



Diplomová práce

Návrh vtokové soustavy vysokotlakého odlitku ze slitiny Al-Si s nízkou hmotností výpočtem s využitím CAx metod

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Michaela Majerníková

Vedoucí práce:

prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Návrh vtokové soustavy vysokotlakého odlitku ze slitiny Al-Si s nízkou hmotností výpočtem s využitím CAx metod

Jméno a příjmení:

Bc. Michaela Majerníková

Osobní číslo:

S21000215

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Zadávací katedra:

Katedra strojírenské technologie

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou výroby odlitků ze slitin hliníku metodou vysokotlakým litím. Zaměřte se především na specifika konstrukce vtokové soustavy.
- 2) Vyberte odlitek malé hmotnosti, proveďte rozbor jeho výroby, včetně vzniku možných vad (stroj, tlakové parametry stroje, teplota formy, atd., bylo by dobré na tomto odlitku zdokumentovat i jeho strukturu a porozitu).
- 3) Proveďte výpočet návrhu vtokové soustavy tohoto odlitku, volte několik různých možností provedení výpočtu.
- 4) Zhodnoňte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy: 50 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] VALECKÝ, J. a kol. Lití pod tlakem. 1. vyd. Praha 1963.
- [2] RAGAN, E. Proces liatia pod tlakom. 1. vyd. FVT TU Košice so sídlom v Prešove, Prešov 1997.
- [3] RAGAN, E. a kol. Liatie kovov pod tlakom. 1. vyd. Prešov, 2007.
- [4] UDROIU, R. Coumputer – aided Technologies: Application in Engineering and Medicine. *Intechopen*, 2016.
- [5] MACHUTA, J. a I. NOVÁ. Slévárenské formy. 1. Vyd. TUL, Liberec, 2014.
- [6] MICHNA, Š., NOVÁ, I.: Technologie a zpracování kovových materiálů. ADIN, Prešov, 2008, s. 326, ISBN 978-80-89244-38-6-9.
- [7] VETIŠKA, A. a kol. Teoretické základy slévárenské technologie. 1. vyd. SNTL Praha
- [8] Články v odborných časopisech.

Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 30. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

4. května 2023

Bc. Michaela Majerníková

Návrh vtokové soustavy vysokotlakého odlitku ze slitiny Al-Si s nízkou hmotností, výpočtem a využitím CAx metod

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh vtokové soustavy odlitku na bázi slitiny Al-Si vyráběného metodou lití kovů pod tlakem. Pro konkrétní typ odlitku jsou v smyslu metodiky navrhování vtokových soustav pro součásti lité pod tlakem provedeny výpočetní návrhy pěti vtokových soustav při využití proměnných doporučených variant návrhu průřezu vtokového nařiznutí a vstupních parametrů výpočtu. Po provedení výpočetního návrhu jsou využitím CAD systému vyhotoveny 3D modely, na základě kterých jsou zhodnoceny ukazatele využití materiálů. Posouzením hydrodynamických charakteristik proudu taveniny jsou vyvozeny předpoklady pro jakostní ukazatel odlitku, kterým je zvolen podíl zachycení plynů v objemu odlitku. Ten je hodnocen v místech, které jsou uvažovány, s ohledem na proudění taveniny a další opracování odlitků, jako kritické. Pro hodnocení zahlcení plynů v objemu odlitků je využito numerické simulace v programu MagmaSoft. V závěrech práce jsou vyvozeny závislosti mezi jednotlivými konstrukčními a technologickými, procesními a ekonomickými ukazateli.

Klíčová slova

Technologie lití kovů pod tlakem, Vtoková soustava, Návrh vtokových soustav, Hliníkové slitiny, Zachycení plynů

The design of the high-pressure low weight Al-Si alloy die cast gating system with calculation and use of CAx methods

Annotation

The diploma thesis is focused on the gating system design for a silumin based cast produced by the high pressure die casting. For a specific type of cast, in accordance with the gating systems design methodology for high pressure die casting components, calculation drafts of five gating systems are performed while using variables of the recommended ingate cross-section designs variants and the input parameters of the calculation. Subsequently after the computational draft, 3D models are designed using CAD system, based of which the indicators of material use are assessed. Appraising the hydrodynamic characteristics of the melt flow, assumptions are derived for the quality indicator of the cast, which i used to select the proportion of the gas entrapment in the cast volume. It is assessed as critical in locations that are considered, regarding the melt flow and further processing of the casts. Numerical simulations in MagmaSoft program are used for gas entrapment evaluation in the casts volume. In conclusion, dependencies between individual design and technological, process and economic indicators are derived.

Key words

High pressure die casting technology, Gating system, gating system design, Aluminium alloys, Gas Entrapment

Poděkování

Upřímně bych chtěla poděkovat paní prof. Ing. Ivě Nové CSc. za skvělé vedení nejen při zpracovávání diplomové práce ale také během celého magisterského studia. Byla a bude mi nadále velkým vzorem. Dále velké dík patří i mé rodině, která mě podporovala.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	10
1. Úvod.....	12
2. Teoretická část práce	14
2.1. Technologie lití kovů pod tlakem.....	14
2.2. Stroje pro lití kovů pod tlakem.....	15
2.2.1. Tlakové lící stroje s teplou komorou.....	15
2.2.2. Tlakové lící stroje se studenou komorou.....	16
2.2.3. Optimální velikost tlakového lícího stroje	17
2.3. Formy pro lití kovů pod tlakem.....	18
2.3.1. Základní části forem.....	19
2.3.2. Konstrukční řešení forem	22
2.3.3. Materiály pro výrobu forem	26
2.3.4. Životnost forem	26
2.3.5. Požadavky na materiál pro výrobu forem	28
2.4. Konstruování vtokových soustav	29
2.4.1. Hydrodynamické základy proudění tekutého kovu.....	29
2.4.2. Analýza proudění tekutého kovu.....	33
2.4.3. Výběr místa pro umístění vtokového nařiznutí a odvzdušňovacího systému	34
2.4.4. Určení doby plnění tvarové dutiny formy	35
2.4.5. Určení rychlosti proudění taveniny ve vtokovém nařiznutí	39
2.4.6. Určení objemu přetokových jamek	40
2.4.7. Určení průřezu vtokového nařiznutí.....	40
2.4.8. Určení průřezu vtokových kanálů	42
2.4.9. Určení geometrických charakteristik a konstrukčního řešení částí vtokového systému	42
3. Experimentální část práce	47
3.1. Charakteristika odlitku	47

3.1.1.	Rozbor výroby zvoleného odlitku	48
3.1.2.	Charakteristiky chemického složení a makrostruktury vyráběného odlitku	50
3.2.	Výpočetní návrh vtokové soustavy	51
3.2.1.	Určení doby plnění tvarové dutiny vysokotlaké formy	52
3.2.2.	Určení rychlosti taveniny ve vtokovém nařiznutí	52
3.2.3.	Určení objemu a hmotností přetokových jamek.....	53
3.2.4.	Určení průřezu vtokového nařiznutí.....	53
3.2.5.	Určení rozměrů vtokového nařiznutí.....	55
3.2.6.	Určení rozměrů vtokové soustavy.....	55
3.2.7.	Základní tvar a konstrukční rozdíly geometrie vtokových kanálů plynoucích z výpočetního řešení	57
3.2.8.	Porovnání spotřeby materiálu pro jednotlivé varianty výpočetního návrhu.....	58
3.2.9.	Určení procentuálního vyplnění plnicí komory.....	59
3.2.10.	Určení potřebné uzavírací síly stroje.....	59
3.3.	Analytické posouzení proudění taveniny ve vtokové soustavě.....	60
3.3.1.	Určení rychlosti lisovacího pístu.....	60
3.3.2.	Určení rychlosti taveniny při přechodu vtokovými kanály	60
3.3.3.	Určení typu proudění taveniny ve vtokových kanálech	61
3.3.4.	Určení režimu plnění tvarové dutiny formy	62
3.3.5.	Posouzení hydrodynamických poměrů ve vtokové soustavě	63
3.4.	Hodnocení výpočetního návrhu využitím numerické simulace	64
3.4.1.	Vyhodnocení zachycení plynů v objemu odlitku	66
4.	Vyhodnocení výsledků a jejich diskuse	71
	Závěr	78
	Seznam použité literatury	81
	Přílohy.....	83

Seznam použitých symbolů a zkratek

% - procento

ν_k – kinematická viskozita [Pa·s]

°C – stupeň Celsia

3D – three dimension

CAD – computer and designed

CB – šířka vtokového kanálu [mm]

cm– centimetr

CT – výška vtokového kanálu [mm]

ČSN – česká státní norma

d – průměr potrubí, v kterém proudí kapalina [m]

d_H – hydraulický průřez, [mm]

DIN – deutsche industrie norm (německá národní norma)

d_p – průměr plnicí komory stroje [m]

e – převažující tloušťka stěny odlitku [m]

F_u – maximální uzavírací síla [N]

F_v – lisovací síla [N]

g – gram

G – součet hmotnosti odlitku a přetoků

h_{ch} – charakteristická tloušťka stěny odlitku [m]

K – empiricky odvozená konstanta související s vodivostí formy [s/m]

k – koeficient zvětšení průřezu vtokového kanálu [m²]

kč – koruna česká

kg – kilogram

kN – kilo newton

kW – kilowolt

m– metr

max - maximum

min – minimum

mm - milimetr

MN – mega newton

m_O – hmotnost odlitku [kg]

MPa- mega pascal

n – počet odlitků, do kterých je z kanálu vedena tavenina
NADCA - North American Die Casting Association
obr – obrázek
 O_K – obvod kanálu [m]
 R – poloměr válcové plochy/odlitku [m]
 R_e – Reynoldsovo číslo
 $R_{krit.}$ – Reynoldsovo číslo kritické
 S - dovolené hodnoty ztuhnutí materiálu [%]
 S – dovolené procento ztuhnutí taveniny na konci plnění tvarové dutiny formy [%]
 s - sekunda
 S_F – plocha průřezu dutiny ve formě [m²]
 S_K – průřez kanálu, [m²]
 S_{KN} – plocha n -tého slučovaného vtokového kanálu [m²]
 S_{KZ} – plocha vtokového kanálu po sloučení [m²]
 S_{Omax} – max. plocha průmětu odlitku v dělicí rovině včetně vtoků a přetoků [m²]
 S_P – průřez lisovacího pístu [m²]
 S_{PK} – plocha průřezu plnicí komory [m²]
 S_Z – plocha vtokového naříznutí [m²]
 t – čas plnění tvarové dutiny formy [s]
tab – tabulka
 T_f – teplota formy [°C]
 T_{LIK} – teplota likvidu [°C]
 T_Z – teplota taveniny v zářeze [°C]
 v – rychlost proudění kapalin [m/s]
 V – součet objemu odlitku a přetoků [m³]
 v_{p2} – rychlost lisovacího pístu v druhé fázi lisování, [m.s⁻¹]
 v_t – rychlost ve vtokovém naříznutí
 v_z – rychlost proudu taveniny ve vtokovém naříznutí [m.s⁻¹]
 v_z – rychlost taveniny ve vtokovém naříznutí, [m.s⁻¹]
 Z – konverzní faktor tuhých částic související s rozsahem tuhnutí [°C/%]
 α – přední náběhová hrana [°]
 α – úhel sklonu stěn vtokového kanálu [°]
 β – zadní náběhová hrana [°]
 ρ – hustota slitiny [kg.m⁻³]

1. Úvod

Lití kovů pod tlakem je metoda přesného lití nejvíce se blížící ideální snaze přeměny základního materiálu na hotový výrobek. Odlitky lité pod tlakem se vyznačují vysokou přesností geometrických rozměrů, hladkým povrchem, tenkými stěnami a odpovídajícími mechanickými vlastnostmi. Odpovídající mechanické vlastnosti odlitků souvisí s jejich jemnozrnnou strukturou. Neblahou vlastností odlitků vyráběných technologií vysokotlakého lití je jejich vnitřní porozita, která souvisí s technologickým procesem, resp. s přítomností plynů v tavenině, čímž je výrazně ovlivňována vnitřní kvalitu odlitků.

Proces lití pod tlakem je nutno chápat jako vzájemně korelující mechanismus konstrukce tlakového liciho stroje, návrhu formy a nastavení technologických parametru lití. Z toho důvodu je nutné se na problematiku snižování porozity odlitků zaměřit parciálně v jednotlivých návrhových fázích, a najít nejvýhodnější průnik jednotlivých řešení.

V současné době jsou se snižováním porozity diskutovány technologické parametry lití, zejména odlévací rychlost pístu a dotlak. Nastavením vhodné hodnoty dotlaku je možné příznivě ovlivnit rozložení a velikost porozity. Po ztuhnutí taveniny ve vtokové soustavě (nařiznutí) se velikost póru mírně zvyšuje, což souvisí se stahováním taveniny během jejího tuhnutí. Proti příznivému působení zvýšené hodnoty dotlaku je potřeba vzít na zřetel fakt, že extrémním zvyšováním hodnoty dotlaku se snižuje životnost (trvanlivost) formy.

Odlévací rychlost pístu podmiňuje řadu technologických faktorů, jako např. hydrodynamické podmínky proudění kovu. Vyšší rychlost pístu mění charakter proudění ve vtokovém kanálu z laminárně-planárního na turbulentně-neplanární, což způsobuje nesouvislost proudu taveniny. Snižováním rychlosti pístu lze dosáhnout uklidnění proudu taveniny, čímž je dosaženo souvislého a pravidelného čela proudu taveniny v průřezu vtokového kanálu. Na druhé straně, přílišné prodloužení liciho cyklu při nízké rychlosti pístu vede k poklesu teploty taveniny, což může vést k chybám jako je nedolití, zavaleniny a studené spoje. Rychlost lisovacího pístu je současně přímo úměrná rychlosti taveniny ve vtokovém nařiznutí. Ta přímo určuje režim plnění tvarové dutiny formy.

Nehledě na nastavení technologických parametrů lití, klíčovým faktorem k zajištění kvality odlitků je návrh vtokového systému. Obecně platí, že návrh vtokové soustavy má

umožnit rychlé vyplnění tvarové dutiny formy tekutým kovem tak, aby docházelo k proudění kovu skrz dutinu formy, pokud možno, po přímých drahách bez náhlých změn směru toku pod velkými úhly. Zachytávání vzduchu taveninou ve fázi plnění je jednou z prvotních příčin porozity odlitků. Správný návrh vtokového systému dokáže ovlivnit režim plnění dutiny formy. Je prokázáno, že přibližně 90 % defektů odlitků litých pod tlakem je zapříčiněno chybami návrhu vtokového systému.

Právě problematice návrhu vtokových soustav je věnována tato diplomová práce s názvem: „Návrh vtokové soustavy vysokotlakého odlitku ze slitiny Al-Si s nízkou hmotností, výpočtem a využitím CAx metod“. Teoretická část práce se věnuje problematice lití kovů pod tlakem, konstrukci strojů lití pod tlakem a permanentních forem, jako i jejich konstrukčním a funkčním prvkům. Důraz teoretické části práce je kladen na metodiku navrhování vtokových soustav pro součásti lité pod tlakem, která slouží jako podklad pro vypracování části aplikační.

V experimentální části práce je proveden výpočetní návrh pěti variant řešení vtokového systému formy v závislosti na proměnném výpočtu průřezu vtokového nařiznutí a vstupních parametrů výpočtu. Pomocí CAD programu jsou vytvořeny digitální dvojčata návrhu, na základě parametrů, kterých jsou vyvozovány dopady metody výpočtu na materiálové zatížení výroby. Současně jsou hodnoceny hydrodynamické poměry taveniny proudící ve vtokových kanálech, po jejich posouzení jsou vyvozeny předpoklady o jakosti odlitku. Ta je vyhodnocována využitím programu Magmasoft. Ta je hodnocena, i s ohledem na posouzení vlivu změny geometrických rozměrů kanálů, pomocí ukazatele zachycení plynů v objemu odlitku, sledovaného ve vybraných místech odlitku.

2. Teoretická část práce

2.1. Technologie lití kovů pod tlakem

Lití kovů pod tlakem je slévárenská technologie, při které je roztavený kov z plnicí dutiny formy dopravován působením vysokého tlaku a rychlosti do tvarové dutiny trvalé formy, kde následně vytuhne na výsledný odlitek. Rychlost pístu působícího na taveninu se pohybuje řádově v jednotkách metrů za sekundu. Její působením je tavenina dopravována z plnicí komory vtokovou soustavou do dutiny formy. Přejít mezi vtokovou soustavou a vlastní dutinou formy tvoří vtokové naříznutí. V naříznutí se rychlost proudu taveniny zvyšuje na několik desítek metrů za sekundu. Vysoká rychlost proudu taveniny způsobuje velmi krátkou dobu plnění dutiny formy, která je rovná jednotkám a desítkám milisekund. Tato metoda plnění dutiny formy umožňuje výrobu tenkostěnných, tvarově náročných odlitků s vysokou rozměrovou přesností a s přesným kopírováním povrchového reliéfu dutiny formy, [1][2][3].

Mezi výhody lití kovů pod tlakem patří:

- a) možnost výroby odlitků v nízkých rozměrových tolerancích, často bez nutnosti obrábění;
- b) hladký povrch odlitků;
- c) dobré mechanické vlastnosti odlitků vzhledem na jemnozrnnou strukturu;
- d) možnost výroby tenkostěnných odlitků;
- e) menší náklady na materiál;
- f) v odlitcích se dají předlévat otvory i velmi malých průměrů s malým dodatečným opracováním;
- g) možnost výroby součástí složitých tvarů;
- h) lehké použití zalitých vložek a jiných kovů a nebo některých nekovových materiálů;
- i) větší přesnost než při odlévání stejných slitin do písku, [1].

Mezi nevýhody lití kovů pod tlakem patří:

- a) velké náklady na výrobu formy;
- b) velké investice na stroje a zařízení;
- c) slitiny odlité pod tlakem mají menší tažnost;
- d) vzhledem na nebezpečí vytvoření povrchových bublin nemůže být odlitek odlitý pod tlakem použitý za vyšších teplot, než je tato teplota pro příslušné slitiny přípustná;
- e) maximální velikost odlitku je omezena velikostí stroje;

f) lití pod tlakem vyžaduje určité pracovní zkušenosti, [1].

2.2. Stroje pro lití kovů pod tlakem

Stroje pro vysokotlaké lití jsou poměrně velká zařízení, která musí vykazovat velkou tuhost, aby unesla poměrně hmotnou vysokotlakou formu a současně bylo možné aplikovat vysoké dotlaky. Dále stroje pro lití kovů pod tlakem musí zajišťovat:

- a) bezpečné uzavření formy;
- b) nastavení rychlosti a tlaku plněného tekutého kovu do dutiny tlakové licí formy;
- c) nastavení času tuhnutí odlitku;
- d) otevření formy;
- e) vysunutí jader;
- f) vyhození odlitku z formy, [4].

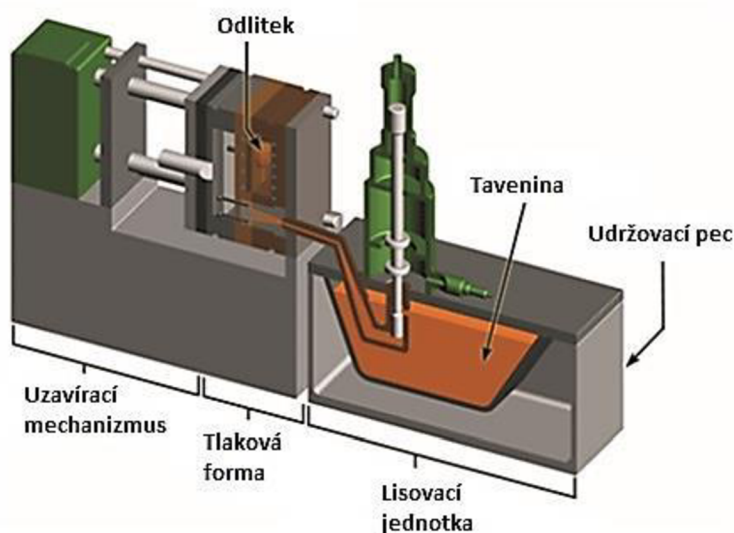
Podle technologického hlediska dělíme stroje podle toho, jestli je roztavený kov v trvalém nebo přechodném styku s plnicím ústrojím, ve kterém na slitinu působí tlak na:

1. Tlakové licí stroje s teplou komorou
 - a) s lisováním kovu pístem;
 - b) s lisováním kovu vzduchem.
2. Tlakové licí stroje se studenou komorou
 - a) s vertikálním lisovacím ústrojím;
 - b) s horizontálním lisovacím ústrojím, [5].

2.2.1. Tlakové licí stroje s teplou komorou

Stroje s teplou licí komorou (Obr. 1) jsou určeny pro odlévání slitin s nízkým bodem tání, tj. slitiny cínu, olova a zinku. V tomto typu strojů je tavící pec součástí stroje a roztavený kov je vytlačován z kelímku přímo do formy pístem nebo zalisováním tlakovým vzduchem o tlaku 2 – 7 MPa. Komora je zúžena v hrdle a je ukončena tryskou, tryska je přitlačena před vstřikem k pevné polovině formy, tedy k jejímu vstřikovacímu otvoru. Píst ve své výchozí (horní) poloze nepřekrývá vtokový otvor komory a přes tento otvor vteče roztavený kov z kelímku do komory. Pohybem pístu v komoře dochází k překrývání vtokového otvoru, čímž je zamezeno samovolnému přetékání kovu do komory. Čelem pístu je roztavený kov tlačěn přes trysku do dutiny formy. Nastane časová výdrž, která trvá několik sekund, během této prodlevy kov v dutině formy ztuhne na odlitek. Následuje vrácení pístu do výchozí polohy, přičemž se opět otevře vtokový otvor komory, která se plní zatékáním nové dávky roztaveného kovu a současně do ní stéká tekutý kov z hrdla.

Společně s tímto dějem se otevírá pohyblivá část formy, která s sebou unáší odlitek, který je vyhazovači uvolněný a obsluha stroje ho kleštěmi nebo jiným nástrojem vyjme a uloží na paletu. Jak je forma otevřená, dutina se ošetří postříkem maziva. Forma se uzavře a celý cyklus se opakuje, [4][5].



Obr. 1 Licí stroj s teplou komorou, [9]

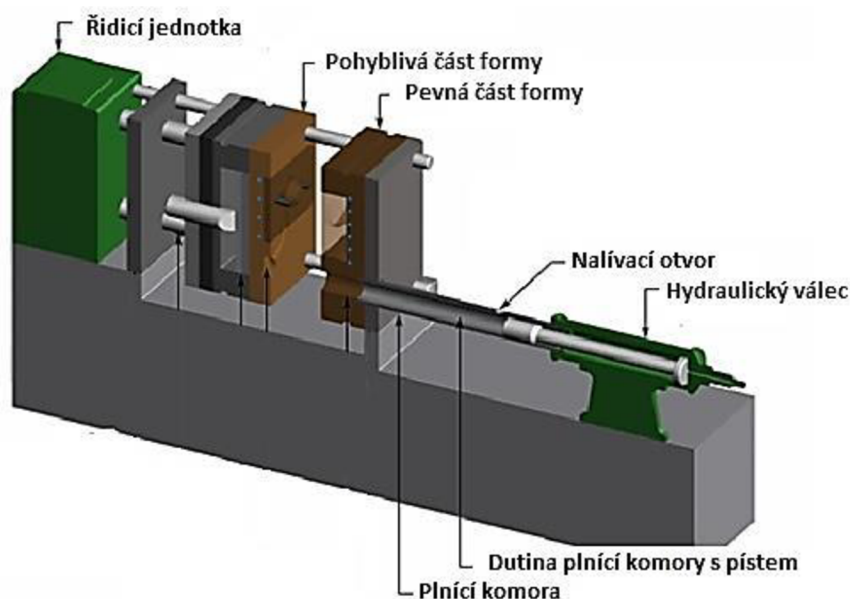
2.2.2. Tlakové lící stroje se studenou komorou

Stroje se studenou lící komorou jsou určeny pro slitiny s vyšší teplotou tání, tj. slitiny hliníku, hořčíku, mosazi a železa. V těchto typech strojů není udržovací pec s roztaveným kovem součástí stroje. Tato pec je postavena zvlášť a roztavený kov je dávkován z ní do komory stroje před každým zalisováním ručně lžící anebo lžící přídavného dávkovacího zařízení (pneumatická dávkovací směs).

Licí stroje se studenou vertikální komorou jsou složeny z vertikálně uloženého válce, trysky, lisovacího pístu a spodního pístu s pružinou. Píst je ve výchozí pozici vysunut nad komorou, do které je naléván roztavený kov. Působením pístu na tekutý kov při pohybu dolů je stlačena spodní píst, čímž se odkryje tryska a kapalný kov je přes ni vháněn do dutiny formy. Nastává časová výdrž, během které kov v dutině ztuhne. Píst se poté vrátí do výchozí polohy. Silou stlačené pružiny ukryté pod spodním pístem dochází k pohybu pístu v komoře, který stříhá tabletu kovu vzniklou vlivem tuhnutí v komoře a pak je z ní vyhozena ven. Následuje otevření komory a vyhození odlitku a ošetření dutiny formy nástřikem maziva. Forma se uzavře a cyklus se opakuje.

Licí stroje se studenou horizontální komorou (Obr. 2) pracují tak, že komora je uložena horizontálně a má otvor, do kterého je naléván roztavený kov. Lisovací píst se pohybuje

v komoře. Vnitřní otvor plnicí komory musí jít pevnou polovinou formy a do její dělicí roviny. Při nalévání kovu je lisovací píst v zadní poloze, aby byl nalévací otvor průchozí. Pohybem pístu v komoře je roztavený kov vtlačován do dutiny formy. Po ukončení lisování a časové prodlevy se forma otevírá a píst vysouvá tabletu kovu z plnicí komory. Píst se vrací do zadní polohy. Když je forma otevřená vyjme se odlitek a dutina formy se ošetří postříkem maziva. Pak se forma uzavře a cyklus se opakuje, [1][4].



Obr. 2 Lící stroj se studenou horizontální komorou, [3]

2.2.3. Optimální velikost tlakového lícího stroje

Optimální velikost tlakového lícího stroje pro výrobu kvalitních odlitků lze stanovit na základě několika faktorů. Mezi ně patří hmotnost odlitku, hmotnost vyplněných odvzdušňovacích jamek a vtokového systému. Je třeba zohlednit i velikost uzavírací síly stroje a potřebný měrný tlak na taveninu, který závisí na vlastnostech slitiny, tloušťce stěn a členitosti odlitku. Existují rychlé metody pro volbu vhodného tlaku, které lze využít.

Tab. 1 Doporučený měrný tlak na slitiny v závislosti na tloušťce stěn a členitosti odlitku, [2]

Tloušťka stěn a členitost odlitku	Slitina				
	Zn	Cu	Al	Mg	Fe
	Měrný tlak na slitinu [MPa]				
Tenkostěnný odlitek hladký bez žeber	25	50	70	80	60
Tenkostěnný odlitek značně členitý žebrovaný	30	60	80	90	70
Odlitek se střední tloušťkou stěn hladký bez žeber	25	50	70	80	60
Odlitek se střední tloušťkou stěn členitý žebrovaný	25	50	70	80	60
Tlustostěnný odlitek hladký bez žeber	20	45	60	70	55
Tlustostěnný odlitek členitý žebrovaný	20	40	50	60	50

Různé typy slitin nabízejí různé typy tlakových lití, například pro slitiny s nízkou teplotou tání, jako jsou slitiny cínu, olova a zinku, používají stroje s teplou komorou a pro slitiny hliníku, hořčíku a mědi se používají stroje s teplou komorou. Každý typ stroje vyžaduje specifický způsob hlavního vtoku a obvykle není možné použít jeden způsob pro všechny typy bez úpravy. Pokud nejsou k dispozici speciální vtokové vložky, je nutné každý typ přizpůsobit, [2].

Obvykle se pro udávání velikosti tlakových licích strojů používá hodnota uzavírací síly, kterou dokáže vyvinout. Aby bylo dosaženo správného uzavření formy při lití kovu, musí být uzavírací mechanismus stroje spolehlivý a bezpečný. Síla potřebná k otevření formy je dána specifickým tlakem kovu, který je vstřikován do formy, velikostí průřezu odlitku v rovině, dynamickými účinky proudícího kovu a lisovacího mechanismu a také složkami sil od eventuálních bočních šoupátek ve formě. Síla uzavírající se formy musí být větší než součet všech sil snažících se formu otevřít.

V praxi se řídíme zásadně požadavkem bezpečného provozu při lití, a proto se nemají stroje nikdy přetěžovat, [3].

Kontrolu využití uzavírací síly stroje můžeme zjistit dle rovnice:

$$0,9 \cdot F_u = S \frac{F_v}{S_{PKOmax}} \quad (2.0)$$

kde:

F_u – maximální uzavírací síla [kN], F_v – lisovací síla [kN], S_{Omax} – max. plocha průřezu odlitku v dělicí rovině včetně vtoku a přetoků [cm²], S_{PK} – plocha průřezu plnicí komory [cm²].

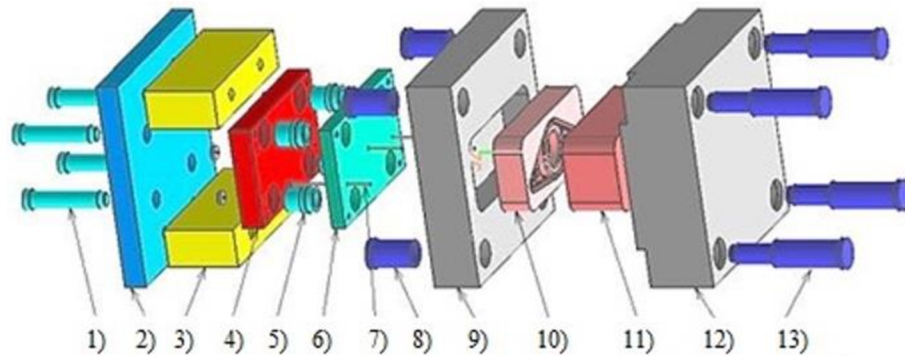
Podle uvedené rovnice je maximálně 0,9 uzavírací síly využíváno při lití, zatímco zbývajících 0,1 síly slouží jako rezerva pro udržení rovnováhy sil. Nicméně, při vyšších rychlostech vstřikování kovu (nad 0,5 m/s), zejména u stroje s použitím horizontální komory, je třeba zvážit větší rezervu uzavírací síly kvůli vlivu dynamických účinků lisovacího ústrojí, které mohou být významné. V těchto případech se doporučuje počítat s využitím uzavírací síly stroje na úrovni 0,5 až 0,7 jmenovité hodnoty.

2.3. Formy pro lití kovů pod tlakem

Úloha formy je dát odlévanému materiálu požadovaný tvar, umožnit odlitku ochlazení na teplotu, při které je odlitek natolik tuhý, že i po vyjmutí z formy neztratí výsledný tvar.

Formy také musí odolávat vysokým tlakům, produkovat výrobky s přesnými rozměry a umožnit jejich vyjmutí, [6].

Na Obr. 3 je znázorněná schéma formy a popsané její jednotlivé části.



Obr. 3 Schéma tlakové lici formy, [3]

1) vodící kolíky 2) upínací deska 3) stoličky 4) oporná vyhadzovací deska 5) pouzdra vodících kolíků 6) kotevní vyhadzovací deska 7) vyhadzovače 8) pouzdra vodících sloupků 9) pohyblivá formovací deska 10) pohyblivá formovací vložka 11) pevná tvarová vložka 12) pevná formovací deska 13) vodící sloupky

2.3.1. Základní části forem

Základní části formy:

- a) Díly vymezující tvarovou dutinu formy
- b) Chladicí, resp. temperanční systém
- c) Vtokový systém
- d) Odvzdušňovací systém
- e) Upínací a vodící elementy

Dají se v podstatě rozdělit na konstrukční a funkční části formy. Konstrukční části zabezpečují správnou činnost nástroje a funkční jsou ve styku se zpracovávaným materiálem a dávají mu požadovaný tvar, [2][6].

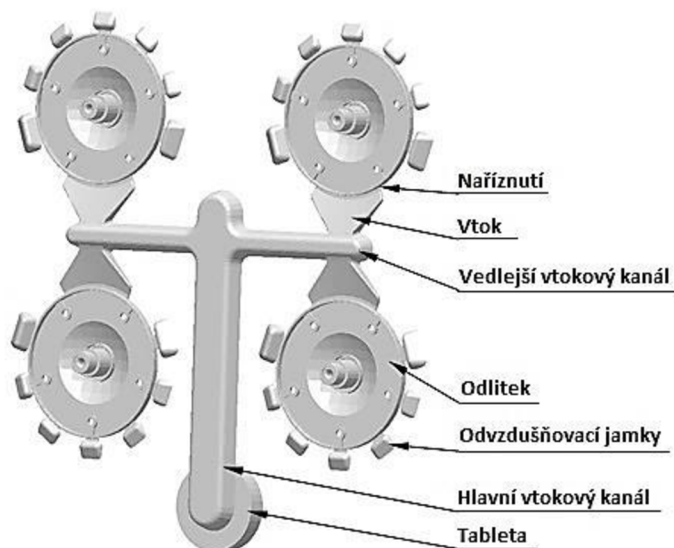
2.3.1.1. Tvarová dutina formy

Tato část je pro funkci formy nejdůležitější. Tvarem je stejná jako žádaný odlitek akorát se liší rozměry, které nesou hodnotu smrštění materiálu, tudíž jsou tyto rozměry o

danou hodnotu větší. V dutině dochází ke chladnutí materiálu. Bylo by vhodné, s ohledem na jeho vlastnosti, aby ochlazování probíhalo ve všech místech odlitku stejnou rychlostí. Aby k tomu docházelo je třeba zajistit homogenitu teplotního pole dutiny. Nerovnoměrné ochlazování má za následek, že hmota na chladnějších místech tuhne dříve a v těchto místech se vytváří tlustší povrchová vrstva ztuhlé hmoty. Kvůli tomu se pak zmenšuje průřez, kterým proudí tavenina do dalších částí dutiny. Liší se pak technologické podmínky pro plnění formy. Následek toho jsou různé vlastnosti odlitku na jednotlivých místech. Nerovnoměrným chlazením vede k vzniku vnitřního pnutí vedoucí k porušování odlitku, [4][5].

2.3.1.2. Vtokový systém

Úlohou tohoto systému je vyplnit dutinu formy takovou rychlostí a v takovém místě, aby bylo zajištěno usměrněné tuhnutí a aby se na minimum omezila oxidace, strhávání vzduchu, plynů a nekovových vměstků dovnitř odlitku. Nesprávně navržený vtokový systém může vést k vzniku netěsností, staženin, studených spojů a špatné povrchové kvalitě odlitků. Do dutiny formy se kov musí dopravit bez víření rozstříkávání, ale dostatečně rychle aby horký kov stačil vyplnit dutinu formy dokonale, [1][6].



Obr. 4 Návrhové řešení vtokového systému, [2]

2.3.1.3. Odvzdušňovací systém

Odvzdušnění je také velmi důležité, protože doba zalisování je velmi krátká a lisování je prováděno za krátký čas doprovázeno vysokým tlakem, vzduch obsažený v dutině formy by nestíhal unikat přes netěsnosti formy v dělicí rovině. Kvůli tomu by mohlo nastat neúplné vyplnění dutiny formy a také kritické zvýšení tlaku v dutině. Proto je důležité

zajistit intenzivní odvod vzduchu z dutiny formy propojením systému odvzdušňovacích kanálů. Avšak ty nesmí být příčinou vznikaní otřepů na odlitku, [1][4].

2.3.1.4. Vyhazovací systém

Vlivem ochlazování se odlitek smršťuje, a tak zůstává přichycen na tvarových součástech dutiny formy je tedy důležité opatřit formu systémem na vyhazování odlitků. Tento systém se nejčastěji řeší formou mechanického vyhazovače, ale využívají se i systémy pneumatické nebo hydraulické. Jedna z možností je tyto systémy použít v jejich kombinaci.

Vyhazovače slouží jako tlačné tyče k vyhazování odlitků z formy. Nejpoužívanějším druhem jsou vyhazovače kruhového, ojediněle jiného průřezu. Obecně se vyhazovači opatřují všechny přetoky a vtoková soustava. Měly by mít co největší průměr. Je také velmi důležité, aby jejich rozložení bylo rovnoměrné po ploše odlitku. Výroba vyhazovačů a pouzder se provádí dle normy DIN 1530 a pouzder vyhazovačů podle DIN 16 756, [7].

Vyhazovací síly se vypočítávají odvozením od měrných tlaků mezi formou a odlitkem, od tepelné závislosti koeficientu tření mezi oběma polovinami formy a od rozměrů odlitku, [6][7].

2.3.1.5. Temperanční systém

Je to vlastně systém kanálů dutin, přes které protéká chladící médium a je tím zabezpečeno udržování teploty formy na požadované hodnotě.

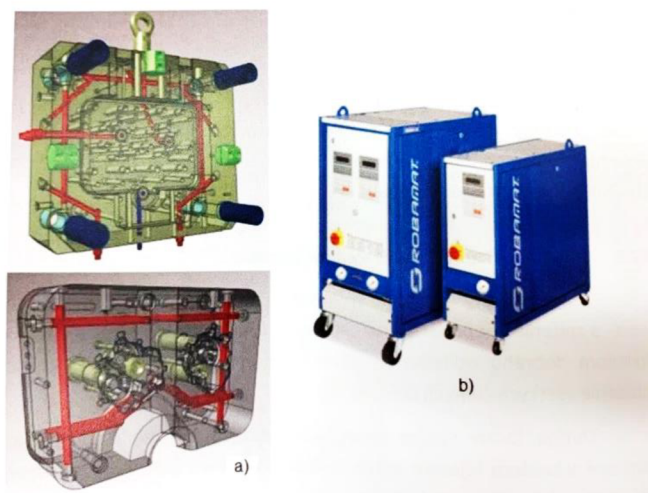
Teplota formy a tepelná rovnováha při tlakovém lití má značný vliv na jakost a snížení zmetkovosti odlitků a na prodloužení životnosti formy. Základem dobrého odlitku je návrh formy, při kterém bude zajištěno účinné chlazení všech částí formy.

Povrch dutiny formy odvádí teplo tuhnoucí slitiny, a to je za potřebí v každém licím cyklu. Jelikož v krátkém čase teplota formy stoupá při lití hliníkových slitin nad 250°C, je nutné formu chladit. Na chlazení se používá vodní mlha nebo voda. Aby se forma správně chladila vyvrtávají se kanály, přes které proudí chladící látka. Pomocí spojek a gumových hadic jsou kanály napojené na zásobovací a odváděcí ústrojí chladicího systému. Tyto chladící kanály musí být vyvrtány do obou částí tlakové formy (pevné i pohyblivé), v pevných vložkách a pohyblivých jádrech. Některé jádra je možné chladit i vzduchem ale musejí být vyrobené z beryliového bronzu. Jádro je vyvedené z formy a opatřené chladícími žebry. Průměr chladících kanálů závisí na tloušťce odlitků (viz Tab. 2) [1][5].

Na Obr. 5 je znázorněný chladicí a temperační systém termoregulačního zařízení firmy Robmat určený pro chlazení forem složených ze soustavy průtokových kanálů se samostatnými okruhy, kde jako chladicí médium se může použít olej, glykol, chemicky upravená voda příp. Stlačený vzduch (nízká účinnost). Uvedený systém umožňuje termoregulaci teploty lince formy pro slitiny Al v rozsahu 180 – 300 °C, [9].

Tab. 2 Volba průměru chladicího kanálu, [1]

Tloušťka stěny odlitků [mm]	Průměr chladicího kanálu [mm]
< 2	8 – 10
2 – 4	10 – 12
4 – 6	12 – 15



a) vizualizace konstrukčního řešení chlazení formy b) chladicí temperační systém firmy Robmat

Obr. 5 Chladicí systémy, [9]

2.3.1.6. Upínací a vodící elementy

Jsou to konstrukční části stroje zabezpečující a vymezující přesné vzájemné dosazení částí formy a jejich funkční pohyblivost.

2.3.2. Konstrukční řešení forem

Při navrhování formy pro lití kovů je důležité zohlednit nejen samotnou technologii lití, ale také technologie výroby. U složitých forem jsou často potřeba speciální postupy, které

jsou typické pro obor nástrojářství. Při určování tolerancí jednotlivých součástí forem je třeba mít v paměti, že se jedná o nástroje pracující za vysokých teplot. Je nutné dbát na to, aby přesnost nebyla přehnaná a nezbytně nezvyšovala náklady na výrobu.

Na druhou stranu, pracovní dutina formy, tedy negativní tvar odlitku ve formě, musí být kotována velmi přesně včetně přídavků na smrštění. Celkový návrh formy by měl být vytvořen s ohledem na použití standardizovaných součástek, aby byla výroba co nejjednodušší a nákladově efektivní. Zejména u složitých forem jsou nutné speciální postupy, které jsou charakteristickým oborem nástrojářství, [1][4].

Správně konstruovaná forma je důležitým faktorem pro tvarově a rozměrově správných odlitků bez výskytu chyb. Optimální konstrukční řešení formy včetně správného nastavení technologických a metalurgických parametrů zajišťuje výrobu kvalitních odlitků. Chyby v konstrukci formy se těžko odstraňují a případné zásahy můžou způsobit snížení životnosti formy. Forma pro tlakové lití je komplexní sestavou složenou z několika stovek jednotlivých součástí z vysokojakostních nástrojových ocelí.

Pro slitiny s nižším bodem tavení (např. zinek) by měla forma vykazovat hodnoty mezi pevnosti 700 – 1000 MPa a pro slitiny s vyšším bodem tavení 1200 – 1600MPa.

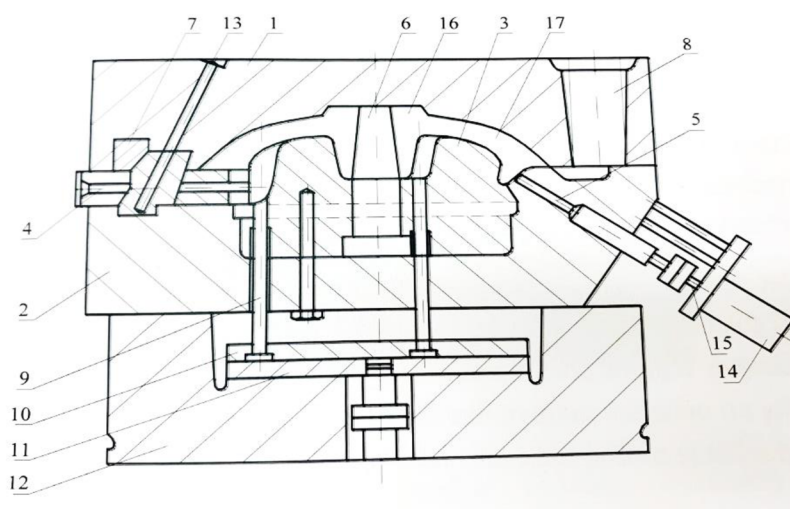
Způsob výroby forem záleží na složitosti a také na požadované přesnosti odlévaných výrobků. Nejčastěji je to způsobem frézování, broušení, případně elektroerozivní obrábění. Tyto způsoby výroby jsou velmi náročné, a proto se cena některých forem pohybuje v rozmezí 250 000 – 2 500 000 Kč. Použití je tedy vhodné pro sériovou výrobu, [1][9].

Existují dva typy forem, buď jsou vyrobeny z jednoho kusu speciální oceli, nebo jsou vytvořeny jako vložkové formy, kde jsou vložky s negativním tvarem odlitku do objímek z vhodné oceli konstrukční, [3]. Jednokusové formy se obvykle používají pro citlivé a složité odlitky menších rozměrů, které vyžadují několik postranních jader. Vložkové formy jsou především využívány v případech, kdy je požadována dlouhá provozní doba formy. Tento typ formy umožňuje výměnu vložek, ve kterých je vypracován tvar odlitku, když jsou vložky opotřebovány a kvalita povrchu odlitku klesá v průběhu dlouhodobého provozu. Samotná konstrukce formy se však nemění.

Každá forma se skládá ze dvou hlavních částí - pohyblivé a pevné. Lícovací kolíky obvykle bývají umístěny v pohyblivých částech formy, zatímco pevná část formy je připevněna ke třmenu lisovacího ústrojí tlakového lícího stroje. Pohyblivá část formy

sestává z poloviny formy a stoličky s vyhazovacím zařízením a je připevněna na nosiči forem. U starších strojů se formy upínají pomocí šroubů a závitových otvorů v pevné části formy a ve stoličce, zatímco na novějších strojích se formy upínají pomocí upínacích mechanismů a drážek tvaru T. Formy musí být dostatečně dimenzovány, aby odolaly výrazně specifickým tlakům, kterým jsou vystaveny, bez ohledu na to, zda se jedná o formy z jednoho kusu nebo formy vložkované. Vložky musí být dostatečně velké, aby byla zajištěna jejich pevnost a co nejdelší životnost, [5][11].

Na Obr. 6 jsou vyobrazené hlavní části formy pro lití kovu pod tlakem s názvy jednotlivých částí.



Obr. 6 Hlavní části tlakové lici formy

1 – pevná polovina formy, 2 – pohyblivá polovina formy, 3 – vložka pohyblivé poloviny formy, 4 – pohyblivé jádro rovnoběžné s dělicí plochou, 5 – pohyblivé jádro šikmo uložené oproti dělicí ploše formy, 6 – pevné jádro kolmé na dělicí plochu formy, 7 – oporná vložka zámku jádra, 8 – dutina pro plnicí komoru, 9 – vyhazovač, 10 – vodící deska vyhazovačů, 11 – oporná deska vyhazovačů, 12 – upínací skříň formy, 13 – šikmý kolík pro pohyb jádra, 14 – hydraulický tahač jádra, 15 – pístnice hydraulického vyhazovacího válce, 16 – dutina formy, 17 – dělicí plocha formy

Při návrhu odlitků pro tlakové lití je nutné dodržovat obecné zásady konstruování. Správný návrh podle směrnic a pravidel pro konstruování odlitků zajišťuje kvalitní odlitky a minimalizuje problémy během odlévání, [2].

Každá součást může být upravena tak, aby zjednodušila formu a zlepšila výrobní hospodárnost. Nicméně každá úprava musí být pečlivě analyzována a prověřena, aby

neovlivnila celkovou funkčnost součástí. Je důležité najít mezi snahou o zjednodušení odlitku a zachování jeho funkce a kvality. Malé úpravy mohou přinést významné zlepšení, ale každá změna by měla být řešena zodpovědně a s ohledem na celkovou funkci součástí, [4][11].

Při konstruování a úpravě odlitků pro lití pod tlakem platí následující pravidla:

1. Tvary by měly být co nejjednodušší, pokud to však okolnosti dovolí. Je nutno vyhýbat se vysokým výčnělkům a použít je jen tehdy, vyžaduje-li to konstrukční řešení a není-li možnost jiného vhodného konstrukčního uspořádání;
2. Součást by měla být co nejlehčí a vnější rozměry co nejmenší, s ohledem na požadavky na mechanické vlastnosti odlitku;
3. Stěny odlitku by měly být co nejtenčí (v souladu s doporučenou tloušťkou stěn) a přesto pevné. Žebrování může být použito k zajištění požadované pevnosti;
4. Průřezy odlitku mají mít, pokud možno stejnou tloušťku. U různých průřezů je nutné použít odstupňování, abychom se vyvarovali koncentraci napětí;
5. Lehká klenba na odlitku je výhodnější než velká rovná plocha, zejména u součástí, které vyžadují vysokou kvalitu povrchu, aby se vyhnulo vadám povrchu, které by mohly poškodit celkový vzhled odlitku;
6. Vnitřní rohy odlitků by měly být vhodně zaobleny a vnější rohy by měly zabránit ostrému tvaru;
7. Otvory a stěny odlitku musí mít příslušné úkosey, aby bylo možné bezpečně vyjmout odlitek z formy bez deformace;
8. Je třeba se vyhnout podpracovaným vnitřním tvarům odlitku, protože zvyšují náklady na výrobu formy a v důsledku zakládání různých tvarových vložek do formy a jejich vyjímání z odlitku snižují ve značné míře rychlost výroby. Pokud tyto volně vkládané vložky nepřinášejí skutečné úspory nebo jiné výhody, je lepší je nepoužívat a raději změnit konstrukční řešení odlitku;
9. Otvory a osazení otvorů by měly být využity tak, aby celkové řešení odlitku znamenalo úsporu materiálu a nákladů bez nepříznivého vlivu na zvýšení ceny formy;
10. Odlitky by měly být navrženy tak, aby se snadno vybíraly a aby nebylo třeba složitých konstrukcí a úkonů;

11. Není-li to ekonomicky odůvodněno, malé otvory v odlitku nepředlévat. Tenké jádro se snadno odlomí, což vede k vyšším nákladům na údržbu formy a ke snížení rychlosti výroby;
12. Má-li být odlitek leštěný, je nutno jej navrhnout tak, aby celý povrch byl snadno přístupný. Ostré rohy a různá osazení zvyšují náklady na konečnou úpravu;
13. Odlitky se navrhuji tak, aby odstranění vtoků a ořepů bylo co nejjednodušší a vyžádalo si co možná nejnižší náklady;
14. Kdykoli je to možné, navrhujeme odlitek s ohledem na upínací zařízení při eventuálním obrábění;
15. Pokud odlitek litý pod tlakem bude mít vliv na konečný vzhled výrobku, nutno mít na zřeteli i jeho estetický tvar. Odlitek v tomto případě má být v souladu s celkovým provedením výrobku;
16. Je-li třeba odlitek obrábět, vyhýbáme se nadměrným přídalkům na opracování;
17. Zástřiky navrhujeme s ohledem na jejich jednoduché umístění ve formě a ošetřujeme je přiměřeným zakotvením v odlitku;
18. Pokud to povaha odlitku dovoluje, je třeba navrhovat jádra co nejjednodušeji;
19. Nutné je mít neustále na zřeteli umístění vyhazovačů. Jsou-li umístěny nevhodně, mohou narušovat povrch odlitku, mohou odlitek deformovat, protože na něj působí velkou silou, nebo působí na málo vyztužených místech;
20. Používáme co největší přípustné tolerance a nepřeháníme požadavky na úzkou toleranci odlitků, [2][4][11].

2.3.3. Materiály pro výrobu forem

Je nutné zvolit vhodné materiály pro výrobu forem a tvarových vložek, které dokážou odolávat silám vyvolaným vysokým tlakem a rychlostí proudící taveniny. Tyto materiály by měly být také odolné vůči rychlým změnám teplot během cyklu lití, [11].

2.3.4. Životnost forem

Formy pro lití neželezných kovů pod tlakem jsou trvalé formy vyráběné z oceli. Jejich části, které přicházejí do kontaktu s taveninou, jsou vyrobeny z vysoce legovaných ocelí vhodných pro práci za tepla. Tyto formy jsou složité a drahé nástroje, proto se snažíme dosáhnout jejich co nejdelší životnosti, což je v současné době klíčovým problémem v oblasti tlakového lití.

Během provozu je forma vystavena střídavému mechanickému a tepelnému namáhání, které roste společně s tavicí teplotou odlévaného kovu. Toto střídavé tepelně-mechanické namáhání ovlivňuje trvale jakost dutiny formy přicházející bezprostředně do styku s roztaveným kovem. Po určitých počtech opakovaných odlévacích cyklů se ve formě začnou tvořit trhliny, které se v důsledku dalšího používání zvětšují. Na povrchu odlitku pak tyto trhliny zanechávají stopy v podobě žilek. Jádra, která tvoří v odlitku různé otvory a dutiny, jsou namáhána při vyhazování odlitku silami, které vznikají jeho smrštěním. Dělicí rovina formy je nejvíce namáhána při dosažení maximální uzavírací síly a další části formy se opotřebovávají od pohybu součástí. Vzhledem k tomu, že formy pro tlakové lití jsou složité a drahé nástroje, je důležité, aby měly co nejdelší životnost. Životnost formy závisí na mnoha faktorech, jako je pravidelnost provozu, druh odlévané slitiny, teplota tavení, konstrukce formy, rychlost a specifický tlak lisování kovu do formy a druhu použitého stroje. Vzhledem k neustálému intenzivnímu namáhání různých částí formy je třeba použít vysoce legovaný materiál, který zabezpečuje určitou životnost formy, [7][9][11].

Forma je považována za vyřazenou z provozu, pokud došlo k výraznému ovlivnění plynulosti lití nebo když trhliny v dutině formy způsobily poškození povrchu odlitku, který již nedosahuje požadované kvality. Měřítkem životnosti formy je počet výlisků, kterých lze dosáhnout, než je nutné nahradit novou, [4].

Pro zvýšení životnosti formy se forma chemicky zpracovává. Účinnou ochrannou je nitridace s difúzním žiháním. Zvýšení životnosti je možné dosáhnout opatřeními jako:

- a) Regulace teploty formy;
- b) Použití vhodného maziva na formu;
- c) Použití materiálů na výrobu formy s nejmenší tepelnou roztažností, nejmenším modulem pružnosti a s největší tepelnou vodivostí;
- d) Technologie lití s krystalizací pod tlakem a zpracováním polotuhého kovu, [4].

Forma je během provozu vystavena třem druhům namáhání:

1. Střídavé mechanické namáhání způsobené licím strojem, což zahrnuje sevření a zalisování roztaveného kovu pod vysokým tlakem a namáhání částí formy, zejména jader, při vyhazování odlitků;
2. Střídavé tepelně-mechanické namáhání povrchové vrstvy dutiny formy;
3. fyzikálně-chemické účinky vstříkovaného kovu, [1].

Z jmenovaných příkladů je tepelně-mechanické namáhání povrchové vrstvy dutiny formy nejzávažnější, protože tvoří vlasové trhliny, které se během provozu prohlubují a zvětšují. Velikost napětí v povrchové vrstvě formy má vliv koeficient tepelné roztažnosti a tepelného spádu. Všechny uvedené faktory mají zásadní vliv na volbu oceli, [4].

2.3.5. Požadavky na materiál pro výrobu forem

Není znám materiál, který by byl naprosto ideální pro výrobu forem, tak že by splňoval všechny teoretické požadavky pro materiál formy.

Požadavky na materiál formy:

- a) Chemická stálost vůči odlévané slitině;
- b) Dostatečná odolnost proti tepelným šokům;
- c) Dobrá opracovatelnost;
- d) Přípustná cena;
- e) dobrou pevnost za tepla a odolnost proti popouštění;
- f) vysokou mez tažnosti za vysokých teplot;
- g) dobrou tepelnou vodivost;
- h) malý součinitel tepelné roztažnosti;
- i) stálost rozměrů při tepelných změnách a při tepelném zpracování;
- j) odolnost proti teplotním rázům, která je do jisté míry funkcí výše uvedených vlastností;
- k) dobrou kovatelnost;
- l) odolnost proti erozivním účinkům proudícího kovu, [2][11].

Těmto požadavkům nejvíce vyhovují legované ocele vanadem, chromem, molybdenem a kobaltem po tepelném zpracování, [9].

Bezvadný povrch obrobené části oceli je zaručen pouze tehdy, pokud byl při volbě tloušťky nebo průměru dodržen normou stanovený přídavek na obrábění. Výrobci oceli obvykle neodstraňují trhliny ani jiné povrchové vady. Pokud vyrábíme formy z ploché oceli, je nutné zajistit, aby bylo během obrábění odstraněno dostatečné množství materiálu na odstranění všech vad, [5][11].

Pro formy používané při lití na strojích se studenou komorou, kde se nejčastěji odlévají slitiny hliníku, hořčíku a mědi, jsou kladeny mnohem vyšší požadavky na ocel. Tyto slitiny mají výrazně vyšší teplotu než zinek, proto je třeba volit oceli s vyšším obsahem legujících prvků, aby se dosáhlo požadované životnosti, [2][4].

2.4. Konstruování vtokových soustav

Konstrukce vtokových soustav pro vysokotlaké lití kovů musí být navržena s ohledem na volbu materiálů, tloušťku stěn a tvarů. Musí být zvoleny materiály s vysokou pevností, aby odolaly vysokému tlaku a zároveň by měli být dostatečně tvarovány, aby minimalizovaly turbulence a tření kapalin.

Sestavení návrhu vtokového systému tlakové formy probíhá následujícím způsobem:

- a) analýza proudění tekutého kovu;
- b) výběr nejvhodnějšího místa pro umístění vtokového zářezu a odvzdušňovacího systému;
- c) výpočet doby plnění dutiny formy;
- d) výpočet rychlosti proudění kovu ve vtokovém zářezu;
- e) určení objemu průtoků;
- f) určení průřezu vtokového zářezu;
- g) určení průřezu vtokových kanálů;
- h) určení geometrických charakteristik a konstrukčního řešení části vtokového systému, [3][6].

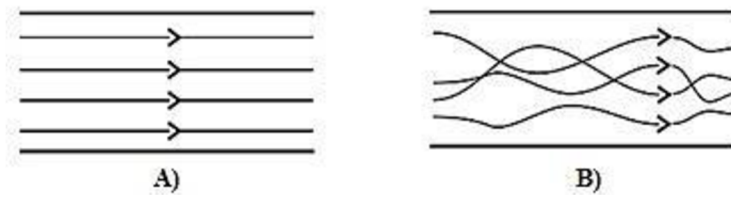
2.4.1. Hydrodynamické základy proudění tekutého kovu

Při plnění dutiny formy je potřebné se podrobněji věnovat proudění kapalného kovu. Následující kapitoly jsou věnovány analytickým základům typu proudění taveniny v kanále šůla režimu plnění tvarové dutiny formy.

2.4.1.1. Režim proudění taveniny v dutině formy

Známé jsou dva druhy proudění kapalin:

- Laminární – kapalina proudí bez míšení částečných proudů (Obr. 7A);
- Turbulentní – vyskytuje se míšení částečných proudů (Obr. 7B).



Obr. 7 Schéma typu proudění kapaliny v kanálech, [9]

Charakterizované Reynoldsovým číslem Re :

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu_k}, \quad [1] \quad (2.1)$$

kde: v – rychlost proudění kapalin [$m \cdot s^{-1}$]; d – průměr potrubí, v kterém proudí kapalina [m];

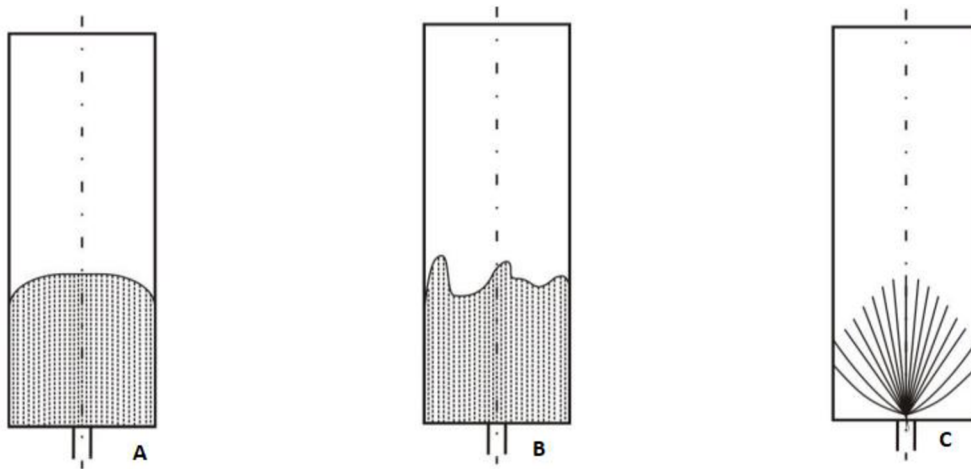
ν_k – kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Rozmezí mezi typem proudění je definováno kritickým Reynoldsovým číslem, které pro vodu je $Re_{krit.} = 2320$. Pak laminární proudění vody je definované $Re < Re_{krit.} = 2320$, turbulentní proudění vody je definované $Re > Re_{krit.} = 2320$. Pro slitiny hliníku je Reynoldsovo číslo 2320, [1].

2.4.1.2. Průběh plnění tvarové dutiny formy

V průběhu plnění dutiny formy nezáleží jen na charakteru proudění, ale i na čele proudění kapalného kovu. Z hlediska čela rozeznáváme:

- Planární proudění (Obr. 8A) – kde čelo proudu souvisle po celé šířce dutiny formy neuzavírající vzduchové bubliny při plnění dutiny formy při nízkých rychlostech;
- Neplanární proudění (Obr. 8B), - kde je čelo proudu nepravidelné v užším rozsahu, než je šířka dutiny formy uzavírající vzduchové bubliny při plnění dutiny formy při vyšších rychlostech;
- Disperzní proudění (Obr. 8C) tvořící při plnění dutiny formy disperzní směs kapalného kovu a vzduchu, [1][9].



Obr. 8 Druhy proudění z hlediska čela kapaliny, [1]

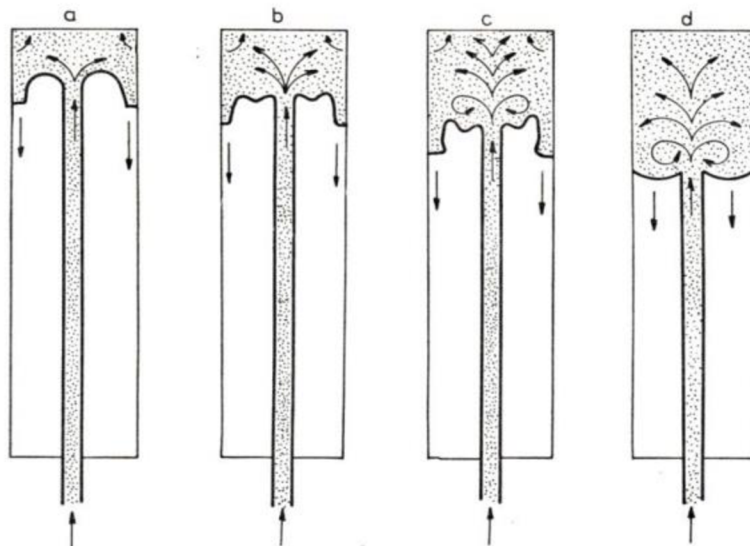
Frommer a Brandt, jak uvádí [1], vyvinuli teoretické základy pro proces plnění dutiny formy tekutým kovem. Tyto práce rozlišují dvě možnosti průběhu plnění tvarové dutiny formy, které se definují poměrem průřezu vtokového naříznutí k průřezu odlitku:

$$\frac{S_Z}{S_F} > 0,25, \quad (2.4)$$

$$\frac{S_Z}{S_F} < 0,25, \quad (2.5)$$

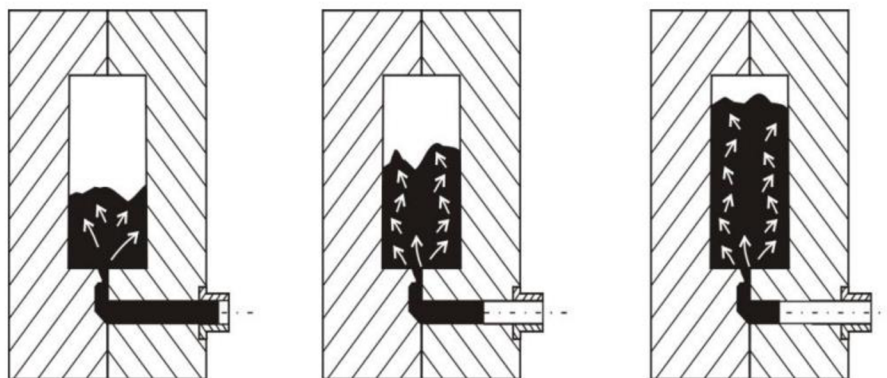
kde: S_Z – plocha vtokového naříznutí [m^2]; S_F – plocha průřezu dutiny ve formě [m^2].

Na Obr. 9 je znázorněno plnění dutiny formy podle Frommera, jak uvádí [1], při poměru $S_Z/S_F < 0,25$. V první fázi *a* (Obr. 9a) proud tekutého kovu narazí na protilehlou stěnu dutiny v blízkosti vtokového naříznutí, což se nazývá nárazová fáze. Proud kovu se rozptýlí po svislých stěnách dutiny a postupuje po nich směrem k vtokovému naříznutí. V této fázi kov nenarazí plynule na protější stěnu dutiny formy, ale naráží na ni v sériích pulzací. V další fázi *b* (Obr. 9b) dopadá proud pulzujícího kovu do vrstvy kovu, což napomáhá uklidnění a pulsace jsou téměř ustálené ve fázi *d* (Obr. 9d). Od tohoto okamžiku se dutina formy plní rovnoměrným proudem tekutého kovu, [1][3].



Obr. 9 Průběh plnění dutiny formy podle Frommera, jak uvádí [1]

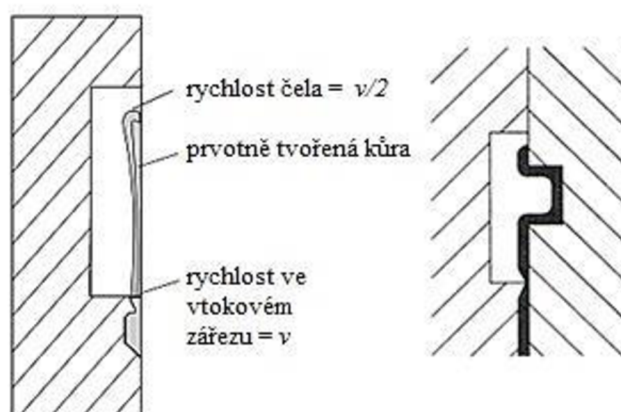
Pokud je S_Z/S_F větší než 0,25, proud tekutého kovu se po opuštění vtokového nařiznutí pohybuje pomalu a rozptýlí se do dutiny formy od nařiznutí ke vzdálenějšímu poměru, jak ukazuje Obr. 10. Tento proces plnění dutiny forem odpovídá teorii vypracované Brandtem, jak uvádí [1].



Obr. 10 Průběh plnění dutiny formy podle Brandta, jak uvádí [1]

Barton, britský výzkumník, prokázal, že při nižších rychlostech tvoří roztavená slitina vstříkovaná do dutiny formy „prvotně utvořenou kúru“ (Obr. 11). V příčném řezu roztaveného proudu je teplotní a rychlostní gradient. To znamená, že slitina v kontaktu s povrchem formy má nižší teplotu a vyšší viskozitu, což znamená, že je méně pohyblivá (až ztuhnutá). Jak se vzdálenost od čela formy zvětšuje, roztavená slitina se pohybuje

rychleji, protože má vyšší teplotu a nižší viskozitu. Rychleji se pohybující horní vrstvy dosahují čela krystalizační fronty. Přední část je nesena rotačním středem a její pohyb je transformován na rotační, protože mezi sousedními vrstvami uvnitř povrchové vrstvy během plnění formy vzniká viskózní smyk. V povrchové vrstvě se gradient rychlosti pohybuje od nuly do v , na vnitřním povrchu „prvotně vytvořené kůry“ se střední rychlostí postupujícího čela kůry $v/2$ jako obdoba odvíjejícího se koberce. V důsledku toho čelo toku naráží na povrch dutiny formy s velkou kinetickou energií a jeho čelo má velkou složku hybnosti kolmou ke směru pohybu, dokud se nakonec nezastaví. Výsledkem je přesná replikace pracovní dutiny slévárenské formy, což je významnou předností technologie tlakového lití, [1].



Obr. 11 Mechanismus plnění dutiny formy dle Bartona, jak uvádí [9]

2.4.2. Analýza proudění tekutého kovu

Při vytváření odlitku je ideální, aby tekutý kov proudil dutinou formy po co nejefektivnějších trasách, které jsou přímé a jasné. Bohužel je zřídka snadné takový ideální tvar navrhnout, zejména pokud jde o vtokové kanály a zářezy. V praxi je často nutné najít kompromis mezi požadavky na technologii a výrobu. Při návrhu vtokového systému by měl návrhář zohlednit jak technologické, tak i slévárenské faktory. Proto je nutné během návrhu konzultovat s odborníky na vysokotlaké lití, kteří mohou poskytnout praktické informace a rady. Návrhář musí následně najít optimální řešení, které zohlední požadovaný tvar, ideální tvar a zpětnou vazbu od odborníků. Tímto způsobem se určí optimální umístění vtokového zářezu, [12].

2.4.3. Výběr místa pro umístění vtokového nařiznutí a odvzdušňovacího systému

Všechny slitiny používané ve slévárenství mají tendenci smršťovat se během tuhnutí a ochlazování. Pokud tuto vlastnost nepředvidáme a nezohledňujeme ji při návrhu formy, může dojít k chybám v odlitcích způsobeným smrštěním. Tyto chyby se projevují jako dutiny v odlitku nebo propadliny různých velikostí. V podstatě jde o zvýšenou pórovitost, [6].

Při odlévání do pískových forem, gravitačním litím, nízkotlakým litím a litím na vytavitelný model se kompenzuje smrštění formy zvětšením objemu formy o hodnotu odpovídající smrštění. Tím se zajistí, že i po smrštění bude mít odlitek požadované rozměrové vlastnosti. Toto zvětšení objemu se dosáhne vytvořením nálitků, což jsou kuželovité výstupy umístěné nad nejtěžšími přístupnými místy. Tyto nálitky se nacházejí v objemu odlitku a tuhnou jako poslední části, [13][14].

Vysokotlaké lití se liší od ostatních slévárenských technologií v tom, že nepoužívá nálitky v tvarové dutině formy. Namísto toho se smrštění eliminuje pomocí dotlaku, takže je nutný navrhnout vtokový systém tak, aby roztavený kov mohl být přepravován co nejdéle a s co nejmenšími ztrátami tlaku. Konstruktor musí zohlednit tlakový spád a procesy probíhající v dutině formy, včetně vtokového zářezu a odvzdušňovacích kanálů.

V praxi je často výhodné navrhnout vtokový systém tak, aby vtokový zářez byl umístěn v dělicí rovině formy a odvzdušňovací systém naproti. Optimálním řešením je umístit vtokové a odvzdušňovací kanály tak, aby proudění roztaveného kovu v tvarové dutině probíhalo po co nejkratších možných drahách, [9][14].

Při projektování vtokových kanálů je výhodné setkání dvou různých proudů roztaveného kovu před vtokovým zářezem. Pokud se však tato situace zachová, je nejlepší umístit vtokový zářez z vnitřní strany odlitku. Centrální vtokový systém může být problematický vzhledem k tomu, že neumožňuje vícenásobné dutiny. Dlouhá vtoková soustava také může snížit rychlost proudění roztaveného kovu dříve, než se dostane do tvarové dutiny formy, [12][13].

Při určování vhodného místa a směru pro zavedení vtokového zářezu vycházíme z těchto hledisek, [12]:

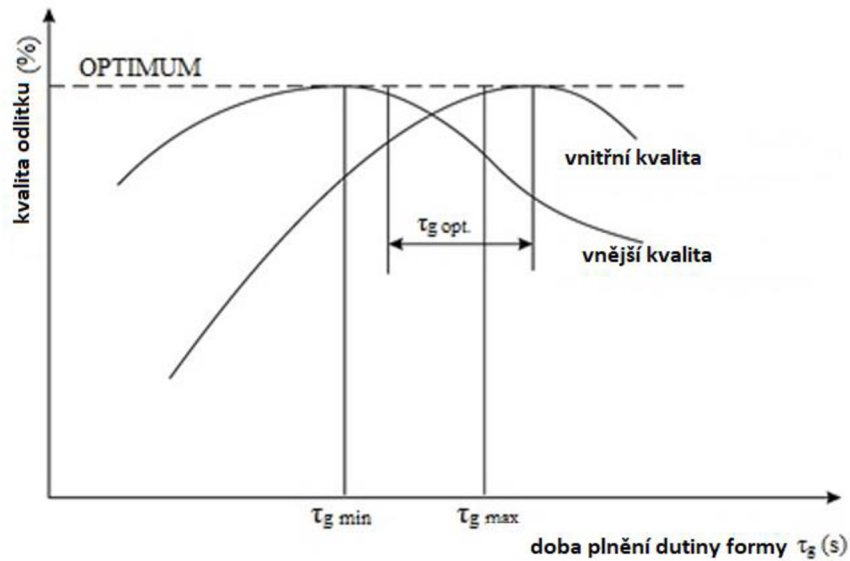
- a) zavést proud slitiny tak, aby při postupném vyřazování jednotlivých odvzdušňovacích prvků v průběhu plnění dutiny formy poslední z nich byly

- funkční i v poslední fázi plnění dutiny formy;
- b) zavést proud slitiny tak, aby nenarážel na překážky jako jádra a výstupky;
 - c) u odlitků s podélnými otvory zavést proud slitiny tak, aby byl rovnoběžný s delším rozměrem otvorů;
 - d) u odlitků s výstupky obdélníkového tvaru zavést proud slitiny tak, aby byl rovnoběžný s delším rozměrem výstupků.

Po nárazu proudu slitiny na překážku dochází k roztříštění proudu a změně směru s následkem uzavření bublin plynů do stěn odlitků. Projeví se zde také silné nalepení. Vhodné zavedení vtokových zářezů je děleno tak, aby proud kovu nenarážel na jádro. Nevhodné zavedení vtokového nařiznutí je bez rozdělení proudu, kde proud slitiny narazí na jádro a za jádrem vzniká víření a vývoj plynů, [12].

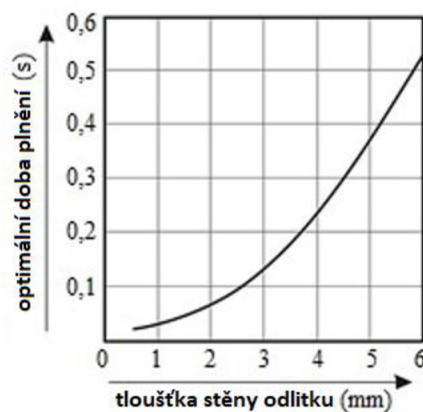
2.4.4. Určení doby plnění tvarové dutiny formy

Kvalita povrchu odlitku a jeho vnitřní zdraví jsou silně ovlivněny dobou plnění dutiny formy. Pokud je doba plnění příliš krátká, plyny a páry se nedostatečně odvětrávají, což vede ke špatné vnitřní zdravoti odlitku, i když povrch vypadá dobře. Na druhé straně, při příliš dlouhé době plnění se plyny odvětrají, ale vlivem snížení teploty slitiny na čele proudu nedojde k dokonalému propojení proudů, což vede ke vzniku studených spojů a vnitřních zavalenin. Chyby, které vznikají v důsledku příliš krátkého nebo dlouhého plnění dutiny formy, jsou zejména u součástí vystavených cyklickému zatížení velmi nebezpečné, protože studené spoje se hromadí a způsobují vrubový efekt. Optimalizace doby plnění dutiny formy vyžaduje dosažení kompromisu mezi příliš krátké a dlouhé době plnění. Tato doba by měla být kratší než doba tuhnutí odlitku ve formě. Vliv doby plnění na kvalitu odlitku je graficky znázorněn na Obr. 12. Jak je z Obr. 12 patrné, jedná se o kvalitu celého odlitku. Zde je rozhodující doba plnění dutiny formy, jak pro získání vnější kvality odlitku, tak pro získání vnitřní kvality odlitku, [2][21].



Obr. 12 Vliv doby plnění na kvalitu odlitku, [1]

Z výpočtů a experimentů [15] vyplývá, že doba plnění odlitku závisí pouze na jeho tloušťce, nikoli na jeho velkých rozměrech, za předpokladu, že dojde ke konstantním tepelně-fyzikálním charakteristikám. Graf optimální doby plnění je zobrazen na Obr. 13.



Obr. 13 Závislost doby plnění na tloušťce stěny odlitku, [1], [14]

Při návrhu odlitku by mělo být zohledněno, že v dělicí rovině formy musí být dostatek místa pro umístění vtokového zářezu a odvzdušňovacích kanálů. Šířka vtokového zářezu se určuje pomocí jednoduchého výpočtu, kdy je plocha zářezu dělena jeho výškou. Plocha zářezu je ovlivněna dobou plnění dutiny formy a rychlosti proudění taveniny v zářezu. Doba plnění dutiny formy je v závislosti na:

1. *minimální tloušťka stěny* - tlusté stěny odlitku poskytují delší dobu během plnění dutiny formy, zatímco u tenkostěnných odlitků musí být doba plnění kratší, aby nedošlo k předčasnému ztuhnutí. Důležité je také zohlednit délku toku taveniny. Pokud jsou tenké stěny odlitku umístěny ve velké vzdálenosti od vtokového naříznutí nebo mají velkou plochu, je třeba zvolit kratší dobu plnění formy;
2. *Teplotní vlastnosti slitin a materiálů* - teplota likvidu, rozsah pásma tuhnutí a teplotní vodivost materiálu formy, resp. tepelná vodivost materiálu formy. Tyto parametry ovlivňují dobu tuhnutí taveniny;
3. *Kombinaci objemu odlitku a přetoků* - tenkostěnné odlitky, odlitky s dlouhou dráhou tečení taveniny přes dutinu formy a odlitky se speciálními požadavky na kvalitu potřebují přetoky s větším objemem. Tento požadavek je odůvodněn tím, že větší objem kovu dokáže udržet požadovanou teplotu déle;
4. *Povolené procento ztuhnutí kovu během plnění* - při požadování vyšší kvality povrchu je důležité udržet taveninu s nižším podílem ztuhnutí a kratší dobu plnění dutiny formy, [13][23].

Norma ČSN 22 8601 [17] uvádí doporučené hodnoty doby plnění formy taveninou odvozené od převažující tloušťky stěny odlitku podle Tab. 3

Tab. 3 Doporučené doby plnění dutiny formy, [17]

Převažující tloušťka stěny odlitku, [mm]	Doba plnění dutiny formy taveninou, [s]
do 1,5	0,01 až 0,03
do 1,8	0,02 až 0,04
do 2,0	0,02 až 0,06
do 2,3	0,03 až 0,07
do 2,5	0,04 až 0,09
do 3,0	0,05 až 0,10
do 3,8	0,05 až 0,12
do 5,0	0,06 až 0,20
do 6,3	0,08 až 0,30

Při návrhu vtokové soustavy není možné spoléhat pouze na orientační hodnoty uvedené v Tab. 3 nebo v Obr. 13. Tyto hodnoty jsou závislé na zkušenostech konstruktérů a mohou vést k významné nepřesnosti v návrhu. Proto je výhodné vycházet při určování doby plnění v rámci formy ze vztahu (2.6), který je uveden v (manuálu slévárenství - Gating Manual vydávaném pod záštitou North American Die Casting Association), [23].

$$t = K \cdot \left\{ \frac{T_Z - T_{LIK} + S \cdot Z}{T_{LIK} - T_f} \right\} \cdot h_{ch}, \quad (2.6)$$

kde: t – čas plnění tvarové dutiny formy [s]; T_Z – teplota taveniny v zářeze [°C]; T_{LIK} – teplota likvidu [°C]; T_f – teplota formy [°C], S – dovolené procento ztuhnutí taveniny na konci plnění tvarové dutiny formy [%], Z – konverzní faktor tuhých částic související s rozsahem tuhnutí [°C/%], K – empiricky odvozená konstanta související s vodivostí formy [s/m], h_{ch} – charakteristická tloušťka stěny odlitku [m].

Část rovnice (2.6), která je v závorkách vyjadřuje teplotní závislosti a děje probíhající ve formě. Konstanta K nabývá hodnotu od $0,0312 \text{ s}\cdot\text{mm}^{-1}$, pro materiál formy (ocel AISI P-20, předběžně kalená nitridační ocel) a materiál odlitku (slitiny zinku). Dále K nabývá hodnot $0,0252 \text{ s}\cdot\text{mm}^{-1}$, pro materiál formy (ocel chromová AISI H-13, ocel chrom-wolframová AISI H-21) a materiál odlitku (slitiny hořčíku). Též K nabývá hodnotu $0,0346 \text{ s}\cdot\text{mm}^{-1}$, pro materiál formy (ocel AISI H-13 a ocel AISI H-21) a materiál odlitku (hliník a mosazi). V tab. 4 jsou uvedeny dovolené hodnoty ztuhnutí materiálu v závislosti na tloušťce stěny odlitku.

Tab. 4 Dovolené hodnoty ztuhnutí materiálu v závislosti na tloušťce materiálu, [3]

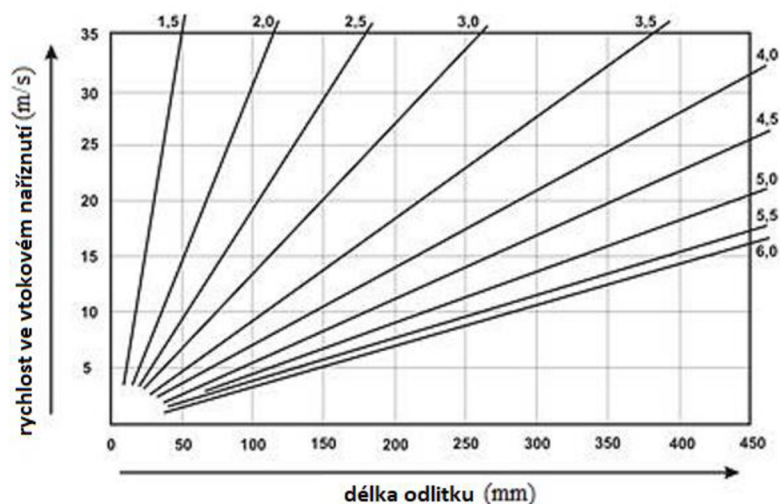
Tloušťka stěny odlitku, [mm]	Dovolené hodnoty ztuhnutí materiálu S, [%]		
	Hliník	Hořčík	Zinek
< 0,8	5	10	5 – 15
0,8 - 1,25	5 – 25	5 – 15	10 – 20
1,25 - 2	15 – 35	10 – 25	15 – 30
2 - 3	20-50	20– 35	20– 35

Z Tab. 4 je důležitá veličina S [%], která uvádí dovolené procento ztuhnutí taveniny na konci plnění dutiny slévárenské formy taveninou. Tato veličiny byla použita při výpočtu doby plnění dutiny formy taveninou slitiny hliníku, jak je uvedeno v experimentální části této práce.

Z rovnice (2.6) značí, tzv. konverzní faktor tuhých částic související s rozsahem tuhnutí, jehož rozměr je [°C·%⁻¹]. Konstanta Z nabývá hodnot $4,8$ [°C·%⁻¹] pro slitiny hliníku Al-Si-Cu-Mg, podeutektické, $5,9$ [°C·%⁻¹] pro slitiny hliníku typu Al-Si-Cu-Mg, nadeutektické, $3,7$ [°C·%⁻¹] pro slitiny hořčíku, $3,2$ [°C·%⁻¹] pro slitiny zinku (Zamak 12 a Zamak 27), $2,5$ [°C·%⁻¹] pro slitiny zinku (Zamak 3, Zamak 5 a Zamak 7), $4,7$ [°C·%⁻¹] pro slitiny mědi a zinku (mosazi).

2.4.5. Určení rychlosti proudění taveniny ve vtokovém nařiznutí

Mechanické vlastnosti a kvalita odlitků jsou ovlivněny rychlostí proudění taveniny příslušné slitiny kovů v zářezu. Volbou nižší rychlosti proudu taveniny vstupující do dutiny formy lze dosáhnout nižší pórovitosti odlitku (příznivější mechanické vlastnosti odlitku). Doporučuje se, aby rychlost ve vtokovém nařiznutí nepřesáhla $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na obr. 14 je uvedena závislost příznivé rychlosti v nařiznutí na charakteristických rozměrech odlitku, jak uvádí, [4]. V tabulce 5 jsou uvedeny doporučené hodnoty rychlosti taveniny ve vtokovém nařiznutí pro jednotlivé druhy slévárenských slitin uveden dle normy ČSN 22 8601, [17].



Obr. 14 Závislost optimální rychlosti v nařiznutí na charakteristických rozměrech odlitku [4]

Tab. 5 Doporučená rychlost taveniny ve vtokovém nařiznutí [17]

Slitina na bázi	Doporučená rychlost v nařiznutí, [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	
	Normální lití	Vakuové lití
Al	20 – 60	15 – 30
Zn	20 – 30	-
Mg	40 – 90	-
Cu	20 – 50	-

Ke kvalitě odlitků přispívá rychlost taveniny v nařiznutí, kterou lze stanovit na základě vztahu, dle [3]:

$$v_z = \frac{m_o}{\rho \cdot t \cdot d_p \cdot 0,785} \quad (2.7)$$

kde: v_z – rychlost proudu taveniny ve vtokovém nařiznutí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]; m_o – hmotnost odlitku [kg], ρ – hustota slitiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; d_p – průměr plnicí komory stroje [m], 0,785 – konstanta.

Pro stanovení rychlosti v nařiznutí (v_z) lze hodnoty v

Tab. 5 a na Obr. 14 brát pouze za orientační.

2.4.6. Určení objemu přetokových jamek

Přetok nebo také odvzdušňovací kanál slouží jako tepelný akumulátor a úložiště nekvalitního, zoxidovaného kovu. Přetoky jsou nezbytné, pokud je tloušťka stěny odlitku malá nebo pokud je třeba nechat odlitek tuhnut při vyšší teplotě, jako např. při odlévání jader umístěných daleko od vtokového systému. V takovém případě tavenina obtéká jádro přes malý průřez stěny odlitku z obou stran a musí být zachována taková teplota taveniny, aby se oba proudy taveniny spojily a vytvořily homogenní strukturu odlitku bez zavalenin. Volba objemu přetoků je tedy úzce svázána s tloušťkou stěny odlitku a jeho objemem, [3].

V Tab. 6 jsou uvedeny doporučené objemy přetoků pro konvenční tlakové lící stroje v závislosti na nejmenší tloušťce stěny odlitku.

Tab. 6 Doporučené objemy přetoků, [17]

Charakteristická tloušťka stěny odlitku, [mm]	Objem přetoku, procentuální podíl z objemu odlitku [%]	
	Vysoká kvalita povrchu odlitku	Nižší kvalita povrchu odlitku
0,90	150	75
1,30	100	50
1,80	50	25
2,50	25	25
3,20	-	-

2.4.7. Určení průřezu vtokového nařiznutí

Vtokové nařiznutí je limitující prvek vtokové soustavy, který má velmi významný vliv na výslednou jakost odlitku. Průřez vtokového nařiznutí (S_z) lze podle normy ČSN 22 8601 stanovit dle vztahu, [19]:

$$S_z = \frac{G}{\rho \cdot t \cdot v_z}, \quad (2.8)$$

kde: G – součet hmotnosti odlitku a přetoků.

Současně pro výpočet průřezu vtokového naříznutí (S_Z) je možno použít další vztah, který uvádí [19]:

$$S_Z = \frac{G}{\rho(k_1 k_2 v_t)(k_3 k_4 t)}, \quad (2.9)$$

kde: v_t – rychlost ve vtokovém naříznutí, podle ČSN 22 8601 je doporučena tato rychlost $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; k_1, k_2, k_3, k_4 – koeficienty, jsou uvedeny v Tab. 7 až Tab. 10.

Tab. 7 Hodnoty součinitele k_1 – plynoucí z tloušťky stěny odlitku, [17]

Tloušťka stěny odlitku [mm]	1 - 4 včetně	4 - 8 včetně	> 8
Součinitel k_1	1,25	1,00	0,75

Tab. 8 Hodnoty součinitele k_2 – plynoucí z působícího tlaku, [17]

Tlak na taveninu, [MPa]	do 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	> 100
Součinitel k_2	3	2	1	0,8	0,6	0,4

Tab. 9 Hodnoty součinitele k_3 – plynoucí z druhu odlévané slitiny, [17]

Slitina na bázi	Pb, Sn	Zn	Al	Mg, Cu
Součinitel k_3	1,1 – 1,2	1	0,9	0,75 – 0,8

Tab. 10 Součinitel k_4 – plynoucí z poměru tloušťky stěn, [17]

Poměr tloušťky stěn odlitku	rovnoměrný	nerovnoměrný
Součinitel k_4	1,0	1,5

Pro odlitky ze slitin hliníku o malé hmotnosti od 30 g do 200 g lze použít pro výpočet průřezu vtokového naříznutí (S_Z) zjednodušený vzorec, který je též uveden v publikaci, [19]:

$$S_Z = 0,1\sqrt{V \cdot e}, \quad (2.10)$$

kde: V – součet objemu odlitku a přetoků [m^3]; e – převažující tloušťka stěny odlitku [m]; $0,1$ – konstanta definovaná podle ČSN 22 8601.

Též v normě ČSN 22 8601 [19] je uveden ještě další vztah pro výpočet průřezu vtokového naříznutí (S_Z):

$$S_Z = 0,016(V)^{0,745}, \quad (2.11)$$

kde: V – součet objemu odlitku a přetoků [m^3].

2.4.8. Určení průřezu vtokových kanálů

Poměr průřezu vedlejšího vtokového kanálu S_{KV} (před přechodem do vtokového zářezu) k ploše vtokového zářezu se řídí způsobem lití [19]:

- a) pro stroje se studenou tlakovou komorou poměr $S_Z : S_{KV}$ je 1 : 1,3 až 1 : 1,8;
- b) pro stroje s teplou tlakovou komorou $S_Z : S_{KV}$ je 1 : 1,5 až 1 : 2.

Poměr výchozího průřezu hlavního vtokového kanálu S_K k zářezům všech odlitků ve formě nemá být menší než 1.

Výpočet průřezu vtokového kanálu závisí na násobnosti forem. Hlavním faktorem ovlivňujícím plochy průřezů vtokových kanálů je větvení vtokových kanálů. Pokud je kanál rozdělen na větvení, celkový průřez by měl být zvýšen o 5 až 30 % po každém rozdělení, směrem od vtokového naříznutí k tabletě. Při samotném výpočtu se postupuje tak, že se navrhují průřezy vtokových kanálů postupně směrem od vtokového naříznutí, [17][20].

Průřez kanálu před vyústěním do vtokového naříznutí u strojů se studenou komorou, se stanovuje podle vztahu [19]:

$$S_K = n \cdot (1,3 - 1,8) \cdot S_Z \quad (2.12)$$

kde: n – počet odlitků, do kterých je z kanálu vedena tavenina.

Průřez větvicího se kanálu je určen podle vztahu [19]:

$$S_{KZ} = (S_{K1} + S_{K2} + \dots + S_{KN}) \cdot k \quad (2.13)$$

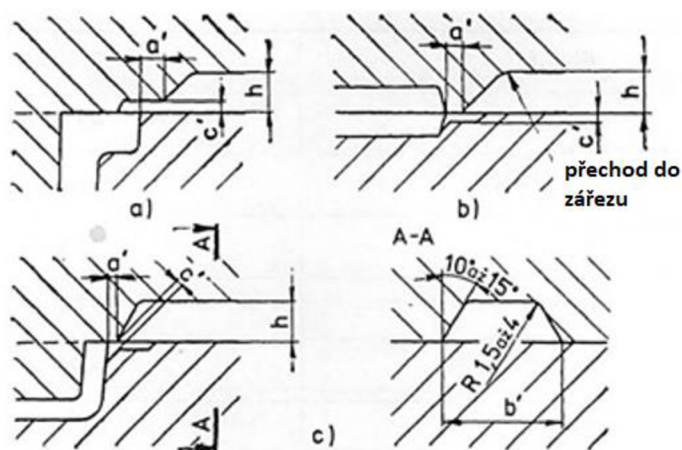
kde: S_{KZ} – plocha vtokového kanálu po sloučení [m^2]; S_{KN} – plocha n -tého slučovaného vtokového kanálu [m^2]; k – koeficient zvětšení průřezu vtokového kanálu (5 % až 30 %).

2.4.9. Určení geometrických charakteristik a konstrukčního řešení částí vtokového systému

Při navrhování geometrie vtokového systému a jeho konstrukce je důležité zohlednit několik faktorů, včetně funkčnosti tlakové lící formy, jednoduchosti odstranění odlitku z dutiny formy, správného odlévání taveniny ve formě a dodržení zákonů hydromechaniky a termomechaniky, [15].

2.4.9.1. Připojení odlitku na vtokovou soustavu – vtokové naříznutí

Každý vtokový zářez pro spojení vtokové soustavy s odlitkem je navržen speciálně pro daný odlitek. Na Obr. 15 jsou představeny některé běžné typy řešení spojení vtokového naříznutí s odlitkem, [19].



Obr. 15 Možnosti připojení vtokového nářžnutí, [15]

V tTab. 11 jsou uvedeny doporučené geometrické charakteristiky pro připojení zářezu na odlitek pro jednotlivé druhy slitin, [19].

Tab. 11 Doporučené hodnoty rozměrů připojení zářezů na odlitek, [19]

Slitina na bázi	Rozměry připojení zářezu [mm]	
	a'	b'
Zn	0,0 – 1,5	0,35 – 1,2
Al	0,0 – 3,0	0,70 – 2,5
Mg	2,0 – 3,0	0,60 – 2,0
Cu	2,5 – 3,0	0,80 – 3,0

2.4.9.2. Připojení odlitku s válcovou plochou na vtokovou soustavu – vtokové nářžnutí

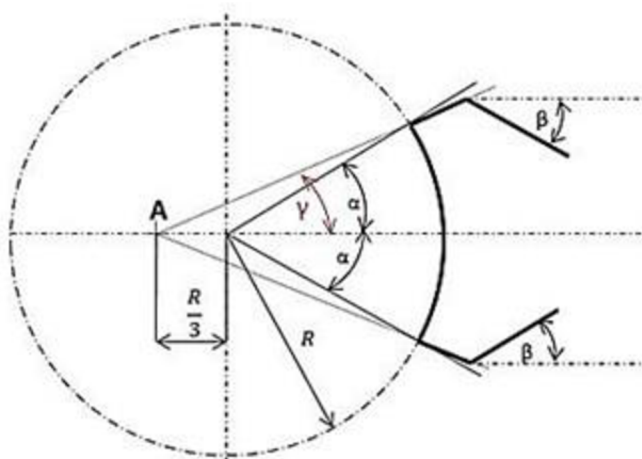
Pro správné připojení vtokového zářezu k odlitku je důležité, aby jeho tvar byl přesně stejný jako tvar válcové plochy, ke které ho chceme připojit. To znamená, že poloměr zakřivení zářezu musí být shodný s poloměrem zakřivení plochy. Pokud je odlitek rotační, poloměr zakřivení zářezu se rovná poloměru odlitku. Pro konstrukci tvaru zářezu v dělicí rovině lze postupovat podle následujícího postupu [19]:

1. sestrojíme osu vtokového kanálu a na ní zvolíme počátek souřadnicové soustavy shodný s osou rotace odlitku;
2. na začátku návrhu soustavy vytvoříme kružnici protínající osu vtokového kanálu s poloměrem stejným jako poloměr odlitku,

3. na začátku souřadnicové soustavy nakreslíme dvě sečnice protínající kružnici směrem ke vtokovému zářezu, které svírají s hlavní osou úhel $\alpha = 30^\circ$. Vzniklý kružnicový výsek je totožný s tvarem a délkou vtokového nářiznutí,

4. Umístíme pomocný bod A vzdálený $R/3$ od začátku souřadnicové soustavy a nakreslíme dvě přímky, které spojují bod A s koncovými body kružnicového výseku. Tímto způsobem získáme přední náběhovou hranu vtoku, její délka je volena podle potřeby pokynů toku taveniny zářezem, [19].

Zadní náběhová hrana je umístěna pod úhlem $\beta = 30^\circ$ od přímky, která prochází koncovým bodem přední náběhové hrany a zároveň je rovnoběžná s osou vtokového kanálu.



Obr. 16 Schéma připojení vtokového nářiznutí na válcovou plochu [19]

Pro určení délky vtokového nářiznutí je možno použít vztah, [3]:

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \alpha}{360} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot 60}{360} = \frac{\pi \cdot R}{3}, \quad (2.14)$$

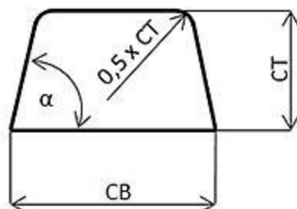
kde: R – poloměr válcové plochy/odlitku [mm].

Výška vtokového nářiznutí lze určit podle vztahu.

$$b = \frac{S_z}{a}, \quad (2.15)$$

2.4.9.3. Vtokový kanál

Průřez vtokového kanálu se volí zpravidla kruhový nebo lichoběžníkový. V praxi se nejčastěji využívá lichoběžníkového tvaru podle Obr. 17.



Obr. 17 Průřez vtokového kanálu, [3]

Jednotlivé rozměry vtokového kanálu podle Obr. 17 lze určit ze vztahu, [3]:

$$S_K = CB \cdot CT - CT^2 \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) = 2 \cdot CT^2 - CT^2 \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) \Rightarrow CT = \sqrt{\frac{S_K}{2 - \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)}}, \quad (2.16)$$

kde: CB – šířka vtokového kanálu [mm]; CT – výška vtokového kanálu [mm], α – úhel sklonu stěn vtokového kanálu [°].

Šířku vtokového kanálu je možno určit ze vztahu:

$$CB = 2 \cdot CT \quad (2.17)$$

2.4.9.4. Odvzdušnění a přetokové jamky

Pro odvedení vzduchu a plynů z taveniny a dělicích prostředků z dutiny se používá odvzdušňovací kanál: mezi dělicí plochu nebo pevnými a pohyblivými částmi formy. V Tab. 12 jsou uvedeny doporučené hloubky kanálů. Pro průřezy odvzdušňovacích kanálů na odlitku se shodují stejné hodnoty jako u průřezu nařiznutí, [3].

Tab. 12 Doporučené hloubky odvzdušňovacích kanálů [3]

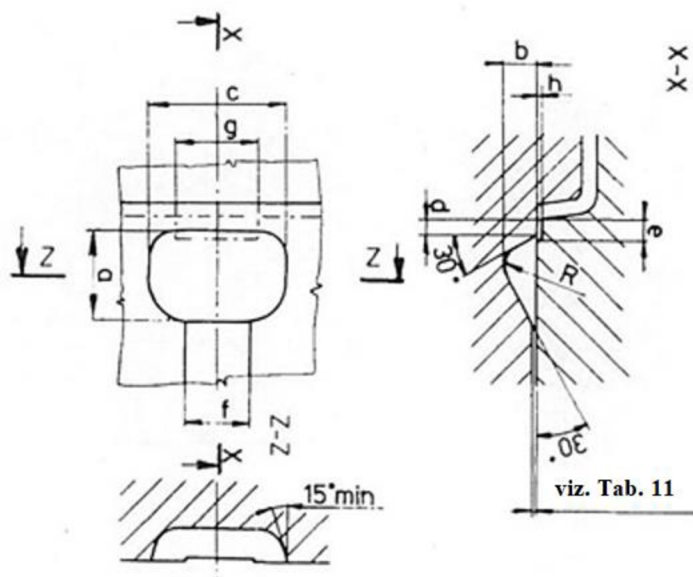
Odlitek ze slitiny na bázi	Hloubka kanálů [mm]
Zn, Pb	0,05 – 0,10
Al, Mg	0,10 – 0,20
Cu	0,15 – 0,30

Pro predikci nedolití odlitku se ve vysokotlaké formě zhotovují tzv. přetoky. Jeden z možných tvarů přetoku, doporučený normou ČSN 22 8601, je znázorněn na Obr. 18. Jeho základní rozměry jsou uvedeny v Tab. 13. Jejich uspořádání je voleno tak, aby

docházelo k jejich postupnému vyplňování taveninou. Potřebný objem přetoků je uveden v Tab. 6.

Přetoky se konstrukčně umísťují zpravidla do pohyblivé části formy a tvoří také opěrnou plochu pro vyhazovače formy.

Tvar přetoku je uspořádán tak, aby umožnil vniknutí prvotně ztuhlého zoxidovaného kovu, a přitom nebránil úniku vzduchu a plynů z dutiny formy, [15].



Obr. 18 konstrukční řešení přetoků, [19]

Tab. 13 Doporučené rozměry přetoků, [19]

	Rozměry podle označení [mm]							
	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 *)							
f	určuje konstruktér *)							
R	1	1,8	2,4	3	3	3	3	3
d	2	2	2	2,5	2,5	3	3	3,5
e	$d + 1 - 2$							
g	5	6	6	8	10	10	12	15
h	pro Al od 0,6 do 1,5 – pro Zn od 0,3 do 0,8							

*upravuje se po zkouškách formy.

Výše uvedené skutečnosti a matematické vztahy byly použity při řešení experimentální části práce.

3. Experimentální část práce

Experimentální část této diplomové práce je zaměřena na návrh vtokové soustavy vysokotlaké formy pro odlévání nízkohmotnostního odlitku (cca o hmotnosti 0,136 g) z hliníkové slitiny na bázi Al-Si (silumin).

Na základě tvarové charakteristiky odlitku a jeho hmotnosti byl proveden výpočetní návrh konstrukce vtokového systému. Pro tento účel byly využity různé varianty výpočtu, které vyplývají z normy ČSN 22 8601 a využívaly metodiku podle americké asociace, (North American Die Casting Association - NADCA). Po provedení výpočetního návrhu vtokové soustavy pro konkrétní odlitek, bylo provedeno analytické zhodnocení proudění taveniny ve vtokovém kanálu pro jednotlivé varianty výpočtu. Následně bylo provedeno ověření a vyhodnocení vhodné varianty navržené vtokové soustavy. Pro tento účel byl použit slévárenský simulační program MagmaSoft a s jeho použitím byl proveden numerický simulační výpočet proudění taveniny ve vtokové soustavě vysokotlaké formy.

3.1. Charakteristika odlitku

Výpočetní návrhy vtokových soustav byly realizovány pro odlitek příruby elektromotoru, který je znázorněn na Obr. 19. Konstrukční výkres odlitku je uveden v příloze A.



Obr. 19 Odlitek příruby elektromotoru

Materiálem odlitku je slitina hliníku AlSi12Cu1(Fe). Maximální průměr odlitku je 116,5 mm a charakteristická tloušťka stěny odlitku je 2 mm.

Pro návrh vtokové soustavy je nutno znát objem odlitku a jeho charakteristické rozměry. K tomuto účelu byl na základě výkresové dokumentace odlitku byl vytvořen model odlitku pomocí programu Autodesk Inventor. S využitím příslušného modulu programu Autodesk Inventor byl stanoven objem odlitku. Dále na základě známé hustoty

slitiny AlSi12Cu1(Fe) byla stanovena hmotnost odlitku. V Tab. 14 jsou uvedeny základní charakteristiky vyráběného odlitku. Na základě hmotnostních a objemových charakteristik odlitku uvedených v Tab. 14 byl realizován výpočetní návrh rozměrových charakteristik vtokového systému formy.

Tab. 14 Hmotnostní a objemové charakteristiky odlitku

VELIČINA	HODNOTA
Slitina	EN AC 47 100 – AlSi12Cu1(Fe)
Hustota slitiny	2650 kg.m ⁻³
Objem odlitku	51697,9. 10 ⁻⁹ m ³
Hmotnost odlitku	0,136 kg
Průměr odlitku	0,1165 m
Charakteristická tloušťka stěny	0,002 m

3.1.1. Rozbor výroby zvoleného odlitku

Odlitek je odléván na vysokotlakovém stroji s typovým označením Müller Weingarten 600. Jedná se o stroj s poloautomatickým provozem s elektronickým řízením. Tento stroj je určen k tlakovému lití neželezných kovů. Tento stroj vybaven je systémem třífázového vstříkovaní multiplikátorem a tlačítkovým ovládním. Hlavní technologické parametry stroje jsou uvedeny v Tab. 15.

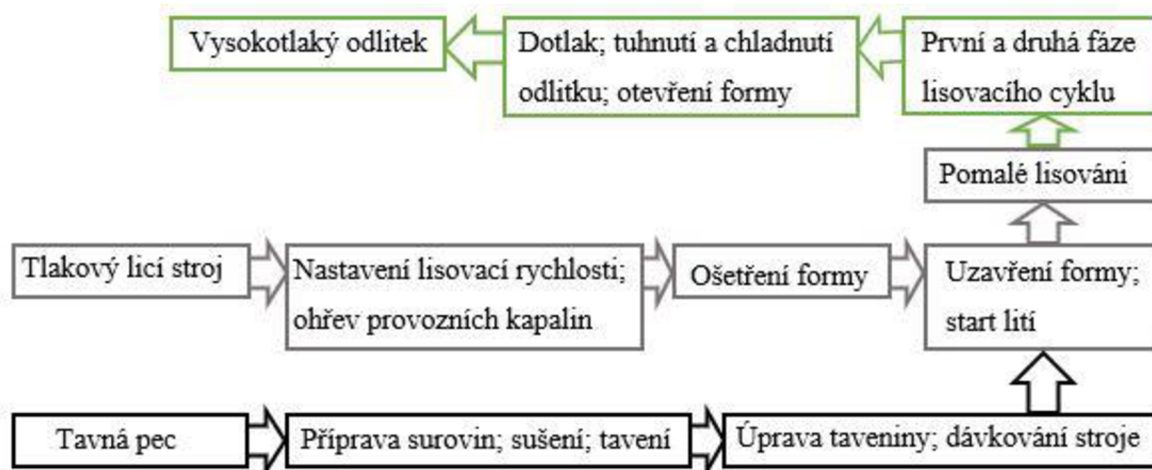
Tab. 15 Parametry tlakového licího stroje pro výrobu odlitku příruby elektromotoru

Rozměry (š x v x d)	2 m x 2,3 m x 8,7 m
Váha	27 t
Výkon motoru	37 kW
Uzavírací síla	600 MN
Lisovací síla	65 MN
Vyhazovací síla	35 MN
Min./max. výška formy	0,4 – 0,9 m
Max. hmotnost Al odlitku	12 kg

Tavenina slitiny AlSi12Cu1(Fe) byla realizovaná v plynové peci a z této pece byla slitina je po rafinaci dopravována do udržovací a dávkovací pece umístěné vedle

tlakového liciho stroje. Teplota taveniny v peci byla kontrolována ponorným teploměrem typu THERM 2101 (opatřeným PtRh-Pt termočlánkem) a teplota vysokotlaké formy byla kontrolována dotykovým teploměrem THERM 2101.

Na obr. 20 je skupinové schéma výroby tohoto odlitku vysokotlakým způsobem.



Obr. 20 Skupinové schéma procesu lití pod tlakem odlitku příruby elektromotoru

Dávkování taveniny slitiny $AlSi12Cu1(Fe)$ bylo prováděno automaticky z udržovací pece pneumatickým dávkovačem. Průměr plnicí komory tlakového liciho stroje je 70 mm, délka 350 mm.

Ošetření líce formy bylo zabezpečeno automaticky, zařízením firmy Wollin prostředkem Dascocast, v poměru 1:100 (1 díl Wollin, 100 dílů vody). Pro mazání odlévacího pístu v plnicí tlakové komoře byl použit mazací prostředek Metalstar FE 82. Sledování technologických parametrů odlévání bylo pozorováno přímo na obrazovce řídicího systému tlakového liciho stroje a na řídicím systému dávkovací pece.

Odlitek byl odléván za technologických parametrů liciho cyklu prezentovaných v Tab. 16.

Tab. 16 Technologické parametry liciho cyklu

PARAMETR	HODNOTA
Teplota taveniny	708 °C
Teplota formy	220 °C
Rychlost lisovacího pístu v první fázi	0,4 m.s ⁻¹
Rychlost lisovacího pístu v druhé fázi	2,8 m.s ⁻¹
Dotlak	25 MPa

3.1.2. Charakteristiky chemického složení a makrostruktury vyráběného odlitku

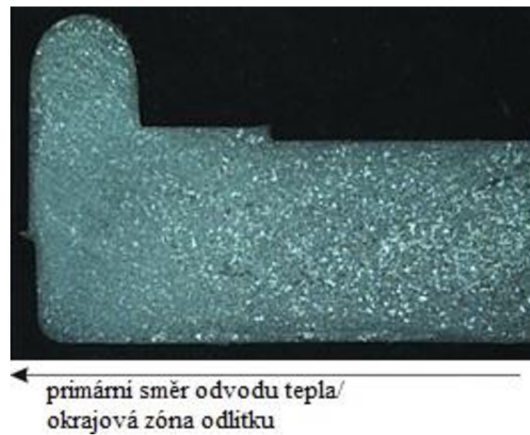
V tab. 17 je uvedeno chemické složení slitiny EN AC 47 100 (AlSi12Cu1(Fe)).

Tab. 17 Chemické složení slitiny EN AC 47 100

Chemické složení slitiny EN AC 47 100											
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
zbytek	10,5	max.	0,7 -	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
	-	1,5	1,2	0,55	0,35	0,1	0,3	0,55	0,2	0,1	0,2
	13,5										
Chemická analýza slitiny EN AC 47 100 s využitím optického chemického spektrometru Q4 Tasman											
85,27	12,02	0,71	1,19	0,21	0,13	0,02	0,02	0,35	0,02	0,03	0,03

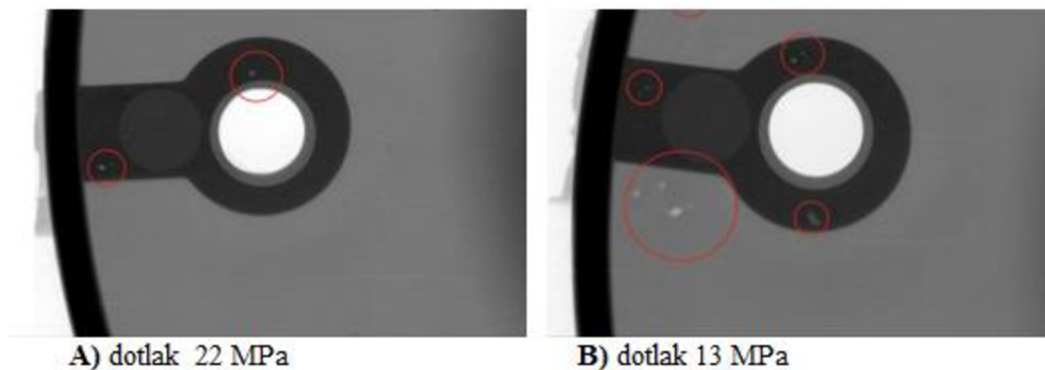
Jak z chemického složení uvedeného v Tab. 17 plyne, tato slitina se nachází v oblasti eutektického složení slitin na bázi siluminu, z čehož je možné odvozovat její dobrou zabíhavost, nízkou náchylnost k tvorbě staženin a dobré mechanické vlastnosti.

S ohledem na způsob lití, odlitky vykazují jemnozrnnou strukturu vznikající vlivem vysokého podchlazení taveniny při styku s relativně chladným lícem formy. Jemnozrnná struktura směrem k tepelné ose odlitku, tj. ve směru proti primárnímu směru odvodu tepla hrubne, jak je to znázorněno na Obr. 21.



Obr. 21 Makrostruktura okrajové části odlitku

Odlitky lité pod tlakem jsou náchylné na tvorbu vad vázaných na nehomogenitu odlitku. Tyto nehomogenity jsou prioritně vyvolány porozitou, která může být způsobená nesprávním nastavením lisovací rychlosti a lisovacího tlaku, nebo nesprávnou konstrukcí vtokového systému a odvzdušnění formy. Na Obr. 22 jsou dokumentovány vnitřní poruchy celistvosti odlitku způsobené proměnnou hodnotou dotlaku, tedy tlaku lisovacího. Tyto vnitřní vady byly stanoveny s použitím RTG analýzy.



Obr. 22 Označení nehomogenity odlitku příruby elektromotoru na RTG snímcích odlitku

3.2. Výpočetní návrh vtokové soustavy

Návrh vtokové soustavy pro odlitek dle Obr. 19 (Příloha A) byl realizován v smyslu metodiky prezentované v kapitole 2.4. Samotný výpočetní návrh vtokové soustavy byl sestaven z následujících kroků:

- a) určení doby plnění tvarové dutiny formy

- b) určení rychlosti taveniny ve vtokovém naříznutí
- c) určení objemu a hmotností přetokových jamek
- d) určení průřezu vtokového naříznutí
- e) určení rozměrů vtokového naříznutí
- f) určení rozměrů vtokové soustavy

3.2.1. Určení doby plnění tvarové dutiny vysokotlaké formy

Určení doby plnění dutiny formy bylo provedeno na základě uvedení hodnot, tloušťka 2 mm, odpovídá rozmezí časů $t = 0,02$ s až 0,06 s, dle normy ČSN 22 8601. Protože interval doby plnění dutiny formy dle této normy je relativně široký, byla doba plnění tvarové dutiny formy určena podle závislosti doby plnění na tloušťce odlitku, viz obr. 13 [1],[4]. Druhý způsob určení dob vyplnění dutiny slévárenské formy taveninou slitiny hliníku vychází ze vztahu (2.6).

Doba plnění tvarové dutiny formy na základě empiricky odvozených grafických závislostí udávají autoři Valecký, Ragan [1], [4], viz Obr. 13. Na základě tohoto grafu je možné určit dobu plnění tvarové dutiny formy pro odlitek dle Obr. 19, za časový okamžik 0,06 s, což je v souladu s normou ČSN 22 8601.

Dle metodiky zformulované podle NADCA, je možné určit dobu plnění tvarové dutiny formy přesněji. Vycházíme-li ze vztahu (2.6) je možné určit dobu plnění tvarové dutiny formy:

$$t = K \cdot \left\{ \frac{T_Z - T_{LIK} + S \cdot Z}{T_{LIK} - T_f} \right\} \cdot h_{ch} = 34,6 \cdot \left(\frac{660 - 590 + 0,2 \cdot 4,8}{590 - 200} \right) \cdot 0,002 = 0,029s,$$

kde: t – čas plnění tvarové dutiny formy [s]; $T_Z = 660$ °C; $T_{LIK} = 590$ °C; $T_f = 200$ °C; $S = 20$ %; $Z = 4,8$ [°C·%⁻¹]; $K = 34,6$ s·mm⁻¹; $h_{ch} = 0,002$ m.

Z výše uvedených vztahů a grafů plyne, že k relevantně uvažována doba plnění tvarové dutiny formy může nabýt hodnota $t = 0,029$ s dle metodiky NADCA, nebo $t = 0,06$ s dle empiricky odvozeného diagramu podle Obr. 13. Obě hodnoty zapadají do rozsahu uvedeném v normě ČSN 22 8601.

3.2.2. Určení rychlosti taveniny ve vtokovém naříznutí

Dle normy ČSN 22 8601 je rychlost taveniny ve vtokovém naříznutí pro odlitek ze slitin hliníku definovaná v rozmezí $v_z = 20$ až 60 m·s⁻¹, viz

Tab. 5. Správné určení rychlosti taveniny ve vtokovém nařiznutí teda vyžaduje určité zkušenosti technologů a konstruktérů.

Na základě empiricky odvozených grafických závislostí, které udávají autoři Valecký, Ragan [1], [4], viz Obr. 14, je možné pro odlitek s tloušťkou stěny 2 mm a průměrem 116,5 mm (ekvivalent délkového rozměru uvedeného v grafu) určit rychlost v nařiznutí na hodnotu $v_z=35 \text{ m.s}^{-1}$.

Podle publikace [15] je možné určit rychlost proudění taveniny ve vtokovém nařiznutí podle vztahu (2.7):

$$v_z = \frac{m_o}{\rho \cdot t \cdot d_p \cdot 0,785} = \frac{0,136}{2650 \cdot 0,029 \cdot 70 \cdot 0,785} = 32,16 \text{ m.s}^{-1},$$

kde: v_z – rychlost proudu taveniny v nařiznutí [m.s^{-1}]; $m_o = 0,136 \text{ kg}$; $\rho = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$; $d_p=0,07 \text{ m}$; $0,785$ – konstanta.

Oba určené hodnoty rychlosti proudění taveniny ve vtokovém nařiznutí zapadají do rozsahu uvedeném v normě ČSN 22 8601. Jelikož rychlost v_z odvozená z empirického grafu, i rychlost dopočtená dosahují blízkých hodnot, v dalším výpočtu bude uvažována hodnota rychlosti taveniny ve vtokovém zářezu, která byla určena na základě vztahu (2.6), teda $v_z = 32,16 \text{ m.s}^{-1}$.

3.2.3. Určení objemu a hmotností přetokových jamek

Vycházejíc z hodnot uvedených v Tab. 6, je pro charakteristickou tloušťku steny odlitku $h_{ch} = 2 \text{ mm}$, při požadované vysoké kvalitě povrchu, určit souhrnný objem přetokových jamek na hodnoty $V_{PR} = 38 \%$ z objemu odlitku. To je přibližně $V_{PR} = 19645,202 \text{ mm}^3$. Po přepočtení je hmotnost přetokových jamek rovná $m_{PR} = 52 \text{ g}$.

3.2.4. Určení průřezu vtokového nařiznutí

Výpočet průřezu vtokového nařiznutí bude vykonán na základě vztahů uvedených v kapitole 2.4.7.

3.2.4.1. Určení průřezu vtokového nařiznutí Variant 1

Pro určení průřezu vtokového nařiznutí pro Variant 1 bude vycházeno ze vztahu (2.8)

$$S_{z1} = \frac{G}{\rho \cdot t \cdot v_z} = \frac{0,188}{2650 \cdot 0,029 \cdot 32,16} = 76,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2,$$

kde:

S_Z – průřez vtokového naříznutí, [m²]; $G = 0,188$ kg; $\rho = 2650$ kg.m⁻³; $t = 0,029$ s; $v_t = 32,16$ m.s⁻¹.

3.2.4.2. Určení průřezu vtokového naříznutí Variant 2

Pro určení průřezu vtokového naříznutí pro Variant 2 bude vycházeno ze vztahu (2.9)

$$S_{Z2} = \frac{G}{\rho \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot v_t)(k_3 \cdot k_4 \cdot t)} = \frac{0,188}{2650 \cdot (1,25 \cdot 2 \cdot 15)(0,9 \cdot 1,5 \cdot 0,029)} \\ = 48,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2,$$

kde:

$G = 0,188$ kg; $\rho = 2650$ kg.m⁻³; $t = 0,029$ s; $k_1 = 1,25$; $k_2 = 2$; $k_3 = 0,9$; $k_4 = 1,5$; $v_t = 15$ m.s⁻¹.

3.2.4.3. Určení průřezu vtokového naříznutí Variant 3

Pro určení průřezu vtokového naříznutí pro Variant 3 bude vycházeno ze vztahu (2.10)

$$S_{Z3} = 0,1 \cdot \sqrt{V \cdot e} = 0,1 \cdot \sqrt{71343,1 \cdot 10^{-9} \cdot 0,002} = 119,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

kde:

$V = 71343,1 \cdot 10^{-9}$ m³; $e = 0,002$ m.

3.2.4.4. Určení průřezu vtokového naříznutí Variant 4

Pro určení průřezu vtokového naříznutí pro Variant 4 bude vycházeno ze vztahu (2.11)

$$S_{Z4} = 0,016 \cdot (V)^{0,745} = 0,016 \cdot (71343,1 \cdot 10^{-9})^{0,745} = 66,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

kde:

$V = 71343,1 \cdot 10^{-9}$ m³.

3.2.4.5. Určení průřezu vtokového naříznutí Variant 5

Pro určení průřezu vtokového naříznutí pro Variant 5 bude vycházeno ze vztahu (2.9), přičemž za hodnotu t bude dosazena hodnota $t = 0,06$ s, která plyne z empiricky odvozeného grafu.

$$S_{Z5} = \frac{G}{\rho \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot v_t)(k_3 \cdot k_4 \cdot t)} = \frac{0,188}{2650 \cdot (1,25 \cdot 2 \cdot 15)(0,9 \cdot 1,5 \cdot 0,06)} = 35,03 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

kde:

$G = 0,188$ kg; $\rho = 2650$ kg.m⁻³; $t = 0,006$ s; $k_1 = 1,25$; $k_2 = 2$; $k_3 = 0,9$; $k_4 = 1,5$; $v_t = 15$ m.s⁻¹.

3.2.5. Určení rozměrů vtokového naříznutí

Pro určení rozměrů vtokového naříznutí bude vycházeno z metodiky uvedené v kapitole 2.4.9.2. Pro délku vtokového naříznutí, a teda připojení naříznutí k odlitku s válcovou plochou bude využit vztah (2.14):

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \alpha}{360} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot 60}{360} = \frac{\pi \cdot R}{3} = \frac{3,14 \cdot 0,05825}{3} = 60,968 \cdot 10^{-3} \text{ m},$$

kde:

$$R = 0,05825 \text{ m}.$$

Délka vtokového naříznutí je pro všechny varianty výpočty průřezu vtokového naříznutí konstantní. Přeměnným parametrem určujícím průřez vtokového naříznutí je jeho výška b . Pokud je do vztahu (2.15) dosazeno hodnot $S_{Z1} - S_{Z5}$, a hodnotu a , je možné určit rozměry vtokového naříznutí, které jsou uvedeny v Tab. 18.

Tab. 18 Rozměry vtokového naříznutí

	Průřez naříznutí, S_Z	Délka naříznutí, a	Výška naříznutí, b
Variant 1	$S_{Z1} = 76,06 \text{ mm}^2$		$b_1 = 1,25 \text{ mm}$
Variant 2	$S_{Z2} = 48,32 \text{ mm}^2$		$b_2 = 0,79 \text{ mm}$
Variant 3	$S_{Z3} = 119,5 \text{ mm}^2$	$a = 60,968 \text{ mm}$	$b_3 = 1,96 \text{ mm}$
Variant 4	$S_{Z4} = 66,05 \text{ mm}^2$		$b_4 = 1,08 \text{ mm}$
Variant 5	$S_{Z5} = 35,03 \text{ mm}^2$		$b_5 = 0,57 \text{ mm}$

Při porovnání výsledných hodnot výšky vtokového naříznutí b s hodnotami přípustnými v smyslu normy ČSN 22 8601 je patrné, že výška vtokového naříznutí u Variantu 5, $b_5 = 0,57 \text{ mm}$ je mimo rozsah určený normou. Rozsah výšek vtokového naříznutí b pro odlitky na bázi Al je normou určen na hodnoty $b = 0,7 - 2,5 \text{ mm}$. Pro demonstraci možných dopadů na sledované vlastnosti bude v dalším výpočtu a řešení uvažováno i s touto hodnotou.

3.2.6. Určení rozměrů vtokové soustavy

Výpočet průřezu vtokového naříznutí bude vykonán na základě vztahů uvedených v kapitole 2.4.

3.2.6.1. Určení průřezů vtokových kanálů

Jak je uvedeno v kapitole 2.4.8, pro stroje s horizontální studenou komorou je poměr průřezu vedlejšího vtokového kanálu (před přechodem do naříznutí) k průřezu naříznutí určen poměrem:

$$S_Z : S_{KV} \dots\dots\dots 1 : 1,3 \text{ až } 1 : 1,8.$$

Pro zachování konstantnosti výpočtu pro všechny varianty výpočetního návrhu vtokového systému byl volen poměr $S_Z : S_{KV}$ na hodnotu 1,5. Pokud je uvažován vztah (2.12), je možné vypočítat hodnoty průřezu vedlejších vtokových kanálů tak, jak jsou uvedeny v Tab. 19.

V případě, že hlavní licí kanál se dělí na vedlejší, uvažujeme 5 – 30 % zvětšení plochy průřezu směrem k tabletě. Pro daný odlitek je uvažováno zvětšení průřezu o 10 %. Průřez hlavních vtokových kanálů pro jednotlivé varianty je definován v Tab. 19.

Tab. 19 Průřezy vtokových kanálů

	Průřez vedlejšího vtokového kanálu, S_{KV}	Průřez hlavního vtokového kanálu, S_K
Variant 1	$S_{KV1} = 228,18 \text{ mm}^2$	$S_{K1} = 501,99 \text{ mm}^2$
Variant 2	$S_{KV2} = 144,96 \text{ mm}^2$	$S_{K2} = 318,91 \text{ mm}^2$
Variant 3	$S_{KV3} = 358,50 \text{ mm}^2$	$S_{K3} = 788,70 \text{ mm}^2$
Variant 4	$S_{KV4} = 198,15 \text{ mm}^2$	$S_{K4} = 435,92 \text{ mm}^2$
Variant 5	$S_{KV5} = 105,09 \text{ mm}^2$	$S_{K5} = 231,20 \text{ mm}^2$

3.2.6.2. Určení geometrie vtokových kanálů

Při uvažování lichoběžníkového průřezu vedlejších vtokových kanálů je možné jejich rozměry určit na základě vztahu (2.16) a (2.17). Geometrické rozměry vedlejších a hlavních vtokových kanálů jsou uvedeny v Tab. 20.

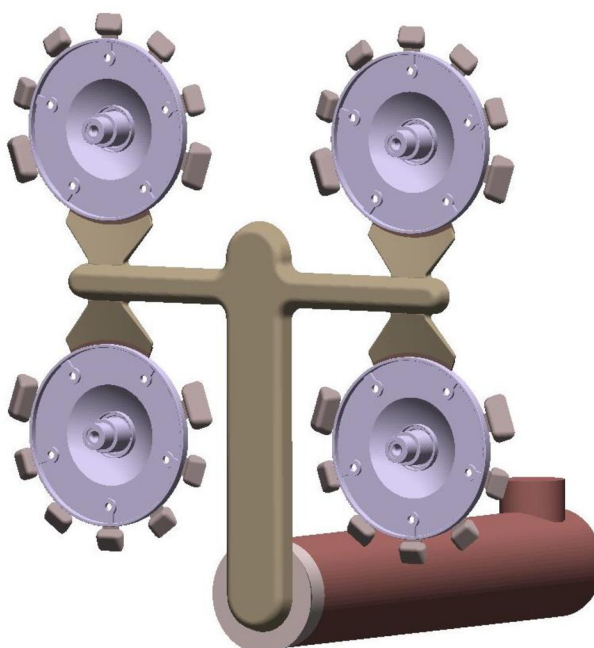
Tab. 20 Geometrické rozměry vtokových kanálů

	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5
Vedlejší kanál					
CT	11,48 mm	9,15 mm	14,39 mm	10,69 mm	7,79 mm
CB	22,96 mm	18,30 mm	28,78 mm	21,38 mm	15,58 mm
Hlavní kanál					
CT	11,48 mm	9,15 mm	14,39 mm	10,69 mm	7,79 mm
CB	46,80 mm	37,30 mm	58,66 mm	43,64 mm	31,80 mm
Poloměr zaoblení, r	6 mm	4,5 mm	7 mm	5 mm	4 mm
Úhel sklonu stěn, α	75°	75°	75°	75°	75°

Délky vtokových kanálů, jako i jejich vzájemné napojení zůstaly při výpočetním návrhu vtokových soustav totožné se vtokovou soustavou výchozí, a to na hodnotách $l_K = 264$ mm a $l_{KV} = 280$ mm.

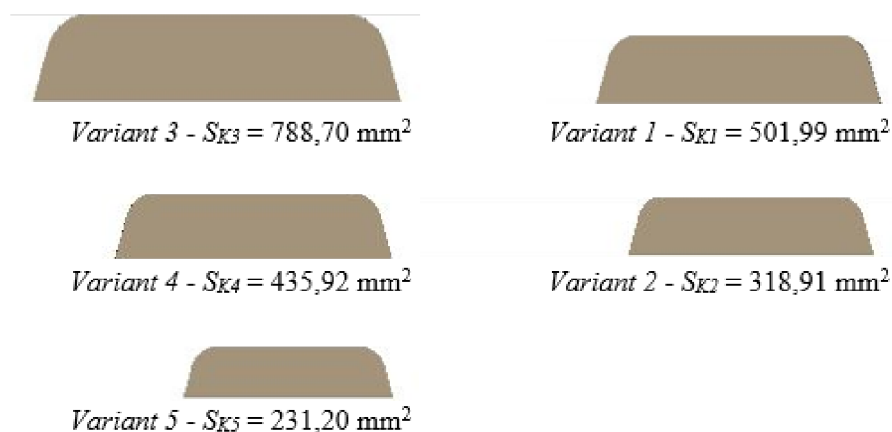
3.2.7. Základní tvar a konstrukční rozdíly geometrie vtokových kanálů plynoucích z výpočetního řešení

Na základě výpočtů výše uvedených byly v programu AuodeskInventor vymodelovány modely vtokových soustav, které byly dále podrobeny numerickým simulacím. Na Obr. 23 je znázorněn základní tvar vtokové soustavy a rozložení odlitků, včetně plnicí komory.



Obr. 23 Základní tvar vtokové soustavy

Jak plyne z výše uvedených výpočtů, délkové rozměry vtokových kanálů, jako i rozměry plnicí komory jsou u všech variant výpočtů stejné. Přeměnné hodnoty nabývají průřezy vtokových nařiznutí S_Z a průřezy vtokových kanálů S_{KV} a S_K . Na Obr. 24 jsou znázorněny rozdíly v geometriích a průřezech hlavních vtokových kanálů. Geometrické charakteristiky dle Obr. 17 jsou uvedeny v Tab. 20.



Obr. 24 Porovnání průřezů hlavních vtokových kanálů

3.2.8. Porovnání spotřeby materiálu pro jednotlivé varianty výpočetního návrhu

Podle výše uvedených výpočtů a údajů uvedených v Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20 a Obr. 24 je evidentní, že využitím různých variant výpočetního řešení návrhu vtokové soustavy pro konkrétní typ odlitku ze sebou nesou i různé nároky na spotřebu materiálu.

V Tab. 21 jsou uvedeny hmotnostní a objemové charakteristiky jednotlivých variant vtokových soustav, jako i přepočítání rozdílu mezi syrovým a hrubým odlitkem, tedy určení odpadu.

Tab. 21 Využitelnost dávky

		Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5
Hrubý odlitek	objem	206,8.10 ⁻⁶ m ³				
	hmotnost	0,544 kg				
Surový odlitek	objem	554,63.10 ⁻⁶ m ³	490,12.10 ⁻⁶ m ³	656,11.10 ⁻⁶ m ³	536,92.10 ⁻⁶ m ³	456,68.10 ⁻⁶ m ³
	hmotnost	1,470 kg	1,299 kg	1,739 kg	1,423 kg	1,210 kg
Využití		37 %	42 %	31 %	38 %	45 %

3.2.9. Určení procentuálního vyplnění plnicí komory

Na základě objemových charakteristik pro surový odlitek uvedených v tab. 20, je určen procentuální podíl vyplnění plnicí komory. Hodnoty procentuálního vyplnění plnicí komory jsou uvedeny v Tab. 22.

Tab. 22 Procentuální vyplnění plnicí komory

Délka plnicí komory	0,35 m				
Průměr lisovacího pístu	0,07 m				
Objem plnicí komory	1346,275.10 ⁻⁶ m ³				
	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5
Vyplnění plnicí komory	41,20 %	36,41 %	48,74 %	39,88 %	33,92 %

Výše uvedené procentuálně podíly vyplnění plnicí komory budou konfrontovány s hodnotami zahlcení plynů v objemu odlitku pro určení výhodného podílu vyplnění.

3.2.10. Určení potřebné uzavírací síly stroje

Jak je patrné na Obr. 24, se podle rozličného výpočtu vtokového nařiznutí mění nejenom průřez vtokových kanálů, ale i jejich geometrie. Přesné hodnoty geometrických rozměrů jednotlivých variant vtokových kanálů jsou uvedeny v Tab. 20. S proměnným rozměrem CB – šířka vtokového kanálu, se mění i průmět plochy vtokové soustavy do dělicí roviny formy, co zákonitě vyvolává změnu velikosti potřebné minimální uzavírací síly stroje. V Tab. 23 jsou uvedeny minimální hodnoty uzavírací síly pro jednotlivé varianty výpočtu.

Tab. 23 Určení potřebné uzavírací síly stroje

	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5
Plocha v dělicí rovině, cm ²	771,71	746,90	797,48	757,98	726,63
Dotlak, MPa	25				
Min. uzavírací síla, kN	1929,27	1867,25	1993,71	1894,95	1816,57
Bezpečnostní faktor, %	20				
Potřebná uzavírací síla, kN	2315,12	2240,70	2392,45	2273,94	2179,88

3.3. Analytické posouzení proudění taveniny ve vtokové soustavě

Analytické posouzení proudění taveniny ve vtokové soustavě je možné provést s ohledem na typ proudění taveniny ve vtokových kanálech a na režim plnění tvarové dutiny formy. K tomuto posouzení je nutné znát rychlostní charakteristiky proudící taveniny i geometrii jednotlivých částí vtokové soustavy.

3.3.1. Určení rychlosti lisovacího pístu

Určení finální rychlosti lisovacího pístu v druhé fázi lisování je vázáno na požadovanou rychlost taveniny ve vtokovém naříznutí. Obecně je možno rychlost lisovacího pístu možno určit na základě rovnice kontinuity podle vztahu:

$$v_z \cdot S_Z = v_{p2} \cdot S_P \quad (3.1)$$

kde:

v_z – rychlost taveniny ve vtokovém naříznutí, [m.s⁻¹]; S_Z – průřez vtokového naříznutí, [m²];
 v_{p2} – rychlost lisovacího pístu v druhé fázi lisování, [m.s⁻¹]; S_P – průřez lisovacího pístu, [m²].

Pokud je do vztahu (3.1) dosazeno hodnot pro S_Z podle Tab. 18, a v_z je uvažována na hodnotě **32,16 m.s⁻¹**, tak při průřezu pístu $S_P = 3,8465 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ jsou vypočtené hodnoty rychlosti lisovacího pístu v druhé fázi uvedené v Tab. 24. Úplný výpočet hodnot uvedených v Tab. 24 je uveden v Příloze B.

Tab. 24 Rychlost lisovacího pístu v druhé fázi

Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5
$v_{p2_1} = 2,54 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{p2_2} = 1,62 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{p2_3} = 4,00 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{p2_4} = 2,21 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{p2_5} = 1,17 \text{ m.s}^{-1}$

3.3.2. Určení rychlosti taveniny při přechodu vtokovými kanály

Pro určení teoretické rychlosti ve vtokovém kanálu je možné použít rovnice kontinuity (3.1), resp. jejího upraveného tvaru dle vztahu:

$$v_z \cdot S_Z = v_{K/KV} \cdot S_{K/KV} \quad (3.2)$$

Na základě výše uvedeného vztahu, jsou určeny teoretické hodnoty rychlostí taveniny ve vtokových kanálech pro jednotlivé návrhy vtokových soustav uvedeny v Tab. 25. Úplný výpočet je uveden v Příloze C.

Tab. 25 Teoretické rychlosti proudění taveniny ve vtokových kanálech

	Rychlost v hlavním kanálu	Rychlost ve vedlejším kanálu
Variant 1	$v_{K1} = 19,46 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{KV1} = 21,44 \text{ m.s}^{-1}$
Variant 2	$v_{K2} = 19,49 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{KV2} = 21,44 \text{ m.s}^{-1}$
Variant 3	$v_{K3} = 19,49 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{KV3} = 19,93 \text{ m.s}^{-1}$
Variant 4	$v_{K4} = 19,76 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{KV4} = 21,44 \text{ m.s}^{-1}$
Variant 5	$v_{K5} = 19,49 \text{ m.s}^{-1}$	$v_{KV5} = 21,44 \text{ m.s}^{-1}$

Jak plyne z Tab. 25 teoretické rychlosti proudění taveniny ve vtokových kanálech nabývají pro jednotlivé varianty výpočetního návrhu vtokových soustav hodnoty, které se pohybují na téměř konstantní úrovni. Tento jev je možné objasnit hypotézou o zachování hmotnostního/objemového průtoku, z které plyne: Pokud je zachován průtok média (taveniny) na vstupu a výstupu, tak rychlostní charakteristiky média při přechodu soustavou s různými průřezy si zachovává konstantní charakter.

3.3.3. Určení typu proudění taveniny ve vtokových kanálech

Jak je uvedeno v kapitole 2.4.1. Obecně rozeznáváme při proudění kapalin proudění laminární, kde kapalina proudí bez míchání částečných proudů a proudění turbulentní, kde se vyskytuje míchání částečných proudů. Jako rozdělovací koeficient při charakterizování typu proudění kapaliny ve vtokovém kanálu slouží Reynoldsovo číslo Re určeno dle vztahu (2.1).

Jelikož má průřez vtokových kanálů lichoběžníkový tvar, pro určení středního průměru potrubí je nutno uvažovat hydraulický průměr, určený dle vztahu:

$$d_H = \frac{4 \cdot S_K}{O_K}, \quad (3.3)$$

kde:

d_H – hydraulický průřez, [mm]; S_K – průřez kanálu, [mm²]; O_K – obvod kanálu, [mm].

Hydraulický průměr je délková/rozměrová charakteristika průtokového průřezu proudů. Vyjadřuje ekvivalentní náhradu průřezu pro potrubí či kanály nekruhového tvaru.

Využitím vztahu (2.1) a (3.3), dosazením hodnot pro jednotlivé varianty výpočtu, byly určeny Reynoldsova čísla uvedeny v Tab. 26. Podrobný výpočet je uvedený v Příloze D.

Tab. 26 Určení Reynoldsova čísla

	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5
Vedlejší kanál					
d_{HKV}	14,36 mm	11,45 mm	18,01 mm	13,39 mm	9,75 mm
Re_{KV}	302177	240942	352293	281765	205169
Hlavní kanál					
d_{HK}	18,05 mm	14,39 mm	22,63 mm	16,82 mm	12,24 mm
Re_K	344394	275267	432891	326208	234140

Na základě údajů uvedených v Tab. 26 je možné předpokládat že se zvyšujícím se hydraulickým průřezem, nebo se zvyšujícím se průřezem plochy vtokových kanálů, stoupá hodnota Reynoldsova čísla, čím je možno vyvozovat předpoklad vyšší turbulence při proudění taveniny skrz vtokové kanály. Tento fakt je podmíněn tím, že pokud je při zvýšení hydraulického průřezu d_H zachována konstantní rychlost proudu (Tab. 25), Reynoldsovo číslo Re se bude zvyšovat, a tím se zvyšuje i turbulence v proudící tavenině.

3.3.4. Určení režimu plnění tvarové dutiny formy

Na základě teoretických základů průběhu plnění formy tekutým kovem vypracovaných Frommerem a Brandtem (kapitola 2.4.1.2), je možné určit režim plnění tvarové dutiny formy na základě rozdělovacího koeficientu určeného vztahem (2.4). Hodnoty poměru S_Z/S_F jsou uvedeny v Tab. 27. Podrobný výpočet je uvedený v Příloze E.

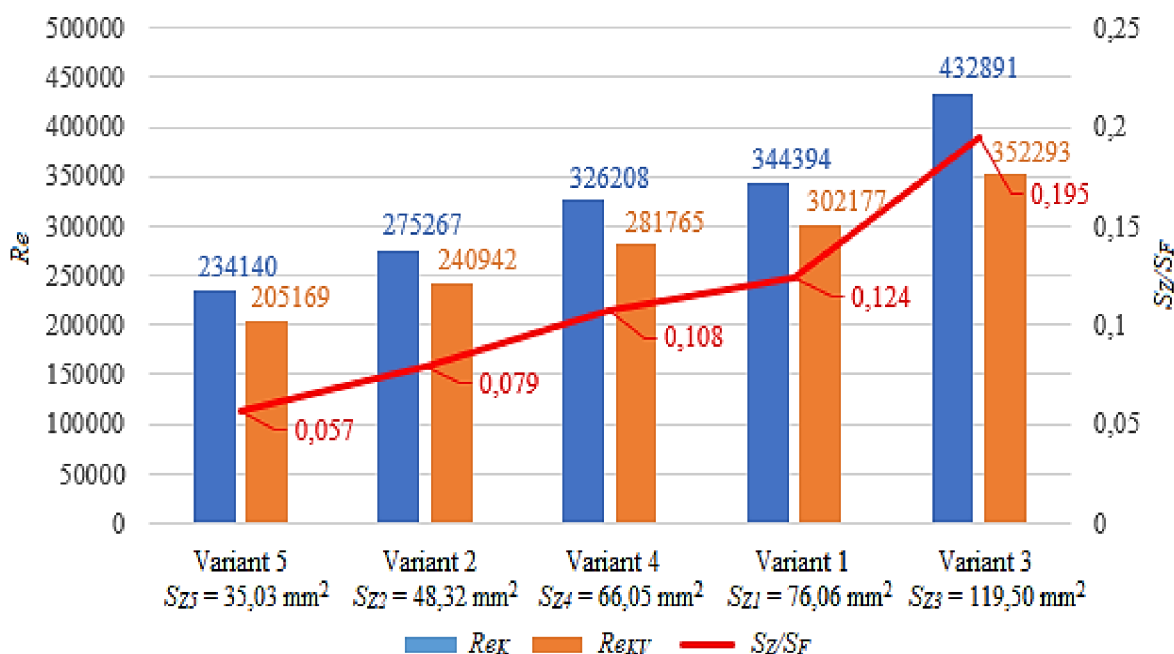
Tab. 27 Určení režimu plnění tvarové dutiny formy

	Poměr S_Z/S_F	Režim plnění
Variant 1	0,124	dle Frommera
Variant 2	0,079	dle Frommera
Variant 3	0,195	dle Frommera
Variant 4	0,108	dle Frommera
Variant 5	0,057	dle Frommera

Na základě údajů uvedených v Tab. 27 je možné předpokládat, že plnění tvarové dutiny bude probíhat v režimu dle Frommera. Současně je možno vyslovit názor, že se snižujícím se podílem S_Z/S_F a teda se zmenšující se plochou vtokového naříznutí, bude se výrazněji projevovat vznik disperzního proudění taveniny ve tvarové dutině formy.

3.3.5. Posouzení hydrodynamických poměrů ve vtokové soustavě

Na základě údajů uvedených v Tab. 19, Tab. 26 a Tab. 27 byl sestrojen graf závislosti typu proudění taveniny ve vtokových kanálech a režimu plnění tvarové dutiny formy na průřezu vtokového naříznutí, zobrazen na Obr. 25.



Obr. 25 Závislost typu a režimu proudění taveniny na průřezu naříznutí

Jak z grafu (Obr. 25) plyne, se zvyšujícím se průřezem vtokového nařiznutí, kterým je podmíněný průřez vtokových kanálů, stoupá hodnota Reynoldsova čísla Re , což dává předpoklad nárůstu turbulence v tavenině při přechodu vtokovými kanály. Na základě tohoto stavu je možné předpovědět zvýšený podíl zachyceného vzduchu taveninou, který bude transportován do odlitku.

Oproti tomu, s rostoucí hodnotou průřezu vtokového nařiznutí S_Z narůstá i podíl S_Z/S_F , což dává předpoklad klidnějšího vyplňování tvarové dutiny formy, a ucelenějšího proudu taveniny při přechodu tvarovou dutinou formy za vtokovým nařiznutím.

Který z výše uvedených aspektů hydrodynamického posouzení proudění taveniny je pro zachytávání plynů v objemu limitující, bude posuzováno využitím numerických simulací.

3.4. Hodnocení výpočetního návrhu využitím numerické simulace

Hodnocení vhodnosti návrhu vtokové soustavy v závislosti na metodě výpočetního řešení bylo hodnoceno využitím programu Magmasoft MAGMA 5.5.1 – HPDC module. Nastavení vstupných parametrů licího cyklu a parametrů procesu lití bylo principiálně totožné s nastavením licího stroje při výrobě odlitků za použití výchozí vtokové soustavy. Rozdíly mezi reálným litím a litím simulovaným vycházejí z metodiky výpočtu. Nastavení parametrů pro potřeby numerické simulace jsou uvedena v Tab. 28.

Tab. 28 Nastavení parametrů procesu lití pro numerickou simulaci

Technologické parametry	
Parametr	Hodnota
Slitina	En AC 47 100 (AlSi12Cu1(Fe))
Teplota taveniny	708 °C
Teplota formy	220 °C
Rychlost lisovacího pístu v první fázi	0,2 m.s ⁻¹
Rychlost lisovacího pístu v druhé fázi	vychází z výpočtu dle vztahu (3.1) – viz Tab. 24
Dotlak	25 MPa
Procesní parametry	
Ošetření formy – ostřík	start – 5s po vyjmutí odlitku trvání – 3s
Ošetření formy – ofuk	start – 2s po ukončení ostříku trvání – 3s
Uzavření formy	2s po ukončení ofuku
Dávkování taveniny	start – 1s po uzavření formy objem dávky kovu – viz Tab. 21 trvání dávkování – 5s prodleva – 3s

Pro zlepšení přesnosti simulace a k získání lepšího popisu cílové podstaty byla volena síť s vysokou jemností a účinností generování. K simulacím licího cyklu byla volená jemná síť, jejíž parametry jsou uvedeny v Tab. 29.

Tab. 29 Parametry pro nastavení sítě

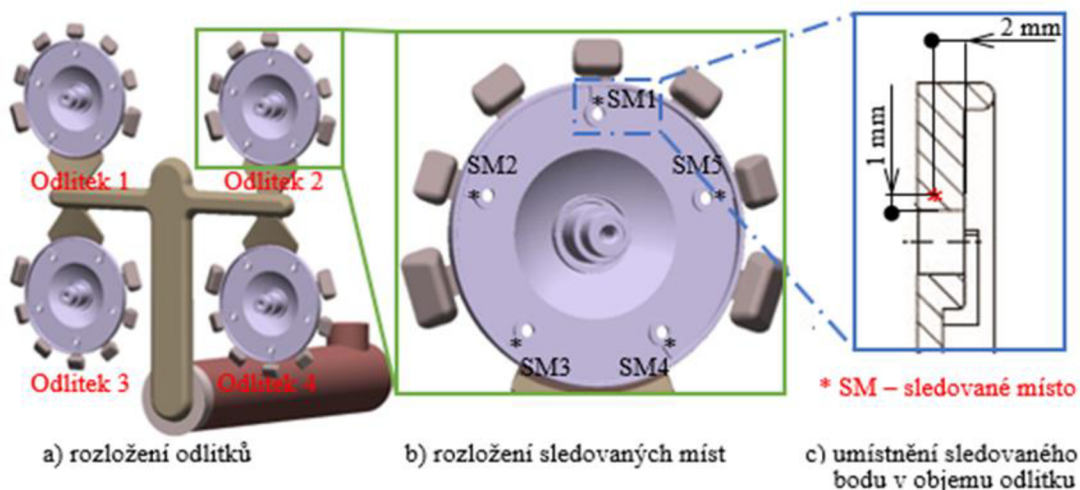
Parametry elementů			
	Velikost elementů [mm]		
	ve směru osy x	ve směru osy y	ve směru osy z
Forma	5	5	5
Vtokové kanály	2	2	2
Temperanční kanály	2	2	2
Plnicí komora + tableta	2	2	2
Odlitky + přetoky	0,66	0,33	0,66
Nařiznutí	0,38	0,19	0,38
* rozložení buněk ekvidistantně ku geometrii jednotlivých objemů			
Parametry sítě – celkové množství elementů			
	celkové množství elementů v síti		
Variant 1	121446920		
Variant 2	121870080		
Variant 3	123505920		
Variant 4	121870080		
Variant 5	121870080		

3.4.1. Vyhodnocení zachycení plynů v objemu odlitku

Obecně platí, že jakostní vlastnosti odlitků litých pod tlakem úzce souvisejí s porozitou, výskyt, který je podmíněn řadou faktorů. Prioritními a zásadními faktory vnášejícími do odlitku příznivé podmínky pro tvorbu porozity je typ proudění taveniny ve vtokových kanálech a režim plnění tvarové dutiny formy. Analytické hodnocení těchto faktorů bylo provedeno v kapitole 2.4.1.

Hodnocení zachycení plynů v objemu odlitku bylo hodnoceno v místech, u kterých následně dochází k třískovému obrábění odlitku a výskyt porozity v těchto místech by mohl být při obrábění problematický, s ohledem na možnost odkrytí pórů po úběru třísky. Současně, tyto místa byly s ohledem na výskyt porozity vyhodnoceni jako kritické i s ohledem na obtékání jader taveninou, které tvoří konstrukční otvor u odlitku. Při obtékání jader dochází k spájení dvou proudů taveniny za jádrem, což dává předpoklad dalšímu

zachycení plynů v odlitku vlivem víření a míchaní taveniny. Posuzované místa jsou znázorněna na Obr. 26. Místa pro sledování zachycení plynů v objemu taveniny jsou umístěny 1 mm v radiálním směru za jádrem a 2 mm od povrchu odlitku do jeho objemu. Označení sledovaných míst je u každého odlitku rozvržené SM1 až SM5 v postupnosti číslování ve směru otáčení od SM1 k ose hlavního vtokového kanálu.



Obr. 26 Sledovaná místa pro hodnocení zachycení plynů v objemu odlitků

Vyhodnocení zachytávání plynů bylo realizováno využitím podmodulu Air Entrapment (zahlcení vzduchu) na konci plnicí fáze, tedy v momentu, kdy byla vtoková soustava vyplněná na 100 % svého objemu, těsně před dotlakovou fází. Tento časový okamžik byl volen s ohledem na to, že dotlak do značné míry eliminuje velikost a rozložení pórů. Také v tomhle časovém okamžiku je možno hodnotit pouze podíl plynů zanesených do objemu odlitku vlivem geometrie vtokové soustavy. Hodnocení a podíl celkové porozity odlitku po ukončení tuhnutí a chladnutí odlitků je funkcí ne jenom porozity plynné, ale také porozity zanesené do odlitku vlivem stahování a neusměrněného tuhnutí odlitku. Naměřené hodnoty zachyceného podílů plynů v objemu odlitku v měřicích místech je uvedeno v Tab. 30–Tab. 34.

Tab. 30 Zachycení plynů v objemu odlitku pro Variant 1

	SM1	SM2	SM3	SM4	SM5	Průměr
Odlitek 1	0,303 %	0,002 %	0,017 %	0,032 %	0,001 %	0,071 %
Odlitek 2	1,170 %	0,007 %	0,018 %	0,038 %	0,004 %	0,247 %
Odlitek 3	0,154 %	0,002 %	0,003 %	0,028 %	0,002 %	0,038 %
Odlitek 4	0,735 %	0,000 %	0,002 %	0,031 %	0,000 %	0,154 %
	Celkový průměr					0,127 %

Tab. 31 Zachycení plynů v objemu odlitku pro Variant 2

	SM1	SM2	SM3	SM4	SM5	Průměr
Odlitek 1	1,840 %	0,004 %	0,011 %	0,129 %	0,000 %	0,397 %
Odlitek 2	1,849 %	0,017 %	0,098 %	0,399 %	0,000 %	0,399 %
Odlitek 3	2,450 %	0,006 %	0,026 %	0,598 %	0,003 %	0,617 %
Odlitek 4	1,425 %	0,009 %	0,120 %	0,236 %	0,001 %	0,358 %
				Celkový průměr		0,443 %

Tab. 32 Zachycení plynů v objemu odlitku pro Variant 3

	SM1	SM2	SM3	SM4	SM5	Průměr
Odlitek 1	2,201 %	0,007 %	0,114 %	0,163 %	0,015 %	0,500 %
Odlitek 2	0,164 %	0,011 %	0,030 %	0,046 %	0,000 %	0,050 %
Odlitek 3	2,799 %	0,004 %	0,061 %	0,072 %	0,002 %	0,588 %
Odlitek 4	2,499 %	0,007 %	0,023 %	0,126 %	0,004 %	0,532 %
				Celkový průměr		0,417 %

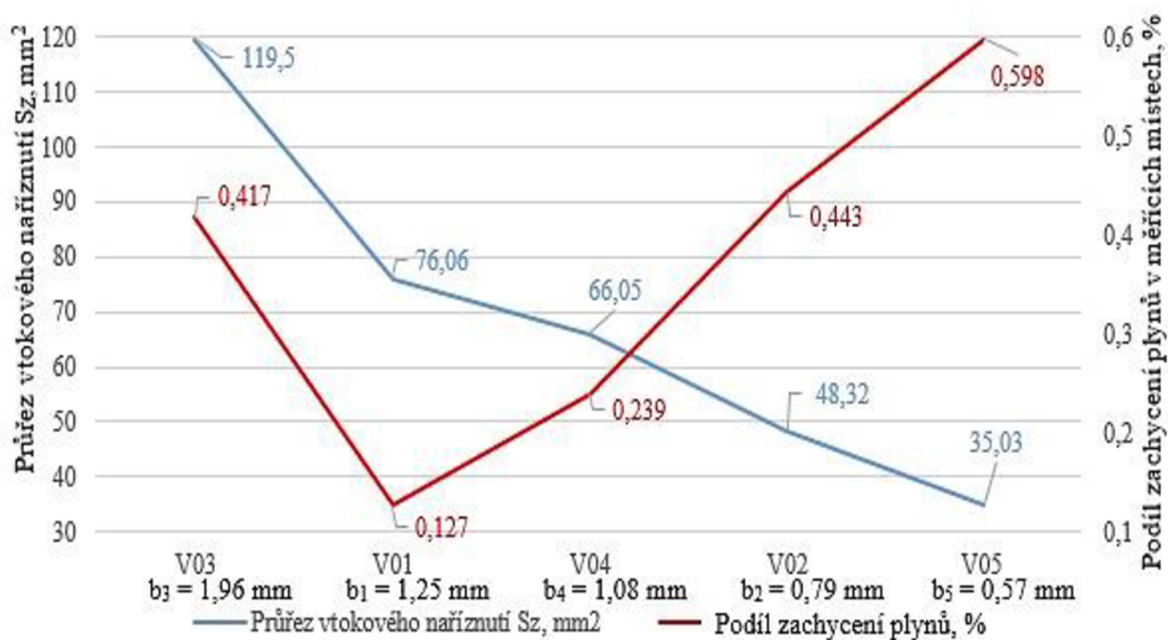
Tab. 33 Zachycení plynů v objemu odlitku pro Variant 4

	SM1	SM2	SM3	SM4	SM5	Průměr
Odlitek 1	1,917 %	0,006 %	0,007 %	0,334 %	0,001 %	0,453 %
Odlitek 2	0,666 %	0,000 %	0,006 %	0,0101 %	0,000 %	0,136 %
Odlitek 3	1,246 %	0,002 %	0,003 %	0,224 %	0,002 %	0,295 %
Odlitek 4	0,289 %	0,004 %	0,025 %	0,029 %	0,000 %	0,069 %
				Celkový průměr		0,239 %

Tab. 34 Zachycení plynů v objemu odlitku pro Variant 5

	SM1	SM2	SM3	SM4	SM5	Průměr
Odlitek 1	0,060 %	0,000 %	0,000 %	0,043 %	0,000 %	0,021 %
Odlitek 2	3,333 %	0,206 %	0,690 %	1,417 %	0,031 %	1,135 %
Odlitek 3	2,925 %	0,003 %	0,007 %	0,100 %	0,000 %	0,607 %
Odlitek 4	3,129 %	0,000 %	0,008 %	0,011 %	0,000 %	0,630 %
				Celkový průměr		0,598 %

Na základě průměrných hodnot zahlčení plynů v objemu odlitku pro jednotlivé varianty byl sestrojen graf závislosti zahlčení plynů na průřezu vtokového naříznutí, který je znázorněn na Obr. 27.



Obr. 27 Zachycení plynů v měřících místech

Jak je evidentní na Obr. 27, se snižující se hodnotou průřezu vtokového naříznutí stoupá hodnota zahlčení plynů v objemu odlitku. Variant 3 tvoří určitý extrém, jelikož u největšího průřezu vtokového naříznutí nastává zvýšení zahlčeného plynu. Vysvětlení možno hledat v Obr. 25 a Tab. 26, ze kterých je evidentní, že hodnoty Re jsou u Variantu 3 nejvyšší, což určuje nejvíc turbulentní proudění taveniny v kanálech. Proto je možné předpokládat, že u Variantu 3 má turbulentní proudění v kanálech většinový podíl distribuce plynů do objemu odlitku. U ostatních Variant 1, 2, 4, 5 bude teda určujícím parametrem poměr S_z/S_F , u kterého s jeho snižující se hodnotou převládá disperzní charakter proudění, a tím vhodnější podmínky pro uzavírání plynů v objemu odlitku.

Z údajů uvedených v Tab. 30 až Tab. 34, a podle rozvržení sledovaných míst podle Obr. 26 plyne poznatek, že při porovnávání podílů zahlčeného plynu v jednotlivých místech odlitku je nejvyšší podíl zahlčených plynů v oblasti okolo bodů SM1, pak SM4 a SM3. Toto zahlčení plynů koreluje s režimem vyplňování tvarové dutiny formy, které je řízeno režimem dle Frommera. Po přechodě proudu taveniny skrz tvarovou dutinu formy je jako první zásobována taveninou oblast okolo místa SM1, čím je jako první zaplněna i

přetoková jamka navazující na tuto oblast. Její vyplnění ji vyřazuje z funkčnosti a účinného odvádění plynů z taveniny do této oblasti dále přitékající. Místa SM4 a SM3 jsou umístěna v oblasti nejbliž k vtokovému nařiznutí. Teda mezi vtokovým nařiznutím a místem SM4/SM3 už nejsou dimenzovány přetokové jamky a účinné odvzdušnění, s čím souvisí vyšší podíl zahlceného plynu v objemu odlitku. Na základě výše popsaného je možné vyslovit tvrzení, že zahlcení plynů v objemu odlitku nesouvisí pouze s faktory distribuci plynů do dutiny formy podporujícími, ale i s účinným a funkčním odvzdušněním formy a rozvržením odvzdušňovacích kanálů.

4. Vyhodnocení výsledků a jejich diskuse

Diplomová práce je zaměřena na posouzení vhodnosti metod výpočetního návrhu vtokového systému pro konkrétní typ nízkohmotnostního odlitku se slitiny na bázi siluminu vyráběného metodou tlakového lití.

Jako výchozí parametry pro návrh vtokového systému a výpočetní řešení geometrie jeho částí jsou určeny charakteristické rozměry odlitku, hmotnost odlitku, hmotnost přetoků, doba plnění tvarové dutiny formy a rychlost taveniny ve vtokovém nařiznutí.

Charakteristické rozměry odlitku jsou dány výkresovou dokumentací pro hrubý odlitek. Hmotnost odlitku, resp. sady odlitků je na základě volby čtyřnásobné formy a výkresu hrubého odlitku určena na hodnotu 0,544 kg. Podle Tab. 6 je hmotnost přetokových jamek pro celou sadu odlitků určena na hodnotu 0,208 kg. Tyto parametry vycházející z výkresové dokumentace pro konkrétní typ odlitku jsou víceméně konstantně určeny.

Dobu plnění tvarové dutiny formy je možné určit na základě tří variant. První variantou je určení doby plnění tvarové dutiny formy v smyslu normy ČSN 22 8601 [17]. V Tab. 3, která je vytvořena v smyslu výše citované normy, je pro odlitek s charakteristickou tloušťkou stěny 2 mm možná volba doby plnění tvarové dutiny formy v intervalu hodnot 0,02 – 0,06 s. Bez letitých zkušeností v oblasti technologie lití pod tlakem a navrhování vtokových soustav je volba správné doby plnění tvarové dutiny formy na základě Tab. 3 nemožné. Proto pro určení doby plnění tvarové dutiny formy pro výpočet řešené vtokové soustavy bylo využito hodnoty vypočtené na základě vztahu – (2.6) a podle empiricky odvozeného diagramu převzatého z publikací autorů Valecký [4] a Ragan[1] na základě výše uvedeného diagramu (Obr. 13) je doba plnění tvarové dutiny formy $t = 0,06$ s. Podle metodiky koncipované americkou asociací NADCA a vztahem (2.6), je doba plnění tvarové dutiny formy vypočtena na hodnotu $t = 0,029$ s. Jelikož výpočet dle NADCA v sobě zohledňuje teplotní charakteristiky taveniny a formy, interakci mezi taveninou a formou a bere v potaz i krystalizaci probíhající v tavenině. Během licího cyklu byla pro výpočetní návrh vtokové soustavy uvažována prioritně hodnota vypočtená, a to hodnota $t = 0,029$ s. Doba plnění tvarové dutiny formy dle diagramu Obr. 13 byla použita v jedné variantě výpočtu demonstrativně, pro ověření možných dopadů na výpočetní řešení a kvalitativní ukazatele.

Rychlost taveniny ve vtokovém nařiznutí je možné určit na základě empiricky odvozeného diagramu převzatého z publikací autorů Valecký [4] a Ragan [1] na Obr. 14.

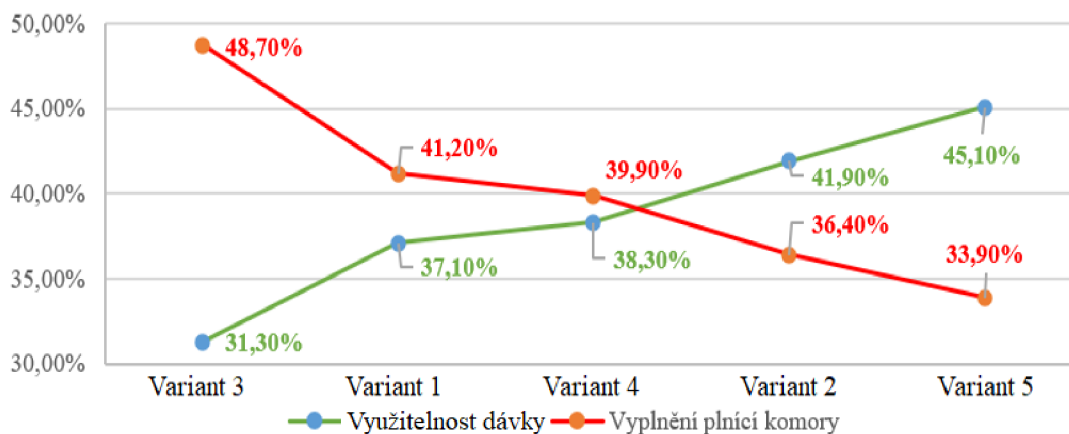
Na základě diagramu je možno určit rychlost taveniny ve vtokovém naříznutí pro odlitek s charakteristickou tloušťkou stěny 2 mm a délkou 116,5 mm na hodnotu $v_Z = 35 \text{ m.s}^{-1}$. Přesnější možnost určení rychlosti taveniny ve vtokovém naříznutí je možné na základě vztahu (2.7), podle kterého je $v_Z = 32,16 \text{ m.s}^{-1}$. Jelikož obě hodnoty jsou sobě blízké, pro výpočetní návrh vtokové soustavy byla uvažována hodnota $v_Z = 32,16 \text{ m.s}^{-1}$.

Výpočet vtokové soustavy byl realizován ve smyslu metodiky uvedené v kapitole 2.4. Prvním krokem, od kterého se odvíjí celý výpočetní návrh vtokové soustavy, bylo určení průřezu vtokového naříznutí S_Z . Pro výpočet pro Variant 1 – Variant 4 (dle vztahů 2.8 – 2.11) bylo využito hodnot $t = 0,029 \text{ s}$ a $v_Z = 32,16 \text{ m.s}^{-1}$. Pro výpočet pro Variant 5, jak bylo zmíněno výše, byla použita demonstrativně hodnota $t = 0,06 \text{ s}$ při zachování $v_Z = 32,16 \text{ m.s}^{-1}$. Výpočetním řešením byly určeny hodnoty průřezů vtokových kanálů a jejich geometrie tak, jak je uvedeno v Tab. 18. Variant 5, u kterého byla použita doba plnění tvarové dutiny formy s hodnotou $t = 0,06 \text{ s}$, vykazuje výšku vtokového naříznutí $b_5 = 0,57 \text{ mm}$, což je mimo doporučený rozsah výšek vtokového naříznutí pro odlitky z hliníkových slitin určen normou ČSN 22 8601 (norma určuje rozsah výšek vtokového naříznutí $b = 0,7 \text{ mm} - 2,5 \text{ mm}$). I skrz toto, normou dané vyloučení, pro výpočet Variant 5 z relevantně uvažovaných rozměrů vtokového naříznutí byl výpočet pro vtokovou soustavu Variant 5 proveden. Bylo určeno, že průřez vtokového naříznutí, který je pro další výpočetní řešení určující, se zmenšuje v postupné řadě Variant 3 ($S_{Z3} = 119,5 \text{ mm}^2$) → Variant 1 ($S_{Z1} = 76,06 \text{ mm}^2$) → Variant 4 ($S_{Z4} = 66,05 \text{ mm}^2$) → Variant 2 ($S_{Z2} = 48,32 \text{ mm}^2$) → Variant 5 ($S_{Z5} = 35,03 \text{ mm}^2$).

Na základě rozměrových, hmotnostních a objemových charakteristik jednotlivých variantách řešení vtokové soustavy bylo postupováno k posouzení vhodnosti návrhu skrze parametry technologické – podíl vyplnění plnicí komory, ekonomické – využitelnost dávky kovu na jednu operaci, na základě teoretických aspektů posouzení charakteristik proudění taveniny ve vtokové soustavě a skrz ukazatel kvalitativní, nímž bylo voleno zachycení plynů v objemu odlitku, které je určeno pomocí numerické simulace.

Jak ze samotného výpočtu jednotlivých průřezových a rozměrových charakteristik plyne, se zmenšujícím se průřezem vtokového naříznutí S_Z klesají i průřezy vtokových kanálů S_K/S_{KV} , čímž klesá i objem celé vtokové soustavy a tím i velikost dávky kovu na jednu operaci, jak je uvedeno v Tab. 21. Při zachování konstantní hmotnosti hrubého odlitku $m = 0,544 \text{ kg}$ se teda se snížením dávky kovu na jednu operaci zvyšuje využitelnost

dávky kovu na jednu operaci. Na straně druhé, se snižováním dávky kovu na jednu operaci klesá podíl vyplnění plnicí komory, jak je uvedeno v Tab. 22. Na Obr. 28 jsou vzájemně porovnány ukazatele využitelnosti dávky kovu na jednu operaci a podíl vyplnění plnicí komory vyjádřený v procentech.

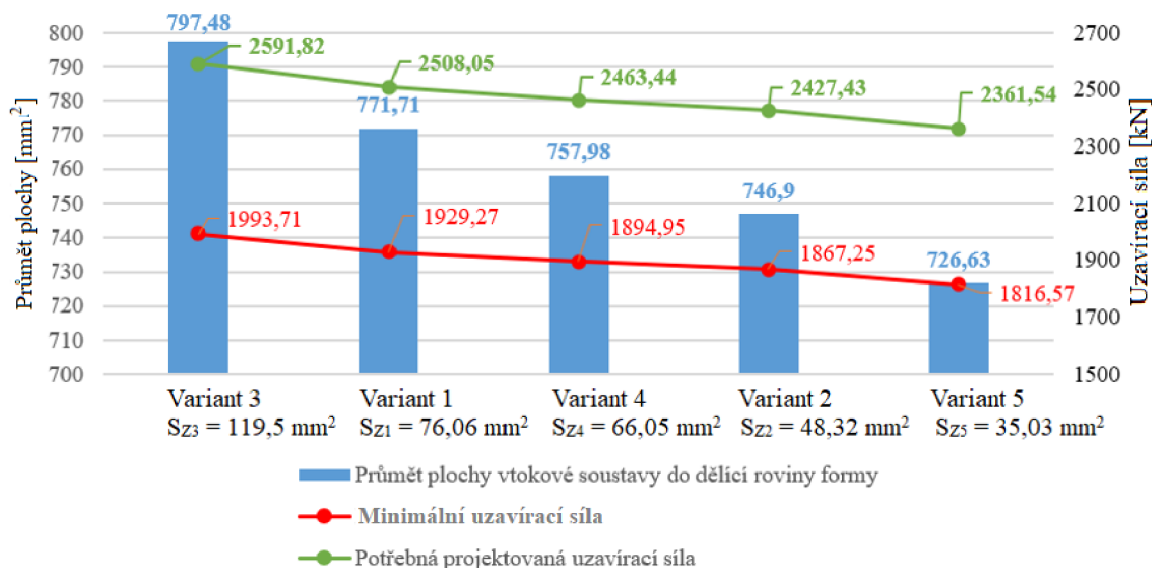


Obr. 28 Porovnání využitelnosti dávky kovu a vyplnění plnicí komory

Pokud bude uvažováno využití dávky kovu na jednu operaci jako ukazatel ekonomický a vyplnění plnicí komory jako ukazatel technologický, teoreticky vzato, místo průsečíku obou křivek je optimálním řešením pro technologičnost a ekonomičnost výroby. V publikaci [9] a [22] je konstatováno, že se snižující se dávkou kovu na jednu operaci, a teda je snížením podílu vyplnění plnicí komory stoupá podíl porozity v odlitcích. Tedy je možné uvažovat, že i podíl zachyceného vzduchu v objemu odlitku bude se snižující se dávkou kovu na jednu operaci stoupat. Toto tvrzení je v práci potvrzeno částečně. Platí pro všechny varianty výpočtu kromě Varianty 3, kdy, podle Obr. 27 a jeho komprimací s Obr. 28 zachycení plynů u Varianty 3 oproti sousedním hodnotám stoupne. Je předpoklad, že zahlcování plynů taveninou a jejich distribuce do objemu odlitku bude řízená i charakteristikami proudění, ne prioritně dávkou kovu na jednu operaci.

Změna rozměrů vtokové soustavy se promítá i do výpočtu minimální a následně potřebné uzavírací síly stroje. Jak je uvedeno v Tab. 23, se snižujícím se průřezem vtokového nařiznutí, klesají i rozměry vtokové soustavy a v závislosti s nimi i průmět plochy odlitku/vtokové soustavy do dělicí roviny formy. Grafické vyjádření změny uzavírací síly v závislosti na změně průmětu plochy vtokové soustavy je uvedeno v Obr. 29. Podle obrázku je zřejmé, že u Varianty 3 bude namáhání rámu stroje a formy od vyvozené uzavírací síly nejvyšší. Vezmeme-li v potaz rozdíl minimální a maximální projektované uzavírací síly, činí rozdíl $\Delta F_u = 230,28$ kN. S ohledem na velikost stroje

Müller Weingarten 600 se může velikost potřebné projektované síly jako parametru pro posouzení vhodnosti návrhu vtokové soustavy zanedbat, nebo být uvažována v minimální míře.



Obr. 29 Změna uzavírací síly v závislosti na průmětu plochy vtokové soustavy do dělicí roviny formy

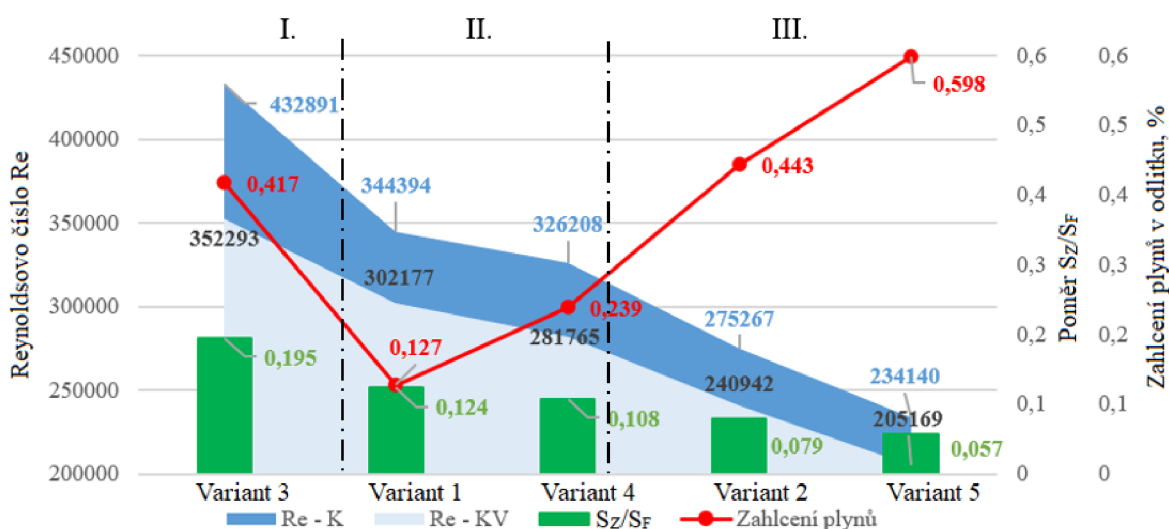
Analytické posouzení proudění taveniny ve vtokové soustavě bylo zaměřeno na posouzení typu proudění taveniny ve vtokových kanálech a posouzení režimu plnění tvarové dutiny formy. K posouzení hydrodynamických poměrů ve vtokové soustavě bylo nutné určit teoretické rychlostní charakteristiky proudu taveniny. Teoretické rychlosti proudu taveniny byly určeny využitím rovnice kontinuity, vztažením k rychlosti taveniny ve vtokovém naříznutí a jeho průřezu. Bylo určeno, že rychlosti proudu taveniny u všech variant výpočtu dosahovaly relativně konstantní úrovně. Tento fakt je možno odůvodnit hypotézou o zachování hmotnostního/objemového průtoku. Z ní plyne, že pokud je zachováno průtočné množství taveniny, či už objemového nebo hmotnostního, na vstupu a na výstupu, tak rychlostní charakteristiky taveniny při přechodu vtokovou soustavou s různými průřezů vykazují konstantní charakter.

U určení typu proudění ve vtokových kanálech bylo předpokládáno proudění turbulentní. Tento předpoklad byl výpočtem Reynoldsova čísla potvrzen. Bylo zjištěno, že se zvětšujícím se průřezem vtokových kanálů stoupá i hodnota Reynoldsova čísla, a teda i turbulence proudění se zvyšuje (Obr. 25 a Tab. 26). I když se může jevit zvýšení průřezu vtokového kanálu jako cesta k snižování turbulence, opak je pravdou. Reynoldsovo číslo by se snížilo při zvětšení průřezu jenom v případě, pokud by bylo dodržováno konstantního

průtoku na vstupu, čím by bylo dosaženo snížení rychlosti v kanálu. Pokud však je při změně průřezu zachována konstantní rychlost, Reynoldsovo číslo se zvyšuje. Jak plyne z teorie slévárenství, typ proudění ve vtokových kanálech je podmíněn rychlostí proudu taveniny. Se zvyšující se rychlostí proudu taveniny stoupá turbulence v jejím proudu. Pokud je nutno zachovat rychlost proudu, resp. není možné rychlost snížit z technologického hlediska, tak cestou k snížení turbulence v proudu taveniny při zachování průtoku je dělení vtokových kanálů.

Režim plnění tvarové dutiny formy je dán poměrem průřezu vtokového nařiznutí S_Z ku průřezu tvarové dutiny formy S_F , do které nařiznutí ústí. Jak plyne z Tab. 27 u všech variant výpočtu je plnění tvarové dutiny formy řízeno režimem podle Frommera. Bylo zjištěno, že se zvětšujícím se průřezem vtokového nařiznutí stoupá i poměr S_Z/S_F . Tím by měly být navozeny příznivější podmínky pro plnění tvarové dutiny formy. Jak plyne z literatur [5], [9] a [22], s klesající hodnotou poměru S_Z/S_F stoupá vliv disperzního vyplňování tvarové dutiny formy, a teda i podíl porozity, potažmo zahlcení plynů v objemu odlitku. Porovnáním tohoto tvrzení s Obr. 27 je evidentní, že u Varianty 3 toto tvrzení neplatí.

Vzítí v úvahu naměřené hodnoty zahlceného plynu v objemu odlitku, které byly získané využitím numerické simulace (Obr. 27 a Tab. 30 - Tab. 34) a jejich srovnání s hodnotami Reynoldsova čísla a poměru S_Z/S_F , tak, jak je to uvedeno v Obr. 30, můžeme částečně vysvětlit extrémy v linearitě průběhu zahlcení plynů, která byla předpokládána na základě teorie slévání i ze závěrů experimentů publikací v citované literatuře uvedených.



Obr. 30 Porovnání charakteristik proudu a zahlcení plynů v tavenině

Je možné předpokládat, že u jednotlivých variant výpočtu vtokové soustavy a jejich konstrukčních řešení, dochází k střídání majoritního vlivu zanášení plynů do tvarové dutiny formy taveninou mezi turbulencí způsobenou hodnotou Reynoldsova čísla Re a disperzi vyvozenou poměrem S_Z/S_F . Proto, vztaženo k průřezu vtokového nařiznutí a k poměru S_Z/S_F je možné předpokládat, že oblast grafu je možné rozdělit na tři oblasti:

- I. oblast, kde je zahlčení plynů v objemu odlitku majoritně ovlivněno hodnotou Reynoldsova čísla Re , teda turbulencí taveniny při proudění vtokovými kanály;
- II. oblast výhodných poměrů mezi Re a S_Z/S_F , teda mezi typem proudění taveniny ve vtokových kanálech a režimem plnění tvarové dutiny formy;
- III. oblast, kde je zahlčení plynů v objemu odlitku majoritně ovlivněna hodnotou poměru S_Z/S_F .

V souvislosti s výše uvedeným tvrzením, bylo by vhodné další výzkum zaměřit na hodnocení rychlostních a tlakových poměrů v tavenině v oblasti před a za vtokovým nařiznutím, při změně vzájemných poměrů Re a S_Z/S_F pro širší škálu odlitků a vtokových soustav.

Při hodnocení zahlčení plynů v objemu odlitku využitím numerické simulace, byla zjištěna mírná zonace v rozložení zachytávání plynů v objemu odlitku. Ta je vztažena k režimu plnění tvarové dutiny formy a k rozložení přetokových jamek. Vyšší hodnoty zahlčení plynů v objemu odlitku byly detekovány v místě SM1 umístěném oproti vtokovému nařiznutí, a následně v místech SM3 a SM4 umístěných v oblasti vtokového nařiznutí. Vyšší podíl zahlčení plynů v oblasti kolem SM1 je možné vysvětlit rychlým zaplněním přetokové jamky za měřícím bodem SM1. Tím dojde k znemožnění dalšímu odvodu plynů a par skrze přetokovou jamku do odvzdušňovacích kanálů. Body SM3 a SM4 se nacházejí v oblasti u vtokového nařiznutí, která je vyplňována jako poslední, a teda v této oblasti jsou zachytávány plyny bez možnosti odvodu skrz odvzdušňovací systém. Je vhodné, v dalším řešení problematiky zaměřit se na konstrukci a rozložení přetokových jamek. Bylo by vhodné, v oblasti měřícího bodu SM1 umístit přetokovou jamku s větším objemem, a v oblasti měřících bodů SM3 a SM4 přidat další přetokové jamky.

Pokud bude hodnocena vhodnost metody výpočetního návrhu vtokové soustavy pro odlitek dle Obr. 19 na základě zahlčení plynů v objemu odlitku, tak jako nejvýhodnější varianty výpočtu je možné určit Variant 1, a teda určení průřezu vtokového nařiznutí dle vztahu (2.8). Vzáti v úvahu i ekonomický ukazatel využití kovu, technologický parametr

velikost uzavírací síly a oblast výhodných poměrů Re a S_Z/S_F definovanou na Obr. 30, tak v průniku těchto veličin vychází nejlépe výpočet dle Varianty 4 určen výpočtem průřezu vtokového nařiznutí dle vztahu (2.11). Variant 4 je možné doporučit i s ohledem na rychlost a jednoduchost výpočtu.

U Variantu 5, při výpočetním řešení, kterého bylo uvažováno doby plnění tvarové dutiny formy odvozené z empiricky determinovaného diagramu dle Obr. 13, byly hodnoty zahlcení plynů na nejvyšší úrovni. Proudění taveniny ve vtokových kanálech vykazovalo nejnižší hodnoty Reynoldsova čísla Re , současně i nejnižší hodnoty poměru S_Z/S_F . To poukazuje na fakt, že proudění taveniny v kanálech má v porovnání s ostatními varianty výpočtu nejkolidnější charakter, režim plnění tvarové dutiny formy nejvíce bouřlivý charakter. Obdobně i posouzení využitelnosti kovu a poměru zaplnění plnicí komory se pohybuje ve srovnání s ostatními variantami v extrémech. Neopominajíc fakt, že hodnota výšky vtokového nařiznutí b se u Varianty 5 nacházela mimo interval hodnot doporučených normou, je možné vyslovit závěr, že pro návrh geometrie vtokové soustavy je vhodné užívat určení doby plnění tvarové dutiny formy podle vztahu (2.6) koncipovaného americkou asociací NADCA.

Závěr

Diplomová práce je zaměřena na posouzení vhodnosti metody výpočetního návrhu vtokové soustavy pro konkrétní typ nízkohmotnostního odlitku na bázi siluminu vyráběného vysokotlakým litím. K návrhu a posouzení vhodnosti návrhu byly využity CAX technologie ve formě modelačních a simulačních softwarů.

Diplomová práce se skládá ze dvou hlavních částí (teoretické a experimentální). V teoretické části jsou uvedeny všechny náležitosti pro řešení vlastních experimentů, včetně teoretického rozboru rychlostních poměrů při návrhu vtokové soustavy vysokotlaké formy pro výrobu odlitku příruby elektromotoru ze slitiny na bázi Al-Si.

Hlavní experimentální část práce je zaměřena na ověření vhodnosti výpočetního řešení geometrického návrhu vtokové soustavy vysokotlaké formy pro odlévání odlitků o nízké hmotnosti (136 g) příruby elektromotoru ze slitiny AlSi12Cu1(Fe).

Na základě provedených výpočtů, hmotnostních a objemových charakteristik navrhnutých vtokových soustav, posouzení hydrodynamických poměrů v tavenině proudící ve vtokových kanálech a naříznutích, využitím simulačního softwarů, jako i vzájemným srovnáním výše uvedených parciálních činitelů je možno koncipovat tyto závěry: Na základě výsledků řešení, lze formulovat tyto dílčí poznatky a výsledky:

- a) u určení doby plnění tvarové dutiny formy t je pro nízkohmotnostní odlitky výhodné určit tuto dobu na základě matematicky vyvozené formulace dle vztahu (2.6) oproti empiricky odvozenému diagramu Obr. 13. Při následném výpočtu průřezu vtokového naříznutí S_Z a určení jeho rozměrů se pak výška vtokového naříznutí b nachází mimo interval doporučených hodnot;
- b) určení rychlosti taveniny ve vtokovém naříznutí v_z je možno pro nízkohmotnostní odlitky možné volit, jak na základě matematické formulace dle vztahu (2.7), tak i z empiricky odvozeného diagramu Obr. 14. Rozdíly mezi určenými hodnotami jsou minimální a možno je do výpočtu použít bez enormního ovlivnění rozměrů vtokové soustavy;
- c) velikost průřezu vtokového naříznutí S_Z ovlivňuje i rozměry průřezu vtokových kanálů S_K a S_{KV} (Tab. 19), čímž jsou ovlivněny i rozměry vtokových kanálů (Tab. 20, Obr. 24);
- d) se zvětšujícími se rozměry vtokových kanálů, stoupá i spotřeba dávky kovu na jednu operaci, čímž se snižuje ekonomičnost výroby (Tab. 21). Na straně druhé,

- stoupá podíl vyplnění plnicí komory (Tab. 22), co má z technologického hlediska příznivý vliv na zahlcování plynů taveninou a jejich transport do objemu odlitku. Při porovnání těchto posuzovaných parametrů (Obr. 28), se jako nejvýhodnější jeví varianty výpočtu Variant 1 (výpočet podle vztahu 2.8) a Variant 4 (výpočet podle vztahu 2.11);
- e) s ohledem na velikost uzavírací síly stroje (Tab. 23), je zvětšení průmětu plochy vtokové soustavy do dělicí roviny stroje (odvíjející se od varianty výpočtu), a tím i změna minimální či projektované uzavírací síly minimální (Obr. 29), a teda irelevantní;
- f) při posouzení hydrodynamických charakteristik proudu taveniny byly zjištěny dílčí závěry:
- určením rychlostí taveniny (Tab. 26) ve vtokových kanálech byla ověřena hypotéza o zachování hmotnostního/objemového průtoku taku taveniny, z které plyne, že při zachování hmotnostního/objemového průtoku taveniny v kanálech se rychlost proudění vlivem geometrie kanálů nemění;
 - při zachování hmotnostního/objemového průtoku, a teda relativně konstantní rychlosti v kanálech, se se zvyšujícím se průřezem vtokového kanálu S_K a S_{KV} hodnota Reynoldsova čísla Re zvyšuje (Tab. 26), čím je podmíněn vyšší stupeň turbulence v proudu taveniny. Z toho možno usuzovat vyšší podíl zahlcení plynů v objemu taveniny;
 - poměr S_Z/S_F se zvyšuje se stoupající hodnotou S_Z (Tab. 27). Vyšším poměrem je určen klidnější režim plnění tvarové dutiny formy taveninou. Z toho možno usuzovat nižší podíl zahlcení plynů v objemu taveniny,
- g) při posouzení hodnot zachycení plynů v objemu odlitku dle Tab. 30 – Tab. 34 (Obr. 27) a jejich komprimací s tvrzeními v bodu f) byly v smyslu Obr. 30 provedeny výpočet rozměrů vtokových soustav definováno třemi charakterů majoritních vlivů zahlcování a distribuce plynů do objemu odlitku v závislosti na hydrodynamických charakteristikách proudu tak, jak je uvedeno v kapitole 4.

Na základě získaných výsledků lze ekonomické aspekty shrnout následovně. Využití dávky kovu na jednu operaci je uvedeno v tab. 21. Využití dávky kovu na jednu operaci zvyšuje v řadě Variant 3 (31 %) → Variant 1 (37 %) → Variant 4 (38 %) → Variant 2 (42 %) → Variant 5 (45 %). V tomhle pořadí se snižuje i podíl vyplnění plnicí komory tlakového licího stroje. Jak je uvedeno na obr. 28, optimální poměr využití dávky kovu na

jednu operaci a podílu vyplnění plnicí komory je v oblasti kolem výpočetního návrhu pro Variant 4. Pro kvantitativní vyjádření rozdílu v spotřebě materiálu v porovnání Variant 3 a Variant 4, rozdíl hmotností odpadu ze surového odlitku je $\Delta m_{V3-V4} = 0,316$ kg. Pro porovnání rozdílu ve spotřebě materiálu mezi Variant 3 a Variant 5, rozdíl v hmotnosti odpadu ze surového odlitku je $\Delta m_{V4-V5} = 0,213$ kg.

Finálním zhodnocením vyplývajícím z bodů a) – g) možno i s ohledem na rychlost a jednoduchost výpočtu průřezu vtokového naříznutí S_z označit způsob výpočtu dle Varianty 4 (vztah 2.11). I když u Varianty 1 zachycení plynů v objemu odlitku v sledovaných místech bylo na nejnižší úrovni, vzít v úvahu ekonomický ukazatel využití kovu, technologický parametr velikost uzavírací síly a oblast výhodných poměrů Re a S_z/S_F definovanou na Obr. 30, tak v průniku těchto veličin vychází nejlépe výpočet dle Varianty 4.

Seznam použité literatury

- [1]. RAGAN, E., et al. *Liatie kovov pod tlakom*. 1st ed. Prešov: Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2007. 392 p. ISBN 978-80-8073-979-9.
- [2]. MAJERNÍK, J., et al. *Technologie a technika lití kovů pod tlakem*. 1st ed. Brno: Tribun EU s.r.o., 2019. 170 p. ISBN 978-80-263-1553-7.
- [3]. MAJERNÍK, J. *Problematika návrhu vtokových soustav permanentních forem pro lití kovů pod tlakem*. 1st ed. Stalowa Wola, Polsko: Wydawnictwo Sztafeta Sp. z o.o., 2019. 94 p. ISBN 978-83-63767-63-1.
- [4]. VALECKÝ, J., et al. *Lití kovů pod tlakem*. 1st ed. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1963. 452 p.
- [5]. RUŽBARSKÝ, J., PAŠKO, J., GAŠPÁR, Š. *Techniques of Die Casting*. 1st ed. Lüdenscheid: RAM-Verlag, 2014. 199 p. ISBN 978-3-942303-29-3.
- [6]. GAŠPÁR, Š., PAŠKO, J., HUSÁR, J. *Konstrukčné úpravy vtokového systému tlakových foriem a ich vplyv na kvalitatívne vlastnosti odliatkov*. 1st ed. Brno: Tribun EU s.r.o., 2018. 109 p. ISBN 978-80-263-1513-1.
- [7]. MACHUTA, J., NOVÁ, I. *Slévárenské formy*. 1st ed. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. 165 p. ISBN 978-80-7494-083-5.
- [8]. GAŠPÁR, Š., PAŠKO, J., MAJERNÍK, J. *Influence of Structure Adjustment of Gating System of Casting Mould upon the Quality of Die Cast*. 1st ed. Lüdenscheid: RAM-Verlag, 2017. 82 p. ISBN 978-3-942303-47-7.
- [9]. GAŠPÁR, Š., PAŠKO, J. *Technológia výroby hliníkových odliatkov tlakovým liatím*. 1st ed. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, FVT Prešov, 2015. 200 p. ISBN 978-80-553-2236-0.
- [10]. ŠEBL, J. *Lití kovů pod tlakem*. 1st ed. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1961. 124 p.
- [11]. ŠEBL, J. *Formy pro lití kovů pod tlakem*. 1st ed. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, n. p., 1962. 116 p.
- [12]. North American Die Casting Association: *Gating Manual*. Illinois: NADCA, 2006. 84p.
- [13]. North American Die Casting Association: *NADCA Product Specification Standards for Die Casting*. Illinois: NADCA, 2015. 272 p.

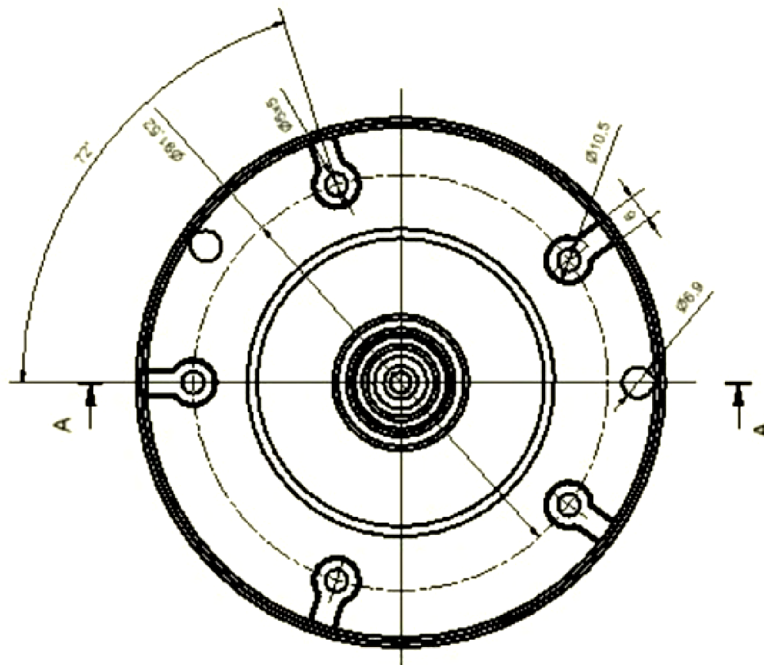
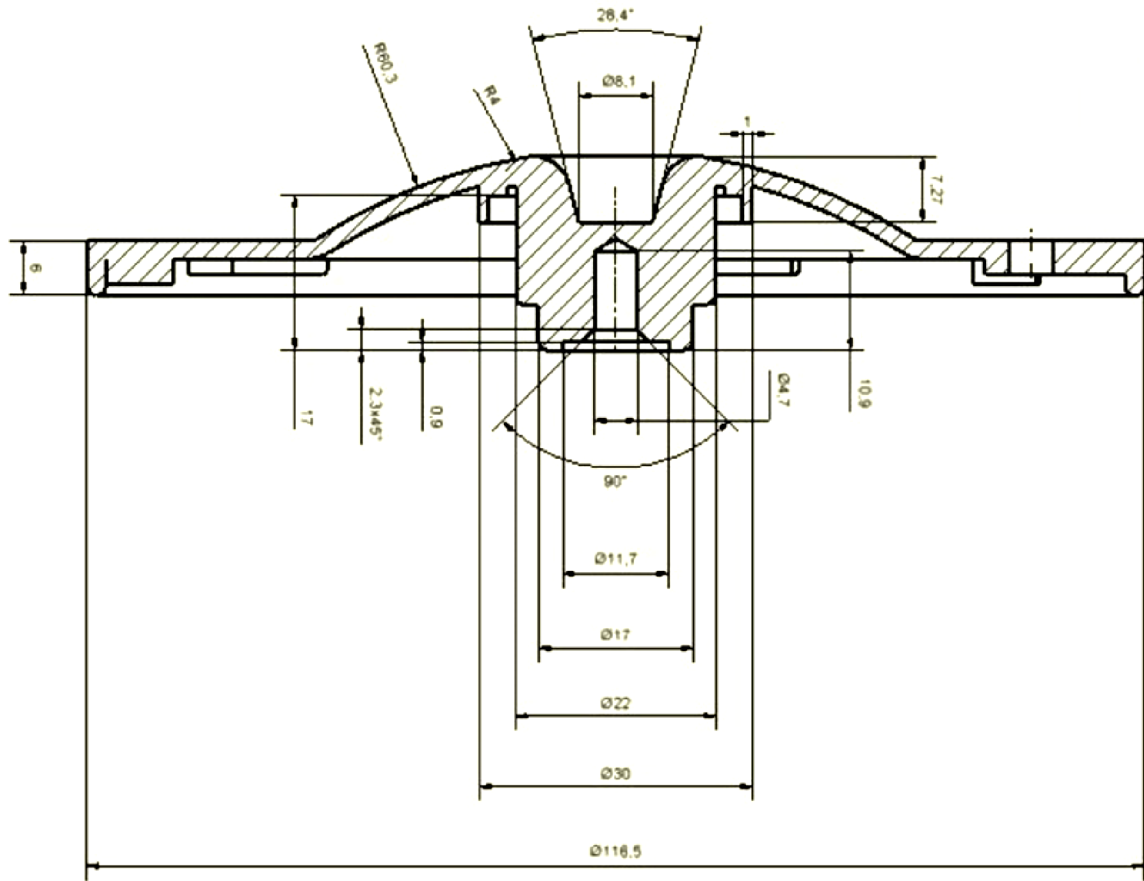
- [14]. MAJERNÍK, J., PAŠKO, J. *Anylytické základy posúdenia typu prúdenia taveniny a jeho vplyv na kvalitu odliatkov*. ai magazine, 2016, vol. 9, no. 1, p. 66. ISSN 1337-7612.
- [15]. MAJERNÍK, J., et al. *Design of Casting and Gating Systems – Primary Prediction of Quality of Die Casting Components*. 1st ed. Lüdenscheid: RAM-Verlag, 2021. 108 p. ISBN 978-3-96595-014-6.
- [16]. PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu II.*, CERM Brno, 2002, ISBN 80-7204-130-4
- [17]. ČSN 22 8601. *Formy tlakové licí: Zásady pro navrhování*. Praha: Český normalizační institut, 1984. 32 p.
- [18]. NOVÁ, I., MACHUTA, J., NOVÁKOVÁ, I. *Castings Processing*. 1st ed. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. 155 p. ISBN 978-80-7372-822-9.
- [19]. ČSN 22 8601. *Formy tlakové licí: Zásady pro navrhování*. Praha: Český normalizační institut, 1984. 32 p.
- [20]. MAJERNÍK, J., PAŠKO, J. *Metodika projekcie pripojenia vtokového zárezu k odliatku s valcovou plochou*. ai magazine, 2016, vol. 9, no. 1, p. 67. ISSN 1337-7612.
- [21]. MALÍK, J. *Technológia tlakového liatia zliatin hliníka*. 1st ed. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2013. 274 p. ISBN 978-80-553-1450-1.
- [22]. PAŠKO, J., GAŠPÁR, Š. *Technological Factors of Die Casting*. 1st ed. Lüdenscheid: RAM-Verlag, 2014. 93 p. ISBN 978-3-942303-25-5.
- [23]. North American Die Casting Association: *Product Design for Die Casting*. Illinois: NADCA, 2015. 156p.
- [24]. ČSN 22 8601. *Formy tlakové licí: Zásady pro navrhování*. Praha: Český normalizační institut, 1984. 32 p.

Přílohy

- Příloha A: Konstrukční výkres odlitku příruby elektromotoru
- Příloha B: Určení rychlosti lisovacího pístu
- Příloha C: Určení rychlosti taveniny ve vtokových kanálech
- Příloha D: Určení Reynoldsova čísla
- Příloha E: Určení poměru S_Z/S_F

Příloha A:

Konstrukční výkres odlitku příruby elektromotoru



Příloha B:
Určení rychlosti lisovacího pístu

Přepočet rychlosti lisovacího pístu v druhé fázi lisování na základě rovnice kontinuity

$$v_z \cdot S_Z = v_{p2} \cdot S_P,$$

kde:

v_z – rychlost taveniny ve vtokovém nářiznutí [$m \cdot s^{-1}$];

S_Z – průřez vtokového nářiznutí [m^2];

v_{p2} – rychlost lisovacího pístu v druhé fázi lisování [$m \cdot s^{-1}$];

S_P – průřez lisovacího pístu [m^2];

- průřez lisovacího pístu:

$$S_P = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,07^2}{4} = 0,0038465 \text{ m}^2$$

d_p – průměr lisovacího pístu, $d_p = 0,07 \text{ m}$.

1. rychlost lisovacího pístu pro Variant 1

$$v_{P2_1} = \frac{v_z \cdot S_{Z1}}{S_P} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 76,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{3846,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 2,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. rychlost lisovacího pístu pro Variant 2

$$v_{P2_2} = \frac{v_z \cdot S_{Z2}}{S_P} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 48,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{3846,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. rychlost lisovacího pístu pro Variant 3

$$v_{P2_3} = \frac{v_z \cdot S_{Z3}}{S_P} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 119,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{3846,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. rychlost lisovacího pístu pro Variant 4

$$v_{P2_4} = \frac{v_z \cdot S_{Z4}}{S_P} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 66,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{3846,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 2,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. rychlost lisovacího pístu pro Variant 5

$$v_{P2_5} = \frac{v_z \cdot S_{Z5}}{S_P} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 35,03 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{3846,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Příloha C:

Určení rychlosti taveniny ve vtokových kanálech

Přepočet rychlosti taveniny v hlavním vtokovém kanálu na základě rovnice kontinuity

$$v_z \cdot S_z = v_K \cdot S_K,$$

kde:

v_z – rychlost taveniny ve vtokovém nářiznutí [$m \cdot s^{-1}$];

S_z – průřez vtokového nářiznutí [m^2];

v_K – rychlost taveniny v hlavním vtokovém kanálu [$m \cdot s^{-1}$];

S_K – průřez hlavního vtokového kanálu [m^2];

1. rychlost taveniny v hlavním vtokovém kanálu pro Variant 1

$$v_{K1} = \frac{v_z \cdot S_{z1}}{S_{K1}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 76,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{501,99 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 19,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. rychlost taveniny v hlavním vtokovém kanálu pro Variant 2

$$v_{K2} = \frac{v_z \cdot S_{z2}}{S_{K2}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 48,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{318,91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 19,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. rychlost taveniny v hlavním vtokovém kanálu pro Variant 3

$$v_{K3} = \frac{v_z \cdot S_{z3}}{S_{K3}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 119,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{788,70 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 19,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. rychlost taveniny v hlavním vtokovém kanálu pro Variant 4

$$v_{K4} = \frac{v_z \cdot S_{z4}}{S_{K4}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 66,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{435,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 19,76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. rychlost taveniny v hlavním vtokovém kanálu pro Variant 5

$$v_{K5} = \frac{v_z \cdot S_{z5}}{S_{K5}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 35,03 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{231,20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 19,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Přepočet rychlosti taveniny ve vedlejším vtokovém kanálu na základě rovnice kontinuity

$$v_z \cdot S_Z = v_{KV} \cdot S_{KV},$$

kde:

v_z – rychlost taveniny ve vtokovém nářiznutí [$m \cdot s^{-1}$];

S_Z – průřez vtokového nářiznutí [m^2];

v_{KV} – rychlost taveniny ve vedlejším vtokovém kanálu [$m \cdot s^{-1}$];

S_{KV} – průřez vedlejšího vtokového kanálu [m^2];

1. rychlost taveniny ve vedlejším vtokovém kanálu pro Variant 1

$$v_{KV1} = \frac{v_z \cdot S_{Z1}}{S_{KV1}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 76,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{228,18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 21,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. rychlost taveniny ve vedlejším vtokovém kanálu pro Variant 2

$$v_{KV2} = \frac{v_z \cdot S_{Z2}}{S_{KV2}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 48,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{144,96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 21,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. rychlost taveniny ve vedlejším vtokovém kanálu pro Variant 3

$$v_{KV3} = \frac{v_z \cdot S_{Z3}}{S_{KV3}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 119,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{358,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 19,93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. rychlost taveniny ve vedlejším vtokovém kanálu pro Variant 4

$$v_{KV4} = \frac{v_z \cdot S_{Z4}}{S_{KV4}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 66,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{198,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 21,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. rychlost taveniny ve vedlejším vtokovém kanálu pro Variant 5

$$v_{KV5} = \frac{v_z \cdot S_{Z5}}{S_{KV5}} = \frac{32,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 35,03 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{105,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 21,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Příloha D:
Určení Reynoldsova čísla

Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu

$$Re_K = \frac{d_{HK} \cdot v_s \cdot \rho}{\eta}$$

kde:

d_{HK} – hydraulický průměr hlavního vtokového kanálu [m];

v_s – střední rychlost v kanálu [$m \cdot s^{-1}$], $v_s = v_K$;

ρ – hustota taveniny [$kg \cdot m^{-3}$],

uvažována hustota slitiny AlSi12Cu1(Fe) $\rho = 2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

η – dynamická viskozita [Pa.s];

uvažována dynamická viskozita hliníku při teplotě 750 °C $\eta = 0,0027 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

- hydraulický průměr hlavního vtokového kanálu

$$d_{HK} = \frac{4 \cdot S_K}{O_K}$$

d_{HK} – hydraulický průřez hlavního vtokového kanálu [m];

S_K – průřez hlavního vtokového kanálu, [m^2];

O_K – obvod hlavního vtokového kanálu, [m].

1. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 1

$$d_{HK1} = \frac{4 \cdot S_{K1}}{O_{K1}} = \frac{4 \cdot 501,99 \cdot 10^{-6} m^2}{111,22 \cdot m^{-3}} = 18,05 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{K1} = \frac{d_{HK1} \cdot v_{K1} \cdot \rho}{\eta} = \frac{18,05 \cdot 10^{-3} m \cdot 19,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{0,0027 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 344394$$

2. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 2

$$d_{HK2} = \frac{4 \cdot S_{K2}}{O_{K2}} = \frac{4 \cdot 318,91 \cdot 10^{-6} m^2}{88,64 \cdot m^{-3}} = 14,39 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{K2} = \frac{d_{HK2} \cdot v_{K2} \cdot \rho}{\eta} = \frac{14,39 \cdot 10^{-3} m \cdot 19,49 m \cdot s^{-1} \cdot 2650 kg \cdot m^{-3}}{0,0027 Pa \cdot s} = 275267$$

3. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 3

$$d_{HK3} = \frac{4 \cdot S_{K3}}{O_{K3}} = \frac{4 \cdot 788,70 \cdot 10^{-6} m^2}{139,40 \cdot m^{-3}} = 22,63 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{K3} = \frac{d_{HK3} \cdot v_{K3} \cdot \rho}{\eta} = \frac{22,63 \cdot 10^{-3} m \cdot 19,49 m \cdot s^{-1} \cdot 2650 kg \cdot m^{-3}}{0,0027 Pa \cdot s} = 432891$$

4. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 4

$$d_{HK4} = \frac{4 \cdot S_{K4}}{O_{K4}} = \frac{4 \cdot 318,91 \cdot 10^{-6} m^2}{103,69 \cdot m^{-3}} = 16,82 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{K4} = \frac{d_{HK4} \cdot v_{K4} \cdot \rho}{\eta} = \frac{16,82 \cdot 10^{-3} m \cdot 19,76 m \cdot s^{-1} \cdot 2650 kg \cdot m^{-3}}{0,0027 Pa \cdot s} = 326208$$

5. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 5

$$d_{HK5} = \frac{4 \cdot S_{K5}}{O_{K5}} = \frac{4 \cdot 231,20 \cdot 10^{-6} m^2}{75,55 \cdot m^{-3}} = 12,24 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{K5} = \frac{d_{HK5} \cdot v_{K5} \cdot \rho}{\eta} = \frac{12,24 \cdot 10^{-3} m \cdot 19,49 m \cdot s^{-1} \cdot 2650 kg \cdot m^{-3}}{0,0027 Pa \cdot s} = 234140$$

Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu

$$Re_{KV} = \frac{d_{HKV} \cdot v_s \cdot \rho}{\eta}$$

kde:

d_{HKV} – hydraulický průměr vedlejšího vtokového kanálu [m];

v_s – střední rychlost v kanálu [$m \cdot s^{-1}$], $v_s = v_{KV}$;

ρ – hustota taveniny [$kg \cdot m^{-3}$],

uvažovaná hustota slitiny AlSi12Cu1(Fe) $\rho = 2650 \text{ kg} \cdot m^{-3}$;

η – dynamická viskozita [Pa.s];

uvažovaná dynamická viskozita hliníku při teplotě 750 °C $\eta = 0,0027 \text{ Pa} \cdot s$

- hydraulický průměr kanálu

$$d_{HKV} = \frac{4 \cdot S_{KV}}{O_{KV}}$$

d_{HKV} – hydraulický průřez vedlejšího vtokového kanálu [m];

S_{KV} – průřez vedlejšího vtokového kanálu, [m^2];

O_{KV} – obvod vedlejšího vtokového kanálu, [m].

1. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 1

$$d_{HKV1} = \frac{4 \cdot S_{KV1}}{O_{KV1}} = \frac{4 \cdot 228,18 \cdot 10^{-6} m^2}{63,54 \cdot m^{-3}} = 14,36 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{KV1} = \frac{d_{HKV1} \cdot v_{KV1} \cdot \rho}{\eta} = \frac{14,36 \cdot 10^{-3} m \cdot 21,44 \text{ m} \cdot s^{-1} \cdot 2650 \text{ kg} \cdot m^{-3}}{0,0027 \text{ Pa} \cdot s} = 302177$$

2. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 2

$$d_{HKV2} = \frac{4 \cdot S_{KV2}}{O_{KV2}} = \frac{4 \cdot 144,96 \cdot 10^{-6} m^2}{50,64 \cdot m^{-3}} = 11,45 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{KV2} = \frac{d_{HKV2} \cdot v_{KV2} \cdot \rho}{\eta} = \frac{11,45 \cdot 10^{-3} m \cdot 21,44 \text{ m} \cdot s^{-1} \cdot 2650 \text{ kg} \cdot m^{-3}}{0,0027 \text{ Pa} \cdot s} = 240942$$

3. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 3

$$d_{HKV3} = \frac{4 \cdot S_{KV3}}{O_{KV3}} = \frac{4 \cdot 358,50 \cdot 10^{-6} m^2}{79,64 \cdot m^{-3}} = 18,01 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{KV3} = \frac{d_{HKV3} \cdot v_{KV3} \cdot \rho}{\eta} = \frac{18,01 \cdot 10^{-3} m \cdot 19,93 m \cdot s^{-1} \cdot 2650 kg \cdot m^{-3}}{0,0027 Pa \cdot s} = 352293$$

4. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 4

$$d_{HKV4} = \frac{4 \cdot S_{KV4}}{O_{KV4}} = \frac{4 \cdot 198,15 \cdot 10^{-6} m^2}{59,17 \cdot m^{-3}} = 13,39 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{KV4} = \frac{d_{HKV4} \cdot v_{KV4} \cdot \rho}{\eta} = \frac{13,39 \cdot 10^{-3} m \cdot 21,44 m \cdot s^{-1} \cdot 2650 kg \cdot m^{-3}}{0,0027 Pa \cdot s} = 281765$$

5. Výpočet Reynoldsova čísla pro proudění taveniny v hlavním vtokovém kanálu Variant 5

$$d_{HKV5} = \frac{4 \cdot S_{KV5}}{O_{KV5}} = \frac{4 \cdot 105,09 \cdot 10^{-6} m^2}{43,11 \cdot m^{-3}} = 9,75 \cdot 10^{-3} m$$

$$Re_{KV5} = \frac{d_{HKV5} \cdot v_{KV5} \cdot \rho}{\eta} = \frac{9,75 \cdot 10^{-3} m \cdot 21,44 m \cdot s^{-1} \cdot 2650 kg \cdot m^{-3}}{0,0027 Pa \cdot s} = 205169$$

Příloha E:
Určení poměru S_Z/S_F

Výpočet poměru S_Z/S_F

$$0,25 < \frac{S_Z}{S_F} < 0,25$$

S_Z – plocha průřezu vtokového nářiznutí [m^2];

S_Z – plocha průřezu dutiny ve formě [m^2], $S_F = 612 \cdot 10^{-6} m^2$.

přičemž platí: - $S_Z/S_Z < 0,25 \rightarrow$ režim plnění tvarové dutiny formy dle Frommera

- $S_Z/S_Z > 0,25 \rightarrow$ režim plnění tvarové dutiny formy dle Brandta

1. Určení poměru S_Z/S_Z pro Variant 1

$$\frac{S_{Z1}}{S_F} = \frac{76,08 \cdot 10^{-6} m^2}{612 \cdot 10^{-6} m^2} = 0,124 < 0,25 \rightarrow \text{režim plnění dle Frommera}$$

2. Určení poměru S_Z/S_Z pro Variant 2

$$\frac{S_{Z2}}{S_F} = \frac{48,32 \cdot 10^{-6} m^2}{612 \cdot 10^{-6} m^2} = 0,079 < 0,25 \rightarrow \text{režim plnění dle Frommera}$$

3. Určení poměru S_Z/S_Z pro Variant 3

$$\frac{S_{Z3}}{S_F} = \frac{119,50 \cdot 10^{-6} m^2}{612 \cdot 10^{-6} m^2} = 0,195 < 0,25 \rightarrow \text{režim plnění dle Frommera}$$

4. Určení poměru S_Z/S_Z pro Variant 4

$$\frac{S_{Z4}}{S_F} = \frac{66,05 \cdot 10^{-6} m^2}{612 \cdot 10^{-6} m^2} = 0,108 < 0,25 \rightarrow \text{režim plnění dle Frommera}$$

5. Určení poměru S_Z/S_Z pro Variant 5

$$\frac{S_Z}{S_F} = \frac{35,03 \cdot 10^{-6} m^2}{612 \cdot 10^{-6} m^2} = 0,057 < 0,25 \rightarrow \text{režim plnění dle Frommera}$$