

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta Strojní
Ústav strojírenské technologie



Problematika teplotního režimu forem a využití zbytkového tepla v technologiích lití pod tlakem

Jakub Remeš

Vedoucí: Ing. Aleš Herman, Ph.D.
Duben 2007

Problematika teplotního režimu forem a využití zbytkového tepla v technologiích lití pod tlakem

Jakub Remeš

1 Úvod

Tento příspěvek, který je součástí práce, je řešen ve spolupráci s firmou **ELAP v.d.**, Světlá hora 321.

Tato práce si dává za cíl navrhnout takové regulační zařízení, které by bylo schopno řízeně a ekonomicky zajišťovat odpadní tepelnou energii vznikající ve výrobním procesu a to především kontrolovaným odvodem tepelné energie při chlazení pracovních nástrojů (forem pro tlakové lití). Důležitým efektem tohoto zařízení je také kontrola a zúžení pásma povrchové teploty forem s následným nanášením **levnějšího** dělicího prostředku pro užší pásmo teplot. Důsledkem použití tohoto zařízení by bylo **snížení spotřeby energií** ve výrobních i nevýrobních procesech.

Při dnešním stavu je ve většině případů toto ohromné množství energie bezúčelně vypouštěno prostřednictvím chladících věží do ovzduší. Přitom tuto tepelnou energii vnesenou do stroje roztaveným kovem lze cíleně využít např. pro předehřev vsázky tavicích pecí, předehřev pracovních nástrojů dalších strojů, vytápění budov, ohřev užitkové vody atd. Při využití této odpadní energie lze dosáhnout značných finančních úspor.

Navrhované regulační zařízení, které je součástí rozvodu chlazení formy u lícího stroje zajišťuje:

- řízení a monitoring skutečného průtoku chladicí vody v jednotlivých chladících kanálech v (přímé/nepřímé) závislosti na teplotě povrchu formy,
- maximální teplotu výstupní chladicí vody do systému zpracování odpadní vody,
- směšování vstupní a výstupní vody při zachování stabilní průtokové rychlosti chladicími kanály → **snížení spotřeby chladicí vody**,
- temperaci pracovního nástroje.

Cílem bude sestavení programu pro řízení jednotlivých prvků chladicího okruhu a ověření jeho funkčnosti na modelovém zařízení, pro jeho pozdější použití na skutečném regulačním okruhu chladicího zařízení.

2 Tepelný režim forem

Tepelné poměry v tlakové lící formě a dodržování optimální teploty líce formy jsou důležitým předpokladem výroby jakostních odlitků. Při odlévání taveniny do formy s nevyhovující teplotou jejího povrchu nastává náhlé a předčasné snížení teploty odlévané taveniny, což způsobuje různé vady povrchu odlitku (závaly), vnitřní pnutí atd. Teplota formy je závislá na řadě faktorů. Závisí na druhu odlévaného materiálu, na poměru objemu odlitku k jeho povrchu, na době trvání lícího cyklu, na materiálu formy, použitých separačních prostředků, na způsobu chlazení formy atd. Při lití neželezných kovů se doporučuje udržovat teplotu povrchu formy v rozmezích cca 200 až 250 °C. Správnou teplotu tlakové lící formy v cyklu tuhnutí a chladnutí odlitku zajišťuje temperační a chladicí systém.

Pro potřeby tepelné bilance byl lící cyklus rozdělen do 4 fází:

Fáze I: Trvá po dobu od počátku vstřiku kovu do formy do pootevření formy.

Fáze II: Trvá po dobu od pootevření formy do vyjmutí odlitku robotem

Fáze III: Trvá po dobu od okamžiku vyjmutí odlitku robotem z formy do okamžiku počátku nanášení separátoru, či-li uvažujeme prázdnou formu bez odlitku. Toto časové období je rozdílné u pevné a pohyblivé části formy. U pevné části formy je nutno tento čas prodloužit o čas z předchozí fáze, protože z pevné části formy byl odlitek vyjmut již při otevření formy ve fázi II odjetím pohyblivé části formy.

Fáze IV: Trvá po dobu trvání nástřiku separátoru.

Toto rozfázování licího cyklu je velmi důležité pro zjištění výše uvolněného výkonu v jednotlivých fázích pro dimenzování výměníků tepla. Ve IV fázi může dokonce dojít k absurdní situaci, že formu je nutno temperovat, protože odvod tepla nástřikem separačního prostředku je příliš velký a nedodržel bychom předepsanou povrchovou teplotu líce formy.

Tepelná bilance formy:

Vstupní parametry:

m ... hmotnost odlitku s vtokovou soustavou	0,75 [kg]
$V_{\text{nástř}}$... objem aplikovaného separátoru	0,1 [l]
$T_{\text{lití}}$... teplota slitiny ve vsíkovací komoře	680 [°C]
T_{kr} ... teplota krystalizace slitiny	660 [°C]
T_{od} ... teplota odlitku v okamžiku otevření formy	340 [°C]
T_{p} ... teplota vnějšího povrchu zavřené formy	120 [°C]
T_{ok} ... teplota okolí stroje	25 [°C]
T_{vod} ... teplota odlitku v okamžiku vyjímání robotem z již otevřené formy	280 [°C]
T_{vz} ... teplota okolního vzduchu mezi otevřenými polovinami formy	50 [°C]
T_{p}^1 ... průměrná teplota povrchu formy v dělicí rovině v okolí dutiny odlitku v okamžiku otevření formy	150 [°C]
T_{p}^2 ... průměrná teplota povrchu formy v dělicí rovině v okolí dutiny odlitku v okamžiku počátku nanášení separátoru	140 [°C]
T_{Pd}^1 ... teplota povrchu dutiny odlitku v pevné části formy v okamžiku otevření formy.	320 [°C]
T_{Pd}^2 ... teplota povrchu dutiny odlitku v pohyblivé části formy v okamžiku vyjmutí odlitku robotem	260 [°C]
T_{Pd}^3 ... teplota povrchu dutiny odlitku v pevné části formy v okamžiku počátku nanášení separátoru	240 [°C]
T_{Pd}^4 ... teplota povrchu dutiny po ukončení nástřiku separátoru	200 [°C]
ΔT ... tepelný spád povrchu dutiny formy při vstřikování kovu proti teplotě masí kovu formy ve hloubce 25 mm	150 [°C]
S ... plocha vnějšího povrchu zavřené formy bez povrchu, který zakrývají prsa licího stroje	2 [m ²]
S_{od} ... povrch části odlitku s vtokovou soustavou, který vystupuje z obrysu formy v otevřené poloze při vyjímání robotem	0,01 [m ²]

$S_{\text{děl}} \dots$ plocha dělicí roviny bez plochy odpovídající průmětu odlitku s vtokovou soustavou v dělicí rovině v pohyblivé části formy	0,25 [m ²]
$S_{\text{celk}} \dots$ celkový povrch odlitku s vtokovou soustavou	0,02 [m ²]

Fáze I: Trvá po dobu od počátku vstřiku kovu do formy do pootevření formy
Označme ji jako čas t_1 .

$t_1 \dots$ 10 [s]

Fáze II: Trvá po dobu od pootevření formy do okamžiku vyjmutí odlitku robotem.
Označme ji jako čas t_2 .

$t_2 \dots$ 5 [s]

Fáze III: Trvá po dobu od okamžiku vyjmutí odlitku robotem z formy do okamžiku počátku nanášení separátoru, či-li uvažujeme prázdnou formu bez odlitku.
Označme ji jako čas t_3 . Toto časové období je rozdílné u pevné a pohyblivé části formy. U pevné části formy je nutno tento čas t_3 prodloužit o čas t_2 z předchozí fáze, protože z pevné části formy byl odlitek vyjmut již při otevření formy ve fázi II odjetím pohyblivé části formy.

$t_3 \dots$ 5 [s]

Fáze IV: trvá po dobu nástřiku separátoru. Označme ji jako čas t_4 .

$t_4 \dots$ doba trvání nástřiku separátoru na fvrch dutiny formy 15 [s]

Pro informaci celkový čas cyklu chlazení:

$t \dots$ celkový čas pracovního cyklu ($t=t_1+t_2+t_3+t_4$) 35 [s]

Materiálové konstanty pro slitinu AISi10:

$c_{\text{tav}} \dots$ měrná tepelná kapacita taveniny	1070 [J/kg.K]
$c_{\text{tuh}} \dots$ měrná tepelná kapacita slitiny v tuhém stavu	968 [J/kg.K]
$c_{\text{nástř}} \dots$ měrná tepelná kapacita nástřiku	3800 [J/kg.K]
$\rho_{\text{nástř}} \dots$ hustota separátoru	1000 [kg/m ³]
$c_f \dots$ měrná tepelná kapacita materiálu formy	476 [J/kg.K]
$\rho_f \dots$ Hustota materiálu formy	7850 [kg/m ³]
$L_{\text{KR}} \dots$ latentní krystalizační teplo taveniny	472121 [J/kg]
$L_v \dots$ měrné skupenské teplo vypařování nástřiku	1700000 [J/kg]
$c_\epsilon \dots$ Součinitel záření černého tělesa	5,775 [W.m ⁻² .K ⁻⁴]
$\epsilon \dots$ poměrná zářivost	0,9 [-]
$\epsilon_{\text{AL}} \dots$ poměrná zářivost hliníku	0,08 [-]
$T_{\text{vyp}} \dots$ teplota vypařování kapalně složky separátoru	100 [°C]
$T_{\text{nástř}} \dots$ počáteční teplota separátoru	30 [°C]

Vypočtené hodnoty energií hmoty kovu:

(Uvažujeme energii nutnou dodat slitině, aby její teplota stoupla z cca 20°C na teplotu lití cca 680°C, při tom dochází ke změně skupenství z tuhého na kapalné.)

Q_1 ... energie kovu v okamžiku nalití do vstřikovací komory.	831151 J
Q_2 ... energie odlitku v okamžiku vyjmutí robotem.	185130 J
Q_1-Q_2 ...energie uvolněná odlitkem po dobu jeho setrvání ve formě	646021 J

Pro informaci přepočítané hodnoty energií na 1kg slitiny.

Q_1 ... energie kovu v okamžiku nalití do vstřikovací komory.	1108201 J
Q_2 ... energie odlitku v okamžiku vyjmutí robotem.	246840 J
Q_1-Q_2 ...energie uvolněná odlitkem po dobu jeho setrvání ve formě	861361 J

Vypočítané hodnoty výkonu získané z odpadní energie:

Fáze I - od počátku vstřiku kovu do okamžiku pootevření formy.

Q_{f1} ...energie uvolněná odlitkem ve fázi 1	602461 J
P ... výkon uvolněný odlitkem za čas t_1	60246 W
$P_{sálf}$... výkon odvedený sáláním povrchu formy za čas t_1	1660 W
P_{proud} ...výkon odvedený prouděním okolního vzduchu za čas t_1	1050 W
Q_{form} ...energie odvedená masou kovu formy v okolí dutiny odlitku silnou 25mm	280245 J
P_{form} ... výkon odvedený masou kovu formy v okolí dutiny odlitku silnou 25mm za čas t_1	28025 W
$P_{chlاد}^I$...výkon odvedený chladícím systémem za čas t_1 Pouze toto odpadní teplo je dále využitelné.	29512 W

Fáze II - forma je otevřena, ale odlitek je stále ve formě.

Tato fáze se týká pouze pohyblivéčásti formy, kde je odlitek.

Trvá po dobu od pootevření formy do vyjmutí odlitku.

Q_{f2} ...energie uvolněná odlitkem během fáze 2	43560 J
P_{CHLB} ...výkon uvolněný odlitkem za čas t_2	8712 W
$P_{chlاد}^{II}$...výkon odvedený chladícím systémem za čas t_2 .	8712 W

Fáze III - forma je otevřena, odlitek je vyjmut. Tato fáze trvá do počátku nástřiku separátoru.

Doba trvání této fáze je pro pro pohyblivou část t_3 a pro pevnou část t_3+t_2 .

U pevné části formy je čas delší o čas t_2 z předchozí fáze.

pozn.

Masou kovu je myšlena hmotnost vrstvy materiálu tlusté 25 mm v dělicí rovině.

A to vrstva v dutině formy pro odlitek s (vtok. soustavou) Vrstva stykové plochy v dělicí rovině je uvažována jako 25%.

Teplo vyzářené z dělicí roviny během fáze III zanedbáváme.

Q_{f3pev} ...energie produkovaná masou kovu pevné části formy během fáze 3	121440 J
Q_{f3poh} ...energie produkovaná masou kovu pohyblivé části formy během fáze 3	65391 J
Q_{f3} ...celková energie produkovaná masou kovu ve fázi 3	186830 J
P_{f3pev} ...výkon vyprodukovaný masou kovu pevné části formy za čas t_3+t_2 .	12144 W
P_{f3poh} ... Výkon vyprodukovaný masou kovu pohyblivé části formy za čas t_3	8407 W
P_{chlad}^{III} ...Výkon nutný odvést chlad. Médiiem za dobu od vyjmutí odlitku po počátek nástřiku separátoru	20551 W

Fáze IV - během ní dochází k nástřiku se parátoru

Předpokládáme 50% odvod tepla nástřikem separátoru.

Q_{f4} ...maximální možné množství energie, které můžeme odebrat z formy nanesením separátoru, abychom dodrželi požadovanou teplotu povrchu formy	74732 J
P_{f4} ...Výkon který můžeme odebrat z masy kovu v dutině odlitku během postřiku separátorem.Za čas t_4 .	4982 W
$P_{nástř}$...Výkon odvedený nástřikem separátoru za čas t_4 .	6553 W
P_{temp}^{III} ... výkon který je nutný dodat temperačním systémem za čas t_4 .	1571 W

Celkový výkon odvedený chladícím médiiem za celkový čas cyklu t 58775 W

Výkon nutný dodat temperačním systémem za čas cyklu t 1571 W

Vlastní propočet tepelné bilance:

Energie objemu slitiny hliníku v okamžiku nalití do vstřikovací komory:

$$Q_1 = Q_{PŘ} + Q_{KR} + Q_{CHLa} = 831151 \text{ [J]}$$

$$Q_{PŘ} = m \cdot c_{tav} \cdot (T_{lití} - T_{kr}) = 16050 \text{ [J]}$$

$$Q_{KR} = (m \cdot L_{KR}) = 354091 \text{ [J]}$$

$$Q_{CHL} = [m \cdot c_{tuh} \cdot (T_{kr} - T_{ok})] = 461010 \text{ [J]}$$

Energie odlitku s vtokovou soustavou v okamžiku vyjmutí ze stroje robotem:

$$Q_2 = [m \cdot c_{tuh} \cdot (T_{vod} - T_{ok})] = 185130 \text{ [J]}$$

Pro informaci přepočítané hodnoty energií na 1kg slitiny za použití vztahů z předchozího výpočtu:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 1108201 \text{ J} \\ Q_2 &= 246840 \text{ J} \end{aligned}$$

Fáze I :

Energie uvolněná odlitkem ve fázi 1:

$$Q_{f1} = Q_{PŘ} + Q_{KR} + Q_{CHLa} = 602461 \text{ J}$$

Výkon uvolněný odlitkem:

$$P = (Q_{PŘ} + Q_{KR} + Q_{CHLa} + Q_{TR}) / t_1 = 60246 \text{ W}$$

kde znamená:

$Q_{PŘ}$ - teplo uvolněné z přehřáté taveniny,
 Q_{KR} - teplo uvolněné při přechodu z tekuté do tuhé fáze,
 Q_{CHLa} - teplo uvolněné při chladnutí odlitku,
 Q_{TR} - teplo vzniklé třením od kinetické energie pístu.

Teplo vzniklé od tření pístu a kinetické energie taveniny je malé a lze ho zanedbat.

$$Q_{CHLa} = [m \cdot c_{tuh} \cdot (T_{kr} - T_{od})] = 232320 \text{ J}$$

Výkon (energie) odvedený masou kovu formy v okolí dutiny odlitku

Uvažujme masu kovu formy v okolí dutiny odlitku. Je tvořena vrstvou kovu silnou 25mm. Přičemž teplotní spád proti povrchu formy v dutině pro odlitek (při vstřikování kovu do dutiny) uvažujeme 150 [°C]

$$Q_{form} = [\rho_f \cdot S_{celk} \cdot 0,025 \cdot c_f \cdot \Delta T] = 280245 \text{ J}$$

$$P_{form} = [\rho_f \cdot S_{celk} \cdot 0,025 \cdot c_f \cdot \Delta T] / t_1 = 28025 \text{ W}$$

Výkon odvedený sáláním vnějšího povrchu formy:

$$P_{sál} = c_{\varepsilon} \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ok}}{100} \right)^4 \right] \cdot S = 1660 \text{ W}$$

Výkon odvedený do okolí prouděním:

$$P_{proud} = \alpha_{proud} \cdot S \cdot (T_p - T_{ok}) = 1050 \text{ W}$$

$$\alpha_{proud} = 1,77 \cdot (T_p - T_{ok})^{1/4} = 5,53 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

Výkon odvedený chladícím médiem:

$$P_{chlad}^I = 29512 \text{ W}$$

Fáze II :

Energie uvolněná odlítkem ve fázi 2:

$$Q_{f2} = [m \cdot c_{tuh} \cdot (T_{od} - T_{vod})] = 43560 \text{ J}$$

Výkon uvolněný odlítkem:

$$P_{CHLb} = [m \cdot c_{tuh} \cdot (T_{od} - T_{vod})] / t_2 = 8712 \text{ W}$$

Výkon odvedený sáláním části povrchu odlitku do okolí a výkon odvedený sáláním povrchu formy v dělicí rovině zanedbáváme.

Výkon nutný odvést chladícím médiem:

$$P_{chlad}^{II} = 8712 \text{ W}$$

Fáze III:

Energie kterou vyprodukuje masa kovu formy od vyjmutí odlitku do počátku nanášení separátoru:

a) pevná část formy (tam kde v předchozí fázi nebyl odlitek):

$$Q_{f3pev} = \left\{ \left[S_{od} \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{Pd}^1 - T_{Pd}^3) \right] + \left[S_{dě} \cdot 0,2 \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_P^1 - T_P^2) \right] \right\} = 121440 \text{ J}$$

b) pohyblivá část formy (tak kde v předchozí fázi odlitek byl):

$$Q_{f3poh} = \left\{ \left[(S_{celk} - S_{od}) \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{Pd}^2 - T_{Pd}^3) \right] + \left[S_{děř} \cdot 0,2 \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_P^1 - T_P^2) \right] \right\} = 65391 \text{ J}$$

Výkon který vyprodukuje masa kovu formy od vyjmutí odlitku do počátku nanášení separátoru:

a) pevná část formy (tam kde v předchozí fázi nebyl odlitek):

$$P_{f3pev} = \left\{ \left[S_{od} \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{Pd}^1 - T_{Pd}^3) \right] + \left[S_{děř} \cdot 0,2 \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_P^1 - T_P^2) \right] \right\} / (t_2 + t_3) = 12144 \text{ W}$$

b) pohyblivá část formy (tak kde v předchozí fázi odlitek byl):

$$P_{f3poh} = \left\{ \left[(S_{celk} - S_{od}) \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{Pd}^2 - T_{Pd}^3) \right] / t_3 + \left[S_{děř} \cdot 0,2 \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_P^1 - T_P^2) \right] / (t_2 + t_3) \right\} = 8407 \text{ W}$$

Brána v úvahu vrstva tlustá 25 mm a pouze 20% plochy dělicí roviny mimo dutinu odlitku.

Teplo vyzářené do okolí z dělicí roviny v této fázi zanedbáváme.

Výkon nutný odvést chladícím médiem za dobu:

od vyjmutí odlitku do počátku nanášení separátoru:

$$Q_{\text{chlad}}^{\text{III}} = 20551 \text{ W}$$

Fáze IV:

Výkon (energie) kterou můžeme odebrat z masy kovu v dutině odlitku formy od počátku nanášení separátoru do ukončení nanášení:

$$Q_{f4} = \left[S_{od} \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{Pd}^3 - T_{Pd}^4) \right] \cdot 2 = 74732 \text{ J}$$

$$P_{f4} = \left[S_{od} \cdot 0,025 \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{Pd}^3 - T_{Pd}^4) \right] \cdot 2 / t_4 = 4982 \text{ W}$$

Brána v úvahu vrstva tlustá 25 mm

**Výkon odvedený nástřikem
separátoru:**

$$P_{násť} = \{ (V_{násť} / 1000) \cdot \rho_{násť} \cdot [c_{násť} \cdot (T_{vyp} - T_{násť}) + L_v] \cdot 0,5 \} / t_4 =$$

6553 W

Předpokládáme 50% účinnost odvodu tepla nástřikem separátoru.

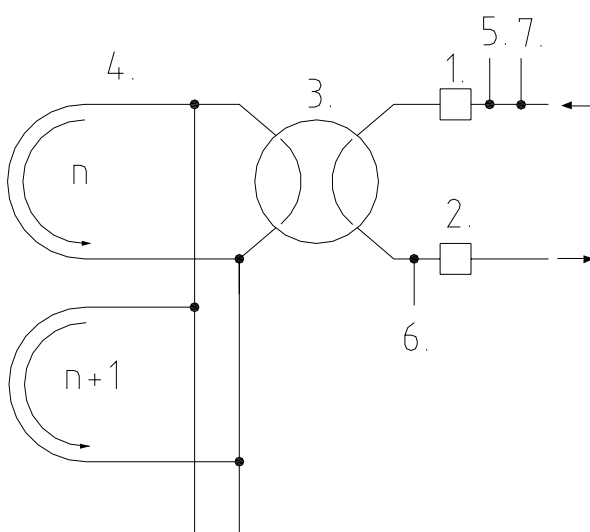
Výkon který je nutný dodat temperačním systémem:

$$Q_{temp}^{III} = 1571 \text{ W}$$

3 Matematický model zjednodušeně popisující zařízení k chlazení pracovních nástrojů

Funkce zařízení:

Zařízení slouží k zajištění odvodu přebytečného tepla z pracovního nástroje. Teplo je odváděno chladícím médiem (např. vodou), která protéká chladicími kanály vytvořenými v pracovním nástroji. Každý chladicí kanál nebo skupina je napojen na regulační okruh, který na základě skutečných teplot (chladicího média, tělesa formy) zajišťuje optimální odběr chladicího média a v případě následného využití odebrané tepelné energie co nejvyšší výstupní teplotu chladicího média.



Obr. 3.1 Schéma chladicího zařízení

Popis schématu:

1. ventil přívodu chladicího média,
2. ventil odvodu chladicího média,
3. směšovací ventil,
4. chladicí kanál,
5. teploměr na přívodu chladicího média,
6. teploměr na odvodu chladicího média,
7. tlakoměr přívodu chladicího média.

Při odvození výpočtu jsou brány v úvahu následující předpoklady:

- 1) Tento výpočetní model je zpracován pouze pro tu část pracovního cyklu, při kterém dochází ke vstřiku kovu do formy a jeho chlazení do okamžiku započetí otvírání formy. **Ve výpočtu tedy uvažujeme pouze tu část pracovního cyklu kdy je forma uzavřena.**
- 2) Měrné tepelné kapacity odlitku c a média c_A jsou konstantní.
- 3) Teplota odlitku je funkcí pouze času.
- 4) Součinitel prostupu tepla k je konstantní.
- 5) Přenos tepla prouděním okolního vzduchu kolem stroje a přestup tepla do rámu stroje zanedbáváme.
- 6) Fázovou přeměnu neuvažujeme
- 7) Chladicí schopnost hmoty kovu neuvažujeme.

Následující propočty jsou provedeny pomocí programu MS Excel vstupní parametry jsou brány jako příklad hodnot. Tento model je brán jako pomůcka pro ověření maximálního možného množství odebíraného tepla chladicím systémem pomocí následujících vstupních parametrů.

Propočet zařízení k chlazení pracovních nástrojů:

Vstupní parametry :

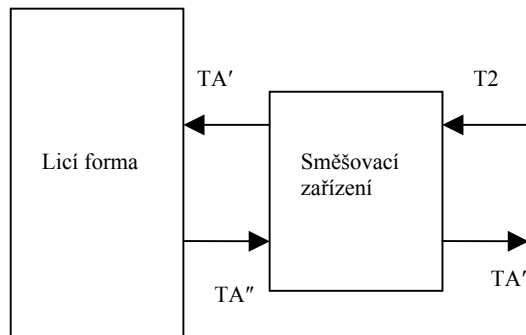
$T_{lití}$teplota odlitku na počátku ochlazování (v čase $t=0$)	680	[°C]
T_{od} ...teplota odlitku na konci ochlazování	340	[°C]
t ...doba ochlazování odlitku ve stroji	10	[s]
m ... hmotnost odlitku s vtokovou soustavou	0,75	[kg]
ϕ ...průměr chladicího kanálu	0,0127	[m]
Ldélka chladicího kanálu	3,3	[m]
Q ...průtok kapaliny v kanálu	0,5	[l/s]
h ... hloubka chladicího kanálu pod povrchem	0,019	[m]
T_2 ... vstupní teplota do směšovacího zařízení	20	[°C]

Použité materiálové konstanty :

c_{tuh}měrná tepelná kapacita materiálu odlitku (hliníku)	891	[J/kg.K]
c_A ...měrná tepelná kapacita chladicího média (vody)	4183	[J/kg.K]
λ_{oc} ...tepelná vodivost materiálu formy (oceli)	41,7	[W/m.K]
λ_A ... tepelná vodivost chladicího média (vody)	0,598	[W/m.K]
ρ ... hustota chladicího média (vody)	998	[kg/m ³]
ukinematická viskozita tekutiny (vody)	1,066E-06	[m ² /s]

Veličiny vypočítané:

T_A' ...teplota média na vstupu do chladicího kanálu formy	49,0	[°C]
T_A'' ...teplota média na výstupu z chladicího kanálu formy	52,6	[°C]
$\dot{m}_1$... hmotnostní tok média o teplotě T_A'' , které po smíchání s médiem o teplotě T_2 vstupuje zpětně do formy	0,355	[kg/s]
$\dot{m}_2$... hmotnostní tok média o teplotě T_2 , které po smíchání s médiem o teplotě T_A'' vstupuje zpětně do formy a zároveň je to hmotnostní tok média o teplotě T_A'' , které vystupuje ze směšovacího zařízení k dalšímu použití	0,044	[kg/s]



Tepelný propočet zařízení k chlazení pracovních nástrojů

Určení součinitele přestupu tepla α [W/m².K]

$$\alpha = \frac{\lambda_A \cdot Nu}{d} = 2258,526 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$$

Výpočet rychlosti proudění v kanále:

$$v = \frac{Q}{S} = 3,947050483 \text{ [m/s]}$$

kriteriální rovnice pro Nusseltovo číslo pro turbulentní proudění v kruhové trubce:

$$Nu = 0,665 \cdot Re^{0,31} \cdot Pr^{0,47} = 47,965$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = 47023,960$$

Prandtlovo číslo:

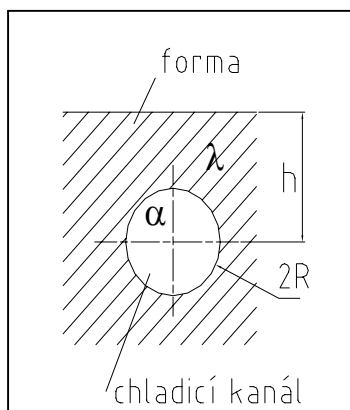
$$Pr = \frac{c_A \cdot \rho \cdot v}{\lambda_A} = 7,442$$

Určení součinitele prostupu tepla k (termického odporu R_T)

$$R_T = \frac{1}{k} = R_T / \lambda + R_T / \alpha = 0,002478 \rightarrow k = 403,5065827$$

termický odpor konduktivní:

pro případ - trubka v poloomezeném tuhém prostředí



$$R_T / \lambda = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{oc}} \cdot \ln \left(\frac{h}{R} + \sqrt{\left(\frac{h}{R} \right)^2 - 1} \right)$$

$$R_T / \lambda = 0,0020355$$

termický odpor konvektivní:

$$R_T / \alpha = \frac{1}{\alpha}$$

Tepelná bilance:

jedná se o děj nestacionární tj. teplota odlitku závisí na čase

pro popsany systém zřejmě platí:

$$dQ = W_A \cdot (T_A'' - T_A') \cdot dt \quad (1.)$$

$$dQ = k \cdot S \cdot \Delta T_{\ln} \cdot dt = k \cdot S \cdot \frac{T - T_A' - (T - T_A'')}{\ln \frac{T - T_A'}{T - T_A''}} \cdot dt \quad (2.)$$

kde průtok W_A :

$$W_A = \dot{M}_A \cdot c_A = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \cdot c_A = 2087,317$$

$$S = \pi \cdot d \cdot L = 0,131664 \text{ m}^2 \dots \text{plocha chladičoho kanálu}$$

z rovnic (1.) a (2.) dostaneme:

$$\frac{k \cdot S}{W_A} = \ln \frac{T - T_A'}{T - T_A''}$$

pro účinnost zařízení platí:

$$\varepsilon = \frac{T_A'' - T_A'}{T - T_A'} = \frac{T - T_A' - (T - T_A'')}{T - T_A'} = 1 - \frac{T - T_A''}{T - T_A'} = 1 - e^{-\frac{k \cdot S}{W_A}} \quad (3.)$$

Nestacionární tepelná bilance je:

$$dQ = m \cdot c_{tuh} \cdot dT = W_A \cdot (T_A'' - T_A') \cdot dt = W_A \cdot (T - T_A' - (T - T_A'')) \cdot dt \quad (4.)$$

Vyjádříme z rovnice (3.)

$$T - T_A'' = e^{-\frac{k \cdot S}{W_A}} \cdot (T - T_A')$$

a dosadíme do (4.) pak :

$$m \cdot c_{tuh} \cdot dT = W_A \cdot \left(T - T_A' - \left(e^{-\frac{k \cdot S}{W_A}} \cdot (T - T_A') \right) \right) \cdot dt$$

$$m \cdot c_{tuh} \cdot dT = W_A \cdot \left(T - T_A' \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot S}{W_A}} \right) \right) \cdot dt$$

po separaci proměnných :

$$\frac{dT}{T - T_A'} = \frac{W_A}{m \cdot c_{tuh}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot S}{W_A}} \right) \cdot dt$$

řešením této diferenciální rovnice prvního řádu s počáteční podmínkou $T(t=0)=T_{liti}$ teplotu odlitku na konci chlazení označíme T_{od} , pak dostaneme :

$$\frac{T_{od} - T_A'}{T_{liti} - T_A'} = \exp \left[-\frac{W_A \cdot t}{m \cdot c_{tuh}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot S}{W_A}} \right) \right] = \exp(X) \quad X = 0,784989742$$

po úpravě :

$$T_A' = \frac{T_{liti} \cdot \exp(X) - T_{od}}{\exp(X) - 1} = \underline{\underline{54,9}} \text{ } ^\circ\text{C} \text{vstupní teplota do chlad. kanálu}$$

a

$$T_A'' = T_{od} - e^{-\frac{k \cdot S}{W_A}} \cdot (T_{od} - T_A') = \underline{\underline{62,0}} \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ...výstupní teplota z chlad. kanálu}$$

Propočet směšovacího ventilu:

Potřebný průtok chladicího média formou k jejímu ochlazení, tok vycházející ze směšovacího ventilu:

$$\dot{M} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v =$$

0,499 kg/s

Q_1 ...teplo odevzdané teplejším médiem

Q_2 ...teplo přijaté studenějším médiem

$$Q_1 = Q_2$$

$$c_1 \cdot \dot{m}_1 \cdot (t_1 - t) = c_2 \cdot \dot{m}_2 \cdot (t - T_2) \quad \dots \quad c_1 = c_2 \quad (5.)$$

$$\dot{m}_1 \cdot (t_1 - t) = \dot{m}_2 \cdot (t - T_2)$$

index 1 teplejší médium

index 2 chladnější médium

t...výsledná teplota

kde: $t_1 = T_A''$

$$t = T_A'$$

T_2 ... vstupní teplota do směšovacího zařízení

$$T_2 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{M} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (6.) \quad \begin{array}{l} \dot{m}_{1,2} \dots \dots \text{hmotnostní toky [kg/s]} \\ \text{vstupující do ventilu} \end{array}$$

po dosažení vztahu (6.) do (5.) a úpravě dostaneme :

$$\dot{m}_1 = 0,413908 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_2 = 0,085092 \text{ kg/s}$$

4 Závěr

Podle očekávání má největší vliv na chladicí schopnost především doba činnosti chlazení a plocha chladících kanálů. Zanedbání tepla uvolněného fázovou přeměnou je kompenzováno jeho odvodem masou kovu formy. Uvedené poznatky jsou ověřovány na modelovém zařízení ve výrobním družstvu ELAP Světlá Hora. Jako zdroj tepla, nahrazující hmotu roztaveného kovu, je použito plynových hořáků.

5 Literatura

- [1] Nová, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách, Liberec, TU v Liberci 2002
- [2] Kutateladze, S.S., Borišanskij, V.M.: Příručka sdílení tepla, Praha, SNTL 1962.
- [3] Šesták, J., Žitný, R.: Tepelné pochody II, Praha, ČVUT 1997.
- [4] Nožička, J.: Sdílení tepla, Praha, ČVUT 1998
- [5] ELAP v.d., ČR, <http://www.elapsh.cz>