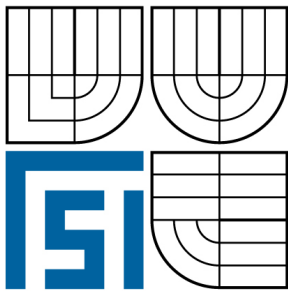


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NUMERICKÁ SIMULACE PLNĚNÍ A TUHNUTÍ ODLITKU

NUMERICAL SIMULATION OF MOLD FILLING AND CASTING SOLIDIFICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VLASTIMIL KOLDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR KRUTIŠ, Ph.D.

BRNO 2008

Abstrakt:

Cílem této diplomové práce je, na základě numerické simulace stávající technologie výroby hliníkového odlitku držáku kladky V9X, analyzovat příčiny vzniku vad typu zavaleniny a studené spoje. Následným cílem je vypracovat návrh variantního řešení tvaru odlitku tak, aby došlo k odstranění zmíněných vad. Toto variantní řešení bude rovněž ověřeno numerickou simulací. Úspěšnost navržených změn, pak posoudí zkušební odlití odlitku.

V rámci řešení problému bude provedena simulace cyklování formy a následně plnění odlitku. Během analýzy plnění dutiny formy bude rovněž rozebrána první fáze plnění, tedy pohyb pístu v tlakové komoře. S ohledem na typ vznikajících vad nebude provedena analýza tuhnutí odlitku.

Abstract:

The object of this diploma thesis is to analyze, pursuant to numerical simulation of current technology of production aluminous casting roller-reck V9X, causes of the rise of cold lap and laminations defects. Consequently, to work up a project of variant solution of the shape of casting so, as to come to elimination mentioned defects. This variant solving will be tested with numerical simulation as well. Fruitfulness of these designed changes will be verified by testing molten of the casting.

In terms of solve the problem the simulation of cycling of the mold and subsequently the filling of the casting will be effected. During the analyse of filling of the die the first phase of filling will be effected too. It means the movement of the piston through the chamber. Simulation of solidification of the casting won't be effected because of the type of the defect.

Klíčová slova:

Vysokotlaké lití, Numerická simulace, Zavaleniny, Studený spoj

Key words:

High pressure die casting, Numerical simulation, Cold laps, Lamination

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma numerická simulace plnění a chladnutí odlitku vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který je součástí této práce.

Datum

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování:

Děkuji tímto ing. Vladimírovi Krutišovi Ph.D. a Petrovi Nuskovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Obsah:

1	Úvod	9
2	Vysokotlaké lití	10
2.1	Stroje pro vysokotlaké lití	11
2.1.1	Tlakový stroj s horkou komorou	11
2.1.2	Tlakový stroj se studenou komorou	12
2.2	Konstrukce forem pro tlakové lití	14
2.2.1	Určení uzavírací síly stroje	14
2.2.2	Vtoková soustava	15
2.2.3	Výpočet vtokové soustavy	16
2.2.4	Chlazení a temperace.....	19
2.2.5	Odvzdušnění forem	19
2.2.6	Řízené odvzdušnění	20
3	Tepebné děje v soustavě forma-odlitek	20
3.1	Přestup tepla vedením	21
3.2	Rovnice přestupu tepla.....	22
3.3	Přestup tepla prouděním	22
3.4	Přestup tepla na rozhraní forma-odlitek	23
3.5	Zásady tepelné bilance při vysokotlakém lití	23
4	Vady tlakových odlitků	24
4.1	Vady vzniklé prouděním	24
4.1.1	Zavalenina (cold lap)	24
4.1.2	Studený spoj (lamination)	28
4.1.3	Nedolití odlitku	30
4.1.4	Vzdušná a plynná poretita (Bubliny)	30
5	Možnosti simulace plnění pro lití pod tlakem	32
5.1	Cyklování	32
5.2	Pohyb pístu v komoře.....	33
5.3	Plnění dutiny formy.....	34
5.4	Dotlak	35
6	Experimentální část	36
7	Zkoumané vady odlitku	36
8	Geometrie – varianta 1	37
8.1	Geometrie odlitku	37
8.2	Geometrie vtokové soustavy	38
8.3	Geometrie formy	39

8.4 Objemová síť.....	41
9 Počáteční a okrajové podmínky simulace	42
10 Výsledky simulace - varianta 1	43
10.1Cyklování formy	43
10.2Simulace plnění odlitku	45
10.2.1 Pohyb pístu.....	46
10.2.2 Plnění	47
A. Odlitek 1	48
B. Odlitek 2	53
10.2.3 Doba plnění odlitku	56
11 Geometrie – varianta 2	58
12 Výsledky simulace – varianta 2	58
12.1Simulace plnění odlitku	58
12.1.1 Plnění	59
A. Odlitek1	59
B. Odlitek 2	64
12.1.2 Doba plnění odlitku	67
13 Závěr	68
14 Literatura	72

1 Úvod

Technologie tlakového lití vznikla kvůli poptávce po tenkostěnných odlitcích, které nelze vyrobit v kokile gravitačním litím, kvůli rychlému odvodu tepla. Jedná se však o složitý proces, který může být ovlivněn nepřeborným množstvím vlivů a parametrů. Jen návrh a vývoj nové formy pro tlakové lití je finančně a rovněž časově velmi náročný proces. Dnešní moderní slévárny však potřebují rychle reagovat na každý požadavek svých klientů.

Díky rychlému vývoji výpočetní techniky nastupuje numerická simulace jako nový nástroj na pomoc při návrhu a optimalizaci slévárenských procesů. Výkonné programy jsou nyní schopné simulace celého procesu ve formě. S vývojem nástrojů pro počítačovou podporu procesů probíhajících při plnění a tuhnutí odlitku, vznikají rozsáhlé možnosti optimalizace jednotlivých technologií. Obzvláště výhodné je její použití v technologii tlakového lití. Pochopením procesů a zajištěním optimálních slévárenských parametrů je možno ušetřit nemalé finanční prostředky. [1]

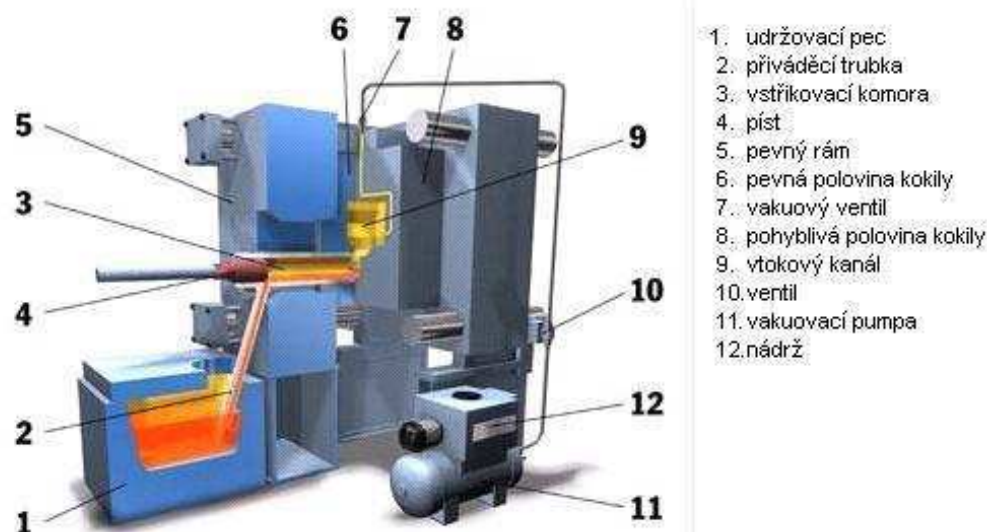
Tato práce se zabývá aplikací výpočtového softwaru ProCAST při řešení vady na odlitku vyrobeného technologií vysokotlakého lití. Po přiblížení samotné technologie a mnoha jejích aspektů a úskalí bude ukázáno, jak je software schopen pomoci s problémem vzniku vad a rovněž bude dokázáno, jaký může mít přínos ke znalostem konstruktérů a technologů ve slévárně.

2 Vysokotlaké lití

Lití pod vysokým tlakem je jednou z nejpoužívanějších technologií pro výrobu odlitků ze slitin hliníku a to převážně slitin s vysokým obsahem křemíku. V menší, ale ne zanedbatelné míře se používá rovněž pro slitiny hořčíku, slitin na bázi olova, cínu, zinku a mědi. Tyto slitiny mají menší tavící teplotu a díky tomu nedochází k velkému opotřebení formy, jak by se mohlo stát u slitin železa.

Metoda vysokotlakého lití minimalizuje riziko předčasného tuhnutí kovu v dutině formy, k němuž může docházet při gravitačním lití u odlitků s malou tloušťkou stěn. Na rozdíl od gravitačního lití do kokil vstupuje kov do formy vysokou rychlostí ($V_{vs} = 40-60$ m/s) a k tuhnutí dochází za působení tlaku v hodnotách kolem 250 Mpa. Této rychlosti dosáhne kov v místě vstupu kovu do formy neboli v nařiznutí. Tyto podmínky umožňují produkovat odlitky s tloušťkou stěn menší než 0.4 mm, což je tloušťka, které nemůže být jinou slévárenskou technologií dosaženo. Tvar odlitku však musí vyhovovat požadavkům na otevření formy, odstranění jader případně vložek a vyhození odlitku z formy. Maximální možná velikost odlitku je dána jeho hmotností a uzavírací silou tlakového stroje potřebnou k udržení těsnosti mezi oběma polovinami formy při působení licího tlaku. Tlaková síla je dána plochou odlitku v rovině kolmé na směr zavírání formy.

V porovnání s ostatními konvenčními metodami lití se vysokotlaké lití vyznačuje poměrně malým sklonem ke vzniku vad, jako jsou staženiny a pórovitost, určitému podílu vzduchu v kovu se však nelze vyhnout díky disperznímu způsobu plnění. Tlakové odlitky se v důsledku tohoto jevu vyznačují horšími mechanickými vlastnostmi, než je dosahováno gravitačním nebo nízkotlakým litím. Dneska už jsme díky moderní technologii schopni vzduch z dutiny formy do značné míry odsát pomocí vakuovacích zařízení. Tlakový stroj se systémem vakua je na obrázku 1. Povrch odlitku je hladký a kvalitní a požadavek na jeho opracování a dokončovací operace je malý. Dochází pouze k odstranění výronků v dělicí rovině formy a případně k vrtání děr či broušení. Za zmínku stojí rovněž vynikající dosahovaná rozměrová přesnost odlitků.



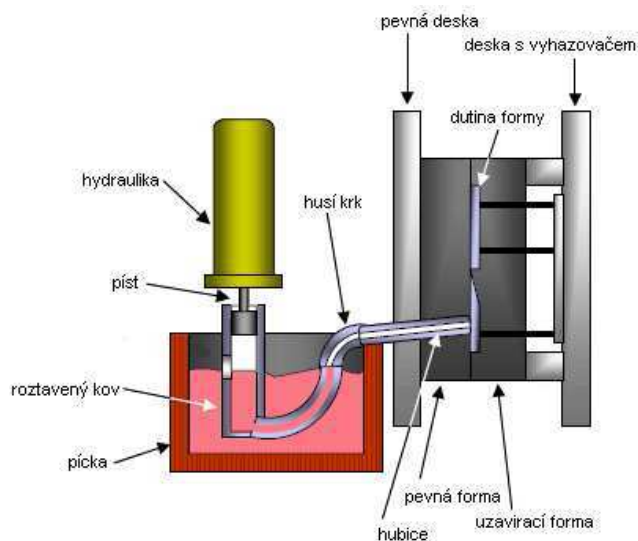
Obr. 1 Tlakový stroj se studenou komorou [2]

2.1 Stroje pro vysokotlaké lití

Hlavními částmi tlakového stroje jsou systém vstřikování kovu, systém uzavírání formy a řízení pohyblivé části formy a systém pro vyhození odlitku z formy po ukončení cyklu. Jsou známi dva typy jednotek pro vstřelování kovu, lišící se od sebe umístěním zásobníku tekutého kovu a použitím. Tlakové stroje se podle nich dělí na stroje s horkou komorou (hot chamber) a studenou komorou (cold chamber). Stroj s horkou komorou, u kterého je píst ponořen v zásobníku roztaveného kovu lze s výhodou použít při lití slitin s nižší teplotou tavení, jako je zinek. Stroj se studenou komorou je nutné použít u slitin s vyšší teplotou tavení, jako jsou slitiny hliníku, mědi a zinku s vysokým obsahem hliníku ve slitině. Tyto slitiny by při použití horké komory reagovaly s materiálem vstřelovací pumpy, čímž by docházelo ke znehodnocování jak pumpy, tak i slitiny samotné. Slitiny hořčíku je možno na strojích s horkou komorou odlévat díky jejich netečnosti s železnými materiály pumpy.

2.1.1 Tlakový stroj s horkou komorou

Typický vstřelovací systém s horkou komorou je vidět na obrázku 2. Stroj se skládá z hydraulického zařízení pro pohyb pístu, komory, husího krku a vstřelovací trysky. Na začátku cyklu je píst v horní poloze. Roztavený kov nateče otvorem do komory a po těsném uzavření formy se píst posune dolů, čímž dojde k uzavření vtokového otvoru. Roztavený kov je pak pístem hnán skrz husí krk, trysku a vtokovou soustavu do dutiny formy. Vtok je kónického tvaru a opatřen rozrážečem pro jednodušší vyjmutí z formy a správné vedení kovu. Po uplynutí času potřebného ke ztuhnutí odlitku je tento z formy vyhozen, píst se vrací do své výchozí polohy a začíná další cyklus. Doba cyklu se v závislosti na velikosti odlitku pohybuje od několika sekund do třiceti.



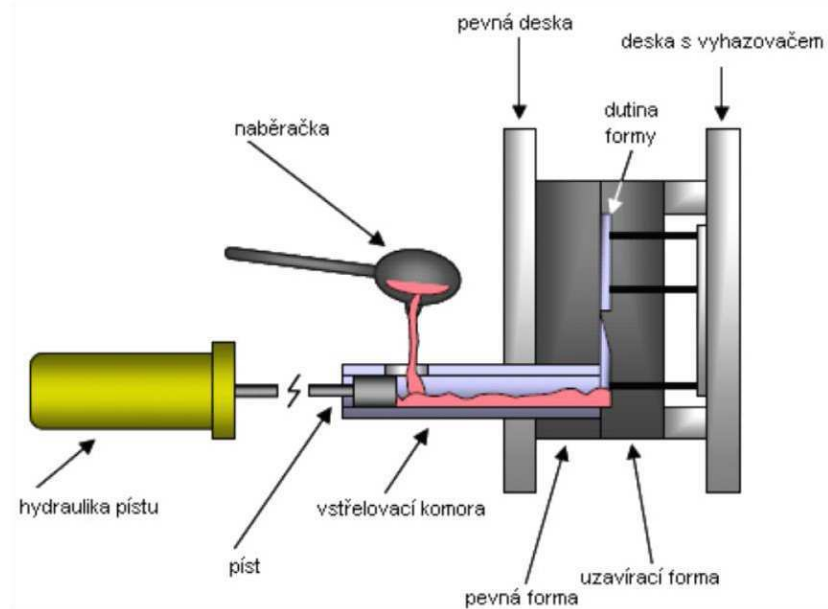
Obr. 2 Schéma stroje s horkou komorou [3]

2.1.2 Tlakový stroj se studenou komorou

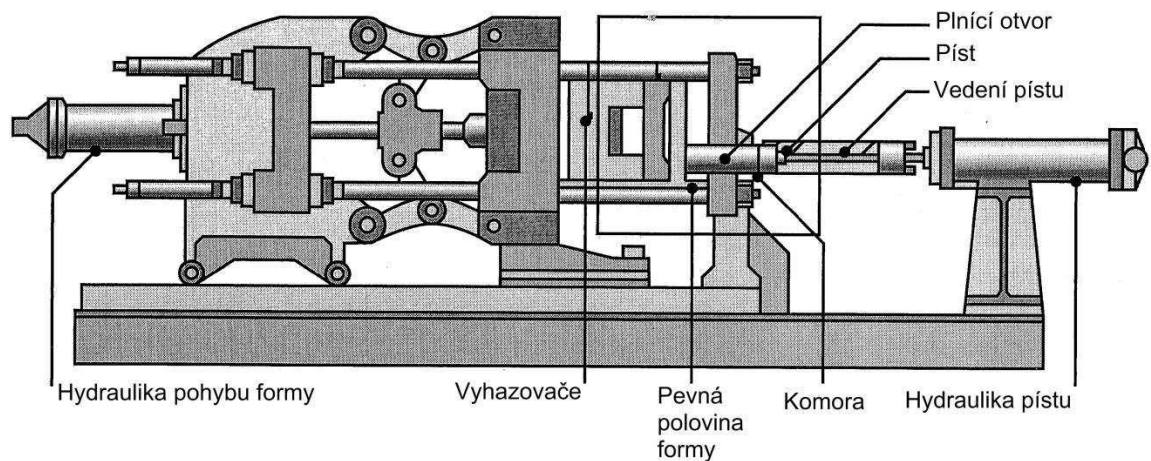
Princip stroje se studenou komorou je na obrázku 3. Stroj se skládá z horizontální komory s otvorem pro plnění, vodou chlazeného pístu a hydraulického systému pro pohyb pístu. Cyklus se skládá z následujících kroků:

- uzavření stroje včetně zajetí tahačů jader a uzavření formy, namazání pístu v plnicí komoře
- naplnění dutiny komory taveninou pomocí dávkovacího zařízení. Množství kovu v komoře záleží na objemu odlitku a vtokové soustavy a do jisté míry na něm závisí kvalita odlitku.
- plnění formy vlivem pohybu pístu komorou. Píst tlačí kov před sebou skrz vtokovou soustavu do dutiny formy. Na čele pístu se na konci plnění vytvoří tzv. tableta, na kterou pak píst tlačí ve fázi dotlaku. Průběh tohoto úkonu v podstatě ovlivňuje jakost odlitku
- doby tuhnutí odlitku v rámci cyklu je využíváno k dalším úkonům, jako je ostříhování odlitku do krokovací palety nebo uchopení zalévaného dílce robotem a založení do formy
- otevření formy spolu s vyhozením odlitku pomocí vyhazovačů
- vyjmutí odlitku či sady robotem nebo manipulátorem z dělicí roviny
- kompletní čištění a mazání formy zařízením pohybujícím se v dělicí rovině - ostřík.

Zřejmě nepoužívanější typ tlakového stroje s horizontální studenou komorou je schematicky zobrazen na obrázku 4.



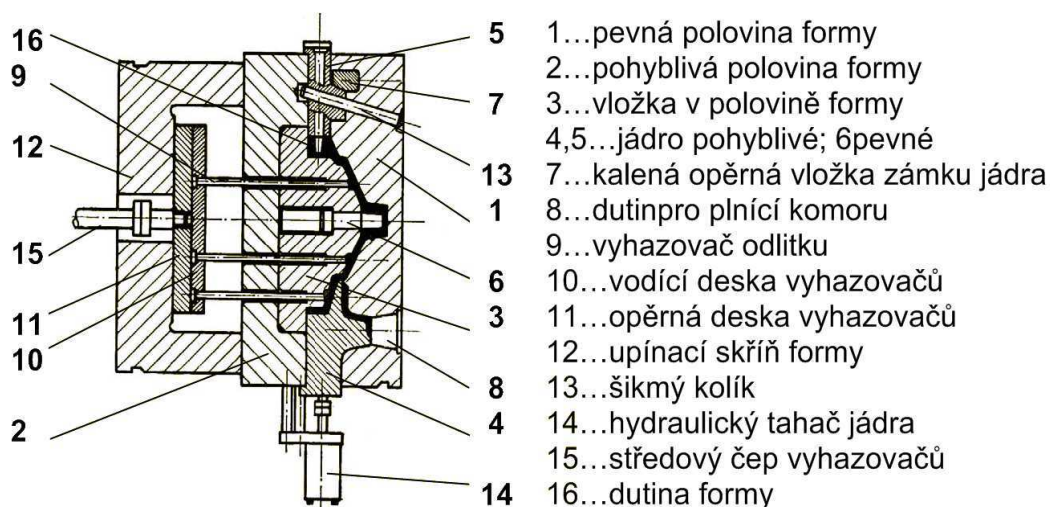
Obr. 3 Schéma stroje s horkou komorou [3]



Obr. 4 Schéma tlakového stroje s horizontální komorou [4]

2.2 Konstrukce forem pro tlakové lití

K získání jakostního odlitku bez povrchových vad, vzduchových bublin a staženin je nutné volit správné technologické podmínky pro lití pod tlakem, které všeobecně určují plnění formy a které mají podstatný vliv na jakost odlitků. Na správně navržené konstrukci formy záleží, zda výsledný produkt tj. odlitek bude požadované kvality při co nejlepších podmínkách. Na obr. 5 je schematicky znázorněna forma s uvedením názvů jednotlivých částí. [5]



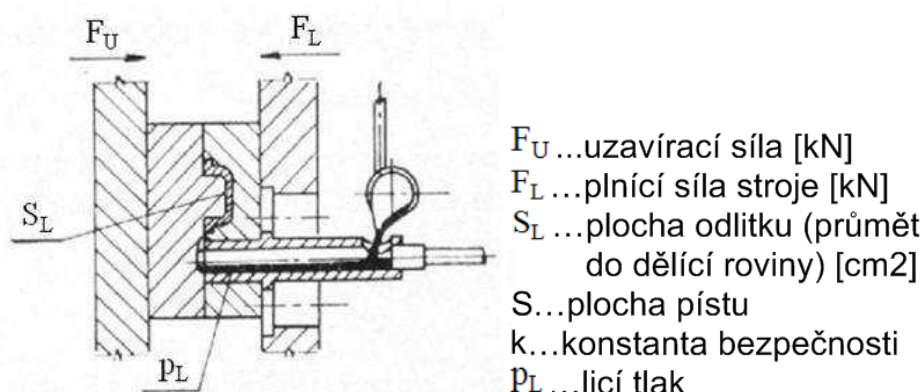
Obr. 5 Forma pro tlakové lití - kokila[5]

2.2.1 Určení uzavírací síly stroje

Výběr tlakového stroje závisí na řadě faktorů. Jsou to druh odlévané slitiny, tvar a velikost odlitku respektive plocha odlitku včetně vtoku a přetoků v rovině kolmé k posuvu pístu a pohyblivé poloviny formy, obsah kovu ve vstřelovací komoře potřebný k dokonalému zaplnění dutiny formy a zejména velikost uzavírací síly stroje.

Uzavírací síla se vypočte pomocí následujícího vzorce:

$$F_U = p_L \cdot S_L \cdot k = \frac{F_L}{S} \cdot S_L \cdot k \quad (2.1)$$



Obr. 6 Schéma k výpočtu uzavírací síly [5]

Doporučené hodnoty licích tlaků pro vybrané slitiny jsou v tabulce 1[5]

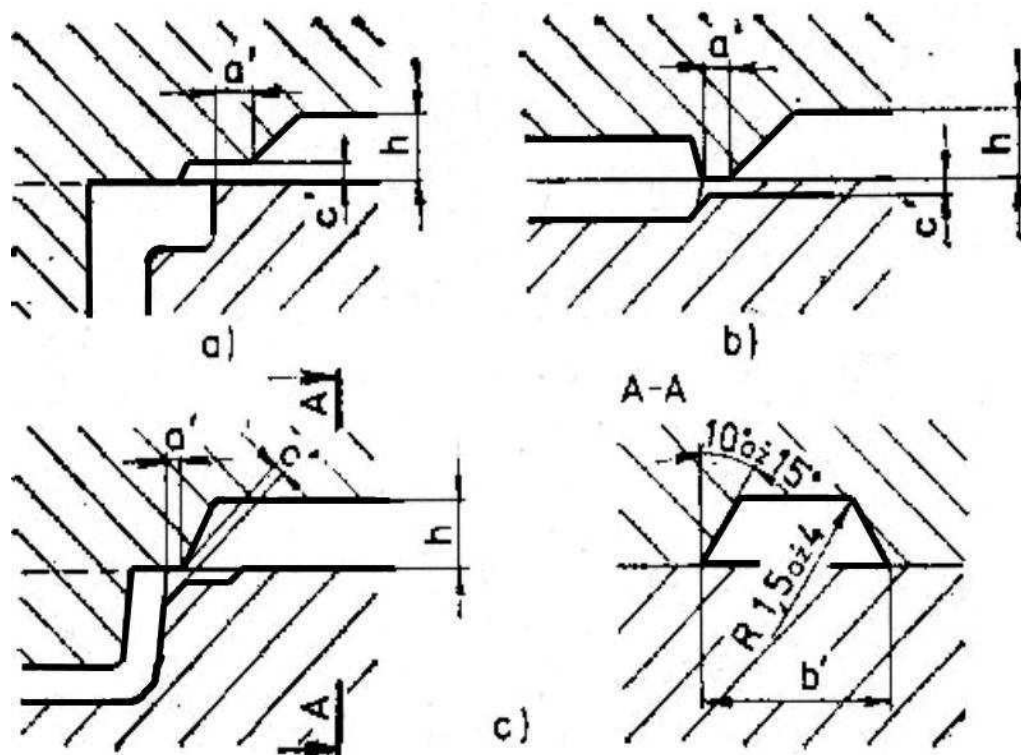
Druh odlitku	Tlak P_L v MPa		
	Zn	Al, Mg	Cu
Odlitky jednoduché	Od 10 do 20	Do 60	Od 30 do 40
Odlitky složité	Od 20 do 30	Od 40 do 80	Od 40 do 80
Odlitky nepropustné	Od 22 do 25	Od 80 do 150	

Tab. 1 Doporučené hodnoty licích tlaků

Hodnota Konstanty bezpečnosti se pohybuje v rozmezí od 1.1 do 1.3 a vyjadřuje rozdíl mezi vypočtenou uzavírací silou a uzavírací silou použitého stroje. Hodnota uzavírací síly tlakových strojů se nachází v rozmezí od 1000kN až do 40 000kN a slévárny si stroje volí podle sortimentu odlitků.

2.2.2 Vtoková soustava

Kvalita odlitku je velmi vážně ovlivněna správností navržené vtokové soustavy. Tu tvoří v dělicí rovině soustava kanálů a dutin, které vedou kov od vstřelovací komory k dutině formy i skrz ni. Kanály vtokové soustavy jsou k vlastní dutině formy připojeny v místě, které se u vysokotlakého lití nazývá naříznutí a je tvořeno úzkou štěrbinou s danými geometrickými parametry. Používané typy naříznutí jsou na obrázku 2.5. Hodnota délky naříznutí „a“=0-0,3, šířka „c“= 0,7-2,5 obě pro slitiny hliníku.



Obr. 7 Typy nařiznutí [5]

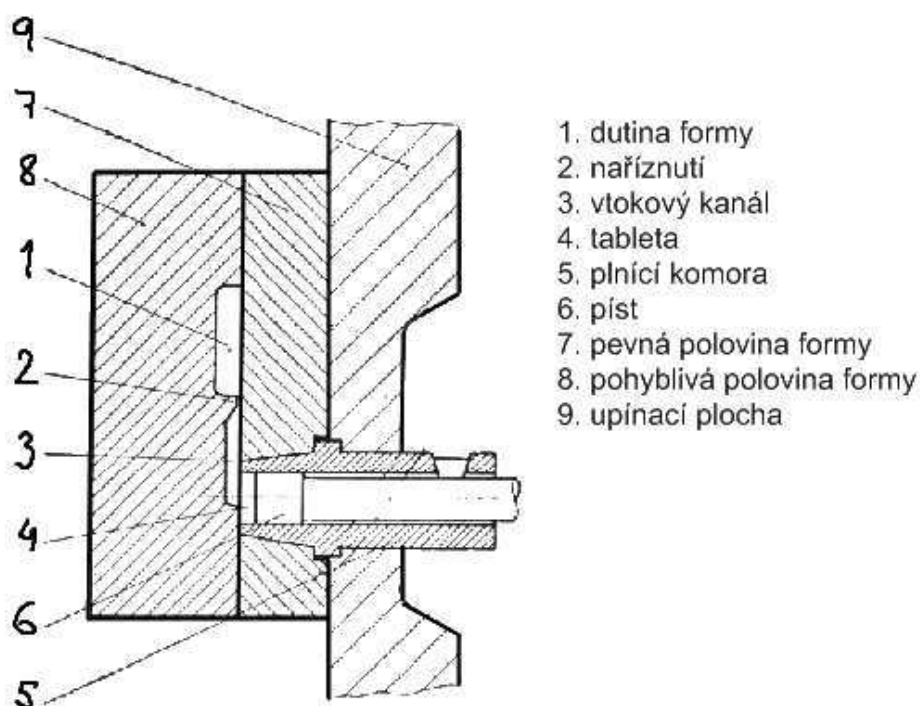
Soustava hraje důležitou roli při výrobě odlitku a měla by být co nejjednodušší a nejkratší z důvodu využití kovu, tedy nákladů. Při návrhu soustavy musí konstruktér znát všechny parametry, možnosti a data stroje, aby mohl na jejich základě určit velikost a tloušťku kanálů s ohledem na požadovanou rychlost a čas plnění. Správný vztah mezi rychlostí a dobou plnění zabraňuje předčasnému natuhávání kovu v průběhu fáze plnění.

Nesprávně navržený tvar vtokové soustavy vede k nevhodnému rozložení proudění kovu při plnění a následně ke vzniku vad typu studený spoj, zavalenina, nezaběhnutí nebo k uzavření vzduchu. Ani v případě splnění požadavků na plnění však nemusí být vtokový systém navržen správně. Pokud je poměr tloušťky kanálu a stěn odlitku velký, hrozí v oblasti nařiznutí vznik deformací, které mohou v konečném důsledku způsobit problémy s vyhozením odlitku z formy. Toto je jedním z důvodů proč u tlakového lití využít při simulaci procesu rovněž výpočet napětí.

2.2.3 Výpočet vtokové soustavy

Vtoková soustava neslouží při tlakovém lití pouze k dopravení kovu z komory do dutiny formy. Její geometrií lze rovněž regulovat pracovní parametry (rychlost, tlak) a značný vliv má i na odvzdušnění.

Prvky vtokové soustavy jsou na obrázku 8



Obr. 8 Vtoková soustava [5]

Vtoková soustava musí splňovat následující požadavky:

- zajistit správné vyplnění dutiny formy
- zamezit předčasnému opotřebení dutiny formy taveninou (kolmé rázy)
- zamezit vznik vrtů, které vedou k uzavírání vzduchu a následné plynné perezitě
- zajistit požadovaný vzhled odlitku

Rozhodující vliv na průběh plnění odlitku má tvar a rozměr naříznutí, což je místo kde kov vstupuje do dutiny formy. Optimální průřez naříznutí vychází z času potřebného k zaplnění dutiny a optimální rychlosti kovu. Pro výpočet se používá následující vzorec:

$$S' = \frac{G}{\rho \cdot v' \cdot t}$$

S'...průřez naříznutí [cm²]

G...hmotnost odlitku (včetně přetoků)

ρ...hustota tekutého kovu [g/cm³]

t...doba plnění formy [s]

v'...rychlost taveniny v zářezu [m/s]

(2.2)

Optimální rychlosti v naříznutí se v konvenčních podmínkách lití pohybují v rozsahu od 20 do 60 m/s. Za použití systému vakua mohou být sníženy na hodnoty 15 až 30 m/s.

Doba plnění je závislá na střední tloušťce stěny odlitku a pohybuje se v řádu desetin až setin sekundy. Následující tabulka obsahuje přehled optimálních časů plnění zjištěných pro konkrétní tloušťky stěn odlitku.

Převažující tloušťka stěny odlitku v mm	Doba plnění formy taveninou v 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

Tab. 2 Teoretické určení doby plnění

Průřez ústí vtokového kanálu má vliv na rychlost proudění kovu do formy a tím na poměry při plnění. Konstruktor formy má zásadně volit nejmenší rychlost proudu slitiny ve vtokovém nařiznutí, s níž lze dosáhnout dobrého vyplnění dutiny formy. V případě malého vtokového nařiznutí docílujeme přesného vyplnění obrysů dutiny formy. Další předností malého průřezu je snadné oddělení odlitku od vtoku prostým odlomením. Zvyšování rychlosti, které je zapříčiněno malým průřezem, má však též nevýhody. Tvoření vírů při dopadu proudu slitiny do polštáře taveniny v dutině formy je podstatně zvýšeno a způsobuje mnohem větší pohlcování plynů a par do slitiny a jejich uzavření v odlitku. Rychlým plněním formy je ztížen odvod plynů a par před rychle postupující slitinou. [3]

Větší ztráty energie třením, které odpovídají větší rychlosti, způsobují větší opotřebení příslušných částí dutiny formy a hrubší strukturu slitiny v odlitku. V případě většího průřezu lze rychlost potřebnou k dobrému vyplnění formy získat nastavením většího tlaku. [3]

2.2.4 Chlazení a temperace

Teplota formy a tepelná rovnováha formy pro lití pod tlakem mají značný vliv na jakost odlitků, na snížení zmetkovitosti a na prodloužení životnosti formy. Chladicí systém formy musí být navržen takovým způsobem, aby bylo zabráněno výskytu vad způsobených špatnou teplotou formy (viz. 2.1.1).

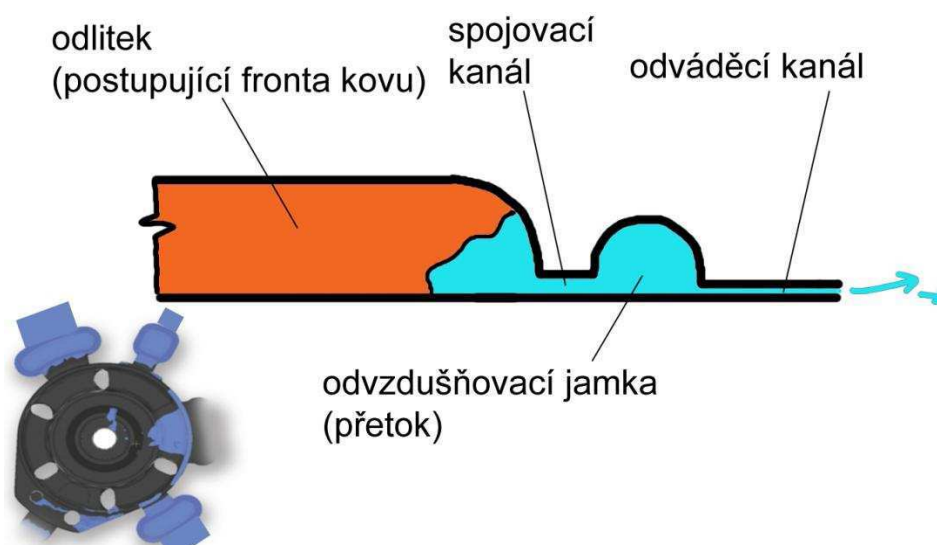
Základem dobrého odlitku je takový návrh formy, kdy bude zajištěno účinné chlazení všech činných částí formy. Pro chlazení se vyvrtávají kanály, které se šroubením a gumovými hadicemi napojují na vodovodní a odpadní potrubí. Jako chladicí médium se používá nejčastěji voda o teplotě v rozmezí 20 - 30°C.

Při temperaci proudí temperačními kanály olej a jeho teplota se pohybuje v rozmezí od 160 do 220 °C.

2.2.5 Odvzdušnění forem

Zastaralý, avšak stále nepřekonaný způsob jak umožnit vzduchu odejít z dutiny formy je použití odvzdušňovacích kanálů. Ty jsou umístěny nejčastěji v dělicí rovině a to v místech kde končí plnění odlitku. Špatné umístění odvzdušňovacích kanálů má pak za následek uzavírání vzduchu v odlitku. Odstranění vzduchu z dutiny formy během krátké doby plnění je znesnadňováno tím, že v dutině formy se zároveň vyskytuje značné množství vzduchu z plnicí komory a vtokových kanálů.

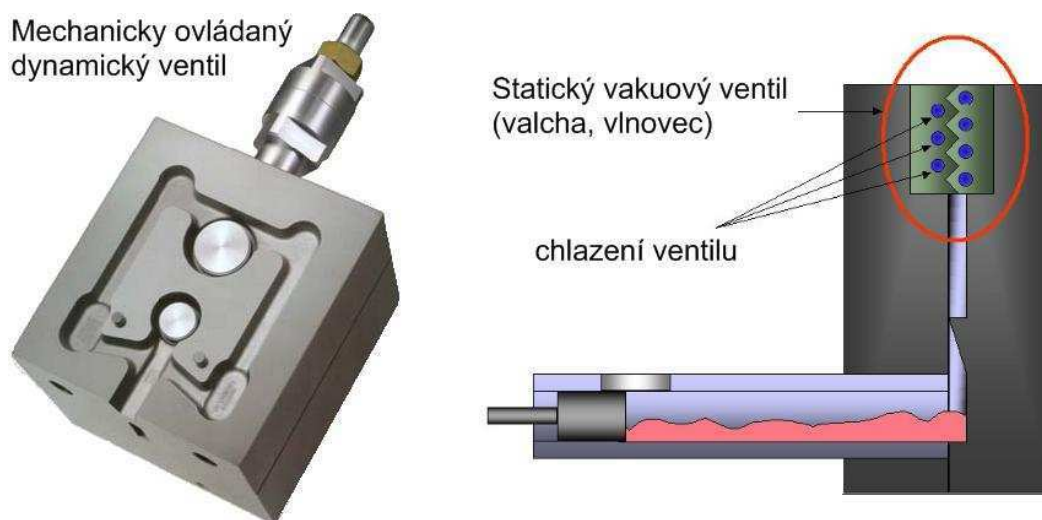
Tloušťka průřezu kanálů se pohybuje cca od 0,05 do 0,1 mm. Šířka kanálů bývá obvykle 2 až 20 mm. Vyšších hodnot se používá u odlitků větších rozměrů, u kterých je kanál položen daleko od vtoku. Odvzdušňovací kanály se obvykle zhotovují v dělicí rovině formy broušením.



Obr. 10 Ukázka odvzdušňovacího systému

2.2.6 Řízené odvzdušnění

Moderním způsobem odvzdušnění formy je použití vakua. Do míst posledního plnění se v tomto případě instalují vakuové ventily a to buď statické (valchy, vlnovce) nebo dynamické (obr 11). Použitím systému vakua se sníží nejen porezita ale také nárok na tonáž stroje neboť v dutině formy je stonásobně menší tlak. Rovněž je možno dosahovat menších tloušťek stěn a komplikovanějších tvarů odlitků.



Obr. 11 Vakuové ventily [6]

3 Tepelné děje v soustavě forma-odlitek

Všechny děje v odlitku velmi úzce souvisí s uvolňováním a transportem tepla při tuhnutí a ve fázi chladnutí. Rychlost přestupu tepla je velmi důležitá k určení doby tuhnutí odlitku a rozložení teplotního pole v celé soustavě forma - odlitek. Oba tyto jevy přímo nebo nepřímo ovlivňují strukturu materiálu, výskyt vměstků, rozložení a tvar porózity a tím kvalitu a vlastnosti celého odlitku. Přestup tepla a procesy při tuhnutí jsou velmi komplexní a těžko pochopitelné problémy, nicméně jejich základní znalost je pro výrobu kvalitního odlitku nutná. Pro správnost numerické simulace je pak nepostradatelná.

V této kapitole budou probrány dva způsoby přestupu tepla a to přestup tepla vedením (kondukcí) a prouděním (konvekcí). [7]

3.1 Přestup tepla vedením

Je známo, že kdykoliv se vedle sebe vyskytují prostředí o jiných teplotách, dochází mezi nimi k předání energie z míst o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou. Tento jev je označován jako vedení a tepelný tok skrz jednotku plochy je úměrný tepelnému gradientu. Konstanta úměrnosti je tepelná vodivost materiálu. Základní Fourierova rovnice pro přenos tepla vedením vypadá následovně:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.3)$$

Kde: q je tepelný tok kolmý na plochu „A“ [W]
 A plocha, přes kterou teplo prochází [m²]
 K tepelná vodivost [W/mK]
 T teplota [K]
 x element kolmý na plochu A [m]

Znaménko mínus ve vzorci vyjadřuje, že teplo je počítáno ve směru jeho toku. [7]

Dále je třeba definovat termín „tepelný odpor“. Pro tento účel budeme předpokládat ustálený stav nezávislý na čase. To znamená $T=T(x)$. Integrací a úpravou Fourierovy rovnice dostaneme následující vzorec:

$$q = - \frac{\Delta T}{R_{th}^{cond}} \quad kde \quad R_{th}^{cond} = \frac{\Delta x}{kA} \quad (2.4)$$

Tento vztah představuje nový pohled na Fourierovu rovnici, ve kterém je rychlost přestupu tepla uvažována jako tepelný tok, a kombinace tepelné vodivosti, tloušťky materiálu, oblasti přestupu a odporu proti tepelnému toku. Řídicím parametrem pro přestup tepla je rozdíl teplot. Fourierova rovnice lze pak vyjádřit jako: [7]

3.2 Rovnice přestupu tepla

Na základě Fourierovy rovnice spolu s prvním zákonem termodynamiky (zákon zachování energie), může být sestrojena základní rovnice přestupu tepla.

Za prvé uvažujme těleso o tepelné vodivosti „k“ a s libovolnou teplotou na povrchu. Změna teploty závislá na čase a na poloze, a vnitřní tepelný vývoj, způsobí s časem změnu teploty celého tělesa. Aplikací rovnice o zachování energie na objem obdržíme následující rovnici energetické rovnováhy: [7]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = q_x - q_{x+\Delta x} + Q_{gen}''' dV \quad (2.5)$$

Po vyjádření všech proměnných společně s mnoha modifikacemi a kombinacemi s Fourierovou rovnicí, získáme jednorozměrnou rovnici pro výpočet přestupu tepla a ta pak poslouží jako základ pro zjištění třírozměrné, na níž jsou založeny všechny tepelné děje při lití kovů.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_{gen}''' \quad (2.6)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{gen}''' \quad (2.7)$$

3.3 Přestup tepla prouděním

Vedení a sálání berou v potaz transport energie nikoliv však hmoty. Konvekce znamená pohyb hmoty při vzetí do úvahy jejího tepelného obsahu. Dobrymi příklady pro přenos tepla prouděním jsou chladicí kanály ve formy, kterými protéká chladicí médium (voda nebo olej), nebo kov pohybující se v komoře a v dutině formy.

Známe dvě formy přestupu tepla prouděním. Nucená konvekce je způsobena proudícím médiem v okolí zkoumaného tělesa. Dobrým příkladem může být právě proudění chladicího média v kanálech formy. Na druhou stranu konvekce volná je způsobena změnou hustoty a vzniká v proudu kovu bez působení vnějších vlivů. Přestup tepla prouděním popisuje Newtonova rovnice chladnutí, zahrnující oba typy konvekce do jednoho vzorce: [7]

$$q = -hA(T_{\infty} - T_s) \quad (2.8)$$

kde T_{∞} a T_s jsou teploty povrchu tělesa a chladicího proudu. Člen h je koeficient přestupu tepla [W/m^2K] závislý na rychlosti proudění média, geometrii kanálu a tvaru ochlazovaná plochy.

3.4 Přestup tepla na rozhraní forma-odlitek

Kovová kokila má 30 – 50 krát vyšší tepelnou vodivost než písková forma. Umožňuje velkou rychlost chladnutí a tak se stává ideální pro tenkostěnné odlitky.

Přestup tepla závisí u tlakového lití především na stykové ploše mezi formou a taveninou. Tepelný tok z teplé taveniny do chladicí formy je ovlivněn následujícími vlivy:

- vzduchovou mezerou mezi formou a chladnoucím odlitkem
- drsností povrchu formy
- nátěrem formy

Vzduchová mezera je způsobena stahováním jako důsledkem změny hustoty kovu při tuhnutí a následným smršťováním během chladnutí odlitku.

Velká drsnost stěn formy způsobuje nedokonalý kontakt dvou povrchů. V mezerách mezi šíčkami profilu drsnosti se drží vzduch a jiné plyny, které zvyšují tepelný odpor na rozhraní forma-kov.

Stěna formy bývá velmi často pokryta tenkou vrstvou keramického prášku pojeného pojivem nejčastěji na bázi vodního skla. Tato směs se nazývá nátěr. Nátěr je rozprášen tryskou na povrch přehřáté formy a v procesu přestupu tepla pak působí jako izolant s velkým tepelným odporem a malou tepelnou vodivostí. Dalším jeho úkolem je eliminovat množství mezer vzniklých drsností povrchu formy. Izolační účinek má dovolit tavenině vyplnit celý prostor formy, dříve než začne proces tuhnutí. Rovněž potlačuje vznik broků v důsledku rozstříkávání kovu. [8]

3.5 Zásady tepelné bilance při vysokotlakém lití

- teplotní bilance v soustavě forma odlitek musí být zachována v průběhu celého procesu (teplo přijaté = teplo odevzdané)
- chyby v designu chladicích kanálů nemohou být kompenzovány zvýšenou rychlostí proudění chladicí kapaliny, neboť k optimálnímu využití konvekce dochází v úzkých limitech rychlostí
- u tenkostěnných odlitků je třeba mnohdy použít kromě chlazení i temperaci olejem o teplotách mezi 150 až 200 stupni
- více malých chladicích kanálů je lepší než jeden velký

4 Vady tlakových odlitků

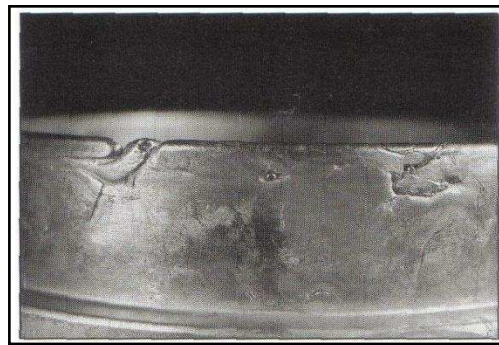
To, že požadavky na kvalitu odlitků jsou neustále vyšší, má na svědomí množství nových technologií a způsobů, jak se vyhnout vadám v odlitcích. Nejlepší způsob jak vady predikovat je numerická simulace, díky níž jsme schopni vidět přímo do procesu lití a případné vady odstranit potřebnými zákroky rovnou v místě jejich vzniku.

4.1 Vady vzniklé prouděním

V této práci se zaměříme zejména na problémy související s prouděním kovu ve formě. Faktorů, ovlivňujících kvalitu odlitků, je velmi mnoho a způsobů jak lze vadám a neshodám vzniklých vlivem proudění zabránit rovněž.

4.1.1 Zavalenina (cold lap)

Zavaleniny jsou okem viditelnou vadou povrchu odlitku, vznikající v důsledku nespojení dvou nebo více různých proudů kovu. K nespojení dochází vlivem možného částečného natunutí kovu na čelech těchto proudů v místech formy s nejvyšším odvodem tepla. Takovými místy mohou být části odlitku, které se plní jako poslední (kov ztrácí teplotu v průběhu celého průchodu dutinou formy) nebo rychle chladnoucí tenké průřezy jako žebra a různé výčnělky. Povrch je vadou zvrásněn, jak ukazují obrázky 12 a 13 níže.



Obr. 12 Zavalenina (povrch žebra) Obr. 13 Vada v tenké stěně difuzoru

Z mnoha známých případů z praxe je zřejmá snaha vyřešit problém změnou vtokové soustavy což je většinou ze všech ten nejnákladnější zásah a s vlastním vznikem nemusí mít často mnoho společného. Zjištění pravé příčiny problému může být v mnoha případech daleko jednodušší, pokud technolog posoudí problém z několika úhlů pohledů. Následující přehled faktorů ovlivňujících průběh plnění by mohl k řešení zavalenin pomoci.

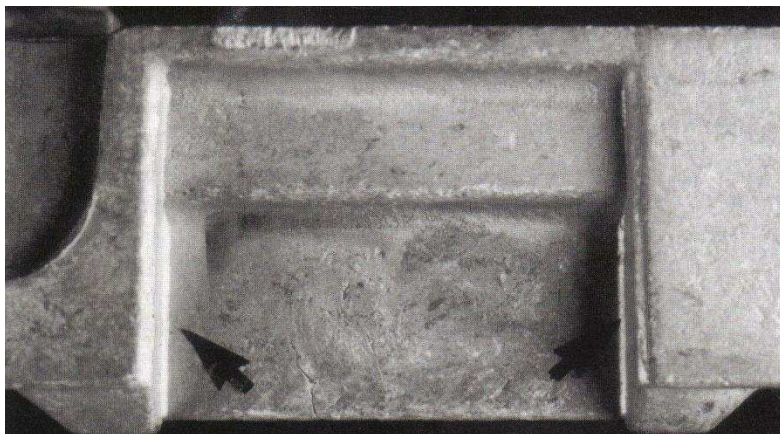
- **Tloušťka stěn odlitku**

U slitin hliníku nastává problém při tloušťkách stěn menších, než je 2.28 mm. U těchto tloušťek dochází ke změnám v proudění a je proto důležité v průběhu konstrukce zajistit součásti největší možnou tloušťku stěn. Minimální tloušťka pro slitiny hliníku je 1.5 mm. Ta však souvisí s nutností krátké doby plnění, malé vzdálenosti pohybu kovu a vyšších teplot formy. [9]

- **Tvar odlitku**

Tvar odlitku může být často nejdůležitějším faktorem při řešení všech povrchových vad odlitků. Naneštěstí však v mnoha případech nejtěžším na změnu. Tvar odlitku by se měl držet následujících zákonitostí [9]:

- délka toku kovu odlitkem by měla být pokud možno co nejmenší
- počet překážek, přes které musí kov na cestě odlitkem projít, by měl být co nejnižší
- kritická jsou místa rozdělující proud kovu (jádra, žebírka)
- hrany musejí být opatřeny vhodnými rádiusy (obr. 14)
- místo vstupu kovu do dutiny (naříznutí) formy musí být správně zvoleno
- tvar rovněž rozhoduje o rozložení teplých a studených bodů v dutině



*Obr. 14 Příklad nevhodně zvoleného zaoblení,
na odlitku s menším radiusem vada nevznikla*

- **Doba plnění**

Čas od okamžiku, kdy kov vstoupí zářezem do formy, do zaplnění celé dutiny, je dalším z velmi důležitých faktorů. Pravidlo zní: čím kratší doba plnění, tím lepší konečný povrch odlitku. Optimální čas plnění se například u odlitků ze slitin hliníku o hmotnosti v hodnotách okolo 8 kg pohybuje v rozmezí 50 až 100 msec. Optimální čas v závislosti na teplotě formy, teplotě kovu a střední tloušťce odlitku se zjistí podle následujícího vzorce: [9]

$$t = K \cdot \frac{(T_i - T_f + SZ)}{T_f - T_d} \cdot T \quad (2.9)$$

kde: K = konstanta
 T = střední tloušťka stěn odlitku
 T_i = teplota kovu v nařiznutí
 T_f = minimální teplota lití
 T_d = teplota kokily
 S = procento tuhé fáze po zaplnění dutiny formy
 Z = konstanta pro přepočítání z procent

Hodnoty doporučených hodnot teplot a středních tloušťek jsou uvedeny v tabulkách níže a měli by do jisté míry korespondovat s hodnotami času plnění v tabulce 2.1 v kapitole 2.2.2.

K	T _f [°C]	T _i [°C]	T _d [°C]	Z [°C%]
0,0124-0,0346	570 – 595	650 - 720	255 - 340	4,8 – 5,9

Tab. 3 Optimální hodnoty do vzorce pro výpočet doby plnění [3]

Tloušťka stěny [mm]	0,25 – 0,75	0,75 – 1,25	1,25 - 2	2 – 3,2
S [%]	5	5 - 25	15 - 35	20 - 50

Tab. 4 Procenta tuhé fáze [3]

Zvýšení rychlosti vlivem zmenšení průřezu nařiznutí je možné jen do té míry, kdy rychlost v nařiznutí nebude ještě způsobovat erozi formy. Nejvhodnější je tedy zvolit co nejmenší čas plnění s ohledem na optimální rychlost v nařiznutí.

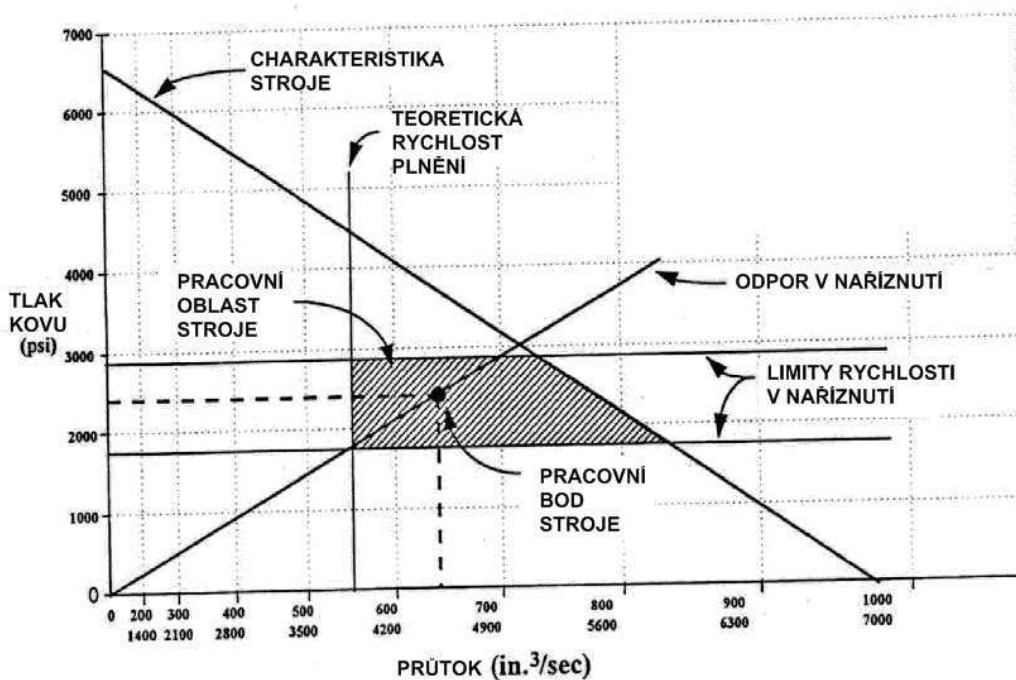
- Charakter proudění**

Při tlakovém lití se vyskytuje jev nazývaný „disperzní proudění“ (atomized flow). Jedná se v podstatě o kapičky kovu rozptýlené ve směsi vzduchu. Kov proudící tímto způsobem dosahuje při disperzním proudění nejlepších povrchů odlitků. Dosažení disperzního proudění je tedy cílem každého jednoho tlakového odlitku a musí s ním být počítáno již při navrhování konstrukce formy.

Druh proudění závisí především na rychlosti kovu v nařiznutí a jeho tloušťce. Pro dosažení disperzního proudění obecně platí: čím větší je tloušťka nařiznutí, tím větší musí být i rychlost kovu. [9]

Jedním z účinných nástrojů pro navrhování vtokových soustav jsou takzvané PQ^2 diagramy, které mohou poskytnout informace o možnostech stroje při určitých podmínkách výroby, určí oblast pracovních charakteristik formy a stroje pro maximální využití potenciálu stroje a kvalitu konstrukce formy z hlediska času plnění, rychlosti plnění, rychlosti kovu v nařiznutí a hydraulických ztrát. [6]

PQ² DIAGRAM



Obr. 15 Příklad PQ^2 diagramu []

- **Teplota formy**

Nízká teplota formy způsobí předčasný výskyt tuhé fáze v kovu. Dvě fronty kovu pak při nedokonalém spojení vytvoří vrásky nebo studené spoje. Teplota kokily by proto neměla být nižší než 200 °C. Mezi hlavní parametry ovlivňující teplotu kovu patří: [9]

- Chlazení (temperace)
- Postřik formy po vyhození odlitku
- Doba cyklu

Chladicí kanály uvnitř formy musí zajistit ideální teplotu formy. Forma nemá být ani příliš chlazená (předčasné natuhávání formy a vznik povrchových vad) ani příliš teplá (rychlé opotřebení formy). Velký vliv kromě vstupní teploty chladicího média má rovněž rychlost jeho proudění chladicími (temperačními) kanály.

Postřik formy se provádí médiem o obsahu vody 99%. Využívá se zde odvodu tepla z povrchu formy díky vypařování vody. Příliš dlouhá doba ostříku, však může mít za následek přehnané ochlazení formy a ulpívající voda může následně způsobit bublinatost v odlitku.

Ke sledování teploty formy v průběhu cyklu může dobře posloužit numerická simulace.

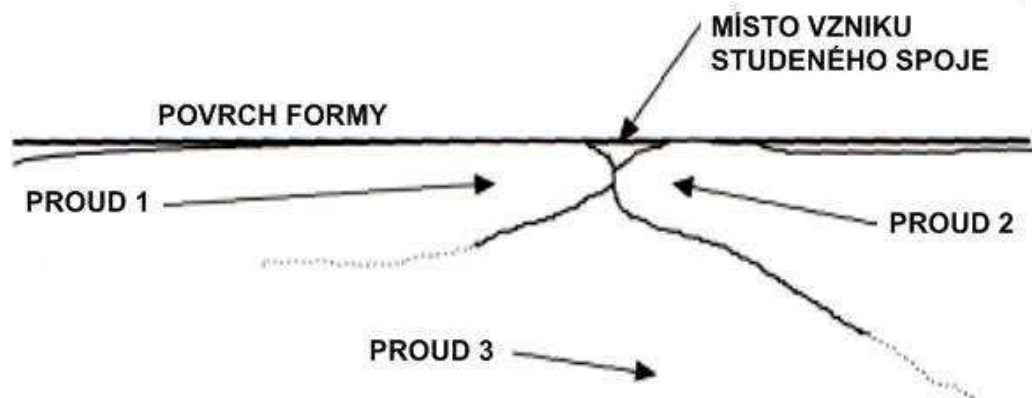
- **Teplota kovu**

Obecně platí: čím vyšší teplota kovu, tím vyšší kvalita povrchu. Maximální možnou teplotu kovu však ovlivňují jiné faktory, se kterými nelze nepočítat.

Vlivem vysoké teploty vzniká ve slitinách hliníku větší podíl oxidických vměstků, dochází k většímu opotřebení dutiny formy, vtokové soustavy a komory, zmenšuje se životnost pístu a také možnost uhlídat správné rozložení teplot v průběhu cyklu je o poznání těžší. Proto se maximální možná teplota pro slitiny hliníku uvádí v hodnotách kolem 687°C. [9]

4.1.2 Studený spoj (lamination)

Další zjevnou povrchovou vadou odlitku jsou tzv. studené spoje. Studený spoj vznikne v důsledku nedokonalého spojení dvou proudů kovu, které mohou být polotuhé, případně se na jejich čele vytvořila vrstva oxidů.



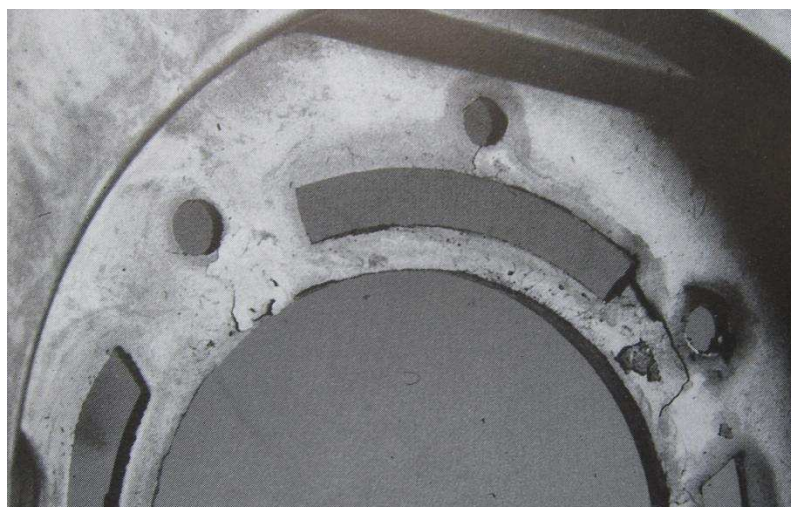
Obr. 16 Schéma vzniku studeného spoje

Obrázek 16 ukazuje situaci, při níž proudy kovu 1 a 2 dotekly do sledovaného místa a začaly se o studenější stěnu formy ochlazovat. To může trvat několik milisekund. Proud 3 je posledním proudem, který dokončí plnění formy. Když se střetne s proudy 1 a 2, mají tyto takové množství tuhé fáze, že není možný mezi nimi a proudem 3 dokonalý svar a vzniká studený spoj. Tento druh vady se na odlitcích objeví většinou po otryskání, kdy dojde k odloupení tenké vrstvičky kovu na povrchu (viz obr. 17).



Obr. 17 Příklad studeného spoje

Dalším způsobem, jak může k této vadě dojít, je příliš velká síla stroje při dotlaku. Jejím vlivem může dojít k malému pootevření nebo místní deformaci. V takovém případě může na poloztuhlý povrch odlitku proniknout další kov a vytvořit novou vrstvičku, jak je vidět na obrázku 18. Je proto nutné sílu dotlaku volit adekvátní k tloušťce stěny odlitku.



Obr. 18 Studený spoj vzniklý deformací formy

4.1.3 Nedolití odlitku

Při zkoušení nové formy se často vyskytují místa, která nejsou v odlitku pravidelně vyplněna. Jsou to obvykle místa, která jsou nejdále od vtokového nařiznutí. Důvodem tohoto nedostatku může být malý průřez nařiznutí, nesprávná poloha nařiznutí vůči odlitku, malý průřez vtokového kanálu, malý vstřikovací tlak a malá rychlost. Rovněž nízká teplota slitiny i formy zaviňují uvedený nedostatek. Tyto nedostatky je nutno odstraňovat již při zkoušení nové formy úpravou nařiznutí, zvětšením průřezu vtokového kanálu, zvětšením vstřikovací síly a rychlosti plnění, překontrolováním teploty formy a slitiny.[10]



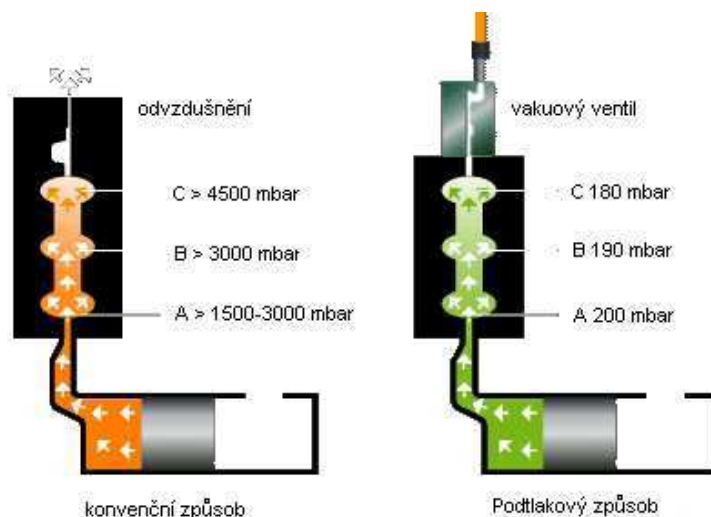
Obr. 19 Nedolitý odlitek

4.1.4 Vzdušná a plynná pomezita (Bubliny)

Pomezita je charakteristická malými dutinami s hladkým povrchem. Vzdušná a plynná pomezita jsou tvořeny hlavně vzduchem z plnicí komory a dutiny formy, ale také z naplyněné slitiny. Při lisování slitiny do formy nestačí všechen vzduch uniknout a zůstává po ztuhnutí v odlitku. Plnění i jednoduché formy tekutým kovem je velmi komplikované, a proto konstrukce každé formy pro nový odlitek vyžaduje své vlastní řešení vtokové soustavy, odvzdušnění, přetoků, chladičho systému a správného zaformování. [11]

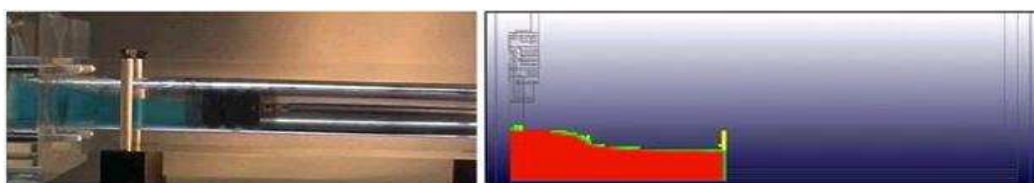
Ke zmenšení nebo odstranění pomezity napomáhá postupné plnění formy, které má být ukončeno v těch místech, kde je možné provést účinné odvzdušnění. Vtokovou soustavu je třeba zaústit tak, aby nedocházelo k uzavření vzduchu tekutým kovem zaplňujícím formu. Pro volbu správného zaústění nařiznutí a správnou polohu umístění přetoků, případně vakuovacích kanálů, je vhodné využít simulační programy. [11]

U odlitků s vysokými požadavky na těsnost je možné volit lití do vakuované formy s použitím vakuovacího ventilu. Obrázek 20 ukazuje rozdíl mezi konvenčním způsobem lití a litím za použití vakua, kdy je vzduch z dutiny formy odsáván.



Obr. 20 Rozdíl v rozložení tlaku při použití vakua [2]

Menší, ale ne nepodstatný vliv na množství plynu v dutině formy, má rovněž chování hladiny kovu v komoře, závislé především na rychlosti pístu. Pokud je rychlost pístu v první fázi moc malá, může dojít k uzavření vzduchu mezi čelem pístu a hladinou kovu.



Obr. 21 uzavřený vzduch vlivem pomalé rychlosti pístu [12]

Příliš velká rychlost pístu v první fázi lisování mívá zase na svědomí vznik tzv. fenoménu víru. Ten vzniká oddělením vršku vlny kovu od horní stěny komory.



Obr. 22 fenomén víru [12]

5 Možnosti simulace plnění pro lití pod tlakem

Numerická simulace skýtá jedinečnou možnost jak pozorovat lití pod vysokým tlakem ve všech jeho fázích. Pro zpracování experimentální části mojí práce byl použit program ProCAST francouzské firmy ESI-Group. Tento program je při zadání vhodných parametrů schopen obsáhnout ve výpočtu všechny aspekty lití pod vysokým tlakem, což jsou:

- Cyklování
- Pohyb pístu v komoře
- Plnění dutiny formy kovem
- Odvzdušnění
- Chladnutí odlitku
- Dotlak

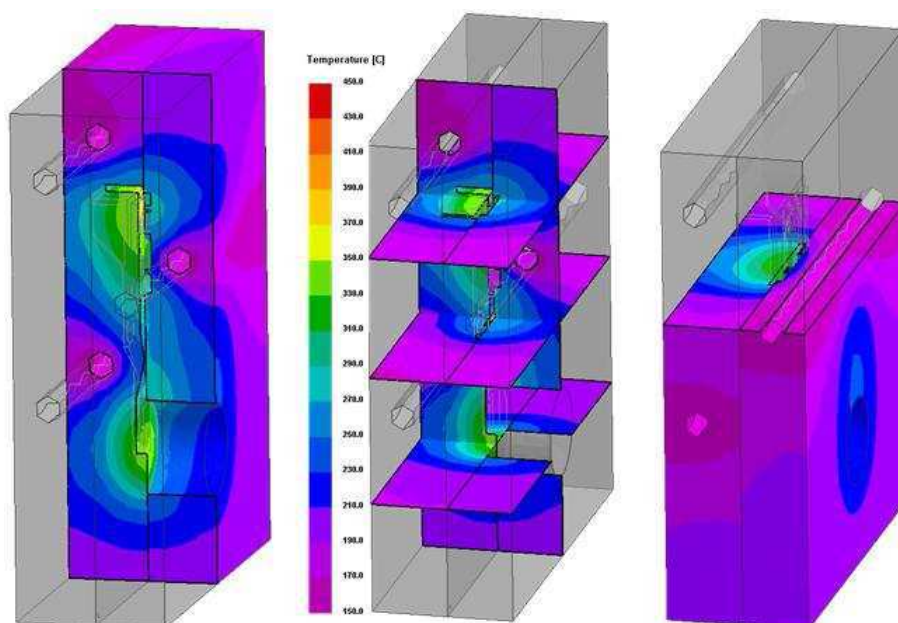
Program je založen na popsání modelu odlitku metodou FEM (metoda konečných prvků – Final Element Method), díky které může být geometrie odlitku s jistými malými zjednodušeními velmi dobře popsána. Metoda rovněž dovoluje lokální zjemnění sítě v kritických místech modelu, jak bylo použito i v našem případě.

5.1 Cyklování

Znalost rozložení teplotních polí v průběhu celého liciho cyklu je velmi důležitá z hlediska tepelného zatížení formy stejně jako při navrhování účinného systému chladících nebo temperančních kanálů. Výstupem z cyklování je také zjištění přesné teploty formy na počátku cyklu pro výpočet plnění formy.

Možnost, která v programu ProCAST umožňuje zahrnout při výpočtu tepelných dějů mezi formou a odlitkem všechny fáze cyklu se nazývá „Die Combo“. Díky ní dochází v průběhu výpočtu k výpočtu přestupu tepla jak mezi formou a odlitkem tak i mezi sprejem dělicího prostředku a formou a rovněž vzduchem ve chvíli kdy je forma při vyhození odlitku otevřena.

Cyklus se nastaví zadáním časů, ve kterých dochází k otevření formy, vyhození odlitku, začátku a konce postřiku a uzavření formy. Příklad rozložení teplotního pole v průběhu cyklování ukazuje obrázek 23.



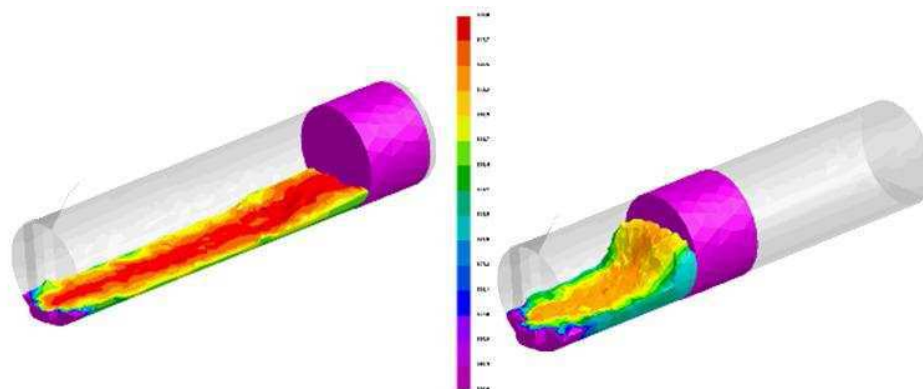
Obr. 23 Cyklování

5.2 Pohyb pístu v komoře

První fáze lisování výrazně ovlivňuje průběh celého procesu vzniku odlitku. Jsme-li schopni modelovat pohyb pístu a chování kovu v komoře můžeme s úspěchem predikovat množství uzavřeného vzduchu v této fázi procesu. Změnou geometrických parametrů nebo procenta zaplnění komory je pak možno zcela eliminovat nepříznivé situace, z nichž jednou je například fenomén víru, popsany v kapitole o plynné porezitě.

Simulaci pohybu pístu můžeme též využít k přesnému určení rychlosti kovu v nařiznutí, která je možná nejdůležitějším parametrem z pohledu konečné podoby tlakového odlitku.

Vlastní rychlost je možné zadat v závislosti na čase nebo na poloze.

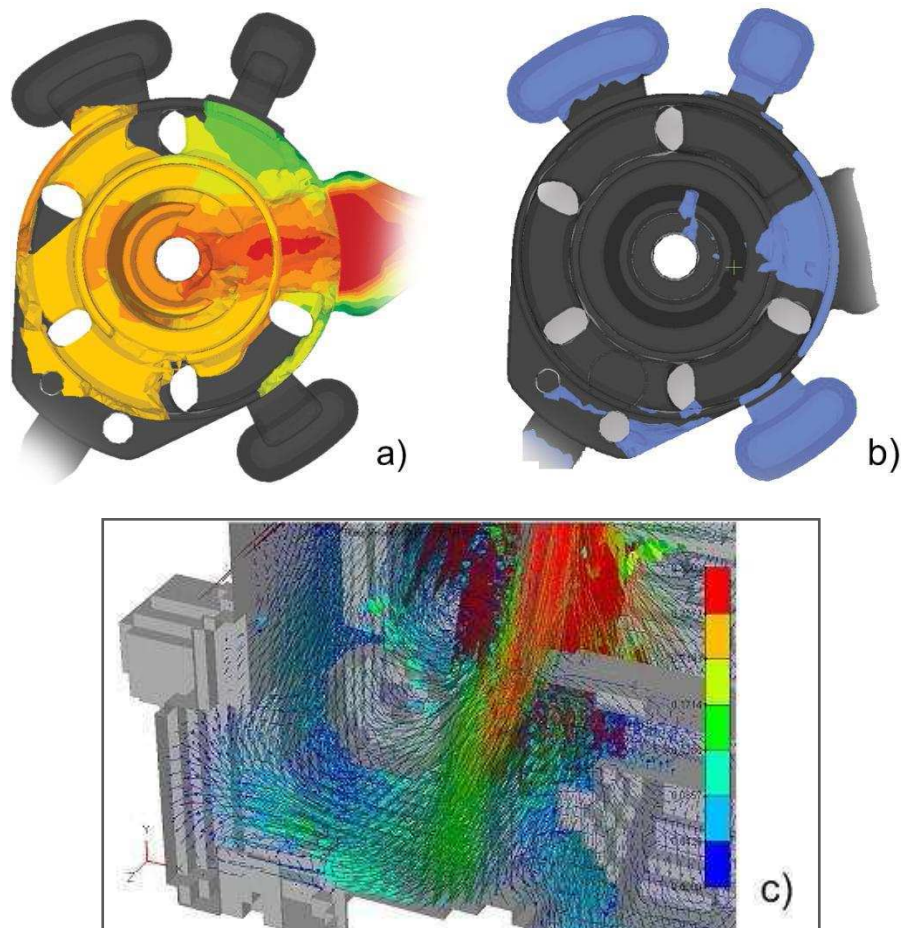


Obr. 24 Průběh první fáze lisování

5.3 Plnění dutiny formy

Jednou z největších výhod simulace je možnost vidět dovnitř dutiny formy v průběhu celého procesu lití. Znalost pohybu kovu ve formě nám pak umožní určit kritická místa konstrukce odlitku, na které bychom byli ve skutečnosti schopni přijít až po odlití odlitku a nalezení vad. V tomto případě se navíc vada může přesunout z místa jejího vzniku a tím toto místo znemožní určit úplně.

Výpočty napomáhají určit správnou pozici vtoku a přetoků, odvzdušnění, navolení správných rychlostí pro zaplňování dutiny formy a ověření správnosti lící teploty kovu. Zobrazení vektorů rychlosti umožňuje sledovat místa, ve kterých dochází ke vzniku nepříznivých turbulencí.

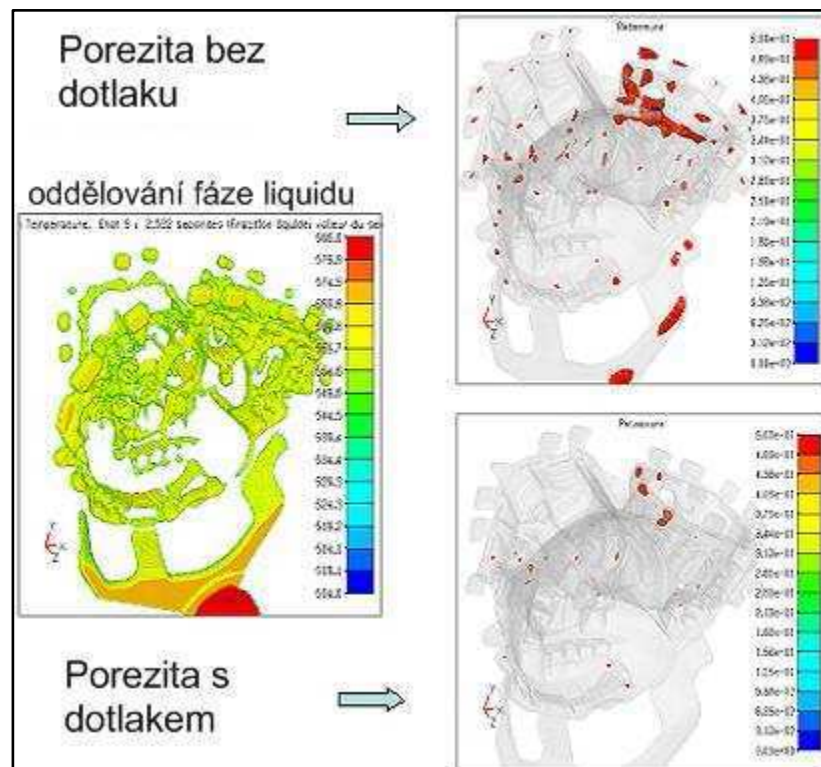


Obr. 25 vizualizace simulace plnění

- a) teplotní pole při plnění
- b) uzavřený vzduch
- c) zobrazení proudu pomocí vektorů

5.4 Dotlak

Třetí fáze lisování, dolisování respektive dotlak, výrazně ovlivňuje množství poretity, vzniklé v odlitku v důsledku smršťování při tuhnutí. V programu ProCAST stačí pro výpočet dotlaku zadat příslušnému parametru číslo uzlového bodu v geometrii tablety. Rozdíl mezi výpočtem se zahrnutým dotlakem a bez něj ukazuje obrázek 26.



Obr. 26 Zobrazení poretity

6 Experimentální část

Experimentální část se skládá z analýzy vzniku vady typu zavalenina na povrchu odlitku držáku kladky V9X stávajícího tvaru (**varianta1**). Pro eliminaci vady bylo navrženo řešení ve formě změny tvaru kritické části odlitku, respektive zvětšení zaoblení pod difuzorem (**varianta2**). Analýza tohoto návrhu bude zpracována rovněž. Jako nástroj analýzy slouží v obou případech simulační software ProCAST.

7 Zkoumané vady odlitku

Vady, které se při odlévání odlitku držáku kladky objevily, byly zavaleniny, nedolití a studené spoje na vnější straně difuzoru. Vada byla především estetického než funkčního rázu, avšak jakákoli vada tohoto rázu způsobuje pokles mechanických vlastností odlitku v místě vady. Vada je zdokumentována na obrázcích 27 a 28.



Obr. 27 Nedolití difuzoru



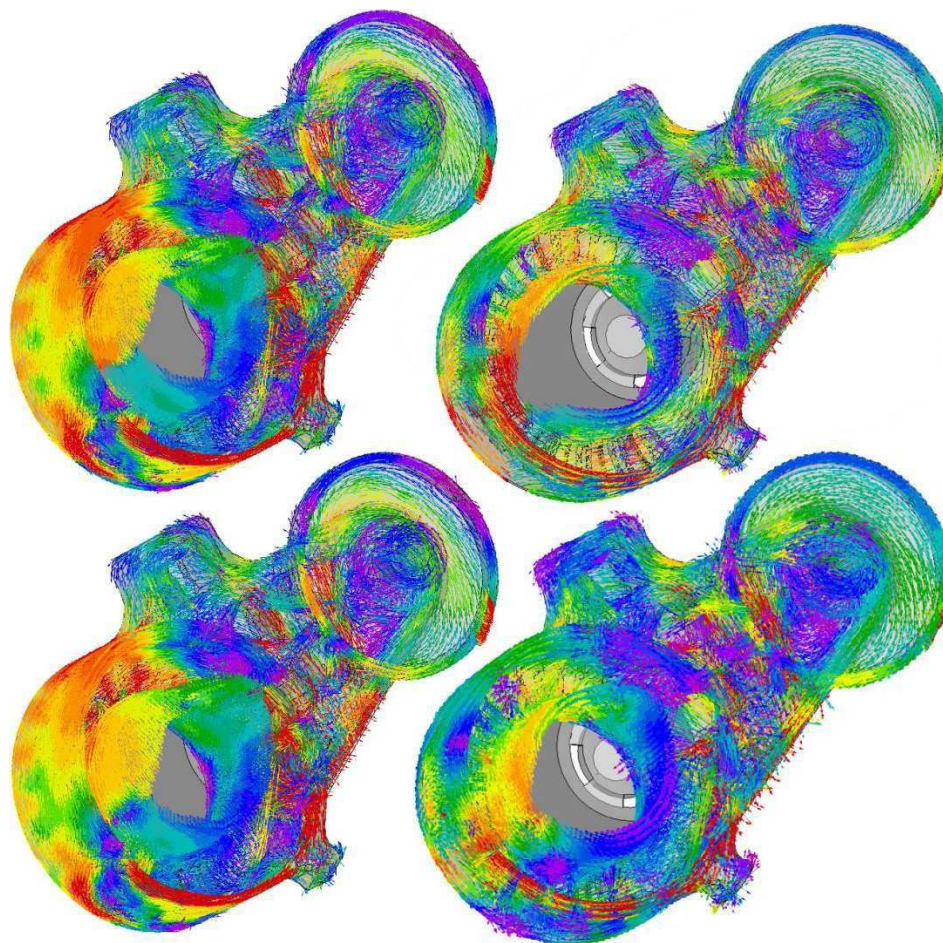
Obr. 28 Zavalenina na vnější stěně difuzoru

13 Závěr

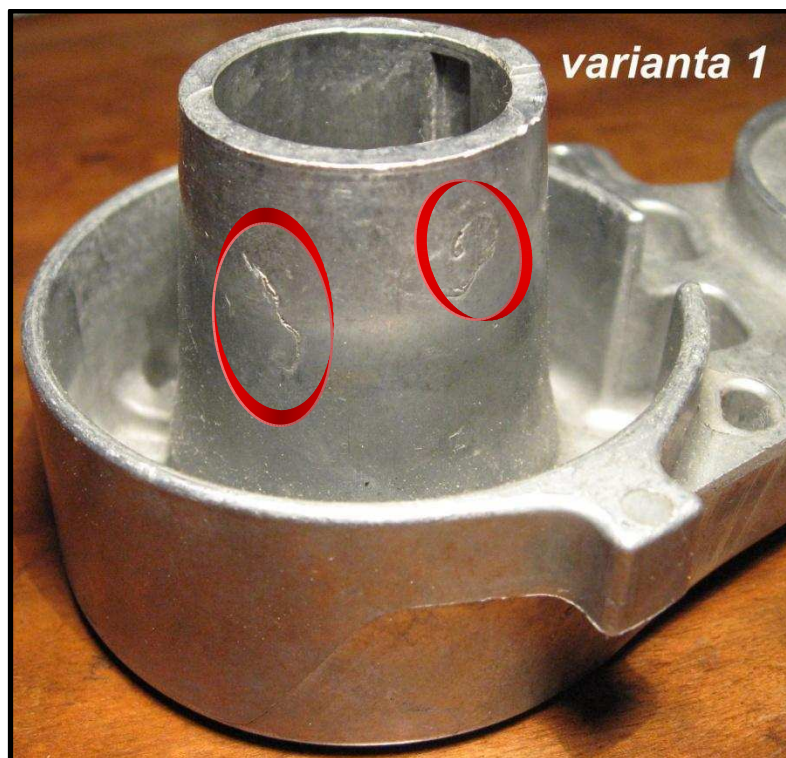
Simulace plnění odlitku s původním tvarem ukázala, že posledním místem plnění dutiny formy je difuzor. Také je vidět (obr. 45), že proud kovu má po obvodu věnce z každé strany jinou teplotu i rychlost. Na odvrácené straně difuzoru se pak potkávají tyto dva proudy a tvoří zavaleninu. V odlitku dochází z důvodu komplikovaného tvaru rovněž k uzavírání velkého množství vzduchu, jak je nejlépe vidět na odlitku označeném číslem 2 (obr. 49)

Příčinou nerovnoměrného proudění kovu po obvodu věnce mohou být radiusy na jeho vnitřní straně. Proto byl při návrhu variantního řešení, za přispění firmou Motor Jikov Tlaková slévárna a.s., zohledněn tento fakt a radiusy byli zvětšeny.

Jak je vidět na obrázku 62, proudy na vnější straně difuzoru se stékají opět s rozdílnými rychlostmi. Díky zvětšení radiusů je však kov při průchodu věncem na obou stranách o něco rychlejší a fronty se stékají od spodu a pozvolněji. Díky tomu nedochází k tak velkému víření při nárazu front kovu a zavalenina se neobjeví, což je patrné z obrázků 63 a 64, který ukazuje odlitou první variantu v porovnání s druhou.



Obr. 62 Rozdíl v rychlostech mezi variantou 1 a 2

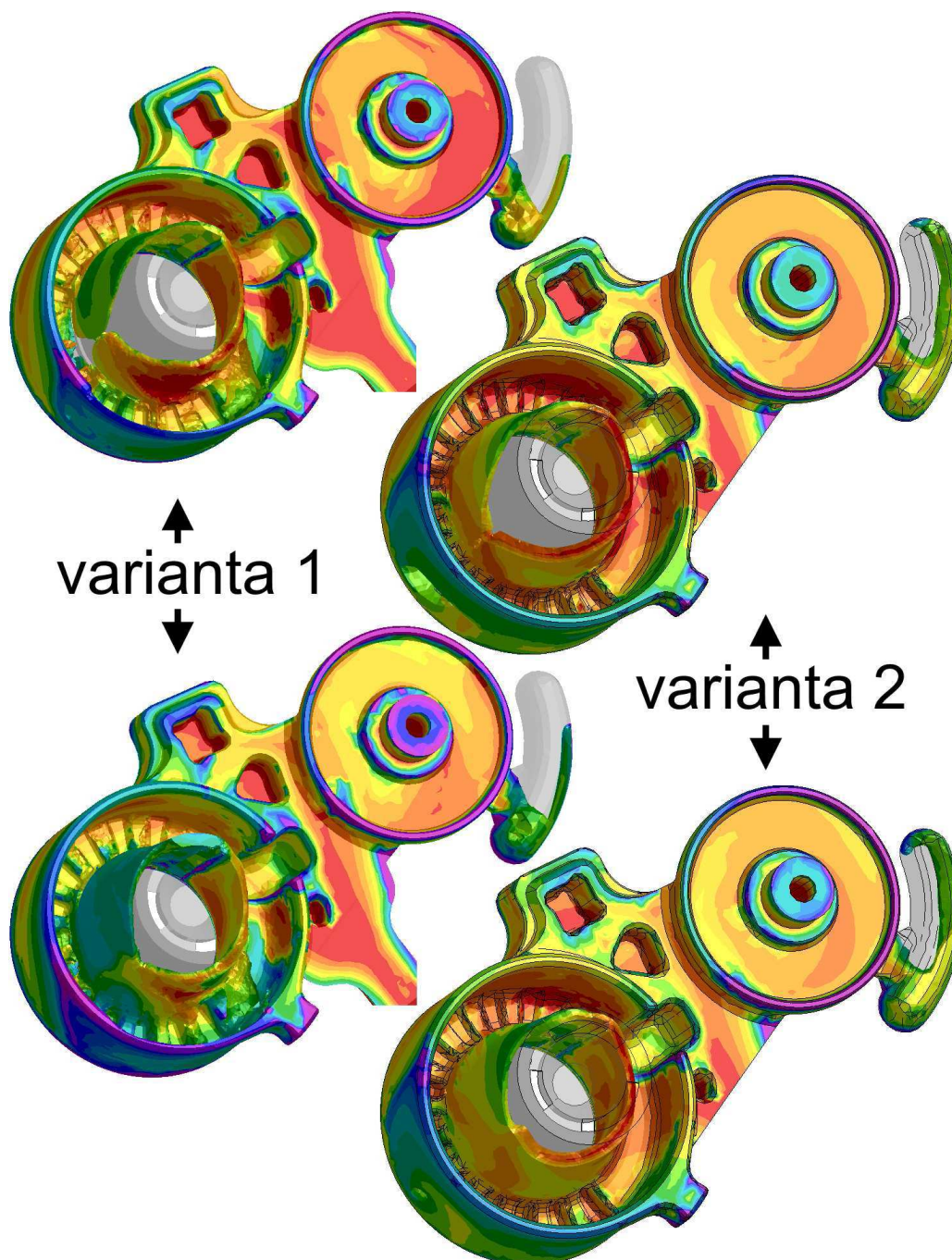


Obr. 63 Odlitek varianta 1 s patrným výskytem zavalenin



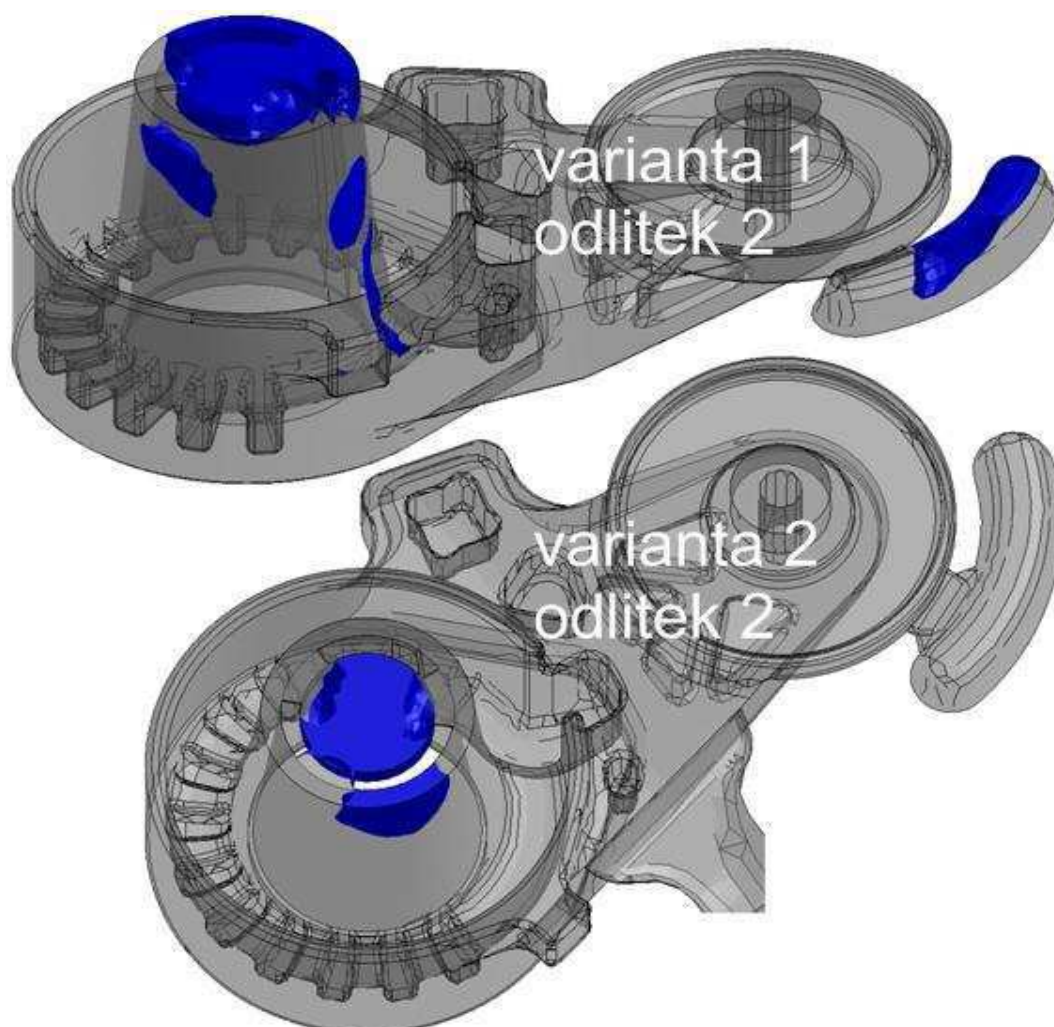
Obr. 64 Odlitek varianta 2 – výskyt vady potlačen

Díky vyšší teplotě lití použité u druhé varianty odlitku a zřejmě také díky menšímu výskytu výrů kovu v tišínách mezi zvětšenými radiusy, není mezi teplotami čel obou střetávajících se proudů takový rozdíl jako u první varianty. Díky tomu může dojít ke spojení obou proudů a rovněž k potlačení vady zavalenina nebo studený spoj. Rozložení teplot u obou variant ukazuje obrázek 65.



Obr. 65 Změna v rozdílu teplot proudů v místě jejich střetu

Uzavřený vzduch viditelný v první variantě u odlitku 2 byl změnou radiusů respektive proudění, vytlačen k ledvině.



Obr. 66 Rozdíl v uzavření vzduchu na konci plnění

Ze závěrů je patrné, že navržená změna nevedla k úplnému odstranění problému se střetávajícími se frontami kovu na vnější stěně difuzoru. Situace se však o poznání zlepšila, což potvrdilo i zkušební odlití odlitku varianta 2.

K úplnému odstranění vady by bylo třeba změny vtokové soustavy a to takové, která by lépe navedla proud kovu do formy. To by však muselo být předmětem dalšího zkoumání. Z hlediska složitosti úpravy formy by se pak jednalo o zákrok dosti komplikovaný a nákladný.

14 Literatura

- [1] KOVAŘÍK, J.: PAM - CAST/Simulor - zkušenosti se simulací slévárenských procesů, Slévárství č.8-9, Brno 1997, str.346-348
- [2] URL: <http://www.mueller-weingarten.de>
- [3] HERMAN, A.: Metody přesného lití II. Dostupné na internetu <http://u12123.fsid.cvut.cz/?udaj=predmet&id=C36010>
- [4] KALPAKIAN, Serope – SCHMID S. R.: Manufacturing engineering and technology 5th edition, Pearson Education, Inc., 2006
- [5] HERMAN, A.: Parametry konstrukce tlakových forem. Dostupné na internetu: http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/konstrukce_forem.pdf
- [6] STUNOVÁ Barbora, Metody přesného lití I. Dostupné na internetu: <http://u12123.fsid.cvut.cz/?udaj=predmet&id=C36010>
- [7] HATTEL, Jesper: Fundamentals of numerical modelling of casting processes, Polyteknisk Forlag, 2005
- [8] FREDERIKSSON Hasse - AKERLIND Ulla: Materials processing during casting, John Wiley & sons, Ltd, 2006
- [9] WALKINGTON, W. G.: Die casting defects, Illinois: North American Die Casting Association, 1997
- [10] KUZMA, Z.: HPDC, [Výzkumná zpráva], Brno 2003
- [11] KRŇÁVEK, V – STŘÍTECKÝ, F.: Konstrukce forem pro odlitky lité pod tlakem a její vliv na výskyt vad. Slévárství 2007 2-3 /, s. 81
- [12] HONG, Jun Ho: Investigation on the flow pattern in the shot sleeve of the cold chamber HPDC process, world foundry congress 06, Casting the future