

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2019

**TOMÁŠ
VÍTEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vitek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **438583**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza teplotních polí forem pro tlakové liti

Název diplomové práce anglicky:

Thermal field die analysis in high pressure die casting technology

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. Technologie tlakového liti a konstrukce forem pro tlakové liti
3. Metody měření teplot a teplotních polí
4. Návrh experimentu, včetně návrhu simulace mezních stavů
5. Vyhodnocení experimentu
6. Závěr a zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

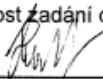
doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

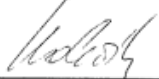
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**



doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

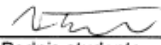


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

9.5. 2019
Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá technologií tlakového lití. Konkrétně se zaměřuje na analýzu teplotních polí forem používaných při výrobě odlitků z hliníkových slitin. Teplotní pole jsou zkoumána primárně termografií. Následně jsou daná pole porovnávána se simulacemi příslušných forem. Vzhledem ke značným rozdílům mezi termograficky zkoumanými formami a jejich simulacemi se přechází k optimalizaci simulací pomocí revize počátečních a okrajových podmínek.

Klíčová slova

Hliník, simulace, teplotní pole, tlakové lití, vysokotlaké lití

Abstract

This thesis deals with the technology of die casting. Specifically, it focuses on the temperature field of the molds used in the production of aluminum alloy castings. Thermal fields are examined primarily by thermography. Subsequently, the fields are compared with simulations of the respective forms. Due to the considerable differences between thermographically examined forms and their simulations the thesis steps towards the optimization of the simulations by revising the initial and boundary conditions.

Keywords

Aluminum, die casting, high pressure die casting, simulations, thermal fields

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „**Analýza teplotních polí forem pro tlakové lití**“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Hermana, Ph.D. s použitím literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze

Bc. Tomáš Vítek

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za odborné vedení této práce a obzvláště cenné připomínky, které přispěly ke zvýšení odborné úrovně této diplomové práce. Zároveň bych chtěl také poděkovat společnosti Kovolis Hedvikov a.s. za možnost vypracovávat tuto práci v jejich slévárně vysokotlakého lití. V neposlední řadě děkuji pracovníkům z vývojového oddělení společnosti, kteří byli vždy ochotni pomoci s rozličnými problémy, které se při vypracování vyskytly.

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Cíle práce	8
2	Tlakové lití	9
2.1	Technologie talkového lití	9
2.1.1	Historie	9
2.1.2	Vysokotlaké lití	10
2.1.3	Nízkotlaké lití	12
2.2	Stroje pro tlakové lití	13
2.2.1	Tlakové lití s teplou komorou	13
2.2.2	Tlakové lití se studenou komorou	14
2.2.3	Výrobci tlakových licích strojů	14
2.2.3.1	Bühler	14
2.2.3.2	Toshiba	16
2.2.3.3	Další výrobci	17
2.3	Slitiny pro tlakové lití	18
2.3.1	Neželezné kovy	18
2.3.2	Slitiny hliníku	19
2.3.2.1	Slévárenské slitiny Al – Si (siluminy)	20
2.3.2.2	Slitiny Al – Cu	22
2.3.2.3	Slitiny AL – Mg	23
2.3.2.4	Značení slévárenských slitin Al	24
2.4	Formy pro tlakové lití	26
2.4.1	Konstrukce	26
2.4.1.1	Zásady konstruování forem	27
2.4.2	Výroba forem	28
2.4.3	Materiály forem	29
2.4.4	Vady forem	29
2.4.4.1	Trhliny	30
2.4.4.2	Nalepení (připájení, naletování)	32
2.4.4.3	Eroze	32
2.4.4.4	Koroze	32
3	Teplotní pole forem	33
3.1	Bilance tepelných pochodů	33
3.2	Chlazení a temperace	33
3.3	Postřík	34
3.3.1	Leidenfrostův jev	35
3.4	Mikropostřík	36
3.5	Měření teplotních polí	36
3.5.1	Emisivita	37
3.5.2	Měření termokamerou	38

4	Experimentální část	40
4.1	Návrh experimentu	40
4.2	Měření a simulace formy skříně rozvodovky	41
4.3	Měření a simulace formy krytu výměníku	45
4.4	Měření a simulace formy výměníku	48
4.4.1	Simulace 1	48
4.4.2	Simulace 2	50
4.4.3	Simulace 3.0	51
4.4.4	Simulace 4.0	53
4.4.5	Simulace 3.1	55
4.4.6	Simulace 4.1	56
4.4.7	Simulace 4.2 a 4.3	56
4.4.8	Simulace 5.0–5.3 (mikropostřík)	57
4.4.9	Simulace 3.2 a 3.3	58
4.4.10	Simulace 4.4 a 4.5	59
5	Závěr	62
6	Seznam použité literatury	64
7	Seznam obrázků	67
8	Seznam tabulek	68
9	Přílohy	69

1 Úvod

V dnešní době je slévárnictví nedílnou součástí výrobních procesů. Tato práce se zabývá především vysokotlakovým litím hliníku, které je v oboru slévárnictví neustále na vzestupu, a to hned z několika důvodů.

Jako velice produktivní technologie je vysokotlakové lití vhodné pro sériové odlitky, kde se na jeden odlitek rozloží počáteční vysoké náklady. Odlitky ze slitin hliníku jsou dnes navíc velice žádaným artiklem kvůli jejich dobrým mechanickým vlastnostem při poměrně malé hmotnosti. Díky těmto vlastnostem jsou vysokotlaké odlitky vhodné pro automobilový a elektrotechnický průmysl.

Zmíněná průmyslová odvětví ovšem kladou značné požadavky na kvalitu výsledných odlitků a minimalizaci negativ této technologie. Příkladem takových negativ může být porozita, která je v těchto odlitcích vždy přítomná. Z hlediska jejího vlivu na výsledný odlitek záleží na její míře a poloze v odlitku. Další výzvou pro výrobce těchto odlitků mohou být speciální požadavky na kvalitu povrchu u pohledových dílů. Tyto nároky nutí výrobce balancovat mezi minimálními náklady, produktivností a kvalitou odlitků.

K udržení nákladů na minimu a produktivitu na maximum s požadovanou kvalitou je třeba úzké spolupráce konstrukce, technologie a výroby již při vývoji odlitku a jeho formy. Ve většině případů se při výrobě vyskytují problémy, které je třeba odstranit. Ve fázi výroby je mnohem nákladnější tyto problémy eliminovat. Cílem by mělo být odstranit možné problémy již ve fázi vývoje, a tím ušetřit náklady na výrobu odlitků.

Jedním z nástrojů, které slouží při fázi vývoji k optimalizaci konstrukčních a technologických vlastností daných odlitků a příslušných forem jsou simulace. Simulace se v dnešní době staly nedílnou součástí vývoje odlitků, protože mohou poskytnout důležité informace o plnění a teplotních polích formy.

1.1 Cíle práce

- Analyzovat teplotní pole forem a porovnat je se simulacemi
- Navrhnout optimální nastavení mezních stavů simulace
- Ověřit daná řešení

2 Tlakové lití

2.1 Technologie talkového lití

Technologie tlakového lití je charakterizována tím, že je kov v kapalném skupenství dopraven pístem pod tlakem do dutiny formy. V současnosti jsou hlavními znaky této technologie vysoká automatizace, výborná produktivita a možná různorodost vyrobených odlitků. Nejlehčí odlitky mohou vážit pouze několik gramů, zatímco největší mají i přes 15 kg[1]. Dnes široce rozšířená a neustále rozvíjející se technologie je využívána hlavně při výrobě odlitků pro automobilový průmysl. Počet celosvětově vyrobených odlitků touto technologií stále roste a výrazně se tento fakt projevuje v potřebě slitin hliníku a hořčíku[2, 3].

Z technického hlediska musí být teplota tání materiálu odlitků výrazně nižší než teplota tání materiálu zařízení, se kterým přichází do kontaktu – komora, píst a hlavně forma. Forma se skládá ze dvou hlavních dílů – pohyblivé a pevné části[2, 3].

Tlakové lití je závislé na řadě proměnných, které se dle jednotlivých technologií liší. Mezi hlavní proměnné patří materiál, vtoková soustava, proces plnění dutiny odlitku. Výsledek je také ovlivněn i postřikem formy nebo chlazením[2, 3].

2.1.1 Historie

Ze začátku, konkrétně v druhé polovině 19. století, byla tato technologie používána pro výrobu psacích strojů. Tlakové lití urychlilo výrobu a zlepšilo přesnost výroby komponent pro tyto stroje. První odlitky byly zhotoveny ze slitiny cínu a olova. Oba tyto materiály mají nízkou teplotu tání. Cín má teplotu tání 231,9 °C a olovo 327,5 °C. Po třiceti letech byla tato technologie využívána i pro jiné výrobky než zmíněné psací stroje. Do konce 19. století se pomocí této technologie vyráběly součástky pro pokladny, gramofony a další hromadně vyráběné díly[4].

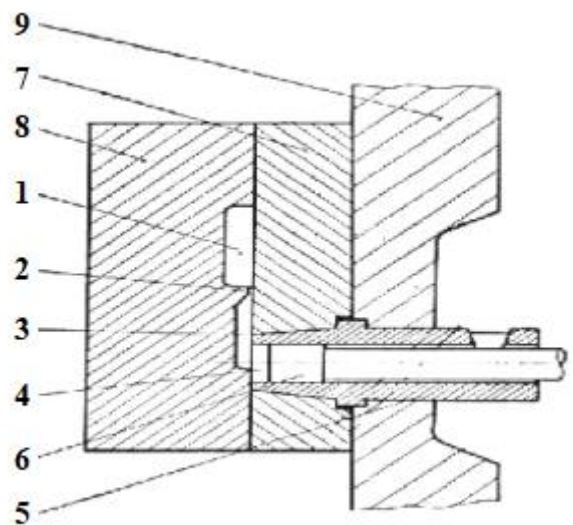
Nevyhovující mechanické vlastnosti cínu a olova byly příčinou hledání nových materiálů. Po patentu prvního vysokotlakého stroje H. H. Doehlera v roce 1915 začaly být využívány slitiny zinku a brzy na to i slitiny hliníku. Výsledné odlitky byly pevnější a daly se tím pádem aplikovat v nových případech. To mělo za následek, že se technologie ještě více rozšířila. V dalších letech bylo využíváno i hořčíkových a měděných slitin. Všechny tyto materiály tvoří základ dnešního tlakového lití, nicméně nejpoužívanější je v dnešní době hliník[2, 4, 5].

Výraznou stopu ve vývoji strojů tlakového lití zanechal český inženýr Josef Polák. V roce 1927 mu byl udělen patent na lící stroj s oddělenou tavicí pecí a vertikální studenou komorou[6].

Mezi dalšími důležitými faktory vývoje tlakového lití byly stále se zlepšující materiály forem (tyto materiály umožňovaly přechod k vysokotlakému lití) nebo rozvoj automobilového průmyslu, který zvýšil potřebu této technologie a tím urychlil i její vývoj. Posledními trendy ve vývoji tlakového lití je zavádění vakuovaných forem, které pomáhají vypořádat se s přítomnou porozitou nebo využití semi-solidových technologií jako je rheocasting[2, 4].

2.1.2 Vysokotlaké lití

Vysokotlaké lití je využíváno k výrobě odlitků z hliníkových, zinkových a hořčíkových slitin. Forma, která je plněna slitinou pod vysokým tlakem, se dělí na pevnou a pohyblivou část. Odlitky vyrobené pomocí vysokotlakého lití jsou velmi podobné hotovým výrobkům – lze dosáhnout velice přesných rozměrů. Vyrábí se ve velkých sériích. Je využíváno velkých sil k doplnění kovu, který je potřeba pro eliminaci vad způsobených stažením materiál, proto musí být obě poloviny formy k sobě přitlačeny velkou uzavírací silou. Při vysokotlakém lití lze využívat stroje s teplou i studenou komorou.



Obrázek 1: Vtoková soustava pro tlakové lití [7]

- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| 1) Dutina formy | 6) Píst |
| 2) Vtokové naříznutí (zářez) | 7) Pevná polovina formy |
| 3) Vtokový kanál | 8) Pohyblivá polovina formy |
| 4) Zbytek v plnicí komoře | 9) Upínací plocha |
| 5) Plnicí komora | |

Průběh tlakového lití [2]

- 1) Nalítí kovu do plnicí komory
- 2) Plnění formy
 - a) Pohyb pístu
 - b) Rychlé zaplnění dutiny formy (od 20 do 45 m/s, nesmí překročit 60 m/s)[5]
 - c) Dotlak vysokou silou hydraulického lisu (až 4000 t \approx 40 MN)
- 3) Otevření formy
- 4) Vyjmutí odlitku

Výhody vysokotlakého lití [8]

- 1) Přesné rozměry
- 2) Vhodné pro malé, složité a tenkostěnné odlitky
- 3) Stálá kvalita výrobků
- 4) Při velkých sériích ekonomicky výhodnější oproti lití do kokil nebo odlévání do písku
- 5) Možná vysoká výrobnost (v řádu stovek výrobků za hodinu)

Dokončovací operace [8]

- 1) Práškové a mokré lakování
- 2) Broušení a leštění
- 3) Tryskání
- 4) Omílání
- 5) Tvrdé eloxování (nelze dekorativní, na povrchu se objevují tmavé matné skvrny)

2.1.3 Nízkotlaké lití

Stejně jako vysokotlaké lití má pohyblivou a pevnou část formy, nicméně u nízkotlakého typu lití jsou poloviny forem umístěny nad sebe. Pod pevnou částí formy je umístěna komora a udržovací pec s roztaveným kovem (jedná se tedy o stroj s vertikální teplou licí komorou). Přetlakování nízkým tlakem (u nízkotlakého lití 0,2 MPa, u vysokotlakého lití až 120 MPa) zajišťuje dopravení kovu do dutiny formy. Tlak je udržován až do doby, než kov ve formě ztuhne. Kov je tedy doplňován i ve fázi tuhnutí a stahování materiálu[3, 9].

Nízkotlaké lití je obecně jednodušší než vysokotlaké. Stroje vysokotlakého lití jsou složitější a příslušné formy musí být vysoce jakostní kvůli vyššímu namáhání. Výhodou nízkotlakého lití proti vysokotlakému jsou tedy menší počáteční i provozní náklady. Velkým rozdílem je možnost použití pískových jader, tím pádem lze dosáhnout i velice složitých tvarů. Nevýhodou je menší produktivita a vyšší minimální tloušťka stěny[10].

2.2 Stroje pro tlakové lití

Stroje pro tlakové lití se liší účelem, konstrukcí a různými parametry stroje, kterými jsou například rozměry stroje, maximální velikost formy, uzavírací síla atd.

Nejjednodušeji lze rozdělit stroje dvěma způsoby. Podle polohy komory nebo podle její operační teploty.

Dle polohy komory:

- 1) Vertikální
- 2) Horizontální

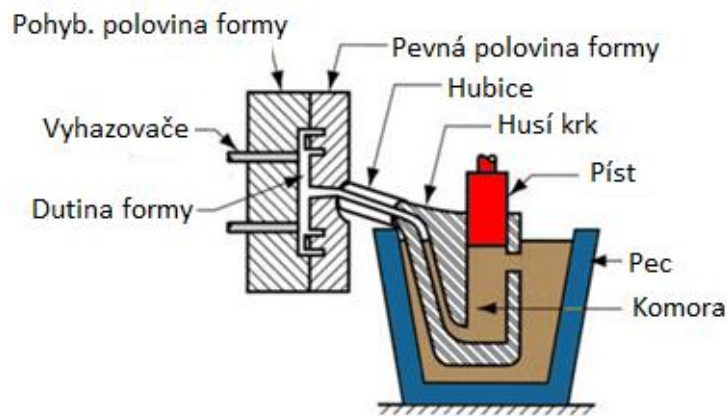
Dle operační teploty komory:

- 1) S teplou komorou
- 2) Se studenou komorou

Pro slitiny zinku a hořčíku se používají stroje s teplou komorou. Tyto stroje se nepoužívají pro hliník, protože při vyšších teplotách může dojít k poškození tzv. husího krku, kterým se přivádí kov do formy[10].

2.2.1 Tlakové lití s teplou komorou

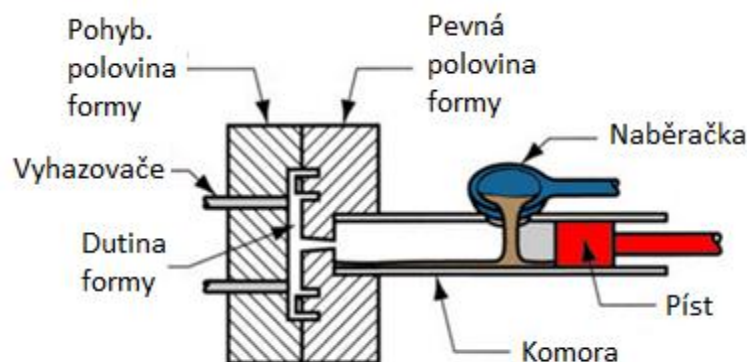
Komora se nachází v udržovací peci pod hladinou roztaveného kovu. Kov je vstřikován do dutiny formy pomocí vertikálního pístu skrz husí krk a trubici a pevnou část formy. Píst po vstřiku kovu do formy setrvává v dolní pozici a pod tlakem dále doplňuje potřebný kov z důvodu stahování. Poté se píst vrátí do původní pozice. Do komory nateče kov sám, pokud je píst v horní pozici (viz obrázek 2)[10].



Obrázek 2: Schéma tlakového lití s teplou komorou[10]

2.2.2 Tlakové lití se studenou komorou

Tento způsob lití je využíván především pro lití hliníkových odlitků, ale využívá se i pro některé hořčíkové slitiny. Na rozdíl od lití s teplou komorou se zde nabírá kov naběračkou z udržovací pece, kterou se poté nalije do komory skrze otvor, který se nachází na vrchu komory u pístu. Píst je zde většinou v horizontální poloze na rozdíl od strojů s teplou komorou. Nicméně po vstřiku i zde působí dotlak pístu na kov v komoře a následně i ve vtokové soustavě, než kov v dutině ztuhne[10, 11].



Obrázek 3: Schéma tlakového lití se studenou komorou[10]

2.2.3 Výrobci tlakových licích strojů

2.2.3.1 Bühler

Bühler je švýcarská firma založená roku 1860 s ústředím v Uzwilu. Společnost se specializuje kromě výroby strojů tlakového lití také na výrobní systémy pro barvy, laky a jiné povlaky. Mimo strojírenství se zabývá procesy zpracování obilí a obecně potravinářským průmysl[12].

V oblasti tlakového lití nabízí komplexní řešení od dodávky strojů, přes postřikové systémy až po optimalizaci konstrukce forem a simulaci plnění formy. Společnost nabízí stroje pro tlakové lití hliníku, hořčíku, strukturálních odlitků, odlitků bloků motorů nebo stroje využívající vakuové lití[13].

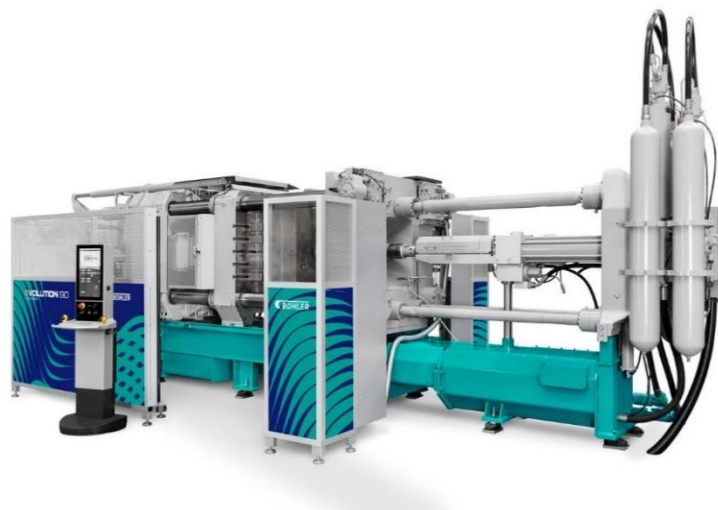
Nabízeny jsou tři řady strojů – Carat, Evolution, Ecoline S series[14].

Carat – Dvoudeskové stroje jsou dostupné ve 13 verzích s uzavírací silou od 10 500 kN do 44 000 kN. Jsou vhodné i pro velké odlitky[14].



Obrázek 4: Tlakový lící stroj Buhler Carat[14]

Evolution – Stroje s uzavírací silou od 2 600 kN do 9 600 kN. Jsou vhodné pro výrobu středně až hodně složitých odlitků[14].



Obrázek 5: Tlakový lící stroj Buhler Evolution[14]

Ecoline S – Stroje s uzavírací silou 3 400 – 8 400 kN. Použitelné pro tlakové lití hliníků i hořčíku. Stroj se základními funkcemi pro ekonomickou výrobu[14].



Obrázek 6: Tlakový lící stroj Bühler Ecoline S[14]

2.2.3.2 Toshiba

Toshiba je japonská společnost založená roku 1875 se sídlem v Tokiu. Působí hlavně na poli elektroniky, energetiky a strojírenství[15].

Mezi nabízené služby patří běžná školení, optimalizace procesu lití s kontrolou výrobků na tomografu až po možnost vyzkoušení strojů s libovolnou formou, kterou slévárna dodá[16].

DC-J řada

Do této řady patří stroje s uzavírací silou od 1 350 kN do 8 000 kN dostačující pro většinu běžně vyráběných odlitků. Maximální rychlost pístu se pohybuje podle jednotlivých strojů od $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Stroje, s výjimkou základních verzí, jsou vybaveny systémem TOSCAST (Total Control System)[17, 18].



Obrázek 7: Tlakový lici stroj Toshiba DC-J[17]



Obrázek 8: Rozhraní TOSCAST[18]

DC-CS řada

DC-CS je vyšší řada zaměřená na maximální automatizaci s uzavíracími silami od 9 800 kN do 34 300 kN. Díky velké uzavírací síle lze na strojích vyrábět například i strukturální odlitky pro automobilový průmysl. Všechny stroje řady DC-CS jsou vybaveny rozhraním TOSCAST[19].

2.2.3.3 Další výrobci

Mimo výše uvedených výrobců, se kterými se lze setkat v Kovolise Hedvikov, lze uvést další zástupce jako například:

- LK Machinery
- Colosio Die casting machines
- Idra Group

2.3 Slitiny pro tlakové lití

Pro tlakové lití se používají neželezné slitiny, tedy slitiny, u kterých základním prvkem není železo, ale jiný kov. Mezi nejvíce využívané neželezné kovy patří hliník, měď, hořčík, zinek a olovo. Pro tlakové lití se využívá slitin hliníku (hliníkové odlitky tvoří až 90% produkce odlitků) a dále slitiny hořčíku, zinku a mědi. Zejména slitiny hořčíku a titanu patří mezi progresivní materiály. Hořčíkové slitiny mají velmi nízkou hmotnost a dobré mechanické vlastnosti[21].

2.3.1 Neželezné kovy

Rozdělení slitin neželezných kovů[22]:

- a) Podle základního prvku (většina slitin ho obsahuje více jak 50%)
- b) Podle způsobu zpracování – slévárenské/tvářené
- c) Podle hustoty
 - a. Lehké (Al, Mg, Ti)
 - b. Těžké (Cu, Zn, Ni, Pb, Sn) – mají hustotu více jak $4\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- d) Podle tavicí teploty
 - a. Do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nízkotavitelné (Sn, Pb, Zn)
 - b. Do $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – se střední teplotou tavení (Mg, Al, Cu)
 - c. Nad $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – s vysokou teplotou tavicí teplotou (Ti, Cr, V, Mo, Nb)
- e) Podle chemické reaktivnosti
- f) Jiná kritéria

Nejběžnější dělení je dle kovů obsažených ve slitinách za pomoci periodické soustavy prvků[22].

- a) Kovy s nízkou teplotou tání: Zn, Cd, Hg, Pb, Bi
- b) Lehké kovy: Al, Mg, Be, Ti
- c) Kovy se střední teplotou tání: Cu, Ni, Mn, Co
- d) Ušlechtilé kovy: Au, Ag, Pt, Rh, Pd, Ir, Os
- e) Kovy s vysokou teplotou tání: Cr, W, V, Mo, Ta, Nb

Základní vlastnosti Al, Mg, Zn, Cu[21]:

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti Al, Mg, Zn, Cu[21]

Kov	Hustota [kg·m ⁻³]	Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]	Skup. teplo tání [kJ·kg ⁻¹]	Atomové číslo
Al	2700	660	2450	402	13
Mg	1740	650	1107	377	12
Zn	7130	419	906	103	30
Cu	8960	1083	2595	209	29

2.3.2 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku jsou vyráběny z hutního hliníku, který má čistotu 99 – 99,9% Al. Tento hliník tedy vždy obsahuje nečistoty, mezi které především patří Fe, Si, Cu, Mg, Mn, V, Ti a Zn. Tyto nečistoty ovlivňují vlastnosti materiálu. Čistý hliník má špatné mechanické vlastnosti (nízkou pevnost i tvrdost) a slévatelnost. Tím pádem se z něj odlitky vyrábí zcela výjimečně, a to pouze v případě, že klíčovou vlastností je elektrická vodivost (vodiče rotorů asynchronních motorů) [21].

Slévatelnost pro běžné odlitky se u slitin výrazně zlepšuje pomocí zvýšeného podílu příslušného eutektika. Tím se také docílí zvýšených hodnot pevnosti a tvrdosti. Za přítomnosti některých dalších legujících prvků se dá dosáhnout ještě lepších mechanických vlastností za předpokladu, že vzniknou intermetalické vytvrzovatelné fáze, a to především Mg₂Si a CuAl₂. Slitiny hliníku se dají využít ke všem obvyklým způsobům lití. Lze je odlévat do písku, kokil, a to jak gravitačně, tak i pod tlakem[21,22].

Výhodou slitin hliníku je například nízká teplota tavení a s tím spjatá menší energetická náročnost na tavbu materiálu. Dále se za pomoci správného technologického postupu dá odstranit z taveniny vodík, který je jediným rozpustným plynem v tavenině. Slitiny mají dobrou odolnost vůči korozi a zvláště u tlakového lití i dobrou kvalitu povrchu[21, 22].

Nejvýznamnější slévárenské slitiny jsou[21]:

- Al – Si (siluminy)
- Al – Cu
- Al – Mg

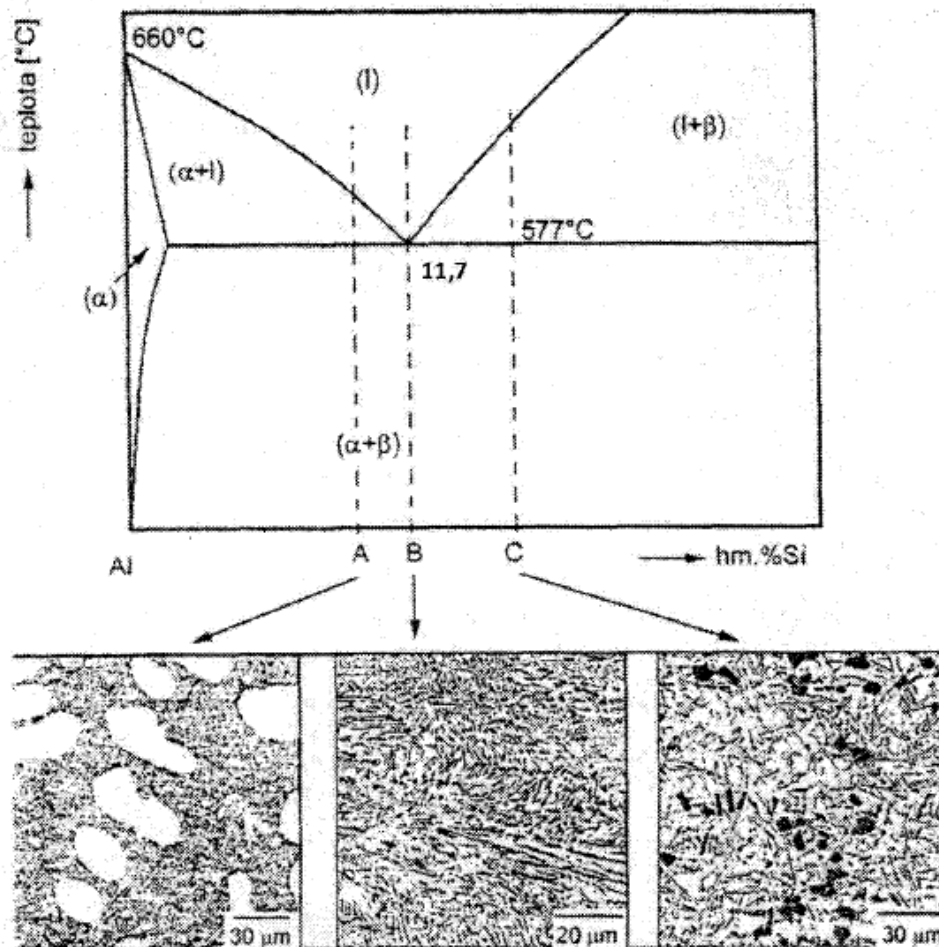
Od těchto základních typů jsou odvozeny další vzájemné kombinace, mezi které například patří[21]:

- Al – Si – Mg
- Al – Si – Cu
- Al – Cu – Si
- Al – Mg – Si

Dalšími žádoucími přísadovými prvky pro specifické případy jsou: Ni, Mn, Zn, Ti, Co. Na metalurgických vlastnostech těchto slitin dále závisí, jestli jsou nebo nejsou vytvrditelné[21].

2.3.2.1 Slévárenské slitiny Al – Si (siluminy)

V těchto slitinách, zvaných také siluminy, je obsah hlavní přísady křemíku vždy vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v tuhém roztoku Al. Fáze α – *hliník* tvoří spolu s fází β – *křemíkem*, eutektický systém s omezenou rozpustností křemíku ve hliníku[21].



Obrázek 9: Rovnovážný diagram Al – Si [21]

Dle rovnovážného diagramu lze rozdělit slitiny Al – Si na tři skupiny:

- PODEUTEKTICKÉ – s obsahem Si do 10% (nejběžnější)
- EUTEKTICKÉ – s obsahem Si v oblasti eutektického složení
- NADEUTEKTICKÉ – s obsahem Si nad eutektickým složením (hranice minimálního obsahu křemíku není definována, nadeutektické slitiny charakterizuje přítomnost fáze β ve struktuře)

Primárním přísadovým prvkem ve slitinách Al-Si je křemík. S vyšším obsahem křemíku se zlepšují téměř všechny slévárenské a technologické vlastnosti. Konkrétně se zlepšuje zabíhavost, zmenšuje se součinitel stahování během tuhnutí odlitku, zmenšuje se také sklon ke vzniku ředin a snižuje se nebezpečí vzniku trhlin a prasklin. Dále se zlepšují kluzné vlastnosti, ořezuvzdornost a odlitek má i menší tepelnou roztažnost. Nevýhodou zvýšeného obsahu křemíku ve slitině je vyšší cena slitiny, proto i přes všechny tyto kladné vlastnosti se nejvíce používají slitiny podeutektické[21].

V siluminech se nachází kromě křemíku i další prvky. Při potřebě zlepšené obrobitelnosti se přidává měď, která také zvyšuje pevnost a tvrdost (je ovšem potřeba počítat se zhoršenou korozivzdorností a tažností)[21].

Významným prvkem je také hořčík, který téměř neovlivňuje slévatelnost. Má minimální vliv na mechanické vlastnosti vzhledem k jeho obsahu ve slitině (zlepšuje pevnost, zhoršuje tažnost), ale je velice důležitý při vytvrzování, protože čím vyšší je obsah Mg, tím vyšší pevnosti lze dosáhnout[21].

Dále se vždy ve slitině nachází mangan, který kompenzuje účinek železa. To je vždy přítomno, ale jako nečistota, která se obtížně odstraňuje. Pokud se přidá určité množství manganu (polovina obsahu železa) je možno zabránit vytváření nevhodné fáze ve tvaru jehlic a destiček, která je tvořena Al – Si – Fe. Mnohem vhodnější fáze dosáhneme právě za pomoci manganu, kdy vznikne místo destiček a jehlic tzv. čínské písmo z intermetalické fáze Al – Si – Fe – Mn. Mangan najde využití také u strukturálních odlitků, opět jako náhrada železa, které je potlačeno na minimum[21].

Mechanické vlastnosti jsou dále ovlivňovány[21]:

- Očkováním
- Modifikací
- Tepelným zpracováním

2.3.2.2 Slitiny Al – Cu

Slitiny hliníku a mědi mají dobré pevnostní vlastnosti, obzvlášť pokud se vytvrzují. Lze je vytvrzovat za tepla i za studena[21].

Při eutektické teplotě 548 °C je rozpustnost mědi v hliníku maximálně 5,7 %. Z technického hlediska nemá vyšší obsah mědi, než zmíněných 5,7 %, ve slitině význam. Slitiny se dále vyznačují svojí dobrou otěruvzdorností, ale také horší korozní odolností[21].

Dalšími přísadovými prvky může být titan (obvykle 0,3 %) pro zjemnění primárního zrna a hořčík, který zvětšuje pevnost. Často se také ve slitině objevuje mangan[21].

Nejběžnějšími slitinami jsou slitiny Al – Si – Cu. Vyšší obsah křemíku zlepšuje slévatelnost, ale zároveň se zvyšuje cena slitiny. Z důvodu ekonomických se hliníkové

slitiny obsahující vyšší množství mědi používají pouze tam, kde jsou vyžadovány vyšší mechanické vlastnosti, než které může zajistit slitina Al – Si. V opačných případech je vhodné použít slitinu Al – Si pro její lepší slévatelnost, ale i ekonomičnost[21, 22].

2.3.2.3 Slitiny AL – Mg

Slitiny mají velmi dobrou korozní odolnost, výborně odolávají mořské vodě, dále jsou svařovatelné a dobře obrobitelné a dají se anodizovat (ELOX). Se slitinami je problém z hlediska metalurgie, protože hořčík má sklony k oxidaci při tavení. Slitiny jsou špatně slévatelné[21, 22].

Při eutektické teplotě 450 °C je maximální rozpustnost hořčíku 450 °C. Nižší teplotou a dalšími legujícími prvky se jeho rozpustnost snižuje. V případě přítomnosti křemíku, lze slitinu vytvrzovat, protože se zde vytváří sloučenina Mg₂Si[21, 22].

Slitiny se dělí do dvou typů. První typ má 3,5 % hořčíku a druhý má 9 % hořčíku. S rostoucím obsahem hořčíku se zhoršuje slévatelnost. Konkrétně se jedná o špatnou zabíhavost, vznik rozptýlených staženin, kvůli kterým jsou odlitky netěsné. Do slitin se přidává Beryllium, které zlepšuje zabíhavost a odstraňuje naplynění[21, 22].

Slitina s 9 % hořčíku se kvůli špatné slévatelnosti odlévá pouze pod tlakem do kokil. Slitiny s nižším obsahem hořčíku lze odlévat i gravitačně do písku. Mechanické vlastnosti těchto slitin jsou v porovnání se siluminy horší, lepší je pouze tažnost, ale ta se se zvyšující teplotou stejně jako ostatní mechanické vlastnosti výrazně zhoršuje[21, 22].

Výhodou slitin je výborná obrobitelnost a aplikovatelnosti povrchových úprav. Lze je výborně leštit a také eloxovat. Mají také dobrou korozivzdornost. Díky zmíněným vlastnostem se využívají při stavbě lodí, a v chemickém či potravinářském průmyslu[21, 22].

2.3.2.4 Značení slévárenských slitin Al

Značení slévárenských slitin hliníku je dáno normou ČSN EN 1706. Slitiny jsou označeny písmeny EN AC a pěti číslicemi[22].

EN AC-XXXXX => EN AC-21000

EN – evropská norma

A – hliník

C – odlitek (casting)

X1 – hlavní přísadový prvek

- 2 – Al-Cu
- 3 – Al-Si
- 4 – Al-Mg
- 5 – Al-Zn

X2 – udává skupinu slitin (důležité pro Al-Si)

X3 – pořadové číslo ve skupině

X4, X5 – jsou 0

Označování slitin hliníku podle ČSN

V normách ČSN se označují jednotlivé typy slitin hliníku označením ČSN a šestimístným číslem. Číselné značení lze doplnit chemickým značením[25].

ČSN 42 4400 AlMg1Si1Mn

42 – třída norem

44 – skupina norem ve třídě norem

00 – číslo ve skupině norem

Další možností, jak značit slévárenské slitiny hliníku, je značení DIN.

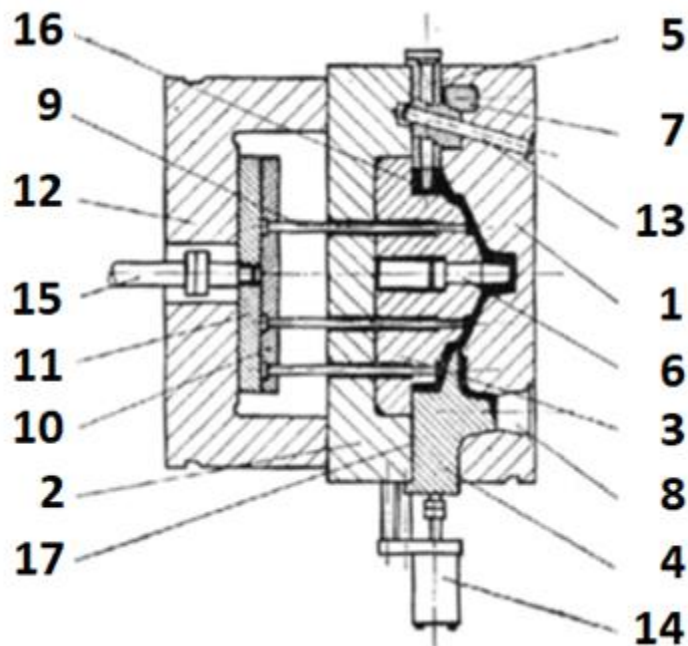
Tabulka 2: Slitiny hliníku na odlitky a jejich značení[22]

Slitiny hliníku na odlitky					
Označení slitin podle ČSN EN 1706		Označení slitin podle ČSN		Označení slitin podle DIN 1725-2	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	-	-	3.1371	AlCu4MgTi
EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	-	-	3.1841	AlCu4Ti
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0.3	-	-	3.2371	AlSi7Mg0.3
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2381	AlSi10Mg(a)
EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	-	-	3.2383	AlSi10Mg(Cu)
EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2373	AlSi9Mg
EN AC-43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)	-	-	3.2382	AlSi10Mg(Fe)
EN AC-44000	EN AC-Al Si11	-	-	3.2211	AlSi11
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2373	AlSi12
EN AC-44300	EN AC-Al Si12(Fe)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2582	AlSi12(Fe)
EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu	-	-	3.2151	AlSi6Cu
EN AC-46000	EN AC-Al Si9Cu3(a)	ČSN 42 4339	AlSi8Cu2Mn	3.2163	AlSi9Cu3(a)
EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	-	-	3.2163	AlSi9Cu3
EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2583	AlSi12(Cu)
EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu(Fe)	-	-	3.2982	AlSi12Cu(Fe)
EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg	-	-	-	AlSi12CuNiMg

2.4 Formy pro tlakové lití

2.4.1 Konstrukce

Na správné konstrukci formy závisí konečná kvalita výrobku, proto je třeba věnovat tomuto tématu dostatečnou pozornost. Formy se skládají primárně z pevné a pohyblivé části, vložek, vyhazovačů, zámků jader a jader samotných. Formy mají také odvzdušňovací systém, který musí být navržen tak, aby kov proudil nejdříve do přetoků a následně do odvzdušňovacích kanálů. Formy ve většině případů obsahují vrtané kanály pro temperaci, chlazení, nebo obojí[7].



Obrázek 10: Řez formou tlakového lití[7]

- | | | | |
|-------|----------------------------------|-----|-------------------------|
| 1) | Pevná polovina formy | 10) | Vodící deska vyhazovačů |
| 2) | Pohyblivá polovina formy | 11) | Opěrná deska vyhazovačů |
| 3) | Vložka v polovině formy | 12) | Upínací skříň formy |
| 4, 5) | Jádro pohyblivé | 13) | Šikmý kolík |
| 6) | Jádro pevné | 14) | Hydraulický tahač jádra |
| 7) | Kalená opěrná vložka zámku jádra | 15) | Středový čep vyhazovačů |
| 8) | Dutina pro plnicí komoru | 16) | Dutina formy |
| 9) | Vyhazovač odlitku | 17) | Dělicí rovina formy |

Konstrukce vychází z několika parametrů, se kterými musí konstruktér počítat[7].

Uzavírací síla je hlavní parametr pro dimenzování forem. Pokud by byla vypočítaná špatně, hrozí nebezpečí prostříku materiálu v dělicí rovině formy. Vychází se z druhu slitiny odlitku, tvaru a velikosti odlitku a velikosti uzavírací síly stroje[7].

$$F_u > \frac{S \cdot p_L}{10^4}$$

S – plocha odlitku (včetně vtoků a přetoků)

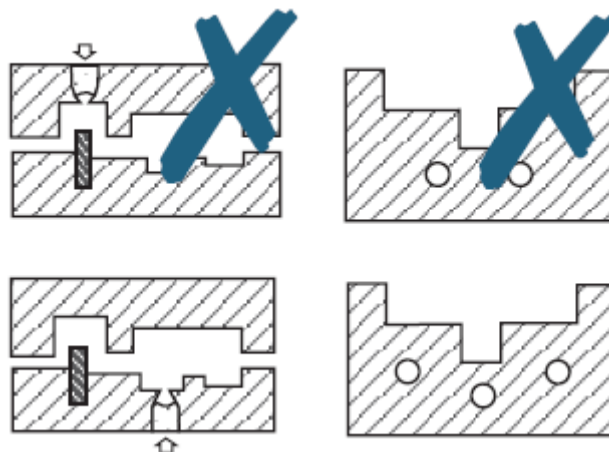
p_L – tlak v MPa (dle složitosti odlitku a materiálu, například pro Al ≈ 60)

Nedílnou součástí je také vtoková soustava, která plní následující funkce[7]:

- reguluje rychlost a tlak plnění
- kanály vtokové soustavy udržují kov v pohybu při plnění
- správně navržená vtoková soustava slouží ke správnému odvodu vzduchu

2.4.1.1 Zásady konstruování forem

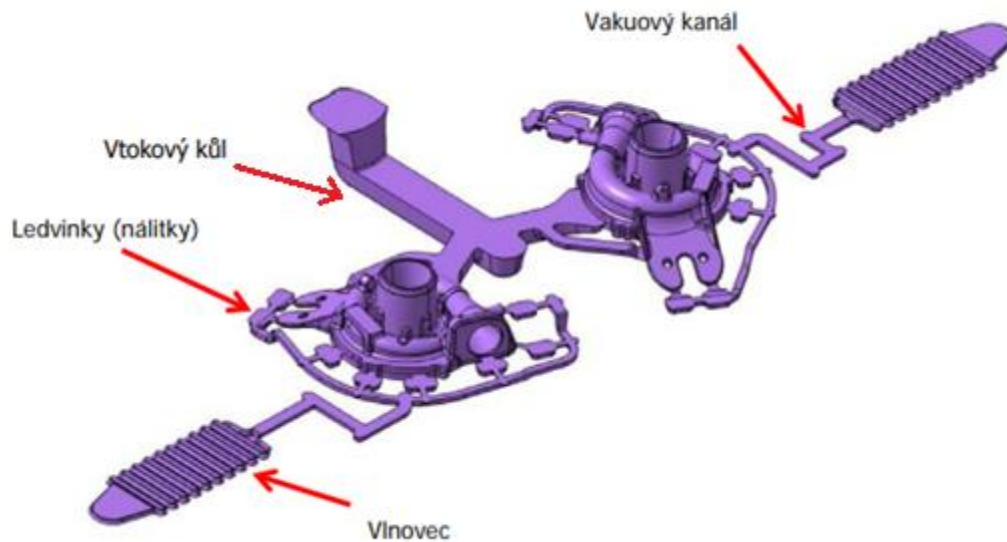
Vzhledem k únavové vrubové citlivosti vysokopevnostních ocelí je nutné, aby ve formě nebyly ostré hrany, ale místo nich byly co největší radiusy. Vzhledem k erozi způsobené prouděním kovu, by měla být jádra a stěny formy co nejdál od vtoků tak, aby nebyly v cestě kovu, který opouští vtokovou soustavu. Chlazení formy by mělo být navrženo tak, aby udržovalo co nejrovnoměrnější teplotu povrchu formy. Důležitá je i kvalita povrchu chladících kanálů. S vyšší drsností povrchu kanálů dochází k zhoršení funkce chlazení a ke zmenšení odolnosti proti opotřebování[28].



Obrázek 11: Špatně a dobře navržené formy[28]

Velice důležité je umístění vtoků, přetoků a odvodu vzdušných kanálů. Konstrukce formy by měla být navržena tak, aby se forma plnila postupně od zářezu po

přetoky. Přetoky umísťujeme po obvodu dutiny formy, aby se případný vzduch neusazoval v podobě porozity v částech odlitku, ale byl právě správným plněním formy vytlačen do ledvinek[28].



Obrázek 12: Příklad dobře zkonstruovaného vtokového a odvzdušňovacího systému[30]

2.4.2 Výroba forem

Formy se většinou obrábí konvenčně s tím, že se stále více využívá progresivního elektroerozivního obrábění. Přesných rozměrů a správné drsnosti se dosahuje broušením a leštěním. Důležitým faktorem je tedy obrobiteľnosť oceli, ze které je forma vyráběna. Ta je ovlivněna nečistotami v materiálu a tvrdostí oceli[28].

Při elektroerozivním obrábění se do kovu vnáší velké množství tepla a povrchové vrstvy materiálu mohou vykazovat známky zakalení. Aby se tomuto nežádoucímu důsledku elektroerozivního obrábění předešlo, doporučuje se pro konečné elektroerozivní obrábění nastavit nižší hodnoty elektrického proudu a vyšší frekvenci. Poté by se měl povrch brousit a leštit. Správný postup by měl omezit vznik trhlin na povrchu formy[28].

Formy je třeba tepelně zpracovat, aby dosáhly požadovaných vlastností. Zvláštní nároky se kladou na vysokou mez kluzu za vyšších teplot, odolnost proti popuštění, tvrdost a tažnost. Nelze dosáhnout maximálních hodnot u všech uvedených vlastností materiálu. Při kalení materiálu záleží na potřebném výsledku. Materiál kalený na vysokou tvrdost lze obtížně obrobít, ale formy s vysokou tvrdostí zaručují dlouhodobou

životnost formy. Je potřeba zvážit ekonomický faktor, nicméně ve většině případů se dává přednost vyšší tvrdosti a horší obrobiteľnosti. Po kalení se formy popouští. Popouštění závisí na tom, jaké konkrétní tvrdosti chceme dosáhnout. Lze také aplikovat povrchové úpravy jako je nitridování. Formy lze také opravovat svařováním. Je nutný předehřev a dodržovat teplotu interpass, která se bude lišit podle druhu oceli. Po svařování je nutné formu pomalu ochlazovat (20-40°C/h) po dobu dvou hodin, následně už může forma chladnout na vzduchu[28].

2.4.3 Materiály forem

Materiály pro formy tlakového lití musí splňovat mnoho požadavků na jejich vlastnosti. Speciální požadavky jsou na tepelnou roztažnost, Youngův modul pružnosti, odolnosti proti tepelné únavě a odolnosti proti chemickým sloučeninám[28].

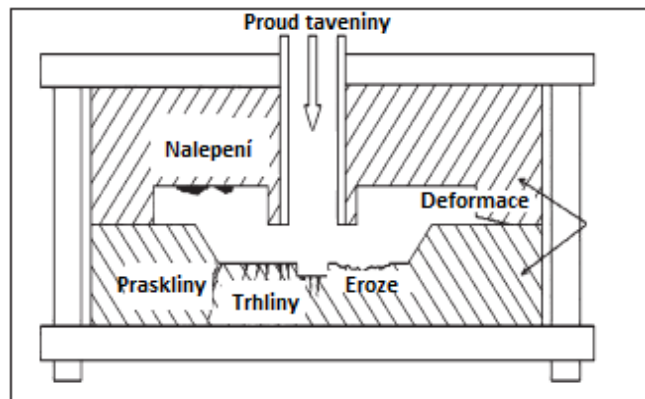
Materiály musí mít malou tepelnou roztažnost a dobrou tepelnou vodivost. Pokud by forma měla špatnou tepelnou vodivost, mohly by vznikat příliš velké tepelné rozdíly uvnitř formy, které by způsobovaly zbytečné namáhání formy. Materiál musí být také odolný proti popuštění a únavě. Tažnost, která je ovlivněna čistotou materiálu, je důležitá z důvodu odolnosti proti vzniku a šíření trhlin[28].

Druhy materiálů pro formy[31]:

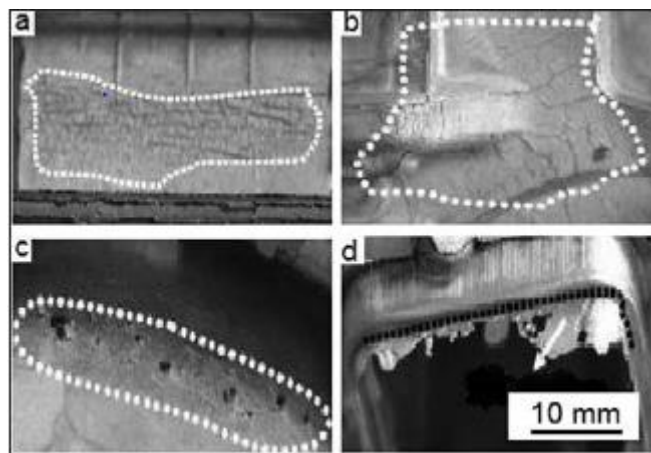
- Uhlíkové oceli pro části nepřicházející do kontaktu s tekutým kovem (např. rámy)
- Nízkolegované oceli – pro funkční části forem při lití ze slitin zinku
- Vysokolegované oceli – Cr-Mo-V-W
- Wolframové slitiny – pro vložky forem, např. Plansee Densimet [29]
- Molybdenové slitiny – pro vložky forem, např. Plansee TZM [29]

2.4.4 Vady forem

Vzhledem k faktu, že formy jsou vystaveny opakovaným teplotním výkyvům, dochází v materiálu k cyklickému namáhání. Z důvodu tepelného, mechanického a chemického namáhání vznikají v materiálu mikrotrhliny, které se následně zvětšují a zkracují životnost formy. Mezi další vady patří například eroze, koroze nebo nalepení kovu na formu (připájení). V nejhorším případě může dojít i k prasknutí[32].



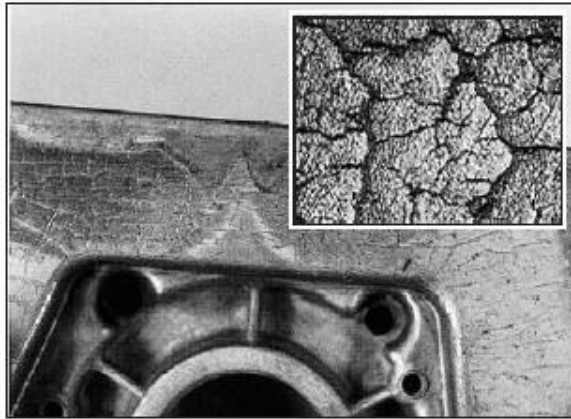
Obrázek 13: Schéma vad forem[32]



Obrázek 14: Fotografie vad forem, a)eroze b)trhliny c)koroze a nalepení d)deformace[32]

2.4.4.1 Trhliny

Původcem trhlin je napětí při změnách teplot materiálu formy při procesu lití. Nejprve se iniciují mikrotrhliny, které se časem a dalším cyklickým namáháním zvětšují. Trhliny mají vliv na výslednou kvalitu povrchu. V případě špatné kvality povrchu u pohledových dílů se může výroba prodražit z důvodu opracování povrchu. U velmi namáhaných forem je dobré, pokud se dá vložka formy co nejjednodušeji vyměnit[33].

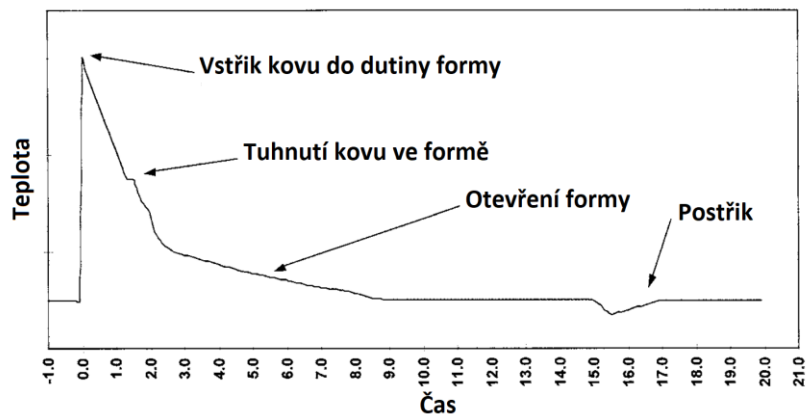


Obrázek 15: Heat checking - trhliny ve formě[33]

Faktory ovlivňující vznik trhlín[28]:

- Teplota formy
- Teplota povrchu formy
- Výdrž na nejvyšší teplotě formy
- Intenzita chlazení
- Koncentrátory napětí (žebra, díry, rohy, drsnost povrchu)

Vzhledem k potřebě minimálních teplotních rozdílů je velice žádoucí teplota, která by měla dosahovat teplot alespoň 180 °C. Při této teplotě je lomová houževnatost až dvakrát vyšší než při pokojové teplotě. Příliš dlouhá doba výdrže na vysoké teplotě může způsobit popuštění materiálu a jeho tečení. Při chlazení je třeba najít ideální kompromis mezi životností formy a produktivitou, přičemž rychlejší ochlazení povrchu snižuje životnost formy[28].



Obrázek 16: Teplota povrchu formy v závislosti na čase[33]

2.4.4.2 Nalepení (připájení, naletování)

Obvykle se nachází v nejteplejších oblastech formy. Poškozena je nejen forma, ale i odlitek. Zabránit se mu dá správným chlazením formy, například pomocí jet coolingu[33].

2.4.4.3 Eroze

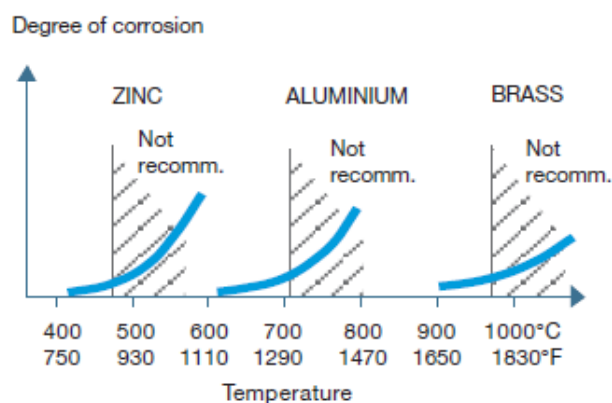
Jedná se o opotřebení povrchu formy za zvýšených teplot. Hlavním činitelem je roztavený kov o vysoké teplotě, který je vstřikován do formy vysokou rychlostí. Pokud je tato rychlost vyšší než 55 m/s, výrazně se zvyšuje opotřebení formy. Vzhledem k vysoké teplotě dochází v materiálu formy i k popouštění. To zhoršuje mechanickou odolnost vůči poškození vměstky nebo precipitáty křemíku, které se mohou nacházet v roztaveném kovu. Nejdůležitějším faktorem pro snížení rizika eroze formy je vysoká pevnost materiálu formy za vysokých teplot a odolnost proti popouštění[28].

2.4.4.4 Koroze

Při tlakovém lití dochází při styku povrchu formy s hliníkem k difuzi, kdy materiál odlitku difunduje směrem do formy a naopak. Nicméně vzhledem k počtu odlitků vyrobených ve formě je ovlivnění materiálu formy mnohem výraznější[28].

Faktory ovlivňující korozi[28]

- Teplota materiálu odlitku v tekuté fázi
- Složení materiálu odlitku
- Konstrukce formy
- Povrchové úpravy formy



Obrázek 17: Koroze forem u různých materiálů[28]

3 Teplotní pole forem

3.1 Bilance tepelných pochodů

Celkovou bilanci tepla uvolněného odlitkem lze zapsat následovně[39]:

$$Q = Q_{stroj} + Q_{píst} + Q_{proud} + Q_{sál} + Q_{chlad} + Q_{postř} \quad (1)$$

Kde: Q – celkové teplo uvolněné odlitkem [J]

Q_{stroj} – teplo odvedené do rámu stroje [J]

$Q_{píst}$ – teplo odvedené do pístu lící komory [J]

Q_{proud} – teplo odebrané prouděním do okolí [J]

$Q_{sál}$ – teplo odebrané sáláním formy [J]

Q_{chlad} – teplo odebrané chladícím médiem [J]

$Q_{postř}$ – teplo odvedené postřikem formy [J]

Množství uvolněného tepla odlitkem je následující[39]:

$$Q = Q_{PT} + Q_{KR} + Q_{CHL} + Q_{TŘ} \quad (2)$$

Kde: Q – celkové teplo uvolněné odlitkem [J]

Q_{PT} – teplo uvolněné při chladnutí na teplotu krystalizace [J]

Q_{KR} – teplo uvolněné tuhnutím odlitku [J]

Q_{CHL} – teplo uvolněné při chladnutí odlitku [J]

$Q_{TŘ}$ – teplo od tření tekutého kovu způsobeného kinetickou energií pístu [J]

3.2 Chlazení a temperace

Regulace tepla naakumulovaného ve formách je nedílnou součástí procesu tlakového lití. V ideální případě je potřeba, aby teplota formy během procesu lití kolísala co možná nejméně. Formu je optimální před samotným začátkem nového procesu přehřát alespoň na teplotu 180 °C z důvodu zmenšení teplotního šoku formy a zmenšení počtu vyrobených startovacích kusů, které jsou brány jako zmetky[38].

Jako médium jsou běžně používány olej a voda. Aplikace daných médií závisí na požadovaném účinku. Ten se většinou odvíjí od právě odlévaného odlitku. Obě tato média mohou zajišťovat temperaci před započítím prací (voda do 180°C a olej do 350°C). Olejové médium oproti vodnímu médiu chrání chladicí/temperační kanály proti zanesení vápencem. Zařízení na bázi vodního média jsou levnější než olejová zařízení. Obecně chlazení a temperace ovlivňují náklady na výrobu přímo i nepřímo[38].

3.3 Postřik

Postřik forem má několik funkcí, z nichž některé nelze nahradit jiným řešením. Mezi tyto funkce patří[26, 27]:

- Separace odlitku od formy
- Mazání pohyblivých částí
- Prevence připájení kovů na formu
- Zlepšování zabíhavosti
- Chlazení povrchu formy (může vyvolávat teplotní rozdíly na povrchu formy)

Separáčnický prostředek se vybírá nejen podle zmíněných funkčních vlastností, ale i podle jeho ceny a ekologičnosti. Kromě samotného složení bude efekt separátoru záležet na mnoha faktorech při jeho nanášení.

Dané faktory jsou následující[26, 27]:

- Teplota povrchu formy
- Doba nanášení
- Úhel nanášení
- Tlak, kterým je separátor nanášen
- Tlak ofuku separátoru
- Vzdálenost trysky od formy
- Koncentrace separátoru

Účinnost ochlazení povrchu formy nelze přesně určit z důvodu mnoha proměnných, které na tuto problematiku mají vliv. Největší vliv na hustotu proudění tepla má teplota samotného povrchu, úhel nanášení a složení separátoru. Dále záleží na době nanášení separátoru a tlaku, kterým je nanášen separátor. Ostatní faktory mají vliv zanedbatelný[27].

Vliv jednotlivých faktorů je vyjádřen na grafech v příloze č. 1, které pochází z experimentálního měření společnosti Chem-Trend. Výsledky těchto měření se zdají být logické, pouze v případě úhlu nanášení separátoru se výsledek testu rozchází s obecným konsenzem, že nejúčinnější je nanášet separátor pod ostrým úhlem menším než 45° a nikoliv kolmo na povrch formy. Nejvyšší hustoty proudění tepla se dosahuje při přechodu z bublinkového varu do přechodového varu[27].

Grafy z přílohy č. 1 mohou také posloužit k přibližnému určení koeficientu přestupu tepla podle následujícího vzorce:

$$h = \frac{q}{\Delta T}$$

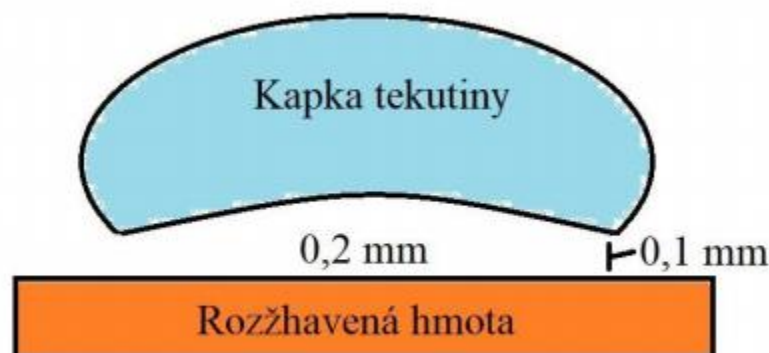
Kde: h – koeficient přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

q – hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

ΔT – Rozdíl teplot mezi pevnou látkou a okolním prostředím [K]

3.3.1 Leidenfrostův jev

Jedná se o jev, který ovlivňuje účinnost postřiku tlakového lití, kdy při teplotě povrchu vyšší než je Leidenfrostův bod se při doteku vody na daném povrchu tvoří pára a kapky vody nabývají kulový tvar z důvodu nepřítomnosti adhezních sil. Leidenfrostův bod závisí na složení tekutiny. U vody je tato teplota mezi 180 - 250 °C, u dusíku jev nastává již při pokojové teplotě[27].



Obrázek 18: Leidenfrostův jev [41]

3.4 Mikropostřik

Vzhledem ke stále vzrůstajícím nárokům na kvalitu odlitků, ale zároveň zkracování cyklu výroby je nutný neustálý vývoj ve všech oblastech týkajících se tlakového lití. Technologie postřiku nejsou výjimkou a současný trend směřuje stále více k využití mikropostřiku. Jedná se o postřik, jehož účelem je co nejméně ovlivnit formu, na kterou je aplikován. Většinou je na olejové bázi bez přidané vody. Aplikace mikropostřiku nám umožňuje využít několika jeho výhod oproti klasicky používaným postřikům[38].

Mezi tyto výhody patří[38]:

- Zkrácení cyklu lití
- Menší spotřeba separátoru
- Menší spotřeba stlačeného vzduchu
- Snížení hluku při postřiku formy
- Menší tepelný šok formy
- Zmenšená potřeba energií
- Delší životnost formy

Současné mikropostřiky lze aplikovat až do teploty 400 °C. Jednou z podmínek využití mikropostřiku je zajistit dobře optimalizovaný systém chlazení a teploty formy[38].

3.5 Měření teplotních polí

Měření teplotních polí se ve většině případů provádí termograficky za pomoci snímačů, které běžně nazýváme termokamery. Princip infračervené termografie je založen na fyzikálním jevu, že jakékoliv těleso o teplotě nad absolutní nulou emituje elektromagnetické záření. Existuje jasná korelace mezi teplotou povrchu tělesa a intenzitou jeho emitovaného záření. Pomocí stanovení této intenzity záření můžeme následně zjistit i jeho teplotu, a to zcela bezkontaktním způsobem[40].

Infračervené záření je část elektromagnetického spektra, jehož vlnové délky nabývají hodnot od cca 760 nm do cca 1 mm[40].

Základem pro intenzitu vyzařování absolutně černého tělesa je Planckův vyzařovací zákon. Ten ovšem pro praktické využití není vhodný, tudíž se pro výpočet

teplot u termokamer vychází ze Stefan-Boltzmanova zákona a Wienova posunovacího zákona[40].

3.5.1 Emisivita

Emisivita je vlastnost materiálu, která je popsána jako podíl intenzity vyzařování reálného tělesa a absolutně černého tělesa o stejných teplotách. Je vyjádřena následujícím vzorcem[34].

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda a}}{W_{\lambda b}}$$

Kde:

ε_{λ} – spektrální emisivita

$W_{\lambda a}$ – energie vyzářená selektivním zářičem

$W_{\lambda b}$ – energie vyzářená absolutně černým tělesem

Emisivita je funkčně závislá na vlnové délce, ale i na dalších parametrech. Tělesa dle emisivity můžeme dělit na tři skupiny – absolutně černá tělesa, šedé zářiče a selektivní zářiče[35].

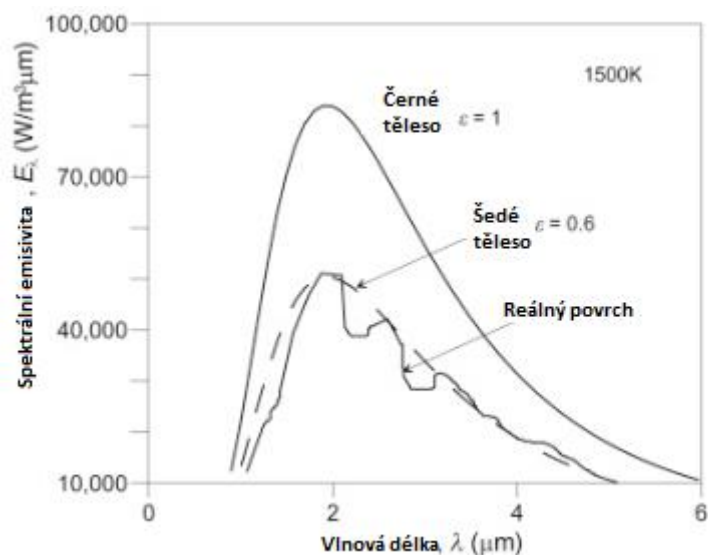
Absolutně černé těleso je těleso, pro které platí $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon = 1$.

Šedé těleso je těleso, pro které platí, že při všech vlnových délkách vyzařuje energii v určitém poměru k absolutně černému tělesu při stejné teplotě.

Selektivní zářič je těleso, u kterého závisí emisivita na vlnové délce.

Emisivita těles nabývá hodnot od 0 (dokonalé zrcadlo) do 1 (absolutně černé těleso).

Pro lepší představu jsou tyto tři typy těles znázorněny na následujícím obrázku.



Obrázek 19: Emisivita těles[34]

Předpokládanou emisivitu různých materiálů (s různými povrchy) lze najít v následující tabulce.

Tabulka 3: Emisivita materiálů[36]

Materiál	Emisivita
Hliník elox	0,77
Hliník leštěný	0,05
Sklo	0,92
Led	0,97
Polypropylen	0,97
Ocel pozinkovaná	0,27
Ocel silně zoxidovaná	0,88
Ocel nerezová	0,1
Zlato leštěné	0,02

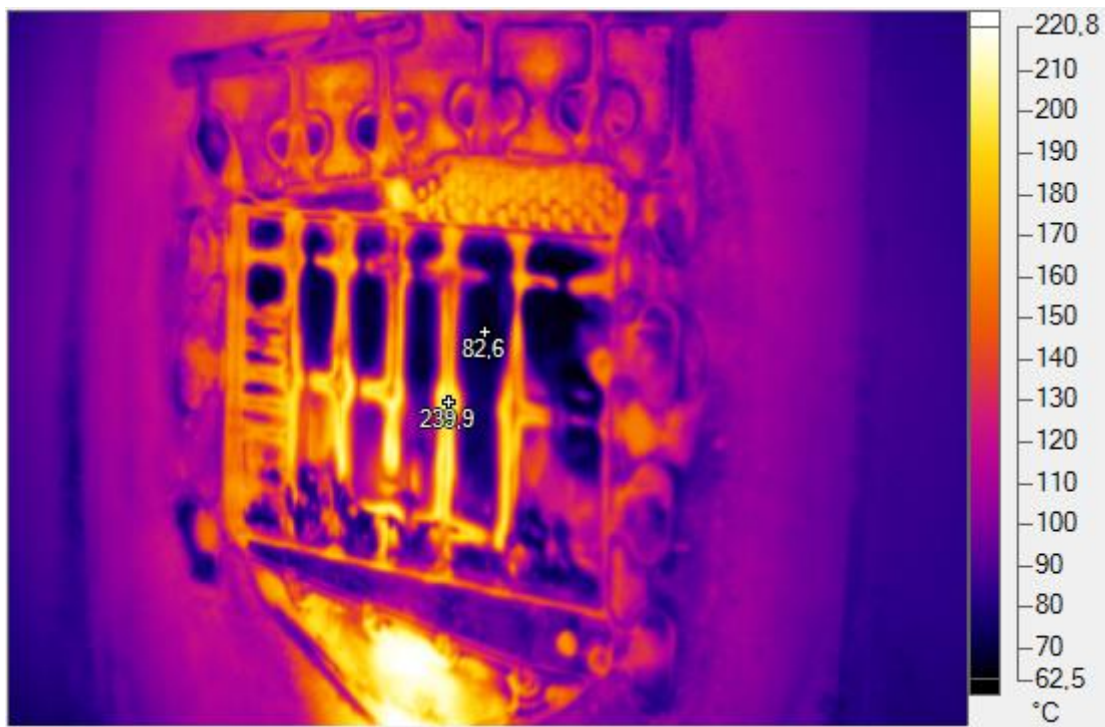
3.5.2 Měření termokamerou

Většina měření při slévárenství probíhá pomocí bezdotykových měřidel. Tyto měřicí přístroje (termokamery, pyrometry) mají ovšem i své nevýhody. Jednou z nich je jejich závislost na správném nastavení hodnoty emisivity, která je vlastností snímaného materiálu. Při snímání ocelových forem se emisivita snímaného objektu může lišit. Problémem je nejenom odrazivost povrchu forem, která je způsobena různou drsností povrchu, ale i úhel měřicího přístroje od normály povrchu objektu. V ideálním případě

by byla forma černá, matná, s hrubým povrchem a termokamera nebo pyrometr by byl zaměřen kolmo ke snímanému povrchu, ani jedné vlastnosti se ovšem nedá docílit.

Pro určení správné emisivity lze snímat dva objekty se stejnou teplotou, ale rozdílnými povrchovými vlastnostmi. Jeden objekt by se měl blížit absolutně černému tělesu (tohoto se dá dosáhnout například pomocí speciálního spreje) a druhý by měl odpovídat objektu, u kterého je potřeba zjistit hodnotu emisivity. V zásadě je potřeba zjistit teplotu snímaného objektu (například dotykovým teploměrem nebo termočlánkem) a poté zjistit teplotu, kterou ukazuje pyrometr nebo termokamera. Z tohoto poměru lze vypočítat podíl a následně upravit emisivitu. V lepším případě by mělo jít u měřících přístrojů snadno upravit emisivitu tak, aby se při měření dala upravit na hodnotu, při které ukazuje přístroj odpovídající teplotu.

Na obrázku 20 lze vidět příklad pevné poloviny formy, na kterou lze využít bezdotykové měření pouze s velkými obtížemi. Z důvodu leštění formy emisivita neodpovídá reálným hodnotám. Z obrázku by se dalo soudit, že teplota na povrchu dutiny formy je nižší než teplota zbytku formy, který vůbec nepřijde do styku s taveninou. Reálně je ovšem povrch uvnitř dutiny formy mnohem teplejší. Tím pádem, i když se jedná o stejný materiál, emisivita se v určitých místech liší.



Obrázek 20: Obtížně měřitelný povrch formy s rozdílnou emisivitou

4 Experimentální část

4.1 Návrh experimentu

Cílem praktické části bylo zlepšit přesnost simulací ProCAST využívaných společností KOVOLIS HEDVIKOV a.s. během fáze vývoje odlitků a příslušných forem. Ve fázi vývoje je třeba odhalit možné problémy, které mohou zkomplikovat výrobu. V případě, že by se tyto problémy odhalily až během výroby, vzrostly by náklady na jejich odstranění. Zpřesnění těchto simulací nám umožní odhalit tyto problémy a zároveň i pochopit jejich původ. S těmito informacemi se lépe hledají možná řešení, která by měla být co nejjednodušší a realizovatelné s minimálními náklady.

První zkušební měření byla prováděna na složitější formě skříně rozvodovky. Po zjištění velkých rozdílů mezi měřením a příslušnou simulací byly vybrány dva jiné odlitky, které jsou odlévány v jednodušších formách a bude je jednodušší optimalizovat. Je plánováno přecházet od jednodušších forem, kde ovlivňuje výslednou situaci méně proměnných, ke složitějším formám.



Obrázek 21: Odlitek skříně rozvodovky

Prvním odlitkem je kryt výměníku (tloušťka stěn 2-3 mm) a druhým odlitkem je příslušný výměník (tloušťka stěn 2,5-3,5 mm), které lze vidět na obrázku č. 22. Oba odlitky jsou odlévány ve formě s jednou fazónou. Materiálem odlitků je AlSi10Mg(Fe).



Obrázek 22: Odlitek krytu výměníku (vlevo), odlitek výměníku (vpravo)

Příprava měření

Před měřením je třeba zjistit emisivitu povrchu formy. Povrch formy byl změřen dotykovým teploměrem a následně se stejný bod změřil pyrometrem a termokamerou. Emisivita odpovídala hodnotě 0,7. Dále byla tato hodnota změřena s mírnou odchylkou i na dalších formách a v následujících měřeních se tedy uvažovalo vždy s emisivitou 0,7.

Měření byla ve většině případů prováděna termokamerou Fluke Ti400 se standardním objektivem (IFOV 1,31 mRad). Mezi nejvýznamnější vlastnosti kamery patří:

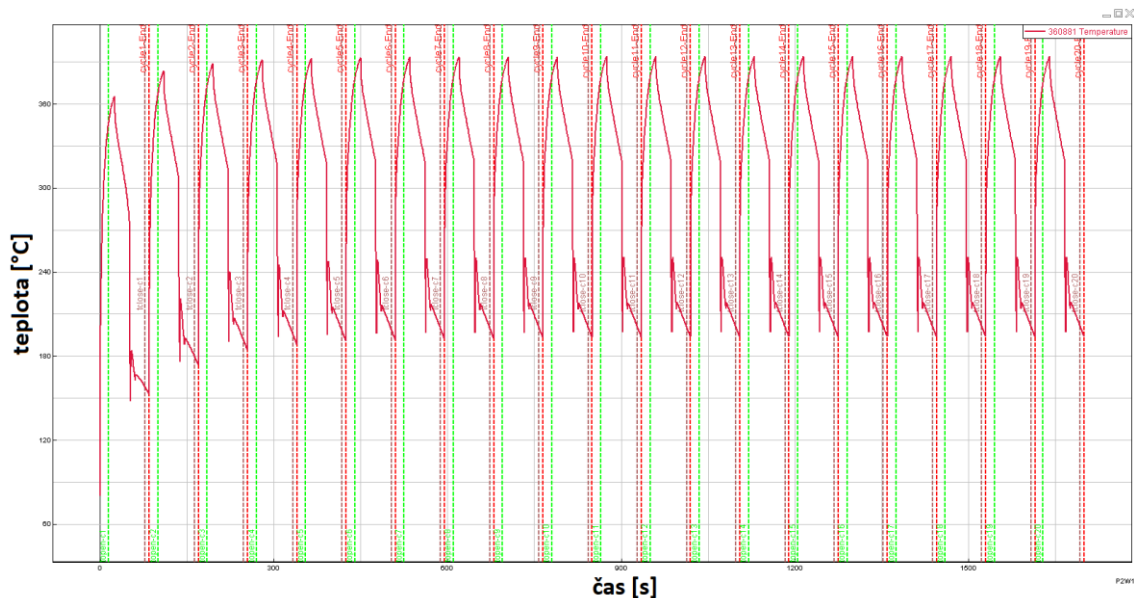
- Rozsah měření teploty -20 °C až $+1\ 200\text{ °C}$
- Přesnost měření teploty $\pm 2\text{ °C}$ nebo 2 %
- Frekvence pořizování snímků 9 Hz
- Rozlišení pořizovaných snímků 320 x 240 pixelů

Podrobnější technickou specifikaci lze najít v příloze č. 3. Kompletní technická specifikace je k dispozici na webu výrobce www.fluke.com.

4.2 Měření a simulace formy skříně rozvodovky

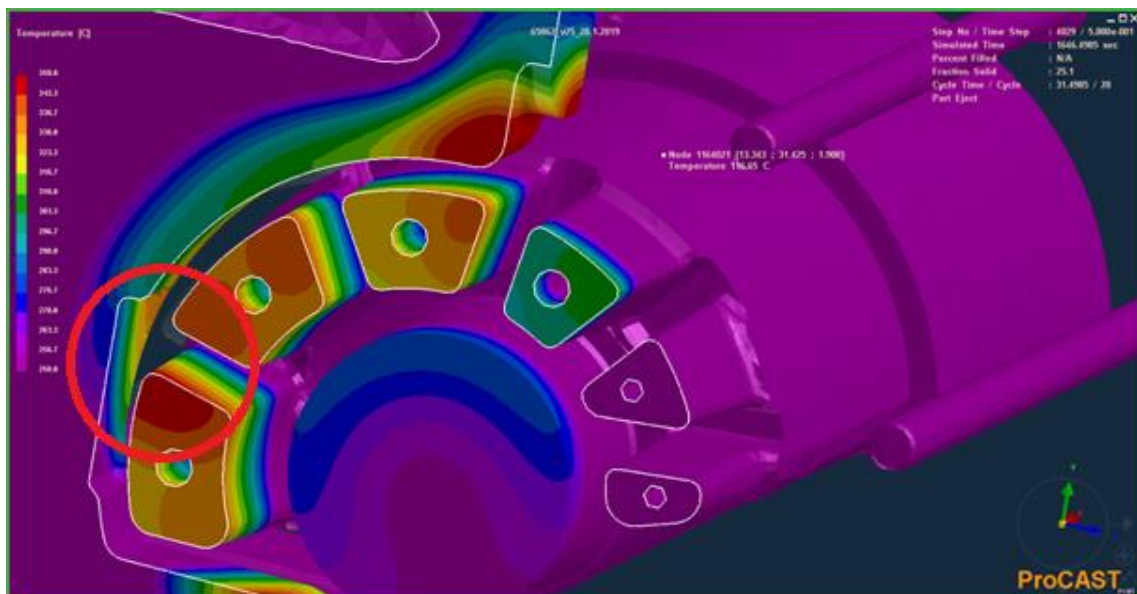
Měření bylo prováděno na formě odlitku skříně rozvodovky. Jde o poměrně velký odlitek, jehož hmotnost přesahuje 3 kg. Jedná se o poměrně složitou formu.

V simulačním programu ProCAST bylo simulováno z důvodu náběhu teploty 20 cyklů. Po dvaceti cyklech je teplota bezpečně ustálena a lze zkoumat teplotní pole formy. Náběh teplot lze pozorovat na obrázku č. 23. Součástí simulace formy je i chlazení formy, bodové chlazení jet cool a postřik formy.



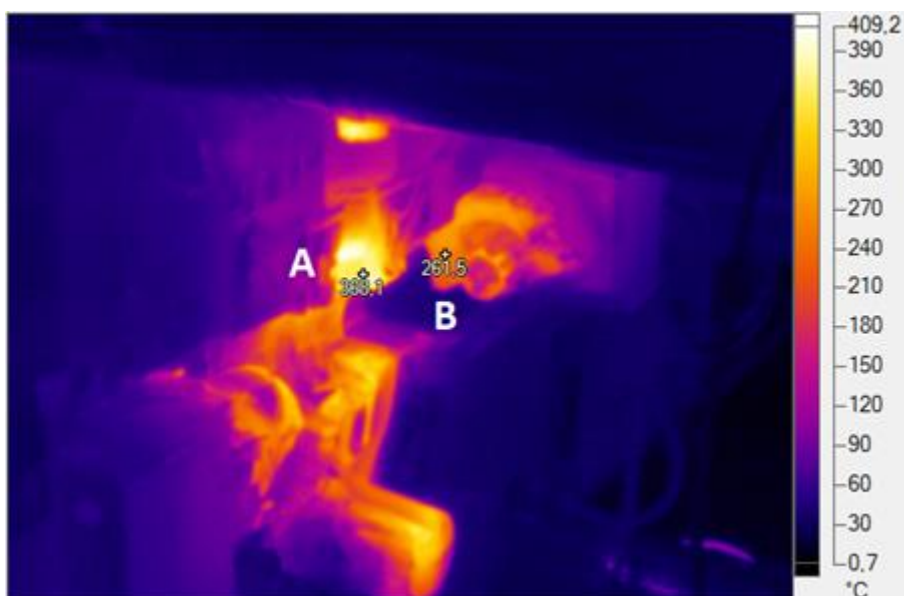
Obrázek 23: Cyklická změna teploty povrchu formy ze simulací

Je třeba mít na paměti, že simulace v tomto případě neodpovídá sto procentně realitě v několika ohledech (toto zjednodušení simulace je nutné kvůli náročnosti výpočtů). Lze uvést několik příkladů, ve kterých se simulace a realita liší. Simulace počítá s rovnoměrným rozptřením postřiku formy, avšak reálně je postřik aplikován z trysek a je aplikován nerovnoměrně. Nepočítá se také s odjetím tahačů, a tím pádem se akumuluje vzduch o vysoké teplotě mezi pohyblivou částí formy a několika jádry, která byla měřena. Na obrázku 24 lze vidět důsledek tohoto zjednodušení, kdy se teplo hromadí v místech, kde by se hromadit nemělo, nicméně z daných zjednodušujících podmínek je toto hromadění tepla logické.



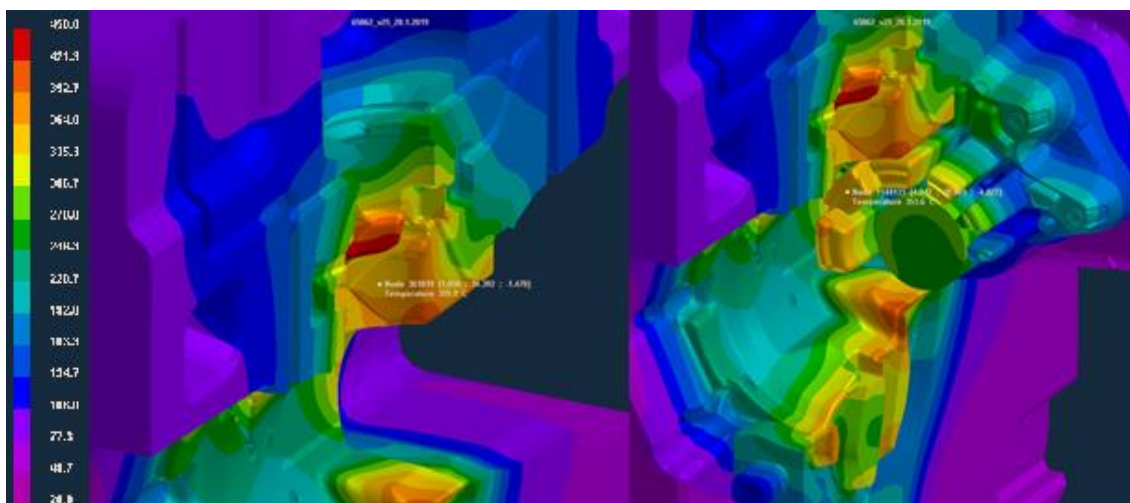
Obrázek 24: Hromadění tepla v uzavřených prostorech

Termokamerou byly pořízeny 3 snímky před postřikem, na kterých byly vybrány 2 reprezentativní body, u kterých se teplota jejich nejbližšího okolí příliš neliší. Snímek z termokamery lze vidět níže na obrázku 25.



Obrázek 25: Termografický snímek formy skříně rozvodovky před postřikem

Poté byla v simulaci (obrázek 26) zjištěna teplota příslušných bodů.



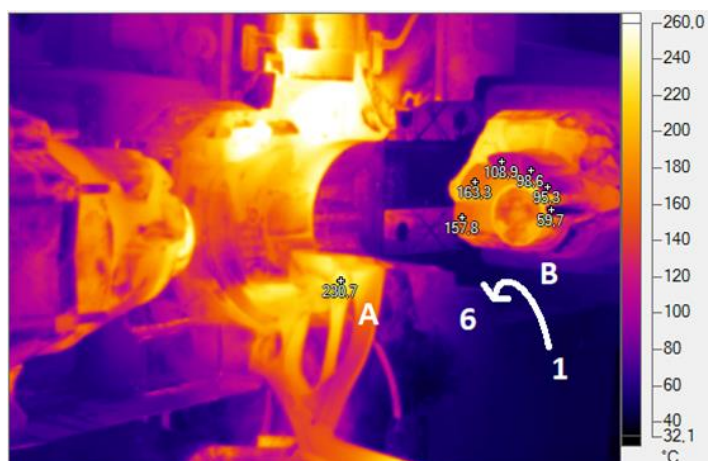
Obrázek 26: Simulace formy skříně rozvodovky s body zájmu

Rozdíl teplot mezi simulací a měřením před postřikem byl následující:

Tabulka 4: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací před postřikem (skříně rozvodovky)

Skříně rozvodovky	A	B
Termokamera [°C]	369,5	264,0
Simulace [°C]	355,1	353,6
Rozdíl [°C]	14,4	-89,6

Byly pořízeny také snímky po postřiku. Tyto snímky byly pořízeny 6 sekund po ukončení postřikové operace a je nutno s touto prodlevou počítat při odečítání teplot ze simulací. Snímky po postřiku jsou detailnější (snímky byly pořízeny uvnitř stroje), což nám umožňuje lepší odečet teplot ze snímků termokamery.



Obrázek 27: Termografický snímek formy skříně rozvodovky po postřiku

Tabulka 5: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací po postřiku (skříň rozvodovky)

Skříň rozvodovky	A	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Termokamera [°C]	233,4	62,9	96,7	100,1	110,7	164,7	158,8
Simulace [°C]	209,8	45	64,4	88,5	126,1	141,1	145
Rozdíl [°C]	23,6	17,9	32,3	11,6	15,4	23,6	13,8

Po zjištění poměrně velkých rozdílů teplot mezi simulací a naměřenými hodnotami termokamerou se rozhodlo, že pro optimalizaci vstupních parametrů bude využita jiná, jednodušší forma. Toto rozhodnutí bylo uděláno z důvodu příliš velkého počtu faktorů ovlivňujících výslednou podobu teplotních polí v této formě. U jiné, jednodušší formy se nejdříve odladí přestup tepla z odlitku do formy a z formy do okolního prostředí. Bylo tedy třeba nalézt formu, která je co nejméně chlazená, bez temperace, bez jet coolu a s minimálním postřikem.

Byla vybrána forma krytu výměníku, která kromě vtoku nemá chlazení, a to ani bodové, navíc je zde pouze minimální postřik, který má primárně mazací funkci.

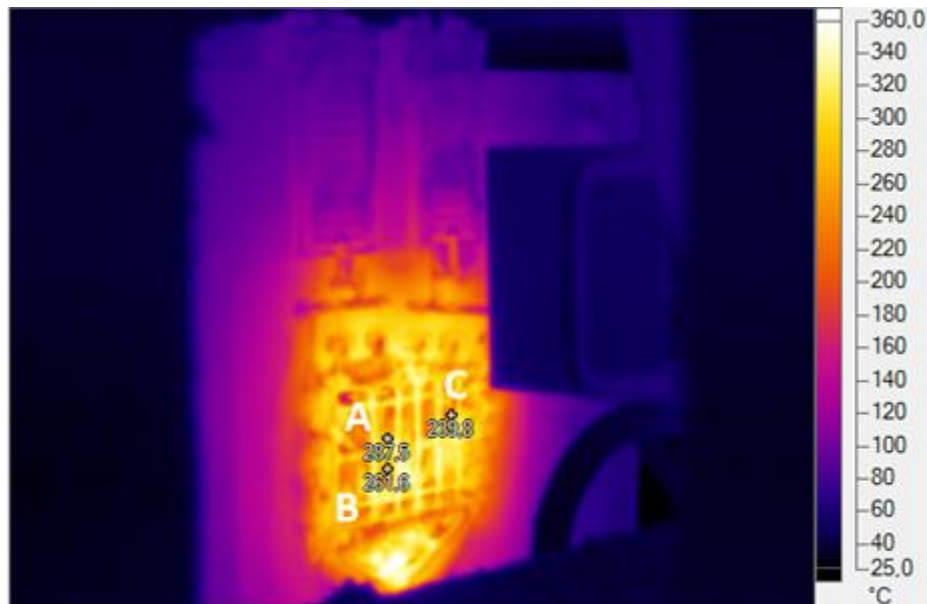
4.3 Měření a simulace formy krytu výměníku

Jak již bylo uvedeno výše, forma je poměrně jednoduchá, odlévá se v ní jediný odlitek a je bez temperace či jet coolu. Chlazený je pouze hříbek u vtokové soustavy. Postřik je minimální a neočekává se, že by měl velký vliv na teplotní pole formy.



Obrázek 28: Pohyblivá polovina formy uvnitř lícího stroje připravená k výrobě

Byly opět pořízeny 3 snímky termokamerou a na nich byly vybrány body podle již dříve uvedených zásad.



Obrázek 29: Termografický snímek krytu výměníku před postříkem

Vstupní parametry první simulace této formy jsou následující:

- Materiál Dievar 1.2343
- Přestup tepla mezi odlitkem a vložkou formy $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- Teplota rámu formy $80 \text{ }^\circ\text{C}$
- Přestup tepla mezi dělicí rovinou a vzduchem $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- Vstupní teplota taveniny $650 \text{ }^\circ\text{C}$ (v udržovacích pecích nastaveno $690 \text{ }^\circ\text{C}$)

Simulace této formy vyšla v porovnání s měřením termokamerou následovně:

Tabulka 6: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 1)

Kryt výměníku	A	B	C
Termokamera [°C]	281,5	259,8	238,8
Simulace [°C]	287,1	285,9	288,6
Rozdíl [°C]	-5,6	-26,1	-52,3

Hodnoty v tabulce se liší od bodů v obrázku 29, protože bylo použito více snímků, u kterých se v daných bodech udělal aritmetický průměr zjištěných hodnot.

Při součtu teplot v předem určených bodech se tedy teplota naměřená na formě od teploty simulací liší o 28 °C. Bylo provedeno 14 variant simulací, ve kterých se upravovaly parametry uvedené výše, aby se přišlo na příčinu a možné řešení nepřesností.

Počáteční a okrajové podmínky všech simulací lze najít v příloze č. 4.

Simulace byly vytvořeny s jiným materiálem formy, vyšší hodnotou přestupu tepla mezi odlítkem a vložkou (v tomto případě se mnoho nezměnilo, protože hlavním rozdílem oproti původní verzi byla rychlost přenosu tepla z odlitku do vložky formy, a nikoliv jeho objem), snížení teploty rámu formy, a především zvětšení koeficientu přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem. Nejlépe vyšla simulace se změnou přestupu tepla na rozhraní dělicí rovina – vzduch, u které byla hodnota přestupu zvýšena z $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. U této varianty se součet teplot jednotlivých bodů simulace od snímku z termokamery lišil pouze o 0,6 °C. Nelze říci, že simulace je naprosto přesná, ať už z důvodu chyby měření termokamerou nebo tím, že body nejsou zvoleny náhodně, ale tak, aby v těchto místech nebyl příliš velký výkyv teplot. Tím lze získat výsledky z kamery, které jsou jen minimálně zkreslené následným odezíráním teplot v jednotlivých bodech.

Zároveň nelze získat přesné hodnoty na daných místech z důvodu výkyvu teplot způsobeného postříkem. Jeho účinek nebude v reálných podmínkách ideálně rozprostřený po celé ploše formy, jako je tomu u simulace. Postříkový plán formy krytu výměníku je k dispozici v příloze č. 5.

Tabulka 7: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 7)

Kryt výměníku	A	B	C
Termokamera [°C]	281,5	259,8	238,8
Simulace [°C]	260,4	258,1	263,3
Rozdíl [°C]	21,1	1,7	-24,5

4.4 Měření a simulace formy výměníku

Po uspokojujivé simulaci formy krytu výměníku se přechází k ověření výsledků na další formě. Jedná se tentokrát o výměník, jehož kryt byl řešen v předešlé části. Hlavními rozdíly oproti předešlému odlitku je jeho větší hmotnost a také žebrování, které může přinést komplikace ať už z důvodu zhoršeného snímání kvůli odrazu záření nebo neodpovídajícího účinku postřiku oproti ostatním formám.

V pozdější fázi se přišlo na chybu, kdy cyklus stroje neodpovídal zadanému cyklu v simulaci. Změna daného cyklu se pohybovala okolo 2 sekund. Tímto byly negativně ovlivněny simulace 1, 2, 3.0, 3.1, 4.0, 4.1, 4.2 a 4.3.

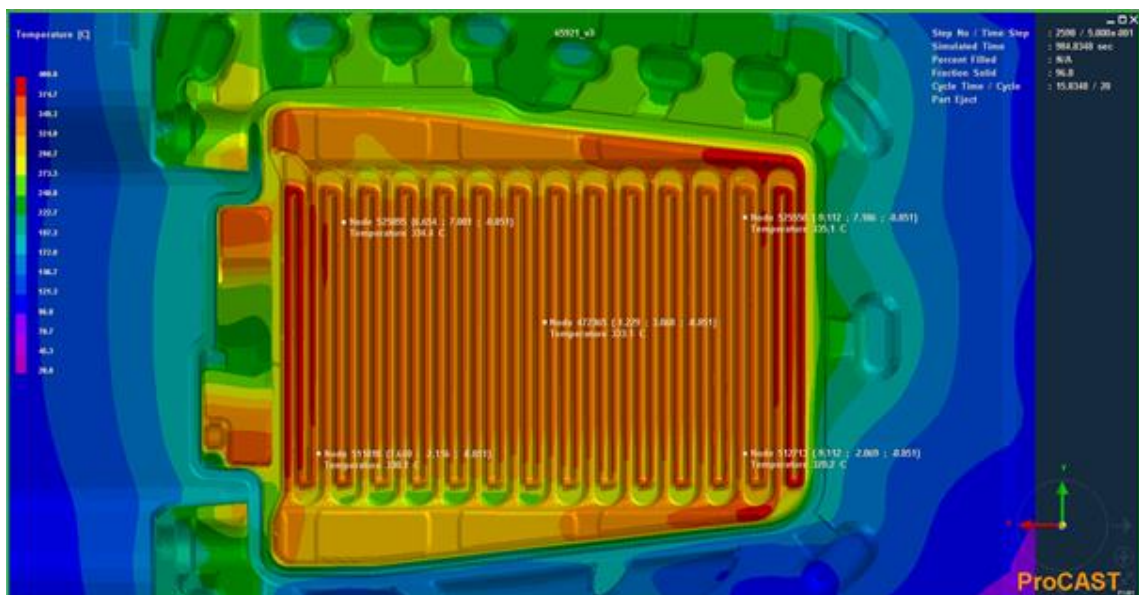
4.4.1 Simulace 1

Při simulaci 1 byly použity původní parametry, ze kterých se vycházelo na začátku optimalizace simulace odlitku krytu výměníku (přestup tepla z formy do vzduchu je zde poloviční oproti poslední – optimální simulaci víka výměníku). Termokamerou byla snímána pohyblivá část formy ve dvou momentech. Nejdříve ihned po vyjmutí odlitku robotem po otevření formy (obrázek 30), poté i po aplikaci postřiku. Byly pořízeny 3 snímky před postřikem a 3 snímky po postřiku.

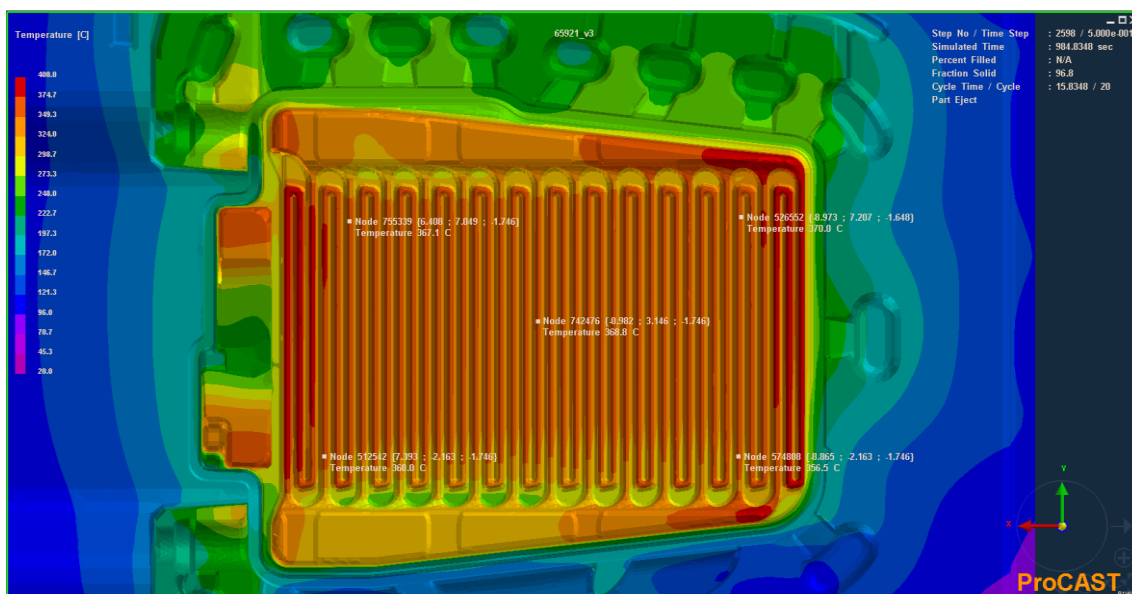


Obrázek 30: Termografický snímek výměníku před postříkem

Z termokamery se určovala teplota formy na žebrování průměrnou teplotou této oblasti. U simulace bylo využito 10 bodů, které byly rozmístěny do 5 lokací po 2 bodech. Vždy byl jeden bod na patě žeber (obrázek 31) a druhý na jeho vrcholech (obrázek 32).



Obrázek 31: Obrázek simulace výměníku – teploty na patě žeber



Obrázek 32: Obrázek simulace výměníku – teploty na vrcholu žeber

Výsledky ze snímání termokamerou se oproti simulaci lišily následovně:

Tabulka 8: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 1)

Výměník			
Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	347,5	Simulace [°C]	120,9
Rozdíl [°C]	73,3	Rozdíl [°C]	-29,9

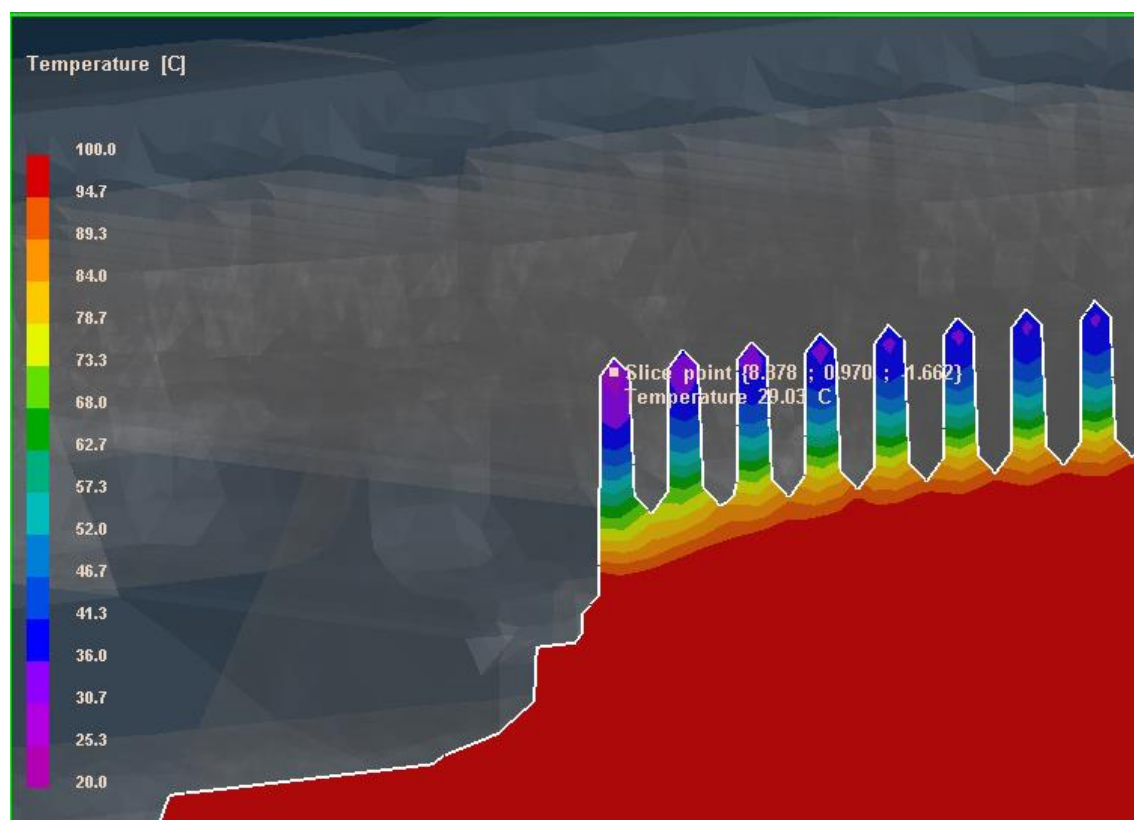
4.4.2 Simulace 2

Při simulaci 2 byly použity ty samé parametry, které byly použity při poslední, nejvíce korelující simulaci odlitku krytu výměníku. Hodnota přestupu tepla z dělicí roviny do vzduchu je $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Očekává se tedy, že okolí formy odebere více tepla a celkově se teplota v daných bodech na formě v simulaci sníží.

Tabulka 9: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 2)

Výměník			
Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	334,8	Simulace [°C]	107,4
Rozdíl [°C]	60,5	Rozdíl [°C]	-43,4

Hypotéza se potvrdila a teplota klesla jak před postříkem, tak po postříku. To ovšem neřeší náš problém, protože teplota před postříkem vychází v simulaci vyšší, než bylo změřeno termokamerou, a naopak po postříku je teplota dle simulace nižší než na termokameře. Problém tedy nelze vyřešit pouze upravením míry odebraného tepla z formy. Je třeba zohlednit, že žebrované odlitky jako tento mohou vykazovat značné odchylky. Takovéto odchylky mohou být způsobeny například z důvodu odrazu emisivity mezi žebry při měření termokamerou nebo z důvodu zjednodušeného postříku v simulačním programu kvůli postříku. Na obrázku 33 lze vidět extrémní efekt postříku v simulaci, který je velmi nepravděpodobný v reálných podmínkách (celkový průběh teplot v příloze č. 6). Je třeba upravit parametry postříku v simulaci, abychom se dostali blíže pravděpodobnému průběhu teplot v žebrování.



Obrázek 33: Řez formou výměníku, detail žebrování ihned po postříku, přestup tepla forma – výměník $4000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

4.4.3 Simulace 3.0

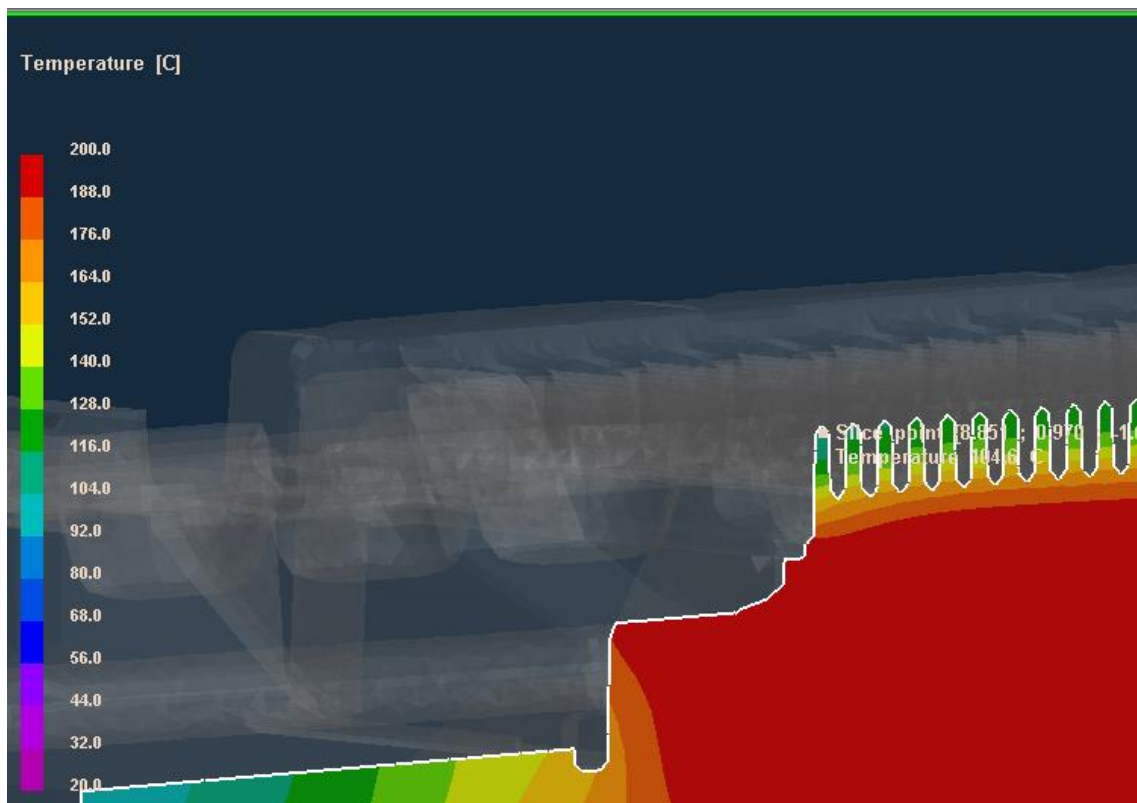
Pro simulaci 3.0 byly použity stejné parametry jako u simulace 2, kromě parametru přestupu tepla mezi postříkem a povrchem formy, který byl snížen ze $4000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Kolem $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ se pohybují i údaje zjištěné

z literatury při vyšších teplotách než 300 °C, viz příloha 2. Od tohoto kroku se čeká, že po postřiku bude teplota vyšší kvůli nižšímu účinku postřiku. Ten nedokáže povrch a masu kovu těsně pod povrchem ochladit tolik jako v předešlých případech. Lze ovšem očekávat i vyšší teplotu před postřikem, a to z důvodu menšího množství odebraného tepla postřikem.

Tabulka 10: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 3)

Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	349	Simulace [°C]	155,9
Rozdíl [°C]	75,1	Rozdíl [°C]	5,1

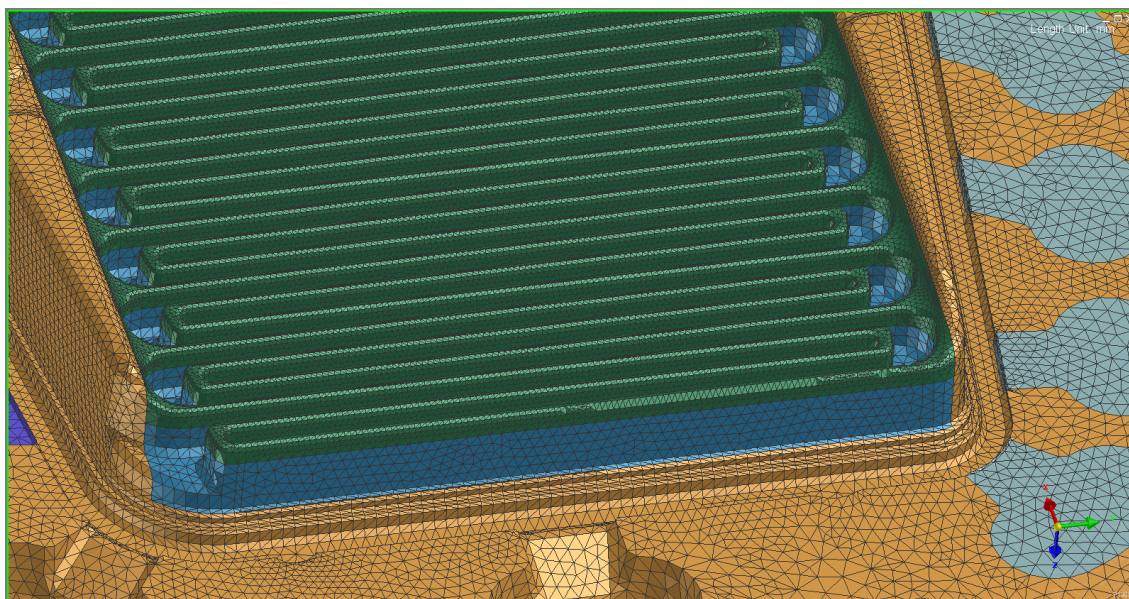
Tato varianta zatím vychází nejlépe ze všech třech provedených simulací. I přes to, že se teplota před postřikem zvedla, její nárůst je mnohem menší než rozdíl hodnot po postřiku. Postřik v tomto případě patrně neodvádí takové množství tepla z celé formy, jak by se mohlo čekat, nicméně jeho lokální dopad v oblasti pod povrchem žebrování je znatelný, to lze vidět na obrázku 34. Na druhou stranu krátkodobě povrch ochlazuje velice výrazně a při snížení jeho efektivity se zvýšila teplota po postřiku v simulaci na prakticky optimální hodnotu, která se pohybuje téměř pouze v odchylce samotné termokamery pracující v ideálních podmínkách.



Obrázek 34: Řez formou výměníku, detail žebrování ihned po postřiku, přestup tepla forma – výměník $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

4.4.4 Simulace 4.0

K přiblížení reálnému účinku postřiku bylo u této simulace rozděleno žebrování na více těles. Pro dané plochy byly nastaveny rozdílné okrajové podmínky, což by mělo umožnit simulovat nerovnoměrnou účinnost postřiku na formě. Na horní část žebrování měl mít postřík 100% účinnost ($4000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) a spodek žebrování měl být chlazen s účinností menší ($800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Úprava modelu pohyblivé části formy je vidět na obrázku 35.

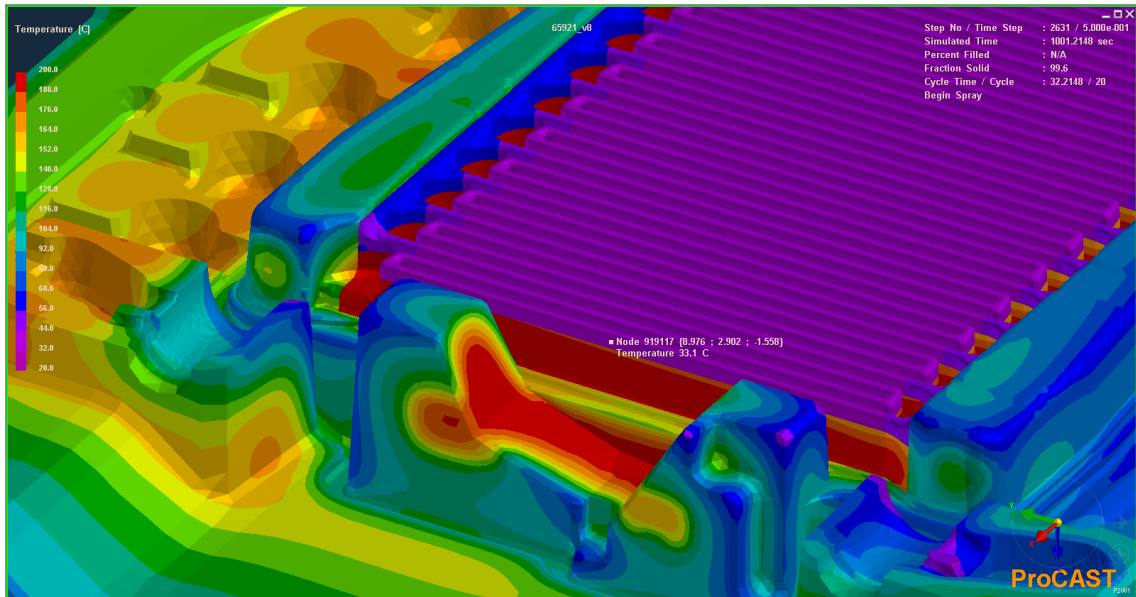


Obrázek 35: Rozdělené žebrování na více těles

Tabulka 11: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4)

Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	395,5	Simulace [°C]	124
Rozdíl [°C]	121,2	Rozdíl [°C]	-26,8

Při této variantě vyšla teplota před postřikem velmi vysoká, a to nejen v poměru k snímkům z termokamery, ale i v poměru k ostatním simulacím. To je zapříčiněno tím, že rozdělená tělesa žebrování nejsou brána jako kontinuum a vedení tepla v nich je tedy odlišné od minulých případů. Teplo se hromadí v elementech žebrování a není odváděno do středu formy. Tento jev lze vidět na obrázku 36.



Obrázek 36: Koincidenční rozhraní u rozděleného modelu žebrování

Jedná se o chybu zadání simulace. Je třeba upravit rozhraní částí žebrování z koincidenčního na ekvivalentní.

4.4.5 Simulace 3.1

Po simulaci 4.0 byla simulována upravená varianta 3.1 vycházející z varianty 3.0. U této varianty byl pozměněn parametr přestupu tepla mezi dělicí rovinou a vzduchem. Tento parametr byl zvýšen ze $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. I přes to, že parametr $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ byl již odzkoušen u simulace a je vyhovující, výsledek této simulace může přinést nový náhled na zatím obtížně řešitelnou problematiku této formy.

Tabulka 12: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 3.1)

Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	335,5	Simulace [°C]	140,5
Rozdíl [°C]	61,2	Rozdíl [°C]	-10,3

Tato simulace vychází podobně jako původní simulace 3.0. Jediným rozdílem je, že se teploty zjištěné ze simulace posunuly směrem k nižším hodnotám.

4.4.6 Simulace 4.1

Následně byla předělána simulace 4.0 na verzi 4.1 tak, aby bylo žebrování bráno jako jedno těleso, na jehož rozděleném modelu se u jednotlivých rozhraních nehromadí teplo.

Tabulka 13: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.1)

Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	350,8	Simulace [°C]	146,6
Rozdíl [°C]	76,5	Rozdíl [°C]	-4,2

Problém s přestupem tepla na rozhraních jednotlivých částí modelu byl vyřešen, nicméně výsledky nejsou lepší než u 3.0 a 3.1.

4.4.7 Simulace 4.2 a 4.3

Po simulaci 4.1 byly vytvořeny ještě simulace 4.2 a 4.3. U simulace 4.2 byla zvýšena hodnota přestupu tepla z dělicí roviny odlitku do vzduchu ze $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Simulace 4.3 měla totožnou hodnotu přestupu tepla mezi vložkou formy a vzduchem, ale byla snížena účinnost postřiku ze $4000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Tabulka 14: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.2)

Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	337,4	Simulace [°C]	131,8
Rozdíl [°C]	63,1	Rozdíl [°C]	-18,9

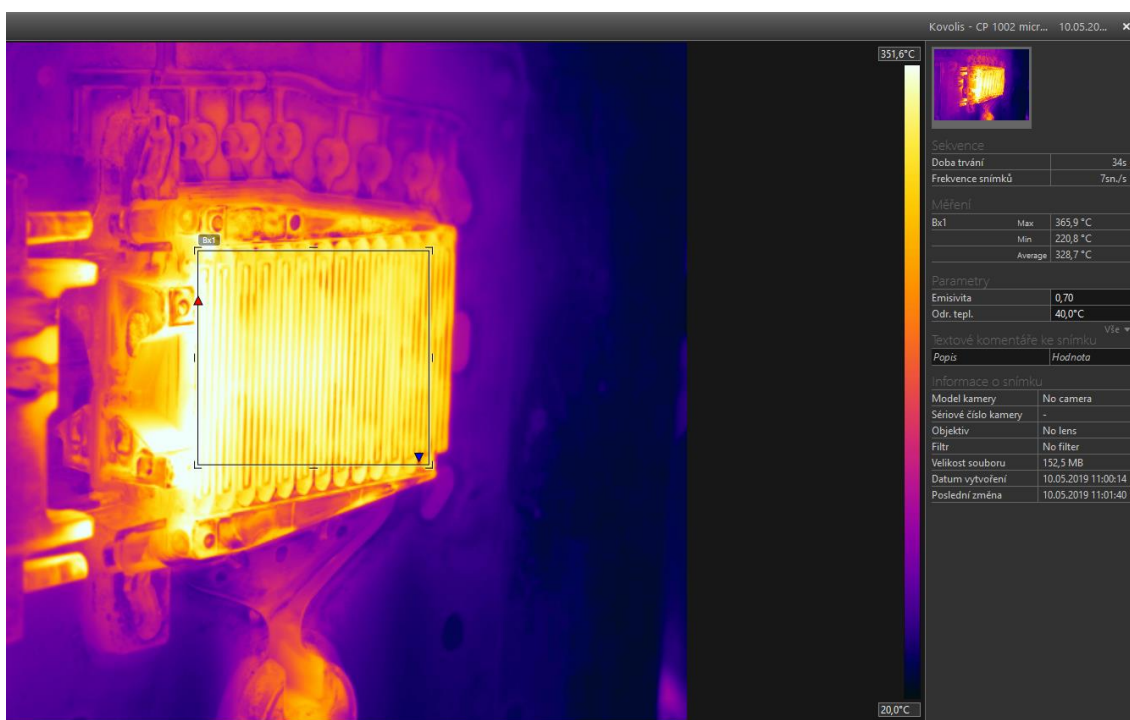
Tabulka 15: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.3)

Před postřikem		Po postřiku	
Termokamera [°C]	274,3	Termokamera [°C]	150,8
Simulace [°C]	343,7	Simulace [°C]	155,3
Rozdíl [°C]	69,4	Rozdíl [°C]	4,5

Simulace se stále hodně liší od dat z termokamery. V této době se zkušebně na této formě zavádí mikropostřík. Dále se tedy bude pokračovat na zpřesnění parametrů simulace této formy u mikropostříku z důvodu vyloučení vlivu postříku. Poté se přejde zpět k optimalizaci s klasickým postříkem.

4.4.8 Simulace 5.0–5.3 (mikropostřík)

U mikropostříku byly v době, kdy nebyl dostupný videozáznam licího cyklu, vytvořeny prvotní simulace, u kterých je zanedbán jakýkoliv vliv postříku. Byly simulovány 3 simulace s různými parametry ofuku. Při následném porovnání s videem dostupným z kamery, která byla umístěna za ochranou plentou, se přišlo na důležitou chybu. Cykly stroje neodpovídaly cyklům simulací. Po zpětné kontrole bylo zjištěno, že cykly neodpovídají ani u předešlých simulací formy výměníku. Avšak z těchto simulací se dalo usoudit, že původní hodnota přestupu tepla u ofuku ($400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) byla příliš vysoká.



Obrázek 37: Snímek z testování mikropostříku (video pořizeno kamerou FLIR)

Z důvodu vyřazení vlivu postříku se nicméně dále pokračuje na korekci parametrů simulace formy výměníku ve verzi s mikropostříkem a ke klasickému postříku se přejde později.

Po úpravě simulací na správné časy byly nakonec vytvořeny 4 simulace s různými hodnotami přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a ofukem.

Tabulka 16: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací mikropostřiku (kryt výměníku, sim. 5.0–5.3)

Verze	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	Před ofukem			Po ofuku		
		Termo-kamera [°C]	Simulace [°C]	Rozdíl [°C]	Termo-kamera [°C]	Simulace [°C]	Rozdíl [°C]
5.0	100	328,7	345,1	-16,4	244,9	245,75	0,85
5.1	150		344,4	-15,7		238,6	-6,3
5.2	200		343,8	-15,1		231,7	-13,2
5.3	250		344,1	-15,4		225,3	-19,6

Nejlépe tedy vyšla simulace 5.0, která se liší oproti hodnotě naměřené termokamerou o 16,4 °C. Lze také pozorovat, že i když rozdíly po ofuku znatelně rostou, tak před ofukem se takto výrazný trend pozorovat nedá. To je dané vyrovnaním teplot, kdy na žebrování sice teplota po ofuku lokálně poklesne, nicméně teplo akumulované v masě kovu pod povrchem tento rozdíl s časem vyrovná.

Byla pozorována také změna teplot během ofuku a daný rozdíl naměřený termokamerou odpovídá simulaci 5.0.

Po vyřešení případu s mikropostřikem již víme, že se dále bude používat Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem $100 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku $100 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Dále je tedy možné se orientovat pouze na postřik.

4.4.9 Simulace 3.2 a 3.3

Po návratu ke klasickému postřiku byly vytvořeny další dvě simulace s následujícími parametry:

Tabulka 17: Parametry simulací 3.2 a 3.3

Verze	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	Koef. přestupu tepla mezi postřikem a dělicí rovinou formy [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
3.2	100	800	100
3.3	100	2000	100

Simulace 3.2 je obdobou simulace 3.0 s jinou hodnotou koeficientu ofuku, který byl převzat ze simulací mikropostřiku. U simulace 3.3 byla zvolena hodnota koef. postřiku $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ jako kompromis mezi simulací 3.2 a původní hodnotou koef. postřiku, která byla využívána před začátkem optimalizace.

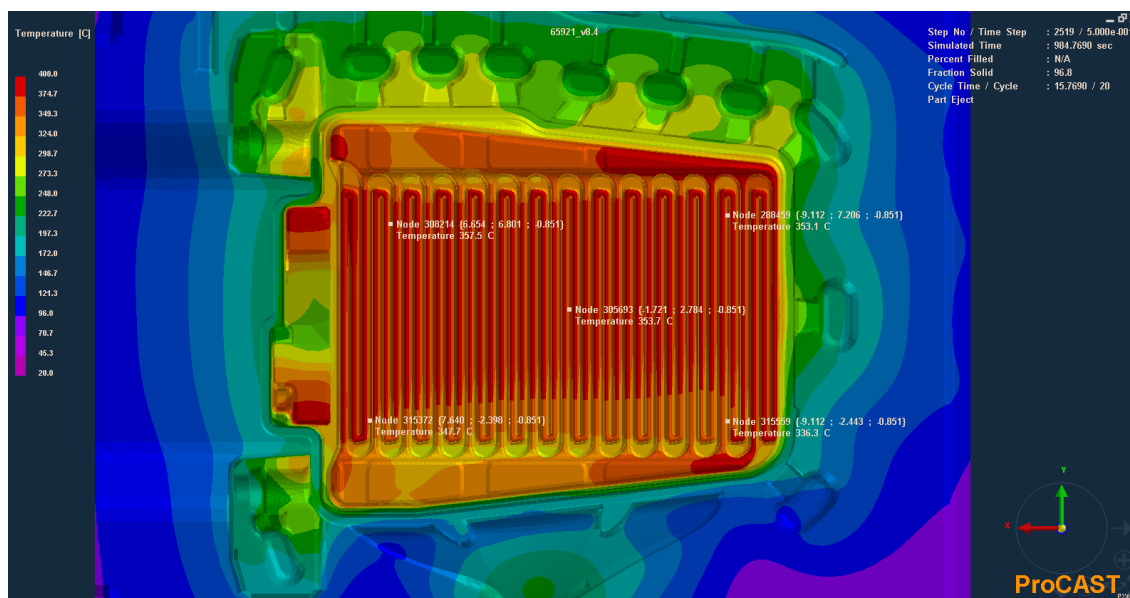
Tabulka 18: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 3.3)

Verze	Před postřikem			Po postřiku		
	Termo- kamera [°C]	Simulace [°C]	Rozdíl [°C]	Termo- kamera [°C]	Simulace [°C]	Rozdíl [°C]
3.2	274,3	350,1	75,8	150,8	182,4	-31,6
3.3		342,6	68,3		128,4	22,6

Simulace se stále dost liší od hodnot naměřených termokamerou.

4.4.10 Simulace 4.4 a 4.5

Po simulacích mikropostřiku byly vytvořeny i další 2 simulace formy s klasickým postřikem a žebry rozdělenými na více těles. Jsou použity tedy dvě hodnoty koef. postřiku pro horní a spodní část žebrování. Jde o poslední pokus vyřešit problematiku dané formy při použití klasického postřiku.



Obrázek 38: Simulace 4.4

Tabulka 19: Parametr simulací 4.4 a 4.5

Verze	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	Koef. přestupu tepla mezi postřikem a dělicí rovinou formy [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
4.4	100	800/200	100
4.5	100	1600/800	100

Tabulka 20: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.4 a 4.5)

Verze	Před postřikem			Po postřiku		
	Termo-kamera [°C]	Simulace [°C]	Rozdíl [°C]	Termo-kamera [°C]	Simulace [°C]	Rozdíl [°C]
4.4	274,3	366,6	92,3	150,8	234,1	83,3
4.5		356,05	81,78		169,58	18,8

Ani u těchto simulací se nepodařilo dosáhnout uspokojivých výsledků. Hodnoty ze simulací se stále rozcházejí s hodnotami naměřených termokamerou. Nelze ani odhadnout, jak velký by měl být koeficient postřiku, protože i kdybychom se dostali na hodnotu odpovídající 150 °C, tak stále nelze přesně určit, zdali je tato hodnota správná. Důvodem jsou nejisté údaje teploty před postřikem. Sice bychom dostali hodnotu odpovídající měření termokamerou, nicméně míra odebraného tepla by se mohla značně lišit. Rozdíl mezi teplotami před postřikem a po postřiku u měření termokamerou je přibližně 120 °C. V případě, že bychom dostali v simulaci teplotu formy po postřiku 150 °C a teplota před postřikem by byla 340 °C, byl by výsledný rozdíl teplot v simulaci 190 °C.

Simulace formy výměníku se tedy nepodařila vyřešit úplně. Úspěšná byla část týkající se mikropostřiku. Z této části jsme zjistili hodnotu koeficientu používaného pro ofuk. U formy s klasickým postřikem jsme se nedostali k potřebným výsledkům, ze kterých by se dal určit koeficient postřiku.

Největší problém pravděpodobně představuje žebrování, které vnáší nejistoty do simulací, ale i reálného měření. Vzhledem k faktu, že simulace mikropostřiku vyšla v uspokojivých mezích lze předpokládat, že největší vliv má žebrování na parametry postřiku. Velkou roli zde hraje i Leidenfrostův jev, se kterým se v simulacích nepočítá.

K určení ideálního koeficientu postřiku by bylo třeba analyzovat ještě další formy. Vzhledem k faktu, že koeficient postřiku závisí na několika faktorech, především na teplotě povrchu formy, je těžké určit jedinou hodnotu, která by vyhovovala ve většině případů. V tuto chvíli se nedá dělat nic jiného než doporučit nastavení koeficientu postřiku v rozmezí hodnot $800\text{--}3200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Konstruktor pracující se simulacemi může volit velikost tohoto koeficientu dle očekávaných teplot na formě.

Doporučené parametry simulací by tedy byly následující:

- Koeficient přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem
 $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- Koeficient přestupu tepla mezi postřikem a dělicí rovinou formy
 $800\text{--}3200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- Koeficient přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku
 $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

5 Závěr

Během praktické části této práce byly změřeny 3 formy a následně se pomocí dvou z nich optimalizovaly nejdůležitější parametry simulací. Měření teplotních polí forem bylo prováděno termokamerou a simulace byly prováděny v programu ProCAST.

I přes nespočet problémů, které vyvstaly během měření nebo simulování forem, se podařilo určit některé parametry, které by měly být použitelné u dalších simulací, které se budou provádět. V průběhu práce se změnila parametry přestupu tepla z formy do okolního vzduchu, postřiku a vzduchu ofuku.

Tyto parametry byly změněny následovně:

- Koeficient přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem z $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- Koeficient přestupu tepla mezi postřikem a dělicí rovinou formy ze $4000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $800\text{--}3200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
- Koeficient přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku ze $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ na $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

S největší jistotou byly zvoleny koeficienty týkající se ofuku a okolního vzduchu formy. Naopak přestup tepla u postřiku, který měl být určen ze simulace výměníku, vychází spíše z poznatků teoretické části a nebyl praktickou částí dostatečně ověřen. Proti přesnému určení jedné jediné hodnoty hovoří i variabilita toho koeficientu. Ta spočívá především ve své závislosti na teplotě povrchu formy. Pro jeho ověření by bylo nutné provést měření a simulace alespoň jedné další formy.

Z dostupných dat řešených simulací lze usuzovat, že u jednoduchých forem by měly být simulace poměrně přesné a data ze simulací by se měla lišit oproti realitě lokálně o $20\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$. Odlišnost teplotního pole u těchto forem se bude v reálném procesu lití oproti simulacím lišit především nastavením postřiku.

U složitějších forem, jako je například forma výměníku z praktické části, jsou výsledky diskutabilní. Velký vliv na výsledky má žebrování, které působí problémy především simulaci postřiku. Při jeho vyloučení u mikropostřiku byla získána data s dobrou přesností. U složitějších forem využívajících mikropostřik tedy lze dosáhnout poměrně přesných výsledků.

Největším problémem při optimalizaci simulací bylo velké množství proměnných, které se navzájem ovlivňují. Obzvláště složitá byla simulace odlitku výměníku s žebrováním. Původním plánem bylo postupovat od jednoduchých forem ke složitějším, nicméně skok mezi krytem výměníku a výměníkem samotným byl patrně příliš velký. Po zpětné úvaze by bylo lepší zvolit jinou formu, která by byla sice složitější než forma krytu výměníku, ale jednodušší než forma výměníku.

Z celkového pohledu se simulace zlepšily. Dále by bylo zapotřebí ověřit výsledky na více formách a simulacích. I když simulace nebudou nikdy absolutně přesnými, mohou poskytnout důležité informace, a tudíž by měla být snaha, aby jejich výstup byl co nejpřesnější.

6 Seznam použité literatury

- [1] LAUKLI, Hans Ivar. High Pressure Die Casting of Aluminium and Magnesium Alloys - Grain Structure and Segregation Characteristics. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2004, **2004**(April).
- [2] Low-pressure vs. high-pressure die casting. *Kurtz Ersa Magazine* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.ke-mag.com/issue-42/article/low-pressure-vs-high-pressure-die-casting.html>
- [3] *About Die Casting* [online]. [cit. 2019-07-03]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20130606062843/http://www.diecasting.org/faq/alloy_prop.htm
- [4] A Brief History of Die Casting. *Premier Die Casting Company* [online]. 2016 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://diecasting.com/blog/2016/02/29/a-brief-history-of-die-casting/>
- [5] THIRUGNANAM, M. *Modern High Pressure Die-casting Processes for Aluminium Castings* [online]. 2013 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://foundryinfo-india.org/images/pdf/2A2.pdf>
- [6] NOVÁ, Iva, Zdeněk HOŠEK a Iva NOVÁKOVÁ. Rozvoj tlakového lití. *MM spektrum*. 2004, **2004**(5), 79.
- [7] *Konstrukce formy pro tlakové lití* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/konstrukce-forem.pdf>
- [8] High pressure die casting. *Elcee* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.elcee.nl/wp-content/uploads/2015/06/High-pressure-die-casting.pdf>
- [9] What is low pressure die casting. *Italpresse gauss* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.italpressegauss.com/en-gb/my-application-and-industry/application-by-process/what-is-low-pressure-die-casting>
- [10] Die Casting 101: Hot Chamber vs. Cold Chamber. *Chicago White Metal Casting, Inc.* [online]. 2016 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.cwmdiecast.com/blog/2016/05/24/die-casting-101-hot-chamber-vs-cold-chamber/>
- [11] Die Casting. *Custompartnet* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>
- [12] About Bühler. *Bühler group* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.buhlergroup.com/global/en/about-buehler.htm>
- [13] Die Casting Processes and Technologies. *Bühler group* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.buhlergroup.com/global/en/process-technologies/die-casting.htm>
- [14] Machines & Plants. *Bühler group* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.buhlergroup.com/global/en/industry-solutions/die-casting/machines-plants.htm>

- [15] Toshiba History. *Toshiba* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.toshiba.co.jp/worldwide/about/history.html>
- [16] Die Casting Machine Technical consultation. *Toshiba* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.toshiba-machine.co.jp/en/product/diecast/gijutsu/eigyo.html>
- [17] Die Casting Machine DC-J Series. *Toshiba* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.toshiba-machine.co.jp/en/product/diecast/lineup/dcj.html>
- [18] Total Control System. *Toshiba* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.toshiba-machine.co.jp/en/product/diecast/lineup/peripheral/toscast.html>
- [19] Die Casting Machine DC-CS Series. *Toshiba* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.toshiba-machine.co.jp/en/product/diecast/lineup/peripheral/toscast.html>
- [20] Product Information. *Toshiba* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://www.toshiba-machine.co.jp/en/product/>
- [21] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [22] LICHÝ, Petr, Vlasta BEDNÁŘOVÁ a Ivana KROUPOVÁ. *Slévárenství slitin neželezných kovů* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/618/618-Slev%C3%A1renstv%C3%AD%20slitin%20NZK%20opory.pdf
- [23] Zpracování hliníku - od minerálu až po kabel. *O Energetice* [online]. 2015, 29. září 2015 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/uncategorized/zpracovani-hliniku-od-mineralu-az-po-kabel/>
- [24] HARTLIEB, Martin. *Aluminum alloys for structural die casting* [online]. Beaconsfield, Kanada [cit. 2019-07-03]. Dostupné z: https://mercalloy.com/site_media/pdfs/NADCA_-_Aluminum_Alloys_for_Structural_Die_Casting.pdf
- [25] ČSN EN 573-1. *Hliník a slitiny hliníku. Chemické složení a druhy tvářených výrobků. Část 1: Číselné označování*. 1996.
- [26] Die Lubricants. *Chem trend* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: https://www.chemtrend.com/application/die_casting/die_lubricants
- [27] GRAFF, James L. a Lothar H. KALLIEN. The Effect of Die Lubricant Spray on the Thermal Balance of Dies. *Chem trend* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: https://dev.chemtrend.com/sites/default/files/brochures/the_effect_of_die_lubricant_spray_on_the_thermal_balance_of_dies_en_v1.pdf
- [28] UDDEHOLM TOOL STEELS FOR DIE CASTING. *Uddeholm* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: https://www.uddeholm.com/files/AB_die_casting_eng.pdf

- [29] *Densimet® and TZM inserts* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://www.plansee.com/en/products/components/forming-and-machining-tools/mold-inserts.html>
- [30] HYNEK, Martin. TLAKOVÉ LITÍ HLINÍKU. [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-verfin/OPVK_PU/KA_01_publikace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf
- [31] RAGAN, E., J. DOBRÁNSKY, P. BARON a T. OLEJÁR. MATERIALS ON DIES FOR PRESSURE DIE CASTING. *Journal Metalurgija*. 2012, **2012**(51), 117-120. ISSN 0543-5846.
- [32] MUHIČ, M., J. TUŠEK, F. KOSEL, D. KLOBČAR a M. PLETERSKI. THERMAL FATIGUE CRACKING OF DIE-CASTING DIES. *Journal Metalurgija*. 2010, **2010**(49), 9-12. ISSN 0543-5846.
- [33] VINARCIK, Edward J. *High integrity die casting processes*. New York: Wiley, c2003. ISBN 0-471-20131-6.
- [34] MEOLA, Carosena, Simone BOCCARDI a Giovanni Maria CARLOMAGNO. *Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials*. Woodhead Publishing, 2015. ISBN 978-1-78242-171-9.
- [35] *Termografie* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/ps3/6.html>
- [36] *Emissivity Table* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: https://www.thermoworks.com/emissivity_table
- [37] ŠTROBACH, Václav. *Vliv teplotních režimů formy na jakost vysokotlakých odlitků*. Liberec, 2011. Doktorská disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [38] *WOLLIN GMBH: SPRAYING STABILITY* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/news/corporate-news/detail-view/wollin-gmbh-spraying-stability/?cHash=321248a56e23d77c4a9aedba22f45e66>
- [39] REMEŠ, Jakub. *Problematika teplotního režimu forem a využití zbytkového tepla v technologiích lití pod tlakem*. Praha, 2007. ČVUT v Praze.
- [40] *Infrared Thermography – Physical Basics* [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.infratec-infrared.com/thermography/service-support/glossary/theory/>
- [41] BREZOVA, V., M. RZEHULKA a P. PRIEBEROVÁ. *Leidenfrostův jev* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2017-2018/Zima17/proc/leidenfrost.pdf>

7 Seznam obrázků

Obrázek 1: Vtoková soustava pro tlakové lití [7]	11
Obrázek 2: Schéma tlakového lití s teplou komorou[10]	14
Obrázek 3: Schéma tlakového lití se studenou komorou[10]	14
Obrázek 4: Tlakový licí stroj Bühler Carat[14]	15
Obrázek 5: Tlakový licí stroj Bühler Evolution[14]	15
Obrázek 6: Tlakový licí stroj Bühler Ecoline S[14].....	16
Obrázek 7: Tlakový licí stroj Toshiba DC-J[17]	17
Obrázek 8: Rozhraní TOSCAST[18]	17
Obrázek 9: Rovnovážný diagram Al – Si [21].....	21
Obrázek 10: Řez formou tlakového lití[7].....	26
Obrázek 11: Špatně a dobře navržené formy[28]	27
Obrázek 12: Příklad dobře zkonstruovaného vtokového a odvodušňovacího systému[30].....	28
Obrázek 13: Schéma vad forem[32].....	30
Obrázek 14: Fotografie vad forem, a)eroze b)trhliny c)koroze a nalepení d)deformace[32].....	30
Obrázek 15: Heat checking - trhliny ve formě[33]	31
Obrázek 16: Teplota povrchu formy v závislosti na čase[33]	31
Obrázek 17: Koroze forem u různých materiálů[28]	32
Obrázek 18: Leidenfrostův jev [41]	35
Obrázek 19: Emisivita těles[34].....	38
Obrázek 20: Obtížně měřitelný povrch formy s rozdílnou emisivitou.....	39
Obrázek 21: Odlitek skříně rozvodovky.....	40
Obrázek 22: Odlitek krytu výměníku (vlevo), odlitek výměníku (vpravo).....	41
Obrázek 23: Cyklická změna teplot povrchu formy ze simulací	42
Obrázek 24: Hromadění tepla v uzavřených prostorech	43
Obrázek 25: Termografický snímek formy skříně rozvodovky před postřikem.....	43
Obrázek 26: Simulace formy skříně rozvodovky s body zájmu	44
Obrázek 27: Termografický snímek formy skříně rozvodovky po postřiku	44
Obrázek 28: Pohyblivá polovina formy uvnitř licího stroje připravená k výrobě	46
Obrázek 29: Termografický snímek krytu výměníku před postřikem	46
Obrázek 30: Termografický snímek výměníku před postřikem	49
Obrázek 31: Obrázek simulace výměníku – teploty na patě žeber	49
Obrázek 32: Obrázek simulace výměníku – teploty na vrcholu žeber.....	50
Obrázek 33: Řez formou výměníku, detail žebrování ihned po postřiku, přestup tepla forma – výměník $4000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	51
Obrázek 34: Řez formou výměníku, detail žebrování ihned po postřiku, přestup tepla forma – výměník $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	53
Obrázek 35: Rozdělené žebrování na více těles.....	54
Obrázek 36: Koincidenční rozhraní u rozděleného modelu žebrování	55
Obrázek 37: Snímek z testování mikropostřiku (video pořízeno kamerou FLIR).....	57
Obrázek 38: Simulace 4.4.....	59

8 Seznam tabulek

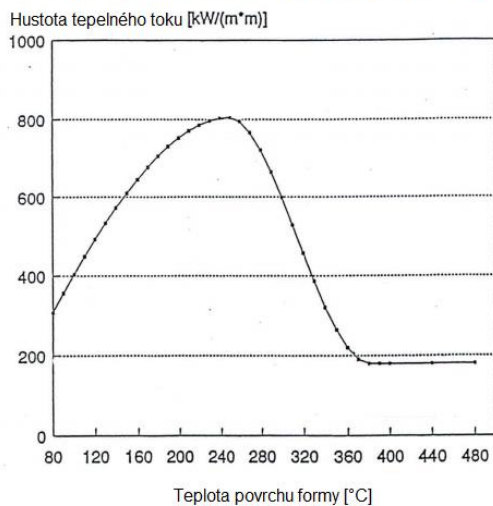
Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti Al, Mg, Zn, Cu[21]	19
Tabulka 2: Slitiny hliníku na odlitky a jejich značení[22]	25
Tabulka 4: Emisivita materiálů[36].....	38
Tabulka 5: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací před postřikem (skříň rozvodovky).....	44
Tabulka 6: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací po postřiku (skříň rozvodovky).....	45
Tabulka 7: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 1).....	47
Tabulka 8: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 7).....	48
Tabulka 9: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 1).....	50
Tabulka 10: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 2).....	50
Tabulka 11: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 3).....	52
Tabulka 12: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4).....	54
Tabulka 13: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 3.1).....	55
Tabulka 14: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.1).....	56
Tabulka 15: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.2).....	56
Tabulka 16: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.3).....	56
Tabulka 17: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací mikropostřiku (kryt výměníku, sim. 5.0–5.3).....	58
Tabulka 18: Parametry simulací 3.2 a 3.3	58
Tabulka 19: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 3.3).....	59
Tabulka 20: Parametr simulací 4.4 a 4.5	60
Tabulka 21: Rozdíl teplot měřených termokamerou a teplot získaných simulací (kryt výměníku, sim. 4.4 a 4.5)	60

9 Přílohy

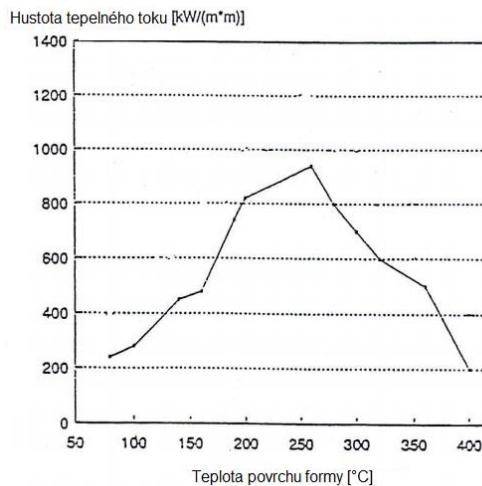
Příloha č. 1 – Hodnoty hustoty tepelného toku v závislosti na teplotě povrchu formy při experimentu společnosti Chem - Trend

- 1) Hustota proudění tepla na teplotě
- 2) Hustota proudění tepla na teplotě z experimentu
- 3) Hustota proudění tepla na teplotě - různé tlaky nanášního separátoru
- 4) Koncentrace separátoru
- 5) Úhel nanášení separátoru
- 6) Doba nanášení

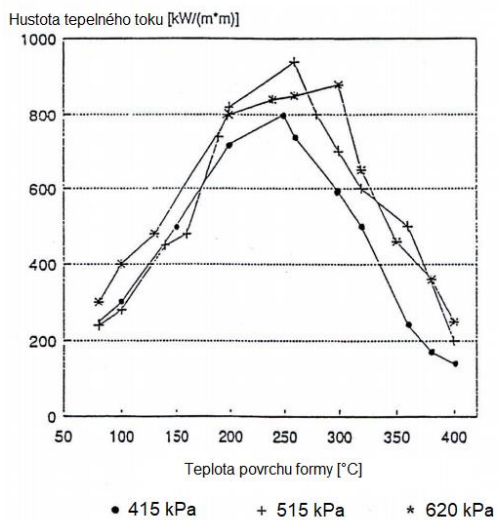
Typická hustota tepelného toku



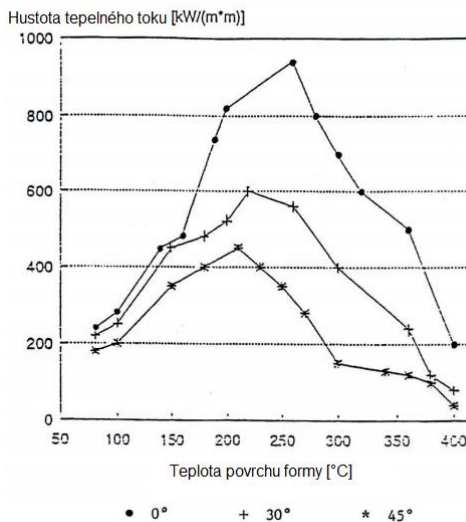
Naměřená hustota tepelného toku



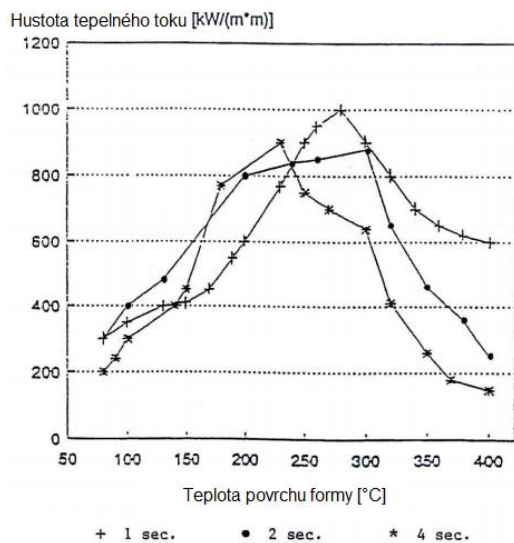
Tlak postřiku



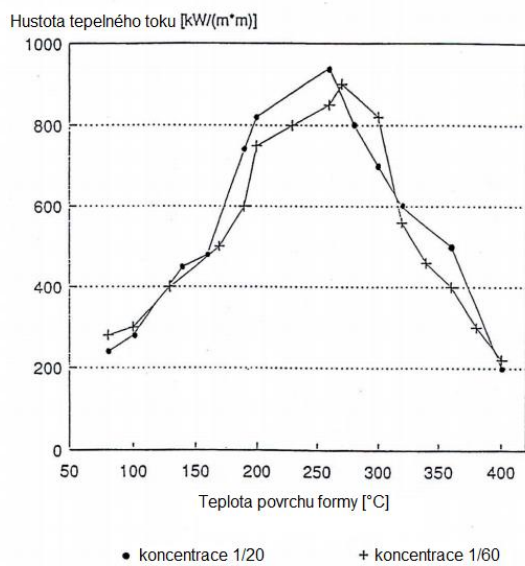
Úhel postřiku



Doba nanášení postříku



Koncentrace postříku



Příloha č. 2 – Technické údaje termokamery Fluke Ti400

Technické údaje: Infračervená kamera Fluke Ti400	
Podrobné specifikace	
Teplota	
Rozsah měření teploty (není kalibrováno pod -10 °C)	-20 °C až +1 200 °C
Přesnost měření teploty	±2 °C nebo 2 % (při jmenovité teplotě 25 °C, platí vyšší hodnota)
Korekce emisivity na displeji	Ano (číselně a pomocí tabulky)
Kompenzace odražené teploty pozadí na obrazovce	Ano
Korekce přenosu na obrazovce	Ano
Kvalita zobrazování	
Frekvence pořizování snímků	Obnovovací frekvence 9 Hz nebo 60 Hz podle modelu
Typ detektoru	Ohniskový rovinný svazek, nechlazený mikrobolometr, 320 x 240 pixelů.
Teplotní citlivost (NETD)	≤0,05 °C při 30 °C cílové teploty (50 mK)
Celkový počet pixelů	76,800
Infračervené spektrální pásmo	7,5 μm až 14 μm (dlouhé vlny)
Optická kamera (viditelné světlo)	Průmyslový výkon 5,0 megapixelu
Standardní typ infračerveného objektivu	
Zorné pole	24° x 17°
Prostorové rozlišení (IFOV)	1,31 mRad
Minimální vzdálenost ostření	15 cm (přibližně 6")
Volitelný infračervený teleobjektiv Typ	
Zorné pole	12° x 9°
Prostorové rozlišení (IFOV)	0,65 mRad
Minimální vzdálenost ostření	45 cm (přibližně 18")
Volitelný typ širokouhlého infračerveného objektivu	
Zorné pole	46° x 34°
Prostorové rozlišení (IFOV)	2,62 mRad
Minimální vzdálenost ostření	15 cm (přibližně 6")
Mechanismus zaostřování	
Systém automatického ostření LaserSharp®	Ano
Pokročilé ruční ostření	Ano
Prezentace vizuálního obrazu	
Paleta barev	
Standardní	Tavené železo, modročervená, vysoký kontrast, žlutá, obrácená žlutá, horký kov, stupnice šedi, obrácená stupnice šedi
Ultra Contrast™	Tavené železo Ultra, modročervená Ultra, vysoký kontrast Ultra, žlutá Ultra, obrácená žlutá Ultra, horký kov Ultra, stupnice šedi Ultra, obrácená stupnice šedi Ultra
Úroveň a rozpětí	Plynulá automatická změna měřítka a manuální změna měřítka úrovně a rozpětí
Rychlé automatické přepínání mezi manuálními a automatickými režimy	Ano
Rychlé automatické nastavení rozsahu v manuálním režimu	Ano
Minimální rozpětí (v manuálním režimu)	2,0 °C (3,6 °F)
Minimální rozpětí (v automatickém režimu)	3,0 °C (5,4 °F)
Obecné specifikace	
Provozní teplota	-10 °C až +50 °C
Teplota pro skladování	-20 °C až +50 °C (-4 °F až 122 °F) bez baterií
Relativní vlhkost	10 % až 95 % nekondenzující
Odolný dotykový displej (kapacitní)	8,9cm barevný obdélníkový displej LCD VGA (640 x 480) s podsvícením
Ovládání a nastavení	Možnost nastavení jednotky teploty (°C/°F) Výběr jazyka Nastavení data a času Nastavení emisivity Kompenzace odražené teploty pozadí Korekce přenosu Uživatelsky volitelné horké a chladné body a středový bod na snímku Rozšiřitelný a zmenšitelný měřicí rámeček s ukazatelem minimální, průměrné a maximální teploty Barevná signalizace Uživatelsky volitelné nastavení podsvícení možnosti grafického informačního displeje Možnosti grafického informačního displeje

Příloha č. 3 – Seznam simulací

Příloha 3.1 - Simulace krytu výměníku

Verze	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Teplota okolního vzduchu [°C]	Koef. přestupu tepla mezi postřikem a dělicí rovinou formy [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Teplota postřiku [°C]	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Teplota ofuku [°C]
1	50	50	4000	20	400	20
2	50	50	4000	20	400	20
3	50	50	4000	20	400	20
4	50	50	4000	20	400	20
5	50	50	4000	20	400	20
6	50	50	4000	20	400	20
7	50	50	4000	20	400	20
8	100	50	4000	20	400	20
9	150	50	4000	20	400	20
10	200	50	4000	20	400	20
11	250	50	4000	20	400	20
12	300	50	4000	20	400	20
13	350	50	4000	20	400	20
14	400	50	4000	20	400	20

Příloha 3.2 - Simulace výměníku

Verze	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem [W·m-2·K-1]	Teplota okolního vzduchu [°C]	Koef. přestupu tepla mezi postřikem a dělicí rovinou formy [W·m- 2·K-1]	Teplota postřiku [°C]	Koef. přestupu tepla mezi dělicí rovinou formy a vzduchem ofuku [W·m- 2·K-1]	Teplota ofuku [°C]
1	50	50	4000	20	400	20
2	100	50	4000	20	400	20
3.0	100	50	800	20	400	20
3.1	150	50	800	20	400	20
3.2	100	50	800	20	100	20
3.3	100	50	2000	20	100	20
4.0	100	50	4000/800	20	400	20
4.1	100	50	4000/800	20	400	20
4.2	150	50	4000/800	20	400	20
4.3	150	50	800/200	20	400	20
4.4	100	50	800/200	20	100	20
4.5	100	50	1600/800	20	100	20
5.0	100	50	-	20	100	20
5.1	100	50	-	20	150	20
5.2	100	50	-	20	200	20
5.3	100	50	-	20	250	20

Příloha č. 4 – Postřikové plány

1/2

Příloha technologického postupu op. lití – 65856/0 Seřízení MOF

Postřik pohyblivé části

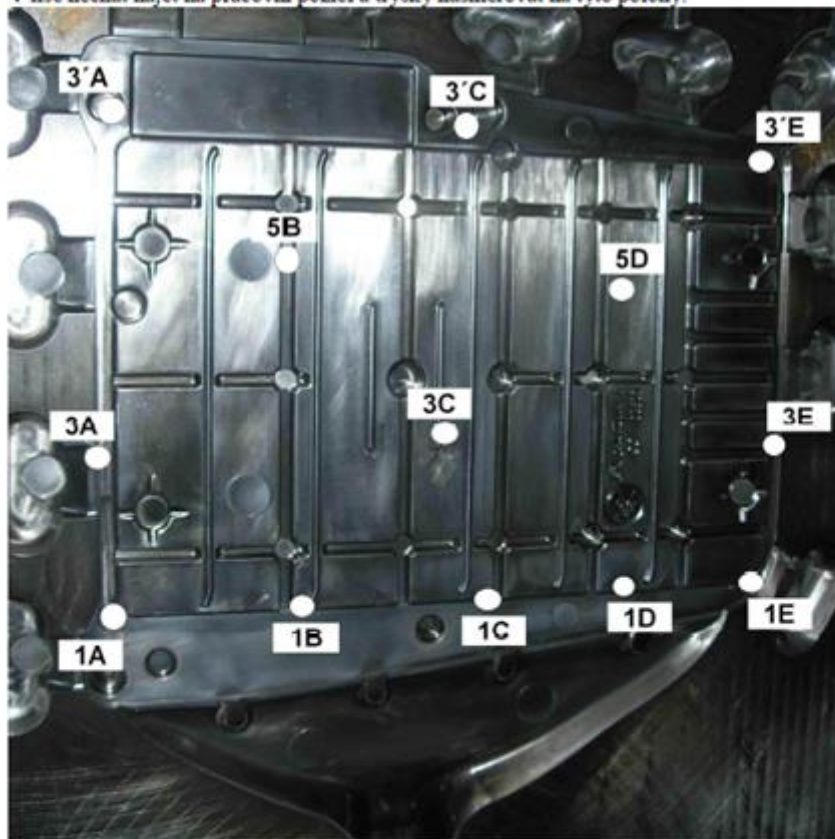
Jednotlivé polohy tryskacích kostek nastavit dle tohoto obrázku.



Podle tabulky nastavit velikosti jednotlivých trysek.
(v tabulce počet drážek na trysce, x – zaslepeno)

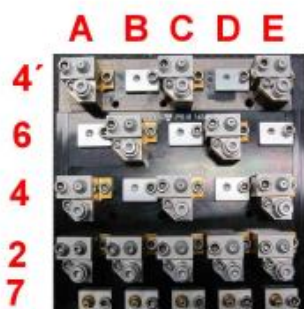
		E	D	C	B	A
3'	Tryska	0	X	0	X	0
5	Tryska	X	0	X	0	X
3	Tryska	0	X	0	X	0
1	Tryska	1	1	1	1	1
7	Tryska	Ořuk	Ořuk	Ořuk	Ořuk	Ořuk

V lise nechat najet na pracovní pozici a trysky nasměrovat na tyto polohy.



Postřik pevné části

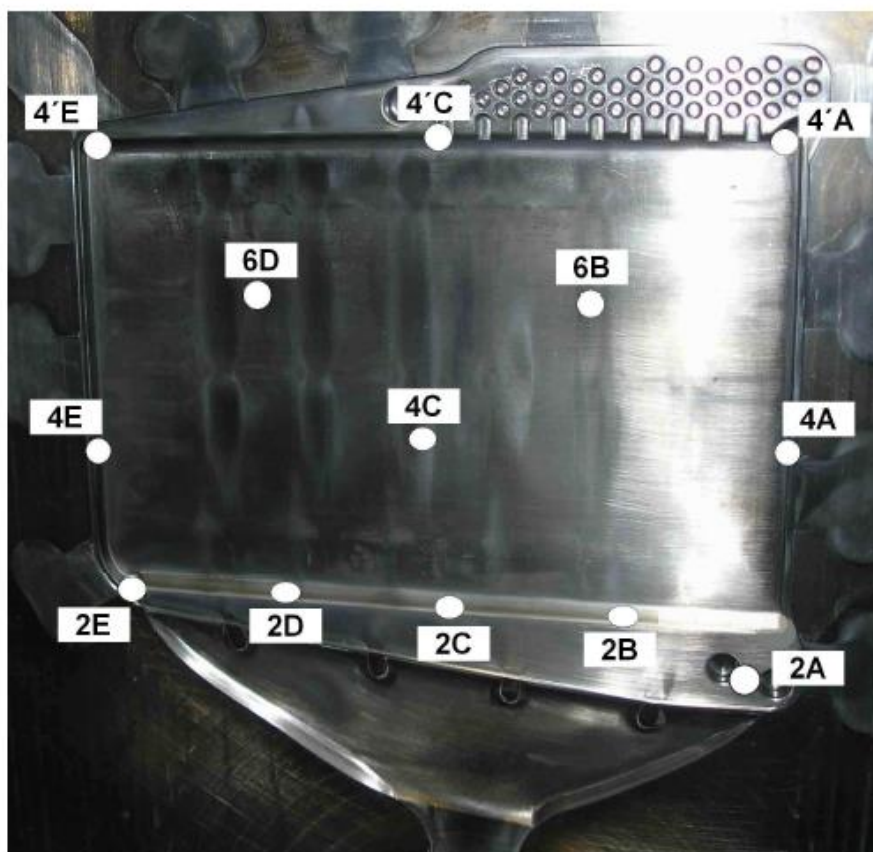
Jednotlivé polohy tryskacích kostek nastavit dle tohoto obrázku.



Podle tabulky nastavit velikosti jednotlivých trysek.
(v tabulce počet drážek na trysce, x – zaslepeno)

		A	B	C	D	E
4'	Tryska	0	X	0	X	0
6	Tryska	X	0	X	0	X
4	Tryska	0	X	0	X	0
2	Tryska	1	1	1	1	1
7	Tryska	Ořuk	Ořuk	Ořuk	Ořuk	Ořuk

V lise nechat najet na pracovní pozici a trysky nasměrovat na tyto polohy.



Vypracoval: Lukáš Samek

Dne: 15.10.2014

Schválil: ing. Jiří Bůžek

Příloha č. 5 – průběh teplot při postřiku výměníku uvnitř formy

- 1) Řez formou při vyjmutí odlitku, bod zájmu 375,5 °C
- 2) Řez formou při konci postřiku, bod zájmu 29 °C
- 3) Řez formou 7 sekund po konci postřiku, bod zájmu 99,1 °C

