



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Konstrukce tlakové licí formy pro odlitek ze slitin hliníku

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: Jiří Janoušek

Vedoucí práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.



Konstrukce tlakové lící formy pro odlitek ze slitin hliníku

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu konstrukce formy na tlakové lití hliníkových slitin ve stroji s horizontální studenou komorou pro odlitek *Příruba antény 5742*. V teoretické části je popsán princip technologie, dále je popsán tlakový lící stroj s horizontální komorou včetně jeho hlavních částí a je popsána forma pro tlakové lití. Hlavní pozornost je věnována správnému návrhu vtokového, odvzdušňovacího, vyhazovacího a nakonec temperačního systému.

Cílem praktické části byl návrh optimálních podmínek pro lití zadaného odlitku ze slitiny hliníku. Podle konstrukce odlitku byl zvolen vhodný lící stroj a hrubé rozměry formy. Hlavní pozornost při návrhu byla věnována vtokovému a odvzdušňovacímu systému. Návrh byl verifikován simulačním výpočtem, na jehož základě se návrh konstrukce upravil.

Klíčová slova:

Hliník, lití hliníku, tlakové lití, vysokotlaké, forma, lící stroj, konstrukce, konstrukce formy, vtok, odlitek

Construction of die casting mold for aluminium alloys

This bachelor thesis deals with the design of a mold for die casting of aluminum alloys in a machine with a horizontal cold chamber for the casting of Flange of the antenna 5742. The theoretical part describes the principle of the technology, a pressure casting machine with a horizontal chamber including its main parts is described, for die casting. The main attention is paid to the correct design of the inlet, venting, ejection and ultimately tempering system.

The aim of the practical part was to design optimal conditions for the casting of the specified aluminum alloy casting. Depending on the casting and customer requirements, a suitable casting machine and coarse mold dimensions have been chosen. The main focus of the design was on the inlet and exhaust system. The design was verified by a simulation calculation, on the basis of which the design of the structure was modified.

Keywords:

Aluminum, Aluminum Casting, Die Casting, High Pressure, Mold, Casting Machine, Construction, Mold Design, Inlet, Casting

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji Ing. Ivě Novákové, Ph.D., vedoucí mé bakalářské práce, za odborné vedení, poskytnutí věcných připomínek a snahu o zdokonalování. Poděkování patří i společnosti ALUTEX s.r.o. v zastoupení mého otce Ing. Jaroslava Janouška a společnosti ALFRED ENGELMANN CZ s.r.o. v zastoupení vedoucího provozu slévárny Ing. Petra Přecechtěla a vrchního konstruktéra Ing. Miloše Jungera za poskytnutí informací, materiálů, citlivých dat a za odborný dohled.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

1	ÚVOD	12
2	TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1	Tlakové licí stroje.....	13
2.1.1	Uzavírací mechanismus.....	15
2.1.2	Lisovací mechanismus.....	17
2.2	Tlaková licí forma.....	18
2.3	Vtokový systém.....	22
2.3.1	Návrh naříznutí.....	24
2.3.2	Návrh vtokového kanálu.....	25
2.4	Odvzdušňovací systém tlakové licí formy.....	27
2.5	Vyhazovací systém.....	29
2.6	Temperační systém.....	31
3	PRAKTICKÁ ČÁST	33
3.1	Tlakový odlitek.....	33
3.2	Návrh zaformování.....	33
3.3	Volba tlakového licího stroje.....	36
3.4	Koncept rozměrů formy.....	36
3.5	Návrh vtokového systému.....	38
3.6	Umístění odvzdušnění.....	40
3.7	Umístění vyhazování.....	42
3.8	Návrh temperačního systému.....	43
3.9	Simulace.....	43
3.9.1	Směr proudění taveniny.....	44
3.9.2	Uzavírání vzduchu v tavenině.....	45
3.9.3	Přetlak vzduchu v dutině formy.....	48
3.9.4	Tuhnutí odlitku.....	49
3.10	Realizace úpravy návrhu.....	40
3.11	Vzorkování.....	52
4	ZÁVĚR	54
5	SEZNAM LITERATURY	55

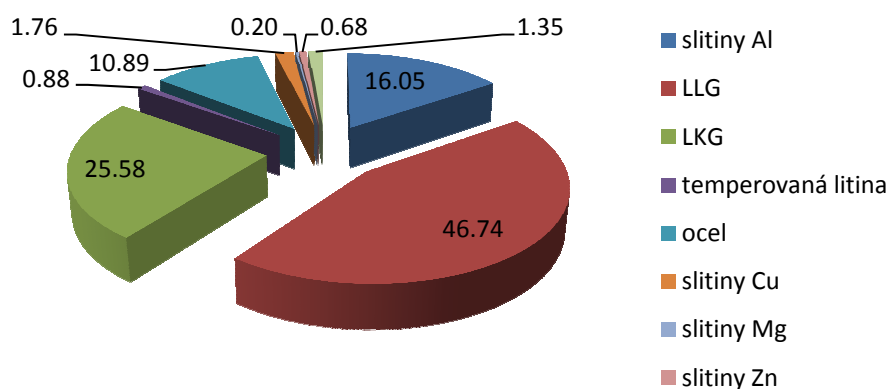
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	délka přetoku	[m]
a_s	rozpětí mezi vodícími sloupy stroje	[m]
A_1, B_1	šířka a délka odlitku	[m]
A_R, B_R	šířka a délka rámu	[m]
A_V, B_V	šířka a délka vložek	[m]
b	hloubka přetoku	[m]
b_s	rozměr upínací desky stroje	[m]
b_k	šířka vtokového kanálu	[m]
c	šířka přetoku	[m]
c_d	koeficient ztrát	[-]
c_s	rozpětí mezi vodícími sloupy stroje	[m]
c_k	hloubka vtokového kanálu	[m]
C_{R1}	výška pevného rámu	[m]
C_{R2}	výška pohyblivého rámu	[m]
C_{v1}	výška pevné vložky	[m]
C_{v2}	výška pohyblivé vložky	[m]
d	vzdálenost přetoku od tvaru	[m]
d_s	rozměr upínací desky stroje	[m]
d_v	průměr pracovního pístu stroje	[m]
D_L	průměr lisovacího pístu	[m]
e	délka kanálku do přetoku	[m]
e_s	průměr vodících sloupů stroje	[m]
E	výstřednost mezi silou F_u a F_{ot}	[m]
f	vyosení plnicí komory	[m]
F_L	lisovací síla stroje	[N]
f_{max}	maximální vyosení plnicí komory	[m]
F_{ot}	otevírací síla	[N]
F_u	uzavírací síla	[N]
F_{us}	skutečná uzavírací síla stroje	[N]
g	šířka kanálku do přetoku	[m]
g_z	gravitační zrychlení	[m/s ²]

G	hmotnost odlitku včetně přetoků	[kg]
h	hloubka odvětrávacího pásu	[m]
h ₁	maximální hloubka tvaru pevné vložky	[m]
h ₂	maximální hloubka tvaru pohyblivé vložky	[m]
j	šířka odvětrávacího pásu	[m]
k ₀	koeficient bezpečnosti	[-]
k _S	skutečný koeficient bezpečnosti	[-]
l _z	délka nařiznutí	[m]
p _{max}	maximální tlak v plnicí komoře	[Pa]
p ₀	pracovní tlak stroje	[Pa]
p _z	tlak v nařiznutí	[Pa]
Q _M	objemový tok taveniny	[m ³ /s]
R	rádiusy v přetoku	[m]
S	plocha průmětu výpadu do dělicí roviny	[m ²]
S ₁	čelní průmětná plocha tvaru bočního jádra	[m]
S _k	plocha průřezu vtokového kanálu	[m ²]
S _{kh}	plocha průřezu hlavního vtokového kanálu	[m ²]
S _{kv}	průřez vedlejšího vtokového kanálu	[m ²]
S _L	plocha lisovacího pístu	[m ²]
S _z	plocha průřezu nařiznutí	[m ²]
t	doba plnění	[s]
TLS	tlakový lisovací stroj	
u	vzdálenost působíště síly F _u od klopné hrany	[m]
v _k	rychlost taveniny ve vtokovém kanále	[m/s]
v _L	rychlost lisovacího pístu	[m/s]
v _{max}	maximální rychlost lisovacího pístu naprázdno	[m/s]
v _z	rychlost taveniny v nařiznutí	[m/s]
Z ₁	vzdálenost otevírací síly od klopné hrany	[m]
α ₁	úhel opěrného boku bočního jádra	[°]
ρ	hustota slitiny	[kg/m ³]

1 ÚVOD

Počátkem 20. let 20. století se objevila nová metoda lití pod tlakem. Šlo o zavedení stroje se studenou plnicí komorou, kam byla tavenina dodávána pomocí lžice. Vývojářem těchto strojů se stal československý odborník Ing. Polák. Původně byla technologie tvořena pro mosazné odlitky, ale velice rychle našla využití i pro odlévání hliníkových slitin. [1] Dle údajů z roku 2015 bylo odlito přes 16 milionů tun odlitků ze slitin hliníku, z čehož dle ČS svazu slévačů je zhruba 70% vyrobeno technologií tlakového lití, a dle prognóz na rok 2018 bude množství dále narůstat až o 4,5%. [2]



Obr. 1: Přehled celosvětové výroby odlitků za rok 2015 [mil. tun] [2]

Podstatou technologie tlakového lití se studenou horizontální komorou je vyplňování dutiny formy taveninou. Vyplňování probíhá vysokou rychlostí a odlitek následně tuhne při vysokém dotlaku. Vývoj této technologie je výsledkem požadavků doby, aby se zmenšovala pracnost a tudíž i rozdíl mezi polotovarem a hotovým výrobkem. Lze odlévat tvarově složité odlitky s tloušťkou stěny minimálně 1mm. Dosahuje se větší přesnosti bez potřeby obrábění a vzhledem k jemnozrnné struktuře i dobrých mechanických vlastností včetně vysoké kvality povrchu. Nevýhodou je však častá poretita odlitků. Náklady na pořízení strojů a výrobu forem jsou vysoké, ale díky vysoké produktivitě se tyto investice brzy vrátí. Kvalita odlitku je ovlivňována velkým množstvím faktorů jako například nastavení stroje, odbornost lidí atd. Velice důležitým faktorem je i konstrukce formy. Této problematice se věnuje tato práce.

Cílem předložené bakalářské práce je návrh formy pro odlitek ze slitiny hliníku „Příruba antény“. V rámci řešení bude proveden návrh způsobu zaformování, včetně

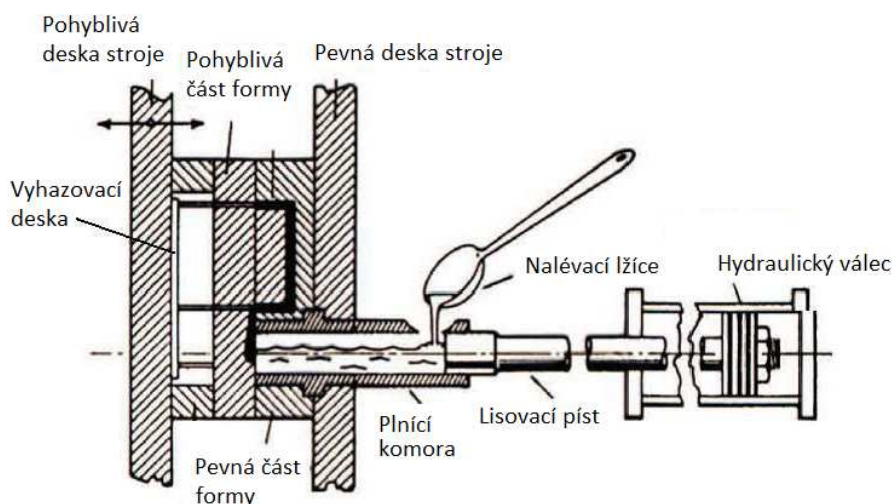
návrhu vtokového a odvzdušňovacího systému, systému vyhazování a neméně důležitého temperačního systému.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Tlakové licí stroje

Použití stroje je omezeno velikostí formy a velikostí uzavírací síly pro daný odlitek. V nynější době lze běžně najít stroje se studenou horizontální komorou s uzavírací silou do 20 MN [1]. Uzavírací síly největších strojů dosahují až 52 MN [12].

Obr. 2 ukazuje princip lití na tlakovém licím stroji se studenou komorou. V plnicí komoře je otvor, kudy se nalévá tavenina. V dutině plnicí komory, která sahá až do dělicí roviny, se pohybuje lisovací píst. Při nalévání taveniny je lisovací píst v zadní poloze a při pohybu lisovacího pístu je tavenina zalisována do dutiny formy. Po příslušné době na ztuhnutí odlitku se forma otevírá, přičemž lisovací píst vytlačuje zbytek tablety.

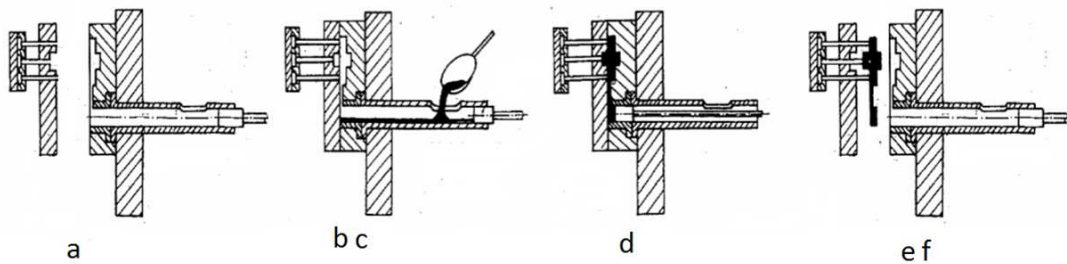


Obr. 2: Princip lití na tlakovém licím stroji se studenou komorou [9]

Pracovní cyklus stroje obsahuje tyto operace [1], viz obr. 3:

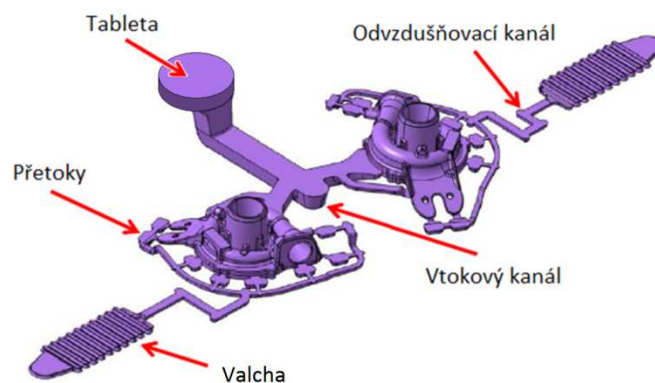
- a) ošetření lící formy – probíhá buď automatizovaným postřikem nebo ruční tlakovou pistolí,
- b) uzavření formy – sevření pevné a pohyblivé části formy,
- c) naplnění komory taveninou – dávkování taveniny probíhá ručně lžící nebo dávkovacím zařízením. Dle bezpečnosti by se neměla komora plnit z více jak 70% jejího objemu, protože během I. fáze pohybu pístu by se mohla tavenina vylít,

- d) fáze plnění dutiny formy taveninou – podrobněji popsané v kapitole 2.1.2 Lisovací mechanismus,
- e) otevření formy – odlitek zůstává na pohyblivé části a dochází k vytlačování tablety z plnicí komory lisovacím pístem,
- f) vyhození výpadu z formy – výpad je vyhozen vyhazovači z pohyblivé části formy a odebrán ručně nebo automaticky.



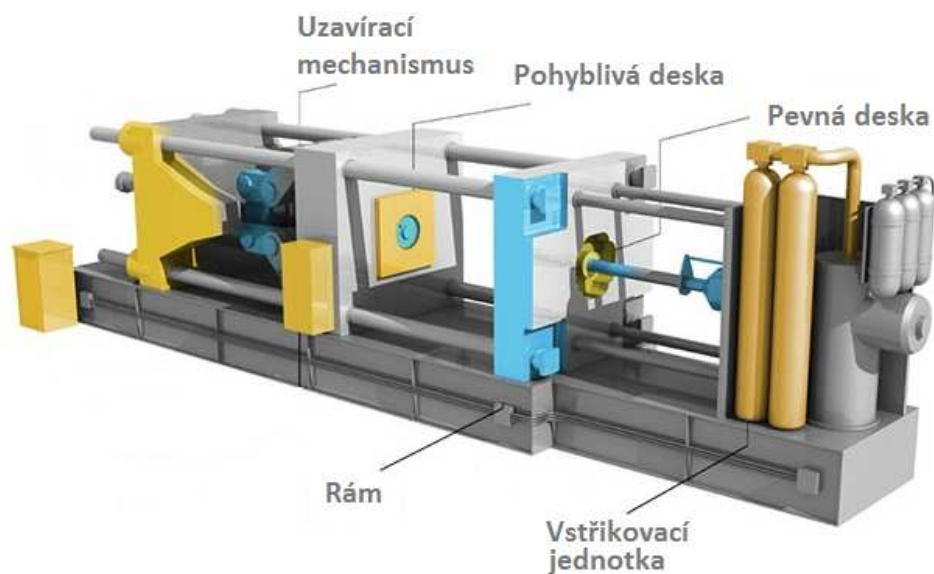
Obr. 3: Průběh pracovního cyklu [14]

Tzv. výpad, viz obr. 4, zůstává v pohyblivé části formy, ze které je vytlačen vyhazovači. Výpad je složen z tzv. tablety, vtokových kanálů, odlitku, přetoků a odvzdušňovacích prvků. Tableta je zbytek taveniny z plnicí komory. Průměr tablety je daný průměrem plnicí komory, ale optimální výška tablety se uvádí od 25 mm v závislosti na velikosti stroje. Je-li menší, může dojít k vadám odlitku kvůli nedostatečné možnosti dotlaku, je-li větší, prodlužuje se pracovní cyklus kvůli době tuhnutí tablety.



Obr. 4: Výpad [13]

Stroje mají na rámu tři základní části: uzavírací mechanismus, desky, na které se umísťuje forma, a vstřikovací lisovací jednotku s lisovacím pístem.



Obr. 5: Schéma stroje se studenou horizontální komorou [7]

2.1.1 Uzavírací mechanismus

U tlakových licích strojů je uzavírací síla parametrem, který určuje velikost stroje a ke kterému se vztahují všechny další parametry stroje. Pro bezpečný provoz stroje je nutné, aby uzavření formy bylo dokonalé, čímž se zajistí dodržení rozměrových tolerancí a zabrání prostříknutí taveniny z dělicí roviny formy. [1] Mechanismy uzavírání mohou být hydraulické přímé nebo hydraulické s kloubovým mechanismem. Mechanismus pohybuje s pohyblivou deskou stroje, která je vedena u většiny strojů po 4 vodičích sloupech stroje [8].

Potřebná uzavírací síla stroje F_u se stanoví ze síly otevírací F_{ot} , tj. ze síly, kterou působí maximální tlak vyvolaný lisováním na celkovou plochu průmětu výpadu v dělicí rovině [1].

$$F_u = \frac{F_L}{S_L} \cdot S \cdot k_0 \quad (1)$$

$$F_{ot} = \frac{F_L}{S_L} \cdot S \quad (2)$$

$$k_s = \frac{F_{us}}{F_{ot}} \geq k_0 \quad (3)$$

kde je: F_{ot} ... otevírací síla [N],

F_L ... lisovací síla – parametr stroje [N],

S plocha průmětu výpadu do dělicí roviny [m²],

F_u ... uzavírací síla [N],

F_{us} ... skutečná uzavírací síla stroje [N],

k_0 ... koeficient bezpečnosti volitelný od 1,1 do 1,3,

k_S ... skutečný koeficient bezpečnosti,
 S_L ... plocha lisovací pístu [m^2],
 D_L ... průměr lisovacího pístu [m].

V případě, že ve formě jsou použity boční pohyblivá jádra, viz obr. 6, je výpočet doplněn o složku síly, kterou působí boční jádro na opěrnou plochu rámu. Výpočet je dán vztahem č. 4 [17]:

$$F_u = \frac{1}{u} k_o F_{ot} [(u + E) + \frac{S_1}{S} Z_1 \operatorname{tg} \alpha_1] \quad (4)$$

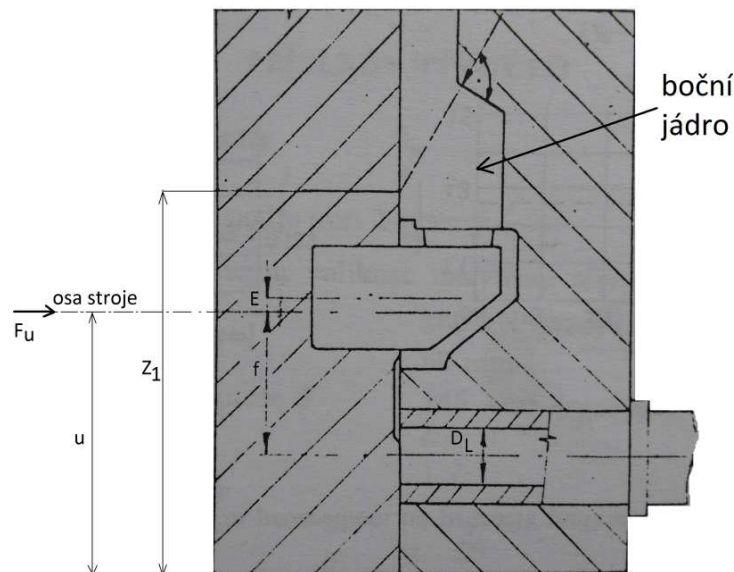
kde je: u ... vzdálenost působišť síly F_u od klopné hrany [m]

E ... výstřednost mezi silou F_u a F_{ot} [m]

S_1 ... čelní průmětná plocha tvaru bočního jádra [m]

α_1 ... úhel opěrného boku bočního jádra [°]

Z_1 ... vzdálenost otevírací síly od klopné hrany [m]

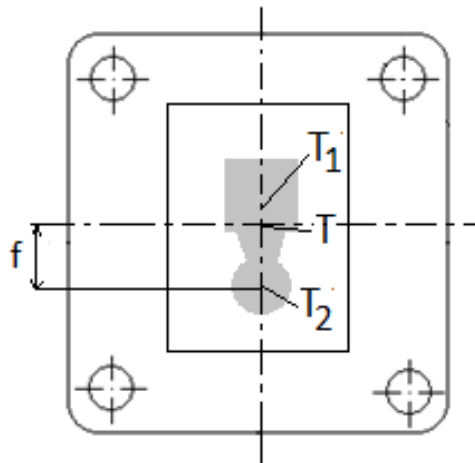


Obr. 6: Průřez formy s bočním jádrem [17]

Je-li uzavírací síla menší než otevírací, forma se pootevře a dochází k prostříkávání taveniny do dělicí roviny formy, čímž se zvětšuje plocha působení tlaku a dochází k přetížení některého z vodících sloupů stroje. Na odlitku pak zůstávají otřepy a nedodržují se rozměry odlitku.

Vyosení je, viz obr. 6, nastavení vzdálenosti f plnicí komory vůči těžišti mezi vodícími sloupy stroje, které je působišťem uzavírací a otevírací síly. Musí docházet k rovnoměrnému rozložení zatížení vodících sloupů.

Spojením těžiště plochy průřezu odlitku s odvzdušněním a vtokem T1 a těžiště průřezu plnicí komory T2 vychází těžiště výpadu T. Těžiště T je působiště otevírací síly F_{ot} . Toto těžiště by mělo ležet v ose upínacích desek stroje mezi vodícími sloupy, kudy zároveň vede osa vyhazování. Při navrhování formy se využívá možnost vyosení plnicí komory, které nabízí každý stroj. [1]



Obr. 7: Poloha těžiště

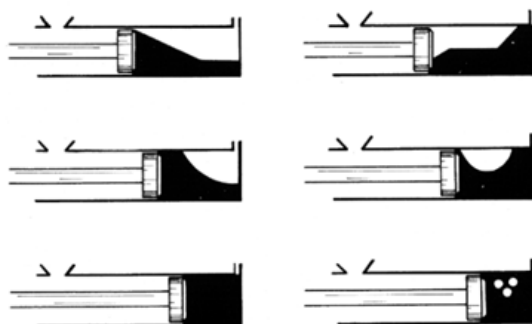
2.1.2 Lisovací mechanismus

Hlavním účelem lisovacího mechanismu je dopravení taveniny do dutiny formy v co nejkratším čase. Rychlost lisovacího pístu je nastavitelná v širokém rozmezí – pro slitiny hliníku až do 6 m/s [1].

Vstřikovací jednotka je opatřena technologií akumulace energie tlakového čerpadla, kdy hydraulické čerpadlo vhání hydraulický olej do akumulárního válce. Nárůstem objemu se posouvá píst, který stlačuje dusík. Po dosažení konkrétního tlaku se uzavře plnicí ventil, ve správný okamžik se otevře hlavní ventil a tlak akumulovaný v dusíku vytlačuje hydraulický olej směrem k lisovacímu válci. [16]

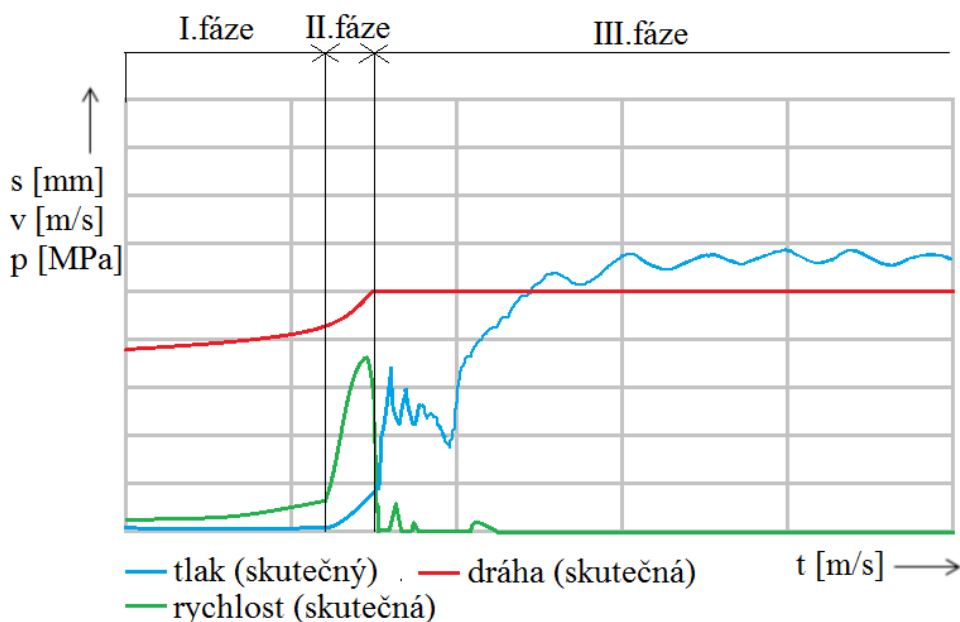
Lisovací fáze je dělená na 3 části, průběh je naznačen na obr. 9:

- a) V I. fázi plnění se píst pohybuje jen malou rychlostí 0,1-0,2 m/s. Tato fáze by teoreticky měla končit v okamžiku, kdy tavenina dosáhne vtokového naříznutí. [1] Má velký vliv na kvalitu odlitku, protože průběhem lisování musí být dosaženo vytlačení vzduchu z plnicí komory dříve, než se začne vytlačovat tavenina. Uzamčený vzduch by se v opačném případě, viz obr. 8, projevil v podobě velké pórovitosti odlitku. Využívá se buď lisování konstantní rychlostí nebo způsobu Parashoot. [15,19]



Obr. 8: Porovnání lisování – vlevo správně, vpravo uzavření vzduchu [15]

- b) Ve fázi II. v momentě, kdy tavenina teoreticky dosáhne nařiznutí, dochází ke zrychlení lisovací rychlosti – až do 6 m/s [1]. Tavenina v této fázi vyplní dutinu formy.
- c) III. fáze se též nazývá dotlaková. Dotlak v této fázi dosahuje 40-100 MPa v závislosti na požadavcích dílu. Běžně se používá hodnota 60 MPa, při požadavku těsnosti odlitku se volí mezi 80-100 MPa. [1]



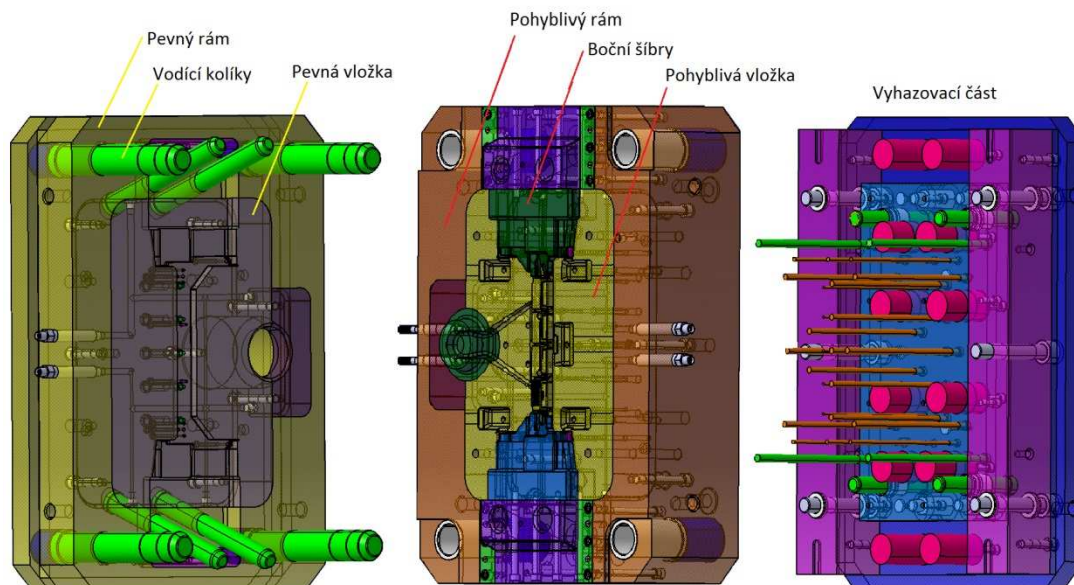
Obr. 9: Graf lisování [6]

2.2 Tlaková lící forma

Formy na tlakové lití hliníku jsou přesně vyrobené ocelové nástroje složené z rámů, vložek a tzv. „stoličky“ s vyhazovacím ústrojím. Nástroj je rozdělen na tzv. pevnou a pohyblivou část. Formy jsou v provozu cyklicky zatíženy tepelně, mechanicky a chemicky. Proto musí být vyrobeny z kvalitního materiálu. Požadavkem na takový materiál je dobrá obrobitelnost, prokalitelnost a tepelná vodivost, nízká tepelná roztažnost, odolnost proti nalepování, vysoká mez pevnosti a

kluzu a rozměrová stálost při tepelné úpravě [1]. Takový materiál je drahý, a proto je forma dělena na rámy a vložky.

Pevná část je tvořena pevným rámem a pevnou vložkou, do nichž je vložena lici komora. Pohyblivá část formy je též složena z rámu a vložky. Na pohyblivé části je připevněn vyhazovací systém formy. Do pohyblivé části se vedle tvarové vložky umísťuje i vložka protivtoku, která mimo vedení taveniny slouží ke chlazení tablety. Pro přesné dosednutí pevné části k pohyblivé se využívá vodících kolíků.

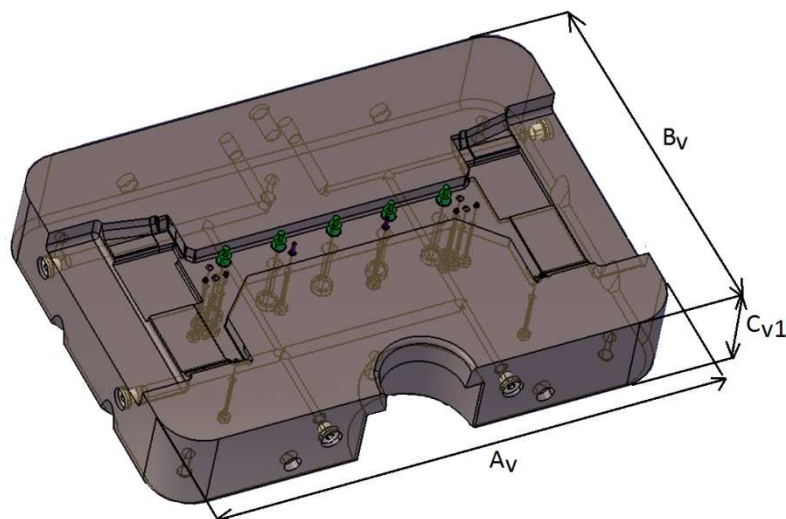


Obr. 10: Rozložení formy

Nejčastěji se pro vložky volí vysoko a středně legovaná nástrojová ocel jako například DIN 1.2343, 1.2344 nebo oceli pod obchodní značkou DIEVAR, TQ1, HP1 a jiné.

Vložky mají v sobě vyvrtané okruhy pro temperační systém. Tvar ve vložkách je negativem odlitku zvětšený o předpokládané smrštění při tuhnutí.

Vložky s přídatky na obrábění se kalí a 2 až 3x popouští ve vakuu na 45^{+2} HRC. Tepelná úprava je dána výrobcem materiálu a je uvedena v materiálových listech dané oceli. Vložky se poté obrábí na přesné rozměry. Běžné rozměrové tolerance pro tvary jsou v řádu setin milimetru. Všechny tvarové části forem se leští na drsnosti Ra 0,1. Po konečném obrobení se tepelně upravují, aby se snížilo zbytkové pnutí. Pro kvalitnější provedení vložek se volí i speciální PVD povlakování proti nalepování taveniny.



Obr. 11: Vložka pevná

Pro odlitek se základními rozměry $A_1 \times B_1 \times C_1$ se rozměry vložek určí pomocí vztahů [4]:

$$A_v = (3,4 \text{ až } 3,6)(A_1)^{0,84} \quad (5)$$

$$B_v = (3,4 \text{ až } 3,6)(B_1)^{0,84} \quad (6)$$

$$C_{v1} = 0,45(B_v + 0,2h_1)^{0,84} \quad (7)$$

$$C_{v2} = 0,50(B_v + 0,2h_2)^{0,84} \quad (8)$$

kde je:

A_1, B_1 ... šířka a délka odlitku [m],

A_v, B_v ... šířka a délka vložek [m],

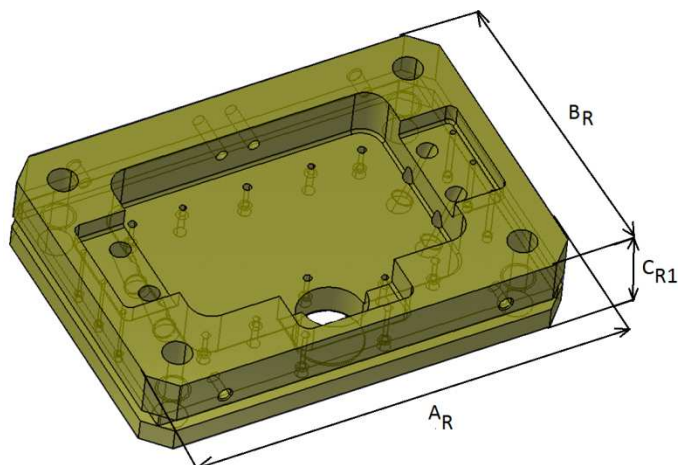
C_{v1} ... výška pevné vložky [m],

C_{v2} ... výška pohyblivé vložky [m],

h_1 ... maximální hloubka tvaru pevné vložky [m],

h_2 ... maximální hloubka tvaru pohyblivé vložky [m].

Rámy pomocí vodících kolíků udržují obě strany formy přesně proti sobě. Na rámy se používá zušlechtěná nástrojová ocel DIN 1.2311 a 1.2312. Do rámu se frézuje dutina, do které se upevňují vložky s vůlí desetiny milimetru. Výška vložky musí být větší než hloubka dutiny rámu, aby se při sevření pevná a pohyblivá strana dotýkala vložkami a perfektně spolu lícovaly. Rámy prochází vyhazování a také nástavce pro temperaci vložek. V případě potřeby se zavádí okruhy pro temperování a kalí se na 40 HRC.



Obr. 12: Pevný rám

Pro návrh velikostí rámu se používají vztahy [4]:

$$A_R = (3,6 \text{ až } 3,9)(A_V)^{0,84} \quad (9)$$

$$A_R = (3,6 \text{ až } 3,9)(A_V)^{0,84} \quad (10)$$

$$C_{R1} = 0,45(B_V)^{0,84} + C_{V1} \quad (11)$$

$$C_{R2} = 0,55(B_V)^{0,84} + C_{V2} \quad (12)$$

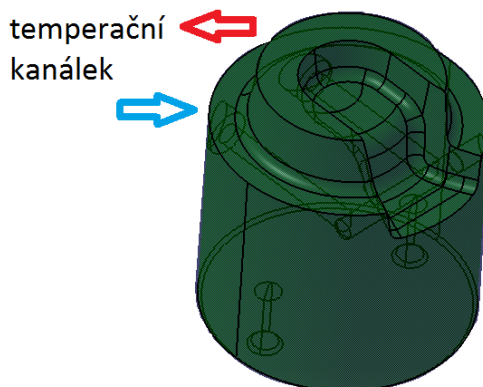
kde je:

A_R, B_R ... šířka a délka rámu [m],

C_{R1} ... výška pevného rámu [m],

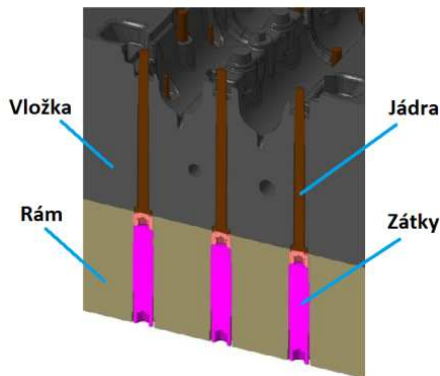
C_{R2} ... výška pohyblivého rámu [m].

Vložky protivtoku jsou neméně důležitým prvkem formy. Svým umístěním na počátku vtokového systému a velkým příjmem tepla od proudící taveniny je potřeba ji intenzivně chladit. Intenzita chlazení ovlivňuje dobu tuhnutí tablety a tudíž dobu cyklu. Vyrábí se stejným postupem a ze stejného materiálu jako tvarové vložky. [13]



Obr. 13: Vložka protivtoku

Předlévané otvory na odlitku jsou vyráběny při odlévání pomocí válcových jader různých velikostí a délek. Jádra jsou ve formě vždy uložena tak, aby zasahovala do dutiny formy v místech budoucího otvoru. Pro snazší výměnu se do rámu pod jádra vkládají zátky, viz obr. 14. Často se využívá i větších jader pro vyvločkování některých částí vložek pro usnadnění výroby formy.



Obr. 14: Průřez formou s jádry (vlevo) a jádro (vpravo)

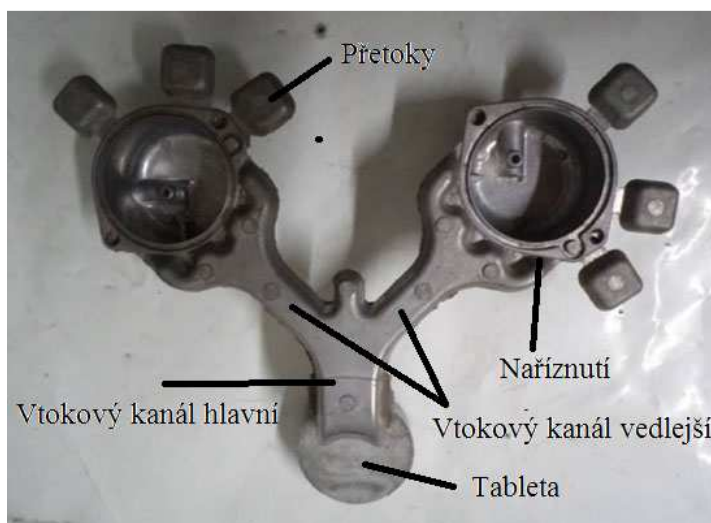
Při návrhu formy je doporučeno držet se několika zásad [1,13]:

- Určení způsobu a směru zaformování vzhledem k tvaru odlitku.
- Určení dělicí roviny vzhledem ke snadnému vyjímání odlitků z formy, snadné vyrobiteľnosti a slícovatelnosti.
- Při úpravě modelu dbát na dodržení velikosti a směru technologických úkosů pro úplné vyjmutí odlitku a dostatečných rádiusů, aby docházelo k plynulejšímu vyplňování dutiny a nedocházelo k lámání tvarů. Dále se kontroluje tloušťka stěn o ohledem na pórovitost a propadliny.
- Při návrhu se musí počítat se smršťováním odlitku.
- Umístění a zavedení odpovídající vtokové soustavy, aby bylo dodrženo rychlé a klidné vyplnění dutiny formy.
- Umístění odpovídajícího odvodu, aby nedocházelo k uzavírání vzduchu v dutině formy, což by výrazně ovlivňovalo kvalitu odlitku.

2.3 Vtokový systém

Vtokový systém je pro správné plnění formy a kvalitu odlitku velice důležitý, pouze správně navržený vtokový systém v kombinaci s ostatními licími parametry umožňuje výrobu bezvadných odlitků. Vtoková soustava by měla zajistit plnění všech odlitků ve stejný okamžik, dosažení požadovaného vzhledu odlitků, zamezení vírů, které by uzavíraly vzduch, a nesmí vést k rychlejšímu opotřebení dutiny formy [1].

Tavenina je vytlačována z lící komory hlavními a vedlejšími vtokovými kanály do dutin odlitků. Spojnice mezi vtokovým kanálem a odlitkem se nazývá naříznutí. V naříznutí nabývá rychlost taveniny nejvyšší hodnoty.



Obr. 15 : Popis vtokového systému

Po návrhu zaformování se navrhuje vtokový systém. Při návrhu je nejprve nutné začít umístěním vtokového naříznutí (viz kap. 2.4.1) a představit si, kudy tavenina poteče, aby se správně vyplnila celá dutina formy. Vychází se z času plnění a rychlosti taveniny v naříznutí. Návrh dále pokračuje vhodným řešením tvaru vtoku v oblasti vtokového naříznutí a tvaru vtokového kanálu (viz kap. 2.4.2) [13].

Neexistují striktně daná pravidla, protože ke každému odlitku je nutno přistupovat odlišně dle jeho tvaru a složitosti. Pro každý odlitek však lze vyslovit několik obecných předpokladů pro zavedení vtoku tak, aby [1,13]:

- dráha taveniny byla co nejkratší,
- poslední z prvků odvzdušnění byl funkční i na konci plnění dutiny formy,
- pokud možno proud nenarážel na citlivé tvarové prvky jako jádra a výstupky, hrozí nebezpečí nalepování, eroze povrchu nebo zlomení,
- docházelo k co nejmenšímu odporu při změně směru proudění,
- vtok je nutné volit i s ohledem na následné jednoduché odstřížení odlitku,
- v praxi se přihlíží i na to, že za naříznutím je maximální omezení porezity a vyšší kvalita povrchu, kdežto na v posledních místech plnění bývá vad nejvíce.

2.3.1 Návrh naříznutí

Naříznutí je plocha vtokové soustavy, kterou je tavenina vstříkována do dutiny formy. Pro každý odlitek se navrhuje individuálně. Konstruktor formy musí volit takovou rychlost v naříznutí, aby bylo dosaženo dobrého vyplnění dutiny formy. Pro slitiny hliníku se volí rychlost v rozmezí 20-60 m/s. V případě kolmého nárazu na stěnu formy se volí rychlost 20 až 40 m/s. Je-li vtokové naříznutí menšího průřezu, dosahuje se vyšší rychlosti a při pozdější apretaci odlitku je snazší odlomení. Vysoká rychlost má za následek časté tvoření vírů, čímž uzavírá vzduch do odlitku. Navíc vyšší rychlost způsobuje abrazi líce formy. Naopak nízká rychlost může způsobit vady povrchu odlitku.

Pro stanovení průřezu naříznutí S_z je nejpoužívanější metoda podle Sharpa [4]:

$$S_z = \frac{G}{\rho \cdot t \cdot v_z} \quad (13)$$

kde je:

G ... hmotnost odlitku včetně přetoků bez vtoku [kg],

ρ ... hustota taveniny [kg/m^3],

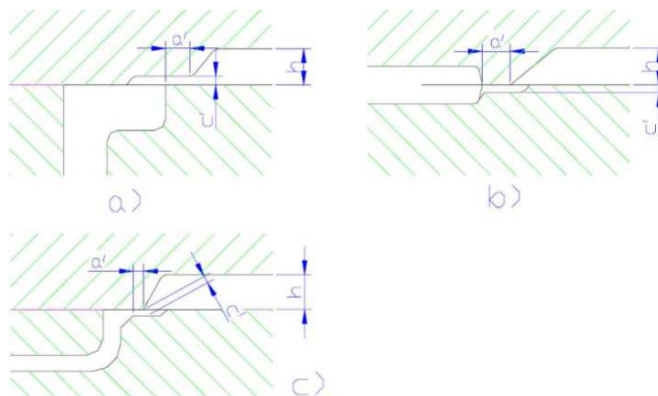
t ... doba plnění [s],

v_z ... rychlost taveniny v naříznutí [m/s].

Tab. 1: Doba plnění formy dle převažující tloušťky stěn [4]

Převažující tloušťka stěny odlitku [mm]	1,50	1,80	2,00	2,30	2,50	3,00	3,80	5,00	6,30
Rozpětí doby plnění formy [s]	0,01 0,03	0,02 0,04	0,02 0,06	0,03 0,07	0,04 0,09	0,05 0,10	0,05 0,12	0,06 0,20	0,08 0,30

Na následujícím obrázku jsou uvedeny tři typické příklady tvaru a polohy naříznutí vůči dělicí rovině. Příklad *a* se používá hlavně v případě, je-li dno odlitku obráběno, ostatní jsou vhodné ke stříhání nebo odlamování.



Obr. 16: Průřez vtokového naříznutí [4]

Pro lití hliníkových slitin se dle literatury doporučuje velikost a' v rozpětí od 0,00 do 3,00 mm a tloušťka c' od 0,7 do 2,5 mm [4]. Pro výpočet délky naříznutí l_z se užívá vzorec:

$$l_z = \frac{S_z}{c'_z} \quad (14)$$

2.3.2 Návrh vtokového kanálu

Velikost plochy průřezů vtokového kanálu se vypočítá z rovnice kontinuity o rovnosti velikostí objemového toku taveniny Q_M :

$$Q_M = S_k \cdot v_k = S_L \cdot v_L = S_z \cdot v_z \quad (15)$$

kde je:

Q_M ... objemový tok taveniny [m^3/s],

S_z ... plocha průřezu naříznutí [m^2],

S_k ... plocha průřezu kanálu [m^2],

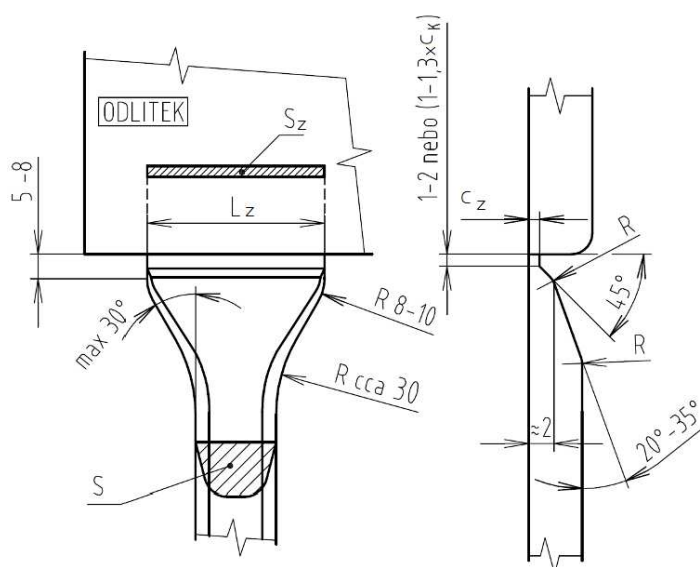
S_L ... plocha lisovacího pístu [m^2],

v_L ... rychlost lisovacího pístu [m/s],

v_k ... rychlost proudění v kanále [m/s],

v_z ... rychlost taveniny v naříznutí [m/s].

Před návrhem vtokového kanálu je nutné navrhnout vhodné místo pro zavedení vtokového zaústění vzhledem k tvaru a geometrii odlitku.



Obr. 17: Doporučená konstrukce zaústění vtokového naříznutí [6]

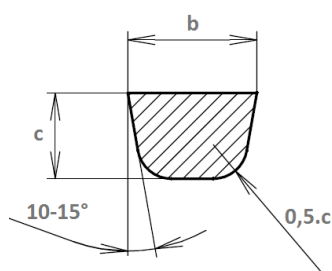
Maximální možný úhel pro rozšíření kanálu v oblasti vtokového naříznutí je 30° , viz obr. 17. Tavenina teče maximálně pod tímto úhlem. Bude-li úhel větší, tavenina

nepoteče celým průřezem kanálu a na krajích budou velmi pravděpodobně vznikat mrtvé zóny.[6]

V praxi se plocha průřezu kanálu S_k se spočítá násobkem plochy nařiznutí pomocí vztahu č. 16:

$$S_k = (1,5 \text{ až } 2,5) \cdot S_z \quad (16)$$

Nejčastěji užívaný tvar vtokového kanálu je ukázán na obr.17.



Obr. 18: Průřez vtokového kanálu [6]

Rozměry vtokového kanálu, tj. hloubka c_k a jeho šířka b_k , pro slitiny hliníku jsou určeny následujícími vztahy [4]:

$$b_k = (1,5 \text{ až } 3,0) \cdot c_k \quad (17)$$

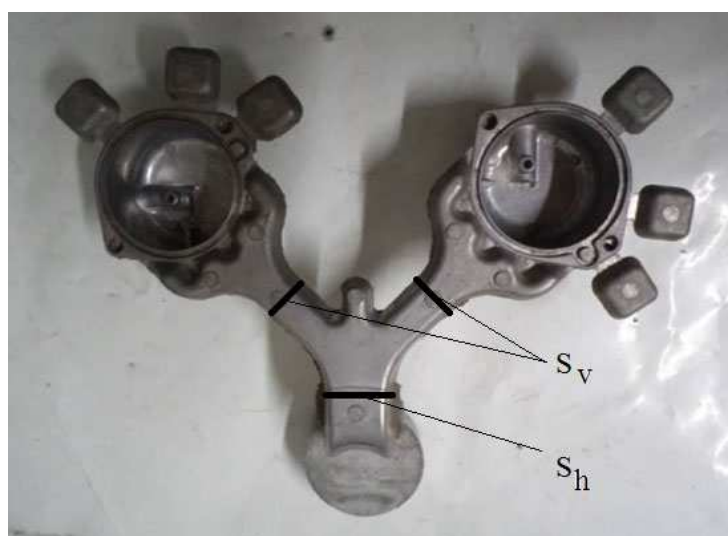
$$c_k = \left(\frac{S_k}{(1,5 \text{ až } 3) - \tan(10 \text{ až } 15^\circ)} \right)^{0,5} \quad (18)$$

kde je:

c_k ... hloubka vtokového kanálu [m],

b_k ... šířka vtokového kanálu [m].

Dochází-li k větvení vtokových kanálů, je třeba dodržet poměry mezi průřezy kanálů. Dodrží se tak rychlostní gradient toku taveniny.



Obr. 19: Dělení kanálů

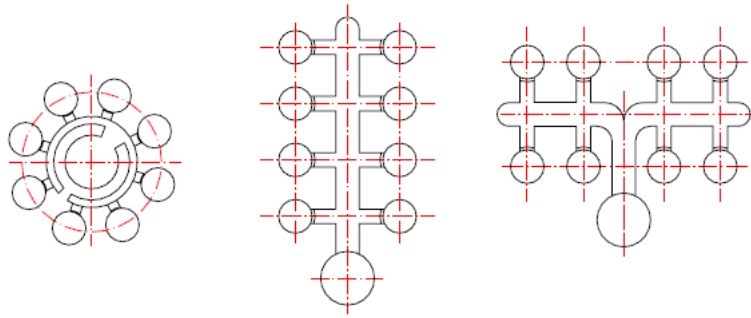
Proto by mělo platit pravidlo o součtu průřezu kanálů:

$$S_h \geq 2S_v \quad (19)$$

kde je: S_h ... plocha průřezu hlavního kanálu [m^2],

S_v ... plocha průřezu vedlejšího kanálu [m^2].

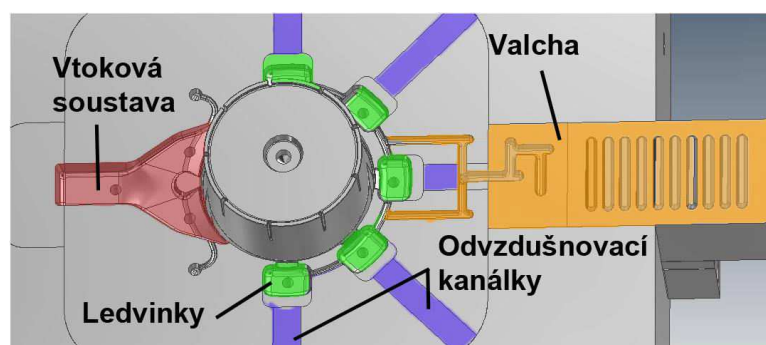
Na následujícím obrázku jsou ukázky uspořádání vícenásobných forem.



Obr. 20: Ukázky uspořádání vícenásobných forem [4]

2.4 Odvzdušňovací systém

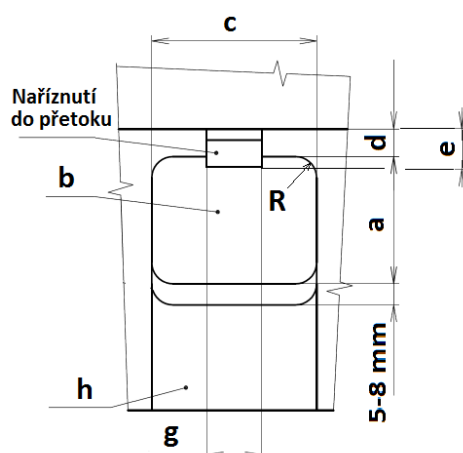
Forma musí obsahovat odvzdušňovací systém, který zajišťuje odvod vzduchu z dutiny formy. Špatná volba umístění může mít za následek uzavírání vzduchu v odlitku. Volí se zpravidla do dělicí roviny, avšak jsou případy, kdy se odvzdušňovací prvky volí i kolmo k dělicí rovině formou odvzdušňovacích jader. Systém odvzdušnění mimo vzduchu odvádí i počáteční vstříkovanou taveninu, která obsahuje různé nečistoty, pěnu, zbytky mazadel atd. [1,2].



Obr. 21: Odvzdušnění formy

Kolem dutiny odlitku se ve vzdálenosti 3 až 6 mm umisťují přetoky neboli tzv. ledvinky. K přetokům jsou připojeny odvzdušňovací pásy nebo valchy. Přetok má jednoduchý tvar s velkými zaobleními a velkými technologickými úkosi. Objem všech přetoků činí nejméně 10% objemu odlitku [3]. Občas se volí takový objem, aby se dle technologických požadavků například více zbrzdil tok kapalného kovu při

plnění dutiny formy nebo aby se lépe odplavila chladná tavenina z první vlny. Do přetoků se umísťují vyhazovače, aby bylo zajištěno vyhození celého odvzdušňovacího systému.



Obr. 22: Navrhování přetoků [4]

Tab. 2: Tabulka rozměrů přetoků [4]

	rozměry podle označení							
	8	10	12	14	17	22	28	34
a	8	10	12	14	17	22	28	34
b	3	3,7	4,3	5	6,5	8,5	11	13,5
c	určuje konstruktér							
R	2	3	5	6	6	6	9	9
d	2	2	2	2,5	2,5	3	3	3,5
e	d + 1 až 2							
g	5	6	6	8	10	10	12	15
h	pro hliníkové slitiny od 0,1 do 0,2 mm							
j	šířku pásků určuje konstruktér							

Z přetoků je vzduch veden odvzdušňovacími pásky, jejichž hloubka h a šířka j se určuje dle potřebného výkonu odvzdušnění. V případě slitin hliníku se volí hloubka 0,1 až 0,2 mm, přičemž hloubka může s rostoucí vzdáleností od přetoků klesat. [4]

Celková plocha průřezu odvzdušnění se vypočítá z následujícího vztahu [6]:

$$S_v = \frac{Q_M}{200} \quad (20)$$

kde je:

Q_M ... objemový tok taveniny [m^3/s].

Při výpočtu tohoto průřezu se vychází z hodnoty 200, která udává rychlost vzduchu v m/s. [6]

Vzduch z přetoků také může být při nedostatečném výkonu pásků odveden do valch neboli vlnovců. Valchy zpomalují tok kovu svým tvarem a intenzivním chlazením velice rychle změni skupenství proudícího kovu, než tavenina vystříkne z dělicí roviny formy. V závislosti na materiálu je mezi pohyblivou a pevnou stranou valchy vůle 0,4 až 0,7 mm. [13]

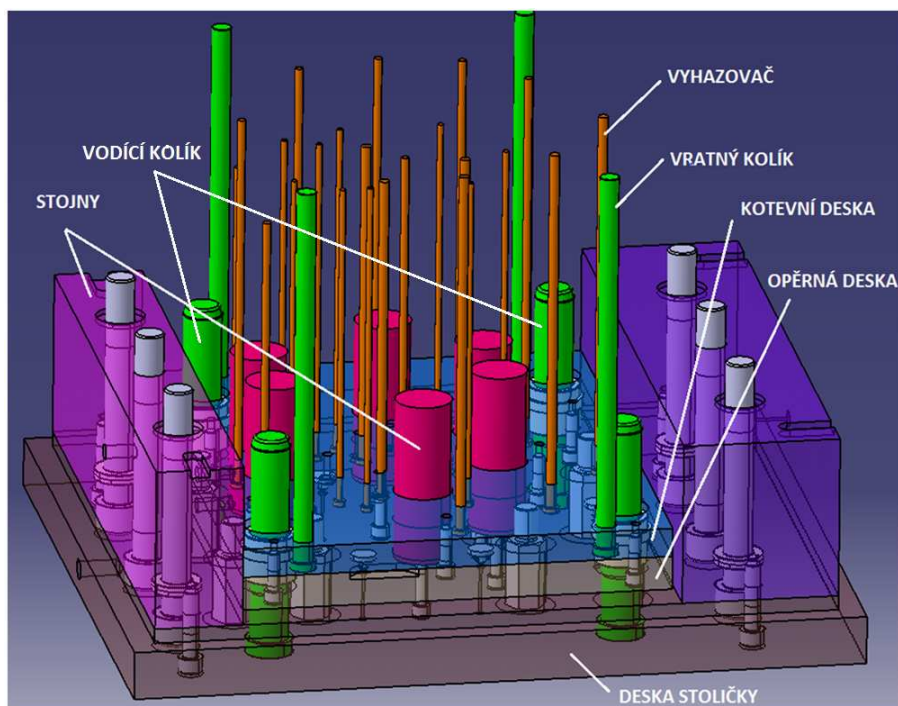


Obr. 23: Valchy [5]

2.5 Vyhazovací systém

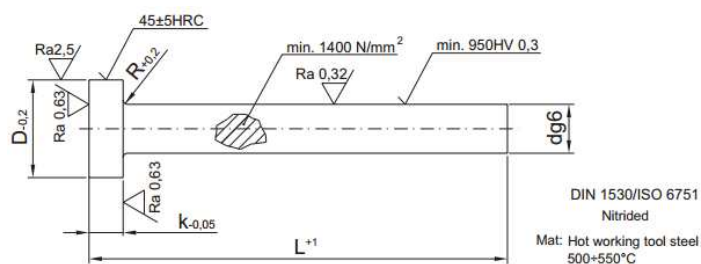
Tento systém slouží k vyhození odlitku z formy, aniž by se odlitek deformoval. Vyhazovací systém je zpravidla umístěn v pohyblivé části formy, lze se ale občas setkat s pomocným vyhazováním i v pevné části, nebo i v bočních pohyblivých jádrech, jedná-li se o tvarově složitý odlitek. Zavádí se do takových míst, která jsou pro vyjímání kritická. Neumísťuje se do pohledových částí. Nejčastěji se používá systému vyhazovačů s deskami. Umístění jednotlivých vyhazovačů je závislé na konstrukci odlitku a požadavcích zákazníka. Musí být především umístěny co nejbližší těm částem odlitku, které drží odlitek v pohyblivé části formy, tak, aby byl odlitek rovnoměrně vytažen.

Tento vyhazovací systém využívá dvou desek z uhlíkové oceli umístěných ve stoličce formy, mezi nimiž jsou umístěny vyhazovače. Deska opěrná ve fázi vyhazování tlačí všechny vyhazovače z formy. Deska kotevní, je deska, ve které jsou všechny vyhazovače usazeny a zároveň slouží k zatahování vyhazovačů zpět do pohyblivé části. Obě desky jsou napevno spojené šrouby. Desky jsou vedeny po vodících kolících stoličky a jsou ovládány vyhazovacím ústrojím stroje. Rozmístění je naznačeno na obr. 24.



Obr. 24: Vyhazovací systém s vyhazovači a deskami

Mezi nejčastěji používané patří vyhazovače s kruhovým průřezem, viz obr. 25, jejichž zavádění je výrobně nejvýhodnější a lze využít normalizovaných vyhazovačů. Běžně se využívají průměry v rozmezí od 4 do 12 mm. Délka dle katalogů prodejců normalizovaných dílů se pohybuje v rozmezí od 80 do 1000 mm. Jejich průměr musí být vyráběn s velkou přesností. S ohledem na teplotní roztažnost vložek, vyhazovačů a zabíhavosti hliníkových slitin se vůle mezi vyhazovačem a otvorem pohybuje mezi 0,03 až 0,04 mm.



Obr. 25: Kulatý nitridovaný vyhazovač [10]

Vzácněji se setkáme s plochými vyhazovači obdélníkového průřezu a s trubkovými vyhazovači. Využívání těchto vyhazovačů je dosti problematické, neboť často dochází k jejich zadírání a lámání.

2.6 Temperační systém

Tepelné poměry v tlakové lici formě a dodržování optimální teploty na lici formy jsou dalším důležitým předpokladem výroby jakostních odlitků. V případě, že by forma nebyla při lití udržována v optimálním rozmezí teplot, došlo by ke zvýšení její teploty, slitina by se nalepovala na dutinu formy a jádra, vyhazovací systém by se zadíral a výrazně by se snížila životnost formy. Naopak lití taveniny s nevyhovující nízkou teplotou lince formy dochází k předčasnému chladnutí taveniny, což může vyvolat různé slévárenské vady. [1] Provozní teplota formy na tlakové lití hliníkových slitin je mezi 200-250°C [1].

Temperační systém každé formy je, viz obr. 26, tvořen soustavou vodorovných a svislých kanálů, které slouží pro předehřívání formy před vlastním litím nebo pro jeho ochlazování v průběhu lití. Tok média je usměrněn pomocí přepážek a ucpávek.

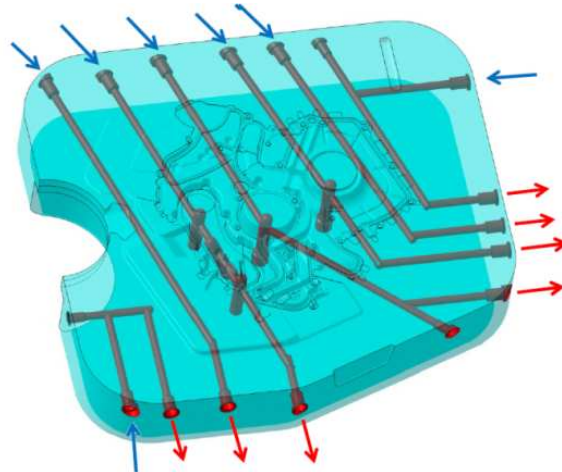
Před započítím liciho procesu je forma studená a je třeba využití temperačního systému formy k ohřevu na provozní teplotu médiem. Temperačními médii jsou většinou chemicky upravená voda nebo olej. Teplota vstupního temperačního média by neměla být nižší než 20 °C. Temperované musí být jak tvarové vložky, tak jádra a okolí vtoku. Některé formy mají zabudovaný okruh temperace i v rámech.

Nejvíce zahřívání je právě okolo tablety, kterou je třeba chladit intenzivněji, neboť delší doba tuhnutí tablety výrazně ovlivňuje dobu setrvání odlitku ve formě a tím zhoršení produktivity. S delší dobou setrvání odlitku ve formě dochází k jeho chladnutí a smršťování, což má za následek zadírání odlitku ve formě, praskání odlitku, lámání vyhazovačů a rozměrové odchylky. [1] Správně nadimenzovaný systém chlazení umožňuje zkracovat pracovní cyklus.

V dnešní době se ve slévárnách vysokotlakého lití běžně používají tyto způsoby temperování:

1. Temperace formy olejem – teploty oleje se pohybují v rozmezí 80 až 260°C, obvykle v rozmezí 180 až 220°C. Využívá se převážně k ohřívání forem u tenkostěnných odlitků. U odlitků tlustostěnných v průběhu výroby formy ochlazuje. [16]
2. Temperace vodou – zde se pracuje s teplotami 20 až 60 °C a slouží k intenzivnějšímu chlazení přehřátějších částí forem, popřípadě k ochlazování celých forem u tlustostěnných odlitků. [16]

3. Chlazení vodou – vstupní teplota chladicí vody se pohybuje okolo 20 °C. Tento způsob chlazení je vhodný pro přehřáté části forem – jádra, oblasti vtoku a vtokové vložky. U novějších a moderních tlakových licích strojů je umožněno mít chlazení zapnuté po celou dobu jednoho cyklu nebo jen po určitý zadaný čas. [16]



Obr. 26: Návrh chlazení vložky [13]

Pro návrh temperačního systému platí teoretická doporučení:

- Doporučené průměry temperačních kanálků jsou voleny vzhledem k tloušťce stěny odlitku, viz tab. 3.
- Jejich vzdálenost od tvaru vložek by neměla být větší než-li 1,5 násobek jejich průměru. Při přesáhnutí vzdálenosti klesá jejich výkon.
- Systém je výkonnější při zavedení vyššího počtu menších kanálů.
- Doporučuje se zavést přívod do nejintenzivněji ohřívaného místa.
- Doporučuje se zavést přívod do spodní části okruhu a odvod z nejvyšší.

Tab. 3: Doporučené průměry temperačních kanálů [4]

Tloušťka stěny odlitku	Průměr kanálu
do 2 mm	8 - 10 mm
do 4 mm	10 - 12 mm
do 6 mm	12 - 15 mm

Je nutno podotknout, že návrh temperačního systému je kompromis s ostatními systémy. Temperační a chladicí okruhy jsou umístěny tak, aby se vhodnou vzdáleností vyhnuly otvorům pro vyhazovače a jádra.

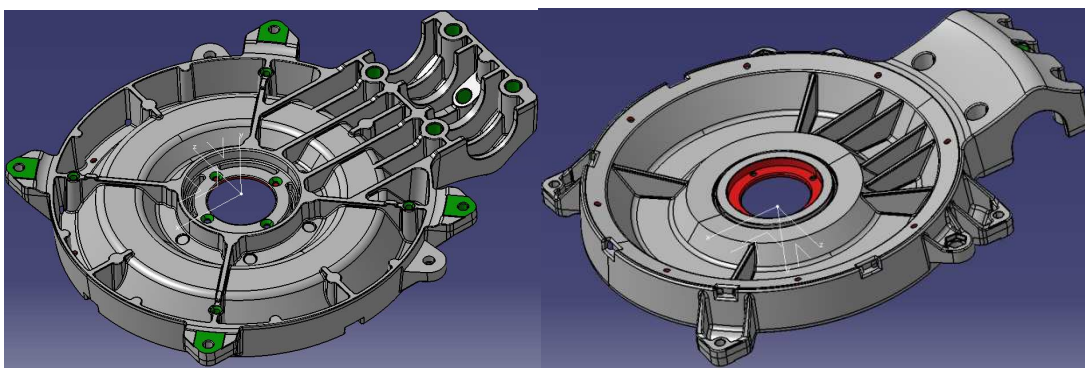
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této části bylo ve spolupráci se společnostmi Alutex s.r.o. a Alfred Engelmann CZ s.r.o. vytvořit návrh konstrukce formy (zaformování, vtok, odvzdušnění, vyhazování a temperace) pro odlitek Příruba antény 5742. Návrh byl ověřen simulací, kterou provedla externí společnost se speciálním softwarem MAGMASoft. Na základě výsledků simulačního výpočtu bylo rozhodnuto o úpravě návrhu. Odlitek musí splňovat technické specifikace dle požadavků zákazníka.

3.1 Tlakový odlitek

Tlakový odlitek, jehož hmotnost činí 1,646 kg, byl odléván ze slitiny AlSi9Cu3(Fe) (neboli DIN 226). Tato slitina je zvláště vhodná pro tlakové lití, velmi dobře slévateľná. Je dobře obrobiteľná. [11] Pravidelné měsíční dodávky čítají 500 kusů po dobu minimálně 8 let. Proto byla doporučena forma jednonásobná s garancí 80.000 odlití, jejíž vložky byly vyrobeny z materiálu DIN 1.2343.

Od zákazníka byl poskytnut 3D model ve formátu *.stp. Na modelu jsou barevně označena místa, která se dle rozhodnutí obrábí, protože otvory a plochy musí být bez úkosů a se závitem nebo určitou drsností povrchu, které se dosáhne obrobením. Odlitek se po odlití olamuje od přetoků a vtoku, opracovává ruční apretáží pro odstranění ostřin a tryská.

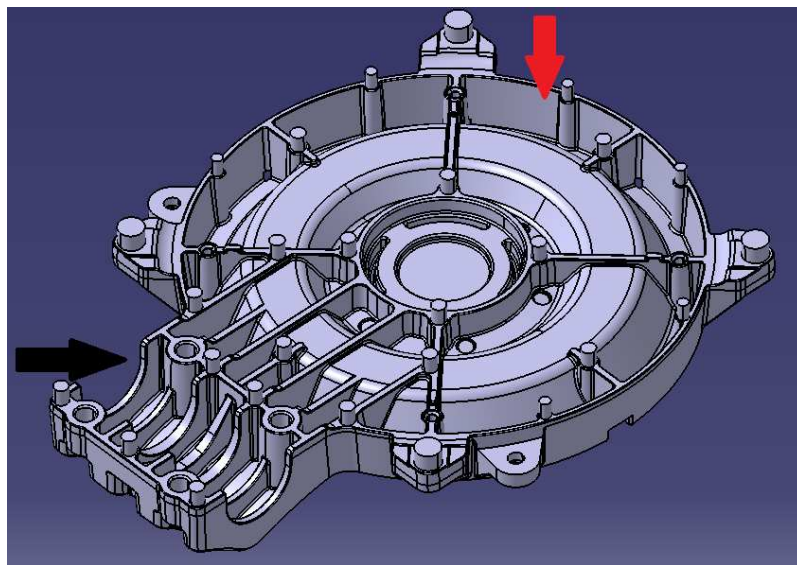


Obr. 27: Model odlitku Příruba antény

3.2 Návrh zaformování

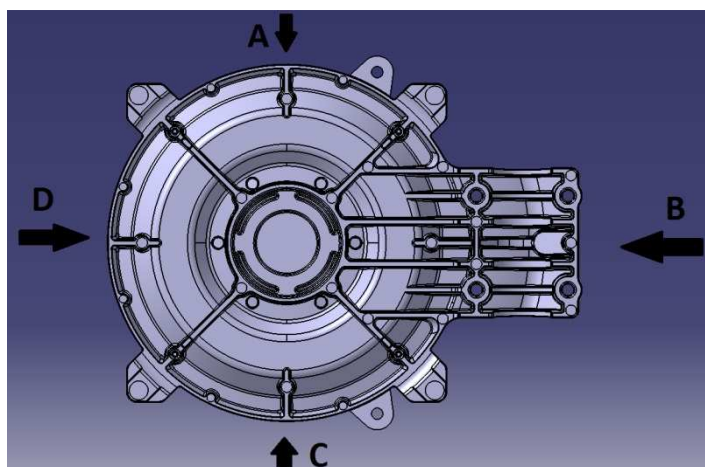
Při návrhu o zaformování odlitku do formy bylo nutné rozhodnout, která část odlitku bude usazena v pevné a která v pohyblivé části formy. Podle tvaru odlitku, viz obr. 28, bylo rozhodnuto o umístění tvaru do pohyblivé části z následujících důvodů:

- Vzhledem k tomu, že žebrování při smršťování odlitku působí na stěny vložek velkými silami, bylo lepší umístit žebrování v části označené černou šipkou na obr. 28 do pohyblivé části formy, odkud bude odlitek vyjímán vyhazovači.
- Tvar odlitku v místě označeném červenou šipkou na obr. 28 bude také mít tendenci stahovat se kolem tvarů vložky, proto bylo opět výhodnější umístit tuto stranu do pohyblivé části.
- Dalším důvodem pro umístění této strany odlitku do pohyblivé části byl předpoklad, že tato strana nebude po montáži na konečný výrobek vidět, proto zde budou stopy po vyhazovačích přípustné.



Obr. 28: *Volba směru zaformování*

Pro zavedení vtoku byly určeny 4 možné směry dle obr. 29.

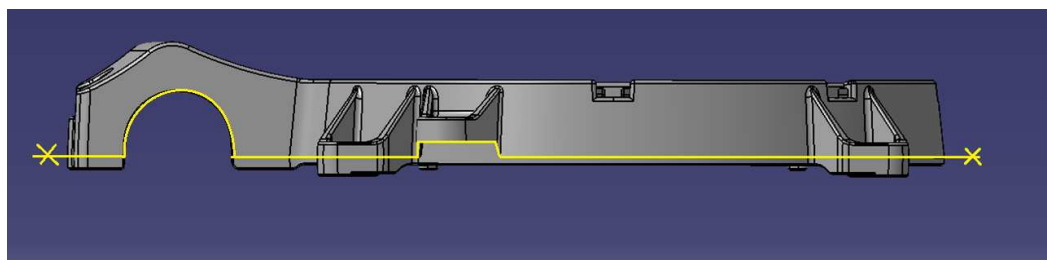


Obr. 29: *Volba směru zavtokování*

Směr A a C nedodrží zásadu zavádění vtoku ve směru delšího rozměru a mohlo by docházet ke špatnému plnění v žebrované části. Žebrovaná část by se

z tohoto směru zavtokování nemusela plnit správně. Zavést vtok ze směru B je nebezpečné z toho důvodu, že proud taveniny by z nařiznutí velkou rychlostí narážel na žebrované tvary vložek. Nejvhodnějším se zdá být směr D.

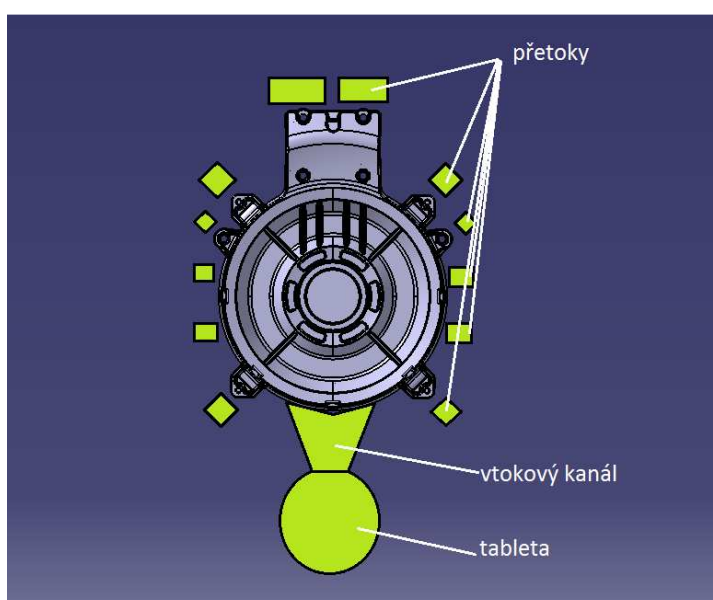
Dalším krokem bylo určení dělicí roviny. Po prozkoumání modelu bylo rozhodnuto vést dělicí rovinu způsobem, uvedeným na obr. 30. Z celkové výšky odlitku dosahuje tvar v pevné části hloubky $h_1 = 8,5$ mm a v pohyblivé $h_2 = 54,5$ mm.



Obr. 30: Dělicí rovina odlitku

Na obr. 31 je ukázána koncepce zaformování s předběžným návrhem rozložení vtoku a přetoků. Objem odlitku dle modelu činí 598 cm^3 . Dle hrubého odhadu objemu výpadu, který dle softwaru činil 818 cm^3 , byla navržena plnicí komora o vnitřním průměru 8,7 cm a aktivní délce 30,8 cm, s jejímž objemem 1830 cm^3 by došlo zhruba k 45% zaplnění. Tato hodnota je zcela vyhovující.

Vzhledem k maximální míře vyosení strojů a pozici těžiště průmětu navrženého výpadu do dělicí roviny, byla zvolena maximální vzdálenost vyosení 250 mm.



Obr. 31: Předběžná koncepce

3.3 Volba tlakového licího stroje

Plocha průmětu odlitku do dělicí roviny činí $S_o=712\text{cm}^2$. Za předpokladu, že plocha přetoků a vtoku včetně tablety činí 50% plochy celého odlitku, je plocha průmětu celého výpadu do dělicí roviny $S_{ov} = 1068\text{cm}^2$.

Z hlediska kapacitní vytiženosti slévárny byl navržen stroj TLS Del casting 750. Pro tento stroj se dle jeho názvu uvádí skutečná uzavírací síla $F_{us}=7500\text{kN}$ (neboli „750 tun“).

Pro plnicí komoru, zvolenou v kapitole 3.2, a zvolenou hodnotu optimálního dotlaku 60 MPa, byla dle tabulek parametrů stroje zvolena lisovací síla $F_L = 350\text{ kN}$. Za těchto podmínek byla spočítána otevírací síla F_{ot} dle vztahu č. 1:

$$F_{ot} = \frac{F_L}{S_L} S_{ov} = \frac{350}{0,00594} 0,1068 = 6288\text{ kN} \quad (21)$$

Pro tuto otevírací sílu a koeficient bezpečnosti $k_0=1,1$ byla stanovena dle vztahu č. 2 bezpečná uzavírací síla F_u :

$$F_u = \frac{F_L}{S_L} S_{ov} k_0 = \frac{3500}{0,00594} 0,1068 \cdot 1,1 = 6916,8\text{ kN} \quad (22)$$

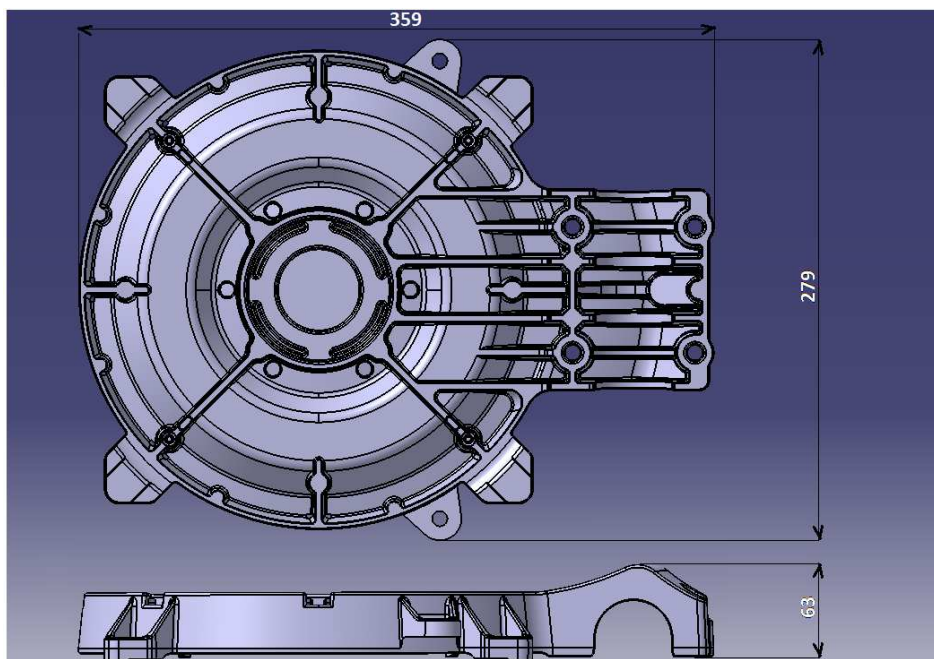
Pro kontrolu se spočítá skutečný koeficient bezpečnosti vztahem č. 3 podílem skutečné uzavírací síly stroje F_{us} a vypočtené otevírací síly F_{ot} :

$$k_s = \frac{F_{us}}{F_{ot}} = \frac{7500}{6288} = 1,193 > 1,1 \quad (23)$$

Hodnota koeficientu bezpečnosti je přípustná za předpokladu, že se výrazně nezvýší plocha výpadu. Ověření bude provedeno po návrhu vtoku a odvzdušnění, viz kapitola 3.6.

3.4 Koncept rozměrů formy

Velikost formy se odvíjí od velikosti odlitku, násobnosti formy, požadavků na pozici vtokové komory a konstrukčních parametrů stroje. Základní rozměry odlitku jsou $A_1 \times B_1 \times C_1 = 279 \times 359 \times 63\text{ mm}$, viz obr. 32.



Obr. 32: Rozměry odlitku

Na základě vztahů 5 až 12 uvedených v kapitole 2.2 byly určeny rozměry vložek a rámu a jsou uvedeny v tab. 5.

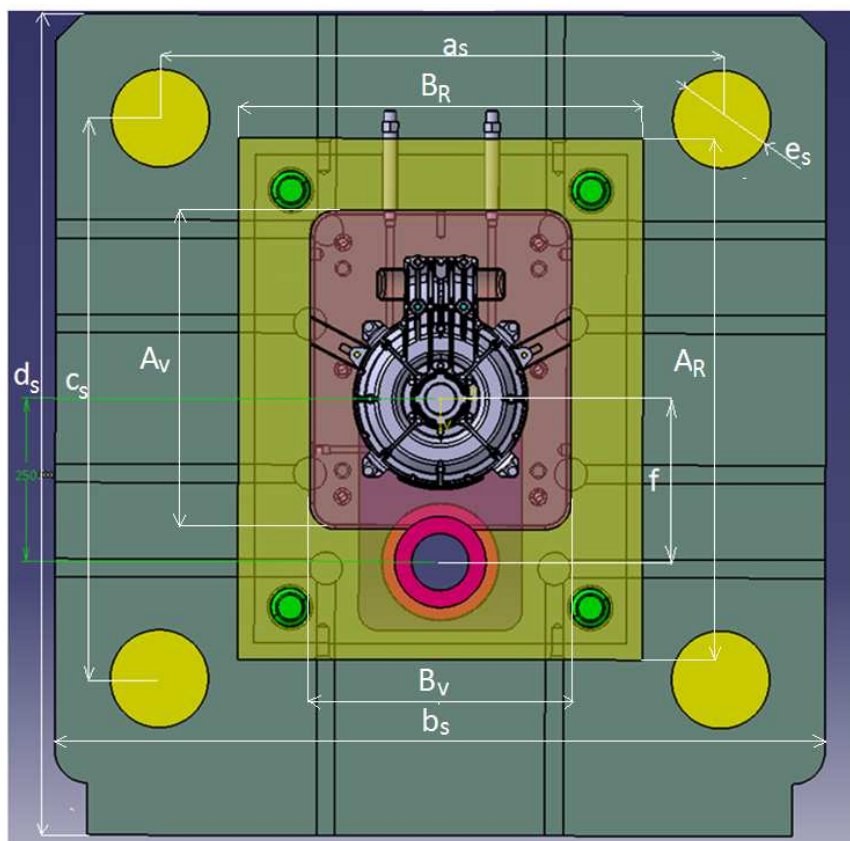
Tab. 5: Rozměry vložek a rámu [mm]

délka vložek	A_v	490
šířka vložek	B_v	400
výška pevné vložky	C_{v1}	90
výška pohyblivé vložky	C_{v2}	90
délka rámu	A_R	800
šířka rámu	B_R	600
výška pevného rámu	C_{R1}	160
výška pohyblivého rámu	C_{R2}	190

Tab. 6: Rozměry upínacích desek licího stroje [mm]

TLS	a_s	b_s	c_s	d_s	e_s	f_{max}	krok
750	915	1200	915	1200	160	250	50

Na obr. 33 je uveden navržený koncept formy umístěný na pevnou upínací desku stroje.



Obr. 33: Koncept formy na stroji (pevná část)

3.5 Návrh vtokového systému

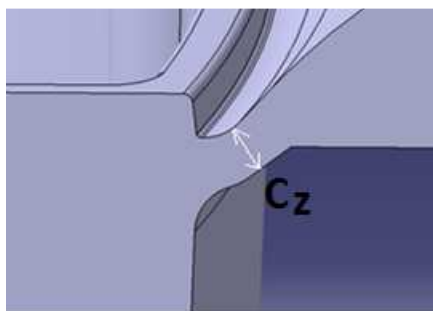
Pro získání velikosti plochy průřezu naříznutí se používá Sharpova vztahu, viz vztah č. 13. Hmotnost výpadu za naříznutím je součtem hmotnosti odlitku a všech přetoků. Hmotnost přetoků se uvažuje jako 10% hmotnosti odlitku. Hmotnost výpadu za naříznutím G tedy činí 1,81 kg. Průměrná tloušťka stěn a žeber odlitku je 2,5 mm. S využitím tab. 1 byla zvolena doba plnění dutiny $t_f = 0,05$ s. Hustota dané slitiny je 2750 kg/m^3 . Byla zvolena optimální rychlost v naříznutí $v_z = 40 \text{ m/s}$. Na základě vztahu č. 13 se vypočítala plocha naříznutí:

$$S_z = \frac{G}{t_f \cdot v_z \cdot \rho} = \frac{1,81}{0,05 \cdot 40 \cdot 2750} = 0,000329 \text{ m}^2 \quad (24)$$

Tloušťka naříznutí c_z s ohledem ke způsobu opracování, velikosti plochy naříznutí a vyšší hmotnosti odlitku byla zvolena 2,5 mm. Délka naříznutí l_z se stanovila vztahem č. 14.

$$l_z = \frac{S_z}{c_z} = \frac{0,000329}{0,0025} = 0,1316 \text{ m} \quad (25)$$

Z důvodu, aby tavenina kolmo nenarážela na tvar, je naříznutí zavedeno pod úhlem, viz obr. 34. Nejužší místo naříznutí je na obrázku naznačeno.



Obr. 34: Návrh vtoku

Pomocí hodnot plochy naříznutí ze vztahu č. 24 a rychlosti taveniny v naříznutí byl vypočítán objemový tok taveniny dle vztahu č. 15:

$$Q_M = S_z \cdot v_z = 0,000329 \cdot 40 = 0,01316 \text{ m}^3/\text{s} \quad (26)$$

Průřez plochy kanálu S_k se určil dle vztahu č. 16:

$$S_k = (1,5 \text{ až } 2,5)S_z = 2 \cdot 0,000329 = 0,000658 \text{ m}^2 \quad (27)$$

Rychlost taveniny ve vtokovém kanálu se určil dle vztahu č. 15:

$$v_K = \frac{Q_M}{S_k} = \frac{0,01316}{0,000658} = 20 \text{ m/s} \quad (28)$$

Rozměry průřezu vtokového kanálu byly vypočítány dle vztahů č. 17 a 18, viz kapitola 2.3.2:

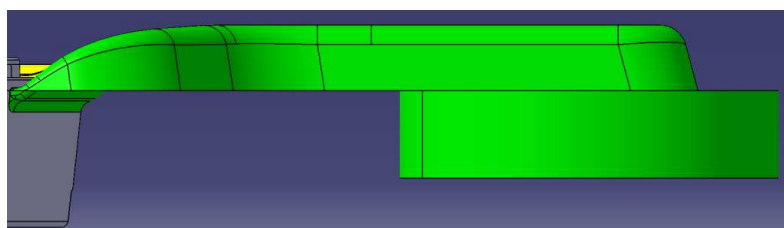
$$c_k = \left(\frac{S_k}{3 - \tan(15^\circ)} \right)^{0,5} \cong 0,0015 \text{ m} \quad (29)$$

$$b_k = 3c_k = 0,0045 \text{ m} \quad (30)$$

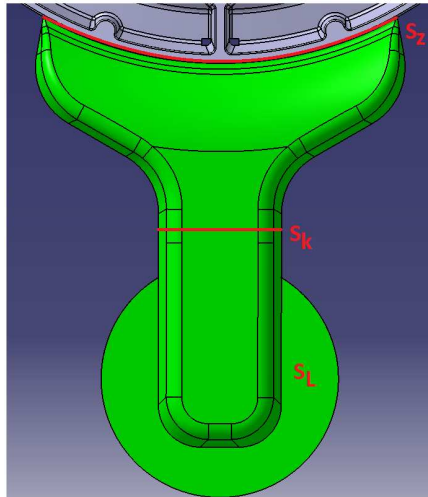
Rychlost lisovacího pístu během II. fáze byla určena dle vztahu 15:

$$v_L = \frac{Q_M}{S_L} = \frac{0,01316}{0,00594} = 2,21 \text{ m/s} \quad (31)$$

Na obr. 35 a 36 je zobrazen návrh vtokového systému formy.



Obr. 35: Vtok - pohled z boku



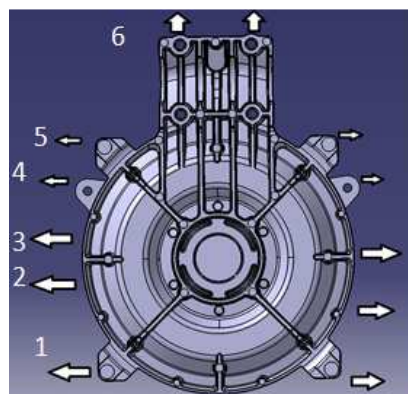
Obr. 36: *Vtok - pohled shora*

3.6 Umístění odvzdušnění

Přetoky tvoří odhadem 10% hmotnosti odlitku a musí být zvoleny tak, aby proudění taveniny neuzavíralo vzduch v dutině formy.

Vzhledem ke konstrukci odlitku lze předpokládat, že masivnější prostřední část odlitku výrazněji zpomalí tok taveniny ve srovnání s obvodem. Je proto potřeba uvažovat více přetokových kapes po obvodu a další menší dát do výstupků. Na závěr poteče proud taveniny nahoru přes žebrování, které se řádně odvzdušní minimálně dvěma přetoky s pásky. Na obr. 37 je znázorněno, kde bylo nutné umístit přetoky.

Celkový minimální průřez odvzdušňovacích pásek byl stanoven dle vztahu č. 20 dosazením objemového toku ze vztahu č. 26. Celkový průřez odvzdušňovacích pásek tedy činí $0,000065 \text{ m}^2$, což při tloušťce pásku $0,15 \text{ mm}$ znamená minimální celkovou šířku pásek $0,433 \text{ m}$.



Obr. 37: *Návrh místa pro přetoky*

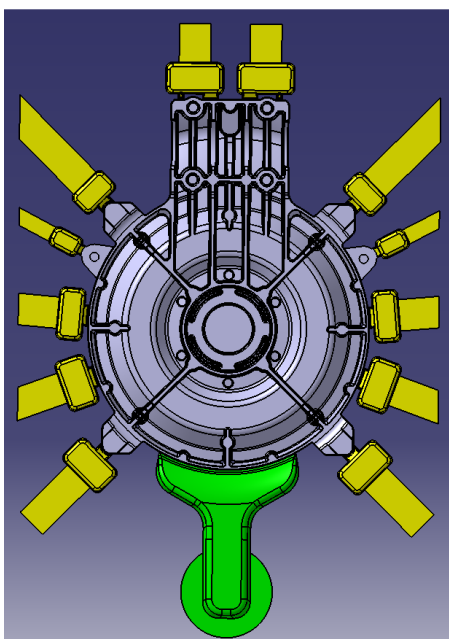
Rozměry přetoků a šířky pásek j byly určeny na základě kapitoly 2.4 a hodnoty rozměrů jsou uvedeny v tabulce 7. Čísla pozic umístění jsou vyznačena na obr. 37.

Obě strany odvzdušnění jsou zrcadlové. Dle požadavků na odvzdušnění a zvyklostí konstruktérů byly některé rozměry zvětšeny nebo zaokrouhleny a rádiusy byly upraveny pro pohodlnější obrábění.

Tab.7: *Tabulka rozměrů přetoků a pásků [mm]*

pozice	1	2	3	4	5	6
a	30	30	25	30	25	30
b	11	11	11	11	11	11
c	50	50	50	20	40	60
R	9	9	9	9	9	9
d	6	6	6	6	6	6
e	8	8	8	8	8	8
g	15	20	20	10	15	20
h	0,15					
j	40	40	40	20	35	40

Na obr. 38 je uveden již vymodelovaný návrh se žlutě vyznačenými přetoky a odvzdušňovacími pásky.



Obr. 38: *Návrh odvzdušnění*

Po návrhu přetoků a vtoku byla provedena kontrola, zda se nezvýšila plocha průmětu výpadu nad únosnou mez. Z celkového návrhu se pomocí softwaru odečetla velikost ploch tablety, vtokového kanálu a přetoků s pásky, viz tab. 8.

Tab. 8: *Plochy průmětů do dělicí roviny [m²]*

odlitek	přetoky s pásky	vtokový kanál	tablety
0,0712	0,0226	0,0060	0,0059

Celková plocha průmětu výpadu do dělicí roviny je menší než předpokládaná plocha a činí 0,1057 m². Po přepočítání otevírací síly, která dle vztahu č. 2 činí 6228 kN, proběhla kontrola skutečné bezpečnosti dle vztahu č. 3:

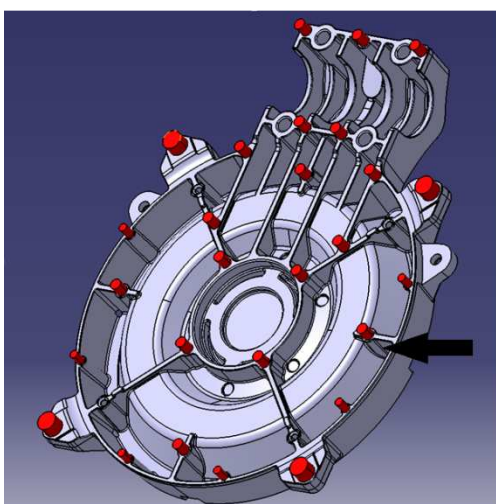
$$k_s = \frac{F_{us}}{F_{ot}} = \frac{7500}{6228} = 1,204 > 1,1 \quad (32)$$

Kontrola tedy ukázala, že plocha průmětu návrhu výpadu do dělicí roviny nepřekročila hranici bezpečnosti.

3.7 Umístění vyhazování

Pro zajištění rovnoměrného vysunutí výpadu z pohyblivé části formy bylo, viz obr. 39, po obvodu kruhové základny odlitku umístěno 6 vyhazovačů o průměru 6 mm a na největší výstupky po obvodu 4 o průměru 14 mm. Ostatní vyhazovače mají průměr 8 mm. Nejvyšší koncentrace těchto vyhazovačů je v místech žebrování, kde je předpoklad největšího odporu při vytahování. Na obr. 39 jsou červeně naznačeny vyhazovače a šipkou je označen „domeček“, který se přidává pod vyhazovače na žebrech a krajích odlitku.

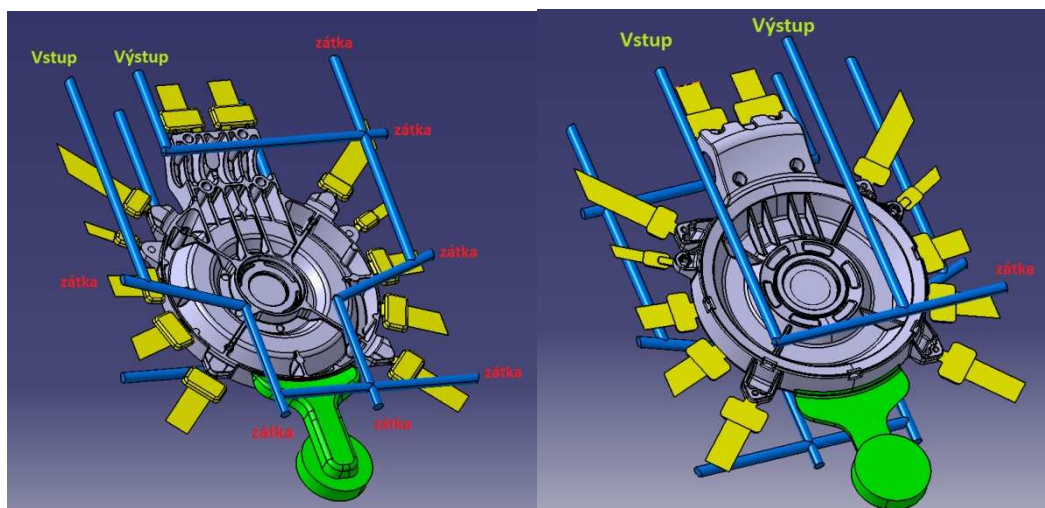
Další vyhazovače průměru 10 mm byly umístěny do každého přetoku a jeden do vtokového kanálu.



Obr. 39: *Umístění vyhazovačů (červeně) bez přetoků*

3.8 Návrh temperačního systému

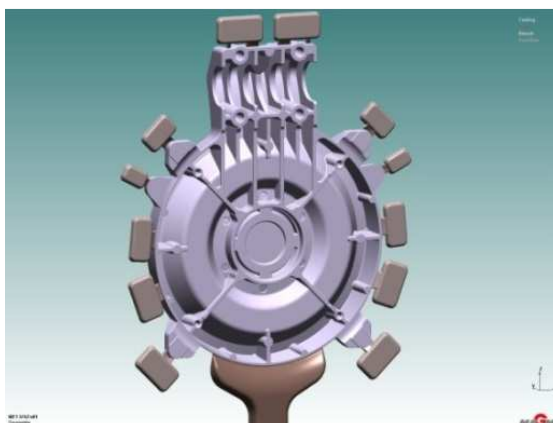
S ohledem na průměrnou tloušťku stěn odlitku pohybující se kolem hodnoty 2,5 mm byl pro temperační kanály dle tab. 4 zvolen průměr 12 mm. Na každé straně vložek byl zaveden pouze jeden okruh kanálů ve vzdálenostech 15 mm od líce vložek, viz obr. 40. Rámy se temperovat nebudou. Vložka protivtoku bude též chlazena jedním vlastním okruhem.



Obr. 40: Zavedení temperace do pohyblivé (vlevo) a pevné části (vpravo)

3.9 Simulace

Provedený návrh byl verifikován pomocí simulačního výpočtu plnění a tuhnutí odlitku. Temperační systém byl ve výsledcích simulace skryt a odvzdušňovací pásy byly nahrazeny příslušným parametrem propustnosti vzduchu v přetocích. Pro simulaci byly použity parametry uvedené v tabulce 9.



Obr. 41: Model k simulaci

Tab. 9: *Vstupní parametry pro simulaci*

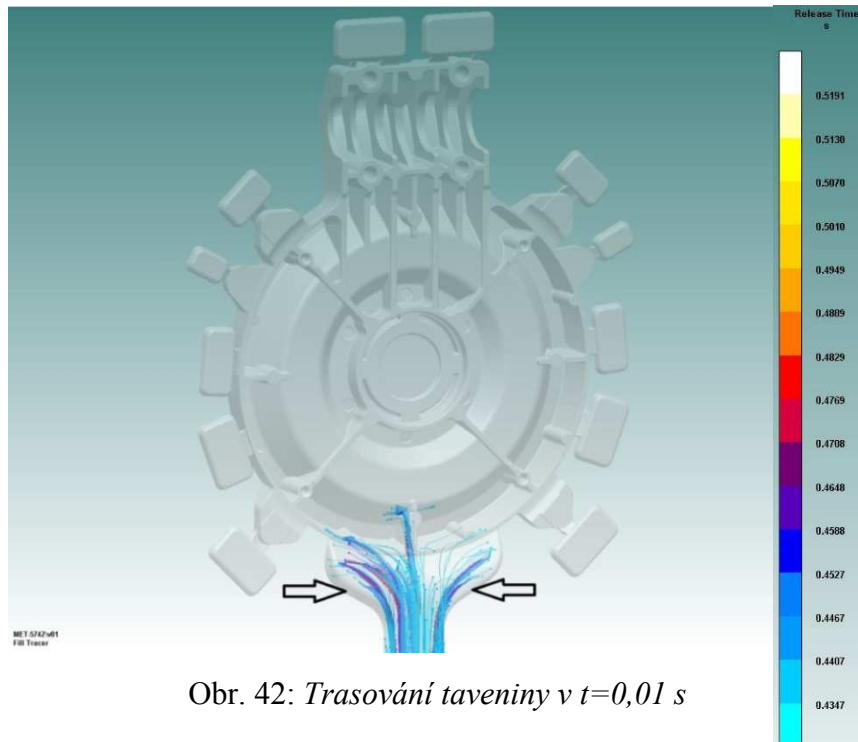
materiál vložek	DIN 1.2343
materiál odlitku	AlSi9Cu3(Fe) (DIN 226)
teplota taveniny v plnicí komoře	660 °C
lisovací rychlost v_1	0,2 m/s
lisovací rychlost v_2	0,8 m/s
lisovací rychlost v_L	2,21 m/s
uzavírací síla F_u	7500 kN
specifický tlak	60 MPa
doba působení dotlaku	6 s
vnitřní průměr plnicí komory	87 mm
délka aktivní plnicí komory	308 mm
temperování	olej 150 °C

Výsledky výpočtu byly hodnoceny pomocí několika kritérií:

- Pomocí kritéria směru proudění, lze zkontrolovat geometrii návrhu vtoku a průběh plnění dutiny formy v různých časech. Částice jsou dle legendy zbarveny podle času, kdy se dostanou do dutiny formy.
- Kritérium uzavírání vzduchu v dutině formy zkoumá množství vzduchu uzavřeného v tavenině při určitém procentuálním zaplnění dutiny formy.
- Kritérium přetlak vzduchu v dutině formy hodnotí tlak vzduchu v dutině během různých fází jejího vyplňování.
- Kritérium tuhnutí odlitku zkoumá průběh teplot při tuhnutí, kdy mohou vznikat staženiny a další technologické vady.

3.9.1 Směr proudění taveniny

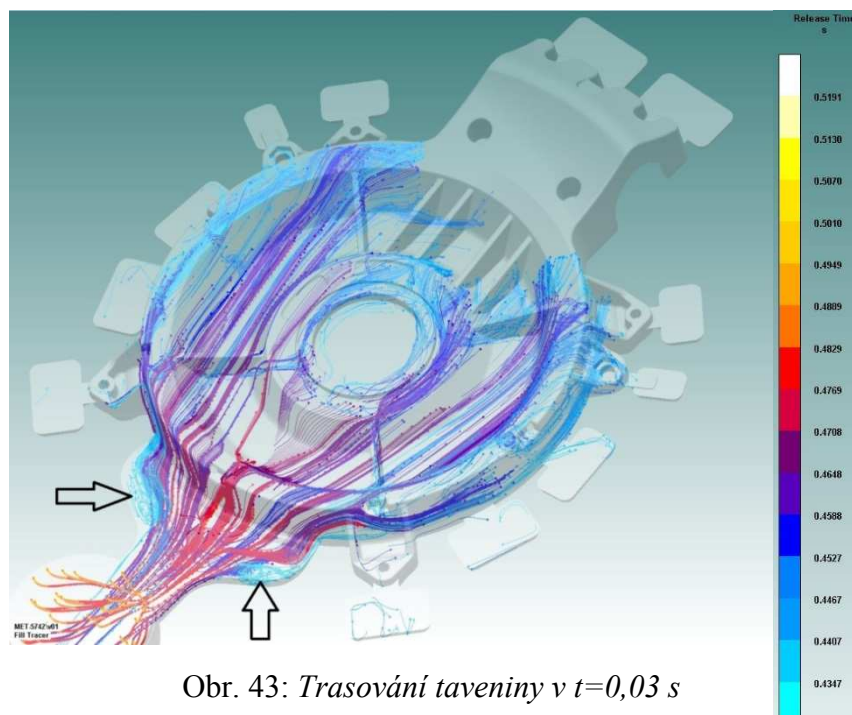
Na obr. 42 je již v počátku proudění vidět, že rozšíření vtokového kanálu není vhodně tvarované, protože proud taveniny zde vytváří mrtvá místa, kde víří tavenina, která v sobě může uzavřít vzduch. Částice jsou zbarvené podle doby, kdy se do dutiny dostaly.



Obr. 42: *Trasování taveniny v $t=0,01$ s*

Z obr. 43 je patrné, že v označených místech ve vstupu vzniká turbulentní proudění. V těch místech víří světle modře zbarvené trasovací částice, což znamená přítomnost taveniny z první vlny.

Dále je patrné, že úvaha o směru proudění při navrhování přetoků byla správná. Postranní proudy jsou rychlejší než proud středový, který je při obtékání středového tvaru odlitku zpomalován. Postranní proud není zpomalován téměř žádnými překážkami, takže do bočních přetoků se prozatím dostává jen malé množství taveniny.



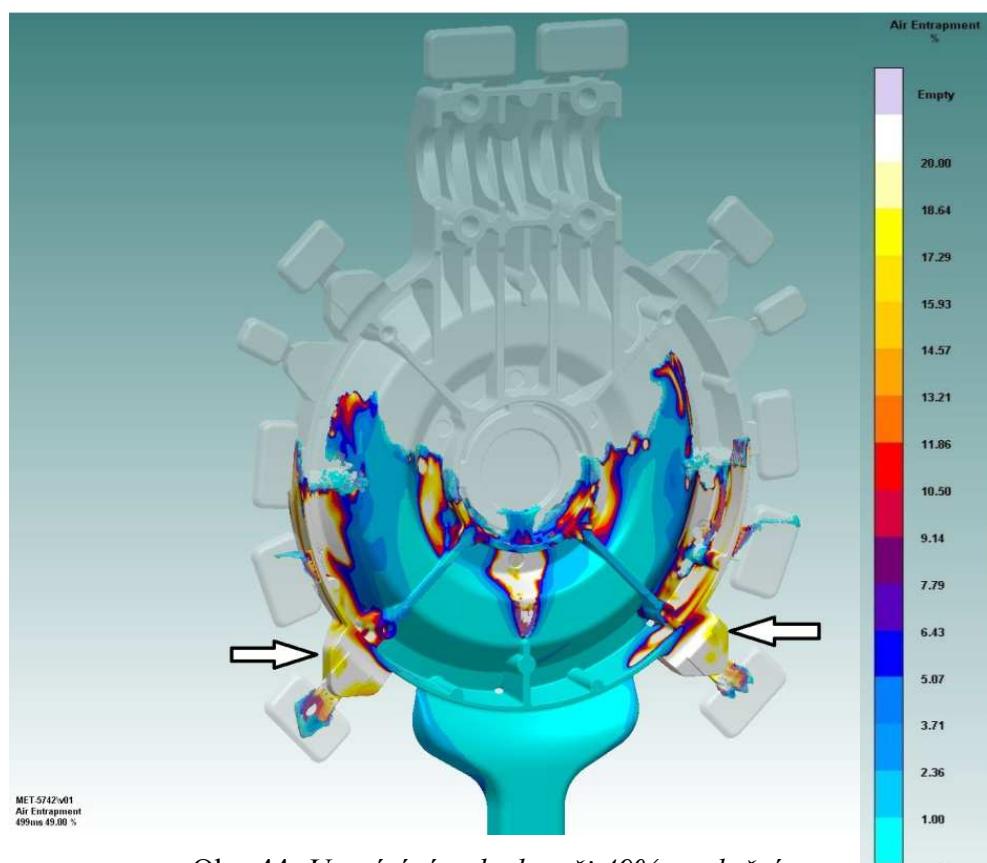
Obr. 43: *Trasování taveniny v $t=0,03$ s*

3.9.2 Uzavírání vzduchu v tavenině

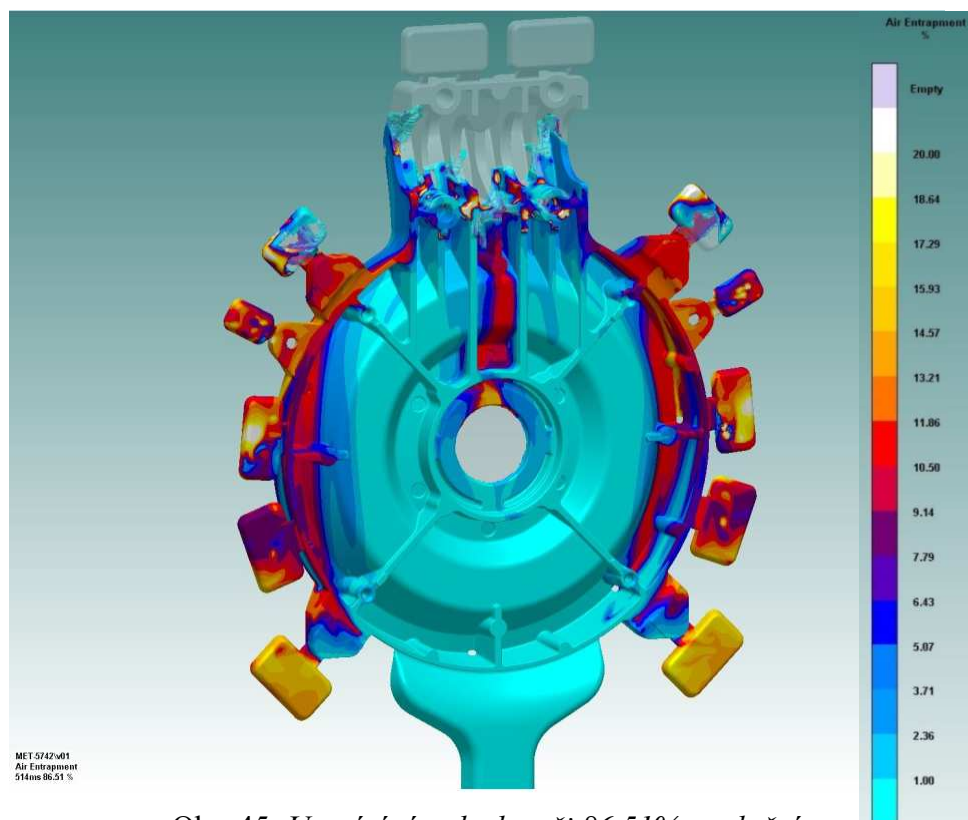
V této kapitole je vyhodnoceno procentuální množství vzduchu uzavřeného v dutině formy.

Z obr. 44 při 49% naplnění dutiny formy je patrné, že první výstupky za vtokem odlitku v sobě koncentrují taveninu s velkým množstvím uzavřeného vzduchu. Ve výstupku bude tavenina s uzavřeným vzduchem jistě vířit a tím pádem se bude uzavřený vzduch vracet do tvaru a pokračovat směrem po obvodu, což je nakonec patrné na obr. 45.

Ve středové části odlitku také dochází k uzavírání vzduchu. Středový proud zanechává při obtékání středového tvaru místo, kde se uzavírá vzduch, viz obr. 45.

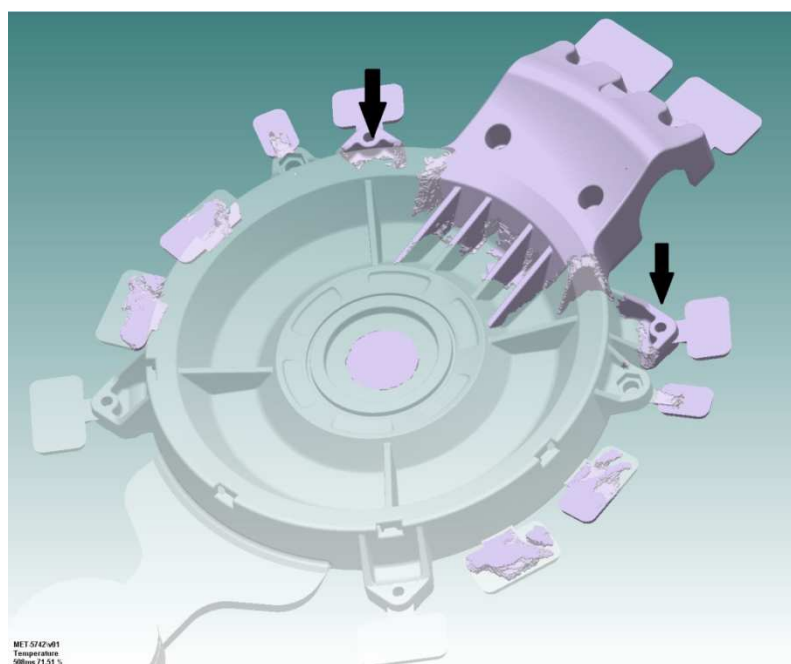


Obr. 44: Uzavírání vzduchu při 49% naplnění

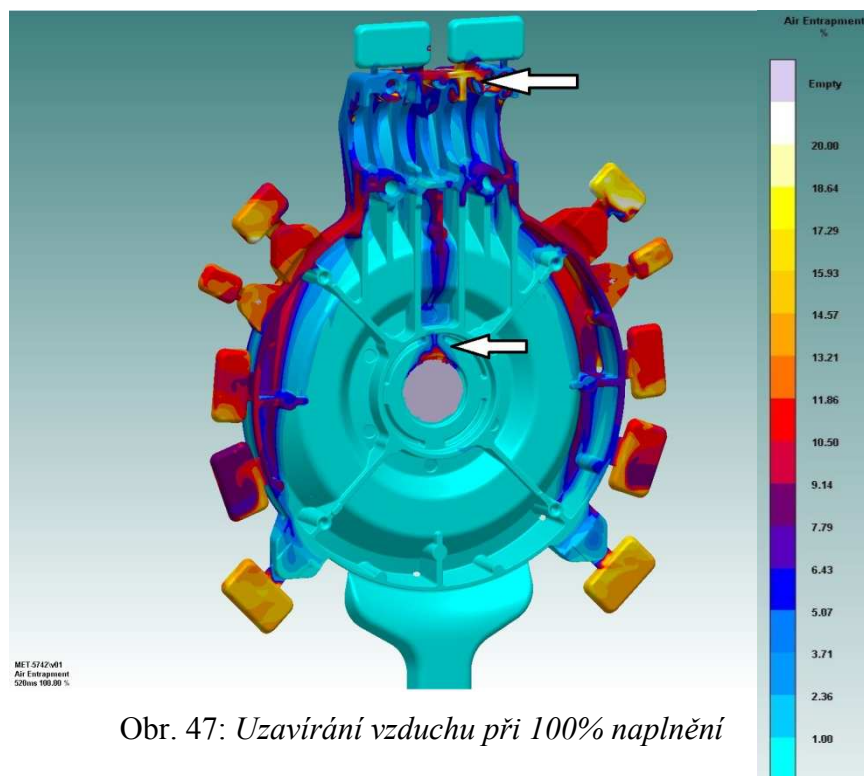


Obr. 45: Uzavírání vzduchu při 86,51% naplnění

Obr. 46 názorně ukazuje uzavírání vzduchu při 71% naplnění dutiny formy. Uzavíraný vzduch je na obrázku uveden jako neprůhledná část tvaru. Obvodový proud v tomto čase zanechává horní výstupky odlitku nezaplňené a pokračuje směrem k horní žebrované části odlitku. Vyplnění výstupků je nepravidelné a kvůli nedostatečně velkému přetoku se uzavírá vzduch.



Obr. 46: Uzavírání vzduchu při 71% naplnění



Obr. 47: Uzavírání vzduchu při 100% naplnění

Při působení dotlaku dochází ke stlačování vzduchu. Hodnoty na stupnici vpravo je tedy nutné vydělit číslem 5.

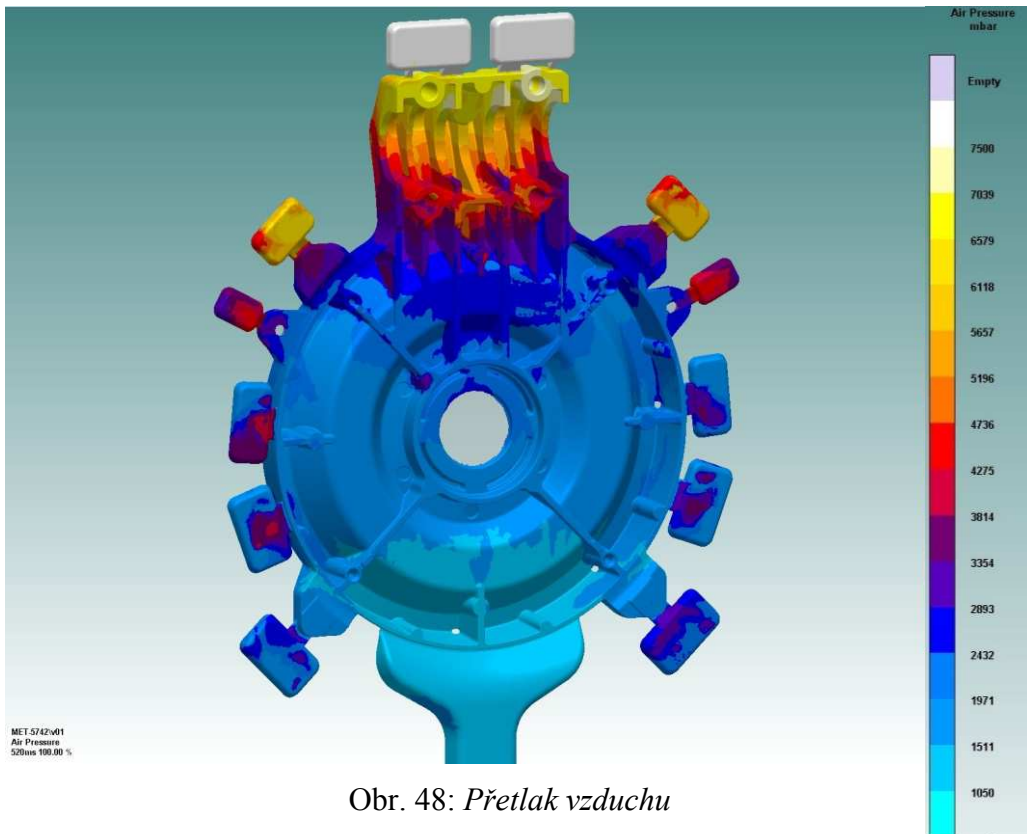
Ve vrchní části odlitku se dle obr. 47 hromadí vzduch ve tvaru mezi přetoky, protože při plnění vrchní části odlitku dojde k tomu, že proud před plným zalitím tvaru obě propuštění do přetoků zalije taveninou. Tvar uprostřed však ještě obsahuje vzduch, který se tam uzavře.

Za středovým otvorem dochází k uzavírání vzduchu v místě, kde se při obtékání oba proudy střetávají. Uzavřený vzduch se při postupném zaplňování formy přemisťuje do vrchní části přes středová žebra, ale vzhledem k zaplnění vrchního tvaru vzduch nemá možnost být uvolněn ani do přetoků. Lze proto očekávat vysokou porezitu po celé délce tvaru vyznačeném mezi šipkami na obr. 47.

Dále je také patrné, že obvod včetně výstupků odlitku je nedostatečně odvzdušněn, protože výstupky stále obsahují poměrně velké množství uzavřeného vzduchu, viz obr. 47. V tohoto důvodu je třeba odvzdušnění upravit.

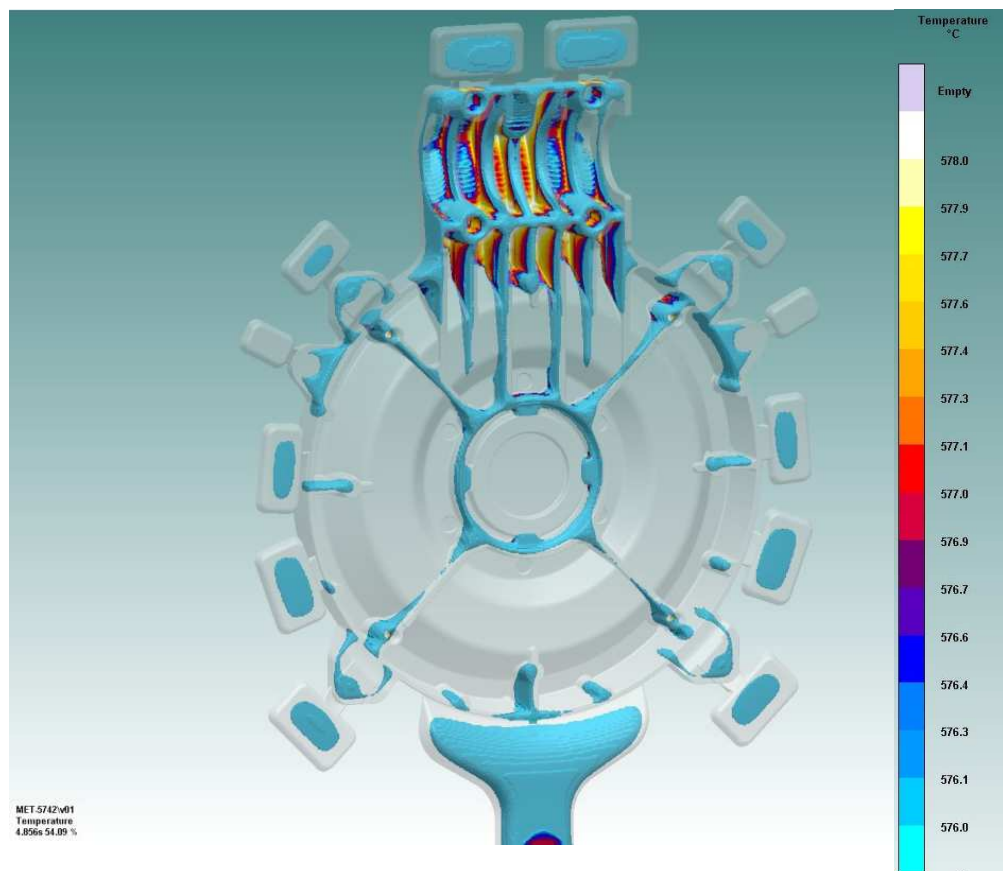
3.9.3 Přetlak vzduchu ve formě

Z tohoto kritéria je patrné, že přetlak vzduchu se při plnění dutiny formy dostává nad kritickou hodnotu 4000 milibarů především v horní části odlitku, která se plní jako poslední. Je to zřejmě z důvodu nedostatečného odvzdušnění. Bude zde třeba doplnit nebo zvětšit odvzdušnění, aby nedocházelo k porezitě.



Obr. 48: *Přetlak vzduchu*

3.9.4 Tuhnutí odlitku



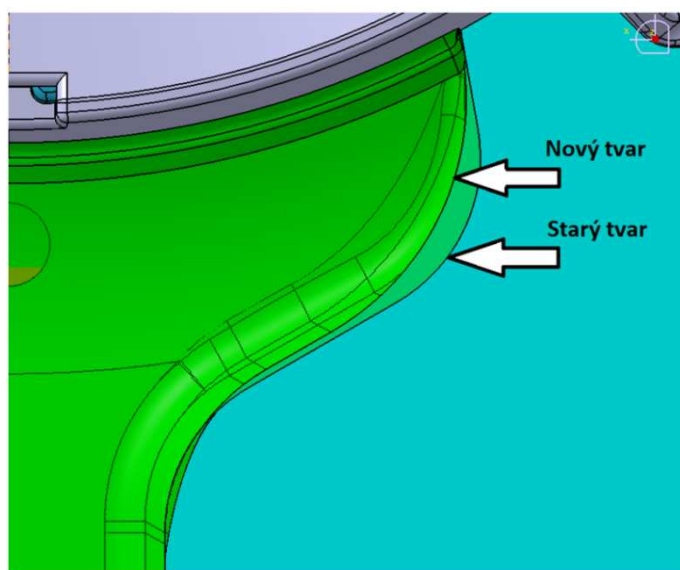
Obr. 49: *Teplota při tuhnutí v čase $t=4,856$ s*

Toto kritérium ukazuje teplotní rozložení při tuhnutí odlitku. Na obr. 49 jsou barevně vyznačena místa, kde se nacházejí teplotní uzly. V horní středové části odlitku se nachází značný teplotní uzel, ve kterém po zatuhnutí velmi pravděpodobně dojde k výskytu staženin. Aktivně lze působit dotlakem pouze 3 vteřiny. V okamžiku zatuhnutí nařiznutí už není možné místa zaplnit.

3.10 Realizace úpravy návrhu

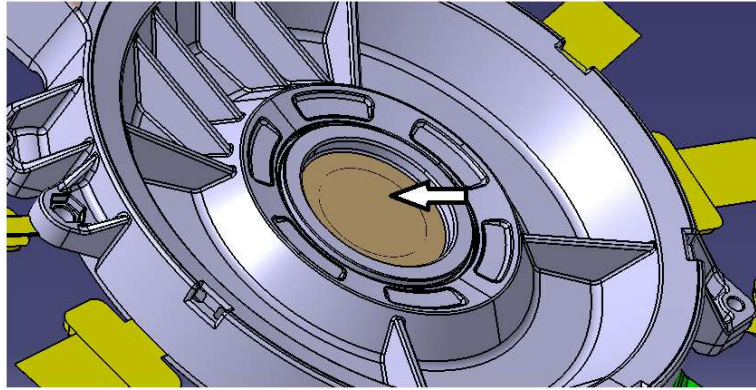
Z výsledku simulačního výpočtu vyplývá, že je nutné provést optimalizaci návrhu, která bude zahrnovat úpravu geometrie vtoku a úpravu systému přetoků s odvzdušňovacími pásky. Úpravy jsou následující:

- Výsledky výpočtu simulace prokázaly, že předchozí tvar způsoboval turbulentní proudění, z čehož vyplývá, že nebyl vhodně navržen. Tvar rozšíření vtokového kanálu k nařiznutí byl upraven tak, aby při proudění taveniny nedocházelo k víření taveniny. Po úpravě se vtokový kanál směrem od tablety k nařiznutí rozšiřuje plynuleji, viz obr. 50.



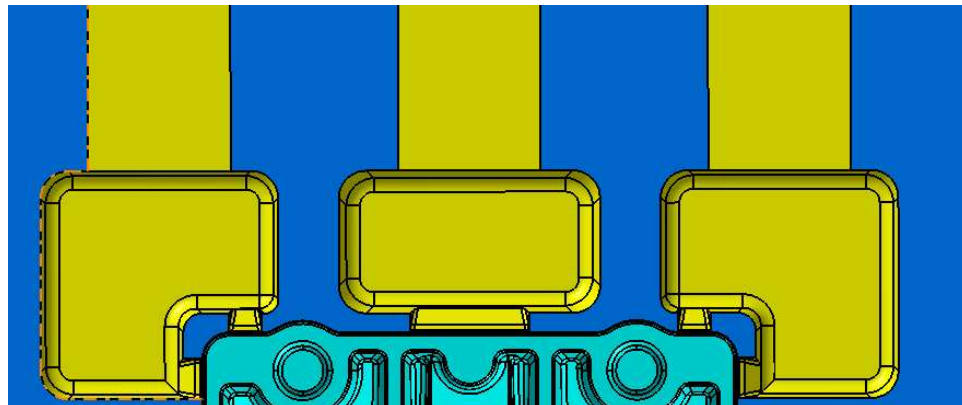
Obr. 50: Úprava tvaru vtoku před nařiznutím

- Riziku porezity za středovým tvarem odlitku, viz obr. 47, se předešlo nastavením 0,3 mm silné blány, která bude součástí přídatku na obrábění plochy, označené červeně na obr. 27 - vpravo. Tavenina bude proudit vzniklou mezerou a nebude vznikat mrtvé místo za středovým tvarem. Blána bude při obrábění plochy a průměru otvoru odstraněna.



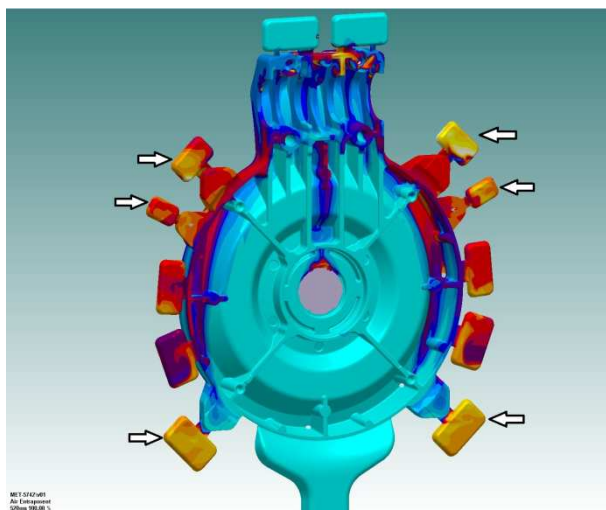
Obr. 51: Úprava středu

- Ze simulace vyplývá, že je třeba upravit odzdušnění především ve vrchní části odlitku. Přetoky vrchní části odlitku musely být objemnější, a proto byly vytvořeny dva přetoky po kraji a jeden uprostřed, aby byla možnost připojit další pásek, čímž by se určitě dosáhlo vytlačování většího objemu vzduchu. Obr. 52 ukazuje, jakým způsobem se změnilo rozložení přetoků v horní části odlitku. Touto úpravou se zvětšil objem přetoků v této oblasti o 190% a výkon odzdušnění horní části o 50%.



Obr. 52: Úprava přetoků horní části

- V bočních výstupcích odlitku se dle obrázku 47 soustředí uzavřený vzduch v maximálním podílu 12%. Při zvýšení objemu přetoků za výstupky lze očekávat, že se do přetoků odplaví více taveniny s uzavřeným vzduchem. Proto hloubka a tím i objem přetoků označených na obr. 53 byla na základě zkušeností zvětšena o 50%.



Obr. 53: Úprava bočních přetoků

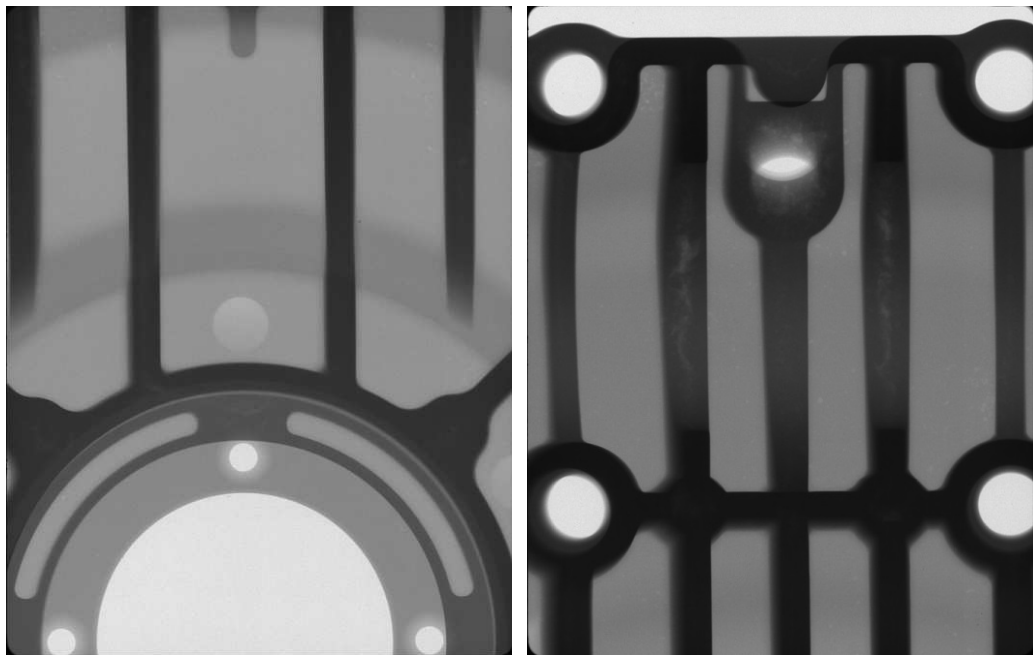
3.12 Vzorkování

Po úpravě návrhu konstrukce formy byla forma vyrobena a řádně proměřena. Forma byla usazena na stroj Del casting CLH 750.02 se studenou horizontální plnicí komorou, automatickým dávkovacím systémem a robotickou paží pro odebrání výpadu z formy. Na základě stanovených technologických parametrů byla odlita zkušební série 50 kusů odlitek.



Obr. 54: Výpad odlitku Příruba antény

Zkušební vzorky byly podrobeny kontrolnímu měření předepsaných rozměrů na 3D měřicím přístroji Mitutoyo a poté kontrolovány na rentgenu. Na obrázcích 55 jsou zobrazeny rentgenové snímky. Na levém snímku je zobrazena oblast za středovou částí odlitku, kde dle simulačního výpočtu docházelo k tvorbě mrtvého místa, které většinu času plnění dutiny formy uzavíralo vzduch. Na snímku je možné pozorovat, že po úpravách se v této oblasti již porezita nenachází. Na snímku pravém je zobrazena vrchní část odlitku. Zde bylo dle simulačního výpočtu uzavíráno velké množství vzduchu. Po úpravě přetoků této oblasti se v prostředních žebrech odlitku stále nachází souvislá porezita v maximální velikosti 0,3 mm. Tento vzduch je s velkou pravděpodobností vzduch, který se uzavíral za středovou částí a přesunul se do horní části. Vzhledem k tomu, že výrobek nemá žádný požadavek na porezitu, lze kvalitu odlitku akceptovat.



Obr. 55: RTG snímek střední části (vlevo) a horní části odlitku (vpravo)

4 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl návrh způsobu zaformování a návrh vtokového, odvzdušňovacího, vyhazovacího a temperačního systému pro odlitek „Příruba antény“ ze slitiny AlSi9Cu3(Fe). Odlitek byl odléván na tlakovém licím stroji se studenou horizontální komorou.

V teoretické části byl popsán princip této technologie. Dále byl popsán princip strojů pro tlakové lití včetně popisu uzavíracího mechanismu, kde se stanovuje velikost licího stroje, a lisovacího mechanismu, kde jsou popsány jednotlivé licí fáze. Byla popsána konstrukce forem včetně hlavních zásad jejich návrhu a výroby. Byly stanoveny proporce formy s ohledem na rozměry odlitku. Hlavní pozornost byla věnována návrhu vtokového a odvzdušňovacího systému. V kapitole Vtokový systém byl popsán návrh naříznutí a tvar vtokové kanálu od tablety po naříznutí. V kapitole Odvzdušňovací systém byla popsána funkce odvzdušnění a jeho návrh. Nakonec byl popsán systém vyhazovací a temperační včetně zásad jejich návrhu.

V rámci experimentu byl s ohledem na tvar odlitku navržen způsob a směr zaformování. Dle konceptu návrhu byla provedena volba tlakového licího stroje. Na základě výběru stroje bylo předběžně vypočítáno, zda je stroj schopen bezpečně odlévat. Vzhledem k rozměrům odlitku byly stanoveny základní rozměry tlakové licí formy. Poté byly navrženy parametry vtokového a odvzdušňovacího systému, kde se na základě stanovených parametrů opět provedla kontrola bezpečnosti volby stroje. Nakonec bylo navrženo umístění vyhazovacího a temperačního systému.

Optimalizace návrhu byla provedena pomocí simulačního výpočtu softwarem Magmasoft. Na základě výsledku simulace byla provedena úprava geometrie vtoku. Byl upraven systém přetoků, aby se dle výsledků simulace omezil výskyt porezity v největší možné míře. Po úpravě návrhu byla forma vyrobena, proměřena a zkušebně odlita.

Po kontrole zkušebních vzorků měřením rozměrů na 3D měřicím přístroji a po prozkoumání vnitřní kvality z hlediska porezity bylo shledáno, že výrobky splňují specifika dané zákazníkem. Odlitky byly uvolněny k sériové výrobě.

5 SEZNAM LITERATURY

- [1] RAGAN, Emil a kol. *Liatie kovov pod tlakom*. 1. vyd. Prešov: Fakulta výrobních technológií, 2007. ISBN 978-80-8073-979-9.
- [2] Slévárenská výroba v zahraničí. *Slévárenství*. 2017, LXV(1-2), 59-60. ISSN 0037-6825. Dostupné také z:
http://www.slevarenstvi.svazslevaren.cz/download/1_2-2017.pdf
- [3] ŠEBL, Josef. *Formy pro lití kovů pod tlakem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [4] ČSN 22 8601. *Zásady pro navrhování tlakové lici formy*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1984.
- [5] Products: Pressure Die Casting. Fondarex: Swiss Vacuum Technology [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.fondarex.com/en/>
- [6] BECK, Christian. Kurz technologie. Uzwil: Bühler Druckguss AG, 1998. *Podklady firmy Bühler Druckguss AG pro školení konstruktérů a technologů lití pod tlakem*.
- [7] <http://www.hillandgriffith.com/die-casting-news/pushing-for-larger-dimension-diecastings-0>
- [8] RUDOLF, Bedřich. *Tvářecí stroje I - Stroje pro lití kovu pod tlakem a zpracování plastických hmot*. České vysoké učení technické. První vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., Praha, 1969.
- [9] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6
- [10] Standart elements for molds. *CECHO* [online]. CECHO – Bohumil Cempírek s.r.o., © 2013 [cit. 2017-06-27]. Dostupné také z: <http://www.cecho.cz/media/files/Standard%20elements%20for%20molds.pdf>
- [11] Hliníkové slitiny. *HP Steel* [online]. HP STEEL s.r.o., © 2017. [cit. 2017-06-27]. Dostupné také z: <http://www.hpsteel.cz/barevne-kovy/hlinikove-slitiny.html>
- [12] <http://www.frechusa.com/cold-chamber-machines/>
- [13] HYNEK, Martin a kol. *Tlakové lití hliníku*. Fakulta strojní Západočeské univerzity[online]. Plzeň: Fakulta strojní, Západočeská univerzita. [cit. 2017-06-27] Dostupné také z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_01_publicace/KA01-Tlakove-liti-hliniku.pdf

- [14] Strojírenské technologie. *DocPlayer* [online]. DocPlayer.cz, © 2017. [cit. 2017-07-28]. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/17833505-Strojirenske-technologie.html>
- [15] ANDREONI, Luigi, CASE Mario a Giorgio POMESANO. *The pressure diecasting process*. První vydání. Brescia (Italy): EDIMET, 1996, 116 s. ISBN 88-86259-13-1.
- [16] KOLMAČKA, Marek. *Technologie odlévání slitin hliníku - Kovolit*. Modřice, 2012, 10 s. Interní dokument firmy Kovolit a. s.
- [17] ČSN 22 8603. *Formy tlakové lící a směrnice pro výpočty*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1983