmi obtížný případný výpočet smrštění vlivem strukturních změn a tím také i dodatečného smrštění.

Pro výpočet, přesněji odhad, smrštění výstřiku z termoplastů lze efektivně použít v podstatě dvě metody:

- První metoda spočívá v analýze procesu vstřikování pomocí p-v-T diagramu vstřikovaného plastu, v kterém je zakreslen odhadovaný průběh stavových veličin uvnitř dutiny formy během vstřikovacího cyklu. K výpočtům objemových změn lze také použít stavové rovnice daného termoplastu. Touto metodou lze získat pouze hrubý odhad smrštění výstřiku.

- Druhou metodou je numerické řešení pomocí počítačové simulace, při které se metodou konečných prvků řeší rozsáhlá soustava rovnic popisujících jednotlivé děje během vstřikování aplikovaná na model výstřiku a jeho zaformování. Počítačovou simulací můžeme získat odhad smrštění mnohem přesněji, vzhledem k tomu, že je ve výpočtu zahrnuta většina vlivů na smrštění. Přesnost simulace závisí na počtu uvažovaných vlivů, které program zahrne do svého výpočtu.

2.4.1 Odhad smrštění pomocí p-v-T diagramu a stavové rovnice [19]

Smrštění výstřiků termoplastů je definováno procentuálním rozdílem lineárních rozměrů výstřiku vůči rozměrům formy. Tyto rozměrové změny lze za předpokladu izotropních vlastností výstřiku určit ze smrštění objemového, kdy vzájemný poměr mezi smrštěním délkovým (lineárním) a objemovým je přibližně 1:3. Přesně se lineární smrštění vypočte z objemového smrštění dle vztahu

$$S_L = (1 - \sqrt[3]{1 - (S_V / 100)}) \cdot 100 \quad (27)$$

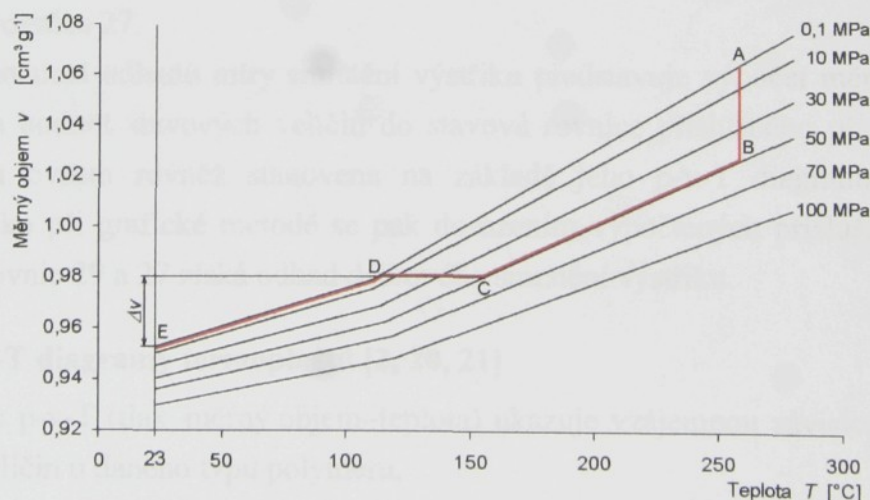
kde značí: S_L – lineární (dédkové) smrštění [%], S_V – objemové smrštění [%].

Objemové smrštění v procentech se určí dle vztahu

$$S_V = \frac{V_f - V_v}{V_f} \cdot 100 \quad (28)$$

kde značí: V_f – objem dutiny formy při 23°C [m³], V_v – objem výstřiku při 23°C [m³].

Proces vstřikování je schématicky zakreslen v p-v-T diagramu amorfního termoplastu (ABS) na obr. 25.



Obr. 25. Schématické znázornění vstřikovacího cyklu v p-v-T diagramu ABS

V bodě A se nachází materiál po skončení plastikace těsně před vstříknutím do formy s teplotou 260°C. V úseku A–B je materiál vstříknut vysokou rychlostí do dutiny formy a stlačen, přičemž pro zjednodušení předpokládáme izotermický průběh. V úseku B–C je fáze dotlaku, pro zjednodušení je průběh izobarický a probíhá ochlazování taveniny plastu. Pro odhad objemového smrštění je nutné znát stav průměrných hodnot základních

termodynamických veličin v rozhodujícím okamžiku vstřikovacího cyklu – v okamžiku zatuhnutí vtokového ústí, a to je v bodě C . Amorfni termoplasty přestávají být taveninou na teplotě viskózního toku T_f a semikrystalické blízko teploty tání T_m . V bodě C má výstřik již stejnou hmotnost jako při vyjímání z formy a pro zjednodušení se předpokládá, že je současně ztuhlý celý objem výstřiku. Objem výstřiku je v úseku $C-D$ konstantní a je shodný s objemem dutiny formy: $V_f = m \cdot v_C$, kde v_C je měrný objem a m hmotnost výstřiku v bodě C . V bodě D klesne hodnota tlaku ve výstřiku na hodnotu atmosférického tlaku a měrný objem výstřiku při ochlazování dále klesá až na hodnotu v_E v bodě E při teplotě 23°C . V bodě E má výstřik objem $V_v = m \cdot v_E$ a dosazením objemů výstřiku v bodě C a E do rovnice 28 obdržíme tento vztah pro objemové smrštění:

$$S_v = \frac{v_C \cdot m - v_E \cdot m}{v_C \cdot m} \cdot 100 = \frac{v_C - v_E}{v_C} \cdot 100 \quad (29)$$

Rovnice 29 předpokládá, že v bodě C je celý objem výstřiku již ztuhlý, což ale často neodpovídá skutečnosti v jádře výstřiku (uprostřed tloušťky stěny). Tento fakt má za následek zvětšení nepřesnosti odhadu smrštění u výstřiků s větší tloušťkou stěny a u těch, které mají vtokové ústí o malém průřezu (relativně). Tato metoda může být použita i pro odhad smrštění semikrystalických termoplastů, ale jejich p - v - T diagramy jsou silně závislé na rychlosti ochlazování (viz kap. 2.4.1.2) a obtížněji se v nich stanovuje bod “ C ” – bod zatuhnutí vtoku resp. ztuhnutí výstřiku vzhledem k zlomu izobar na teplotě T_m . Je zde proto větší pravděpodobnost nepřesností než u materiálů amorfních.

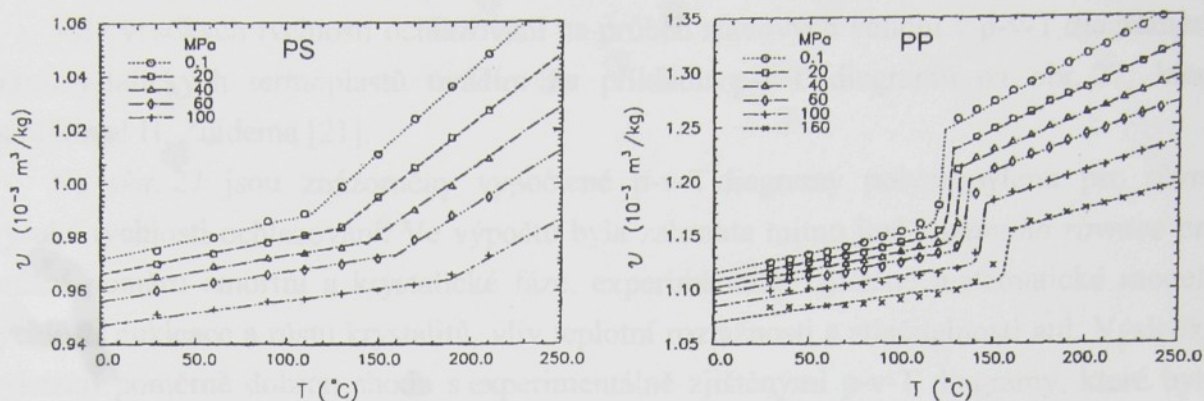
Hodnoty měrných objemů pro výpočet smrštění dle rovnice 29 se v bodech C a E zjišťují grafickou metodou přímo z p - v - T diagramu. Odhad délkového smrštění se poté vypočte dle rovnice 27.

Další možnost odhadu míry smrštění výstřiku představuje výpočet měrných objemů, dosazováním hodnot stavových veličin do stavové rovnice příslušného plastu, když tato rovnice byla ovšem rovněž stanovena na základě jeho p - v - T diagramu. Obdobným způsobem jako při grafické metodě se pak dosazením vypočtených příslušných měrných objemů do rovnic 29 a 27 získá odhad délkového smrštění výstřiku.

2.4.1.2 p - v - T diagramy termoplastů [2, 20, 21]

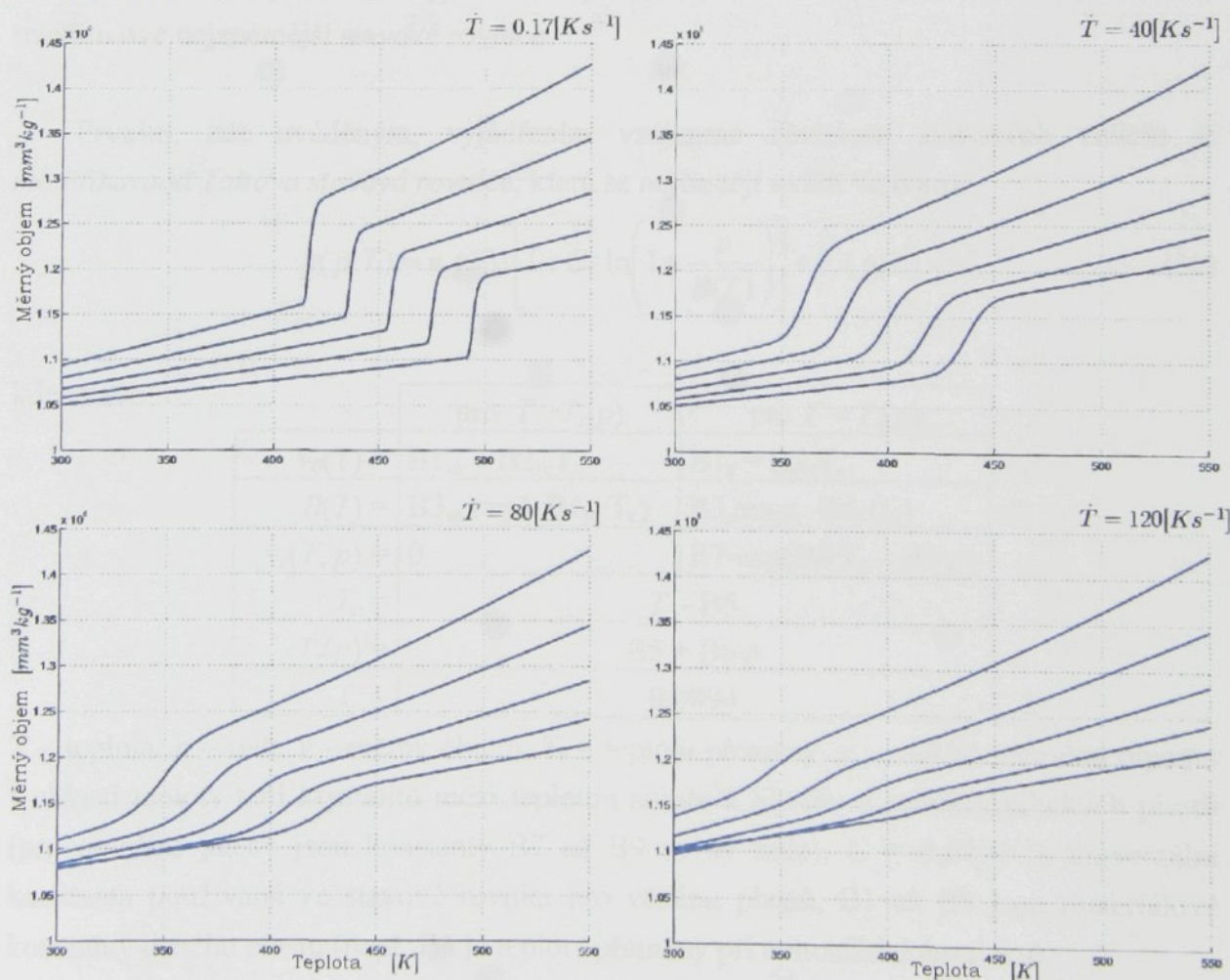
Diagram p - v - T (tlak–měrný objem–teplota) ukazuje vzájemnou závislost tří hlavních stavových veličin u daného typu polymeru.

Na obr. 26 jsou znázorněny p - v - T diagramy polystyrenu a polypropylenu, typických představitelů amorfních resp. semikrystalických termoplastů. Na tomto obrázku je dobře patrný rozdíl v průběhu izobar amorfního a semikrystalického termoplastu. U amorfního termoplastu nastává ohyb izobary v oblasti teploty skelného přechodu T_g , u semikrystalického se izobary lomí při teplotě tání krystalitů T_m . Na p - v - T diagramy má vliv způsob naměření dat p - v - T a to zejména u semikrystalických termoplastů.



Obr. 26. p-v-T diagram amorfního (PS) a semikrystalického (PP) termoplastu [20]

Měření závislosti stavových veličin p-v-T je možné několika způsoby (izotermická změna tlaku, izobarické zvyšování resp. snižování teploty atd.). Pro analýzu vstřikování je nejvhodnější způsob, kdy se provádí izobarická měření měrného objemu při ochlazování plastu. Standardně se měření provádějí při pomalém ochlazování termoplastu. Pro semikrystalické termoplasty takto stanovené p-v-T diagramy ale nevystihují poměry ve formě v místech, kde dochází vlivem vysokých rychlostí ochlazování (např. v blízkosti stěny formy) k potlačení krystalizace.



Obr. 27. Vypočítaný měrný objem izotaktického polypropylénu (K2Xmod, Borealis) pro rychlosti ochlazování $\dot{T} = 0,17$ $\dot{T} = 40$ $\dot{T} = 80$ a $\dot{T} = 120$ $[\text{K} \cdot \text{s}^{-1}]$. Působící tlak je znázorněn v izobarách $p = 0,1$ $p = 40$ $p = 80$ $p = 120$ a $p = 160$ $[\text{MPa}]$ [21].

Vliv vysokých rychlostí ochlazování na průběh stavových veličin v p-v-T diagramech semikrystalických termoplastů uvádím na příkladu p-v-T diagramů na obr. 27, které publikoval H. Zuidema [21].

Na obr. 27 jsou znázorněny vypočtené p-v-T diagramy polypropylenu pro různé vysoké rychlosti ochlazování. Ve výpočtu byla zahrnuta mimo jiné *Avramiho rovnice* pro určení poměru amorfní a krystalické fáze, experimentálně zjištěné matematické modely rychlosti nukleace a růstu krystalitů, vliv teplotní roztažnosti a stlačitelnosti atd. Výsledky vykazují poměrně dobrou shodu s experimentálně zjištěnými p-v-T diagramy, které byly naměřeny na přístroji umožňujícím vysoké rychlosti ochlazování.

2.4.1.3 Stavové rovnice termoplastů [2, 13]

K předpovědi smrštění výstřiku (za předpokladu, že výstřik má izotropní vlastnosti) lze využít stavovou rovnici, která popisuje závislost měrného objemu na teplotě a tlaku. Parametry (materiálové konstanty), které se dosazují do stavových rovnic jednotlivých termoplastů se získávají empiricky (např. metodou nejmenších čtverců) z p-v-T dat resp. diagramů. Dá se tedy říci, že stavová rovnice matematicky popisuje p-v-T diagram daného termoplastu. Existuje několik vyjádření vzájemné závislosti stavových veličin u plastů, zde uvádím dvě nejznámější stavové rovnice.

Prvním, zde uváděným, vyjádřením vzájemné závislosti stavových veličin je *modifikovaná Taitova stavová rovnice*, která se nejčastěji uvádí ve tvaru

$$v(p,T) = v_0(T) \cdot \left[1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_r(p,T) \quad (30)$$

kde značí:

	pro $T > T_r(p)$	pro $T < T_r(p)$
$v_0(T) =$	$B1_m + B2_m T_c$	$B1_s + B2_s T_c$
$B(T) =$	$B3_m \cdot \exp(-B4_m \cdot T_c)$	$B3_s \cdot \exp(-B4_s \cdot T_c)$
$v_r(T, p) =$	0	$B7 \cdot \exp(B8 \cdot T_c - B9 \cdot p)$
$T_c =$	$T - B5$	
$T_r(p) =$	$B5 + B6 \cdot p$	
$C =$	0,0894	

T – teplota, p – tlak, v – měrný objem, T_r – teplota přeměny, v_r – nárůst měrného objemu v oblasti teploty tání krystalitů mezi teplotou solidu a likvidu u semikrystalických plastů (pro amorfní plasty jsou konstanty $B7$ až $B9$ rovny nule), $C = 0,0894$ je univerzální konstanta používaná ve stavové rovnici pro většinu plastů, $B1$ až $B9$ jsou materiálové konstanty daného plastu (např. $B5$ je teplota přeměny při atmosférickém tlaku).

Taitova modifikovaná stavová rovnice je nejčastěji používanou stavovou rovnicí pro popis p-v-T dat termoplastů.

Jedním z nejstarších a nejznámějších vyjádření vzájemného stavu stavových veličin u plastů je *modifikovaná stavová rovnice Van der Waalsova* ve tvaru

$$(p + \pi) \cdot (v - \omega) = R' \cdot T \quad (31)$$

kde značí: p - vnější tlak [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], π - vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], v - měrný objem polymeru [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$], ω - měrný objem polymeru při 0 K [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$], T - teplota [K], R' - materiálová konstanta analogická plynové konstantě [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

I když se používá hlavně pro taveniny polymerů, její platnost je obecná a dá se využít i pro polymery v tuhém stavu. Rovnice obsahuje celkem tři parametry π , ω , R' , které musí být stanoveny empiricky z p - v - T diagramů. Parametry rovnice jsou rozdílné pro oblasti diagramu vymezené přechodovými teplotami T_g a T_m .

2.4.2 Počítačová simulace procesu vstřikování [14, 22]

Simulační programy slouží k realizaci virtuálního modelu za skutečných podmínek. Počítačem se provádí simulace fyzikálních, chemických a dalších problémů. Pro tyto účely bylo vyvinuto již značné množství simulačních programů. Výsledky jejich simulací je možné využít při tvorbě výkresové dokumentace a jsou vstupními parametry pro výrobní stroje. Uplatňují se v nejrůznějších odvětvích, kde pomáhají snižovat náklady a vyhnout se kritickým stavům.

Pro numerické simulace procesu vstřikování je nejčastěji využívána metoda konečných prvků (MKP). Problematika metody konečných prvků jako přibližné numerické metody řešení parciálních diferenciálních rovnic je značně komplikovaná [22], a proto se omezím jen na základní popis této metody. Základním principem této metody je rozdělení (diskretizace) dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích prvků. Skutečný průběh vyšetřované veličiny (teploty, deformace, atd.) uvnitř prvků aproximujeme při řešení zvolenou funkcí, přičemž je nutné, aby tato funkce byla jednoznačně určena hodnotami veličiny v uzlových bodech. Hodnoty veličiny v uzlových bodech jsou pak základní neznámé parametry řešení. Výpočtem těchto parametrů je pak určen průběh veličiny v dané oblasti.

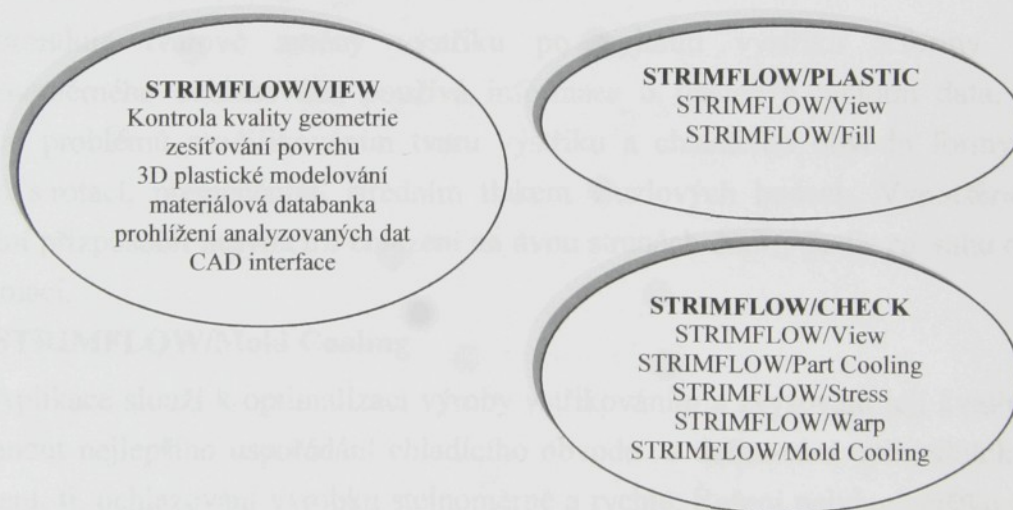
Velkou výhodou numerické simulace procesu vstřikování termoplastů je možnost analýzy tohoto procesu již ve fázi konstrukce výstřiku či nástroje. Simulace poskytuje již v předvýrobní etapě cenné informace o toku materiálu při plnění dutiny formy, nebezpečí vzniku studených spojů, deformací vlivem nerovnoměrného ochlazování, smrštění, atd. Tyto informace umožňují realizovat vhodné zásahy a změny v technologii výroby již ve fázi její přípravy a včas umožňují optimalizovat tvar výstřiku, technologické podmínky vstřikování, technologické zásahy do konstrukce nástroje apod.. Takový postup vede k významnému poklesu nákladů při náběhu výroby, zlepšení možnosti řízení a kvality

procesu vstřikování, časovým úsporám při inovacích a ve svých důsledcích vede k významnému zvyšování konkurenceschopnosti finálního produktu.

V současné době se pro návrh výrobků z plastů a pro návrh a optimalizaci konstrukce vstřikovacích forem používá celá řada simulačních programů jako jsou např.: STRIMFLOW, MOLD FLOW, C MOLD, SIMUFLOW, CADMOULD. Přesnost simulace závisí na počtu uvažovaných vlivů, které program zahrnuje do svého výpočtu. Například zda při analýze plnění dutiny formy dokáže do výpočtu zahrnout též analýzu chlazení formy apod. V předkládané práci je pro numerické simulace procesu vstřikování využíván program STRIMFLOW. V následující podkapitole je uvedena jeho stručná charakteristika.

2.4.2.1 Popis simulačního programu STRIMFLOW [23, 24]

Program STRIMFLOW slouží pro simulaci kompletního vstřikovacího cyklu (viz obr. 28). Součástí jsou kompatibilní softwarové nástroje pro návrh plastových modelů a analýzu jejich strukturního chování. Umožňuje uživateli regulovat vstřikovací proces dle stavu plnění, kontrolu indexu toku na počátku vstřikování, tlakovou kontrolu ve fázi dotlaku, chlazení a tuhnutí. Simuluje procesy postupného a sendvičového vstřikování. Program STRIMFLOW obsahuje následující moduly:



Obr. 28. Funkční bloky s moduly simulačního programu STRIMFLOW [24]

STRIMFLOW/View

Tento modul automaticky kontroluje kvalitu importovaného geometrického modelu a barevně rozlišuje různé defekty ve struktuře modelu. Požaduje simulační podmínky: tloušťky stěn, vstřikovací parametry, charakteristiky vstřikovaných polymerů. Vytváří automatické síťování rozdílných typů geometrie modelů. Poskytuje kompletní a výkonné funkce pro grafické analýzy výsledků.

STRIMFLOW/Fill

Slouží pro simulaci vstupního vstřikovacího cyklu. Vysoce přesná simulace vstřikování je založená na síťování, materiálových charakteristikách, vstřikovacích parametrech. Používá sadu výkonných funkcí k určení: krajních tlaků, materiálové

degradace, nesprávné umístění dělicí roviny, nekompletní nebo přebytkové plnění. Pro sekvenční vstřikování kontroluje indexy toku v každém vtoku, nízký vstřikovací tlak, optimalizuje umístění dělicí roviny. Používá síť k určení tloušťky stěn, materiálových charakteristik a vstřikovacích parametrů, pro stanovení vstřikovacích a tvářecích podmínek. Všechny prvky požadované pro vstřikovací a tvářecí analýzy mohou být jednoduše a rychle určeny pomocí *SHELLMeshing* a *3D Plastik Flow Modeling* aplikací. Analýza nachází chyby jako např. překročení mezních tlaků, degradace materiálu apod..

Vstřikovaný polymer je během simulační fáze stlačitelný. Program používá p – v – T diagramy popisující rozdíly specifických materiálových hodnot dle teploty a tlaku. Vstřikovací podmínky mají vysoké možnosti přesného nastavení. Pohyb šneku je přizpůsoben na požadovaný tlak a na konstantní nebo proměnlivou rychlost, nebo lze zapnout přizpůsobení rychlosti tlaku a tak simulovat celou fázi.

STRIMFLOW/Stress

Slouží k minimalizaci deformací, ohybů a k dosažení vysoké kvality produktů. Počítá zbytková pnutí během vstupního vstřikovacího cyklu. Problémové plochy jsou zobrazeny na obrazovce při ukončení simulace vstřikování.

STRIMFLOW/Warp

Simuluje tvarové změny výstřiku po vyjmutí výstřiku z formy v důsledku nerovnoměrného ochlazování, používá informace o tlacích a teplotní data. Umožňuje snížení problémů modifikováním tvaru výstřiku a chladicího obvodu formy. Aplikace počítá s rotací, přemístěním, středním tlakem v uzlových bodech. Vypočtené výsledky umožní přizpůsobit nesymetrii chlazení na dvou stranách dutiny podle rozsahu obdržených deformací.

STRIMFLOW/Mold Cooling

Aplikace slouží k optimalizaci výroby vstřikováním a zvyšování její kvality. Umožní dosáhnout nejlepšího uspořádání chladicího obvodu a definování optimálních podmínek chlazení, tj. ochlazování výrobku stejnoměrně a rychle. Řešení nejvhodnějšího uspořádání chladicích obvodů formy počítá optimální vzdálenosti mezi modelem a obvodem. Výpočet je uveden jak pro jádro, tak pro dutinu stěny. Spočítá se tak odpovídající celková teplotní vodivost a změny na povrchu formy. Počítá vzdálenosti mezi každým komponentem části a prvku chladicího obvodu. Tento výpočet je uveden pro každou stěnu formy. Ze zobrazených vzdáleností lze určit defektní plochy, v dalším kroku pak optimalizuje polohu chladicího obvodu. Index toku, rychlost, tlakový spád a Reynoldsovo číslo charakterizuje tok temperační kapaliny. Podmínkou je turbulentní proudění kapaliny k zajištění odvodu tepla z taveniny. Tato analýza počítá rozdílné teploty plastů ve formě. Tento výpočet indikuje čas potřebný k ochlazování a ukáže nebezpečí pnutí podle intenzity teplotních diferencí. Teplotní mapy jsou zobrazeny během chladicího procesu.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Záměr experimentálních prací

Hlavním záměrem experimentálních prací bylo získání poznatků o vlivu podmínek vstřikování a dodatečné úpravy temperováním na rozměrové změny výstřiků u vybraných materiálů. Výběr materiálu byl podřízen používáním příslušného materiálu na vstřikované díly automobilů, které procházejí po vyrobení procesem lakování vodou ředitelnými laky v podniku *Pegufarm Bohemia a.s.* Jelikož smrštění amorfních a semikrystalických termoplastů se liší velikostí i průběhem, byly pro experiment vybráni zástupci obou typů polymerů. Z amorfních termoplastů byl vybrán materiál ABS *Terluran HH-112*, ze kterého se např. vyrábí lakovaný rám mřížky chladiče automobilu *Škoda Octavia*. Ze semikrystalických termoplastů byl zvolen elastomerem modifikovaný polypropylen *Kelburon 95610* plněný talkem, ze kterého se, mimo jiné, vyrábí lakované nárazníky automobilu *Škoda Octavia*. Nejběžnější zastoupení talku v *Kelburonu 95610* používané pro výrobu nárazníků pro automobily *Škoda* v podniku *Pegufarm Bohemia a.s.* se pohybuje v okolí 10 hmotnostních procent.

Převážná část experimentu této práce se zabývá měřením výrobního a dodatečného smrštění na výstřicích tvaru desky s různou tloušťkou a za různých technologických podmínek. Vzhledem ke složitosti problematiky smrštění výstřiků z termoplastů vlivem působení mnoha faktorů je tato práce zaměřena na zjištění vlivu pouze vybraných technologických faktorů, které by měly mít, dle dosud publikovaných výsledků, na výrobní a dodatečné smrštění největší vliv. Z konstrukčních faktorů byl vybrán vliv toho, který má na velikost smrštění největší vliv – tloušťka stěny výstřiku.

Cíle pro experimentální část předkládané práce lze shrnout do následujících bodů:

- Pro prováděné experimenty vybrat kombinace proměnných parametrů tak, aby rozsah experimentu nebyl příliš široký a aby pokud možno zachytil největší vlivy na velikost výrobního a dodatečného smrštění.
- Pro materiály *Terluran HH-112* a *Kelburon 95610MTU10* (*Kelburon 95610* + 10% talku) určit vliv základních technologických parametrů vstřikování na výrobní, dodatečné a celkové smrštění výstřiků tvaru desky – zkušebních těles o rozdílné tloušťce. Dodatečné a celkové smrštění měřit po temperování zkušebních těles, kdy průběh temperace simuluje teplotní zátěž během procesu lakování reálných výrobků.
- Statisticky vyhodnotit vliv jednotlivých faktorů na velikost smrštění faktorovou analýzou rozptylu.
- Pro materiál *Kelburon 95610*, plněný různým množstvím talku, stanovit vliv obsahu minerálního plniva na míru jeho smrštění. Počet kombinací

technologických parametrů pro tento experiment dále zredukovat dle jejich vlivu na smrštění pouze na ty významnější, a to na základě předchozí faktorové analýzy provedené pro materiál *Kelburon 95610MTU10*. Dále pak posoudit vliv obsahu talku na základní mechanické vlastnosti tohoto materiálu pro zjištění případných nežádoucích změn zejména v jeho houževnatosti.

- Pro vybraný materiál a podmínky vstřikování provést analýzu procesu vstřikování a smrštění výstřiků simulačním programem *STRIMFLOW*. Porovnat tuto analýzu s experimentálně získanými daty a vyjádřit možnosti tohoto simulačního programu v oblasti určování smrštění výstřiků z termoplastů.

Postup řešení, výsledky experimentálních prací a diskuse výsledků jsou uvedeny v následujících kapitolách.

3.2 Charakteristika zkoušených materiálů

3.2.1 Akrylonitril-butadién-styrén (ABS) [6, 7]

Mezi dalšími možnostmi zlepšení houževnatosti polystyrénu nabyla velkého technického významu výroba a zpracování polymerů ABS. Ty jsou vytvořeny kombinací tří monomerů: akrylonitrilu, butadiénu a styrénu. Jedná se tedy o tzv. terpolymery.

ABS polymery jsou amorfní tuhé plasty s vysokou houževnatostí. Přednosti polymerů ABS jsou zejména:

- vysoká houževnatost a rázuvzdornost, a to i při záporných teplotách
- zlepšené teplotní vlastnosti, zejména tvarová stálost
- zvýšená tvrdost a odolnost vůči poškrábání
- zlepšená chemická odolnost
- snížená nasákavost
- oproti PS zlepšená odolnost proti korozi za napětí

Z dalších výhod oproti ostatním plastům je možnost ABS výborně galvanicky pokovovat. Nevýhodou je špatná povětrnostní stabilita ovlivněná reaktivní butadiénovou složkou v polymeru.

Původně se ABS polymery vyráběly dvěma způsoby: mechanickým směřováním a roubovací kopolymerizací. V současnosti již převládá druhý postup. Při jednom z postupů se latex předem připraveného styren-butadiénového kaučuku, popř. jen samotného polybutadiénu přidá do emulze styrenu a akrylonitrilu a tato směs se dále polymeruje.

Výsledný terpolymer je vícefázovým materiálem, obsahujícím jako základ (pojivo, matici) kopolymer styren-akrylonitril (SAN), v němž jsou dispergovány malé částice styren-butadiénového kaučuku o velikosti 1 až 10 μm . Tato vícefázová struktura je podmínkou pro dosažení vynikajících odolností ABS proti nárazům. Tak drobné částice však rozptylují světlo, a ABS není proto průhledný.

Vlastnosti ABS polymerů určují v první řadě poměrná zastoupení jednotlivých složek, z nichž zejména obsah akrylonitrilu, resp. styrén-akrylonitrilové fáze, má rozhodující význam. Produkty s velmi nízkým obsahem akrylonitrilu se podobají svým chováním houževnatému polystyrénu. Produkty se středním obsahem akrylonitrilu (kolem 15 %) mají na rozdíl od houževnatého polystyrénu vyšší chemickou odolnost. Produkty s obsahem 20 až 35 % akrylonitrilové fáze se svými vlastnostmi od houževnatého polystyrénu již významně liší. Pevnost v tahu je v rozmezí 20 - 65 MPa, modul pružnosti 2000 - 3000 MPa, podle podílu jednotlivých složek terpolymeru. Se zvyšujícím se obsahem kaučuku roste houževnatost, ale snižuje se pevnost, tuhost a teplotní odolnost. Přítomnost akrylonitrilu je příčinou mírně polárního charakteru hmoty, což má za následek vyšší navlhavost a horší dielektrické vlastnosti. Tepelná odolnost ABS je vyšší než u polystyrénu. ABS lze podle typu používat až do teplot 80–15 °C, mrazuvzdorné typy naopak do -30 °C. Navlhnutím ABS se však tyto údaje mohou poněkud snížit. Během transportu a skladování hrozí nebezpečí navlhnutí produktu, které by zhoršilo jednak průběh zpracování, ale také konečný povrchový vzhled výrobků. Proto se doporučuje granulát před zpracováním předsušet 1 až 3 hodiny při 80 °C. Smrštění závisí na obsahu kaučuku a pohybuje se mezi 0,4 až 0,7 %. Se stoupajícím obsahem kaučuku smrštění narůstá.

ABS patří svými vlastnostmi spíše k technickým plastům. Je dnes široce používaným materiálem a podle objemů spotřeby leží mezi velkotonážními (komoditními) a technickými plasty. Je velmi rozšířen v automobilovém průmyslu (úložné kapsy, větrací otvory, protisluneční clony, rám mřížky chladiče), používá se na výrobky pro domácnost, v elektrotechnice a elektronice, vyrábějí se z něho kancelářské stroje atd.

Pokud jsou výrobky z ABS opatřovány lakem je třeba vzít v úvahu omezenou chemickou odolnost ABS a použít takový rozpouštědlový systém, který nenaruší povrch.

3.2.1.1 Terluran HH-112 [25]

ABS *Terluran HH-112* je produktem fy. *BASF*, který se vyznačuje vysokou tvarovou stálostí za tepla. Patří k typům ABS s relativně vyšší teplotní odolností, vyšší tuhostí, střední odolností proti nárazu a střední tekutostí.

Materiálový list fy. *BASF* pro materiál *Terluranu HH-112* je uveden v příloze 1.

3.2.2 Polypropylen modifikovaný elastomerem a talkem

3.2.2.1 Izotaktický polypropylén [6]

Výhodná kombinace ceny s dobrými užitnými vlastnostmi řadí izotaktický polypropylénu mezi komoditními plasty. Některé jeho aplikace jej však řadí i mezi konstrukční materiály. Mezi nejvýznamnější aplikace polypropylénu patří vlákna, obalová technika, díly automobilů, domácích spotřebičů a různé spotřební zboží.

V posledních letech význam polypropylénu znovu zřetelně roste. Důvodem jsou jednak nově vyvinuté modifikace a kompozity na jeho základě, nové aplikace a také důraz na snadnou recyklovatelnost polymerních výrobků.

Běžný izotaktický polypropylén je částečně krystalický (semikrystalický) a chová se jako kompozitní materiál. Tvrdé krystalické oblasti vyztužují měkkou matici a současně zakotvují molekuly, které do krystalitů přecházejí ze souvislé amorfni fáze. Proto je izotaktický polypropylén pevný, tuhý a poměrně tvrdý materiál s uspokojivou houževnatostí, pokud teplota neklesne pod teplotu skelného přechodu amorfni matrice ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Také syndiotaktický polypropylén, který se podařilo připravit teprve v poslední době v komerčně zajímavém množství, je částečně krystalický a má nadějně užité vlastnosti.

Polymerací samotného propylénu získáme homopolymer, označovaný PP-H. Pro praktické použití je nejčastější homopolymer s molekulovou hmotností mezi $2 \cdot 10^5$ až $6 \cdot 10^5$ a poměrně úzkou distribucí. Jsou to vysoce krystalické a dobře tekuté typy. Zvyšuje-li se molekulová hmotnost a rozšiřuje distribuce, získáme méně tekuté typy se sníženou krystalinitou, a dobrou houževnatostí použitelné pro vstřikování, vyfukování dutých nádob a vytlačování fólií.

Makroskopické vlastnosti izotaktického polypropylénu vyplývají z jeho krystalické struktury, ale závisí ovšem na teplotě, na čase i na působení vnějšího prostředí. Hustota polypropylénu se pohybuje mezi 900 až $920\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

3.2.2.2 Modifikace polypropylénu [6]

Blokový kopolymer (PP reaktorově modifikovaný elastomerem)

Pro výrobu blokového kopolymeru, označovaného jako PP-B, se nejprve v jednom reaktoru vyrobí homopolymer (izotaktický PP). Ten se převede do druhého reaktoru, kam se přidá zároveň směs monomerů etylénu a propylénu. V něm proběhne jejich kopolymerace za vzniku etylén–propylénového kaučuku (EPR), který se jako makromolekulární blok naváže na polypropylénový řetězec. Obsah kaučukových bloků kolísá mezi 10 až 40% a významným způsobem modifikuje vlastnosti PP. Zejména se sníží teplota skelného přechodu amorfni fáze cca. na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, aniž by se omezila krystalinita. Získá se tak polypropylén odolný proti nárazu i za mrazu. Dynamikou spotřeby předčí dnes tento typ klasický PP-H.

Kompozity PP

Široké možnosti modifikace mechanických vlastností polypropylénu nabízí jeho kombinace s jinými polymery, částicovým, případně vláknitým plnivem, tedy vytváření kompozitních materiálů. Takto lze zejména vyvažovat vzájemný poměr mezi pevností a houževnatostí. Přidáním levného částicového plniva do polymerní matrice se navíc snižuje i cena výsledného materiálu.

K nejvýznamnějším již komerčně zavedeným modifikacím polypropylénu patří přidání talku (částicové minerální plnivo) a elastomeru. Do polypropylénové matrice se talek přidává ve formě prášku, jehož zrnitost obvykle nepřesahuje 10 μm v různém množství až do 40%. Elastomerní složka se do polypropylénové matrice přidá buď při blokové kopolymeraci v reaktoru (viz výše), nebo fyzikálně, kdy se za působení tepla a tlaku mechanicky smísí v hnětiči. Termomechanickým míšením (kompaudací) se např. připravují směsi PP+EPDM (pozn.: EPDM kaučuk, Etylén-Propylén-Dien-Monomer). Takto připravené kompozitní materiály nacházejí často uplatnění v automobilovém průmyslu na technické výstřiky u kterých se vyžaduje nízkoteplotní houževnatost, např. na nárazníky a spoilery osobních automobilů.

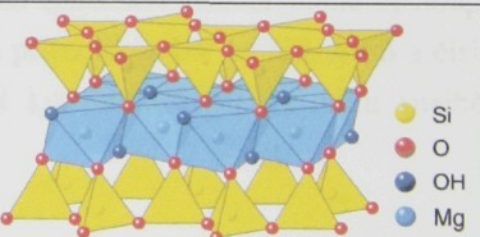
3.2.2.3 Minerální plnivo – talek [26, 27]

Talek (také mastek nebo steatit) - $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ je anorganické minerální plnivo na bázi křemičitanů. U termoplastů je nejčastěji používán pro plnění PP (Hostalen, Kelburon, Moplen, Keltan aj.) pro zlepšení jeho rozměrové stability. Obsah talku se u jednotlivých typů PP liší a dosahuje až 40%.

Díky svým vlastnostem je v průmyslu široce užívaným materiálem. Pro jeho odolnost proti vysokým teplotám, kyselinám a dobré elektroizolační vlastnosti se využívá v různých aplikacích v elektrotechnice. Dále je používán jako přísada do barev, pryží, střešních krytin a keramiky.

Měrná hmotnost se pohybuje v rozmezí 2700 až 2800 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, součinitel délkové teplotní roztažnosti $\alpha = 1,34\cdot 10^{-5} [\text{K}^{-1}]$. Je mléčně zakalený, na omak mýdlovitý, lze jej rýpat nehtem (tvrdost 1). Nemá dispozice k vytváření jednotlivých krystalů, ale tvoří ploché deskovité krystaly. Obvykle je ho možno nalézt v kompaktních masách. V přírodě se vyskytuje v mnoha barevných odstínech od zelené přes šedou až po bílou.

Tab. 2. Chemické složení talku

Molekulová hmotnost		379,27 gm	
Hořčík	19,23% Mg	31,88% MgO	
Křemík	29,62% Si	63,37% SiO ₂	
Vodík	0,53% H	4,75% H ₂ O	
Kyslík	50,62% O		
suma	100%	100% oxid	

3.2.2.4 Kelburon 95610 (R-EMPP) [28]

Materiál *Kelburon 95610* je polypropylén, který je pro zvýšení houževnatosti reaktorově modifikován elastomerem a je produktem firmy *DSM Polypropylenes B.V.* Reaktorově elastomerem modifikované polypropyleny (R-EMPP) řady *Kelburon* obsahující vysoké procento elastomeru, kombinují velmi vysokou houževnatost (ve srovnání s běžnými kopolymerem) s vysokou tuhostí a dobrou zpracovatelností. Protože

etylén-propylénová kaučuková fáze je vytvořena v reaktoru, je *Kelburon* cenově efektivnější alternativa k termomechanicky vytvářeným směsím kaučuku a polypropylénu.

Materiálový koncept založený na míchání masterbatche s neplněným polypropylenem *Kelburon* nese název *Kelburon CS* (*CS = Customized Solutions*, v přibližném překladu „řešení úpravou u zákazníka“). Koncept *Kelburon CS* umožňuje v násypce vstřikovacího stroje kombinovat neplněný *Kelburon* s *Kelburonem* plněným 50% talku tzv. *masterbatchem*. Například, když 100% směsi granulátu je vytvořeno smícháním v hmotnostním poměru 80% granulí neplněného *Kelburonu 95610* a 20% granulí masterbatche *Kelburon 20MTBU*, je výsledný materiál značen *Kelburon 95610MTU10*, kde písmena *MT* značí modifikaci pomocí *Masterbatch Talc*, písmeno *U* znamená přítomnost *UV stabilizátorů* a číslo *10* výsledný podíl talku v hmotnostních procentech ve výsledném materiálu.

Modifikace *Kelburonu 95610* masterbatchem přímo ve vstřikovacím stroji je cenově výhodná a zároveň umožňuje proměnlivým dávkováním masterbatche regulovat jeho vlastnosti, zejména pak jeho smrštění. Nejdůležitější aplikací *Kelburonu* vstřikováním jsou nárazníky automobilů.

Materiálové listy fy. *DSM Polypropylenes* pro materiály *Kelburon 95610* a *Kelburon 95610CSU10*, který obsahuje 10 % talku (pozn.: *CS = Compounded Supportive*, tzn. není modifikován masterbatchem, ale je plněný přísadami již u výrobce materiálu) jsou uvedeny v příloze 2.

3.2.2.5 Masterbatch – Kelburon 20MBTU [28]

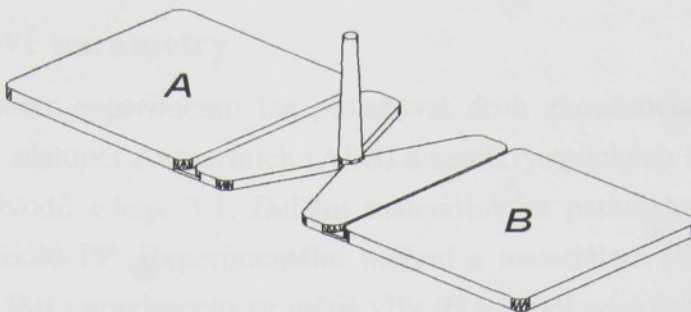
Masterbatch – *Kelburon MBT* (MasterBatch Talc) – je polymer s vysokou koncentrací přísad. Tento koncentrát v polymerní matici obsahuje hlavně minerální plnivo – talek a dále pak mazivo, pigmenty popř. UV-stabilizátory. Je dodáván ve formě granulátu. Masterbatch použitý v experimentální části práce je výrobcem označován jako *Kelburon 20MBTU*, v kterém je talek v celkovém množství masterbatche zastoupen 50 hmotnostními procenty. Písmeno *U* zde označuje přítomnost UV stabilizátorů a číslice *20* vyjadřuje dávkování masterbatche pro docílení koncentrace 10 % talku (nejběžnější koncentrace) ve výsledném materiálu.

3.3 Vstřikovací stroj a nástroj

Všechny výstřiky vyrobené pro potřeby experimentu byly vyrobeny v univerzálním nástroji, který má výměnnou desku s různými tvarovými dutinami. V rámci experimentu byly použity tvarové dutiny ve tvaru desek o rozměrech 50×50 mm a tloušťce 2 a 4 mm pro výrobu zkušebních těles pro měření smrštění a dále pak tvarové dutiny pro výrobu normalizovaných zkušebních těles pro zkoušku tahem a rázem.

Výstřiky ve tvaru desky, na kterých se měřilo smrštění, byly vyrobeny ve dvounásobné vstřikovací formě s filmovým ústím vtoku širokým 50 mm o tloušťce 0,6 u

desky 2 mm tlusté resp. 1,2 mm u desky o tloušťce 4 mm. Výstřiky byly rozlišeny označením tvarových dutin písmeny *A* a *B* (viz obr. 29).



Obr. 29. Zkušební tělesa – výstřiky tvaru desky – pro stanovení smrštění, před oddělením rozváděcích kanálů

Výstřiky byly vstřikovány na vstřikovacím lisu ENGEL ES 25/50, vybrané technické parametry tohoto lisu jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3. Technické parametry vstřikovacího lisu ENGEL ES 25/50

Parametry stroje		
Průměr šneku	25	[mm]
Zdvih šneku	85	[mm]
Otáčky šneku (normální)	50 - 130	[min ⁻¹]
Otáčky šneku (zrychlené)	50 - 260	[min ⁻¹]
Plastikační kapacita	14	[kg.hod ⁻¹]
Vstřikovací kapacita	35	[cm ³]
Max. vstřik. tlak	140	[MPa]
Uzavírací síla	300	[kN]
Průměr šneku	25	[mm]
Maximální výška formy	242	[mm]
Minimální výška formy	152	[mm]

Skutečné rozměry dutin formy *A* a *B* byly změřeny v referenčních bodech (viz obr. 35 v kap. 3.6.2) za pokojové teploty 23 °C výrobcem nástroje s přesností na 0,01mm jak ve směru podélném, tak i příčném (ve směru toku a kolmo na směr toku taveniny v dutině formy). Naměřené hodnoty uvádí tab. 4.

Tab. 4. Rozměry dutin formy

Rozměry dutiny formy [mm]			
2 mm	Dutina A	podélný směr l_C	50,03
		příčný směr b_C	50,00
	Dutina B	podélný směr l_C	49,96
		příčný směr b_C	50,03
4 mm	Dutina A	podélný směr l_C	50,02
		příčný směr b_C	50,00
	Dutina B	podélný směr l_C	49,99
		příčný směr b_C	49,99

3.4 Volba parametrů experimentu

3.4.1 Materiálové parametry

Za první parametr experimentu lze považovat druh zkoušeného termoplastu. Bylo zvoleno po jednom zástupci z amorfních (ABS) a semikrystalických (PP) termoplastů dle výše uvedených důvodů v kap. 3.1. Dalším materiálovým parametrem byl procentuální obsah talku v materiálu PP. Experimentální měření s materiálem PP byla rozdělena do dvou fází. V první fázi experimentu se měřil vliv tří technologických parametrů na třech úrovních pro koncentraci talku 10 hmotnostních procent. V druhé fázi pak byla dalším materiálovým parametrem velikost procentuálního obsahu talku, a to na pěti úrovních, kdy počet technologických parametrů i počet jejich úrovní byl snížen o jeden (vypuštěn parametr, který měl v první fázi nejmenší vliv na smršťení) z důvodu snížení rozsahu experimentu.

Pro potřeby experimentálních měření byly předem navázeny směsi složené z granulátu *Kelburon 95610* a vzestupným procentuálním zastoupením granulátu masterbatche *Kelburon 20MTBU* na čtyřech úrovních: 10, 20, 30 a 50 hmotnostních procent, pátou úrovní byla nulová koncentrace talku. Koncentrace talku tedy byly: 0, 5, 10, 15 a 25 %. Rozsah 0–25% obsahu talku, zvolený pro experiment, odpovídá běžně používaným koncentracím talku v polypropylénech. Pro takto vytvářený materiál jsem v této práci souhrnně používal označení *Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%*. *Kelburon 95610* s 10% talku, použitý v první fázi experimentu s PP, je označen podle firemního předpisu, tj. *Kelburon 95610MTU10* (viz kap. 3.2.2.3).

3.4.2 Konstrukční parametry

Z konstrukčních faktorů byla za další parametr experimentu zvolena velikost tloušťky stěny zkušebního tělesa a to na dvou úrovních: 2 a 4 mm. Rozsah 2-4 mm pokrývá tloušťky stěn většiny technických výstřiků. Zahrnutí další hodnoty tloušťky stěny by značně navýšilo počet měření v experimentu, a proto byl tento parametr ponechán na dvou úrovních. Je třeba poznamenat, že tloušťka vtokového ústí byla pro tloušťky stěny výstřiku 2 a 4 mm rozdílná (0,6 a 1,2 mm). Vzhledem ke konstantnímu vzájemnému poměru mezi tloušťkou ústí vtoku a tloušťkou stěny u zkušebních těles tloušťky 2 a 4 mm lze předpokládat minimalizaci vlivu rozdílné tloušťky vtokového ústí na velikost smršťení.

3.4.3 Volba technologických parametrů vstřikování

Základní technologické parametry při vstřikování termoplastů jsou: teplota taveniny, teplota formy, vstřikovací tlak, dotlak, doba dotlaku, doba plnění formy a doba chlazení výstřiku ve formě.

Autoři publikací zabývajících se smršťováním termoplastů se shodují v následujícím posouzení vlivů jednotlivých technologických parametrů. Z technologických veličin má na velikost smrštění výstřiku největší vliv výše a doba trvání dotlaku. Vstřikovací tlak určující rychlost plnění formy, teplota taveniny a teplota formy mají na smrštění menší vliv. Doba plnění dutiny formy smrštění významně neovlivňuje [1, 7, 14, 29, 30, 31].

Doba chlazení se volí taková, aby měl výstřik při vyjímání z formy teplotu, při které bude mít dostatečnou tuhost, aby nedošlo k jeho nežádoucím deformacím, a je tedy závislá na teplotě taveniny, teplotě formy a účinnosti odvodu tepla z formy temperačním médiem.

Změna v nastavení úrovní uvedených technologických parametrů má na hodnotu smrštění výstřiku buď zvyšující nebo snižující vliv, přičemž míra jejich vlivu je různá a nelze ji brát izolovaně. Tyto faktory spolu navzájem souvisejí a ve svých účincích se buď doplňují nebo si naopak odporují [7].

Pokud bychom chtěli provést experimentální zjištění vlivu základních parametrů při všech vzájemných kombinacích, obsahovala by úplná faktorová analýza pro 7 faktorů na 3 úrovních $3^7 = 2187$ pokusů. Z důvodu snížení počtu pokusů jsem při experimentu měnil na třech úrovních pouze tři ze sedmi základních technologických parametrů vstřikování, které dle výše uvedených předpokladů, nejvíce ovlivňují smrštění: dotlak (výšku dotlaku), teplotu formy a teplotu taveniny.

Dotlak (Výška dotlaku)

Z důvodu omezení rizika chybného okamžiku přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak, a z toho plynoucích negativních důsledků na rozměrovou přesnost (viz. kap. 2.1), byla hodnota vstřikovacího tlaku shodná s výškou dotlaku. Rychlost vstřiku (doba plnění) tím nebyla ovlivněna, neboť i nejnižší vstřikovací tlaky, používané při experimentu pro vstřik zkoušených materiálů, postačovaly během fáze plnění dutiny formy k udržení zvolené vstřikovací rychlosti šneku na konstantní hodnotě ($25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$).

Velikosti v experimentu nastavovaných hodnot dotlaku přihlíží k hodnotám dotlaku, běžně používaných při vstřikování zkoušených materiálů v praxi a byly odstupňovány na třech úrovních po 10 MPa v rozsahu 40-60 MPa pro výstřiky z ABS, resp. 30-50 MPa pro výstřiky z polypropylénu.

Teplota formy

Doporučované a v praxi běžné teploty formy pro vstřikování výstřiků z ABS a PP jsou shodné a nabývaly výše 40, 60 a 80 °C. Byly tedy zvoleny tři úrovně tohoto technologického parametru.

Za teplotu formy byla v tomto případě považována teplota na povrchu dutiny formy při ustálených podmínkách na konci manipulační doby vstřikovacího cyklu. Teplota byla měřena bezdotykovým způsobem - pyrometrem. Teplota formy byla regulována nepřímo pomocí regulace teploty temperačního média. Teploty temperačního média vstupujícího do vstřikovací formy byly experimentálně stanoveny a regulovány na 30, 50 a 70 °C.

Teplota taveniny

Teplota taveniny byla opět nastavovaná na třech úrovních, tak, aby se rozsah těchto hodnot odpovídal intervalu zpracovávacích teplot doporučených výrobcí materiálů. Hodnoty tohoto parametru spolu s ostatními technologickými parametry vstřikování nastavované na vstřikovacím stroji ENGEL ES 25/50 pro jednotlivé části experimentu jsou uvedeny v tab. 5–7.

Ostatní základní technologické parametry byly pro všechny části experimentu konstantní a jejich hodnoty byly nastaveny dle následujícího postupu:

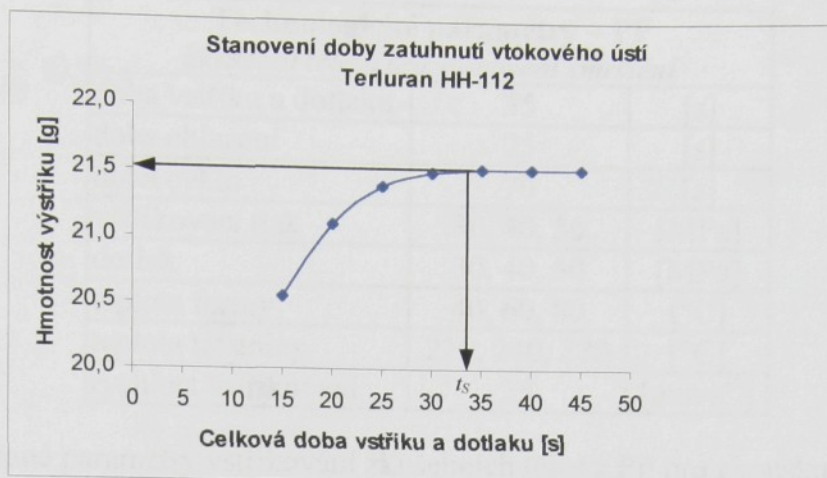
Doba vstřiku (doba plnění dutiny formy) je závislá na objemu výstřiku a rychlosti vstřikování, přičemž rychlost vstřiku byla nastavena konstantní pro všechny experimenty na hodnotu $25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (vyjádřená v rychlosti posuvu šneku). Rychlost vstřiku, vyjádřená objemovým průtokem Q , byla $12,265 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Doba dotlaku

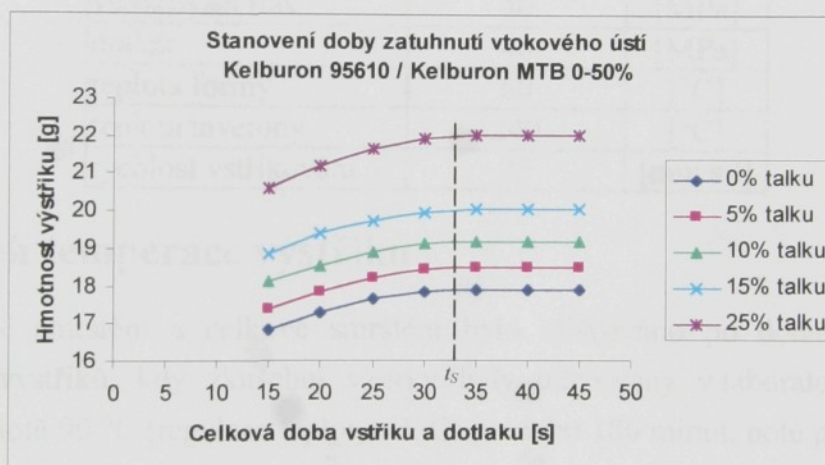
Pro určení doby dotlaku jsem zvolil kritérium maximální možné hmotnosti výstřiku při dané kombinaci parametrů vstřikování. Vycházel jsem z úvahy, že v ideálním případě by měla končit doba dotlaku v okamžiku zatuhnutí vtokového ústí, a že případná delší doba dotlaku nemá již na hmotnost, rozměry a smršťení žádný vliv. Na stroji byla tedy nastavována celková doba vstřiku a dotlaku, která byla stanovena tak, aby nebyla kratší než je nejdelší možná doba zatuhnutí vtokového ústí v rozsahu nastavovaných parametrů experimentu. Pro jednotlivé zkoušené materiály byla stanovena metodou vážení výstřiků (viz kap. 2.2.2.2) při nastavených podmínkách vstřikování s předpokládanou nejdelší dobou zatuhnutí vtokového ústí, tedy u zkušební tělesa s tloušťkou 4 mm při nejvyšší teplotě taveniny, nejvyšší teplotě formy a nejvyšším dotlaku. Pro experiment se doby zatuhnutí vtokového ústí a tedy zároveň i minimální doby vstřiku a dotlaku určily z grafů na obr. 30 a obr. 31. V momentě, kdy hmotnost výstřiku přestane záviset na době dotlaku odečteme z grafu hodnotu doby zatuhnutí vtokového ústí t_s v sekundách. V našem případě byla celková doba vstřiku a dotlaku pro všechny části experimentu stanovena na 35 sekund a to i pro tloušťku zkušebních těles 2 mm. Pro zkušební tělesa s tloušťkou 2 mm by postačovala doba dotlaku kratší, ale při zachování konstantní doby chlazení by tavenina plastu byla po skončení plastikace delší dobu v tavící komoře stroje a mohly by se tím způsobit rozdílné vlastnosti taveniny oproti vstřikování těles o tloušťce 4 mm.

Doba chlazení

Doba chlazení výstřiku ve formě byla zvolena tak, aby nedocházelo k deformacím při jeho vyjímání z formy. Byla stanovena na základě minimální potřebné doby chlazení výstřiku při nejvyšší teplotě formy, teplotě taveniny, nejvyšším dotlaku a tloušťce stěny výstřiku 4 mm. Doba chlazení se na vstřikovacím stroji počítá od konce doby dotlaku a byla pro všechny části experimentu stanovena na 25 sekund. Celková doba cyklu, včetně doby manipulace, byla také pro všechny části experimentu shodná – přibližně 70 sekund.



Obr. 30. Stanovení doby zatuhnutí vtokového ústí t_s zkušebního tělesa tloušťky 4 mm pro *Terluran HH-112*



Obr. 31. Stanovení doby zatuhnutí vtokového ústí t_s zkušebního tělesa tloušťky 4 mm pro *Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%*.

Tab. 5. Vybrané parametry vstřikování zkušebních těles z ABS pro stanovení smrštění

Technologické parametry – ABS		
doba vstřiku a dotlaku	35	[s]
doba chlazení	25	[s]
doba cyklu	70	[s]
vstřikovací tlak	40, 50, 60	[MPa]
dotlak	40, 50, 60	[MPa]
teplota formy	40, 60, 80	[°C]
teplota taveniny	240, 260, 280	[°C]
rychlost vstřikování	25	[mm·s ⁻¹]

Tab. 6. Vybrané parametry vstřikování zkušebních těles z PP pro stanovení smršťení

Technologické parametry – PP <i>zkušební tělesa pro stanovení smršťení</i>		
doba vstřiku a dotlaku	35	[s]
doba chlazení	25	[s]
doba cyklu	70	[s]
vstřikovací tlak	30, 40, 50	[MPa]
dotlak	30, 40, 50	[MPa]
teplota formy	40, 60, 80	[°C]
teplota taveniny	210, 240, 270	[°C]
rychlost vstřikování	25	[mm·s ⁻¹]

Tab. 7. Vybrané parametry vstřikování zkušebních těles z PP pro zkoušku tahem a rázem

Technologické parametry – PP <i>zkušební tělesa pro zkoušku tahem a rázem</i>		
doba vstřiku a dotlaku	35	[s]
doba chlazení	25	[s]
doba cyklu	70	[s]
vstřikovací tlak	40	[MPa]
dotlak	40	[MPa]
teplota formy	60	[°C]
teplota taveniny	240	[°C]
rychlost vstřikování	25	[mm·s ⁻¹]

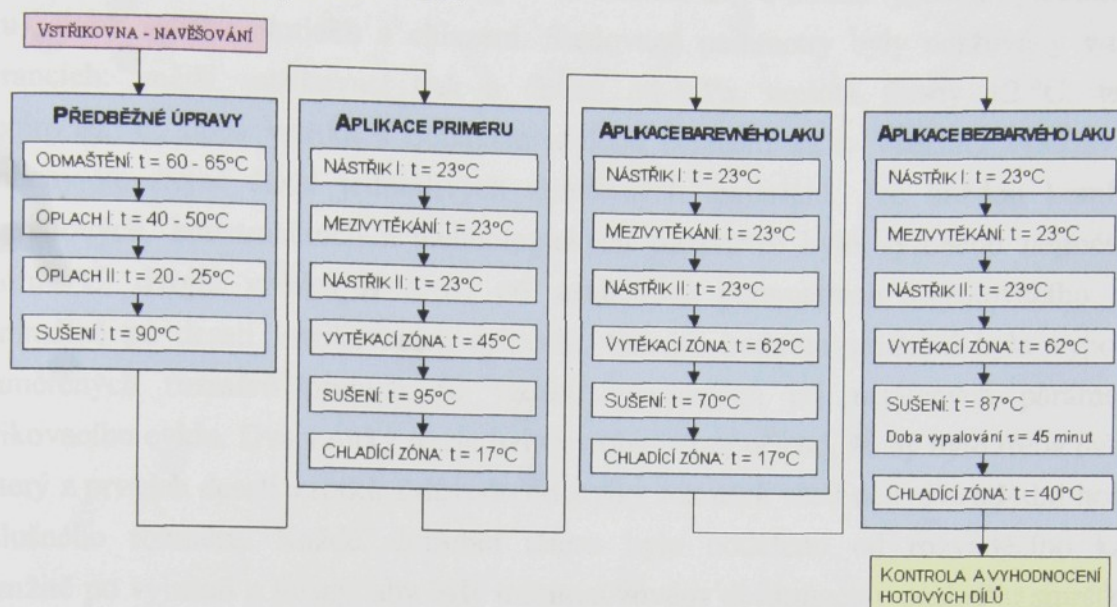
3.5 Průběh temperace výstřiků

Dodatečné smršťení a celkové smršťení bylo zjišťováno po dodatečné úpravě – *temperaci* – výstřiků, kdy zkušební vzorky byly udržovány v laboratorní sušárně na konstantní teplotě 90 °C (regulace teploty $\pm 1^\circ\text{C}$) po dobu 180 minut, poté ponechány volně vychladnout na vzduchu rozložené na rovné podložce a po 16 až 24 hodinách opětovně přeměřeny pro zjištění dodatečného smršťení.

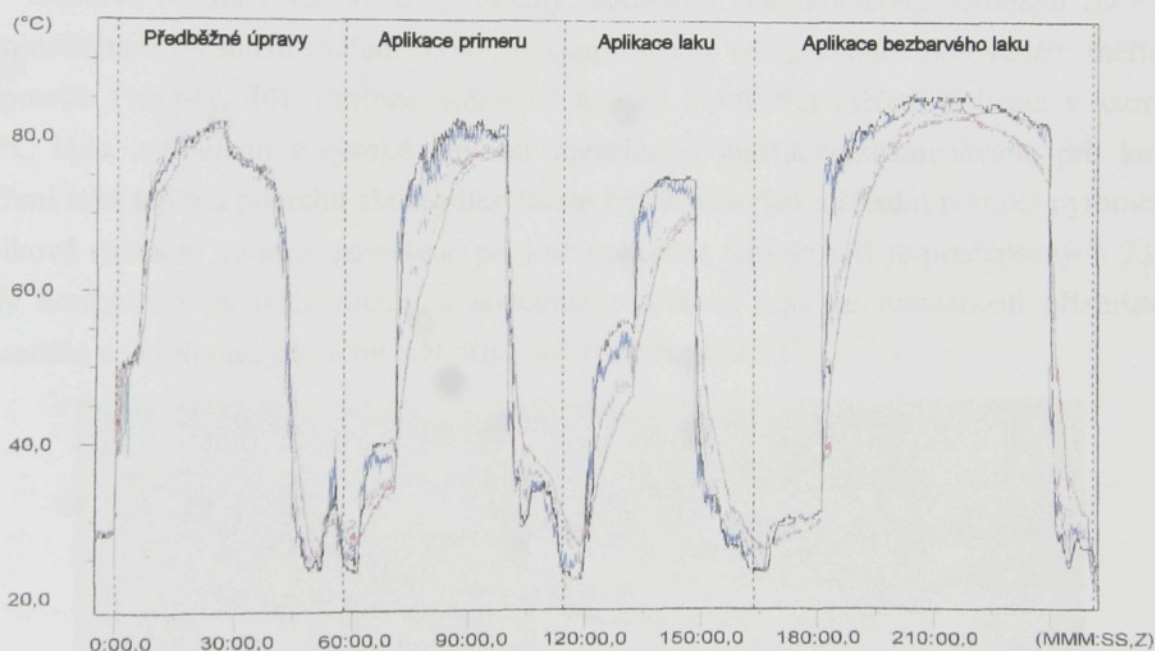
Průběhem temperace bylo simulováno tepelné zatížení vstřikovaných dílů při následném průchodu automatizovanou lakovací linkou provozovanou v podniku *Peguform Bohemia a.s.* (viz obr. 32).

Na lakování nárazníků se používají vodou ředěné základové laky. Tyto laky jsou výsledkem dlouhodobé snahy o zvýšení bezpečnosti práce snížením obsahu těkavých podílů. Sestávají ze stejných složek jako laky na bázi rozpouštědel, ta jsou ovšem z velké části nahrazena vodou (65%). Voda má proti ostatním rozpouštědlům zcela odlišné fyzikální vlastnosti. Její molekuly jsou silně polární a jsou vzájemně propojeny silnými vodíkovými můstky. Z tohoto důvodu je třeba k odpaření vody vyšších teplot. Během postřiku se ztrácí pouze 25% obsahu vody oproti rozpouštědlovým lakům, kde dochází k odpaření až 50% rozpouštědla. Aby bylo docíleno odpaření vody z naneseného filmu základového laku, je zapotřebí dodatečné energie ve formě ohřívání odvětrávacích zón, kde maximální teploty dosahují až 90°C [32]. Celý proces lakování trvá cca. 240 minut,

přičemž sušení laku při maximálních teplotách 85 až 90°C probíhá přibližně 180 minut. Průběh teplot v lakovně je na obr. 33.



Obr. 32. Schéma procesu lakování vstřikovaných dílů [33]



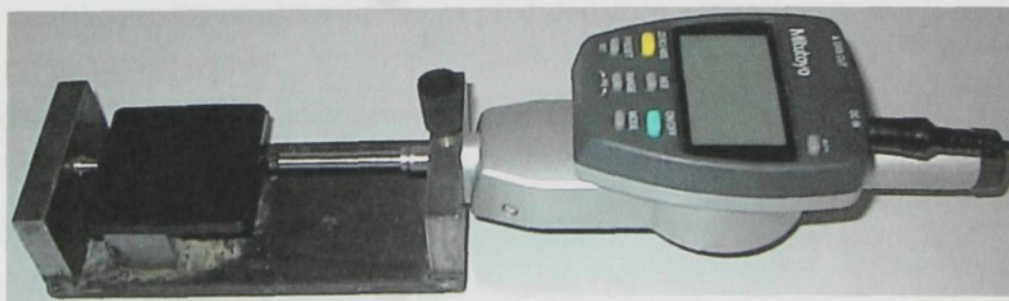
Obr. 33. Průběh teplot v lakovně měřený na povrchu výstřiku [34]

3.6 Stanovení výrobního, dodatečného a celkového smrštění

Výstřiky tvaru desky s filmovým ústím vtoku, na kterých bylo měřeno smrštění, jsou tvarově podobné zkušební tělesům specifikovaných normou pro stanovení smrštění termoplastů ČSN EN ISO 294-4 *Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – část 4: Stanovení smrštění*. V této normě jsou ale pro zkušební tělesa určeny rozměry 60×60×2 mm. Pro stanovení smrštění výstřiků byla použita metodika a výpočtové vztahy formulované touto normou [35].

Při výrobě zkušebních vzorků byla kontrolována teplota formy, teplota taveniny (bezdotykové měření pyrometrem), vnější vstřikovací tlak a dotlak (průběh hydraulického tlaku), doby vstřiku, dotlaku a chlazení. Sledované parametry byly udržovány v těchto tolerancích: vnější vstřikovací tlak a dotlak ± 1 MPa, teplota formy ± 2 °C, teplota taveniny ± 2 °C, doba vstřiku s dotlakem a doba chlazení ± 1 s. Všechny výstřiky byly vyrobeny ze stejné šarže jednotlivých zkoušených materiálů. Pro každou kombinaci materiálových, konstrukčních a technologických parametrů bylo vyrobeno nejméně 12 vzorků (12 dvojic vzorků *A* a *B*) při ustálených parametrech vstřikovacího cyklu (minimálně po deseti vstřikovacích cyklech). Střední hodnota smrštění byla vypočtena z naměřených rozměrů prvních 10 vzorků vyrobených při ustálených parametrech vstřikovacího cyklu. Dva vzorky navíc byly vyrobeny pro případ, že by bylo třeba nahradit některý z prvních deseti vzorků z důvodu odchylky rozměrů větší než 5% střední hodnoty příslušného rozměru. Každé zkušební těleso bylo odděleno od rozváděcího kanálu okamžitě po vyjmutí z formy, aby byly minimalizovány deformace v důsledku smršťování rozváděcích kanálů.

Délkové rozměry vzorků byly měřeny digitálním úchylkoměrem Mitutoyo ID-F150 s dosažitelnou přesností měření 0,001 mm umístěném ve speciálně zhotoveném měřicím přípravku (viz obr. 34). Protože pokojová teplota v průběhu měření kolísala v rozmezí ± 2 °C byla, vzhledem k vysoké teplotní roztažnosti plastů, zaznamenávána pro každé měření také teplota povrchu zkušebního tělesa bezdotykovým měřením pomocí pyrometru. Délkové rozměry vzorků, naměřené při jiné pokojové teplotě než je předepsaných 23 °C, byly korigovány pomocí středního součinitele délkové teplotní roztažnosti příslušného materiálu na hodnotu, jakou by měl příslušný rozměr při 23 °C.



Obr. 34. Měřicí přípravek s měřidlem Mitutoyo ID-F150

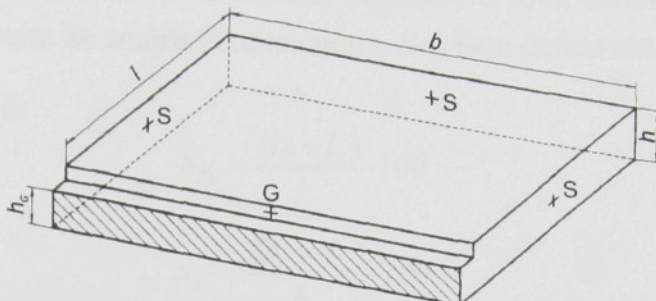
3.6.2 Výrobní smrštění

Výrobní smrštění (S_M) je rozdíl mezi rozměry suchého zkušebního tělesa a rozměry tvarové dutiny formy, v níž bylo zkušební těleso vstřikováno; rozměry formy i zkušebního tělesa se měří při pokojové teplotě.

Výrobní smrštění (S_M) se stanovuje v podélném směru (S_{Mp}) a v příčném směru (S_{Mn}) vůči směru toku taveniny. Měření rozměrů zkušebních těles probíhalo po uplynutí 16-ti až 24 hodin od výroby, kdy se předpokládá, že všechny měřené rozměry jsou již ustáleny.

Výstřiky se uchovávaly ve standardní atmosféře (teplota $23 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu $65 \pm 5\%$).

S_{Mp} se stanovuje ve středu šířky zkušebního tělesa a S_{Mn} ve středu délky zkušebního tělesa. Na obr. 35 je vyznačeno umístění referenčních bodů (S , G), v kterých jsou měřeny rozměry zkušebního tělesa. Vyšrafovaná plocha označuje zbytek ústí vtoku o tloušťce h_G .



Obr. 35. Perspektivní zobrazení zkušebního tělesa tvaru vstřikované desky.

Výrobní smrštění se vyjadřuje v procentech daného rozměru tvarové dutiny formy:

$$S_{Mp} = \frac{(l_c - l_1)}{l_c} \cdot 100 \quad (32)$$

$$S_{Mn} = \frac{(b_c - b_1)}{b_c} \cdot 100 \quad (33)$$

kde l_c a b_c jsou délka a šířka ve středu tvarové dutiny [mm],
 l_1 a b_1 odpovídající délka a šířka zkušebního tělesa [mm].

3.6.3 Dodatečné smrštění

Dodatečné smrštění (S_p), nazývané též dosmrštění, je definováno jako rozdíl mezi rozměry vstřikovaného zkušebního tělesa před dodatečnou úpravou a po ní; rozměry jsou měřeny při pokojové teplotě.

Dodatečné smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny, S_{pp} , a dodatečné smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny, S_{pn} , jsou definovány analogicky jako u smrštění výrobního:

$$S_{pp} = \frac{(l_1 - l_2)}{l_1} \cdot 100 \quad (34)$$

$$S_{pn} = \frac{(b_1 - b_2)}{b_1} \cdot 100 \quad (35)$$

kde l_2 a b_2 jsou délka a šířka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě (po temperování nebo po delším smluvním čase) [mm].

V této práci bylo dodatečné smrštění měřeno po temperaci zkušebních těles (viz kap. 3.5) a to v rozmezí 16 až 24 hodin po skončení temperování.

3.6.4 Celkové smrštění

Celkové smrštění (S_T), je rozdíl mezi rozměry zkušebního tělesa po dodatečné úpravě a rozměry tvarové dutiny formy, ve které bylo zkušební těleso vstřikováno; rozměry jsou měřeny při pokojové teplotě.

Celkové smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny, S_{Tp} , a celkové smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny, S_{Tn} , jsou definovány analogicky jako u smrštění výrobního:

$$S_{Tp} = \frac{(l_c - l_2)}{l_c} \cdot 100 \quad (36)$$

$$S_{Tn} = \frac{(b_c - b_2)}{b_c} \cdot 100 \quad (37)$$

kde použité symboly jsou definovány výše.

Celkové smrštění není přesný součet výrobního a dodatečného smrštění, protože výrobní a dodatečné smrštění nejsou vyjadřovány jako procenta stejného výchozího rozměru. Vztah mezi výrobním smrštěním, dodatečným smrštěním a celkovým smrštěním je dán následující rovnicí:

$$S_T = S_M + S_P - \frac{S_P \cdot S_M}{100} \quad (38)$$

Poslední člen rovnice 38 lze však ve většině případů zanedbat. V předkládané práci je celkové smrštění počítáno podle rovnic 36 a 37.

3.7 Statistické vyhodnocení naměřených dat faktorovou analýzou rozptylu [36]

Obecně lze říci, že analýza rozptylu (Analysis of Variance – ANOVA) patří mezi nejčastěji používané statistické metody. Hovoříme-li o analýze rozptylu, potom jednotlivé vysvětlující proměnné nazýváme faktory. Analýza rozptylu spočívá v rozkladu výběrového rozptylu na několik složek příslušejících k jednotlivým uvažovaným zdrojům variability. Rozklad celkového rozptylu na složky má umožnit úsudky o vlivu jednotlivých faktorů, podle nichž je soubor roztríděn, na sledovanou veličinu, jejíž napozorované hodnoty tvoří náhodný výběr. Pro posouzení shody (odlišností) výsledků naměřených dat se nejčastěji používá Fischerovo kritérium, které vychází ze součtu čtverců odchylek. V případě, že je výsledná hodnota Fischerova kritéria pro daný faktor vyšší než kritická hodnota Fischerova rozdělení (na zvolené hladině významnosti a pro dané stupně volnosti), pak uvedený faktor můžeme brát jako statisticky významný. Veškeré statistické testy jsou provedeny pro hladinu významnosti $\alpha = 5\%$.

Statistické vyhodnocení naměřených dat bylo realizováno s pomocí statistického programu *STATGRAPGICS* s využitím multifaktorové analýzy rozptylu (ANOVA).

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tabulky naměřených hodnot výrobního, dodatečného a celkového smrštění obsahují z důvodu redukce velkého množství údajů pouze aritmetické průměry z deseti naměřených hodnot smrštění na jednotlivých zkušebních tělesech. Ke každé jednotlivé průměrné hodnotě smrštění je uvedena příslušná směrodatná odchylka σ souboru naměřených dat. Výsledky naměřené na zkušebních tělesech *A* a *B* se od sebe lišily pouze nepatrně, a proto jsou v tabulkách uváděny a dále statisticky zpracovány pouze výsledky smrštění naměřené na zkušebních tělesech označených písmenem *A*.

Pro posouzení vlivů jednotlivých parametrů vstřikování popř. jejich vzájemných interakcí na velikost výrobního, dodatečného a celkového smrštění byla použita statistická metoda analýzy rozptylu (ANOVA) (viz kap. 3.7). Výpočet analýzy byl proveden pomocí programu *STATGRAPHICS* ver. 5.0. V tomto programu statistická analýza ANOVA vykonává multifaktorovou analýzu, která výsledky uvádí ve formě tabulek, v kterých, kromě jiného, zobrazuje výsledky *F*-testů k určení faktorů majících na jednotlivá smrštění statistický vliv a dále na základě analýzy vytváří přehledné grafy.

Tabulky výsledků multifaktorové analýzy ANOVA uvádějí nejprve vlivy hlavních efektů (*main effects*), tj. samostatných faktorů, a dále vlivy všech dvoufaktorových kombinací (*interactions*). Pro hodnocení vlivu jednotlivých faktorů a jejich interakcí vycházíme z údajů v posledních dvou sloupcích tabulky. Ze sloupce *F-ratio* (Fischerovo kritérium) lze usuzovat na velikost míry vlivu tohoto faktoru na závisle proměnnou veličinu (smrštění). Čím vyšší jsou tyto hodnoty *F-ratio*, tím významnější je vliv příslušného faktoru. Sloupec *P-Value* udává statistickou významnost faktoru, tj. zda chování výstupního parametru v závislosti na vstupu je pouze náhodné anebo zda vstupní parametr má statisticky významný vliv na výstup. Jestliže je hodnota *P-Value* větší, než 0,05 (v rámci tohoto experimentu) je vliv vstupního parametru nevýznamný a tudíž lze tvrdit, že s pravděpodobností $1 - \alpha$ nemá tento faktor vliv na hodnotu závislé výstupní proměnné, a naopak, pokud je nižší než 0,05, má na konkrétní smrštění statisticky významný účinek s 95%-ní pravděpodobností. Všechny testy ANOVA byly provedeny na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

Dalšími výstupy programu *STATGRAPHICS*, použité k vyhodnocení výsledků experimentu, jsou maticové grafy sestavené programem na základě multifaktorové analýzy ANOVA, které graficky popisují závislosti smrštění na jednotlivých faktorech (parametrech) a jejich vzájemných kombinacích a přehledně tak popisují jejich vliv na smrštění. V jednotlivých grafech jsou zobrazeny průměrné hodnoty smrštění z vyhodnocovaných kombinací parametrů. Velikost jednotlivých faktorů v grafech není vyjádřena absolutně, nýbrž úrovněmi (*Level*). Vyšší číslo *Level* znamená vyšší úroveň příslušného faktoru.

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tabulky naměřených hodnot výrobního, dodatečného a celkového smrštění obsahují z důvodu redukce velkého množství údajů pouze aritmetické průměry z deseti naměřených hodnot smrštění na jednotlivých zkušebních tělesech. Ke každé jednotlivé průměrné hodnotě smrštění je uvedena příslušná směrodatná odchylka σ souboru naměřených dat. Výsledky naměřené na zkušebních tělesech *A* a *B* se od sebe lišily pouze nepatrně, a proto jsou v tabulkách uváděny a dále statisticky zpracovány pouze výsledky smrštění naměřené na zkušebních tělesech označených písmenem *A*.

Pro posouzení vlivů jednotlivých parametrů vstřikování popř. jejich vzájemných interakcí na velikost výrobního, dodatečného a celkového smrštění byla použita statistická metoda analýzy rozptylu (ANOVA) (viz kap. 3.7). Výpočet analýzy byl proveden pomocí programu *STATGRAPHICS* ver. 5.0. V tomto programu statistická analýza ANOVA vykonává multifaktorovou analýzu, která výsledky uvádí ve formě tabulek, v kterých, kromě jiného, zobrazuje výsledky *F*-testů k určení faktorů majících na jednotlivá smrštění statistický vliv a dále na základě analýzy vytváří přehledné grafy.

Tabulky výsledků multifaktorové analýzy ANOVA uvádějí nejprve vlivy hlavních efektů (*main effects*), tj. samostatných faktorů, a dále vlivy všech dvoufaktorových kombinací (*interactions*). Pro hodnocení vlivu jednotlivých faktorů a jejich interakcí vycházíme z údajů v posledních dvou sloupcích tabulky. Ze sloupce *F-ratio* (Fischerovo kritérium) lze usuzovat na velikost míry vlivu tohoto faktoru na závisle proměnnou veličinu (smrštění). Čím vyšší jsou tyto hodnoty *F-ratio*, tím významnější je vliv příslušného faktoru. Sloupec *P-Value* udává statistickou významnost faktoru, tj. zda chování výstupního parametru v závislosti na vstupu je pouze náhodné anebo zda vstupní parametr má statisticky významný vliv na výstup. Jestliže je hodnota *P-Value* větší, než 0,05 (v rámci tohoto experimentu) je vliv vstupního parametru nevýznamný a tudíž lze tvrdit, že s pravděpodobností $1 - \alpha$ nemá tento faktor vliv na hodnotu závislé výstupní proměnné, a naopak, pokud je nižší než 0,05, má na konkrétní smrštění statisticky významný účinek s 95%-ní pravděpodobností. Všechny testy ANOVA byly provedeny na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

Dalšími výstupy programu *STATGRAPHICS*, použité k vyhodnocení výsledků experimentu, jsou maticové grafy sestavené programem na základě multifaktorové analýzy ANOVA, které graficky popisují závislosti smrštění na jednotlivých faktorech (parametrech) a jejich vzájemných kombinacích a přehledně tak popisují jejich vliv na smrštění. V jednotlivých grafech jsou zobrazeny průměrné hodnoty smrštění z vyhodnocovaných kombinací parametrů. Velikost jednotlivých faktorů v grafech není vyjádřena absolutně, nýbrž úrovněmi (*Level*). Vyšší číslo *Level* znamená vyšší úroveň příslušného faktoru.

4.1 Vyhodnocení smrštění výstřiků z ABS Terluran HH-112

Kombinace nastavení jednotlivých parametrů, pro jednotlivé tloušťky zkušebních těles, byly pro materiál ABS *Terluran HH-112* označeny třemi číslicemi vyjadřujícími velikost proměnných parametrů vstřikování v tomto pořadí:

Teplota formy (T_{formy}) [$^{\circ}\text{C}$] – Teplota taveniny (T_{taveniny}) [$^{\circ}\text{C}$] – Dotlak [MPa].

Tyto tři technologické parametry byly měněny na třech úrovních. Čtvrtým parametrem byla tloušťka stěny [mm], měněná na dvou úrovních. Naměřené výsledky smrštění výstřiků tvaru zkušebních těles jsou pro materiál *Terluran HH-112* uvedeny v tab. 8–10. Tyto výsledky tvoří data, na která byla aplikována multifaktorová analýza rozptylu (ANOVA) programu *STATGRAPHICS*. Výsledky této statistické analýzy jsou uvedeny v tab. 11–16 a na obr. 36–41.

Vyhodnocení naměřených výsledků a výsledků analýzy rozptylu je rozděleno na vyhodnocení výrobního, dodatečného a celkového smrštění.

Výrobní smrštění

Z naměřených hodnot výrobního smrštění je patrné, že výrobní smrštění příčné je u všech vzorků větší, než smrštění podélné. Podélné i příčné výrobní smrštění vykazuje se zvyšujícími se hodnotami všech technologických parametrů klesající tendenci. Maximální hodnoty výrobního smrštění podélného i příčného byla naměřena u obou tloušťek při nejnižších hodnotách všech tří technologických parametrů 40-240-40. Pro oba směry byla minima smrštění u tloušťky 2 mm naměřena pro nejvyšší hodnoty technologických parametrů 80-280-60 a u tloušťky 4 mm pak u kombinace parametrů 60-280-60. Se zvětšující se tloušťkou stěny se výrobní smrštění podélné i příčné u většiny kombinací parametrů mírně zvyšovalo, ale pro kombinace s nejnižším dotlakem a teplotami formy 40 a 60 $^{\circ}\text{C}$ se mírně snižovalo u příčného smrštění. Naměřené hodnoty výrobního smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,436–0,816% a 0,539–0,771% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,481–0,848% a 0,552–0,806% u tloušťky 4 mm.

Z výsledků analýzy rozptylu (ANOVA) vyplývá, že na výrobní smrštění podélné i příčné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv výška dotlaku. Ostatní parametry mají též statisticky významný vliv na výrobní smrštění výstřiků tvaru zkušebních těles (hodnota $P\text{-Value}$ je menší než 0,05). Vliv teploty taveniny a formy u příčného smrštění je větší než u podélného a naopak vliv tloušťky je větší u podélného smrštění. Vlivy jednotlivých parametrů a jejich interakcí na výrobní smrštění jsou však relativně malé vzhledem k vlivu dotlaku. Vliv některých interakcí jednotlivých parametrů je též statisticky významný, ale pouze interakce *tloušťka* $\times$ *dotlak* má srovnatelný vliv jako hlavní efekty.

Dodatečné smrštění (po temperaturaci – teplota 90°C po dobu 180 min)

Naměřené hodnoty dodatečného smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,070–0,139% a 0,038–0,069% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo dodatečné smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,057–0,119% a 0,038–0,068% u tloušťky 4 mm. Maximální dodatečné smrštění podélné i příčné bylo naměřeno při parametrech 2mm–80–240–40 a minimální podélné i příčné bylo naměřeno při parametrech 4mm–40–280–60. Vliv jednotlivých parametrů je patrný z grafů na obr. 38 a 39. Z porovnání hodnot dodatečného smrštění vzorků tloušťky 4 mm a 2 mm je zřejmé, že se vzrůstající tloušťkou klesají hodnoty dodatečného smrštění. S vyšší teplotou formy dodatečné smrštění mírně vzrůstá u tloušťky 2 mm a naopak s vyšší teplotou taveniny mírně klesá. Ve srovnání s vlivem dotlaku a zejména tloušťky jsou vlivy teplot formy a taveniny mnohem méně významné jak potvrdila i analýza rozptylu.

Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že na dodatečné smrštění podélné i příčné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv tloušťka stěny výstřiku. Vliv dotlaku na dodatečné smrštění je mnohem menší než vliv tloušťky. Velmi malý vliv na podélné dodatečné smrštění má teplota formy a na příčné teplota taveniny. Z interakcí parametrů mají určitý vliv na dodatečné smrštění podélné *tloušťka × teplota taveniny* a *tloušťka × teplota formy* a na příčné *tloušťka × dotlak* a *tloušťka × teplota formy*.

Celkové smrštění

Celkové smrštění je přibližně součet smrštění výrobního a dodatečného. Vzhledem k tomu, že smrštění dodatečné je výrazně menší než výrobní, celkové smrštění sleduje trendy vlivů parametrů podobné jako u smrštění výrobního. Podélné i příčné celkové smrštění vykazuje se zvyšujícími se hodnotami všech technologických parametrů klesající tendenci. Naměřené hodnoty celkového smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,524–0,929% a 0,579–0,823% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo celkové smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,561–0,940% a 0,598–0,850% u tloušťky 4 mm. Maximální celkové smrštění podélné i příčné bylo naměřeno při parametrech 2mm–40–240–40 a minimální podélné i příčné bylo naměřeno při parametrech 2mm–80–280–60. Výsledky analýzy rozptylu ukazují, že na celkové smrštění má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv velikost dotlaku a že vliv tloušťky je poměrně malý pro podélné i příčné smrštění. Druhý nejvyšší vliv má teplota taveniny a dále teploty formy. Z interakcí vyhodnocovaných parametrů má největší vliv na celkové smrštění *tloušťka × dotlak*.

Tab. 8. Výrobní smrštění výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Proměnné parametry	Výrobní smrštění S_M [%] <i>Terluran HH-112</i>							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ
40-240-40	0,816	0,003	0,848	0,006	0,771	0,007	0,806	0,008
40-240-50	0,662	0,004	0,709	0,005	0,696	0,006	0,716	0,008
40-240-60	0,541	0,003	0,585	0,006	0,611	0,008	0,632	0,009
40-260-40	0,731	0,006	0,785	0,008	0,724	0,008	0,739	0,008
40-260-50	0,631	0,005	0,673	0,007	0,681	0,006	0,678	0,007
40-260-60	0,505	0,004	0,549	0,005	0,569	0,005	0,588	0,006
40-280-40	0,706	0,004	0,756	0,006	0,722	0,006	0,718	0,008
40-280-50	0,595	0,006	0,637	0,004	0,687	0,007	0,662	0,007
40-280-60	0,477	0,004	0,521	0,004	0,546	0,008	0,560	0,009
60-240-40	0,756	0,007	0,770	0,005	0,733	0,009	0,729	0,007
60-240-50	0,628	0,006	0,657	0,006	0,683	0,006	0,687	0,007
60-240-60	0,510	0,003	0,555	0,004	0,584	0,006	0,600	0,005
60-260-40	0,685	0,008	0,735	0,007	0,714	0,007	0,723	0,009
60-260-50	0,581	0,005	0,617	0,009	0,666	0,007	0,656	0,008
60-260-60	0,474	0,004	0,514	0,005	0,559	0,008	0,579	0,005
60-280-40	0,650	0,007	0,696	0,006	0,701	0,006	0,698	0,006
60-280-50	0,545	0,005	0,590	0,004	0,679	0,005	0,655	0,006
60-280-60	0,438	0,005	0,489	0,004	0,539	0,004	0,552	0,005
80-240-40	0,699	0,006	0,725	0,006	0,697	0,008	0,717	0,007
80-240-50	0,591	0,004	0,635	0,003	0,657	0,007	0,665	0,005
80-240-60	0,479	0,003	0,523	0,005	0,568	0,008	0,575	0,006
80-260-40	0,655	0,006	0,685	0,004	0,692	0,008	0,692	0,007
80-260-50	0,548	0,005	0,589	0,006	0,649	0,006	0,653	0,007
80-260-60	0,456	0,004	0,503	0,005	0,554	0,006	0,574	0,005
80-280-40	0,636	0,004	0,673	0,007	0,682	0,007	0,692	0,006
80-280-50	0,539	0,007	0,576	0,004	0,642	0,009	0,645	0,007
80-280-60	0,436	0,004	0,481	0,005	0,558	0,007	0,570	0,006

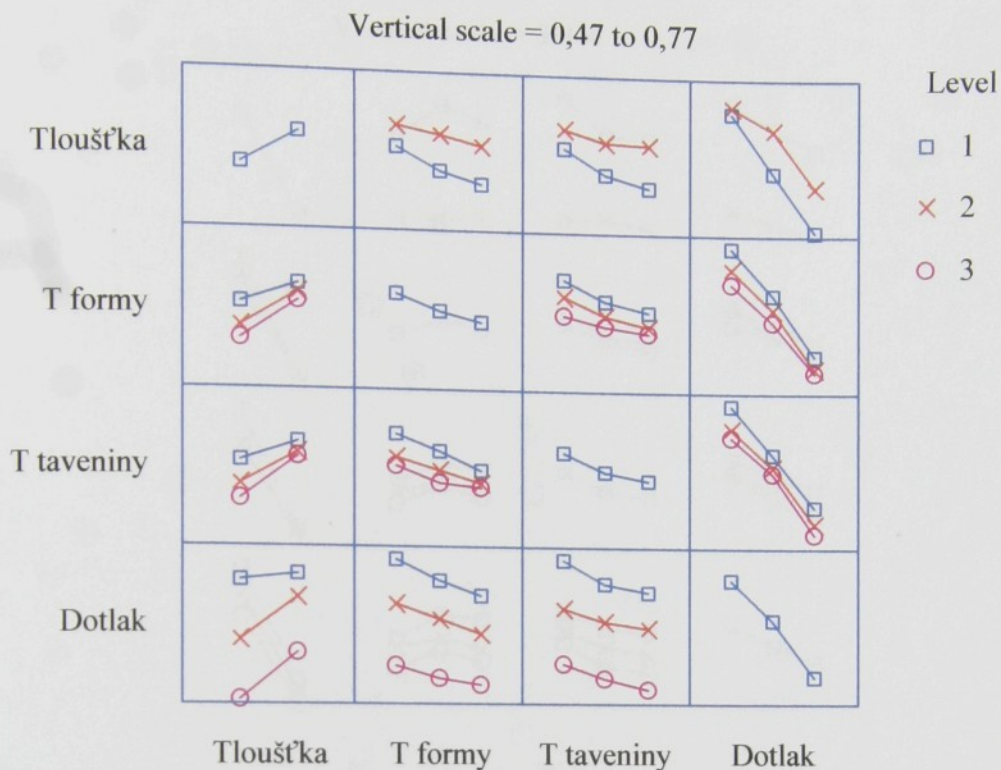
Tab. 9. Dodatečné smrštění výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Proměnné parametry	Dodatečné smrštění S_p [%] <i>Terluran HH-112</i>							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{pp}	σ	S_{pn}	σ	S_{pp}	σ	S_{pn}	σ
40-240-40	0,113	0,004	0,092	0,003	0,052	0,003	0,044	0,002
40-240-50	0,105	0,002	0,086	0,004	0,055	0,004	0,049	0,003
40-240-60	0,089	0,004	0,072	0,002	0,060	0,002	0,053	0,003
40-260-40	0,099	0,003	0,085	0,004	0,058	0,004	0,054	0,004
40-260-50	0,092	0,003	0,077	0,004	0,057	0,003	0,055	0,002
40-260-60	0,078	0,004	0,061	0,003	0,045	0,002	0,048	0,003
40-280-40	0,097	0,004	0,094	0,003	0,055	0,004	0,058	0,003
40-280-50	0,089	0,003	0,075	0,004	0,048	0,004	0,052	0,004
40-280-60	0,070	0,003	0,057	0,003	0,038	0,003	0,042	0,003
60-240-40	0,128	0,006	0,107	0,004	0,058	0,002	0,068	0,002
60-240-50	0,117	0,004	0,099	0,004	0,053	0,003	0,057	0,002
60-240-60	0,110	0,004	0,082	0,002	0,049	0,003	0,047	0,002
60-260-40	0,113	0,004	0,109	0,003	0,061	0,002	0,058	0,003
60-260-50	0,103	0,003	0,091	0,005	0,053	0,004	0,053	0,003
60-260-60	0,094	0,004	0,077	0,003	0,046	0,003	0,045	0,002
60-280-40	0,125	0,005	0,115	0,003	0,055	0,002	0,055	0,003
60-280-50	0,100	0,003	0,084	0,003	0,048	0,003	0,050	0,002
60-280-60	0,091	0,004	0,077	0,004	0,040	0,003	0,045	0,003
80-240-40	0,139	0,003	0,119	0,004	0,057	0,004	0,055	0,003
80-240-50	0,115	0,003	0,094	0,003	0,051	0,004	0,052	0,002
80-240-60	0,102	0,004	0,078	0,004	0,044	0,002	0,053	0,002
80-260-40	0,104	0,004	0,108	0,003	0,069	0,002	0,058	0,002
80-260-50	0,091	0,003	0,083	0,002	0,052	0,001	0,055	0,002
80-260-60	0,086	0,004	0,069	0,003	0,039	0,003	0,042	0,003
80-280-40	0,100	0,002	0,094	0,004	0,061	0,003	0,064	0,002
80-280-50	0,086	0,004	0,082	0,003	0,047	0,002	0,050	0,003
80-280-60	0,088	0,003	0,080	0,004	0,041	0,002	0,047	0,002

Tab. 10. Celkové smrštění výstřiků z materiálu výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

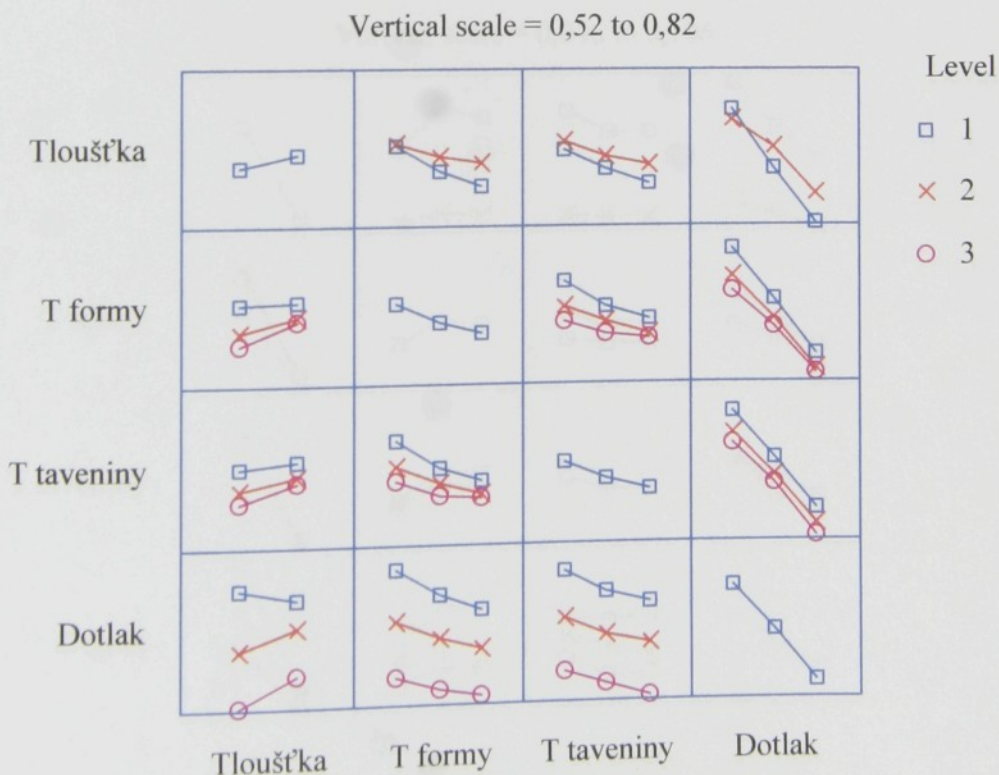
Proměnné parametry	Celkové smrštění S_T [%] <i>Terluran HH-112</i>							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{Tp}	σ	S_{Tn}	σ	S_{Tp}	σ	S_{Tn}	σ
40-240-40	0,929	0,007	0,940	0,009	0,823	0,008	0,850	0,011
40-240-50	0,766	0,007	0,795	0,008	0,751	0,011	0,764	0,010
40-240-60	0,630	0,008	0,656	0,007	0,671	0,012	0,685	0,009
40-260-40	0,829	0,006	0,870	0,009	0,782	0,008	0,793	0,011
40-260-50	0,723	0,005	0,750	0,010	0,739	0,009	0,734	0,012
40-260-60	0,583	0,006	0,611	0,008	0,615	0,007	0,636	0,009
40-280-40	0,803	0,008	0,850	0,009	0,777	0,009	0,776	0,008
40-280-50	0,684	0,007	0,712	0,011	0,735	0,012	0,714	0,010
40-280-60	0,547	0,008	0,577	0,009	0,583	0,010	0,602	0,013
60-240-40	0,884	0,008	0,877	0,008	0,791	0,013	0,798	0,012
60-240-50	0,746	0,006	0,757	0,011	0,737	0,011	0,744	0,009
60-240-60	0,620	0,008	0,636	0,007	0,633	0,009	0,647	0,011
60-260-40	0,798	0,007	0,843	0,009	0,775	0,008	0,781	0,009
60-260-50	0,684	0,009	0,709	0,008	0,719	0,012	0,708	0,012
60-260-60	0,567	0,007	0,591	0,009	0,605	0,010	0,624	0,010
60-280-40	0,775	0,007	0,811	0,006	0,756	0,013	0,753	0,013
60-280-50	0,645	0,008	0,674	0,009	0,727	0,011	0,705	0,014
60-280-60	0,529	0,007	0,566	0,008	0,579	0,010	0,598	0,011
80-240-40	0,838	0,010	0,844	0,007	0,754	0,008	0,772	0,008
80-240-50	0,706	0,009	0,729	0,009	0,709	0,009	0,717	0,010
80-240-60	0,581	0,008	0,600	0,011	0,611	0,013	0,628	0,014
80-260-40	0,759	0,006	0,792	0,010	0,760	0,011	0,750	0,011
80-260-50	0,639	0,006	0,671	0,008	0,701	0,009	0,708	0,011
80-260-60	0,542	0,007	0,572	0,007	0,593	0,008	0,616	0,008
80-280-40	0,736	0,009	0,768	0,009	0,743	0,012	0,756	0,010
80-280-50	0,625	0,007	0,658	0,008	0,689	0,011	0,695	0,009
80-280-60	0,524	0,009	0,561	0,010	0,599	0,013	0,617	0,011

Factor Means Plot for Výrobní smrštění podélné



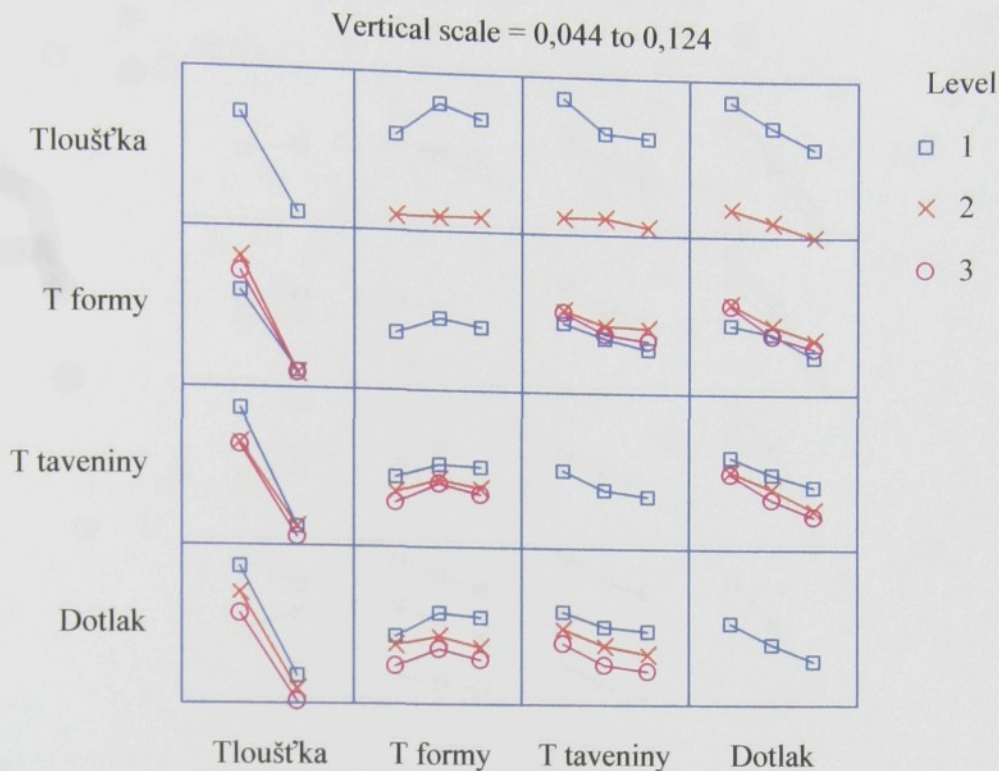
Obr. 36. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na výrobní smrštění podélné výstřiků z materiálu *Telruran HH-112*

Factor Means Plot for Výrobní smrštění příčné



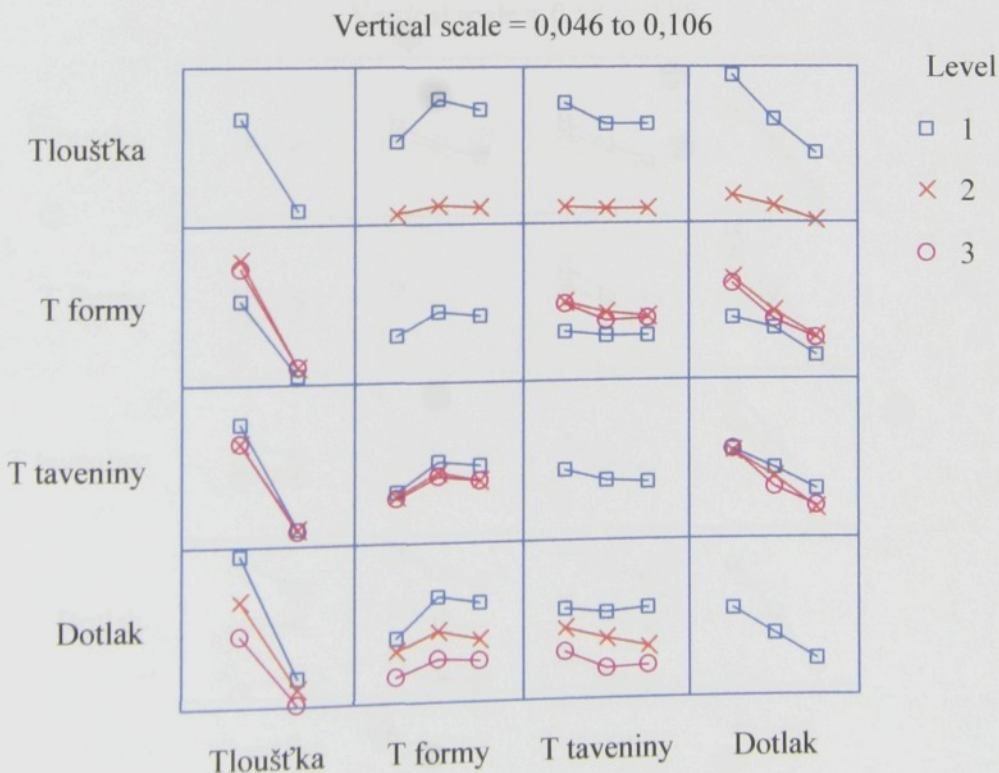
Obr. 37. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na výrobní smrštění příčné výstřiků z materiálu *Telruran HH-112*

Factor Means Plot for Dodatečné smrštění podélné



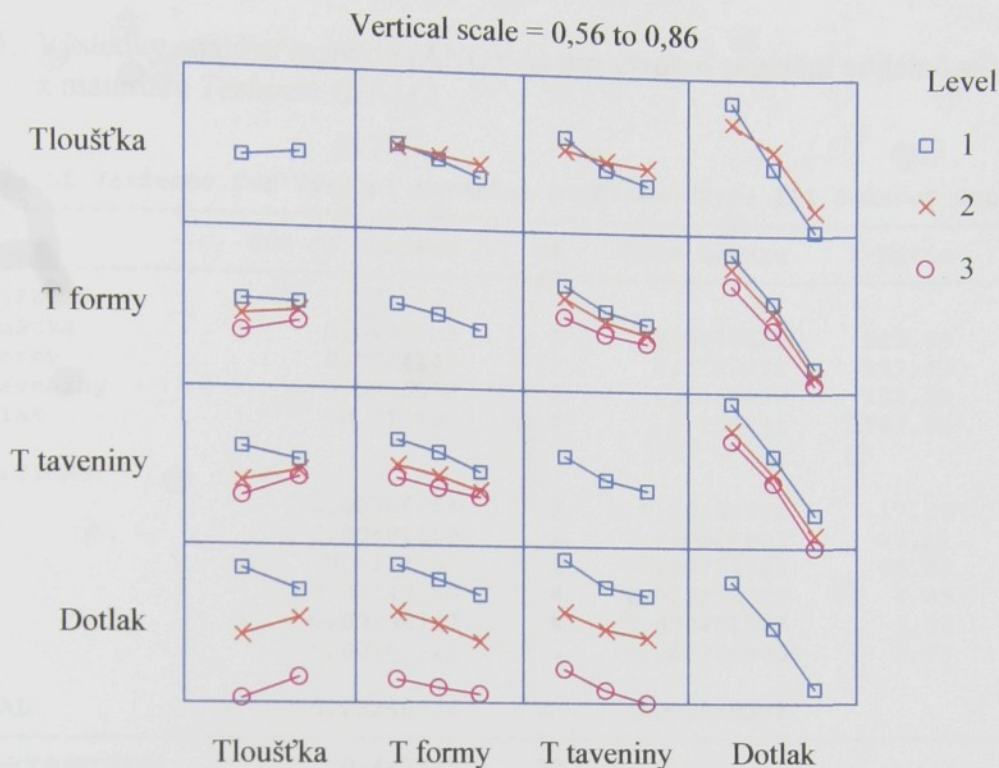
Obr. 38. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na dodatečné smrštění podélné výstřiků z materiálu *Telruran HH-112*

Factor Means Plot for Dodatečné smrštění příčné



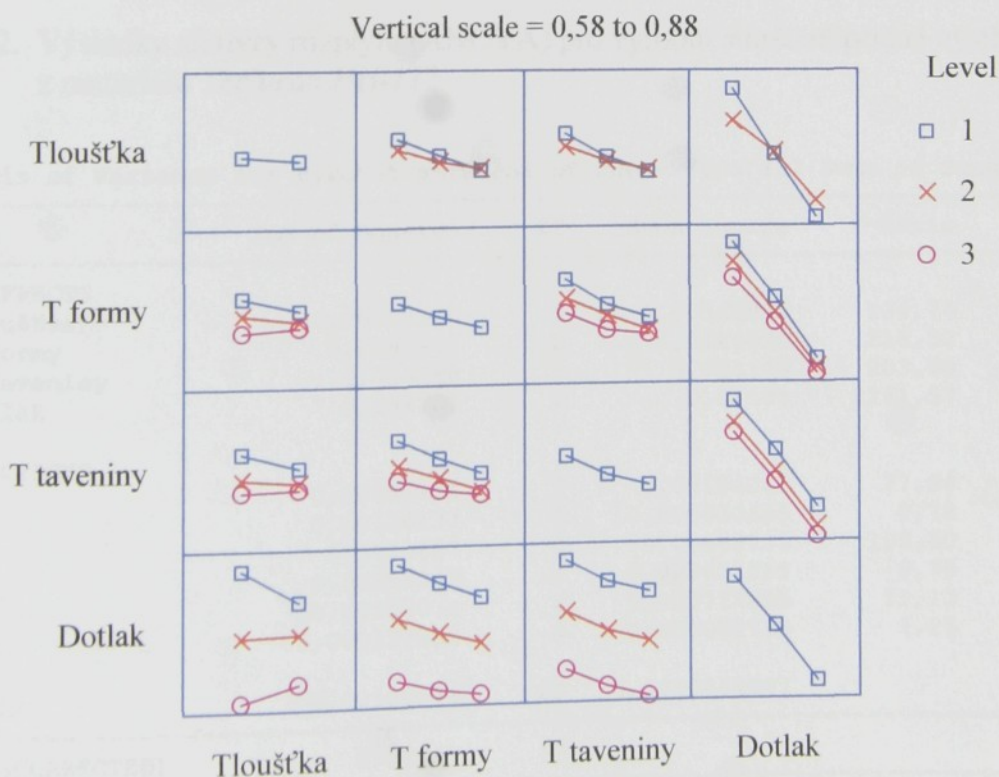
Obr. 39. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na dodatečné smrštění příčné výstřiků z materiálu *Telruran HH-112*

Factor Means Plot for Celkové smrštění podélné



Obr. 40. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na celkové smrštění podélné výstřiků z materiálu *Telruran HH-112*

Factor Means Plot for Celkové smrštění příčné



Obr. 41. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na celkové smrštění příčné výstřiků z materiálu *Telruran HH-112*



Tab. 11. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro výrobní smrštění podélné výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Analysis of Variance for Výrobní smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,0470525	1	0,0470525	529,69	0,0000
B:T formy	0,0244143	2	0,0122072	137,42	0,0000
C:T taveniny	0,0236018	2	0,0118009	132,85	0,0000
D:Dotlak	0,317481	2	0,158741	1787,00	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00308804	2	0,00154402	17,38	0,0000
AC	0,00481659	2	0,0024083	27,11	0,0000
AD	0,0154357	2	0,00771785	86,88	0,0000
BC	0,00143756	4	0,000359389	4,05	0,0103
BD	0,00196767	4	0,000491917	5,54	0,0021
CD	0,00106322	4	0,000265806	2,99	0,0356
RESIDUAL	0,00248726	28	0,0000888307		
TOTAL (CORRECTED)	0,442846	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 12. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro výrobní smrštění příčné výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Analysis of Variance for Výrobní smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,00868935	1	0,00868935	134,74	0,0000
B:T formy	0,0281845	2	0,0140922	218,52	0,0000
C:T taveniny	0,026298	2	0,013149	203,89	0,0000
D:Dotlak	0,291701	2	0,14585	2261,57	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00360404	2	0,00180202	27,94	0,0000
AC	0,00126137	2	0,000630685	9,78	0,0006
AD	0,0133627	2	0,00668135	103,60	0,0000
BC	0,00251007	4	0,000627519	9,73	0,0000
BD	0,00287074	4	0,000717685	11,13	0,0000
CD	0,000322852	4	0,000080713	1,25	0,3123
RESIDUAL	0,00180574	28	0,0000644907		
TOTAL (CORRECTED)	0,38061	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 13. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro dodatečné smrštění podélné výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Analysis of Variance for Dodatečné smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,032856	1	0,032856	1097,81	0,0000
B:T formy	0,000576	2	0,000288	9,62	0,0007
C:T taveniny	0,00140544	2	0,000702722	23,48	0,0000
D:Dotlak	0,00310711	2	0,00155356	51,91	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,000661778	2	0,000330889	11,06	0,0003
AC	0,000782333	2	0,000391167	13,07	0,0001
AD	0,000213778	2	0,000106889	3,57	0,0415
BC	0,0000555556	4	0,0000138889	0,46	0,7615
BD	0,000158222	4	0,0000395556	1,32	0,2863
CD	0,0000571111	4	0,0000142778	0,48	0,7522
RESIDUAL	0,000838	28	0,0000299286		
TOTAL (CORRECTED)	0,0407113	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 14. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro dodatečné smrštění příčné výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Analysis of Variance for Dodatečné smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,0162934	1	0,0162934	563,90	0,0000
B:T formy	0,000836333	2	0,000418167	14,47	0,0000
C:T taveniny	0,000253444	2	0,000126722	4,39	0,0220
D:Dotlak	0,00364544	2	0,00182272	63,08	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00042137	2	0,000210685	7,29	0,0028
AC	0,000122704	2	0,0000613519	2,12	0,1385
AD	0,000898037	2	0,000449019	15,54	0,0000
BC	0,0000228889	4	0,00000572222	0,20	0,9373
BD	0,000151556	4	0,0000378889	1,31	0,2900
CD	0,000103111	4	0,0000257778	0,89	0,4816
RESIDUAL	0,000809037	28	0,0000288942		
TOTAL (CORRECTED)	0,0235573	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 15. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro celkové smrštění podélné výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Analysis of Variance for Celkové smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,00130046	1	0,00130046	8,98	0,0057
B:T formy	0,0206267	2	0,0103134	71,25	0,0000
C:T taveniny	0,0366503	2	0,0183251	126,60	0,0000
D:Dotlak	0,38284	2	0,19142	1322,46	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00144848	2	0,000724241	5,00	0,0139
AC	0,00858981	2	0,00429491	29,67	0,0000
AD	0,0192316	2	0,0096158	66,43	0,0000
BC	0,00113763	4	0,000284407	1,96	0,1274
BD	0,0015363	4	0,000384074	2,65	0,0539
CD	0,000789074	4	0,000197269	1,36	0,2719
RESIDUAL	0,00405285	28	0,000144745		
TOTAL (CORRECTED)	0,478203	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 16. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro celkové smrštění příčné výstřiků z materiálu *Terluran HH-112*

Analysis of Variance for Celkové smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,00114817	1	0,00114817	15,55	0,0005
B:T formy	0,0207369	2	0,0103685	140,41	0,0000
C:T taveniny	0,031305	2	0,0156525	211,97	0,0000
D:Dotlak	0,360738	2	0,180369	2442,61	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00208411	2	0,00104206	14,11	0,0001
AC	0,00204311	2	0,00102156	13,83	0,0001
AD	0,021163	2	0,0105815	143,30	0,0000
BC	0,00219952	4	0,00054988	7,45	0,0003
BD	0,00209807	4	0,000524519	7,10	0,0004
CD	0,000110963	4	0,0000277407	0,38	0,8240
RESIDUAL	0,00206759	28	0,0000738426		
TOTAL (CORRECTED)	0,445694	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

4.2 Vyhodnocení výstřiků z polypropylénu

4.2.1 Smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610MTU10

Kombinace nastavení jednotlivých parametrů, pro jednotlivé tloušťky zkušebních těles, byly pro materiál *Kelburon 95610MTU10* označeny třemi číslicemi vyjadřujícími velikost proměnných parametrů vstřikování v tomto pořadí:

Teplota formy (T formy) [°C] – Teplota taveniny (T taveniny) [°C] – Dotlak [MPa].

Tyto tři technologické parametry byly měněny na třech úrovních. Čtvrtým parametrem byla tloušťka stěny [mm], měněná na dvou úrovních. Naměřené výsledky smrštění výstřiků tvaru zkušebních těles jsou pro materiál *Kelburon 95610MTU10* uvedeny v tab. 17–19. Tyto výsledky tvoří data, na která byla aplikována multifaktorová analýza rozptylu (ANOVA) programu *STATGRAPHICS*. Výsledky této statistické analýzy jsou uvedeny v tab. 20–25 a na obr. 42–47.

Vyhodnocení naměřených výsledků a výsledků analýzy rozptylu je rozděleno na vyhodnocení výrobního, dodatečného a celkového smrštění.

Výrobní smrštění

Naměřené výrobní smrštění příčné nabývalo hodnot větších než u podélného smrštění na výstřicích s tloušťkou 2 mm. U tloušťek 4 mm nebyly mezi výrobním smrštěním podélným a příčným výrazné rozdíly. Větší tloušťka a vyšší teplota formy měly na výrobní smrštění zvyšující vliv. Zvyšující se teplota taveniny měla na výrobní smrštění mírně snižující vliv, při nejvyšší teplotě ale na smrštění působila již mírně vzestupně. Zvýšení dotlaku způsobovalo snižování hodnot výrobního smrštění. Maximální hodnota výrobního podélného smrštění byla naměřena u výstřiku s tloušťkou 4 mm za kombinace parametrů 60-210-30 a pro příčné smrštění při parametrech 4mm-80-210-30. Minimální hodnoty podélného i příčného smrštění byly naměřeny na tělesech s tloušťkou 2 mm při kombinaci parametrů 40-240-50. Naměřené hodnoty výrobního smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,633–1,129% a 1,068–1,531% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,764–1,274% a 1,081–1,512% u tloušťky 4 mm.

Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že největší vliv na výrobní smrštění podélné i příčné má ze zkoušených parametrů tloušťka stěny výstřiku. Další výrazný vliv má velikost dotlaku a v případě příčného smrštění i teplota formy. Teplota taveniny má na výrobní smrštění malý vliv. Z interakcí má u podélného smrštění statisticky významný vliv pouze *teplota taveniny × dotlak*. U příčného smrštění má z interakcí větší vliv *tloušťka × teplota taveniny*. Statisticky významné jsou u příčného smrštění dále interakce *tloušťka × dotlak* a *teplota taveniny × dotlak*.

Dodatečné smrštění (po temperaci – teplota 90°C po dobu 180 min)

Při vyhodnocování dodatečného smrštění bylo nejvýznamnější zjištění, že zkušební tělesa při určitých kombinacích parametrů vstřikování zvětšovala své rozměry, a počítané dle rovnic 34 a 35, nabývalo záporných hodnot. K narůstání těchto rozměrů docházelo ve směru podélném i ve směru příčném u většiny výstřiků o tloušťce 4 mm vyjma těchto kombinací parametrů 40–210–30, 40–210–40, 40–210–50, 40–270–30 a 60–210–50. Tloušťka stěny, teplota formy a teplota taveniny měly na velikost dodatečného podélného i příčného smrštění snižující vliv. Dotlak způsoboval mírné narůstání u podélného resp. působil pouze minimálně na změny příčného dodatečného smrštění. Naměřené hodnoty dodatečného smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,100–0,273% a -0,215–0,126% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo dodatečné smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,129–0,271% a -0,215–0,135% u tloušťky 4 mm. Rozdíly mezi podélným a příčným dodatečným smrštěním byly větší u tloušťek výstřiku 2 mm než u tloušťek 4 mm. Maximální hodnoty dodatečného podélného i příčného smrštění byly naměřeny u výstřiku s tloušťkou 2 mm za kombinace parametrů 40-210-50 a minimální hodnoty u výstřiku tloušťky 4 mm za kombinace parametrů 80-270-30.

Z výsledků analýzy rozptylu (ANOVA) vyplývá, že na dodatečné smrštění podélné i příčné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv tloušťka stěny, kdy větší vliv má v příčném směru než v podélném. Ostatní parametry mají též statisticky významný vliv na výrobní smrštění výstřiků, kromě vlivu dotlaku v případě příčného dodatečného smrštění. Vliv teploty formy je na dodatečné smrštění podélné i příčné přibližně dvakrát větší než vliv teploty taveniny. Z interakcí jednotlivých parametrů mají určitý vliv na podélné i příčné dodatečné smrštění *tloušťka × teplota formy* a *tloušťka × teplota taveniny*, a u podélného také interakce *teplota taveniny × dotlak*. Vlivy jednotlivých parametrů a jejich interakcí na dodatečné smrštění jsou však relativně malé vzhledem k vlivu tloušťky stěny.

Celkové smrštění

Vzhledem k většímu podílu výrobního než dodatečného smrštění na celkovém smrštění, působí jednotlivé parametry z hlediska celkového smrštění obdobně jako u smrštění výrobního. Celkové podélné i příčné smrštění se snižuje se zvyšujícími se hodnotami dotlaku. Zvyšující se teplota taveniny má na celkové smrštění vliv nejprve snižující a při vyšších teplotách zvyšující. Zvyšující se teplota formy nemá na celkové smrštění výrazný vliv ani v jednom směru. Vliv zvyšující se tloušťky stěny na celkové smrštění ve směru podélném je zvyšující ale v příčném směru je méně výrazný a u nejnižší hodnoty dotlaku je snižující. Naměřené hodnoty celkového smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,838–1,287% a 1,078–1,493% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,999–1,466% a 1,077–0,448% u tloušťky 4 mm. Maximální celkové smrštění podélné bylo pro jednotlivé tloušťky stěny

naměřeno při parametrech 4mm-40-210-30 a 2mm-80-210-30. Maximální celkové smrštění příčné bylo naměřeno při parametrech 4mm-80-210-30 a 2mm-80-210-30. Minimální celkové smrštění podélné i příčné bylo naměřeno při vstřikovacích parametrech 2mm-80-240-50 a 4mm-40-240-50.

Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že na celkové smrštění podélné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv tloušťka stěny a velikost dotlaku. Teplota formy nemá vliv (hodnota *P-Value* je větší než 0,05) na celkové smrštění podélné ani příčné. Na celkové smrštění příčné má největší vliv teplota taveniny a dotlak, vliv tloušťky stěny je menší. Z interakcí vyhodnocovaných parametrů má největší vliv na celkové smrštění *tloušťka × dotlak* a u podélného celkového smrštění má vliv také interakce *teplota taveniny × dotlak*.

Tab. 17. Výrobní smrštění výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Proměnné parametry	Výrobní smrštění S_M [%] Kelburon 95610MTU10							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ
40-210-30	1,078	0,019	1,140	0,011	1,466	0,011	1,371	0,016
40-210-40	0,895	0,008	1,003	0,014	1,267	0,008	1,236	0,013
40-210-50	0,711	0,010	0,865	0,009	1,068	0,018	1,103	0,012
40-240-30	0,884	0,018	0,959	0,016	1,372	0,016	1,252	0,012
40-240-40	0,725	0,016	0,861	0,015	1,231	0,012	1,164	0,008
40-240-50	0,633	0,010	0,764	0,008	1,091	0,019	1,088	0,013
40-270-30	0,856	0,014	0,943	0,013	1,069	0,011	1,081	0,015
40-270-40	0,760	0,009	0,862	0,012	1,189	0,014	1,165	0,009
40-270-50	0,664	0,013	0,780	0,016	1,308	0,007	1,250	0,008
60-210-30	1,086	0,014	1,211	0,009	1,531	0,016	1,376	0,018
60-210-40	0,901	0,008	1,066	0,015	1,344	0,013	1,286	0,016
60-210-50	0,716	0,015	0,921	0,018	1,157	0,012	1,195	0,009
60-240-30	0,871	0,019	0,978	0,011	1,377	0,018	1,353	0,014
60-240-40	0,780	0,008	0,906	0,014	1,266	0,016	1,240	0,013
60-240-50	0,685	0,010	0,822	0,009	1,165	0,011	1,220	0,016
60-270-30	0,952	0,018	1,033	0,016	1,427	0,011	1,376	0,013
60-270-40	0,824	0,016	0,935	0,015	1,330	0,008	1,309	0,012
60-270-50	0,702	0,010	0,836	0,008	1,232	0,018	1,242	0,012
80-210-30	1,129	0,014	1,274	0,013	1,462	0,016	1,512	0,008
80-210-40	0,941	0,009	1,130	0,012	1,352	0,012	1,411	0,013
80-210-50	0,752	0,013	1,012	0,016	1,242	0,019	1,311	0,015
80-240-30	0,944	0,014	1,091	0,009	1,338	0,011	1,328	0,009
80-240-40	0,809	0,008	0,989	0,015	1,287	0,014	1,322	0,008
80-240-50	0,738	0,015	0,870	0,018	1,253	0,007	1,316	0,018
80-270-30	0,953	0,019	1,076	0,011	1,488	0,016	1,460	0,016
80-270-40	0,863	0,008	1,025	0,014	1,374	0,013	1,397	0,009
80-270-50	0,783	0,010	0,860	0,009	1,308	0,012	1,335	0,012

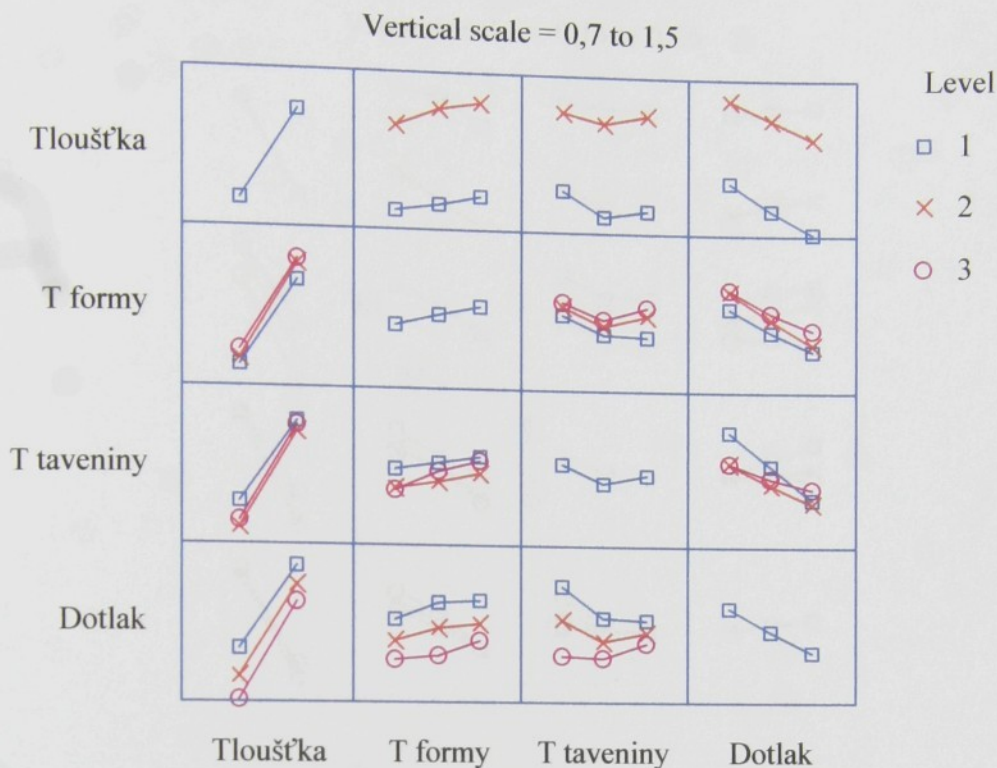
Tab. 18. Dodatečné smrštění výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Proměnné parametry	Dodatečné smrštění S_p [%] Kelburon 95610MTU10							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{pp}	σ	S_{pn}	σ	S_{pp}	σ	S_{pn}	σ
40-210-30	0,166	0,008	0,270	0,007	0,027	0,009	0,070	0,014
40-210-40	0,220	0,007	0,269	0,010	0,076	0,008	0,103	0,009
40-210-50	0,273	0,006	0,271	0,009	0,126	0,012	0,135	0,010
40-240-30	0,193	0,004	0,270	0,011	-0,042	0,005	-0,010	0,008
40-240-40	0,222	0,009	0,264	0,013	-0,027	0,007	-0,010	0,012
40-240-50	0,244	0,011	0,253	0,009	-0,012	0,011	-0,011	0,016
40-270-30	0,198	0,006	0,250	0,008	0,015	0,010	0,001	0,007
40-270-40	0,215	0,008	0,241	0,012	-0,026	0,013	-0,026	0,008
40-270-50	0,232	0,015	0,232	0,014	-0,065	0,012	-0,053	0,011
60-210-30	0,164	0,014	0,230	0,016	-0,110	0,008	-0,074	0,013
60-210-40	0,211	0,012	0,237	0,011	-0,049	0,015	-0,027	0,012
60-210-50	0,257	0,008	0,243	0,008	0,012	0,012	0,021	0,012
60-240-30	0,200	0,006	0,241	0,007	-0,093	0,009	-0,092	0,008
60-240-40	0,192	0,005	0,219	0,009	-0,088	0,007	-0,088	0,009
60-240-50	0,218	0,009	0,202	0,014	-0,080	0,012	-0,074	0,011
60-270-30	0,183	0,007	0,237	0,012	-0,072	0,006	-0,073	0,010
60-270-40	0,178	0,012	0,206	0,013	-0,071	0,013	-0,086	0,011
60-270-50	0,173	0,010	0,175	0,009	-0,073	0,005	-0,099	0,008
80-210-30	0,158	0,013	0,191	0,011	-0,105	0,008	-0,064	0,013
80-210-40	0,136	0,011	0,185	0,008	-0,068	0,010	-0,036	0,013
80-210-50	0,113	0,009	0,181	0,007	-0,030	0,016	-0,008	0,014
80-240-30	0,122	0,014	0,145	0,012	-0,157	0,013	-0,162	0,009
80-240-40	0,112	0,007	0,136	0,009	-0,145	0,014	-0,154	0,011
80-240-50	0,100	0,004	0,129	0,009	-0,134	0,007	-0,134	0,012
80-270-30	0,141	0,010	0,162	0,008	-0,215	0,005	-0,215	0,008
80-270-40	0,146	0,009	0,171	0,014	-0,194	0,012	-0,207	0,009
80-270-50	0,103	0,011	0,155	0,015	-0,174	0,011	-0,199	0,014

Tab. 19. Celkové smrštění výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

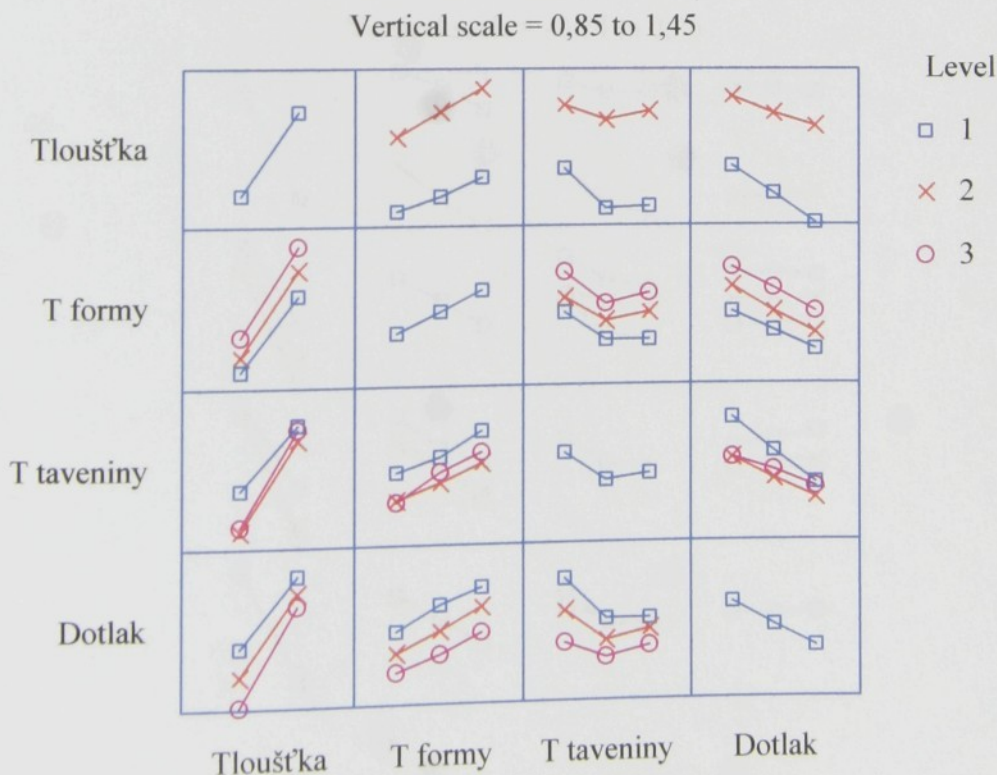
Proměnné parametry	Celkové smrštění S_T [%] Kelburon 95610MTU10							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{Tp}	σ	S_{Tn}	σ	S_{Tp}	σ	S_{Tn}	σ
40-210-30	1,244	0,016	1,410	0,015	1,493	0,019	1,441	0,012
40-210-40	1,114	0,011	1,271	0,013	1,344	0,011	1,338	0,008
40-210-50	0,985	0,013	1,133	0,011	1,194	0,009	1,238	0,015
40-240-30	1,077	0,019	1,229	0,015	1,330	0,016	1,242	0,014
40-240-40	0,947	0,013	1,125	0,016	1,204	0,015	1,154	0,013
40-240-50	0,878	0,014	1,016	0,014	1,078	0,018	1,077	0,019
40-270-30	1,055	0,019	1,194	0,017	1,084	0,016	1,082	0,010
40-270-40	0,975	0,014	1,103	0,011	1,163	0,013	1,139	0,018
40-270-50	0,896	0,018	1,012	0,012	1,244	0,012	1,196	0,009
60-210-30	1,250	0,008	1,440	0,013	1,421	0,012	1,302	0,015
60-210-40	1,112	0,016	1,302	0,010	1,295	0,008	1,259	0,010
60-210-50	0,973	0,016	1,164	0,012	1,169	0,016	1,216	0,019
60-240-30	1,071	0,010	1,219	0,008	1,284	0,011	1,261	0,018
60-240-40	0,972	0,018	1,125	0,016	1,179	0,008	1,152	0,017
60-240-50	0,903	0,015	1,025	0,019	1,085	0,018	1,146	0,017
60-270-30	1,135	0,011	1,270	0,013	1,355	0,016	1,303	0,013
60-270-40	1,002	0,013	1,141	0,014	1,259	0,012	1,223	0,014
60-270-50	0,875	0,016	1,011	0,011	1,159	0,019	1,143	0,014
80-210-30	1,287	0,019	1,466	0,018	1,357	0,011	1,448	0,007
80-210-40	1,076	0,017	1,315	0,012	1,285	0,014	1,375	0,015
80-210-50	0,865	0,011	1,193	0,010	1,212	0,007	1,303	0,012
80-240-30	1,067	0,010	1,236	0,009	1,181	0,016	1,166	0,019
80-240-40	0,922	0,013	1,125	0,018	1,142	0,015	1,168	0,011
80-240-50	0,838	0,015	0,999	0,016	1,118	0,009	1,182	0,010
80-270-30	1,094	0,017	1,238	0,011	1,273	0,008	1,245	0,016
80-270-40	1,009	0,014	1,196	0,012	1,180	0,018	1,190	0,016
80-270-50	0,886	0,014	1,015	0,018	1,134	0,016	1,136	0,011

Factor Means Plot for Výrobní smrštění podélné



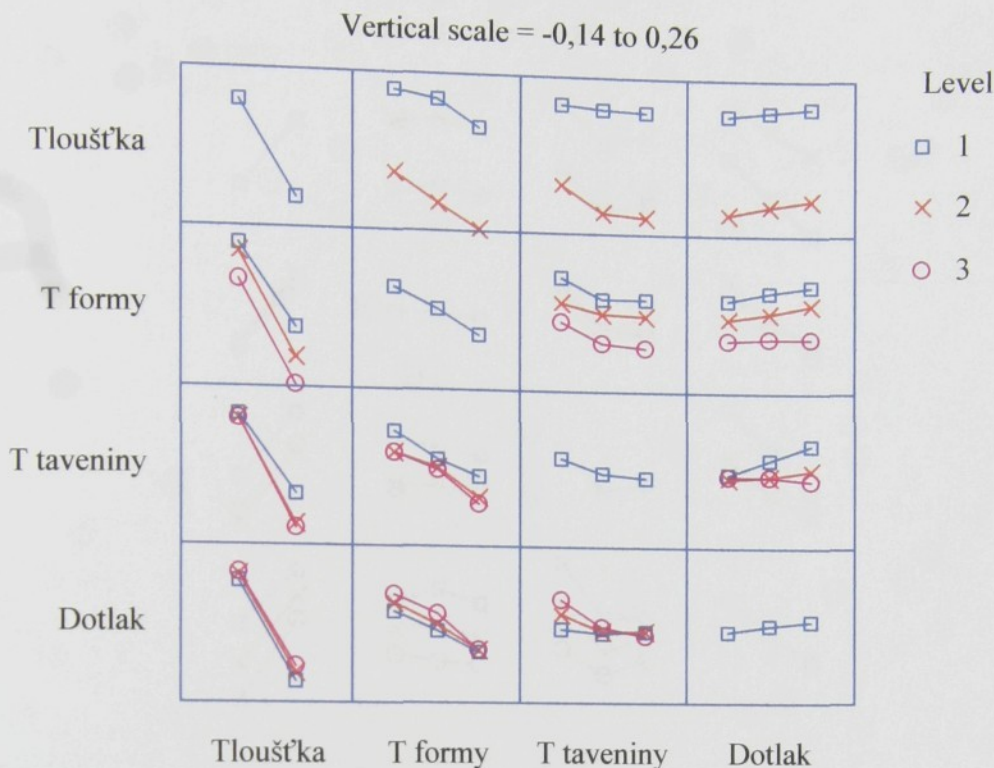
Obr. 42. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na výrobní smrštění podélné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Factor Means Plot for Výrobní smrštění příčné



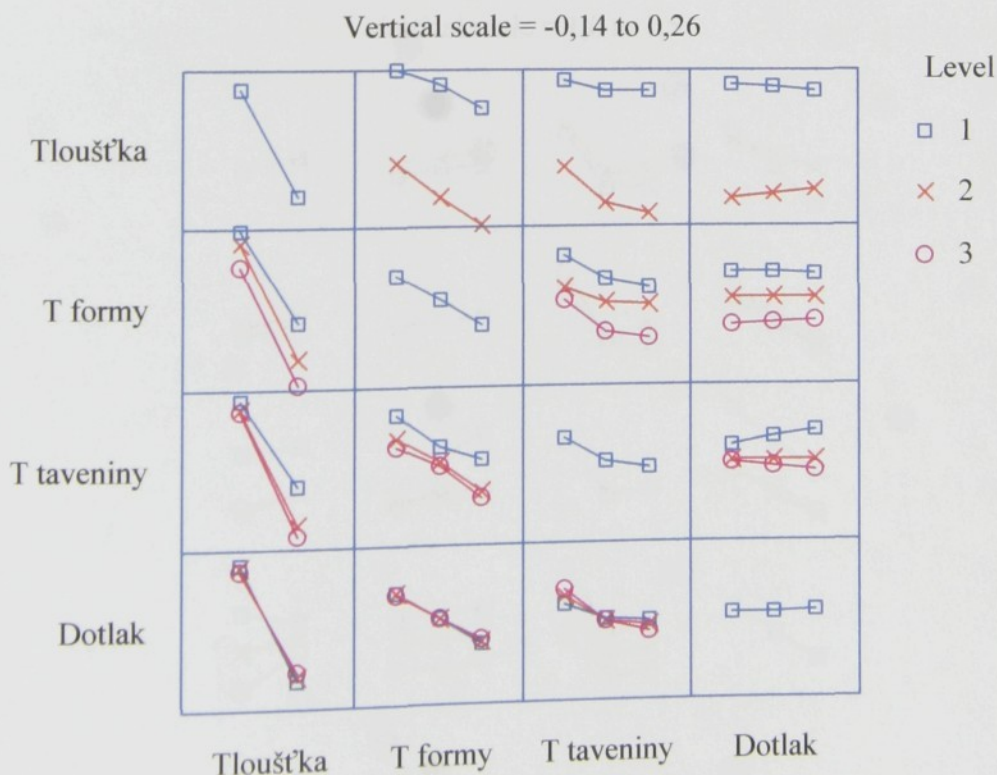
Obr. 43. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na výrobní smrštění příčné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Factor Means Plot for Dodatečné smrštění podélné



Obr. 44. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na dodatečné smrštění podélné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

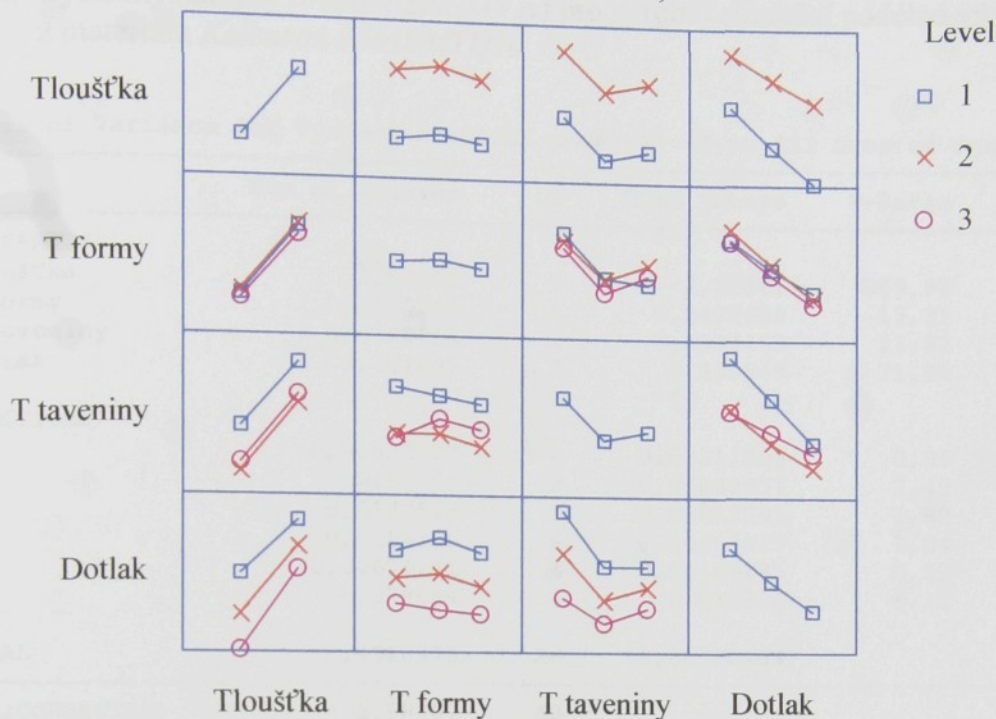
Factor Means Plot for Dodatečné smrštění příčné



Obr. 45. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na dodatečné smrštění příčné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Factor Means Plot for Celkové smrštění podélné

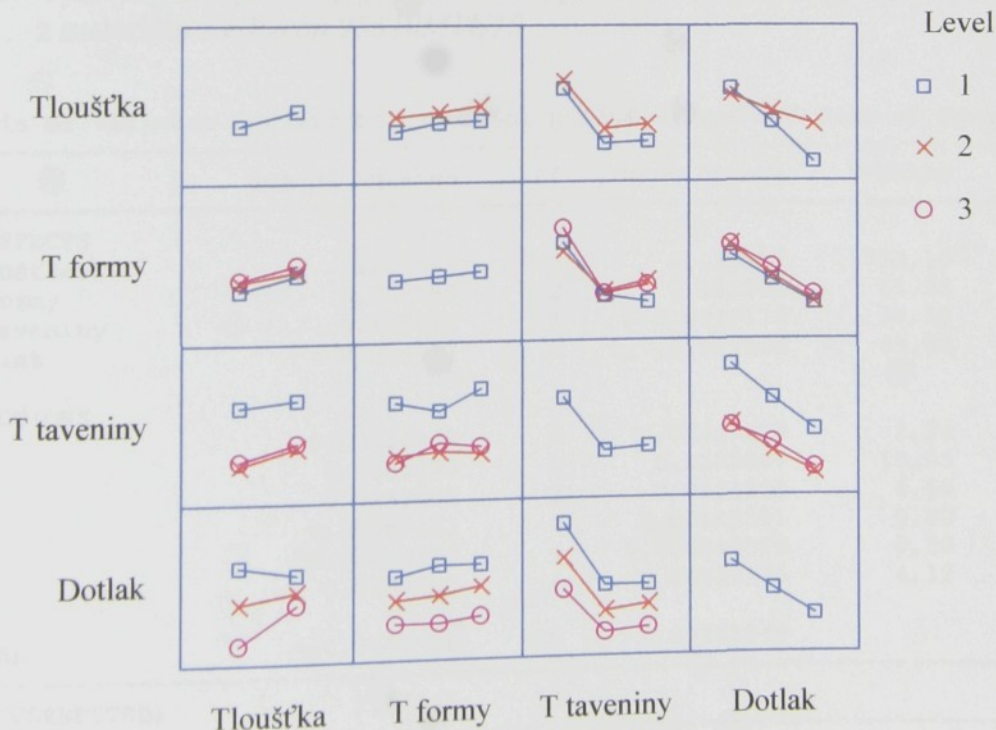
Vertical scale = 0,89 to 1,39



Obr. 46. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na celkové smrštění podélné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Factor Means Plot for Celkové smrštění příčné

Vertical scale = 1,0 to 1,5



Obr. 47. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na celkové smrštění příčné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Tab. 20. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro výrobní smrštění podélné výstřiků z materiálu *Kelburon 95610MTU10*

Analysis of Variance for Výrobní smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	2,82861	1	2,82861	869,98	0,0000
B:T formy	0,0865211	2	0,0432606	13,31	0,0001
C:T taveniny	0,0768916	2	0,0384458	11,82	0,0002
D:Dotlak	0,461695	2	0,230848	71,00	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00623737	2	0,00311869	0,96	0,3954
AC	0,0161991	2	0,00809957	2,49	0,1010
AD	0,0122518	2	0,00612591	1,88	0,1707
BC	0,0161205	4	0,00403013	1,24	0,3169
BD	0,00676741	4	0,00169185	0,52	0,7215
CD	0,079544	4	0,019886	6,12	0,0011
RESIDUAL	0,0910375	28	0,00325134		
TOTAL (CORRECTED)	3,68187	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 21. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro výrobní smrštění příčné výstřiků z materiálu *Kelburon 95610MTU10*

Analysis of Variance for Výrobní smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	1,33387	1	1,33387	733,10	0,0000
B:T formy	0,222784	2	0,111392	61,22	0,0000
C:T taveniny	0,109836	2	0,0549179	30,18	0,0000
D:Dotlak	0,254017	2	0,127008	69,80	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,00816178	2	0,00408089	2,24	0,1249
AC	0,0365773	2	0,0182887	10,05	0,0005
AD	0,0243001	2	0,0121501	6,68	0,0043
BC	0,00582363	4	0,00145591	0,80	0,5353
BD	0,00216207	4	0,000540519	0,30	0,8774
CD	0,0299662	4	0,00749155	4,12	0,0095
RESIDUAL	0,0509456	28	0,00181949		
TOTAL (CORRECTED)	2,07845	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 22. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro dodatečné smrštění podélné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Analysis of Variance for Dodatečné smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,817458	1	0,817458	1008,15	0,0000
B:T formy	0,126752	2	0,0633761	78,16	0,0000
C:T taveniny	0,0252288	2	0,0126144	15,56	0,0000
D:Dotlak	0,00723033	2	0,00361517	4,46	0,0208
INTERACTIONS					
AB	0,00879137	2	0,00439569	5,42	0,0102
AC	0,0131563	2	0,00657813	8,11	0,0017
AD	0,000506037	2	0,000253019	0,31	0,7345
BC	0,00281644	4	0,000704111	0,87	0,4951
BD	0,00241422	4	0,000603556	0,74	0,5700
CD	0,0111166	4	0,00277914	3,43	0,0211
RESIDUAL	0,0227038	28	0,000810851		
TOTAL (CORRECTED)	1,03817	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 23. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro dodatečné smrštění příčné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Analysis of Variance for Dodatečné smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,996066	1	0,996066	2362,02	0,0000
B:T formy	0,139378	2	0,069689	165,26	0,0000
C:T taveniny	0,0547424	2	0,0273712	64,91	0,0000
D:Dotlak	0,0000422593	2	0,0000211296	0,05	0,9512
INTERACTIONS					
AB	0,0089677	2	0,00448385	10,63	0,0004
AC	0,0210868	2	0,0105434	25,00	0,0000
AD	0,00351781	2	0,00175891	4,17	0,0260
BC	0,00487341	4	0,00121835	2,89	0,0404
BD	0,000402519	4	0,00010063	0,24	0,9141
CD	0,00587474	4	0,00146869	3,48	0,0198
RESIDUAL	0,0118076	28	0,000421701		
TOTAL (CORRECTED)	1,24676	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 24. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro celkové smrštění podélné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Analysis of Variance for Celkové smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,604626	1	0,604626	236,36	0,0000
B:T formy	0,00943715	2	0,00471857	1,84	0,1768
C:T taveniny	0,178045	2	0,0890223	34,80	0,0000
D:Dotlak	0,353566	2	0,176783	69,11	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,000439815	2	0,000219907	0,09	0,9179
AC	0,000137926	2	0,000068963	0,03	0,9734
AD	0,0176255	2	0,00881274	3,45	0,0460
BC	0,0152519	4	0,00381296	1,49	0,2318
BD	0,00499274	4	0,00124819	0,49	0,7445
CD	0,031571	4	0,00789274	3,09	0,0318
RESIDUAL	0,0716259	28	0,00255807		
TOTAL (CORRECTED)	1,28732	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 25. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro celkové smrštění příčné výstřiků z materiálu Kelburon 95610MTU10

Analysis of Variance for Celkové smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,024576	1	0,024576	13,53	0,0010
B:T formy	0,0098677	2	0,00493385	2,72	0,0836
C:T taveniny	0,306498	2	0,153249	84,35	0,0000
D:Dotlak	0,247838	2	0,123919	68,21	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,000488444	2	0,000244222	0,13	0,8748
AC	0,00210211	2	0,00105106	0,58	0,5673
AD	0,0462423	2	0,0231212	12,73	0,0001
BC	0,0181253	4	0,00453132	2,49	0,0656
BD	0,00179752	4	0,00044938	0,25	0,9088
CD	0,00991041	4	0,0024776	1,36	0,2717
RESIDUAL	0,0508709	28	0,00181682		
TOTAL (CORRECTED)	0,718317	53			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

4.2.2 Smršťení výstřiků z PP Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Zkoušené materiály byly připraveny ze směsi granulátu neplněného „přírodního“ Kelburonu 95610 a granulátu masterbatche Kelburon 20MTBU ve zvolených poměrech.

Souhrnné označení *Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%*, které je používáno v tabulkách a grafech s výsledky experimentu, v sobě zahrnuje tyto materiály:

Kelburon 95610, Kelburon 95610MTU5, Kelburon 95610MTU10, Kelburon 95610MTU15 a Kelburon 95610MTU25.

V této části experimentu přibyl jeden materiálový parametr – obsah talku – a to na pěti úrovních. Jedna úroveň parametru – 10% talku – byla již vyhodnocená a nebylo ji třeba již měřit. Stále ještě zbývaly čtyři úrovně obsahu talku a tak bylo pro omezení rozsahu experimentu třeba redukovat množství proměnných technologických parametrů na dva a snížit počet jejich úrovní také na dva. Vyřazeným technologickým parametrem byla teplota taveniny a to na základě výsledků multifaktorové analýzy rozptylu výrobního a dodatečného smršťení zkušebních těles z materiálu *Kelburon 95610MTU10*. Pro volbu, který parametr vyřadit, bylo nejdůležitější hledisko nejmenšího vlivu na dodatečné smršťení, což se vztahovalo na teplotu taveniny. Teplota taveniny pro tuto část experimentu byla nastavena konstantní na 240°C, uprostřed rozpětí použitého pro stanovení smršťení materiálu *Kelburon 95610MTU10*.

Technologické parametry byly tedy měněny na dvou úrovních. Materiálový parametr – obsah talku – byl měněn na pěti úrovních. Čtvrtým, konstrukčním parametrem byla tloušťka stěny [mm], měněná na dvou úrovních.

Kombinace nastavení jednotlivých parametrů, pro jednotlivé tloušťky zkušebních těles, byly pro materiály *Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%*, označeny třemi číslicemi vyjadřujícími velikost proměnných parametrů vstřikování v tomto pořadí:

Obsah talku (% talku) [hmotnostní %] – Teplota formy (T formy) [°C] – Dotlak [MPa].

Naměřené výsledky smršťení výstřiků tvaru zkušebních těles jsou pro materiál *Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%* uvedeny v tab. 26–28. Tyto výsledky tvoří data, na která byla aplikována multifaktorová analýza rozptylu (ANOVA) programu *STATGRAPHICS*. Výsledky statistické analýzy jsou uvedeny v tab. 29–34 a na obr. 48–53.

Vyhodnocení naměřených výsledků a výsledků analýzy rozptylu je rozděleno na vyhodnocení výrobního, dodatečného a celkového smršťení.

Výrobní smršťení

Výrobní smršťení příčné nabývalo na výstřicích s tloušťkou 2 mm hodnot větších než u podélného smršťení. U výstřiků s tloušťkou 4 mm byly naměřeny hodnoty výrobního smršťení příčného až na výjimky vyšší než smršťení podélné. Větší tloušťka stěny a vyšší teplota formy měly na výrobní smršťení zvyšující vliv. Zvyšující se procentuální obsah talku a zvyšující se dotlak měly na smršťení snižující vliv. Maximální hodnoty výrobního smršťení v podélném směru byly pro jednotlivé tloušťky stěny naměřeny při parametrech

2mm-0%-80-30 a 4mm-0%-80-30. Maximální výrobní smrštění příčné bylo naměřeno při parametrech 2mm-0%-80-30 a 4mm-0%-80-50. Minimální výrobní smrštění podélné i příčné bylo naměřeno při parametrech 2mm-25%-40-50 a 4mm-25%-40-50.

Naměřené hodnoty výrobního smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,633–1,129% a 1,068–1,531% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,764–1,274% a 1,081–1,512% u tloušťky 4 mm.

Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že největší vliv na výrobní smrštění podélné i příčné má ze zkoušených parametrů tloušťka stěny výstřiku. Další výrazný vliv má velikost koncentrace talku a v případě podélného smrštění i dotlak. Teplota formy má na výrobní smrštění menší vliv podobně jako dotlak ve směru příčném na směr toku. Z interakcí má u podélného smrštění největší vliv *teplota formy × dotlak*, další statisticky významné interakce jsou *tloušťka × % talku* a *% talku × teplota formy*. U příčného smrštění má z interakcí větší vliv *tloušťka × dotlak* a *teplota formy × dotlak*, další statisticky významné interakce jsou *tloušťka × % talku* a *tloušťka × teplota formy*.

Dodatečné smrštění (po temperaci – teplota 90°C po dobu 180 min)

Naměřené výsledky dodatečného smrštění nabývaly záporných hodnot u tloušťek 4 mm při vyšším obsahu talku počínaje 5 % koncentrací při všech kombinacích teploty formy a dotlaku. Výstřiky s 5 % talku vstřikované do formy o teplotě 40 °C a výstřiky bez plniv ale své rozměry po temperaci nezvětšovaly. Tloušťka stěny, % obsah talku a teplota formy měly na velikost dodatečného podélného i příčného smrštění snižující vliv. Dotlak způsoboval mírné narůstání podélného dodatečného smrštění u vyšších koncentrací talku a nižších teplot formy.

Na příčné dodatečné smrštění měl dotlak malý zvyšující vliv u větší tloušťky a vyšších koncentrací talku a mírně snižující vliv u nulové koncentrace talku a nižší tloušťky výstřiku. Naměřené hodnoty dodatečného smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,060–0,350% a -0,179–0,282% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,078–0,403% a -0,182–0,311% u tloušťky 4 mm. Rozdíly mezi podélným a příčným dodatečným smrštěním byly větší u tloušťek výstřiku 2 mm než u tloušťek 4 mm. Maximální hodnoty dodatečného podélného smrštění byly naměřeny u výstřiku za kombinace parametrů 2mm-0%-40-50 a u příčného při parametrech 2mm-0%-40-30. Minimální hodnoty byly naměřeny u výstřiku tloušťky 4 mm za kombinace parametrů 25%-80-30 pro podélný i příčný směr.

Z výsledků analýzy rozptylu (ANOVA) vyplývá, že na dodatečné smrštění podélné i příčné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv tloušťka stěny, kdy větší vliv má v příčném směru než v podélném. Druhý nejvýznamější vliv na dodatečné smrštění v příčném směru než v podélném. Ostatní parametry mají též statisticky významný vliv na výstřiků měla teplota formy.

výrobní smrštění výstřiků, kromě vlivu dotlaku v případě příčného dodatečného smrštění. Zjištěný vliv teploty formy je na dodatečné smrštění podélné i příčné přibližně dvakrát větší než vliv obsahu talku. Z interakcí jednotlivých parametrů mají určitý vliv na podélné i příčné dodatečné smrštění *tloušťka × %talku* a *tloušťka × teplota formy*, a u podélného také interakce *teplota formy × dotlak*.

Celkové smrštění

Vzhledem k většímu podílu výrobního než dodatečného smrštění na celkovém smrštění, působí jednotlivé parametry z hlediska celkového smrštění obdobně jako u smrštění výrobního. Celkové podélné i příčné smrštění se snižuje se zvyšujícími se hodnotami dotlaku. Zvyšující se procentuální obsah talku a zvyšující se dotlak měly na smrštění snižující vliv. Zvyšující se teplota formy neměla na celkové smrštění výrazný vliv ani v jednom směru. Vliv zvětšující se tloušťky stěny na celkové smrštění je zvyšující ale se zvyšujícím se obsahem talku je méně výrazný a v příčném směru je vliv tloušťky naopak snižující při obsahu talku 15 a 25 % a nižší hodnotě dotlaku. Naměřené hodnoty celkového smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek stěn 2 mm v rozsahu 0,632–1,484% a 1,787–1,947% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,846–1,706% a 0,810–1,897% u tloušťky 4 mm. Minimální celkové smrštění podélné i příčné bylo naměřeno pro obě tloušťky při parametrech 25%–80–50.

Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že na celkové smrštění má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv procentuální obsah talku. Vliv tloušťky stěny je velký v podélném směru a poměrně nízký ve směru příčném. Vliv dotlaku je také menší v příčném směru než ve směru podélném. Teplota formy nemá vliv (hodnota *P-Value* je větší než 0,05) na celkové smrštění v příčném směru a v podélném směru má vliv jen poměrně nízký. Z interakcí vyhodnocovaných parametrů má největší vliv na celkové smrštění v podélném směru *tloušťka × %talku* a v příčném směru interakce *tloušťka × dotlak*. Menší vliv na celkové smrštění mají dále ve směru podélném *teplota formy × dotlak* a *%talku × teplota formy* a ve směru příčném interakce *teplota formy × dotlak* a *tloušťka × %talku*.

Tab. 26. Výrobní smrštění výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Proměnné parametry	Výrobní smrštění S_M [%] Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ
0-40-30	1,172	0,013	1,303	0,006	1,700	0,003	1,504	0,002
0-40-50	0,908	0,007	1,081	0,005	1,341	0,004	1,397	0,004
0-60-30	1,235	0,005	1,390	0,006	1,816	0,007	1,738	0,007
0-60-50	0,987	0,014	1,172	0,005	1,681	0,007	1,816	0,005
5-40-30	1,014	0,014	1,113	0,015	1,499	0,010	1,362	0,005
5-40-50	0,734	0,007	0,864	0,006	1,196	0,005	1,193	0,003
5-60-30	1,081	0,010	1,200	0,010	1,565	0,010	1,501	0,009
5-60-50	0,851	0,015	0,982	0,010	1,458	0,011	1,552	0,007
10-40-30	0,884	0,012	0,959	0,013	1,372	0,015	1,252	0,007
10-40-50	0,633	0,006	0,764	0,004	1,091	0,008	1,088	0,007
10-60-30	0,944	0,007	1,091	0,010	1,338	0,010	1,328	0,008
10-60-50	0,738	0,010	0,870	0,012	1,253	0,010	1,316	0,013
15-40-30	0,810	0,015	0,892	0,006	1,266	0,012	1,156	0,005
15-40-50	0,560	0,005	0,690	0,006	1,006	0,012	1,007	0,013
15-60-30	0,821	0,011	0,995	0,008	1,166	0,009	1,189	0,011
15-60-50	0,636	0,012	0,805	0,015	1,059	0,015	1,136	0,013
25-40-30	0,749	0,013	0,825	0,008	1,083	0,006	0,990	0,009
25-40-50	0,498	0,010	0,625	0,014	0,843	0,011	0,844	0,009
25-60-30	0,709	0,012	0,878	0,010	1,010	0,009	1,052	0,004
25-60-50	0,572	0,016	0,791	0,009	0,932	0,013	1,022	0,011

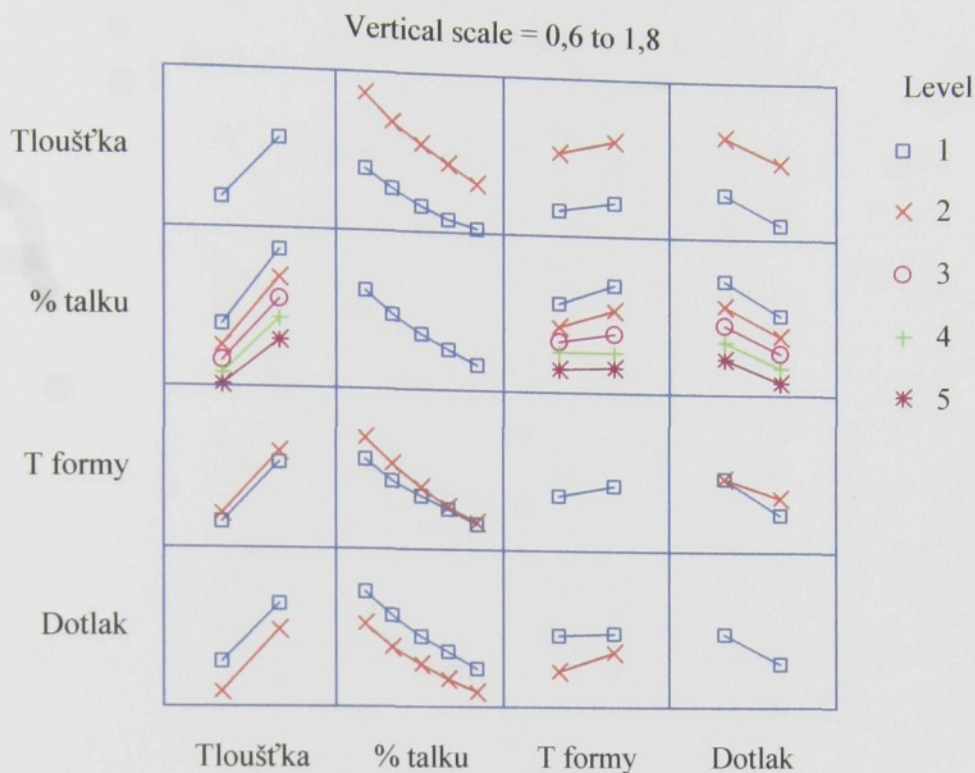
Tab. 27. Dodatečné smrštění výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Dodatečné smrštění S_P [%] Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%								
Proměnné parametry	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{Pp}	σ	S_{Pn}	σ	S_{Pp}	σ	S_{Pn}	σ
0-40-30	0,312	0,007	0,403	0,012	0,247	0,003	0,311	0,004
0-40-50	0,350	0,006	0,367	0,003	0,282	0,005	0,270	0,004
0-60-30	0,245	0,004	0,306	0,005	0,109	0,003	0,113	0,003
0-60-50	0,279	0,010	0,288	0,008	0,021	0,004	0,081	0,004
5-40-30	0,254	0,007	0,324	0,008	0,091	0,012	0,129	0,008
5-40-50	0,291	0,005	0,297	0,002	0,147	0,012	0,132	0,012
5-60-30	0,165	0,003	0,194	0,004	-0,115	0,012	-0,112	0,009
5-60-50	0,182	0,012	0,201	0,007	-0,120	0,003	-0,116	0,006
10-40-30	0,193	0,006	0,270	0,007	-0,042	0,008	-0,010	0,008
10-40-50	0,244	0,004	0,253	0,008	-0,012	0,013	-0,011	0,014
10-60-30	0,122	0,003	0,145	0,005	-0,157	0,009	-0,162	0,010
10-60-50	0,100	0,014	0,129	0,008	-0,134	0,003	-0,134	0,005
15-40-30	0,164	0,012	0,227	0,015	-0,075	0,006	-0,066	0,007
15-40-50	0,228	0,004	0,234	0,005	-0,028	0,009	-0,033	0,007
15-60-30	0,084	0,003	0,107	0,003	-0,169	0,008	-0,174	0,006
15-60-50	0,072	0,011	0,102	0,009	-0,139	0,005	-0,138	0,008
25-40-30	0,130	0,015	0,188	0,007	-0,079	0,004	-0,077	0,005
25-40-50	0,217	0,003	0,221	0,005	-0,032	0,007	-0,034	0,012
25-60-30	0,071	0,004	0,099	0,003	-0,179	0,003	-0,182	0,003
25-60-50	0,060	0,012	0,078	0,008	-0,145	0,004	-0,141	0,003

Tab. 28. Celkové smrštění výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

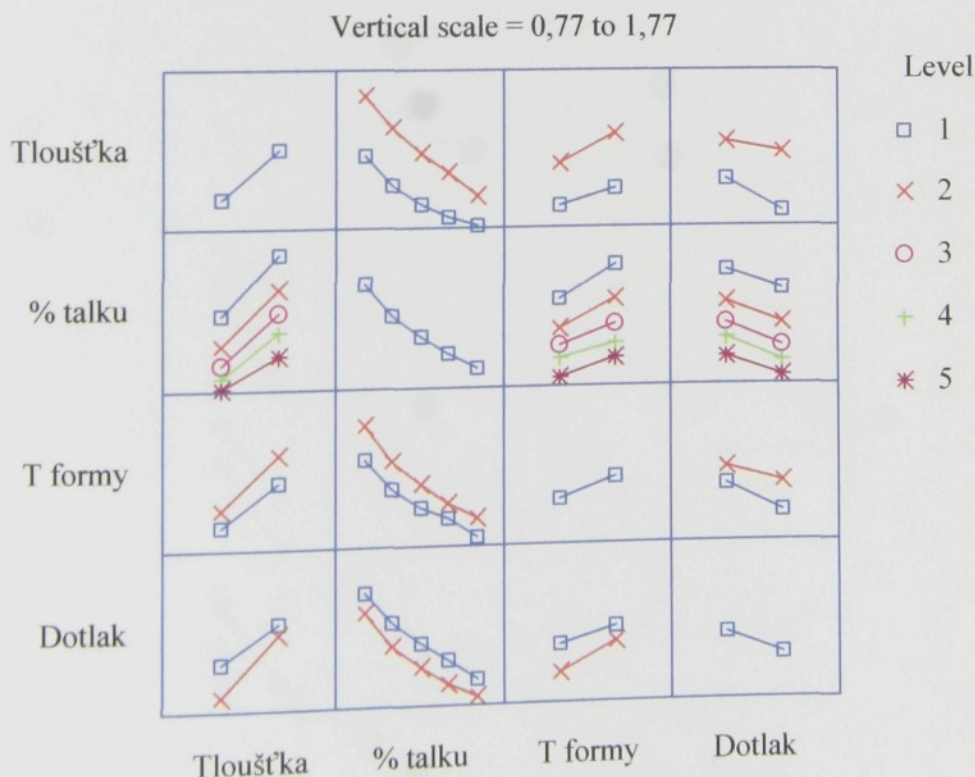
Proměnné parametry	Celkové smrštění S_T [%] Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%							
	Tloušťka stěny 2 mm				Tloušťka stěny 4 mm			
	S_{Tp}	σ	S_{Tn}	σ	S_{Tp}	σ	S_{Tn}	σ
0-40-30	1,484	0,011	1,706	0,011	1,947	0,004	1,815	0,004
0-40-50	1,257	0,005	1,449	0,006	1,623	0,004	1,667	0,007
0-60-30	1,480	0,008	1,696	0,006	1,925	0,006	1,851	0,006
0-60-50	1,265	0,007	1,460	0,004	1,702	0,006	1,897	0,004
5-40-30	1,268	0,009	1,437	0,009	1,590	0,005	1,491	0,011
5-40-50	1,025	0,007	1,161	0,007	1,343	0,006	1,325	0,014
5-60-30	1,246	0,013	1,394	0,012	1,450	0,014	1,390	0,011
5-60-50	1,034	0,010	1,183	0,016	1,337	0,008	1,436	0,012
10-40-30	1,077	0,014	1,229	0,016	1,330	0,012	1,242	0,013
10-40-50	0,878	0,004	1,016	0,004	1,078	0,012	1,077	0,014
10-60-30	1,067	0,009	1,236	0,012	1,181	0,012	1,166	0,015
10-60-50	0,838	0,014	0,999	0,008	1,118	0,011	1,182	0,013
15-40-30	0,974	0,012	1,120	0,013	1,191	0,011	1,090	0,008
15-40-50	0,787	0,006	0,924	0,011	0,978	0,014	0,974	0,015
15-60-30	0,906	0,011	1,102	0,008	0,996	0,012	1,015	0,012
15-60-50	0,708	0,013	0,907	0,016	0,920	0,008	0,998	0,013
25-40-30	0,878	0,011	1,014	0,012	1,003	0,007	0,913	0,011
25-40-50	0,716	0,013	0,846	0,017	0,811	0,007	0,810	0,013
25-60-30	0,781	0,016	0,977	0,010	0,830	0,012	0,870	0,007
25-60-50	0,632	0,006	0,869	0,012	0,787	0,014	0,881	0,011

Factor Means Plot for Výrobní smrštění podélné



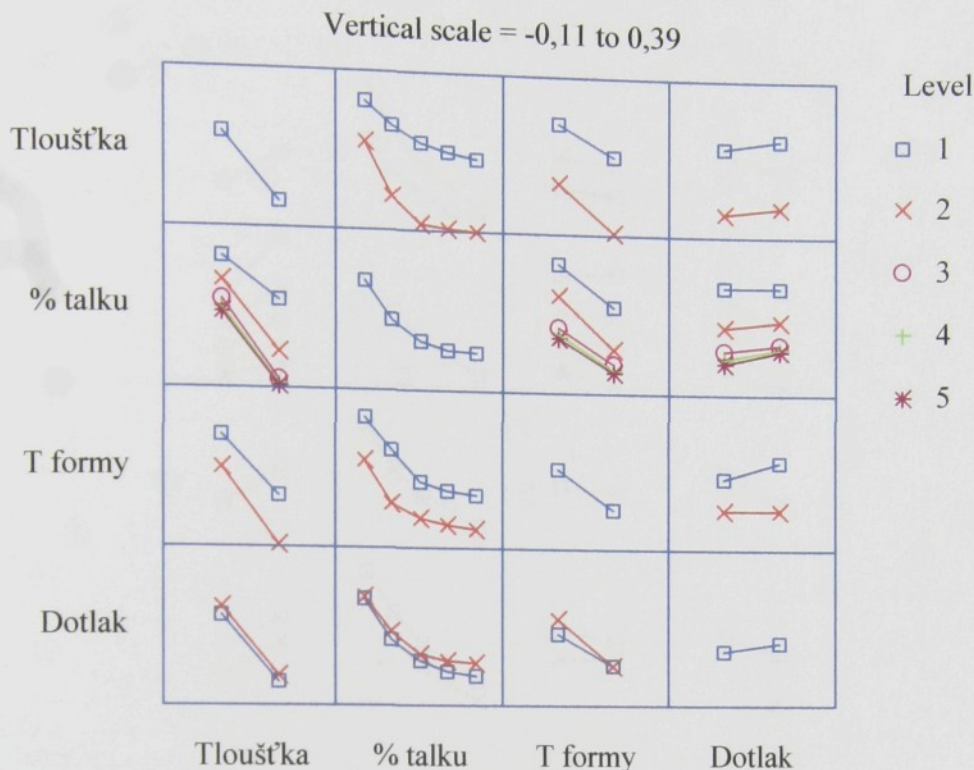
Obr. 48. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na výrobní smrštění podélné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Factor Means Plot for Výrobní smrštění příčné



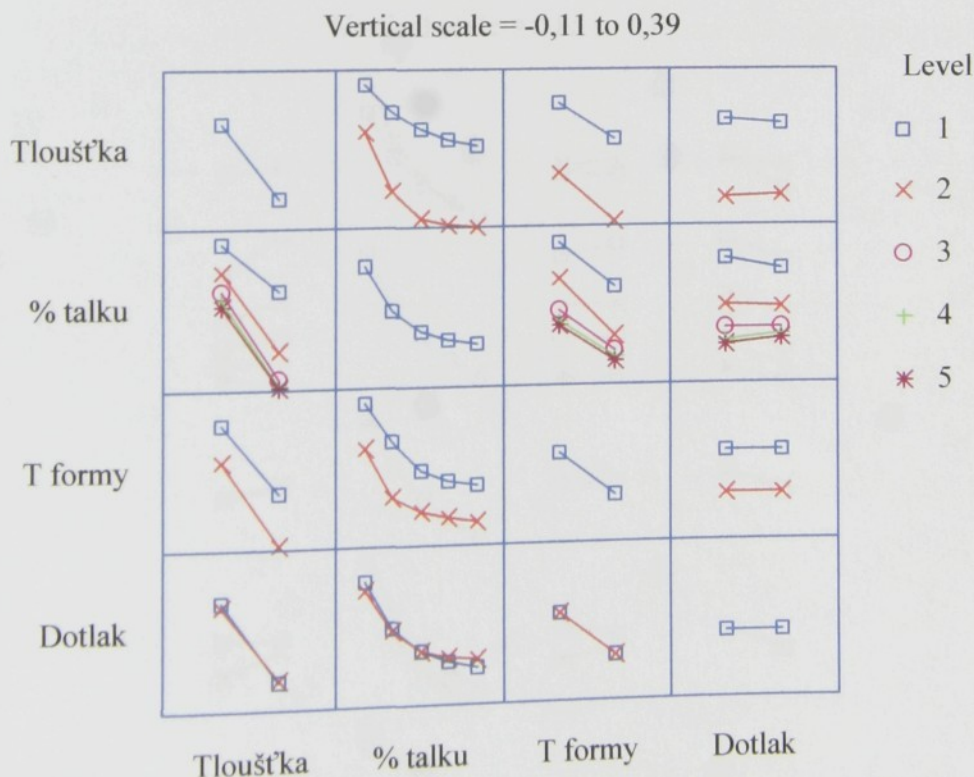
Obr. 49. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na výrobní smrštění příčné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Factor Means Plot for Dodatečné smrštění podélné



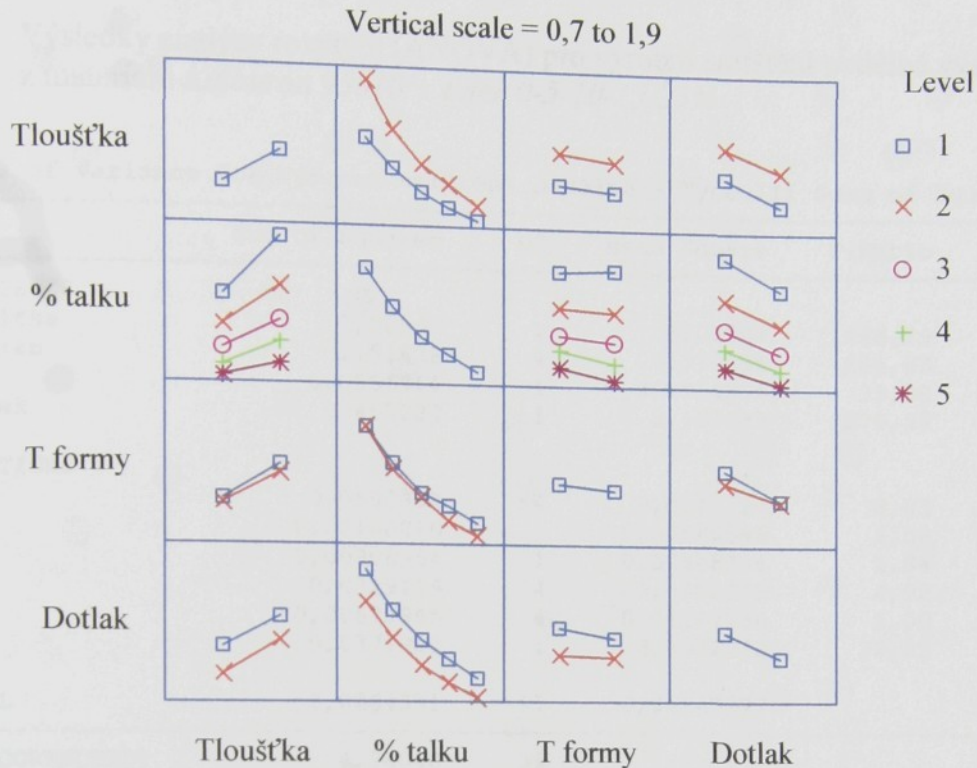
Obr. 50. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na dodatečné smrštění podélné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Factor Means Plot for Dodatečné smrštění příčné



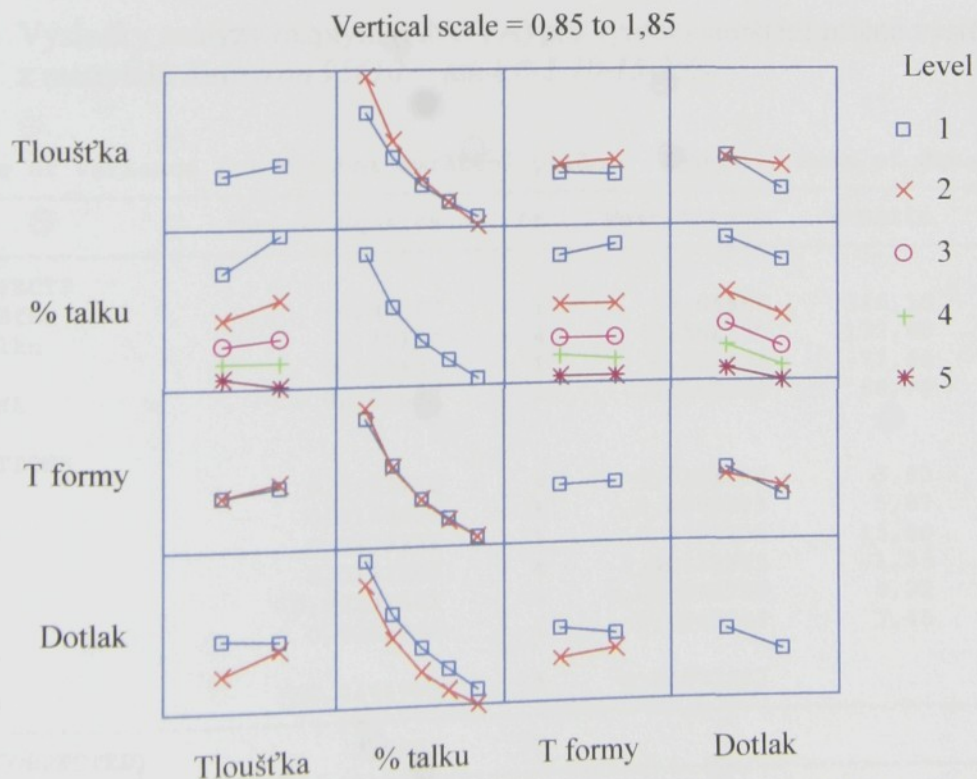
Obr. 51. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na dodatečné smrštění příčné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Factor Means Plot for Celkové smrštění podélné



Obr. 52. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na celkové smrštění podélné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Factor Means Plot for Celkové smrštění příčné



Obr. 53. Graf vlivů vstřikovacích parametrů (faktorů) na celkové smrštění příčné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Tab. 29. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro výrobní smrštění podélné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Analysis of Variance for Výrobní smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	2,08593	1	2,08593	1246,99	0,0000
B:% talku	1,51638	4	0,379094	226,63	0,0000
C:Tf	0,0556964	1	0,0556964	33,30	0,0000
D:Dotlak	0,453222	1	0,453222	270,94	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0590907	4	0,0147727	8,83	0,0005
AC	0,00180096	1	0,00180096	1,08	0,3140
AD	0,00308354	1	0,00308354	1,84	0,1923
BC	0,0329116	4	0,0082279	4,92	0,0081
BD	0,00670945	4	0,00167736	1,00	0,4333
CD	0,0372222	1	0,0372222	22,25	0,0002
RESIDUAL	0,0284371	17	0,00167277		
TOTAL (CORRECTED)	4,28048	39			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 30. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro výrobní smrštění příčné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Analysis of Variance for Výrobní smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,94667	1	0,94667	346,10	0,0000
B:% talku	1,45134	4	0,362835	132,65	0,0000
C:Tf	0,212431	1	0,212431	77,66	0,0000
D:Dotlak	0,182682	1	0,182682	66,79	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0427136	4	0,0106784	3,90	0,0199
AC	0,0160641	1	0,0160641	5,87	0,0268
AD	0,0423931	1	0,0423931	15,50	0,0011
BC	0,0167582	4	0,00418955	1,53	0,2377
BD	0,00237501	4	0,000593753	0,22	0,9253
CD	0,0203762	1	0,0203762	7,45	0,0143
RESIDUAL	0,0464989	17	0,00273523		
TOTAL (CORRECTED)	2,9803	39			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 31. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro dodatečné smrštění podélné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Analysis of Variance for Dodatečné smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,460918	1	0,460918	452,20	0,0000
B:% talku	0,278642	4	0,0696606	68,34	0,0000
C:Tf	0,159694	1	0,159694	156,67	0,0000
D:Dotlak	0,00603685	1	0,00603685	5,92	0,0263
INTERACTIONS					
AB	0,0183744	4	0,00459361	4,51	0,0115
AC	0,00697488	1	0,00697488	6,84	0,0181
AD	0,000136161	1	0,000136161	0,13	0,7193
BC	0,00514254	4	0,00128564	1,26	0,3234
BD	0,00138017	4	0,000345042	0,34	0,8482
CD	0,00609596	1	0,00609596	5,98	0,0256
RESIDUAL	0,0173277	17	0,00101928		
TOTAL (CORRECTED)	0,960723	39			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 32. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro dodatečné smrštění příčné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Analysis of Variance for Dodatečné smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,573052	1	0,573052	828,99	0,0000
B:% talku	0,333799	4	0,0834498	120,72	0,0000
C:Tf	0,183833	1	0,183833	265,94	0,0000
D:Dotlak	0,00000319225	1	0,00000319225	0,00	0,9466
INTERACTIONS					
AB	0,0225213	4	0,00563032	8,14	0,0007
AC	0,00491287	1	0,00491287	7,11	0,0163
AD	0,00096138	1	0,00096138	1,39	0,2545
BC	0,00574509	4	0,00143627	2,08	0,1287
BD	0,00381454	4	0,000953636	1,38	0,2827
CD	0,00000970225	1	0,00000970225	0,01	0,9071
RESIDUAL	0,0117516	17	0,000691269		
TOTAL (CORRECTED)	1,1404	39			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 33. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro celkové smrštění podélné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Analysis of Variance for Celkové smrštění podélné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,585688	1	0,585688	489,67	0,0000
B:% talku	3,03867	4	0,759668	635,12	0,0000
C:Tf	0,0267806	1	0,0267806	22,39	0,0002
D:Dotlak	0,354607	1	0,354607	296,47	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,11975	4	0,0299376	25,03	0,0000
AC	0,0016874	1	0,0016874	1,41	0,2513
AD	0,00192377	1	0,00192377	1,61	0,2218
BC	0,0178729	4	0,00446824	3,74	0,0234
BD	0,0135276	4	0,0033819	2,83	0,0576
CD	0,0131696	1	0,0131696	11,01	0,0041
RESIDUAL	0,0203336	17	0,00119609		
TOTAL (CORRECTED)	4,19401	39			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tab. 34. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) pro celkové smrštění příčné výstřiků z materiálů Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Analysis of Variance for Celkové smrštění příčné - Type III Sums of Squares					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Tloušťka	0,0466352	1	0,0466352	31,61	0,0000
B:% talku	3,1365	4	0,784126	531,54	0,0000
C:Tf	0,00103226	1	0,00103226	0,70	0,4145
D:Dotlak	0,181225	1	0,181225	122,85	0,0000
INTERACTIONS					
AB	0,0976871	4	0,0244218	16,55	0,0000
AC	0,00320768	1	0,00320768	2,17	0,1586
AD	0,056145	1	0,056145	38,06	0,0000
BC	0,00892881	4	0,0022322	1,51	0,2427
BD	0,0050911	4	0,00127277	0,86	0,5059
CD	0,021289	1	0,021289	14,43	0,0014
RESIDUAL	0,0250783	17	0,00147519		
TOTAL (CORRECTED)	3,58282	39			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

4.2.2.2 Tahová zkouška a zkouška rázové a vrubové houževnatosti [37, 38]

Nejvýznamnější aplikací zkoušeného polypropylénu jsou nárazníky automobilu. Pro tyto vnější díly karoserie automobilu se vyžaduje zejména vysoká houževnatost materiálu, a to i při velmi nízkých teplotách (až -40°C). Talek má však kromě aktivních účinků na smrštění také nezanedbatelný vliv na mechanické vlastnosti takto modifikovaného plastu.

Pro posouzení vlivu obsahu talku na základní mechanické vlastnosti byly provedeny tyto zkoušky: tahová zkouška dle ČSN EN ISO 527-2 a zkouška rázové a vrubové houževnatosti dle ČSN 64 0612 metodou Charpy.

Technologické parametry vstřikování zkušebních těles pro zkoušku tahem a pro zkoušku rázové a vrubové houževnatosti jsou uvedeny v tab. 7 (kap. 3.4.3 *Volba technologických parametrů vstřikování*).

Tahová zkouška

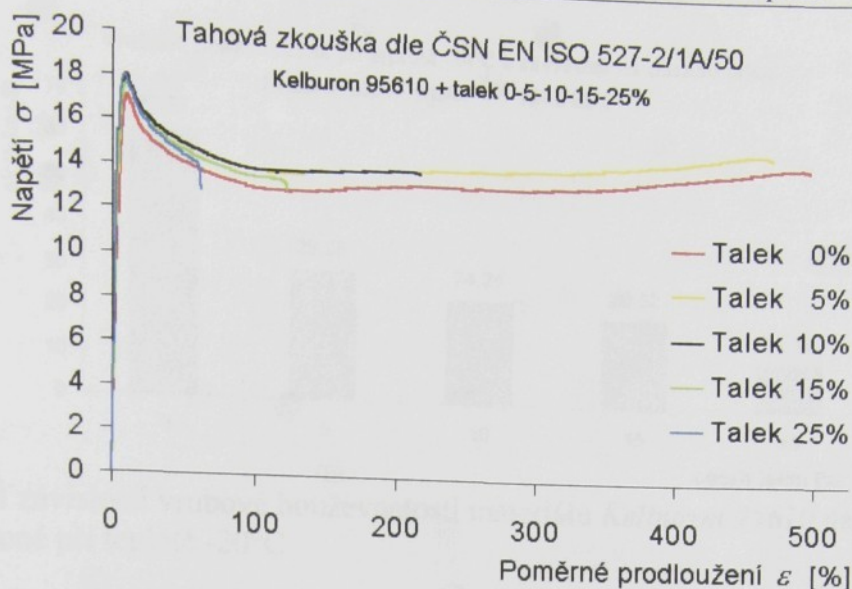
Tahová zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-2/1A/50. Zkouška byla prováděna na zkušebních tělesech typu 1A, která byla zhotovena za podmínek vstřikování uvedených v tab. 7. Během zkoušky byla použita rychlost posuvu příčnicku $50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Zkušební tělesa byla vyrobena s koncentracemi talku 0, 5, 10, 15 a 25 hmotnostních procent v zkoušeném materiálu, což byly koncentrace stejné jako v části experimentu pro stanovení smrštění. Zkušební tělesa byla po 24 hodinách kondicionování při standardních podmínkách (23°C , 65 % vlhkost vzduchu) zkoušena na zkušebním zařízení *TIRA test 2300* v počtu 10 kusů vzorků pro každý materiál. V průběhu zkoušek byl zaznamenáván časový průběh síly F [N] na dráze příčnicku ΔL [mm]. Tento průběh byl poté transformován do diagramu tahové napětí σ [MPa] – poměrné prodloužení ε [%]. Z diagramu byla odečtena maximální síla $F_{\max}$ [N], napětí na mezi pevnosti σ_M [MPa], poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_M [%] a poměrné prodloužení při přetržení ε_B [%].

Diagramy *tahové napětí σ – poměrné prodloužení ε* jsou pro jednotlivé koncentrace talku souhrnně zobrazeny na obr. 54.

Tabulka naměřených výsledků tahové zkoušky pro jednotlivá procentuální zastoupení talku (tab. 35) obsahuje průměrné hodnoty stanovené z výsledků měřených na deseti zkušebních tělesech.

Tab. 35. Tabulka výsledků zkoušky tahem, Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Talek [%]	$F_{\max}$ [N]	σ_M [MPa]	ε_M [%]	ε_B [%]
0	682	17,25	10,36	523,01
5	713	17,86	9,73	476,32
10	721	18,08	9,53	215,69
15	713	17,87	9,18	109,17
25	716	17,91	8,60	63,00



Obr. 54. Diagramy zkoušky tahem, Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Zápis o zkoušce a výsledky měření pro jednotlivé procentuální obsahy talku jsou uvedeny v příloze 3.

Zkouška rázové a vrubové houževnatosti

Zkouška byla provedena dle normy ČSN 64 0612 *Stanovení rázové a vrubové houževnatosti plastických hmot metodou Charpy*. Zkouška byla prováděna na zkušebních tělesech č.2 ($l \times h \times b = 80 \times 10 \times 4$ mm), kdy pro zkoušku vrubové houževnatosti byla opatřena vrubem tvaru U (šířka vrubu $b_k = 2$ mm, tloušťka zkuš. tělesa v místě vrubu $h_k = 6,7$ mm).

Pro výpočet vrubové houževnatosti a_k [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$] byl použit vztah:

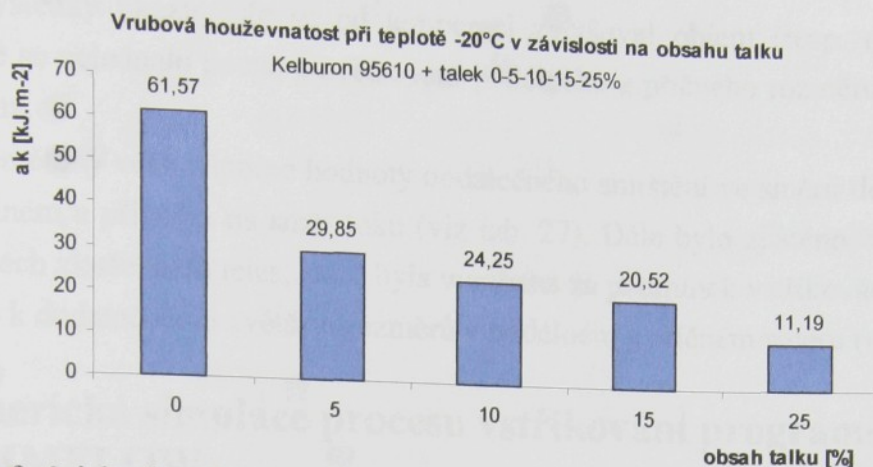
$$a_k = \frac{A_k}{b \cdot h_k} \cdot 10^3 \quad (39)$$

kde A_k [J] je energie, spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa s vrubem,
 b [mm] šířka zkušebního tělesa v místě vrubu.

Pro každou koncentraci talku byla zhotovena zkušební tělesa za vstřikovacích podmínek shodných s výrobou zkušebních těles pro zkoušku tahem (viz tab. 7).

Polypropylén Kelburon 95610 je modifikovaný elastomerem, což způsobuje, že se jedná o materiál s vysokou rázovou i vrubovou houževnatostí. Obě tyto vlastnosti se ale výrazně mění s teplotou a proto byly zkoušky provedeny při třech teplotách zkušebních vzorků: 23°C , 0°C a -20°C . Pro každou koncentraci talku bylo zkoušeno 16 zkušebních vzorků. Pro zkoušky za nízkých teplot byly vyrobené vzorky po 24 hodinách od výroby vloženy do mrazicího boxu s nastavenou požadovanou teplotou, odkud byly po 12 hodinách jednotlivě vyjímány a ihned zkoušeny. Při zkoušení za normální teploty (23°C) ani za teploty 0°C nedošlo při zkouškách rázové ani vrubové houževnatosti u všech koncentrací talku k porušení zkušebního vzorku.

K porušení zkušebních vzorků docházelo pouze při teplotě -20°C . Závislost vrubové houževnatosti na obsahu talku za daných podmínek zkoušení je patrná z grafu na obr. 55.



Obr. 55. Graf závislosti vrubové houževnatosti materiálu *Kelburon 95610* na obsahu talku měřené při teplotě -20°C

Zápis o zkoušce a výsledky měření jsou uvedeny v příloze 4.

4.2.2.3 Doplnkové měření smrštění ve směru tloušťky stěny výstřiku

Výsledky zjištěné při stanovení dodatečného smrštění ve směru podélném a příčném na směr toku taveniny ukázaly, že se rozměry zkušebních těles po dodatečné úpravě temperací zvětšovaly u těles s tloušťkou 4 mm od koncentrace 5% talku a výše. Toto zvětšování rozměrů bylo z hlediska známých teoretických předpokladů neočekávané. Změny rozměrů ve směru tloušťky se v rámci základního experimentu neměřily. Aby se zjistilo, zda se nejednalo o zvětšování plošných rozměrů na úkor tloušťky bylo v tomto okamžiku vhodné zjistit, zda se po temperaci zvětšuje i třetí rozměr zkušebních těles – tloušťka. Protože se výrobní smrštění vzorků z dutiny formy **B** prakticky nelišilo od vzorků z dutiny **A**, byla z nich vybrána skupina vzorků o tloušťce 4 mm, vyrobených při stejných technologických parametrech vstřikování. Tyto vzorky byly poté podrobeny temperaci za shodných podmínek jako vzorky **A**, které byly použity pro stanovení dodatečného smrštění ve směru podélném a příčném. Relativní změna tloušťky byla měřena v označeném bodě přibližně uprostřed zkušebního tělesa.

Na všech vybraných zkušebních tělesech se projevil zvětšení tloušťky (záporná hodnota smrštění ve směru tloušťky) po dodatečné úpravě temperací. Zjištěné průměrné hodnoty dodatečného smrštění ve směru tloušťky jsou uvedeny v tab. 36.

Tab. 36. Dodatečné smrštění vybraných zkušebních těles ve směru tloušťky stěny

<i>Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%</i>		
Parametry vstřikování	Tloušťka stěny 4 mm	
	S_p (ve směru tloušťky)	σ
0-40-50	-0,28	0,05
5-40-50	-0,31	0,06
10-40-50	-0,35	0,04
15-40-50	-0,33	0,05
25-40-50	-0,28	0,06

Tyto výsledky ukazují, že se po temperaci zvětšoval objem (resp. měrný objem) výstřiku a že se nejednalo pouze o zvětšování podélného a příčného rozměru na úkor jeho tloušťky stěny.

Byly naměřeny větší záporné hodnoty dodatečného smrštění ve směru tloušťky než ve směru podélném a příčném na směr toku (viz tab. 27). Dále bylo zjištěno, že se tloušťka zvětšila i u těch zkušebních těles, která byla vyrobena za podmínek vstřikování, při kterých nedocházelo k dodatečnému zvětšení rozměrů v podélném a příčném směru (viz tab. 27).

4.3 Numerická simulace procesu vstřikování programem STRIMFLOW

Analýza procesu vstřikování simulačním programem *STRIMFLOW* byla provedena na modelu výstřiku tvaru zkušebních těles použitých při experimentálním měření smrštění.

Na tomto výstřiku jednoduchého tvaru byly demonstrovány možnosti tohoto simulačního programu v oblasti stanovení smrštění. Pro simulační výpočty byl vytvořen numerický model výstřiku zkušebního tělesa o tloušťce 4 mm včetně vtokových kanálů a temperačních okruhů formy. Simulační výpočty byly provedeny pro materiál ABS *Terluran HH-112* s využitím materiálových dat od výrobce plastu fy. *BASF*. Protože tento program neuvažuje strukturní změny ve výstřiku, nelze jej využít pro analýzu dodatečného smrštění a analýza procesu vstřikování byla proto použita pouze pro odhad výrobního smrštění.

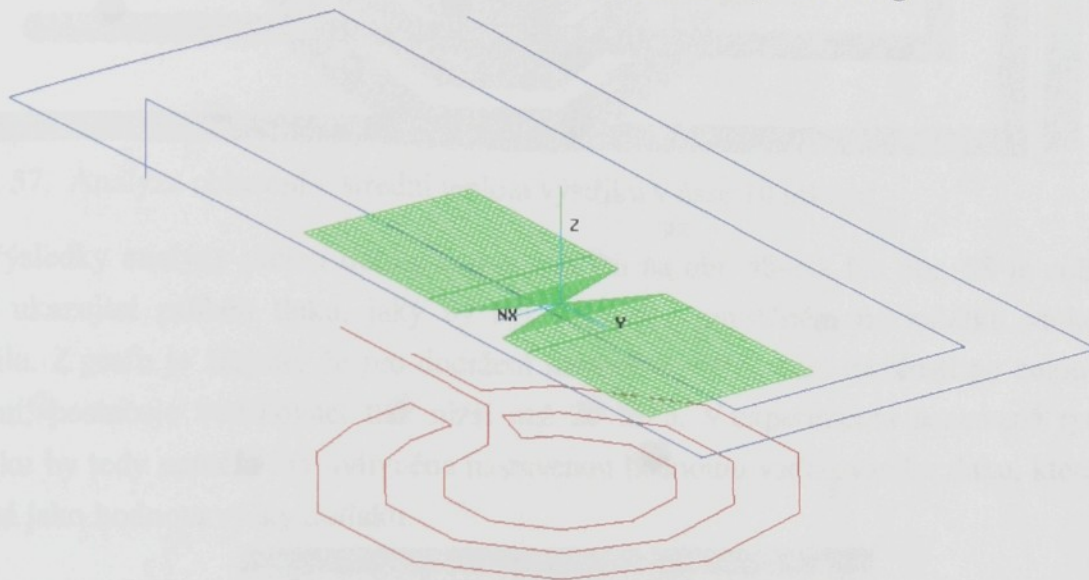
Simulační výpočty byly provedeny pro kombinaci technologických parametrů označenou 60–260–50 a tloušťku výstřiku 4 mm. Označení je stejné, jako v případě experimentálního měření smrštění na zkušebních tělesech, kde označení třemi číslicemi vyjadřuje velikost proměnných parametrů vstřikování v tomto pořadí: Teplota formy [°C] – Teplota taveniny [°C] – Dotlak [MPa]. Při modelování podmínek vstřikování byly pro jednotlivé technologické parametry zvoleny střední hodnoty technologických parametrů použité při experimentálním stanovení hodnot výrobního smrštění výstřiků z ABS *Terluran HH-112*.

4.3.1 Konstrukce modelu a definice procesu vstřikování

Nejprve byl vytvořen síťový model výstřiku. V prvním kroku byl simulačním programem vytvořen plošný geometrický model v modulu *2D/3D MODELING* na základě skutečných rozměrů výstřiku. Dalším krokem bylo síťování modelu, které bylo provedeno pomocí aplikace *MESHING*. Takto vytvořený síťový model byl tvořen trojúhelníkovými a čtvercovými prvky. Vytvořený model se dále upravil přiřazením tloušťek stěn, připojením vtokového systému a umístěním chladících okruhů formy (viz obr. 56).

Dalším krokem při definici procesu vstřikování bylo zadání materiálových dat vstřikovaného materiálu. Požadované materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulkách a grafech v příloze 5.

Posledním krokem před spuštěním výpočtů bylo definování parametrů vstřikovacího procesu. Rychlost plnění dutiny formy byla zvolena konstantní a určena objemovým průtokem $Q = 12,3 \text{ [cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$. Přepnutí na dotlak bylo nastaveno na okamžik, kdy byla dutina formy zaplněna z 96 %. Průběh dotlaku byl zvolen konstantní. Dále byla zadána časová frekvence ukládání výsledků simulace $t = 0,5 \text{ [s]}$. Do analýzy vstřikování byla zahrnuta předem vypočtená analýza chlazení výstřiku. V posledním kroku před spuštěním výpočtů byla programem provedena kontrola zadaných dat, geometrie a materiálových charakteristik vzhledem k zvolenému režimu vstřikování. Kontrolou vstupních dat skončila fáze tzv. „*Preprocessingu*“, a následovala fáze výpočtu tzv. „*Processing*“.



Obr. 56. Síťový model výstřiku s vtokovým systémem a chladicími okruhy formy

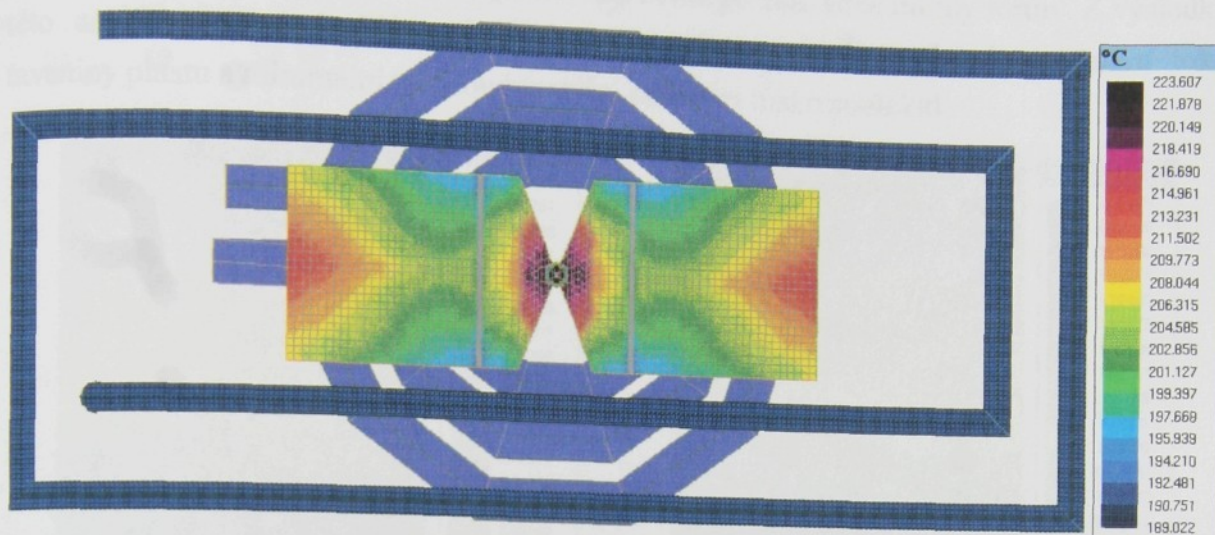
4.3.2 Vyhodnocení výsledků numerické simulace

Analýza vypočtených výsledků simulace se provádí jejich zobrazováním v modulu *2D/3D GRAPHIC DISPLAY*, během tzv. fáze „*Postprocessingu*“. Pomocí barevné mapy a izokřivek na zobrazeném modelu, popř. 2D grafů, lze zobrazit jednotlivé analyzované děje během procesu vstřikování.

Na obr. 57 jsou znázorněny výsledky analýzy chlazení výstřiku, kde je zobrazena střední teplota výstřiku v čase 10 sekund v dutinách formy *A* (vpravo) a *B* (vlevo), a dále temperační okruhy tvárníku (tmavě modrý okruh) a tvárnice (modrý okruh). Rozložení středních teplot ve výstřiku je u obou dutin velmi podobné a lze tedy předpokládat velmi malé odchylky průběhu ochlazování výstřiku mezi dutinami formy *A* a *B*.

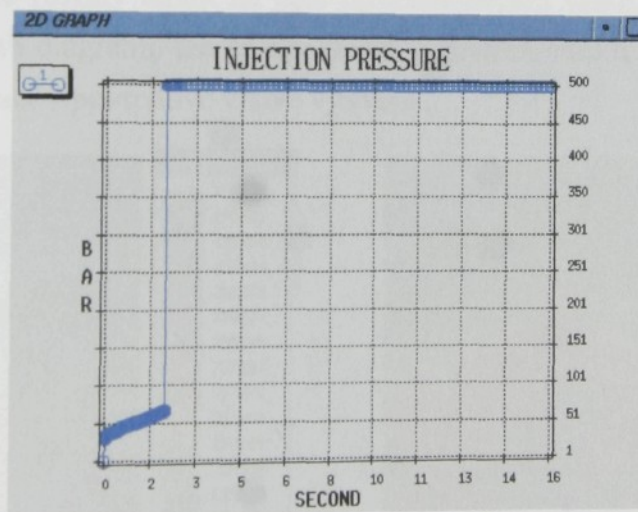
Analýza chlazení však ukazuje, že uspořádání temperačního okruhu v části formy na straně vtoku (tvárníku), kde temperační kanály jsou v poměrně velké vzdálenosti od dutiny formy, zapříčiňuje nerovnoměrné ochlazování výstřiku ve směru kolmém na směr toku taveniny. Nerovnoměrné ochlazování pak ovlivňuje rozložení hustoty a tím i velikost smrštění v jednotlivých částech výstřiku (viz. obr. 61–62). Toto uspořádání temperačních kanálů na pevné části formy je použito z důvodu univerzálnosti tohoto nástroje, který

umožňuje výměnu části nástroje s různými tvárnicemi pro vstřikování více typů zkušebních těles.



Obr. 57. Analýza chlazení – střední teplota výstřiku v čase 10 sekund

Výsledky analýzy plnění dutiny formy uvádím na obr. 58–60. Na obr. 58 je zobrazen graf ukazující průběh tlaku, jaký by byl v senzoru umístěném na začátku vtokového kanálu. Z grafu je zřejmé, že pro dodržení nastavené vstřikovací rychlosti po celou dobu plnění, postačuje vstřikovací tlak nižší než 20 MPa. V experimentu nastavená rychlost vstřiku by tedy neměla být ovlivněna nastavenou hodnotou vstřikovacího tlaku, která byla stejná jako hodnota výšky dotlaku.



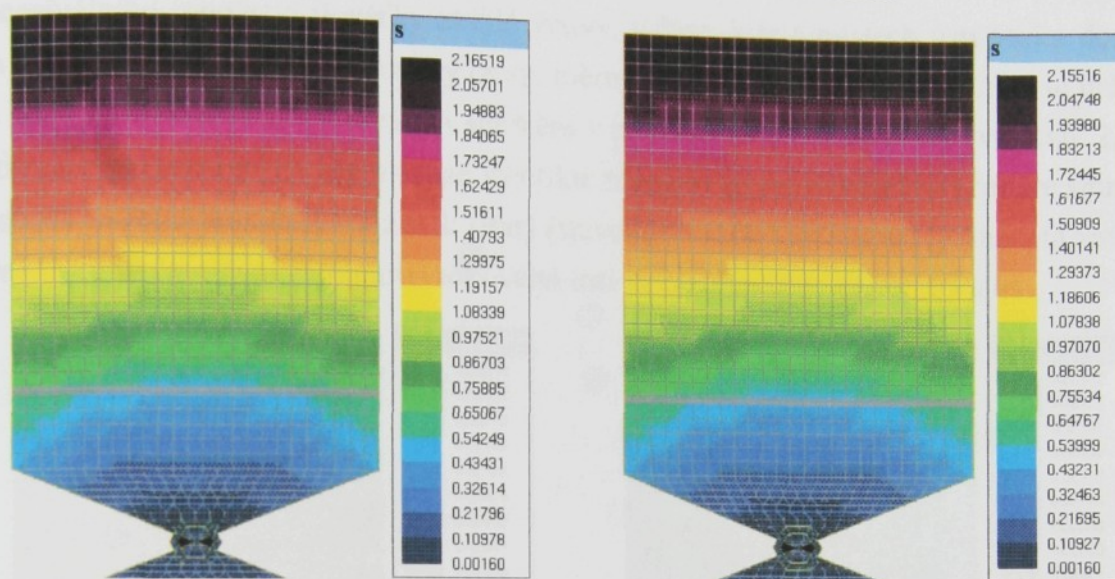
Obr. 58. 2D graf – průběh vstřikovacího tlaku [Bar] na začátku vtokového kanálu v závislosti na době plnění dutiny formy [s]

Na dalších obrázcích (obr. 59–64) uvádím výsledky jednotlivých analýz vstřikování ve dvou variantách:

1. bez použití výsledků analýzy chlazení (na obrázcích vlevo)
2. s použitím výsledků analýzy chlazení (na obrázcích vpravo).

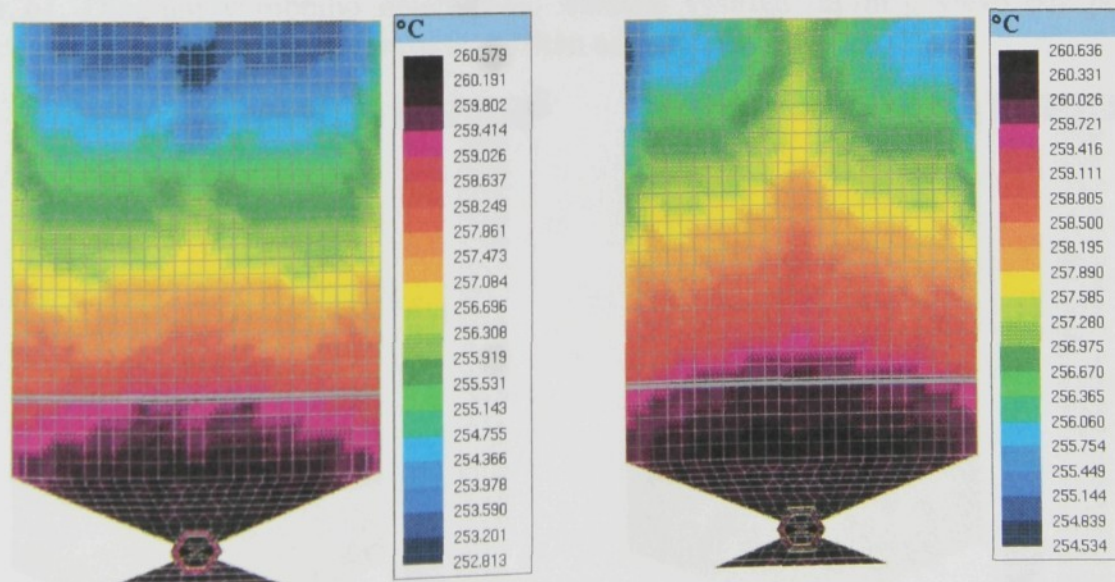
Vzhledem k symetrii obou dutin formy a z toho plynoucím minimálním rozdílům mezi výsledky analýz vstřikování do dutin A a B vstřikovací formy jsou další vypočtené analýzy vstřikování zobrazovány pouze pro dutinu formy A.

Na obr. 59 je znázorněn diagram časového průběhu plnění dutiny formy. Z diagramů je dobře patrné, že se dutina formy plní rovnoměrně po celé šířce dutiny formy. Z výsledku této analýzy lze předpokládat jednosměrnou orientaci makromolekul ve směru toku taveniny plastu a minimální příčnou biaxiální orientaci makromolekul.



Obr. 59. Diagram časového průběhu plnění dutiny formy [s], vlevo bez použití analýzy chlazení a vpravo s použitím analýzy chlazení

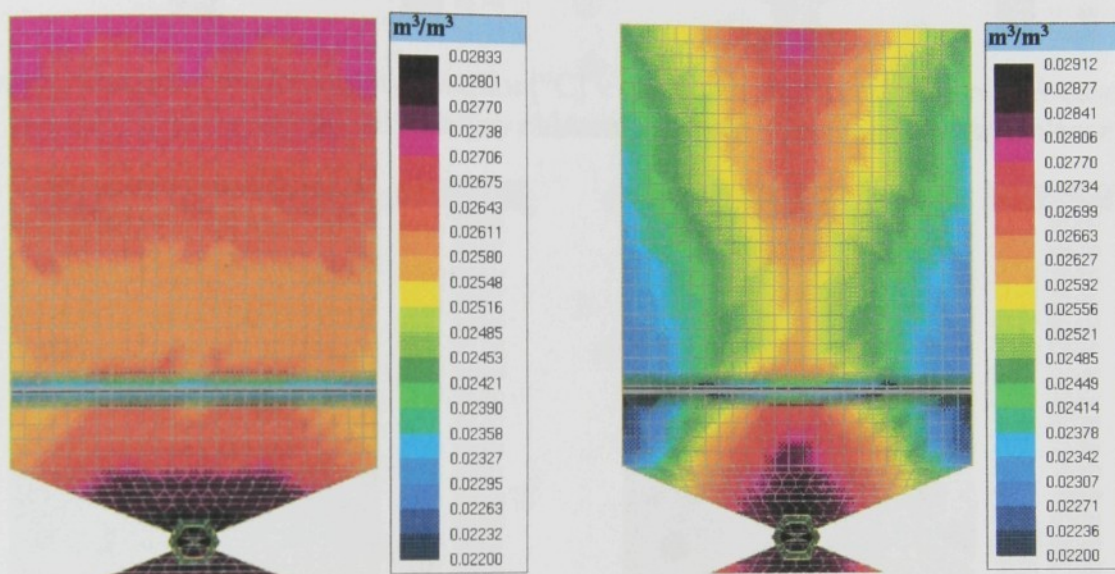
Na obr. 60 je znázorněn diagram teploty čela taveniny během plnění dutiny formy. Simulace ukazuje, že rozdíly teplot na čele taveniny nejsou velké, do 10°C. Z výsledků zobrazených na tomto diagramu lze předpokládat v místech s nižší teplotou čela taveniny větší biaxiální orientaci v povrchové vrstvě výstřiku.



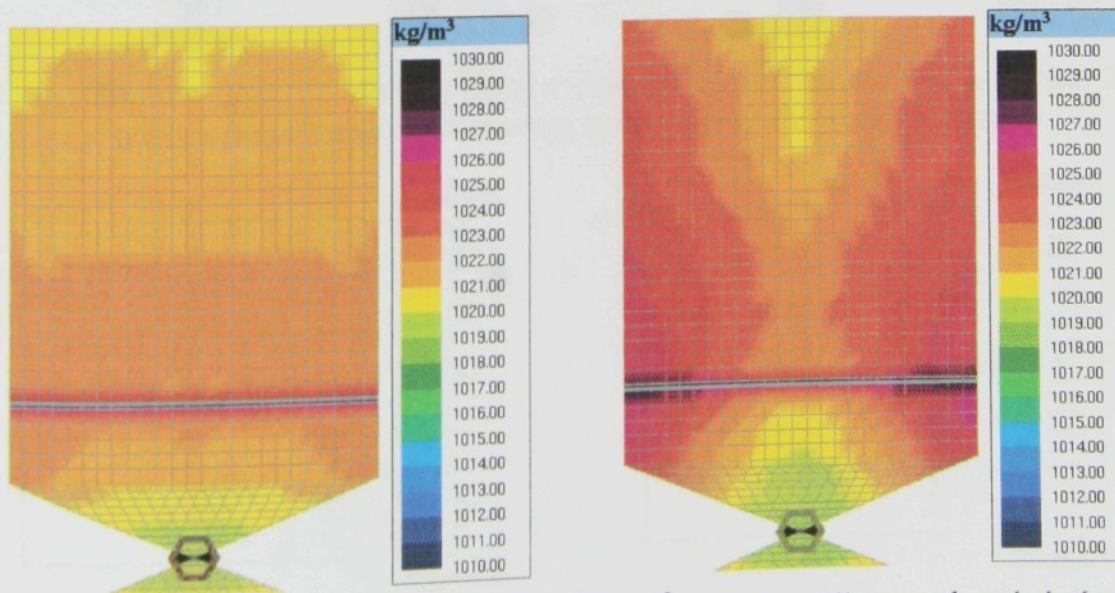
Obr. 60. Diagram teploty na čele taveniny v průběhu plnění dutiny formy [°C], vlevo bez použití analýzy chlazení a vpravo s použitím analýzy chlazení

Simulační program *STRIMFLOW* zobrazuje smrštění v jednotlivých místech výstřiku v diagramech výrobního objemového smrštění S_V [m^3/m^3] (viz obr. 61). Délkové výrobní smrštění [%] lze ve zvoleném směru odhadnout, za předpokladu stejného smrštění ve

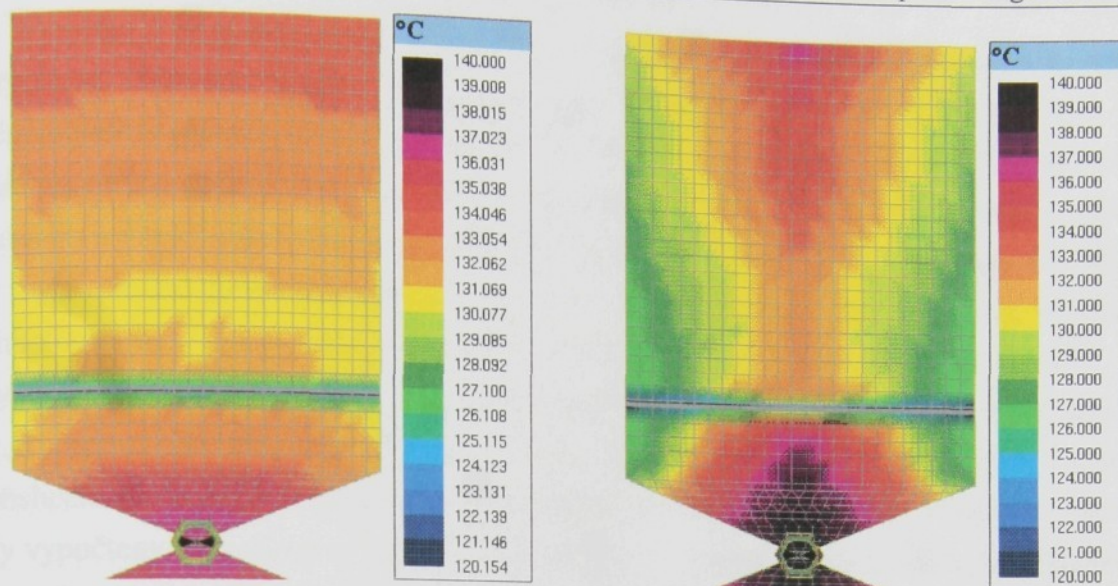
všech směrech, ze střední hodnoty objemového smrštění [%] zjištěného grafickou metodou v úseku výstřiku vymezeném např. referenčními body *a*, *b*, *c*, *d* (viz obr. 65). Výrobní smrštění lze odhadovat také z diagramu střední hustoty (obr. 62) zobrazeného v okamžiku zatuhnutí ústí vtoku. Okamžik zatuhnutí ústí vtoku (v čase 23 s) byl stanoven z diagramu procentuálního množství tloušťky ztuhlé vrstvy, v čase, kdy v místech ústí vtoku dosáhla tato hodnota 100%. Velikost hustoty (resp. měrného objemu) v tomto okamžiku je určující pro velikost výrobního objemového smrštění v příslušném místě výstřiku (viz kap. 2.4.1). Větší hodnota hustoty v daném místě výstřiku znamená menší výrobní objemové smrštění a naopak. Střední teplota [°C] a tlak [Bar] (stavové veličiny, na kterých je hustota závislá) ve výstřiku v okamžiku zatuhnutí vtokového ústí jsou zobrazeny na obr. 63 a 64.



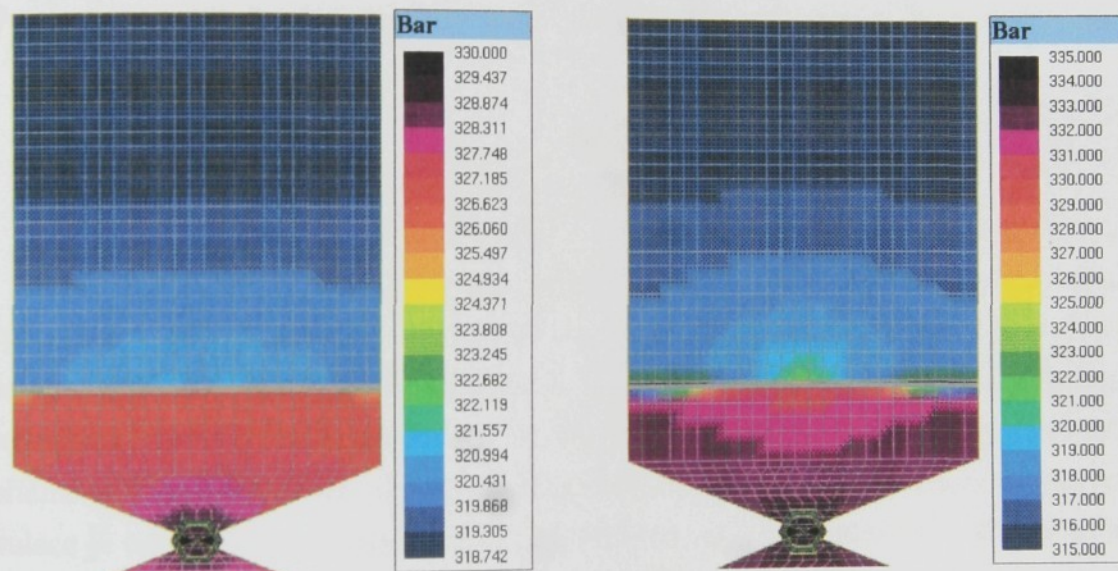
Obr. 61. Diagram výrobního objemového smrštění výstřiku [m^3/m^3], vlevo bez použití analýzy chlazení a vpravo s použitím analýzy chlazení



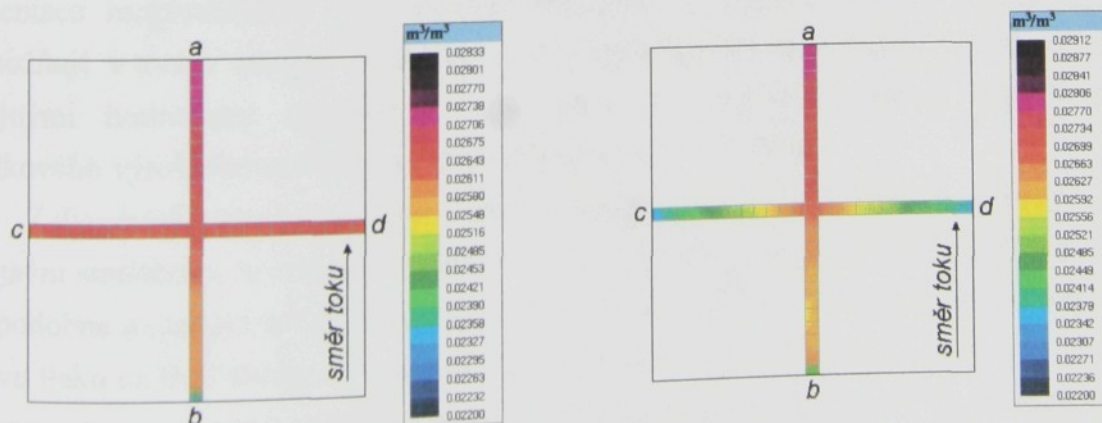
Obr. 62. Diagram střední hustoty výstřiku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], v okamžiku zatuhnutí ústí vtoku (v čase 23 s), vlevo bez použití analýzy chlazení a vpravo s použitím analýzy chlazení



Obr. 63. Diagram střední teploty výstřiku [°C] v okamžiku zatuhnutí ústí vtoku (v čase 23 s), vlevo bez použití analýzy chlazení a vpravo s použitím analýzy chlazení



Obr. 64. Diagram tlaku ve výstřiku [Bar] v okamžiku zatuhnutí ústí vtoku (v čase 23 s), vlevo bez použití analýzy chlazení a vpravo s použitím analýzy chlazení



Obr. 65. Úseky výstřiku vymezené referenčními body pro určení středního výrobního objemového smrštění [m^3/m^3] a pro následný odhad délkového výrobního smrštění v podélném (úsek a-b) a příčném směru (úsek c-d) vzhledem k toku taveniny, vlevo bez použití a vpravo s použitím analýzy chlazení (viz obr. 61)

Na obr. 65 jsou znázorněny oblasti výstřiku vymezené referenčními body a, b, c, d , na kterých se určovaly střední hodnoty objemového smrštění v podélném (úsek $a-b$) a příčném směru (úsek $c-d$) směru vzhledem ke směru toku taveniny. Referenční body, resp. vyhodnocované oblasti byly na modelu výstřiku umístěny přibližně ve stejných místech, kde se na reálných zkušebních tělesech při experimentálním měření určovalo smrštění, tak aby bylo možné porovnat výsledky simulace a experimentu. Pro zvolenou kombinaci technologických parametrů, označenou 60–260–50 a tloušťku výstřiku 4 mm, byly z vypočtených analýz vstřikování, zobrazených na diagramech objemového smrštění obr. 61 resp. obr. 65, vyhodnoceny střední hodnoty objemového výrobního smrštění v příslušném směru (viz příloha 6). Odpovídající hodnoty délkového výrobního smrštění byly vypočteny s použitím rovnice 27 a porovnány s experimentálně zjištěnými hodnotami výrobního smrštění uvedenými v tab. 8. Porovnání hodnot výrobního délkového smrštění získaných simulací a experimentálním měřením je uvedeno v tab. 37.

Tab. 37. Porovnání hodnot výrobního délkového smrštění získaných pomocí simulace a experimentálním měřením na zkušebních tělesech

Výrobní smrštění S_M [%]	podélné	příčné
Experimentální měření na zkušebních tělesech	0,666	0,656
Numerická simulace vstřikování bez analýzy chlazení	0,886	0,887
Numerická simulace vstřikování s analýzou chlazení	0,896	0,844

Výrobní délkové smrštění, odhadnuté výše uvedeným způsobem z výsledků simulace, se poměrně výrazně lišilo (cca 30%) od experimentálně naměřeného smrštění. Rozdíl dosahuje přibližně hodnoty rozpětí mezi nejmenší a největší hodnotou naměřeného výrobního smrštění v rámci experimentu. Největší část tohoto rozdílu je pravděpodobně zapříčiněna rozdílem mezi skutečnou a simulovanou dobou zatuhnutí vtoku, kdy u simulace je tato doba pravděpodobně kratší, čímž se snižuje působení dotlaku na taveninu plastu v tvarové dutině, což způsobuje zvýšení smrštění. Další vliv na nepřesnost simulace má to, že tento simulační program neuvažuje strukturní změny ve výstřiku, zejména vliv orientace makromolekul a morfologie polymeru. Z hlediska určení smrštění výstřiků umožňují v tomto případě výsledky analýzy vstřikování pouze určit místa výstřiku se stejnými hodnotami objemového výrobního smrštění a poměrově rozdíly hodnot délkového výrobního smrštění mezi příslušnými místy výstřiku.

Z diagramů hustoty, smrštění a střední teploty výstřiku je patrné, že rozložení míst se stejným smrštěním je obdobné rozložení střední hustoty v okamžiku zatuhnutí vtoku, které je podobné rozložení střední teploty výstřiku. Je to způsobeno větším vlivem teploty oproti vlivu tlaku na třetí stavovou veličinu – měrný objem. Výsledky těchto simulačních výpočtů ukazují, že na přesnost výsledků analýzy vstřikování má velký vliv volba zařazení analýzy chlazení do výpočtu. V tomto případě toková analýza v kombinaci s analýzou chlazení odhalila vliv nerovnoměrného chlazení na rozložení středních teplot výstřiku a tím i na velikost a rozložení výrobního smrštění v jednotlivých místech výstřiku.

5 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky předložené disertační práce přinášejí dílčí poznatky v technologii vstřikování termoplastů v oblasti rozměrových změn výstřiků. Smrštění výstřiků z termoplastů není materiálovou konstantou, ale je závislé na tepelně mechanické historii dějů během vstřikování a případných dodatečných úprav výstřiků. Vliv dodatečných úprav výstřiků na dodatečné smrštění, řešený v disertační práci, úzce souvisí s problematikou vstřikování dílů pro automobilový průmysl, které jsou následně lakovány vodou ředitelnými laky. Během procesu lakování dochází k dodatečnému ohřevu výstřiků a ovlivnění jejich struktury, a tomu odpovídajícím rozměrovým změnám. Hlavním záměrem této disertační práce bylo vyhodnocení vlivu vybraných základních materiálových, konstrukčních a technologických parametrů vstřikování na výrobní a dodatečné smrštění po následném ohřevu (temperaci) výstřiků tvaru desky z vybraných materiálů používaných při výrobě lakovaných dílů pro automobilový průmysl. Dodatečný ohřev simuloval průběh teplotního zatížení výstřiků během procesu lakování.

Hodnoty smrštění těchto materiálů byly v rámci experimentu naměřené na výstřicích poměrně malých rozměrů a jednoduchého tvaru. Přesto lze, dle mého názoru, výsledky takto zjištěné využít i na odhad smrštění v jednotlivých místech výstřiků větších rozměrů a složitějších tvarů. Data získaná kombinacemi proměnných parametrů vyjadřují hodnoty smrštění plastu za různých termodynamických podmínek a tloušťek stěn zkušebních těles. Pokud známe alespoň přibližné rozložení základních termodynamických veličin a tloušťek stěn ve větším výstřiku, lze pro odhad smrštění v jednotlivých místech takového výstřiku použít ty hodnoty smrštění malých zkušebních těles, které byly vyrobeny za obdobných termodynamických podmínek a při stejné tloušťce stěny výstřiku. Sledování termodynamických veličin uvnitř dutiny formy lze zajistit pomocí snímačů tlaku a teploty, což bývá poměrně složité. Alternativním řešením mohou být počítačové simulace procesu vstřikování termoplastů, ze kterých lze výpočtem získat hodnoty termodynamických veličin v libovolném místě výstřiku a lze je provést už při návrhu formy nového vstřikovaného dílu.

Program *STRIMFLOW* použitý v předkládané disertační práci pro numerické simulace procesu vstřikování poměrně úspěšně řeší problematiku plnění dutiny formy, tlakových ztrát v tavenině a chlazení výstřiku. Pro výpočty objemového smrštění tento program využívá p-v-T diagramů resp. stavových rovnic, které vzájemnou závislost stavových veličin popisují. Tyto diagramy resp. stavové rovnice ale nezachycují vlivy průvodních dějů během vstřikování na změny ve struktuře výstřiku, zejména vliv orientace makromolekul a plniv. Další nepřesnost simulačních výpočtů smrštění tohoto programu plyne z toho, že používá p-v-T diagramy naměřené standardně při nízké rychlosti ochlazování, ale v povrchových vrstvách výstřiku probíhá ochlazování mnohem vyššími

rychlostmi a nemohou tedy zachytit vliv vyšších rychlostí ochlazování na strukturu zejména u semikrystalických polymerů. Protože tento simulační program nepočítá se strukturními změnami výstřiku, nemohl být tedy využit ani pro výpočty dodatečného smrštění. Vzhledem k složitosti analytického řešení a možností výpočtu smrštění simulačním programem s výše uvedenými nepřesnostmi bylo v předkládané práci nutné, při hodnocení vlivu jednotlivých parametrů vstřikování na velikost smrštění, vycházet především z experimentálně naměřených dat.

Oba testované materiály, amorfní termoplast ABS a semikrystalický elastomerem modifikovaný a talkem plněný PP, patří v současné době k velmi používaným druhům termoplastů pro výrobu lakovaných dílů pro osobní automobily. Vzhledem k jejich odlišnému nadmolekulárnímu uspořádání, byly předpokládány i výrazné rozdíly ve velikosti výrobního a dodatečného smrštění obou polymerů, které se měřením potvrdily. Kromě předpokládaných průběhů závislostí smrštění na parametrech vstřikování byly při vyhodnocování naměřených výsledků dodatečného smrštění zkušebních těles zjištěny některé netypické závislosti a hodnoty dodatečného smrštění o obou zkoušených materiálech. V případě ABS *Terluran HH-112* se jednalo o snižující vliv zvyšujícího se dotlaku na dodatečné smrštění a v případě PP *Kelburon 95610* plněného talkem se jednalo o výskyt záporných hodnot dodatečného smrštění u výstřiků tloušťky 4 mm.

Pro vysvětlení těchto netypických závislostí dodatečného smrštění na parametrech vstřikování jsem na základě naměřených hodnot smrštění a teoretického rozboru možných vlivů navrhl následující teoretické zdůvodnění - hypotézu.

Z morfologického hlediska je pro oba hodnocené polymery významná ta skutečnost, že se v obou případech jednalo o materiály s vícefázovou strukturou. U obou materiálů byla v polymerní matici dispergována elastomerní fáze a polypropylén navíc ve většině případů obsahoval částicové minerální plnivo. Dvoufázové systémy typu roubovaných polymerů s kaučukovitými částicemi dispergovanými ve sklovité matici (ABS), blokových kopolymerů s kaučukovitými bloky navázanými na polymerní řetězec (PP kopolymery), popř. fyzikálních směsí vzájemně nerozpustných nemísitelných polymerů (směsi PP+EPDM), vykazují viskoelastické chování podobného typu, kdy jednotlivé fáze si zachovávají rozdílné teplotní závislosti mechanických vlastností (modul pružnosti, tažnost). Jednotlivé fáze těchto materiálů vykazují také rozdílné vlastnosti ovlivňující bezprostředně měrný objem (koeficient teplotní roztažnosti α , koeficient stlačitelnosti β) (viz kap. 2.2.1.1 a 2.2.1.2).

Vzhledem k výše uvedeným rozdílům ve vlastnostech jednotlivých fází vstřikovaného materiálu a rychlým změnám termodynamických veličin ve výstřiku během vstřikování předpokládám vznik oblastí výstřiku vyskytujících se v nerovnovážném stavu z hlediska měrného objemu, které mohou ovlivňovat průběh rozměrových změn výstřiku. Tento mnou definovaný předpoklad nabízí také vysvětlení narůstání rozměrů po dodatečné úpravě temperováním výstřiků tloušťky 4 mm z PP *Kelburon 95610* plněného talkem.

Podle tohoto předpokladu, kontinuální fáze, kterou tvoří polypropylénová matrice, během vstřikování při ochlazení na teplotu T_m ztuhne a v důsledku jejího většího objemového smrštění (viz zlom izobar v p-v-T diagramu PP na obr. 26) budou částice dispergované elastomerní fáze stlačeny. Jelikož má PP matrice za normální teploty mnohem vyšší tuhost než dispergovaný EP kaučuk, zůstanou částice EPR v matrici stlačeny zbytkovým tlakem, který ve výstřiku vytvoří vnitřní expanzní pnutí. Vlivem dlouhodobě zvýšené teploty při temperování výstřiků se ve větší míře uplatní křip PP matrice a dojde k uvolňování tohoto zbytkového pnutí za současného zvětšování objemu dispergované elastomerní fáze. K celkovému zvětšení měrného objemu resp. rozměrů výstřiku (záporné hodnoty dodatečného smrštění) po temperování však dojde pouze v případě, že zvětšení měrného objemu resp. rozměrů výstřiku vlivem uvolnění vnitřního expanzního pnutí bude větší nežli zmenšení měrného objemu výstřiku vlivem dodatečné krystalizace PP matrice a zmenšení rozměrů výstřiku v důsledku relaxace orientovaných makromolekul.

V případě ABS *Terluran HH-112* tvoří kontinuální fázi (matrici) akrylonitril-styrénové bloky a dispergovanou fázi tvoří částice butadien-styrénového kaučuku. U tohoto materiálu lze také, i když v menší míře než u semikrystalického PP, předpokládat vliv rozdílných vlastností jednotlivých fází na vznik oblastí výstřiku v nerovnovážném stavu z hlediska měrného objemu. Při teplotě zesklnění akrylonitril-styrenové matrice se výrazně mění vlastnosti kontinuální fáze, zejména modul pružnosti, který je při teplotách nižších než T_g matrice mnohem vyšší než u částic dispergovaného elastomeru. Vyšší tuhost matrice může tedy způsobovat omezování objemových změn dispergované fáze za vzniku vnitřního expanzního pnutí, ale pouze v případě, bude-li objemové smrštění matrice větší než u dispergovaných částic. Při dodatečné úpravě výstřiku temperováním by pak mohlo docházet vlivem objemové relaxace k částečnému kompenzování dodatečného smrštění.

Lze předpokládat vliv velikosti podílu dispergované elastomerní fáze v polymeru na velikost dodatečného smrštění výstřiků. Malý obsah dispergovaného elastomeru v matrici bude pravděpodobně potlačovat výše popsané neobvyklé průběhy dodatečného smrštění výstřiků. Při podílu kaučukovité fáze blížíci se 50% by již nebyla tato fáze dispergována a a pravděpodobně by se tak vliv fáze s vyšší tuhostí uplatnil ve zmenšené míře na omezení objemových změn kaučukovité fáze. Poměrné zastoupení jednotlivých fází v polymeru bohužel výrobci hodnocených polymerů neuvádí. Zastoupení elastomerní dispergované fáze v hodnocených polymerech proto pouze odhaduji. Běžné vstřikovací typy materiálu ABS, ke kterým se řadí i materiál *Terluran HH-112*, mají obvykle zastoupení butadien-styrénového kaučuku okolo 25%, který tvoří dispergovanou fázi v styren-akrylonitrilové matrici. Materiál PP *Kelburon 95610* patří svým aplikačním využitím do kategorie polypropylénů s vysokým obsahem etylén-propylénového kaučuku, a lze proto předpokládat zastoupení této elastomerní fáze okolo 30%.

5.1 Vliv parametrů vstřikování na smrštění výstřiků z ABS Terluran HH-112

Zjištěné hodnoty **výrobního smrštění** zkušebních těles z materiálu *Terluran HH-112* se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,436–0,816% a 0,539–0,771% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,481–0,848% a v rozsahu 0,552–0,806% u tloušťky 4 mm. Zjištěné hodnoty výrobního smrštění se výrazně neliší od hodnot uváděných pro běžně používané typy ABS. Výrobní smrštění zkušebních těles z materiálu *Terluran HH-112* vykazuje v podélném i příčném směru se zvyšujícími se hodnotami technologických parametrů, teploty formy, teploty taveniny a dotlaku klesající tendenci. Tyto tendence jsou v souladu s teoretickými předpoklady, protože vyšší hodnoty všech těchto parametrů působí na zvýšení vnitřního tlaku v tvarové dutině formy, což vede ke snižování výrobního smrštění. Z naměřených hodnot výrobního smrštění je patrné, že anizotropie výrobního smrštění se více uplatňuje u výstřiků s tloušťkou stěny 2 mm, přičemž příčné výrobní smrštění je u všech vzorků větší, než smrštění podélné. Tento jev pravděpodobně způsobuje nižší teplotní roztažnost (smrštivost) polymeru ve směru orientace makromolekul. U výstřiků s tloušťkou 4 mm jsou rozdíly mezi podélným a příčným výrobním smrštěním jen velmi malé a větší tloušťka se ve většině případů projevuje i většími hodnotami smrštění. Je to zřejmě způsobeno menším zastoupením orientovaných částí výstřiku a větší relaxací orientace a vnitřního pnutí již v dutině formy vlivem pomalejšího ochlazování výstřiku. Větší hodnoty výrobního smrštění u tloušťky 2 mm než u tloušťky 4 mm byly naměřeny při kombinacích parametrů s nejnižšími hodnotami teploty taveniny a dotlaku, což je nejspíše způsobeno většími tlakovými ztrátami při plnění dutiny formy o menším průřezu a nižší viskozitou taveniny. Pro vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů vstřikování byla použita statistická metoda analýzy rozptylu (ANOVA). Výsledky ukázaly, že zdaleka největší vliv na podélné i příčné výrobní smrštění má vstřikovací tlak. Ostatní parametry mají též statisticky významný vliv na smrštění vzorků (hodnota *P-Value* je menší než 0,05). Skutečnost, že vliv teploty taveniny a formy u příčného smrštění je větší než u podélného a naopak vliv tloušťky je větší u podélného smrštění je vysvětlena výše popsaným vlivem teploty formy a taveniny na tlak v dutině formy resp. vlivem tloušťky stěny na orientaci makromolekul ve směru podélném na směr toku. Vliv většiny interakcí jednotlivých parametrů je též statisticky významný, pouze interakce *tloušťka* × *dotlak* má srovnatelný vliv jako hlavní efekty.

Dodatečné smrštění zkušebních těles bylo měřeno po dodatečné úpravě temperováním při teplotě 90°C po dobu 180 minut. Teplota temperace se nacházela v doporučeném intervalu teplot a byla přibližně o 20°C nižší než je teplota skelného přechodu zkoušeného materiálu *Terluran HH-112* tak, aby nebyla příčinou deformací

Diskuse výsledků

vzhledem k předpokládanému většímu procentuálnímu zastoupení míst s pomalejším ochlazováním ve výstřiku s tloušťkou 4 mm než u výstřiku s tloušťkou 2 mm.

Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) ukazují, že na dodatečné smrštění podélné i příčné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv tloušťka stěny výstřiku. Vliv dotlaku na dodatečné smrštění je mnohem menší než vliv tloušťky. Velmi malý vliv na dodatečné smrštění má teplota formy a teplota taveniny. Z interakcí vyhodnocovaných parametrů mají určitý vliv na dodatečné smrštění podélné *tloušťka × teplota taveniny* a *tloušťka × teplota formy* a na příčné *tloušťka × dotlak* a *tloušťka × teplota formy*. Určitý vliv mají tedy pouze interakce s parametrem s největším vlivem, kterým je tloušťka výstřiku. V podélném směru se v interakci s tloušťkou uplatňují parametry s větším vlivem na orientaci struktury výstřiku, teploty taveniny a formy. Tyto vlivy jsou však relativně malé vzhledem k vlivu samotné tloušťky.

Celkové smrštění sleduje podobné trendy vlivů parametrů jako u smrštění výrobního. Podélné i příčné celkové smrštění vykazuje se zvyšujícími se hodnotami všech technologických parametrů klesající tendenci. Vliv tloušťky výstřiku na celkové smrštění je poměrně malý. Jak už bylo uvedeno výše, je to dáno tím, že tento zvyšující se parametr působil na dodatečné smrštění opačně než na smrštění výrobní. Jelikož je celkové smrštění přibližně součtem smrštění výrobního a dodatečného, je parametrem s největším vlivem na celkové smrštění dotlak, který měl na výrobní i dodatečné smrštění snižující vliv. Z interakcí vyhodnocovaných parametrů má největší vliv na celkové smrštění interakce *tloušťka × dotlak*.

5.2 Vliv obsahu talku a parametrů vstřikování na smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610

5.2.1 Smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610MTU10 (10% talku)

Výrobní smrštění naměřené na zkušebních tělesech vstřikovaných z materiálu PP Kelburon 95610MTU10 (obsah talku 10%) nabývalo hodnot pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,633–1,129% a 1,068–1,531% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,764–1,274% a 1,081–1,512% u tloušťky 4 mm. Hodnota výrobního smrštění uváděná v materiálovém listu je 1,15 % a v rozsahu mnou naměřených hodnot leží přibližně uprostřed, kdy mezi minimální a maximální hodnotou výrobního smrštění byl naměřen rozdíl smrštění přibližně jedno procento. Pokud by při výrobě formy byla použita pro návrh rozměrů dutiny pouze střední hodnota uváděná v materiálovém listu, mohl by tento postup způsobit zejména u výstřiků větších rozměrů poměrně značné nepřesnosti v rozměrech výstřiku. Tento materiálový list také neposkytuje žádnou informaci o dodatečném smrštění výstřiků z tohoto materiálu. Naměřené hodnoty smrštění v rámci

experimentu tedy poskytují cenné informace o možných rozměrových změnách výstřiků vlivem proměnlivých parametrů vstřikování a dodatečných úprav.

U naměřeného výrobního smrštění se projeví větší rozdíly mezi smrštěním podélným a příčným u tloušťky 2 mm než u tloušťky stěny výstřiku 4 mm. Větší tloušťka stěny způsobuje pomalejší chladnutí a orientované makromolekuly mají více času na relaxaci, což tuto anizotropii smrštění snižuje. Největší vliv na výrobní smrštění měla tloušťka stěny výstřiku, kdy její zvýšení značně zvyšovalo i výrobní smrštění. Výrobní smrštění se zvyšovalo i s rostoucí teplotou formy, kdy vyšší teplota formy přispívá k vyššímu stupni krystalizace polymeru. Zvýšení dotlaku způsobovalo podle očekávání snižování hodnot výrobního smrštění. Zvyšující se teplota taveniny měla na výrobní smrštění pouze malý mírně snižující vliv. Z interakcí má u podélného smrštění statisticky významný vliv *teplota taveniny × dotlak*. U příčného smrštění má z interakcí větší vliv pouze *tloušťka × teplota taveniny*.

Dodatečné smrštění zkušebních těles bylo měřeno po dodatečné úpravě temperováním probíhající opět za podmínek simulujících proces lakování výstřiků, tedy při teplotě 90°C po dobu 180 minut. Naměřené hodnoty dodatečného smrštění se pohybovaly pro podélný směr u tloušťek 2 mm v rozsahu 0,100–0,273% a -0,215–0,126% u zkušebních těles tloušťky 4 mm. V příčném směru bylo výrobní smrštění pro dané podmínky vstřikování u tloušťek 2 mm naměřeno v rozsahu 0,129–0,271% a -0,215–0,135% u tloušťky 4 mm. Při měření dodatečného smrštění u zkušebních těles s tloušťkou 4 mm bylo zjištěno zvětšení rozměrů výstřiku v podélném i příčném směru a při dodatečném měření i zvětšení tloušťky stěny. Při vyhodnocování výsledků experimentu bylo toto narůstání vyjádřeno pomocí záporné hodnoty dodatečného smrštění. Mnou navržené vysvětlení tohoto jevu se zakládá na předpokladu vzniku oblastí výstřiku vyskytujících se v nerovnovážném stavu z hlediska měrného objemu (viz kap. 5, str.123-124). Podle této hypotézy by mělo být dodatečné narůstání rozměrů tím větší, čím větší by byl rozdíl mezi objemovým výrobním smrštěním PP matrice a dispergovaného EP kaučuku. Objemové smrštění PP matrice ovlivňuje nejvíce rychlost krystalizace a z toho plynoucí stupeň krystalinity. Měrný objem dispergovaného EP kaučuku lze, vzhledem k jeho větší kompresibilitě, ovlivnit hodnotou tlaku při kterém PP matrice dosáhne teploty T_m . Vyšší hodnoty dotlaku, zmenšováním objemového smrštění dispergované EPR fáze, zvětšují rozdíl mezi měrnými objemy matrice a dispergované fáze a vyrovnávají tak účinek vyššího dotlaku na větší dodatečné smrštění matrice v důsledku zpomalení a potlačení krystalizace a dezorientace ve výstřiku. Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že na dodatečné smrštění podélné i příčné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv tloušťka stěny. Ostatní parametry mají na dodatečné smrštění vliv menší, kromě vlivu dotlaku, který má vliv minimální pravděpodobně z výše popsaného důvodu. Vliv větší tloušťky stěny výstřiku a vyšší teploty formy působil na dodatečné smrštění opačně než na výrobní smrštění. Vliv teploty formy na dodatečné smrštění byl poměrně výrazný, protože

značně ovlivňuje rychlost krystalizace PP matrice. Vliv teploty formy na velikost dodatečného smrštění byl větší než vliv teploty taveniny, a proto byl pro další část experimentu (vliv obsahu talku na smrštění) vyřazen parametr *teploty taveniny*. Z interakcí jednotlivých parametrů mají určitý vliv na podélné i příčné dodatečné smrštění *tloušťka × teplota formy* a *tloušťka × teplota taveniny*, a u podélného také interakce *teplota taveniny × dotlak*. Vlivy jednotlivých parametrů a jejich interakcí na dodatečné smrštění jsou však relativně malé vzhledem k vlivu tloušťky stěny.

Celkové smrštění má podobné závislosti jako smrštění výrobní. Celkové smrštění se snižuje se zvyšujícími se hodnotami dotlaku a zvyšuje s větší tloušťkou stěny. Z výsledků analýzy rozptylu vyplývá, že na celkové smrštění podélné má z vyhodnocovaných parametrů největší vliv tloušťka stěny a velikost dotlaku. Na celkové smrštění příčné má největší vliv teplota taveniny a dotlak, vliv tloušťky stěny je menší. Zvyšující se teplota taveniny má na celkové smrštění vliv nejprve snižující a při vyšších teplotách zvyšující. Teplota formy nemá žádný vliv na celkové smrštění podélné ani příčné. Z interakcí vyhodnocovaných parametrů má největší vliv na celkové smrštění *tloušťka × dotlak* a u podélného celkového smrštění má vliv také interakce *teplota taveniny × dotlak*.

5.2.2 Vliv obsahu talku na smrštění výstřiků z PP Kelburon 95610

Výrobní smrštění v podélném i příčném směru s rostoucím obsahem talku plynule klesá. Je zde patrný výrazný vliv nízké teplotní roztažnosti a stlačitelnosti částicového plniva talku na snižování výrobního smrštění. Menší tloušťka stěny u všech koncentrací talku vždy způsobovala snížení výrobního smrštění. Zvýšení dotlaku za konstantní výše ostatních parametrů vede, v souladu s teorií, ke zmenšení výrobního smrštění pro všechny koncentrace talku téměř o konstantní hodnotu, avšak pro kombinace větší tloušťky a vyšší teploty formy je pokles velikosti smrštění nižší. Zvýšení teploty formy má oproti změně tloušťky vzorku či výšce dotlaku na výrobní smrštění malý vliv a způsobuje pouze jeho mírné narůstání u všech koncentrací talku.

S rostoucím obsahem talku se snižují i hodnoty **dodatečného smrštění**. Při vyšších koncentracích talku, přibližně od 20% talku, pravděpodobně dochází k maximalizaci jeho účinku na snižování dodatečného smrštění (v zkoumaném rozsahu koncentrací). Průběhy dodatečného smrštění v podélném a příčném směru nevykazují výrazné rozdíly u všech kombinací parametrů vstřikování. Naměřené výsledky dodatečného smrštění nabývaly záporných hodnot u tloušťek 4 mm při vyšším obsahu talku počínaje 5 % koncentrací při všech kombinacích teploty formy a dotlaku. Nízká teplota formy a nepřítomnost resp. nízký obsah talku jakožto nukleačního činidla způsobila, že výstřiky s 5 % talku vstřikované do formy o teplotě 40 °C a výstřiky bez plniv své rozměry po temperaci nezvětšovaly. K zvětšování rozměrů výstřiku (zápornému smrštění) pravděpodobně docházelo, dle hypotézy uvedené v kap. 5 na str.123-124, pouze v případech, kdy zvětšení

objemu dispergovaného EP kaučuku bylo větší než dodatečné smrštění vlivem dodatečné krystalizace PP matrice a dezorientace orientované struktury polymeru.

Průběh **celkového smrštění** je možno s malou nepřesností chápat jako prostý součet výrobního a dodatečného smrštění. Vzhledem k tomu, že trendy závislostí výrobního a dodatečného smrštění byly pro technologické parametry opačné, je vliv těchto parametrů na celkové smrštění menší než vliv procentuálního zastoupení talku, kde trend poklesu smrštění zůstal zachován u výrobního i dodatečného smrštění. Teplota formy má na celkové smrštění vliv z daných parametrů nejmenší.

Vzhledem k tomu, že vliv parametrů vstřikování na rozměry výstřiku se při výrobě nejčastěji vyhodnocuje krátce po vyrobení výstřiků, jsou pro využití v praxi zajímavé zejména výsledky závislostí výrobního a dodatečného smrštění. Z výsledků experimentu vyplývá, že na výrobní i dodatečné smrštění má největší vliv velikost tloušťky stěny. Druhý nejvýznamnější zjištěný vliv na smrštění má procento minerálního plniva – talku. Tato zjištěná skutečnost podporuje možnost využití změny koncentrace talku k účinnému ovlivňování hodnot výrobního i dodatečného smrštění výstřiků. Změnu koncentrace talku lze v případě hodnoceného materiálu snadno provést dávkováním *Masterbatche*. Pro konkrétní aplikace je však zároveň nutné brát v úvahu vliv koncentrace minerálního plniva na změnu mechanických vlastností, kdy zvýšené procento talku snižuje houževnatost a tažnost polypropylenů zejména za nižších teplot, jak bylo zjištěno zkouškou tahem a zkouškou vrubové houževnatosti.

5.2.3 Vliv obsahu talku na mechanické vlastnosti PP Kelburon 95610

Nejčastější aplikací materiálu *Kelburon 95610* jsou nárazníky automobilů. Na materiál, ze kterého se vyrábí nárazníky automobilů, jsou kladeny vysoké požadavky zejména na jeho schopnost pohlcovat nárazy i za nízkých teplot. *Kelburon 95610* obsahuje vysoký podíl EP kaučuku, což mu dodává vysokou houževnatost i za nízkých teplot. Mísením s částicovým minerálním plnivem se jeho houževnatost snižuje. Pro zjištění vlivu obsahu talku na houževnatost *Kelburonu 95610* byla provedena tahová zkouška a zkouška rázové a vrubové houževnatosti.

Při tahové zkoušce zkoušený materiál s různým procentuálním obsahem talku vykazoval výraznou mez kluzu, která byla zároveň i mezí pevnosti. Rostoucí obsah minerálního plniva snižoval hodnoty relativního prodloužení při přetržení i při maximální síle. Hodnota meze pevnosti nejvíce vzrostla v intervalu 0 až 5% talku, pro vyšší koncentrace se již téměř neměnila.

U zkoušek rázové a vrubové houževnatosti nedošlo při teplotách 0 a 23 °C k porušení zkušebního tělesa. U rázové zkoušky houževnatosti při teplotě -20°C také nedošlo k porušení zkušebního tělesa. Vrubová houževnatost měřená při teplotě -20°C se



s rostoucím % talku výrazně snižovala, nejvíce v intervalu 0 až 5% talku, pro vyšší koncentrace klesala mírněji.

Vyhodnocením tahové zkoušky bylo zjištěno, že zvětšující se obsah talku ve zkoušeném materiálu nemá velký vliv na jeho tuhost a pevnost. Zkouška rázové a vrubové houževnatosti při teplotě -20°C ukázala, že při nízkých teplotách má obsah talku významný vliv na houževnatost *Kelburonu 95610*. Při použití tohoto materiálu na díly, které budou používány při nízkých teplotách, doporučuji nepřekračovat patnáctiprocentní koncentraci talku.

6 ZÁVĚR

Předložená disertační práce na téma vlivu podmínek vstřikování na smrštění výstřiků z termoplastů je příspěvkem k problematice technologie vstřikování termoplastů v oblasti rozměrových změn během vstřikování a dodatečných úprav výstřiků.

Experimentální část práce je zaměřena na posouzení vlivu vybraných parametrů vstřikování na výrobní a dodatečné rozměrové změny výstřiků z termoplastů. Výrobní a dodatečné smrštění (po temperaci) je zde posuzováno na výstřicích tvaru desky tloušťky 2 a 4 mm o rozměrech 50×50 mm z vybraných materiálů používaných při výrobě lakovaných dílů pro automobilový průmysl. Temperace výstřiků (doba temperace 180 minut při teplotě 90°C) tvaru desky přibližně simulovala průběh teplot na reálném výstřiku během procesu lakování. Při posuzování vlivu jednotlivých parametrů vstřikování na smrštění výstřiků bylo třeba vzít do úvahy, že materiály vybrané pro experiment, ABS *Terluran HH-112* a PP *Kelburon 95610* plněný talkem, jsou pro zvýšení houževnatosti modifikovány elastomerem, a že se tedy jedná o materiály s vícefázovou strukturou. V rámci řešení disertační práce byl prokázán vliv podmínek vícefázové struktury těchto polymerů zejména na rozměrové změny výstřiků po dodatečné úpravě temperováním.

Výsledky práce lze shrnout do následujících bodů:

1. V teoretické části práce jsou shrnuty základní poznatky o vlivech na rozměrové změny výstřiků z termoplastů. Tyto vlivy jsou zde rozděleny na fyzikální, technologické a konstrukční. Z rozboru sledované problematiky vyplývá, že na velikost smrštění působí velké množství faktorů, které se vzájemně ovlivňují, což činí problematiku rozměrových změn výstřiků poměrně značně složitou.
2. V rámci experimentu byl pomocí faktorové analýzy rozptylu vypracován rozbor vlivu základních podmínek vstřikování na výrobní, dodatečné a celkové smrštění výstřiků tvaru zkušební desky pro vybrané, v technické praxi široce používané materiály (ABS, R-EMPP). Výsledky experimentu - vlivy hodnocených parametrů vstřikování - jsou přehledně zobrazeny pomocí souhrnných grafů (viz kap. 4, obr. 36-53).
3. Na základě vyhodnocení naměřených hodnot výrobního a dodatečného smrštění a rozboru možných vlivů a změn ve vícefázové struktuře materiálu výstřiku jsem navrhl hypotézu vysvětlující netypické závislosti dodatečného smrštění na parametrech vstřikování (viz kap. 5, str.123-124).
4. Výsledky numerické simulace procesu vstřikování výstřiků z ABS *Terluran HH-112* v rámci předložené práce ukázaly, že výrobní smrštění určené pomocí simulačního programu *STRIMFLOW* má větší hodnoty než získané experimentem s poměrně značnou odchylkou cca. 30%. Vzhledem k tomu, že tento simulační program nepočítá při výpočtech se změnami ve struktuře výstřiku nemůže být využit pro odhad dodatečného smrštění.

Vlastní přínosy práce

Nové poznatky práce přináší především v části zabývající se vlivy parametrů vstřikování a dodatečné úpravy teploty na dodatečné smrštění výstřiků.

Novým zjištěním, bylo zejména záporné dodatečné smrštění (narůstání rozměrů) výstřiků z materiálu PP *Kelburon 95610* plněného talkem po dodatečné úpravě temperováním, kdy byly naměřeny záporné hodnoty dodatečného smrštění u tlouštěk stěny výstřiku 4 mm, při vyšším obsahu talku od koncentrace 5 % a při všech kombinacích teploty formy a dotlaku s maximální hodnotou -0,18% při obsahu talku 25%, vyšší teplotě formy (80°C) a nižším dotlaku (30 MPa).

Naměřený a vyhodnocený vliv rostoucího dotlaku na snižování dodatečného smrštění po teplotě u výstřiků z materiálu ABS *Terluran HH-112* lze považovat také za nové zjištění, které doplňuje dosavadní znalosti o dodatečném smršťování výstřiků z ABS.

Tyto netypické průběhy dodatečných rozměrových změn u obou hodnocených materiálů si vyžádaly nový pohled na tuto problematiku a navržení jejich teoretického vysvětlení. Mnou navržená hypotéza, založená na vzniku vnitřního expanzního pnutí vlivem procesu vstřikování vícefázových polymerních materiálů, nabízí možné vysvětlení těchto netypických průběhů dodatečného smrštění (viz kap. 5, str.123-124).

Přínosy práce pro praxi

V současné době, kdy se zvyšuje podíl vstřikovaných dílů s dodatečnou úpravou lakováním je, jak ukazují i výsledky této práce, nezbytné věnovat zvýšenou pozornost znalosti závislosti dodatečného smrštění na rozdílných podmínkách vstřikování. Znalost těchto závislostí může výrazně přispět k omezení nepřesností při návrhu formy i při vlastní výrobě vstřikovaných dílů.

Zjištěné hodnoty dodatečného smrštění po teplotě, simulující průběh teplotní zátěže materiálu při lakovacím procesu, mohou být v praxi využity pro odhad následných rozměrových změn po lakování vstřikovaných dílů.

Výsledky práce je dále možné použít pro přesnější návrh dutin vstřikovacích forem a také ke korekcím rozměrů výstřiků změnou podmínek vstřikování popř. dávkování minerálního plniva. Výsledky mohou sloužit též jako podklady pro numerické simulace vstřikování.

Jsem si vědom, že tato disertační práce řeší jen určitou část problematiky rozměrových změn výstřiků. Při řešení práce nebyly např. uvažovány vlivy rychlosti plnění dutiny formy, doby dotlaku, druhu vtokového ústí, vlivu průběhu teploty výstřiků atd.. Vzhledem k zjištěným netypickým závislostem dodatečného smrštění na parametrech vstřikování u hodnocených materiálů, doporučuji pro další výzkum v této problematice zaměřit se na materiály s vícefázovou strukturou.



7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLOUCH J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. SNTL, Praha, 1986.
- [2] KREBS J.: Teorie zpracování nekovových materiálů. Skripta, TU Liberec, 2001.
- [3] BOWN J.: Injection Moulding of Plastic Components. McGRAW-HILL Book Company (UK) Limited, London, 1979.
- [4] Směrnice pro vstřikování konstrukčních termoplastů, Divize plasty - Bayer, Leverkusen, 1999.
- [5] JENSEN R.: Injection Moulding Technology. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1981.
- [6] SOVA M., KREBS J. A KOL.: Termoplasty v praxi – příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. Verlag Dashofer, svazek 2, Praha, 2000.
- [7] BRUMEL M. a kolektiv: Rozměrově přesné výrobky z plastů. Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 1977.
- [8] MEISSNER B., ZILVAR V.: Fyzika polymerů. SNTL, Praha, 1987.
- [9] VOHLÍDAL J.: Makromolekulární chemie. Skripta, UK Praha, 1995.
- [10] RAAB M., SOVA M., SLÍŽOVÁ M.: Význam morfologie polymerů pro pochopení technologických procesů, II. Aplikace. Plasty a kaučuk., 30, 354–359, č.12, 1993.
- [11] JOONG-HWAN CHOI, JONG-HOON RYU, SANG YONG KIM: Storage Modulus of Polybutadiene Core in Acrylonitrile–Butadiene–Styrene Polymers with Different Degrees of Grafting. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 81, 924-930 (2001), John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [12] CAPT L., KAMAL M.R.: The Pressure-Volume-Temperature Behavior Polyethylene Melts. Intern. Polymer Processing XV (2000), Hanser Publishers, Munich, 2000.
- [13] PANTANI R., TITOMANLIO G.: Description of PVT Behavior of an Industrial Polypropylene–EPR Copolymer in Process Conditions. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 81, 267–278 (2001), John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [14] ŠTĚPEK J., ZELINGER J., KUTA A.: Technologie zpracování a vlastnosti plastů. SNTL, Praha, 1989.
- [15] RYBNÍKÁŘ F.: Makromolekulární chemie. Skripta, VUT Brno, FT Zlín, 2000.
- [16] KOLOUCH J.: Strojní součásti z plastů. SNTL, Praha, 1981.
- [17] MALLOY R. A.: Plastic Part Design For Injection Molding. Carl Hanser Verlag, Munich, 1994.
- [18] ŠAFARÍK M.: Nástroje pro tváření kovů a plastů. VŠST Liberec, Liberec 1991.



- [19] SHAY R.M., POSLINSKI A.J., FAKHREDDINE Y.: Estimating Linear Shrinkage of Semicrystalline Resins from Pressure-Volume-Temperature (PVT) Data.
- [20] STEVENSON J. F.: Innovation in polymer processing: molding. Carl Hanser Verlag, Munich, 1996.
- [21] ZUIDEMA H., PETERS G.W.M., MEIJER H.E.H.: Influence of Cooling Rate on PVT-Data of Semicrystalline Polymers. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 82, 1170-1186 (2001), John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [22] VITÁSEK E.: Numerické metody. SNTL, Praha, 1987.
- [23] MATRADIVISION : STRIMFLOW updating training manuál, France, 1995.
- [24] AUSPERGER A.: Simulace procesu vstřikování s využitím systému STRIM100. Diplomová práce, TU Liberec 1998.
- [25] Materiálové listy. Internetové stránky fy. BASF. <http://www.BASF.com>
- [26] <http://galleries.com/minerals/silicates/talc/talc.htm>
- [27] <http://www.luzenac.com/talc.html>
- [28] Materiálové listy Internetové stránky fy. DSM. <http://www.DSM.com>
- [29] JANSEN K.M.B., VAN DIJK D.J., HUSSELMAN M.H.: Effect of Processing Conditions on Shrinkage in Injection Molding. Polymer Engineering and Science, May 1998, Vol. 38, 838–845, No. 5.
- [30] TAO C. CHANG: Shrinkage Behavior and Optimization of Injection Molded Parts Studied by the Taguchi Method. Polymer Engineering and Science, May 2001, Vol. 41, 703–710, No. 5.
- [31] GIPSON P.M., GRELLE P.F., SALAMON B.A.: The Effect of Process Conditions, Nominal Wall Thickness, and Flow Length on the Shrinkage Characteristics of Injection Molded Polypropylene. Journal of Injection Molding Technology, September 1999, Vol. 3, No. 3.
- [32] ŠOTOLOVÁ I.: Smrštění plastových lakovaných nárazníků. Diplomová práce, TU Liberec, 2000.
- [33] ELISOVÁ L.: Vliv obsahu minerálního plniva na smrštění výstřiků z polypropylenu. Diplomová práce, TU Liberec, 2002.
- [34] HARTIG F.: Vliv podmínek vstřikování na výrobní a dodatečné smrštění výstřiků z ABS. Diplomová práce, TU Liberec, 2002.
- [35] ČSN EN ISO 294-4: Plasty, Vstřikování zkušebních těles z termoplastů, část 4: Stanovení smrštění. ČNI, Praha, 1999
- [36] KOSCHIM F.: Statgraphics, Grada a.s., Praha 1992
- [37] ČSN EN ISO 527-2: Plasty, Stanovení tahových vlastností. ČNI, Praha, 1999.
- [38] ČSN 64 0612: Stanovení rázové a vrubové houževnatosti plastických hmot metodou Charpy. ÚNM, Praha, 1969.



8 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list fy. *BASF* materiálu *ABS Terluran HH-112*
- Příloha 2 Materiálové listy fy. *DSM* materiálů *PP Kelburon 95610*
a *Kelburon 95610CSU10*
- Příloha 3 Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 527-2/1A/50 materiálu *PP Kelburon 95610*
s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %
- Příloha 4 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti dle ČSN 64 0612 materiálu
PP Kelburon 95610 s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %
- Příloha 5 Vstupní materiálová data *ABS Terluran HH-112* pro simulační výpočty
programu *STRIMFLOW*
- Příloha 6 Vyhodnocení objemového smrštění výstřiku z *ABS Terluran HH-112*
v příslušném směru z výsledků simulace programu *STRIMFLOW*
- Příloha 7 Seznam publikací

Terluran® HH-112

(ABS (TP), BASF - 2001-10-15)

Vlastnosti*jednotky typické hodnoty metoda stanovení**Specifické vlastnosti :**

Hustota :	kg.m ⁻³	1060	ISO 1183
Index toku taveniny :			ISO 1133
při 220 °C a 10 kg	cm ³ /10min	6	

Mechanické vlastnosti :**Houževnatost dle Charpyho :**

rázová při +23 °C	kJ.m ⁻²	170	ISO 179/1eU
rázová při -30 °C	kJ.m ⁻²	120	ISO 179/1eU
s vrubem při +23 °C	kJ.m ⁻²	12	ISO 179/1eA
s vrubem při -30 °C	kJ.m ⁻²	5	ISO 179/1eA

Zkouška tahem :

mez kluzu	N.mm ⁻²	58	ISO 527-1/-2
prodloužení na mezi kluzu	%	3,1	ISO 527-1/-2
prodloužení na mezi pevnosti	%	8	ISO 527-1/-2

Tepelné vlastnosti :

Tepelná odolnost dle Vicata při 50N a 50°C/h :	°C	112	ISO 306
Souč. teplotní délkové roztažnosti :	E-4/°C	0,9	ISO 11359-1/-2

KELBURON 95610 (Polypropylene Reactor Elastomer - Modified)

<u>vlastnosti</u>	<u>jednotky SI</u>	<u>typické hodnoty</u>	<u>metoda stanovení</u>
Specifické vlastnosti :			
Hustota :	kg.m ⁻³	900	ISO 1183
Index toku taveniny :			ISO 1133
při 230 °C a 21,6 N	dg.min ⁻¹	6	
při 230 °C a 50 N	dg.min ⁻¹	28	
Souč. teplotní délkové roztlačnosti :	.10 ⁻⁶ K ⁻¹	120	ASTM D696
Výrobní smrštění :	%	1,5	DSM metoda
Mechanické vlastnosti :	1)		
Houževnatost dle Charpyho :			ISO 179
rázová při +23 °C	2) kJ.m ⁻²	N.B.	
vrubová při -40 °C	kJ.m ⁻²	N.B.	
Houževnatost dle Izoda :	3)		ISO 180
s vrubem při +23 °C	kJ.m ⁻²	N.B.	
s vrubem při 0 °C	kJ.m ⁻²	N.B.	
s vrubem při -20 °C	kJ.m ⁻²	15	
s vrubem při -40 °C	kJ.m ⁻²	5	
Zkouška tahem :	4)		ISO R527
mez kluzu	N.mm ⁻²	18	
mez pevnosti	N.mm ⁻²	20	
tažnost	%	500	
Zkouška ohybem :			ASTM D790
modul pružnosti v ohybu	N.mm ⁻²	800	
Tvrdost Shore D :	-	58	ISO 868
Tepelné vlastnosti :			
Tepelná odolnost dle Vicata při 10N :	°C	130	ISO 306/A

- 1) stanoveno na zkušebním tělese
 2) vrub tvaru U N.B. : neporušeno
 3) s vrubem 0,1" N.B. : neporušeno
 4) rychlost deformace 50 mm.min⁻¹

KELBURON 95610CSU10 (Polypropylene Reactor Elastomer - Modified)
mineral filled

<i>vlastnosti</i>	<i>jednotky SI</i>	<i>typické hodnoty</i>	<i>metoda stanovení</i>
Specifické vlastnosti :			
Hustota :	kg.m ⁻³	960	ISO 1183
Index toku taveniny :			ISO 1133
při 230 °C a 21,6 N	dg.min ⁻¹	5	
při 230 °C a 50 N	dg.min ⁻¹	22	
Souč. teplotní délkové roztlačnosti :	.10 ⁻⁶ K ⁻¹	80	ASTM D696
Výrobní smrštění :	%	1,15	DSM metoda
Mechanické vlastnosti : 1)			
Houževnatost dle Charpyho :			ISO 179
rázová při +23 °C	2) kJ.m ⁻²	N.B.	
vrubová při -40 °C	kJ.m ⁻²	N.B.	
Houževnatost dle Izoda : 3)			
s vrubem při +23 °C	kJ.m ⁻²	N.B.	ISO 180
s vrubem při 0 °C	kJ.m ⁻²	N.B.	
s vrubem při -20 °C	kJ.m ⁻²	9	
s vrubem při -40 °C	kJ.m ⁻²	4	
Zkouška tahem : 4)			
mez kluzu	N.mm ⁻²	17	ISO R527
mez pevnosti	N.mm ⁻²	19	
tažnost	%	500	
Zkouška ohybem :			
modul pružnosti v ohybu	N.mm ⁻²	1000	ASTM D790
Tvrdoost Shore D :			
	-	59	ISO 868
Tepelné vlastnosti :			
Tepelná odolnost dle Vicata při 10N :	°C	120	ISO 306/A

1) stanoveno na zkušebním tělese

2) vrub tvaru U N.B. : neporušeno

3) s vrubem 0,1" N.B. : neporušeno

4) rychlost deformace 50 mm.min⁻¹, tloušťka zkušebního tělíska 3,2 mm

Příloha 3 str.1/2 Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 527-2/1A/50 materiálu
PP Kelburon 95610 s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %

Zápis o zkoušce

Materiál	PP Kelburon 9561095610 s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %
Zkušební tělesa	zkušební tělesa typu 1A
Podmínky kondicionace	24 hodin, teplota 23°C, relativní vlhkost 55%
Počet zkoušených těles	10 ks pro každou koncentraci talku
Zkušební zařízení	TIRA TEST 2300
Rychlost posuvu příčnicku	50 mm.min ⁻¹
Datum zkoušky	22.4.2002
Použitá norma	ČSN EN ISO 527-2/1A/50

Tabulky výsledků zkoušky tahem, Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%

Kelburon 95610 (talek 0%)					
č. vzorku	F_{max} [N]	σ_M [Mpa]	σ_B [%]	σ_M [%]	A_0 [mm ²]
1	675	17,05	518,74	10,01	39,59
2	683	17,30	540,54	10,60	39,49
3	673	17,03	502,57	10,48	39,53
4	690	17,49	536,19	10,52	39,45
5	685	17,32	510,42	10,71	39,55
6	681	17,26	525,84	10,12	39,45
7	676	17,09	512,63	10,46	39,55
8	684	17,30	529,55	10,13	39,53
9	686	17,39	524,86	10,15	39,45
10	684	17,26	528,76	10,39	39,63
aritm. průměr	681,70	17,25	523,01	10,36	39,52
směr. odchylka	4,360	0,116	9,536	0,204	0,05

Kelburon 95610 + talek 5%					
č. vzorku	F_{max} [N]	σ_M [Mpa]	σ_B [%]	σ_M [%]	A_0 [mm ²]
1	716	17,96	468,28	9,42	39,86
2	708	17,80	475,71	10,05	39,78
3	716	17,92	482,36	9,47	39,96
4	715	17,89	476,50	10,10	39,96
5	710	17,77	474,50	9,60	39,96
6	714	17,82	480,56	9,71	40,06
7	720	18,05	486,63	10,10	39,88
8	708	17,75	475,32	9,80	39,88
9	710	17,77	465,35	9,41	39,96
10	713	17,88	477,99	9,64	39,88
aritm. průměr	713,00	17,86	476,32	9,73	39,92
směr. odchylka	3,200	0,080	4,488	0,226	0,06

Příloha 3 str.2/2 Zkouška tahem dle ČSN EN ISO 527-2/1A/50 materiálu
PP Kelburon 95610 s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %

Tabulky výsledků zkoušky tahem, Kelburon 95610 + talek 0-5-10-15-25%
(pokračování)

Kelburon 95610 + talek 10%					
č. vzorku	F_{max} [N]	σ_M [Mpa]	ε_B [%]	ε_M [%]	A_0 [mm ²]
1	719	18,08	220,28	9,42	39,76
2	723	18,10	215,12	9,53	39,94
3	716	17,99	206,36	9,45	39,80
4	723	18,15	215,13	9,58	39,84
5	723	18,10	194,82	9,36	39,94
6	724	18,21	231,80	9,70	39,76
7	724	18,15	200,71	9,61	39,90
8	726	18,18	232,13	9,31	39,94
9	716	17,92	223,85	9,34	39,96
10	713	17,90	216,68	10,03	39,84
aritm. průměr	720,70	18,08	215,69	9,53	39,87
směr. odchylka	3,760	0,085	9,260	0,158	0,07

Kelburon 95610 + talek 15%					
č. vzorku	F_{max} [N]	σ_M [Mpa]	ε_B [%]	ε_M [%]	A_0 [mm ²]
1	714	17,86	100,94	9,19	39,98
2	709	17,77	116,30	8,75	39,90
3	703	17,66	99,07	9,36	39,80
4	728	18,25	113,35	8,73	39,90
5	715	17,88	116,21	9,88	39,98
6	710	17,76	108,56	8,86	39,98
7	726	18,20	98,12	9,26	39,90
8	714	17,92	120,10	9,14	39,84
9	708	17,79	103,20	9,32	39,80
10	703	17,66	115,85	9,31	39,80
aritm. průměr	713,00	17,87	109,17	9,18	39,89
směr. odchylka	6,400	0,149	7,192	0,248	0,06

Kelburon 95610 + talek 25%					
č. vzorku	F_{max} [N]	σ_M [Mpa]	ε_B [%]	ε_M [%]	A_0 [mm ²]
1	712	17,84	61,76	8,49	39,91
2	711	17,77	73,59	8,66	40,01
3	710	17,75	72,02	8,68	40,01
4	716	17,93	62,01	8,65	39,93
5	721	18,06	58,96	8,64	39,93
6	715	17,86	68,52	8,68	40,03
7	718	17,95	51,16	8,65	40,01
8	722	18,08	60,04	8,46	39,93
9	717	17,91	56,94	8,47	40,03
10	718	17,96	65,00	8,62	39,97
aritm. průměr	716,00	17,91	63,00	8,60	39,98
směr. odchylka	3,200	0,085	5,426	0,076	0,04

Příloha 4 str.1/1 Zkouška rázové a vrubové houževnatosti dle ČSN 64 0612 materiálu
PP Kelburon 95610 s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %

Zápis o zkoušce

Materiál	PP Kelburon 9561095610 s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %
Zkušební tělesa	zkušební tělesa č.2 ($l \times h \times b = 80 \times 10 \times 4$ mm) vrub tvaru U ($b_k = 2$ mm, $h_k = 6,7$ mm).
Podmínky kondicionace	24 hodin, teplota 23°C, relativní vlhkost 55%
Zkušební teplota	0°C (kondiciace: 24 hod. tepl. 23°C, 12 hod. tepl. 0°C) -20°C (kondiciace: 24 hod. tepl. 23°C, 12 hod. tepl. -20°C)
Počet zkoušených těles	16 ks pro každou koncentraci talku a zkušební teplotu
Zkušební zařízení	kladivo Charpy, fa. Feinmechanik Ralf Kögl
Rychlost rázu	2,9 m.s ⁻¹
Datum zkoušky	27.4.2002
Použitá norma	ČSN 64 0612

Tabulka výsledků zkoušky rázové a vrubové houževnatosti materiálu
PP Kelburon 9561095610 s obsahem talku 0, 5, 10, 15, 25 %

Zkušební teplota	23°C		0°C		-20 °C			
[%] talku	A _K [J]	a _K [kJ.m ⁻²]	A _K [J]	a _K [kJ.m ⁻²]	A _K [J]	σ	a _K [kJ.m ⁻²]	σ
0	N.B.	N.B.	N.B.	N.B.	1,65	0,012	61,57	0,21
5	N.B.	N.B.	N.B.	N.B.	0,80	0,010	29,85	0,18
10	N.B.	N.B.	N.B.	N.B.	0,65	0,011	24,25	0,19
15	N.B.	N.B.	N.B.	N.B.	0,55	0,008	20,52	0,15
25	N.B.	N.B.	N.B.	N.B.	0,30	0,009	11,19	0,17

Poznámka: Zkratka N.B. značí, že zkušební vzorek nebyl porušen.

Příloha 5 str.1/2 Vstupní materiálová data ABS *Terluran HH-112* pro simulační výpočty programu *STRIMFLOW*

Tabulka materiálových dat ABS *Terluran HH-112* použitých pro numerickou simulaci

Měrné teplo	$1,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost	$0,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Délková teplotní roztažnost	$0,9 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Hustota taveniny při střední T_i	$1,06 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Střední T_i	$260 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota zatuhnutí toku taveniny (No-flow temp.)	$155 \text{ }^\circ\text{C}$
Poissonovo číslo	0,35
Modul pružnosti v tahu	2800 MPa

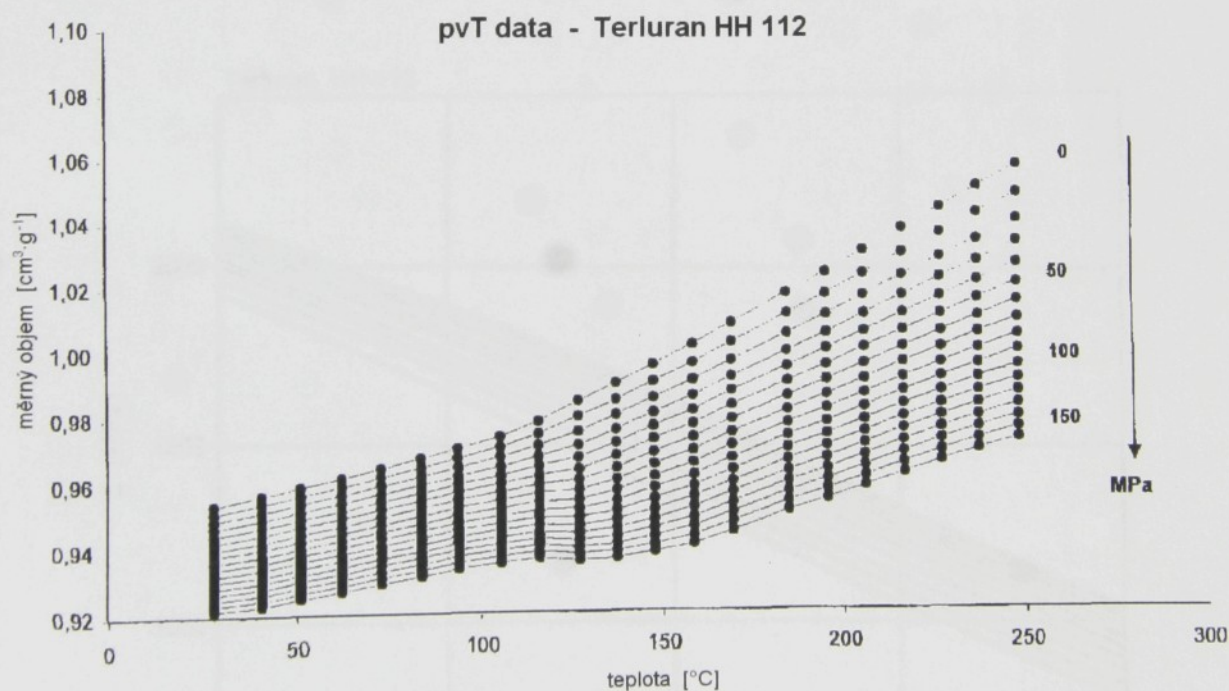


Diagram p-v-T pro ABS *Terluran HH 112*

Příloha 5 str.2/2 Vstupní materiálová data ABS *Terluran HH-112* pro simulační výpočty programu *STRIMFLOW*

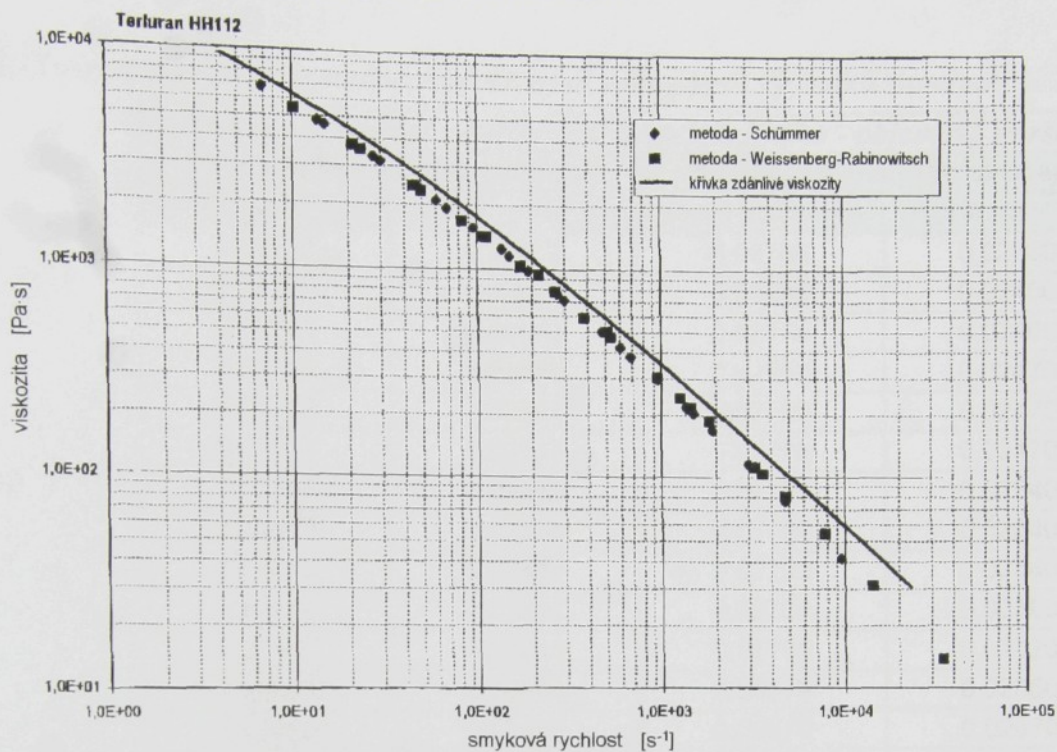


Diagram závislosti viskozity [Pa·s] na smykové rychlosti [s⁻¹] ABS *Terluran HH 112*

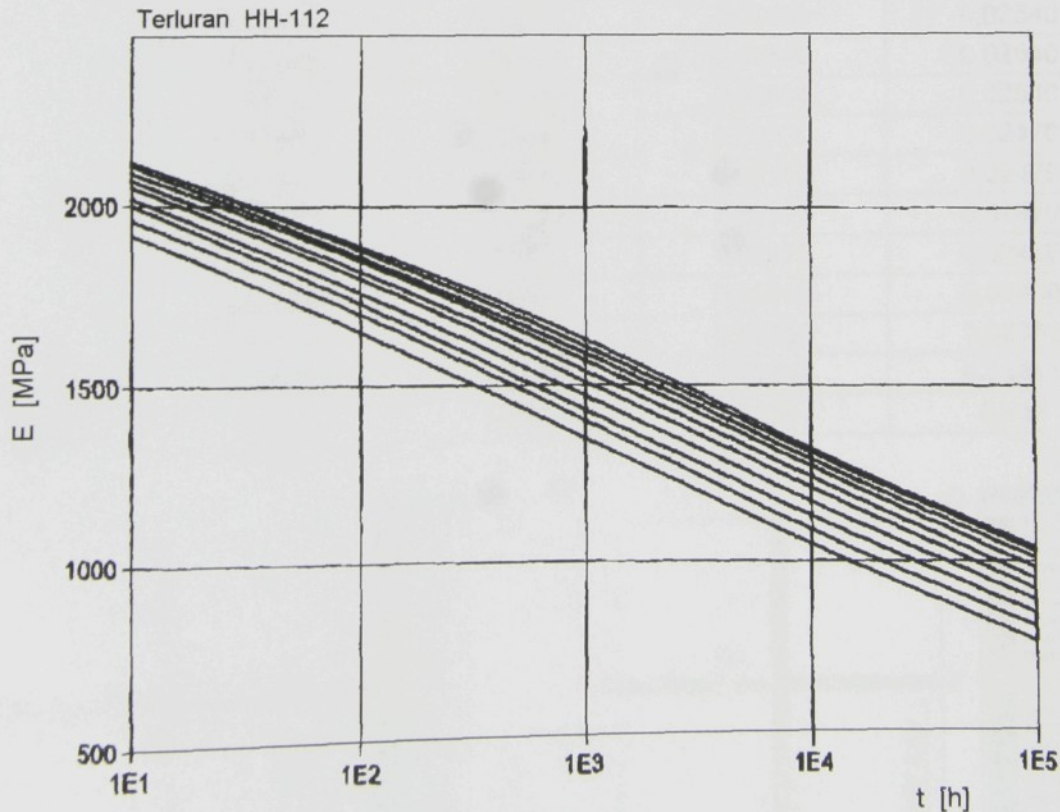
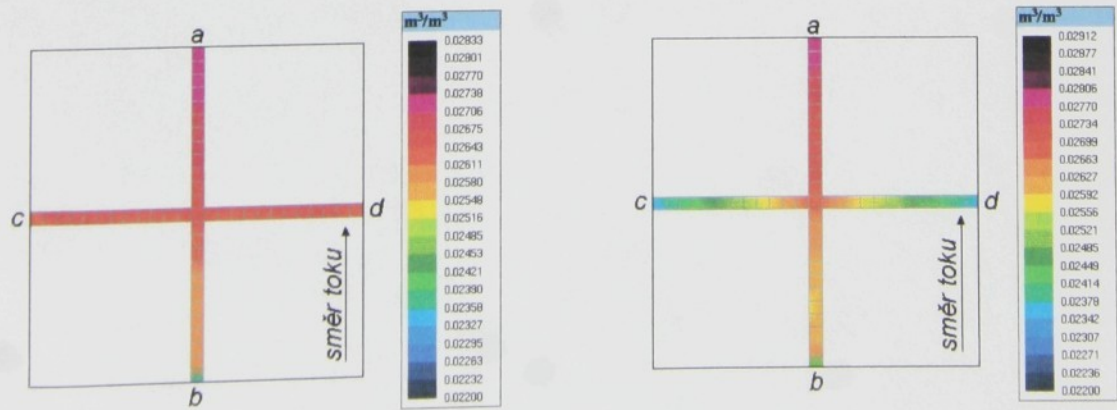


Diagram relaxace modulu pružnosti tahu E [MPa] v závislosti na čase t [h] pro materiál ABS *Terluran HH 112*

Tabulka hodnot objemového smrštění odečtených z diagramů výsledků simulace

Vyhodnocení simulace vstřikování zkušebních těles - objemové smrštění			
Simulace bez analýzy chlazení		Simulace s analýzou chlazení	
podél (úsek a-b)	napříč (úsek c-d)	podél (úsek a-b)	napříč (úsek c-d)
0,02720	0,02632	0,02785	0,02360
0,02720	0,02632	0,02785	0,02400
0,02720	0,02643	0,02770	0,02400
0,02720	0,02643	0,02750	0,02470
0,02700	0,02643	0,02750	0,02470
0,02675	0,02643	0,02700	0,02470
0,02675	0,02643	0,02700	0,02540
0,02675	0,02625	0,02700	0,02540
0,02675	0,02632	0,02700	0,02540
0,02650	0,02632	0,02700	0,02590
0,02650	0,02643	0,02700	0,02620
0,02650	0,02650	0,02670	0,02650
0,02650	0,02650	0,02670	0,02670
0,02650	0,02650	0,02650	0,02650
0,02610	0,02643	0,02630	0,02620
0,02610	0,02632	0,02630	0,02590
0,02580	0,02632	0,02630	0,02540
0,02580	0,02625	0,02600	0,02540
0,02580	0,02643	0,02600	0,02540
0,02580	0,02643	0,02590	0,02470
0,02580	0,02643	0,02590	0,02470
0,02580	0,02643	0,02575	0,02470
0,02580	0,02643	0,02575	0,02400
0,02580	0,02632	0,02590	0,02400
0,02500	0,02632	0,02556	0,02360
$S_V [m^3/m^3]$	0,02636	0,02664	0,02511
$S_L [\%]$	0,886	0,887	0,844



Diagramy s úseky výstřiku vymezené referenčními body pro určení středního výrobního objemového smrštění $S_V [m^3/m^3]$, vlevo bez použití a vpravo s použitím analýzy chlazení

SEZNAM PUBLIKACÍ

- [1] HISEM P.: Dodatečné smrštění výstřiků z termoplastů. Acta Mechanica Slovaca 2/2002, Sborník mezinárodní konference „PRO-TECH-MA“, Košice 2002, s.151-156, ISSN 1335-2393
- [2] HISEM P.: Vliv podmínek vstřikování na smrštění termoplastů. In. Sborník mezinárodní konference "Technológia 2001", Bratislava 2001, s. 53-56, ISBN 80-227-1567-0.
- [3] HISEM P., ŠOLCOVÁ A.: Smrštění plastových lakovaných nárazníků. In. Sborník mezinárodní konference "Plastko 2001", Zlín 2001, ISBN 80-7318-009-X, s. 31.
- [4] HISEM P., LENFELD P., SŮRA R.: Teplotní pole na povrchu velkoplošného výstřiku. In. Sborník 8. mezinárodní konference „Vstřikování plastů“, Praha 2000, s. 70 – 77.
- [5] HISEM, P., AUSPERGER A.: Aplikace plastů na vnější díly karosérie automobilů. In Sborník mezinárodní konference „Materiálové inženýrství“, Liberec 2000, s.62, ISBN 80-7083-404-8.
- [6] AUSPERGER A., HISEM, P.: Ověřování přesnosti simulace vstřikování Plastů. In. Sborník mezinárodní konference "Juniormat 2001", Brno 2001
- [7] AUSPERGER A., HISEM P., RADOSTA T.: Zbytková pnutí ve vstřikovaných výrobcích v automobilovém průmyslu. In. Sborník mezinárodní konference „Materiálové inženýrství“, Liberec 2000, s. 7 - 13, ISBN 80-7083-404-8.
- [8] ŠOLCOVÁ A., HISEM P.: Hodnocení plastových dílů automobilů. In.: Sborník mezinárodní konference " Technológia' 99", Bratislava, září 1999, s. 201-204, ISBN 80-227-1255-8.

Životopis

Jméno: Pavel
Příjmení: Hisem
Datum narození: 5. 7. 1969
Trvalý pobyt: Rumjancevova 514/23
Liberec 1, 460 01

Zaměstnání: listopad 1994 - červen 1995 Technik, katedra tváření a plastů,
Fakulta strojní, TU v Liberci
červenec 1995 - červen 2002 Odborný asistent, katedra strojírenské
technologie, oddělení tváření kovů a plastů,
Fakulta strojní, TU v Liberci
srpen 2002 – září 2002 Technolog, Peguform Bohemia, a.s.,
únor 2003 – současnost Technik, katedra strojírenské technologie,
oddělení tváření kovů a plastů,
Fakulta strojní, TU v Liberci

Vzdělání: 1995 - TU v Liberci, externí doktorské studium, katedra strojírenské
technologie, zaměření tváření kovů a plastů
Státní doktorská zkouška složena 16. 10. 2000
1990 - 1995 TU v Liberci, inženýrské studium obor strojírenská technologie,
zaměření tváření kovů a plastů
Studium ukončeno státní zkouškou 20. 6. 1995
1983 - 1988 Střední odborné učiliště železniční Nymburk

Členství v odborných společnostech:

Česká společnost pro nové materiály a technologie

Jazyk: angličtina, ruština

Práce s počítačem: Microsoft Windows, Microsoft Office 2000, CAD Catia

Pedagogická činnost:

- Přednášky: Strojírenské technologie (1. ročník, FM)
Průřez strojírenskými technologiemi (4. ročník, HF)
- Cvičení: Technologie tváření kovů a plastů (2. ročník, FS)
Teorie zpracování nekovových materiálů (4. ročník, FS)
Strojírenské technologie (1. ročník, FM)
Průřez strojírenskými technologiemi (4. ročník, HF)

Konzultant celkem 6 diplomových prací se zaměřením na zpracování plastů.

Spolupráce na výzkumné činnosti katedry:

Spoluúčast na řešení grantových úkolů: Výzkumný záměr č. J11/98:242100002

FRVŠ 1488/2002

Spoluúčast na hospodářské činnosti katedry:

Řešitel 18 výzkumných zpráv se zaměřením na hodnocení pevnosti lepených spojů a hodnocení mechanických vlastností polymerních materiálů určených pro automobilový průmysl.

Výzkum prováděn pro firmy:

1. ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav
2. Peguform Bohemia a.s. Liberec
3. Lukov Plast s.r.o. Český Dub
3. FUCHS EUROPE Schmierstoffe GmbH & Co. KG
4. PFINDER GmbH & Co.
5. Wilhelm Dietz GmbH & Co. KG
6. Zeller Gmelin GmbH & Co.
7. Shell Europe Oil Products
8. Quaker Chemical B.V.

Přehled publikací

- [1] HISEM P.: Dodatečné smrštění výstřiků z termoplastů. Acta Mechanica Slovaca 2/2002, Sborník mezinárodní konference „PRO-TECH-MA“, Košice 2002, s.151-156, ISSN 1335-2393
- [2] HISEM P.: Vliv podmínek vstřikování na smrštění termoplastů. In. Sborník mezinárodní konference "Technológia 2001", Bratislava 2001, s. 53-56, ISBN 80-227-1567-0.
- [3] HISEM P., ŠOLCOVÁ A.: Smrštění plastových lakovaných nárazníků. In. Sborník mezinárodní konference "Plastko 2001", Zlín 2001, ISBN 80-7318-009-X, s. 31.
- [4] HISEM P., LENFELD P., SŮRA R.: Teplotní pole na povrchu velkoplošného výstřiku. In. Sborník 8. mezinárodní konference „Vstřikování plastů“, Praha 2000, s. 70 – 77.
- [5] HISEM, P., AUSPERGER A.: Aplikace plastů na vnější díly karosérie automobilů. In Sborník mezinárodní konference „Materiálové inženýrství“, Liberec 2000, s.62, ISBN 80-7083-404-8.
- [6] AUSPERGER A., HISEM, P.: Ověřování přesnosti simulace vstřikování Plastů. In. Sborník mezinárodní konference "Juniormat 2001", Brno 2001
- [7] AUSPERGER A., HISEM P., RADOSTA T.: Zbytková pnutí ve vstřikovaných výrobcích v automobilovém průmyslu. In. Sborník mezinárodní konference „Materiálové inženýrství“, Liberec 2000, s. 7-13, ISBN 80-7083-404-8.
- [8] ŠOLCOVÁ A., HISEM P.: Hodnocení plastových dílů automobilů. In.: Sborník mezinárodní konference " Technológia' 99", Bratislava, září 1999, s. 201-204, ISBN 80-227-1255-8.