



Vliv nastavení chladicího okruhu na teplotu povrchu jader vysokotlaké formy

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Kryštof Stieber**
Vedoucí práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kryštof Stieber**
Osobní číslo: **S16000296**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Vliv nastavení chladicího okruhu na teplotu povrchu jader vysokotlaké formy**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s technologií výroby odlitků vysokotlakým litím.
2. Zaměřte se na konstrukci temperačního systému vysokotlakých forem a zejména na možnosti chlazení jejich jader.
3. Prostudujte problematiku tepelné bilance tlakové lící formy.
4. Ve spolupráci s firmou KovolisHedvikov a.s. pro vybranou vysokotlakou formu proveďte experimenty zaměřené na stanovení vlivu nastavení chladicího okruhu na teplotu povrchu jádra.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

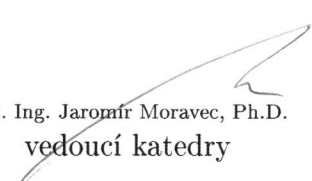
- [1] RAGAN, E. a kol. *Liatie kovov pod tlakom*, 1. vyd., Prešov: Vydavateľstvo Michala Vaška, 2007. ISBN 978-80-8073-979-9.
[2] VALECKÝ, J. a kol. *Lití kovů pod tlakem*. 1. vyd., Praha: SNTL, 1963.
[3] NOVÁKOVÁ, I. *Tepelné a tlakové poměry v soustavě odlitek-forma při vysokotlakém lití slitin hliníku s křemíkem*. Liberec, 2006. *Disertační práce. Technická univerzita v Liberci*.
[4] ŠTROBACH, V. *Vliv teplotních režimů formy na jakost vysokotlakých odlitků*. Liberec, 2011. *Doktorská disertační práce. Technická univerzita v Liberci*.
[5] Časopisy: Slévárenství, Giesserei, atd.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Iva Nováková, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. ledna 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

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

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

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

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

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům slévárny Kovolis Hedvikov a.s. za ochotu a pomoc při realizaci experimentů. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině za vytrvalou podporu během mého studia na vysoké škole.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá stanovením vlivu nastavení chladicího okruhu na teplotu jader u vybrané vysokotlaké licí formy. Teoretická část se věnuje popisu formy se zřetelem na způsoby chlazení a temperování tvarových částí a jader, dále pak metodám ošetření líce formy a tepelnými poměry v soustavě odlitek-tlaková licí forma. Experimentální část probíhala ve spolupráci s firmou Kolovis Hedvikov a.s. a zabývá se sledováním vlivu doby chlazení a průtoku chladicího média na povrchovou teplotu jader.

Klíčová slova

vysokotlaké lití, vysokotlaká forma, temperační systém, chlazení jader, bodové chlazení, chladicí okruh

Abstract

The diploma thesis deals with the influence of the cooling circuit setting on the temperature of the cores at the selected high pressure casting mold. The theoretical part of the thesis inquires into methods of cooling and tempering of the shaped parts and cores, as well as the methods of spray applying mold-release agent to a die casting mold and the heat ratios in the die casting mold. Experimental part was carried out in collaboration with Kovolis Hedvikov a.s. and is concerned with the monitoring of the depending cooling time and the flow of the cooling medium on the surface temperature of the cores.

Key words

high pressure die casting, high pressure die casting mold, cooling system, cores cooling, spot cooling, cooling circuit

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	7
1. ÚVOD	10
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2.1 Charakteristika technologie vysokotlakého lití	12
2.2 Tlaková licí forma	13
2.3 Temperační systém formy	16
2.3.1 Konvenční temperační systém.....	17
2.3.2 Chlazení jader a tenkých míst tvarových vložek.....	20
2.4 Postřik líce tlakové formy	26
2.4.1 Vodou ředitelné dělicí prostředky	27
2.4.2 Postřikové systémy pro vodou ředitelné dělicí prostředky	30
2.4.3 Práškové separátory.....	34
2.4.4 Dělicí prostředky na bázi oleje.....	35
2.5 Přenos tepla v soustavě odlitek - tlaková licí forma.....	36
2.5.1 Tepelná bilance licího cyklu.....	38
2.5.2 Teplo předané odlitkem.....	39
2.5.3 Teplo odvedené z formy.....	41
2.6 Měření teploty povrchu formy.....	49
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	53
3.1 Popis experimentu	53
3.2 Slitina.....	54
3.3 Tlakový licí stroj.....	55
3.4 Chladicí agregát.....	56
3.5 Tlaková licí forma	57
3.6 Postřik líce formy	61
3.7 Měření povrchové teploty jader termokamerou	65

3.8	Měření povrchové teploty jader při změně doby chlazení chladicího okruhu	67
3.9	Měření povrchové teploty jader při změně průtoku vody chladícím okruhem	70
3.10	Analýza naměřených hodnot povrchové teploty jader	72
4.	ZÁVĚR.....	83
5.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY	85
	PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

c	- střední hodnota rychlosti proudění v průřezu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
c_F	- měrná tepelná kapacita materiálu formy [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
c_L	- měrná tepelná kapacita taveniny [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
c_p	- měrnou tepelnou kapacitu postřiku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
c_s	- měrná tepelná kapacita materiálu v tuhém stavu [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
c_t	- měrná tepelná kapacita temperačního média [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
ČSN	- československá státní norma,
d	- hydraulický rozměr [m],
$\emptyset D$	- průměr temperačního kanálu [m],
$D:S$	- poměr vzdálenosti k velikosti plochy [-],
E	- modul pružnosti v tahu [MPa],
E_p	- energie postřikového paprsku [$\text{Pa}\cdot\text{m}^2$],
HB	- tvrdost podle Brinella,
HRC	- tvrdost podle Rockwella,
HV	- tvrdost podle Vickerse,
IR	- infračervené záření,
l	- vzdálenost temperačního kanálu od líce formy [m],
L_{KR}	- měrné latentní krystalizační teplo taveniny [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$],
L_{vp}	- měrné skupenské teplo vypařování kapalně fáze z postřiku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$],
m	- hmotnost taveniny [kg],
m_p	- hmotnost odpařeného postřiku [kg],
p	- tlak vzduchu [Pa],
PVD	- physical vapour deposition (fyzikální depozice z plynné fáze),
Pr	- Prandtlovo číslo [-],
q_{ZDR}	- tepelný výkon vnitřních zdrojů [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$],
Q	- teplo, celkové teplo uvolněné odlitkem [J],
Q_p	- teplo odvedené postřikem líce formy [J],
$Q_{píst}$	- teplo odvedené pístem stroje [J],
Q_{proud}	- teplo odvedené do okolí prouděním [J],
$Q_{PŘ}$	- teplo uvolněné z přehřáté taveniny [J],

Q_{KR}	- teplo uvolněné při tuhnutí taveniny [J],
Q_{CHL}	- teplo uvolněné při chladnutí odlitku [J],
$Q_{TŘ}$	- teplo vzniklé třením pístu [J],
$Q_{sál}$	- teplo odvedené do okolí sáláním [J],
Q_{stroj}	- teplo odvedené vedením do rámu stroje [J],
Q_t	- teplo odvedené temperačním systémem [J],
Re	- Reynoldsovo číslo [-],
Re_{krit}	- kritická hodnota Reynoldsova čísla [-],
$R_{p0,2}$	- smluvní mez kluzu [MPa],
S	- styčná plocha formy a odlitku,
S_{FO}	- plocha styku formy s okolím [m^2],
S_k	- teplosměnný povrch temperačního kanálu [m^2],
$S_{sál}$	- plochu sálajícího tělesa [m^2],
S_{st}	- plocha styku formy s rámem stroje [m^2],
t	- čas [s],
t_{cykl}	- čas licího cyklu [s],
T	- teplota [K],
T_F	- teplota formy [$^{\circ}C$],
T_{FS}	- teplota vnějšího povrchu formy, který je ve styku se strojem [$^{\circ}C$],
T_L	- teplota likvidu [$^{\circ}C$],
T_S	- teplota solidu [$^{\circ}C$],
$T_{lití}$	- teplota lití [$^{\circ}C$],
T_{KR}	- teplota krystalizace taveniny [$^{\circ}C$],
T_{tms}	- teplota stěny temperačního kanálu [$^{\circ}C$],
T_m	- teplota temperačního média [$^{\circ}C$],
T_{ok}	- teplota okolí [$^{\circ}C$],
T_{PO}	- povrchová teplota odlitku [$^{\circ}C$],
T_{PF}	- povrchová teplota formy [$^{\circ}C$],
T_{PS}	- teplota povrchu rámu stroje, který je ve styku s formou [$^{\circ}C$],
T_{sp}	- teplotu povrchu sálajícího tělesa [$^{\circ}C$],
T_{pp}	- počáteční teplotu postřiku [$^{\circ}C$],
T_v	- teplotu vypařování kapalné fáze z postřiku [$^{\circ}C$],
ΔT_1	- teplotní spád mezi stěnou formou a stěnou temperačního kanálu [$^{\circ}C$],

ΔT_2	- teplotní spád mezi stěnou temperačního kanálu a temperačním médiem [$^{\circ}\text{C}$],
V_1	- rychlost předplnění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
V_2	- plnicí rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
x,y,z	- souřadnice systému [m],
α	- součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],
α_p	- součinitel přestupu tepla prouděním [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],
α_s	- součinitel přestupu tepla sáláním [$\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$],
α_t	- součinitel přestupu tepla mezi lícem formy a temperačním médiem [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
α_v	- součinitel přestupu tepla z povrchu formy do rámu stroje [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$],
ε	- emisivita [-],
ν	- kinematická viskozita média [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$],
λ	- součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
$\lambda_{x,y,z}$	- součinitel tepelné vodivosti v jednotlivých osách [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
ρ	- hustota materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
σ	- Stefan – Boltzmannova konstanta ($5,67\cdot 10^8$ [$\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-4}$]).

1. ÚVOD

Technologie tlakového lití patří mezi nejrozšířenější technologii výroby odlitků, jejichž odbytištěm je především automobilový průmysl. Právě v automobilovém průmyslu se kladou vysoké nároky na jakost vyráběných dílů, což vede i subdodavatele k neustálé potřebě inovací, zlepšování a zavádění nových technologií.

Jedním z důležitých faktorů ovlivňující výslednou jakost odlitků jsou tepelné poměry v soustavě odlitek – forma – okolí. Ve slévárnách tlakového lití se lze setkat s dvěma přístupy k regulaci teploty formy. Jeden způsob využívá temperační systém nejprve k přehřevu formy na pracovní teplotu a následně k regulaci teploty formy během lití. U druhého způsobu jsou pouze tvarové části a jádra bodově chlazeny. V tomto případě je před samotnou výrobou odlitků forma nahřívána na pracovní teplotu nalitím několika zkušebních kusů.

Během samotné výroby je nutné ovlivňovat proces tuhnutí a chladnutí odlitku tak, aby nedocházelo k přehřívání formy, vzniku vad na odlitku (staženiny, nedolití, aj.) a došlo ke zkrácení doby licího cyklu. Za tímto účelem je potřeba regulovat teplotu formy. K regulaci teploty formy slouží temperační kanály, kterými proudí médium. Požadovanou teplotu média zajišťují termoregulační zařízení. V dnešní době nabízí řada výrobců termoregulační zařízení, které umožňuje regulaci teploty média, průtoku a nastavení doby chlazení jednotlivých okruhů.

Neustálý vývoj a nástup výpočetní techniky dnes umožňuje optimální návrh temperačního systému pomocí simulačních programů. Díky inovativním technologiím (bodové chlazení, Jet cooling, chlazení CO₂) je navíc možné chladit i tenké části forem a jádra malých průřezů. Vhodným nastavením parametrů termoregulačních okruhů lze docílit usměrnění tepelných toků s minimálními teplotními gradienty v rámci povrchu tvarové dutiny formy, snížení tepelného namáhání formy a zabránění koroznímu působení hliníku na líc formy. Díky tomu nedochází k nadměrnému ztěžování materiálu formy, což má vliv na její životnost.

Požadavky kladené na temperační systém jsou ovlivňovány i vývojem nových separačních prostředků, kterými je v každém licím cyklu ošetřen líc formy.

Problematikou temperačních systémů tlakových licích forem se zabývá i tato diplomová práce. Cílem předložené práce je stanovení vlivu průtoku temperačního média a doby chlazení na změnu povrchové teploty jádra vybrané tlakové licí formy.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Charakteristika technologie vysokotlakého lití

Základní charakteristikou technologie vysokotlakého lití je, že odlitek vzniká při vysokých rychlostech plnění formy taveninou a k tuhnutí ve formě dochází při vysokém tlaku tzv. dotlaku. [1]

Historie této technologie sahá do druhé poloviny 19. století, kdy se odlévalo na strojích s teplou komorou. Velký rozvoj tlakového lití umožnil Ing. Josef Polák se svými spolupracovníky, kdy ve 20. letech minulého století vynalezl technologii tlakového lití se studenou vertikální komorou a zároveň se stal prvním výrobcem strojů pracujících na tomto principu. Tlakovým litím lze vyrábět odlitky ze slitin hliníku, hořčíku a mědi. V největším objemu se dnes touto technologií odlévají slitiny hliníku. [1]

Vzhledem k vysokým finančním nárokům na stroje a výrobu forem je technologie tlakového lití výhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu. K výhodám této technologie patří [1] [2]:

- menší nároky na metalurgické ošetření taveniny,
- možnost výroby odlitků s nízkými rozměrovými tolerancemi,
- hladký povrch odlitků,
- jemnozrnná struktura a s tím spojené dobré mechanické vlastnosti,
- možnost výroby tenkostěnných odlitků,
- možnost výroby tvarově složitých odlitků,
- možnost předlití i velmi malých otvorů.

K nevýhodám patří:

- velké finanční nároky na lící stroj a další zařízení,
- velké náklady na výrobu formy,
- nízká tažnost odlévaných slitin,
- maximální velikost odlitku omezena velikostí lícího stroje,
- vnitřní poretita odlitků.

Při zhotovení odlitku tlakovým litím vstupuje do procesu výroby mnoho faktorů. Na strukturu a tedy mechanické vlastnosti odlitku mají vliv zejména vlastnosti odlévané slitiny, technologické parametry a akumulční schopnost tlakové lící formy. [1]

Samotná tvorba odlitku od okamžiku nalití kovu do formy až po vyjmutí odlitku trvá desítky vteřin. Lící cyklus pro zhotovení každého odlitku se skládá z těchto kroků [3]:

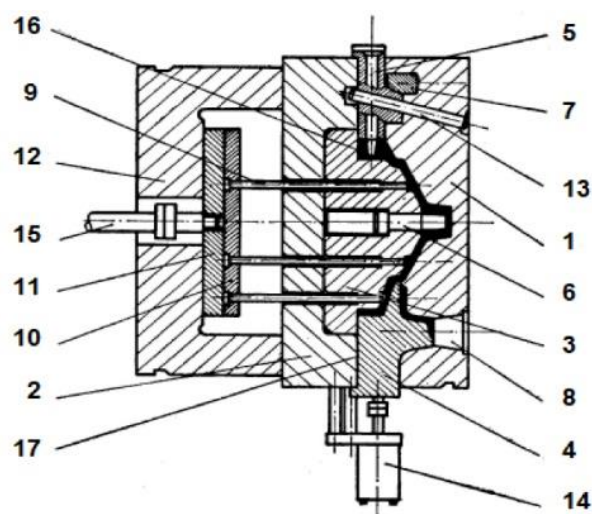
1. Nanesení separační látky na líc tlakové lící formy včetně jader.
2. Zajetí pohyblivých jader (jsou-li přítomna), zavření formy pomocí uzavíracího mechanismu lícího stroje a namazání pístu.
3. Nadávkování taveniny z udržovací pece do lící komory.
4. Vyplnění dutiny formy taveninou – fáze lisování.
5. Odebrání tepelné energie odlitku formou a jeho ztuhnutí ve formě za působení dotlaku.
6. Otevření formy a vyjetí pohyblivých jader (jsou-li přítomna).
7. Vyjmutí odlitku z formy pomocí vyhazovacího systému a robota.

Mezi nejdůležitější technologické parametry lícího stroje patří parametry plnění dutiny formy tj. rychlost předplnění V_1 , plnicí rychlost V_2 a bod přepnutí mezi rychlostmi V_1 a V_2 . V poslední fázi lícího cyklu má velký význam dotlak. Vysoká hodnota dotlaku zaručuje dolití odlitků, zmenšuje objem uzavřeného vzduchu v odlitku a má tak pozitivní vliv na pevnost a těsnost odlitků, zároveň ale vysoká hodnota dotlaku snižuje životnost formy a zvětšuje prostoje tlakových lících strojů. [1]

Mezi další důležité technologické parametry patří také teplota taveniny a teplota líce formy.

2.2 Tlaková lící forma

Tlaková lící forma se skládá z pevné a pohyblivé části. Schéma tlakové lící formy je vidět na obr. 2-1.



Obr. 2-1 Hlavní části tlakové lící formy: 1 - pevná část formy, 2 - pohyblivá část formy, 3 - vložka pohyblivé části formy, 4 - protivtoková vložka, 5 - pohyblivé jádro rovnoběžné s dělicí rovinou, 6 - pevné jádro kolmé na dělicí rovinu, 7 - opěrná vložka zámku jádra, 8 - dutina pro lící komoru, 9 - vyhazovač, 10 - vodící deska vyhazovačů, 11 - opěrná deska vyhazovačů, 12 - stolička, 13 - šikmý kolík pro pohyblivé jádro, 14 - hydraulický tahač jádra, 15 - pístnice hydraulického vyhazovacího válce, 16 - dutina formy, 17 - dělicí rovina [4]

Pevná část je pomocí mechanických upínek upnuta na pevný třmen lícího stroje. Pohyblivá část je upnuta na pohyblivý třmen, který svým pohybem po vodících sloupkách umožňuje otevírat a zavírat formu. Na pohyblivé části je také upnuta stolička s vyhazovacím mechanismem. [1]

Slévárenská forma pro vysokotlaké lití se obvykle skládá z těchto základních konstrukčních dílů: rámu pevné a pohyblivé části formy, tvarových a protivtokových vložek, jader, tahačů, vedení, vyhazovačů a vlnovců. [5]

Pro méně namáhané části formy, které nepřicházejí do styku s roztaveným kovem, jako je rám nebo vyhazovače, se používají konstrukční legované oceli. [5]

Pracovní dutina formy může být tvořena jedním dílem, ale častěji je forma vložkovaná. V takovém případě tvoří dutinu několik vyměnitelných vložek, které jsou uloženy v rámu. V případě poškození dutiny postačí vyměnit pouze opotřebovanou vložku, čímž se prodlužuje životnost formy. [5]

Pohyblivá jádra jsou obvykle uložena v pohyblivé části formy. Jejich pohyb je ovládán mechanicky pomocí šikmého kolíku nebo pomocí hydraulického tahače. [5]

Značně namáhané jsou ty části formy, které jsou v přímém styku s taveninou, tedy [6]:

- tvarové části formy (tvarové vložky, pevná a pohyblivá jádra),
- protivtokové vložky,
- části odvodu taveniny formy – vlnovce.

Materiál těchto částí formy je vystaven cyklickému mechanickému, tepelnému a chemickému namáhání. Pro splnění vysokých nároků na rozměrovou přesnost odlitků jsou na materiál vložek a jader kladeny následující požadavky. [7]

Materiál musí mít ***dobré mechanické a plastické vlastnosti*** za normálních i zvýšených teplot. Požaduje se nejen vysoká pevnost a tvrdost, ale i vynikající houževnatost a tažnost. [7]

Aby bylo možné dosáhnout vysokých tvrdostí, musí mít materiál ***vysokou prokalitelnost***. Materiál formy musí vykazovat také ***odolnost proti popouštění*** za provozu, jinak hrozí snížení mechanických vlastností (pevnosti, tvrdosti) a může dojít k plastickým deformacím během lití, což má vliv na rozměrovou přesnost odlitků. [7]

Dalším požadavkem je ***odolnost proti korozi*** roztavenými kovy. Při styku taveniny s lícem formy může docházet k rozpuštění některých fází tvořících základní matici v tavenině. Zároveň může docházet k difuzi prvku z taveniny do materiálu formy. Intenzita koroze je dána teplotou, dobou a velikostí styčné plochy formy a odlitku. [7]

Slitiny hliníku vytvářejí při styku s železem křehké intermetalické fáze $FeAl_2$, $FeAl_3$ a Fe_2Al_3 . Při tepelně – mechanickém namáhání tyto fáze přispívají k tvorbě trhlinek a také zapříčiňují lepení taveniny na líc formy. [7]

Dále se u materiálu tvarových částí formy požaduje **odolnost proti abrazi a erozi**, ke kterých dochází při plnění dutiny formy taveninou. [7]

V důsledku nevhodné konstrukce vtokové soustavy může docházet ke kavitaci, kdy neustálý vznik a zánik kavít mechanicky narušuje líc formy. Z tohoto důvodu se požaduje **odolnost proti kavitaci**. Lépe kavitaci odolávají oceli s homogenní matricí o maximální možné tvrdosti. Přítomnost karbidů v matrici odolnost snižuje. [7]

Mezi další požadavky na materiál tvarových částí patří rozměrová stálost, dobrá leštitelnost a vysoká tepelná vodivost. [7]

Nárokům na materiál vložek a jader nejlépe vyhovují oceli určené k práci za tepla. S ohledem na uvedené požadavky je materiál tvarových částí běžně legován těmito prvky: Si, Cr, Mo, V, Mn, Co. Dosažení výše uvedených vlastností napomáhá také tepelné zpracování a povrchové úpravy. V rámci tepelného zpracování je materiál žhán (žhánání na měkko, žhánání na snížení vnitřního pnutí), kalen (na vzduchu, v oleji nebo v solné lázni) a popuštěn. V tab. 2-1 jsou uvedeny některé oceli používané pro tvarové části tlakových licích forem. [7]

Tab. 2-1 Materiály tvarových částí tlakové lící formy [8] [9] [10]

Obchodní označení oceli	Chemické složení [hm%]					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Uddeholm Dievar	0,35	0,2	0,5	5,0	2,5	0,6
Uddeholm Vidar Superior	0,36	0,3	0,75	5,0	1,3	0,5
QRO 90 Supreme	0,38	0,3	0,75	2,6	2,25	0,9
THYROTHERM 2343 EFS/2343 EFS SUPRA	0,4	1,0	-	5,3	1,3	0,4
Vaco 180	C	Co	Ni	Mo	Ti	ostatní
	<0,03	9,0	18,5	5,0	0,75	Al,Br,Zr

Aby se zvýšila odolnost proti korozi a opotřebení a zlepšili únavové vlastnosti, provádí se u částí na formy povrchové úpravy. Nitridace umožňuje získat velmi tvrdý povrch (až 1200 HV) při zachování houževnatého jádra. Povrch formy se kromě dusíku může sytit dalšími prvky jako je síra (sulfonitridace), nebo uhlík (karbonitridace). [7] [8]

Spolu se sycením povrchu formy se nanášejí povlaky PVD a PACVD. Zejména se povlakuje PVD povlaky $TiAlCrN$ a $TiAlN$ nebo PACVD povlakem TiB_2 . [7]

Důležitou částí formy jsou vlnovce. Pro jejich správnou funkci je potřeba, aby měl materiál vysoký součinitel tepelné vodivosti. Pro materiál vlnovců se tak mohou používat kalené ocele, bronz (hliníkové, beryliové) nebo speciální materiály. [6]

Vývojovým trendem v tlakových slévárnách je výroba velmi opotřebovávaných dílů technologií laserového sintrování (Laser sintering). Touto technologií lze vyrábět a opravovat jádra, protivtokové vložky nebo vlnovce. Používají se materiály vhodné k sintrování, zejména oceli (např. ocel 1.2709). Jedná se o tzv. maraging oceli, což jsou vysokolegované oceli, které mají velmi nízký obsah uhlíku (méně než 0,03 % C). Legurami jsou Ni (okolo 18 %), Co (okolo 9 %), Mo (okolo 5 %), Ti a Al (oba pod 1 %). Tyto oceli dosahují vynikajících mechanických vlastností: pevnost v tahu dosahuje hodnoty i nad 2000 MPa, smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ při teplotě 500 °C okolo 1000 MPa, tažnost 6 až 10 % a tvrdost 51 - 55 HB. [11]

K udržení tepelné rovnováhy formy se využívá síť temperačních kanálů. Těmi proudí médium, které snižuje teplotní rozdíl mezi vrstvami v různé hloubce materiálu formy, čímž snižuje namáhání materiálu formy. K zabránění korozního působení taveniny na materiál formy slouží postřik dělicího prostředku. O temperačním systému a postřiku líce formy blíže pojednává kapitola 2.3 resp. kapitola 2.4.

2.3 Temperační systém formy

Jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, jedním z činitelů ovlivňující teplotní pole tlakové licí formy je její temperační systém. Ten by měl zabezpečit optimální teplotní podmínky během licího cyklu. [12]

Působením temperačního systému je forma nahřátá na pracovní teplotu, čímž se snižuje teplotní interval mezi povrchem formy a taveninou a nedochází k tak velkým tepelným šokům. Tím se zabraňuje tvorbě povrchových trhlin a dochází ke zvýšení životnosti formy. [12]

Temperační systém také významně ovlivňuje jakost odlévaných dílů. Snižuje vnitřní pnutí, usměrňuje tuhnutí odlitku a zvyšuje jeho rozměrovou stabilitu. [12]

Důležité je, aby forma nebyla přehřívána, kdy by mohlo dojít k vyžhání materiálu formy a snížení tvrdosti. S rostoucí teplotou líce formy dochází vlivem vysoké afinity hliníku k železu k tvorbě intermetalických fází. Tento jev se označuje jako nalepování hliníku. Vlivem teplotní roztažnosti materiálu formy vzniká rozměrová nestabilita a s tím související zadírání pohyblivých jader a vyhazovačů. [2] [12]

Teplotní stabilitu formy zajišťuje médium, které během licího cyklu proudí temperačními kanály. V závislosti na možnostech termoregulačního zařízení lze u média

regulovat jeho teplotu, průtok a dobu trvání tohoto průtoku. Podle teploty média lze hovořit o chladicím nebo temperačním systému.

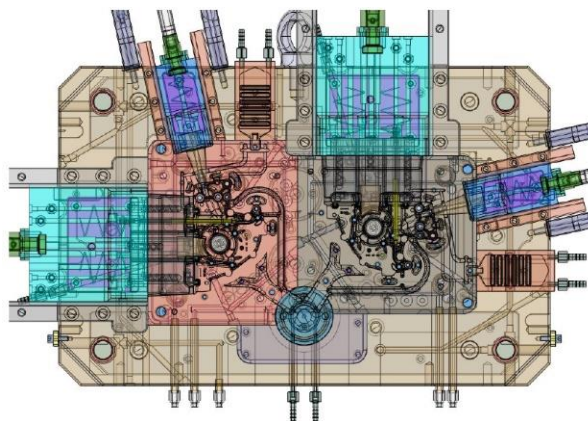
V temperačních systémech se jako temperační resp. chladicí média nejvíce používají olej a voda. V menší míře se využívají kapalný CO₂, v tepelných trubcích potom metylalkohol, difenyl aj. Každé médium má jiné tepelné vlastnosti a tedy i rozdílnou schopnost odvodu tepla. [12]

V případě vodního média se jedná o demineralizovanou nebo destilovanou vodu z toho důvodu, aby nedocházelo k zanášení kanálů, čímž by se snižovala účinnost temperačního systému. Z tohoto důvodu se do média přidávají antikoroziční prostředky. Hlavními výhodami vody jsou vysoký chladicí výkon, nižší pořizovací náklady na médium a snazší likvidace odpadu. Vysoký chladicí výkon vody umožňuje snížení doby postřiku. Protože voda v systému proudí za zvýšeného tlaku, může být její teplota i 180 °C. Vodou je vhodné temperovat resp. chladit místa s větším objemem tuhacího kovu (např. vtok, tableta), nebo místa, která se přehřívají (tenká jádra). [13] [14]

Olejová média mají oproti vodním nižší chladicí výkon, z toho důvodu jsou účelná v případě tenkostěnných odlitků. Používají se pro temperaci vložek, rámu, jader. [13] [14]

2.3.1 Konvenční temperační systém

Konvenční temperační systém je tvořen kruhovými kanály, které jsou vzájemně pospojovány hadicemi. Tyto kanály jsou vyvrtány rovnoběžně s dělicí rovinou a to jak v rámu a tvarových vložkách, tak i v jádrech větších rozměrů. Aby se zabránilo velkým teplotním rozdílům v různých místech formy, bývá temperační systém rozdělen do temperačních okruhů. V každém okruhu může proudit médium o jiné teplotě. V praxi bývají zapojeny samostatné okruhy pro jednotlivá jádra, rám, vložky, vtok, a to zvláště pro pohyblivou a pevnou část formy. K usměrnění toku média se kromě hadic používají přepážky, ucpávky, zátky a koncovky. Schéma rozmístění kanálů v rámu a vložkách je vidět na obr. 2-2. [12] [15]



Obr. 2-2 Schéma vrtání jednotlivých temperačních kanálů [12]

Konvenční temperační systémy jsou regulovány termoregulačními zařízeními, které vyrábí např. firmy Thermobiehl Apparatebau, Robamat nebo Regloplas. Tato zařízení jsou buď jednookruhová, nebo dvouokruhová a pracují s vodním nebo olejovým médiem. Termoregulační systém některých zařízení umožňuje ohřev olejového média až do 350 °C, teplota vody (pod zvýšeným tlakem) může dosáhnout až 200 °C. Některé typy zařízení disponují funkcemi pro měření a regulaci průtoku média, odvápňovacím systémem, možností sacího provozu (při netěsnostech na formě), integrovaným vstřikovacím systémem k ochraně proti korozi (v případě vodního média) a systémem pro kontrolu úniku média. Výkon cirkulačního čerpadla dosahuje u těchto zařízení až 100 l/min a maximální tlak na okruh až 10 barů. [16] [17]

Pokud je celá forma chlazená pouze vodou pomocí bodového chlazení, je temperační systém tvořen kanály vrtanými kolmo k dělicí rovině. V takovém případě je potřeba chladit více nezávislými okruhy. K tomu se využívá sekundární chladicí systém. Jedná se o systém s uzavřeným okruhem chladicí vody, který distribuuje vodu do jednotlivých okruhů, následně ji ochlazuje a filtruje. Zařízení sestává z těchto základních částí: nádrž s vodou, čerpadlo, chladič, pískový filtr a ovládací panel.

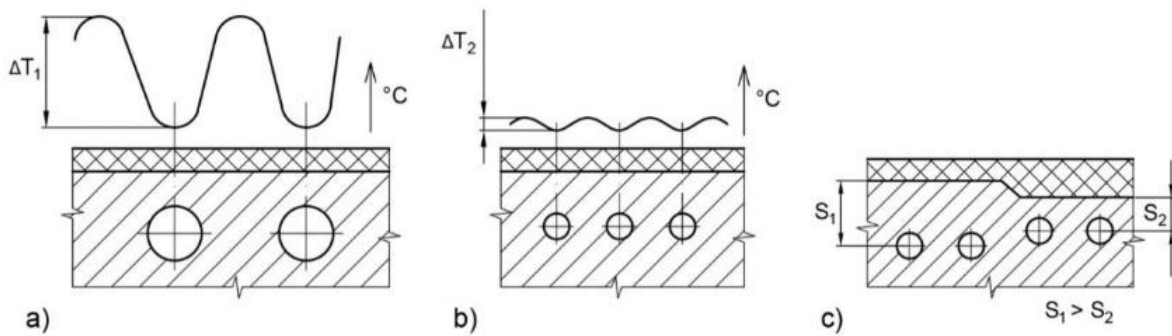
Pro zajištění požadované funkce temperačního systému tj. zaručení rovnováhy tepla přivedeného taveninou a tepla odvedeného, je důležité dodržovat správné zásady konstrukce temperačního systému. Jedná se o tyto pravidla [18]:

- Temperační kanály umisťovat v blízkosti tvarové dutiny formy s ohledem na požadavek dostatečné tuhosti,
- Vzdálenost kanálu od povrchu formy by měla být alespoň jeden a půl násobku průměru kanálu. Doporučený rozměr kanálu v závislosti na tloušťce stěny odlitku udává tab. 2-2,

Tab. 2-2 Doporučený rozměr kanálu v závislosti na tloušťce stěny odlitku [19]

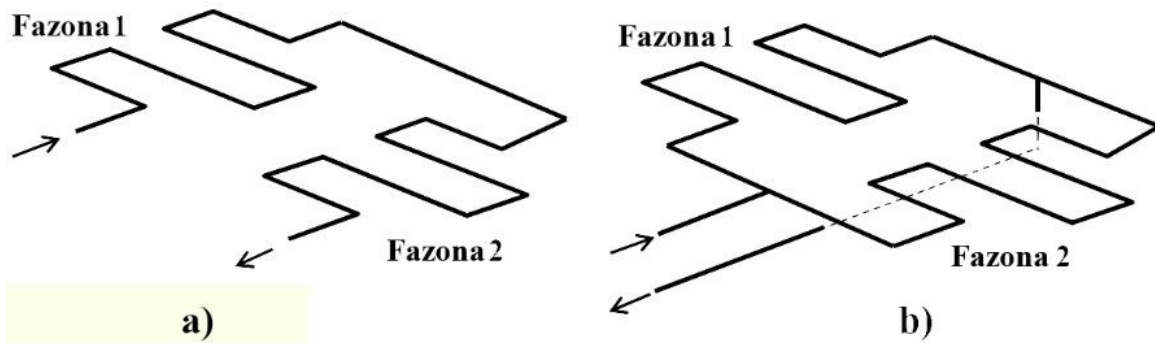
Tloušťka stěny odlitku [mm]	Průměr kanálu [mm]
do 2	od 8 do 10
do 4	od 10 do 12
do 6	od 12 do 15

- Je výhodnější větší počet kanálů menšího průřezu, jak ukazuje obr. 2-3,



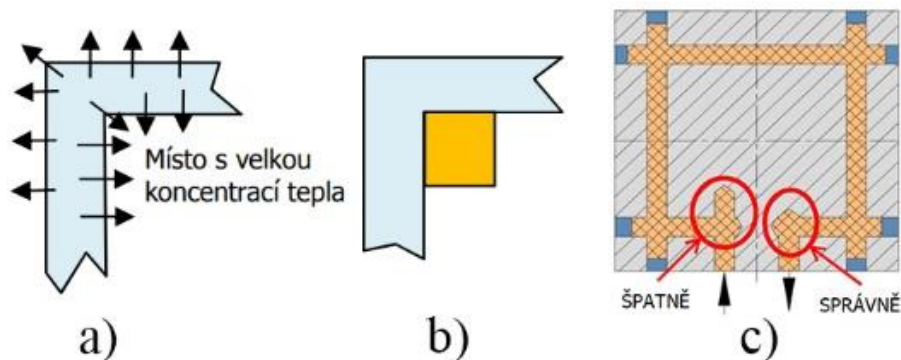
Obr. 2-3 Vliv rozložení temperačních kanálů na povrchovou teplotu formy [20]

- V případě ohřevu formy má médium proudit od nejchladnějšího místa k teplejšímu, v případě chlazení naopak,
- Zvláště u kanálů malých průřezů je důležité zbavit médium nečistot, jinak by docházelo k zanášení kanálů,
- Pro účinný přenos tepla musí médium proudit turbulentně, což zajišťuje vyšší drsnost povrchu kanálů,
- Je-li příliš vysoký rozdíl vstupní a výstupní teploty média příliš vysoký, je lépe rozdělit chlazení do více okruhů,
- Je-li forma vícenásobná, měla by být každá fazona (dutina) chlazen separátně, pokud jsou chlazen společným okruhem, je výhodnější paralelní zapojení fazon, viz obr. 2-4,



Obr. 2-4 Zapojení více fazon v jednom okruhu a) sériové zapojení, b) paralelní zapojení [18]

- Jednotlivé okruhy by měli mít totožnou geometrii temperačních kanálů,
- Médium musí zatéct do všech míst okruhu. Nežádoucí jsou slepá místa, kde médium neproudí a hrozí zde usazování nečistot,
- V přehřívávaných místech, jako jsou např. vnitřní kouty, je možné použít vložky z vysoce vodivého materiálu, viz obr. 2-5.



Obr. 2-5 a) Chlazení ostrých koutů, b) Použití tepelně vodivé vložky, c) Temperační kanály ve formě [18]

Minimální vzdálenost kanálů ale musí být taková, aby ve formě nedocházelo vlivem velkých teplotních rozdílů taveniny a média k nadměrnému pnutí. Vlivem tohoto pnutí by mohly vznikat trhliny, kterými by se médium mohlo dostat do dutiny formy, což by vedlo k porositě odlitků. Další faktory ovlivňující konstrukci temperačních kanálů jsou velikost tlaku v dutině formy nebo maximální přípustný rozdíl teploty v daném místě formy. [2] [12]

Temperační kanály jsou hadicemi spojeny s termoregulačním zařízením, které řídí průtok a teplotu média. Před začátkem lití termoregulační zařízení formu přehřeje na provozní teplotu a během lití formu udržuje na stálé teplotě. [14]

Konvenčním temperačním systémem je problém zajistit chlazení tvarově komplikovaných nebo tenkých jader, jejichž povrch je z velké části obtékán taveninou. [12]

Pro návrh temperačního systému existují orientační podklady a simulační software, ale vlastní konstrukce a dimenzování závisí na zkušenostech konstruktéra. V praxi je k vyladění správné funkce temperačního systému potřeba řada zkoušek. Z tohoto důvodu je lépe, je-li systém předdimenzován, lze poté lépe regulovat teplotní pole formy. Návrh temperačního systému je navíc omezován dalšími funkčními prvky, jako jsou jádra a vyhazovače. [12]

2.3.2 Chlazení jader a tenkých míst tvarových vložek

V rámci technologie tlakového lití se lze setkat s celou řadou způsobů chlazení přehřívaných míst na formě, jako jsou např. jádra nebo žebrování. Konkrétní způsob chlazení je na volbě slévárny a zkušenostech technologů. Při výběru se musí brát v potaz tyto faktory [12]:

- ekonomické náklady na chladicí zařízení,
- náročnost konstrukčních úprav na formě,
- náročnost na údržbu chladicího systému,
- chladicí účinek.

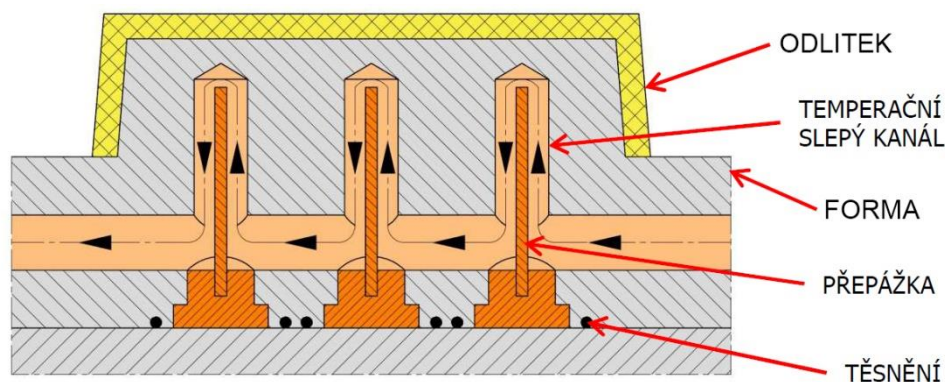
Pro chlazení tenkostěnných jader a jader malých průřezů se používají tyto technologie:

- bodové chlazení (přepážkové systémy),
- Jet cooling,
- laserové sintrování,
- vložky z vysoce vodivého materiálu,
- chlazení tekutým CO₂,
- tepelné trubice.

Existuje několik typů **bodového chlazení**. Jedním ze způsobů bodového chlazení jsou tzv. *přepážkové systémy*. Do jádra nebo tvarové vložky je vždy vyvrtán otvor, do kterého je umístěna chladicí vložka. Dle typu této vložky rozeznáváme systémy s plochou přepážkou, se spirálovou přepážkou nebo tzv. fontánky. Takto vytvořenými kanály může proudit jak vodní, tak i olejové médium. Pro dostatečný chladicí účinek bodového chlazení je nutné zajistit těsnost vložky v otvoru. Účinnost chlazení se odvíjí od těchto faktorů [18]:

- velikost průměru vrtání temperačního kanálu,
- druh média a jeho průtok,
- doba chlazení místa,
- vzdálenost vložky od vrcholu vrtaného otvoru.

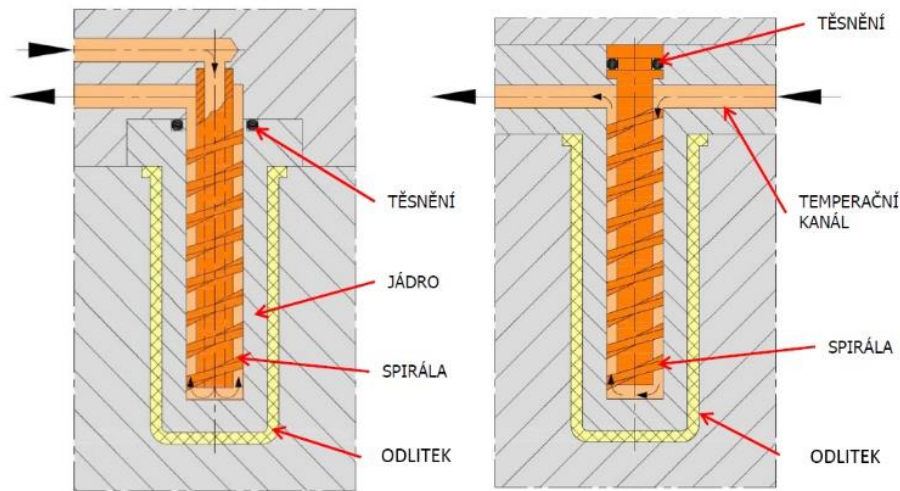
Plochá přepážka rozděljuje vyvrtaný otvor na dva kanály polokruhového průřezu. Médium proudí od ústí otvoru podél přepážky až k vrcholu otvoru, kde přepážku obtéká a vrací se druhým kanálem ven, viz obr. 2-6. Pro rovnoměrný odvod tepla je důležité, aby přepážka otvor rozdělovala na dva stejně velké kanály. [18]



Obr. 2-6 Systém plochých přepážek [18]

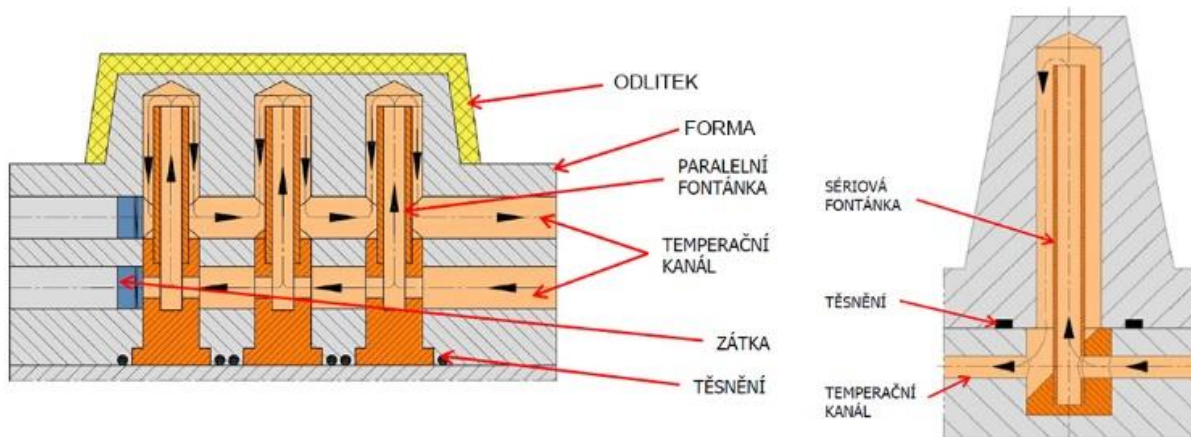
V případě spirálové přepážky (tzv. temperačního šneku) se lze setkat s dvěma typy – buď je přepážka tvořena dvěma závity anebo pouze jedním vnějším závitem a vnitřním otvorem. V prvním případě slouží jeden závit pro přívod média k vrcholu otvoru a druhý závit

k jeho odvodu. V druhém případě zajišťuje přívod média k vrcholu vnitřní otvor. Oba typy ukazují obr. 2-7. [18]



Obr. 2-7 Systém spirálových přepážek [18]

Fontánky označují soustavu jednoho nebo více otvorů, do kterých jsou vloženy trubičky upevněné ve vložce. Tyto vložky zajišťují přívod a odvod média k vrtanému otvoru. Médium proudí vnitřní trubičkou k vrcholu otvoru a zpět teče po vnější stěně trubičky. Na obr. 2-8 je zobrazena paralelní a sériová fontánka, které se liší pouze ve způsobu napojení na hlavní temperační kanál. [18]



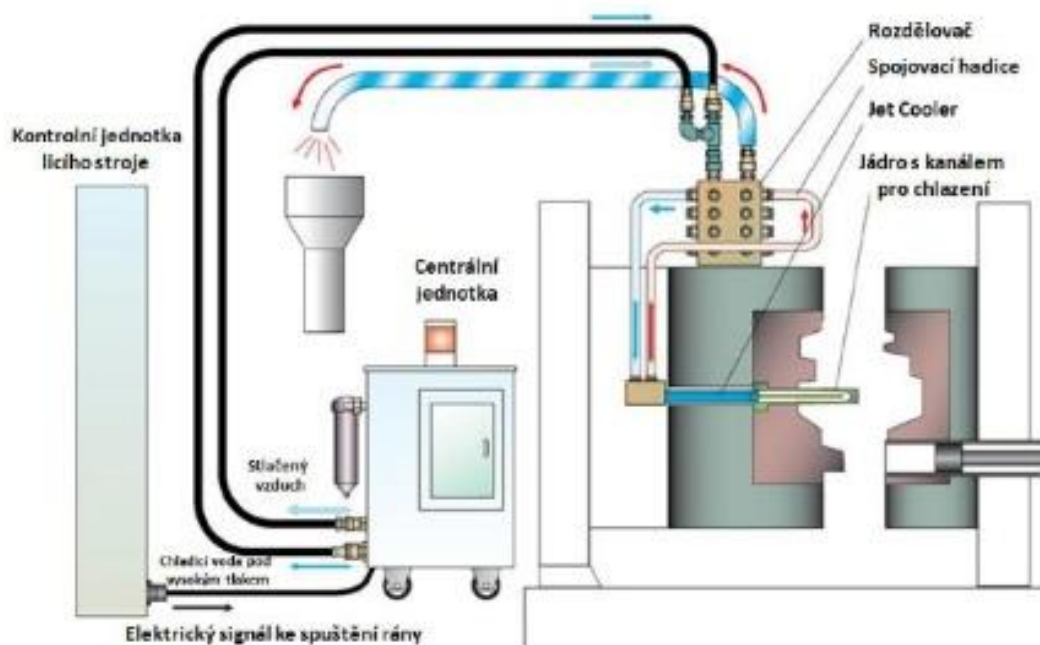
Obr. 2-8 Systém fontánek - paralelní fontánka (vlevo) a sériová fontánka (vpravo) [18]

V tab. 2-3 jsou uvedeny hodnoty intenzity vyzařovaného tepla v závislosti na průměru kanálu v jádře (tyto hodnoty odpovídají přetlaku ve vodovodním potrubí 0,6 MPa tj. 6 bar).

Tab. 2-3 Intenzita vyzařovaného tepla v závislosti na průměru kanálu v jádře chlazeného pomocí vložené trubice [19]

Intenzita vyzařování tepla 1 cm ² povrchu kanálu při lití Al slitin	Intenzita vyzařovaného tepla jedním centimetrem délky kanálu v [kJ.h ⁻¹] podle průměru chladicího kanálu v [mm]							
	8	9	10	11	12	13	14	15
Chlazení jader s vloženou trubicou [150 kJ.cm ⁻² .h ⁻¹]	375	425	470	520	565	610	660	705

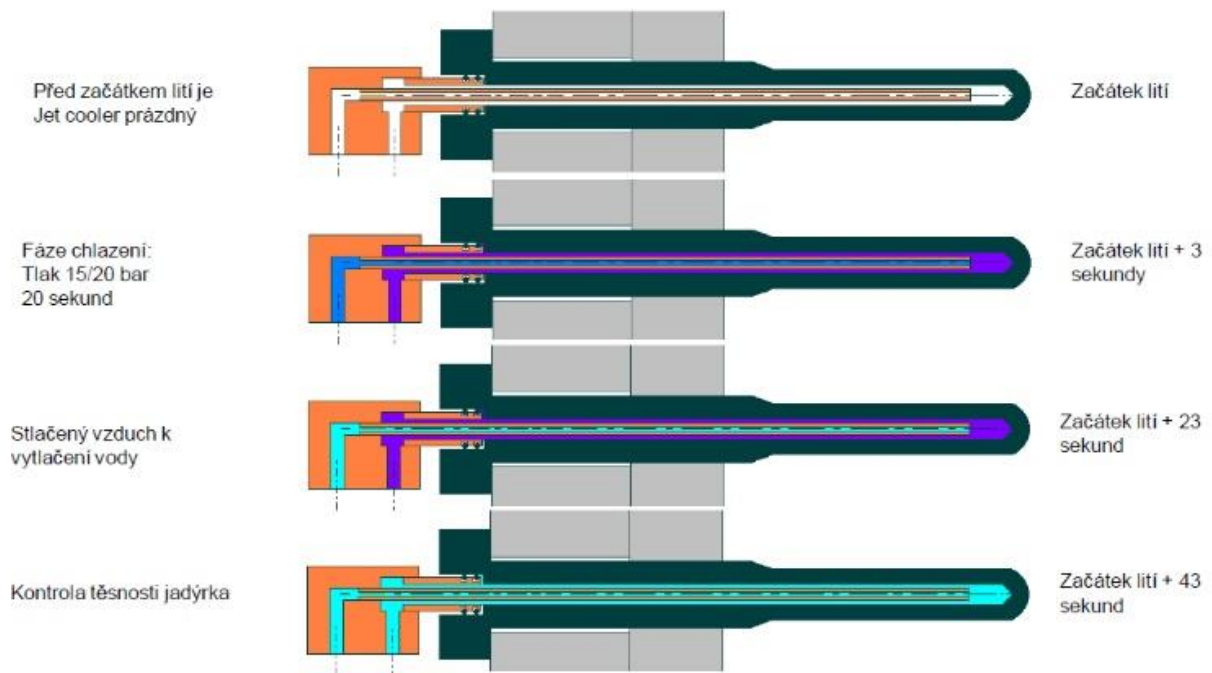
Technologie Jet cooling se využívá zejména pro chlazení jader malých průměrů (od 4 mm) na pevné a pohyblivé části tlakové lici formy. U bočních jader je tento systém obtížně použitelný. Pro využití této technologie je potřeba samostatné zařízení, které nabízí např. firma Lethiguel. Schéma zařízení ukazuje obr. 2-9. Jako temperační médium se zde využívá demineralizovaná voda. Buď se jedná o otevřený systém, kdy se voda po chlazení jádra vypouští přímo do odpadu, nebo jde o uzavřený systém, kdy voda neustále cirkuluje přes tepelný výměník v centrální jednotce, kde teplo odevzdává. Výhodou uzavřeného systému je nízká spotřeba vody. Celý systém je řízen centrální jednotkou, která sestává ze čtyř okruhů, které lze samostatně regulovat. Pro každý okruh tak lze nastavit jinou dobu chlazení. Každý okruh přitom může chladit jedno nebo více jader, přičemž zařízení umožňuje zapojení až 20 jet coolerů. [12] [21]



Obr. 2-9 Speciální zařízení pro technologii chlazení Jet cooling [12]

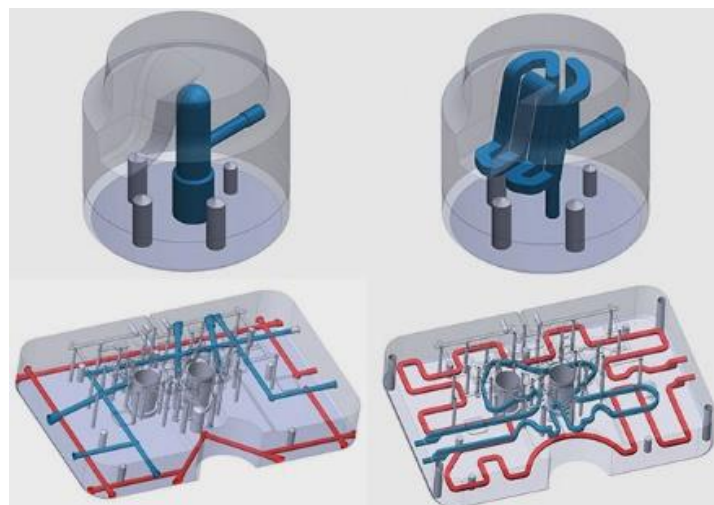
Proces začíná tehdy, když centrální jednotka dostane od licího stroje signál, že začala fáze lisování. V tu chvíli centrální jednotka spustí přívod vody, která hadicí proudí přes rozdělovač a jet cooler až do jádra. Tam se zčásti přemění na páru, čímž odebere jádru tepelnou energii a ochladí ho. Chlazení trvá 5 až 10 s, přičemž voda je pod tlakem až 20 bar. Poté je přiveden stlačený vzduch (6 bar), který vyfouká vodu z hadice, jádra i jet cooleru. Jádro v sobě musí mít přesně vycentrovaný otvor (větší než 2 mm), do něhož je vsunut jet cooler. Po každém chladícím cyklu pak systém kontroluje, zda nedošlo k zalomení jádra. Životnost jádra chlazeného systémem jet cool je 30 000 až 40 000 cyklů, tedy dvou až tří násobek oproti jádru chlazenému konvenčním systémem vrtaných kanálů. To vede ke snížení doby prostojů nutných k výměně jádra a zároveň ke snížení množství separačního prostředku

nutného k povrchovému ochlazení jádra. Konstrukci jet cooleru, kterým je médium přiváděno do jádra, ukazuje obr. 2-10. [12] [21]



Obr. 2-10 Schéma průběhu chlazení Jet cooling [21]

Technologie laserového sintrování (LaserCUSING) se používá pro chlazení tvarových a protivtokových vložek nebo jader. Takovýto díl formy je zhotoven na speciálním zařízení, které spéká ocelový prášek po jednotlivých vrstvách dle požadované kontury. Na rozdíl od vrtaných otvorů lze touto technologií zhotovit tvarově velmi složité kanály, které stejnoměrně kopírují povrch tvarové plochy, čímž se zvyšuje chladicí výkon systému. Na obr. 2-11 je znázorněn rozdíl konvenčního a konformního temperačního systému protivtokové vložky a tvarové vložky. [12]



Obr. 2-11 Rozdíl konvenčního a konformního temperačního systému [22]

Vložky z vysoce vodivých materiálů se používají v kombinaci s chlazením temperačními kanály. Materiál takovýchto vložek je ze slitin mědi, berillia nebo wolframu. Vložky jsou výhodné pro odvod tepla z tvarově členitých částí, jako jsou např. žebra. Vložka může být přímo ve styku s taveninou anebo je uvnitř ocelového pláště, viz obr. 2-12. [18]



Obr. 2-12 Vliv vodivé vložky na teplotní pole jádra [23]

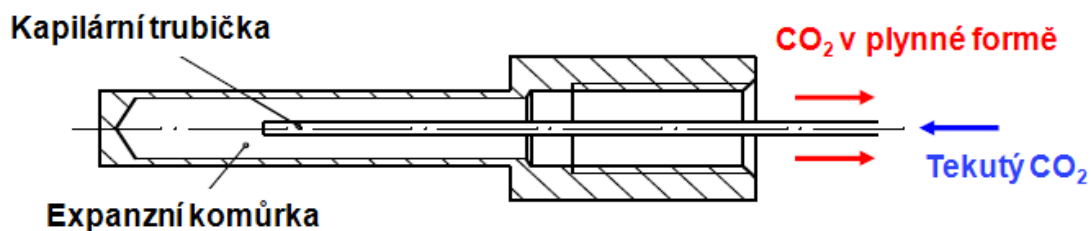
Tepelné trubice se používají spíše výjimečně. Jedná se o tlakotěsnou nádobu obvykle tvaru trubice, která je umístěna ve vrtaném otvoru uvnitř jádra. Uvnitř trubice je teplotněsensitive médium, které buď cirkuluje pouze uvnitř trubice, nebo v rámci napojeného chladicího okruhu. Pro dosažení vysokého chladicího výkonu je výhodná trubice s co největším průměrem (alespoň polovina průměru jádra). Průměry trubic jsou od 3 do 40 mm a délky 50 až 500 mm. Vzhledem k tomu, že trubice se vlivem tepelné roztažnosti prodlužují více než okolní materiál formy, je nutné počítat s axiální vůlí asi 3 % délky trubice. [12]

K chlazení dochází tak, že médium teplo odvádí z přehřátého místa k chladnějšímu konci trubice. Přenos tepla z místa o vyšší teplotě do místa s nižší teplotou probíhá už při rozdílu 0,5 °C. Kapalně médium se v přehřátém místě mění na páru, čímž odtud odebírá teplo. Pára následně proudí do kondenzačního pásma, kde teplo odevzdává a kondenzuje zpátky na kapalinu. [12]

Jako teplotněsensitive médium se používají voda, rtuť, metylalkohol a difenyl. Pracovní rozsah teplot je kromě média dán také materiálem pláště nádoby (např. hliníkový, měděný, ocelový). Existují různá provedení trubic jako gravitační, rotační, kapilární atd. Tvar nádob může být válcový, kuželový, deskový aj. [12]

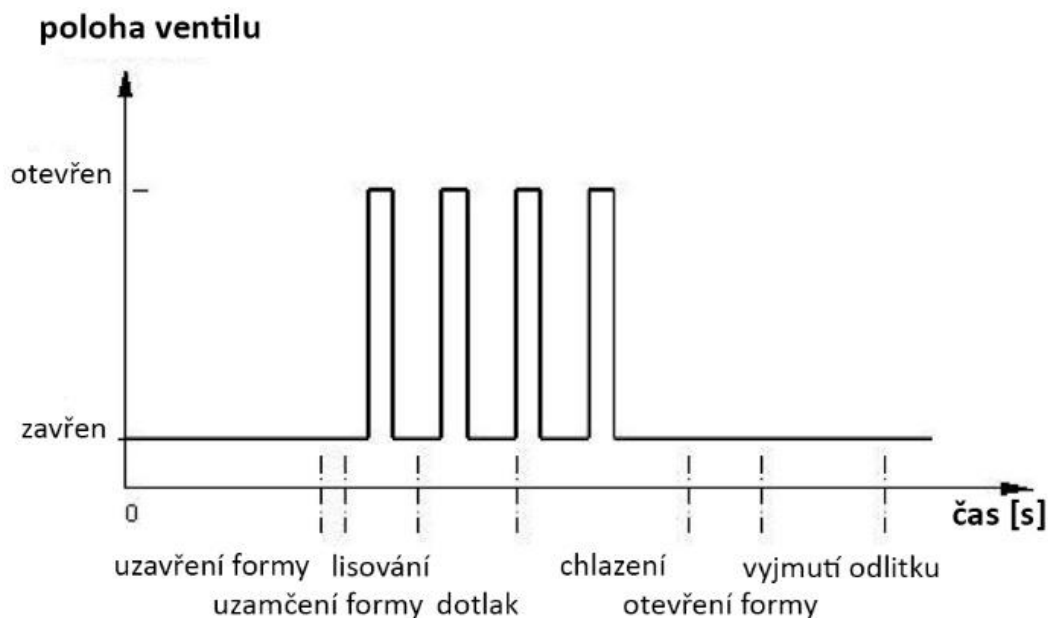
Chlazení tekutým CO₂ se používá u tenkých jader nebo u míst s tepelnými uzly. Oxid uhličitý může být tekutý pouze při tlaku větším než 0,5 baru, v pevném skupenství se při

normálním atmosférickém tlaku vyskytuje při teplotě pod $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, jedná se o tzv. suchý led. Technologie chlazení tlakových forem CO_2 se označuje jako Spot cooling (bodové chlazení). Médium proudí kapilárami do kritického místa, kde vlivem poklesu tlaku v expanzní komůrce expanduje a mění skupenství na směs sněhu a plynu, viz obr. 2-13. Vlivem této změny skupenství je z přehřátého místa účinně odváděno teplo. Plynný CO_2 následně putuje z expanzní komůrky podél kapilár ven z jádra, přičemž může být znovu zkapalněn a uložen do zásobníku (pouze v případě uzavřeného systému). [12]



Obr. 2-13 Princip technologie chlazení jader pomocí CO_2 [12]

Systém je ovládán řídicí jednotkou, která je napojena na licí stroj a ve stanovených časových intervalech otevírá a uzavírá solenoidové ventily, kterými ze zásobníku proudí tekutý CO_2 . Schéma impulzního řízení přívodu média je uvedeno na obr. 2-14. Díky řízenému dávkování média lze docílit vyšší účinnosti a rovnoměrného odvodu tepla. [12]



Obr. 2-14 Příklad impulzního řízení přívodu kapalného CO_2 [12]

2.4 Postřik líce tlakové formy

Jednou z důležitých operací v rámci licího cyklu je nanášení postřiku na líc tlakové formy. Mezi hlavní úkoly postřiku patří [13] [24]:

- tvorba dělicího filmu,
- mazací účinek,
- chlazení (pouze u vodou ředitelných prostředků).

Tvorba dělicího filmu má zabránit přímému styku taveniny s povrchem formy a tím zabránit nalepování hliníku na formu. Vrstva postřiku musí odolat účinkům taveniny, která proudí místy vysokou rychlostí (např. v oblasti naříznutí). Kvalita dělicího filmu má vliv na intenzitu opotřebení povrchu formy. [13] [24]

Dobrý mazací a kluzný efekt usnadňuje vyjímání odlitku z formy a zajišťuje správnou funkci šoupátek a vyhazovačů. Díky tomu brání vzniku zadřenin. Při vyjímání odlitku z formy dochází k ochlazení hliníku (předává teplo formě) a tím k jeho smrštění. Ocelová forma se naopak zahřívá a vlivem toho se rozpíná. Díky těmto jevům je zvláště u jader velkých průměrů problém s vyjmutím odlitku. [13] [24]

Mezi další požadavky na dělicí prostředky patří zdravotní nezávadnost, nezávadnost k životnímu prostředí a nehořlavost. [13]

Postřik formy tvoří značnou část licího cyklu. Z tohoto důvodu je dnes snaha o minimalizaci množství separátoru při zachování vysoké jakosti odlitků. O vhodné volbě dělicího prostředku rozhoduje: druh slitiny, teplota lití, teplota líce formy a geometrie odlitků. [13] [24]

Dle složení lze dělicí prostředky rozdělit na:

- vodou ředitelné dělicí prostředky,
- práškové separátory,
- olejové prostředky (bezvodé).

2.4.1 Vodou ředitelné dělicí prostředky

Používání vodou ředitelných dělicích prostředků je ve slévárenských provozech tlakového lití nejrozšířenější, bude mu proto věnována větší pozornost. [13]

Voda má jednak nosnou funkci, kdy umožňuje přenos prostředku na formu, jednak slouží k ředění a rozpouštění koncentráту. Po dopadu kapek vody na ohřátý povrch formy dojde k jejich vypaření. Dochází k odvodu tepla a ochlazení povrchu formy. [13]

Voda v separačním prostředku musí splňovat požadavek čistoty, tzn. má být zbavena minerálů (vápník, hořečnaté soli, volné železo, síra). Množství minerálních látek ve vodě určuje tvrdost vody. V případě vysokého obsahu minerálů hrozí znečišťování povrchu formy a také zanášení a ucpávání trysek. Aby k tomuto nedocházelo, je nutné vodu filtrovat a používat změkčovač. Proces odstranění minerálů z vody se nazývá deionizace. [13]

Chladicí účinek postřiku je důležitý především tam, kde z konstrukčních důvodů není možné zajistit chlazení pomocí temperačního systému. To nastává především u tvarově složitých částí formy nebo dlouhých jader. V první řadě má chlazení přehřívaných míst zajišťovat temperační systém. Při nanesení postřiku dojde pouze k rychlému povrchovému ochlazení (1 až 2 s), které má umožnit tvorbu dělicího filmu. K efektivnímu chladicímu účinku dochází v krátkém časovém intervalu pouze při odpaření vody, kdy dojde k odvedení většího množství tepla. Při nanášení velkého množství vody, která se neodpařuje, je chladicí účinek špatný a dochází akorát k prodloužení licího cyklu a plýtvání dělicího prostředku. [13] [24]

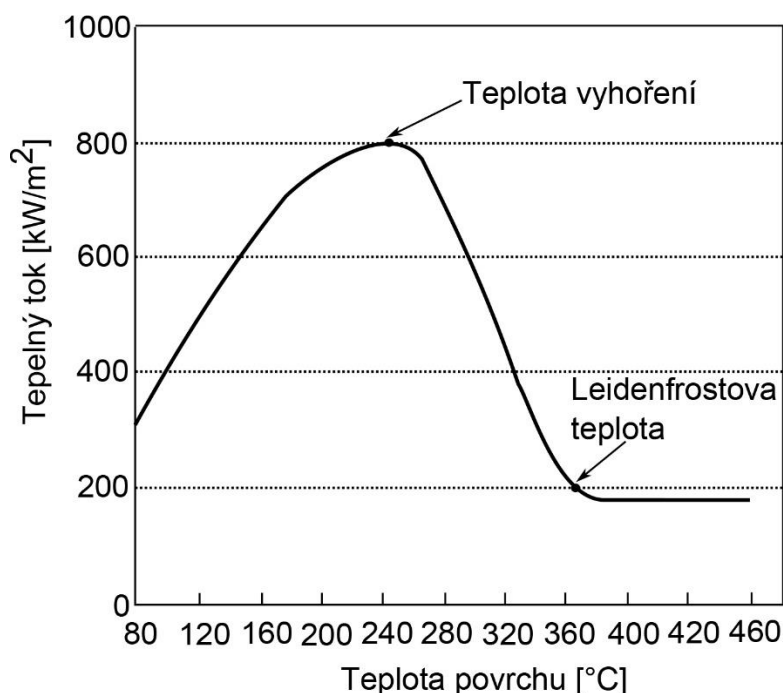
Běžné vodou ředitelné dělicí prostředky se skládají z koncentrátu, vody a emulgátorů. Koncentrát tvoří minerální, esterové nebo silikonové oleje anebo vosky. Jednotlivé skupiny olejů se liší podle stupně viskozity. [25]

Ze silikonových olejů se u tlakového lití uplatňují alkyl arilpolysiloxany (označované jako polysiloxany), které patří mezi nejpoužívanější syntetické koncentráty. Mají dobrý mazací účinek a také velmi vysoký tepelný odpor. Na základě svého chemického složení mají rozdílné specifické vlastnosti. [25]

Další důležitou složkou dělicích prostředků jsou emulgátory. Jsou to organické povrchově aktivní látky, které zajišťují smísení jinak nemísitelných látek např. vody a oleje. [13] [25]

Mezi další složky dělicích prostředků mohou patřit syntetické tuky (zlepšující kohezi), pevné látky ve formě prášku (barviva, slída, oxidy titanu, železa, křemíku a hliníku), které odolávají vysokým teplotám, mají izolační vlastnosti, ovlivňují viskozitu a chemicky nereagují. Konkrétní složení dělicích prostředků se liší dle výrobce. [13]

Problematiku intenzity odvodu tepla z povrchu líce formy při aplikaci postřiku ukazuje graf na obr. 2-15. Zde je znázorněna závislost tepelného toku na teplotě povrchu formy. S rostoucím rozdílem teplot mezi lícem formy a vrstvou postřiku roste intenzita odpařování a díky tomu i tepelný tok. Ten roste až do teploty vyhoření, při které se na povrchu začne vytvářet parní vrstva, která má izolační vlastnosti. Tato teplota se označuje také jako Nukiyamova teplota. Při vyšších rozdílech teplot začne tepelný tok klesat a uplatňuje se tzv. Leidenfrostův jev. [26] [27]



Obr. 2-15 Závislost tepelného toku na teplotě povrchu formy [26]

Leidenfrostův jev vzniká při styku kapaliny (vody) se stěnou (lícem formy), která má teplotu výrazně nad bodem varu kapaliny. Voda po kontaktu s povrchem začne vytvářet kulovité kapky, které se odpařují a přitom se na povrchu neuspořádaně pohybují. Toto chování je dáno tím, že se pod kapkou vytvoří tenký polštář páry, který brání adhezním silám, aby kapalina přilnula na povrch. V důsledku působení povrchového napětí má proto kapka kulovitý tvar. Existence Leidenfrostova jevu brání aktivním látkám dělicího prostředku dostatečně přilnout k povrchu a nedochází k tvorbě separační vrstvy. [26] [27]

Maximální teplota, při které dojde k přilnutí dělicího prostředku, je označována jako Leidenfrostova teplota. Na tuto teplotu má vliv řada faktorů: velikost kapek, nárazový tlak, vzdálenost od povrchu a úhel dopadu paprsku, směr paprsku (horizontální či vertikální), drsnost povrchu, teplota povrchu, teplota, hustota a tvrdost vody, příměsi ve vodě. [28]

Výrobce vodou ředitelných separačních prostředků, např. firma Wollin, udává vhodnou teplotu povrchu pro nanášení separátoru v rozmezí 180 až 250 °C. Při této optimální teplotě trvá tvorba dělicího a mazacího filmu 0,5 až 2 s. Při vyšších teplotách zabraňuje nanášení parní clona, naopak při nižších teplotách nedochází k dostatečnému odpařování vody a separátor je z povrchu vymýván. [26] [27]

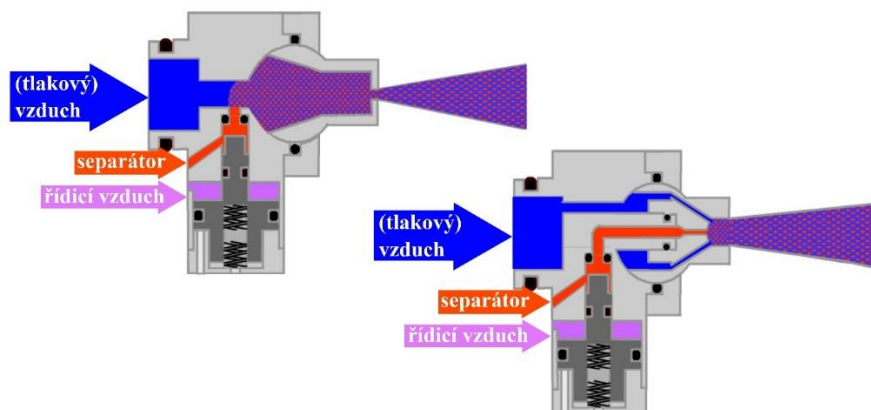
Vývoj nových dělicích prostředků se snaží zvýšit Leidenfrostovu teplotu, čímž se umožní nanášení postřiku při vyšších teplotách. To umožní zkrátit doby postřiku a zvýšit produktivitu. [26] [27]

2.4.2 Postřikové systémy pro vodu ředitelné dělicí prostředky

Nejčastěji se v tlakových slévárnách jako postřikovací nástroj používají postřikovací hlavy, se kterými při postřiku manipuluje robot. U výrobce těchto postřikových hlav, firmy Wollin, jsou konstruovány jako stavebnice, což umožňuje konfiguraci trysek podle konkrétní geometrie povrchu formy. Postřikové hlavy mají určitý počet okruhů, které mají samostatné ovládání přívodu prostředku a vzduchu. Důležitými stavebnicovými prvky těchto hlav jsou: trysky, clony, trubičky. [29]

Trysky se skládají ze základního tělesa (tzv. „domečku“) a z kuličkové trysky. Existují dva typy konstrukce těchto trysek: s vnitřním mísením a s vnějším mísením. Oba typy konstrukce pracují na podobném principu, kdy řídicím tlakem je ovládán přívod separačního prostředku do trysky. [29]

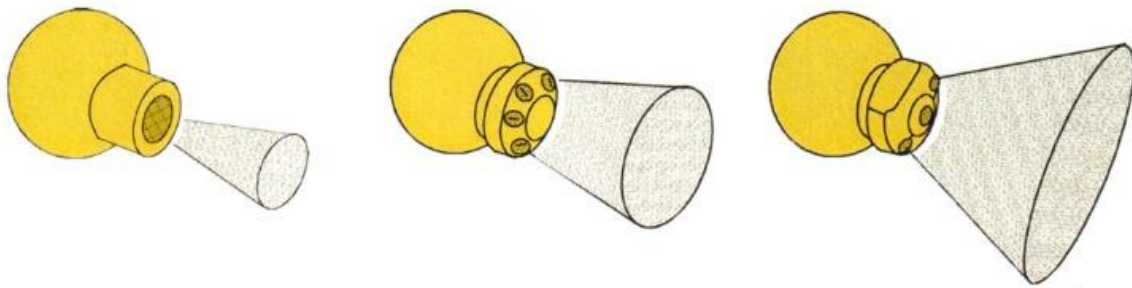
Trysky s vnitřním mísením se vyznačují velkou energií postřikovacího paprsku. Konstrukce takové trysky je zobrazena na obr. 2-16 (vlevo). Jak je ze schématu patrné, ke směšování tlakového vzduchu a separačního prostředku dochází uvnitř trysky. Aby tryska správně pracovala, nesmí být tlak vzduchu vyšší než tlak emulze (separačního prostředku). Při příliš vysokém tlaku vzduchu by docházelo k tlačení prostředku zpět do trysky. Tato konstrukce trysek je vhodná např. pro formy s žebry. [29]



Obr. 2-16 Konstrukce trysky s vnitřním (vlevo) a vnějším mísením (vpravo) [29]

Princip práce trysky s vnějším mísením ukazuje obr. 2-16 (vpravo). Zde má přívod prostředku vyústění až na konci trysky. Tato konstrukce umožňuje mikrojemné rozprašování. Kapky jsou menší a je mezi nimi menší prostor, což má za následek lepší odvod tepla a větší procento ošetřené plochy. Tento typ trysek je vhodné používat pro formy s velkoplošnými konturami a malým nánosem separačního prostředku. [29]

Konstrukce trysky také určuje tvar postřikového kuželu. Jednotlivé typy trysek ukazuje obr. 2-17. [29]



Obr. 2-17 Typy konstrukce trysek [29]

Clony slouží ke stanovení průtokového množství separačního prostředku. Průměr průtočného otvoru je od 0,4 mm do 1,6 mm. [29]

Dalším stavebnicovým prvkem jsou prodlužovací **trubičky**, které se podobně jako trysky odlišují pro vnitřní a vnější mísení. Trubičky lze ohýbat a díky tomu umožňují lepší polohování paprsku separátoru. [29]

Aby docházelo ke správnému nanášení dělicího prostředku a odpaření veškeré vody, musí být správně nastaveny parametry postřiku. Jedná se o tyto parametry: [13] [29]

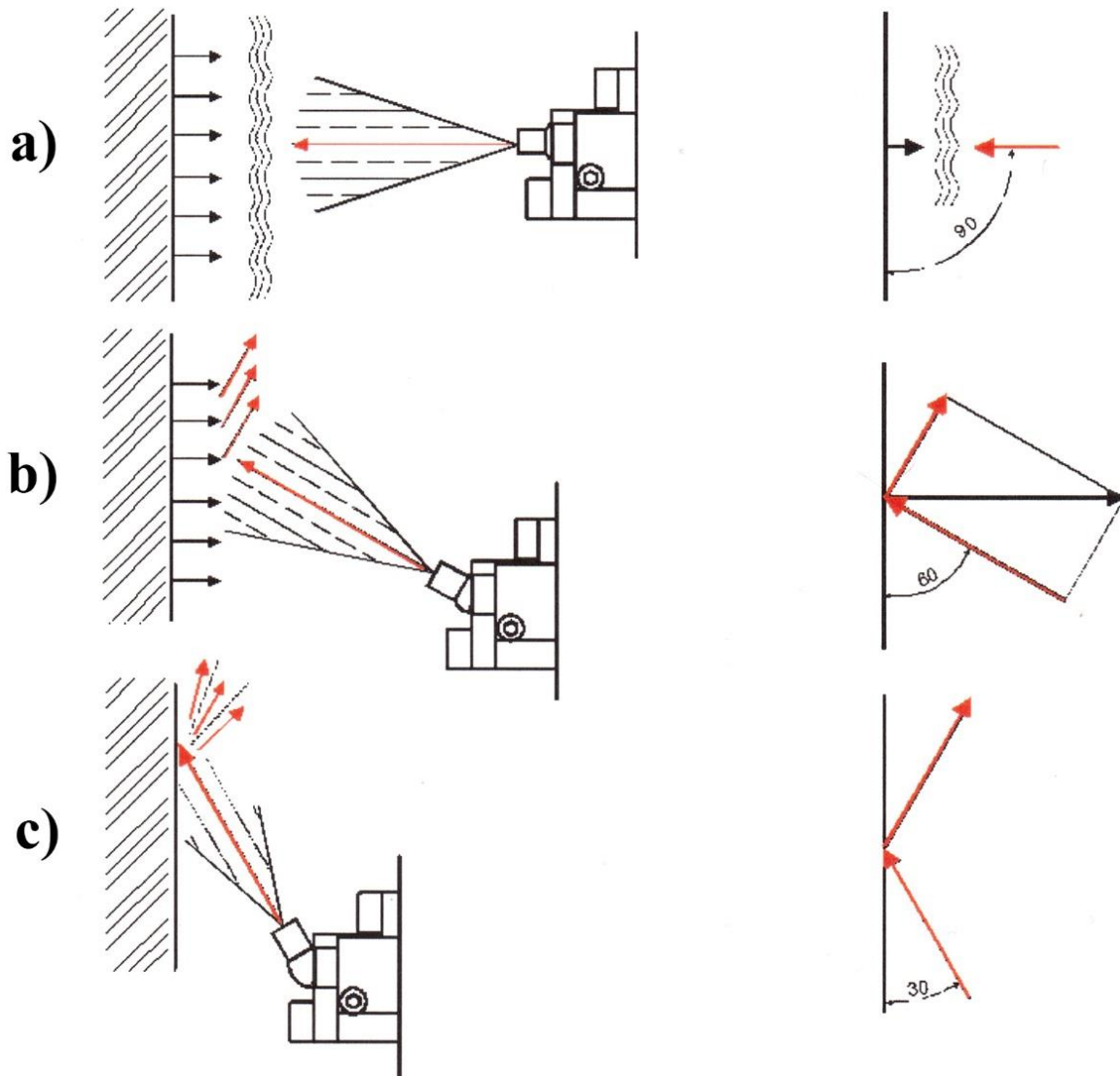
- tlak vzduchu,
- vzdálenost trysky od formy,
- úhel mezi postřikovým paprskem a povrchem formy,
- velikost kapek,
- čas postřiku,
- tvar postřikového kuželu.

Tlak vzduchu umožňuje transport kapek dělicího prostředku na povrch formy. S rostoucím tlakem vzduchu se zmenšuje velikost kapek a zvyšuje jejich rychlost. Zvýšením tlaku vzduchu se také zvětšuje průtočné množství prostředku. [29]

Vzdálenost mezi tryskou a povrchem formy má vliv na velikost zasažené plochy postřikem, hustotu postřiku a rychlost kapek. Běžně se volí vzdálenost cca 100 mm. Platí, že pro přehřívaná místa formy (např. jádra) je potřeba kratší vzdálenost, pro místa s nižšími teplotami delší vzdálenost. [29]

Úhel postřikování má velký vliv hlavně u horkých míst, kde dochází k tvorbě tzv. parního polštáře. Při postřikování pod úhlem 90° tvoří síla od dopadajícího paprsku rovnováhu se silami způsobenými srážením páry u povrchu, viz obr. 2-18a. To brání účinnému chlazení a tvorbě vrstvy filmu. Postřikováním pod úhlem $45 - 70^\circ$ (směrem nahoru) vzniklá složka síly způsobí rozrušování parní vrstvy (obr. 2-18b). Při příliš ostrém úhlu ($< 45^\circ$) mezi paprskem a povrchem má paprsek nízkou dopadovou energii a dochází

k odrazu postřiku, viz schéma na obr. 2-18c. Tento způsob lze cíleně využít pro ovlivnění průběhu proudění. [29]



Obr. 2-18 Vliv úhlu postřikování na tvorbu filmu [29]

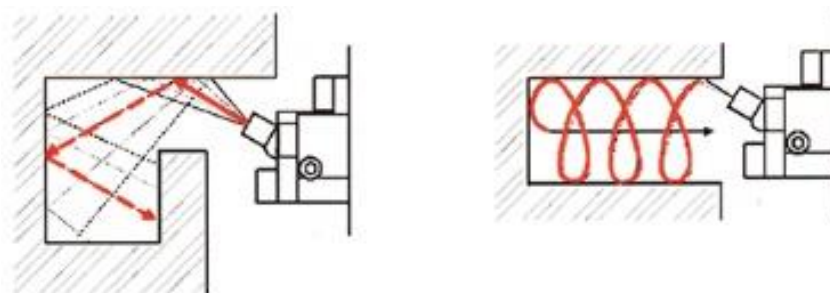
Velikost kapek ovlivňuje tlak vzduchu a především průměr clony. Větší počet malých kapek (o určitém objemu) odvede výrazně více tepla z povrchu formy než menší počet kapek větších rozměrů (o stejném objemu). Přestože objem jedné kapky o průměru 1 mm se rovná objemu 8 kapek o průměrech 0,5 mm, plocha 8 kapek bude dvakrát větší než plocha té jedné kapky. Malé kapky tak po dopadu zasáhnou větší plochu povrchu formy. Intenzivnější odvod tepla pak umožní rychlejší smáčení povrchu dělicím prostředkem. [29]

Pro určitá místa forem jako jsou pevná a pohyblivá jádra, kolíky, dutiny, žebra apod. je výhodné používat speciální způsoby postřiku, které zaručí lepší nanesení dělicího prostředku.

Pulsující postřík lze použít pro malé přehřívané plochy. Tvorba parní clony trvá cca 0,5 s a doba odbourání této clony asi 1 až 2 s. Průběh pulsujícího postříku je takový, že asi 0,5 s se provádí samotný postřík a poté následuje asi sekundová pauza. Výhodou tohoto způsobu je menší spotřeba vody, nevýhodou je delší doba licího cyklu. [29]

Jinou možností je **postřík při posuvném vratném pohybu** postříkovací hlavy. Výhodou tohoto způsobu oproti pulsnímu postříku je plynulost procesu bez neproduktivních časových intervalů. Pohyb postříkovací hlavy při opakovaném postříku musí být nastaven tak, aby prodleva mezi jednotlivými postříky činila 1 až 2 s, kdy stihne dojít k odbourání parní clony. [29]

Nepřímý postřík se aplikuje u nepřístupných míst. Využívá se toho, že při malém úhlu paprsku dochází k odrazu od povrchu, což ukazuje obr. 2-19. Pokud se pro nepřímý postřík používá více trysek, je třeba dbát na nežádoucí vzájemné ovlivňování proudů. Jednotného směru proudění se docílí vhodnou orientací trysek. [29]



Obr. 2-19 Aplikace nepřímého postříku [29]

Pro sestavení postříkové hlavy a nastavení správných parametrů postříku je třeba řada zkušeností. Doporučené způsoby nanášení postříku pro jednotlivé části formy uvádí tab. 2-4.

Tab. 2-4 Způsoby nanášení postříku pro jednotlivé části formy [29]

velké horké plochy a malá horká místa	malá koncentrace prostředku, krátká vzdálenost od povrchu formy, šikmé ostříkování, posuvný vratný pohyb ostříku, u velkých ploch posuvný vratný pohyb ostříku, u malých horkých míst případně pulsující ostřík
pevná jádra a kolíky	malá koncentrace prostředku, krátká vzdálenost od povrchu jádra/kolíku, u velkých jader šikmé ostříkování, případně pulsující ostřík, současný ostřík ze všech stran
pohyblivá jádra a kolíky	malá koncentrace prostředku, krátká vzdálenost od povrchu jádra/kolíku, u velkých jader šikmé ostříkování, případně pulsující ostřík, současný ostřík ze všech stran
prohlubně a dutiny	vysoká koncentrace prostředku, nepřímý spirálovitý ostřík
lamely a žebra	vysoká koncentrace prostředku, nepřímý ostřík

2.4.3 Práškové separátory

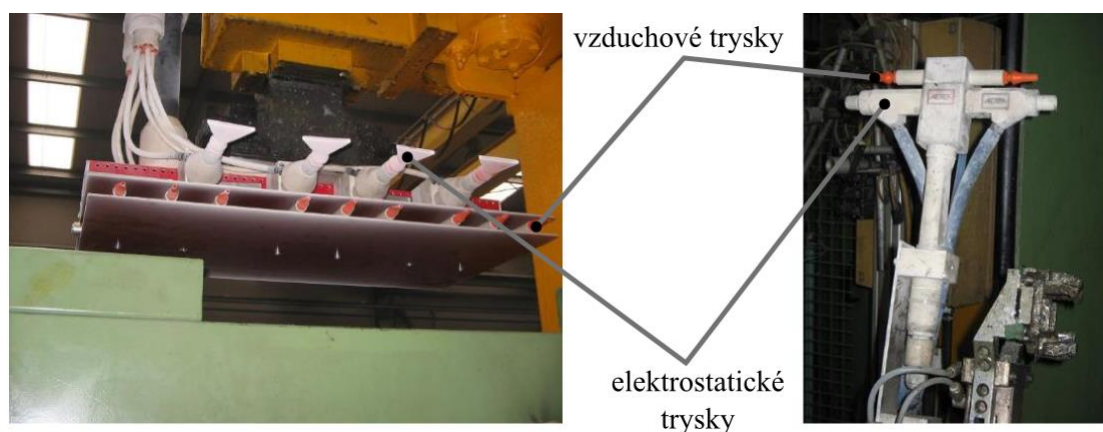
Mezi bezvodý způsob ošetření líce formy patří nanesení práškového separátoru. K nanesení separátoru dochází pomocí elektrostatických sil. K tomu je nutné, aby byl prášek elektricky nabitý a forma uzemněná. Tento způsob ošetření je v tlakových provozech méně používaný. [30]

Výhodou této metody je zabránění vzniku teplotních šoků formy, protože na její povrch není nanášena voda, která by intenzivně odváděla teplo a povrch chladila. To ale klade vyšší nároky na temperační systém, který musí veškeré teplo odvést i z tvarově složitých povrchů a jader. Nevýhodou nanášení suchého prášku je vyšší dýmavost, což klade vyšší nároky na odsávání u strojů. [29]

Separáční prášek má bílou či žlutou barvu, chemicky se jedná o vosk organického původu nerozpustný ve vodě, jehož sypná hmotnost v tuhém stavu je cca $0,5 \text{ g.cm}^3$. Teplota tavení může být různá, např. 80 nebo i 220 °C. Konkrétní vlastnosti se liší podle výrobce a složení prostředku. Výrobce práškových separátorů jsou např. firma ALTEA nebo firma ChemTrend. Po dopadu na horký povrch formy dochází k roztavení vosku a tvorbě separačního filmu. [30]

Podobně jako u vodou ředitelných dělicích prostředků jsou i u práškových separátorů dvě možnosti dávkování: ruční nebo automatické. Automatické postřikové systémy jsou v praxi častější, kdy posuv postřikového nástroje provádí jeden nebo více robotů. [30]

Při nanášení elektricky nabitého prášku na tvarově složitý povrch může dojít ke vzniku efektu Faradayovy klece, kdy se v rozích (koncentrátorech el. napětí) tvoří silnější vrstva prášku než na rovných plochách. K eliminaci tohoto efektu lze buď zvýšit tlak vzduchu, nebo snížit napětí. Zvýšením tlaku vzduchu dojde k urychlení částic prášku, které se pak dostanou i mimo oblast působení elektrického pole. Snížením napětí dojde k oslabení elektrického pole a to pak nemá tak intenzivní vliv na směr proudění prášku. [31]



Obr. 2-20 Zařízení pro ošetření forem pomocí práškového separátoru [30]

Zařízení pro ošetření forem pro tlakové lití hliníku pomocí práškového separátoru nabízí např. firma ALTEA pod názvem Dry lub system. Jedná se o zařízení pro přípravu prášku, sušící filtry, postřikové hlavy a stříkací pistole viz obr. 2-20. [30]

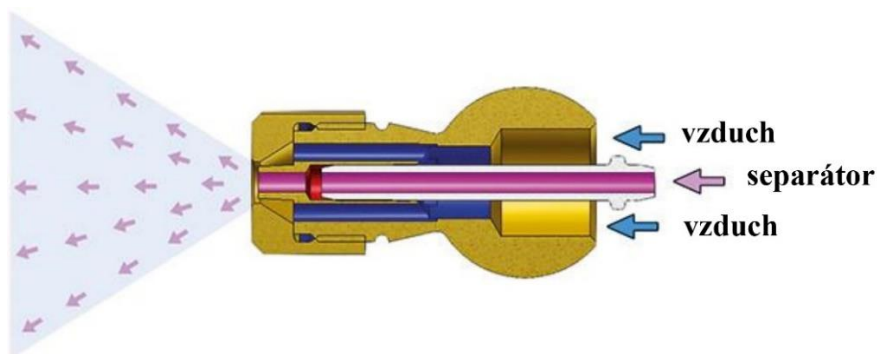
2.4.4 Dělicí prostředky na bázi oleje

V tlakových slévárnách se lze setkat s technologií postřiku na bázi oleje. Tato technologie se někdy nazývá mikropostřik, jelikož na povrch formy se nanáší pouze čistý koncentrát. V důsledku nepřítomnosti vody v prostředku nedochází při nanášení na formu k intenzivnímu povrchovému chlazení. Tím se, podobně jako u práškového separátoru, zvyšují nároky na temperační systém. [32]

Princip ošetření formy za použití oleje je podobný jako u ošetřování prostředků na bázi vody. Postřikovým nástrojem jsou různé typy postřikových hlav, které se skládají z jednotlivých stavebnicových prvků. Tyto postřikové hlavy speciálně určené pro postřiky na bázi olejů vyrábí např. firma AED AUTOMATION. Trysky pro olejové separátory mohou mít různé provedení, viz obr. 2-21. Schéma trysky ukazuje obr. 2-22. Tyto trysky pracují na principu vnějšího směšování. [32]



Obr. 2-21 Trysky a postřiková hlava pro olejový separátor [32]



Obr. 2-22 Konstrukce trysky pro mikropostřik [30]

Olejové dělicí prostředky vyrábí např. firma Henkel. Tyto oleje odolávají vysokých teplotám a vyznačují se vysokou smáčivostí, která umožňuje tvorbu velmi tenkého filmu na povrchu formy. Na 1 m² se nanáší 1 až 5 ml prostředku, tzn. tloušťka separační vrstvy je pouze 1 až 5 μm. Pro správnou funkci postřiku je nutná hladká rovnoměrná vrstva. Výhodou

technologie mikropostřiku je relativně široký interval teplot povrchu formy, při kterých lze nanášet olejový separátor. [32]

Tvorbu dělicí vrstvy lze řídit podobně jako u vodou ředitelných prostředků (vzdálenost trysky od povrchu, úhel paprsku, energie paprsku, velikost kapek, čas postřiku atd.) Množství naneseného postřiku lze řídit tlakem separátoru, tlakem vzduchu a velikostí clony. [32]

2.5 Přenos tepla v soustavě odlitek - tlaková licí forma

Během tvorby odlitku při vysokotlakém lití dochází k přenosu tepla z taveniny resp. odlitku do tlakové licí formy. Jde o značně složitý fyzikální proces nestacionárního sdílení tepla mezi dvěma tělesy. [33]

Důležitým faktorem ovlivňující výslednou jakost odlitku je teplota líce formy. Na tuto teplotu má vliv druh slitiny, poměr objemu odlitku k jeho povrchu, doba licího cyklu, materiál formy, druh separačního prostředku, konstrukce temperačního systému atd. Následkem nevhodné teploty líce formy může dojít k rychlejšímu ztuhnutí taveniny, v důsledku čehož mohou vznikat vady (studené spoje, nedolití, závaly, staženiny, vnitřní pnutí). Pro dosažení požadovaných rozměrových tolerancí odlitků je důležité, aby v jednotlivých místech povrchu formy nebyly velké rozdíly teplot. Jak již bylo uvedeno, k udržení optimálních tepelných poměrů v tlakové licí formě slouží temperační systém. [33]

Z hlediska tepelných procesů při tvorbě odlitku je nejvýznamnějším dějem přenos tepelné energie mezi odlitkem a formou. K přenosu tepla může dojít vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). [33]

Podíly jednotlivých složek tepla závisí na tepelně – fyzikálních vlastnostech taveniny a materiálu formy, licí teplotě, způsobu ošetření líce, době, po kterou je tavenina v přímém kontaktu s lícem formy a také na tloušťce stěny odlitku. [33]

Sdílení tepla vedením je charakteristické přechodem tepelné energie z částice na částici jejich přímým stykem. Teplo je v důsledku srážek předáváno z částic s vyšší tepelnou energií (tj. oblast o vyšší teplotě) částicím s nižší tepelnou energií (tj. oblast o nižší teplotě). K přenosu tepla vedením může docházet v tuhé fázi (tj. ztuhlý odlitek, licí forma), pouze ve zvláštních případech se předpokládá i v tekutinách. [33]

Časovou změnu teploty v určitém místě formy popisuje Furierova diferenciální rovnice nestacionárního prostorového vedení tepla [33]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} \cdot \lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \lambda_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + q_{ZDR} \right], \quad (2.1)$$

kde značí: T – teplotu [K];
 ρ – hustotu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];
 c – měrnou tepelnou kapacitu [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];
 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – součinitel tepelné vodivosti v jednotlivých osách souřadného systému [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];
 x, y, z – souřadnice systému [m];
 q_{ZDR} – tepelný výkon vnitřních zdrojů [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$].

Tuto rovnici je možné zapsat ve zjednodušeném tvaru, pokud bude forma považována za homogenní izotropní těleso a nebude uvažován výkon vnitřních zdrojů q_{ZDR} [33]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]. \quad (2.2)$$

Sdílení tepla prouděním nastává v kapalinách a plynech. Rozeznáváme proudění přirozené a nucené. Přirozené proudění vzniká působením tíhového pole v důsledku nerovnoměrně prohřáté tekutiny a probíhá samovolně. Při nucené konvekci na tekutinu působí tíhové pole a vnější účinek např. tlak. [2]

Konvekce mezi stěnou a tekutinou se označuje jako přestup tepla. Tento děj popisuje Newtonův zákon. Pomocí Newtonova zákona je možné popsat fyzikální děj výměny tepla mezi odlitkem a lícem formy. Množství tepla, které projde styčnou plochou odlitku a formy je přímo úměrné velikosti této plochy, teplotnímu rozdílu povrchových teplot odlitku a formy, době přestupu tepla a součiniteli přestupu tepla [33]:

$$Q = \alpha \cdot (T_{PO} - T_{PF}) \cdot S \cdot t, \quad (2.3)$$

kde značí: α – součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$];
 T_{PO} – povrchová teplota odlitku [$^{\circ}\text{C}$];
 T_{PF} – povrchová teplota formy [$^{\circ}\text{C}$];
 S – styčná plocha formy a odlitku [m^2];
 t – čas [s].

U kovových forem např. pro gravitační lití je při vzájemném styku odlitku a formy uvažován systém odlitek – mezera – forma, kdy mezera vzniká v důsledku teplotní roztažnosti materiálu formy při ohřevu. Mezera může být tvořena plynovou vrstvou, oxidickou vrstvou odlitku a vrstvou dělicího prostředku. Tato mezera má za následek snížení intenzity přenosu tepla. Literatura uvádí, že při vysokotlakém lití k tvorbě mezery mezi lícem formy a odlitkem

nedochází. Intenzivní kontakt taveniny a formy je zajištěn dotlakem, díky němuž hodnota koeficientu přestupu tepla vystupující v rovnici 2.3 nabývá vysoké hodnoty. Hodnotu koeficientu přestupu tepla je však značně obtížné určit, jelikož závisí na mnoha faktorech, jako jsou: fyzikální vlastnosti taveniny (tepelná vodivost, tepelná kapacita, viskozita, hustota atd.), teplotní vodivost materiálu formy, teplota líce, tvar stěny, druh proudění taveniny a velikost dotlaku. Hodnota tohoto koeficientu je určována z empirických vztahů nebo pomocí podobnostních kritérií (Nusseltovo, Reynoldsovo, Grashoffovo číslo). Pro hliníkové slitiny pro vysokotlaké lití se hodnota koeficientu přestupu tepla udává v rozmezí 7000 – 7500 [W.m⁻².K⁻¹]. Práce jiných autorů udávají hodnotu tohoto koeficientu při tlakovém lití hliníkových slitin jako dvoj až čtyřnásobek hodnoty při normálním tlaku. [3] [33]

Z výše uvedeného je zřejmé, že budou rozdílné hodnoty součinitele přestupu tepla prouděním mezi lícem formy a okolím (α_p), jiné pro přestup tepla mezi lícem formy a temperačním médiem (α_t) a jiné pro přestup sáláním (α_s). [33]

Sdílení tepla sáláním je bezkontaktní způsob přenosu tepla, při kterém se tepelná energie přeměňuje na elektromagnetické záření, které je emitováno do prostoru. Tento způsob sdílení tepla může nastat v jakémkoliv průteplivém prostředí (tzn. ve všech skupenstvím i ve vakuu). Tento způsob přenosu tepla je významný při velkých rozdílech teplot těles. [33]

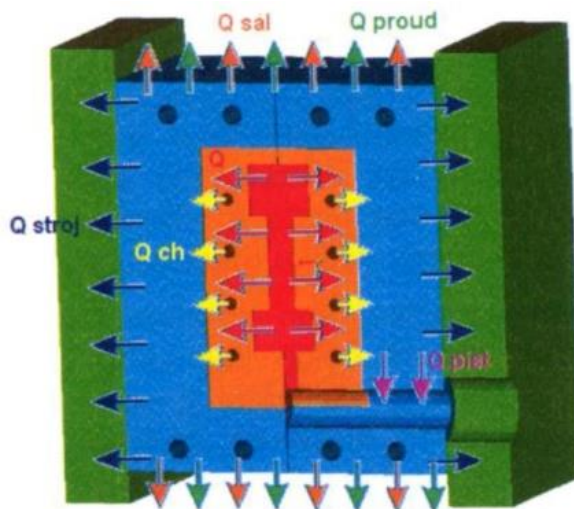
Teplo se nešíří jednotlivými způsoby odděleně, naopak dochází ke kombinaci všech tří způsobů (vedením, prouděním, sáláním). Podstatné jsou ty děje, které převládají. [33]

2.5.1 Tepelná bilance licího cyklu

Tepelná bilance slouží jednak ke zjištění hodnot přivedeného tepla taveninou, jednak k určení množství tepla odvedeného jednotlivými složkami během licího cyklu. Pro níže uvedený způsob výpočtu tepelné bilance budou přijaty tyto předpoklady a zjednodušení [33] [34]:

- tlaková licí forma a odlitek představuje uzavřený systém, který se nachází v tepelné rovnováze;
- tepelné děje se považují za stacionární;
- tepelné toky a teploty jednotlivých částí formy jsou v průběhu licího cyklu konstantní;
- rozdíly teplot líce pevné resp. pohyblivé části formy se zanedbávají;
- teplota líce formy je stanovena jako aritmetický průměr teplot líce pevné resp. pohyblivé části formy;
- po dobu uzavření formy se uvažuje těsný styk taveniny (resp. odlitku) a líce formy;

- teplota temperačního média na vstupu resp. výstupu do formy je určena jako aritmetický průměr teplot temperačního média na vstupu resp. výstupu.



Obr. 2-23 Schéma formy z vyznačením tepelné bilance [33]

Schéma tepelné bilance tlakové licí formy znázorňuje obr. 2-23. Teplo do soustavy odlitek – tlaková licí forma dodané taveninou je formou akumulováno a následně jednotlivými složkami odváděno z formy do okolí. Toto teplo je vedením přenášeno částečně rámem tlakového licího stroje Q_{stroj} a částečně licím pístem $Q_{píst}$ (podíl tepla odvedeného pístem je zanedbatelný). Určitá část tepla se šíří prouděním Q_{proud} a sáláním $Q_{sál}$ do okolí. V případě použití postřiku na vodní bázi je značný podíl tepla odveden postřikem líce formy Q_p . Temperační systém do soustavy teplo Q_t buď dodává, nebo ze soustavy teplo odvádí. V rámci tepelné bilance je třeba uvažovat zbytkové teplo odlitku na konci licího cyklu. Tepelnou bilanci vyjadřuje rovnice [33]:

$$Q = Q_{sál} + Q_{proud} + Q_t + Q_{stroj} + Q_{píst} + Q_p \quad (2.4)$$

kde značí:

- Q – celkové teplo uvolněné odlitkem [J];
- $Q_{sál}$ – teplo odvedené do okolí sáláním [J];
- Q_{proud} – teplo odvedené do okolí prouděním [J];
- Q_t – teplo odvedené temperačním systémem [J];
- Q_{stroj} – teplo odvedené vedením do rámu stroje [J];
- $Q_{píst}$ – teplo odvedené pístem stroje [J];
- Q_p – teplo odvedené postřikem líce formy [J].

2.5.2 Teplo předané odlitkem

Množství tepla, které se z tuhajícího a chladnoucího odlitku uvolní je menší než teplo potřebné k roztavení vsázky v peci v důsledku tepelných ztrát při přelití a metalurgického

zpracování taveniny. Rovnice (2.5) popisuje jednotlivé složky tepla, které se z taveniny resp. odlitku uvolní [33] [34]:

$$Q = Q_{PŘ} + Q_{KR} + Q_{CHL} + Q_{TŘ} \quad (2.5)$$

kde značí: $Q_{PŘ}$ – teplo uvolněné z přehřáté taveniny [J];
 Q_{KR} – teplo uvolněné při tuhnutí taveniny [J];
 Q_{CHL} – teplo uvolněné při chladnutí odlitku [J];
 $Q_{TŘ}$ – teplo vzniklé třením pístu [J].

Složky tepla, které vzniknou v důsledku tření pístu a přeměny kinetické energie taveniny, tvoří malý podíl na celkovém množství vzniklého tepla a proto je lze opomenout. V případě použití lící komory, která nemá vnitřní vyhřívání, hrozí znatelný pokles teploty taveniny v komoře (i o 30 °C). Tehdy nelze za teplotu lití považovat teplotu taveniny v udržovací peci. [33]

Podíl tepla, který se přenáší z přehřáté taveniny, je dán rovnicí [33]:

$$Q_{PŘ} = m \cdot c_L \cdot (T_{lití} - T_{KR}), \quad (2.6)$$

kde značí: m – hmotnost taveniny [kg];
 c_L – měrnou tepelnou kapacitu taveniny [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];
 $T_{lití}$ – teplotu lití [°C];
 T_{KR} – teplotu krystalizace taveniny [°C].

Pro slitiny typu Al-Si se teplota lití v závislosti na přesném chemickém složení a způsobu dávkování taveniny běžně pohybuje v intervalu 660 – 710 °C. Fyzikální vlastnosti slitin uvádí tab. 2-5. Přesné stanovení těchto hodnot je značně problematické z důvodu jejich teplotní závislosti. Je známo, že slitiny s vyšší tepelnou kapacitou c_L resp. c_S chladnou pomaleji, než ty s nízkou hodnotou c_L resp. c_S . Čím je hodnota tepelné kapacity vyšší, tím méně dochází k nehomogenitě teplotního pole odlitku. Obdobný vliv na homogenitu teplotního pole odlitku má hustota materiálu slitiny. Schopnost rozvádět teplo v tavenině (odlitku) lze také popsat materiálovou veličinou, a to tepelnou vodivostí. [33] [35]

Tab. 2-5 Materiálové hodnoty slitin Al-Si [35]

Slitina	ρ_L [$kg \cdot m^{-3}$]	ρ_S [$kg \cdot m^{-3}$]	c_L [$kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	c_S [$kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	λ [$W \cdot (mK)^{-1}$]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K^{-1}]	$T_S - T_L$ [°C]	L_{kr} [$kJ \cdot kg^{-1}$]
AlSi7Mg	2500	2625	-	1070	150-180	22	550-625	444
AlSi10Cu	2500	2625	1070	968	140-150	20	570-620	470
AlSi12Cu	2550	2675	1131	1080	150	20	570-585	497
AlSi8Cu3	2600	2725	1090	986	100-110	22	510-610	453

Teplo, které se z taveniny uvolní při tuhnutí resp. krystalizaci, vyjadřuje rovnice [33]:

$$Q_{KR} = m \cdot L_{KR}, \quad (2.7)$$

kde značí: L_{KR} – měrné latentní krystalizační teplo taveniny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Hodnota latentního krystalizačního tepla taveniny slitiny Al-Si je tím menší, čím je obsah křemíku nižší. Vliv obsahu křemíku na hodnotu L_{KR} uvádí tab. 2-6. [34]

Tab. 2-6 Latentní krystalizační teplo pro slitiny Al-Si v závislosti na obsahu křemíku [35]

obsah Si [hm %]	L_{kr} [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
6,0	435,0
7,0	444,2
8,0	453,0
9,0	463,1
10,0	470,6
11,0	481,9
12,0	497,4
13,5	511,0

Teplo, které se uvolní během chladnutí odlitku, popisuje rovnice [33]:

$$Q_{CHL} = m \cdot c_S \cdot (T_{KR} - T_{ok}), \quad (2.8)$$

kde značí: c_S – měrnou tepelnou kapacitu materiálu v tuhém stavu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

T_{ok} – teplotu odlitku po vyjmutí [$^{\circ}\text{C}$].

2.5.3 Teplo odvedené z formy

Tlaková licí forma teplo z odlitku jednak odvádí ke stěně formy, jednak toto teplo akumuluje. Hodnoty tepelně – fyzikálních vlastností běžných materiálu tlakových licích forem uvádí tab. 2-7. [33]

Tab. 2-7 Tepelně – fyzikální vlastnosti materiálů forem [35]

ocel	ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	c_F [$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	λ [$\text{W} \cdot (\text{mK})^{-1}$]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K^{-1}]	E [MPa]
1.2343	7760	460	28	12,4 (20-540 $^{\circ}\text{C}$)	191 (345 $^{\circ}\text{C}$)
1.2706	8000	420	21	11,8 (20-500 $^{\circ}\text{C}$)	195
1.7258	7800	500	50	13,5 (400 $^{\circ}\text{C}$)	-
Měď	8300	419	372	16,6	-

a) Teplo odvedené z formy vedením

Podíl tepla, které se šíří vedením z odlitku do formy a do rámu stroje, závisí na tepelně – fyzikálních vlastnostech materiálu formy a rámu, především na tepelné vodivosti, tepelné kapacitě, hustotě ale také na způsobu upnutí formy na rám. Stanovení tepla, které je z formy předáno do rámu stroje popisuje rovnice [33]:

$$Q_{stroj} = \alpha_v \cdot (T_{PF} - T_{PS}) \cdot S_{st} \cdot t_{cykl}, \quad (2.9)$$

kde značí: α_v – součinitel přestupu tepla vedením z povrchu formy do rámu stroje ($\alpha_v = 15 \text{ [W.m}^2\text{.K}^{-1}\text{]}$) [33];

T_{FS} – teplotu vnějšího povrchu formy, který je ve styku se strojem [$^{\circ}\text{C}$];

T_{PS} – teplotu povrchu rámu stroje, který je ve styku s formou [$^{\circ}\text{C}$];

S_{st} – plochu styku formy s rámem stroje [m^2];

t_{cykl} – čas licího cyklu [s].

Množství odvedeného tepla je přímo úměrné teplotnímu rozdílu mezi povrchem formy a povrchem rámu stroje, které jsou vzájemně ve styku, dále na velikosti styčné plochy a na čase. Vedením do rámu stroje je odvedeno 2 až 5 % z celkového množství tepla uvolněného odlitkem. [1] [33] [36]

b) Teplo odvedené do okolí prouděním

Teplo, které je odvedeno z formy prouděním okolního vzduchu, lze určit Newtonovým zákonem [33]:

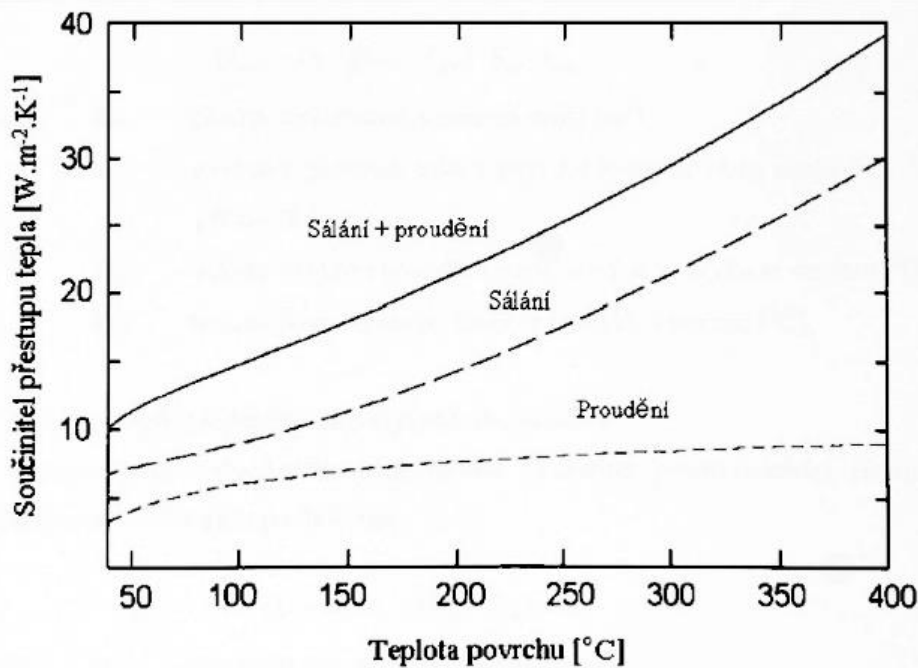
$$Q_{proud} = \alpha_p \cdot (T_{PF} - T_{ok}) \cdot S \cdot t_{cykl}, \quad (2.10)$$

kde značí: α_p – součinitel přestupu tepla prouděním [$\text{W.m}^2\text{.K}^{-1}$];

T_{PF} – teplotu vnějšího povrchu formy [$^{\circ}\text{C}$];

S_{FO} – plochu styku formy s okolím [m^2].

Z grafu na obr. 2-24 je zřejmé, že součinitel přestupu tepla α_p se s rostoucí teplotou líce formy téměř nemění a nabývá hodnot $\alpha_p = 3$ až $10 \text{ [W.m}^2\text{.K}^{-1}\text{]}$. Teplo odvedené z formy proudícím vzduchem činí pouze 5 až 10 % z celkového tepla, které odlitek uvolní. [33]



Obr. 2-24 Součinitel přestupu tepla sáláním a prouděním v závislosti na teplotě [3]

c) Teplu odvedené do okolí sáláním

Při výpočtu tepla, které je vyzářeno v podobě sálavé energie lze vycházet ze Stefanova – Boltzmannova zákona [33]:

$$Q_{sál} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{sp}^4 - T_{ok}^4) \cdot S \cdot t_{cykl}, \quad (2.11)$$

kde značí: σ – Stefan – Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^8$ [W·m²·K⁻⁴]);

ε – emisivitu [-];

T_{sp} – teplotu povrchu sálajícího tělesa [K];

T_{ok} – teplotu okolí [K];

$S_{sál}$ – plochu sálajícího tělesa [m²];

t_{cykl} – čas licího cyklu [s].

Emisivita ε (poměrná zářivost) udává schopnost tělesa (formy) vyzářovat teplo. Jedná se o optickou vlastnost materiálu, která je závislá na vlnové délce, chemickém složení, struktuře materiálu a na vlastnostech povrchu jako jsou drsnost, čistota a povrchová teplota. Hodnota emisivity pro materiál tlakové licí formy je obvykle 0,7 až 0,99. [3] [37]

Podíl sálavého tepla je také možné určit prostřednictvím součinitele přestupu tepla sáláním α_s [33]:

$$Q_{sál} = \alpha_s \cdot (T_{sp} - T_{ok}) \cdot S \cdot t_{cykl}, \quad (2.12)$$

kde značí: α_s – součinitel přestupu tepla sáláním [W·m²·K⁻¹].

Z grafu na obr. 2-24 je patrná teplotní závislost součinitele α_s , který nabývá hodnot v rozmezí 7 až 30 W.m⁻².K⁻¹. Hodnota tohoto součinitele významně kolísá v závislosti na místní teplotě povrchu formy. [33]

Množství tepla vyzářeného sáláním činí 3 až 10 % z celkového objemu tepla, které odlitek uvolní. [1] [36]

d) Teplu odvedené temperačním systémem

Teplu, které temperační systém odvede, resp. dodá soustavě, lze vypočítat pomocí Newtonova zákona [33]:

$$Q_t = \alpha_t \cdot S_k \cdot (T_F - T_{tm}) \cdot t_{cycl}, \quad (2.13)$$

kde značí: α_t – součinitel přestupu tepla prouděním mezi lícem formy a temperačním médiem [J.kg⁻¹.K⁻¹];

S_k – teplosměnný povrch temperačního kanálu [m²];

T_{tm} – teplotu temperačního média [°C].

Hodnota součinitele přestupu tepla α_t je dána druhem proudění média (laminární nebo turbulentní), teplotní vodivostí média a průměrem temperačního kanálu. Tuto hodnotu lze vypočítat pomocí Reynoldsova a Prandtlova podobnostního čísla [33]:

$$\alpha_t = 0,0235 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8) \cdot \frac{\lambda_t}{D}, \quad (2.14)$$

kde značí: Re – Reynoldsovo číslo média;

Pr – Prandtlovo číslo média;

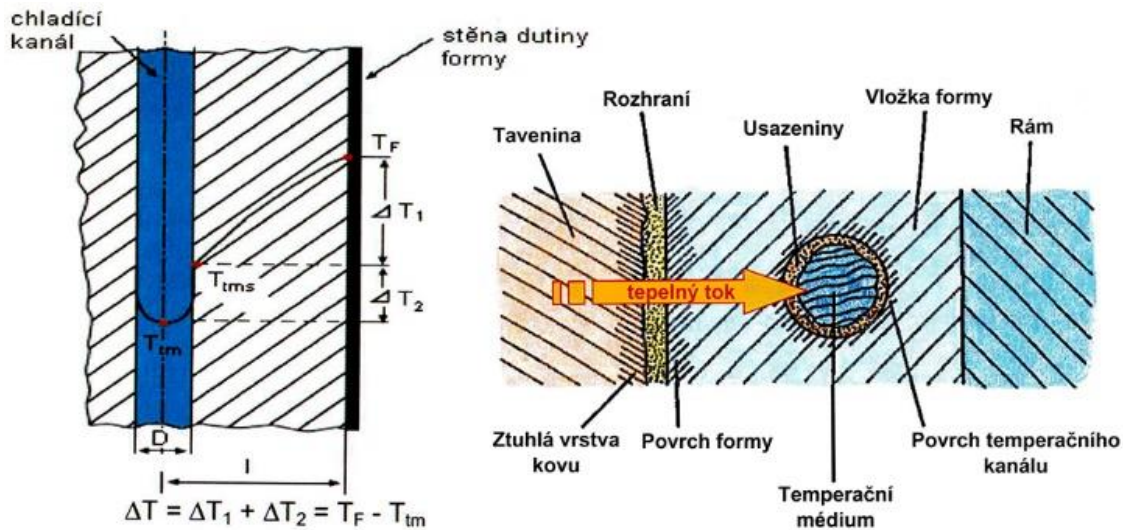
λ_t – součinitel tepelné vodivosti temperačního média [W.m⁻¹.K⁻¹];

D – hydraulický rozměr temperačního kanálu [m].

Podíl tepla, které odvede temperační systém, závisí na konstrukci temperačních kanálů, vlastnostech teplotnosného média a charakteru proudění. [33]

V případě konstrukce jsou určujícími parametry průměr kanálů, jejich vzdálenost od líce formy a počet samostatných temperačních okruhů. Schéma na obr. 2-25 (vlevo) ukazuje možné rozložení teplot v příčném řezu tlakové licí formy, přičemž temperační kanál má průměr $\varnothing D$ a jeho vzdálenost od líce formy je l . V tělese formy se uplatňuje způsob přenosu tepla vedením (teplotní spád ΔT_1) a následně je teplo odváděno proudícím médiem (teplotní spád ΔT_2). Teplotní spád ΔT_1 je tvořen rozdílem teplot formy T_F a stěny temperačního kanálu T_{ms} , zatímco teplotní spád ΔT_2 je dán rozdílem teploty T_{ms} a teploty temperačního média T_m .

Schéma na obr. 2-25 (vpravo) znázorňuje jednotlivé vrstvy, které mají vliv na výsledný součinitel přestupu tepla mezi lícem formy a temperačním médiem α_t . [33]



Obr. 2-25 Schéma rozložení teplot ve formě a v kanále (vlevo) [33] a schéma příčného řezu formy (vpravo) [35]

Běžně používaná teplotonosná média, olej a voda, se významně liší svými tepelně – fyzikálními vlastnosti jako je např. tepelná kapacita. Výrazně lepší schopnosti odvodu tepla z formy a tedy vyššího chladicího účinku dosahuje voda. [33]

Z hlediska proudění média v temperačních kanálech je výhodnější turbulentní proudění. Při tomto typu proudění nastává neuspořádaný pohyb částic média a dochází tak ke kontaktu částic o různé teplotě, což způsobuje intenzivní odvod tepla. Kritériem pro posouzení charakteru proudění je Reynoldsovo číslo Re , které je přímo úměrné součinu střední hodnoty rychlosti proudící kapaliny a hydraulickému rozměru (v tomto případě průměru kanálu) a nepřímo úměrné kinematické viskozitě, viz rovnice 2.13 [33]:

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu}, \quad (2.15)$$

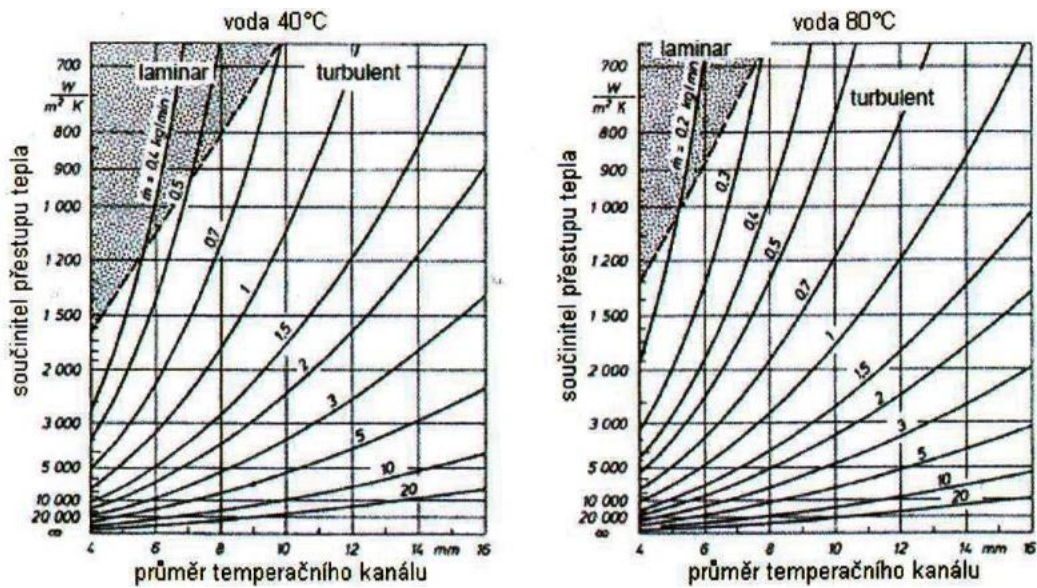
kde značí: c – střední hodnota rychlosti proudění v daném průřezu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

d – hydraulický rozměr [m];

ν – kinematická viskozita média [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Při hodnotách $Re < Re_{krit}$ se jedná o laminární proudění (v případě vody $Re_{krit} = 2320$). Pokud je hodnota Re v intervalu 2320 – 10 000, jedná se o přechodovou oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním, při vyšších hodnotách jde o turbulentní proudění. [33]

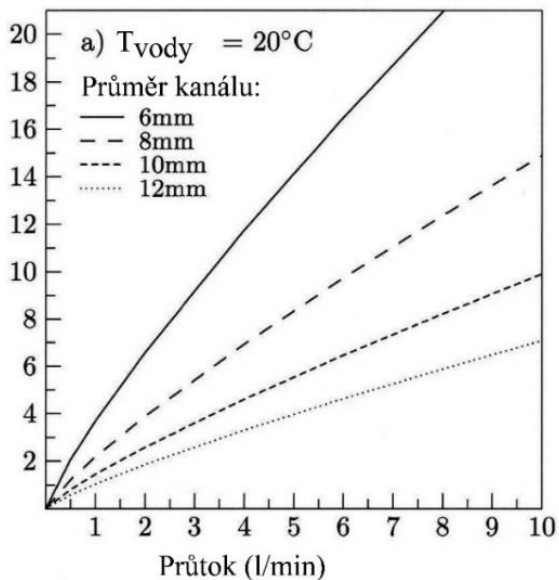
Graf na obr. 2-26 ukazuje závislost součinitele přestupu tepla α_t na průtoku vodního média a průměru temperačního kanálu. Zvýšené intenzity odvodu tepla lze dosáhnout vyšším průtokem média (roste hodnota Re) a také snížením teploty média.



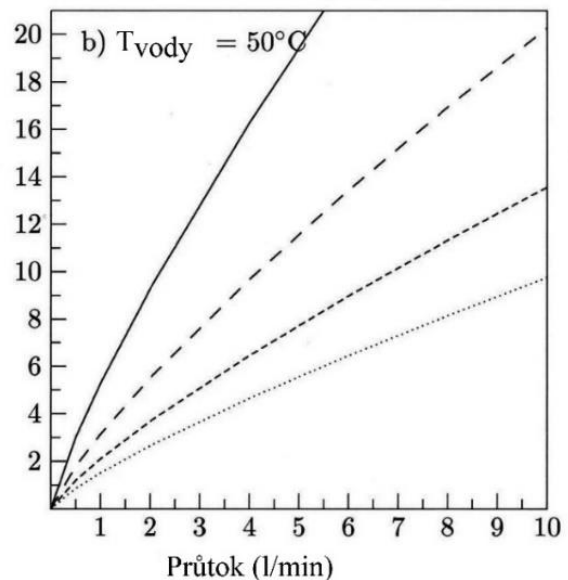
Obr. 2-26 Závislost rychlosti proudění temperačního média na různých činitelích pro teploty média 40 °C a 80 °C [35]

Z grafů na obr. 2-27 (pro vodu) a obr. 2-28 (pro olej) je dobře patrný vliv průměru kanálu při konstantním průtoku média. Čím větší je průměr kanálu, tím nižší je součinitel přestupu tepla α_t a klesá tak množství odvedeného tepla Q_t (přestože se zvětšuje teplosměnný povrch kanálu). Snížením teploty média T_m je také možné dosáhnout zvýšeného odvodu tepla, je ale nutné zaručit homogenní teplotní pole formy.

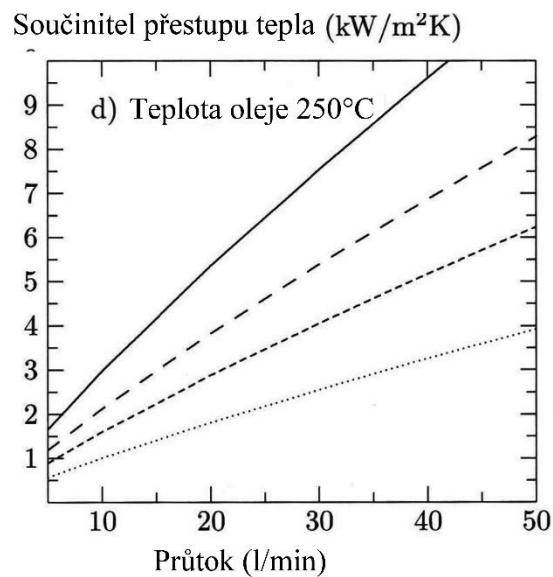
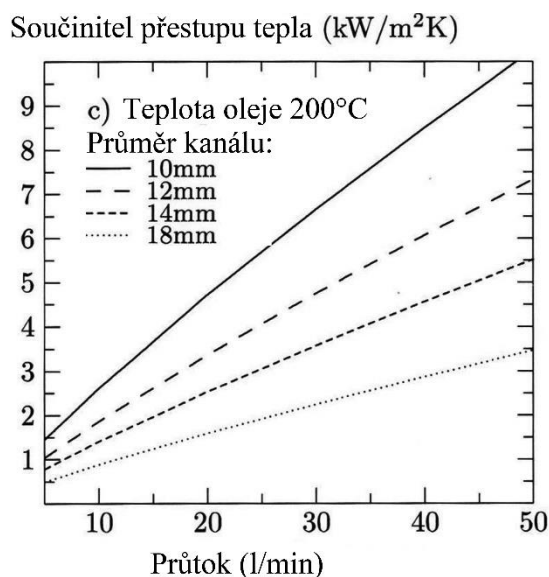
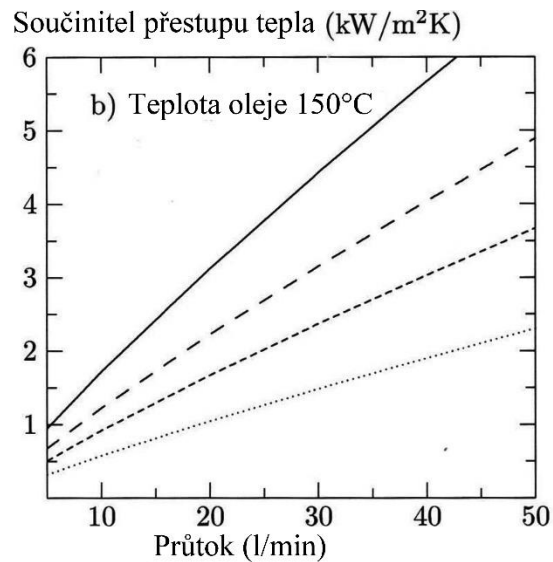
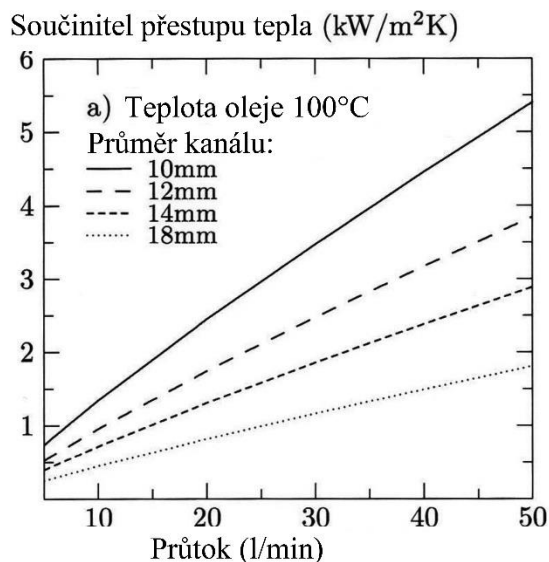
Součinitel přestupu tepla (kW/m²K)



Součinitel přestupu tepla (kW/m²K)



Obr. 2-27 Součinitel přestupu tepla mezi lícem formy a temperačním médiem (voda) [35]



Obr. 2-28 Součinitel přestupu tepla mezi lícem formy a temperačním médiem v závislosti na teplotě oleje: a) 100 °C, b) 150 °C, c) 200 °C, d) 250 °C [35]

Z tab. 2-8 a z tab. 2-9 je patrná teplotní závislost tepelné kapacity c_p , která u vodního i olejového média s rostoucí teplotou roste. [33] [35]

Tab. 2-8 Materiálové vlastnosti vodního temperačního média [35]

T [°C]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [kJ.(kg.K) ⁻¹]	λ [W.(mK) ⁻¹]	ν 10 ⁻⁶ [m ² .s ⁻¹]	Pr [-]
Voda					
25	997	4,18	0,607	0,89	6,1
50	988	4,18	0,643	0,55	3,5
75	975	4,19	0,667	0,39	2,4
100	958	4,22	0,683	0,29	1,7
120	943	4,25	0,686	0,25	1,5
160	907	4,35	0,683	0,19	1,1

Tab. 2-9 Materiálové vlastnosti olejových temperačních médií [35]

T [°C]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [kJ.(kg.K) ⁻¹]	λ [W.(mK) ⁻¹]	ν 10 ⁻⁶ [m ² .s ⁻¹]	Pr [-]
Transcal N (minerální olej)					
50	846	2,09	0,131	19,0	270
100	816	2,30	0,128	5,0	78
150	784	2,51	0,124	2,2	38
200	754	2,72	0,120	1,3	24
250	722	2,93	0,117	0,9	17
Marlotherm S (syntetický olej)					
50	1009	1,67	0,128	9,4	125
100	974	1,84	0,123	3,0	43
150	939	2,03	0,118	1,5	25
200	904	2,21	0,113	0,95	17
250	869	2,38	0,108	0,68	13

Funkce temperačního systému se liší podle konkrétního odlitku resp. formy a odvíjí se od způsobu ošetření líce formy. Pokud je povrch formy ošetřován práškovým separátorem nebo koncentrovaným prostředkem na bázi oleje (tzv. mikropostřík), slouží temperační systém k odvedení tepla ze soustavy odlitek – forma – stroj. V případě ošetření postříkem na vodní bázi může docházet k tomu, že voda resp. vodní pára odvede takové množství tepla, že k dosažení tepelné rovnováhy v soustavě odlitek – forma – stroj musí temperační systém teplo naopak přivést. [29] [32]

e) Teplo odvedené postříkem líce formy

V případě postříku na vodní bázi může podíl odvedeného tepla postříkem tvořit až desítky procent celkového odvedeného tepla ze soustavy odlitek – forma – stroj. Pro správnou funkci postříku je třeba zajistit, aby voda po líci pouze nestékala a aby došlo k vypaření většiny vodní složky. Pro odstranění neodpařené vody se na konci postříkového cyklu ofukuje líc formy vzduchem. Voda, která by zůstala v dělicí rovině, by zapříčinila porezitu odlitků. Teplo odvedené postříkem líce tlakové se vypočte podle rovnice [2] [33] [29]:

$$Q_p = m_p \cdot [c_p \cdot (T_v - T_{pp}) + L_{vp}], \quad (2.16)$$

kde značí:

- m_p – hmotnost odpařeného postříku [kg];
- c_p – měrnou tepelnou kapacitu postříku [J.kg⁻¹.K⁻¹];
- T_v – teplotu vypařování kapalně fáze z postříku [°C];
- T_{pp} – počáteční teplotu postříku [°C];
- L_{vp} – měrné skupenské teplo vypařování kapalně fáze z postříku [J.kg⁻¹],
voda: $L_{vp} = 2,253$ [MJ.kg⁻¹].

2.6 Měření teploty povrchu formy

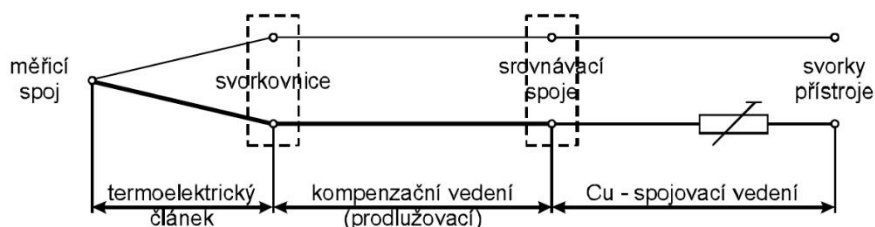
Při určování optimálních tepelných poměrů v soustavě odlitek – forma – okolí jsou kladeny požadavky na rychlé a přesné měření teploty. Pro zhotovení vysoce jakostních dílů je nezbytné znát teplotu taveniny, teplotu temperačního média a teplotu povrchu dutiny tlakové licí formy. Moderní udržovací pece používané ve slévárnách tlakového lití dokáží teplotu taveniny spolehlivě udržovat na požadované hodnotě. Měření teploty temperačního média zajišťuje přímo termoregulační zařízení. Pro zjištění teploty povrchu formy se používají teploměry, které je možné rozdělit na: [36]

- kontaktní (dotykové teploměry),
- bezkontaktní (bezdotykové teploměry-pyrometry, termovize).

Z hlediska fyzikálního principu jsou nejrozšířenější ve slévárenských provozech elektrické teploměry, které pracují na základě teplotní závislosti elektrického odporu, anebo využívají termoelektrický jev. [38]

Kontaktní snímače teploty jsou tvořeny dvěma dráty, které jsou na obou koncích spojeny a tvoří uzavřený elektrický obvod tzv. termočlánek, viz schéma na obr. 2-29. Každý drát je z jiného materiálu. Při ohřevu jednoho ze spojů vzniká v obvodu termoelektrické napětí. Velikost tohoto napětí závisí na kombinaci použitých materiálů drátů a na teplotě měřeného objektu. Pro zjištění hodnoty napětí je do obvodu zapojen voltmetr. Existuje celá řada kombinací materiálů drátů, které se liší rozsahem měřených teplot např. NiCr – Ni, CuNi – Cu, PtRh – Pt atd. Hodnota napětí se následně převádí na teplotu. [38]

Dotyková čidla termočláneků mají zpožděný náběh teploty, což je jejich hlavní nevýhoda. Doba odezvy činí obvykle několik sekund. Pro spolehlivé měření je nutná izolace elektrického obvodu, aby nedocházelo ke kontaminaci chemikáliemi, oleji a ke korozi drátů. [38]

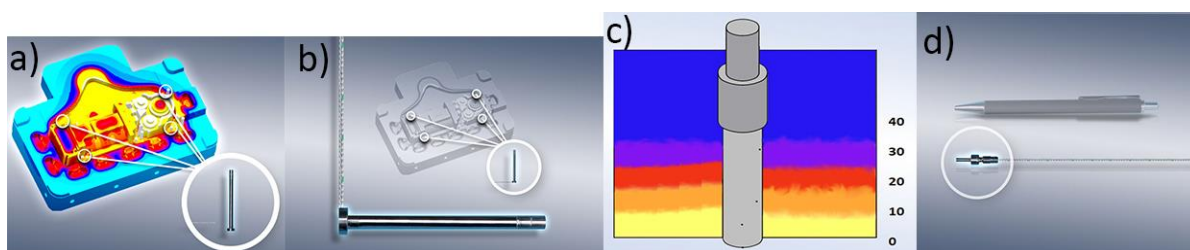


Obr. 2-29 Zapojení termoelektrického článku [39]

Pro měření teploty uvnitř formy během licího cyklu existují speciální snímače. Jedná se o dotykové snímače pracující na principu termočláneků NiCr – Ni, které mohou být integrovány do tvarových částí vložek nebo jader. V závislosti na typu sondy lze měřit buď

přímo teplotu taveniny v daném místě formy (do teploty max. 750 °C), nebo teplotu formy v blízkosti povrchu (do teploty max. 400 °C). [40]

Lze se setkat s různými provedeními senzorů. Pro obtížně přístupná místa v dutině se vyrábí sondy o průměru 2,5 mm, viz obr. 2-30d. U jiného typu snímače lze průměr sondy uzpůsobit požadavkům zákazníka. Tato sonda svým tvarem pak zároveň nahrazuje běžné jádro, viz obr. 2-30a,b. Pro zkoumání tepelné vodivosti formy existuje sonda měřící teplotu v různé tloušťce od povrchu, kterou ukazuje obr. 2-30c. Taková sonda měří teplotu v pěti úrovních, které jsou od sebe vzdáleny po 10 mm nebo po 1 či 2 mm. Pomocí takové sondy lze zkoumat vliv postřiku a temperačního systému na tepelnou bilanci formy přímo v průběhu lícího cyklu. [40]



Obr. 2-30 Dotykové snímače teploty pro tlakové lící formy [40]

Bezkontaktní snímače teploty pracují na principu snímání infračerveného záření (IR záření) emitovaného objektem. Infračervené záření emitují všechny objekty s teplotou vyšší, než 0 K. V rámci elektromagnetického spektra jde o záření s vlnovými délkami v rozmezí 0,7 až 100 μm . IR záření se nachází mezi oblastmi viditelného světla (nižší vlnové délky) a oblastí rádiových vln (vyšší vlnové délky). Pro účely měření se snímá záření o vlnových délkách 0,7 až 14 μm . [36]

Při měření však snímá teploměr tři druhy IR záření: odražené, prostupující a emitované. O teplotě objektu vypovídá pouze množství emitované energie z jeho povrchu. Pro správné měření musí snímač umět odečíst podíl odražené a prostupující složky záření a také uvažovat podíl energie absorbované v optickém systému. Na měření mají vliv okolní podmínky, tzn. přítomnost páry, prachu apod., které mohou záření absorbovat. [36]

IR záření emitované povrchem objektu prochází optickým systémem tvořeným čočkami a optickou clonou a prochází přes filtr k detektoru. Z detektoru následně vystupuje elektrický signál, který dává údaj o naměřené teplotě. Aby výstupní hodnota z detektoru byla správně převedena na hodnotu teploty, musí být zvoleny odpovídající parametry, tj. emisivita, poměr vzdálenosti k velikosti stopy, zorné pole a teplota okolí. [36]

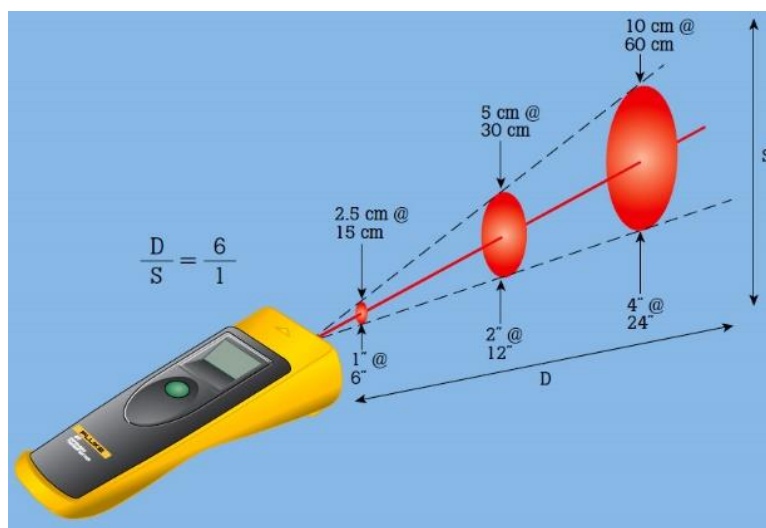
Emisivita (ϵ) je definována jako poměr energií vyzářených reálným tělesem a absolutně černým tělesem. Jedná se tedy o schopnost daného objektu emitovat IR záření.

Hodnota emisivity je vždy v intervalu od 0 (dokonalý reflektor např. lesklé zrcadlo) do 1 (dokonalý emitor resp. zářič, např. černé těleso). Hodnotu emisivity daného objektu ovlivňují zejména tyto faktory: teplota a tvar objektu, jakost povrchu (typ povrchové úpravy, zoxidovaný povrch), spektrální oblast měření, úhel snímání záření. Leštěné povrchy vykazují nízkou hodnotu emisivity, hrubé nebo matné vyšší hodnoty ε . Hodnotu emisivity je možné na snímači navolit, nebo je pevně stanovena hodnota odpovídající většině natřených, zoxidovaných nebo organických povrchů. Emisivitu některých materiálů uvádí tab. 2-10. [36]

Tab. 2-10 Hodnoty emisivity vybraných materiálů [41]

Materiál	emisivita
hliník leštěný	0,05
hliník, hrubý povrch	0,07
hliník, silně zoxidovaný	0,25
Bronz, porézni, hrubý	0,55
Bronz, leštěný	0,1
Ocel, silně zoxidovaná	0,88
Ocel, hrubý povrch	0,96
Ocel, zrezivělá	0,69

V praxi je nastavení správné hodnoty emisivity obtížné, jelikož při provozu může dojít např. k nalepení taveniny hliníku na povrch jádra. Vzhledem k rozdílným emisivitám hliníku a oceli může mít tento jev zásadní vliv na měření. Hliník má nízkou hodnotu emisivity a tedy vysokou odraznost. Díky tomu by při nastavení vysoké emisivity vykazoval povrch hliníku větší teplotu, než by byla jeho reálná teplota. Na vlastnosti povrchu vložek a jader, které se mohou projevit při měření, mohou mít vliv opravy tvarů (navarováním a broušením) a také nanášené vrstvy filmu při postřiku.



Obr. 2-31 Schéma poměru vzdálenosti a velikosti stopy [41]

Důležitým parametrem bezkontaktního teploměru je tzv. poměr vzdálenosti a stopy, viz obr. 2-31. Tento technický údaj úzce souvisí s rozlišením termokamery a je pro ni neměnný. Lze ho změnit pouze výměnou objektivu. Stopa je plocha, která se na snímku zobrazuje právě jako jeden obrazový bod (pixel). Teplota tohoto bodu je pak průměrnou teplotou dané plochy. Vzdálenost je dána odstupem čočky teploměru od povrchu objektu. Poměr vzdálenosti k velikosti plochy (označovaný jako poměr $D:S$) udává optické rozlišení. S rostoucím poměrem je rozlišení vyšší a velikost stopy, kterou lze snímat, menší. [36]

Zorné pole snímače souvisí s velikostí stopy a snímanou plochou objektu. Je-li vzdálenost mezi snímačem a objektem příliš velká, velikost stopy přečnává mimo povrch objektu, čímž dochází ke zkreslení měření. Drobné objekty je tedy nutné měřit v malé vzdálenosti, přičemž je potřeba respektovat minimální vzdálenost ostření termokamery. [36]

Teplota okolí úzce souvisí s nastavenou hodnotou emisivity. V případě, že měřený objekt má vyšší teplotu, než okolí, hrozí následující případ zkreslení teploty. Příliš vysoko nastavená emisivita zapříčiní naměření nižší teploty objektu, než je jeho skutečná teplota. Naopak příliš nízko nastavená emisivita způsobí naměření vyšší teploty objektu, než je ta skutečná. [36]

Při měření hrají důležitou roli také jevy odrazu od teplé plochy a odlesku.

V případě velkých teplotních rozdílů mezi snímanými objekty může docházet k odrazu od teplé plochy, kdy se záření z přehřátého objektu odráží na povrch chladnějšího objektu. V takovém případě dojde k naměření vyšší teploty, než je skutečná teplota povrchu chladnějšího objektu.

S úhlem snímání souvisí odlesk, který je přítomný u lesklých povrchů a také u válcových ploch. Na snímku se projevuje jako oblast s vyšší teplotou, než je skutečná teplota objektu

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Veškeré měření v rámci experimentální části práce byla prováděna ve spolupráci se slévárnou KOVOLIS HEDVIKOV a.s., která se specializuje na tlakové lití hliníkových slitin. Odbytištěm velké části odlitků je automobilový průmysl.

Cílem experimentu bylo zjištění změn povrchové teploty vybraného místa tlakové lící formy v závislosti na nastavení parametrů chladicího okruhu temperačního systému.

3.1 Popis experimentu

Za tímto účelem byla vybrána tlaková lící forma pro výrobu odlitku označením 65580, který po obrobení slouží jako součást brzdových systémů, viz obr. 3-1. U této formy se slévárna potýká s rizikem přehřívání jader v blízkosti vtoku.



Obr. 3-1 Pozice jader na odlitku [42]

Ve formě pro odlitek 65580 je implementován temperační systém, který využívá vodního bodového chlazení tvarových částí dutiny i pohyblivých jader. Chladicí agregát umožňuje u jednotlivých chladících okruhů formy regulaci průtoku a doby chlazení. Povrchová teplota v závislosti na nastavení chladicího okruhu byla sledována u čtyř jader, která byla napojena na společný chladicí okruh.

Experiment byl tedy rozdělen do dvou částí. V první části byl zjišťován vliv doby chlazení okruhu na povrchovou teplotu jader. Měření proběhlo pro 3 různé intervaly doby chlazení: 9 s, 10 s a 11 s, přičemž teplota jader byla vyhodnocována jak před postřikem, tak po postřiku. Tato část experimentu si kladla za cíl zjistit, jak velký bude mít vliv změna doby chlazení v určených mezích na povrchovou teplotu jader.

Druhá část experimentu zkoumala vliv změny průtoku chladicí vody okruhem na povrchovou teplotu jader. I v rámci této části proběhlo zvlášť měření teploty před postřikem a zvlášť po postřiku. Úkolem druhé části experimentu bylo zjištění změn povrchové teploty jader pro různé hodnoty průtoku chladicího média.

Ve slévárně probíhá lití odlitku 65580 na více licích pracovištích. Každá část měření proběhla na jiném licím pracovišti, přičemž v obou případech se jednalo o stroj typu Toshiba DC800J-MS. Obě licí pracoviště byla vybavena stejným typem chladicího agregátu.

Pro daný odlitek disponuje slévárna vícero formami, které se lišily svým stářím. Měření v rámci první části experimentu proběhlo na starší formě, zatímco u druhé části experimentu bylo měřeno na novější formě. Přestože je u forem pravidelně prováděna údržba, v rámci které se provádí čistící procedura chladících okruhů, není vyčištění kanálů dokonalé. U starších forem tak může být účinnost chlazení omezena vodním kamenem nebo rzi. Podobně tomu je u povrchu dutiny včetně povrchu jader, kde u starších forem může být povrch poškozen vlivem tepelného a chemického namáhání (nalepováním taveniny), tryskáním, navařováním či broušením.

3.2 Slitina

Do tlakové formy byla odlévána slitina označená podle normy EN 1706 AlSi12Cu1(Fe). Chemické složení této slitiny udává tab. 3-1. Tato slitina je vhodná pro tvarově složité, tenkostěnné odlitky. Je vhodná pro hlavy a bloky motorů, tělesa pump, lopatková kola aj.

Tab. 3-1 Chemické složení slitiny AlSi12Cu1(Fe)

Chemické složení slitiny EN AC-AlSi12Cu1(Fe) [%]											Obsah nečistot [%]	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Jeden prvek	celkem
10,5-13,5	1,3	0,7-1,2	0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20	0,05	0,25

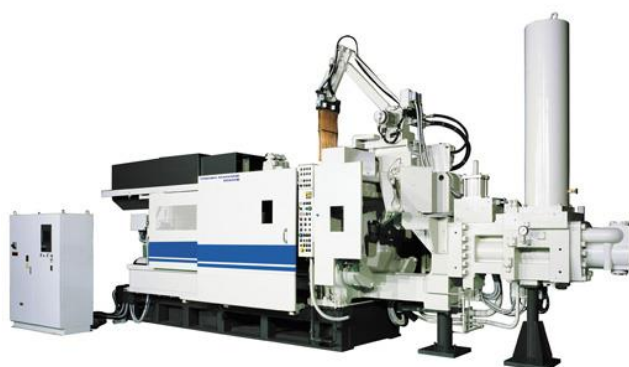
Tavení slitiny proběhlo v šachtové tavicí peci Striko Westofen s tavicím výkonem 1 t/hod. Objem nových bloků ve vsázce činil minimálně 30 %. Poté byla tavenina přelita do transportních kelímků a metalurgicky ošetřena tj. odplyněna a rafinována. Jako odplyňovací médium byl použit dusík. Celý cyklus odplynění a rafinace trval 3 minuty. Během odplynění se do taveniny nadávkovala rafinační sůl ARSAL 2125. Následně tavič dopravil kelímek s taveninou k licímu stroji, kde byla tavenina přelita do udržovací pece Marconi. Mechanické dávkovací zařízení poté nalilo taveninu do licí komory. Teplota taveniny v udržovací peci se mohla pohybovat v mezních hodnotách 665 °C až 690 °C. Hmotnost dávky na jedno nalití činila 2,2 kg. Tepelně – fyzikální vlastnosti této slitiny uvádí tab. 3-2.

Tab. 3-2 Tepelně – fyzikální vlastnosti slitiny AlSi12Cu1(Fe)

Slitina	ρ_L [kg.m ⁻³]	ρ_S [kg.m ⁻³]	c_L [kJ.(kg.K) ⁻¹]	c_S [kJ.(kg.K) ⁻¹]	λ [W.(mK) ⁻¹]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]	T_S-T_L [°C]	L_{kr} [kJ.kg ⁻¹]
AlSi12Cu1(Fe)	2550	2675	1131	1080	150	20	570-585	497

3.3 Tlakový licí stroj

Forma pro díl 65580, na které bylo realizováno měření, byla nasazena na tlakovém licím stroji typu Toshiba DC800J – MS, viz obr. 3-2. Jedná se o horizontální tlakový stroj se studenou licí komorou. Tab. 3-3 obsahuje základní technické údaje, které uvádí výrobce.



Obr. 3-2 Licí stroj Toshiba DC800J-MS [43]

Tab. 3-3 Technické údaje licího stroje Toshiba DC800J-MS [43]

Tlakový licí stroj DC800J-MS		
Údaj	Jednotka	Hodnota
Uzavírací síla	[kN]	8000
Rychlost lisování	[m/s]	0,1-6,5
Rozteč mezi sloupy (výška x šířka)	[mm]	930x930
Výška formy max/min	[mm]	950/400
Zdvih formy	[mm]	760

Layout licího pracoviště dále tvořili tyto periferní zařízení: udržovací elektrická pec Marconi, dávkovací zařízení, chladicí agregát spolu se zařízením na hlídání průtoku vody, vakuovací zařízení, zařízení na ošetření formy Wollin, robot ABB pro vyjímání odlitku z formy, ochlazovací vana, ostříhovací lis a dopravníkové pásy.

Dodržení správného intervalu licího cyklu kontrolovala řídicí jednotka licího stroje. Skutečná doba licího cyklu se pohybovala během měření od 45 do 50 s.

3.4 Chladicí agregát

V rámci lícího pracoviště stroje Toshiba DC800J – MS se pro chlazení formy používá sekundární chladicí systém. Tento systém používá jako chladicí médium demineralizovanou vodu. Spolu se zařízením na kontrolu průtoku chladicí vody umožňuje toto zařízení samostatnou regulaci průtoku pro jednotlivé okruhy. Chladicí agregát dovoluje chladit lící formu až 17 okruhy, přičemž u každého okruhu je možné nastavit různou dobu chlazení. Pokud je v rámci jednoho okruhu chlazeno více míst, platí pro tato místa samozřejmě stejné parametry chlazení (průtok, doba chlazení). Maximální možný průtok pro jeden okruh je 50 l/min. Na skutečnou hodnotu průtoku má vliv stupeň zanesení temperačních kanálů. Přestože v rámci údržby forem dochází k proplachu temperačních kanálů čisticím prostředkem, není toto čištění dokonalé. U starších forem tak může být skutečný průtok nižší, než u nových forem.

Sekundární chladicí systém pracuje s uzavřeným okruhem chladicí vody. Tento okruh tvoří tyto hlavní části: nádrž s vodou, čerpadlo, chladič, pískový filtr, potrubí pro přívod a odvod vody od rozvaděče chladicí vody a řídicí panel. Jednotlivé tyto části jsou vidět na obr. 3-3 a obr. 3-4. Teplota chladicí vody v nádrži se pohybuje okolo 25 °C. Ochlazení vody na výstupu z formy zajišťuje chladič.



Obr. 3-3 Sekundární chladicí systém



Obr. 3-4 Řídicí panel zařízení na regulaci průtoku chladicí vody

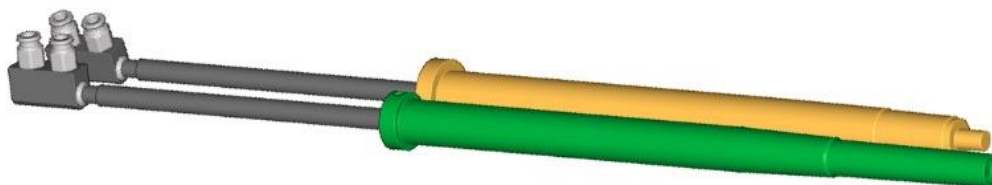
3.5 Tlaková licí forma

Tlaková licí forma pro odlitek 65580 je dvojnásobná (tj. má dvě fazony). Materiálem tvarových vložek je ocel 1.2343 EFS SUPRA. Tyto vložky jsou uloženy v rámu z legované oceli.

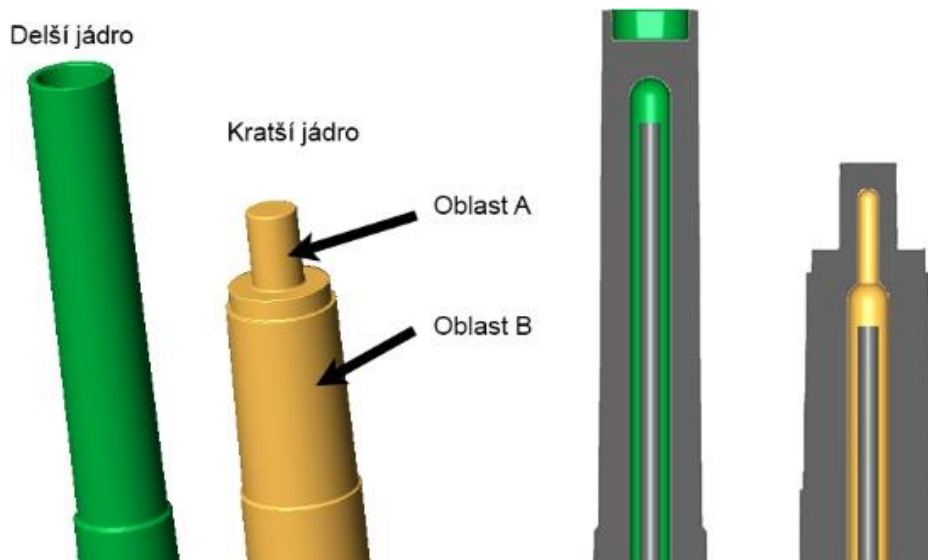
Vtoková soustava je na formě řešena tak, že tavenina ústí do dutiny formy prstencovým vtokem kolem čtyř spodních jader. Tato spodní jádra jsou tak značně tepelně namáhána. Na dvou větších jádrech z těchto čtyř bylo prováděno měření teploty.

Kratší jádro, u kterého bylo uskutečněno měření, je vyrobeno z oceli 1.2343 a následně povrchově nitrídováno na tvrdost 46 HRC. Delší jádro je vyrobeno ze speciální ocele VACO 180 a je tepelně zpracováno na tvrdost 54 až 56 HRC.

Způsob chlazení obou jader je stejný. Vyrvtaným otvorem v jádře vede trubička, kterou je přiváděna chladicí voda až k vrcholu jádra, viz obr. 3-5 a obr. 3-6. Tento způsob bodového chlazení jader je popsán v kapitole 2.3.2. Vnitřní průměr trubičky je 3 mm a tloušťka její stěny 0,5 mm. U menšího jádra je průměr chladicího kanálu v oblasti B 8 mm a v oblasti A 4 mm. Vzdálenost konce trubičky od čela kanálu je 27 mm. Průměr jádra v oblasti A je přibližně 11 mm a v oblasti B 25 mm. V případě delšího jádra je průměr kanálu 8 mm a vzdálenost konce trubičky od čela kanálu 9 mm. Průměr delšího jádra v měřené oblasti je přibližně 19 mm. Výkresy obou jader jsou uvedeny v přílohách č. 1 a č. 2.



Obr. 3-5 Jádra chlazená okruhem č. 10



Obr. 3-6 Vyznačení oblastí měření teploty na jádrech

Na obr. 3-7 a obr. 3-8 je uvedeno schéma temperačního systému pevné části formy. Pevná část je chlazena celkem pěti samostatnými okruhy (okruh č. 1, 2, 3, 5 a 7). Pro jednoznačnost je potřeba uvést, že označení levá a pravá fazona (dutina) je bráno z hlediska pohyblivé části formy.

Okruh č. 1 slouží k bodovému chlazení levé fazony. Tento okruh zde chladí 6 tvarových míst, přičemž tato místa jsou označena pořadovými čísly 1 až 6. Kanály pro průtok vody jsou kolmé na dělicí rovinu.

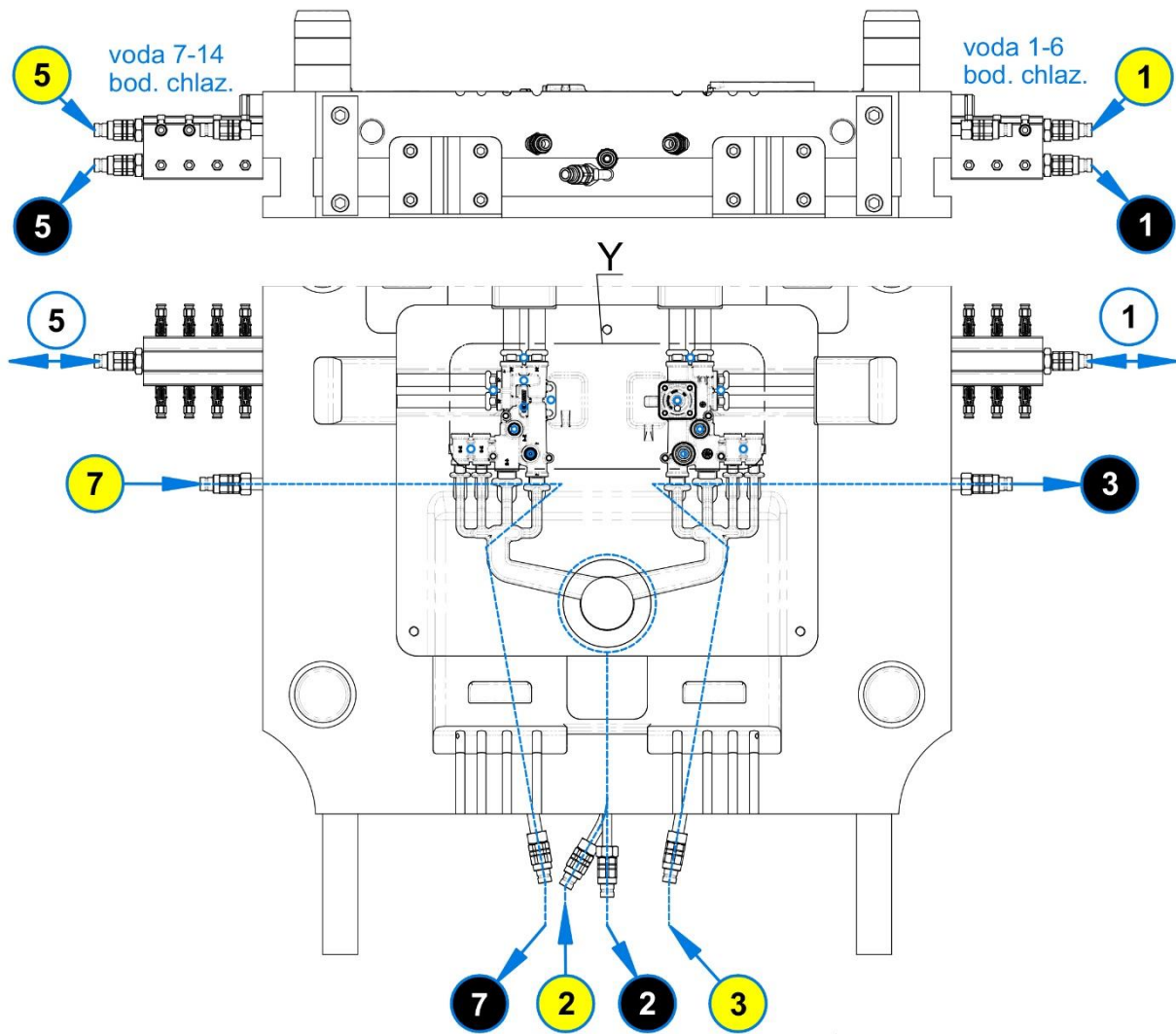
Okruh č. 2 zajišťuje chlazení vtoku. Při nasazení formy na licím stroji nebyl tento okruh po dobu měření zapojen.

Okruh č. 3 je určen pro chlazení vložek v místě vtokové soustavy a vtokového nařiznutí u levé fazony. Tento okruh je totožný s okruhem č. 7

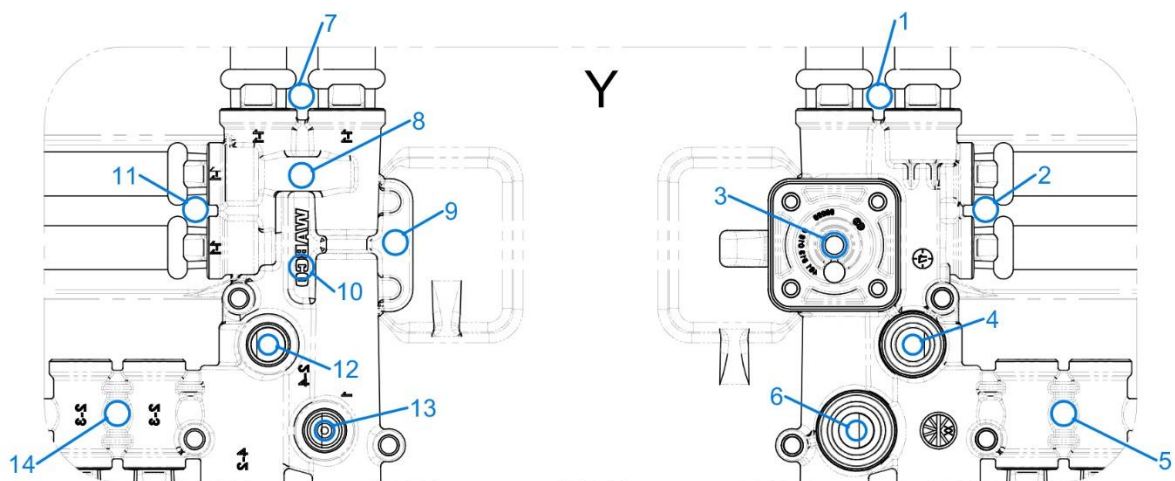
Okruh č. 5 chladí dutinu pravé fazony. Okruhem je chlazeno 8 tvarových míst na formě, přičemž tato místa jsou označena pořadovými čísly 7 až 14. Kanály pro průtok vody jsou kolmé na dělicí rovinu. Doba chlazení je stejná jako u okruhu č. 1.

Okruh č. 7 je totožný s okruhem č. 3, tzn. pro okruh je stejná hodnota doby chlazení jako pro okruh č. 3.

Vstup Výstup X-Chlazení vodou

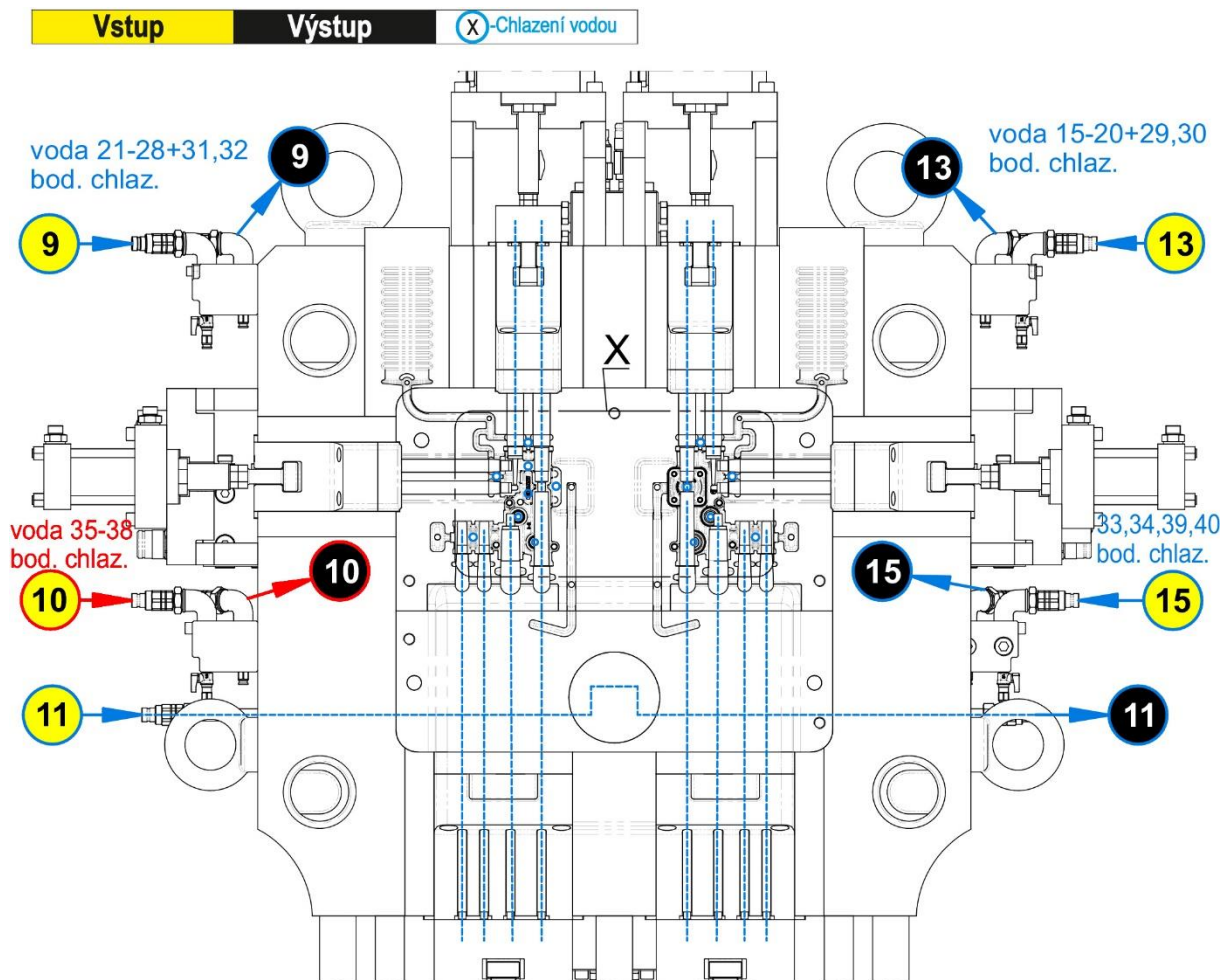


Obr. 3-7 Schéma chlazení pevné části formy

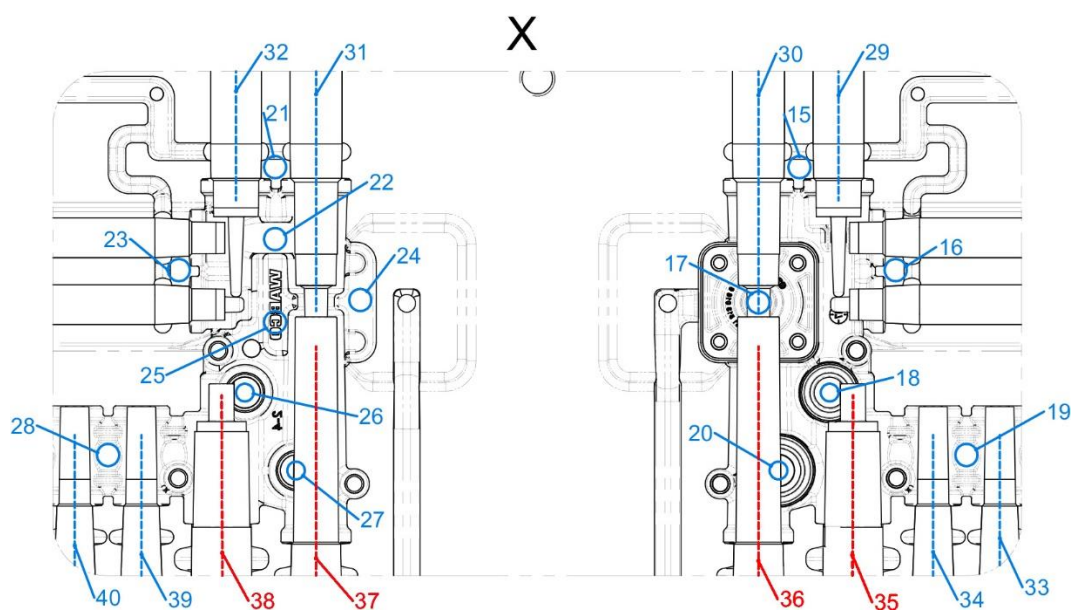


Obr. 3-8 Detail chlazení pevné části formy

Na obr. 3-9 a obr. 3-10 je zobrazeno schéma temperačního systému pohyblivé části formy. Pohyblivá část je chlazena stejně jako pevná část pěti samostatnými okruhy (okruh č. 9, 10, 11, 13 a 15).



Obr. 3-9 Schéma chlazení pohyblivé části formy



Obr. 3-10 Detail chlazení pohyblivé části formy

Okruh č. 9 slouží k bodovému chlazení levé fazony. Tento okruh zde chladí 8 tvarových míst ve vložkách (identické s okruhem č. 5) a navíc dvě horní pohyblivá jádra. Jednotlivá místa chlazení jsou označena pořadovými čísly 21 až 28 a 31, 32.

Okruh č. 10 chladí pouze dolní dvě pohyblivá jádra na každé fazoně tj. celkem 4 jádra. Chlazení těchto jader je označeno pořadovými čísly 35 až 38.

Úkolem okruhu č. 11 bylo chlazení protivtokové vložky. Tento okruh nebyl po dobu měření zapojen.

Funkcí okruhu č. 13 bylo bodové chlazení pravé fazony. Okruh chladí 6 tvarových míst ve vložkách (identické s okruhem č. 1) a navíc dvě horní pohyblivá jádra. Jednotlivá místa chlazení jsou označena pořadovými čísly 15 až 20 a 29, 30. Doba chlazení je stejná jako u okruhu č. 9.

Okruh č. 15 je určen pro chlazení dvou menších pohyblivých jader na každé fazoně (celkem 4 jader). Bodové chlazení těchto jader je označeno pořadovými čísly 33, 34, 39 a 40.

Okruhem č. 17 byl chlazen píst po celou dobu licího cyklu.

V tab. 3-4 jsou uvedeny hodnoty průtoku chladicí vody a doby chlazení pro jednotlivé okruhy. Chlazení začíná při spuštění lisování řídicí jednotkou stroje. Od tohoto okamžiku je tedy počítána doba chlazení.

Tab. 3-4 Podmínky chlazení stávající výroby

	číslo okruhu	Průtok [l/min]		doba chlazení [s]		číslo okruhu	Průtok [l/min]		doba chlazení [s]
		Aktuální	Průměrný				Aktuální	Průměrný	
pevná pol. formy	1	25	10	2	pohyblivá pol. formy	9	29	2	4
	3	26	23	5		10	15	10	10
	5	30	16	2		13	24	2	4
	7	28	24	5		15	11	1	10
					píst	17	21	21	celý čas cyklu

V rámci experimentu bylo měněno pouze nastavení okruhu č. 10.

3.6 Postřik líce formy

Pro ošetření líce formy vybrané formy se používá postřiková hlava od firmy Wollin, se kterou manipuluje robot v horizontálním a vertikálním směru.

Postřiková hlava se skládá ze dvou částí, přičemž jedna zajišťuje postřik pevné části formy a druhá pohyblivé části formy. Hlava se skládá z okruhů, kterým lze jednotlivě nastavovat parametry. K pevné části formy směřují okruhy 1, 3 a 5. K pohyblivé 2, 4, a 6. Okruh 7 slouží pouze pro ofuk. Doplnkové okruhy 3', 5' a 6' jsou propojeny s příslušným

okruhem 3, 5 a 6 a platí pro ně parametry daného okruhu. Jednotlivé kostky daného okruhu se označují písmeny, přičemž A je vždy kostka nejbližší obsluze stroje. Každá tryska má své označení, ke kterému se vztahuje ošetřované místo a typ trysky a škrťacího šroubu. Toto označení určuje kostku, ve které je tryska upevněna a okruh, kterým je řízena. Jednotlivé trysky jsou nasměrovány na určité místo dutiny formy dle technologického postupu. Schéma hlavy pro pevnou část zobrazuje obr. 3-11.



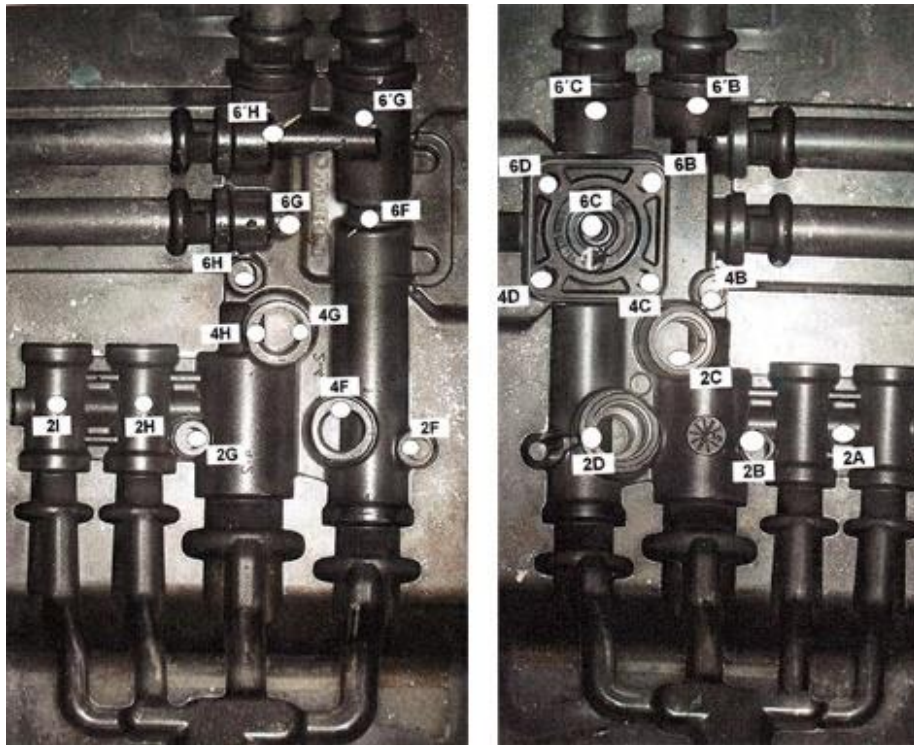
Obr. 3-11 Schéma značení trysek na postřikové hlavě pro pevnou část formy

Tab. 3-5 uvádí ke každému ošetřovanému místu pevné části formy příslušný počet drážek na trysce a na škrťacím šroubu. Počet drážek na trysce určuje velikost průměru otvoru této trysky, přičemž velikost otvoru má vliv na tvar postřikového kužele. Na postřikové hlavě byly nasazeny pouze trysky se dvěma drážkami, což odpovídá otvoru o průměru 0,8 mm. Počet drážek na škrťacím šroubu určuje velikost průměru otvoru tohoto šroubu, přičemž průměr otvoru ve škrťacím šroubu určuje průtok dělicího prostředku.

Tab. 3-5 Počet drážek na trysce a šroubu pro konkrétní ošetřované místo dutiny pevné části formy (X - zaslepeno)

		A	B	C	D	E	F	G	H	I
6'	Tryska		2	2	X	X	X	2	2	
	Šroub		2	2	X	X	X	2	2	
6	Tryska	X	2	2	2	X	2	2	2	X
	Šroub	X	3	3	3	X	3	3	3	X
4	Tryska	X	2	2	2	X	2	2	2	X
	Šroub	X	3	3	3	X	3	3	3	X
2	Tryska	2	2	2	2	X	2	2	2	2
	Šroub	2	3	3	3	X	3	3	3	2
7	Tryska	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk

Na obr. 3-12 je ukázán způsob ošetření pravé a levé fazony pevné části formy.



Obr. 3-12 Schéma postřiku pevné části formy (pravá a levá fazona)

Na obr. 3-13 je znázorněna postřiková hlava pro pohyblivou část formy včetně schématu s označením jednotlivých trysek.



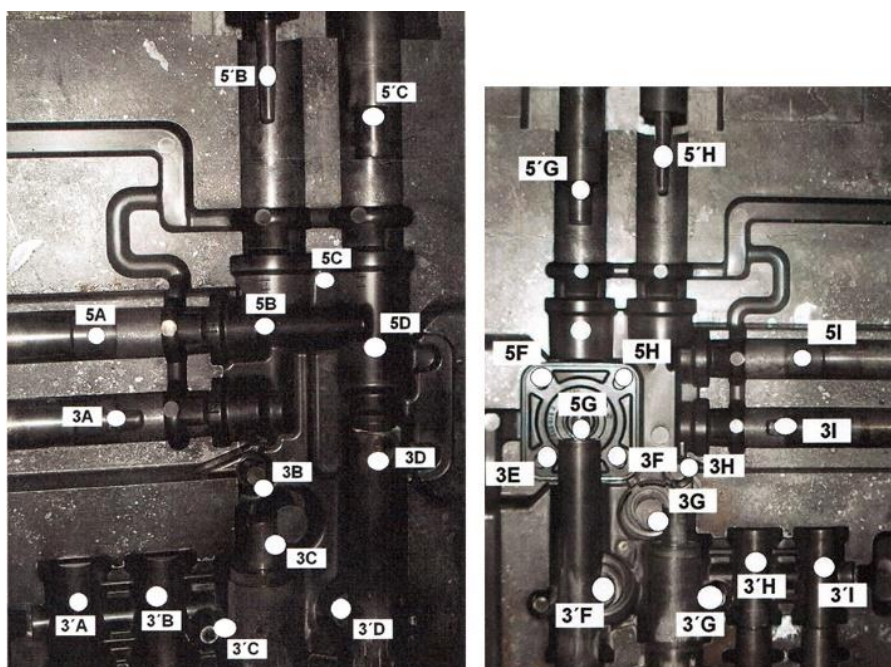
Obr. 3-13 Schéma značení trysek na postřikové hlavě pro pohyblivou část formy

Tab. 3-6 uvádí ke každému ošetřovanému místu pohyblivé části formy příslušný počet drážek na trysce a na škrťicím šroubu.

Tab. 3-6 Počet drážek na trysce a šroubu pro ošetřované místo dutiny pohyblivé části formy (X - zaslepeno)

		A	B	C	D	E	F	G	H	I
5'	Tryska		2	2	X	X	X	2	2	
	Šroub		2	2	X	X	X	2	2	
5	Tryska	X	2	2	2	X	2	2	2	X
	Šroub	X	3	3	3	X	3	3	3	X
3	Tryska	X	2	2	2	X	2	2	2	X
	Šroub	X	3	3	3	X	3	3	3	X
3'	Tryska	2	2	2	2	X	2	2	2	2
	Šroub	2	3	3	3	X	3	3	3	2
7	Tryska	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk	Ofuk

Na obr. 3-14 je ukázán způsob ošetření pravé a levé fazony na pohyblivé části formy. Zkoumaná jádra ošetřují trysky okruhu 3 a okruhu 3'.



Obr. 3-14 Schéma postřiku pohyblivé části formy (levá a pravá fazona)

Postřikovací cyklus je plně automatický a je spouštěn řídicí jednotkou licího stroje. Po najetí hlavy do pracovní pozice je proveden postřik horní části dutiny a následně postřik spodní části dutiny včetně jader. Poté hlava při posuvném pohybu od shora dolů ofukuje povrch dutiny tak, aby došlo k tvorbě rovnoměrné vrstvy filmu a odstranění vody. Ošetření pevné a pohyblivé části formy probíhá naráz. Celková doba postřikovacího cyklu včetně pojezdů, čekání a ofuku činila 15 s. Doba ošetření jader činila 0,8 s.

Pro ošetření povrchu formy byl použit ve slévárně běžně používaný dělicí prostředek SL 7804 od firmy Chem – Trend. Vhodná pracovní teplota tohoto dělicího prostředku je udávána do 250 °C. V případě, že teplota povrchu na jádrech dosahovala i po postřiku nad 200 °C, byla tato teplota hodnocena jako kritická pro správnou funkci separátoru.

Tvorbu dělicího prostředku zajišťuje směšovací zařízení Wollin TOP 75 MD znázorněné na obr. 3-15. Toto zařízení je schopno pracovat v rozmezí poměru ředění 1:25 - 1:200. Směšovací poměr byl nastaven pomocí dávkovacího šroubu na 1:80. Tento poměr vychází z požadované procentuální hodnoty koncentrace a je určen technologickým postupem. Tomuto poměru odpovídá koncentrace 1,25 %.

Pro zjištění spotřeby postřiku v rámci jednoho výrobního cyklu bylo provedeno měření. Nádrž s emulzí byla naplněna po horní okraj a byla zaznamenána hodnota z vodoměru. Po 50 výrobních cyklech byla nádrž opět doplněna po horní okraj a následně

z vodoměru odečtena nová hodnota. Rozdíl těchto hodnot určil spotřebu dělicího prostředku během 50 cyklů. V rámci jednoho licího cyklu se tedy spotřebuje cca 0,4 l postřiku.



Obr. 3-15 Směšovací zařízení Wollin TOP 75 MD

3.7 Měření povrchové teploty jader termokamerou

Pro měření teploty jader byla použita infračervená kamera Fluke Ti400. Základní technické údaje této termokamery uvádí tab. 3-7.

Tab. 3-7 Technické údaje infračervené kamery Fluke Ti400 [44]

Hlavní vlastnosti	Ti400
Rozlišení snímače	320 × 240 (76 800 pixelů)
prostorové rozlišení	1,31 mRad, D:S 753:1
Zorné pole	24° vodorovně × 17° svisle
Minimální vzdálenost ostření	15 cm
Tepelná citlivost (NETD)**	≤0,05 °C při 30 °C teploty objektu
Minimální rozpětí (v manuálním režimu)	2,0 °C
Minimální rozpětí (v automatickém režimu)	3,0 °C
Rozsah měření teploty (není kalibrováno pod -10 °C)	-20 °C až +1200 °C
Přesnost	±2 °C nebo 2 % (při jmenovité teplotě 25 °C, platí vyšší hodnota)
Infračervené spektrální pásmo	7,5 μm až 14 μm (dlouhé vlny)
Provozní teplota	-10 °C až +50 °C
Relativní vlhkost	10 % až 95 %, nekondenzující
Měření teploty středového bodu	Ano
Bodová teplota	Značky horkých a studených bodů
Uživatелеm definovatelné bodové značky	3 uživatelem definované body
Středový rámeček	Prizpůsobitelný měřicí rámeček s minimální, průměrnou a maximální teplotou

** Nejlepší možné

Termokamera byla použita pro své výhody, jako je bezdotykové a rychlé měření povrchové teploty u těžko dostupných míst, díky čemuž bylo možné zjišťovat rozložení teploty na povrchu obou jader v rámci jednoho měření. Potřeba rychlého měření teploty s minimální dobou náběhu měřicího přístroje je obzvlášť nutná, měří-li se povrchová teplota bezprostředně po ošetření postřikem. V takovém případě totiž dochází k prudkým změnám teplotního pole na povrchu. Přesnost stanovení teploty při měření hodnot kolem 200 °C je ± 4 °C.

Přes uživatelskou přívětivost termokamery bylo potřeba vyrovnat se s vlivy, které by mohly mít negativní dopad na měření a následnou interpretaci teplotních snímků. Jednalo se zejména o hodnotu emisivity a teploty pozadí, vzdálenost objektivu termokamery od měřených jader a úhel, pod jakým byla snímána.

Problematika nastavení správných parametrů při měření termokamerou je stručně popsána v kapitole 2.6. Při měření teploty jader byla přednastavena hodnota $\varepsilon = 0,95$, což odpovídá oceli s hrubým povrchem. Před měřením byla jádra zkontrolována, zda na nich není nalepen hliník. Dalším důležitým parametrem nastaveným na termokameře byla teplota okolí, která byla přednastavena na 22 °C. Vzdálenost mezi objektivem termokamery a měřenými jádry byla volena tak, aby jádra levé i pravé fazony byla snímána přibližně ze stejné vzdálenosti. Podobně jako vzdálenost je i úhel snímání jader do značné míry omezen špatnou přístupností k povrchu formy. Brání tomu jednak vodící sloupky stroje, tak také velká intenzita sálavé energie vyzařovaná z obou částí formy.

Pro vyhodnocení termosnímků byl využit volně dostupný software od výrobce termokamery s názvem SmartView 3.2.1. Teplota obou jader byla určována pomocí nástroje středového rámečku, který umožňuje stanovit minimální, průměrnou a maximální teplotu vybrané oblasti.

Delší jádro bylo vyhodnocováno s ohledem na odlesk v ose jádra a odlesk na krajích od dutiny formy. Velikost měřené oblasti byla určena tak, aby zahrnovala pouze tu část jádra, která je plně oblita hliníkem a která je funkční částí odlitku.

U kratšího jádra bylo vyhodnocení provedeno ve dvou oblastech. Jednu oblast tvořila špička jádra o menším průměru (oblast A) a druhou oblast silnější část jádra (oblast B), která byla ještě plně oblita taveninou. Podobně jako u delšího jádra i zde oblast na výstupu z fazony, kde nebylo jádro plně oblito taveninou, nebyla pro měření podstatná.

Požizování teplotních snímků probíhalo vždy s minimálním odstupem 15 minut. Tato doba byla nutná na ustálení teplotního pole. Po otevření formy vždy proběhlo snímání nejprve

levé fazony a bezprostředně poté i pravé fazony. Snímky byly pořizovány vždy při zajetých jádrech.

Měření bylo provedeno pro stejné nastavení parametrů chladicího okruhu třikrát. Při každém měření byly kontrolovány tyto údaje: teplota a tlak chladicí vody na vstupu do formy, teplota taveniny v udržovací peci a čas licího cyklu. Intervaly, v jakých se pohybovaly tyto hodnoty během měření, uvádí tab. 3-8.

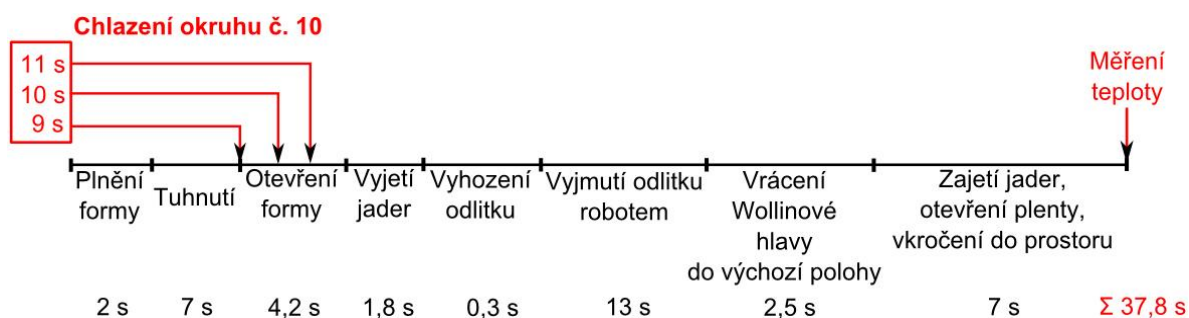
Tab. 3-8 Intervaly sledovaných hodnot při měření teploty

Teplota chladicí vody na vstupu	Tlak vody na vstupu	Teplota taveniny v udržovací peci	Čas cyklu
[°C]	[bar]	[°C]	[s]
22 až 26,5	4 až 4,5	665 až 686	44,8 až 52

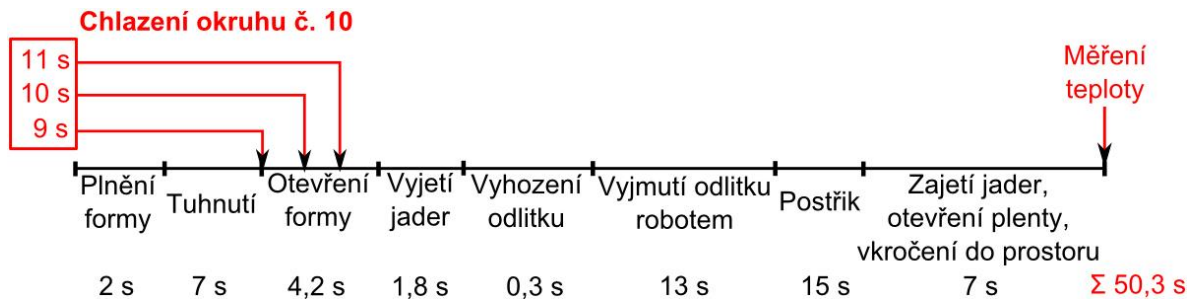
3.8 Měření povrchové teploty jader při změně doby chlazení chladicího okruhu

Chlazení okruhu č. 10 začíná vždy při rozjezdu lisovacího pístu (tj. při první lisovací rychlosti). Okamžik měření teploty jader před ošetřením postříkem znázorňuje schéma na obr. 3-16. Okamžik měření teploty jader po ošetření postříkem znázorňuje schéma na obr. 3-17. Z uvedeného schématu je zřejmé, že zatímco u doby chlazení 9 s jsou jádra chlazená pouze po dobu, kdy je forma uzavřená, u doby 10 s se již forma začíná otevírat. U doby chlazení 11 s již končí chladicí cyklus jader při částečně otevřené formě. V tuto dobu již dochází k přenosu tepla z líce formy také vedením, prouděním a sáláním.

Na schématu je také znázorněno, že zatímco při měření před postříkem bylo provedeno měření po cca 38 s od zalisování, při měření po postříku došlo k měření až po cca 50 s. Při této 12 s prodlevě byla forma otevřená a teplota na povrchu jádra byla již opět ovlivňována i vedením, prouděním a sáláním z líce formy.



Obr. 3-16 Časová osa licího cyklu bez ošetření postříkem při různé době chlazení



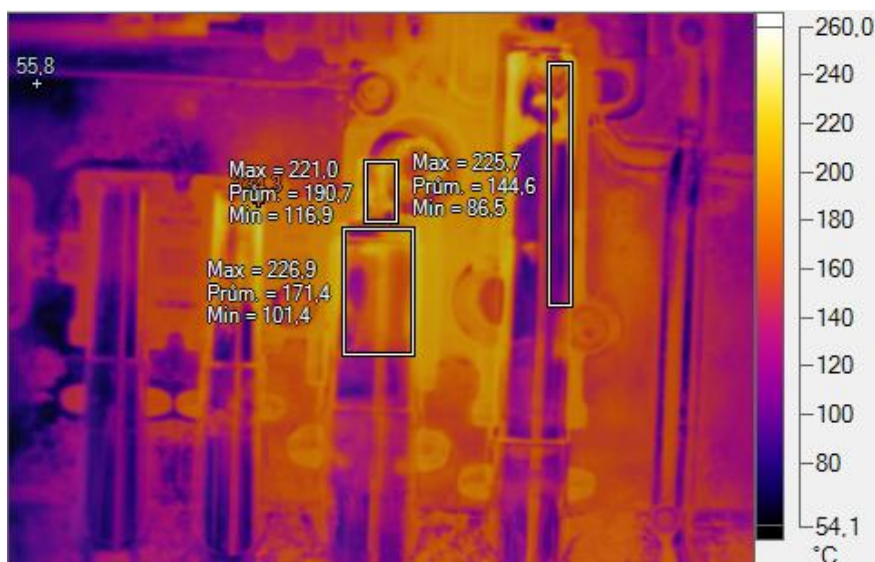
Obr. 3-17 Časová osa licího cyklu po ošetření postřikem při různé době chlazení

Pro ukázkou je na obr. 3-18 ukázáno rozložení teplotního pole levé fazony před ošetřením postřikem při době chlazení 10 s a na obr. 3-19 po ošetření. Tato doba chlazení odpovídá standardnímu nastavení okruhu, při jakém probíhala výroba. Lze vidět, že obě měřená jádra mají nehomogenní rozložení povrchové teploty a vyskytují se na nich oblasti se značně rozdílnými teplotami. Uprostřed obou jader je patrný odlesk. U kratšího jádra se vyskytují dvě oblasti A a B, u kterých lze předpokládat rozdílné teploty. Ze snímku je zřejmé, že oblast A jádra má větší teplotu než zbytek jádra. Průměrná teplota v této oblasti se pohybuje nad 200 °C, což může mít negativní vliv na tvorbu filmu při ošetření líce formy postřikem.



Obr. 3-18 Teplotní pole levé fazony před postřikem při době chlazení 10 s

Na obr. 3-19 je ukázáno teplotní pole levé fazony po ošetření postřikem při době chlazení 10 s. Na obou jádrech je patrný pokles povrchové teploty oproti jádrům měřeným před postřikem. Tento pokles činí u kratšího jádra cca 10 °C a u delšího jádra cca 15 °C.



Obr. 3-19 Teplotní pole levé fazony po postřiku při době chlazení 10 s

Průměrné hodnoty z naměřených povrchových teplot jader pro různé doby chlazení měřené před a po ošetření postřikem uvádí tab. 3-9 a tab. 3-10. Kompletní naměřené hodnoty teplot jsou uvedeny v příloze č. 3.

Tab. 3-9 Povrchové teploty jader před postřikem pro různé doby chlazení

Fazona	Doba chlazení [s]								
	9		Delší jádro	10		Delší jádro	11		Delší jádro
	Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:		
A	B	A	B	A	B	A	B		
	Průměrná teplota [°C]								
Levá	226,0	188,4	170,6	208,5	176,5	149,0	202,8	170,6	143,5
Pravá	210,0	199,0	166,4	204,2	178,2	147,8	194,3	168,1	139,2
	Směrodatná odchylka [°C]								
Levá	4,7	3,2	5,1	4,6	4,4	4,0	3,2	4,9	3,8
Pravá	4,6	8,0	2,1	4,5	6,0	5,2	9,3	3,4	7,0

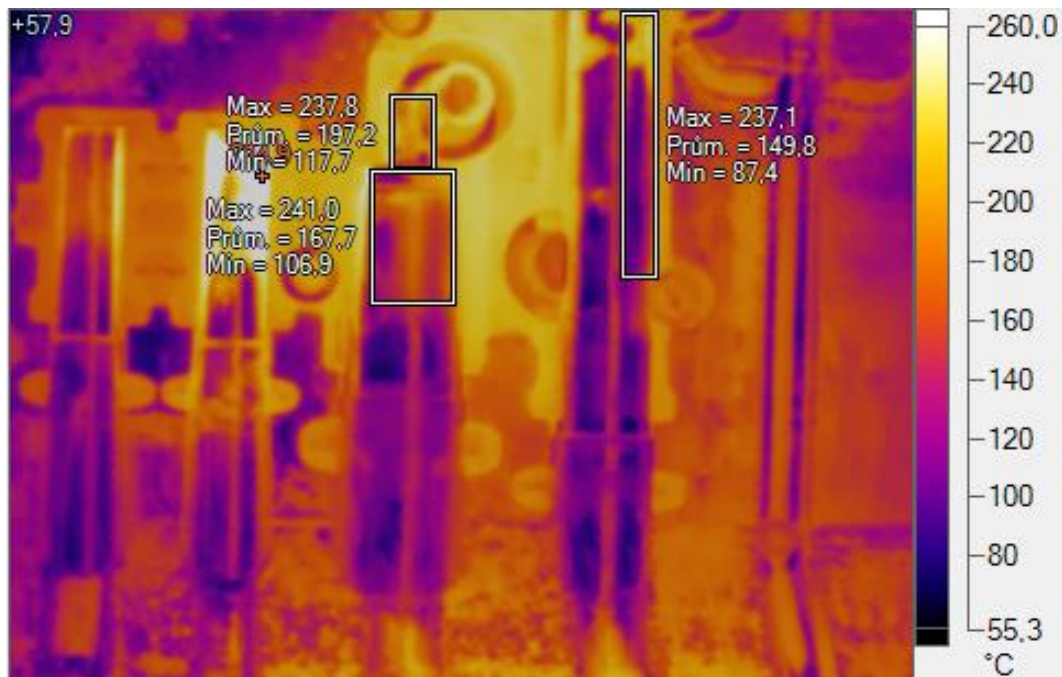
Tab. 3-10 Povrchové teploty jader po postřiku pro různé doby chlazení

Fazona	Doba chlazení [s]								
	9		Delší jádro	10		Delší jádro	11		Delší jádro
	Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:		
A	B	A	B	A	B	A	B		
	Průměrná teplota [°C]								
Levá	198,9	179,9	162,1	185,2	165,1	143,0	173,7	153,6	135,9
Pravá	188,3	171,4	159,9	179,8	164,4	142,1	170,2	151,8	132,9
	Směrodatná odchylka [°C]								
Levá	5,2	1,1	3,0	3,9	4,5	2,7	4,9	6,1	4,6
Pravá	2,6	4,8	3,9	3,6	2,2	2,9	3,7	3,4	4,6

3.9 Měření povrchové teploty jader při změně průtoku vody chladícím okruhem

Pro měření teploty jader při změně průtoku vody chladícím okruhem platí stejná časová osa jako u první části experimentu. V rámci této části experimentu však byla nastavena konstantní doba chlazení 10 s. Právě na konci chladicího cyklu tedy dochází k otevření formy, viz obr. 3-16 a obr. 3-17 v kapitole 3.8 a dochází k přenosu tepla vedením, sáláním a prouděním z líce formy.

Příklad rozložení teplot na povrchu jader levé fazony při průměrném průtoku $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ je ukázán na obr. 3-20. Při tomto nastavení je standardně odlitek vyráběn. Nejvyšší teplota v rámci měřených jader se vyskytuje na kratším jádru, kde průměrná teplota v oblasti A dosahuje teploty cca $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Při teplotě nad $200 \text{ }^\circ\text{C}$ již může docházet ke špatné tvorbě filmu při ošetření líce formy postřikem.



Obr. 3-20 Teplotní pole levé fazony před postřikem při průměrném průtoku $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$

Na snímku z obr. 3-21 jsou zachycena jádra levé fazony po postřiku při průměrném průtoku $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Pokles teploty vlivem postřiku činí u kratšího jádra v oblasti A cca $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a v oblasti B $5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 3-21 Teplotní pole levé fazony po postřiku při průměrném průtoku $10 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$

V tab. 3-11 a tab. 3-12 jsou zapsány průměrné povrchové teploty jader pro různé hodnoty průtoků snímané před a po ošetření postřikem. Kompletní naměřené hodnoty teplot jsou uvedeny v příloze č. 4.

Tab. 3-11 Povrchové teploty jader před postřikem pro různé průtoky

Fazona	Průměrný/aktuální průtok [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]											
	8/11		Delší jádro	10/13		Delší jádro	12/16		Delší jádro	16/21		
	Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:		
A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	Delší jádro		
	Průměrná teplota [$^{\circ}\text{C}$]											
Levá	222,1	195,9	165,3	200,3	173,1	147,2	181,6	151,1	131,7	156,2	129,4	114,8
Pravá	233,0	206,6	165,6	207,2	178,8	150,4	190,4	156,0	132,8	164,8	128,4	118,6
	Směrodatná odchylka [$^{\circ}\text{C}$]											
Levá	2,8	3,8	1,8	2,2	5,2	6,8	12,5	8,1	4,3	3,0	3,1	3,6
Pravá	4,2	4,1	4,3	7,8	4,9	3,1	8,8	7,5	3,7	3,4	0,5	0,9

Tab. 3-12 Povrchové teploty jader po postřiku pro různé průtoky

Fazona	Průměrný/aktuální průtok [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]											
	8/11		Delší jádro	10/13		Delší jádro	12/16		Delší jádro	16/21		
	Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:			Kratší jádro oblast:		
A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	Delší jádro		
	Průměrná teplota [$^{\circ}\text{C}$]											
Levá	192,5	178,1	148,0	169,6	158,0	140,5	143,4	137,5	131,3	125,0	114,9	113,3
Pravá	193,4	173,1	138,1	165,1	147,2	132,6	140,1	123,7	128,8	121,1	105,1	114,9
	Směrodatná odchylka [$^{\circ}\text{C}$]											
Levá	1,6	5,2	3,9	1,6	3,0	5,5	5,0	4,0	2,6	2,1	2,2	4,9
Pravá	4,0	1,3	1,1	1,0	1,9	0,9	2,6	2,3	4,0	4,3	1,0	1,1

3.10 Analýza naměřených hodnot povrchové teploty jader

Pro ucelenou představu o chladícím účinku vody při různých parametrech nastavení chladicího okruhu bylo stanoveno množství vody, které během jednoho cyklu proteklo sledovaným okruhem č. 10. Z rovnice 3.1 je zřejmé, že bude-li narůstat jeden z parametrů tj. buď průtok, nebo doba chlazení, bude narůstat i celkový objem vody, která v rámci jednoho chladicího cyklu proteče okruhem. Větší objem vody potom dokáže odvést více tepla, v důsledku čehož bude povrchová teplota jader nižší.

$$V = \dot{V}_p \cdot t_{chl}, \quad (3.1)$$

kde značí: V – objem vody [l];
 \dot{V}_p – průměrný objemový průtok vody okruhem č. 10 [l.min⁻¹];
 t_{chl} – doba chlazení okruhu č. 10 [s].

V tab. 3-13 jsou uvedeny hodnoty objemů vody, které při daném nastavení parametrů okruhu protekly jádrem. Při změně doby chlazení z intervalu 9 na 11 s došlo k navýšení objemu vody o 0,33 l, zatímco u změny průměrného průtoku z intervalu 8 na 16 l.min⁻¹ k nárůstu o 1,34 l. U změn průtoku tak lze očekávat větší naměřené teplotní rozdíly než u změn doby chlazení.

Tab. 3-13 Množství vody proudící okruhem č. 10 při různých parametrech chlazení

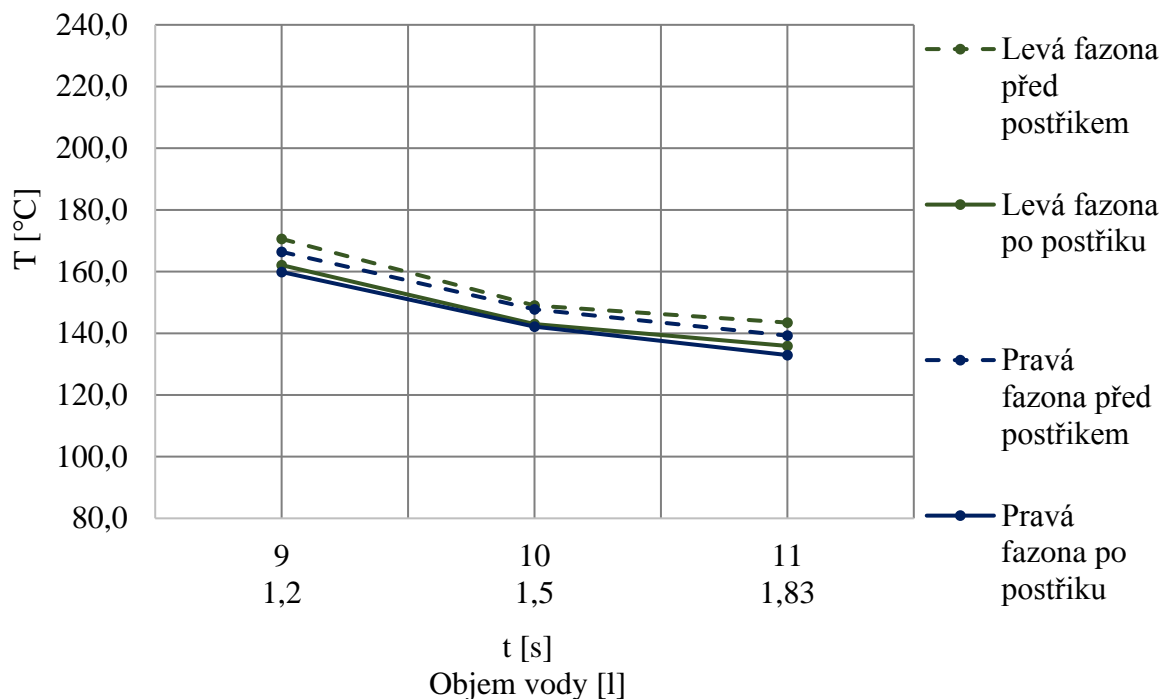
Objem vody při změnách doby chlazení			Objem vody při změnách průtoku		
t_{chl} [s]	\dot{V}_p [l.min ⁻¹]	V [l]	\dot{V}_p [l.min ⁻¹]	t_{chl} [s]	V [l]
9	10	1,5	8	10	1,33
10	10	1,67	10	10	1,67
11	10	1,83	12	10	2,00
			16	10	2,67

Naměřené hodnoty povrchové teploty jader v závislosti na změně doby chlazení uvedené v tab. 3-9 a tab. 3-10 byly graficky zpracovány.

Na obr. 3-22 je uvedena grafická závislost změny povrchové teploty delšího jádra na době chlazení. Výsledky ukazují, že při delší době chlazení dochází k poklesu teploty. Při prodloužení doby chlazení z 9 s na 11 s bylo dosaženo poklesu teploty u jádra na levé i pravé straně o cca 26 °C před postřikem i po postřiku. Výsledky dále ukazují, že nedošlo k výrazné změně teploty jader před postřikem a po postřiku. To může být způsobeno tím, že chladicí účinek postřiku je krátkodobý, a tudíž je měření velice náchylné na rychlost provedeního snímání. Dojde-li po ošetření postřikem k určité časové prodlevě před snímáním, povrchová

teplota jádra se postupně zpět dohřívá na vyšší teplotu. Toto dohřívání je způsobeno vedením, prouděním a sáláním z okolní dutiny formy.

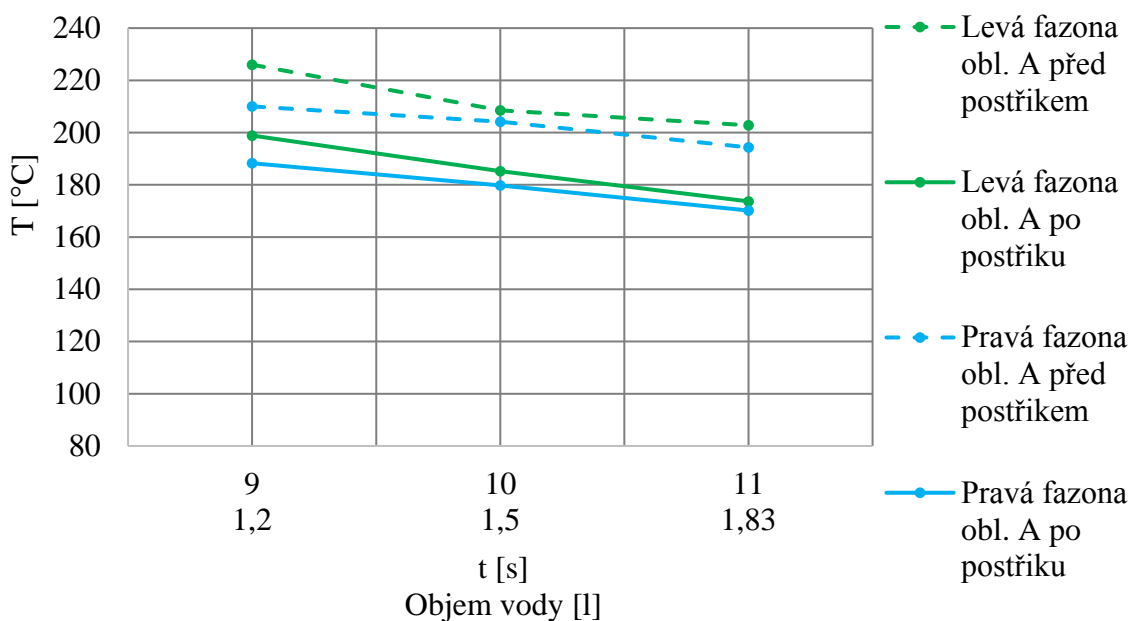
Závislost povrchové teploty delšího jádra před a po postřiku na době chlazení



Obr. 3-22 Závislost povrchové teploty delšího jádra na době chlazení

V grafické závislosti na obr. 3-23 je uvedena změna povrchové teploty menšího jádra v oblasti A na době chlazení.

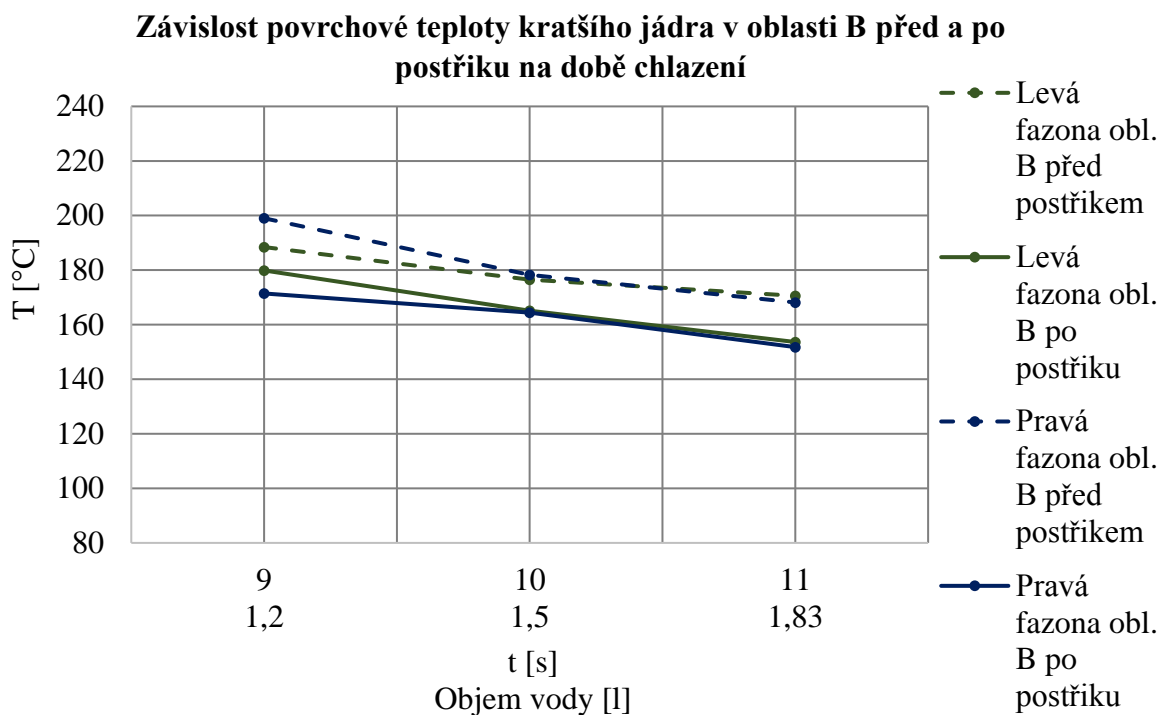
Závislost povrchové teploty kratšího jádra v oblasti A před a po postřiku na době chlazení



Obr. 3-23 Závislost povrchové teploty kratšího jádra v oblasti A na době chlazení

Z grafu je zřejmé, že před postřikem bylo v oblasti A dosaženo povrchové teploty i nad 200 °C. Dále je z grafu patrný pokles teploty jádra u levé i pravé fazony při delší době chlazení. Před postřikem i po postřiku činí pokles teploty jádra levé fazony při změně doby chlazení z 9 s na 11 s cca 25 °C. U jádra pravé fazony ukazují výsledky pokles teploty před i po postřiku cca 18 °C. Na rozdílnou teplotu jader levé a pravé fazony mohl mít vliv mírný časový odstup mezi měřeními levé a pravé fazony, vzdálenost a úhel snímání, nebo také postupný ohřev chladicí vody při proudění kanály. Chladicí voda nejprve proudí jádrem pravé fazony, kde dochází k jejímu ohřevu a poté proudí jádrem levé fazony. Díky menšímu rozdílu teplot mezi stěnou kanálu a médiem není chlazení u levé fazony tolik intenzivní. Z grafu je dále rozeznatelný pokles teploty jader vlivem postřiku. Tento pokles je pravděpodobně způsoben tím, že na oblast A je nasměrována samostatná tryska postřikové hlavy, viz obr. 3-14 v kapitole 3.6.

Na obr. 3-24 je uvedena grafická závislost změny povrchové teploty kratšího jádra na době chlazení v oblasti B.

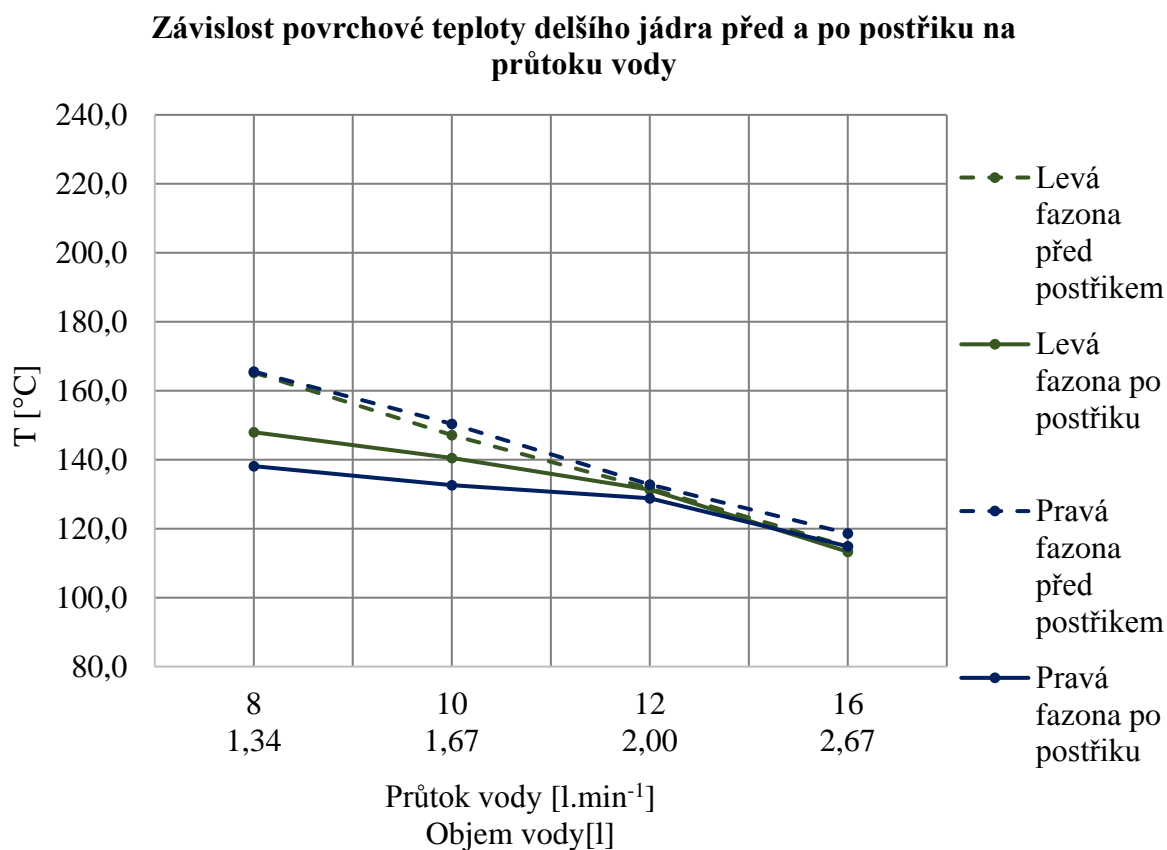


Obr. 3-24 Závislost povrchové teploty kratšího jádra v oblasti B na době chlazení

Z výsledků je zřejmé, že stejně jako v oblasti A i zde při delší době chlazení dochází k poklesu povrchové teploty jádra. Před postřikem bylo při prodloužení doby chlazení z 9 s na 11 s dosaženo poklesu teploty u jádra levé fazony o cca 20 °C a u pravé fazony o cca 31 °C. Po postřiku činí u levé fazony pokles teploty cca 30 °C a u pravé fazony cca 20 °C. Podobně jako v oblasti A kratšího jádra je i zde zřetelný pokles teploty jádra vlivem postřiku.

V rámci druhé části experimentu byl sledován vliv změny průtoku chladicího média na povrchovou teplotu jader. Graficky zpracované výsledky měření z tab. 3-11 a 3-12 jsou uvedeny na obr. 3-25 až obr. 3-27.

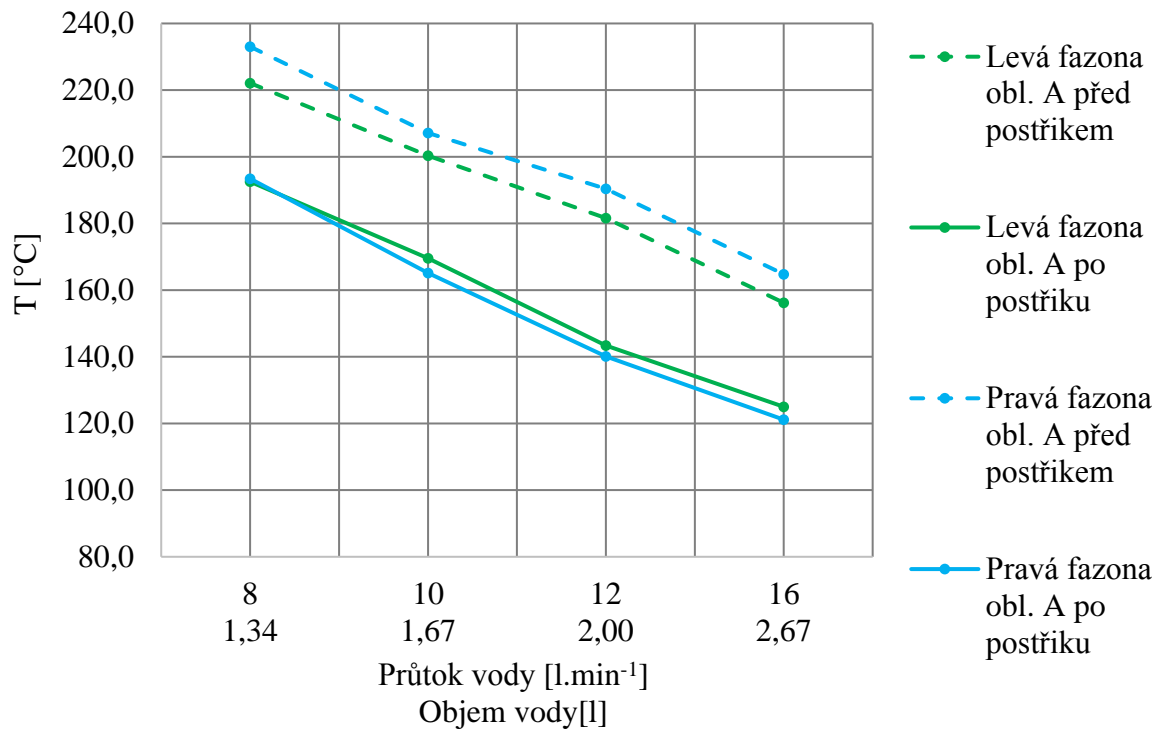
Grafická závislost na obr. 3-25 znázorňuje změnu povrchové teploty delšího jádra při změně průtoku chladicí vody. U jádra levé i pravé fazony je patrný pokles teploty. Z porovnání teplot jádra před postřikem a po postřiku je zřejmý také pokles teploty jádra po ošetření postřikem. Rozdíl teplot před a po postřiku je však u průtoku $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ a $16 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ nízký, což mohla způsobit časová prodleva při měření, během nichž došlo po postřiku k dohřátí jádra vlivem vedení, proudění a sálání z okolní dutiny. Před postřikem bylo při změně průtoku z $8 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ na $16 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ dosaženo poklesu teploty u jádra levé i pravé fazony o cca $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Po postřiku činil u levé fazony pokles teploty cca $35 \text{ }^\circ\text{C}$ a u pravé fazony cca $23 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 3-25 Závislost povrchové teploty delšího jádra na průtoku vody

Na obr. 3-26 je uvedena grafická závislost změny povrchové teploty kratšího jádra na průtoku chladicího vody v oblasti A.

Závislost povrchové teploty kratšího jádra v oblasti A před a po postřiku na průtoku vody

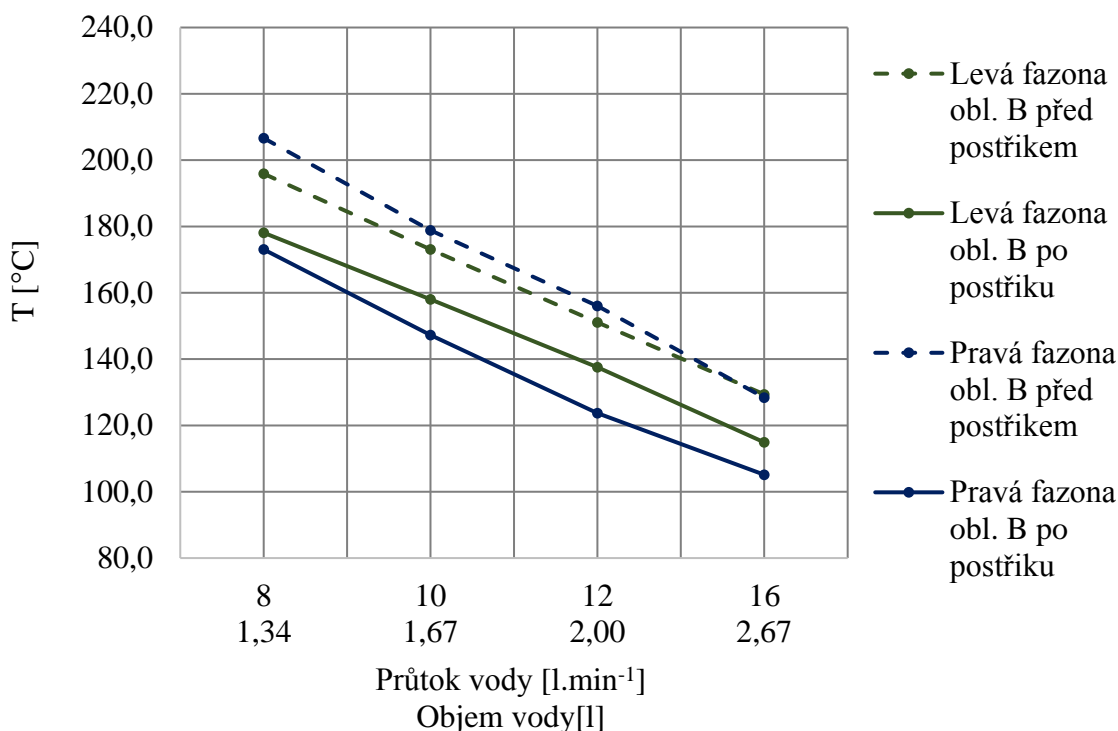


Obr. 3-26 Závislost povrchové teploty kratšího jádra v oblasti A na průtoku vody

Výsledky ukazují, že při vyšší hodnotě průtoku dochází k poklesu povrchové teploty. Před postřikem bylo při změně průtoku z 8 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ dosaženo poklesu teploty u jádra levé i pravé fazony o cca 66 °C. Po postřiku došlo ke snížení teploty jádra levé fazony i pravé fazony o 72 °C. Z porovnání teplot jádra před a po postřiku u obou fazon je zřejmý výrazný pokles teploty jádra po ošetření postřikem. To lze přičíst způsobu ošetření postřikem kratšího jádra, kdy je na oblast A nasměrována samostatná tryska, vlivem které je tato oblast výrazněji ochlazená.

Na obr. 3-27 je uvedena grafická závislost změny povrchové teploty kratšího jádra na průtoku vody v oblasti B. Z výsledků je zřejmé, že stejně jako v oblasti A i zde při delší době chlazení dochází k poklesu povrchové teploty jádra. Před postřikem bylo při změně průtoku z 8 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ dosaženo poklesu teploty u jádra levé fazony o cca 70 °C a u pravé fazony o cca 80 °C. Po postřiku činí u levé fazony pokles teploty cca 60 °C a u pravé fazony cca 70 °C. Důvody, které zapříčinily naměření odlišné teploty jader u levé a pravé fazony již byly uvedeny výše.

Závislost povrchové teploty kratšího jádra v oblasti B před a po postřiku na průtoku vody

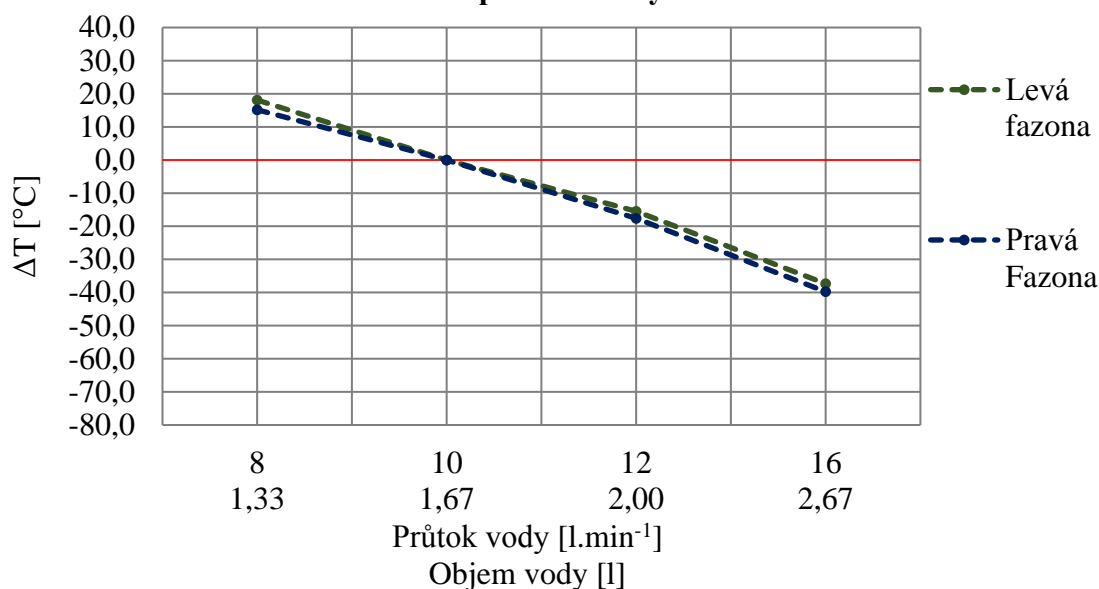


Obr. 3-27 Závislost povrchové teploty kratšího jádra v oblasti B na průtoku vody

V rámci druhé části experimentu ukázaly grafické závislosti změny povrchové teploty jader na průtoku výrazný pokles teploty při větším průtoku vody. Z tohoto důvodu byly u této části experimentu graficky zpracovány také změny povrchové teploty jader porovnané vůči parametrům standardní výroby. Na následujících grafech (obr. 3-26 až obr. 3-29) jsou uvedeny závislosti změny povrchové teploty jader při různém nastavení průtoku vztahované k průměrnému průtoku při standardní výrobě tj. 10 l.min⁻¹.

V grafu na obr. 3-28 je zobrazena závislost změny teploty delšího jádra na průtoku vody měřeného před postřikem. K rovnoměrnému poklesu teploty s vyšším průtokem dochází u jádra na obou fazonách. Výsledky ukazují, že snížením průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 8 l.min⁻¹ došlo k nárůstu povrchové teploty jádra o cca 15 °C. Zvýšením průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 12 l.min⁻¹ došlo k poklesu teploty o cca 20 °C, při zvýšení z 10 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ potom k poklesu teploty o 40 °C. Souhrnné údaje o změnách teploty jsou uvedeny v tab. 3-14.

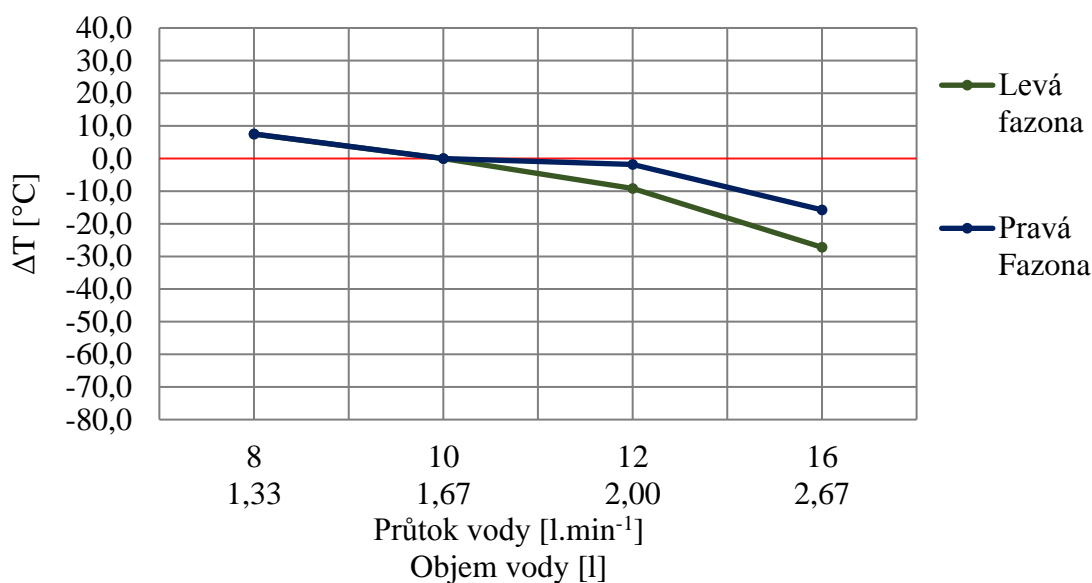
Závislost změny povrchové teploty delšího jádra před postřikem na průtoku vody



Obr. 3-28 Závislost změny povrchové teploty delšího jádra před postřikem na průtoku vody

Na obr. 3-29 je uvedena grafická závislost změny povrchové teploty delšího jádra na průtoku vody měřeného po postřiku.

Závislost změny povrchové teploty delšího jádra po postřiku na průtoku vody

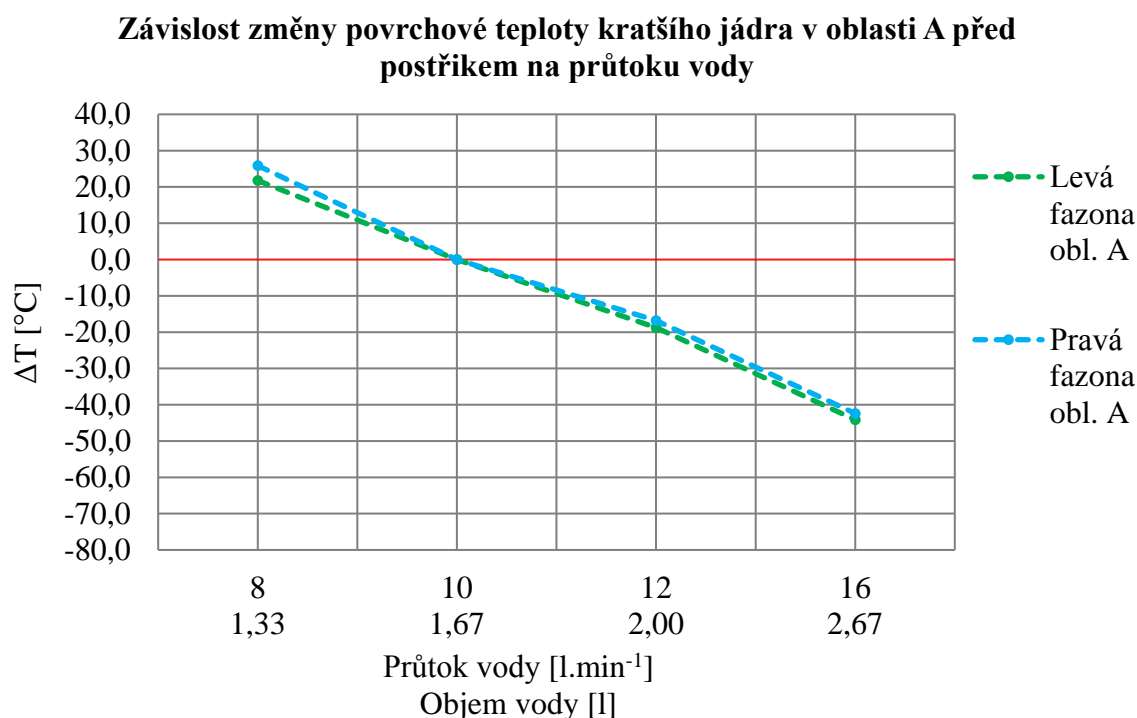


Obr. 3-29 Závislost změny povrchové teploty delšího jádra po postřiku na průtoku vody

Taktéž zde s vyšší hodnotou průtoku dochází k poklesu teploty jádra na obou fazonách. Při změně průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 8 l.min⁻¹ je z výsledků patrný mírný nárůst teploty o cca 8 °C. Při zvýšení průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 12 l.min⁻¹ je zřetelné snížení teploty pouze u jádra levé fazony a to o cca 10 °C. Při změně z 10 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ došlo ke snížení teploty jádra u levé fazony o cca 27 °C a u pravé fazony o 16 °C.

Rozdíl v poklesu teploty u pravé a levé fazony může být zapříčiněn prodlevou mezi měřením, kdy bylo nejprve měřeno jádro u levé fazony a pak až jádro u pravé fazony. Během této prodlevy mohlo dojít k dohřátí jádra vlivem vedení, proudění a sálání z okolní dutiny. Údaje o změnách povrchové teploty při různém průtoku jsou uvedeny v tab. 3-15.

Grafická závislost na obr. 3-30 ukazuje změnu povrchové teploty kratšího jádra před postřikem na průtoku vody v oblasti A.

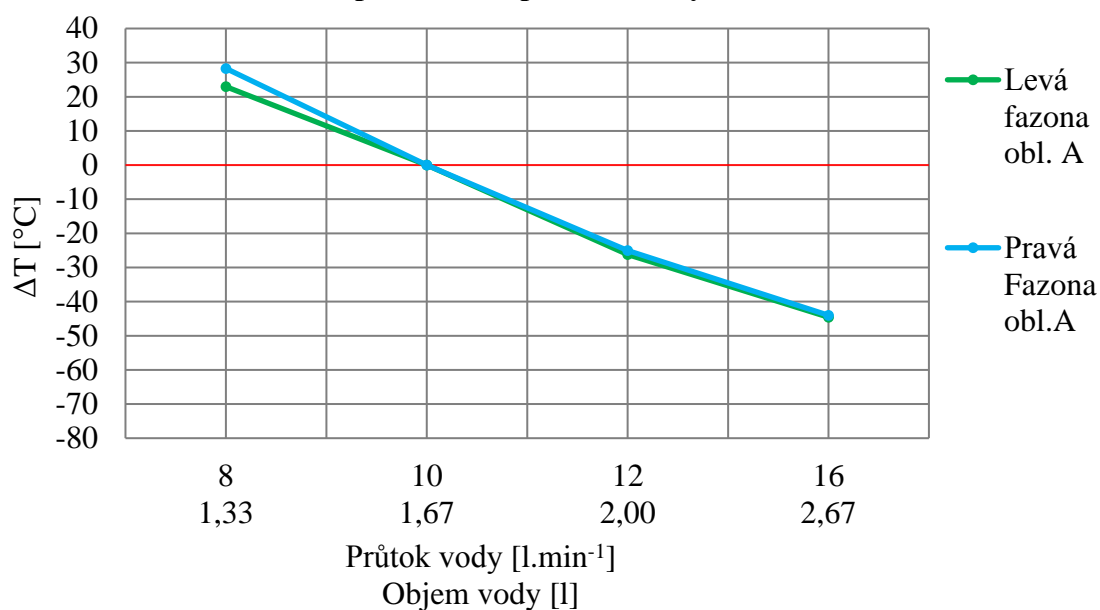


Obr. 3-30 Závislost změny povrchové teploty kratšího jádra v oblasti A před postřikem na průtoku vody

K poklesu teploty s rostoucím průtokem dochází u jádra na obou fazonách. Výsledky ukazují, že snížením průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 8 l.min⁻¹ došlo k nárůstu teploty jádra o cca 25 °C. Zvýšením průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 12 l.min⁻¹ došlo k poklesu teploty o cca 17 °C, při zvýšení z 10 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ potom k poklesu teploty o více jak 40 °C. Souhrnné údaje o změnách povrchové teploty jsou uvedeny v tab. 3-14.

Na obr. 3-31 je uvedena grafická závislost změny povrchové teploty kratšího jádra po postřiku na průtoku vody v oblasti A. Podobně jako u měření před postřikem i zde s vyšší hodnotou průtoku dochází k výraznému poklesu teploty jádra na obou fazonách. Při změně průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 8 l.min⁻¹ došlo k nárůstu teploty o cca 25 °C. Při zvýšení průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 12 l.min⁻¹ je z výsledků patrné snížení teploty jádra o cca 25 °C. Při změně z 10 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ došlo ke snížení teploty jádra o cca 45 °C. Souhrnné údaje o změně povrchové teploty jsou zaznamenány v tab. 3-15.

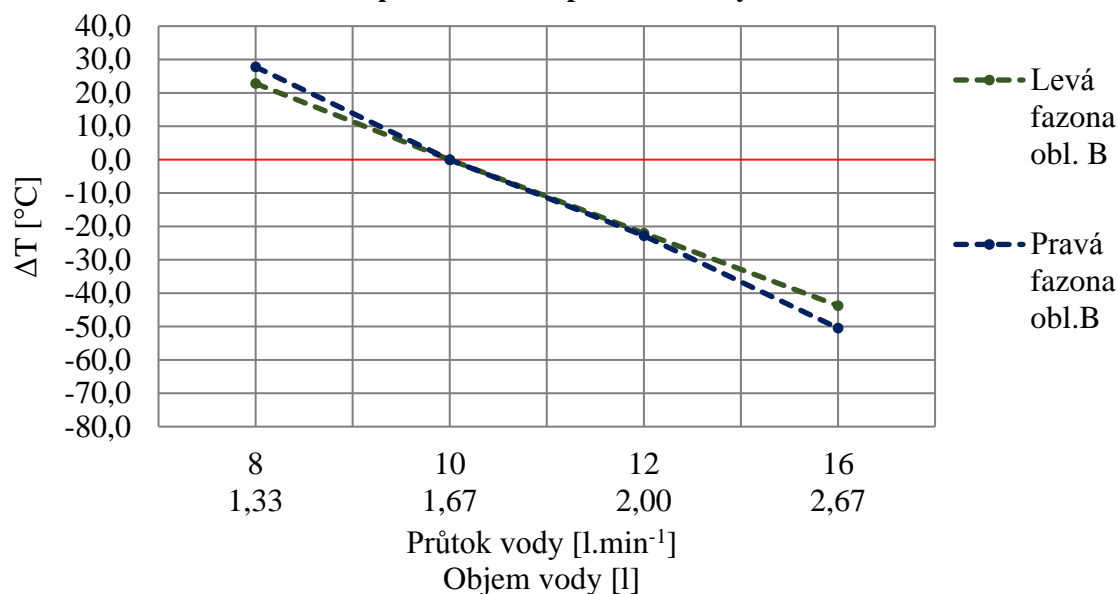
Závislost změny povrchové teploty kratšího jádra v oblasti A po postřiku na průtoku vody



Obr. 3-31 Závislost změny povrchové teploty kratšího jádra v oblasti A po postřiku na průtoku vody

Graf na obr. 3-32 ukazuje závislost změny povrchové teploty kratšího jádra před postřikem na průtoku vody v oblasti B.

Závislost změny povrchové teploty kratšího jádra v oblasti B před postřikem na průtoku vody

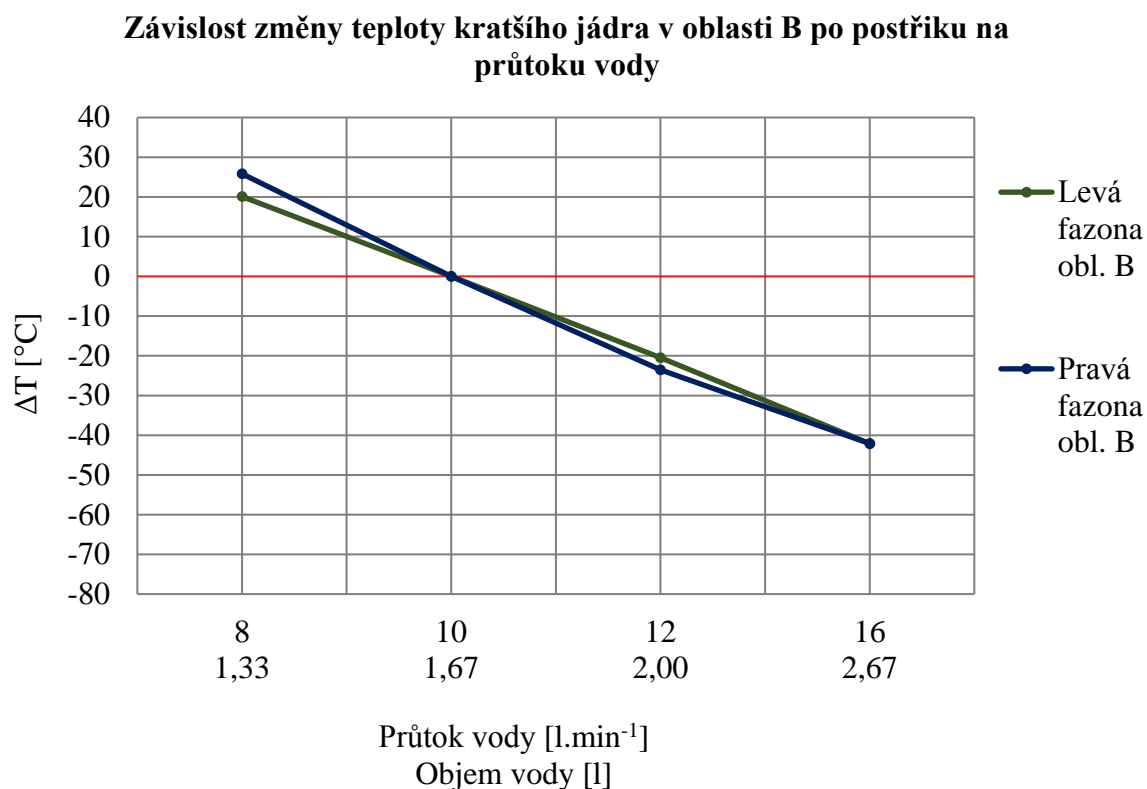


Obr. 3-32 Závislost změny povrchové teploty kratšího jádra v oblasti B před postřikem na průtoku vody

K rovnoměrnému poklesu teploty s rostoucím průtokem dochází u jádra na obou fazonách. Při změně průtoku z 10 l.min⁻¹ na 8 l.min⁻¹ činí nárůst teploty cca 28 °C, při změně z 10 l.min⁻¹ na 12 l.min⁻¹ dochází k poklesu teploty o cca 23 °C a při změně z 10 l.min⁻¹ na

16 l.min⁻¹ k poklesu teploty o cca 47 °C. Podrobné údaje o změně povrchové teploty jádra jsou uvedeny v tab. 3-14.

Grafická závislost na obr. 3-33 ukazuje změnu povrchové teploty kratšího jádra po postřiku na průtoku vody v oblasti B.



Obr. 3-33 Závislost změny povrchové teploty kratšího jádra v oblasti B před postřikem na průtoku vody

Pokles teploty s rostoucím průtokem je patrný u jádra na obou fazonách. Z výsledků je při změně průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 8 l.min⁻¹ zřejmý nárůst teploty jádra levé fazony o cca 15 °C, u jádra pravé fazony pak o cca 31 °C. Rozdíl ve změně povrchové teploty jádra levé a pravé fazony může být dán časovou prodlevou mezi měřeními jader, kdy u pravé fazony zatím došlo k prohřátí jádra vlivem vedení, proudění a sálání z okolní dutiny. Zvýšením průměrného průtoku z 10 l.min⁻¹ na 12 l.min⁻¹ došlo k poklesu teploty o cca 25 °C, při zvýšení z 10 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ potom k poklesu teploty o více jak 40 °C. Souhrnné údaje o změnách povrchové teploty jsou uvedeny v tab. 3-15.

V tab. 3-14 a tab. 3-15 jsou uvedeny změny povrchové teploty jader při změně průtoku porovnané se standardním nastavením průměrného průtoku na 10 l.min⁻¹.

Tab. 3-14 Tabulka změn povrchové teploty jader před postřikem v závislosti na průtoku

	Změna teploty před postřikem vztažená k teplotě při průměrném průtoku 10 [l.min ⁻¹]					
	Průměrný průtok [l.min ⁻¹]					
	8	12	16	8	12	16
	Levá fazona			Pravá fazona		
Kratší jádro obl. A	21,8 ± 5,0	-18,7 ± 14,7	-44,1 ± 5,2	25,9 ± 12,0	-16,8 ± 16,6	-42,4 ± 11,3
Kratší jádro obl. B	22,8 ± 9,0	-22,0 ± 13,4	-43,7 ± 8,4	27,8 ± 9,0	-22,8 ± 12,3	-50,5 ± 5,4
Delší jádro	18,1 ± 8,6	-15,5 ± 11,1	-37,3 ± 10,4	15,2 ± 7,4	-17,6 ± 6,8	-39,8 ± 4,1

Tab. 3-15 Tabulka změn povrchové teploty jader po postřiku v závislosti na průtoku

	Změna teploty po postřiku vztažená k teplotě při průměrném průtoku 10 [l.min ⁻¹]					
	Průměrný průtok [l.min ⁻¹]					
	8	12	16	8	12	16
	Levá fazona			Pravá fazona		
Kratší jádro obl. A	23,0 ± 3,3	-26,2 ± 6,7	-44,6 ± 3,7	28,3 ± 5,0	-25 ± 3,6	-44,0 ± 5,3
Kratší jádro obl. B	20,1 ± 8,2	-20,5 ± 7,0	-42,1 ± 5,2	25,8 ± 3,2	-23,5 ± 4,2	-42,1 ± 2,9
Delší jádro	7,5 ± 9,5	-9,2 ± 8,1	-27,2 ± 10,4	7,5 ± 2,0	-1,8 ± 4,9	-15,7 ± 2,0

4. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjištění vlivu nastavení chladicího okruhu na teplotu povrchu jader u vybrané tlakové licí formy. Práce vznikla ve spolupráci s tlakovou slévárnou Kovolis Hedvikov a.s. Text práce je rozdělen na teoretickou a experimentální část.

První kapitola teoretické části stručně charakterizuje technologii vysokotlakého lití. V následující kapitole je popsáno konstrukční uspořádání vysokotlaké formy. Další kapitola plynule navazuje popisem temperačního systému formy, v nichž jsou popsány jednak zásady konstrukce konvenčního temperačního systému a jednak způsoby chlazení jader a tenkých míst tvarových vložek. Následující kapitola se věnuje způsobům ošetření líce vysokotlaké formy. Větší pozornost je zde věnována problematice vodou ředitelných prostředků, které mají vliv na tepelnou bilanci forem. V samostatné kapitole je uveden popis přenosu tepla v soustavě odlitek – forma – okolí. Zde je také podrobně rozebrán odvod tepla z formy pomocí temperačního systému. Poslední kapitola teoretické části je věnována způsobům měření teploty povrchu formy.

Experimentální část práce se věnuje popisu provedeného experimentu, který byl rozdělen do dvou částí. V první části byl zjišťován vliv doby chlazení na povrchovou teplotu jader. Měření bylo provedeno pro 3 různé intervaly doby chlazení: 9 s, 10 s a 11 s, přičemž teplota jader byla vyhodnocována jak před postřikem, tak po postřiku. Toto měření si kladlo za cíl zjistit, jak velký bude mít vliv změna doby chlazení na povrchovou teplotu jader. Výsledky měření v této části experimentu ukázaly, že při změně doby chlazení z 9 s na 11 s, čemuž odpovídal nárůst objemu chladicí vody o 0,33 l, dochází k poklesu povrchové teploty u obou jader. Největšího poklesu bylo dosaženo u delšího jádra, kde změna teploty činila cca 40 °C. U kratšího jádra se pokles teploty v obou měřených oblastech pohyboval v rozmezí od 20 °C do 30 °C. Ochlazovací vliv postřiku se zřetelně projevil pouze u kratšího jádra. Vzhledem k tomu, že se průměrná teplota kratšího jádra v oblasti A pohybovala i po postřiku kolem 200 °C, což už je kritická teplota pro správnou funkci postřiku, lze slévárně doporučit jako minimální dobu chlazení používat interval 10 s.

V rámci druhé části experimentu byl zkoumán vliv změny průtoku chladicí vody na povrchovou teplotu jader. Zde bylo provedeno měření pro 4 různé nastavení průměrného průtoku: 8 l.min⁻¹, 10 l.min⁻¹, 12 l.min⁻¹ a 16 l.min⁻¹. V rámci posouzení vlivu průtoku byl proveden výpočet, ze kterého vyplynulo, že při nárůstu průtoku z 8 l.min⁻¹ na 16 l.min⁻¹ došlo k navýšení objemu chladicí vody z 1,33 l na 2,67 l. Následně provedené porovnání změn teplot vztažené ke standardnímu nastavení průtoku 10 l.min⁻¹ ukázalo, že k největší změně

teploty došlo při průměrném průtoku $16 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, kdy rozdíl činil před postřikem u delšího jádra levé fazony $(-37,3 \pm 10,4) \text{ }^\circ\text{C}$, u kratšího jádra v oblasti A $(-44,1 \pm 5,2) \text{ }^\circ\text{C}$ a v oblasti B $(-43,7 \pm 8,4) \text{ }^\circ\text{C}$. Rozdíl mezi teplotou jader levé a pravé fazony činil méně než $7 \text{ }^\circ\text{C}$. Při průměrném průtoku $16 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ po postřiku dosahoval rozdíl teplot u delšího jádra levé fazony $(-27,2 \pm 10,4) \text{ }^\circ\text{C}$, u kratšího jádra v oblasti A $(-44,6 \pm 3,7) \text{ }^\circ\text{C}$ a v oblasti B $(-42,1 \pm 5,2) \text{ }^\circ\text{C}$. Zde byl rozdíl mezi teplotou jader levé a pravé fazony nejvíce $11 \text{ }^\circ\text{C}$.

Během druhé části experimentu bylo dosaženo výrazných změn povrchové teploty jader. Tyto výrazné změny teploty byly zapříčiněny větším rozdílem v objemu proteklé chladicí vody. Zatímco u změny doby chlazení byl největší rozdíl v objemu $0,33 \text{ l}$, u změny průtoku to bylo $1,67 \text{ l}$. Vzhledem k malému zvýšení objemu proteklé chladicí kapaliny ve sledovaných časech, by bylo zajímavé tento experiment rozšířit o měření s prodlouženými časy chlazení.

Manuální měření teploty je do jisté míry náchylné na časové prodlevy, které vznikají v důsledku zastavení stroje, otevření plenty apod. Následkem toho dochází ke zkreslení naměřených hodnot. Protože měření probíhalo za běžného provozu licího stroje, pracoval stroj v automatickém režimu. Vlivem toho vznikala výrazná časová prodleva tvořená časem pro vyjetí jader, vyhozením a vyjmutím odlitku. Zároveň vznikala výrazná časová prodleva mezi měřeními před postřikem a po postřiku. Během této prodlevy docházelo vlivem vedení, sálání a proudění k opětovnému dohřívání jader od okolní dutiny.

V případě dalšího měření lze slévárně doporučit automatické snímání pomocí pevně upevněné termokamery pořizující videozáznam, případně pomocí termočlánků umístěných do měřených oblastí, což by vyžadovalo provést konstrukční úpravu na formě.

Výsledky experimentů v rámci této práce firma využije jako podklad při konstrukci a nastavení parametrů chladicího okruhu temperačního systému nových forem, u kterých bude využit jiný prostředek pro ošetření líce formy tzv. mikropostřik, který nemá zásadní vliv na odvod tepla z líce formy.

5. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] RAGAN, Emil. *Liatie kovov pod tlakom*. První. Prešov: Vydavateľstvo Michala Vaška, 2007. ISBN 978-80-8073-979-9.
- [2] FIALA, J. *Chlazení jader tlakové licí formy technologií Jet cooling*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing. Iva Nová, CSc.
- [3] NOVÁKOVÁ, I. *Tepelné a tlakové poměry v soustavě odlitek-forma při vysokotlakém lití slitin hliníku s křemíkem*. Liberec, 2006. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] VALECKÝ, J. *Lití kovů pod tlakem*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [5] ŠEBL, J. *Formy pro lití kovů pod tlakem*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [6] HYNEK, M. a kol. *Tlakové lití hliníku* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_01_publicace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra konstruování strojů.
- [7] FREMUNT, P., J. KREJČÍK a T. PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. 1. Brno: Dům techniky Brno, 1994, 230 s.
- [8] BÖHLER UDDEHOLM CZ. *DIEVAR-katalogový list: ocel pro práci za tepla*. Praha, 2006, 7 s. Dostupné také z: <http://uddeholm.cz/czech/1159.htm>
- [9] SCHMOLZ+BICKENBACH. *THYROTHERM® 2343*. Kladno, 2018, 3s. Dostupné také z: https://www.schmolz-bickenbach.cz/pdf/thyrotherm_2343_cz.pdf
- [10] BOHDAN BOLZANO, . *Vaco 180*. Kladno, 2018, 2s. Dostupné také z: <http://www.bolzano.cz/assets/files/Vaco-180.pdf>
- [11] Nástrojové oceli pro práci za tepla. *Böhler Uddeholm CZ* [online]. Praha: Böhler Uddeholm CZ, 2009 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: http://www.boehler.cz/czech/nastrojove_oceli_za_tepla.php
- [12] NOVÁKOVÁ, I. *Nekonvenční způsob chlazení kritických oblastí tvarových částí tlakových licích forem*. Liberec, 2015, 18 s. Výzkumná zpráva. Technická univerzita v Liberci.

- [13] KOPLÍK, Jiří. *Snížení nákladů na výrobu odlitku litého tlakovým litím pomocí aplikace vysokoteplotního separátoru*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaromír Roučka, CSc.
- [14] *Temperování forem v tlakovém lití v průběhu času: Šebesta-slужby slévárnám*. Brno, 2013. Dostupné také z: <http://www.sebestasro.cz/cz/clanky/15-zasedani-ok-liti-pod-tlakem-pri-ceske-slevarenske-spolecnosti-29-3052013>
- [15] ŠMÍD, R. *Konstrukce formy pro tlakové lití*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Hynek Ph.D.
- [16] *Thermobiehl: Topná a chladicí zařízení*. Gladbeck, Německo, 2017. Dostupné také z: www.thermobiehl.com
- [17] *Delta T Systems: T Series - Hot Oil Unit* [online]. Richfield (Wisconsin): Delta T Systems, 2018 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.deltatsys.com/temperature-control-system/oil-units/t-series>
- [18] HYNEK, M. a kol. *Temperace vstřikovacích forem* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf. Projekt. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra konstruování strojů.
- [19] *Formy tlakové lící zásady pro navrhování*. 1. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1985.
- [20] KOČÁREK, K. *Návrh technologie výroby plastového krytu elektropřístroje*. Brno, 2015, 59s, 5 výkresů, 4 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.
- [21] Jet cooling: Lethiguel. In: *Šebesta-slужby slévárnám: Zasedání odborné komise lití pod tlakem: Škoda Auto* [online]. Brno, b.r. [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: www.sebestasro.cz/cz/get.php?id=221
- [22] CONFORMAL COOLING. In: *HTS International Corporation* [online]. Knoxville, USA: HTS International Corporation, 2018 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://www.hts-ic.com/int/en/itherm-technology/conformal-cooling/>
- [23] Jádru bez chlazení vodou. In: *MECOBOND®* [online]. Mülheim an der Ruhr, Německo: MECOBOND® Dr.Betz, 2018 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://mecobond.de/english/examples.htm>

- [24] MOLYDUVAL maziva pro tlakové lití a jejich použití [online]. České Budějovice: DECKENBACH CZ, 2017, , 5 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://www.fina-oleje.cz/files/produkty/molyduval/maziva_pro_tlak_liti.pdf
- [25] RAMPI, Giovanni. *Release agents for die casting: general aspects and state of the art* [online]. Lonate Pozzolo ITALY, b.r., , 9 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.jodovit.com/doc/HTDC%20English%20.pdf>
- [26] KALLIEN, Lothar a James GRAFF. *The Effect of Die Lubricant Spray on the Thermal Balance of Dies* [online]. Howell (Michigan) U.S.A., 2013-2017, , 26 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: https://www.chemtrend.com/sites/default/files/brochures/the_effect_of_die_lubricant_spray_on_the_thermal_balance_of_dies_en_v1.pdf
- [27] NATESH, G. *Aluminium die casting: lubrication technology and trends* [online]. Howell (Michigan) U.S.A.: Chem-Trend, 2013-2017, , 6 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://www.chemtrend.com/resources/technical_articles_papers/aluminium_die_casting_lubrication_technology_and_trends
- [28] CHABIČOVSKÝ, Martin. *Faktory ovlivňující sprchové chlazení za vysokých teplot*. Brno, 2016. Teze dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [29] WOLLIN. *Technika ostříku: Školení*. Lorch, Německo, 2004, 77 s.
- [30] ALTEA. *Pulvertechnologie zur Formbehandlung*. Monticelli Brusati, Itálie, 2005.
- [31] *Overcoming the Faraday cage effect* [online]. Cape Town, South Africa: Jotun, 2017 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: https://www.jotun.com/bw/en/b2b/news/Faraday_cage.aspx
- [32] Deltaspeed MQS. *AED Automation* [online]. Dornstadt, Germany: AED Automation, 2018 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <https://www.aed-automation.com/en/products/pressure-die-casting/deltaspeed-mqs.html>
- [33] NOVÁ, I. *Přenos tepla ve slévárenských formách*. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-141-2.
- [34] ŠTROBACH, V. *Vliv teplotních režimů formy na jakost vysokotlakých odlitků*. Liberec, 2011. Doktorská dizertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [35] *Schulungskurs: Gieß- und wärmetechnische Formauslegung*. Aalen, Německo: Arbeitsgemeinschaft Metallguss, 2017.

- [36] DRÁBEK, M. *Teplotní režim tlakové lící formy při odlévání slitin hliníku na bázi Al-Si*. Liberec, 2005. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [37] Emisivita. *Termomechanika technologických procesů: Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Plzeň, ©2000-2018 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/opticke-vlastnosti/opticke-vlastnosti/emisivita>
- [38] MÁLEK, V. *Bezkontaktní měření teploty pomocí přístroje Ahlborn*. Liberec, 2006. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [39] BAVOR, M. *Automatizace úlohy měření teploty pomocí multimetru APPA 109N*. Liberec, 2007. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [40] Temperature sensors. *Electronics* [online]. Neuhausen auf den Fildern, Německo: Electronics, 2018 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.electronics-gmbh.com>
- [41] Infrared Thermometers. *Fluke* [online]. United Kingdom: Fluke Corporation, 2018 [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/fluke/uken/products/Thermometers.htm>
- [42] Trailer Electronic Braking System (EBS-E). In: *WABCO* [online]. Brusel: WABCO Europe, 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.wabco-auto.com/fileadmin/Products/Trailer_products/8150100933_-_TEBS_Brochure_EN.pdf
- [43] Die Casting Machine: DC-J Series. *TOSHIBA MACHINE* [online]. Numazu-shi, Japonsko: TOSHIBA MACHINE, 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.toshiba-machine.co.jp/en/product/diecast/lineup/dcj.html#/>
- [44] Infračervená kamera Fluke Ti400. *Fluke* [online]. Eindhoven: Fluke Corporation, ©2014-2016 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamery/fluke-ti400.htm?pid=77090>

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

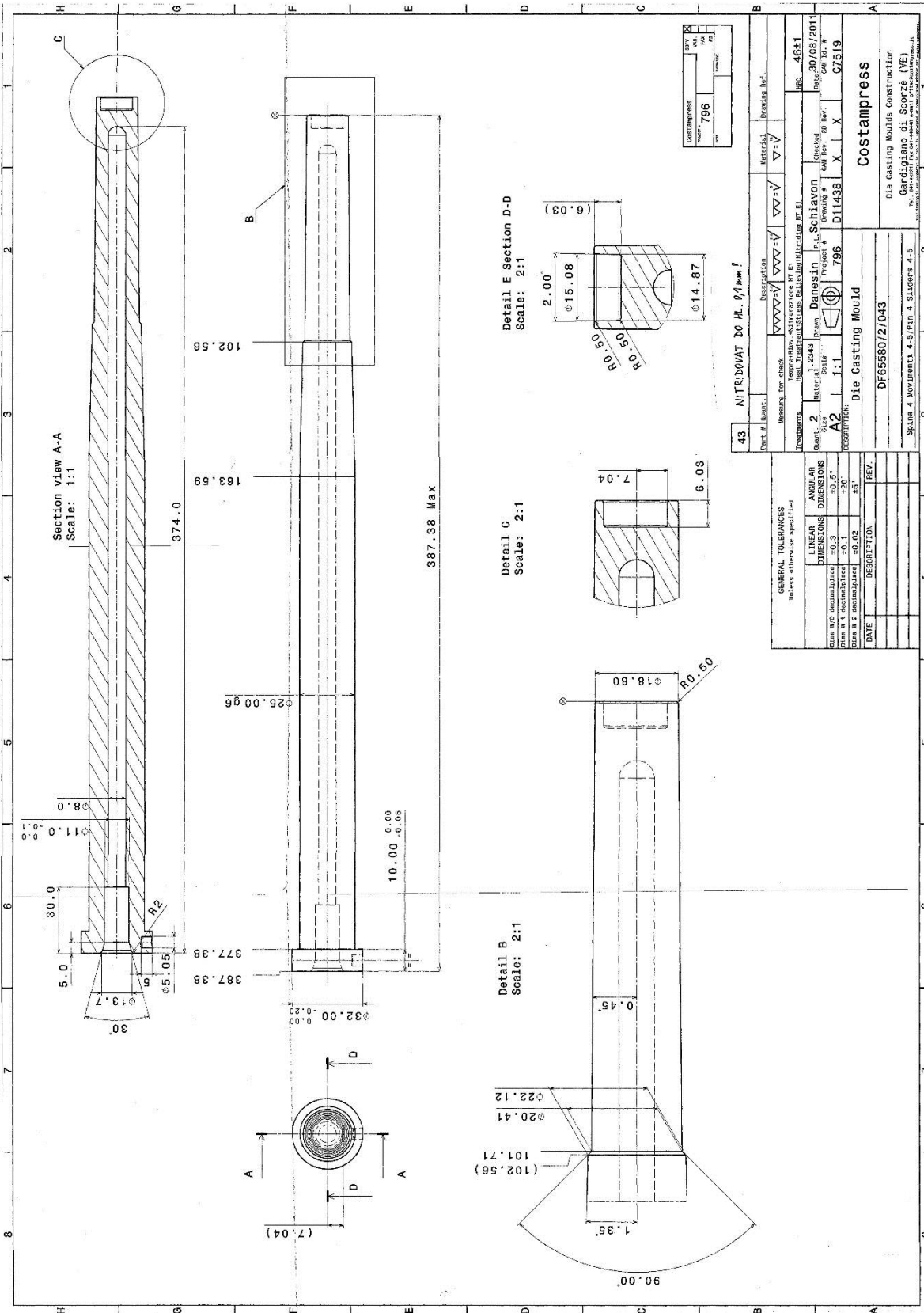
Příloha č. 1: Výkres delšího jádra

Příloha č. 2: Výkres kratšího jádra

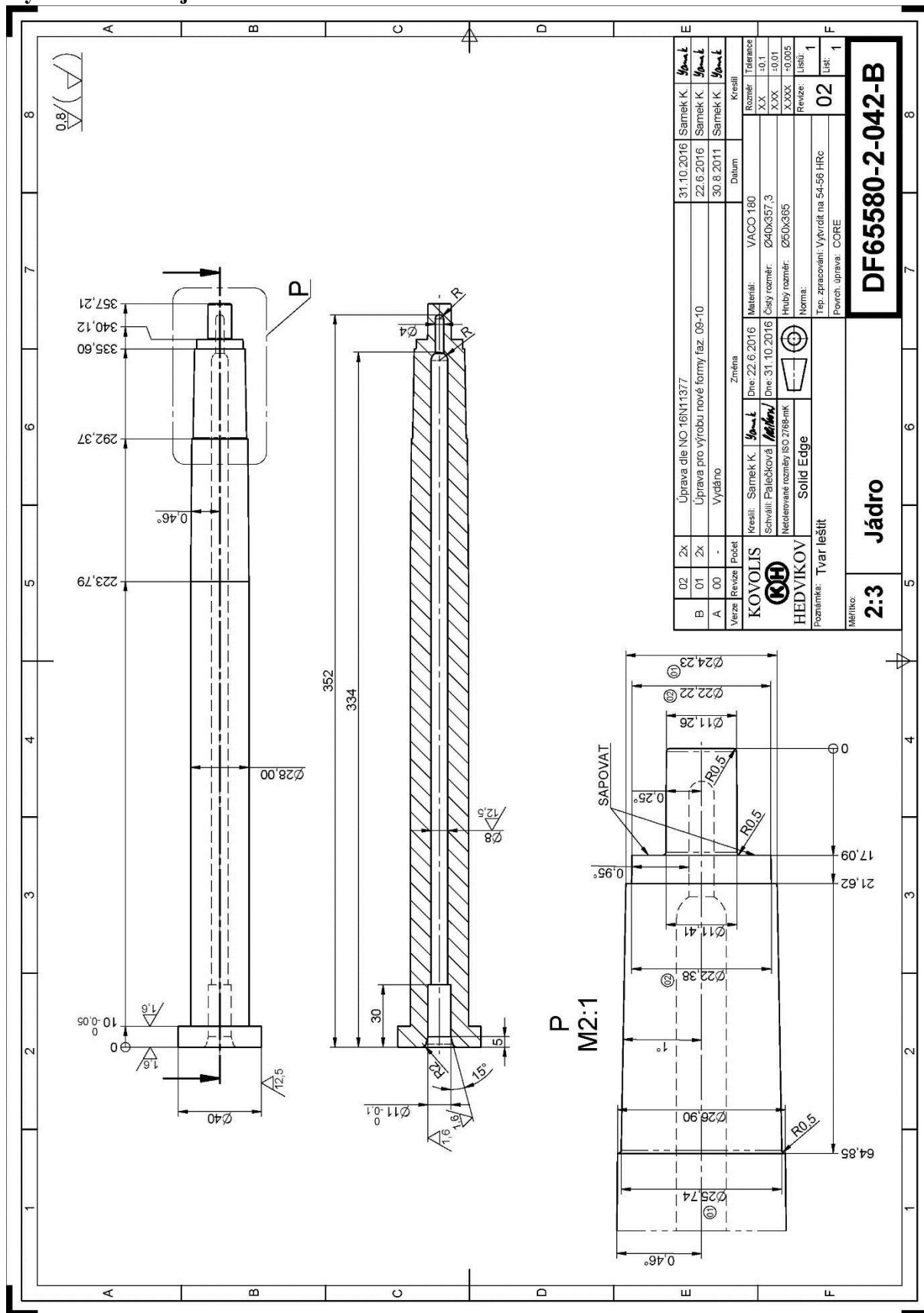
Příloha č. 3: Naměřené hodnoty povrchové teploty pro různé časy chlazení

Příloha č. 4: Naměřené hodnoty povrchové teploty pro různé průtoky

Výkres delšího jádra



Výkres kratšího jádra



Naměřené hodnoty povrchové teploty pro různé časy chlazení

Povrchová teplota jader při změně doby chlazení [°C]						
Doba chlazení [s]	Levá fazona			Pravá fazona		
	Kratší jádro obl. A	Kratší jádro obl. B	Delší jádro	Kratší jádro obl. A	Kratší jádro obl. B	Delší jádro
Před postřikem						
9	232,0	188,5	177,2	209,6	197,4	168,3
	225,4	192,3	164,8	204,6	190,1	167,4
	220,6	184,5	169,8	215,9	209,5	163,5
10	208,4	172,4	144,8	198,5	185,9	144,6
	214,1	174,4	147,8	209,4	177,5	143,6
	203,0	182,7	154,4	204,6	171,3	155,1
11	207,3	177,5	148,4	199,7	166,1	131,3
	201,3	166,7	142,8	202,1	172,9	138,0
	199,8	167,5	139,2	181,2	165,4	148,4
Po postřiku						
9	198,3	178,7	165,0	188,6	166,9	163,8
	192,8	179,6	157,9	184,9	169,4	154,6
	205,5	181,3	163,4	191,3	178,0	161,2
10	182,4	161,4	145,2	184,5	167,4	145,6
	182,5	162,5	139,2	179,2	163,8	142,3
	190,7	171,4	144,6	175,7	162,1	138,5
11	169,7	145,7	139,6	170,8	155,6	136,6
	170,8	154,8	129,4	174,3	152,3	126,4
	180,5	160,4	138,7	165,4	147,4	135,8

Naměřené hodnoty povrchové teploty pro různé průtoky

Povrchová teplota jader při změně průměrného průtoku [°C]						
Průměrný průtok [l.min ⁻¹]	Levá fazona			Pravá fazona		
	Kratší jádro obl. A	Kratší jádro obl. B	Delší jádro	Kratší jádro obl. A	Kratší jádro obl. B	Delší jádro
Před postřikem						
8	220,3	195,5	164,6	233,4	203,7	159,6
	226,0	200,7	168,2	238,0	212,4	168,2
	220,0	191,5	163,0	227,7	203,8	168,9
10	201,2	180,3	137,1	200,8	185,7	149,3
	202,5	171,3	152,7	218,2	175,9	155,5
	197,2	167,7	149,8	202,5	174,9	146,4
12	175,1	147,6	134,9	193,7	163,4	135,0
	170,6	143,3	126,4	178,3	145,8	127,6
	199,1	162,3	133,7	199,1	158,9	135,8
16	160,4	132,6	118,0	160,3	129,0	118,9
	153,7	125,1	110,8	168,7	128,4	120,8
	154,5	130,4	115,7	165,3	127,7	116,2
Po postřiku						
8	190,7	171,8	144,6	189,9	171,4	137,3
	194,6	178,0	145,8	191,4	174,6	137,4
	192,3	184,5	153,5	199,0	173,2	139,7
10	171,3	161,1	137,1	165,4	146,6	131,5
	167,5	153,9	135,7	163,8	149,8	132,6
	170,0	159,0	148,7	166,2	145,3	133,7
12	138,5	137,4	129,2	136,5	126,3	132,5
	141,3	132,7	129,8	142,6	120,7	123,2
	150,3	142,5	134,9	141,2	124,1	130,7
16	122,2	112,1	107,3	126,3	106,5	116,3
	127,1	117,5	119,3	115,8	104,7	114,5
	125,7	115,1	113,3	121,3	104,2	113,8