

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



TEPLOTNÍ POLE VE VSTŘIKOVACÍCH FORMÁCH

Disertační práce

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071357

Ing. Petr Lenfeld

1997

KSP

do UK 20.8.94

TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 08

Strojírenská technologie

zaměření

tváření kovů a plastů

katedra tváření a plastů

Teplotní pole ve vstřikovacích formách

Ing. Petr LENFELD

Školitel: Doc.Ing. Josef Krebs, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 138

Počet obrázků 90

Počet tabulek 43

Počet výkresů 2

Počet příloh 2

ANOTACE

Téma práce: Teplotní pole ve vstřikovacích formách.

Práce pojednává o sledování teplotních polí ve vybrané vstřikovací formě pomocí experimentálního měření a pomocí simulace s vyhodnocením účinků jednotlivých parametrů (teplota taveniny, teplota temperačního média, rychlost proudění temperačního média a doby vstřikovacího cyklu) na průběh teplotních polí a jejich změnu. K měření bylo nutné sestavit a odzkoušet potřebné zařízení a odladit vyhodnocovací software. Bylo provedeno velké množství měření, které by mělo pomoci udělat si představu o vlivu jednotlivých parametrů a tím tedy optimalizovat problémy při konstrukci nástroje a volbě zpracovatelských parametrů.

SYNOPSIS

Topic of this work: Temperature fields in injection moulds

The work deals with measuring non - stationary temperature fields in the chosen injection mould. It consists of experimental methods and simulation, it is of interest to observe the effect of each parameters like fluid temperature, fluid velocity, injection time, mold temperature on fluctuation of temperature fields. It was necessary to develop and construct efficient device and determine convenient output software. The experimental data obtained by these methods, describes the influence of each parameters and thus helps to optimize the problems of construction and choose technological features.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	6
1. ÚVOD	8
2. TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1. Technologie vstřikování	10
2.2. Tepelné děje při vstřikování	12
2.2.1. Vliv teploty taveniny na kvalitu výstřiku	13
2.2.2. Vliv teploty formy na kvalitu výstřiku	14
2.3. Tepelné poměry ve vstřikovací formě	15
2.3.1. Vzájemný styk mezi výstřikem a formou	22
2.3.2. Přenos tepla uvnitř vstřikovací formy	25
2.3.3. Přenos tepla mezi formou a temperačním systémem	26
2.4. Popis a rozdělení teplotního pole	30
2.4.1. Rovnice vedení tepla	31
2.4.2. Stacionární teplotní pole	32
2.4.3. Nestacionární teplotní pole	32
2.4.4. Počáteční a okrajové podmínky	33
2.5. Metody řešení teplotních polí	35
2.5.1. Analytický způsob řešení	36
2.5.2. Numerický způsob řešení	36
2.5.3. Experimentální způsob řešení	39
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
3.1. Použité zařízení pro měření a sledování teplotních polí	40
3.1.1. Použité termočlánky	41
3.1.2. Karta AD 18 s převodníkem	43
3.2. Vstřikovací forma	45
3.3. Rozbor umístění termočlánků ve vstřikovací formě	47
3.4. Použitý termoplast	50
3.5. Popis provedených měření teplotních polí ve vstřikovací formě	50
3.6. Vstřikovací cyklus	53
3.7. Soubor naměřených průběhů teplotních polí ve vstřikovací formě	53
3.8. Vyhodnocení naměřených hodnot	79
3.8.1. Vyhodnocení vlivu teploty taveniny na průběh teplotních polí	85
3.8.2. Vyhodnocení vlivu doby vstřikovacího cyklu na průběh teplotních polí	95
3.8.3. Vyhodnocení vlivu temperačního systému na průběh teplotních polí	100

3.8.3.1. Vyhodnocení vlivu druhu proudění temperačního média na průběh teplotních polí	100
3.8.3.2. Vyhodnocení vlivu teploty temperačního média na průběh teplotních polí	106
4. MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ VE VSTŘIKOVACÍ FORMĚ NA PC POMOCÍ PROGRAMU MKP	110
5. DISKUSE VÝSLEDKŮ	126
5.1. Hodnocení dosažených výsledků	126
5.2. Vyhodnocení mechanických vlastností pro shodné parametry vstřikování	130
6. ZÁVĚR	134
LITERATURA	136

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a_1	- součinitel teplotní vodivosti taveniny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
a_2	- součinitel teplotní vodivosti ztuhlého plastu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
a_{tm}	- součinitel teplotní vodivosti temperačního média [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
c_v	- měrná tepelná kapacita při stálém objemu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
C_c	- součinitel záření absolutně černého tělesa [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$],
d	- hydraulický rozměr temperačního kanálu [m],
dx/dt	- stěnová rychlost tuhnutí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
dT/dt	- změna teploty s časem [$\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$],
D	- průměr temperačního kanálu [m],
$\text{erf}(x)$	- Gaussův integrál chyb,
Δh_{pl}	- rozdíl měrných entalpií při teplotách T_T a T_{vyh} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$],
k	- součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
l	- vzdálenost mezi povrchem tvarové dutiny formy a středem temperačního kanálu [m],
m	- množství proteklé temper. kapaliny za jednotku času [$\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$],
m_v	- hmotnost výstřiku [kg],
Q_{pl}	- tepelný tok mezi plastem a formou [W],
Q_{tm}	- tepelný tok mezi formou a temperovací kapalinou [W],
Q_o	- tepelný tok mezi formou a okolím [W],
Q_R	- tepelný tok mezi rozváděcím blokem a formou [W],
Q_{ov}	- tepelný tok zprostředkovaný do okolí vedením [W],
Q_{op}	- tepelný tok zprostředkovaný do okolí prouděním [W],
Q_{os}	- tepelný tok zprostředkovaný do okolí sáláním [W],
q	- intenzita tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
q_p	- měrný tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
q	- teplo vnitřních zdrojů nebo - li disipace energie [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
s	- tloušťka stěny formy mezi výstřikem a temperačním kanálem [m],
S	- plocha styku mezi hmotou a formou [m^2],
S_K	- teplotněměnný povrch temperačního kanálu [m^2],
S_F	- polovina povrchu tvarové dutiny formy, kterou ochlazuje temperační kanál [m^2],
S	- plocha formy ve styku s okolím [m^2],
S_o	- plocha vzájemného styku mezi výstřikem a formou [m^2],
S_v	- povrch styku formy s rámem stroje [m^2],
S_{tk}	- povrch temperačního kanálu pro polovinu nástroje [m^2],
t	- čas [s],
t	- čas vzájemného styku [s],
t_{chl}	- doba chlazení [s],
T	- teplota [K],
T_T	- teplota taveniny [K],
T_{vyh}	- střední teplota ve výstřiku v okamžiku vyhození [K],
T_{vyho}	- střední teplota v ose výstřiku v okamžiku vyhození [K],
T_F	- střední teplota tvarové dutiny formy (teplota formy) [K],
T_{tms}	- střední teplota temperačního média [K],
T_o	- teplota okolí [K],
T_{tm}	- teplota temperačního média [K],
T_p	- teplota povrchu [K],

T_{pv}	- teplota povrchu výstřiku [K],
T_K	- kontaktní teplota [K],
ΔT_v	- rozdíl teplot ve výstřiku [K],
ΔT_F	- rozdíl teplot ve formě [K],
T_{2max}	- maximální teplota během cyklu [K],
T_{2min}	- minimální teplota během cyklu [K],
T_1	- teplota temperačního média [K],
T_3	- teplota, při které dojde k vyhození výrobku [K],
grad T	- teplotní gradient ve formě $[K \cdot m^{-1}]$,
dT/dt	- změna teploty s časem,
dT/dn	- změna teploty ve směru normály,
x, y, z	- kartézské souřadnice [m],
x	- parametr délky [m],
X	- polovina tloušťky výstřiku [m],
α	- součinitel přestupu tepla $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,
$\alpha_i(x)$	- součinitel přestupu tepla plast - forma $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,
α_K	- součinitel přestupu tepla forma - temperační médium $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,
α_{tm}	- součinitel přestupu tepla pro temper. médium $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,
α_K	- součinitel přestupu tepla mezi povrchem tvarové dutiny formy a temperačním médiem $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,
α_D	- součinitel přestupu tepla dotykem $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,
α_p	- součinitel přestupu tepla z formy do okolí $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$,
λ	- součinitel tepelné vodivosti $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
λ_1	- součinitel tepelné vodivosti taveniny plastu $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
λ_2	- součinitel tepelné vodivosti ztuhlého plastu $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
λ_{tm}	- součinitel tepelné vodivosti temper. kapaliny $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
λ_v	- součinitel tepelné vodivosti $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
λ_F	- součinitel tepelné vodivosti formy $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
ε	- emisivita povrchu [-],
ν_{tm}	- kinematická viskozita temperačního média $[m^2 \cdot s^{-1}]$,
ρ_1	- hustota taveniny plastu $[kg \cdot m^{-3}]$,
ρ_2	- hustota ztuhlého plastu $[kg \cdot m^{-3}]$,
ξ	- bezrozměrná veličina [-],
Θ	- bezrozměrná veličina [-],
Re	- Reynoldsovo číslo [-],
Pr	- Prandtlovo číslo [-],
Bi	- Biotovo číslo [-],
Fo	- Fourierovo číslo [-],
C+	- programovací jazyk,
PVC	- polyvinylchlorid,
PMMA	- polymethylmetakrylát,
PS	- polystyren,
SAN	- styrenakrylonitril,
ABS	- akrylonitrilbutadienstyren,
PA6	- polyamid 6,
PA66	- polyamid 66,
PTFE	- polytetrafluoretylen,
PP	- polypropylen,

POM	- polyoximetylen,
LDPE	- nízkohustotní polyetylen,
HDPE	- vysokohustotní polyetylen,
MKP	- metoda konečných prvků,
PC	- osobní počítač.

1. ÚVOD

V současné době se využití plastů v procesu vstřikování neustále zvyšuje a zpracovatelský průmysl se orientuje na výrobu tvarově složitých a členitých výrobků s vysokou přesností rozměrů. Příčiny rychlého zvyšování objemu a kvality výroby i spotřeby plastů je nutné hledat ve specifických vlastnostech těchto materiálů, kterými často předčí materiály klasické, jako jsou kovy, sklo, keramika, a pod.

Vlastnosti výrobků z plastů jsou závislé na mnoha technologických parametrech. Výroba kvalitních výstřiků je kromě tlakových procesů výrazně ovlivněna tepelnými procesy v průběhu výroby. Proto je nutná dokonalá znalost tepelných dějů v systému výstřik - nástroj a studium těchto tepelných procesů během vlastní výroby.

Proces chlazení výstřiku ve formě je dějem nestacionárním, cyklicky se opakujícím, který probíhá v rozmezí teplot od teploty taveniny do teploty formy. Tento proces je velmi složitý a je ovlivňován celou řadou faktorů, kterými jsou např. materiál formy a výrobku, teplotní závislost materiálu nástroje a výrobku, účinnost a vliv temperačního systému, atd.

V praxi se stále ve velké míře navrhuje vstřikovací formy na základě zkušenosti konstruktérů. Takto provedené návrhy jsou dobré, ale u složitých tvarů málo kdy optimální. Proto se stále více používají, na základě rozvoje výpočetní techniky, simulační programy, které poskytují nové možnosti při sledování tepelných dějů ve vstřikovacích formách a při modelování teplotních polí v navrhovaných nástrojích. Složitost tepelných procesů v systému výstřik - nástroj má svůj dopad na kvalitu a produktivitu výroby a v neposlední řadě na dobu vývoje u nových výrobků a při návrhu forem.

Složitost studovaného systému výstřik - forma - temperační systém, jeho vzájemná provázanost, cyklické děje a teplotní vliv technologických parametrů mě vedly k pokusu sledovat teploty v nástroji při konkrétních podmínkách vstřikování. Jednou z možností, jak si udělat představu o rozložení teplotních polí v nástroji, o vlivu temperačních kanálů na proces chlazení při konkrétních podmínkách vstřikování je metoda *měření teplotních polí* v nástroji během procesu vstřikování. V tomto smyslu je orientována i tato práce, jejímž cílem je získání dalších poznatků o tepelných dějích ve vstřikovacích formách.

Na základě rozboru sledované problematiky (teplotních procesů ve vstřikovacích formách) lze uvést, že se jedná o velmi složitý problém, kterému literární prameny nevěnují téměř žádnou pozornost. Složitost celého problému lze, mimo jiné, spatřovat v tom, že tepelné děje mezi výstřikem a kovovou formou probíhají velmi rychle, mají nestacionární charakter a jednotlivé cykly se velmi rychle opakují. Proto jsem považoval měření teplotních polí a sledování teplot ve vstřikovací formě za velmi dobrý a přesný ukazatel teplotních dějů, které se ve vstřikovací formě odehrávají.

Při řešení jsem si stanovil tyto cíle:

1. Teoretický rozbor sledované problematiky tepelných a teplotních procesů podle současných poznatků ve vstřikovací formě se zaměřením na:

- ♦ tepelné procesy v systému výstřik - forma - okolí,
- ♦ tepelné děje ve vstřikovací formě během procesu plnění a chlazení,
- ♦ způsoby řešení diferenciální rovnice vedení tepla,
- ♦ řešení systému výstřik - forma pomocí kritériálních čísel.

2. Provedení simulačních výpočtů a namodelování teplotních polí pro vybranou vstřikovací formu pro shodné parametry vstřikování jako u experimentálních měření a následně vzájemné porovnání zjištěných hodnot s vyhodnocením rozdílu mezi metodami.

3. Provedení experimentálních měření teplotních polí na vybrané vstřikovací formě a vyhodnocení vlivu technologických parametrů, které jsem plánovitě měnil při jednotlivých měřeních, na rozložení a velikost teplotních polí.

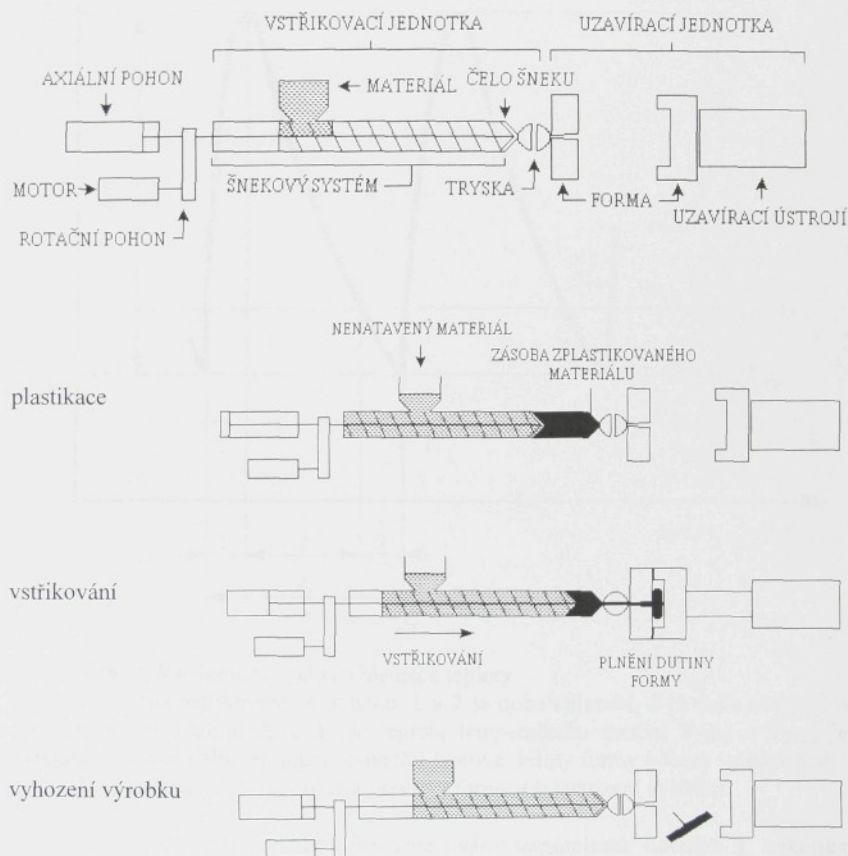
Přehled publikací k této problematice:

1. LENFELD, P. - KREBS, J.: Simulace teplotních polí ve vstřikovacích formách pomocí software ALGOR.
In.: Sborník mez. konfer. „Aplikace CAD/CAM systémů při konstrukci a výrobě kovových forem“, VŠST Liberec, 1993.
2. KREBS, J. - LENFELD, P.: Význam teplotních polí ve vstřikovací formě pro řízení procesu vstřikování termoplastů.
In.: Sborník příspěvků VŠST Liberec, 1994.
3. LENFELD, P. - KREBS, J.: Modelování teplotních polí ve vstřikovacích formách pomocí metody konečných prvků.
In.: Sborník mezin. konference „Vstřikování plastů“, Praha, 1994.
4. KREBS, J. - LENFELD, P.: Vliv temperačního systému na tepelný režim vstřikovacích forem.
In.: Sborník mezin. konference „Vstřikování plastů“, Praha, 1994.
5. LENFELD, P. - KREBS, J.: Simulace teplotních polí v nástrojích a pevnostní analýza výstřiků z plastů pomocí metody konečných prvků.
In.: Konference s mezin. účastí „Formy pro zpracování plastů“, Brno, 1994.
Plasty a kaučuk, č. 1, 1995, s. 6 - 8.
6. KREBS, J. - LENFELD, P.: Temperování forem pro vstřikování termoplastů.
In.: Konference s mezin. účastí „Formy pro zpracování plastů“, Brno, 1994.
Plasty a kaučuk, č. 8, 1994, s. 235 - 238.
7. LENFELD, P.: Metody stanovení doby chlazení výstřiků z termoplastů.
In.: Sborník konference se zahraniční účastí „Plastko“, Zlín, 1995.
8. LENFELD, P.: Způsoby řešení temperačních systémů ve vstřikovacích formách.
In.: Konference s mezin. účastí „Plasty v elektrotechnice“, Tábor, 1995.
9. LENFELD, P.: Využití simulace vstřikování plastů při optimalizaci návrhu nástroje.
In.: Mezinárodní konference „Vstřikování plastů“, Praha, 1996.
10. LENFELD, P.: Problematika vstřikování termoplastů.
In.: Doprovodný text k semináři o aplikaci software STRIM 100, TU Liberec, 1996.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Technologie vstřikování /1/, /9/, /17/, /29/

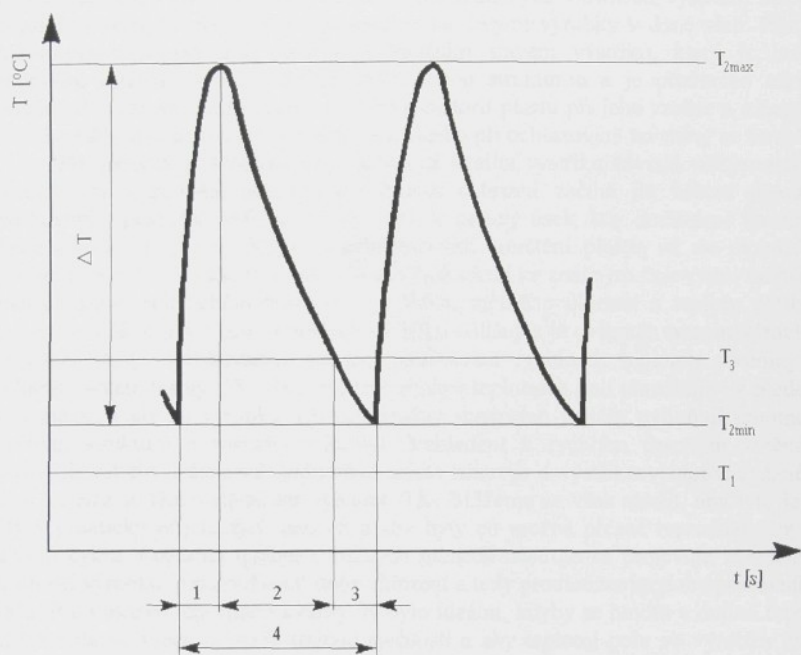
Vstřikováním se označuje takový proces, způsob tváření polymerních materiálů, při kterém se zplastikovaný materiál vstřikuje vysokou rychlostí do uzavřené dutiny formy, která je temperovaná (viz obr. 1). Ochlazením materiál ve formě ztuhne a výstřik je po otevření formy vyhozen.



Obr. 1: Princip vstřikování

Materiál se plastikuje v plastikační jednotce, která je součástí vstřikovacího stroje. K uzavřené vstřikovací formě se přisune plastikační jednotka, odkud se vstříkne zplastikovaný materiál axiálním pohybem šneku do dutiny formy. Po zaplnění působíme na materiál dotlakem, který částečně vyrovnává vliv smrštění, ale také

ovlivňuje zbytková prnutí ve výrobku. Od okamžiku plnění formy nastává v důsledku styku materiálu se stěnou formy chlazení výrobku. Hmotu tedy předává své teplo do formy a tímto způsobem ztuhne. Následně se forma otevře, výrobek je vyhozen z formy a celý cyklus se opakuje. Vstřikovací cyklus z hlediska teploty na povrchu tvarové dutiny formy je ukázán na obr. 2 /28/.



Obr. 2: Vstřikovací cyklus z hlediska teploty

kde **1** je doba vstřikování a dotlaku, **1 a 2** je doba chlazení, **3** je doba otevření a uzavření formy (strojní čas), T_1 je teplota temperačního média, T_{2max} a T_{2min} je maximální a minimální teplota na povrchu tvarové dutiny formy během vstřikovacího cyklu, T_3 je teplota, při které dojde k otevření formy a k vyhození výstřiku.

Jak bylo výše popsáno, při zpracování termoplastů dochází k několika procesům, které mají bezprostřední vliv na kvalitu výstřiku a hospodárnost výroby. K jednomu z nejdůležitějších patří tepelné děje při vstřikování, tedy proces chladnutí výstřiku, tj. proces odvodu tepla z výstřiku do formy a temperačních kanálů.

Jedná se o velmi složité děje, které prakticky nelze analyticky řešit a kterým je věnována v současné době malá pozornost. Na druhé straně však výrazně ovlivňují proces vstřikování a kvalitu výrobku /22/.

2.2. Tepelné děje při vstřikování

Vstřikování termoplastů představuje nestacionární děj, při kterém je polymer vystaven neizotermickému tváření a materiál je složitě mechanicky i tepelně namáhán, a to jak v plastikační jednotce vstřikovacího stroje, tak i ve vtokovém systému a ve vlastní tvářecí dutině formy.

Složitost vstřikovacího procesu - tepelně mechanického namáhání polymeru - se projevuje jak v nehomogenitě fyzikálně mechanických vlastností výstřiku, tak i v kolísání výsledných makrovlastností mezi jednotlivými výrobky v dané sérii. Přitom anizotropie vlastností úzce souvisí s vnitřním stavem výstřiku, který je určen především orientací makromolekul, krystalickou strukturou a je předurčen tokem taveniny do tvarové dutiny formy a teplotní historií plastu při jeho změně z tekutého do viskózně tekutého stavu a zpět do stavu tuhého při ochlazování taveniny ve formě.

Při vstřikování termoplastů je konečná kvalita výstřiku závislá velkou měrou na rychlosti a průběhu ochlazování. Proces chlazení začíná již během procesu vstřikování a pokračuje během dotlaku, což je časový úsek, kdy dodáváme taveninu plastu do dutiny formy, abychom kompenzovali smrštění plastu, až do okamžiku vyhození výrobku. V celém procesu chlazení dochází ke značným časovým i místním změnám stavových veličin polymeru, tj. tlaku, měrného objemu a teploty. Průběh stavových veličin je v různých místech výstřiku odlišný a je ovlivněn tvarem výrobku, tloušťkou stěny, vstřikovacím tlakem, vstřikovací rychlostí, teplotou taveniny a teplotním polem formy /15/, /16/. A právě znalost teplotních polí umožňuje již předem určit možné vady na výrobku, protože změny stavových veličin ovlivňují hmotnost výrobku, strukturu a rozměry výstřiku. Vzhledem k rychlým časovým změnám stavových veličin „zůstávají“ jednotlivá místa nástroje a výstřiku v nerovnovážném stavu a nelze se těmto rozdílům vyhnout /15/. Můžeme se však snažit, aby tyto jevy byly v prakticky přijatelných mezích a aby byly co možná přesně reprodukovány v každém cyklu. Rozdílná teplota v různých místech nástroje se projevuje zhoršením vlastností výrobků, prodloužením doby chlazení a tedy prodloužením doby pracovního cyklu. Pro dosažení optimální kvality by bylo ideální, kdyby se hmota v dutině formy ochlazovala ve všech místech stejnou rychlostí a aby teplotní pole ve výrobku byla homogenní. To je však ideální případ a v praxi jej nelze dosáhnout, protože teplo zejména vlivem rozmístění temperačních kanálů je v různých místech formy odváděno různou rychlostí /1/. Ve skutečnosti forma pracuje v opakujících se teplotních cyklech (je-li forma v činnosti dostatečně dlouho) a tento teplotní systém vytváří cyklické třírozměrné teplotní pole, které je nejvíce ovlivnitelné umístěním, tvarem a parametry temperačních kanálů. Přivedená tepelná energie je odváděna vlastní formou do temperační kapaliny, rámu stroje a okolního prostředí /47/.

Stanovení teplotních polí ve vstřikovací formě během procesu vstřikování umožňuje udělat si představu /40/:

- ♦ o rozdělení teploty taveniny v příslušném místě průřezu výstřiku a v nástroji v závislosti na době plnění,
- ♦ o rozdělení teplot ve výstřiku a v nástroji v daném časové okamžiku v závislosti na vzdálenosti od vtokového ústí,
- ♦ o rozdělení teploty v průřezu výstřiku a v nástroji v závislosti na době ochlazování.

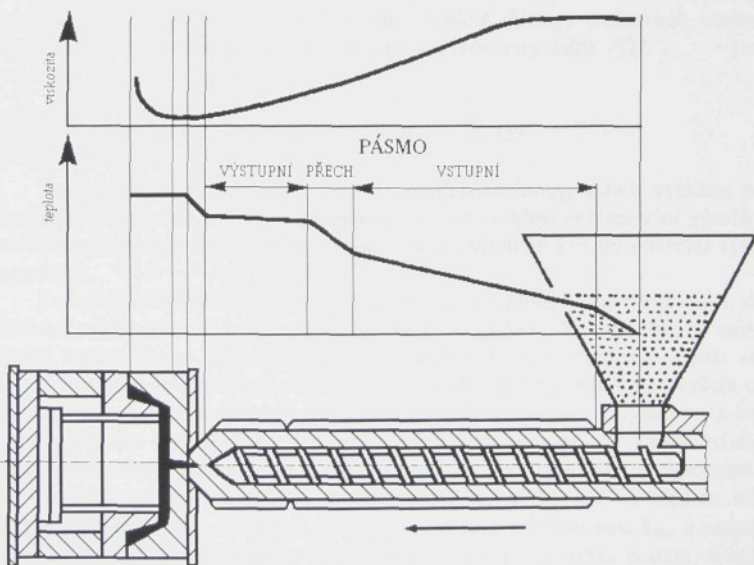
Znalost rozdělení teplot a jejich gradientů, včetně rychlostních a tlakových profilů při plnění tvarové dutiny formy, umožní exaktní předpověď vnitřního stavu výstřiků, což spolu s tepelnou bilancí formy a s určením optimálního času ochlazování výstřiku povede ke značným ekonomickým efektům u uživatelů a k prohloubení

znalosti o procesu vstřikování pro možnost jeho matematické optimalizace a na nasazení moderní řídicí a výpočetní techniky.

2.2.1. Vliv teploty taveniny na kvalitu výstřiku /1/, /18/, /29/

Teplota taveniny je vedle tlaku při ovlivňování vlastností výstřiku nejdůležitější veličinou. Její změnou lze poměrně snadno měnit zabíhavost plastu, protože každý plast můžeme vstřikovat pouze v určitém teplotním intervalu. Obecně lze doporučit používání teploty taveniny pokud možno co nejvyšší, neboť tavenina má vysokou tekutost, takže stačí nízký vstřikovací tlak. To zase vede k malému vnitřnímu pnutí ve výrobcech, které však není pouze funkcí tlaku. Avšak vyšší teplota taveniny vyžaduje delší dobu chlazení hmoty ve formě a je příčinou většího smrštění výstřiku.

Pro kvalitu výstřiku je velmi důležitá teplotní homogenita taveniny. Ideální homogenitu nelze ovšem dosáhnout ani u nejdokonalejších vstřikovacích strojů. Homogenita taveniny plastu závisí na konstrukčních parametrech šneku a dále na době, po kterou je hmota ve styku se stěnou tavicí komory. Prodloužení doby pobytu hmoty v komoře má sice příznivý vliv na zlepšení teplotní homogenity, ale na druhé straně může být příčinou tepelné degradace polymeru. Toto nebezpečí se zvyšuje, je-li doba cyklu dlouhá. Také nesprávná konstrukce tavicí komory může způsobovat rozklad hmoty, je-li zadržována dlouhou dobu v mrtvých prostorech.



Obr. 3: Průběh viskozity a teploty během procesu vstřikování

Stejně jako u tlaku nelze ani vliv teploty taveniny uvažovat nezávisle na ostatních parametrech vstřikování. Významná je interakce mezi teplotou taveniny a vnitřním tlakem. Zvyšováním teploty se snižuje viskozita taveniny a tím se zmenšují tlakové ztráty v tavicí komoře, ve vtokových kanálech i v dutině formy, což se projeví zvýšením vnitřního tlaku a dotlaku ve formě při konstantní hodnotě vnějšího tlaku. S tím souvisí i vyšší rychlost plnění. Na obr. 3 je ukázáno rozložení teploty a viskozity od okamžiku přívodu granulátu do tavicí komory až po ukončení procesu vstřikování do dutiny formy.

Hmota plastu prodělává během vstřikovacího procesu teplotní cyklus. Do procesu vstupuje plast s teplotou okolí a vlivem topení a pohybu šneku se ohřívá a taje. Zpočátku jeho teplota stoupá velmi rychle, avšak postupně se rychlost ohřevu zpomaluje vlivem zmenšení teplotního spádu. Jakmile je plast vstříknut do dutiny formy, nastává prudké ochlazení stykem s chladnou formou a chlazení pokračuje, až je výrobek dostatečně tuhý a můžeme otevřít formu. Teplota hmoty v okamžiku vyjímání je vyšší než teplota formy, neboť teplotě formy se blíží pouze teplota povrchu výstřiku, avšak v jeho vnitřku je vyšší. Chladnutí hmoty pokračuje dále na vzduchu až do vyrovnání teploty s okolím.

Teplota taveniny se během procesu plnění zvýší vlivem disipační energie (vnitřní tření) o několik $^{\circ}\text{C}$, příp. až desítek $^{\circ}\text{C}$ /46/. Proto je velmi důležité znát teplotu a rozložení teplotních polí na vzdálenějších místech od temperačního systému, neboť disipační energie nebezpečně zvyšuje teplotní rozdíly mezi jednotlivými místy výstřiku a formy. Teplotní profil po tloušťce materiálu (výrobku) nemá vlivem newtonovského chování taveniny plastu a vlivem disipační energie během vstřikování tvar paraboly, ale u stěn je teplota vyšší oproti středu tečení. Tato nerovnoměrnost závisí na teplotě taveniny, teplotě formy, rozměrech vtokového systému, na tokových vlastnostech hmoty a na vstřikovacím tlaku /52/.

2.2.2. Vliv teploty formy na kvalitu výstřiku /1/, /2/, /29/

Teplota vstřikovací formy ovlivňuje zabíhavost hmoty a tedy rychlost plnění dutiny formy jen v malé míře, ale má značný vliv na rychlost ochlazování výrobku, na dobu chlazení, na ekonomii výroby a značně také ovlivňuje kvalitu povrchu výstřiku, zejména lesk.

Z ekonomického hlediska by bylo účelné volit teplotu formy co nejnižší, aby se vstřikovací cyklus zkrátil, avšak z hlediska technologického by měla být co nejvyšší. Při vyšší teplotě formy chladne výstřik rovnoměrněji, takže obsahuje menší vnitřní pnutí a zlepšuje se jeho tvarová stabilita. U krystalických polymerů se zvyšuje obsah krystalické fáze a tím se zlepšují jejich mechanické vlastnosti. Zvyšuje se i kvalita povrchu. Při vyšší teplotě formy lze použít nižší teplotu taveniny. Konkrétní teplota formy závisí na druhu plastu a na charakteru výrobku a je výsledkem kompromisu.

Nejvyšší použitelná teplota formy musí být nižší, než je teplota tuhnutí příslušného plastu. U krystalických polymerů tedy pod teplotou tání T_m , u amorfních polymerů pod teplotou zesklnění T_g . Výrobek se uplatňuje svým tvarem, tloušťkou stěny, maximální dráhou toku taveniny ve formě a požadovanou tolerancí rozměrů. S ohledem na vlastnosti výstřiku je žádoucí, aby se hmota v dutině formy ochlazovala ve všech místech stejně rychle. Důsledky nerovnoměrného chladnutí se projevují vnitřním pnutím ve výstřiku a v kolísání vlastností v jednotlivých místech výrobku.

Teplota formy se udržuje na požadované výši pomocí chladicího média, které protéká soustavou temperačních kanálů. Teplota formy však není konstantní a stále

kolísá kolem určité střední hodnoty (střední teploty). Zjednodušeně se dá říci, že pokud forma „přijme“ více tepla (akumulace tepla se zvýší nad střední hodnotu), začne „účinněji pracovat“ temperační systém, aby „vyrovnal“ nevýhodný stav a naopak /28/. Na tomto zjednodušujícím principu vlastně pracují současné regulátory teploty, používané u vstřikovacích strojů.

Umístění temperačních kanálů a jejich rozměry, jakož i teplota a směr proudění temperačního média mají značný vliv na rovnoměrnost teploty formy /11/, /49/. Temperační systém se navrhuje tak, aby jeho povrch měl pokud možno stejnou plochu, jako je plocha určená k chlazení. Nemá být umístěn těsně pod povrchem dutiny formy. Množství chladicího média se určuje tak, aby rozdíl teplot na vstupu a na výstupu nepřekročil 3 až 5 °C. Příčerm rychlost média má zajišťovat turbulentní proudění, aby byl součinitel přestupu tepla z formy do kapaliny dostatečně vysoký /36/, /37/.

Mnohá pozorování na vstřikovacích formách ukazují, že se tento rozdíl téměř nikdy nepřekročí /45/. Pokud bychom tento rozdíl měli dělit z hlediska laminárního a turbulentního proudění, tak např. pro teplotu formy 15 °C bude pro turbulentní proudění rozdíl teplot 1 až max. 2 °C, pro laminární proudění s nízkým průtočným objemem kolem 25 l/hod bude rozdíl teplot plných 5 °C. Pokud se tato změna dá do vztahu s Reynoldsovým číslem, je možné spočítat minimální průtočné množství a tím zavést důležitou kontrolní funkci /45/.

Teplota formy ovlivňuje rychlost krystalizace polymeru během tuhnutí výstřiku v dutině formy. Smrštění vzrůstá se vzrůstající teplotou formy, avšak celkové smrštění s rostoucí teplotou formy klesá. Pokud tedy budeme mít stejnoměrné rozdělení teplot v nástroji, poroste kvalita výrobku, bude se zkracovat doba cyklu a v průměru se sníží teplota stěny dutiny formy o 10 °C. Jelikož snížení teploty stěny dutiny formy o 1 °C zkracuje dobu chlazení o 2 %, tak správným rozložením teplotních polí můžeme zvýšit produktivitu až o 20 % /47/.

2.3. Tepelné poměry ve vstřikovací formě /28/, /35/, /37/

Problém temperování forem souvisí s přenosem tepla, tedy schopností vstřikovací formy přijmout (naakumulovat) teplo z tuhnoucí taveniny a předat jej temperačnímu systému. Tento proces si můžeme rozdělit na několik fází, které během výrobního cyklu probíhají současně:

- 1) přestup tepla z plastu do vstřikovací formy,
- 2) přestup tepla z formy do temperačního systému,
- 3) přestup tepla z formy do okolí a rámu stroje.

Vlastní přestup tepla je závislý na zpracovatelských podmínkách plastu a na materiálu formy, na tloušťce stěny výrobku, ale také na styku taveniny plastu s formou.

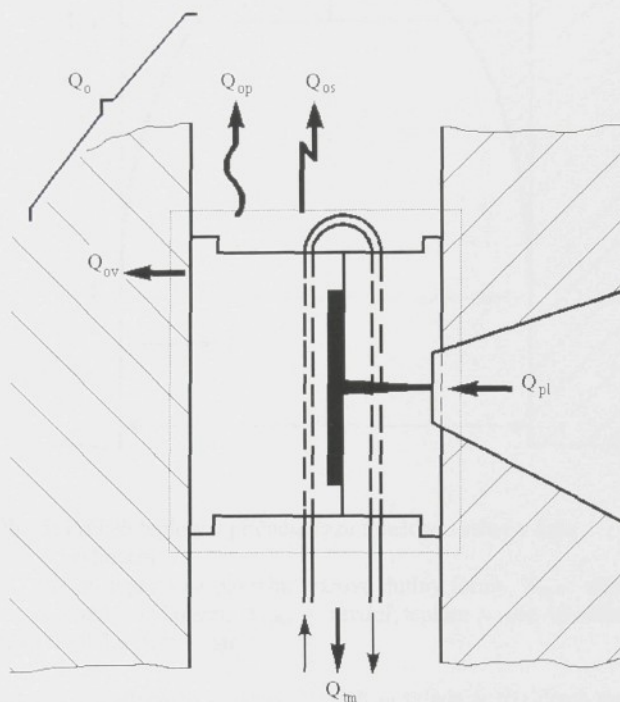
Z hlediska obecného pohledu na tepelné děje mezi výstřikem a formou dochází k výměně tepla:

- 1) vedením (kondukcí),
- 2) prouděním (konvekcí),
- 3) sáláním (radiací, zářením).

Při všech úvahách o tepelných tocích ve vstřikovací formě je třeba vycházet z těchto předpokladů a zjednodušení:

- ♦ vstřikovací forma tvoří uzavřený systém v tepelné rovnováze,
- ♦ tepelné toky v nástroji a teploty částí formy jsou časově konstantní,

- ♦ kolísání teploty povrchu dutiny formy během vstřikovacího cyklu se zanedbává,
- ♦ jako teplota povrchu dutiny se považuje střední hodnota teplotního maxima a minima během vstřikovacího cyklu,
- ♦ jako teplota temperační kapaliny se považuje střední hodnota ze vstupní a výstupní teploty.



Obr. 4: Tepelná bilance vstřikovací formy

Tepelná bilance vstřikovací formy je uvedena na obr. 4. Podle obrázku bude pro vstřikovací formu platit podmínka rovnováhy mezi tepelnými toky, přivádějící teplo do systému a tepelnými toky, které teplo odvádějí ve tvaru

$$Q_{pl} - Q_{tm} - Q_o (+ Q_R) = 0 \quad (2.1)$$

kde Q_{pl} je tepelný tok mezi plastem a formou [W],

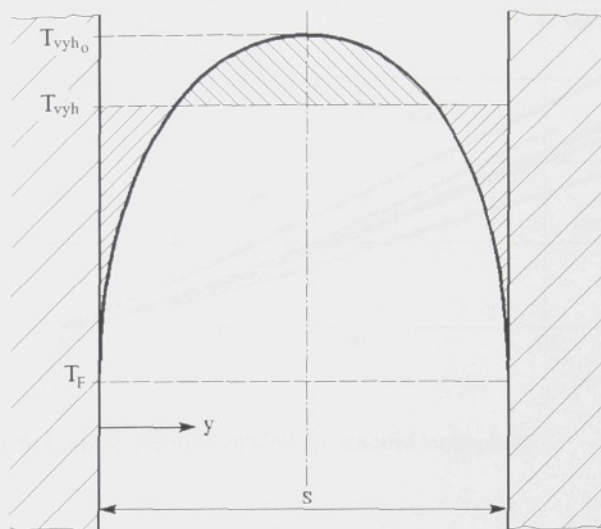
Q_{tm} je tepelný tok mezi formou a temperovací kapalinou [W],

Q_o je tepelný tok mezi formou a okolím [W],

Q_R je tepelný tok mezi rozváděcím blokem a formou [W].

Při vlastním výpočtu se předpokládá, že teplota formy je vyšší než teplota okolí a temperační okruh teplo odvádí. Proto jsou tepelné toky Q_{pl} a Q_R ve vztahu (2.1)

kladné, pretože do systému teplo privádzajú. Naopak tepelné toky Q_{tm} a Q_o ze systému teplo odvádzajú, preto jsou ve vztahu (2.1) uvedeny jako záporné. Tepelný tok mezi rozváděčím blokem a formou se uplatňuje jen u forem s vytápěnou vtokovou soustavou, jinak je roven nule.



Obr. 5: Průběh teploty v příčném řezu tloušťkou stěny v čase vyhození

kde T_F - střední teplota na povrchu tvarové dutiny formy, T_{vyh} - střední teplota ve výstřiku v okamžiku vyhození, T_{vyh_0} - střední teplota v ose výstřiku v okamžiku vyhození, s - tloušťka stěny výstřiku.

Tepelný tok odvedený z formy do okolí se skládá ze tří dílčích tepelných toků:

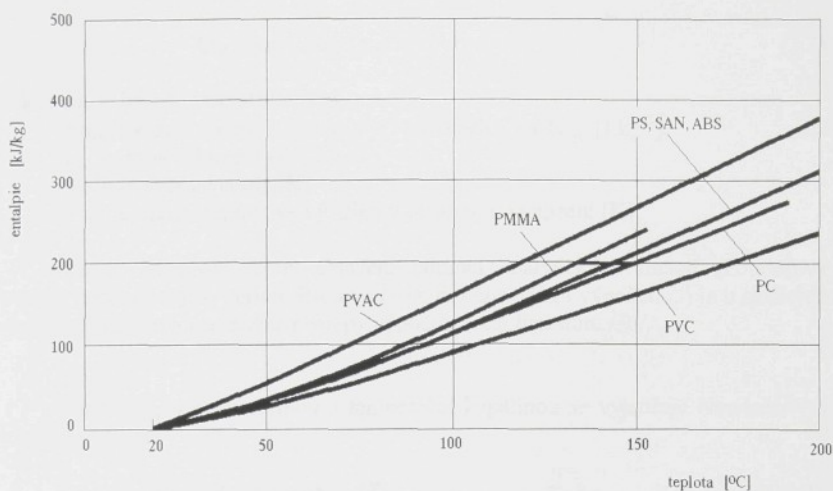
$$Q_o = Q_{ov} + Q_{op} + Q_{os} \quad (2.2)$$

kde Q_{ov} je tepelný tok zprostředkovaný do okolí vedením [W],
 Q_{op} je tepelný tok zprostředkovaný do okolí prouděním [W],
 Q_{os} je tepelný tok zprostředkovaný do okolí sáláním [W].

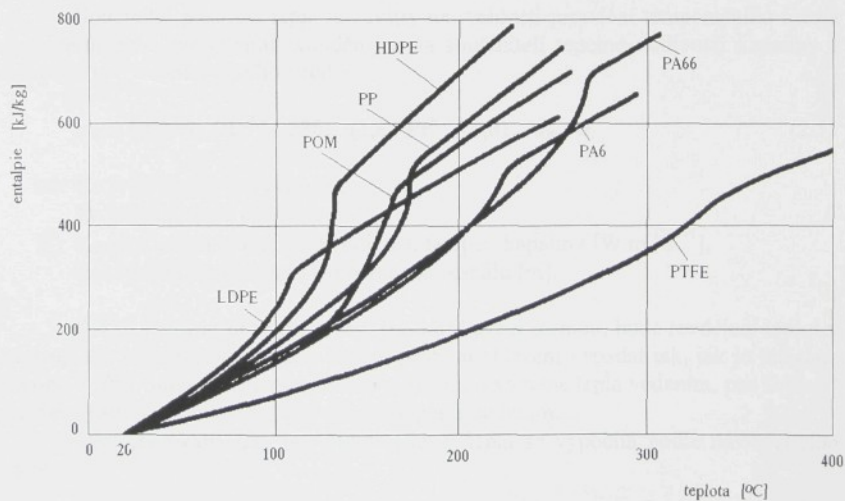
Hodnoty jednotlivých dílčích toků Q_o závisí zejména na rozdílu teploty formy a teploty okolí. O hodnotu tepelného toku, odvedeného do okolí (Q_o), se sníží tepelný tok Q_{tm} , odvedený temperační kapalinou.

Teplo, které přestupuje z výstřiku do formy, je dáno rozdílem entalpií při teplotě zpracování plastu (teplota taveniny) T_F a při střední teplotě ve výstřiku při vyjmutí z formy T_{vyh} (viz. obr. 5).

Hodnoty entalpií pro vybrané druhy termoplastů v závislosti na teplotě jsou uvedeny na obr. 6 a obr. 7 /28/.



Obr. 6: Hodnoty měrných entalpií pro amorfní termoplasty



Obr. 7: Hodnoty měrných entalpií pro krystalické termoplasty

Teplotný tok medzi plastem (taveninou) a formou pak můžeme vyjádřit následujícím vztahem:

$$Q_{pl} = m_v \cdot \Delta h_{pl} / t_{chl} \quad (2.3)$$

kde m_v je hmotnost výstřiku [kg],

Δh_{pl} je rozdíl měrných entalpií při teplotách T_T a T_{vyh} [$J \cdot kg^{-1}$],

t_{chl} je doba chlazení [s],

T_T je teplota taveniny [K],

T_{vyh} je střední teplota ve výstřiku v okamžiku vyhození [K].

Pozn.: Stanovení doby chlazení pomocí analytických metod (Fourierova rovnice, nomogramy, kritérium Biotova čísla, dimensionální výpočet, ...) je u složitých výrobků dosti obtížné a možné postupy výpočtů uvádí literatura [36].

Přenos tepla mezi formou a temperační kapalinou se vyjadřuje Newtonovým vztahem ve tvaru:

$$Q_{tm} = \alpha_K \cdot S_K \cdot (T_F - T_{tm}) \quad (2.4)$$

kde α_K je součinitel přestupu tepla mezi povrchem tvarové dutiny formy a temperačním médiem [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

S_K je teplosměnný povrch temperačního kanálu, který závisí na obvodu kanálu a jeho délce [m^2],

T_F je střední teplota tvarové dutiny formy [K],

T_{tm} je střední teplota temperačního média [K].

Součinitel přestupu tepla je závislý na rychlosti proudění temperačního média (laminární nebo turbulentní proudění) a na součiniteli tepelné vodivosti kapaliny a vypočítá se dle následujícího vztahu:

$$\alpha_K = 0,0235 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8) \cdot \lambda_{tm} / d \quad (2.5)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo [-],

Pr je Prandtlovo číslo [-],

λ_{tm} je součinitel tepelné vodivosti temper. kapaliny [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

d je hydraulický rozměr temperačního kanálu [m].

Pokud bychom provedli příčný řez vstřikovací formou, bude rozdělení teplot v nástroji a v temperačním kanálu během procesu chlazení vypadat tak, jak je ukázáno na obr. 8. Pro "oblast" materiálu formy bude platit výměna tepla vedením, pro "oblast" temperačního kanálu bude platit výměna tepla prouděním.

Teplotní rozdíl ΔT_1 pro oblast vedení tepla se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\Delta T_1 = (Q_{pl} \cdot l) / (2 \cdot S_F \cdot \lambda_F) \quad (2.6)$$

kde l je vzdálenost mezi povrchem tvarové dutiny formy a středem temperačního kanálu [m],

λ_F je součinitel tepelné vodivosti formy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

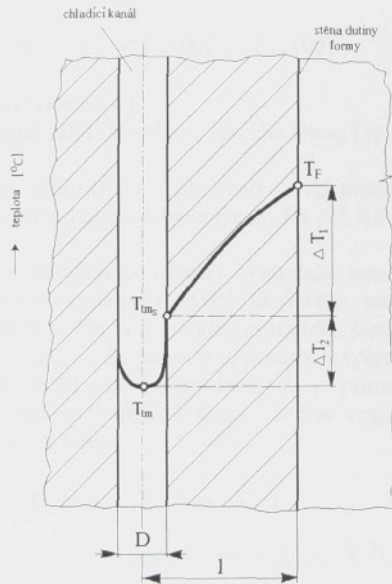
S_F je polovina povrchu tvarové dutiny formy, kterou ochlazuje temperační kanál [m^2].

Teplotní rozdíl ΔT_2 pro oblast výměny tepla prouděním se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\Delta T_2 = (Q_{pl} + Q_o) / (2 \cdot S_{tk} \cdot \alpha_{tm}) \quad (2.7)$$

kde S_{tk} je povrch temperačního kanálu pro polovinu nástroje [m^2],

α_{tm} je součinitel přestupu tepla pro temper. médium [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].



Obr. 8: Teplotní profil v příčném řezu nástroje během procesu chlazení (polovina nástroje)

kde D je průměr kanálu, l je vzdálenost mezi povrchem dutiny formy a středem temperačního kanálu.

Celkové teplo, které přejde ze vstřikovací formy do okolí vedením, prouděním a sáláním se určí obdobným způsobem, jako teplo prošlé z povrchu výstřiku do formy a platí následující vztahy:

a) tepelný tok předaný do okolí vedením

$$Q_{ov} = S_v \cdot \lambda_v \cdot (T_o - T_{tm}) \quad (2.8)$$

kde S_v je povrch styku formy s rámem stroje [m^2],

λ_v je součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

T_o je teplota okolí [K],

T_{tm} je teplota temperačního média [K].

b) tepelný tok předaný do okolí prouděním

$$Q_{op} = S \cdot \alpha_p \cdot (T_o - T_{tm}) \quad (2.9)$$

kde S je plocha formy ve styku s okolím [m^2],

α_p je součinitel přestupu tepla z formy do okolí [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

c) tepelný tok předaný do okolí sáláním

$$Q_{os} = S \cdot \varepsilon \cdot C_c \cdot ((T_o/100)^4 - (T_{tm}/100)^4) \quad (2.10)$$

kde ε je emisivita povrchu [-],

C_c je součinitel záření absolutně černého tělesa [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$].

Pozn.: Teplo, předané do okolí, tvoří velmi malou část z tepla, které je do formy přivedeno taveninou plastu a bývá kolem 5% /2/, /14/.

Jak je vidět z předchozího rozboru, podmínky tepelných dějů mezi výstřikem, formou a temperačním systémem závisí především na intenzitě přestupu tepla. Intenzita přestupu tepla vedením a prouděním probíhá často současně a označuje se v některých pramenech /4/, /5/, /8/ jako výměna tepla dotykem. Celkové množství tepla, prošlého z povrchu výstřiku do formy dotykem, je přímo úměrné tepelnému toku, prošlému styčnou plochou výstřiku a formy, za čas vzájemného styku. Popisuje se *Newtonovým zákonem* ve tvaru

$$Q = \alpha_D \cdot (T_{pv} - T_F) \cdot S_o \cdot t \quad (2.11)$$

kde α_D je součinitel přestupu tepla dotykem [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

T_{pv} je teplota povrchu výstřiku [K],

T_F je teplota formy, resp. teplota okolí [K],

S_o je plocha vzájemného styku mezi výstřikem a formou [m^2],

t je čas vzájemného styku [s].

Jak vyplývá z tepelných dějů, čím je větší tepelná vodivost materiálu formy, tím stěna formy vykazuje větší teplotní spád a podporuje větší prostup tepla stěnou do temperačního systému formy.

Z hlediska tepelných dějů ve vstřikovací formě, tedy z hlediska tepelných poměrů mezi výstřikem a vstřikovací formou, se dále zaměříme na sledování těchto systémů:

1) Vzájemný styk mezi výstřikem a formou,

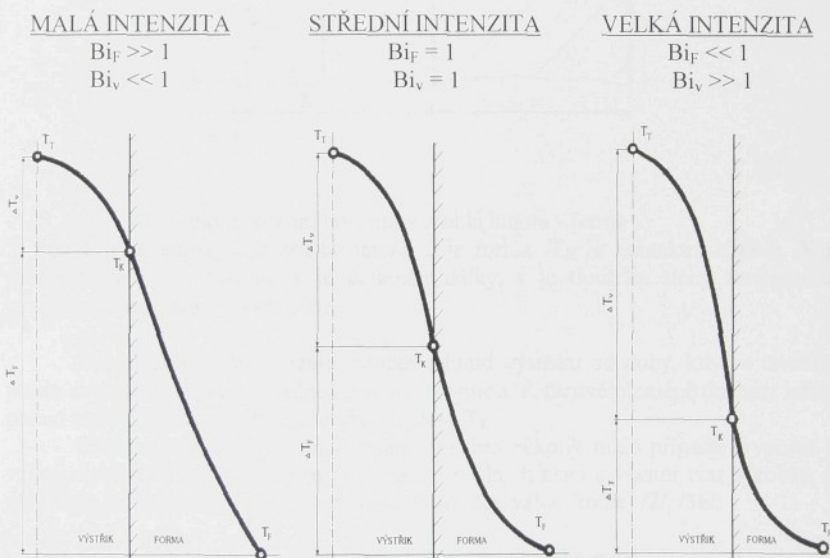
- 2) Přenos tepla uvnitř vstřikovací formy,
- 3) Přenos tepla mezi formou a temperačním systémem.

2.3.1. Vzájemný styk mezi výstřikem a formou /2/, /4/, /6/, /8/, /11/

Vzájemný styk mezi výstřikem a vstřikovací formou budeme uvažovat jako těsný (dokonalý), a to jak v tekutém stavu, tak i ve stavu tuhém během ochlazování. Soustava v tomto smyslu představuje ustálený tepelný děj (viz obr. 10), jehož teplotní podmínky jsou v podstatě vyjádřeny dvěma kritériálními čísly - Biotovým a Fourierovým číslem.

Biotovo číslo ($Bi = \alpha \cdot X / \lambda$) vyjadřuje intenzitu výměny tepla mezi povrchem výstřiku a formou, resp. závislost mezi teplotním polem vstřikovací formy a podmínkami sdílení tepla povrchu tvárníku a tvárnice.

Podle konkrétních hodnot Biotova čísla je možno získat tři případy intenzity přestupu tepla tak, jak je uvedeno na obr. 9. Z obrázku je patrné, že čím vyšší je Biotovo číslo výstřiku oproti Biotovu číslu formy, tím vyšší je intenzita přestupu tepla /8/, /33/.



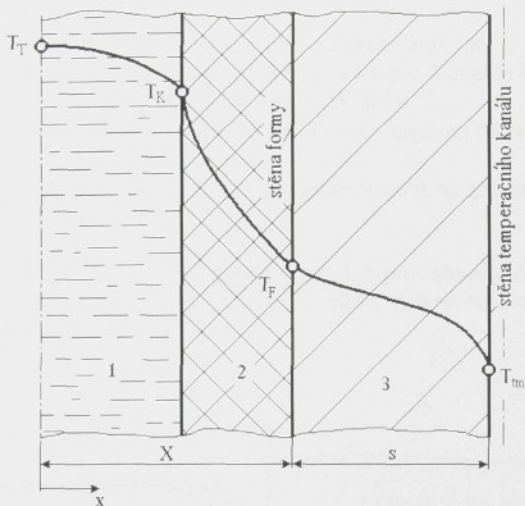
Obr. 9: Schematické znázornění významu Biotova čísla /33/

kde T_F je teplota formy, T_K je kontaktní teplota, T_T je teplota taveniny, ΔT_V je rozdíl teplot ve výstřiku, ΔT_F je rozdíl teplot ve formě.

Fourierovo číslo ($Fo = a \cdot t / X^2 = (\lambda \cdot t) / (c \cdot \rho \cdot X^2)$) vyjadřuje poměr času probíhajícího tepelného procesu k času molekulární difuze tepla /5/, /8/. Hodnota času v bezrozměrovém vyjádření závisí na rychlosti změny teplotního pole vstřikovací

formy, fyzikálních parametrech a rozměrech tělesa, resp. formy. Druhý tvar vyjadřuje poměr tepla přenášeného v systému vedením k teplu akumulovanému systémem.

Biotovo a Fourierovo číslo jsou základní parametry pro výpočty tepelných dějů mezi výstřikem a vstřikovací formou (např. pro stanovení intenzity přestupu tepla, konstanty tuhnutí výstřiku, doby tuhnutí výstřiku základních geometrických tvarů, ...).



Obr. 10: Teplotní systém tavenina - ztuhlá hmota - forma

kde **1** je tavenina, **2** je ztuhlá hmota, **3** je forma, T_K je kontaktní teplota, X je polovina tloušťky výstřiku, x je parametr délky, s je tloušťka stěny formy mezi výstřikem a temperačním kanálem.

Případ na obr. 10 ukazuje proces tuhnutí výstřiku od doby, kdy se tavenina plátu dostane do styku s chladnou kovovou formou. K fázové přeměně dochází tehdy, pokud teplota hmoty dosáhne kontaktní teploty T_K .

Exaktní analytické řešení je známé jen pro několik málo případů (výpočet je velmi náročný) a při výpočtu se používá kritériálních čísel a vlastní tvar výrobku se nahrazuje jednoduchými základními modely (deska, válec, koule) [2], [36].

Energetická bilance systému je popsána následujícím vztahem

$$-Q = \rho_1 \cdot \Delta h_{pl} \cdot (dV_1(x) / dx) \cdot (dx / dt) \quad (2.12)$$

kde ρ_1 je hustota taveniny plátu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

dx/dt je stěnová rychlost tuhnutí, neboli jak rychle „poroste“ ztuhlá vrstva ve směru souřadnice x oproti tavenině.

Teplu, které se odvádí z taveniny přes formu do temperační kapaliny se stanoví ze vztahu

$$Q = k \cdot S \cdot (T_K - T_{tm}) \quad (2.13)$$

kde S je plocha styku hmota - forma [m^2],

T_K je kontaktní teplota [K],

k je součinitel prostupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$], který se vypočte ze vztahu

$$k = \alpha_i(x) + \lambda / s + \alpha_K \quad (2.14)$$

kde $\alpha_i(x)$ je součinitel přestupu tepla plast - forma [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

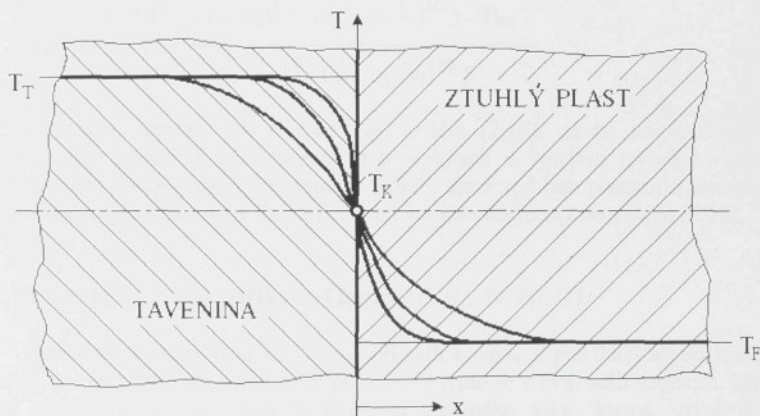
s je tloušťka stěny formy mezi výstřikem a temper. kanálem [m],

λ je součinitel tepelné vodivosti formy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

α_K je součinitel přestupu tepla forma - temper. médium [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Pozn.: Součinitel přestupu tepla $\alpha_i(x)$ se stanoví na základě toho, zda jde o desku, válec nebo kouli.

Ze vztahů (2.12) až (2.14) lze stanovit vztah pro stěnovou rychlost tuhnutí na "čele" hmoty, pokud budeme znát kontaktní teplotu, nebo-li teplotu fázové přeměny T_K . Výpočet provedeme dle obr. 11.



Obr. 11: Teplotní pole při kontaktu tavenina - ztuhlý plast

Pro řešení známe pouze fyzikální a teplotní součinitele obou dvou materiálů (c , λ , ρ), které jsou konstantní, počáteční teplotu u hmoty (teplota taveniny během vstřikování) a teplotu na stěně formy. V místě styku platí, že obě tělesa mají stejnou teplotu (u reálných těles nemusí být tato podmínka splněna např. vlivem drsnosti materiálu, oxidů, ...). Jako kontaktní plochu bereme rovinu $x = 0$.

Pro taveninu a parametr $x < 0$ platí následující vztah

$$(T - T_K) / (T_T - T_K) = -\operatorname{erf}((x / (2 \cdot a_l \cdot t))) \quad (2.15)$$

kde x je parametr délky [m],

a_1 je součinitel teplotní vodivosti taveniny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 $\text{erf}(\mathbf{x})$ Gaussův integrál chyb,
 t je čas [s].

a pro ztuhlý plast a parametr $x > 0$ platí

$$(T - T_F) / (T_{im} - T_K) = \text{erf}((x / (2 \cdot a_2 \cdot t))) \quad (2.16)$$

kde a_2 je součinitel teplotní vodivosti ztuhlého plastu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Součinitel teplotní vodivosti se stanoví ze vztahu $a = \lambda / (\rho \cdot c)$ a součinitel jímavosti tepla ze vztahu $b = (\lambda \cdot \rho \cdot c)^{1/2}$. Součinitel jímavosti (někdy také součinitel akumulace), určuje rychlost odvodu tepla z vstřiku do formy a tím vlastně ovlivňuje celou dobu chlazení.

Po matematických úpravách dostaneme vztah, který poměří součinitele jímavosti tepla taveniny plastu a ztuhlé hmoty ve tvaru

$$(T_T - T_K) / (T_K - T_{im}) = (\lambda_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2)^{1/2} / (\lambda_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1)^{1/2} \quad (2.17)$$

a po dalších úpravách vztah pro určení kontaktní teploty ve tvaru

$$T_K = \frac{T_T + ((\lambda_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2)^{1/2} / (\lambda_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1)^{1/2}) \cdot T_{im}}{1 + ((\lambda_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2)^{1/2} / (\lambda_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1)^{1/2})} \quad (2.18)$$

Kontaktní teplota, jak je vidět ze vztahu (2.18), závisí na součinitelích jímavosti obou materiálů a na počátečních teplotách u systému tavenina - ztuhlá hmota. Obdobným způsobem lze stanovit teplotu mezi ztuhlým plastem a formou po dosazení materiálových a fyzikálních konstant vstřikovací formy do vztahu (2.18).

2.3.2. Přenos tepla uvnitř vstřikovací formy /2/, /4/, /6/, /8/, /11/

Vstřikovací formy jsou ve většině případů kovové a pro další řešení budeme uvažovat, že materiál tvoří homogenní prostředí a teplo se v něm sdílí vedením. Mírou sdílení tepla v tomto prostředí je intenzita tepelného toku, kterou vyjadřujeme *Fourierovým vztahem* ve tvaru

$$\mathbf{q} = -\lambda_F \cdot \text{grad } T \quad (2.19)$$

kde $\text{grad } T$ je teplotní gradient ve formě [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$].

Teplotní gradient je kritériem pro posouzení stupně rozdílnosti teplotního pole v tělese. $\text{Grad } T$ je definován jako rozdíl teplot T_1 a T_2 , vztažený na nejkratší vzdálenost izoterm (tj. ploch, v jejichž všech bodech je v daném místě a v daném okamžiku stejná teplota, tedy $T = \text{konst.}$). Největší tepelný tok je ve směru normály a to od teploty vyšší, tedy od teploty T_1 , k teplotě nižší, tedy k teplotě T_2 .

Vedení tepla ve vstřikovací formě je charakterizováno prostorovým a časovým rozdělením teploty ($T = f(\mathbf{x}, y, z, t)$), tj. podmínkami nestacionárního sdílení tepla. Tyto

podmínky popisuje *Fourierova diferenciální rovnice* sdílení tepla (2.20), která udává rozložení teploty ve vstřikovací formě v libovolném časovém okamžiku - tzv. *teplotní pole*:

$$\rho \cdot c_v \cdot dT / dt = \text{grad } \lambda \cdot \text{grad } T + q^* \quad (2.20)$$

a po úpravě pro $\lambda = \text{konst}$ dostaneme následující vztah

$$dT / dt = a \cdot \text{grad}^2 T + q^* \quad (2.20a)$$

kde dT/dt je změna teploty s časem,

c_v je měrná tepelná kapacita při stálém objemu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

t je čas [s],

a je součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

q^* je teplo vnitřních zdrojů neboli disipace energie [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Řešení rovnice (2.20a) je velmi náročné, protože kromě fyzikálních a geometrických vlastností výrobku je potřebné znát počáteční a okrajové podmínky (viz kapitola 2.4 a 2.5) s tím, že do procesu vstupuje velké množství rozdílných veličin /46/.

Teplotní pole vstřikovací formy závisí především na:

- 1) vlastnostech vstřikovaného materiálu,
- 2) materiálu formy a na konstrukčním faktoru formy.

1. Plasty s vysokou hodnotou měrné tepelné kapacity c se ohřívají a chladnou za stejných podmínek pomaleji, než slitiny s nízkou měrnou tepelnou kapacitou. Ve stejném smyslu působí i hustota ρ plastu. Součinitel tepelné vodivosti λ je také materiálovou veličinou a je měřítkem rychlosti "předávání" tepla uvnitř hmoty. Vysoká hodnota tepelné vodivosti vede k mohutnějšímu tepelnému toku z výstřiku do formy, což se projevuje vyšší rychlostí tuhnutí plastu v dutině formy. Je však nutné připomenout, že výše uvedené veličiny jsou závislé na teplotě, která se v průběhu chlazení mění /5/, /27/, /29/.

2. Materiál formy spolu s konstrukcí (zejména tvar dutiny, rozmístění temperačních kanálů, ...) výrazně ovlivňují teplotní pole ve vstřikovací formě. Vstřikovací forma je schopna dodané teplo z taveniny plastu odvádět do temperačního systému, ale také akumulovat. Zde je nutné, aby byl splněn soulad mezi odvodem tepla od povrchu tvarové dutiny do formy a z formy do temperačního systému. Na tomto souladu závisí teplotní pole ve formě a tím i rychlost tuhnutí plastu v dutině formy. Schopnost odvodu tepla je, stejně jako v bodě 1., dána zejména tepelnou vodivostí, měrným teplem a hustotou materiálu formy /5/, /27/, /29/.

2.3.3. Přenos tepla mezi formou a temperačním systémem /2/, /13/

Ve vstřikovací formě pro termoplasty je pro zvýšení rychlosti odvodu tepla navržen a vytvořen temperační systém. Temperačním systémem se rozumí systém kanálů a dutin, umožňujících přestup tepla z hmoty formy do temperovací kapaliny.

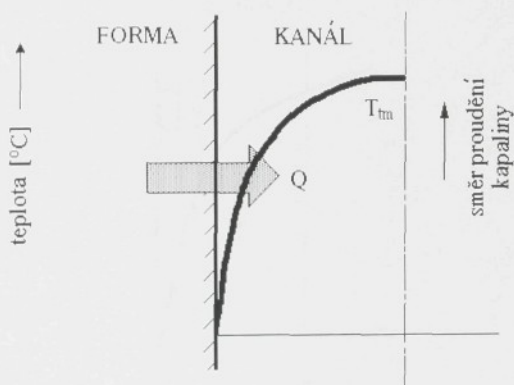
Nesprávně navržený temperační systém má tyto důsledky /39/:

- ♦ nedosažení požadované kvality výrobku,

- ♦ dlouhá doba vstřikovacího cyklu,
- ♦ nestejná teplota jednotlivých částí formy,
- ♦ dlouhé rozběhové fáze pro dosažení stabilního stavu,
- ♦ nehospodárnost provozu.

Nadbytečné teplo se tedy z formy odvádí temperačním okruhem a to co nejrychleji a pokud možno rovnoměrně po celé ploše tvarové dutiny formy. Pokud bude temperační systém navržen vhodně, bude vstřikovací forma minimálně tepelně namáhána, protože tepelné toky budou patřičně "usměrněny" a teplotní gradienty optimálně "potlačeny" /51/. V opačném případě dojde k nevhodnému rozložení teplotních polí ve formě a k nepříznivému nárůstu teplotních gradientů, což se projeví zhoršením kvality výrobku.

Při styku chladicí kapaliny s pevnou stěnou temperačního kanálu dochází mezi kapalinou a stěnou ke sdílení tepla prouděním. V praxi rozlišujeme proudění (konvekci) přirozené a nucené. Přirozené proudění vzniká samovolně, pouze změnou teploty a tím i hustoty jednotlivých částic temperační kapaliny. Dochází totiž k ohřívání tenké vrstvy kapaliny při stěně temperačního kanálu a vzniklým rozdílem hustot různých teplých vrstev kapaliny dochází k tzv. přirozenému proudění. Konvekce umělá, neboli nucená, vzniká působením vnějších účinků na kapalinu pro zvýšení její rychlosti proudění. To vede ke značnému zvýšení výměny tepla. V obecném případě nastávají oba jevy současně. Schéma sdílení tepla prouděním je na obr. 12.



Obr. 12: Schéma sdílení tepla prouděním

Teplo, sdělené z materiálu vstřikovací formy do temperační kapaliny, se vypočítá podle vztahu (2.4). Nejdůležitější veličinou, která může nejvíce ovlivnit množství odvedného tepla, je součinitel přestupu tepla, který se stanoví dle vztahu (2.5). Jak je z rovnice patrné, součinitel přestupu tepla závisí především na:

1. rychlosti proudění temperačního média v kanále,
2. geometrických rozměrech temperačního kanálu (průměr, vzdálenost stěny kanálu od tvarové dutiny, ... - viz. obr. 8),
3. součiniteli tepelné vodivosti kapaliny.

1. Rychlost proudění rozeznáváme dvojí - laminární a turbulentní a mezi těmito dvěma oblastmi ještě i oblast přechodovou. Hranice jednotlivých mezí se určuje pomocí kritického čísla dle *Reynoldse*, kritického čísla dle *Prandla*, příp. kritického čísla dle *Nusselta*, které jsou vyjádřeny následujícími vztahy:

$$Re = v_{tm} \cdot D / \nu_{tm} \quad (2.21a)$$

$$Pr = \nu_{tm} / \alpha_{tm} \quad (2.21b)$$

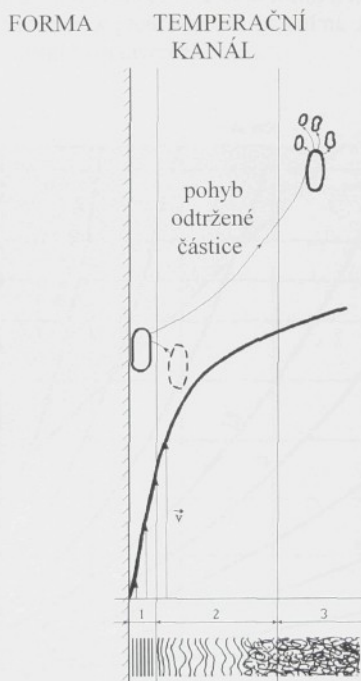
$$Nu = \alpha_K \cdot D / \lambda_{tm} \quad (2.21c)$$

kde v_{tm} je rychlost proudění temperačního média [$m \cdot s^{-1}$],

D je průměr temperačního kanálu [m],

ν_{tm} je kinematická viskozita temperačního média [$m^2 \cdot s^{-1}$],

α_{tm} je součinitel teplotní vodivosti temperačního média [$m^2 \cdot s^{-1}$].



Obr. 13: Schéma dějů v blízkosti stěny kanálu při turbulentním proudění v trubce

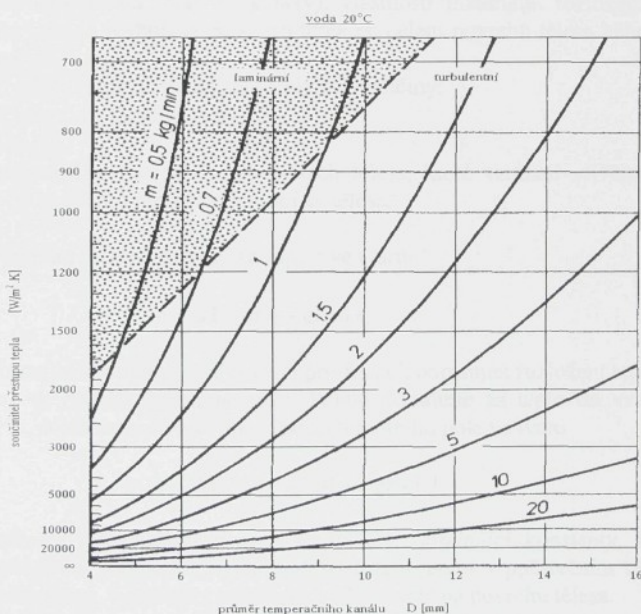
kde 1 je oblast převážně laminárního proudění, 2 je přechodová oblast, 3 je oblast turbulentního proudění.

Pro laminární proudění je charakteristické, že se částice kapaliny pohybují víceméně po rovnoběžných drahách a vrstvy se navzájem nemísí. Jako horní mez mezi laminární a přechodovou oblastí proudění se udává Reynoldsovo číslo $Re = 2300$ (viz obr. 13) /13/. Oblast laminárního proudění je blízko stěny kanálu a v této oblasti je

prudký vzrůst rychlosti. V praxi však není laminární vrstva čistě laminární, neboť částice s malou rychlostí se odtrhují od stěny a pohybují se do oblasti turbulence. Přechodová oblast se udává mezi hodnotami Reynoldsova čísla 2300 až 10000. V této oblasti dochází k plynulé změně proudění, kdy se úseky laminárního proudu postupně prodlužují, až zcela vymizí. Pro turbulentní proudění ($Re > 10000$) je charakteristické kolísání všech veličin. Dráhy částic kapaliny jsou neuspořádané, chaotické a tím dochází k intenzivnímu promíchávání objemu proudící kapaliny, podporované odtrženými částicemi z laminární oblasti, které (ještě navíc) podporují intenzitu turbulence.

Z hlediska výše popsaných skutečností a pro dosažení co nejvyššího přestupu tepla z formy do temperačního systému je tedy nutné zajistit turbulentní proudění v temperačním kanále.

2. Z hlediska vzdálenosti mezi povrchem tvarové dutiny formy a středem temperačního kanálu můžeme učinit závěr, že čím menší bude tato vzdálenost, tím bude dutina formy rychleji chlazena. Tuto vzdálenost však nelze snižovat příliš, a to jak z důvodů pevnostních (nebezpečí porušení formy), tak i z důvodů technologických, protože by mohlo docházet k předčasnému lokálnímu zatuhnutí vstříkovaného plastu nebo dokonce k zastavení toku taveniny [37].



Obr. 14: Závislost rychlosti proudění temperačního média na různých činitelích pro vybranou teplotu média 20 °C.

Při návrhu temperačního systému je důležitý i průřez vlastního temperačního kanálu, který nesmí být příliš velký, aby nedocházelo k porušení tuhosti a pevnosti formy, ale ani příliš malý (i přesto, že roste rychlost proudící kapaliny), protože se snižuje účinná plocha chlazení. Jak je patrné ze vztahu (2.21a), závisí Reynoldsovo

číslo, kromě ostatních parametrů, na průměru temperačního kanálu. A protože součinitel přestupu tepla α_K je funkcí Reynoldsova čísla, je vlastně i funkcí průměru temperačního kanálu. Tyto skutečnosti jsou popsány v literatuře /18/, kde je ukázána na grafických závislostech vzájemná interakce Reynoldsova čísla, průměru temperačního kanálu, součinitele přestupu tepla a teploty temperační kapaliny. Jeden z mnoha příkladů (pro teplotu temperační kapaliny 20 °C) je na obr. 14.

Odvod tepla lze také zvýšit snižováním teploty temperačního média, ale toto snižování nám nedává velké možnosti, protože musíme dodržet dostatečnou tepelnou homogenitu formy.

3. Součinitel tepelné vodivosti λ_m , tak jak již bylo popsáno v kapitole 2.3.2. v bodě 1., je materiálovou veličinou a je měřítkem rychlosti "předávání" tepla /5/, /33/. Vysoká hodnota tepelné vodivosti vede k mohutnějšímu tepelnému toku z formy do temperační kapaliny, což se projevuje vyšším odvodem tepla, rychlejším chlazením dutiny formy a tím tedy vyšší produktivitou výroby.

2.4. Popis a rozdělení teplotního pole /3/, /8/, /14/, /31/

Úkolem je zjistit rozložení teploty v tělese (materiálu). Pro vlastní řešení známe geometrii tělesa (tvar a rozměry), vlastnosti materiálu, rozložení teploty v počátečním stavu a podmínky přestupu tepla po celém povrchu tělesa během procesu vstřikování.

Při sdílení tepla je nutné znát vždy dvě veličiny:

- ♦ tepelné toky (viz. kapitola 2.3),
- ♦ teplotní pole.

Tedy teploty na rozličných místech tělesa, které vznikají vlivem teplotních gradientů (příp. spádů) mezi různými místy tělesa.

Z teplotní bilance, kterou lze zapsat ve tvaru

$$\rho \cdot c_v \cdot dT / dt = - \text{grad } q \quad (2.22)$$

budeme formulovat diferenciální rovnici pro funkci, popisující rozložení teplot v tělese (materiálu), tj. rovnici teplotního pole. Pokud dosadíme za teplo do vztahu (2.22) vztah (2.19), dostaneme rovnici pro výpočet teplotního pole ve tvaru

$$\rho \cdot c_v \cdot dT / dt = \text{grad } \lambda \cdot \text{grad } T \quad (2.23)$$

Řešením diferenciální rovnice je funkce, obsahující konstanty, které musí splňovat počáteční podmínku, vyjadřující rozložení teplot v počátečním okamžiku, a podmínky okrajové, vyjadřující podmínky sdílení tepla na povrchu tělesa.

Pokud bude součinitel tepelné vodivosti λ konstantní, dostaneme ze vztahu (2.23) následující rovnici

$$dT / dt = a \cdot \text{grad}^2 T \quad (2.24)$$

kde

$$a = \lambda / (\rho \cdot c_v) \quad (2.25)$$

Vztah (2.24) je základní rovnicí pro řešení teplotního pole v pravoúhlém souřadném systému.

2.4.1. Rovnice vedení tepla /3/

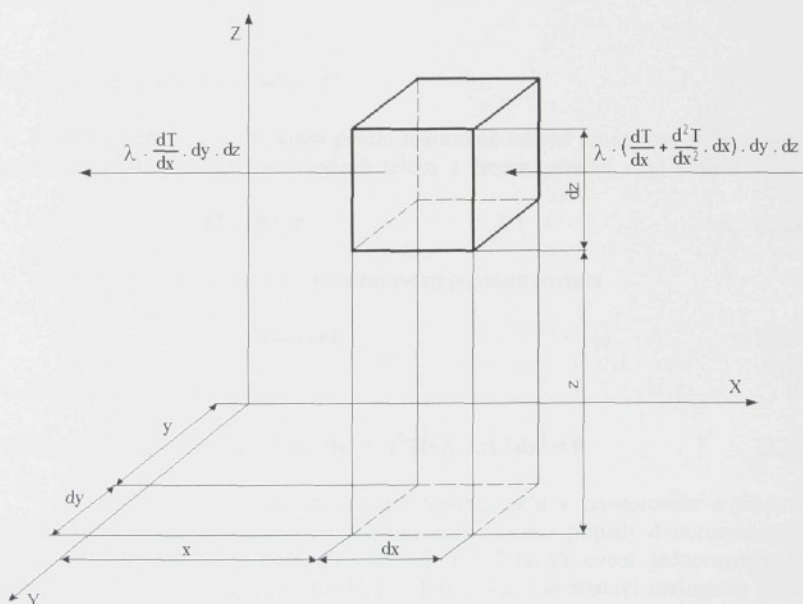
Teplota T , která je obecně funkcí souřadnic a času, se může prostorově i časově měnit a potom množiny teplot v tělese nazýváme teplotním polem. Při použití pravoúhlých souřadnic x, y, z je teplotní pole v časovém okamžiku t obecně popsáno funkcí

$$T = T(x, y, z, t) \quad (2.26)$$

kde T je teplota [K],

x, y, z jsou kartézské souřadnice [m],

t je čas [s].



Obr. 15: Tepelná bilance elementu při použití pravoúhlých souřadnic
(pro názornost jsou naznačeny tepelné toky pouze ve směru x)

Pro určení diferenciální rovnice teplotního pole, použijeme tepelnou bilanci pro element tělesa (viz obr. 15) tvaru kvádra o rozměrech dx, dy, dz . Platí zde skutečnost, že teplo, které „vnikne“ do elementu tělesa, se spotřebuje na jeho ohřátí. Jako kladné označíme ty tepelné toky, které proudí do elementu. Po napsání rovnice rovnováhy a

po následné úpravě dostaneme diferenciální rovnici nestacionárního teplotního pole v pravouhlých souřadnicích ve tvaru

$$\begin{aligned} d^2T(x,y,z,t) / dx^2 + d^2T(x,y,z,t) / dy^2 + d^2T(x,y,z,t) / dz^2 = \\ = (1/a) \cdot dT(x,y,z,t) / dt \end{aligned} \quad (2.27)$$

Tato rovnice se nazývá Fourierovou diferenciální rovnicí vedení tepla.

Vztah (2.27) se týká řešení teplotních polí v pravouhlých souřadnicích pro základní tvar - deska. Pokud bychom chtěli vyšetřovat teplotní pole ve válci, příp. kouli, museli bychom pravouhlé souřadnice nahradit souřadnicemi válcovými, příp. kulovými, což je uvedeno např. v literatuře /2/.

Rovnice (2.27) říká, že spojíme-li body tělesa, ve kterých je stejná teplota ve stejném čase, dostaneme teplotní pole. Podél teplotních polí se teplota nemění, nejprudší změna teploty je v místě kolmém na tuto plochu. Měrný přírůstek teploty (přírůstek na jednotku délky) označujeme jako teplotní gradient. Pokud je teplotní gradient záporný, nazýváme ho teplotním spádem. Nerovnoměrné rozložení teploty má za následek vznik tepelného toku ve směru klesající teploty /2/, /33/.

Při vlastním řešení teplotních polí můžeme vyšetřovat jak stacionární, tak i nestacionární teplotní pole.

2.4.2. Stacionární teplotní pole /35/

Třírozměrným stacionárním polem rozumíme takové prostorové pole teplot, u kterého se teplota v jednotlivých bodech tělesa s časem nemění, resp. platí-li vztah

$$dT / dt = 0 \quad (2.28)$$

Takové teplotní pole je v obecném tvaru popsáno rovnicí

$$T = T(x, y, z) \quad (2.29)$$

a v diferenciálním tvaru rovnicí

$$d^2T(x,y,z,t) / dx^2 + d^2T(x,y,z,t) / dy^2 + d^2T(x,y,z,t) / dz^2 = 0 \quad (2.30)$$

Rovnice (2.30) popisuje stacionární teplotní pole v prostorovém souřadném systému (třírozměrné teplotní pole). Mohou však nastat i případy dvourozměrného, neboli rovinného teplotního pole ($dT / dz = 0$, $T = T(x, y)$) event. jedno-rozměrného teplotního pole ($dT / dy = dT / dz = 0$, $T = T(x)$), které se stanoví analogicky jako u třírozměrného teplotního pole.

Na stacionární teplotní pole je možné pohlížet jako na zvláštní případ obecnějšího případu nestacionárního teplotního pole.

2.4.3. Nestacionární teplotní pole /3/, /35/

Rovnice (2.26) popisuje třírozměrné nestacionární teplotní pole, které je charakterizováno skutečností, že teploty v jednotlivých bodech o souřadnicích x, y, z

jsou funkcemi času. Nestacionární třírozměrné teplotní pole je nejobecnější případ teplotního pole. Další možné případy nastanou, obdobně jako u stacionárního teplotního pole, mění-li se teplota pouze ve dvou směrech - dvourozměrné, neboli rovinné teplotní pole ($dT / dz = 0$, $T = T(x, y, t)$) event. pouze v jednom směru - jednorozměrné teplotní pole ($dT / dy = dT / dz = 0$ a tedy $T = T(x, t)$), jejichž diferenciální rovnice se stanoví obdobně jako u třírozměrného teplotního pole.

2.4.4. Počáteční a okrajové podmínky /3/

Časově proměnné teplotní pole způsobuje obecně změnu stavu okolí v okamžiku t . Teplota T ke každému pozdějšímu časovému okamžiku $t > 0$ je potom jednoznačně určena, pokud v čase $t = 0$ je známé teplotní pole. Jinak řečeno, v případě nestacionárního vedení tepla musíme výslednou diferenciální rovnici doplnit počáteční podmínkou, popisující rozložení teploty v tělese v čase $t = 0$.

Např. v pravouhlém souřadném systému má počáteční podmínka tvar

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad (2.31)$$

Často je počáteční podmínka formulována tak, že v okamžiku $t = 0$ je teplota v tělese rozložena rovnoměrně a tedy např. při použití pravouhlých souřadnic platí

$$T(x, y, z) = T_0 = \text{konst} \quad (2.32)$$

U stacionárního teplotního pole podmínka odpadá.

Pro všechny pozdější časové okamžiky $t > 0$ musíme diferenciální rovnici vedení tepla, a to jak při stacionárním, tak i nestacionárním vedení tepla, doplnit určitým počtem okrajových podmínek, které vyjadřují podmínky přestupu tepla na povrchu tělesa. Z charakteru diferenciálních rovnic plyne určitý počet těchto podmínek.

Vzhledem k tomu, že jde vesměs o diferenciální rovnice druhého řádu, bude tento počet okrajových podmínek $2 \cdot n$ u n - rozměrného teplotního pole. Proto budou u jednorozměrného pole nutné dvě podmínky, u dvourozměrného pole čtyři a u třírozměrného pole šest okrajových podmínek.

Okrajové podmínky mohou být zadány čtyřmi způsoby:

1. Je dáno rozložení teploty T_p na povrchu tělesa jako známá funkce času (okrajová podmínka prvního druhu)

$$T_p(t) = f(t) \quad (2.33)$$

2. Je dán měrný tepelný tok q_p , procházející povrchem tělesa, jako známá funkce času (okrajová podmínka druhého druhu)

$$q_p(t) = f(t) \quad (2.34)$$

3. Jsou dány jako známé funkce času teplota prostředí, obklopující těleso a podmínky přestupu tepla z tělesa do prostředí (okrajová podmínka třetího druhu). Tato podmínka je formulována tak, že tepelný tok, procházející povrchovou vrstvou tělesa, je totožný

s tepelným tokem, procházejícím mezní vrstvou okolního média. Přitom tepelný tok q_p , proudící z tělesa jednotkovou plochou povrchu, je podle vztahu (2.19) úměrný teplotnímu spádu na povrchu tělesa ve směru kolmém, tedy ve směru normály povrchu a platí

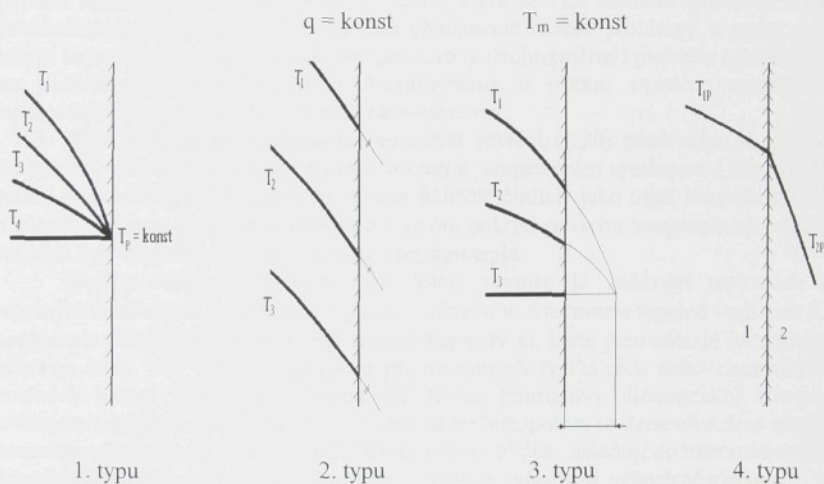
$$q_p = -\lambda \cdot (dT / dn)_p \quad (2.35)$$

Tepelný tok q_p , procházející jednotkovou plochou mezní vrstvy média je úměrný rozdílu povrchové teploty tělesa T_p a teploty média T_{tm} (Newtonův zákon) a tedy platí následující vztah

$$q_p = \alpha \cdot (T_p - T_{tm}) \quad (2.36)$$

Z rovnosti obou tepelných toků dostaneme okrajovou podmínku třetího druhu.

Zvláštní případ nastane pro limitu $\lambda / \alpha = 0$ (a tedy $T_p = T_{tm}$). V tomto případě přechází okrajová podmínka třetího druhu v podmínku prvního druhu.



Obr. 16: Okrajové podmínky prvního až čtvrtého druhu

4. Při dokonalém styku dvou těles platí okrajová podmínka čtvrtého druhu, která vyjadřuje, že:

- ♦ teplota obou těles je v místě styku stejná,
- ♦ tepelný tok, proudící mezi povrchovými vrstvami těles, je v místě styku stejný.

Pro výše uvedené body můžeme zapsat okrajovou podmínku čtvrtého druhu následující vztahy:

$$T_{1p} = T_{2p} \quad (2.37)$$

$$\lambda_1 \cdot (dT_1 / dn)_p = \lambda_2 \cdot (dT_2 / dn)_p \quad (2.38)$$

Okrajové podmínky prvního, druhého, třetího a čtvrtého druhu pro teplotní poměry kolem povrchu tělesa pro výše popsané příklady jsou ukázány na obr. 16.

2.5. Metody řešení teplotních polí

V této kapitole jsou uvedeny možné způsoby určení funkce $T(x, y, z, t)$, popisující při použití pravouhlých souřadnic teplotní pole v tělese daného tvaru, rozměrů a materiálových vlastností, je-li dáno počáteční rozložení teploty a podmínky sdílení tepla na povrchu tělesa, které lze v podstatě provést třím způsobem. Hledaná funkce musí vyhovovat diferenciální rovnici vedení tepla a splňovat počáteční podmínky i podmínky okrajové.

Pokud se podaří při řešení rovnice (2.20) správně formulovat okrajové podmínky, lze očekávat úspěšnost jejího řešení. Samotným řešením Fourierovy rovnice lze získat nekonečný počet výsledků, které se více či méně přibližují dané problematice. Řešení rovnice (2.20) však představuje značné problémy, a proto tam, kde je to jen trochu možné, převádíme prostorový (trojrozměrný) problém řešení tepla na problém jednorozměrný nebo dvourozměrný a ostatní rozměry uvažujeme nekonečně velké a sdílení tepla v nich zanedbáváme.

Ve vstřikovacích formách lze aplikovat rovnici (2.20) především na přenos tepla mezi výstřikem a formou a mezi formou a temperačním systémem s tím, že do řešení problému nebudou zahrnuty některé důležité činitele jako např. konvekce tepla v plastu, vliv mezery mezi výstřikem a formou, pokrytí povrchu temperačních kanálů rzi, atd. Tyto činitele ovlivňují intenzitu přestupu tepla.

Dalším velkým problémem při řešení rovnice je zadávání teplotních a tepelných koeficientů (součinitele teplotní vodivosti a , součinitele tepelné vodivosti λ , součinitele přestupu tepla α , měrné tepelné kapacity c), které jsou závislé na teplotě, příp. na čase. Vliv času se uplatňuje při nevratných fyzikálních nebo chemických změnách hmoty tělesa [33]. Pokud při řešení Fourierovy diferenciální rovnice uvažujeme např. závislost teplotní vodivosti na teplotě, potom je třeba při řešení zavést pomocnou proměnnou. Tyto vlivy se potom velmi obtížně začleňují do matematického řešení dané problematiky, nehledě na to, že složitost výpočtu se neúměrně zvyšuje.

Složitost a obtížnost matematického řešení Fourierovy rovnice v současné době způsobila (i přes velké možnosti výpočetních systémů), že se ho používá velmi zřídka a místo toho se dává přednost empirickému řešení, nebo řešení, kdy dochází k nahrazení zkoumaného jevu bezrozměrnými čísly (viz. kap. 2.3).

Způsoby řešení teplotních polí jsou:

1. analytický způsob,
2. numerický způsob,
3. experimentální způsob.

2.5.1. Analytický způsob řešení /34/, /35/

Analytickými metodami lze řešit teplotní pole pouze v jednodušších případech tvaru těles a okrajových podmínek, většinou za použití vhodné idealizace problému.

Hlavní výhodou analytického řešení je, že výsledky mají obecnou platnost. Se zřetelem na zobecnění výsledků je výhodné používat bezrozměrných parametrů jak během řešení, tak hlavně ve výsledných vzorcích. V případě složitějšího tvaru tělesa a složitějších okrajových podmínek, nebo v případě, kdy materiálové vlastnosti tělesa jsou závislé na fyzikálních parametrech (teplotě, tlaku, atd.), nelze provést exaktní analytické řešení. Potom se musí zanedbávat podřadnější vlivy, např. proměnlivost materiálových vlastností, tepelný tok v určitém směru proti převažujícímu tepelnému toku, složitě těleso nahradíme jednoduššími modely, ..., a počítáme se středními hodnotami, nebo použijeme některé z metod numerických nebo experimentálních.

Metod analytického řešení existuje několik a mezi nejdůležitější patří:

1. řešení pomocí separace proměnných,
2. řešení pomocí Laplaceova zobrazení.

1. Metoda separace proměnných

Diferenciální rovnici teplotního pole (prvního až třetího řádu) z hlediska výsledného řešení můžeme rozdělit na několik dílčích řešení, které vyjádříme pomocí řady. Po vyřešení jednotlivých dílčích diferenciálních rovnic určíme konstanty z okrajových podmínek. Následně vše dosadíme do původní rovnice a provedeme integraci dle řádu diferenciální rovnice (např. po tloušťce tělesa).

Výhodnější způsob je použití bezrozměrných veličin ($\mathbf{Fo}$, $\mathbf{Bi}$, ξ , Θ , ...). To tedy znamená, že hodnoty nebudou nyní zobrazovány se souřadnicemi $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$, $\mathbf{z}$, nebo teplotou $\mathbf{T}$, atd., ale pouze v bezrozměrném vyjádření a konečná integrace bude v mezích 0 - 1.

2. Laplaceovo zobrazení

Řešení spočívá v tom, že diferenciální rovnici zobrazíme podle času. Zároveň zobrazíme podle času okrajové podmínky. Zobrazenou (Laplaceův obraz) diferenciální rovnici vyřešíme tak, aby splňovala obrazy okrajových podmínek. Řešení zobrazené rovnice je obrazem řešení rovnice původní. Dostaneme tedy řešení původní diferenciální rovnice jako originál k nalezenému obrazu, což bývá nejobtížnější část řešení.

Větší využití matematického popisu přineslo rozšíření numerických počítačů, které umožňovaly při správné „idealizaci“ získat řešení v přijatelně krátké době a s dostatečnou přesností. Diferenciální rovnice vedení tepla se potom převedla na diferenční rovnici a základní řídicí rovnice byla ve tvaru matice, jejíž další zpracování umožňovala některá z numerických metod.

2.5.2. Numerický způsob řešení /3/

Numerických metod existuje velké množství a v nynější době se jich s výhodou využívá v simulačních programech pro výpočty jednotlivých analýz (teplotních, napěťových, atd.), kde nacházejí největší uplatnění při řešení velkého množství rovnic, uspořádaných do matic. Princip metod je založen na rozdělení zkoumané oblasti do vhodně uspořádaných podoblastí, na které se potom aplikují vhodné matematické operace.

Mezi nejdůležitější numerické metody patří:

1. metoda sítí (konečných diferencí),

2. metoda hraničních (okrajových) prvků,
3. metoda konečných prvků.

1. Metoda sítí

Vyšetřovaná oblast se rozdělí na konečný počet prvků (sítí) a pokud v každém z nich nahradíme derivace přibližně konečnými diferencemi, dostaneme místo diferenciálních rovnic rovnice algebraické, platné pro funkční hodnoty v jednotlivých bodech. Pro lepší názornost se tyto body spojují do sítí. V ostatních bodech je nutné definovat hodnoty hledané funkce dodatečně podle zvoleného algoritmu. Metodu sítí lze zobecnit i pro dvourozměrnou nebo i třírozměrnou oblast. Její nevýhodou je, že nemá-li hranice jednoduchý tvar, musí se diferenční vzorce pro okrajové oblasti zvlášť odvozovat nebo se musí užívat interpolace.

Pokud zkráceně popíšeme aplikaci metody sítí na diferenciální rovnici teplotního pole (2.20), tak tato rovnice se převede do diferenciálního tvaru prostorovou a časovou diskretizací. Provedeme-li nahrazení derivace teploty podle času dopřednou diferencí $[(T^{(k+1)} - T^{(k)}) / \Delta t]$, je výpočtová metoda explicitní (přímá). Její tvar dovozuje v každém uzlu zvolené výpočtové sítě explicitně vypočítat teplotu $T^{(k+1)}$ v následujícím časovém okamžiku, tj. ve zvoleném časovém kroku Δt , známe-li teploty tělesa $T^{(k)}$ na počátku tohoto kroku.

Explicitní tvar umožňuje snadnější programování použité numerické metody na počítači, než např. tvar implicitní. Implicitní formule se získává náhradou derivace teploty dle času zpětnou diferencí $[(T^{(k)} - T^{(k-1)}) / \Delta t]$.

Diferenciální rovnici je třeba současně řešit ve všech uzlech zvolené výpočtové sítě, protože neznámou teplotu $T^{(k+1)}$ nelze vypočítat přímo z jediné rovnice. Implicitní vyjádření tak vede k řešení početního systému algebraických rovnic. Proto k řešení této problematiky se používá metoda explicitní, která má proti metodě implicitní výhodu v tom, že na volbě délky časového kroku Δt závisí stabilita řešení. Velkou výhodou explicitních metod je právě stabilita řešení pro libovolně dlouhý časový krok, který se při jejich použití volí jen se zřetelem na chybu časové diskretizace úměrnou Δt . Při řešení teplotního pole je nutno matematicky modelovat fázovou přeměnu taveniny v tuhou fázi. Změna fáze je doprovázena skokovou změnou parametrů, resp. tepelně - fyzikálních veličin materiálu výstřiku (λ , ρ , c). Tato skoková změna komplikuje převedení Fourierovy diferenciální rovnice do diferenčního tvaru.

2. Metoda hraničních prvků

K hlavní výhodě této metody patří ta skutečnost, že se hlavní část řešení odbývá v oblasti o jednu dimenzi nižší, než je rozměr definiční oblasti. Při této metodě používáme místo přesného řešení aproximaci a integrál, vyjadřující stav tělesa (deformace, teplota, atd.), který bude nenulový. Čím bude hodnota takto aproximovaného integrálu menší, tím bude aproximace lepší. Okrajové hodnoty hledané funkce, tj. funkce vyjadřující přesné řešení deformace tělesa, dovedeme vypočítat, aniž bychom řešili danou diferenciální rovnici uvnitř definiční oblasti, ale pouze řešením okrajových podmínek při použití znalostí o geometrii oblasti. Aplikujeme-li tuto myšlenku na prostorovou úlohu, získáme hodnoty hledaných funkcí na povrchu tělesa, aniž bychom řešili prostorovou úlohu.

3. Metoda konečných prvků

Základním principem této metody je rozdělení 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. Výpočetem těchto parametrů je pak určen průběh veličiny v dané oblasti. Průběh veličin se určuje z podmínky minima určitého funkcionálu.

Tato metoda je spolu s metodou sítí jednou ze základních numerických metod. Používá se pro řešení úloh resp. při sledování fyzikálních veličin, které jsou popsány parciální diferenciální rovnicí a lze je stanovit na počítači.

Ve většině případů, lze na MKP pohlížet jako na variační metodu. Přibližné řešení se zde hledá ve tvaru lineární kombinace konečného počtu vhodně zvolených funkcí, tzv. *bazových funkcí*. Variační metoda, užitá k řešení lineární okrajové úlohy, vede k řešení soustavy lineárních algebraických rovnic $\mathbf{Ax} = \mathbf{f}$ pro kladné koeficienty této kombinace. Na rozdíl od klasických variačních metod se bazové funkce v MKP volí tak, že se oblast, v níž je úloha zadána, rozloží na konečný počet (ale poměrně velký počet) podoblastí jednoduchého tvaru, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečný počet uzlových bodů na hranicích prvků. Podoblasti, neboli prvky rozděleného prostoru, mohou mít tvar trojúhelníků s rovinnými stranami a třemi uzly nebo čtyřstěnů se čtyřmi uzlovými body ve vrcholech; popř. jinými útvary. Složitost zvolených prvků souvisí i se složitostí řešení parciální diferenciální rovnice. Bazové funkce se volí tak, že jsou nenulové pouze lokálně, tj. na jednom, či několika sousedních prvcích. Tato volba má za následek speciální strukturu matice $\mathbf{A}$, která umožňuje soustavu $\mathbf{Ax} = \mathbf{f}$ efektivně řešit. Typickou vlastností této metody je, že průběh hledaných fyzikálních veličin se určuje z podmínky minima jistého funkcionálu, což je předpis, který přiřazuje reálné, popř. komplexní číslo každému prvku jisté třídy matematických objektů.

Variační metoda spadá do široké škály metod numerické matematiky, vedoucích k přibližnému určení extrémních hodnot funkcionálů. V matematice se používají k přibližnému řešení operátorových rovnic, např. úloh pro parciální diferenciální rovnice.

Variační metoda spočívá v převedení úloh hledání extrémů funkcionálů na hledání minima funkce s konečným počtem nezávisle proměnných a na konstrukci posloupnosti, která v jistém smyslu konverguje k řešení úlohy, tj. k prvku, který realizuje extrém vyšetřovaného funkcionálu (tzv. minimalizující posloupnost). Pomocí variačních metod jsou konkrétní úlohy obvykle vypracovávány počítačem (kladou velké nároky na rychlost a kapacitu počítače).

Totoho principu se používá i při vyšetřování teplotních polí sledovaného tělesa, lze však postupovat různými způsoby, jež se liší přístupem k řešení diferenciální rovnice vedení tepla a volbou dělení prostoru na prvky. Jak uvádí literatura /3/, nejčastěji se používají:

- a) metoda využívající Eulerova teorému,
- b) metoda používající Galerkinova principu.

V současné době dospěli někteří autoři k tomu, jak uvádí literatura /19/, /20/, /21/, /33/, že obecný algoritmus řešení teplotního pole (prostorového sdílení tepla a hmoty v systému výstřik - forma - okolí), kdy se uplatňují všechny druhy přenosu tepla a okrajových a počátečních podmínek je prakticky analyticky neřešitelný.

Závěrem této kapitoly je nutné uvést konstatování /42/, /49/, že při porovnání metody konečných prvků a metody sítí je výhodnější metoda konečných

prvků. Nehledě na to, že metoda sítí je náchylná na přesnost ve větších hloubkách pod povrchem materiálu tam, kde se řeší rozložení teplot.

To je pravděpodobně důvod, proč většina programových souborů, určených k řešení teplotních polí ve výstřiku a vstřikovací formě (např. STRIM 100, CADMOULD, MOLDFLOW, CMOLD, ALGOR, atd.) je založena na metodě konečných prvků, jak uvádí jejich propagační materiály.

2.5.3. Experimentální způsob řešení

Při řešení teplotních polí experimentálními metodami se využívá okolností, že některé fyzikální jevy jsou popsány diferenciálními rovnicemi, shodnými s diferenciálními rovnicemi vedení tepla. Tak lze např. modelovat teplotní pole polem elektrickým, kdy teplotám odpovídá určitý elektrický potenciál, tepelné vodivosti elektrická vodivost, měrnému tepelnému toku intenzita elektrického proudu apod.

Experimentální měření teplotních polí ve vstřikovacích formách, které jsem použil pro účely zjištění průběhu teplot na čase, je založeno na měření pomocí termočlánků a je dále popsáno v kap. 3.1.

Vše, co bylo uvedeno v teoretické části, mi dalo určitý přehled o fyzikální podstatě dějů, které se odehrávají ve vstřikovací formě při procesu vstřikování, tedy při vzájemné interakci mezi taveninou plastu, kovem vstřikovací formy a temperačním systémem. To mi pomohlo jednak při volbě umístění termočlánků v materiálu vstřikovací formy, tak při volbě technologických parametrů vstřikování, které jsem systematicky měnil a kombinoval.

Na základě toho, že matematické řešení rovnice vedení tepla se všemi okrajovými podmínkami je velmi náročné a v důsledku toho, že neexistuje obecný algoritmus pro analytické řešení, jsem se rozhodl pouze pro experimentální měření teplotních polí a jejich porovnání s teplotními polí, získanými pomocí modelování.

Vedlo mě k tomu několik důvodů, které se dají shrnout do těchto bodů:

- ♦ nemožnost získání přesných výsledků z analytického řešení,
- ♦ vysoká přesnost získaných hodnot při experimentálním měření při konkrétních podmínkách vstřikování včetně účinku okolních vlivů,
- ♦ vysoká rychlost a kvalita naměřených hodnot i při změně jednotlivých parametrů vstřikování,
- ♦ jednoduché a rychlé zpracování výsledků včetně grafických výstupů,
- ♦ možnost porovnání experimentálně zjištěných hodnot s hodnotami, které jsem zjistil pomocí modelování teplotních polí pro zvýšení účinnosti simulačních programů.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální měření této práce byla zaměřena na měření teploty v závislosti na čase v různých místech vstřikovací formy během procesu vstřikování pro různé technologické parametry (teplota taveniny, teplota temperačního média, délka doby cyklu a rychlost proudění temperačního média), které jsem měnil tak, abych mohl sledovat jejich vliv na teplotní pole, příp. na mechanické vlastnosti.

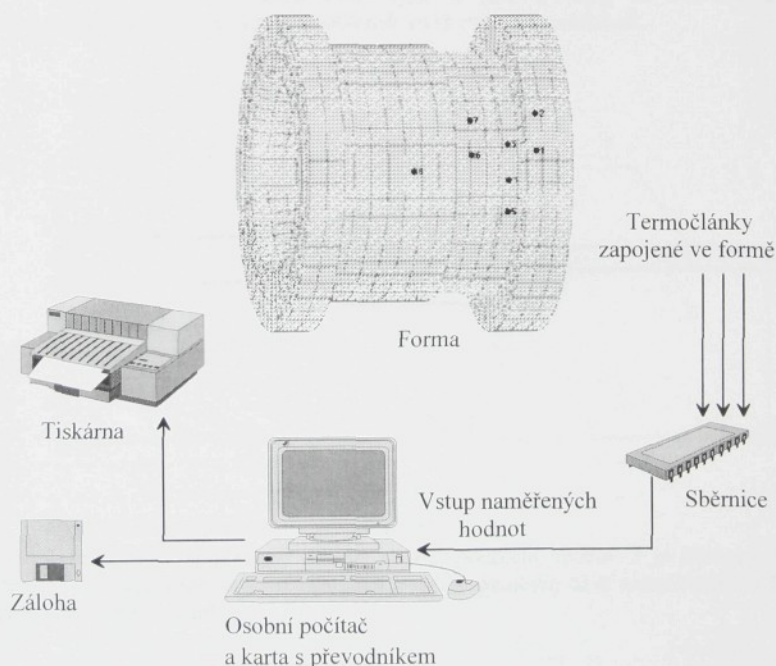
Pro měření teploty byly zvoleny termočlánky typu **T** (viz. kap. 3.1.1.) a karta **AD 18** s převodníkem.

Experimenty byly provedeny na vstřikovací formě pro výrobu výstřiků jednoduchého tvaru - „kelímek ČSA“. Výkres vstřikovací formy je uveden v příloze 1. Výkres výrobku je uveden v příloze 2.

Měření teplotních polí a jejich vyhodnocení bylo provedeno na katedře tváření a plastů Technické univerzity v Liberci.

3.1. Použité zařízení pro měření a sledování teplotních polí

Měření a sledování průběhů teplot v závislosti na čase v různých místech nástroje bylo prováděno na zařízení, které se skládá z termočlánků, sběrnice, karty **AD 18** s převodníkem a z počítače **PC/AT 486**. Celá tato soustava převádí analogový signál od termočlánků na digitální signál na výstupu. Schéma měřicího zařízení spolu s formou je na obr. 17.



Obr. 17: Schéma měřicího zařízení

Od použitého měřicího zařízení bylo vyžadováno:

- ♦ velikost, tvar formy a její tvarová dutina musí do určité míry zabezpečit nezkreslené podmínky měření,
- ♦ rozmístění termočlánků musí co nejspolehlivěji sledovat skutečnou teplotu, protože s klesajícím průměrem větví termočlánků se potlačuje i škodlivý vliv odvodu tepla z měřeného prostoru, čímž se snižuje i časová konstanta čidla,
- ♦ co nejmenší ovlivnění měřicí soustavy, a tím pádem i výsledků měření, vstřikovacím strojem a okolními vlivy,
- ♦ co nejjednodušší, přesný a přehledný způsob zápisu a vyhodnocení naměřených hodnot.

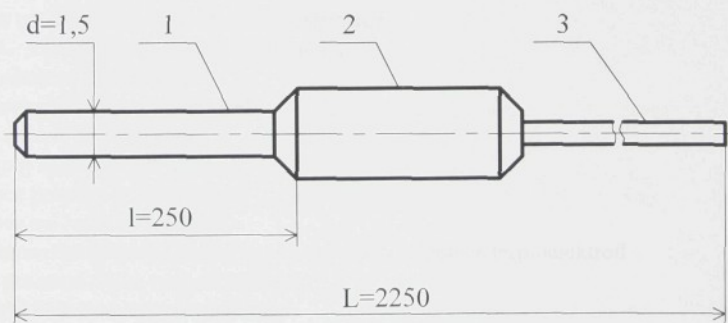
3.1.1. Použité termočlánky

Použité termočlánky jsou určeny pro měření teplot ve strojírenství, pro experimentální výzkum s přizpůsobením pro teploty v hlubokých dutinách (otvorech). Jejich malé rozměry umožňují měření teplot ve velmi malých objemech při vysoké citlivosti na změny teplot.

Pro měření teplotních polí ve sledovaných místech vstřikovací formy byly použity termočlánky ruské výroby typu **T** „chromel - alumel“ s tímto chemickým složením na jednotlivých elektrodách:

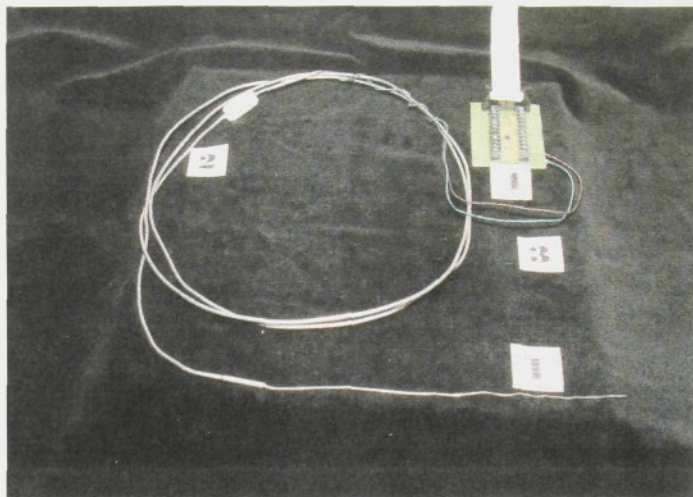
- ♦ kladný přívod: 90,5% Ni + 9,5% Cr,
- ♦ záporný přívod: 94,5% Ni + 5,5% Al.

Tvar a konstrukce termočlánku typu **T** jsou uvedeny na obr. 18 a na následujícím obr. 19, je ukázán termočlánek ve skutečném provedení.



Obr. 18: Tvar a konstrukce termočlánku

kde **1** je plášť, **2** je přechodový kus na kompenzační vedení, **3** je kompenzační vedení, d je vnější průměr termočlánku, l je délka pracovní části termočlánku a L je celková délka termočlánku.



Obr. 19: Provedení termočlánu

kde **1** je pracovní část termočlánu, **2** je kompenzační vedení v ocelovém plášti, **3** je kompenzační vedení pro připojení na sběrnici, **4** je sběrnice.

Charakteristika použitých termočlánu:

označení / typ: **TXA - 1000 - 00 - 1 (25)**

a) *Popis označení termočlánu (zleva doprava):*

- ◆ TXA - termočlánek „chromel - alumel“,
- ◆ 1 - kabelová konstrukce,
- ◆ 0 - materiál pláště z nerez oceli,
- ◆ 0 - kruhový průřez pláště,
- ◆ 0 - spoj společný s obalem,
- ◆ 0 - bez pouzdra pro těsnění,
- ◆ 0 - bez ochranného těsnění,
- ◆ 1 - termoelektrodový kabel v ocelovém plášti + izolace termoelektrod
- ◆ 25 - pracovní délka termočlánu (cm).

b) *Technické parametry termočlánu:*

- | | |
|---|------------------|
| ◆ rozsah teplot pro dlouhodobé použití: | - 200 až 1000 °C |
| ◆ mezní teplota pro krátkodobé použití: | 1300 °C |
| ◆ vnější průměr termočlánu d v pracovní části: | 1,5 mm |
| ◆ délka pracovní části termočlánu l : | 250 mm |
| ◆ celková délka L : | 2250 mm |
| ◆ zaručená doba provozu: | 5000 h |
| ◆ pravděpodobnost bezporuchového provozu: | 92 % |

3.1.2. Karta AD 18 s převodníkem

Pro snímání a záznam zjištěných hodnot během vlastních měření jsem použil kartu **AD 18** s převodníkem, která je kompatibilní s počítači řady **PC** a velmi snadná na obsluhu a zadávání vstupních hodnot, protože prostředí je vytvořeno v programovacím jazyku **C+** firmy **BORLAND**. Komfortní obslužný program umožňuje nastavení počtu kanálů, rozsahu, doby měření, způsobu měření, atd.

Karta **AD 18** obsahuje autonomním procesem řízení **AD** převodník s vysokou rozlišovací schopností, který je galvanicky oddělený od obvodů počítače, aby se minimalizoval vliv rušivých vlivů. **AD** převodník pracuje na principu modifikované metody vyrovnávání náboje, používané u multimetrů vyšších tříd přesnosti. Integrovaný princip převodu a galvanické oddělení zajišťují vysokou odolnost vůči rušivým napětím.

Karta je ideální pro měření malých signálů. Ke kartě je připojena svorkovnice s měřením teploty studeného konce pro měření teploty pomocí termočlánků. Vysoká přesnost karty **AD 18** s převodníkem je dána využitím metody autokalibrace. Kartu lze použít všude tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na přesnost, linearitu a rozlišovací schopnost a svými parametry může karta **AD 18** nahradit až šestidekádobé systémové multimetry při nesrovnatelně nižší ceně.

Technické parametry:

- ♦ programovatelné rozlišení 16 až 22 bitů,
- ♦ nelinearita typ. 0,0003 %
- ♦ maximální chyba 0,005 % z údaje,
- ♦ základní rozsah 0 až 5 V unipolárně nebo $\pm 2,5$ V bipolárně,
- ♦ přesnost při měření teploty typ. 0,2 až 0,5 °C,
- ♦ teplotní drift typ. 20 ppm/K,
- ♦ max. vstupní napětí ± 30 V,
- ♦ rychlost převodu je v tab. 1.

Tab. 1: Rychlost převodu pro možné volby rozlišení

ROZLIŠENÍ SIGNÁLU (bit)	16	18	20	22
DOBA INTEGRACE (ms)	5	20	80	320
DOBA PŘEVODU (ms)	10	25	85	325

K celkové době převodu je však nutné ještě přičíst čas nutný pro zpracovávání údaje v PC, který podle rychlosti **PC** činí 1 až 15 ms.

Ovládací program karty **AD 18** umožňuje pohodlnou volbu požadovaných vstupů, jako např. volbu rozsahů, počet kanálů, ukládání naměřených hodnot na disk, atd. Při spuštění ovládacího programu je načtena konfigurace ze souboru, pokud je přítomen v aktuálním adresáři, jinak je použito implicitní nastavení. Po spuštění ovládacího programu se objeví základní menu. Veškeré funkce karty je možno vyvolávat buď pomocí myši nebo pomocí kurzorových a „horkých“ kláves. Funkce menu je možno vyvolat kliknutím myši, klávesou **F10** nebo stisknutím klávesy **Alt** a zvýrazněného písmena funkce.

Na obr. 20 je schematicky naznačena struktura ovládacího programu.

3.2. Vstřikovací forma

Experimentální měření bylo provedeno na vybrané vstřikovací formě pro výrobu kelímků, používaných u Českých aerolinií (viz. obr. 21). Tvárník i tvárnice jsou samostatně zobrazeny na obr. 22 a obr. 23.

Při volbě vstřikovací formy bylo bráno v úvahu takové konstrukční řešení, které by zamezilo zkreslování hodnot během experimentálních měření, např. vytápěné vtokové kanály, vícenásobný vstřikovací nástroj, tepelně vodivé vložky v nástroji, atd.

Jedná se o kruhovou, jednonásobnou, dvoudeskovou formu s plným středovým vtokem. Vtok je kolmý na dělicí rovinu. Vyhození výstřiku včetně vtokového zbytku je zabezpečeno pomocí stíracího kroužku. Váha výstřiku je 22 gramů. Temperační systém je rozdílný jak pro tvárník, tak i pro tvárnici. Ke chlazení tvárníku je použito trubkového temperačního systému a temperační vložky pro zabezpečení správné cirkulace temperačního média. Chlazení tvárnice je pak zajištěno kruhovým chladícím systémem obdélníkového průřezu. Ke chlazení vtokové vložky je také použito kruhového temperačního systému s obdélníkovým průřezem. Vlastní řešení je zřejmé z výkresu sestavy, který je uveden v příloze 1.

Tvarové části formy (tvárník a tvárnice) jsou vyrobeny z oceli 19 486 odolávající opotřebení, vtoková vložka z oceli 19 614 s velkou prokalitelností a ostatní nenormalizované části nástroje z oceli 11 600.

V důsledku vysoké tvrdosti tvarových částí se musela vstřikovací forma vyžíhat, abych mohl do nástroje vyvrtat otvory požadovaného průměru a hloubky pro umístění termočlánků pro měření teplotních polí v nástroji během vstřikovacího cyklu.



Obr. 21: Výstřik (kelímek)



Obr. 22: Vstřikovací forma - tvárník

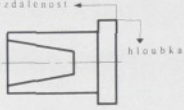


Obr. 23: Vstřikovací forma - tvárnice

V pevné i pohyblivé části vstřikovací formy bylo rozmístění otvorů pro termočlánek navrženo tak, aby bylo možno sledovat průběhy teplot v různých místech nástroje, tedy jak v „oblasti“ výstřiku, tak v „oblasti“ temperačních kanálů, ale i v různých vzdálenostech od dutiny formy.

V tab. 2 je uvedena vzdálenost a hloubka jednotlivých otvorů ve vstřikovací formě. Vzdálenost je vždy uvažována od čela formy, hloubka otvoru je vždy udávána od povrchu jednotlivé části nástroje, ve kterém je otvor zhotoven. Směr otvoru byl vždy kolmo k povrchu a směrem k ose nástroje.

Tab. 2: Umístění otvorů ve vstřikovací formě

	číslo otvoru	1	2	3	4	5	6	7	8
	hloubka (mm)	50	95	25	40	55	10	45	30
	vzdálenost (mm)	30	30	50	50	50	90	80	100

Otvory v nástroji byly vyrobeny tak, aby co nejméně zkreslovaly a ovlivňovaly vlastní měření.

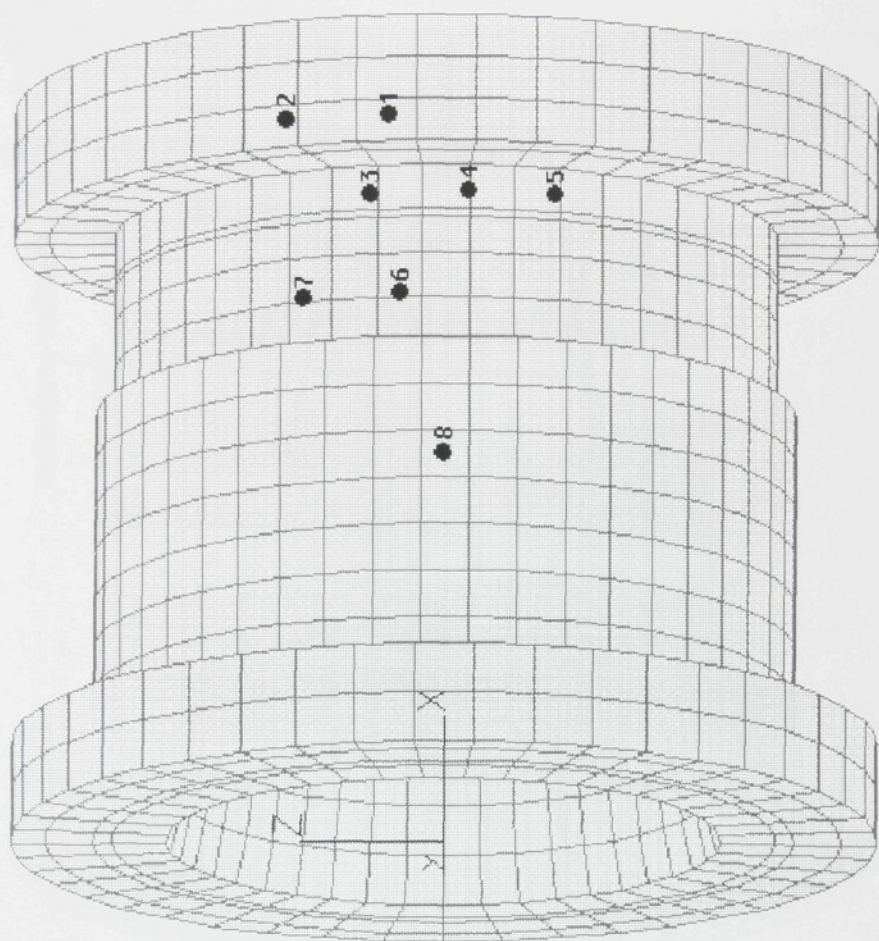
Před prováděnými experimenty byla vstřikovací forma a otvory pro vsunutí termočláneků pečlivě upraveny tak, aby nebylo bráněno kovovému styku v systému vstřikovací forma - termočlánek. Na dno jednotlivých měřicích otvorů jsem nanesl vodivou pastu, abych zajistil dokonalý styk termočláneků se vstřikovací formou.

Grafické znázornění rozmístění termočláneků na povrchu nástroje a v řezu nástroje je ukázáno na obr. 24 a na obr. 25.

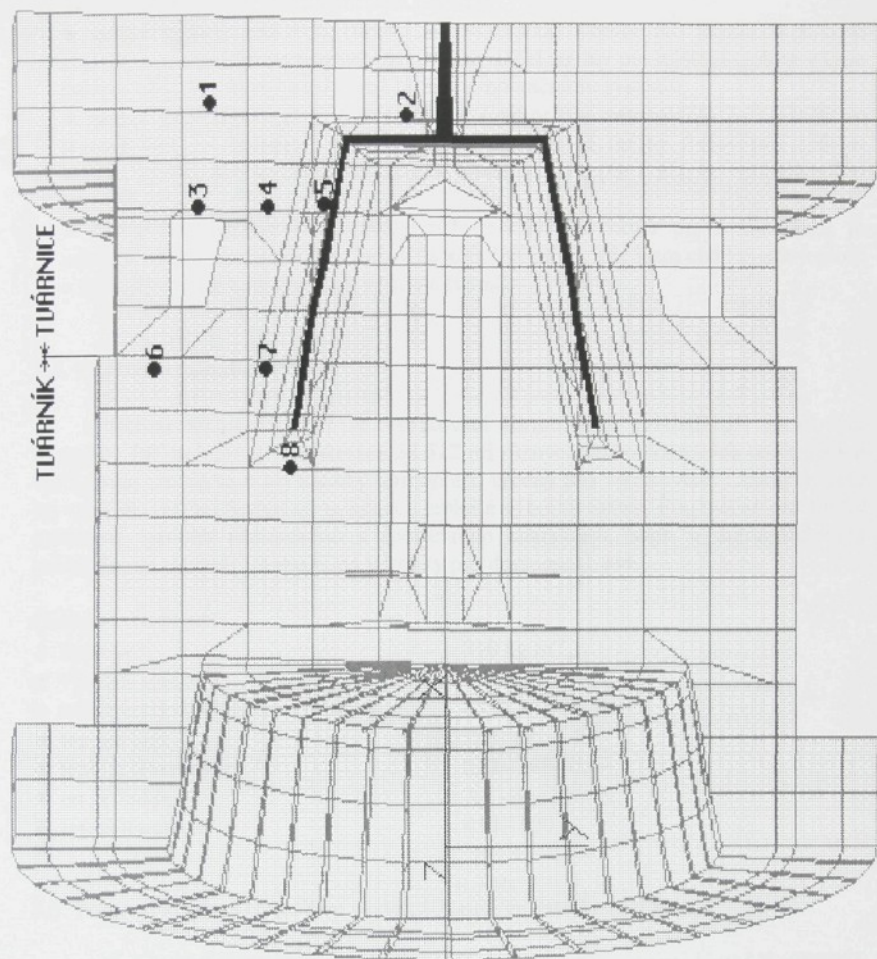
3.3. Rozbor umístění termočláneků ve vstřikovací formě

Do vstřikovací formy jsem pro vlastní měření a pro získání průběhů teplotních polí zhotovil osm měřicích otvorů pro termočlánek tak, jak je naznačené na obr. 24 a na obr. 25 s tímto odůvodněním volby umístění:

- ♦ *měřicí termočlánek č. 1.* (světle zelená křivka) - otvor pro termočlánek je umístěn v polovině hloubky pevné příruby tvárnice, kde jsem chtěl zjistit účinnost temperačního systému na přivedené množství tepla taveninou plastu ve vzdáleném místě od dutiny formy (zjištění průběhu teploty na čase),
- ♦ *měřicí termočlánek č. 2.* (červená křivka) - otvor pro termočlánek je umístěn ve tvárnici mezi vtokovou vložkou a temperačním kanálem blízko dna výstřiku a osy formy, kde jsem chtěl zjistit, zda bude temperační systém schopen dostatečně zchladit velké množství tepla od taveniny plastu,
- ♦ *měřicí termočlánek č. 3.* (růžová křivka) - otvor pro termočlánek je umístěn velmi blízko temperačního systému obdélníkového průřezu ve tvarové části tvárnice pro zjištění změny teploty v čase v okolí temperačního systému během procesu vstřikování,
- ♦ *měřicí termočlánek č. 4.* (tyrkysová křivka) - otvor pro termočlánek je umístěn ve tvárnici mezi temperačním systémem obdélníkového průřezu a tvarovou dutinou formy neboli mezi otvorem pro termočlánek č. 3. a otvorem pro termočlánek č. 5, kde jsem chtěl zjistit teploty v čase právě mezi těmito dvěma otvory,



Obr. 24: Rozmístění měřících otvorů na povrchu vstříkovací formy
(vzdálenost)



Obr. 25: Rozmístění měřicích otvorů ve vstřikovací formě (hloubka)

♦ *měřicí termočlánek č. 5.* (tmavě modrá křivka) - otvor pro termočlánek je umístěn velmi blízko tvarové dutině formy v tvárnici (aby bylo toto umístění proveditelné, bylo potřeba tento otvor provrtat až do dutiny formy a následně zakrýt navařením), kde jsem chtěl zjistit teploty v čase přímo u tvarové dutiny formy, neboli teplotní skok z teploty taveniny na měřenou teplotu vlivem mezery mezi dutinou formy a výstřikem (smrštění plastu),

♦ *měřicí termočlánek č. 6.* (tmavě zelená křivka) - otvor pro termočlánek není hluboký a je umístěn ve tvarové části blízko dělicí roviny pro zjištění teploty v čase daleko od dutiny formy a relativně blízko temperačnímu systému,

♦ *měřicí termočlánek č. 7.* (žlutá křivka) - otvor pro termočlánek je umístěn ve tvarové části, v tvárniku, nepříliš daleko od tvarové dutiny formy pro zjištění teploty v čase, kde se „setkává“ účinek přivedeného tepla a účinek temperačního systému,

♦ *měřicí termočlánek č. 8.* (světle růžová křivka) - otvor pro termočlánek je umístěn blízko tvarové dutiny formy na konci výstřiku, kde jsem chtěl zjistit teploty v čase při účinku temperačních systémů tvárniku i tvárnice.

3.4. Použitý termoplast /60/

Měření teplotních polí ve vstřikovací formě jsem provedl při zpracování materiálu **PP** (polypropylen) **Mosten 52.517** při různých technologických podmínkách vstřikování. Jedná se o krystalický termoplast, určený pro vstřikování. Charakterizuje jej vyšší rázová houževnatost za nižších teplot a výborná tuhost. Používá se pro široký sortiment výrobků technického a spotřebního charakteru, např. v automobilovém průmyslu, na součásti přístrojů, na výrobky pro domácnost, atd.

Základní vlastnosti:

♦ hustota:	910 kg.m ⁻³ ,
♦ výrobní smrštění:	1,3 - 1,6 %,
♦ trvalá tepelná odolnost dle Vicata:	88 °C,
♦ teplota tání:	165 °C,
♦ teplota taveniny:	220 - 280 °C,
♦ tavný index	2,5 - 4 g/10min,
♦ sypaná hmotnost:	450 - 600 g.l ⁻¹ .

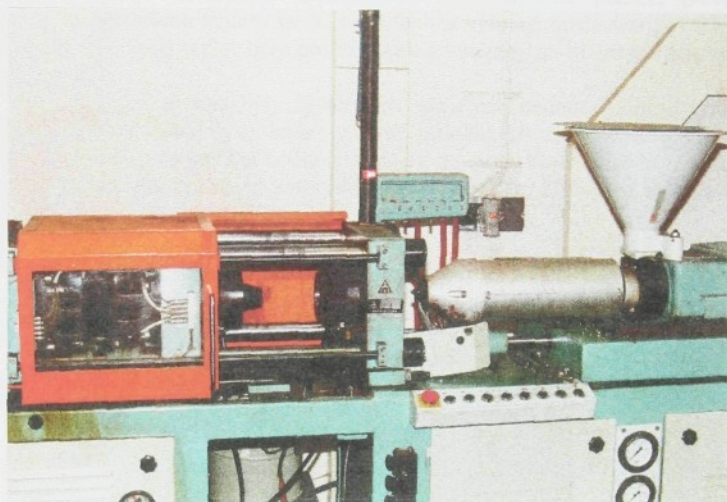
3.5. Popis provedených měření teplotních polí ve vstřikovací formě

Experimentální měření bylo provedeno na vstřikovacím lisu **CS 88/63** - výrobce *TOS Rakovník* (viz. obr. 26).

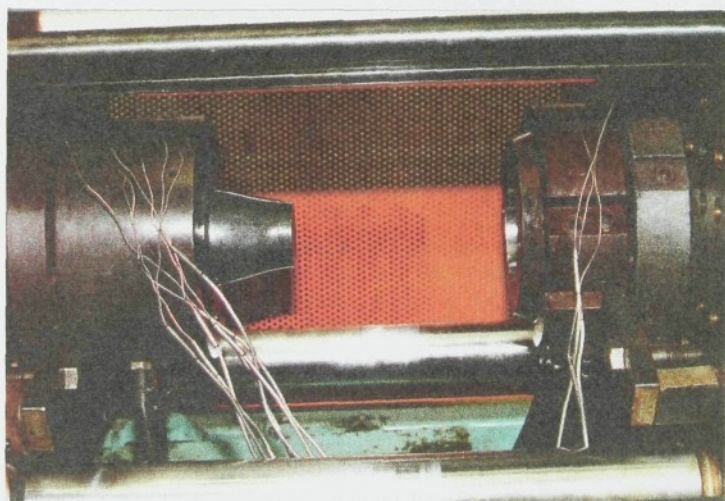
Vstřikování probíhalo za různých technologických podmínek (teplota taveniny, teplota temperačního média, doba cyklu, rychlost proudění kapaliny), které mají vliv na teplotní procesy a na rozložení teplotních polí ve vstřikovací formě. Měření bylo provedeno tak, abych mohl vyhodnotit vliv jednotlivých parametrů.

Pro měření teplotních polí jsem použil počítač **AT 486**, který byl vybaven kartou **AD 18** a svorkovnicí pro měření studeného konce termočládku. Po zapojení termočládků a po jejich zavedení do předem připravených a očištěných otvorů vstřikovací formy (viz. obr. 27), po zapojení počítače a připojení sběrnice jsem zadal

vstupní hodnoty, které jsem zkontroloval na monitoru počítače. Pro lepší a dokonalejší styk termočlánků s kovovou formou byly dotykové části termočládku natřeny vodivou pastou.



Obr. 26: Vstřikovací lis CS 88/63



Obr. 27: Umístění termočlánků ve vstřikovací formě

Před každým jednotlivým druhem měření jsem zkontroloval teplotu povrchu dutiny nástroje pomocí digitálního infračerveného pyrometru **OS 52A** americké firmy **OMEGA** a teplotu v jednotlivých místech vstřikovací formy jednorázovým měřením teploty, aby byly zajištěny stejné počáteční podmínky pro všechna prováděná měření.

Po celý průběh měření (vstřikování, dotlak, chlazení, vyhození výstřiku) byly sledovány hodnoty elektrického napětí, které byly následně pomocí převodníku převedeny na příslušnou teplotu ve $^{\circ}\text{C}$ pro všechna vybraná místa vstřikovací formy. Tyto časové závislosti teplot byly pro kontrolu zobrazeny na monitoru a zároveň se ukládaly na disk.

Po ukončení měření byly zpracovány naměřené hodnoty pomocí dodatečné filtrace tak, aby se vyloučily ty hodnoty, které působením rušivých vlivů zkreslovaly měření. Následně se naměřené hodnoty vynesly do grafických závislostí teploty na čase a teploty na vzdálenosti od dutiny formy, přičemž každé měřené místo mělo při vyhodnocování určitou barvu křivky (viz. tab. 3).

Tab. 3 : Barevné označení jednotlivých měřených míst.

ČÍSLO OTVORU	BARVA KŘIVKY
1	světle zelená
2	červená
3	růžová
4	tyrkysová
5	tmavě modrá
6	tmavě zelená
7	žlutá
8	světle růžová

Při prováděných experimentech jsem měnil následující technologické parametry a vzájemně je mezi sebou kombinoval:

- ♦ teplotu taveniny, která byla nastavována stupňovitě na vstřikovacím stroji na hodnotu 220°C , 240°C nebo 260°C s tím, že teplota trysky byla shodná s teplotou posledního pásma tavicí komory,

- ♦ teplotu temperačního média, která byla nastavena a udržována na požadované hodnotě (15°C nebo 45°C) termostatem se zpětnou vazbou a jako zvláštní případ bylo provedeno měření při vstřikování bez temperace,

- ♦ dobu cyklu, která byla nastavena na vstřikovacím stroji pomocí časových relé a to ve dvou úrovních - 12 s nebo 18 s (výpočet potřebné doby chlazení pro vybraný výstřik jsem provedl dle literatury [36/),

- ♦ druh (rychlost) proudění temperačního média, které bylo buď laminární (rychlost proudění byla $0,3\text{ m/s}$) nebo turbulentní (rychlost proudění byla $1,5\text{ m/s}$) a opět jako zvláštní případ bylo provedeno měření při vstřikování bez temperace.

Pozn.: V důsledku možností vybavení katedry nebylo provedeno měření při teplotě temperačního média 45°C a turbulentním proudění temperační kapaliny.

3.6. Vstřikovací cyklus

Během jednotlivých měření jsem použil konstantní vstřikovací cyklus, který se lišil pouze v době chlazení (viz tab. 4). Ostatní časové údaje byly v obou případech shodné, protože jsem chtěl dodržet parametry doby vstřikování a doby dotlaku tak, aby při porovnávání jednotlivých měření nevznikaly chyby od práce šneku.

Tab. 4: Časový průběh vstřikovacího cyklu

VSTŘIK. CYKLUS	čas (s)					
	vstřikování	dotlaku	plastikace	chlazení	strojní	celkový
č. 1	0,8	0,4	6	9	1,8	12
č. 2	0,8	0,4	6	15	1,8	18

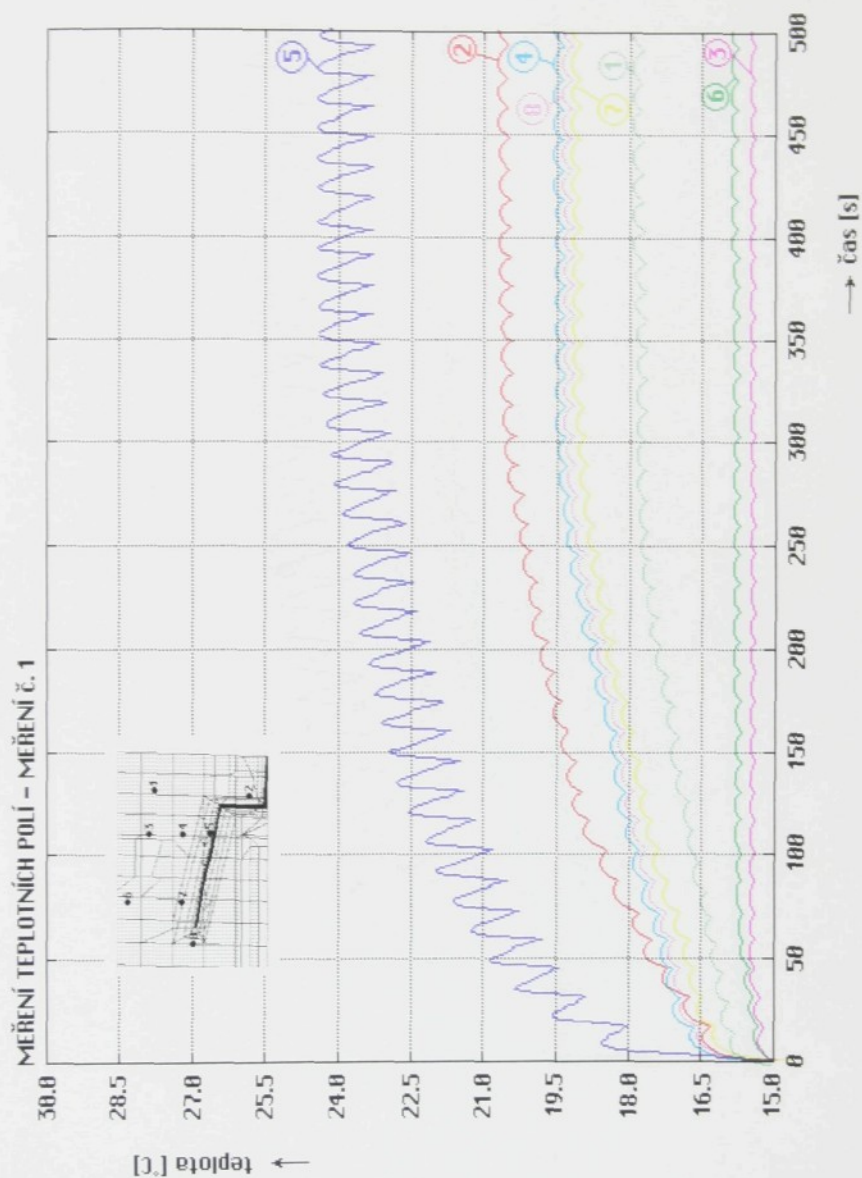
Pozn.: Plastikace materiálu probíhala během doby chlazení a vstřikování probíhalo na automatický režim s přisunutou tavící komorou k formě s odsunutím po dotlaku.

3.7. Přehled naměřených průběhů teplotních polí ve vstřikovací formě

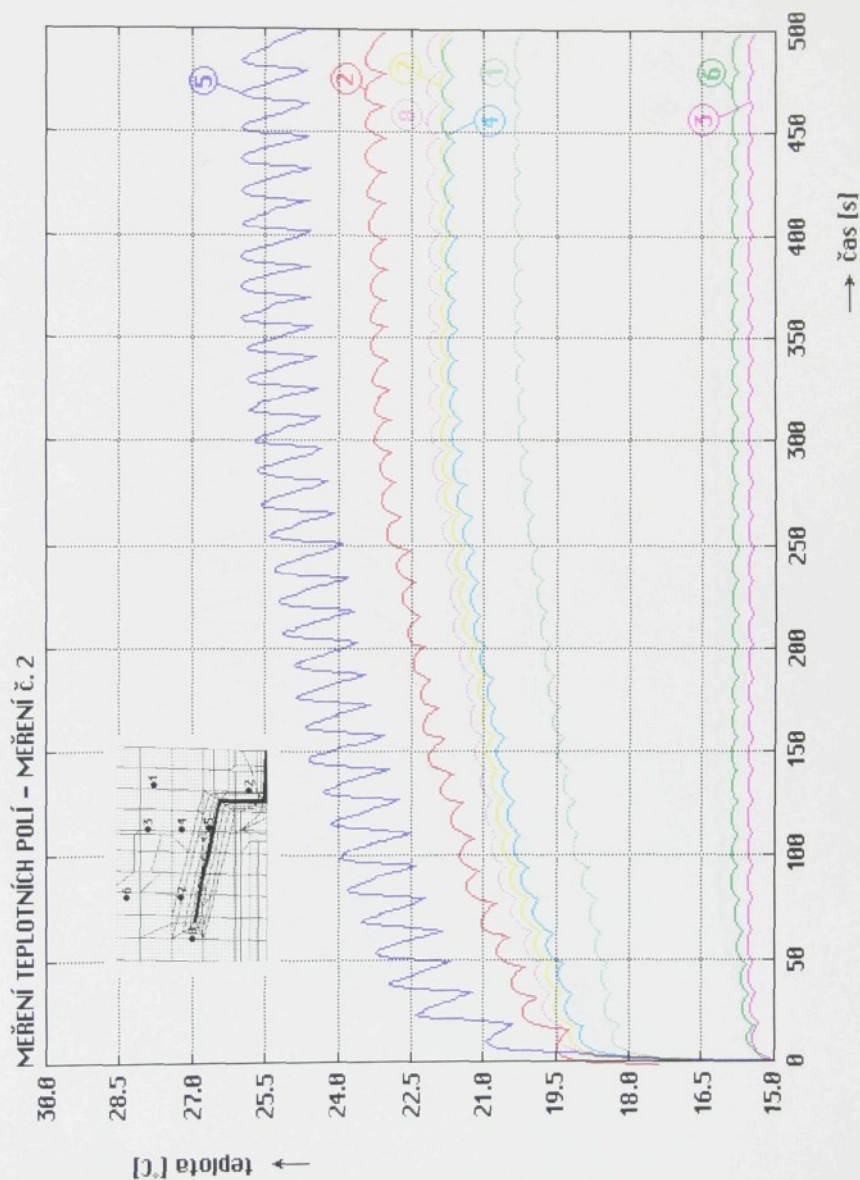
V následující části práce je uveden přehled průběhů grafických závislostí teploty na čase v jednotlivých měřených místech, které jsou zobrazeny na obr. 28 až na obr. 51.

- ♦ Obr. 28: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 220$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 29: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 240$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 30: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 260$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 31: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 220$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 32: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 240$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 33: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 260$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 34: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 220$ °C, bez použití temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 35: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 240$ °C, bez použití temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 36: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 260$ °C, bez použití temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 37: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 220$ °C, bez použití temperační tekutiny,
- ♦ Obr. 38: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 240$ °C, bez použití temperační tekutiny,

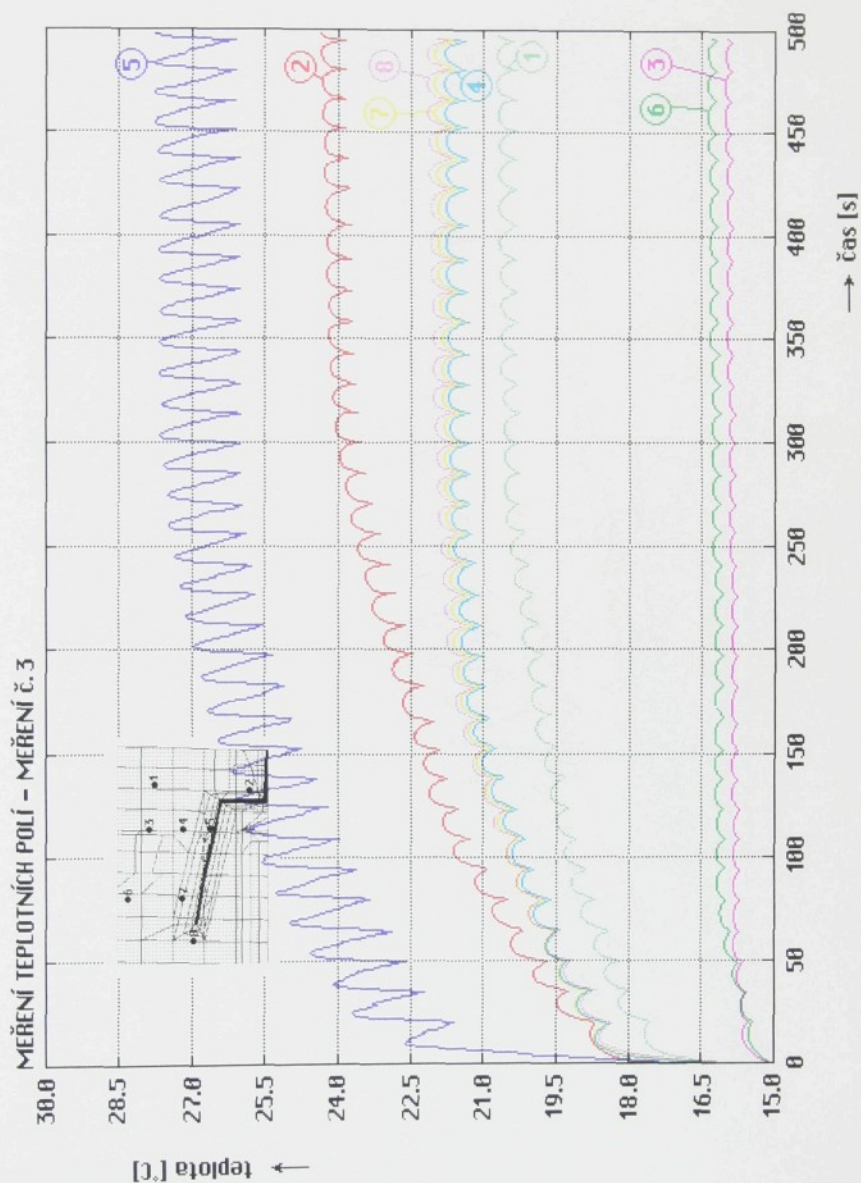
- ◆ Obr. 39: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 260$ °C, bez použití temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 40: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 220$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 41: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 240$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 42: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 43: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 220$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 44: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 240$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 45: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 46: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 220$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 47: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 240$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 48: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 49: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 220$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 50: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 240$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
 - ◆ Obr. 51: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny,
- kde značí: t_c je doba vstřikovacího cyklu,
 T_{tav} je teplota taveniny,
 T_{tm} je teplota temperačního média.



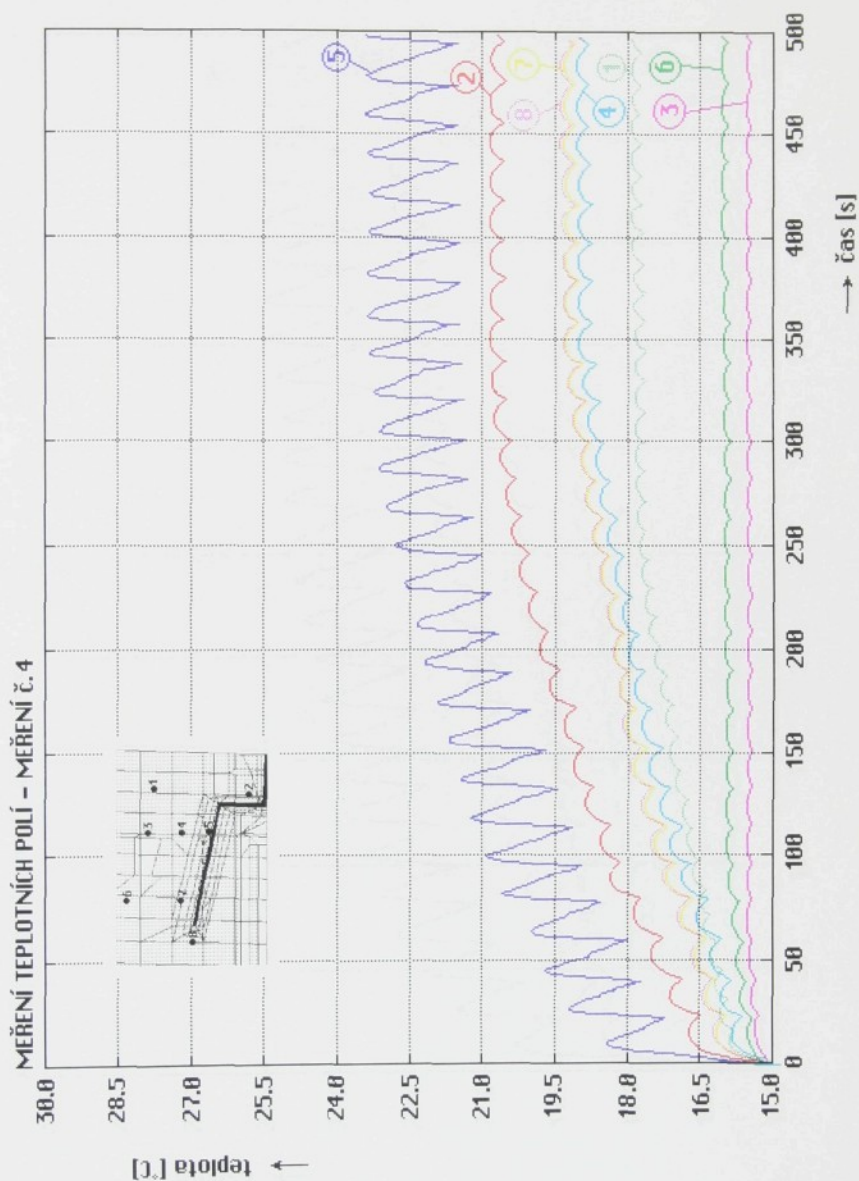
Obr. 28: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} \approx 220^\circ\text{C}$, $T_{\text{im}} = 15^\circ\text{C}$, s turbulentním prouděním temperační tekutiny



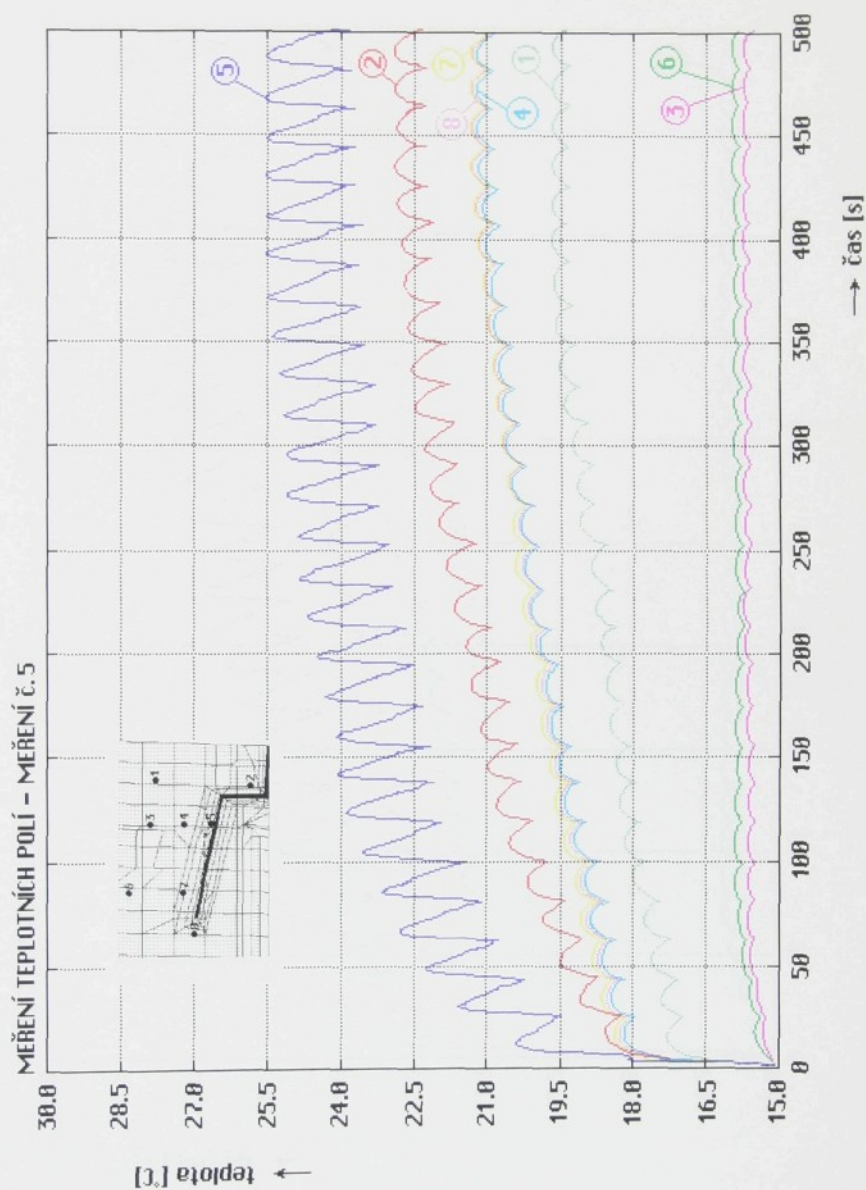
Obr. 29: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{\text{tav}} = 240$ °C, $T_{\text{im}} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační
 tekutiny



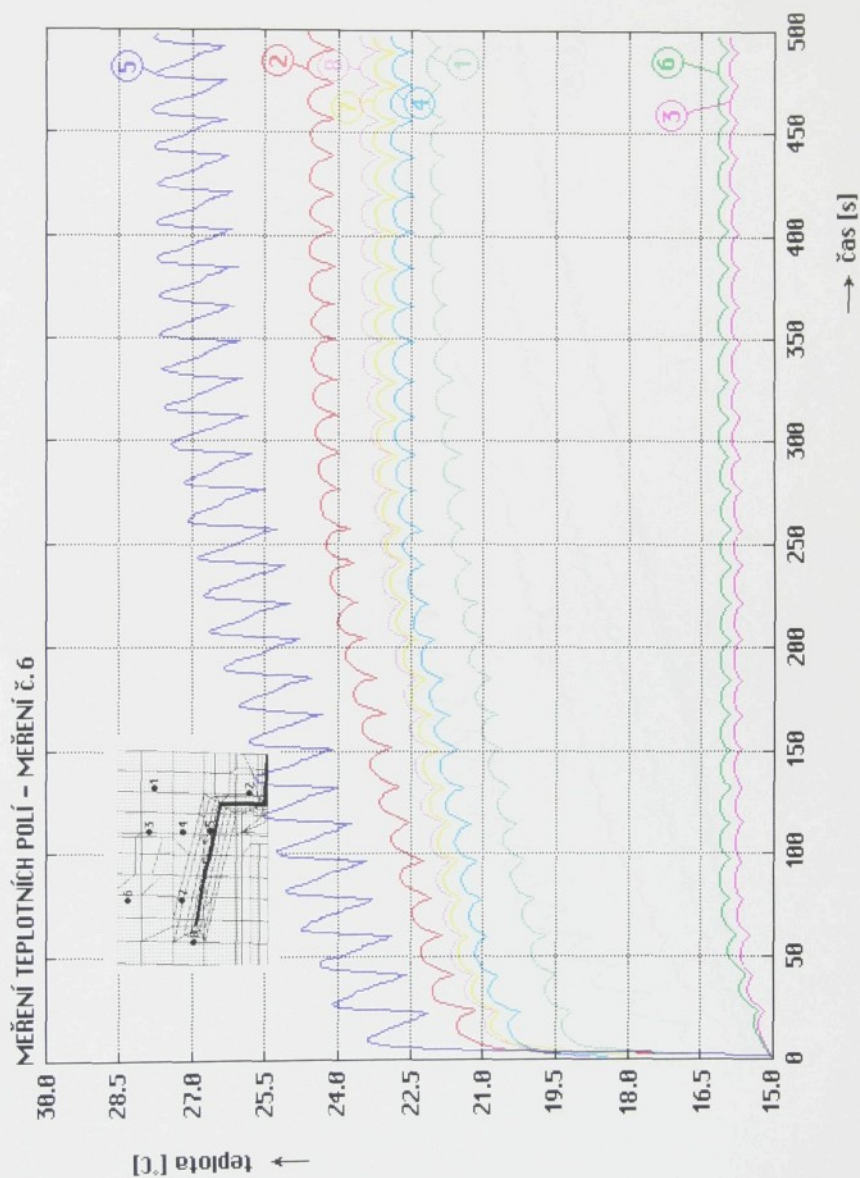
Obr. 30: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační
 tekutiny



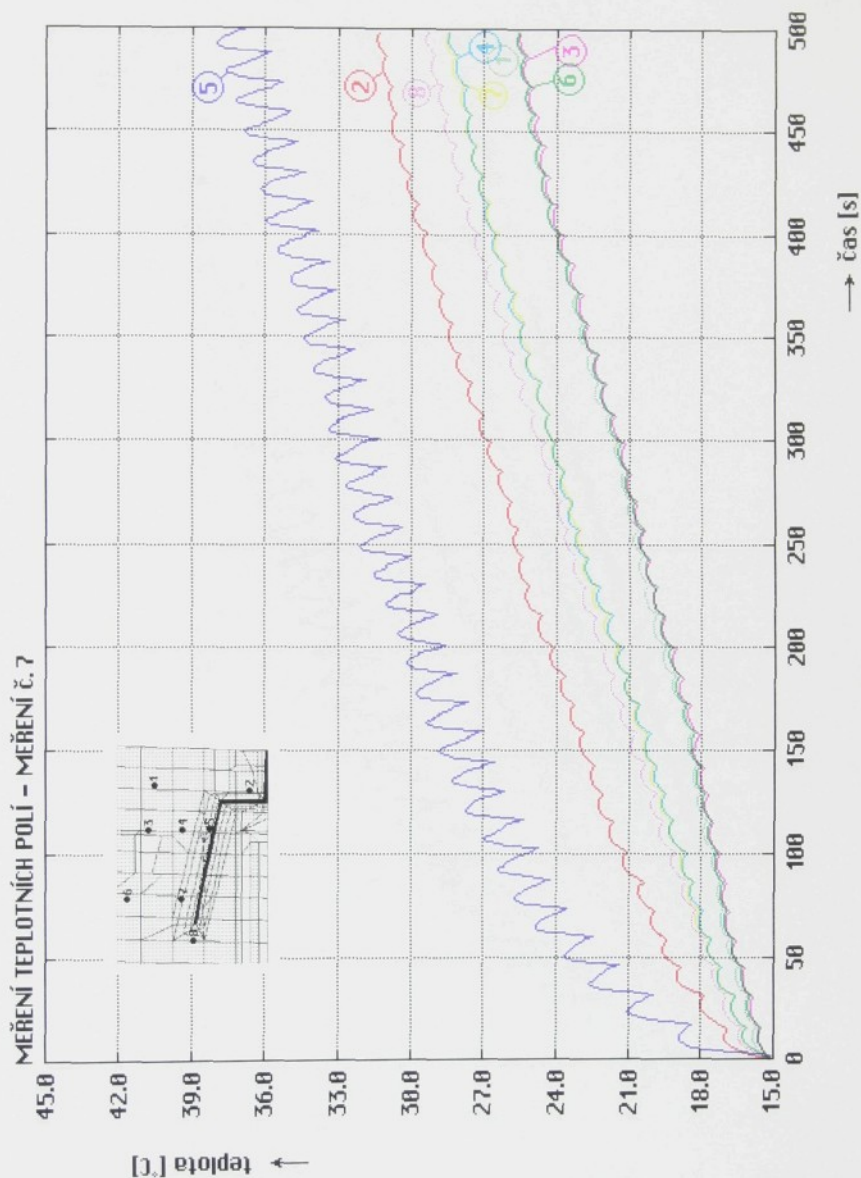
Obr. 31: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 220$ °C, $T_{\text{im}} = 15$ °C, s turbulentním prouděním teplační
 tekutiny



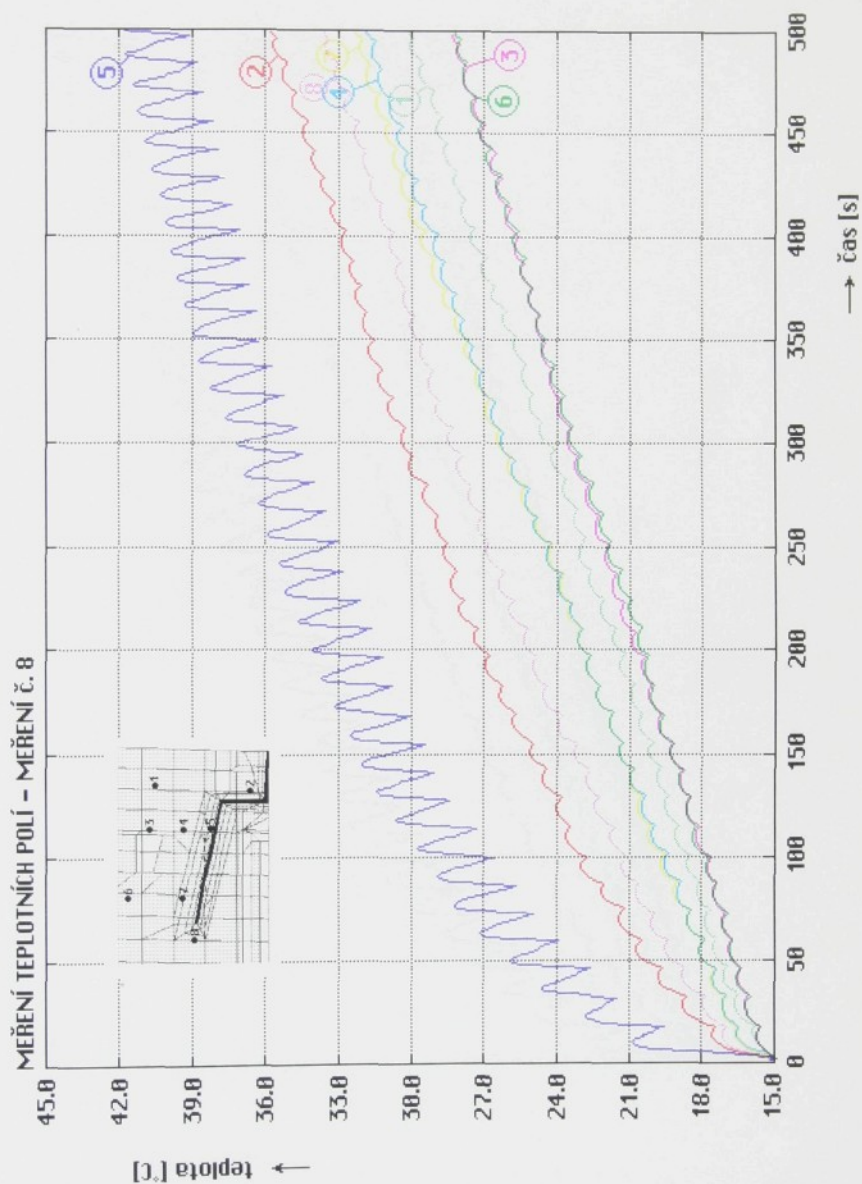
Obr. 32: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 240$ °C, $T_{\text{im}} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační
 tekutiny



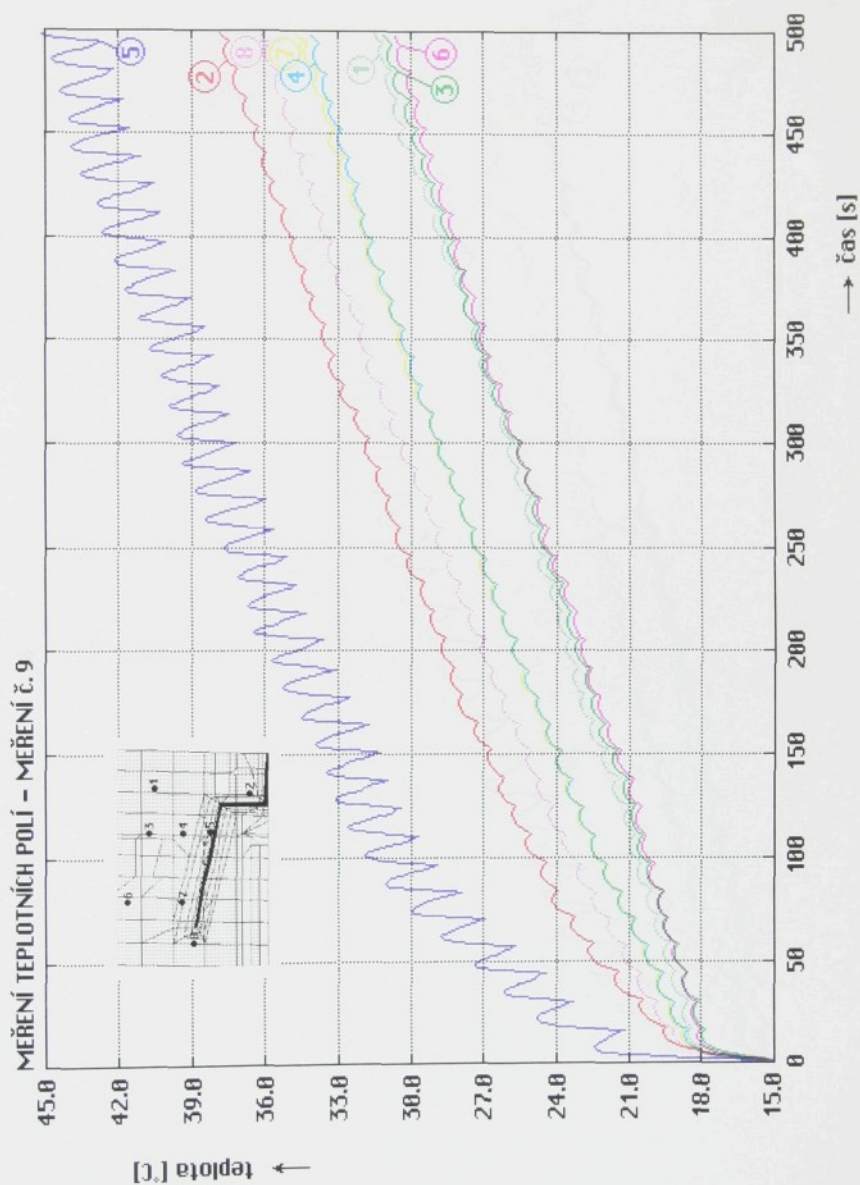
Obr. 33: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s turbulentním prouděním temperační
 tekutiny



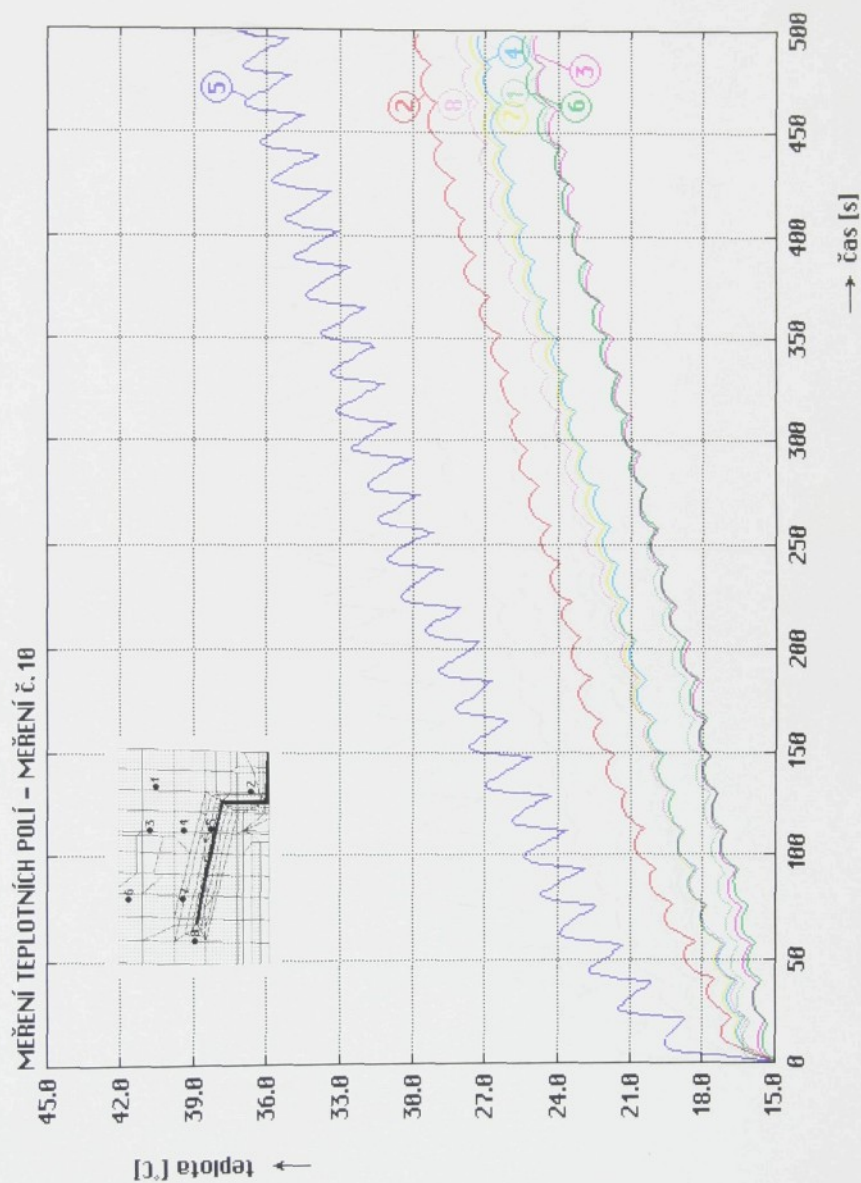
Obr. 34: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{lav} = 220$ °C, bez použití temperační tekutiny



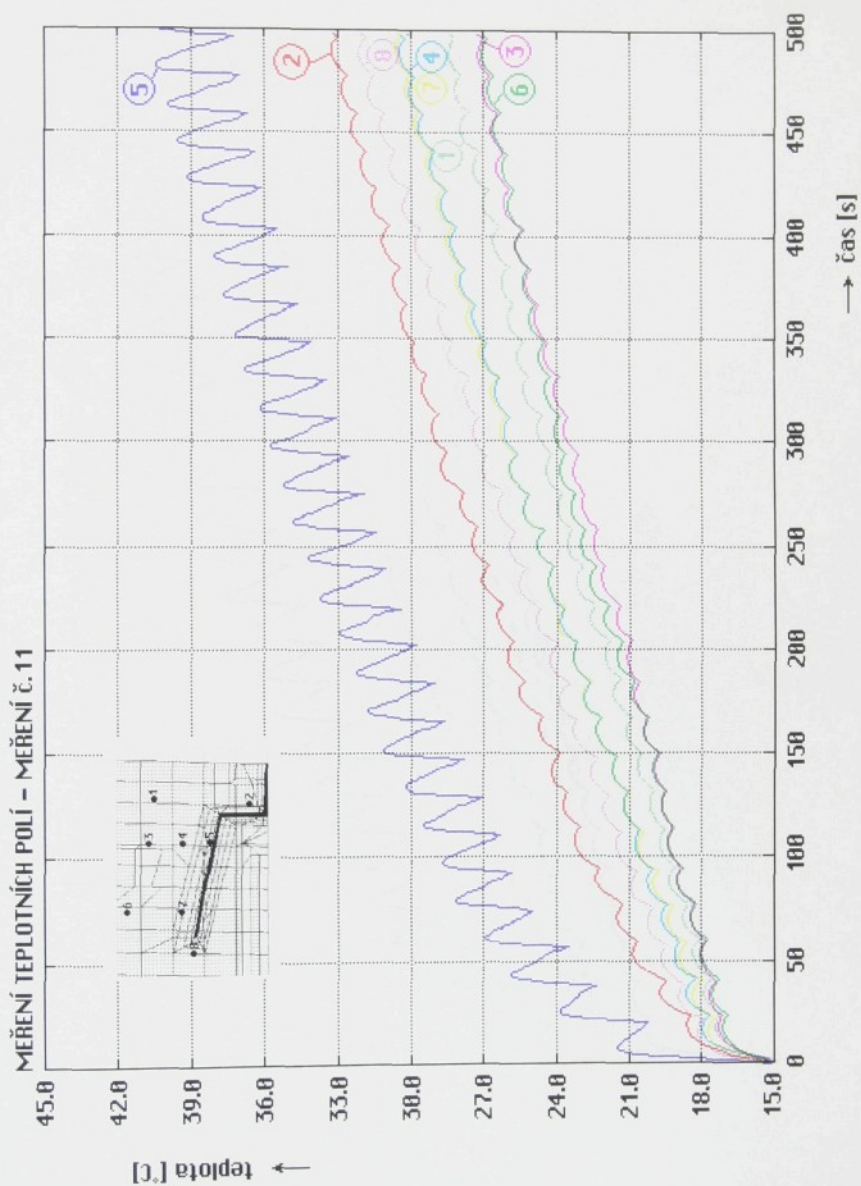
Obr. 35: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{\text{tav}} = 240$ °C, bez použití temperační tekutiny



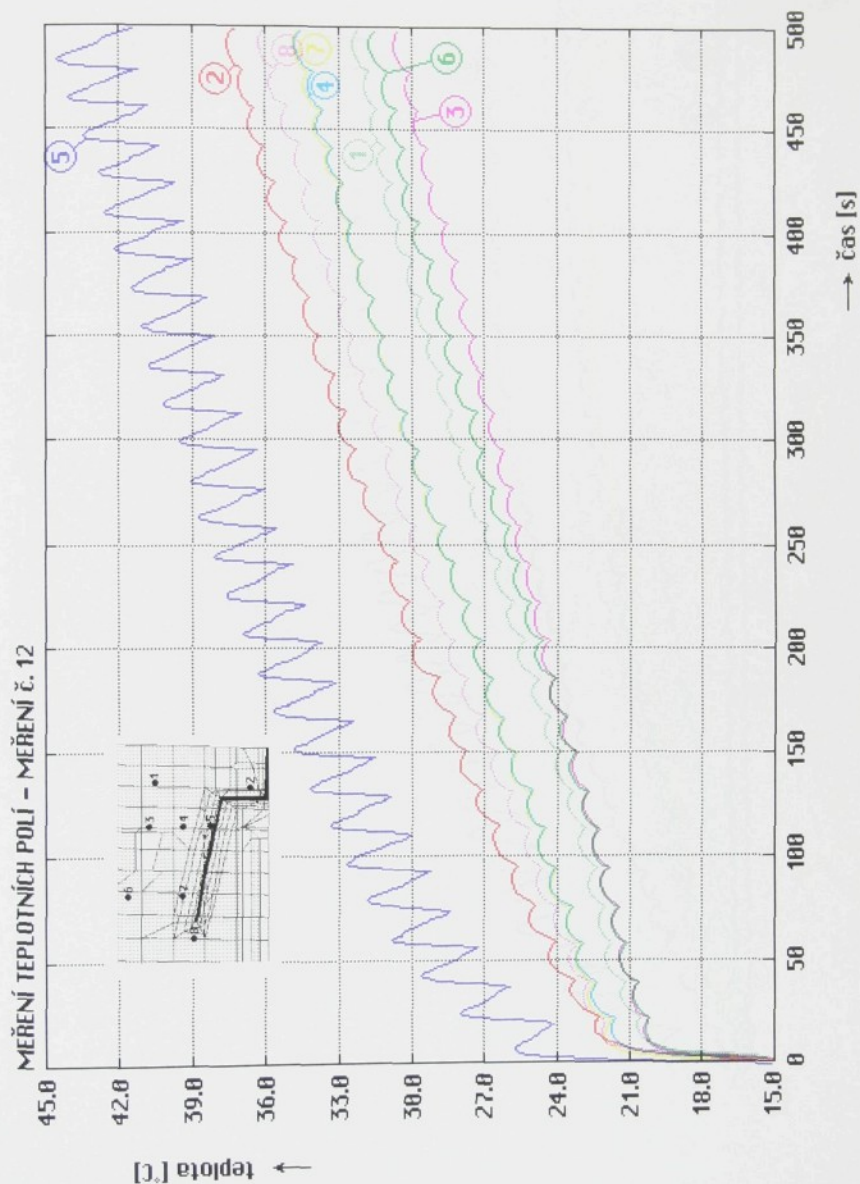
Obr. 36: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{\text{lav}} = 260$ °C, bez použití temperační tekutiny



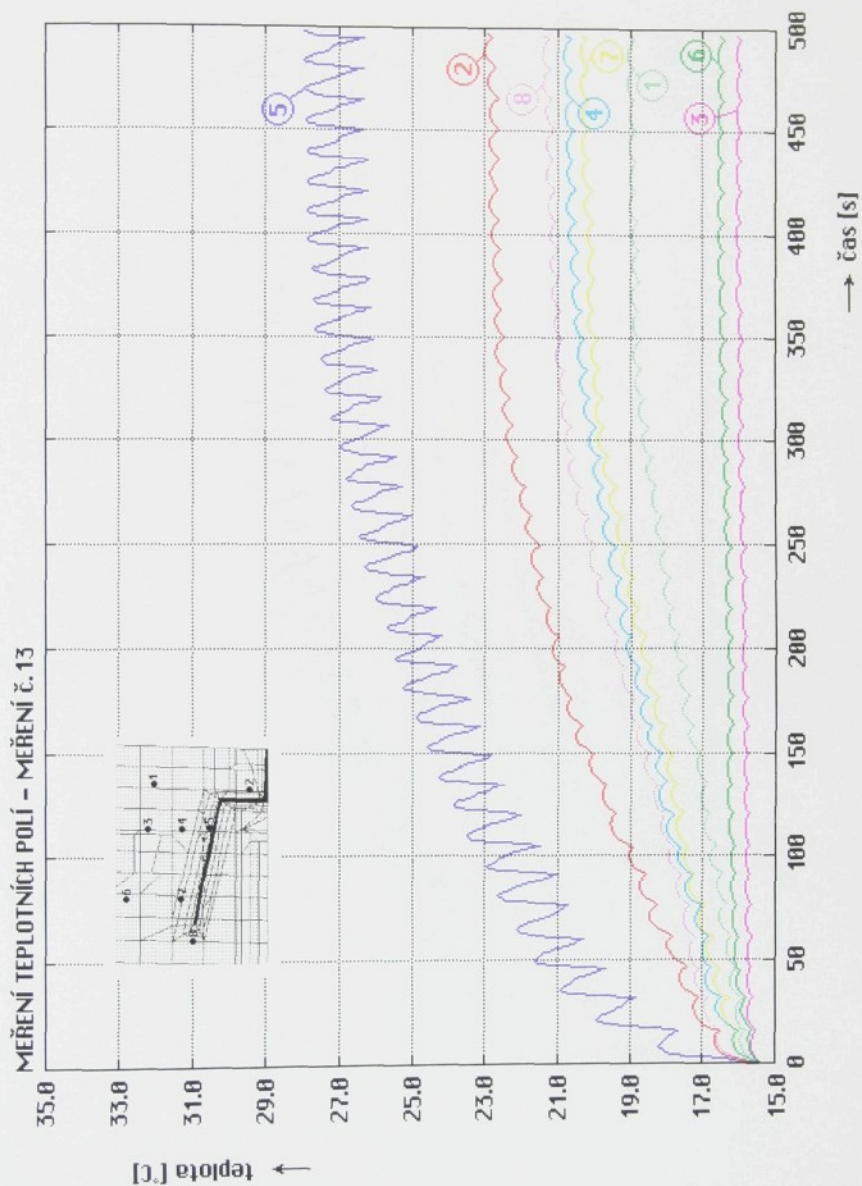
Obr. 37: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 220$ °C, bez pužití temperační tekutiny



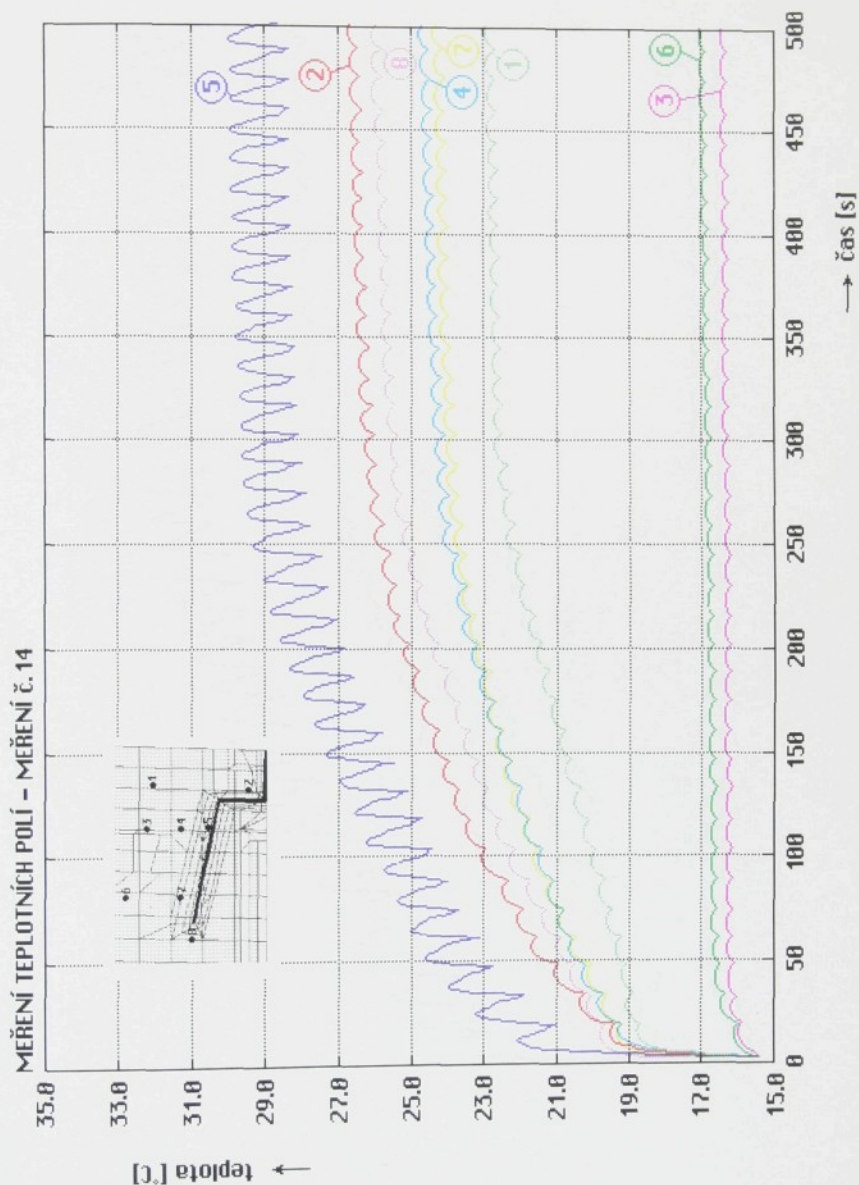
Obr. 38: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 240$ °C, bez použití temperační tekutiny



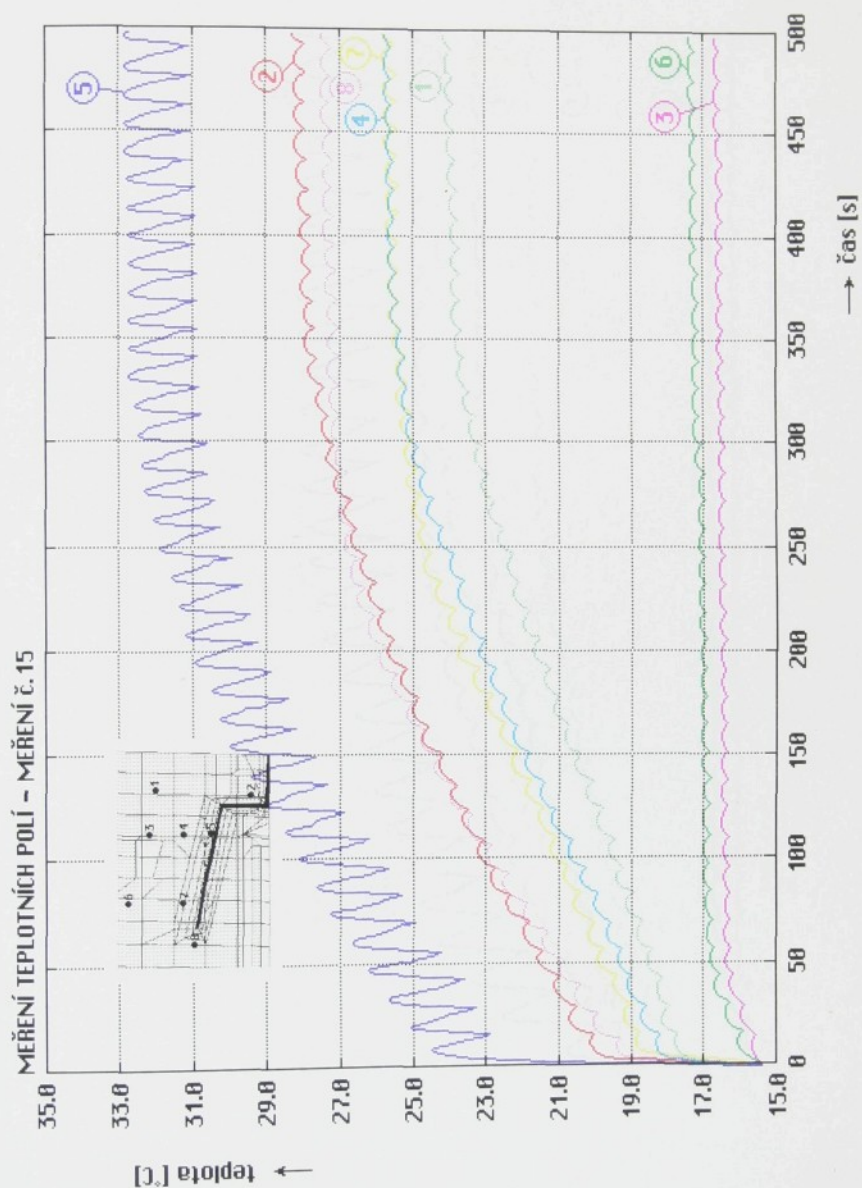
Obr. 39: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 260$ °C, bez použití temperační tekutiny



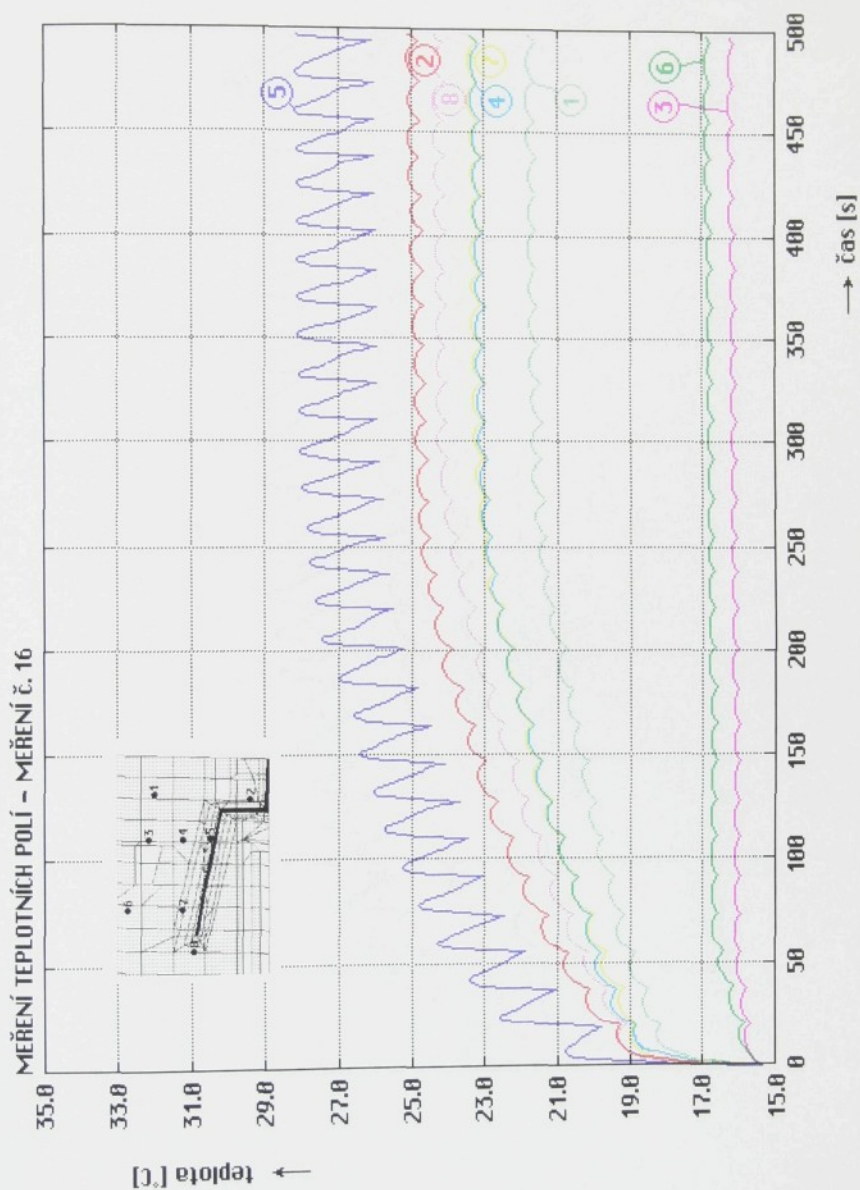
Obr. 40: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{\text{tav}} = 220$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační
 tekutiny



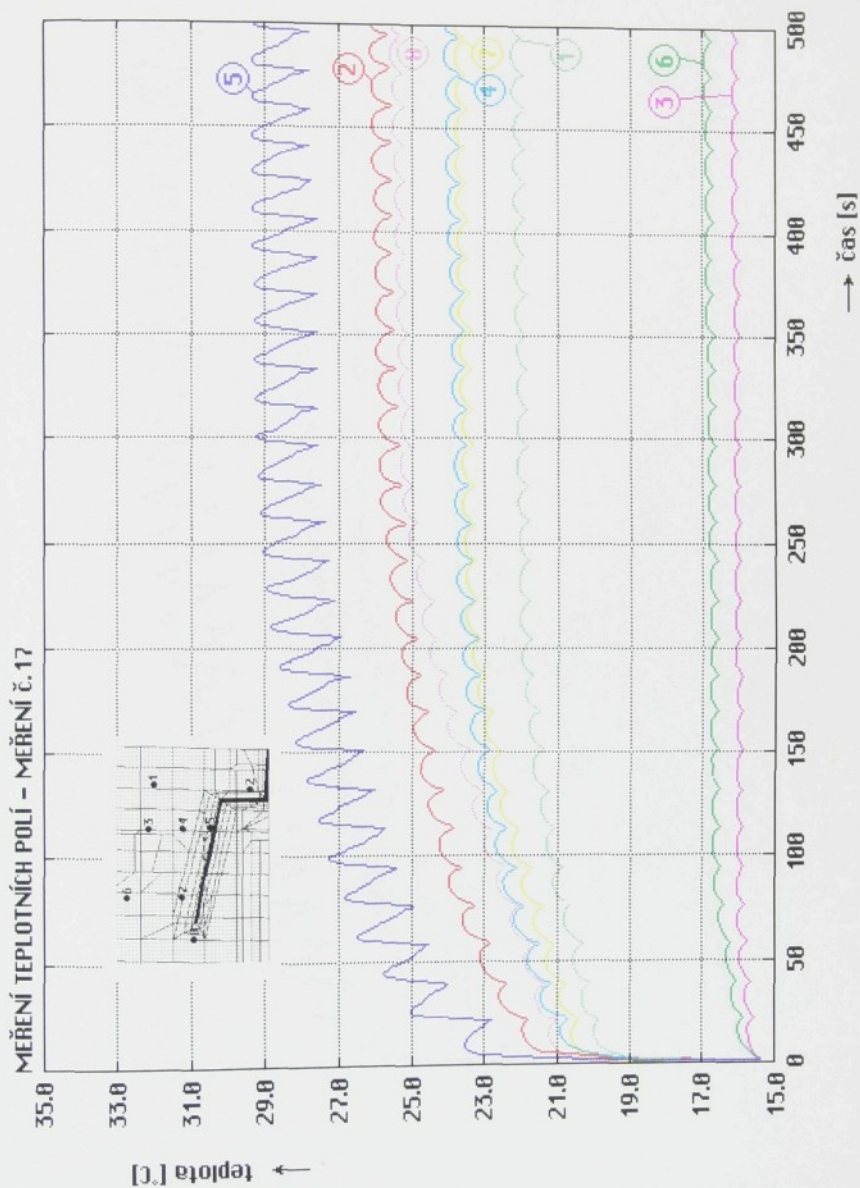
Obr. 41: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{lav} = 240$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny



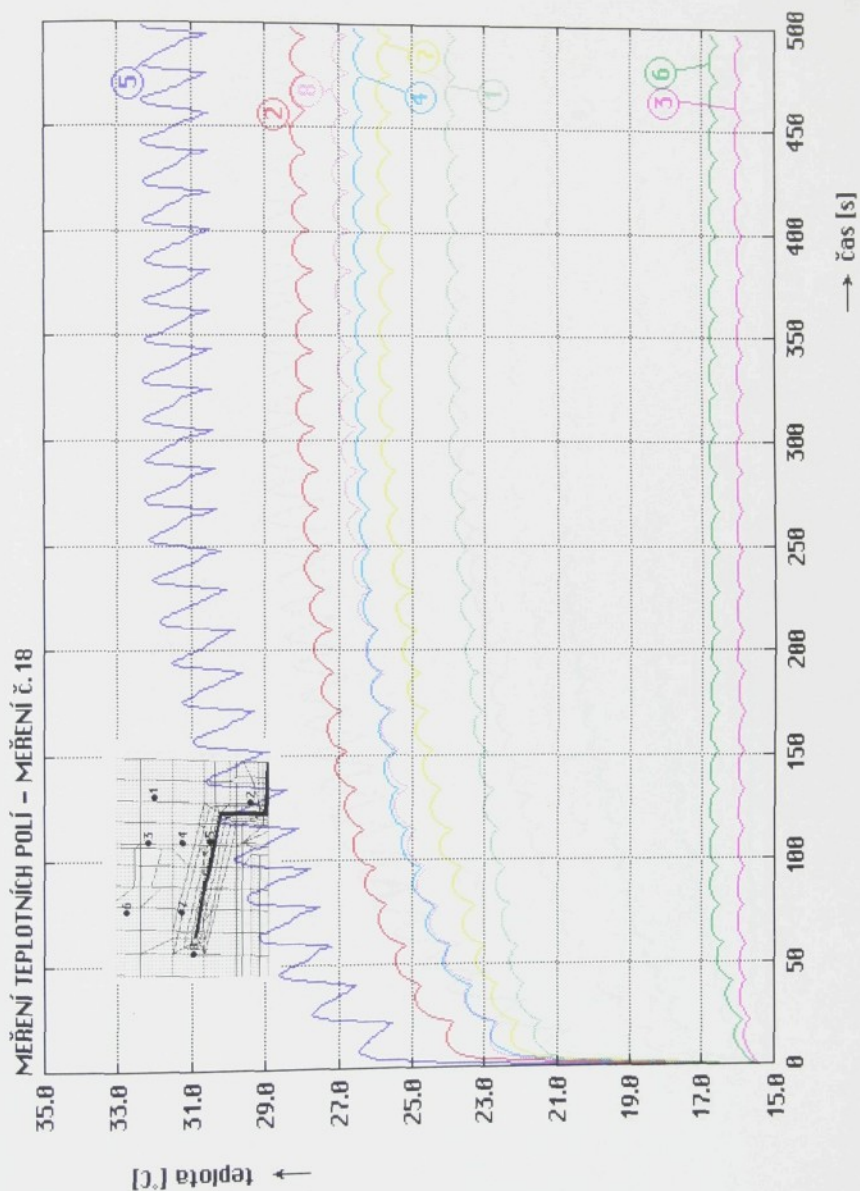
Obr. 42: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{lav} = 260$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny



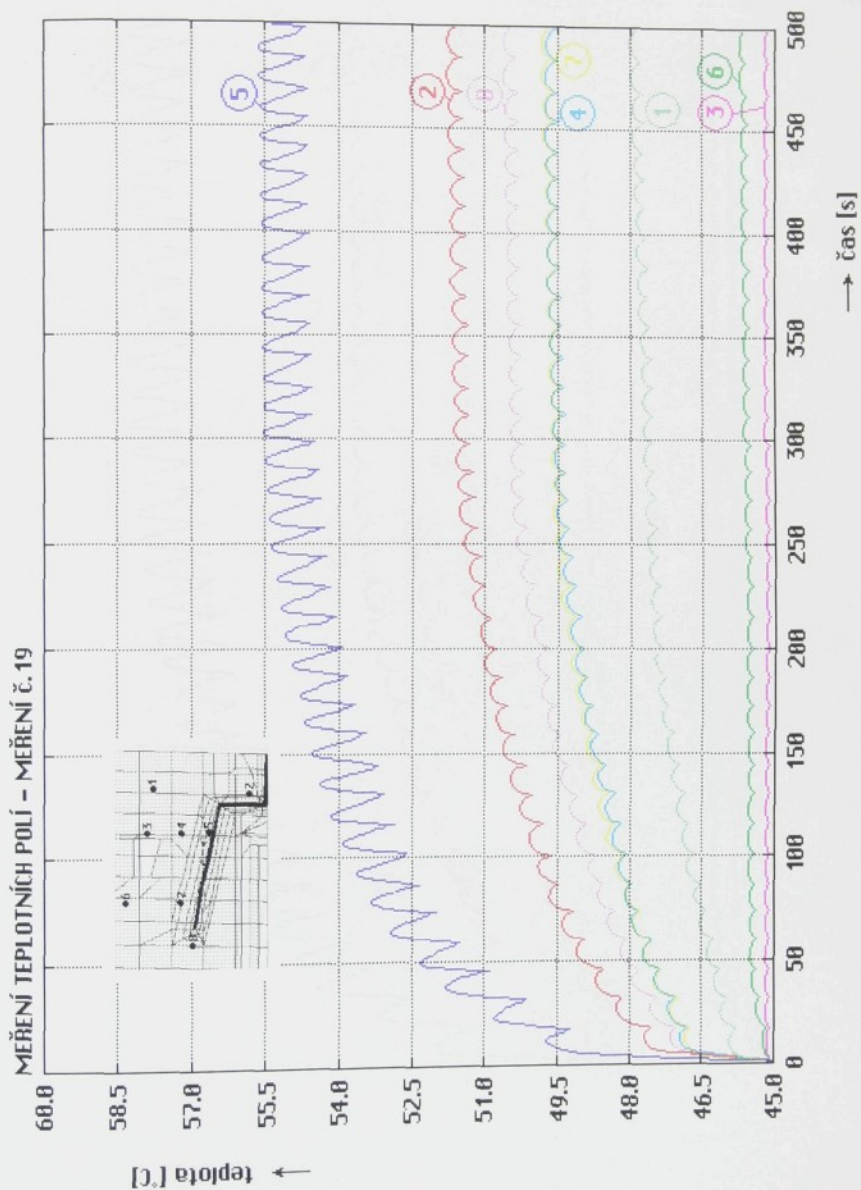
Obr. 43: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{lav}} = 220$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační
 tekutiny



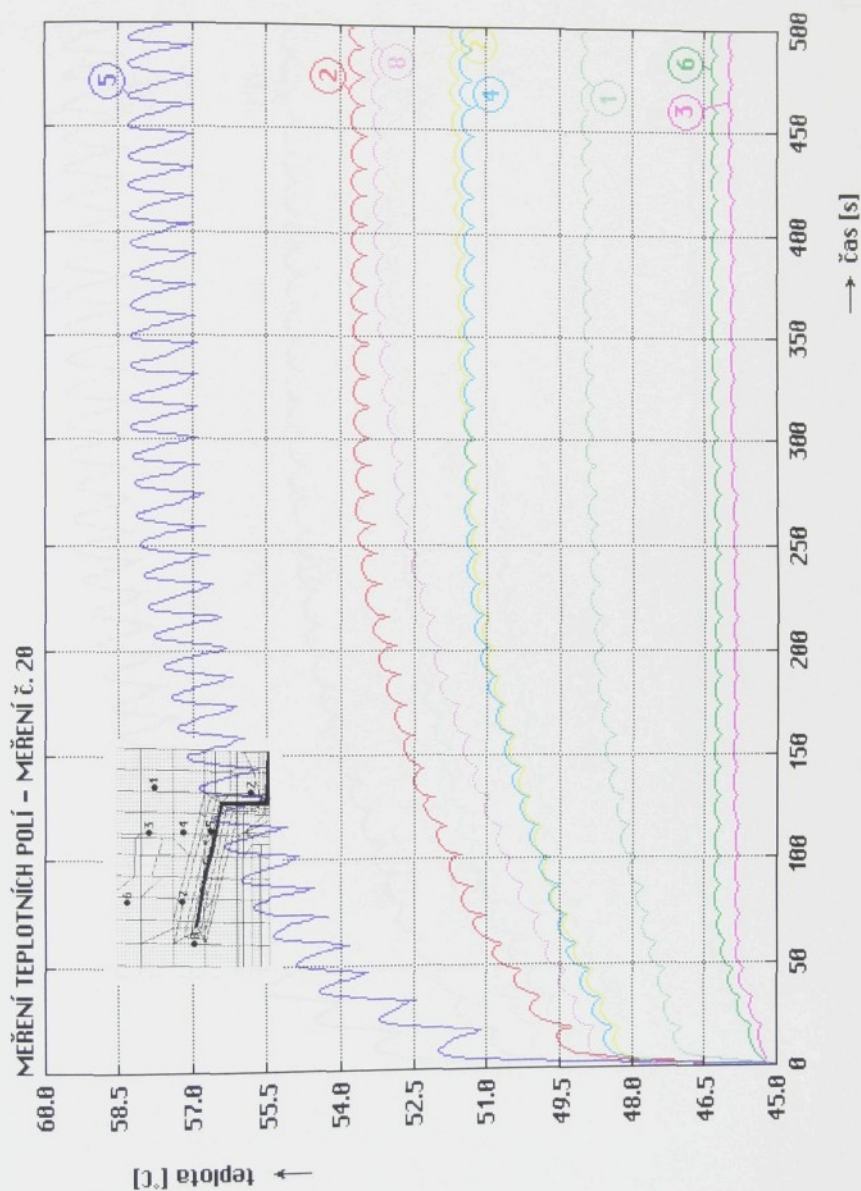
Obr. 44: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{lav} = 240$ °C, $T_{tm} = 15$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny



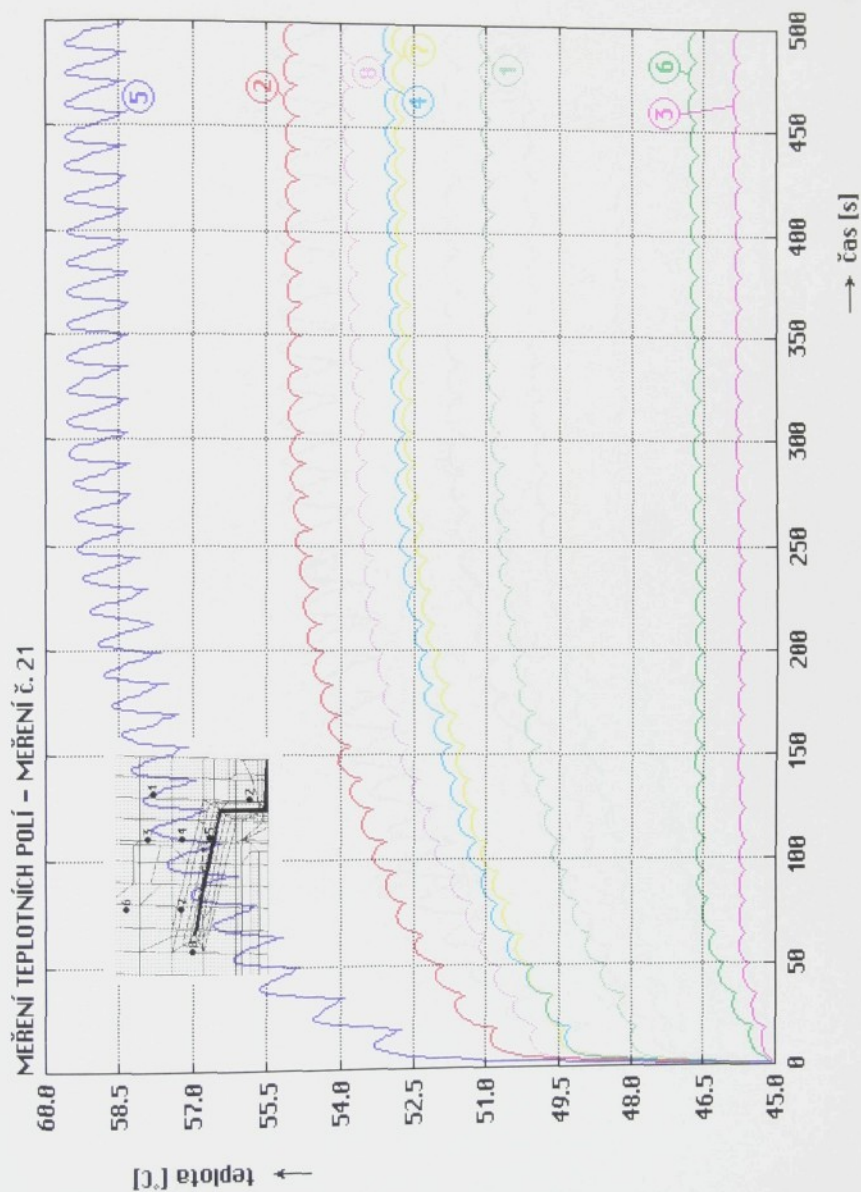
Obr. 45: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C, s laminárním prouděním teplejší
 tekutiny



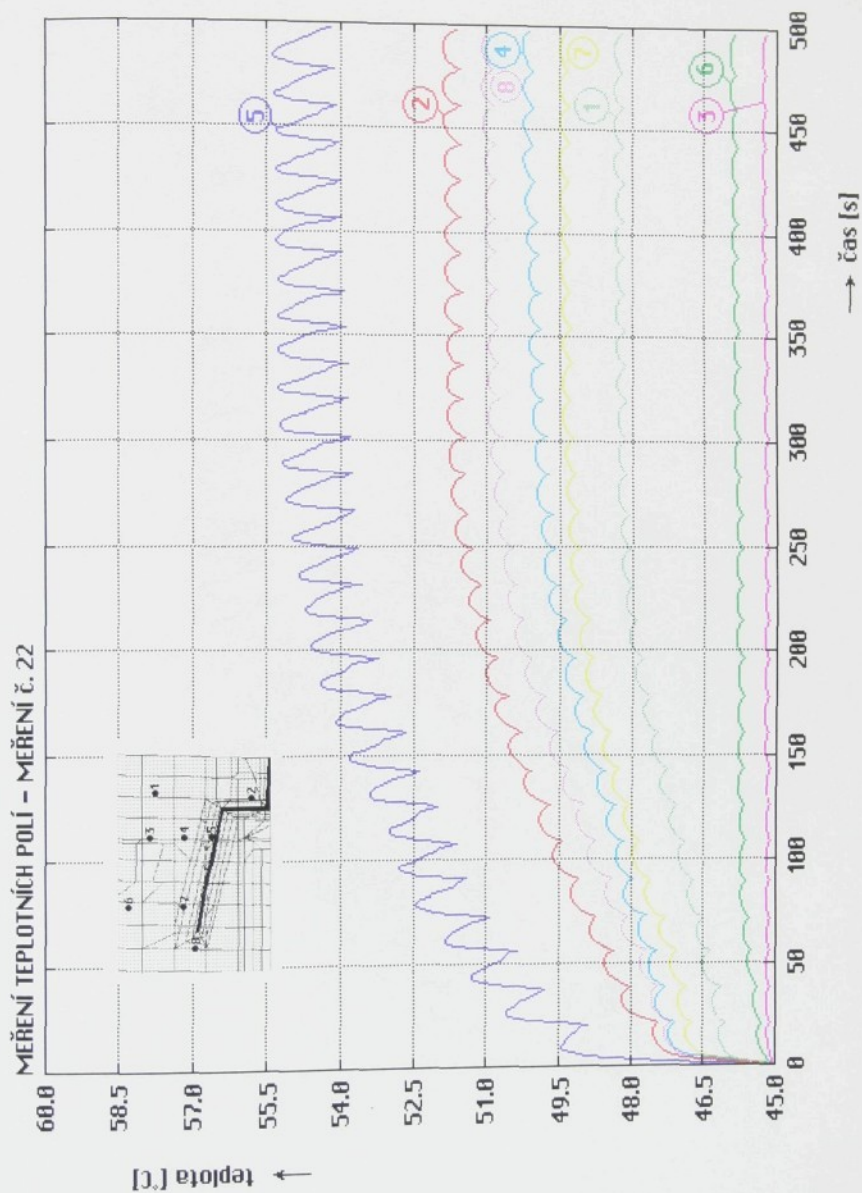
Obr. 46: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 220$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny



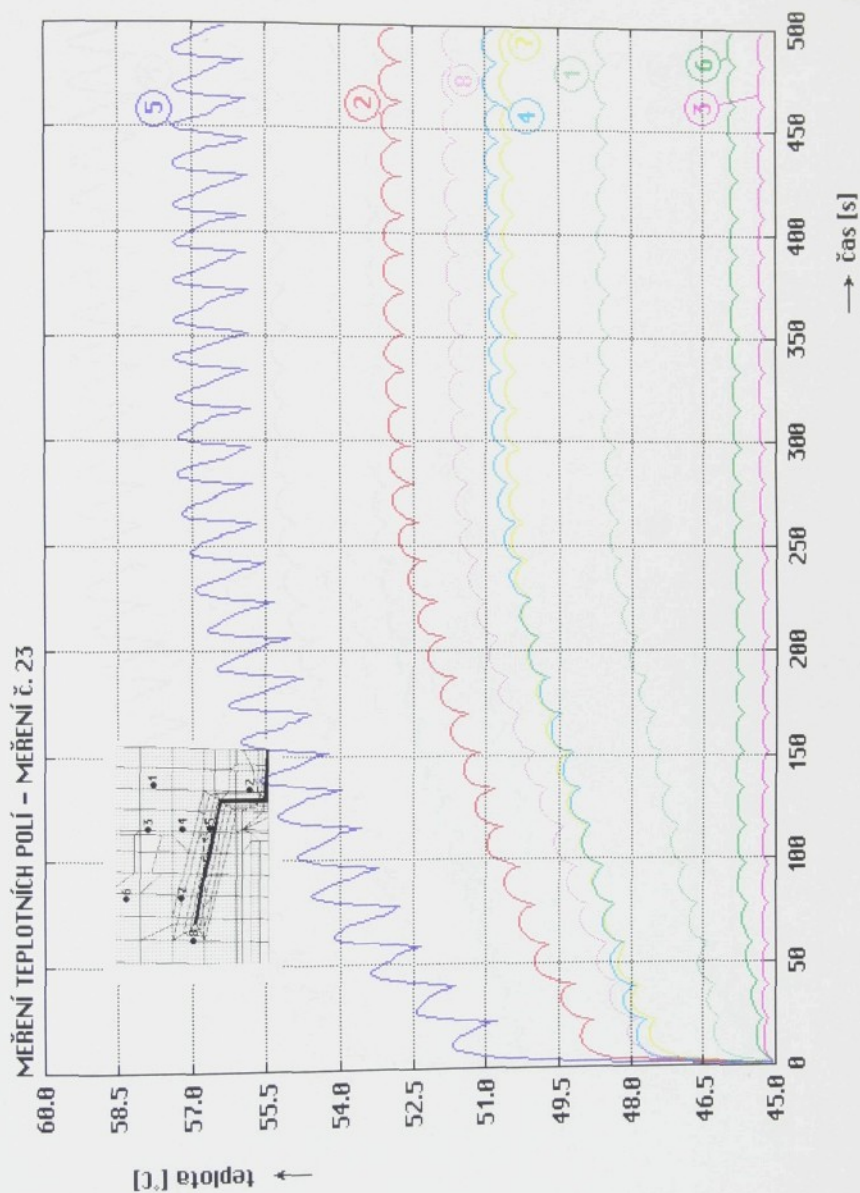
Obr. 47: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{\text{tav}} = 240$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační
 tekutiny



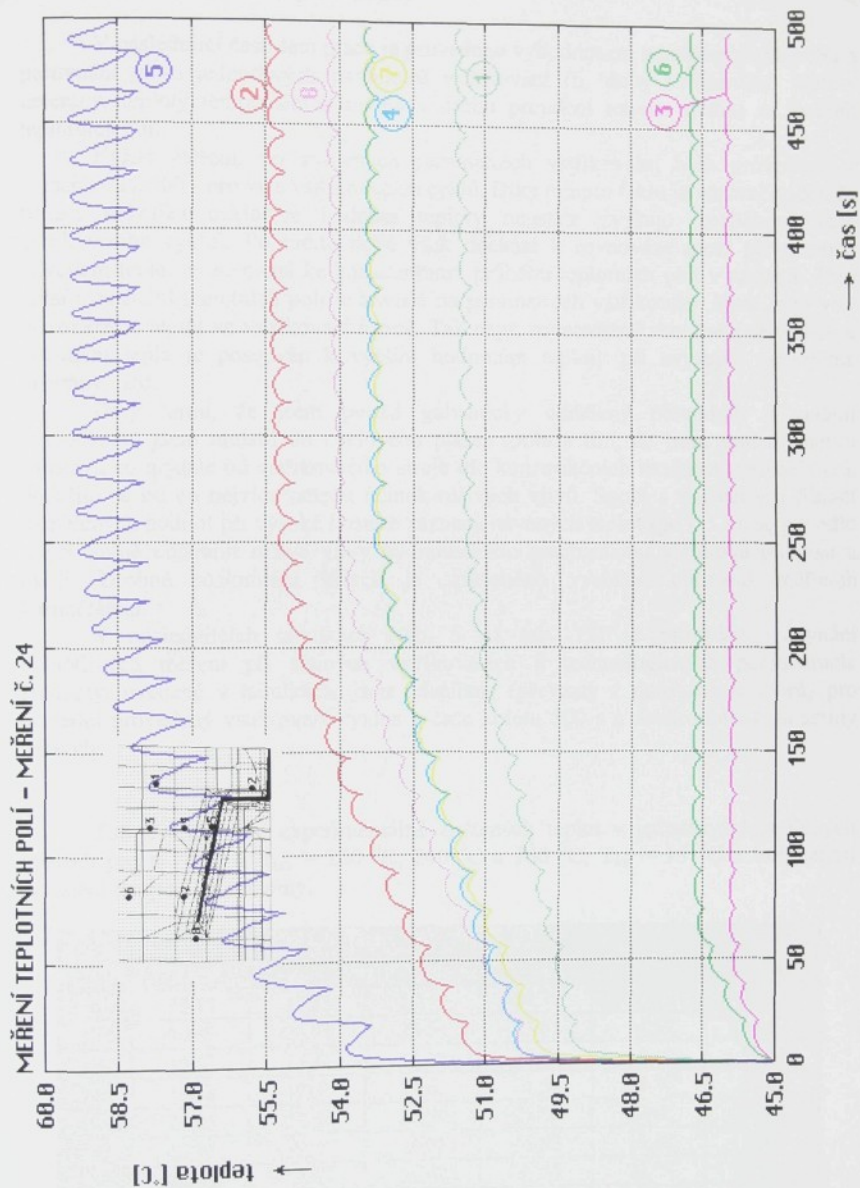
Obr. 48: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 12$ s,
 $T_{\text{lav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační
 tekutiny



Obr. 49: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s, $T_{lav} = 220$ °C, $T_{um} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační tekutiny



Obr. 50: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{lav} = 240$ °C, $T_{tm} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační
 tekutiny



Obr. 51: Grafické znázornění závislosti teploty na čase při $t_c = 18$ s,
 $T_{\text{tav}} = 260$ °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C, s laminárním prouděním temperační
 tekutiny

3.8. Vyhodnocení naměřených hodnot

V následující části této práce je provedeno vyhodnocení naměřených průběhů a porovnání vlivu jednotlivých parametrů vstřikování (tj. doby vstřikování, teploty taveniny, teploty temperačního média a druhu proudění tohoto média) na průběh teplotních polí.

Každé měření, při zvolených parametrech vstřikování, bylo provedeno v rozsahu 0 až 500 s pro více vstřikovacích cyklů. Díky tomuto faktu je názorně vidět, že během několika cyklů se hodnota teploty neustále zvyšuje (rozběhová fáze vstřikovacího cyklu). Po určité době však dochází k rovnováze mezi přívodem a odvodem tepla, to znamená ke konstantnímu průběhu teplotních polí v nástroji. Tato doba vyrovnání teplotních polí je závislá na parametrech vstřikování, které mají vliv na rozložení teplot ve vstřikovací formě. Tak např. rovnovážný stav mezi přívodem a odvodem tepla je posouván k vyšším hodnotám teploty při zvyšující se teplotě taveniny, atd.

Díky tomu, že jsem použil galvanicky oddělený převodník a vedení termočlánků jsem umístil do ocelového pláště spolu s tím, že jsem umístil měřící soustavu co nejdále od vstřikovacího stroje dle konstrukčních možností termočlánků, podařilo se mi co nejvíce omezit účinek rušivých vlivů. Spolu s dodatečnou filtrací naměřených hodnot při vysoké hustotě zaznamenávaných teplot (po 0,1 s), se povedlo téměř úplně odstranit rušivé vlivy hydraulického mechanismu vstřikovacího lisu a okolí. Drobné rozkmitání křivek je způsobeno vysokou citlivostí měřících termočlánků.

V následujících tabulkách (tab. 5 až tab. 12) je provedeno srovnání jednotlivých měření při stejných vstřikovacích a technologických parametrech. Hodnoty, uvedené v tabulkách, jsou odečítány (převzaty z datových souborů) pro poslední provedený vstřikovací cyklus v čase kolem 500 s a zaokrouhleny na setiny sekundy.

Tab. 5: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{\text{tav}} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{\text{tm}} = 15$ °C a turbulentní proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	měření č. 1		měření č. 2		měření č. 3	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	18,12	17,85	20,51	20,31	20,69	20,33
2	20,82	20,51	23,56	23,01	24,59	23,87
3	15,51	15,42	15,66	15,52	16,19	16,03
4	19,78	19,51	21,86	21,54	21,87	21,43
5	24,65	23,31	26,09	24,58	27,88	26,04
6	15,93	15,79	16,05	15,82	16,38	16,03
7	19,31	19,1	22,03	21,74	22,05	21,69
8	19,65	19,31	22,39	22	22,28	21,7

Tab. 6: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{tm} = 15$ °C a turbulentní proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	měření č. 4		měření č. 5		měření č. 6	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	18,01	17,75	19,78	19,46	22,25	21,83
2	20,81	20,57	22,9	22,49	24,41	24,1
3	15,52	15,41	15,64	15,52	15,87	15,66
4	19,71	19,4	21,25	20,91	22,93	22,52
5	23,59	21,68	25,57	23,72	27,88	26,32
6	15,9	15,73	15,96	15,62	16,38	16,01
7	19,22	18,96	21,35	21,02	23,38	22,9
8	19,36	19,09	21,41	21,05	23,65	23,08

Tab. 7: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C bez použití temperační tekutiny.

číslo otvoru	měření č. 7		měření č. 8		měření č. 9	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	25,55	25,21	30,06	29,56	31,05	30,61
2	31,45	30,91	36,04	35,35	37,59	36,87
3	25,5	25,21	28,36	27,94	31,09	30,61
4	28,64	28,25	31,76	31,28	33,95	33,41
5	38,19	36,02	42,08	39,04	45,07	42,25
6	25,54	25,21	28,35	27,91	30,6	30,21
7	28,67	28,26	32,49	31,98	34,5	34,02
8	29,65	29,27	33,84	33,24	36,01	35,4

Tab. 8: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C bez použití temperační tekutiny.

číslo otvoru	měření č. 10		měření č. 11		měření č. 12	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	25,21	24,9	28,69	28,12	32,6	32,01
2	30,05	29,36	33,9	33,21	37,59	36,87
3	25,07	24,72	27,59	27,14	30,78	30,21
4	27,45	27,08	30,74	30,14	35,04	34,32
5	37,06	35,11	41,58	37,65	44,78	41,22
6	25,54	25,24	27,45	27,09	32,08	31,5
7	27,6	27,26	30,78	30,12	35,12	34,41
8	28,25	27,85	32,45	31,84	36,21	35,65

Tab. 9: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{lav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{tm} = 15$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	měření č. 13		měření č. 14		měření č. 15	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	19,01	18,87	22,84	22,5	23,96	23,61
2	23,01	22,63	26,64	26,19	28,15	27,7
3	16,05	15,87	16,37	16,08	16,57	16,35
4	20,81	20,55	24,67	24,22	25,68	25,25
5	28,05	26,29	29,99	28,1	32,65	30,78
6	16,5	16,38	16,9	16,67	17,25	17,01
7	20,38	20,03	24,25	23,87	25,57	25,15
8	21,59	21,22	26,05	25,78	27,3	27,01

Tab. 10: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18$ s, $T_{lav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{tm} = 15$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	měření č. 16		měření č. 17		měření č. 18	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	21,61	21,35	22,01	21,69	23,78	23,33
2	24,98	24,56	25,8	25,27	27,98	27,45
3	16,03	15,9	15,82	15,65	15,75	15,57
4	23,21	22,88	23,84	23,35	26,15	25,8
5	28,01	25,78	29,01	27,4	32,08	30,1
6	16,7	16,55	16,6	16,39	16,5	16,28
7	23,3	22,98	23,55	23,15	25,67	25,21
8	24,11	23,85	25,31	24,99	26,94	26,45

Tab. 11: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{lav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{tm} = 45$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

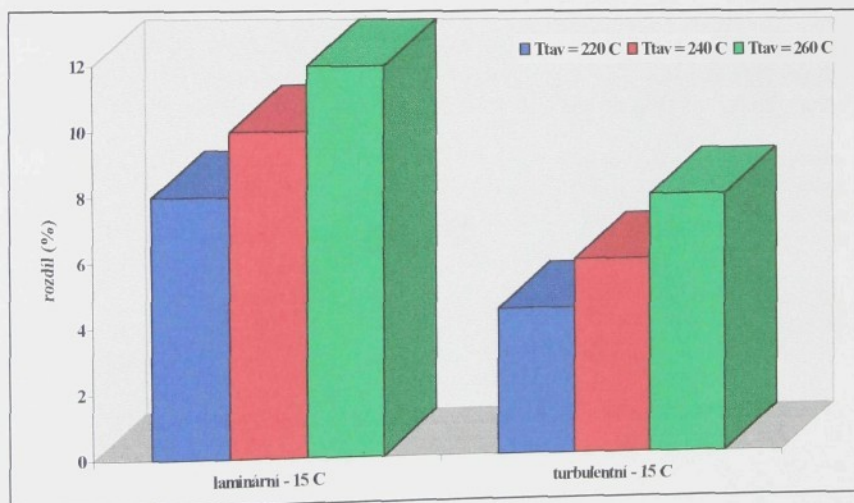
číslo otvoru	měření č. 19		měření č. 20		měření č. 21	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	48,01	47,78	48,82	48,59	51,05	50,78
2	51,68	51,35	53,2	52,81	50,04	49,61
3	45,15	45,01	45,82	45,65	45,87	45,66
4	49,75	49,56	51,36	51,01	53,22	52,9
5	55,56	54,62	58,01	56,78	59,6	58,09
6	45,83	45,67	46,5	45,96	46,87	46,52
7	49,87	49,55	51,54	51,28	52,9	52,57
8	50,55	50,27	53,14	52,88	53,96	53,54

Tab. 12: Srovnání experimentálně zjištěných teplot v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18$ s, $T_{\text{tav}} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{\text{tm}} = 45$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	měření č. 22		měření č. 23		měření č. 24	
	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)	max. T (°C)	min. T (°C)
1	48,35	48,17	49,11	48,4	51,59	51,15
2	51,81	51,48	53,11	52,54	55,32	54,91
3	45,25	45,14	45,36	45,15	45,78	45,52
4	50,27	49,95	50,96	50,65	53,25	52,98
5	55,25	53,98	57,31	55,78	59,32	57,78
6	45,85	45,66	45,84	45,62	46,5	46,27
7	49,45	49,22	50,7	50,38	53,25	52,88
8	51,05	50,87	51,91	51,6	54,01	53,62

Pokud bych měl hodnotit provedené experimenty v jednotlivých místech podle naměřených teplot v závislosti na čase, lze naměřené teploty, které jsou uvedené v tab. 5 až v tab. 12, shrnout do několika bodů:

1. Nejnižší teploty byly naměřeny v otvorech, označených č. 3 a č. 6, a to jak pro měření s laminárním a turbulentním druhem proudění temperačního média, tak i pro obě použité doby vstřikovacího cyklu.



Obr. 52: Procentuální rozdíly mezi počáteční teplotou temperačního média a mezi naměřenými teplotami v místech č. 3 a č. 6

Rozdíl teploty mezi naměřenou hodnotou v místě č. 3 nebo v místě č. 6 a počáteční hodnotou (v čase 0 s) temperačního média $15,2$ °C pro laminární druh proudění temperačního média nepřekročil 12 % (pro teplotu taveniny 220 °C byl kolem 8 %, pro teplotu taveniny 240 °C byl kolem 10 % a pro teplotu taveniny 260 °C

byl kolem 12 %), který byl přibližně stejný pro obě rozdílné doby vstřikovacího cyklu (viz obr. 52).

Pro turbulentní druh proudění temperační kapaliny (počáteční teplota 15,1 °C) nebyl rozdíl větší než 8 % (pro teplotu taveniny 220 °C byl kolem 5 %, pro teplotu taveniny 240 °C byl kolem 6 % a pro teplotu taveniny 260 °C byl 8 %), který byl přibližně stejný pro obě rozdílné doby vstřikovacího cyklu (viz obr. 52).

Rozdíly naměřených teplot v místě č. 3 a č. 6 od počáteční hodnoty temperačního média 45,4 °C pro laminární druh proudění temperačního média jsou v průměru, pro vstřikovací cyklus dlouhý 12 s, kolem 4 % a pro vstřikovací cyklus 18 s kolem 3 %.

Naměřené teploty v místě, označeném jako č. 6, oproti měřenému místu č. 3, jsou v průměru o 2,5 % vyšší pro turbulentní druh proudění a v průměru o 4,5 % vyšší pro laminární druh proudění.

Z předchozích odstavců je patrné, že při změně teploty temperačního média z 15 °C na teplotu 45 °C, snižují se při laminárním proudění temperační kapaliny rozdíly mezi naměřenou a počáteční teplotou z 12 % na 4 % resp. 3 %.

Pro vstřikování bez použití temperační kapaliny rostou teploty (průběhy teplotních polí) s časem skoro přímkovou závislostí po celou dobu měření, tj po dobu 500 s. Teploty, zjištěné pro oba dva použité vstřikovací cykly jsou téměř srovnatelné pro stejné teploty taveniny. Je zde nutné podotknout, že k ustálení teplotních polí by během další doby určitě došlo, ale protože hlavní oblastí této práce bylo měření teplotních polí ve vybraných místech vstřikovací formy při změně parametrů vstřikování a protože vstřikování bez temperace jsem zde uvedl pouze jako zvláštní případ, není zde uvedeno, při jakém čase dojde k rovnovážnému stavu mezi odvodem a přívodem tepla.

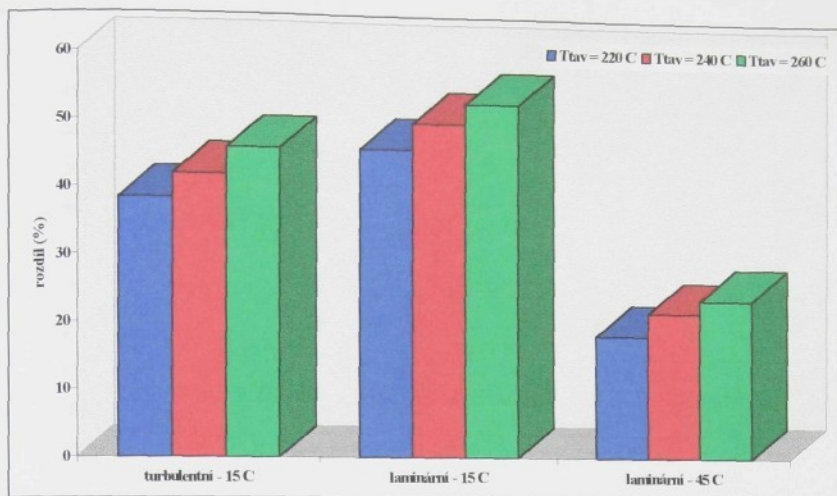
2. Nejvyšší teploty byly experimentálně zjištěny v otvoru č. 5, který je umístěn u tvarové dutiny formy (viz obr. 25). Průběh teplotního pole vykazuje i největší rozdíly teplot mezi maximální a minimální hodnotou teploty během jednoho vstřikovacího cyklu.

Rozdíly naměřených teplot v místě č. 5 od počáteční hodnoty temperačního média (tj. teploty 15,2 °C) pro laminární druh proudění nepřekročily 53 % (pro teplotu taveniny 220 °C byl zjištěn rozdíl 46 %, pro teplotu taveniny 240 °C byl rozdíl kolem 50 % a pro teplotu taveniny 260 °C byl rozdíl 53 %), který byl přibližně stejný pro obě rozdílné doby vstřikovacího cyklu (viz obr. 53).

Pro turbulentní druh proudění temperační kapaliny (počáteční teplota 15,1 °C) nebyl rozdíl větší než 46 % (pro teplotu taveniny 220 °C byl 38,5 %, pro teplotu taveniny 240 °C byl kolem 42 % a pro teplotu taveniny 260 °C byl 46 %), který byl přibližně stejný pro obě rozdílné doby vstřikovacího cyklu (viz obr. 53).

Rozdíly naměřené teploty v místě č. 5 od počáteční hodnoty temperačního média 45,4 °C pro laminární druh proudění jsou pro jednotlivé teploty taveniny následující (viz obr. 53): pro teplotu taveniny 220 °C je rozdíl 18,5 %, pro teplotu taveniny 240 °C je rozdíl kolem 22 % a pro teplotu taveniny 260 °C je rozdíl 24 % a to jak pro dobu vstřikovacího cyklu 12 s, tak i pro dobu vstřikovacího cyklu 18 s.

Naměřené teploty nabývají, pro laminární a turbulentní druh proudění a teplotu temperačního média 15 °C, přibližně stejných hodnot (viz. kap. 3.8.3.1.), a to jak pro čas cyklu 12 s, tak i pro čas cyklu 18 s. Pro teplotu temperačního média 45 °C jsou naměřené teploty v místě č. 5 opět téměř shodné, a to jak pro čas cyklu 12 s, tak i pro čas cyklu 18 s.



Obr. 53: Procentuální rozdíly mezi počáteční teplotou temperačního média a mezi naměřenými teplotami v místě č. 5

Při srovnání zjištěných rozdílů je patrné, že při změně teploty temperačního média z 15°C na teplotu 45°C se snižují při laminárním proudění temperační kapaliny rozdíly mezi naměřenou a počáteční teplotou zhruba na polovinu.

Pro vstřikování bez použití temperační kapaliny rostou teploty s časem téměř přímočarou závislostí. Teploty pro oba dva použité vstřikovací cykly jsou téměř srovnatelné pro stejné teploty taveniny.

3. Téměř shodných teplot dosahují naměřené teploty v měřených místech č. 1, č. 4, č. 7 a č. 8. O málo „vyšší“ teploty byly experimentálně zjištěny v otvoru č. 2.

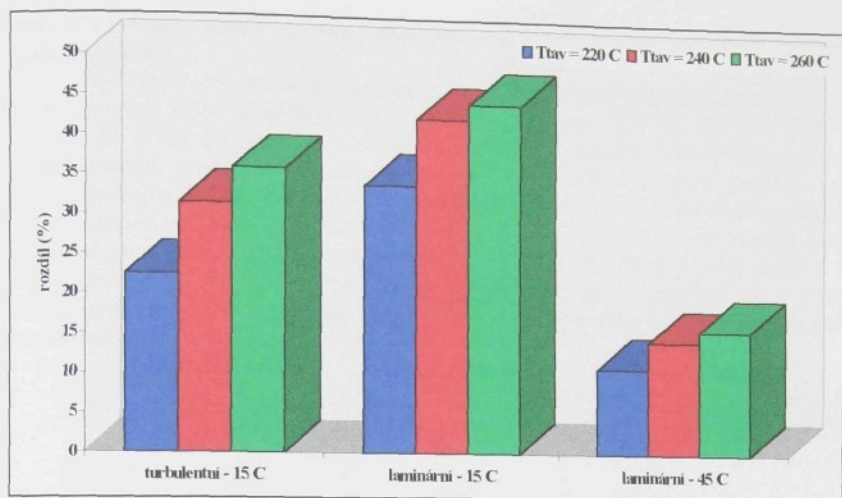
Rozdíly naměřených teplot v místech č. 1, č. 4, č. 7 a č. 8 od počáteční hodnoty temperačního média $15,2^\circ\text{C}$ pro laminární druh proudění kapaliny, nepřekročily hodnotu $44,5\%$ (pro teplotu taveniny 220°C byl rozdíl 34% , pro teplotu 240°C byl rozdíl kolem $42,5\%$ a pro teplotu taveniny 260°C byl rozdíl $44,5\%$). Rozdíly byly přibližně stejné pro obě doby vstřikovacího cyklu (viz obr. 54).

Teploty pro otvor č. 2 jsou v průměru o 10% vyšší oproti teplotám pro otvory č. 1, č. 4, č. 7 a č. 8.

Pro turbulentní druh proudění temperační kapaliny s počáteční teplotou $15,1^\circ\text{C}$ nebyl rozdíl větší než 36% (pro teplotu taveniny 220°C byl rozdíl kolem $22,5\%$, pro teplotu taveniny 240°C byl rozdíl kolem $31,5\%$ a pro teplotu taveniny 260°C byl rozdíl 36%), který byl přibližně stejný pro obě rozdílné doby vstřikovacího cyklu (viz obr. 54), což je dále popsáno v kap. 3.8.2.

Teploty pro otvor č. 2 jsou v průměru o 8% vyšší oproti zjištěným teplotám pro otvory č. 1, č. 4, č. 7 a č. 8.

Rozdíly naměřené teploty od počáteční hodnoty temperačního média $45,4^\circ\text{C}$ pro laminární druh proudění jsou v průměru kolem 16% (pro teplotu taveniny 220°C byl rozdíl kolem 11% , pro teplotu taveniny 240°C byl rozdíl $14,5\%$ a pro teplotu taveniny 260°C byl rozdíl 16%), a to jak pro dobu vstřikovacího cyklu 12 s , tak i pro dobu vstřikovacího cyklu 18 s (viz obr. 54).



Obr. 54: Procentuální rozdíly mezi počáteční teplotou temperačního média a mezi naměřenými teplotami v místech č. 1, č. 4, č. 7 a č. 8

Teploty pro otvor č. 2 jsou v průměru o 5,5 % vyšší oproti teplotám pro otvory č. 1, č. 4, č. 7 a č. 8.

Pro teplotu temperačního média 45 °C, jsou naměřené teploty téměř shodné, a to jak pro čas cyklu 12 s, tak i pro čas cyklu 18 s.

Při porovnání zjištěných rozdílů je patrné, že při změně teploty temperačního média z 15 °C na teplotu 45 °C se snižují při laminárním proudění temperační kapaliny rozdíly mezi naměřenou a počáteční teplotou zhruba na třetinu.

Pro vstřikování bez použití temperační kapaliny rostou naměřené teploty s časem opět skoro přímkovou závislostí. Teploty zjištěné v měřených místech, označených jako č. 1, č. 4, č. 7 a č. 8, pro oba dva použité vstřikovací cykly, jsou téměř srovnatelné pro stejné teploty taveniny.

Pro vstřikování bez použití temperační kapaliny a pro naměřené teploty v otvoru č. 2, zjištěné pro oba dva použité vstřikovací cykly, jsou teploty téměř srovnatelné pro stejné teploty taveniny.

Pro optimalizaci celého vstřikovacího procesu je potřeba provést vyhodnocení naměřených hodnot zvlášť, aby byl ukázán vliv každého parametru vstřikování tj. doby cyklu, teploty taveniny, teploty temperačního média a rychlosti proudění temperačního média, které jsem měnil dle zvolených kritérií u jednotlivých měření. Pro hodnocení má také velký vliv umístění měřicích otvorů a proto je nutné vždy provést vyhodnocení pro stejná místa měření.

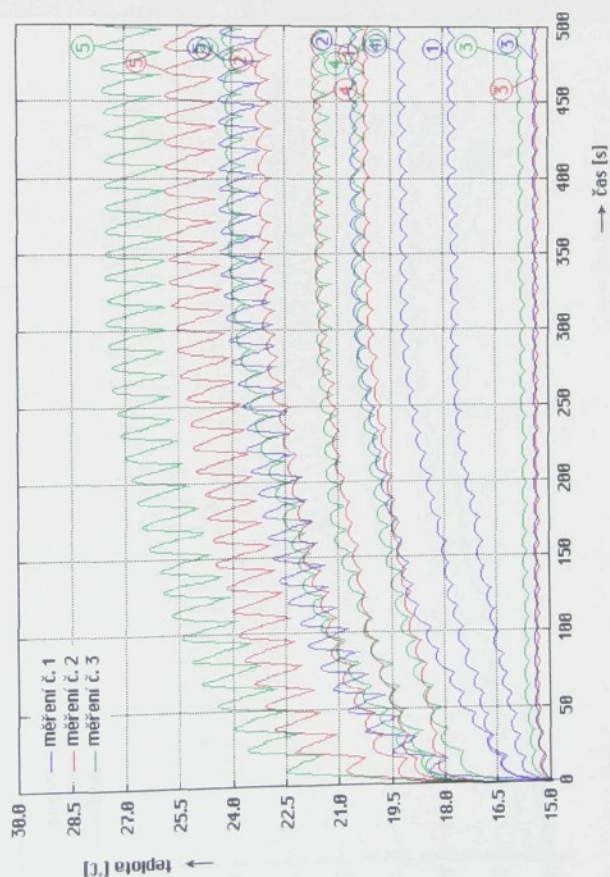
V dalších kapitolách je provedena diskuse o naměřených hodnotách z různých pohledů na danou problematiku.

3.8.1. Vyhodnocení vlivu teploty taveniny na průběh teplotních polí

Při vyhodnocování vlivu teploty taveniny (za jinak stejných podmínek vstřikování) je zřejmé, že se zvyšující se teplotou taveniny je patrná větší prvotní

strmost závislosti teploty na čase. Také hodnota teploty, při které se „ustálí“ teplotní pole, se zvyšuje.

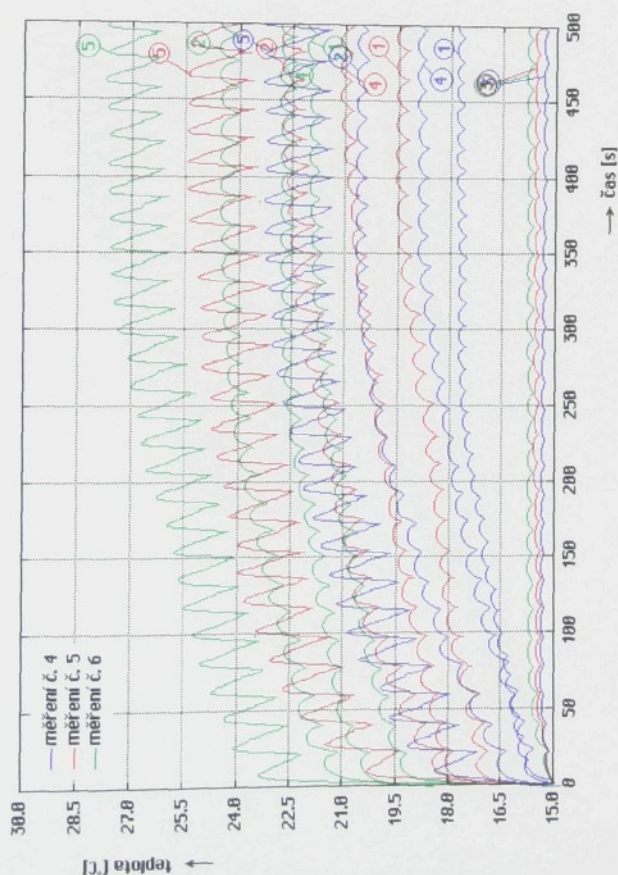
Vyhodnocení provedu pro každou trojici měření zvlášť jako procentuální rozdíl mezi teplotami ve vyvrtaných otvorech pro teplotu taveniny 220°C , 240°C a 260°C (viz tab. 13 až tab. 20). Jako hodnota, ke které budou vztahovány i ostatní hodnoty pro určení rozdílu a následného procentuálního vyjádření, jsou vybrány hodnoty pro teplotu taveniny 260°C . Dále je zde uvedeno grafické srovnání naměřených průběhů teplotních polí pro každou skupinu měření (viz obr. 55 až obr. 62), ze kterých jsem zjišťoval procentuální rozdíly, uvedené v tab. 13 až v tab. 20. Pro přehlednost a v důsledku téměř shodných průběhů teplotních polí pro měřená místa č. 3 a č. 6 a pro měřená místa č. 4, č. 7 a č. 8 budou v grafech uvedeny pouze průběhy teplotních polí pro měřená místa č. 1, č. 2, č. 3, č. 4 a č. 5.



Obr. 55: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 1, č. 2 a č. 3

Tab. 13: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{lav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{lm} = 15$ °C a turbulentní proudění temperační tekutiny.

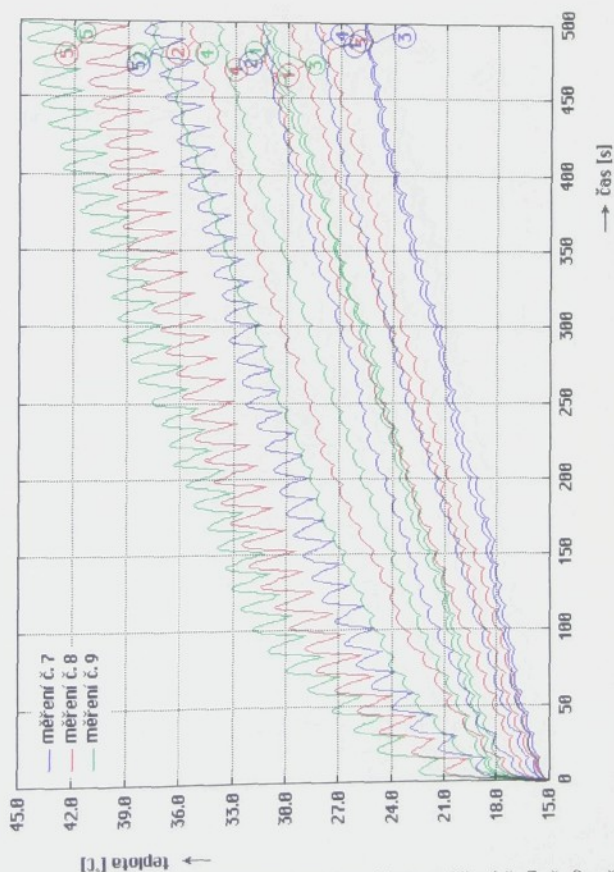
číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č. 3 - měření č. 1		měření č. 3 - měření č. 2	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	12,42	12,19	0,87	0,09
2	15,33	14,07	4,19	3,6
3	4,2	3,81	3,27	3,17
4	9,09	8,95	0,05	0,56
5	11,59	10,48	6,42	5,61
6	2,74	2,36	2,01	1,35
7	12,38	12,17	0,11	0,23
8	11,81	10,56	0,13	1,38



Obr. 56: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 4, č. 5 a č. 6

Tab. 14: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18 \text{ s}$, $T_{\text{lav}} = 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{tm}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a turbulentní proudění temperační tekutiny.

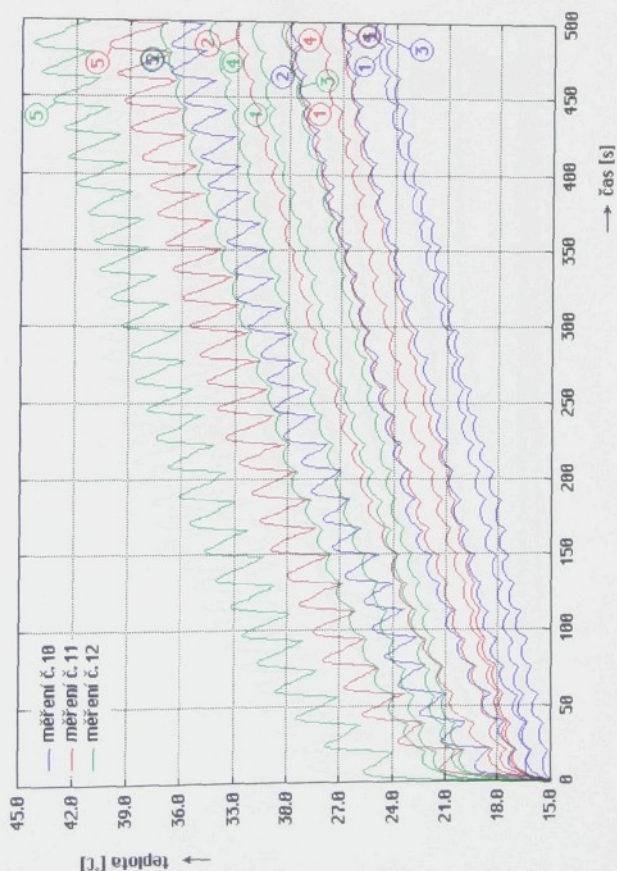
číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č. 6 - měření č. 4		měření č. 6 - měření č. 5	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	19,11	18,68	11,11	10,02
2	14,74	14,46	6,19	5,98
3	2,21	1,59	1,45	0,89
4	14,04	13,85	7,32	7,05
5	15,39	17,62	8,29	9,87
6	2,93	2,36	2,56	2,43
7	17,78	15,14	8,68	8,2
8	18,14	17,28	9,47	8,79



Obr. 57: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 7, č. 8 a č. 9

Tab. 15: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C bez použití temperační tekutiny.

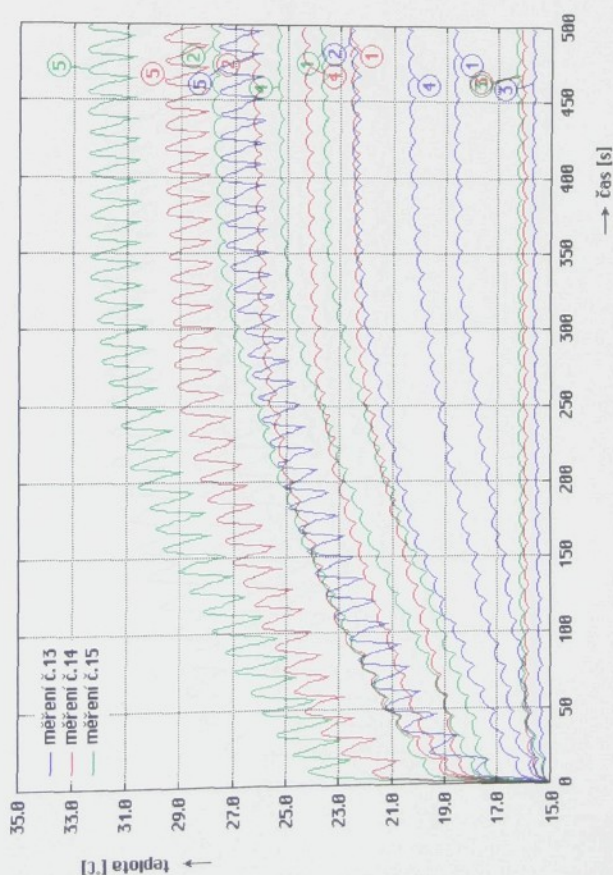
číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č. 9 - měření č. 7		měření č. 9 - měření č. 8	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	17,71	17,64	3,22	3,03
2	16,33	16,16	4,12	3,97
3	17,98	17,64	9,74	8,72
4	15,6	15,41	6,46	6,37
5	15,26	15,02	6,65	6,59
6	16,54	16,34	7,35	7,27
7	16,89	16,83	6,02	5,99
8	17,66	17,25	6,03	5,84



Obr. 58: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 10, č. 11 a č. 12

Tab. 16: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C bez použití temperační tekutiny.

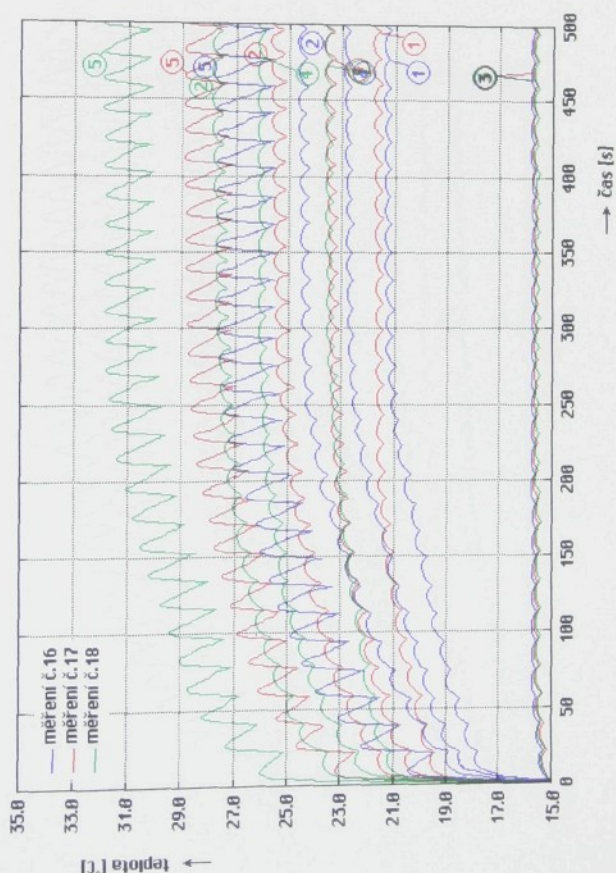
číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č.12 - měření č.10		měření č.12 - měření č.11	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	22,6	22,21	11,99	11,54
2	20,06	19,67	9,82	9,72
3	18,55	18,17	10,36	10,16
4	21,66	21,03	12,27	9,17
5	17,23	14,82	8,14	7,66
6	20,38	19,87	14,43	13,99
7	21,41	20,77	12,35	12,26
8	21,98	20,82	10,38	10,08



Obr. 59: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 13, č. 14 a č. 15

Tab. 17: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{tav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{tm} = 15$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

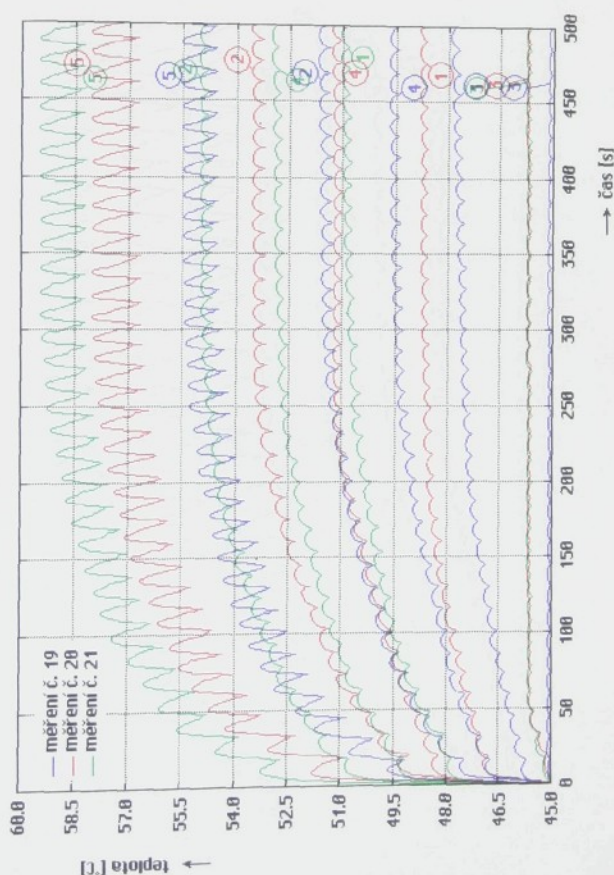
číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č.15 - měření č.13		měření č.15 - měření č.14	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	20,65	20,07	4,67	4,69
2	18,25	18,29	5,36	5,45
3	3,14	2,935	1,21	1,65
4	18,98	18,61	3,93	4,08
5	14,09	14,58	8,15	8,7
6	4,35	3,71	2,03	1,99
7	20,29	20,35	5,16	5,09
8	20,91	21,43	4,58	4,55



Obr. 60: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 16, č. 17 a č. 18

Tab. 18: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18$ s, $T_{tav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{im} = 15$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

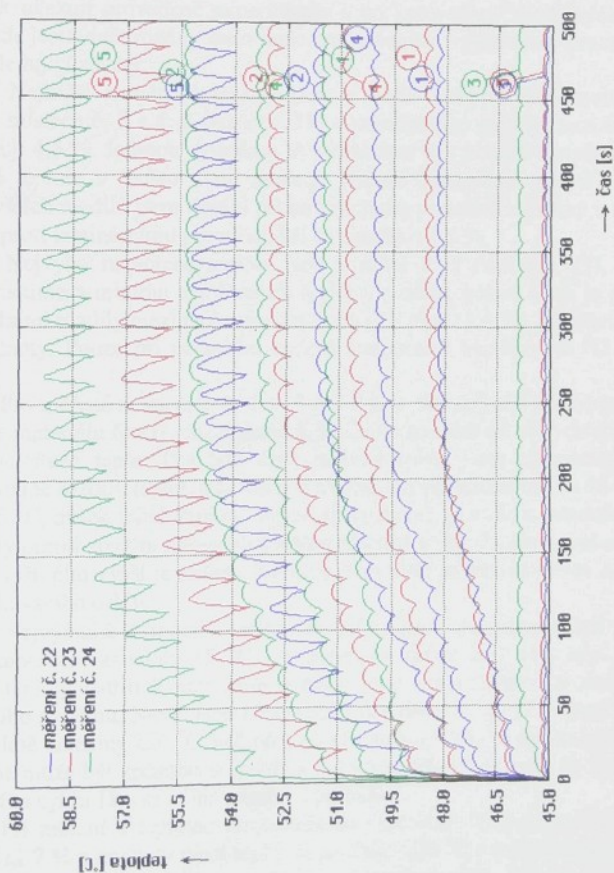
číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č.18 - měření č.16		měření č.18 - měření č.17	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	19,12	18,99	7,44	7,02
2	10,72	10,52	7,79	7,51
3	1,77	2,11	0,44	0,51
4	11,24	11,31	8,83	8,94
5	12,68	14,35	9,57	8,97
6	1,21	1,65	0,61	0,67
7	9,23	8,75	8,26	8,17
8	10,51	9,82	6,05	5,51



Obr. 61: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 19, č. 20 a č. 21

Tab. 19: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 12$ s, $T_{lav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{tm} = 45$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č.21 - měření č.19		měření č.21 - měření č.20	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	5,95	5,9	4,37	4,31
2	3,28	3,38	6,31	6,45
3	1,57	1,42	0,11	0,02
4	6,52	6,31	3,49	3,57
5	6,77	5,97	2,67	2,31
6	2,22	1,82	0,79	1,2
7	5,73	5,74	2,51	2,45
8	6,32	6,1	1,52	1,38



Obr. 62: Porovnání průběhů teplotních polí pro měření č. 22, č. 23 a č. 24

Tab. 20: Procentuální rozdíl mezi teplotami v jednotlivých měřených místech pro $t_c = 18$ s, $T_{lav} = 220$ °C, 240 °C a 260 °C, $T_{tm} = 45$ °C a laminární proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	rozdíl (%)			
	měření č.24 - měření č.22		měření č.24 - měření č.23	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	6,28	5,82	4,81	5,27
2	6,34	6,24	3,99	4,31
3	1,15	0,83	0,92	0,81
4	5,59	5,32	4,3	4,39
5	6,86	6,57	3,39	3,46
6	1,39	1,31	1,42	1,35
7	7,13	6,69	4,79	4,36
8	5,48	5,12	3,89	3,76

Jak ukazují provedené experimenty a po „převedení“ grafických výstupů do tabulek, kde jsou vidět rozdíly mezi teplotami taveniny, vyjádřené v procentech, mohou učinit následující závěry:

1. Nejnižší naměřené teploty jsou v okolí temperačního systému, tedy v měřených místech č. 3 a č. 6 (viz obr. 25) a procentuální rozdíly mezi teplotami zde nepřekračují 4,5 %. Jedinou výjimkou je vstřikování bez použití temperační kapaliny. Naměřené teploty v těchto dvou místech vlastně odpovídají teplotě temperačního média. Vyšších rozdílů jsem dosáhl při turbulentním proudění kapaliny v temperačním systému oproti laminárnímu proudění, liší se zhruba o 1,5 %.

2. Nejvyšší naměřené teploty jsou v místě č. 5 (viz obr. 25), kde existují výrazná maxima a minima naměřených teplot a rozdíly, pokud bych je porovnával s procentuálními rozdíly mezi teplotami taveniny (7,7 % a 15,4 %), představují přibližně stejné hodnoty. Pouze při počáteční teplotě temperační kapaliny 45 °C jsou zhruba poloviční.

3. Pro měřená místa č. 2, č. 4, č. 7 a č. 8 (viz obr. 25) se výrazně projevuje vliv akumulace materiálu formy, což znamená, že forma se snaží co nejrychleji přijmout co největší množství tepla. Pro tato čtyři měřená místa jsem experimentálně zjistil přibližně stejné rozdíly teplot, a to jak pro teplotu temperačního média 15 °C, tak i pro teplotu 45 °C, avšak jejich teploty nejsou srovnatelné, protože v měřeném místě č. 2 jsou teploty oproti zbylým měřeným místům výrazně vyšší. Procentuální rozdíly teplot jsou tím vyšší, čím vyšší je teplota taveniny, čím nižší je teplota formy a čím delší je doba vstřikovacího cyklu.

4. Nejvýraznější rozdíly teplot (až 20%) jsem experimentálně zjistil - pro teplotu temperační kapaliny 15 °C - v měřeném místě č. 1 (viz obr. 25), i když naměřené teploty patřily k nejnižším a otvor je vyvrtán daleko od dutiny formy a temperačního systému. Navíc jsou tyto rozdíly pro dobu cyklu 12 s výrazně vyšší (asi 5x) při teplotě taveniny 220 °C, než při teplotě taveniny 240 °C oproti teplotě taveniny 260 °C, což může být způsobeno rychlým a častým přívodem tepla do formy. Pro čas vstřikovacího cyklu 18 s se jedná zhruba o polovinu.

5. Při měření s teplotou temperačního média 45 °C jsou maximální rozdíly teplot 6 % až 7 % a hodnoty mezi teplotou taveniny 220 °C a teplotou taveniny 240 °C oproti teplotě taveniny 260 °C jsou zhruba o čtvrtinu nižší. Zde se již neprojevuje výrazně vliv přivedeného tepla taveninou plastu tak, jak tomu bylo u „chladné“ formy.

Procentuální rozdíly v místech č.1, č. 2, č. 4, č. 5, č. 7 a č. 8 jsou téměř srovnatelné i přes velké rozdíly v naměřených teplotách.

6. Při měření bez použití temperační kapaliny je nárůst teplot velmi výrazný, protože nic „nenutí“ vstřikovací formu teplo odevzdat a rozdíly teplot (viz tab. 15 a tab. 16) jsou velmi vysoké.

3.8.2. Vyhodnocení vlivu doby vstřikovacího cyklu na průběh teplotních polí

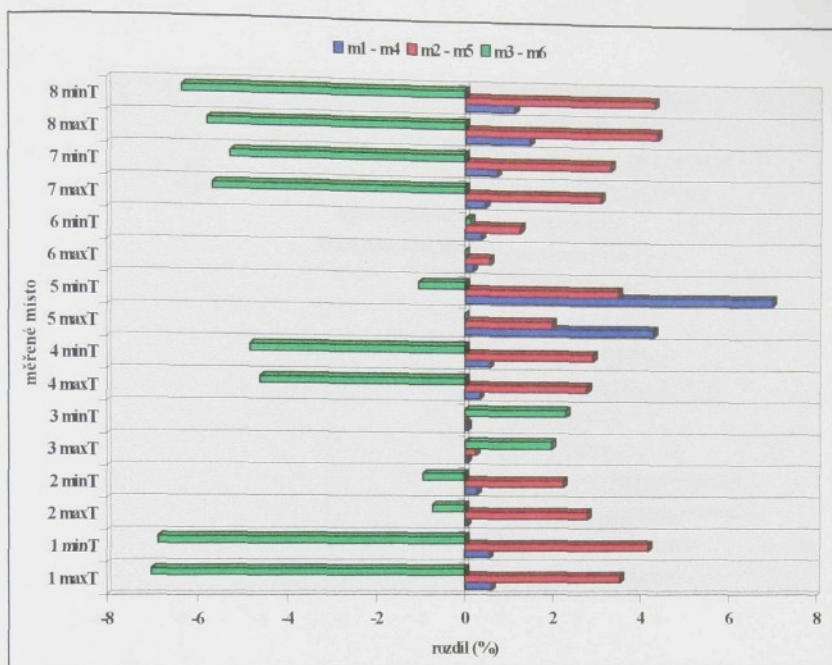
Pro objektivní porovnání vlivu doby vstřikovacího cyklu je potřeba porovnávat vstřikování, kdy teplota taveniny, teplota temperačního média i způsob proudění chladicí tekutiny byly stejné.

Při měřeních byly použity vstřikovací cykly s rozdílnou dobou chladnutí výrobku (viz tab. 4). Při vstřikovacím cyklu s delší dobou chladnutí výstřiku v dutině formy, docházelo k rychlejšímu vyrovnání přívodu a odvodu tepla a tedy ke kratší rozběhové fázi, což je patrné z grafických závislostí.

V následujících tabulkách (viz tab. 21 až tab. 24) je provedeno porovnání jednotlivých experimentů tak, že při stejných teplotách taveniny, teplotách temperačního média a druhu proudění temperačního média, jsou procentuálně vyjádřeny rozdíly mezi teplotami při době vstřikovacího cyklu 12 s a době vstřikovacího cyklu 18 s, vztažené vždy k experimentálně zjištěné teplotě při době cyklu 12 s. (Pozn.: Záporné znaménko značí naměřené vyšší teploty pro dobu vstřikovacího cyklu 18 s). Dále je zde pro každou tabulku nakreslen sloupcový graf, kde jsou přehledně uvedeny zjištěné rozdíly (viz obr. 63 až obr. 66).

Tab. 21: Procentuální rozdíl mezi experimentálně zjištěnými teplotami u doby vstřikovacího cyklu 12 s a doby vstřikovacího cyklu 18 s v jednotlivých měřených místech pro $T_{lav} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{tm} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a turbulentní proudění temperační tekutiny.

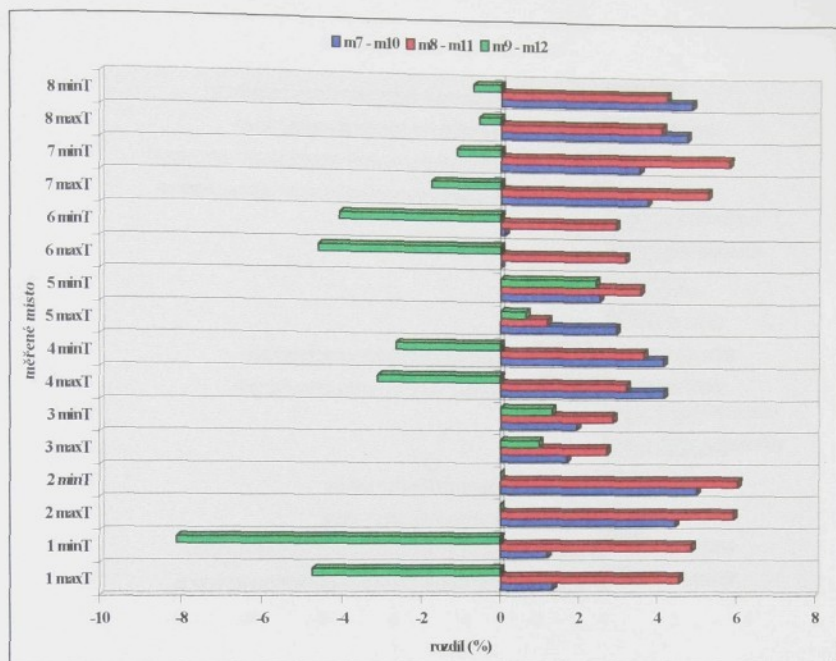
číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 1 - měř. č. 4		měř. č. 2 - měř. č. 5		měř. č. 3 - měř. č. 6	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	0,61	0,56	3,55	4,18	-7,01	-6,87
2	0,05	0,29	2,8	2,25	-0,73	-0,95
3	0,06	0,06	0,25	0	1,97	2,31
4	0,35	0,56	2,79	2,92	-4,62	-4,84
5	4,3	6,99	1,99	3,49	0	-1,06
6	0,18	0,38	0,56	1,26	0	0,12
7	0,46	0,73	3,08	3,31	-5,68	-5,28
8	1,47	1,13	4,37	4,31	-5,79	-6,35



Obr. 63: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů u skupiny měření č. 1 až č. 6

Tab. 22: Procentuální rozdíl mezi experimentálně zjištěnými teplotami u doby vstřikovacího cyklu 12 s a doby vstřikovacího cyklu 18 s v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{tav}} = 220^{\circ}\text{C}$, 240°C a 260°C bez použití temperační tekutiny.

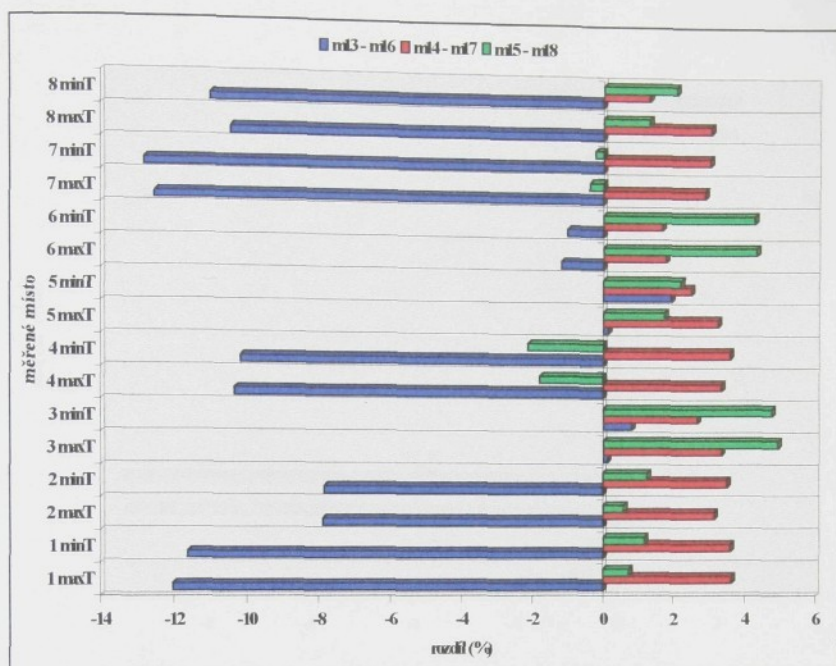
číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 7 - měř. č. 10		měř. č. 8 - měř. č. 11		měř. č. 9 - měř. č. 12	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	1,33	1,22	4,55	4,87	-4,75	-8,12
2	4,45	5,01	5,93	6,05	0	0
3	1,69	1,94	2,71	2,86	0,99	1,31
4	4,16	4,14	3,21	3,64	-3,11	-2,65
5	2,95	2,52	1,19	3,56	0,64	2,43
6	0	0,11	3,17	2,93	-4,61	-4,09
7	3,73	3,53	5,26	5,81	-1,76	-1,13
8	4,72	4,85	4,1	4,21	-0,55	-0,7



Obr. 64: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů u skupiny měření č. 7 až č. 12

Tab. 23: Procentuální rozdíl mezi experimentálně zjištěnými teplotami u doby vstřikovacího cyklu 12 s a doby vstřikovacího cyklu 18 s v jednotlivých měřených místech pro $T_{lav} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{lm} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a laminární proudění temperační tekutiny.

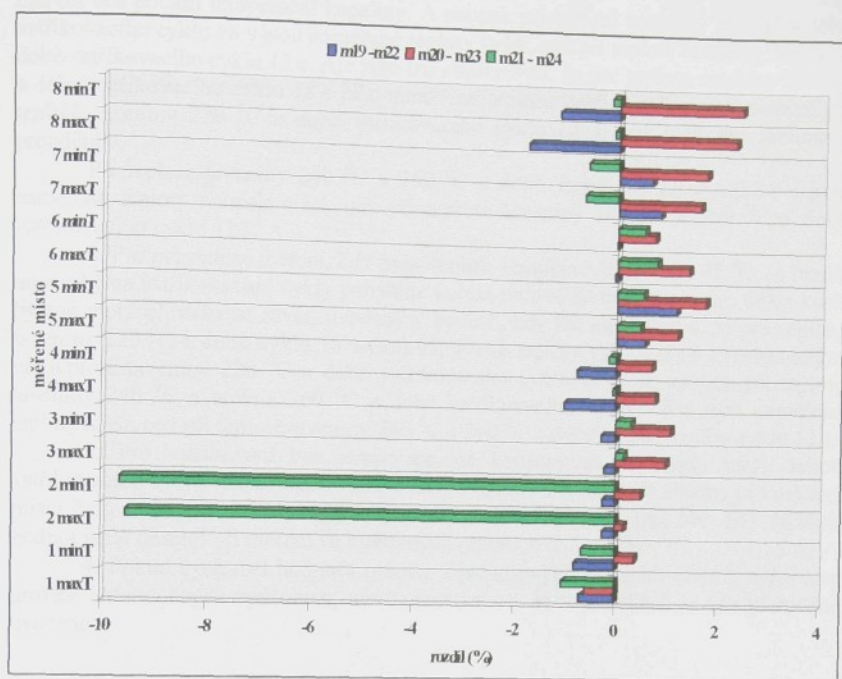
číslo otvoru	rozdíly (%)					
	měř. č.13 - měř. č.16		měř. č.14 - měř. č.17		měř. č.15 - měř. č.18	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	-12,03	-11,62	3,63	3,6	0,75	1,18
2	-7,89	-7,85	3,15	3,51	0,6	1,26
3	0,12	0,81	3,35	2,67	4,95	4,77
4	-10,34	-10,18	3,36	3,59	-1,79	-2,13
5	0,14	1,93	3,26	2,49	1,74	2,21
6	-1,19	-1,02	1,78	1,68	4,34	4,29
7	-12,53	-12,83	2,89	3,02	-0,39	-0,23
8	-10,45	-11,02	2,84	3,06	1,32	2,07



Obr. 65: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů u skupiny měření č. 13 až č. 18

Tab. 24: Procentuální rozdíl mezi experimentálně zjištěnými teplotami u doby vstřikovacího cyklu 12 s a doby vstřikovacího cyklu 18 s v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{lav}} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{tm}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a laminární proudění temperační tekutiny.

číslo otvoru	rozíl (%)					
	měř. č.19 - měř. č.22		měř. č.20 - měř. č.23		měř. č.21 - měř. č.24	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	-0,7	-0,81	-0,59	0,39	-1,05	-0,67
2	-0,25	-0,25	0,17	0,51	-9,54	-9,65
3	-0,22	-0,29	1	1,09	0,19	0,31
4	-1,03	-0,78	0,78	0,71	-0,06	-0,15
5	0,56	1,17	1,21	1,76	0,47	0,53
6	-0,05	-0,02	1,42	0,74	0,79	0,54
7	0,84	0,66	1,63	1,75	-0,66	-0,59
8	-1,79	-1,18	2,31	2,42	-0,09	-0,15



Obr. 66: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů u skupiny měření č. 19 až č. 24

Z předchozích tabulek a sloupcových grafů, kde jsou vyjádřeny rozdíly v procentech mezi měřeními pro vstřikovací cyklus 12 s a vstřikovací cyklus 18 s, můžeme učinit následující závěry:

I. Pro provedená měření s teplotou temperačního média 15°C a s turbulentním prouděním kapaliny, bylo zjištěno, že rozdíl mezi naměřenými teplotami roste s rostoucí teplotou taveniny, a to tak, že mezi teplotami 220°C a 240°C se zvýší v průměru šestkrát, a mezi teplotami 240°C a 260°C se zvýší v průměru dvakrát (viz obr. 63). Na rozdíl od laminárního proudění, kde byly naměřeny vyšší teploty pro dobu cyklu 18 s a pro teplotu taveniny 220°C , tak pro turbulentní proudění temperačního média byly naměřeny vyšší teploty pro čas vstřikovacího cyklu 18 s a teplotu taveniny 260°C . U laminárního proudění lze konstatovat, na rozdíl od turbulentního proudění, že rozdíl mezi teplotami klesá s rostoucí teplotou taveniny (viz obr. 65). Tyto závěry ovšem platí pouze s tím konstatováním, že v měřených místech č. 3 a č. 6 byla vždy naměřena (až na některé výjimky) vyšší teplota u doby vstřikovacího cyklu 12 s.

Nelze tedy tvrdit, že teploty u delšího vstřikovacího cyklu oproti teplotám u kratšího vstřikovacího cyklu dosahují vyšších či nižších hodnot, ale můžeme konstatovat, že pro teplotu taveniny 220°C a 240°C a dobu vstřikovacího cyklu 18 s jsou naměřené teploty nižší oproti experimentům při teplotě taveniny taveniny 220°C a 240°C a době vstřikovacího cyklu 12 s, což platí pro turbulentní proudění a pro

měření bez použití temperační kapaliny. A naopak při teplotě taveniny 260°C a době vstřikovacího cyklu 18 s jsou naměřené teploty vyšší, než při teplotě taveniny 260°C a době vstřikovacího cyklu 12 s. Ale také lze konstatovat, že pro teplotu taveniny 220°C a dobu vstřikovacího cyklu 18 s jsou naměřené teploty vyšší oproti experimentům při teplotě taveniny 220°C a době vstřikovacího cyklu 12 s, což platí pro laminární proudění.

Při teplotě taveniny 240°C a 260°C a době vstřikovacího cyklu 18 s jsou naměřené teploty naopak nižší, než při teplotě taveniny 240°C a 260°C a době vstřikovacího cyklu 12 s.

2. Pro provedená měření, kdy byla teplota temperačního média 45°C , se rozdíl mezi oběma vstřikovacími cykly pohybuje kolem nulové hodnoty (viz obr. 66), i když by zde mohl převažovat závěr, uvedený v bodě 1, kdy lze konstatovat, že pro teplotu taveniny 220°C a dobu cyklu 18 s jsou naměřené teploty vyšší oproti experimentům při teplotě taveniny 220°C a době vstřikovacího cyklu 12 s. A naopak při teplotě taveniny 240°C a teplotě 260°C a době vstřikovacího cyklu 18 s jsou naměřené teploty nižší, než při teplotě taveniny 240°C a 260°C a době vstřikovacího cyklu 12 s.

3. Pro vstřikování bez temperace lze konstatovat, že rozdíl mezi dobou vstřikovacího cyklu 12 s a dobou vstřikovacího cyklu 18 s, je téměř shodný pro měřená místa č. 2, č. 4, č. 7, č. 8 a nabývá maximálně necelých 6 % (viz obr. 64). Nižších hodnot jsme dosáhli při měření ve vyvrtaných otvorech č. 1 a č. 5.

4. Pokud bych měl hodnotit rozdíly u jednotlivých měřicích otvorů, nelze toto provést jednoduchých způsobem, ale domnívám se, že v tabulkách je vše přehledně uvedeno.

3.8.3. Vyhodnocení vlivu temperačního systému na průběh teplotních polí

Při vyhodnocování účinků temperačního systému na průběh teplotních polí a tedy na provedené experimenty musím srovnávat měření, u kterých je stejná teplota taveniny a stejná doba vstřikovacího cyklu, aby bylo možné výsledky následně popsat a shrnout.

Toto vyhodnocení je dále potřeba rozdělit na dvě oblasti;

a) vliv druhu proudění temperačního média,

b) vliv teploty temperačního média.

3.8.3.1. Vyhodnocení vlivu druhu proudění temperačního média na průběh teplotních polí

Různá rychlost proudění temperačního média má vliv na součinitel přestupu tepla mezi formou a kapalinou a tedy na „odběr“ tepla formě temperačním systémem a na zvýšení teploty temperačního média.

V našem případě jsem měřil teplotu na vstupu na počátku měření a na výstupu při ukončení prováděných experimentů jak při proudění laminárním (pomocí termostatu byla rychlost proudění tekutiny udržována na rychlosti $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), tak i při proudění turbulentním (rychlost proudění byla $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Nárůst teploty při laminárním proudění a počáteční teplotě $15,2^{\circ}\text{C}$ byl při teplotě taveniny 220°C o $3,6^{\circ}\text{C}$, tedy 19,1 %. Při teplotě taveniny 240°C se teplota temperačního média zvýšila o $4,2^{\circ}\text{C}$, což představuje 21,6 % a při teplotě taveniny 260°C byl nárůst teploty $5,1^{\circ}\text{C}$, tj. 25,12 %.

Oproti tomu se při turbulentním proudění a počáteční teplotě $15,1^{\circ}\text{C}$ zvýšila teplota temperačního média při teplotě taveniny 220°C o $2,2^{\circ}\text{C}$, tj. 12,7 %. Při teplotě taveniny 240°C se teplota temperačního média zvýšila o $2,7^{\circ}\text{C}$, což představuje 15,2 % a při teplotě taveniny 260°C byl nárůst teploty temperačního média $3,2^{\circ}\text{C}$, což představuje 17,5 %.

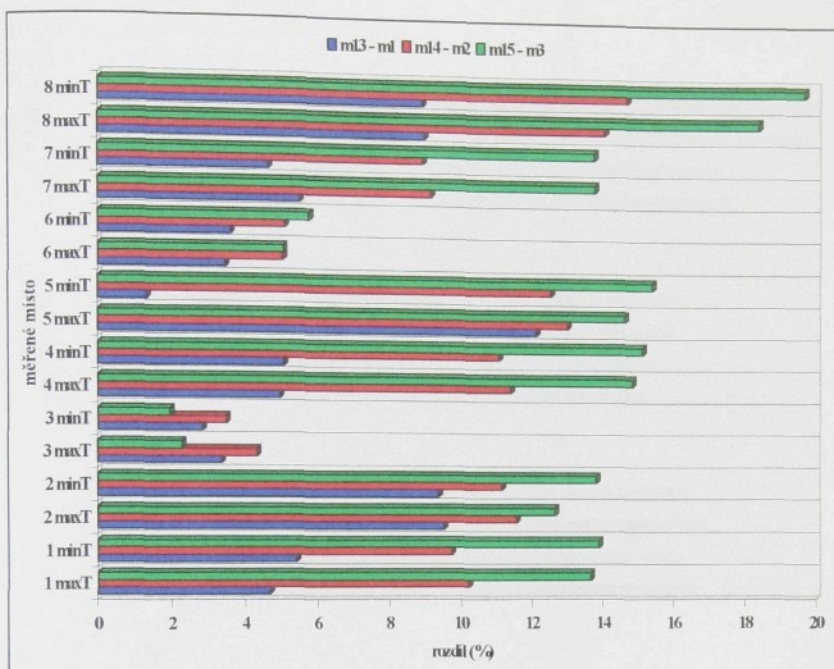
Nárůst teploty při laminárním proudění a počáteční teplotě $45,4^{\circ}\text{C}$ byl při teplotě taveniny 220°C o $1,6^{\circ}\text{C}$, tedy 3,4 %, při teplotě taveniny 240°C se teplota temperačního média zvýšila o $2,3^{\circ}\text{C}$, což představuje 4,8 % a při teplotě 260°C byl nárůst teploty 3°C , tj. 6,2 %.

Při použití chladicího média s turbulentním prouděním dochází k méně strmému nárůstu teploty a k vyrovnaní teplotních polí (ukončená rozběhová fáze) dochází na nižších hodnotách teploty. To je způsobeno tím, že turbulentní proudění se vyznačuje vířivým proudem, což má za následek zvětšení „efektivnosti“ přenosu tepla mezi kovem a kapalinou. Doba rozběhové fáze (vyrovnaní přivedeného a odvedeného tepla) byla přibližně stejná.

Na následujících tabulkách (viz tab. 25 a tab. 26) a sloupcových grafech (viz obr. 67 a obr. 68) je číselně a graficky vyjádřen rozdíl teplot v procentech při použití laminárního proudění temperační kapaliny a při použití turbulentního proudění temperační kapaliny. Srovnání je provedeno pro stejnou teplotu taveniny, stejnou dobu vstřikovacího cyklu a stejnou teplotu temperačního média (s výjimkou pro měření bez použití temperačního média). Jako směrodatné hodnoty pro stanovení rozdílu byly určeny teploty u laminárního proudění.

Tab. 25: Procentuální rozdíl mezi experimentálně zjištěnými teplotami u laminárního a turbulentního druhu proudění temperačního média v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{tm}} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{tav}} = 220^{\circ}\text{C}$, 240°C a 260°C a $t_c = 12$ s.

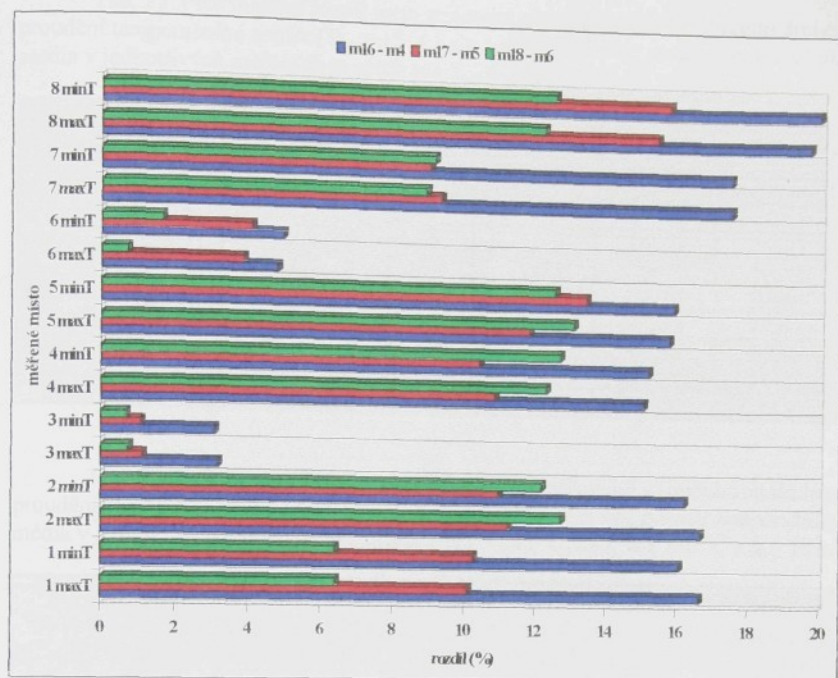
číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 13 - měř. č. 1		měř. č. 14 - měř. č. 2		měř. č. 15 - měř. č. 3	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	4,68	5,41	10,2	9,73	13,65	13,89
2	9,51	9,36	11,56	11,14	12,64	13,82
3	3,36	2,83	4,33	3,48	2,29	1,95
4	4,95	5,06	11,39	11,06	14,83	15,12
5	12,12	11,33	13	12,53	14,61	15,39
6	3,45	3,6	5,03	5,09	5,04	5,76
7	5,25	4,64	9,15	8,92	13,77	13,75
8	8,98	8,91	14,05	14,66	18,38	19,65



Obr. 67: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů mezi měřením č. 13, č. 14, č. 15 a měřením č. 1, č. 2 a č. 3

Tab. 26: Procentuální rozdíl mezi experimentálně zjištěnými teplotami u laminárního a turbulentního druhu proudění temperační kapaliny v jednotlivých měřených místech pro $T_{im} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_{Tav} = 220^{\circ}\text{C}$, 240°C a 260°C a $t_c = 18\text{ s}$.

číslo otvoru	rozdl (%)				měř. č. 18 - měř. č. 6	
	měř. č. 16 - měř. č. 4		měř. č. 17 - měř. č. 5		pro max. T	pro min. T
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T		
1	16,65	16,08	10,13	10,28	6,43	6,42
2	16,69	16,24	11,24	11	12,75	12,2
3	3,18	3,08	1,14	1,09	0,75	0,7
4	15,07	15,21	10,86	10,45	12,31	12,71
5	15,78	15,9	11,85	13,43	13,09	12,55
6	4,79	4,95	3,85	4,09	0,72	1,65
7	17,51	17,49	9,34	9,2	8,92	9,16
8	19,7	19,95	15,4	15,76	12,21	12,51



Obr. 68: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů mezi měřeními č. 16, č. 17, č. 18 a měřeními č. 4, č. 5 a č. 6

Vstřikování termoplastů bez použití temperační kapaliny lze považovat za zvláštní případ druhu proudění, ale také i za zvláštní případ vstřikování termoplastů. Obecně lze říci, že při použití temperačního média teploty na měřených místech nenabývají takových hodnot, jako v případě, kdy temperační tekutinu nepoužíváme.

U měření s použitím temperačního média dochází nejprve k prudkému nárůstu teploty, ale následně dochází k vyrovnání přívodu a odvodu tepla (konstantnímu průběhu teplotních polí), což vede k vytvoření stabilního stavu, rovnováhy, mezi vstřikovací formou a temperačním systémem a ke zmenšení tepelného namáhání nástroje. Při použití temperační soustavy v nástroji dochází k rovnovážnému stavu mnohem dříve.

Na následujících tabulkách (viz tab. 27 až tab. 32) je číselně vyjádřen rozdíl teplot v procentech při použití laminárního nebo turbulentního proudění temperační kapaliny oproti experimentálně zjištěným teplotám při vstřikování bez použití temperační kapaliny v temperačním systému formy. Srovnání je provedeno pro stejnou teplotu taveniny a stejnou dobu vstřikovacího cyklu. Jako směrodatné hodnoty pro stanovení rozdílu naměřených teplot byly určeny teploty u měření bez použití temperační kapaliny.

Záporné znaménko v tab. 29 a v tab. 30 značí, že vyšší teploty byly naměřeny pro měření s teplotou temperačního média 45 °C.

Tab. 27: Procentuální rozdíl mezi teplotami u vstřikování s laminárním druhem proudění temperačního média ($T_{\text{tm}} = 15^{\circ}\text{C}$) a u vstřikování bez použití temperačního média v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{tav}} = 220^{\circ}\text{C}$, 240°C a 260°C a $t_c = 12$ s.

číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 7 - měř. č. 13		měř. č. 8 - měř. č. 14		měř. č. 9 - měř. č. 15	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	25,59	25,41	24,01	23,88	22,83	22,11
2	26,83	26,78	26,08	25,91	25,37	24,87
3	37,05	37,04	42,27	42,44	46,7	46,58
4	27,33	27,54	22,32	22,57	24,35	24,61
5	26,55	27,01	28,73	28,02	27,55	27,14
6	35,39	35,02	40,39	40,27	43,62	43,69
7	28,91	29,12	25,36	25,35	25,88	26,07
8	27,18	27,5	23,02	23,41	24,18	23,7

Tab. 28: Procentuální rozdíl mezi teplotami u vstřikování s laminárním druhem proudění temperačního média ($T_{\text{tm}} = 15^{\circ}\text{C}$) a u vstřikování bez použití temperačního média v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{tav}} = 220^{\circ}\text{C}$, 240°C a 260°C a $t_c = 18$ s.

číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č.10 - měř. č.16		měř. č.11 - měř. č.17		měř. č.12 - měř. č.18	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	15,28	14,25	23,28	22,86	27,06	27,11
2	16,87	16,34	23,89	23,91	25,56	25,54
3	36,05	35,67	42,66	42,33	48,83	48,46
4	15,44	15,78	22,44	22,52	25,37	24,82
5	24,41	26,57	30,23	27,22	28,36	26,97
6	34,61	34,42	29,52	39,49	48,56	48,31
7	15,57	15,7	23,48	23,12	26,9	27,12
8	14,65	14,36	22	21,51	25,6	25,81

Tab. 29: Procentuální rozdíl mezi teplotami u vstřikování s laminárním druhem proudění temperačního média ($T_{\text{tm}} = 45^{\circ}\text{C}$) a u vstřikování bez použití temperačního média v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{tav}} = 220^{\circ}\text{C}$, 240°C a 260°C a $t_c = 12$ s.

číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 7 - měř. č. 19		měř. č. 8 - měř. č. 20		měř. č. 9 - měř. č. 21	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	-87,91	-89,52	-62,41	-64,37	-64,41	-65,89
2	-64,32	-66,12	-47,61	-49,39	-33,12	-34,55
3	-77,05	-78,54	-61,56	-63,38	-47,53	-48,28
4	-73,71	-75,43	-61,71	-63,07	-56,75	-58,33
5	-45,48	-51,63	-27,46	-45,44	-32,23	-37,49
6	-79,44	80,92	-64,02	-64,67	-53,16	-53,98
7	-73,94	-74,25	-58,63	-60,35	-53,33	-54,52
8	-70,48	-71,74	-57,03	-59,08	-49,84	-51,24

Tab. 30: Procentuální rozdíl mezi teplotami u vstřikování s laminárním druhem proudění temperačního média ($T_{tm} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) a u vstřikování bez použití temperačního média v jednotlivých měřených místech pro $T_{tav} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_c = 18\text{ s}$.

číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 10 - měř. č. 22		měř. č. 11 - měř. č. 23		měř. č. 12 - měř. č. 24	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	-91,78	-93,45	-71,17	-72,11	-58,25	-59,79
2	-72,41	-75,34	-56,84	-58,21	-47,16	-48,92
3	-80,49	-82,78	-64,41	-66,35	-48,73	-50,67
4	-83,13	-84,45	-65,77	-68,04	-51,96	-54,37
5	-49,08	-53,74	-37,83	-48,15	-32,46	-40,17
6	-79,52	-80,9	-66,99	-68,04	-44,95	-46,88
7	-79,16	-80,55	-64,71	-65,82	-51,62	-53,67
8	-80,71	-82,65	-59,97	-62,06	-49,15	-50,41

Tab. 31: Procentuální rozdíl mezi teplotami u vstřikování s turbulentním druhem proudění temperač. média ($T_{tm} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) a u vstřikování bez použití temperač. média v jednotlivých měřených místech pro $T_{tav} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_c = 12\text{ s}$.

číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 7 - měř. č. 1		měř. č. 8 - měř. č. 2		měř. č. 9 - měř. č. 3	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	29,08	29,19	31,76	31,92	33,36	33,58
2	33,79	33,63	34,62	34,9	34,58	35,25
3	39,18	38,83	44,78	44,45	52,07	47,63
4	30,93	30,93	31,17	31,13	35,58	35,74
5	35,45	35,28	37,99	37,03	38,14	38,36
6	37,62	37,36	43,38	43,31	46,47	46,93
7	32,64	32,41	32,19	32,02	36,08	36,25
8	33,72	34,02	33,83	33,81	38,12	38,7

Tab. 32: Procentuální rozdíl mezi teplotami u vstřikování s turbulentním druhem proudění temperač. média ($T_{tm} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) a u vstřikování bez použití temper. média v jednotlivých měřených místech pro $T_{tav} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_c = 18\text{ s}$.

číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č. 10 - měř. č. 4		měř. č. 11 - měř. č. 5		měř. č. 12 - měř. č. 6	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	28,56	28,71	31,06	30,79	31,74	31,5
2	30,74	29,93	32,44	32,27	35,06	34,63
3	38,09	37,66	43,31	42,81	48,44	48,16
4	28,19	28,65	30,87	30,62	34,56	34,38
5	36,34	38,25	38,5	36,99	37,74	36,14
6	37	37,67	41,85	42,34	48,98	49,17
7	30,36	30,44	30,63	30,51	33,42	33,44
8	31,46	31,45	34,02	33,88	34,68	35,25

Pozn.: Experimenty při vstřikování bez použití temperační kapaliny ukázaly, že nedojde v čase 500 s ke konstantním průběhům teplotních polí, ale protože jsem chtěl mít stejné časové podmínky pro porovnání jednotlivých měření, bylo vyhodnocení do tabulek provedeno pro poslední vstřikovací cyklus v čase 500 s.

Provedené experimenty, kdy se měnila rychlost proudění temperačního média, poskytují tyto výsledky:

1. Pro dobu vstřikovacího cyklu 12 s je nejnižší rozdíl mezi naměřenými teplotami pro laminární a turbulentní druh proudění temperačního média při teplotě 220 °C a nejvyšší rozdíl je při teplotě 260 °C (viz obr. 67). To tedy znamená, že při teplotě 260 °C byly naměřeny vyšší rozdíly teplot mezi laminárním prouděním temperačního média a turbulentním prouděním temperačního média.

Markantní zvýšení rozdílu je hlavně z teploty taveniny 220 °C na teplotu taveniny 240 °C. Pro měřená místa, označená jako č. 1, č. 4, č. 7, č. 8, je nárůst v této oblasti kolem 100 % a při přechodu z teploty 240 °C na teplotu taveniny 260 °C je nárůst kolem 50 % (viz tab. 25). Pro tyto otvory je velká změna dle mého názoru proto, že se zde „přetahují“ tavenina plastu (přívod tepla) a temperační kapalina (odvod tepla) o přívod či odvod tepla. Zatímco při teplotě taveniny 220 °C má „navrch“ temperační systém, tak při teplotě taveniny 260 °C „vede“ tavenina plastu a rozdíly jsou zde mnohem větší.

V měřeném místě č. 5 je téměř stálá hodnota pro všechny teploty taveniny a tato hodnota je třikrát až čtyřikrát větší, než v měřených místech č. 3 a č. 6, kde převažuje vliv temperačního systému (viz obr. 67). Podobný názor lze učinit i pro otvor č. 2 (viz obr. 25), kde jsou opět vysoké rozdíly a také pomalu rostou.

Lze tedy konstatovat, že teplotní pole jsou vyšší, pokud použijeme laminární proudění temperační kapaliny v temperačních kanálech, což je známý fakt, ale navíc rozdíly rostou s teplotou taveniny.

2. Pro dobu vstřikovacího cyklu 18 s jsou výsledky srovnání vlastně opačné. Tedy nejnižší rozdíl mezi naměřenými teplotami pro laminární a turbulentní druh proudění temperačního média je při teplotě taveniny 260 °C a nejvyšší rozdíl je při teplotě taveniny 220 °C (viz obr. 68). Tyto rozdíly jsou ještě vyšší, než u doby vstřikovacího cyklu 12 s, což je způsobené delší dobou setrvání taveniny plastu v dutině formy.

Ostatní závěry jsou obdobné jako v bodě 1., pouze s tím konstatováním, že rozdíly teplot pro měřená místa č. 3 a č. 6 jsou několikanásobně nižší oproti ostatním měřicím otvorům.

Pozn.: Vyhodnocení tab. 27 až tab. 32 zde nebudu provádět, neboť vypočtené rozdíly mají pouze informativní charakter, protože vstřikování bez temperace se v dnešní době téměř vůbec nepoužívá a z tabulek jsou patrné rozdíly i výsledky.

3.8.3.2. Vyhodnocení vlivu teploty temperačního média na průběh teplotních polí

Při prováděných experimentech jsem použil temperační médium o teplotě 15 °C, a to jak s laminárním, tak i turbulentním druhem proudění temperační tekutiny, resp. temperační médium o teplotě 45 °C, avšak v tomto případě, v důsledku vybavení laboratoří a dílen katedry, pouze s laminárním druhem proudění temperační kapaliny.

Při použití temperační tekutiny o teplotě 45 °C dochází samozřejmě k mnohem vyššímu teplotnímu namáhání nástroje, protože teplota ustálení průběhů teplotních polí je mnohem vyšší. K ustálení však dochází mnohem dříve, než u „chladnějšího“

temperačního média, protože kov vstřikovací formy již nemusí přijmout takové množství tepla. Lze tedy konstatovat, že pro získání rychlého ustálení teplotních polí je potřebné použít temperační kapalinu o vyšší teplotě a pro ustálení teplotních polí na co nejnižší teplotě, je vhodné použít chladnější temperační tekutinu, ať už s laminárním nebo s turbulentním prouděním. Ještě je nutné podotknout, že výsledná teplota ustálení je při „vyšší“ teplotě temperačního média v čase 500 s vyšší i než v případě, kdy jsme temperační tekutinu vůbec nepoužívali.

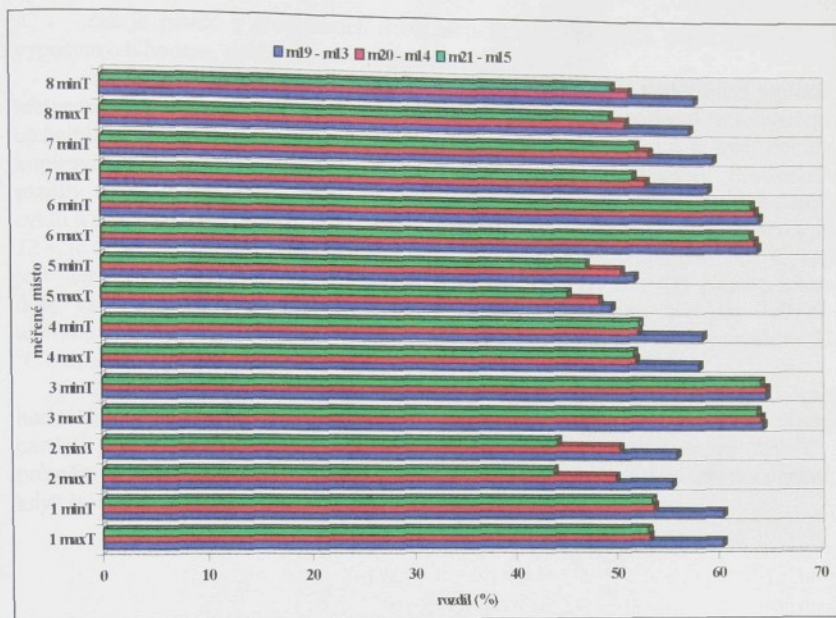
Na následujících dvou tabulkách (viz tab. 33 a tab. 34) je procentuálně vyjádřen rozdíl teplot při měření s použitím temperační kapaliny o teplotě 15 °C oproti měření při použití temperační kapaliny s teplotou 45 °C v temperačním systému formy. Srovnání je provedeno pro stejnou teplotu taveniny, stejnou dobu vstřikovacího cyklu a pro laminární proudění temperační kapaliny. Jako hodnoty, ke kterým budu určovat rozdíl naměřených teplot, byly stanoveny teploty u měření s teplotou temperačního média 45 °C. Dále jsou zde pro větší přehlednost uvedeny pro každou srovnávací tabulku sloupcové grafy (viz obr. 69 a obr. 70) vypočtených procentuálních rozdílů.

Tab. 33: Procentuální rozdíl mezi naměřenými teplotami u měření s teplotou temperačního média 15 °C oproti měření s teplotou temperačního média 45 °C v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{tav}} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_c = 12\text{ s}$ a laminární druh proudění temperačního média.

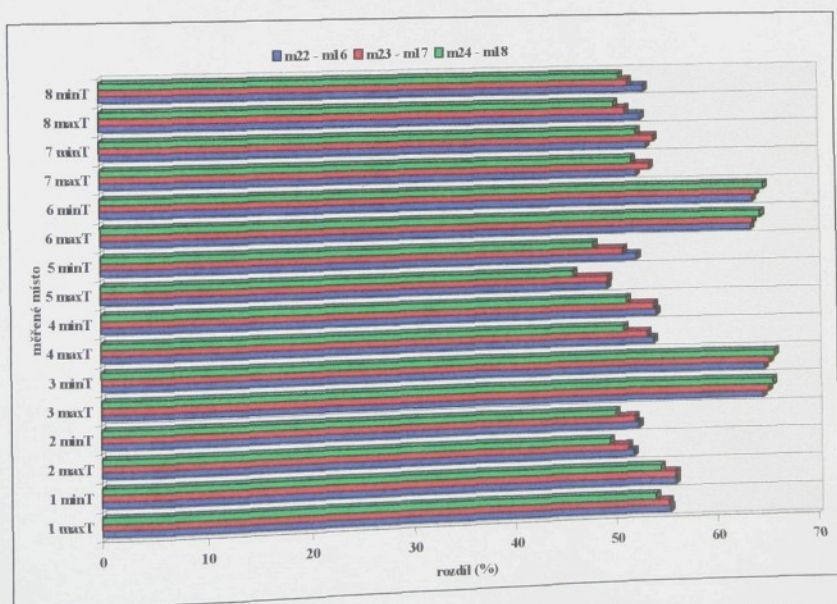
číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č.19 - měř. č.13		měř. č.20 - měř. č.14		měř. č.21 - měř. č.15	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	60,4	60,5	53,21	53,71	53,06	53,5
2	55,47	55,92	49,92	50,36	43,74	44,16
3	64,45	64,74	64,27	64,77	63,87	64,19
4	58,17	58,53	51,96	52,18	51,74	52,26
5	49,51	51,86	48,3	50,51	45,21	47,01
6	63,93	64,13	63,65	63,72	63,19	63,32
7	59,13	59,57	52,94	53,26	51,66	51,97
8	57,28	57,78	50,97	51,24	49,4	49,55

Tab. 34: Procentuální rozdíl mezi naměřenými teplotami u měření s teplotou temperačního média 15 °C oproti měření s teplotou temperačního média 45 °C v jednotlivých měřených místech pro $T_{\text{tav}} = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_c = 18\text{ s}$ a laminární druh proudění temperačního média.

číslo otvoru	rozdíl (%)					
	měř. č.22 - měř. č.16		měř. č.23 - měř. č.17		měř. č.24 - měř. č.18	
	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T	pro max. T	pro min. T
1	55,3	55,87	55,18	55,86	53,9	54,38
2	51,78	52,29	51,42	51,9	49,42	50
3	64,57	64,77	65,12	65,33	65,59	65,79
4	53,82	54,11	53,21	53,89	50,89	51,23
5	49,3	52,24	49,38	50,87	45,92	47,91
6	63,57	63,75	63,78	64,07	64,52	64,81
7	52,28	53,31	53,55	54,04	51,79	52,32
8	52,77	53,11	51,24	51,56	50,12	50,67



Obr. 69: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů mezi měřením č. 19, č. 20, č. 21 a měřením č. 13, č. 14 a č. 15



Obr. 70: Grafické vyjádření vypočtených procentuálních rozdílů mezi měřením č. 22, č. 23, č. 24 a měřením č. 16, č. 17 a č. 18

Jak je patrné z předchozích dvou tabulek a sloupcových grafů a na základě vypočtených hodnot, můžu provést následující vyhodnocení:

1. Rozdíl teplot je velmi vysoký, což je dáno rozdílem teplot mezi teplotami temperačního média z 15°C na 45°C , což činí 66,67 %. Této hodnotě se samozřejmě co nejlépe přibližují hodnoty, stanovené v měřených místech č. 3 a č. 6, které dokážou kopírovat teplotu temperační kapaliny pro všechny teploty taveniny. Procentuální rozdíly teplot v měřeném místě č. 5 jsou téměř shodné pro oba časy vstřikovacího cyklu a pro všechny tři teploty taveniny. Pro ostatní místa při době vstřikovacího cyklu 12 s je největší rozdíl mezi teplotou taveniny 220°C a teplotou taveniny 240°C , který je kolem 7 % a dále se snižuje prakticky pouze o 0,5 % (viz obr. 69). Naproti tomu u doby vstřikovacího cyklu 18 s je největší rozdíl mezi teplotou taveniny 240°C a teplotou taveniny 260°C , který je kolem 2 % a dále se zvyšuje k teplotě taveniny 220°C o desetiny procent (viz obr. 70).

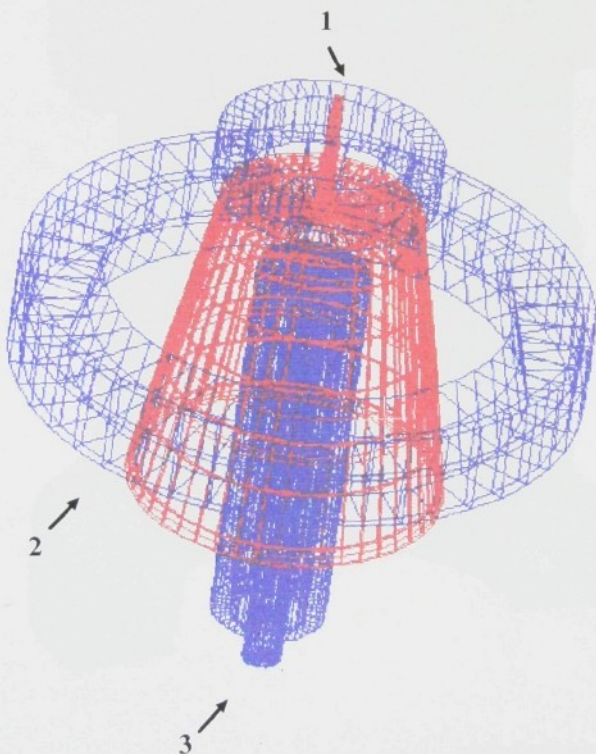
2. Rozdíly, vypočtené pro dobu vstřikovacího cyklu 12 s jsou vyšší oproti hodnotám, vypočteným pro dobu vstřikovacího cyklu 18 s, protože zde existuje častější přívod tepla do dutiny formy. Jsou nejvyšší pro teplotu taveniny 220°C , v průměru o 5 %. Pro teploty taveniny 240°C a 260°C toto tvrzení beze zbytku neplatí, i když jsou vypočtené hodnoty téměř srovnatelné.

4. MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ VE VSTŘIKOVACÍ FORMĚ NA PC S POMOCÍ PROGRAMU MKP

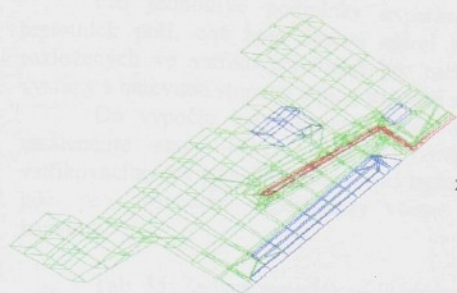
V rámci ověření experimentálních měření a porovnání zjištěných hodnot jsem provedl namodelování teplotních polí, resp. časových závislostí teplot, ve vybraných místech vstřikovací formy za stejných podmínek měření, jak tomu bylo u prováděných experimentů.

K modelování byl použit profesionální program, software *ALGOR*, od firmy *Algor Inc., USA*. Jedná se o program, založený na metodě konečných prvků a tento program mimo jiné umožňuje řešení teplotních polí v namodelované vstřikovací formě ve zvoleném časovém okamžiku pro zadané počáteční a okrajové podmínky.

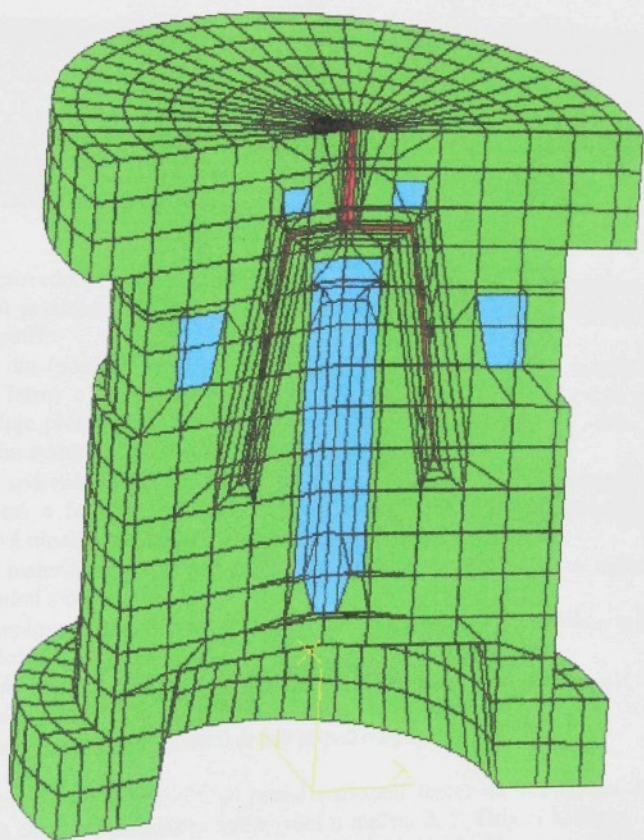
Na obr. 71 je ukázáno namodelování temperačních systémů kolem dutiny formy (výstřiku) a na obr. 72 je zobrazeno barevné rozlišení pro soustavu (tj. materiálová data) výstřik (tavenina plastu) - forma (kov) - temperační systém (kapalina).



Obr. 71: Ukázka prostorového rozmístění kanálů kolem vstřikovací formy kde 1 ukazuje první temperační okruh, 2 je druhý temperační okruh a 3 je třetí temperační okruh.



základní segment
modelu formy



Obr. 72: Soustava výstřik - forma - temperační systém (řez formou) včetně ukázky základního segmentu formy
kde červená barva značí taveninu plastu v dutině formy, zelená barva kov vstřikovací formy a modrá barva značí temperační kapalinu v temperačním systému.

Pro jednotlivé podmínky experimentů bylo provedeno i namodelování teplotních polí, což bylo časově velmi náročné a jako ukázka teplotních polí, rozložených ve vstřikovací formě pro měření pod označením č. 1, jsou grafické výstupy s barevnou stupnicí teplot, uvedené na obr. 73 až na obr. 74.

Do výpočtu byly dosazeny hodnoty, uvedené v tab. 35, které odpovídají ustálenému stavu během procesu vstřikování (po ukončení rozběhové fáze vstřikovacího cyklu) a dále vždy stejná teplota taveniny a teplota temperačního média, jako pro provedené experimenty včetně daných rychlostí proudění temperační kapaliny.

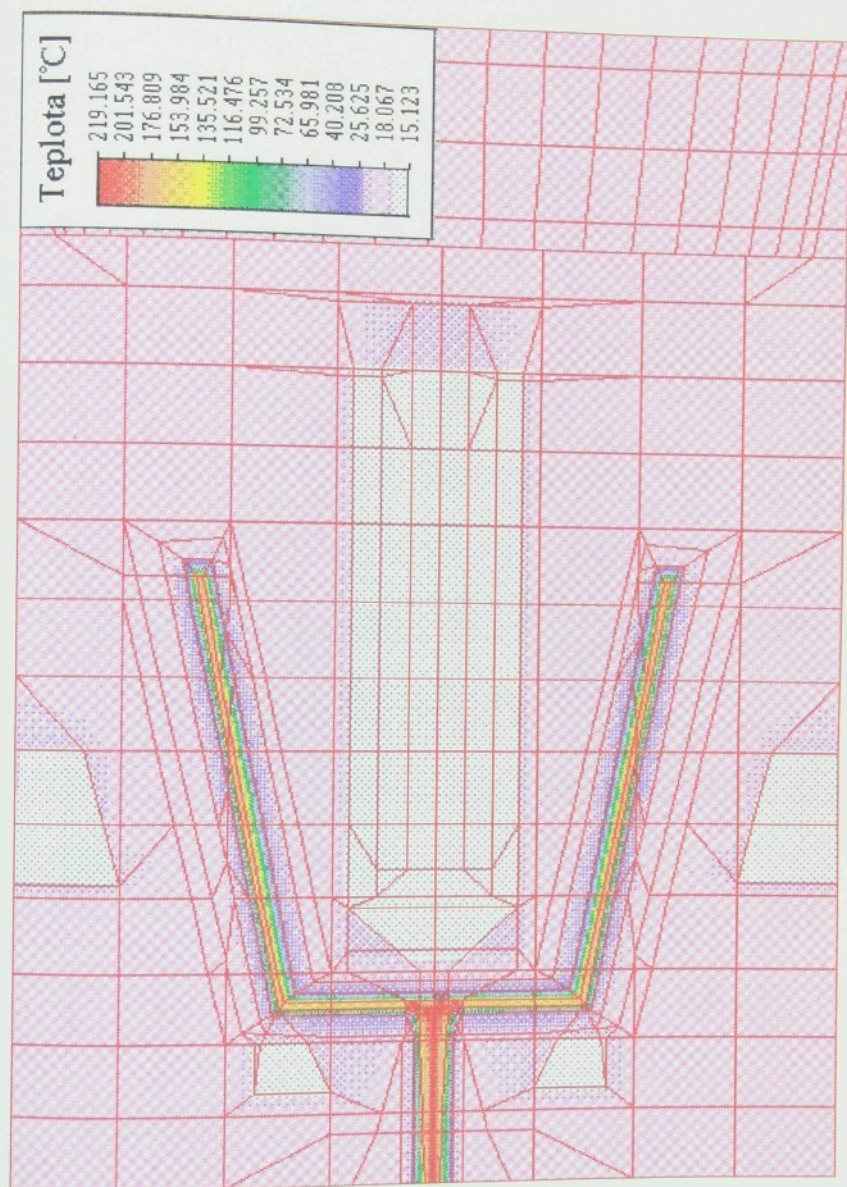
Tab. 35: Zadané materiálové vlastnosti plastu, temperačního média a vstřikovací formy

MATERIÁL	HUSTOTA (kg.m ⁻³)	SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
PP	920	0,25	2500
OCEL UHL.	7800	60	452
OCEL NÁSTROJ.	7800	47	461
VODA	1000	50	4187

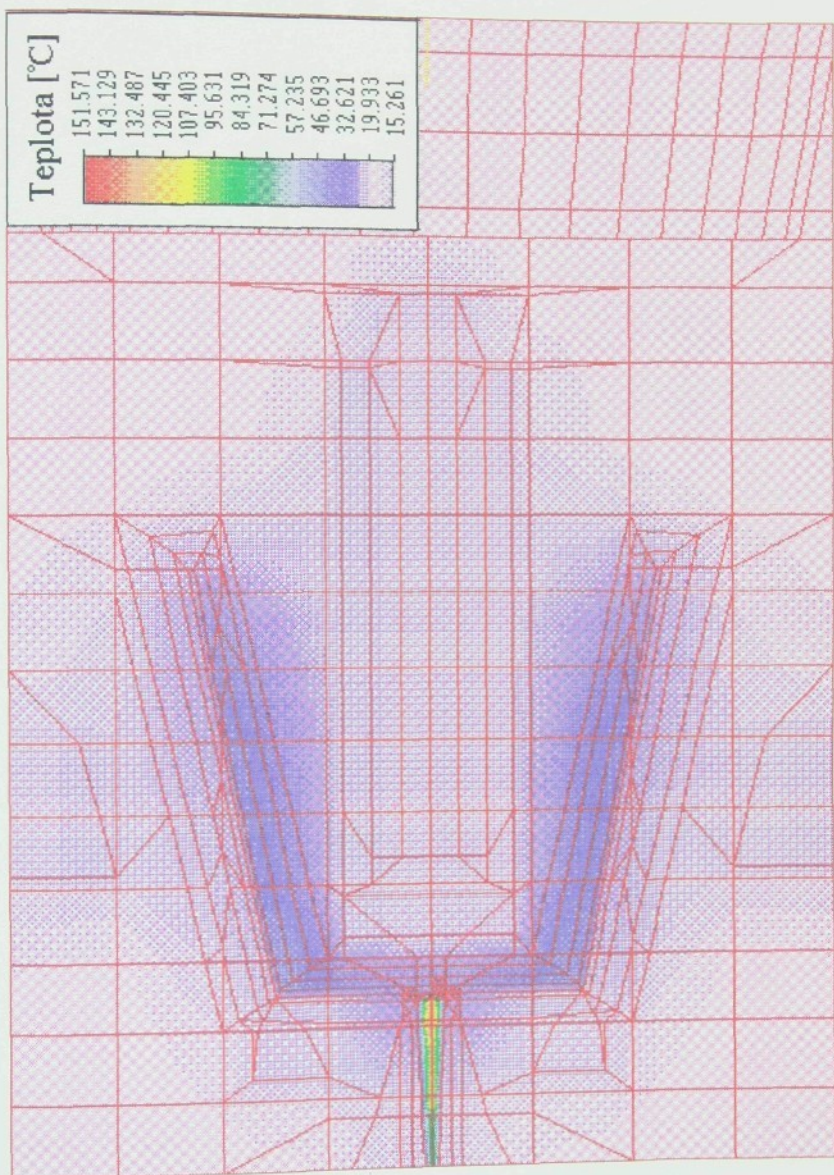
Z provedených, a dá se říci, že pouze orientačních, simulací našich experimentů je zřejmé, že získané výsledky jsou závislé na mnoha činitelích, mezi které např. patří :

- ♦ přesnost dat (počátečních a okrajových podmínek), zadaných pro materiál plastu, materiál formy a temperační kapalinu, což je v dnešní době asi největší problém, který určuje přesnost výsledků simulací při kvalitně nakresleném modelu a dobře navrženém systému chlazení a plnění dutiny formy,
- ♦ možnost ovlivnění výsledků kvalitou „dokonalého styku“ mezi taveninou plastu (výstřikem) a formou (tedy zda vznikne při chlazení a vlivem smrštění plastu vzduchová mezera mezi výstřikem a dutinou formy),
- ♦ závislost materiálových hodnot a tepelných a teplotních koeficientů na teplotě, které se ještě mění s časem,
- ♦ zvýšení teploty vlivem škrcení taveniny v důsledku vstřikování vysokou rychlostí a velkým tlakem,
- ♦ vliv koroze temperačních kanálů během provozu vstřikovací formy a její zahrnutí do vlastního výpočtu (dochází ke snížení součinitele přestupu tepla mezi temperační kapalinou a kovem formy), která se liší případ od případu, a dalších.

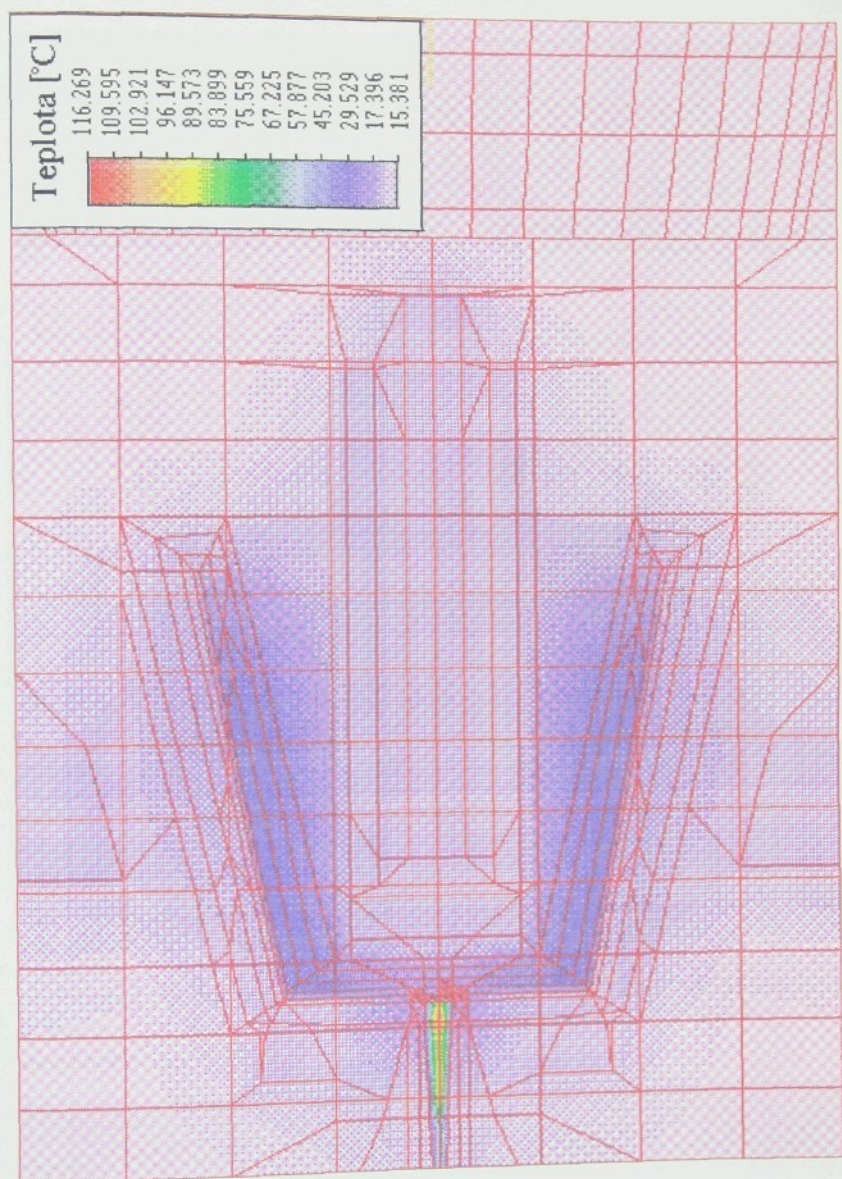
Z obr. 73 až z obr. 75 je patrné rozložení teplot ve vstřikovací formě v závislosti na čase pro parametry vstřikování u měření č. 1. Ostatní hodnoty, získané modelováním teplotních polí, jsou uvedeny v tab. 36 až v tab. 43 (teploty jsou uvedeny ve stupních Celsia), kde je provedeno srovnání s experimentálně zjištěnými hodnotami pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č.1, č. 4 a č. 5) a kde jsou vyjádřeny rozdíly mezi těmito dvěma metodami. Grafické srovnání zjištěných teplot a vypočtených rozdílů je ukázáno na obr. 76 až na obr. 87.



Obr. 73: Rozložení teplotních polí ve vstřikovací formě v čase 0,5 s
pro měření č. 1 (polovina formy - detail)



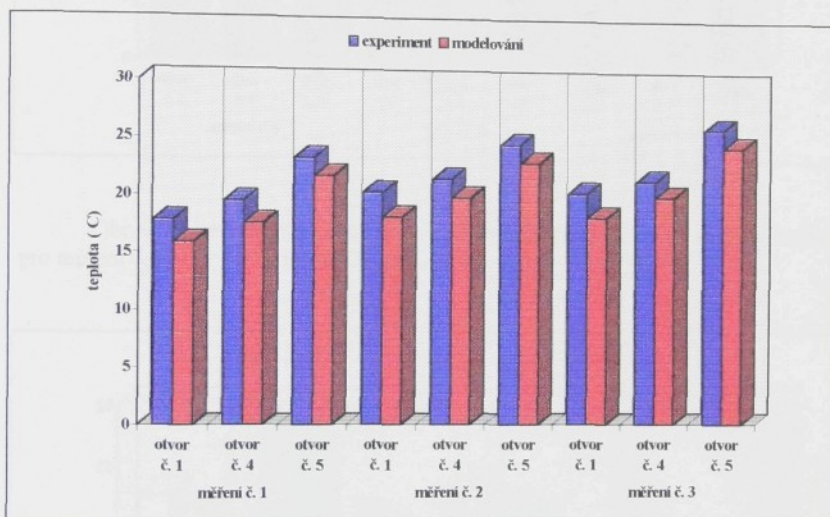
Obr. 74: Rozložení teplotních polí ve vstřikovací formě v čase 5 s
pro měření č. 1 (polovina formy - detail)



Obr. 75: Rozložení teplotních polí ve vstřikovací formě v čase 12 s
pro měření č. 1 (polovina formy - detail)

Tab. 36: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 1, měřením č. 2 a měřením č. 3 a modelováním teplotních polí.

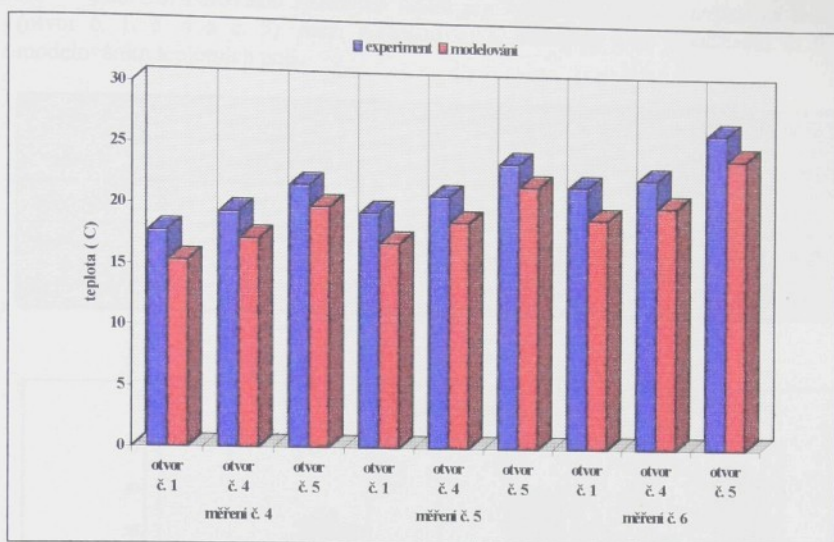
číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdl (%)
měření č. 1	17,85	15,88	11,04	19,51	17,59	9,84	23,31	21,73	6,77
měření č. 2	20,31	18,17	10,53	21,54	19,89	7,66	24,58	22,97	6,55
měření č. 3	20,33	18,21	10,42	21,43	20,01	6,62	26,04	24,43	6,18



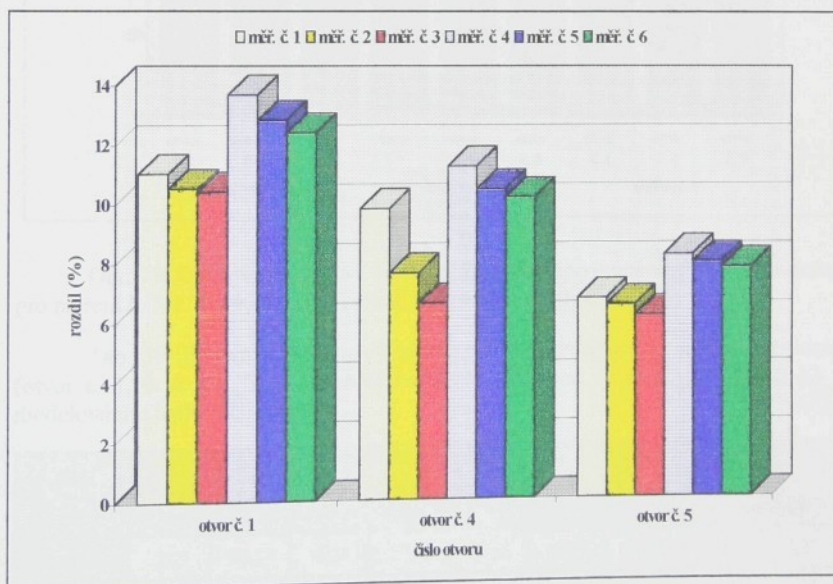
Obr. 76: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 1, č. 2 a č. 3 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)

Tab. 37: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 4, měřením č. 5 a měřením č. 6 a modelováním teplotních polí.

číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdl (%)
měření č. 4	17,75	15,32	13,69	19,4	17,21	11,28	21,68	19,89	8,25
měření č. 5	19,46	16,96	12,84	20,91	18,76	10,48	23,72	21,82	8,01
měření č. 6	21,83	19,12	12,41	22,52	20,22	10,21	26,32	24,26	7,82



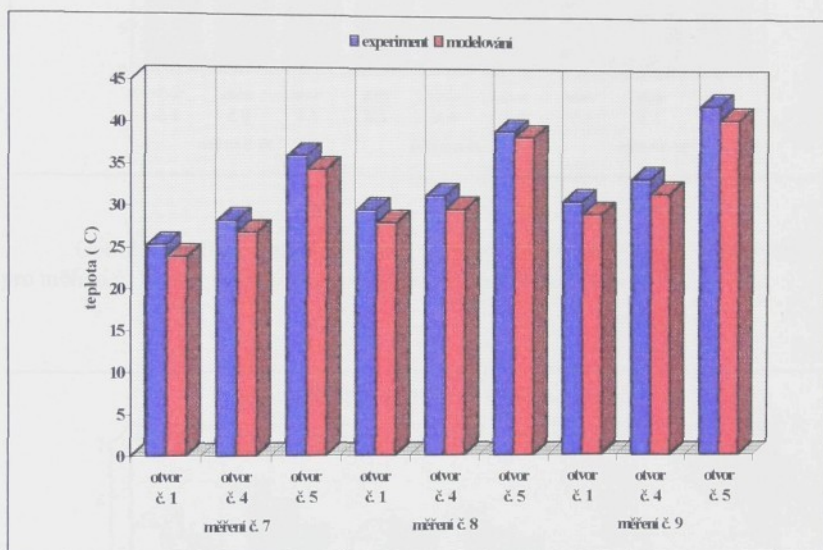
Obr. 77: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 4, č. 5 a č. 6 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)



Obr. 78: Grafické vyjádření vypočtených rozdílů mezi experimentem a modelováním pro skupinu měření č. 1 až měření č. 6

Tab. 38: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 7, měřením č. 8 a měřením č. 9 a modelováním teplotních polí.

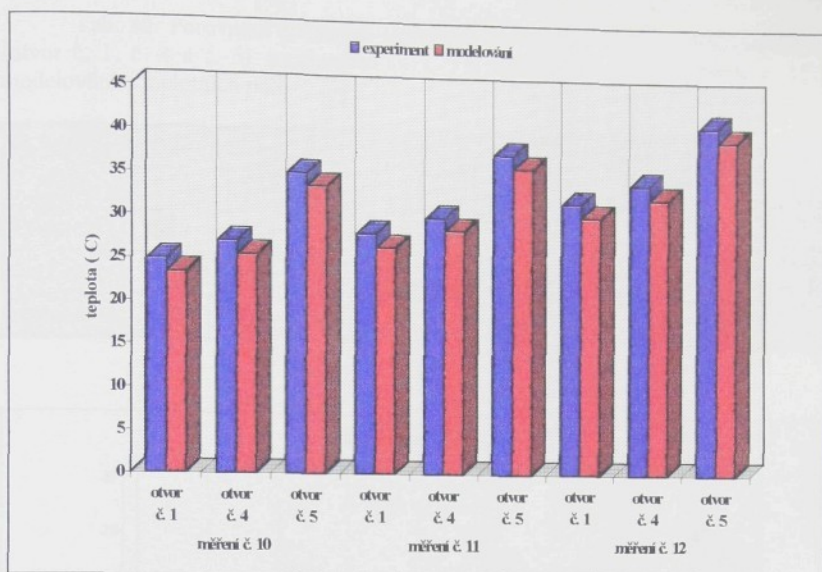
číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)
měření č. 7	25,21	23,82	5,55	28,25	26,77	5,3	36,02	34,41	4,44
měření č. 8	29,56	28,03	5,07	31,28	29,65	5,11	39,04	38,36	4,23
měření č. 9	30,61	29,07	4,9	33,41	31,63	5,05	42,25	40,51	4,02



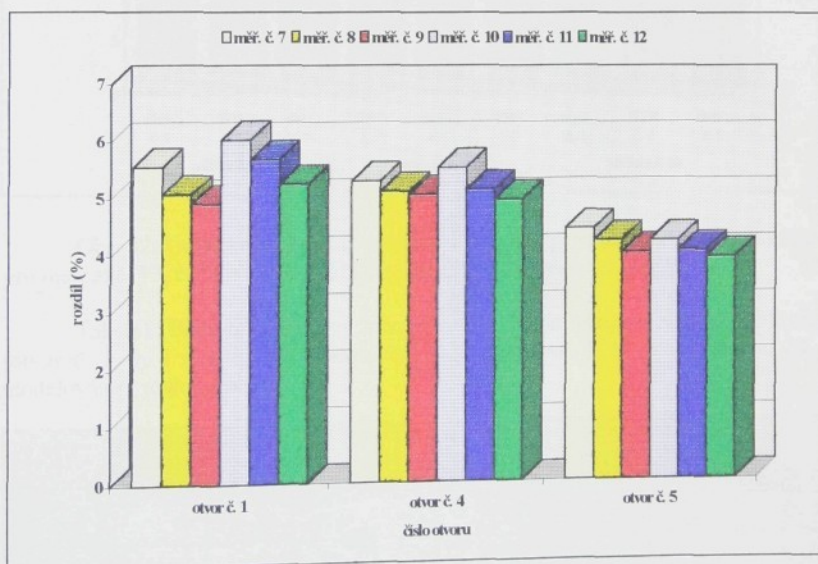
Obr. 79: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 7, č. 8 a č. 9 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)

Tab. 39: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 10, měřením č. 11 a měřením č. 12 a modelováním teplotních polí.

číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)
měření č. 10	24,9	23,39	6,02	27,08	25,53	5,53	35,11	33,64	4,23
měření č. 11	28,12	26,54	5,68	30,14	28,61	5,14	37,65	36,07	4,05
měření č. 12	32,01	30,46	5,25	34,32	32,67	4,96	41,22	39,6	3,93



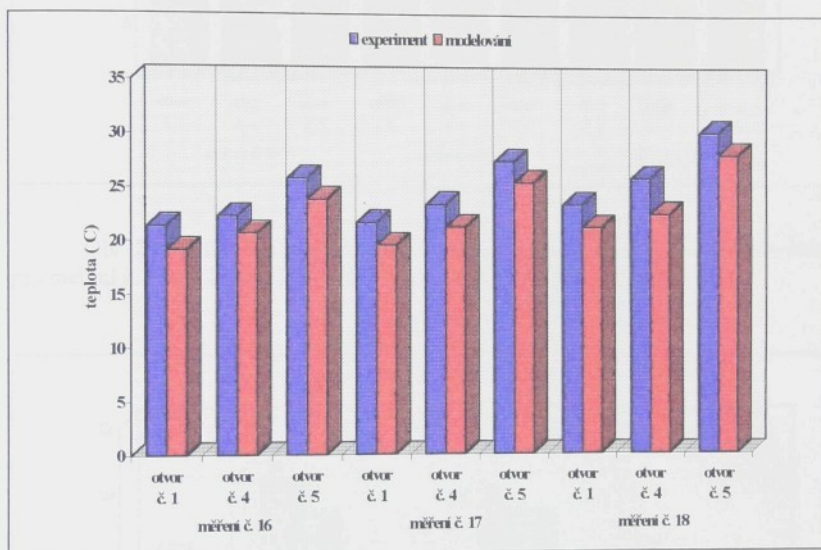
Obr. 80: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 10, č. 11 a č. 12 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)



Obr. 81: Grafické vyjádření vypočtených rozdílů mezi experimentem a modelováním pro skupinu měření č. 7 až měření č. 12

Tab. 40: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 13, měřením č. 14 a měřením č. 15 a modelováním teplotních polí.

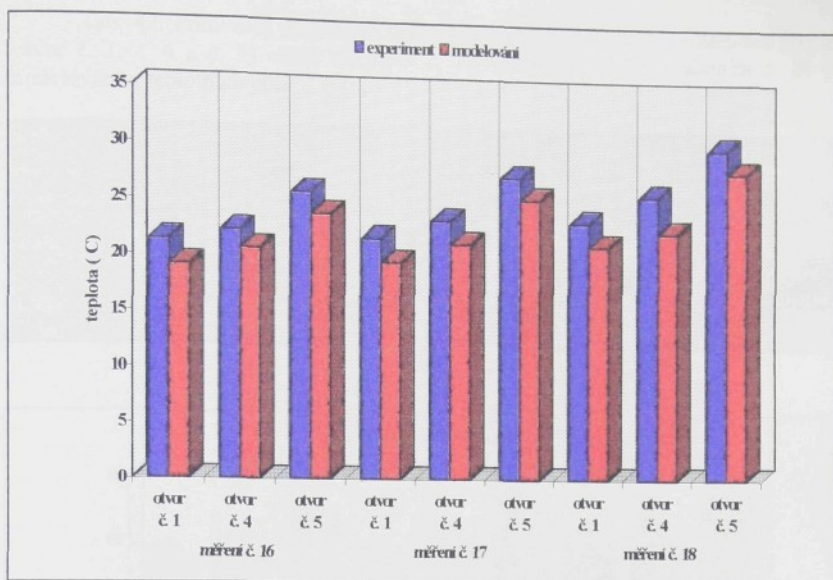
číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)
měření č. 13	18,87	17,35	8,05	20,55	19,02	7,44	26,29	24,59	6,46
měření č. 14	22,5	20,74	7,82	24,22	22,42	7,41	28,1	26,51	6,22
měření č. 15	23,61	21,68	7,32	25,25	23,41	7,28	30,78	28,94	5,97



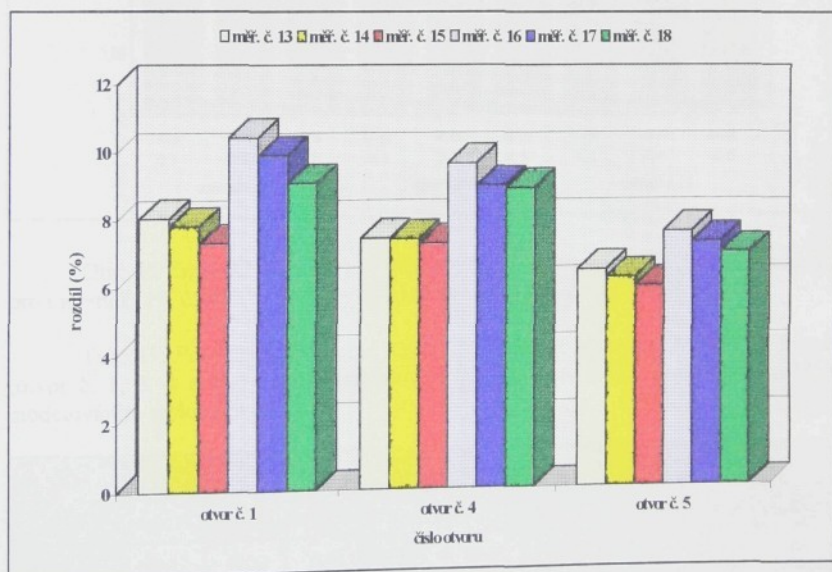
Obr. 82: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 13, č. 14 a č. 15 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)

Tab. 41: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 16, měřením č. 17 a měřením č. 18 a modelováním teplotních polí.

číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdíl (%)
měření č. 16	21,35	19,12	10,44	22,88	20,67	9,65	25,78	23,82	7,6
měření č. 17	21,69	19,54	9,91	23,35	21,24	8,99	27,4	25,39	7,29
měření č. 18	23,33	21,21	9,08	25,8	22,49	8,91	30,1	27,99	6,97



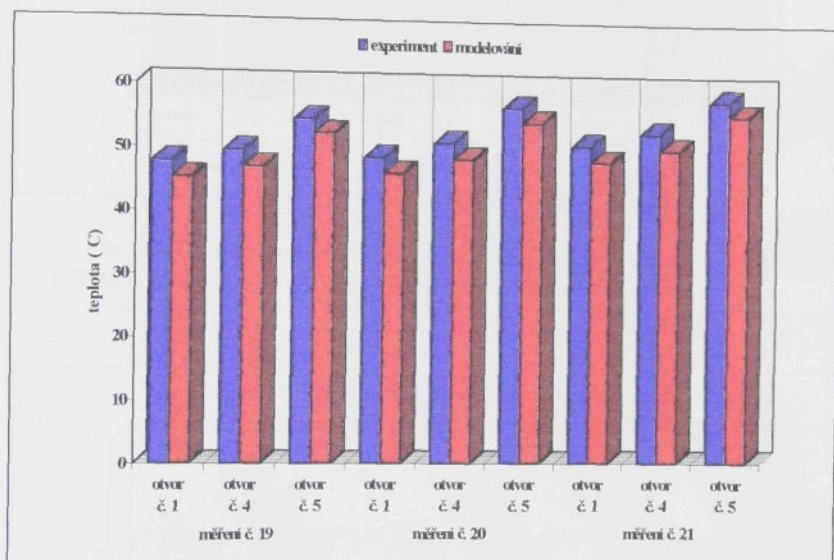
Obr. 83: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 16, č. 17 a č. 18 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)



Obr. 84: Grafické vyjádření vypočtených rozdílů mezi experimentem a modelováním pro skupinu měření č. 13 až měření č. 18

Tab. 42: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 19, měřením č. 20 a měřením č. 21 a modelováním teplotních polí.

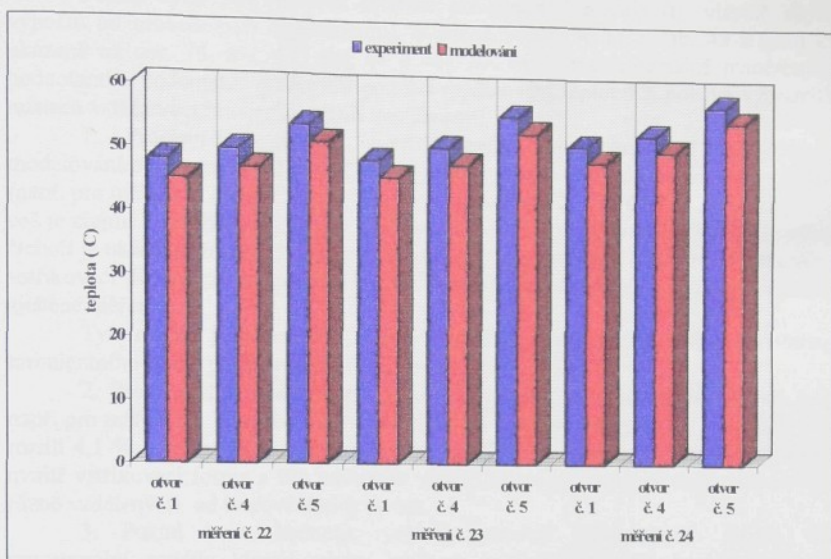
číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdlil (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdlil (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdlil (%)
měření č. 19	47,78	45,22	5,35	49,56	46,97	5,22	54,62	52,38	4,1
měření č. 20	48,59	46,12	5,08	51,01	48,49	4,94	56,78	54,39	4,04
měření č. 21	50,78	48,23	5,02	52,9	50,23	4,63	58,09	55,81	3,95



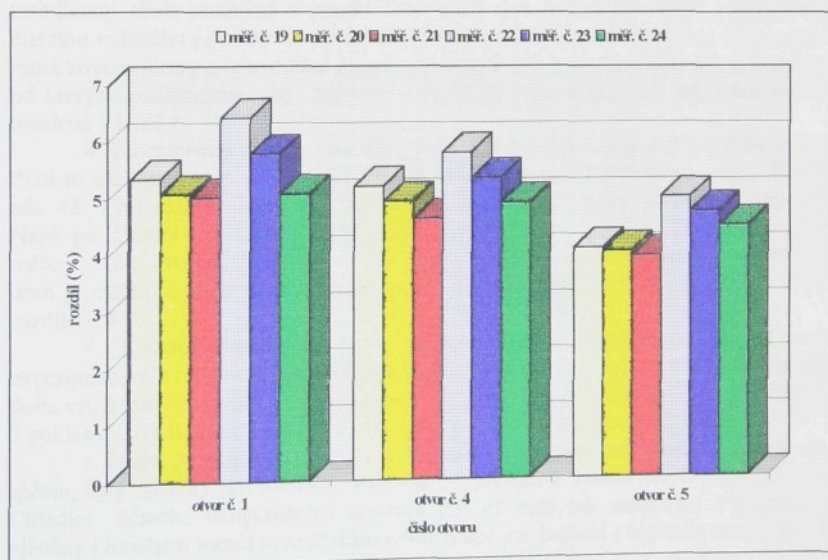
Obr. 85: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 19, č. 20 a č. 21 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)

Tab. 43: Porovnání zjištěných teplot pro vybraná místa ve vstřikovací formě (otvor č. 1, č. 4 a č. 5). mezi měřením č. 22, měřením č. 23 a měřením č. 24 a modelováním teplotních polí.

číslo měření	otvor č. 1			otvor č. 4			otvor č. 5		
	exper (C)	MKP (C)	rozdlil (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdlil (%)	exper (C)	MKP (C)	rozdlil (%)
měření č. 22	48,17	45,19	6,43	49,95	47,05	5,81	53,98	51,29	5,01
měření č. 23	48,4	45,72	5,79	50,65	47,92	5,35	55,78	53,14	4,75
měření č. 24	51,15	48,69	5,08	52,98	50,36	4,91	57,78	55,19	4,49



Obr. 86: Grafické porovnání teplot, zjištěných experimentálně a modelováním, pro měření č. 22, č. 23 a č. 24 a pro vybrané otvory (otvor č. 1, č. 4 a č. 5)



Obr. 87: Grafické vyjádření vypočtených rozdílů mezi experimentem a modelováním pro skupinu měření č. 19 až měření č. 24

Pokud bych měl hodnotit zjištěné procentuální rozdíly (tj. vlastně chyby výpočtu od provedených experimentů), uvedené v tab. 36 až v tab. 43 a graficky ukázané na obr. 78, obr. 81, obr. 84 a obr. 87, mezi experimentálně naměřenými hodnotami a hodnotami zjištěnými pomocí modelování teplotních polí ve vybraných místech vstřikovací formy, lze učinit toto shrnutí:

1. Procentuální rozdíly zjištěné mezi experimentálním měřením a modelováním teplotních polí jsou tím větší, čím je otvor dále od tvarové dutiny formy (např. pro měření č. 1 se snížil rozdíl z 11,04 % pro otvor č. 1 na 6,77 % pro otvor č. 5), což je zřejmě způsobeno narůstající chybou při výpočtu přes jednotlivé konečné prvky. Neboli je ukázáno, že účinek temperačního systému je mnohem větší pro oblast dutiny vstřikovací formy při výsledcích z modelování teplotních polí, než pro hodnoty zjištěné měřením.

Tyto rozdíly jsou tím větší, pokud je použito pro temperaci vstřikovací formy turbulentního druhu proudění temperačního média.

2. Procentuální rozdíly klesají s rostoucí teplotou temperačního média, kdy např. pro měření č. 13 a otvor č. 5 je rozdíl 6,46 % a pro měření č. 19 a otvor č. 5 je rozdíl 4,1 %. Dle mého názoru se velmi snižuje vliv temperačního média na teploty uvnitř vstřikovací formy a tím pádem se snižují i rozdíly mezi jednotlivými otvory, různě vzdálenými od tvarové dutiny formy.

3. Pokud budu hodnotit rychlost proudění temperačního média, tak procentuální rozdíly klesají tehdy, když je rychlost proudění laminární oproti turbulentnímu druhu proudění temperačního média. Tak např. pro měření č. 1 a otvor č. 4 je rozdíl 9,84 % a pro měření č. 13 a otvor č. 4 je rozdíl 7,44 %. Chyba výpočtu pro jednotlivé druhy proudění je tím vyšší, čím je vyšší rychlost proudění.

Dále můžu zkonstatovat, že turbulentní druh proudění, modelovaný pomocí simulačního programu, má mnohem vyšší účinek (tj. nižší zjištěné teploty), než turbulentní druh proudění v praxi. Toto může být způsobeno např. nedokonalou čistotou vnitřního povrchu temperačních kanálů, které významně snižují přenos tepla mezi kovem formy a temperační kapalinou zvláště pro ty rychlosti proudění kapaliny, od kterých požadujeme, aby „zajistili“ vysoký přestup tepla. Dále zde platí závěry, uvedené v bodě 1.

4. Procentuální rozdíly jsou tím větší, čím je delší doba vstřikovacího cyklu. Platí to všeobecně pro všechna provedená měření a hodnoty, uvedené v tab. 36 až v tab. 43. Tyto rozdíly jsou větší pro turbulentní druh proudění temperační kapaliny. Např. pro měření č. 1 (turbulentní druh proudění) a otvor č. 1 je rozdíl 11,04 % oproti měření č. 4 a otvor č. 1, kde je rozdíl 13,69 %. Kdežto pro měření č. 13 (laminární druh proudění) a otvor č. 1 je rozdíl 8,05 % oproti měření č. 16 a otvor č. 1, kde je rozdíl 10,44 %.

5. Rostoucí teplota taveniny snižuje zjištěné procentuální rozdíly mezi experimentem a modelováním teplotních polí a tento pokles je tím větší, čím delší je doba vstřikovacího cyklu. Tak např. pro otvor č. 1 je mezi měřením č. 1 a měřením č. 3 pokles o 0,62 %, ale mezi měřením č. 4 a č. 6 je pro stejný otvor pokles již 1,25 %.

6. Nízke procentuální rozdíly, srovnatelné pro měření bez použití temperačního média, byly zjištěny pro měření s teplotou temperačního média 45 °C (max. 6,5 %). Chladicí účinek temperačního systému zde už není tak intenzivní a proto byly zjištěny i mnohem menší procentuální rozdíly, než pro měření s teplotou temperačního média 15 °C.

7. Pro sledované hodnoty při měření bez temperace, nabývají zjištěné procentuální rozdíly nejnižších hodnot (max. 6 %). Zde se již neprojevuje účinek

temperačního systému formy, který nejvíce „ovlivňuje“ zjištěné rozdíly mezi jednotlivými metodami, ale je zde pouze porovnáván přenos tepla kovem formy.

Na základě předchozích bodů můžu učinit následující shrnutí: chyby výpočtu rostou s delší dobou vstřikovacího cyklu, s vyšší rychlostí proudění temperační kapaliny, s rostoucí vzdáleností jednotlivých otvorů od dutiny formy a se snižující se teplotou taveniny.

5.1. Modelování teplotního pole

Úkolem výpočtu je poskytnout přesnou představu o teplotním poli v průběhu vstřikovacího procesu.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota prostředí, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

Pro řešení tohoto problému je třeba znát všechny parametry, které ovlivňují teplotní pole. Tyto parametry jsou: geometrie formy, vlastnosti materiálu formy, vlastnosti materiálu odlévání, rychlost proudění kapaliny, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí, teplota taveniny, teplota formy, teplota okolního prostředí.

5. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Získané hodnoty a zpracované výsledky v této práci přinášejí dílčí poznatky pro technologii vstřikování, zvláště v oblasti, týkající se problematiky kovových forem, problematiky sledování teplotních polí a problematiky použití simulačních programů.

Hlavní záměrem této disertační práce bylo získání poznatků o sledované problematice a o vlivu vybraných parametrů vstřikování na rozložení teplotních polí ve vstřikovací formě.

5.1. Hodnocení dosažených výsledků

Získané výsledky a poznatky lze shrnout do následujících závěrů a doporučení:

1. Rozborem sledované problematiky lze konstatovat, že se jedná o velmi složitý problém, kterému se v literatuře věnuje malá pozornost. V současné době je již jasné, že obecný algoritmus řešení teplotního pole je prakticky neřešitelný a proto se stále více používají simulační programy, které sice přinášejí určité poznatky o teplotních polích a jejich rozložení ve vstřikovací formě, avšak vždy s nějakou chybou od skutečného stavu. To byl také jeden z důvodů napsání této práce, kdy jsem se snažil porovnat výsledky z modelování a výsledky z časově a finančně náročných experimentů se zpětnou vazbou na snížení chyb numerického výpočtu.

Složitost analytického řešení celého problému lze mimo jiné vidět v tom, že tepelné děje mezi taveninou plastu, kovovou vstřikovací formou a temperačním systémem probíhají velmi rychle, cyklicky se opakují a jsou nestacionárního charakteru, čímž je řešení dané problematiky matematicky velmi náročné.

Proto jsem při stanovení teplotních polí a pro hodnocení vlivu jednotlivých vstřikovacích parametrů na rozložení těchto teplotních polí vycházel z experimentálního měření teplotních polí pomocí zařízení, popsáno v kap. 3.1.

Snažil jsem se o to, aby měření probíhala vždy za stejných počátečních podmínek, abych mohl v dostatečné míře porovnávat zjištěné hodnoty teploty v závislosti na čase v jednotlivých vybraných místech vstřikovací formy.

Jak je patrné, studium této problematiky a vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů je velmi náročné. Je nutné si uvědomit, že sledovaný proces a s tím spojené veličiny mají fyzikální podstatu (tepelné a teplotní koeficienty), které ovlivňují chování materiálu vstřikovací formy během vstřikovacího procesu, tuhnutí výstřiku a tím tedy rozložení teplotních polí. K tomu přistupují i materiálové hodnoty vstřikovací formy a plastu (např. hustota), které se odlišným způsobem mění s teplotou a s časem. Na druhé straně je patrné, že během procesu vstřikování dochází k postupnému rozložení teploty v jednotlivých vrstvách vstřikovací formy podle toho, jak se šíří teplo od dutiny formy materiálem formy směrem k temperačnímu systému. Tyto vrstvy materiálu se vyznačují v daném okamžiku specifickými hodnotami teploty, které se mění po celou dobu vstřikování. To byl další důvod, proč byla napsána tato práce, ve které jsem se snažil sledovat a naměřit teplotní pole a v rámci řešení vyhodnotit vliv vybraných parametrů na rozložení teplot ve formě během procesu vstřikování.

2. Byla stanovena metodika pro zjišťování teplotních polí ve vstřikovacích formách, tedy zjišťování časových závislostí teplot v určitých vzdálenostech od dutiny formy. Ke sledování teplot jsem použil mnou sestavené zařízení, skládající se z počítače PC/AT 486, karty AD 18 s převodníkem pro PC, sběrnice, termočlánků a vybrané vstřikovací formy.

Tato měřicí soustava převádí analogový signál od termočlánků na digitální, umožňuje nastavení hodnot dle volby uživatele a současně umožňuje záznam naměřených hodnot na pevný disk počítače. V konečné fázi je velmi jednoduché vyhodnocení naměřených hodnot, které se dá graficky velmi přehledně zobrazit.

Pro převod analogového signálu na digitální signál jsem použil kartu AD 18, která má vysokou rozlišovací schopnost, takže je ideální pro přesné měření signálů, které se od sebe nepatrně liší. Aby byly odstraněny rušivé vlivy mechanismů vstřikovacího stroje, bylo dodatečně provedeno galvanické oddělení karty AD 18 od obvodů počítače.

Pro měření teplot ve vybraných otvorech vstřikovací formy jsem použil termočlánky typu NiCr - NiAl s izolací termoelektrod a s termoelektrodovými kabely v ocelovém plášti, aby byl opět co nejvíce potlačen účinek rušivých vlivů. Pracovní část termočlánků byla speciálně upravena pro rychlou manipulaci a pro práci v hlubokých dutinách.

Sestavené zařízení se velmi osvědčilo pro měření teplot ve vstřikovací formě a svou přesností, rychlostí a snadnou obsluhou dokonale vyhovovalo všem požadavkům.

3. Naměřené hodnoty teplotních polí při zadáních parametrech vstřikování zahrnují v sobě i veškeré ostatní vlivy, které jsem považoval při prováděných experimentech za konstantní (teplota prostředí, hodnota dotlaku a její délka, ...) a které, dle mého názoru, významně neovlivnily získané hodnoty časových závislostí teplot.

Na kovovou vstřikovací formu je nutno pohlížet nejen jako na vodič tepla, ale také současně jako na akumulátor tepla. S tímto konstatováním je nutné přijímat i následující poznatky o vlivu jednotlivých parametrů na rozložení teplot uvnitř vstřikovací formy.

V této souvislosti bych chtěl podotknout, že provedení závěrů ze získaných hodnot bylo dosti obtížné, přesto byla snaha o zkonkretizování poznatků a o jejich shrnutí. V důsledku toho vznikla otázka, jak při řešení této problematiky hodnotit vliv teploty taveniny, doby cyklu, teploty temperačního média a rychlosti proudění temperačního média na rozložení teplotních polí při nestacionárních podmínkách sdílení tepla.

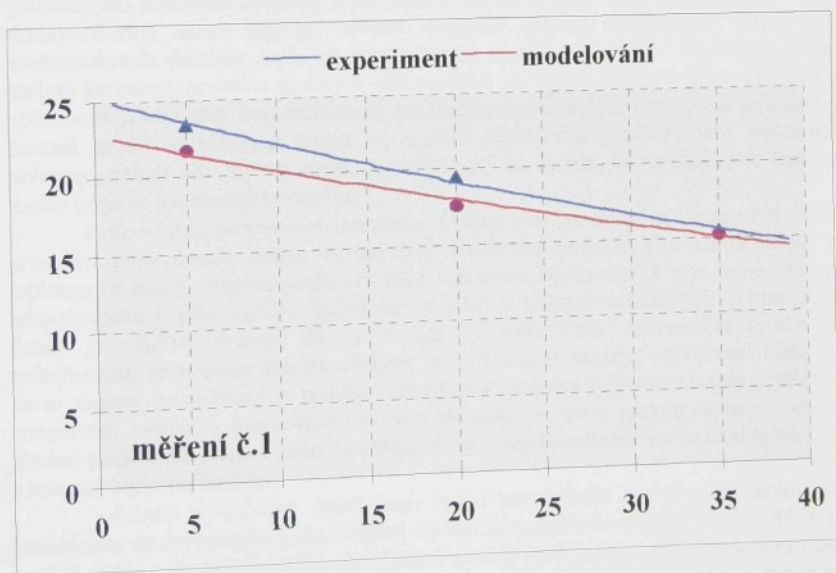
Tavenina plastu přivádí do dutiny formy určité množství tepla během jednoho vstřikovacího cyklu. Na začátku vstřikování forma akumuluje velké množství tepla, protože se snaží co nejrychleji odejmout teplo plastu, což je patrné z grafických závislostí. Když budeme pokračovat ve vstřikování, bude vstřikovací forma dále akumulovat teplo od tuhnoucího výstřiku, ale zároveň ho bude předávat temperačnímu systému. Po určité době se tento stav ustálí a přívod a odvod tepla do materiálu formy a z materiálu formy bude stále stejný. V případě vstřikování bez temperace bude vstřikovací forma dále akumulovat teplo pomaleji, v menším množství, od tuhnoucího výstřiku, protože již do jisté míry naakumulovala teplo od předchozích výstřiků. Dochází k prohřátí formy, roste teplota v jednotlivých místech nástroje až do okamžiku, kdy forma naakumuluje dostatečné množství tepla a dojde opět k vyrovnání mezi přívodem a odvodem tepla.

Vlastní vyhodnocení naměřených hodnot včetně některých závěrů je provedeno v kap. 3.8.1. až v kap. 3.8.3. a proto je v dalším textu již pouze diskuse zjištěných výsledků. Hodnocení jednotlivých parametrů zde provedu spolu s ostatními parametry, protože jednotlivé parametry jsou spolu navzájem provázány.

Jak je patrné z naměřených časových závislostí teplot, *doba vstřikovacího cyklu* má výrazný vliv na čas rozběhové fáze, což je vidět z uvedených grafických závislostí. Oproti tomu doba vstřikovacího cyklu nemá skoro žádný vliv na změnu teploty ve

vstřikovací formě, neboť naměřené teploty jsou pro dobu vstřikovacího cyklu 12 s a dobu vstřikovacího cyklu 18 s téměř shodné pro provedená měření se shodnými parametry vstřikování. Je to velmi zajímavé zjištění, protože během celkové doby měření, která činila 500 s, byl téměř dvojnásobný počet výstřiků u času 12 s než u času 18 s a tedy skoro dvakrát tak větší přívod tepla do dutiny formy. Dle mého názoru hmota formy dokáže dostatečně rychle odvést teplo od taveniny plastu do ostatních míst nástroje a nezáleží tedy na tom, kolikrát se vstříkne tavenina plastu do dutiny formy za dobu výroby výstřiků a nebo je předdimenzován temperační systém vstřikovací formy, který dokáže bez problémů odvést přivedené množství tepla a tím udržet teplotu formy stále na stejné hodnotě.

S tím souvisí i fakt, že teploty zjištěné v místech č. 4, č. 7 a č. 8 vstřikovací formy jsou téměř shodné, i když jsou v různých vzdálenostech jak od dutiny formy, tak i od čela formy. Je to důkaz toho, že se kov vstřikovací formy prohřívá rovnoměrně v určitých vrstvách kolem dutiny formy, i když jsou otvory vzdálené od sebe dostatečně daleko (příklad grafické závislosti mezi teplotou a vzdáleností od dutiny formy je pro měření č. 1 ukázán na obr. 88). Na druhé straně se k těmto teplotám velmi blíží teploty, zjištěné v otvoru č. 1, který je vzdálen daleko jak od dutiny formy, tak i od temperačního kanálu. Je zde názorně ukázána ta skutečnost, že přenos tepla se děje nejkratší cestou po izotermách, které jsou kolmo k dutině nástroje a ostatní místa vstřikovací formy nejsou již tolik ovlivněna účinností temperačního systému a udržují si svou teplotu. Neboli materiál formy dokáže naakumulované teplo rovnoměrně rozvádět do celého objemu, pokud není nucen „cestou“ toto teplo odevzdat. To je velmi důležité, protože správným rozložením teplotních polí, tedy pokud bude stejnoměrné rozdělení teplot v nástroji, se výrazně ovlivňuje i kvalita výrobku a může se zkrátit doba cyklu a tím se zvýší i produktivita výroby.



Obr. 88: Porovnání grafických závislostí teplota - vzdálenost u experimentu a modelování pro měření č. 1 a otvory č. 3, č. 4 a č. 5

Pokud budu porovnávat hodnoty teplot v jednotlivých měřených místech, zjištěných při různých *teplotách taveniny*, tak čím je vyšší teplota formy (teplota temperačního média), tím je i menší rozdíl teplot v materiálu formy. Tato skutečnost je patrná pro naměřené teploty při teplotě temperačního média 45°C , které jsou dvakrát až třikrát menší (hlavně v otvorech č. 1, č. 2, č. 4, č. 7 a č. 8), než při teplotě temperačního média 15°C . Není již zde takový teplotní spád mezi teplotou taveniny a teplotou temperačního média a proto i efekt chlazení je potlačen na nízkou hodnotu. Dále musím zkonstatovat tu skutečnost, že pro zjištěné rozdíly mezi naměřenými teplotami pro vstřikovací cyklus 12 s a pro vstřikovací cyklus 18 s u měření s teplotou temperačního média 45°C neexistuje téměř žádný rozdíl a naměřené teploty jsou téměř shodné. Neboli zde opět rostoucí teplota formy potlačila účinek a vliv doby cyklu na minimum.

Myslím si, že na základě výsledků měření můžu konstatovat, že kolikrát se zvýší teplota formy, tolikrát se sníží rozdíl naměřených teplot a tedy existuje zde určitá přímá úměra.

Vliv teploty taveniny se vůbec neprojevuje u otvorů blízko dutiny formy (otvor č. 5), protože stejný rozdíl mezi teplotami taveniny je i mezi jednotlivými měřeními, což se dalo očekávat. Na druhé straně je nutné podotknout, že čím je otvor ve vstřikovací formě dále od dutiny formy, tím jsou i větší zjištěné rozdíly pro různé teploty taveniny. Prostup tepla materiálem formy je dostatečně rychlý pro prohřátí i vzdálených míst vstřikovací formy a lze tedy říci, že rozdíl teplot roste se vzdáleností od dutiny formy, pokud není dané místo ovlivněno temperačním systémem.

Rozdíly teplot jsou tím vyšší, čím vyšší je teplota taveniny, čím nižší je teplota formy, čím delší je doba vstřikovacího cyklu a čím rychlejší je proudění temperačního média.

Při teplotě temperačního média 45°C je rozdíl naměřených teplot mezi jednotlivými teplotami taveniny téměř zanedbatelný (kromě míst, umístěných blízko dutiny formy, které kopírují změnu teploty). Hmota vstřikovací formy již naakumulovala dostatek tepla od temperačního systému a proto, i když zvyšujeme teplotu taveniny, nerostou teploty v jednotlivých měřených místech nijak výrazným způsobem. Mohu tedy konstatovat, že kolikrát se zvýší teplota formy, tak tolikrát se zmenší rozdíl naměřených teplot od rozdílů teplot mezi jednotlivými teplotami taveniny, neboli vliv teploty taveniny se snižuje tak rychle, jak rychle roste teplota formy (teplota temperačního média).

Pokud budu porovnávat naměřené teploty pro laminární a turbulentní *druh proudění temperačního média*, tak pro dobu vstřikovacího cyklu 12 s rostou rozdíly s teplotou taveniny. Naproti tomu při době vstřikovacího cyklu 18 s je tomu přesně naopak (nárůst, příp. pokles, zjištěných rozdílů v místech umístěných v materiálu formy je nejdříve jednou takový a dále již poloviční). Temperační systém s turbulentním prouděním dokáže odebírat teplo z celého objemu vstřikovací formy a proto teploty ve vybraných místech porostou s rostoucí teplotou taveniny, kdežto temperační systém s laminárním druhem proudění se svou nízkou účinností musí vlastně počkat, až „dojde“ teplo do oblastí, které dokáže ovlivnit. Proto rozdíly klesají s rostoucí teplotou taveniny.

Závěry z výsledků, které jsem získal porovnáním naměřených teplot při laminárním druhu proudění, ale rozdílné *teplotě temperačního média* (15°C a 45°C), se dají shrnout do konstatování, že zjištěné rozdíly mezi naměřenými teplotami jsou nižší, než rozdíl mezi teplotami temperačního média a klesají s rostoucí teplotou taveniny. Podle mne je to „způsobené“ tím, že vstřikovací forma již neptijímá teplo od taveniny plastu tak intenzivně, jako při teplotě temperačního média 15°C a rozdíly při

nižších teplotách taveniny jsou větší díky méně účinnějšímu vlivu temperačního systému s laminárním prouděním na hmotu formy, což bylo již popsáno výše.

4. V rámci ověření experimentálních měření bylo provedeno namodelování teplotních polí simulačním programem *Algor* se stejnými počátečními podmínkami, které byly nastaveny u prováděných experimentů. Výsledky modelování a jejich porovnání s experimenty je uvedeno v kap. 4.

Z výsledků je patrné, že zjištěné rozdíly mezi experimentem a modelováním rostou se vzdáleností otvoru od dutiny formy, což může být způsobeno jednak kumulující se chybou výpočtu, příp. „dokonalým“ šířením tepla materiálem formy a jeho odvodem do temperačního systému, protože ani v jednom případě jsem nezískal hodnotu vyšší, než u experimentálního měření. Tyto rozdíly klesají s rostoucí teplotou taveniny, což ukazuje na to, že při výpočtu má účinek teploty taveniny větší vliv, než účinek temperačního systému.

Co se týče doby cyklu, tak rozdíly jsou tím větší, čím delší je doba vstřikovacího cyklu. Neplatí zde tedy to, co vyplynulo z experimentů, protože u simulace se výrazně projevila doba setrvání výrobku v dutině vstřikovací formy, neboli zde má vliv doba, po kterou se bude předávat teplo z výstřiku do materiálu formy. Nižší teploty, získané z modelování, ukazují na to, že se výstřik může vyhazovat dříve, což je zrádné hlavně při výrobě konstrukčních výlisků, u kterých chceme dodržet přesné rozměry a tvar.

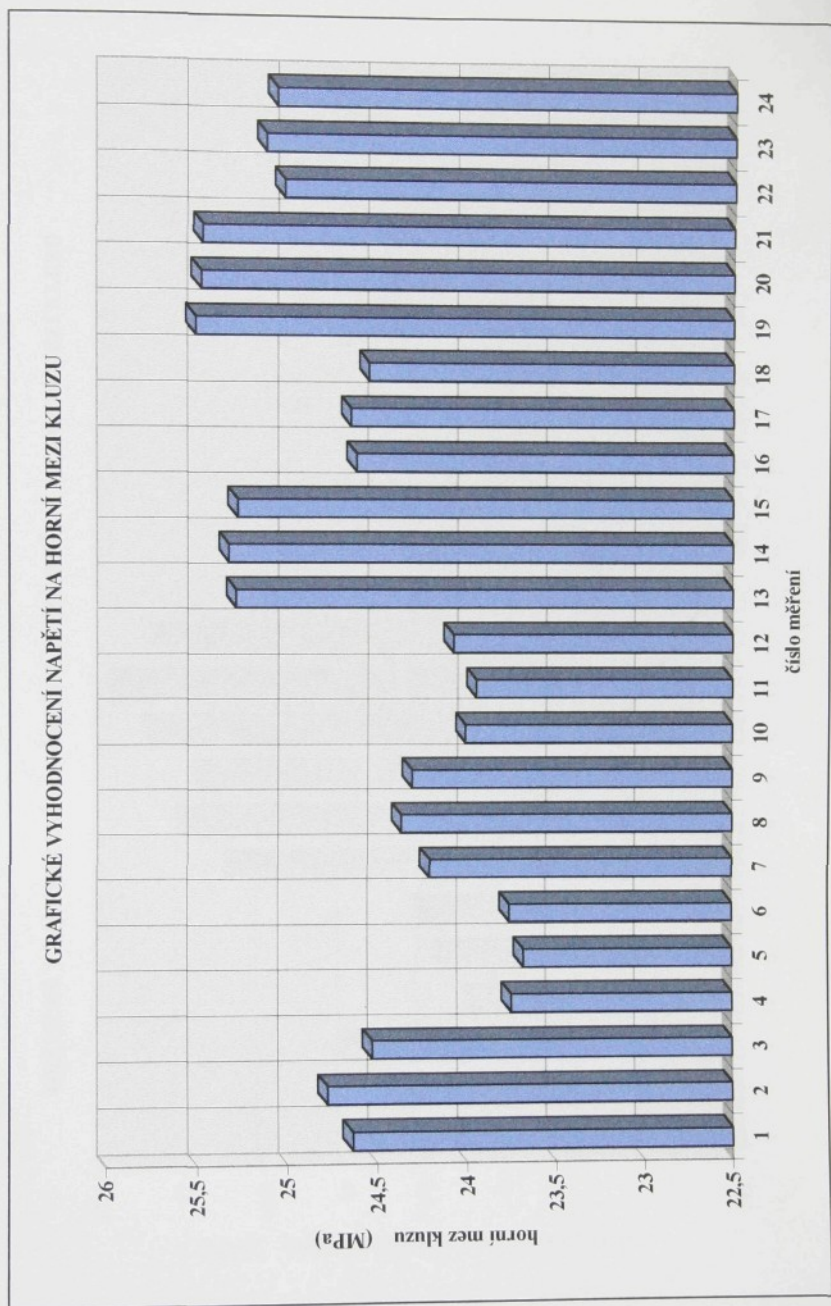
Pokud klesá rychlost proudění temperačního média (od turbulentního druhu proudění k laminárnímu druhu proudění), snižují se i zjištěné rozdíly, pro zadané hodnoty přibližně o čtvrtinu. Dle mého názoru, v praxi se výrazně projevuje vliv nedokonalého (nečistého) povrchu temperačního kanálu na rychlost proudění, ale hlavně na součinitel přestupu tepla mezi vstřikovací formou a temperačním systémem. Někdo by mohl namítnout, že vady povrchu zvyšují víření proudů temperačního média, což je pravda, ale na druhé straně je mezi stěnou temperačního kanálu a temperační kapalinou „vložená“ další vrstva, která jednak působí jako další „trubka“, kterou musí teplo projít a jednak zpomaluje rychlost proudění temperačního média.

S rostoucí teplotou temperačního média se snižují i rozdíly mezi experimentem a modelováním, které se mění v závislosti na změně teploty taveniny přibližně stejným způsobem pro oba dva vstřikovací cykly. To potvrzuje jenom ten fakt, že výsledky získané modelováním řeší „ideálně“ účinek jednotlivých vlivů parametrů vstřikování, neboli stejný algoritmus výpočtu nestacionárního šíření tepla „dodá“ výsledky výpočtu se stejnou kvalitou pro změněné (vyšší či nižší) parametry vstřikování.

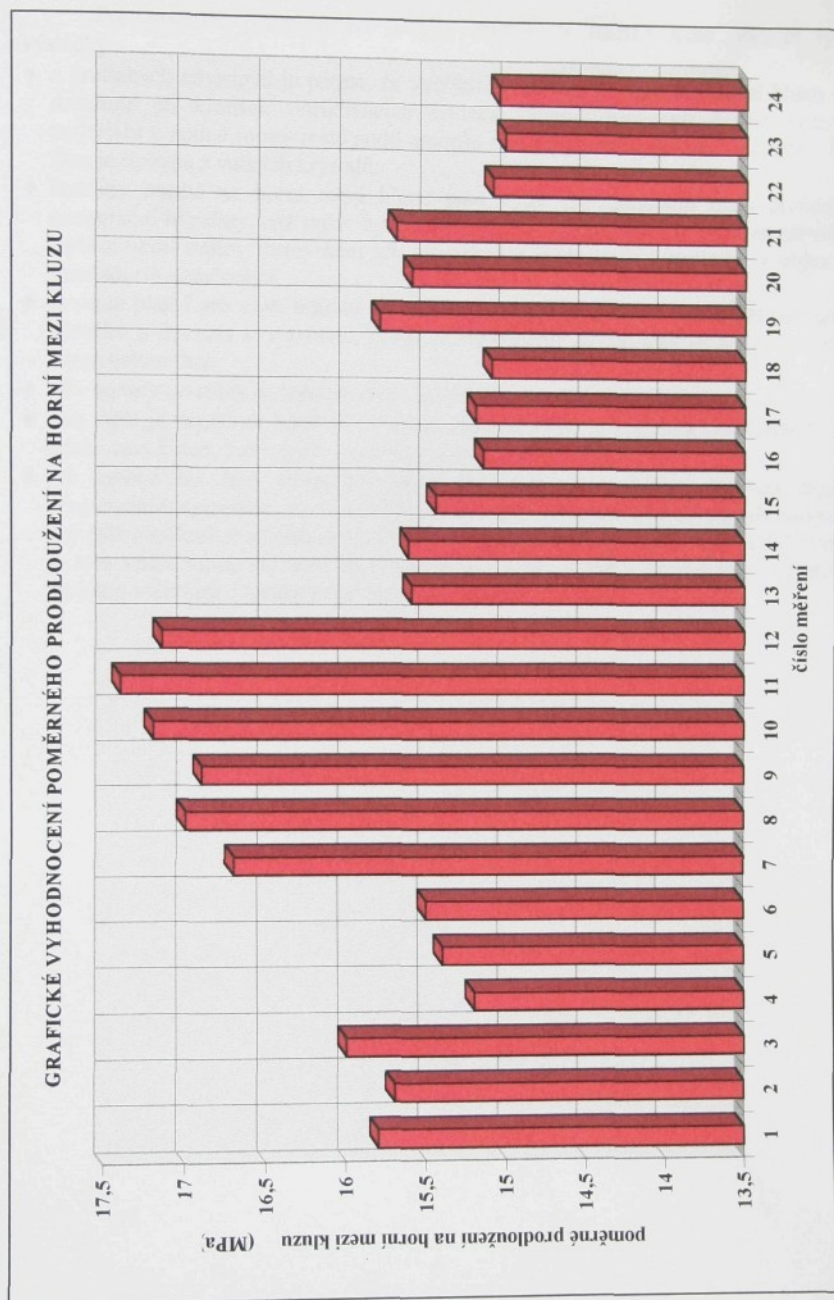
Osobně se neodvážuji konstatovat, zda chyby výpočtu jsou přijatelné či nikoliv. Ale hlavně modelování teplotních polí pomocí simulačních programů, na rozdíl od analytických metod, umožňuje udělat si představu o tom, co se v materiálu formy děje, jaký je účinek temperačního systému a jaké je rozložení teplotních polí kolem dutiny vstřikovací formy.

5.2. Vyhodnocení mechanických vlastností pro shodné parametry vstřikování

Závěrem diskuse bych se chtěl zmínit o vlivu parametrů vstřikování, které jsem měnil při prováděných experimentech, na mechanické vlastnosti. Provedl jsem zkoušku tahem na zkušebních tělesech, vyrobených za stejných podmínek vstřikování, při jakých byly měřeny průběhy teplot ve vstřikovací formě. V důsledku zkrácení této práce zde uvedu pouze zjištěné hodnoty veličin ze zkoušky tahem, a to napětí na horní mezi kluzu σ_{sh} (viz. obr. 89) a prodloužení na horní mezi kluzu ε_{sh} (viz obr. 90).



Obr. 89: Grafické vyhodnocení napětí na horní mezi kluzu σ_{sh} pro jednotlivá provedená měření



Obr. 90: Grafické vyhodnocení prodoužení na horní mezi kluzu ϵ_{sh} pro jednotlivá provedená měření

Pro materiál polypropylen (PP) - **MOSTEN 52.517** jsem obdržel tyto výsledky:

- ◆ z grafických závislostí je patrné, že vyšších hodnot napětí na horní mezi kluzu se dosahuje při kratších vstřikovacích cyklech. Naproti tomu při delším pobytu materiálu v dutině formy roste podíl amorfní fáze na povrchu výrobku a krystalická fáze je složena z velkých krystalů.
- ◆ hodnoty napětí na horní mezi kluzu jsou vyšší pro laminární druh proudění temperační kapaliny, což může být způsobeno tou skutečností, že rychlost odvodu tepla z okolí dutiny formy není tak intenzivní a proto bude i struktura v objemu výrobku rovnoměrnější.
- ◆ to samé platí i pro vyšší teplotu vstřikovací formy, kdy probíhá pomalejší chlazení výstřiku a dochází k vytvoření jemné a rovnoměrné krystalické struktury s vyšší krystalickou fází.
- ◆ vliv teploty taveniny na mechanické vlastnosti je téměř zanedbatelný.
- ◆ čím nižší je napětí na horní mezi kluzu, tak tím vyšší je poměrné prodloužení na horní mezi kluzu, což logicky vyplývá z předchozích bodů.
- ◆ při vstřikování bez temperace, kdy nedochází k rychlému odvodu tepla temperačním systémem, jsem zjistil nejnižší napětí na horní mezi kluzu, ale naopak nejvyšší poměrné prodloužení. Chlazení výstřiků probíhá v dutině formy, kdy forma je sice vodič tepla, ale zároveň i akumulátor tepla a tedy výrazně svou přijatou teplotou ovlivňuje i mechanické vlastnosti výstřiků.

6. ZÁVĚR

Předložená práce, napsaná na téma „Teplotní pole ve vstřikovacích formách“ je příspěvkem k problematice šíření tepla materiálem formy během procesu vstřikování při nestacionárních podmínkách a ke sledování vlivu vybraných technologických parametrů na změnu teplotních polí ve vstřikovací formě.

Je rozdělena do dvou hlavních částí, a to na:

- *teoretickou část,*
- *experimentální část.*

V teoretické části je stručně naznačena problematika a shrnutí nejdůležitějších poznatků o tepelných a teplotních dějích při vstřikování, vliv technologických parametrů vstřikování na tyto děje i na kvalitu výstřiku a dále jsou zde uvedeny stručné popisy, rozdělení a metody řešení teplotních polí.

V experimentální části, která je hlavní částí této práce, jsem nejdříve popsal zařízení pro měření teplotních polí, použité termočlánky a dále jsem se již zaměřil na měření teplotních polí ve vstřikovací formě a sledování změn těchto teplotních polí při určitých technologických podmínkách vstřikování (teplota taveniny, doba vstřikovacího cyklu, teplota temperačního média a rychlost proudění temperačního média) pro vstřikovací formu na výrobu kelímků pro potřeby ČSA. Vlastní měření byla provedena s materiálem polypropylen (PP) - MOSTEN 52.517.

Naměřené hodnoty byly následně zpracovány do tabulek a vyneseny do grafických závislostí teploty na čase. Z vyhodnocení těchto závislostí je možné provést závěrečné shrnutí:

1. Zařízení, sestavené pro měření teplotních polí, skládající se z počítače AT 486, karty AD 18 s převodníkem a termočlánků ruské výroby NiCr - NiAl, se ukázalo jako velmi vhodné a dostatečně přesné a citlivé pro měření cyklicky se měnících teplot ve vstřikovacích formách v závislosti na čase.

2. Použitá experimentální metoda - měření teplotních polí v systému výstřik - forma - temperační systém vyžaduje pro kvalitní aplikaci na kovové vstřikovací formy dodržování některých důležitých zásad:

- ♦ dodržení konstantních experimentálních podmínek vstřikování pro všechny typy prováděných experimentů,
- ♦ eliminování vlivu mnoha nepříznivých činitelů, které by mohly průběh a výsledky experimentu nepříznivě ovlivnit, tj. např. počáteční teplota temperační kapaliny a tedy počáteční teplota formy, vstřikovací tlak, doba a výše dotlaku, atd.,
- ♦ zajištění dokonalého styku mezi termočlánkem a kovem vstřikovací formy a co nejmenší odvod tepla vyvrtaným otvorem,
- ♦ snažit se o co nejmenší účinek rušivých vlivů prostředí a vlivů vstřikovacího stroje na měřicí zařízení a tím také na zjištěné hodnoty.

3. Z výsledků jednotlivých měření teplotních polí při různých podmínkách vstřikování, které jsou zpracovány do tabulek a vyhodnocené v jednotlivých kapitolách této práce, mohu učinit následující závěry a shrnutí:

- ♦ doba vstřikovacího cyklu, která je velmi důležitá z hlediska produktivity a ekonomie výroby a její změna z 12 s na 18 s nemá téměř žádný vliv na změny teplot v jednotlivých místech vstřikovací formy při shodných podmínkách vstřikování, což je velmi překvapivé zjištění. Na rozdíl od zjištěných teplot je z obr. 89 patrné, že při kratším vstřikovacím cyklu oproti delšímu vstřikovacímu cyklu se zvyšují mechanické hodnoty výrobku a poměrné prodloužení výrobku.

- ♦ teplota taveniny, která výrazně ovlivňuje zabíhavost taveniny plastu, ale i dobu chlazení, tak rozdíly při její změně v jednotlivých místech vstřikovací formy jsou srovnatelné s rozdíly mezi jednotlivými teplotami taveniny. Neboli teplota taveniny se výrazně neprojevuje na změně teploty v měřených místech. Musím zde však podotknout, že čím je otvor dále od dutiny formy, tím jsou i větší rozdíly mezi naměřenými teplotami pro různé teploty taveniny. Naproti tomu rozdíly teplot v otvorech co nejbližší tvarové dutině formy kopírují rozdíly teplot mezi teplotami taveniny. Mechanické hodnoty (napětí na horní mezi kluzu a poměrné prodloužení) pro jednotlivé teploty taveniny jsou téměř shodné a nevykazují výrazné odchylky.
- ♦ vliv rychlosti proudění temperační kapaliny (tj. laminárního a turbulentního druhu proudění), která je důležitá z hlediska rychlosti odvodu tepla a účinnosti temperačního systému na materiál vstřikovací formy a tedy na produktivitu výroby, pro stejnou teplotu formy (teplotu temperačního média) je přesně opačný. Neboli pro turbulentní druh proudění temperačního média rostou rozdíly s teplotou taveniny, kdežto u laminárního druhu proudění temperačního média tyto rozdíly klesají. Mechanické hodnoty jsou nepatrně vyšší pro laminární druh proudění.
- ♦ nejvýraznější vliv na rozložení teplotních polí a na jejich změnu má teplota temperačního média (tedy teplota formy), která výrazně ovlivňuje jak dobu cyklu, tak i zabíhavost taveniny plastu. Z výsledků lze konstatovat, že kolikrát se zvýší teplota temperačního média (v našem případě z 15 °C na 45 °C), tak tolikrát se sníží rozdíl mezi naměřenými teplotami při různých teplotách taveniny se závěrem, že rozdíl teplot v jednotlivých místech vstřikovací formy pro různé teploty taveniny a teplotu temperačního média 45 °C je téměř zanedbatelný. Mechanické hodnoty jsou o něco vyšší, než při teplotě 15 °C.

V dnešní době, kdy existují moderní stroje s termostaty, řízené pomocí mikroprocesorů, které dokáží přesně udržovat jak teplotu taveniny a ostatní parametry vstřikování, tak i teplotu a rychlost proudění temperačního média, můžu na základě výsledků (hledisko tepelného namáhání formy) provést toto doporučení: používat turbulentní proudění temperační kapaliny, nižší teplotu taveniny a vyšší teplotu temperačního média (teplotu formy) a k tomu, z hlediska kvality a pevnosti výrobku, vypočítat dobu vstřikovacího cyklu.

4. Modelování teplotních polí pomocí simulačních programů je v současné době velmi rozšířenou záležitostí, u které se „věří“ v dostatečnou přesnost získaných výsledků. Je to pochopitelné už jenom z toho hlediska, že analytické řešení takto složitých problémů je takřka nemožné a získané výsledky nejsou příliš přesné. Chyba, která vznikla při porovnávání zjištěných hodnot mezi experimentem a modelováním by byla na jedné straně u některých aplikací nízká, na straně druhé by byla pro někoho příliš vysoká. Proto považuji metodu měření teplotních polí ve vstřikovacích formách za metodu srovnávací a při zjišťování teplot v různých místech vstřikovací formy v závislosti na čase jako důležitou pro další zpřesňování vstupních údajů pro prováděné simulace a využití zjištěných hodnot pro snadnější zadávání vstupů, týkajících se chlazení výrobku v dutině formy.

5. Cílem dalších prací a dalšího rozvoje v této oblasti je tedy konfrontace výsledků experimentů s výsledky simulace a naopak vytváření báze dat pro dokonalejší zadávání parametrů během procesu vstřikování, ale i chlazení. Neboli usnadnit pracovníkům, pracujícím se simulačními programy a nejenom jim, pochopení vlivu jednotlivých parametrů na celý proces vstřikování, na kvalitu výrobku a na dodržení požadovaných mechanických vlastností při jejich změně.

LITERATURA

- /1/ ŠTĚPEK, J. a kol.: Technologie zpracování a vlastnosti plastů.
SNTL, Praha, 1989.
- /2/ WAGNER, M., H.: Wärmeübergang an nicht newtonschen Flüssigkeiten.
VDI - Verlag, Düsseldorf, 1991.
- /3/ KLEČKOVÁ, M.: Nestacionární teplotní pole a napjatosti ve strojních součástech.
SNTL, Praha, 1979.
- /4/ KALČÍK, J.: Technická termomechanika.
Academia Praha, 1973.
- /5/ VEJNÍK, A., T.: Termodynamika litéj formy.
Moskva, 1. vydání, 1968.
- /6/ CHOLSKIJ, B., GORISLAVEC, V.: Reodynamika i teploobmen nelinejno vjazkoplastičnych materialov.
Nauka i tehnika, Minsk, 1970.
- /7/ TADMOR, E., GOGOS, K.: Teoretičeskije osnovy pererabotky polimerov.
Chimija, 1984.
- /8/ LYKOV, A., V.: Teorija teploprovodnosti.
Moskva, Izdatelstvo „Vyššaja škola“, 1967.
- /9/ BROY, W.: Handbuch der Plasttechnik.
VEB Deutscher Verlag, Leipzig, 1985.
- /10/ WÜBKEN, G., CONRAD, J.: Rationalisation in the injection moulding shop.
VDI Verlag, Düsseldorf, 1981.
- /11/ TAUTZ, H.: Wärmeleitung und Temperaturgleich.
Berlin, Academic - Verlag, 1971.
- /12/ HENGES, C.: Anleitung für den Bau von Spritzgiesswerkzeugen.
Hanser, München, 1983.
- /13/ KAST, W., KRISCHER, O.: Konvektive Wärme - und Stoffübertragung.
Springer - Verlag, Berlin, 1974.
- /14/ BROWN, R., P., READ, B., E.: Measurement Techniques for Polymeric Solids.
EASP, London, 1984.
- /15/ KOLOUCH, J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním.
SNTL, Praha, 1986.
- /16/ KOLOUCH, J.: Strojní součásti z plastů.
SNTL, Praha, 1981.
- /17/ NEUHÄUSL, E.: Vstřikování plastických hmot.
SNTL, Praha, 1973.
- /18/ HARTMANN, W., WÜBKEN, G.: Injection Moulds.
VDI - Verlag, Düsseldorf, 1980.
- /19/ WEISS, K.: Die Berechnung des Wärmeüberganges zwischen Phasen grenzen mittels der Methode der immeren Rander.
VDI, Aachen, 1995.
- /20/ EDWARD, R., CHAMPION, J.: Finite element analysis in manufacturing engineering.
McGraw - Hill, 1992.
- /21/ FLETCHER, A., J.: Thermal Stress and Strain generation and Heat Treatment.
EASP, London, 1989.
- /22/ WHERAN, A., CRAFF, J.: Developments in Plastic Technology - 3.
EASP, London, 1986.

- /23/ PRITCHARD, G.: Developments in Plastic Technology - 5.
EASP, London, 1986.
- /24/ FAST, J.: Elektrická měření.
SNTL, Praha, 1987.
- /25/ WEICHERT, L.: Temperaturmessung in der Technik.
Expert Verlag, Württ, 1981.
- /26/ PLUHAŘ, J., KORITTA, J.: Strojírenské materiály.
SNTL, Praha, 1987.
- /27/ AGASSANT, J., a kol.: Polymer processing.
Publishers Hausers, 1986.
- /28/ GORBACH, P.: Handbuch der Temperaturregelung mittels flüssiger Medien.
Material fy REGLOPLAS, Schweiz, 1986.
- /29/ KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů.
Skripta VŠST Liberec, 1991.
- /30/ TOMIS, F.: Základy zpracování plastů.
Skripta VUT Brno, 1979.
- /31/ HRDLÍČKA, L.: Přenos tepla hmoty.
Skripta ČVUT Praha, 1974.
- /32/ JENČÍK, J.: Technická měření.
Skripta ČVUT Praha, 1981.
- /33/ NOVÁ, I.: Měření teplotních polí a sledování hodnot termofyzikálních
vlastností litinových slévárenských forem.
Habilitační práce, TU Liberec, 1995.
- /34/ ŠIMŮNKOVÁ, I.: Měření teplotních polí ve vstřikovací formě.
Diplomová práce, TU Liberec, 1995.
- /35/ HOFFMANN, V.: Modelování temperačního systému ve vstřikovací formě.
Diplomová práce, TU Liberec, 1995.
- /36/ BEŠÍK, L.: Metody stanovení doby chlazení při vstřikování termoplastů.
Diplomová práce, TU Liberec, 1994.
- /37/ ZEMAN, L.: Teplotní profily při vstřikování termoplastů a ověřování
jejich platnosti.
SVÚM Praha, 1986.
- /38/ KENDÍK, B.: Rozbor chladicího systému forem pro vstřikování termoplastů.
Diplomová práce, TU Liberec, 1993.
- /39/ RYBCZUK, Z.: Vyhodnocení vlivu teploty taveniny, teploty formy a doby
cyklu na mechanické vlastnosti výstřiku.
Diplomová práce, TU Liberec, 1996.
- /40/ NEDESS, CH., KOSIN, T.: Spritzgussteile schneller produzieren durch
Simultaneous Engineering.
Kunststoffe 11, 1993, s. 871 - 874.
- /41/ THIENEL, P., JEHN, P.: Werkzeuge rechnerisch auslegen.
Kunststoffe 4, 1992, s. 301 - 305.
- /42/ NOTZ, F.: Entlüftung von Spritzgiesswerkzeugen.
Kunststoffberater 1/2, 1995, s. 28 - 33.
- /43/ SCHENK, R., SCHROIFF, V.: Deformation von Einlegeteilen beim Umspritzen
simulieren.
Kunststoffe 3, 1994, s. 244 - 246.
- /44/ RAUDENSKÝ, M.: Thermal Mathematical Models and Experimental Work.
Technika a trh, Brno, 1993, s. 35 - 38.

- /45/ THIENEL, P., SCHMIDT, V.: Bei der Konstruktion von Spritzgiesswerkzeugen für thermoplastische Formteile.
Kunststoffberater 5, 1993, s. 26 - 30.
- /46/ NEDESS, CH., KOSIN, T.: Simulationsprogramme für das Spritzgiessen auswählen.
Kunststoffe 6, 1992, s. 464 - 468.
- /47/ SPECKENHEUER, G., P., STRÄCKE, A.: Thermische Simulation eines Kunststoffgehauses.
Kunststoffe 5, 1993, s. 35 - 37.
- /48/ REICHERT, P., VLASE, I.: Druckgeliervverfahren rechnergestützt optimieren.
Kunststoffe 9, 1992, s. 840 - 843.
- /49/ ROSSBACH, R.: Temperierkanäle in Spritzgiesswerkzeugen auslegen.
Kunststoffe 6, 1994, s. 713 - 716.
- /50/ SCHULZE, V., HOLWEG, S.: Eigenspannungen in Spritzgussteilen.
Kunststoffe 2, 1993, s. 145 - 149.
- /51/ SIEGMANN, A., KENIG, S.: Residual stresses in injection molded amorphous polymers.
Polymer Eng. 14, 1987, s. 1069 - 1078.
- /52/ ZÖLLNER, O.: Werkzeuggefüllvorgang bei sehr dünnwandigen.
Spritzgussteilen berechnen CHV, München, 1991.
- /53/ LOOS, G.: Optimierte Kühlwasserversorgung.
Kunststoffe 2, 1996, s. 181 - 184.
- /54/ Regulování teploty nástrojů pro výrobu součástek z termoplastů.
Materiál fy SINGLE, Wernau, 1978.
- /55/ Injection Moulding.
Materiál fy SIMCON, Aachen, 1991.
- /56/ ČSN 64 0605: Zkouška tahem plastů.
ÚNM, Praha, 1981.
- /57/ ČSN 64 0614: Stanovení modulu pružnosti ze zkoušky tahem, tlakem a ohybem.
ÚNM, Praha, 1981.
- /58/ KOSCHIN, F.: Statgraphics aneb statistika pro každého.
Grada, Praha, 1991.
- /59/ ŠTEFL, J.: Corel Draw 3.0.
Grada, Praha, 1994.
- /60/ Mosten 52.517: Materiálový list.
- /61/ Návod k obsluze karty AD 18.
Praha, 1994.

Poděkování:

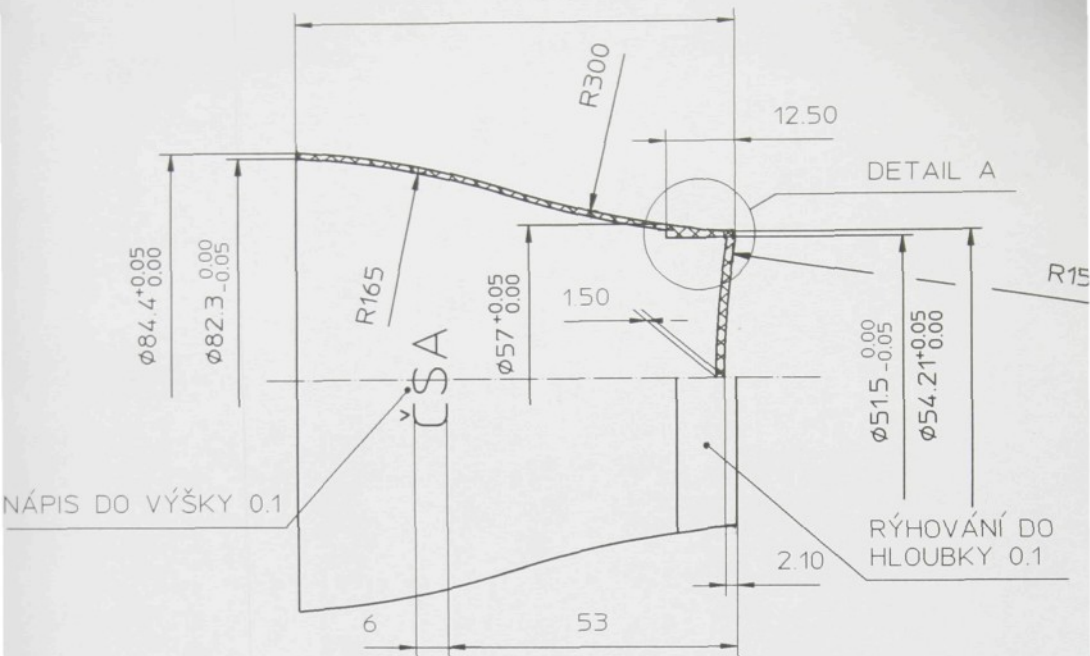
Děkuji všem, kteří mi pomohli vytvořit velmi dobré podmínky pro vypracování mé doktorandské práce a kteří měli se mnou trpělivost po celou dobu mého doktorandského studia.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výkres vstřikovací formy

Příloha 2: Výkres výrobku

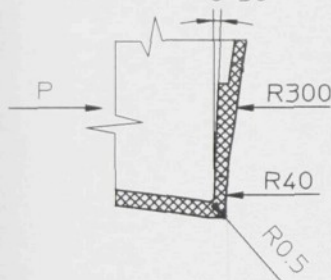
80.40^{+0.05}_{0.00}



DETAIL A

M 2:1

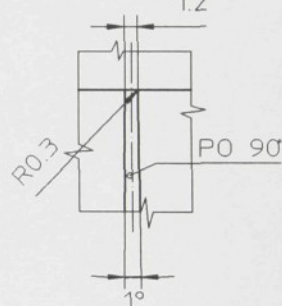
0°30



POHLED P

M 2:1

1.2



NEZAKÓTOVANÉ ÚKOSY MIN 30°

NEZAKÓTOVANÉ RÁDIUSY R0.2

PŘÍPUSTNÁ ODCHYLKA U PRŮBĚHŮ KŘIVEK 0.5 mm

INDEX	ZMENA	DATUM	PODPIS	TU LIBEREC	
ZN.MATERIALU PP MOSTEN 52517			T.O.	HMOTNOST kg	MER. 1:1 (2:1)
ROZM.-POLOT.					
POM.ZAR.			C.SN.	TR.C.	
VYPR. ING. P. LENFELD			NORM.REF.	POZN.	C.KUSOVNIKU
PREZK.					
TECHNOL.			SCHVALIL	STARY V.	C.V.
NAZEV			TYP		
VÝROBEK				Listu	KPT-97-02 1
					List

POZ.	NÁZEV - ROZMĚR	VÝKRES-NORMA	MATERIÁL	J.	MN	HMOTN
1.	TVÁRNICE Ø 160 x 88		19 486		1	
2.	TVÁRNÍK Ø 280 x 205		19 486		1	
3.	TVAROVÁ VLOŽKA Ø 90x 42		19 486		1	
4.	VTOKOVÁ VLOŽKA Ø 50 x 28		19 614		1	
5.	VYHAZOVACÍ DESKA Ø 130 x 23		11 600		1	
6.	STÍRACÍ KROUŽEK Ø 135 x 28		19 312		1	
7.	ZDĚŘ Ø 190 x 60		11 600		1	
8.	PEVNÁ PŘÍRUBA Ø 240 x 50		11 600		1	
9.	STŘEDOVÝ KROUŽEK Ø 190 x 22		11 600		1	
10.	VYHAZOVACÍ ČEP Ø 18 x 95		11 700		4	
11.	MATICE Ø 60 x 25		11 700		1	
12.	VLOŽKA CHLAZENÍ Ø 52 x 115		11 523		1	
13.	PŘEPÁŽKA CHLAZENÍ 2 x 21 x 27		11 373		1	
14.	PŘEPÁŽKA CHLAZENÍ 2 x 21 x 27		11 373		1	
15.	KOLÍK Ø 2 x 8	ČSN 02 2150			1	
16.	VODÍCÍ KOLÍK Ø 12 x 80	ČSN 22 8860			2	
17.	KOLÍK Ø 8 x 40	ČSN 02 2158			2	
18.	KOLÍK Ø 3 x 10	ČSN 02 2158			1	
19.	NÁUSTEK	PN 4468			6	
20.	PŘESUVNÁ ZÁTKA	PN 4469			6	
21.	TĚSNÍCÍ KROUŽEK Ø 140 x 5	ČSN 02 9281			2	
22.	TĚSNÍCÍ ŠNURA	ČSN 02 9280			2	
23.	TĚSNÍCÍ KROUŽEK Ø 60 x 2	ČSN 02 9281			1	
24.	TĚSNÍCÍ KROUŽEK Ø 36 x 2	ČSN 02 9281			1	
25.	ŠROUB M 10 x 50	ČSN 02 1143			6	
26.	ŠROUB M 6 x 20	ČSN 02 1143			4	

TU LIBEREC

Vypr. ING. P. LENFELD	Norm. ref.	Pozn.	č. výkr.
Přezk.			KPT - 97 - 01/1
Techn.	Schválil		tríd. č.
Název	KELÍMEK ČSA		
	Listů	KPT - 97 - 01	List 2