



Predikce tuhnutí a chladnutí brzdových kotoučů automobilů z litiny s lupínkovým grafitem

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Vítek Žitný**
Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vítek Žitný**
Osobní číslo: **S16000297**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Predikce tuhnutí a chladnutí brzdových kotoučů automobilů z litiny s lupínkovým grafitem**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

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

1. Seznamte se s litinou s lupínkovým grafitem, její výrobou a aplikačními možnostmi.
2. Prostudujte obecné zákonitosti tuhnutí a chladnutí odlitků a zaměřte se na tyto procesy u litiny s lupínkovým grafitem.
3. Seznamte se s programy, popř. metodami, které umožňují predikci tuhnutí a chladnutí odlitků.
4. Proveďte grafický návrh brzdového kotouče.
5. Seznamte se s výpočtovým simulačním programem Magma a na základě tohoto programu se pokuste o simulační výpočet tuhnutí a chladnutí brzdového kotouče z litiny s lupínkovým grafitem.
6. Na základě získaných výsledků formulujte dílčí závěry.


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

- [1] **Roučka, Jaromír.** *Metalurgie litin.* PC-DIR, s.r.o Brno. 1998.
- [2] **Nová, Iva.** *Teorie slévání 1. díl - Teoretické základy technologických procesů.* TU v Liberci 2007, ISBN 80-7372-149-X.
- [3] **Nová, Iva.** *Teorie slévání 2. díl. - Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin.* TU v Liberci 2007, ISBN 978-80-7372-185-5.
- [4] **Vetiška, Aleš a kol.** *Teoretické základy slévárenské technologie.* 1. vyd. SNTL Praha 1974. 04.238.74.
- [5] **Nová, Iva.** *Přenos tepla ve slévárenských formách.* 1. vyd. TU v Liberci 2014. ISBN 978-80-7494-141-2.
- [6] **Podkladové materiály simulačního programu Magma.**
- [7] **Články z odborných časopisů.**

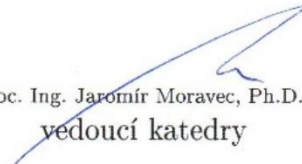
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Iva Nová, CSc.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **31. ledna 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




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

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou základních částí – teoretické a experimentální. V teoretické části jsou shrnuty základní informace o brzdových kotoučích a jejich materiálech. Dále je zde popsána charakteristika a základní rozdělení litin a následné rozdělení grafitických litin. V této části je hlavní pozornost zaměřena na litinu s lupínkovým grafitem a její metalurgii a výrobu, jelikož se jedná o materiál, který se nejvíce používá při výrobě brzdových kotoučů. Experimentální část se zabývá numerickým simulačním výpočtem tuhnutí a chladnutí dvou typů brzdových kotoučů (odvětrávaného a neodvětrávaného) z litiny s lupínkovým grafitem a posouzení výsledků dosažených simulačním výpočtem.

Klíčová slova: litina s lupínkovým grafitem, tuhnutí, chladnutí, brzdový kotouč, numerický simulační výpočet, vtoková soustava

Abstract

This Diploma Thesis is divided into two basic parts - the theoretical part and the experimental one. Basic information about brake discs and their materials is summarized in the theoretical part. Further, characteristics and basic division of cast iron and subsequent division of graphical cast iron are described here. The main attention is focused on gray cast iron, its metallurgy and production in this part since it deals with the material, which is mostly used in brake disc production. The experimental part is concerned with the numerical simulation calculation of solidification and cooling of two types of brake discs / ventilated and unventilated/ made of gray cast iron and recognition of the results reached by the simulation calculation.

Key words: gray cast iron, solidification, cooling, brake disc, numerical simulation calculation, gate system

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Ivě Nové, CSc. z katedry strojírenské technologie TU Liberec za trpělivost a připomínky, které mi velmi pomohly k napsání této bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D. za veškeré rady, které mi poskytl při numerickém simulačním výpočtu.

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

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	10
2.1	Charakteristika brzdových kotoučů.....	10
2.2	Charakteristika a rozdělení litin	12
2.3	Charakteristika grafitických litin.....	13
2.4	Litina s lupínkovým grafitem.....	18
2.4.1	Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem	21
2.4.2	Vliv prvků na strukturu litiny s lupínkovým grafitem.....	23
2.4.3	Hodnotící kritéria litin	24
2.4.4	Očkování litiny s lupínkovým grafitem.....	25
2.4.5	Tavení litiny s lupínkovým grafitem	27
2.5	Výroba litinových brzdových kotoučů	33
2.6	Tepelné děje v pískových slévárenských formách.....	35
2.6.1	Sdílení tepla v pískové slévárenské formě	35
2.7	Výpočtové simulační programy tuhnutí a chladnutí odlitku.....	38
2.7.1	Modely tepelných procesů.....	40
2.7.2	Metody řešení tepelných úloh	41
2.7.3	Magma.....	43
2.8	Vtoková soustava pískových forem	46
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	50
3.1	Příprava technické dokumentace.....	50
3.1.1	Návrh a výpočet vtokové soustavy pískové slévárenské formy.....	51
3.1.1.1	Výpočet hlavních rozměrů vtokové soustavy	53
3.2	Simulační výpočet tuhnutí a chladnutí odlitků brzdových kotoučů.....	54
3.2.1	Vyhodnocení numerických výpočtů plnění slévárenské formy taveninou při výrobě neodvětrávaných a odvětrávaných brzdových kotoučů.....	58
4	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	80
5	ZÁVĚR	88
6	POUŽITÁ LITERATURA	91
7	SEZNAM PŘÍLOH	92

Seznam použitých zkratek a symbolů

C	uhlík
Si	křemík
Mn	mangan
Ti	titan
Mo	molybden
Cr	chrom
Ni	nikl
S	síra
P	fosfor
Al	hliník
Cu	měď
Co	kobalt
Zr	zirkon
Nb	niob
W	wolfram
V	vanad
Te	telirium
Mg	hořčík
Ce	cer
B	bór
LLG, GJL	litina s lupínkovým grafitem
LKG, GJS	litina s kuličkovým grafitem
LČG, GJV	litina s červíčkovým grafitem
ČSN	česká technická norma
C _E	uhlíkový ekvivalent
S _C	stupeň eutektičnosti
K	grafitizační koeficient
R _m	mez pevnosti v tahu
E	Youngův modul pružnosti
CaC ₂	náhrada koksu
CaCO ₃	vápenec
CaCO ₃ ·MgCO ₃	dolomit
CaF ₂	kazivec

q_K	intenzita tepelného toku
λ_K	součinitel vedení tepla
α_P	součinitel přestupu tepla konvekcí
T_{PL}	teplota plynu
T_{SF}	teplota stěny formy
E	součinitel poměrné sálavosti
C_0	součinitel sálavosti dokonale černého tělesa
MKP, FEM	metoda konečných prvků
MKD, FDM	metoda konečných diferencí
MOP	metoda okrajových prvků
CAD	počítačem podporované navrhování
$t_{lití}$	doba lití
a	součinitel závisející na tloušťce stěny odlitku a na druhu odlévaného materiálu
m_o	hmotnost odlitku
H	celková výška vtokové soustavy (včetně licí jamky, licího kúlu a struskováku)
C	výšku odlitku
P	vzdálenost zářezů od horní části dutiny formy
H_u	účinná výška vtokové soustavy
ΣS_Z	součet průřezů zářezů
μ	součinitel hydraulických ztrát
ρ	hustotu odlévané taveniny
t	čas plnění dutiny formy taveninou
S_S	průřez struskováku
S_Z	průřez licího kúlu
n	počet zářezů
d_K	průměr kúlu
V_{jamky}	objem licí jamky
$m_{O\ sur}$	hmotnost surového odlitku
ϑ	součinitel závislý na velikosti odlitku

1 ÚVOD

V současné době je velký rozvoj automobilového průmyslu, kde se uplatňují odlitky jak z neželezných kovů, které se vyznačují nízkou hustotou, tak odlitky ze slitin železa. Mezi tyto slitiny se řadí litiny s lupínkovým grafitem. Vyznačují se velmi dobrou odolností při namáhání v tlaku, útlumovými a dobrými kluznými vlastnostmi. V konstrukci automobilů mají uplatnění při výrobě vložek a pístních kroužků spalovacích motorů, dále při výrobě brzdových bubnů a brzdových kotoučů. Na litinové odlitky brzdových kotoučů jsou kladeny velmi vysoké nároky, sledují se mechanické vlastnosti, chemická čistota a odolnost proti korozi. U brzdových kotoučů je velmi významná struktura, neboť brzdové kotouče tvoří brzdovou soustavu automobilů, která je velmi důležitá z hlediska bezpečnosti silničního provozu. Při brzdění dochází k abrazivnímu tření mezi brzdovou plochou kotouče a brzdnými destičkami, tření způsobuje značné zahřívání brzdového kotouče. Proto je od materiálu brzdového kotouče vyžadována vyhovující tepelná vodivost, nízký součinitel teplotní roztažnosti a vysoká teplota tavení. Z dalších vlastností je to odolnost proti opotřebení a korozi.

S rostoucí výrobou automobilů a požadavky na jejich bezpečnost jsou také kladeny velké požadavky na kvalitu a celkovou výrobu brzdových kotoučů, které jsou jedním z důležitých prvků bezpečného ovládání automobilu.

Na našem pracovišti – Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci se pracovníci této katedry zabývají problematikou výroby automobilových dílů, např. výrobou brzdových bubnů, brzdových kotoučů a dalších litinových dílů pro automobilový průmysl. V současné době mají pro účely výzkumu k dispozici slévárenský simulační program MAGMA 5, jehož simulační výsledky umožňují predikovat a zpřesňovat technologické postupy výroby odlitků. Také touto problematikou se zabývá má diplomová práce, která je zaměřená na simulační výpočet dvou typů brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem a řeší téma: ***„Predikce tuhnutí a chladnutí brzdových kotoučů automobilů z litiny s lupínkovým grafitem“***.

2 TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

2.1 Charakteristika brzdových kotoučů

Brzdové kotouče jsou důležitými prvky brzdového systému automobilů. Brzdový systém je jedním z nejdůležitějších bezpečnostních komplexů na automobilu. Proto je na brzdový kotouč kladeno velmi mnoho požadavků. Mezi tyto požadavky patří materiál brzdových kotoučů, konstrukce, odolnost proti tepelnému a mechanickému namáhání a stálost tvaru. V současné době materiály pro výrobu kotoučů jsou zejména litina s lupínkovým grafitem, dále hliníkový kompozit s kovovou maticí (Al – MMC) a speciální keramika. Nejstarším a nejrozšířenějším materiálem je litina s lupínkovým grafitem. Používá se pro většinu automobilů s ohledem na doporučení asociace SAE (Society of Automotive Engineers), která definovala dle směrnice SAE J 341 materiál pro výrobu brzdových kotoučů. Jedná se o legovanou litinu s lupínkovým grafitem s obsahem 3,4 % uhlíku. Legury zlepšují materiálové vlastnosti této litiny. K legování se používá molybden, měď, chrom nebo titan. Měď v litině zvyšuje její odolnost proti korozi. Litina s lupínkovým grafitem splňuje výše zmíněné požadavky a řadí se tak k nejrozšířenějšímu používanému materiálu pro výrobu brzdových kotoučů běžných automobilů. V tabulce 2-1 je uvedeno chemické složení legovaných brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem. V tabulce 2-2 jsou uvedeny hodnoty vybraných fyzikálních vlastností pro teplotu 20 °C. Je však nutno připomenout, že při brždění může teplota kotouče stoupnout až na hodnotu cca 500 °C. Tím se změní hodnoty uvedené v tabulce 2-2. Z fyzikálního hlediska jsou tyto hodnoty závislé na teplotě. Tabelárně nejsou nikde uváděny, je třeba je stanovit fyzikálním měřením. Litina s lupínkovým grafitem se vyznačuje velmi homogenní strukturou a nižším teplotním napětím, [1], [2].

Tabulka 2-1 Chemické složení legovaných brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem, [2]

<i>Chemické složení litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu brzdových kotoučů</i> [hmot. %]								
C	Si	Mn	Ti	Mo	Cr	Ni	S	P
3,4	1,50	0,60	0,15	0,13	0,09	0,084	0,075	0,015

Tabulka 2-2 Hodnoty vybraných vlastností litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu brzdových kotoučů, [2]

<i>Vybrané fyzikální vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem pro výrobu brzdových kotoučů</i>	
Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7 250
Měrná tepelná kapacita c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	540
Součinitel teplotní roztažnosti α [K^{-1}]	$13\cdot 10^{-6}$
Youngův modul pružnosti E [MPa]	130 000
Poissonovo číslo μ [1]	0,211
Pevnost na mezi kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	195
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	268
Teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$]	1 147

Dále se pro výrobu brzdových kotoučů používá hliníkový kompozit s kovovou maticí (Al – MMC), který se používá pro výrobu brzdových kotoučů vlaků, nákladních automobilů a motocyklů, [3].

Brzdové kotouče z keramiky se používají nejčastěji u závodních vozů. Tyto kotouče vykazují vyšší životnost a vyšší brzdný výkon. Keramické kotouče jsou vyrobeny z tzv. kompozitu, který tvoří uhlíková vlákna zpevnovaná keramickou maticí. V keramické matici má největší podíl karbid křemíku, který vykazuje vysokou odolností proti otěru. Životnost keramických brzdových kotoučů odpovídá najetí až 300 000 km a úbytek tloušťky keramického brzdového kotouče činí během celé jeho životnosti jen asi 0,5 mm. Keramické brzdy jsou také naprosto odolné vůči korozi, [3].

V tabulce 2-3 je uveden přehled základních vlastností materiálů brzdových kotoučů.

Tabulka 2-3 Základní vlastnosti brzdových kotoučů, [2]

Základní vlastnosti materiálů pro výrobu brzdových kotoučů			
Materiál kotouče	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]
Litina s lupínkovým grafitem (3,4 hmot. %)	7 200	52	$10\cdot 10^{-6}$ až $13\cdot 10^{-6}$
Hliníkový kompozit s kovovou maticí (Al – MMC)	2 700	180	$18\cdot 10^{-6}$ až $25\cdot 10^{-6}$
Kompozit s uhlíkovými vlákny	1 700	300	$0,1\cdot 10^{-6}$ až $1,5\cdot 10^{-6}$

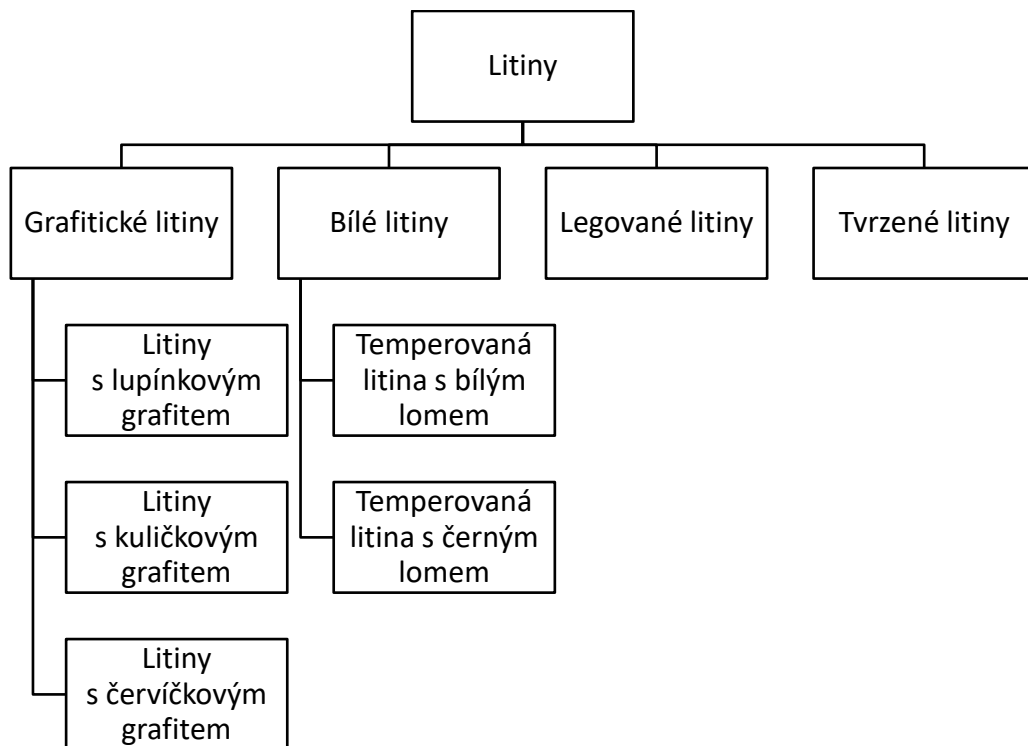
2.2 Charakteristika a rozdělení litin

Litina je slitina železa, uhlíku a dalších prvků (Si, S, Mn, P) s obsahem uhlíku vyšším, než je 2,14 hm. % C. Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. Litiny obsahují mimo jiné vyšší množství uhlíku a dalších přísadových směsí, například křemík, mangan, síru a fosfor, na rozdíl od ocelí. Mezi nejdůležitější přísadu patří křemík.

Existují dvě formy uhlíku, tudíž i dva systémy Fe-C (stabilní a metastabilní), v průběhu tuhnutí se u bílých litin projevuje vznik cementitického eutektika (ledeburit), u grafitických litin závisí na složení taveniny a podmínkách ochlazování. Podmínky ovlivňující strukturu litin jsou [3]:

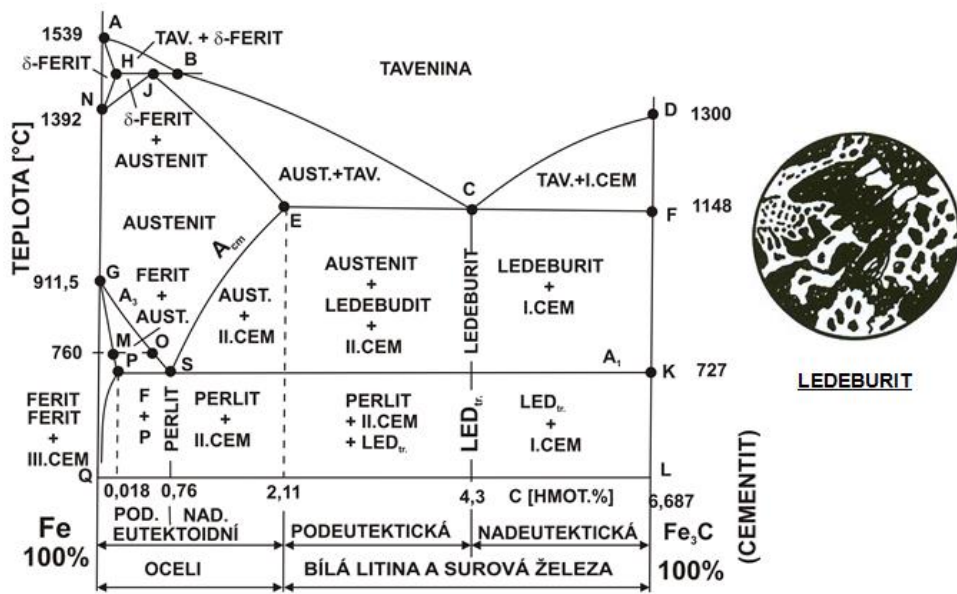
- Chemické složení taveniny – C, dále Si, Mn, P, S a obsah dalších prvků;
- Rychlost tuhnutí a chladnutí – tloušťka stěny odlitku, typ formy a jader;
- Zárodečný stav taveniny – vliv očkování, modifikace, teploty a doby přehřátí taveniny;
- Způsob tepelného zpracování – bainitické kalení, temperování atd.

Na obr. 2-1 je uvedeno schéma rozdělení dvou základních druhů litin.

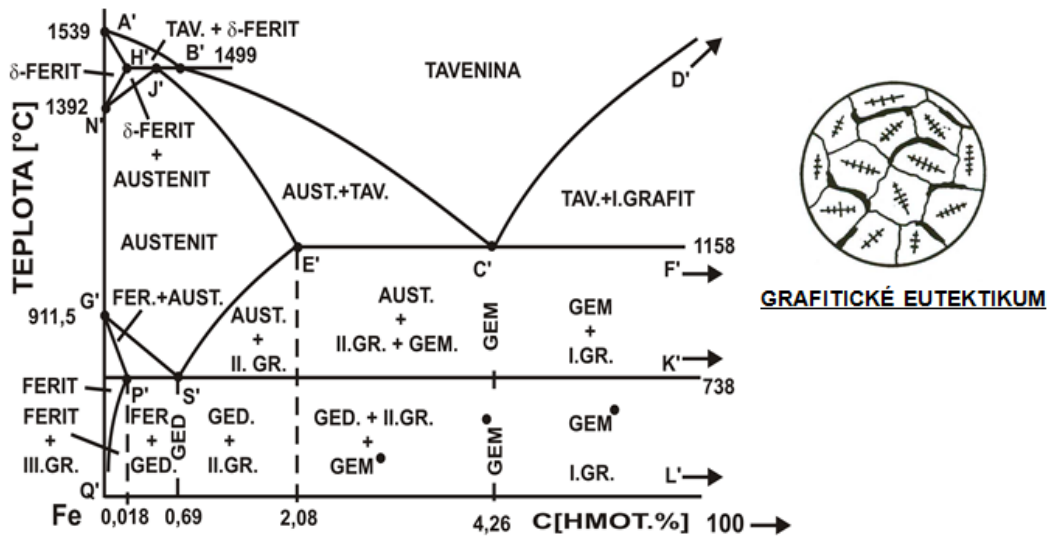


Obr. 2-1 Základní rozdělení slitin

Na obr. 2-2 a 2-3 jsou uvedeny diagramy obou typů soustav.



Obr. 2-2 Rovnovážný binární diagram Fe-C metastabilní, [4]



Obr. 2-3 Rovnovážný binární diagram Fe-C stabilní, [4]

2.3 Charakteristika grafitických litin

Vlastnosti grafitických litin závisí na vlastnostech základní kovové hmoty (matrice) a typu tvaru, velikosti a rozložení grafitu. Struktura matrice grafitických litin po odlití bývá obvykle tvořena perlitem, feritem nebo jejich směsí (popř. eutektickým cementitem, fosfidickým eutektikem, výjimečně bainitem nebo martenzitem). Perlit je nejčastěji lamelární a s jeho rostoucím podílem se zvyšuje pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a klesá tažnost a houževnatost. Při vzrůstajícím množství feritu

v matrici se snižují pevnostní vlastnosti, zvyšuje se tažnost a houževnatost. Cementit v grafitických litinách zvyšuje jejich tvrdost a křehkost a zhoršuje obrobitelnost, jeho přítomnost v litinách je tudíž nežádoucí, [3].

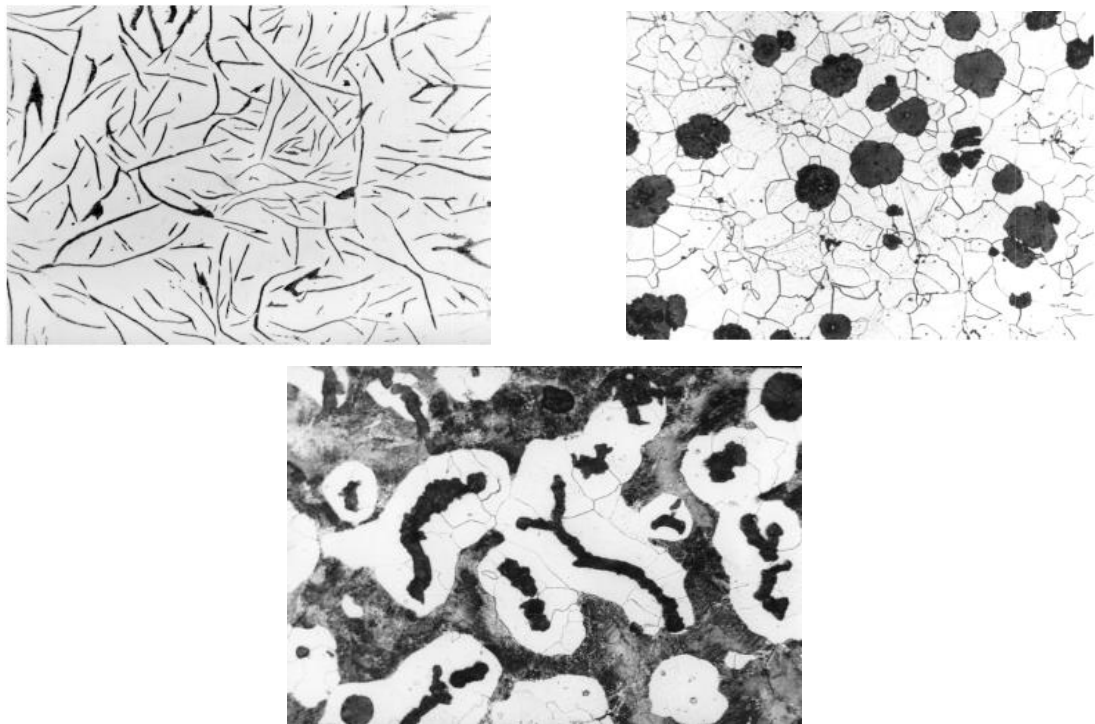
Podle tvaru vyloučeného grafitu rozdělujeme tyto litiny na tři velké skupiny:

Litina s lupínkovým grafitem (LLG) – dle ČSN EN 1561 se označuje GJL – obsahuje grafit ve tvaru prostorových útvarů, které na metalografickém výbrusu mají tvar lupínků. Délka lupínků je podstatně větší než jejich tloušťka, konec lupínků je ostrý. Litina s lupínkovým grafitem je nejobvyklejším typem vyráběných litin, [5].

Litina s kuličkovým grafitem (LKG) – dle ČSN EN 1563 se označuje GJS (častěji nazývaná jako litina tvárná) - obsahuje grafit ve formě kuliček. Z hlediska vlastností litiny je ideálním tvarem dokonalá kulička, často se však vyskytuje grafit „nedokonale zrnitý“, [5].

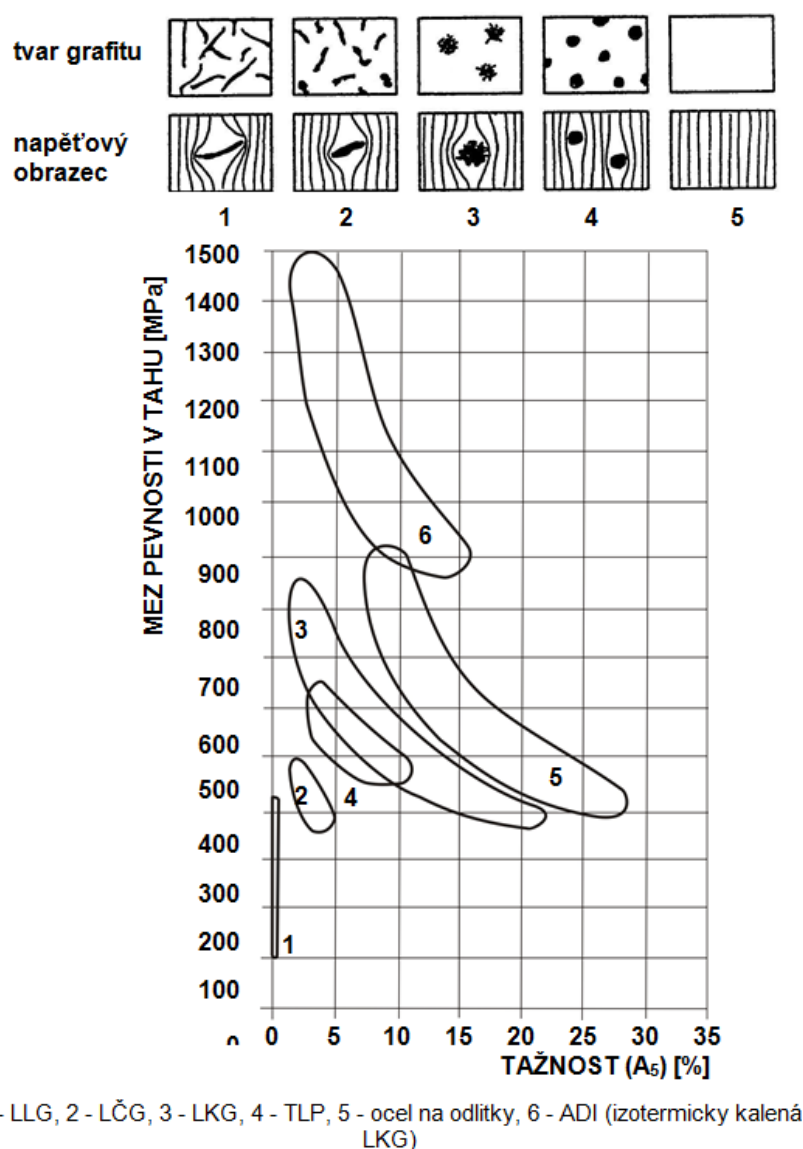
Litina s červíčkovým grafitem (LČG) – dle ČSN EN se označuje GJV (nebo také litina s červíkovitým grafitem). Vermikulární grafit má podobný tvar jako grafit lupínkový. Ve srovnání s LLG jsou však útvary grafitu kratší, tlustší a jejich konec bývá zaoblený. Vermikulární litina obvykle obsahuje též určité množství lupínkového nebo kuličkového grafitu, [5].

Na obr 2-4 je rozdělení vyloučeného grafitu podle tvaru.



Obr. 2-4 Tvar vyloučeného grafitu podle tvaru jeho tvaru, 1 – GJL, 2 – GJS, 3 – GJV, [5]

Na obr. 2-5 jsou uvedeny pevnostní vlastnosti vybraných typů litin.



Obr. 2-5 Závislost pevnosti a tažnosti u grafitických litin, [4]

Grafit – z velké části ovlivňuje vlastnosti litiny, neboť jeho částice zmenšují aktivní průřez kovové hmoty litiny, avšak lupínkový grafit způsobuje útlumové vlastnosti litiny. Grafit je elementární uhlík, který krystalizuje v hexagonální soustavě. Vzniká při eutektické přeměně litiny podle stabilního diagramu Fe-C a zůstává ve struktuře litiny, není zde rozhodující, zda probíhala další přeměna podle stabilního, nebo metastabilního diagramu Fe-C. Grafit má při komparaci s kovovou maticí litiny téměř zanedbatelnou pevnost, [3], [4].

Důležitý je tvar (morfologie) grafitu. Za běžných podmínek krystalizuje grafit ve formě lupínků. Přidání určitého množství tzv. modifikátoru do taveniny způsobí eliminaci např. kuličkového nebo červíčkového grafitu. Dalším podstatným hlediskem

je velikost a rozložení grafitu. Pokud požadujeme grafit drobnějšího vzhledu s pravidelným vyloučením, přidáváme před odléváním do taveniny tzv. očkovadlo (uhlík, fosfor, měď atd.), [3].

Tvar grafitu se hodnotí podle normy ČSN EN ISO 945, která zařazuje grafit do šesti tříd:

1. lupínkový grafit,
2. pavoučkový grafit,
3. červíkovitý grafit,
4. vločkový grafit,
5. nedokonale zrnitý grafit,
6. pravidelně zrnitý.

Z nichž 2. a 5. tvar jsou nežádoucí, [5].

Rozložení grafitu se hodnotí podle normy ČSN 420461 podle etalonových řad do pěti tříd a označují se:

- A – rovnoměrné rozložení,
- B – růžicovité,
- C – smíšené,
- D – mezidendritické neusměrněné,
- E – mezidendritické usměrněné.

Toto rozdělení se používá převážně u litiny s lupínkovým grafitem. Ideální rozložení grafitu z hlediska vlastností litin je rovnoměrné rozložení. Pokud se vyskytne hrubý grafitový útvar a nepravidelné rozložení grafitu dojde ke zhoršení mechanických vlastností. Typy grafitu mezidendritický neusměrněný a mezidendritický usměrněný se nazývají přechlazeným grafitem, vznikají při nedostatku krystalizačních zárodků a při rychlém ochlazení a jsou přechodem od stabilního k metastabilnímu tuhnutí, [5].

Na obr. 2-6 je rozdělení litin podle tvaru a rozložení grafitu.



Obr. 2-6 Rozdělení litin podle tvaru a rozložení grafitu, [6]

U všech grafitických litin je cílem z hlediska velikosti grafitu dosáhnout jemnozrnného grafitu ve formě drobných lupínků nebo kuliček. Především výskyt hrubých lamel grafitu podstatně snižuje mechanické vlastnosti litin. Velikost grafitu se také hodnotí podle etalonových řad, [5].

Základní kovová hmota – může být podle způsobu transformace austenitu vzniklého při eutektické krystalizaci litiny feritická, feriticko-perlitická a perlitická. Zároveň se mohou ve struktuře litiny objevovat i další, výše uvedené strukturní součásti, [3].

Struktura základní kovové hmoty závisí na:

- chemickém složení litiny;
- rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí;
- stavu krystalizačních zárodků;
- tepelném zpracování.

Ferit – ve struktuře litin snižuje pevnost v tahu, tvrdost a odolnost proti opotřebení, avšak zvyšuje tvárné vlastnosti a vrubovou houževnatost litin. Ferit je u litin definován jako tuhý roztok uhlíku a křemíku v Fe_{α} , [3].

Legury a doprovodné prvky podstatně ovlivňují vlastnosti feritu. S rostoucím obsahem křemíku dochází ke snížení houževnatosti feritu, [5].

Perlit – má dvě morfologické formy – lamelární a globulární. Lamelární perlit je tvořen lamelami feritu a cementitu, které rostou rovnoběžně vedle sebe. Z jednoho zrna austenitu obvykle vzniká několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel. Globulární perlit vzniká sbalením lamel cementitu při sferoidizačním žhání. Tyto litiny mají lepší obrobiteľnosť než litiny s lamelárným perlitom, [5].

Perlit se v litinách objevuje v lamelárném stavu. Čím je větší množství perlitu v matici, tím se zvyšují mechanické vlastnosti litiny (pevnost v tahu, tvrdost) a odolnost vůči opotřebení, tvárnost litiny má však klesající tendenci, [3].

Steadit – ternární fosfidické eutektikum, je směs ($Fe - Fe_3C - Fe_3P$). Ve struktuře litiny se objevuje ve formě „pavučinek“. Toto nepříjemné eutektikum se vyskytuje při vyšším obsahu fosforu, tj. od 0,3 %. Má nízkou teplotu tání (950 °C), celkově je velmi tvrdou a nepříznivou strukturní složkou litiny, [3].

2.4 Litina s lupínkovým grafitem

Jak bylo již výše uvedeno, litina s lupínkovým grafitem je základním materiálem pro výrobu brzdových kotoučů. Tato litina byla dříve označována jako šedá litina. Pro konstrukční účely se používá podeutektického složení. Dříve používaná norma ČSN označovala tuto litinu ČSN 42 24XX, kde poslední dvojčíslí udává minimální pevnost v tahu v $kp \cdot mm^{-2}$, dnes je jednotkou pevnosti Pa nebo MPa. Pak přepočítání na MPa je $kp \cdot mm^{-2} \cdot 9,81$. V současné době se označování jednotlivých typů grafitických litin provádí dle norem Evropské unie. Způsob značení se řídí normou ČSN EN 1560. Chemické složení této litiny bývá 2,8 až 3,6 % C, 1,4 až 2,8 % Si, 0,5 až 1,0 % Mn, 0,2 až 0,6 % P a maximálně 15 % S, [3].

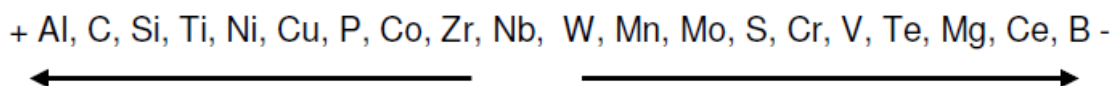
Chemické složení má na krystalizaci litiny velký vliv. Měníme-li složení litiny, můžeme za jinak stejných podmínek dosáhnout toho, že odlitky budou mít různou strukturu a jiné mechanicko-fyzikální vlastnosti, [3].

Většina prvků přítomných v litině s lupínkovým grafitem může být klasifikována podle jejich vlivu na mikrostrukturu. Tyto zahrnují:

1. Primární prvky (C, S, Mn, P, Si);
2. Legující prvky (Cu, Ni, Mo);
3. Prvky zbytkové a pro určité účely, se speciálním záměrem (As, Bi, Pb, Sb atd.);
4. Perlito- a karbidotvorné prvky (As, B, Cr, Sn, V);
5. Plyny (H, N, O).

Výsledná struktura základní kovové hmoty litiny je během ochlazování při průchodu kritickou teplotní oblastí ovlivněna způsobem transformace austenitu. V závislosti na druhu litiny může mít buď zcela feritickou strukturu, směs feritu a perlitu nebo zcela perlitickou strukturu. Ostatní struktury, například martenzitickou, austenitickou a další, lze získat tepelným zpracováním. Požadované struktury v litém stavu lze docílit řízenou transformací austenitu, a to především volbou chemického složení, [3].

Na krystalizaci a změnu struktury má rozhodující vliv chemické složení litiny, které se pohybuje ve velmi širokém rozmezí a řídí se účelem použití. Pokud se mění složení litiny, je možno za jinak stejných podmínek získat různou strukturu odlitku. Vliv jednotlivých prvků na grafitizaci vyjadřuje následující řada, [3], viz obr. 2-7.



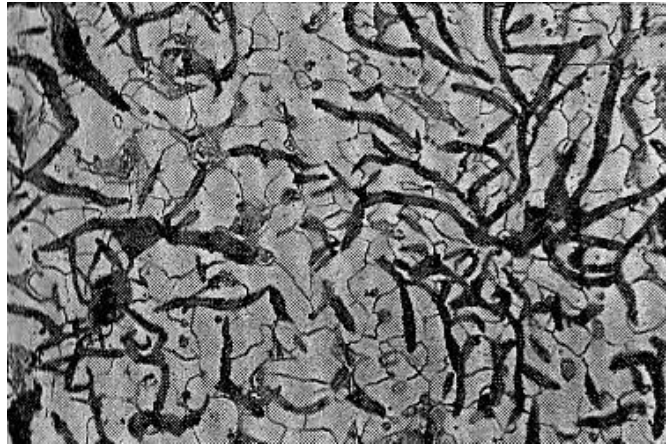
Obr. 2-7 Řada podporujících a brzdících prvků, [7]

Na kvalitu a vlastnosti litiny má vliv, kromě základní kovové hmoty, také grafit. Lupínkový grafit vytváří v základní kovové hmotě litiny vrubové účinky (vruby) přispívající k poklesu pevnostních hodnot matrice litiny, zároveň je materiálově rozdílný od strukturních součástí základní kovové hmoty. To zapříčiňuje, že se struktura litiny posuzuje dvojím způsobem, z hlediska *základní kovové hmoty a tvaru, velikosti a rozložení grafitu*.

Struktura základní hmoty tepelně nezpracované litiny s lupínkovým grafitem existuje ve formách:

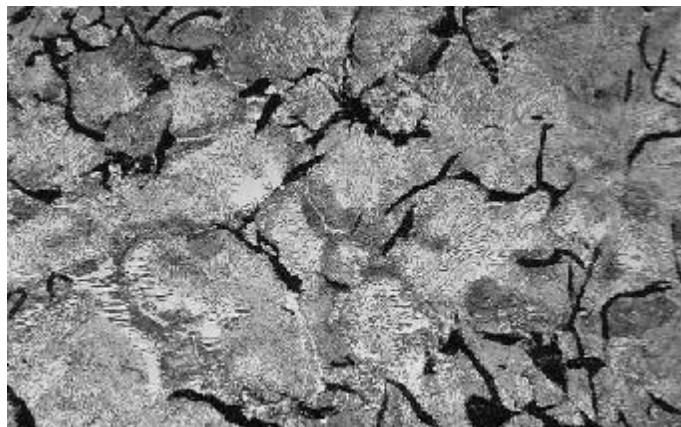
feritická – pokud je chladnutí pomalé, anebo je obsah grafitizačních přísad dostatečně vysoký. Litiny tohoto druhu jsou velmi měkké a málo pevné, nevyužívají se jakožto konstrukční materiály. Veškerý uhlík je vyloučen jako grafit, jeho tvar je velmi

hrubý a počet lupínků velký, [3]. Na obr. 2-8 je struktura feritické litiny s lupínkovým grafitem.



Obr. 2-8 Struktura feritické litiny s lupínkovým grafitem, [7]

perlitická – struktura, kde je obsah grafitizačních přísad v dokonalém souladu s rychlostí chladnutí. Jedná se o velmi hodnotný konstrukční materiál a většina odlitku se vyrábí z perlitické litiny s lupínkovým grafitem. Při snížení množství grafitizačních přísad a obsahu uhlíku se zvyšuje pevnost litiny, protože klesá hrubost a množství grafitu, případně se zjemňuje perlit. Při nízkém obsahu grafitizačních přísad se může stát, že grafitizace zcela neproběhne, ve struktuře se vyskytne volný cementit a litina je tvrdá a špatně obrobitelná, to samé při zvýšené rychlosti ochlazování. Zároveň mechanické vlastnosti této litiny klesají, [3]. Na obr. 2-9 je perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem.



Obr. 2-9 Struktura perlitické litiny s lupínkovým grafitem, [7]

feriticko-perlitická – pokud jsou pro danou rychlost chladnutí odlitku grafitizační prvky v přebytku, vytvoří se v této struktuře litina s lupínkovým grafitem, ve které jsou grafitové lupínky převážně uloženy ve feritu, a zbývající obsah je vyplněn perlitem. Při

porovnání s perlitickou litinou je feriticko-perlitická litina měkčí, méně pevná, z toho důvodu se nejedná o tak vhodný konstrukční materiál. Bez určitých opatření nelze vzniku feriticko-perlitické základní hmoty zcela zabránit, a to hlavně v silnějších průřezích odlitku, kde jsou markantnější rozdíly v tloušťce jednotlivých stěn. Přítomnost feritu ve struktuře je žádoucí například pro využití k výrobě ocelářských kokil, válců, kde jsou výhodné, protože svou tvárností zmenšují pnutí, například mezi teplejšími a studenějšími částmi odlitku a snižují tak nebezpečí praskání [3]. Na obr. 2-10 je feriticko-perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem.



Obr. 2-10 Feriticko-perlitická struktura litiny s lupínkovým grafitem, [7]

2.4.1 Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem

Jako krystalizaci litiny si představme v podstatě vznik fází, které vznikají z taveniny, která má při ochlazování až teplotu likvidu. Při dosažení eutektické teploty $T_{E1,1}$ taveniny krystalizace končí, [4].

Mechanismus dějící se při nižších teplotách, tím myšleno při teplotách eutektoidních, nenazýváme již krystalizací, ale eutektoidní přeměnou austenitu. Po všech probíhajících přeměnách v litině je její struktura tvořená grafitem a základní kovovou hmotou, [4].

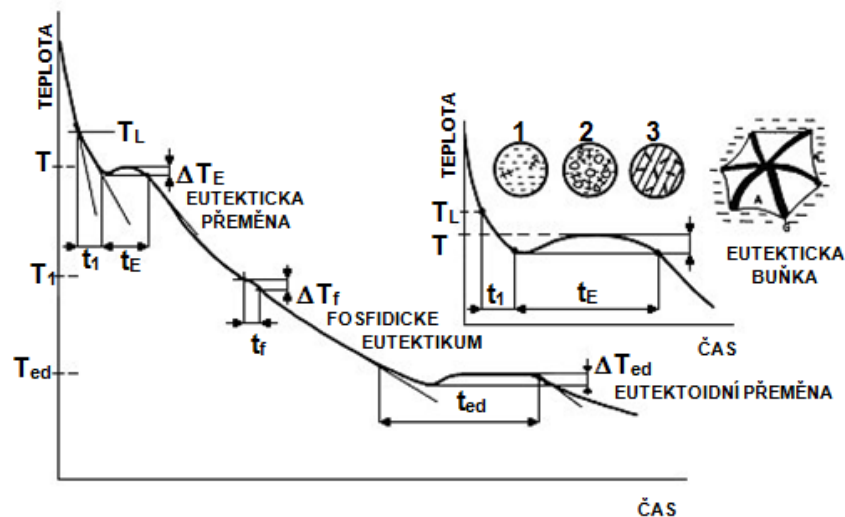
Krystalizace podeutektické litiny s lupínkovým grafitem

Průběh tuhnutí, resp. krystalizace podeutektických LLG, je možno rozdělit do dvou fází:

1. Primární krystalizaci – tj. 1. fáze krystalizace;
2. Eutektickou krystalizaci (přeměnu) – tj. 2. fáze krystalizace.

1. fáze krystalizace: na krystalizačních zárodcích se vytváří dendrity austenitu, které rostou až do počátku druhé fáze krystalizace (ve které zároveň začíná krystalizovat grafitické eutektikum).

2. fáze krystalizace: krystalizuje grafitické eutektikum, zároveň se vytváří a rostou eutektické buňky, které jsou mimo jiné též ovlivňovány rychlostí chladnutí dané taveniny. Krystalizace začíná na příslušné větvi likvidu, a to výše zmíněnou tvorbou primárních dendritů (prostorových, resp. rozvětvených krystalů) austenitu přímo z taveniny. Dendrity během krystalizace rostou na úkor taveniny, která se společně s tím obohacuje uhlíkem. Při dosažení eutektické koncentrace uhlíku v tavenině začíná tavenina tuhnout jako grafitické eutektikum. Při eutektické krystalizaci je vedoucí fází grafit, jehož zárodky se mohou vytvářet přímo z taveniny, nebo na povrchu již přítomných krystalů austenitu. Grafit při růstu z jednotlivých zárodků ochuzuje okolní taveninu o uhlík a vytváří tím podmínky pro další krystalizaci austenitu. Výsledný grafit spolu s austenitem tvoří eutektické buňky, [4]. Na obr. 2-11 je uveden postup krystalizace litiny s lupínkovým grafitem.



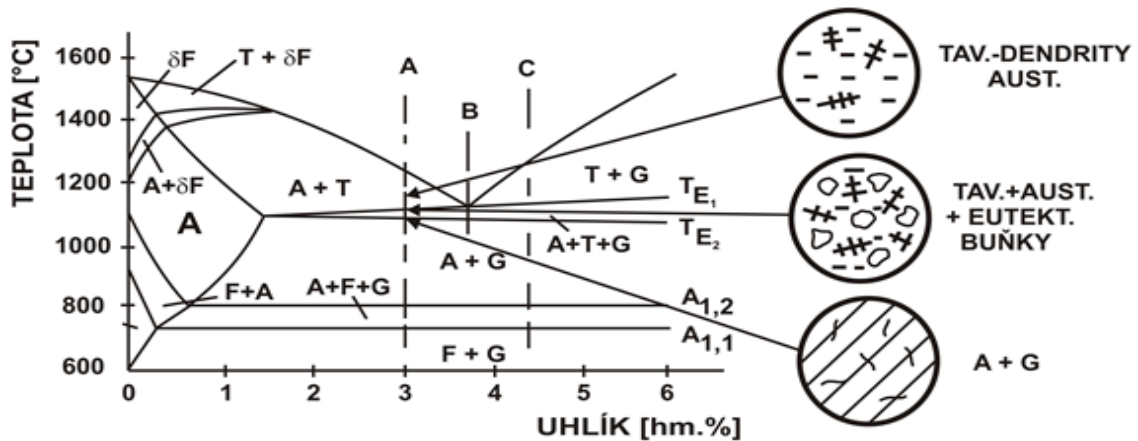
T_L – teplota počátku primární krystalizace; T_E – teplota eutektické přeměny; ΔT_E – interval teplot eutektické přeměny; T_f – teplota počátku krystalizace fosfidového eutektika; ΔT_f – interval teplot krystalizace fosfidového eutektika; T_{ed} – teplota eutektoidní přeměny; ΔT_{ed} – interval teplot eutektoidní přeměny; t_1 – čas primární krystalizace; t_E – čas eutektické přeměny; t_f – čas krystalizace fosfidického eutektika; t_{ed} – čas eutektoidní přeměny.

Obr. 2-11 Křivka tuhnutí a chladnutí litiny s lupínkovým grafitem, [4]

Krystalizace eutektické a nadeutektické litiny s lupínkovým grafitem

Průběh krystalizace litin s eutektickým složením je velmi podobný výše popsanému mechanismu, pouze začíná v okamžiku, kdy tavenina docílí eutektické teploty. Jejím docílením se začnou v tavenině vytvářet eutektické buňky. To, jak krystalizace dále probíhá, je stejné jako u zmíněného mechanismu [4]. Eutektické litiny jsou na obr. 2-12 znázorněny čarou B.

Krystalizace nadeutektických litin (obr. 2-12 čára C) krystalizace začíná při dosažení teploty určité větve likvidu vyloučením uhlíku z taveniny, která je zde velmi bohatá na uhlík. Uhlík, který vylučuje takto přesycená tavenina, je ve formě grafitu ve tvaru hrubých lupínků. Při dosažení eutektické teploty krystalizuje grafit opět v rámci vzniku eutektických buněk, [4].



Obr. 2-12 Pseudobinární rovnovážný diagram Fe-C-Si (2 hmot. %), [4]

2.4.2 Vliv prvků na strukturu litiny s lupínkovým grafitem

Uhlík – spolu s křemíkem má největší vliv na strukturu a vlastnosti litin. Uhlík jako samotný prvek má pouze malý vliv na mechanické vlastnosti, na druhou stranu ale podporuje grafitizaci, a zvýšené množství uhlíku (vyloučený ve formě grafitu) zlepšuje útlumové vlastnosti. Litina, která vylučuje grafit, zvětšuje svůj objem. Tím vyrovnává důsledek stahování, které nastává při krystalizaci austenitu. Z toho vyplývá, že čím více uhlíku ve formě grafitu je vyloučeno, tím více je omezeno celkové stažení, obzvláště u LLG. To je také důvodem, proč tenkostěnné odlitky z LLG se téměř nenálitkují. Zároveň má vyšší obsah uhlíku v litině za následek vyloučení hrubšího grafitu, [4].

Křemík – snižuje teplotu tání litiny a zvyšuje její tekutost, zvětšuje pravděpodobnost tvorby bublin a pórů. Jeho přítomnost způsobuje sníženou koncentraci uhlíku v eutektiku i eutektoidu. Např. při přítomnosti 2 hm. % Si v litině je obsah uhlíku v perlitu asi 0,65 hm. % a v ledeburitu 3,7 hm. %. Kromě přítomnosti křemíku posouvá i přítomnost fosforu v litině eutektický bod (4,26 hm. % C) doleva tak, že má eutektické složení nižší obsah, než je 4,26 hm. % C. Z toho důvodu při hodnocení litin uvažujeme současný vliv těchto prvků, dále sledujeme tzv. uhlíkový ekvivalent (ekvivalentní uhlík) C_E . Křemík podporuje průběh fázových přeměn v souladu se stabilní rovnováhou

soustavy Fe-C, což v praxi znamená, že existuje závislost mezi obsahem C, Si a strukturou litiny pro danou tloušťku odlitku, [4].

Mangan – má u litin jakožto karbidotvorný prvek opačný vliv než křemík, stabilizuje cementit, a je důležitý pro odsíření litiny. Jeho obsah v litině bývá 0,4 až 0,8 hm. %. Příliš velké množství manganu v litině způsobuje metastabilní rovnováhu, zvyšuje tvrdost a křehkost litiny, [4].

Síra – v litině má podobné účinky jako Mn, brzdí rozpad cementitu. Pro litiny se zvýšeným obsahem síry platí, že čím mají větší tvrdost, tím mají zároveň horší mechanické vlastnosti. Síra umocňuje smrštění a zmenšuje homogenitu odlitku. Neblahé účinky síry na litinu lze kompenzovat zvýšením obsahu Mn, s nímž síra vytvoří sulfid manganatý nebo zvětšením obsahu Si (s tím, že 0,1 hm. % S lze eliminovat přísadou asi 0,5 hm. % Si). U litin kvalitních vlastností nemá síra přesáhnout 0,1 hm. %, [4].

Fosfor – zvyšuje tekutost litiny, interval krystalizace a stabilizuje cementit. Z toho důvodu se při použití litiny pro umělecké účely užívá záměrně vyšší obsah fosforu. Kromě toho, že tvoří již zmíněný steadit, má neblahé účinky na obrobiteľnosť a odolnosť litiny proti dynamickému namáhání, proto je příznivý jeho obsah v litině pod 0,3 hm. %. To však neplatí pro fosforatou litinu, která obsahuje cca 1 hm. % fosforu, je výjimečná dobrými třecími vlastnostmi a používá se pro výrobu brzdových špalíků, [4].

2.4.3 Hodnotící kritéria litin

Uhlíkový ekvivalent – lze vypočítat:

$$C_E = C + 0,3 \cdot (\% Si + \% P) \quad (1)$$

kde značí: C, Si, P – obsah prvků v litině v hm. %.

Je-li C_E roven 4,3 (tj. cca eutektickému složení uhlíku), lze litinu považovat za *eutektickou*, je-li nižší, pak se jedná o litinu *podeutektickou* a je-li vyšší, tak je to litina *nadeutektická*.

Stupeň eutektičnosti – litina se jím posuzuje mnohem častěji:

$$S_C = \frac{\% C}{4,23 - 0,27 \% P - 0,297 \% Si} \quad (2)$$

Je-li: $S_C = 1$, litina je eutektická;

$S_C < 1$, litina je podeutektická;

$S_C > 1$, litina je nadeutektická.

Poměr uhlíku a křemíku

$$\frac{C}{Si} = 1,7 \text{ až } 1,8 \quad (3)$$

hodnotí správné množství uhlíku a křemíku v litině.

Grafitizační koeficient – hodnotí grafitizační schopnost litiny:

$$K = \frac{4}{3} \cdot Si \cdot \left(1 - \frac{5}{3C+Si}\right) \quad (4)$$

Je-li $K = 0,65$, je pro zkušební tyče $\varnothing 30$ mm předpoklad, že bude mít strukturu bílé litiny. Pro přechodovou (makovou) litinu je K od 0,65 do 0,85. Pro litinu s perlitickou matricí je K od 0,85 do 2,05. Je-li K 2,05 až 3,1, z toho lze předpokládat vznik perliticko-feritické základní hmoty. Pro čistě feritickou matrici se předpokládá K 3,1 a více.

Po zkoumání chemického složení litin lze stanovit i jejich mechanické vlastnosti, to zejména platí pro LLG.

Výpočet pevnosti v tahu a tvrdosti podle Collauda:

$$R_m = (100,6 - 80 \cdot S_C) \cdot 10 [MPa] \quad (5)$$

$$Hb = 465 - 270 \cdot S_C \quad (6)$$

Výpočet modulu pružnosti litiny s lupínkovým grafitem:

$$E = \frac{R_m}{HB} \cdot 10^5 [MPa] \quad (7)$$

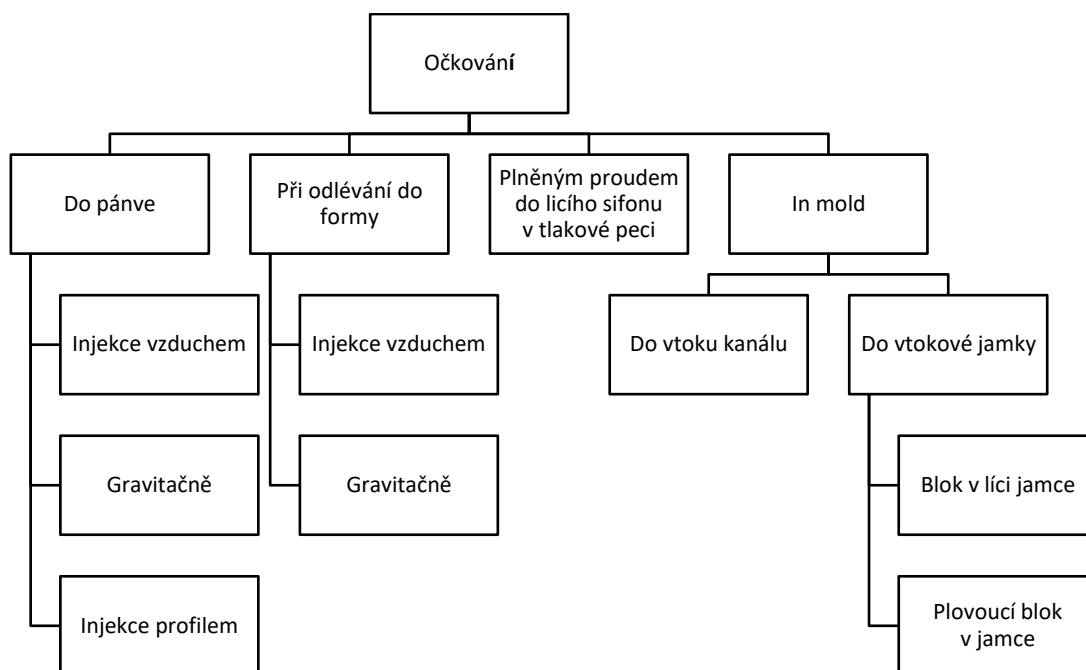
Všechny uvedené vztahy jsou stanoveny na základě zkoušek litinových tyčí, nejčastěji $\varnothing 30$ mm, [3].

2.4.4 Očkování litiny s lupínkovým grafitem

Očkováním rozumíme obecně technologickou operaci, při které do tekutého kovu vnášíme malé množství vhodně zvolené substance, tzv. očkovadla, čímž zvýšíme množství krystalizačních zárodků určité fáze. Grafitizační očkování litiny s lupínkovým grafitem umožňuje zvyšování počtu krystalizačních zárodků grafitu. Jelikož tím snížíme vliv grafitu jako „vrubů“ v matrici a zároveň tím zvýšíme mechanické vlastnosti litiny. Výsledkem této operace je větší množství menších lupínků. Jedná se zároveň o jeden z nejdůležitějších procesů při výrobě jakostních druhů litiny s lupínkovým grafitem, [3].

Čím nepříznivější jsou podmínky pro grafitizaci, tím větší je význam očkování, např. při rychlejším ochlazování odlitku a nepříznivějším chemickém složení (nízký uhlíkový ekvivalent, malý obsah grafitizačních prvků a velký obsah karbidotvorných prvků). Není-li očkování dostatečné, vzniká nepravidelně rozložený grafit typu B, přechlazené formy grafitu typu D a E, nebo oblasti s metastabilní strukturou. Tyto litiny mají špatné mechanické vlastnosti, nepříznivé slévárenské technologické vlastnosti a vysokou tvrdost. Pomocí očkování se zlepšuje obrobiteľnosť, [3].

Na obr. 2-13 je základní rozdělení očkování litiny s lupínkovým grafitem.



Obr. 2-13 Základní rozdělení očkování litiny s lupínkovým grafitem

Očkování na žlábek tavicí pece při odpichu – jedná se o nejjednodušší metodu dávkování zrnitých očkovaadel. Jeho výhodou je rovnoměrné rozdělení očkovaadla v tavenině, na druhou stranu má nevýhodu v prodloužení doby mezi očkováním prvního kovu z odpichu a odlévání forem, jelikož při napouštění a sběru taveniny do velkých lících pánví (mnohdy trvá i desítky minut) dochází ke značnému odeznění očkovacího efektu a následnému rozpuštění prvku očkovaadla v litině, [3].

Očkování do pánve – jedná se o velmi rozšířený způsob očkování, a to i přesto, že není jednoduché dodržet zásadu rovnoměrného přidělování očkovaadla do proudu kovu. Nejlepší způsob je začít očkovaadlo přidávat do pánve plné asi do $\frac{1}{4}$ a pokračovat rovnoměrně po dobu 50 až 60 % z doby plnění pánve. Při pouhém jednorázovém vhození očkovaadla do pánve se nedočkáme dobrých výsledků. Výrobci očkovaadel většinou radí přidávat očkovaadlo postupně do litiny a vyvarovat se přelévání očkovaadla

litinou. Nedodržení těchto zásad přidávání může vést ke spékání a slepování očkovačla, kterému může následovat jeho zestruskování, [3].

Očkování In-mold – přímé očkování do formy, nebo in-mold proces, je proces ukládání očkovačla přímo do vtokového systému, a to buďto přímo do licí jamky, nebo do vtokového kanálu (kůlu). Další možností je ukládání očkovačla do vhodně upravených zásobníků v rozváděcích kanálech (ne do zářezu). Tato očkovačla nalezneme buď ve formě jemné drtě, jemných granulí, peletovaných granulí, nebo předlitých nábojů, či bloků. Pro očkovačla je velmi důležitá jejich rozpustnost v tavenině, [3].

Očkování v licí jamce – Zakotvený blok – je blok očkovačla, který je vhodně vytvarován, ukotven do spodku licí jamky v místě, kam dopadá proud taveniny při odlévání, zde ho tavenina omývá a je rozpuštěn. V licí jamce nalezneme pevnou přepážku, která zachycuje strusku a brání jejímu postupu do vtokového systému. V případě, že používáme větší formy pro těžší odlitky, máme možnost užití různé upravených zátek, které vpustí naočkovanou taveninu až po dosažení horní hranice licí jamky a znemožní tím, aby se již při začátku odlévání objevily nepravidelnosti. Po uvolnění zátky se spustí proud naočkované taveniny do vtokového kanálu (kůlu) a pokračuje dále do formy. **Plavoucí blok** – je blok, který je tvořen válcovým, nebo kubickým blokem, který se volně umístí do licí jamky těsně před začátkem odlévání. Tím, že se očkovačlo rozpouští po částech a postupně, je zajištěno efektivní pozdržené gravitační očkování litiny. Zároveň musí rozměry bloku splňovat to, že se ani po částečném rozpuštění nesmí vejít do ústí vtokového kanálu (kůlu) a ani do celého vtokového systému. Z výše uvedených důvodů je pevnou přepážkou opatřena i licí jamka, [3].

2.4.5 Tavení litiny s lupínkovým grafitem

Kov, resp. taveninu k odlévání, připravujeme prostřednictvím tavících zařízení, proto se jedná o velmi důležité přístroje. Při tavícím procesu je důležité, aby nezhoršoval kvalitu taveniny. Naopak předpokládáme, že probíhající reakce mají umožnit i metalurgické zásahy, [4].

K výrobě (tavení) litiny bylo v minulosti vyvinuto velké množství tavících agregátů, řada z nich se stále používá. Konkrétně nejstarší a stále nejrozšířenější jsou **kupolové pece**, za nimi můžeme jmenovat **elektrické indukční pece**, méně používané jsou pak **rotační bubnové pece** a **elektrické obloukové pece**, [4].

Jedná se o jednotky různých velikostí a rozměrů, různých energetických zdrojů a různých technologií a výrobních procesů, sloužících k přípravě taveniny pro výrobu odlitku z litiny s lupínkovým grafitem.

Kuplovna – je tavící zařízení, které se nejčastěji užívá k výrobě litiny s lupínkovým grafitem. Jedná se o šachtovou pec kruhového průřezu, která stojí na čtyřech sloupech. Její velikost posuzujeme na základě průměru šachty v oblasti dmyšek, obvykle se pohybujeme v rozměrech od 0,7 do 1,4 m. U velkých kuploven se výška pohybuje mezi 4,5 a 7,5 m. Povrch je z ocelového pláště, kolem proudí vzduch z větrovodu. Mezi její další součásti patří vsázkový otvor, žlábký pro taveninu a strusku, dvířka pro manipulaci a vyprazdňování kuplovny a dalších částí. Z tepelného hlediska kuplovna funguje jako protiproudý výměník tepla. V současné době rozeznáváme u kuploven různé druhy konstrukcí, které dělíme podle různých kritérií, např. podle toho, o jaký provoz se jedná (jednodenní nebo kampaňový), podle předpecí (s předpecím, bez předpecí), dále může být s předpecím vyhřívaným nebo bez vyhřívání, [4]. Na obr. 2-14 je uvedeno schéma řezu kuplovnou.

Vsázkové suroviny pro kuplovnu:

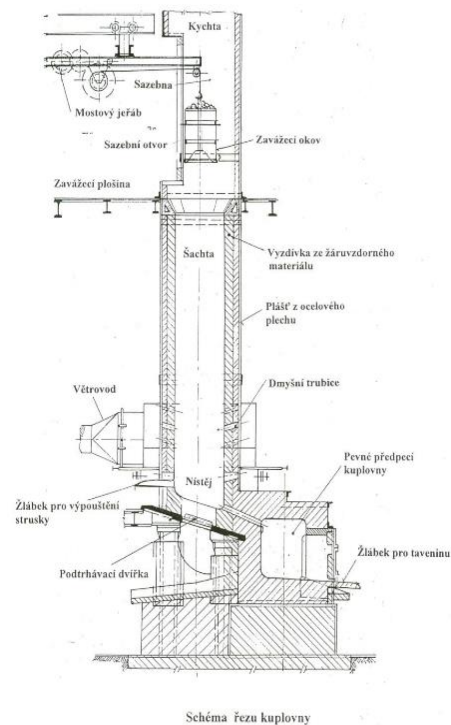
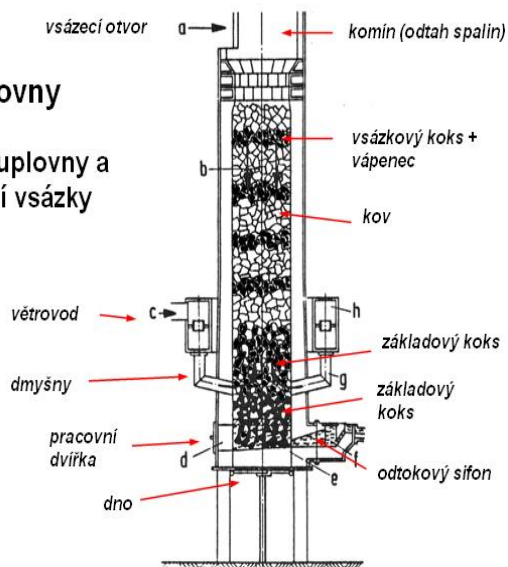
Kovové suroviny: slévárenské surové železo; vratný materiál; litinový šrot; ocelový šrot feroslitiny.

Palivo: koks (CaC_2 – částečná náhrada koksu, lepší nahličení vsázky).

Struskotvorné přísady: vápenec (CaCO_3), dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) zvyšuje tekutost, popř. kazivec (CaF_2).

Kuplovný

Schéma kuplovný a rozložení vsázky



Obr. 2-14 Schéma kuplovný, [7], [14]

Její **výhodou** je vysoká měrná výrobnost a nízká spotřeba paliva. Dále lze považovat za výhodu její poměrně jednoduchou konstrukci i provozní obsluhu v kontrastu s tím, že z ní můžeme získat litinu o teplotě 1 500 °C. Její další výhodou je to, že během tavby máme možnost změny vložení vsázky, což oceníme zejména při výrobě různých druhů litin s lupínkovým grafitem, [4].

Na druhou stranu musíme zmínit **nevýhody**, ke kterým patří nestálost chemického složení litiny během tavby, například se obtížně taví litiny s nízkým obsahem uhlíku; a teplotu taveniny nemůžeme udržet bez použití speciálního zařízení, kterým může být např. indukční předpeči. Dále bychom se měli vyvarovat přímému styku taveniny

s palivem a kupolními plyny, jelikož přímý styk zapříčiňuje výskyt nežádoucích příměsí v litině a je zdrojem zvýšeného obsahu nekovových vměstků a plynů, [4].

Pracovní prostor kuplovný se skládá z těchto důležitých částí:

Nístěj je spodní část pece sahající až do úrovně dmyšen. Její výška je 0,50 až 0,80 m. Nístěj při tavení uzavíráme spodními dvířky, nad nimiž je umístěna vrstva žáruvzdorné výdusky se sklonem k odpichovému otvoru, [4].

Šachta je střední část kuplovný, která sahá od dmyšních trubice až po sazebnu. Starší kuplovný mají šachtu tvaru válce, modernějším se rozšiřuje směrem k nístěji. V horní části šachty dochází k přehřívání vsázky, ve spodní k tavení a přehřívání taveniny litiny, [4].

Dmyšní trubice má mít velikost v poměru s kuplovnou 1:6 až 1:10. Obvykle má tvar obdélníku. U malých kuploven se volí 4 až 6 trubice, u větších 8 až 10 trubice po obvodě. Při nutnosti intenzifikace tavení jsou postaveny ve dvou řadách. Množství větru dmýchaného do kuplovný záleží na rozměrech šachty a potřebném tlaku větru, [4].

V slévárnách je často vyžadováno větší množství taveniny, k tomu používáme předpecí kuplovný, které zároveň slouží jako zásobník taveniny uložený mimo pracovní část kuplovný, viz obr. 2-17 vpravo.

Výhody kuploven s předpecím: vyrovnání chemického složení litiny, menší nauhličení a nasíření litiny, úspora plnicího koku atd.

Nevýhody kuploven s předpecím: pokles teploty v nevyhříváném předpecí, větší spotřeba žáruvzdorných materiálů, vyšší investiční náklady a náklady na údržbu, [4].

Elektrická indukční pec – elektrické indukční pece jsou po kuplovnách nejdůležitějším agregátem užívaným k výrobě litin. Počet instalací indukčních pecí ve slévárnách se neustále zvyšuje z důvodů ekologických, metalurgických a provozních, [5].

Ekologické výhody: mnohem menší množství plynných i prachových exhalací v porovnání s tavením v kuplovnách a jejich snadnější zachycování, [5].

Metalurgickými výhodami jsou zejména:

- velká operativnost provozu,
- velká variabilita použitelných vsázkových surovin, je možno tavit ocelové vsázky i ze 100 %,
- snadná regulace tavicího procesu a možnost dosažení vysokých teplot,

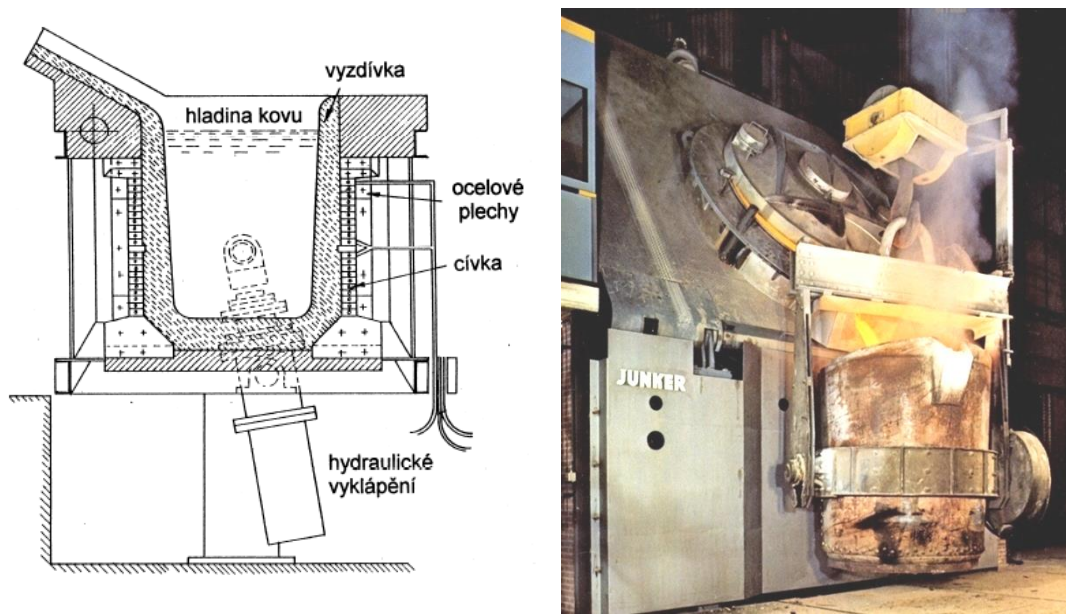
- snadná možnost úpravy chemického složení, EIP jsou vhodné i pro tavení legovaných litin,
- míchání lázně zaručující homogenizaci teploty a chemického složení,
- menší propaly prvků, [5].

Indukční ohřev je zapříčiněn působením magnetického pole, které vzniká v indukční cívce při průchodu střídavého proudu. Indukční pece můžeme podle frekvencí rozdělit na středofrekvenční pece (250–400 Hz) a na síťovou frekvenci (50 Hz), přičemž proud se zvýšenou frekvencí se získává pomocí měniče frekvence. Pece fungující na síťovou frekvenci nepotřebují frekvenční měnič. Část zařízení, v němž je umístěna cívka, se nazývá induktor.

Indukční cívka je tvořena měděným dutým profilem, kterým protéká chladicí voda. Pece dále dělíme na kelímkové a kanálkové podle umístění induktoru, [5].

Indukční kelímkové pece – u indukčních kelímkových pecí je tavicí kelímek umístěn přímo v ose indukční cívky. Kelímkové pece mohou být jak na síťovou frekvenci, tak středofrekvenční. Skládají se měniče frekvence, dalších elektrických částí, řídicí jednotky a z vlastní tavicí pece. K jedné napájecí jednotce bývají obvykle připojeny 2 tavicí kelímky, které lze přepínat, ale někdy mohou tavit i současně, tavicí kelímek je s napájecí jednotkou propojen pružným elektrickým vedením a po natavení se obsah pece vylévá naklopením pece, [5].

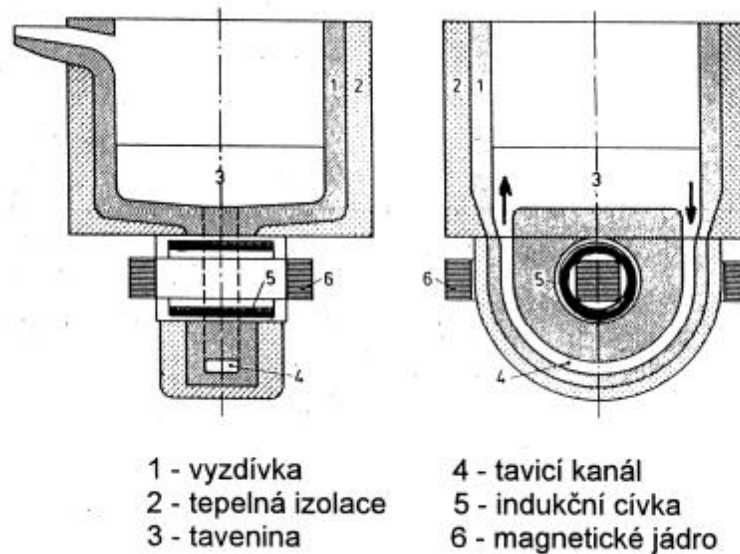
Kelímek je vyplněn žáruvzdornou vyzdívkou, o jejíž životnosti rozhoduje způsob provedení a zacházení během tavicí kampaně (čištění pece, způsob zavážení vsázky atd.). Vyzdívka se průběžně opravuje po každé tavně (několika tavnách), kelímek se vybourá a znovu vyzdí po celkovém opotřebením. Středofrekvenční kelímkové pece umožňují natavovat z pevné vsázky běžné kusovitosti, jejíž chemické složení může odpovídat požadovanému chemickému složení natavené litiny, mnohokrát se však taví jen z ocelové vsázky a vratného materiálu. Chemické složení můžeme dále měnit pomocí nauhličovala a feroslitin, [5]. Na obr. 2-15 je znázorněna indukční kelímková pec.



Obr. 2-15 Indukční kelímková pec, [5], [14]

Indukční kanálkové pece – induktor je zde jako samostatná část výměnným způsobem spojená s kelímkem. Ohřev kovu je prováděn v kanálku induktoru, kolem kterého je umístěna indukční cívka. Kov v kanálku proudí působením elektromagnetických sil a ohřátý kov se promíchává s ostatním kovem v kelímku. Zároveň pec nelze za provozu zcela vyprázdnit a v induktoru a části kelímku musí stále být tekutý zbytek, [5].

Kromě výroby hliníkových slitin, kdy se tyto pece často též využívají k tavení, se převážně u litin používají jako udržovací a homogenizační. Podobně, jako indukční kanálkové pece, jsou konstruovány i licí pece u formovacích linek, které slouží jako odlévací zařízení. Ve srovnání s pecemi kelímkovými můžeme na pecích kanálkových vyzdvihnout jejich vyšší elektrickou účinnost, avšak nevýhodnější je jejich nižší elektrický výkon. Díky vysoké pohyblivosti lázně jsou v tomto agregátu široké možnosti úpravy chemického složení, markantně změnit složení taveniny však není jednoduchý proces. Kvůli neustálému a intenzivnímu pohybu kovu je vyzdívka v kanálu induktoru mimořádně namáhaná a má proto menší životnost než vyzdívka ve vaně pece. Z tohoto důvodu se dá induktor vyměnit, [5]. Na obr. 2-16 je indukční kanálková pec.



Obr. 2-16 Indukční kanálková pec, [5]

2.5 Výroba litinových brzdových kotoučů

Litinové brzdové kotouče se vyrábí odléváním litiny s lupínkovým grafitem do pískových, nejčastěji bentonitových forem. V současné době pro tento účel výroby slouží speciální slévárny. Tak např. široké spektrum brzdových kotoučů se vyrábí v německé firmě SHW Automotive GmbH, pro vozy Porsche, VW, Audi, BMW, Lamborghini, Bentley, Brembo atd. Na obr. 2-17 je brzdový kotouč firmy SHW Automotive GmbH. Materiálová kvalita tohoto vnitřně odvětrávaného brzdového kotouče odpovídá litině s lupínkovým grafitem EN-GJL-200 nebo EN-GJL-250, [1].



Obr. 2-17 Brzdový kotouč firmy SHW Automotive GmbH a jádro z pojivového systému Inotec, [1]

Pro výrobu jader vyráběných brzdových kotoučů firmy SHW Automotive GmbH běžně používá polyuretanovou pryskyřici pro metodu studeného jaderníku. Pro výrobu jader byl také odzkoušen nově vyvinutý anorganický pojivový systém Inotec. Jedná se o nové slévárenské pojivo z roku 2009 na bázi vodního skla vyvinuté společností ASK

Chemicals ve spolupráci se slévárnou BMW. Množství pojiva ve směsi se pohybuje v rozmezí 1,8–2,5 %. Jádra se vytvrzují dehydratací ve vyhřívaných jadernících o teplotě 150–200 °C v kombinaci s profukováním horkým vzduchem. Vytvrzovací reakce je však vratná, a proto mají jádra při zvýšené vlhkosti vzduchu sklon k rehydrataci. Pro prodloužení skladovatelnosti jader v běžných klimatických podmínkách bez rizika zpětného navlhnutí jsou do směsi přidávána speciální aditiva (tzv. promotory 0,1–1 %), které výrazně zvyšují chemickou stabilitu jader a zároveň urychlují proces pojení. Díky anorganické povaze se pojivo vyznačuje nízkou tvorbou emisí a šetrností k životnímu prostředí. Tento pojivový systém pro výrobu odvětrávaných kotoučů se zatím zdá být horší než pojivový systém na bázi polyuretanové pryskyřice. Speciální produkci jader pro výrobu odvětrávaných brzdových kotoučů zabezpečuje firma Hüttenes Albertus Werke GmbH (firma HA), [8]. Tato firma byla inspirována skutečností, že někdy klasické jádrové směsi nesplňují podmínky pro výrobu kvalitní odvětrávaných kotoučů. Na obr. 2-18 je uvedeno jádro pro výrobu odvětrávaných brzdových kotoučů od firmy HA. V těchto směsí je používáno kulaté křemenné ostřívo s velikostí zrn $d_{50} = 0,20$ mm.



Obr. 2-18 Jádro pro výrobu odvětrávaných kotoučů vyrobená z obalované směsi HAP 120 128Z 1 s 1 % Feranexu 7530 S, [8]

Při použití křemenných ostřív a pro jejich eliminování roztažnosti se do jádrových směsí přidávají aditiva. Pro výrobu odvětrávaných brzdových kotoučů se do jádrových směsí přidává aditivum – Feranex 7530 S. Na obr. 2-19 je vlevo část odvětrávaného brzdového kotouče, kde v jádrové směsi nebylo použito aditivum, naopak vpravo je část odvětrávaného kotouče, kde v jádrové směsi bylo použito aditivum – Feranex 7530 S.



Obr. 2-19 Vlevo je část odvětrávaného brzdového kotouče vyráběného s jádrem bez aditiva; vpravo je část odvětrávaného kotouče vyráběného s jádrem (aditivo – Feranex 7530 S, 1 %), [8]

Na obr. 2-20 je pohled na výrobu brzdových kotoučů, zde je použita bentonitová forma, kde je dutina s jádrem pro odlévání dvou kotoučů ve slévárenské formě.



Obr. 2-20 Pohled na formu pro výrobu odvětrávaných brzdových kotoučů automobilů, [13]

Tavenina litiny je připravována v indukčních středofrekvenčních pecích. Teplota odlévané taveniny litiny je 1 370 °C. Před odléváním je taveniny metalurgicky ošetřena běžným způsobem (očkována a stažena struska a změřena teplota odlévané taveniny). Pro odlévání se používají bentonitové formy. U nás se na výrobu brzdových kotoučů a brzdových bubňů připravuje slévárna ZPA Pečky, která bude vyrábět tyto díly bezrámovým formováním, podobně jako tomu bylo před nedávnem ve slévárně litiny s lupínkovým grafitem v automobilce ŠKODA – Auto v Mladé Boleslavi, kde bylo použito bezrámové formování s linkou Loramendi.

2.6 Tepelné děje v pískových slévárenských formách

2.6.1 Sdílení tepla v pískové slévárenské formě

Písková forma, resp. stěna pískové formy představuje disperzní systém, v podstatě kapilární pórovité těleso, které je zaplněné vzduchem. Z toho mimo jiné vyplývá, že sdílení tepla je ve slévárenské pískové formě velmi složité. V kapilárně pórovitém tělese

se uplatňuje nejen přenos tepla, ale také přenos hmoty. V pískové slévárenské formě se uskutečňuje sdílení tepla těmito ději:

1. Vedením (kondukce) – prostřednictvím tepelné vodivosti pevné a plynné fáze formy,
2. Prouděním (konvekce) plynů i vody,
3. Sáláním (radiace) v prostorech mezi zrny ostřiva, [9].

Pokud dělíme celkové sdílení tepla na elementární děje (vedení, proudění, sálání), má to pouze teoretický význam, neboť děje mohou často probíhat současně, i když v různé intenzitě, nebo se vzájemně ovlivňovat. Maximální účinky těchto dějů jsou ovlivněny rozsahem teplot. Do teploty 200 °C převládá přenos tepla vedením, od 200 °C do 600 °C je proudění tepla. Při teplotách nad 600 °C je probíhá přenos tepla sáláním

Přenos tepla vedením – je v pískové slévárenské formě ovlivněn tepelnou vodivostí skeletu, pojiva, vody, popř. plynů. Míru sdílení tepla udává intenzita hustoty tepelného toku, kterou lze vyjádřit Fourierovým vztahem:

$$\bar{q}_K = -\lambda_K(T) \cdot \text{grad } T \quad (8)$$

kde: q – intenzita tepelného toku;

λ_K – součinitel vedení tepla;

T – teplotní gradient, [9].

Uvnitř každého monolitického zrna ostřiva má vedení tepla vysokou hodnotu, ale vodivost celého systému je limitována tepelnými odpory v místech styku zrn disperzní soustavy. Je závislý na stupni zhuštění formovací směsi, tím se myslí pórovitost směsi, kvalita a geometrie styku zrn přes mosty pojiva (obsahu vody, pojiva a přísad) a teplotě. Obecně však platí, že s rostoucí teplotou klesá vodivost celého systému a tím se snižuje i množství sdíleného tepla. Zároveň se však nad 500 °C začíná výrazně uplatňovat sdílení tepla sáláním, čímž se zvyšuje množství přeneseného tepla. Z výše uvedených důvodů je třeba brát na vědomí, že pískové formy jsou ve srovnání s kovovými špatnými vodiči tepla a důsledkem je vytváření vyššího teplotního gradientu, [9].

Přenos tepla prouděním – je dán konvekcí plynu, u velkých forem i konvekcí vody. Konvekci jako takovou dělíme na přirozenou a vynucenou. Oba tyto typy jsou užívány při přenosu tepla a hmoty v pískové formě, a ještě je doplňuje kruhová konvekce, [9].

Přirozená konvekce – je způsobena rozdílnou teplotou částic plynu, přesněji rozdílnou hustotou částic plynu, které jsou ohřáté na různou teplotu, s tím, že teplejší částice jsou lehčí a naopak. Při této konvekci probíhá dvojstranná výměna média, tzn.

plynu. Při dvojstranné výměně teplejší (a tedy lehčí) částice směřují nahoru do pórů formy a naopak. Tím je vyvolána konvekce ve vertikálním a horizontálním směru. Takto je způsobeno proudění plynu, a to jak v oddělených mezizrnných pórech, tak v celé prohráté formě nebo v jejím určitém pásmu, to vše vlivem filtrace plynu kapilárami formy. Plynu je proto umožněno proudění od vnitřního povrchu formy až do hloubky stěny formy, [9].

Vynucená konvekce – je vyvolána rozdílným tlakem plynu v průřezu stěny pískové formy. Ihned po odlití působí u líce formy vyšší tlak plynů než v dalších vrstvách, jelikož platí, že objem vyloučených plynů závisí na množství přijatého tepla. Právě do těchto vrstev je umožněno pronikání plynů uvolněných z taveniny a zplodin, které jsou důsledkem vyhořívání příměsí ve formě; dále se tvoří pára, plyny a čím více stoupá teplota, tím značněji vzrůstá objem plynu a vzduchu v pórech formy. Oproti přirozenému způsobu konvekce dochází u této verze pouze k jednostranné výměně plynu z míst s vyšším tlakem do míst s nižším tlakem, což ve výsledku znamená, že teplejší plyny a páry prostupují kapilárami do vzdálenějších (a tedy chladnějších) oblastí formy, a zintenzivňují tak přenos tepla. Dalo by se říct, že jde takzvaně o jednosměrnou filtraci, a nikoliv o cirkulaci. S postupem doby se s klesající intenzitou vynucené konvekce vyvíjí ve formě stále méně plynů, [9].

Uzavřená kruhová konvekce – má termodynamickou příčinu. Vzniká vždy v případě změn teplot, chemických a elektrických potenciálů.

Obecně lze hustotu tepelného toku prouděním zapsat takto:

$$\bar{q}_P = \alpha_P (T_{PL} - T_{SF}) \quad (9)$$

kde: α_P – součinitel přestupu tepla konvekcí;

T_{PL} – teplota plynu;

T_{SF} – teplota stěny formy, [9].

Přenos tepla sáláním – je závislý z velké části na geometrických charakteristikách pórů nebo částic, na teplotě a na stupni černosti povrchu částic. Rozhodujícím vlivem při sálání je teplota, jak je zaznamenáno ve Stefan – Boltzmannově zákoně, který tento děj popisuje. Platí, že čím více roste teplota částic, tím více tepla je vysáláno do mezizrnných prostorů. Součinitel černosti povrchu tělesa se pohybuje v hodnotách od 0 do 5,67 W.M⁻².K⁴. Účinek přenosu tepla sáláním v pískové formě můžeme zvýšit přidáním přísad černé barvy. Hustotu tepelného toku sáláním lze stanovit takto:

$$\bar{q}_S = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left[\left(\frac{T_P}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_S}{100} \right)^4 \right] \quad (10)$$

kde: ε – součinitel poměrné sálavosti;

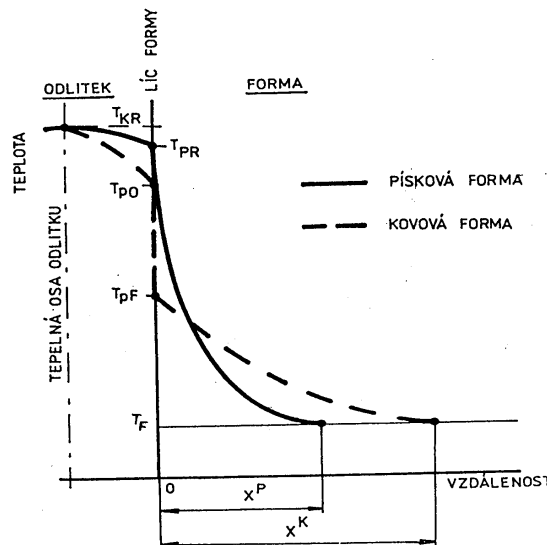
C_0 – součinitel sálavosti dokonale černého tělesa;

T_p – teplotu plynu

T_s – teplotu stěny, [9].

I přesto, že víme, prostřednictvím jakých dějů dochází v pískové slévárenské formě ke sdílení tepla, je velmi těžké číselně určit, jaké mají tyto jednotlivé děje na výsledném tepelném sdílení podíl. Kromě toho je však důležité sledovat i přenos hmoty, čímž se dostáváme ke složité fyzikálně-matematické úloze. Přibližně můžeme rozdělení teplot (teplotního pole) v pískové slévárenské formě stanovit pomocí Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla.

Na obr 2-17 je zobrazeno schématické rozložení teplot ve stěně kovové a pískové formy v určitém časovém okamžiku.



Obr. 2-21 Schéma teplotních polí v řezu pískové a kovové formy ve stejném časovém okamžiku, [9]

2.7 Výpočtové simulační programy tuhnutí a chladnutí odlitku

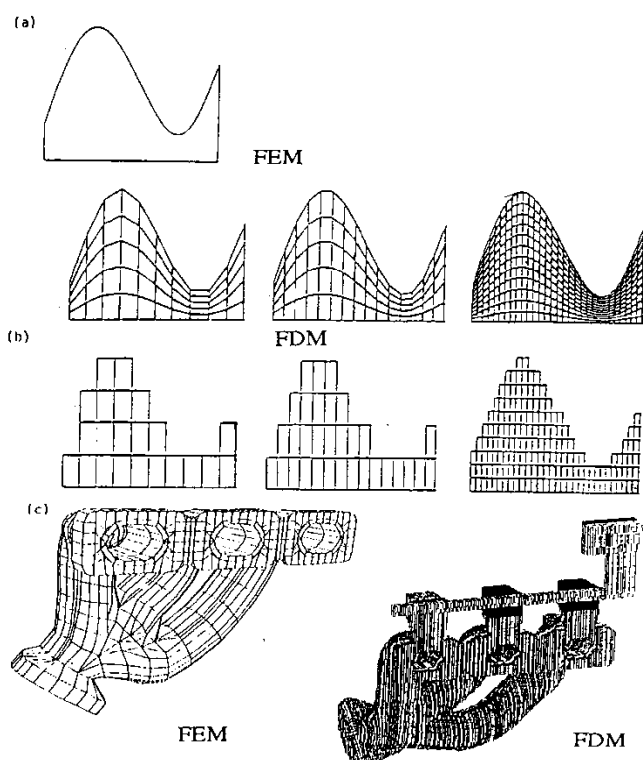
V posledních deseti letech začal být značně patrný velmi pozitivní vliv počítačových simulací slévárenských technologických procesů na výslednou kvalitu odlitků a řešení technologických problémů a také na systematické odstraňování technologických chyb a vad. Počítačovou simulaci lze popsat jako vysoce účinný nástroj optimalizace procesů a dějů, technologických zařízení i organizace práce při použití vysoce výkonných počítačů.

V současnosti lze na evropském trhu sehnat celou řadu slévárenských komplexních, neustále se doplňujících a modernizujících simulačních programů, které dávají uživateli možnost řešení různých úloh. Simulační programy se dnes orientují zejména na řešení těchto problémů: plnění forem; tuhnutí a chladnutí odlitku; vznik struktury a utváření vlastností odlitku; vznik vnitřních pnutí a deformace.

Kvalita simulačních programů, jejich vypovídající hodnoty a míra shody výsledků simulace s realitou je dána zejména tím, jak umí:

1. dobře a jednoduše vystihnout matematický popis dílčích dějů;
2. zahrnout odchylky chování a stavu odlévaného materiálu od ideálního předpokladu jednofázového stavu taveniny;
3. definovat a numericky vyjádřit fyzikální a mechanické vlastnosti forem i odlévaného materiálu v závislosti na teplotě v celé potřebné šíři teplotního intervalu, [9].

Je důležité, jak přesně simulační programy definují proudění kapaliny pomocí rovnice kontinuity a pomocí Navier – Stokesova zákona o zachování hybnosti; tuhnutí a chladnutí odlitku Fourierovou diferenciální rovnicí pro přenos tepla; úroveň zbytkových či vnitřních pnutí zákony mechaniky tuhého tělesa při plastické a elastické deformaci. S tím je spojeno i stanovení výchozích a okrajových podmínek řešení. Poměrně velkým problémem při užívání simulačních programů je uplatnění správných hodnot daných tepelně-fyzikálních veličin u použitých materiálů. Nedostatek hodnot daných odpovídajících veličin nejčastěji zapříčiňuje rozdíl výsledků získaných simulací oproti výsledkům z experimentálního měření při srovnatelných podmínkách, [9]. Na obr 2-22 je uvedeno schéma obecné plochy a její rozdělení na jednotlivé elementy podle MKP a MKD.



Obr. 2-22 Schéma dělení plochy při uplatnění různých mechanických metod, [9]

2.7.1 Modely tepelných procesů

Klasickou teorii přenosu tepla vedením získáme z Biotovy a Fourierovy hypotézy, podle které je vektor hustoty tepelného toku přímo úměrný teplotnímu gradientu. Tato hypotéza nezahrnuje některé případy a některé vlivy, jako například konečná rychlost šíření tepla nebo dokonalý styk dvou těles o různé teplotě, přesahují její rámec. Z tohoto důvodu je stále intenzivnější snaha najít obecnější matematický model základního zákona vedení tepla. Tento model by měl vycházet z teorie nevratných termodynamických procesů a zahrnovat vlivy nelineárních podmínek, konečné rychlosti atd. Pro svou relativní jednoduchost je klasická fenomenologická teorie vedení tepla a z ní vytvořené matematické modely přenosu tepla vedením v tuhých tělesech výchozím teoretickým předpokladem při formulaci tepelných úloh. Tato teorie se v naprosté většině řešení praktických případů shoduje se skutečností. Další teorií, která přispívá k objasnění tepelných dějů, je teorie tepelné vodivosti, na které je založen popis některých fyzikálních zákonitostí přenosu tepla a jejich analytické řešení.

Podstatou současných výpočtů tepelných procesů jsou modely, které lze rozdělit na abstraktní (*formální*, též „abstraktní matematický model“) a simulační (realizační, realizován technickými prostředky, je-li technickým prostředkem počítač, pak mluvíme o počítačovém modelu např. číslicovém, analogovém nebo hybridním), [9].

Abstraktní matematický model tepelného procesu je sice formální, ale je popisován soustavou matematických vztahů. Rozdělují se na fenomenologické, asymptotické a komplexové. Fenomenologické modely jsou výsledkem přímého pozorování nebo experimentálního zkoumání. Fenomenologickými modely mohou být různé funkční závislosti vyjádřené numericky, analyticky nebo graficky a bývají v diferenciálním nebo integrálním tvaru. Modely komplexové se tvoří vzájemným propojením dílčích podsystémů, [9].

Pod situačním modelem tepelných procesů si představme fyzický model (materiální, předmětový) dynamického systému použitý k simulaci zkoumaného procesu. Jedná se o technický prostředek, na němž se realizuje příslušný abstraktní model, nejčastěji matematický a často se označuje realizačním modelem. Simulační modely dělíme na přirozené, fyzikální, fyzikálně matematické a matematické, představované počítačovými modely. Další hledisko, podle kterého můžeme simulační modely dělit, je charakter procesu na modelu, to je potom dělíme na deterministické a stochastické, [9].

2.7.2 Metody řešení tepelných úloh

Obecně rozeznáváme tři způsoby řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry: analytický, numerický nebo experimentální. Všechny tyto úlohy mohou být deterministické nebo stochastické, [9].

Analytická metoda zprostředkuje získání tepelné úlohy buď ve tvaru matematického výrazu, nebo ve tvaru, kde teplota je funkcí souřadného systému a času. Tyto metody můžeme dále rozdělit na přesné a přibližné. Technické tepelné úlohy patří mezi úlohy přibližné, neboť v nich je každý model pouze přibližné vyjádření skutečnosti. Jako příklad analytické metody můžeme jmenovat metodu separace proměnných (označuje se jako Fourierova metoda), dále např. metodu Greenových funkcí a metodu tepelných potenciálů, metody integrální transformace (Laplaceova a Fourierova), variační metody (Ritzova, Kantorovičova a Biotova) a metody algebrologické (vhodné pro řešení prostorových tvarově složitých tepelných úloh ustálených a neustálených), [9].

Numerické metody jsou dnes převážně využívány v počítačových simulačních výpočtech tepelných dějů mezi odlitkem a slévarenskou formou. Závisí na diskretizaci proměnných, k čemuž přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu, což je zároveň operační vlastnost číslicových počítačů. Numerické metody mají výhodu v tom, že je možné dojít k řešení tepelné úlohy

v konečném počtu diskretních míst (uzlů) zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků, a to buď v celé oblasti, nebo její povrchové části. Příklady numerických metod jsou: metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí a metoda okrajových prvků, [9].

Metoda konečných prvků (MKP, FEM) je založena na principu rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků, tzn. „konečných prvků“, o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranici prvků. Skutečný průběh vyšetřované fyzikální veličiny, resp. teploty uvnitř prvků, aproximujeme při řešení zvolenou funkcí, při tom je nutné, aby tuto funkci jednoznačně určovaly hodnoty veličiny v uzlových bodech. Hodnoty teploty v uzlových bodech jsou pak základní neznámé parametry řešení. Pokud vypočítáme tyto parametry, zároveň určíme průběh fyzikální veličiny v dané oblasti. Při vyšetřování teploty je možno užít řadu postupů, které se budou lišit tím, jak přistupují k řešení základní diferenciální rovnice vedení tepla a volbou dělení sledovaného prostoru na prvky. K dělení prostoru na prvky se používá buď metoda, která využívá Eulerův teorém nebo metoda, která uplatňuje Galerkinův princip. Výhodnější je však užívat metodu konečných prvků, která s sebou nese celou řadu kladů. Například umožňuje aproximovat zakřivený tvar křivkovými prvky, je poměrně snadné vyjádřit oblasti složené s různých anizotropních materiálů, a také vyjádřit okrajové podmínky a jejich nespojitost. Dříve byly nevýhodou vyšší nároky na kapacitu paměti a rychlost počítače, to je však v současné době překonáno, [9].

Metoda konečných diferencí, (MKD, FDM) někdy též metoda sítí, je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami, odpovídající diferenční rovnici, jež má tvar algebraických rovnic. Dokonalost aproximace spočívá v jejím nahrazování derivace přesnějšími výrazy. Náhrada je prováděna v diskretních místech tvořených uzly sítě zahrnujících zkoumanou oblast. Finálním výsledkem algebraických operací je určení teploty v daném uzlu sítě, [9].

Metoda okrajových prvků (MOP) je založena na principu fundamentálního řešení okrajové úlohy. Řešení odpovídá funkci zdroje zadané ve tvaru Diracovy δ – funkce. V tomto případě je možno použít konečné prvky k aproximaci hranice oblasti a integrální rovnice pro vnitřní část rovnice. Tuto metodu můžeme také najít pod názvem metoda okrajových integrálních rovnic nebo hraniční či povrchové prvky. Odlišnost této metody od již zmiňovaných metod spočívá v tom, že není vyžadována diskretizace a určování hodnot teploty v celé oblasti, nýbrž pouze v její okrajové části.

Zároveň však metoda využívá možnosti převedení tepelné úlohy na určitou integrální rovnici, čímž dochází k redukci rozsahu řešené úlohy. Samotné řešení je prováděno buď numericky nebo numericko-analyticky. Okrajová integrální rovnice je nahrazena určitým diskrétním analogem získaným po aproximaci hranice souborem prvků. MOP dále dělíme na *metody přímé* – okrajové integrální rovnice souvisí přímo funkcí mající přímý vztah k teplotě, *metody nepřímé* – je vazba mezi neznámými hustotami rozdělené po okraji nebo jeho části určitých singulárních řešení diferenciálních rovnic úlohy, *metody polopřímé* – okrajová integrální rovnice formulována k některým pomocným funkcím.

Oproti metodě konečných prvků lze touto numerickou metodou řešit trojrozměrné úlohy neohrazených oblastí i rozsáhlé soustavy rovnic, [9].

Experimentální metody fungují díky faktu, že některé fyzikální jevy jsou popsány diferenciálními rovnicemi shodnými s diferenciálními rovnicemi vedení tepla. Příkladem je teplotní pole, které lze modelovat polem elektrickým, teplotám pak odpovídá elektrický potenciál, tepelné vodivosti elektrická vodivost, měrnému tepelnému toku intenzita elektrického proudu atd., [9].

Výhody MKP ve srovnání s MKD:

1. Dovoluje lépe geometricky popsat a vystihnout okrajové podmínky při složitých tvarech integrační oblasti.
2. Využívá místně zjemněné diskretizace ve významných částech řešené oblasti bez zvláštních úprav výpočtového programu.
3. Umožňuje jednodušší použití vyšších typů aproximace hledané funkce s cílem zvýšení přesnosti řešení, [9].

2.7.3 Magma

Simulační program Magma, dříve označovaný Magma soft, dnes je používána jeho verze, která je označovaná MAGMA 5. Software MAGMA je komplexní německý slévárenský software pro simulační výpočty pro utváření odlitků ve slévárenských formách. Řadí se k modulárním simulačním programům a v současné době je jedním z nejpoužívanějších slévárenských simulačních programů. Je složen z jednotlivých výpočetních modulů a určen především pro výpočet tuhnutí odlitků se zahrnutím plnění slévárenské formy. Software funguje na základě metody konečných diferencí (FDM), uplatňuje CAD systém a pracuje ve 3D. Z toho vyplývá, že v něm můžeme zobrazit dynamiku tečení taveniny, tuhnutí a chladnutí odlitku ve slévárenské formě,

zbytkové pnutí, strukturu odlitku i stanovení staženin a ředin v odlitku. Obsahuje samostatné výpočtové moduly pro litiny i pro oceli a bohatou databanku údajů nutných k výpočtům. Program je založen na reálných fyzikálních základech proudění tekutiny a na sdílení tepla, [9].

Tento programový soubor je aplikovatelný do všech procesů lití, od masivních litinových a ocelových odlitků litých gravitačně do pískových forem až po tvarově komplikované odlitky ze slitin hliníku odlévané vysokotlakým způsobem. Tímto softwarem je možné simulovat slévárenské procesy v běžných slévárenských formách, [9].

Dříve v propagačních materiálech firmy MAGMA Gießereitechnologie GmbH Aachen byly uváděny tyto moduly.

Magma project – modul řídicí správu jednotlivých projektů, jejich verzí, zpřístupnění výsledků a získání celkové informace o výsledku simulačního výpočtu.

Magma pre – procesor (interní modelář) vyvinut pro modelování třírozměrného objemového tělesa. Obsahuje efektivní funkce k modelování i velmi složitých těles ve vytvářené slévárenské technologii. Umožňuje načtení CAD dat z většiny systémů.

Magma mesh – automatický generátor sítě objemových elementů dle metody FDM, výjimečným způsobem jednoduchého modifikování geometrie bez ztráty kvality sítě, současně s tím umožňuje provádění libovolného množství úprav slévárenské technologie.

Magma fill – určen pro simulaci plnění formy taveninou. Vyvinut pro optimalizaci vtokové soustavy, odhad eroze formy, výpočet doby plnění formy, sledování proudění a míst vzniku turbulence, sledování tlaku a teploty v tavenině a výpočet rychlosti proudění kovu v jednotlivých částech systému.

Magma iron – modul obsahující pro odhad tuhnutí, resp. struktury slitin na bázi železa, včetně výsledných mechanických vlastností. Výpočty lze provádět i na očkovaných a modifikovaných slitinách, a to i za předpokladu, že hlavní složky mají vliv na průběh tuhnutí a segregaci. Lze v něm stanovit rozložení obsahu feritu a perlitu, popř. vznik makrostaženin.

Magma solid – určen pro řešení teplotního toku taveniny ve formě, kde využívá tepelně proměnných vlastností taveniny a umožňuje sběr informací o zaplnění a porezitě ve formě. Co se týče výpočtu tuhnutí taveniny, vychází z teplotního pole při stoprocentním zaplnění dutiny formy. Dále řeší dobu tuhnutí jednotlivých oblastí

odlitku, teplotní gradienty odlitku, teplotní zatížení formy včetně jader, křivky chladnutí pro libovolnou oblast odlitku a umístění nálitků a chladítek.

Magma post – modul analyzující výsledky simulace. Výsledky analýzy jsou prezentovány v třírozměrném barevném rozložení, tedy např. rychlost a čas plnění formy taveninou, vektory směru a rychlosti proudění taveniny v dutině formy, čas lokálního plnění formy, makro a mikrostaženiny, křivky chladnutí, funkce nálitku atd.

Magma stress – modul sestrojený k výpočtům zbytkových pnutí v odlitku. Řeší rozložení napětí odlitku, deformace odlitku atd.

Magma batch – modul zabývající se problematikou lití v cyklech do trvalých forem.

Magma data – databáze materiálu, které program obvykle užívá. Obsahuje odpovídající tepelně-fyzikální veličiny.

Magma hpdc – modul k simulačním výpočtům vysokotlakého lití, zároveň zahrnuje vliv specifických podmínek. Při simulaci tohoto způsobu odlévání jsou zohledněny jednotlivé etapy výrobního procesu, jako plnění licí komory, pohyb pístu a samotné plnění dutiny formy. Při tlakovém lití máme možnost užití celé řady strojů pro vysokotlaké lití. Simulace je určena pro libovolný počet cyklů tlakového stroje, zahrnuje definici jednotlivých částí formy a umožňuje zohlednit otevření a uzavření formy v závislosti na čase, použití nástřiku formy. Současně lze zahrnout použití různých tlaků pro jednotlivé kroky procesu. Funkce simulačního výpočtu umožňuje získání informací o optimálním pracovním cyklu.

Magma lpdc – modul simulačního výpočtu nízkotlakého lití. Lze do něj podrobně obsáhnout technologické podmínky, a to včetně proměnného tlaku plnění. Simulace umožňuje zahrnout: počet licích cyklů, kontrolu chladících kanálů, optimalizaci podmínek plnění, určení času pro vyjmutí odlitku z formy a optimálního času celého pracovního cyklu. Současně lze jeho pomocí zjistit teplotní namáhání jader.

Magma disa – modul pro simulační výpočet formování na strojích Disamatic, umožňuje následné lití s ohledem na tepelný tok ve formě a s tím i další specifické okrajové podmínky této produktivní technologie. Modul zprostředkovává údaje o simulaci procesu a optimalizaci stroje. Taktéž je schopen stanovit ideální dobu pro vytlučení odlitku z formy a monitorovat procesy jako je oběh formovací směsi (i její tepelnou kapacitu), průběh ochlazování směsi v chladícím bubnu atd., [9].

2.8 Vtoková soustava pískových forem

Pro výpočet hlavních rozměrů řídicích kanálů vtokové soustavy je rozhodující plocha všech zářezů. Výpočet je však závislý ještě na dalších parametrech, které je nutno nejdříve určit:

Doba lití – je určena pro menší odlitky vztahem:

$$t_{lití} = a \cdot \sqrt{m_o} \text{ [s]}, \quad (11)$$

kde značí: a – součinitel závislejší na tloušťce stěny odlitku a na druhu odlévaného materiálu

m_o – hmotnost odlitku [kg].

V tabulce 2-4 jsou uvedeny hodnoty součinitele a .

Tabulka 2-4 Hodnoty součinitele „ a “ závislejší na tloušťce stěny a materiálu odlitku

Odlévaný materiál	Hodnota součinitele „ a “ pro určitou tloušťku odlitku [mm]						
	3 – 4	5 – 6	7 – 9	9 – 14	15 – 20	21 – 40	40 <
Slitiny hliníku	1,90	1,94	1,98	2,05	2,20	2,30	2,40
Slitiny mědi	1,13	1,15	1,17	1,21	1,26	1,34	1,50
LKG (tvárná litina)	1,14	1,22	1,33	1,47	–	–	–
Litina bílá	1,63	1,77	1,95	2,20	–	–	–
LLG (litina šedá)	1,71	1,93	2,14	2,35	–	–	–
Ocel	–	1,35	–	–	–	–	–

Stanovení účinné výšky vtokové soustavy $H_{\dot{u}}$ – pro určení této výšky se používá tento univerzální vztah:

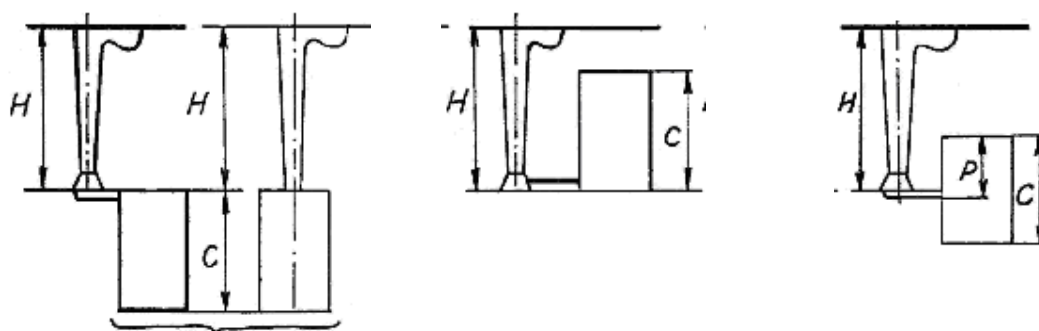
$$H_{\dot{u}} = H - \left(\frac{P^2}{2C}\right); \text{ res. } H_{\dot{u}} = \left(\frac{(2 \cdot H \cdot C - P^2)}{2C}\right) \quad (12)$$

kde značí: H – celkovou výšku vtokové soustavy (včetně licí jamky, licího kůlu a struskováku) [m];

C – výšku odlitku [m];

P – vzdálenost zářezů od horní části dutiny formy [m].

Na obr. 2-23 jsou uvedeny polohy zaústění zářezů do dutiny formy (resp. do odlitku).



a) horní vtok

$$H_{\dot{u}} = H$$

b) spodní vtok

$$H_{\dot{u}} = H - \frac{C}{2}$$

c) střední vtok

$$H_{\dot{u}} = H - \frac{P^2}{2C}$$

Obr. 2-23 Schéma zabudování vtokové soustavy do formy a určení účinné výšky vtokové soustavy $H_{\dot{u}}$

Z obr. 2-2 jsou patrné podmínky konstrukce vtokové soustavy při uplatnění různých vtoků:

a) horní vtok, $P = 0$; $H_{\dot{u}} = H$;

b) střední vtok, $P \neq 0$; $H_{\dot{u}} = H - \left(\frac{P^2}{2C}\right)$;

c) spodní vtok, $P = C$; $H_{\dot{u}} = H - \frac{C}{2}$.

Určení součinitele celkových hydraulických ztrát (μ):

Ve většině případů je součinitel $\mu = 0,4$ až $0,7$, závisí na mnoho činitelích:

- a) složitosti vtokové soustavy;
- b) charakteru místních odporů;
- c) počtu změn směru proudění;
- d) na složitosti kanálů vtokové soustavy.

V tabulce 2-5 jsou uvedeny hodnoty součinitele μ pro odlévaný materiál – litinu, která je lita do pískové vysušené nebo syrové formy pro odlitky drobné, střední a velké.

Tabulka 2-5 Hodnoty součinitele hydraulických ztrát vtokové soustavy μ

Druh odlitku	Odlévaný materiál			
	Součinitel hydraulických ztrát μ			
	LLG		Ocel	
	sušená forma	syrová forma	sušená forma	syrová forma
Drobné odlitky	0,60	0,50	0,50	0,42
Střední odlitky	0,48	0,42	0,38	0,32
Velké odlitky	0,41	0,35	0,30	0,25

Určení průřezu řídicího kanálu vtokové soustavy – tj. součet průřezu zářezů ΣS_Z

Pro stanovení celkového průřezu zářezů existují různé vztahy, často je používán tento:

$$\Sigma S_Z = \frac{m_O}{\mu \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_U} \cdot t}, [\text{m}^2], \quad (13)$$

kde značí: μ – součinitel hydraulických ztrát (odlévání litiny do bentonitové formy

$$\mu = 0,42);$$

m_O – hmotnost odlitku [kg];

ρ – hustotu odlévané taveniny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

t – čas plnění dutiny formy taveninou [s];

H_U – účinnou vtokové soustavy [m].

Určení průřezu dalších částí vtokové soustavy (průřezu jednotlivých zářezů, struskováku a licího kůlu) – vycházíme na základě zvoleného poměru

$$S_Z : S_S : S_K = 1 : 1,2 : 1,4 \quad (14)$$

Stanovení plochy jednoho zářezu – je třeba zvolit počet zářezů v tomto případě se vychází ze zkušeností. Pro velmi malý odlitek (od 0,5 až 1 kg) stačí 1 zářez. Pro odlitky od 2 až do 10 kg by měly postačit zářezy 2 a u odlitku o hmotnosti přibližně 50 kg jsou vhodné již zářezy 4,

$$S_Z = \frac{\Sigma S_Z}{n} \quad (15)$$

kde značí: n – počet zářezů.

Stanovení rozměrů zářezů – nejčastěji mívají tvar obdélníku, lichoběžníku, trojúhelníku nebo kruhové výseče.

1. trojúhelníkový průřez zářezu: $S_Z = 6 \cdot a^2 [\text{mm}^2]$

2. lichoběžníkový průřez zářezů: $S_Z = 3,15 \cdot a^2$ [mm^2]

3. kruhová výseč: $S_Z = 2,85 \cdot a^2$; [mm^2]

4. obdélníkový průřez zářezů: $S_Z = 3,5 \cdot a^2$ [mm^2]

Stanovení velikosti struskováku – Struskovák je lichoběžníkového průřezu, s kratší stranou nahoře o rozměru $0,8 \cdot a$, s delší stranou a , výškou $1,4 \cdot a$.

$$S_S = 1,2 \cdot \sum S_Z; a = \sqrt{\frac{S_S}{1,26}} \text{ [mm]}. \quad (16)$$

Stanovení průřezu licího kůlu – který ústí do struskováku $S_K = 1,4 \cdot \sum S_Z$, [4].
.Předpokládáme kruhový průřez. Průměr kůlu se určí pomocí tohoto vztahu:

$$d_K = \sqrt{\frac{4 \cdot S_K}{\pi}}; \text{ [mm]} \quad (17)$$

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem experimentální části této diplomové práce je návrh odlitku odvětrávaného a neodvětrávaného brzdového kotouče z litiny s lupínkovým grafitem pro osobní automobily s následným simulačním výpočtem jejich tuhnutí a chladnutí. Tento návrh byl prováděn na základě zkušeností výroby brzdových kotoučů, kterému se dlouhá léta věnují pracovníci Katedry strojírenské metalurgie TU v Liberci. Též byl využit simulační program MAGMA 5, který je k dispozici na pracovišti.

Experimenty a výpočtové metody, které byly provedeny v rámci této práce, jsou rozděleny na 2 hlavní etapy řešení: příprava technické dokumentace obou brzdových kotoučů a simulační výpočet tuhnutí a chladnutí těchto kotoučů, včetně porovnání získaných výsledků.

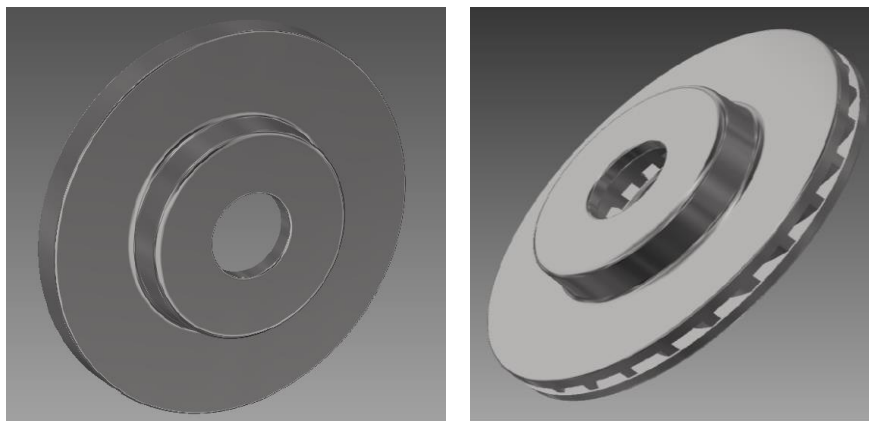
3.1 Příprava technické dokumentace

Brzdové kotouče, které byly navrženy pro řešení této část diplomové práce, byly graficky navrženy pomocí počítačového software Autodesk Inventor professional 2015. Rozměry kotoučů byly stanoveny na základě výkresové dokumentace, viz příloha 1 a 2.

Nejdříve byl graficky pomocí software Autodesk Inventor professional 2015 znázorněn neodvětrávaný kotouč, který je z hlediska modelování jednodušší než odvětrávaný kotouč. V tomto případě se začalo s načrtnutím základního tvaru (průměru) neodvětrávaného kotouče, následovalo vysunutí. V další části se jednalo o vytvoření skici a její vytažení tzv. prstence, který je umístěn na základním tvaru a má tvar komolého kužele kvůli lepšího vydávání jádra z rámu formy. Předposlední operace, která se prováděla, byla vysunutí díry do prstence a základního tvaru brzdového kotouče, aby byla docílena průchodnost mezi těmito částmi brzdového kotouče a mohl se brzdový kotouč uchytit do ramen automobilu. V poslední řadě se provádělo zkosení všech ostrých hran na tomto odlévaném kotouči. Všechny tyto rozměry byly zvětšeny o technologický přídavek na obrábění. Na obr. 3-1 jsou znázorněny navržené brzdové kotouče.

Dále následovalo vymodelování tvaru odvětrávaného brzdového kotouče. V tomto případě se začalo s vysunutím tzv. prstence, který má taktéž tvar komolého kužele. Na tento prstenec následovalo vymodelování základního tvaru odvětrávaného brzdového kotouče. Tento základní tvar je ovšem užší než u neodvětrávaného brzdového kotouče, protože brzdná část kotouč se skládá ze tří částí. Z dvou základních tvarů a žeber. Po

vysunutí základního tvaru následuje na tento tvar vytvoření žeber a jejich vytažení. Celkem těchto žeber je po obvodu brzdového kotouče dvacet šest. Na žebra následuje další základní část brzdového kotouče. V další části byla vysunuta díra pro uchycení kotouče do ramen automobilu. Na závěr byly znovu zkoseny všechny ostré hrany a rozměry taktéž byly zvětšeny o technologický přídavek na obrábění. Tento brzdový kotouč je znázorněn na obr. 3-1 vpravo. Takto připravená geometrie obou brzdových kotoučů byla uplatněna při numerické simulačním výpočtu, plnění formy taveninou, tuhnutí a chladnutí odlitků kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem, viz kapitola 3.2.

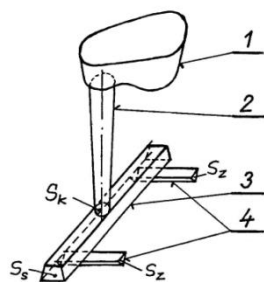


Obr. 3-1 Neodvětrávaný a odvětrávaný brzdový kotouč z litiny s lupínkovým grafitem

3.1.1 Návrh a výpočet vtokové soustavy pískové slévárenské formy

Pro numerický simulační výpočet je vedle tvarů kotoučů nutno ještě stanovení základních rozměrů vtokové soustavy, včetně návrhu licí jamky. Dále připojení vtokové soustavy, resp. zářezů k dutině slévárenské formy. Nedílnou součástí byla i volba velikosti formovacího rámu a situování vtokové soustavy do tohoto rámu v souvislosti s volbou počtu a polohy dutin slévárenské formy.

Při návrhu vtokové soustavy bylo dbáno na dodržení hlavních zásad, kterými se vtoková soustava pro bentonitovou pískovou formu musí vyznačovat. Pro odlévání litiny s lupínkovým grafitem se používá vtoková soustava s licí jamkou. Na obr. 3-2 je schéma vtokové soustavy.



- 1 – vtoková (licí) jamka
- 2 – svislý vtokový kanál
- 3 – vodorovný kanál – struskovák
- 4 – zářezy

Obr. 3-2 Schéma vtokové soustavy pro odlévání odlitků z litiny s lupínkovým grafitem

Současně při návrhu vtokové soustavy bylo přihlédnuto k tomu, aby zajišťovala tyto náležitosti: rovnoměrné a stálé rozvádění tekutého kovu do určitých míst dutiny formy bez turbulencí a nasávání vzduchu; zabezpečovala zachycení strusky a jiných nečistot, které by mohly vniknout do dutiny formy současně s taveninou; regulovala teplotního pole soustavy odlitek. Dále řešení návrhu vtokové soustavy se vycházelo z jejich přetlakových poměrů (byla volena přetlaková vtoková soustava). Poměr mezi plochou zářezů, plochou struskováku a plochou svislého kanálu lze pro litinové odlitky volit takto:

$$S_z : S_s : S_k = 1 : 1,2 : 1,4 \quad (18)$$

kde značí: S_z – plochu všech zářezů;
 S_s – plochu struskováku;
 S_k – plochu svislého kanálu (licího kůlu).

Konstrukce licí jamky byla navržena s ohledem na svůj účel, kde musí zachycovat náraz proudu odlévané taveniny a současně zabezpečovat odstruskovací účinek. Vnitřní tvar licí jamky byl volen mírně zaoblený, aby se to tohoto místa mohla vlévat tavenina a mohlo nastávat její víření, které zabraňuje k minimalizaci proniknutí strusky dále do svislého kanálu. Pro stanovení objemu licí jamky lze využít tuto rovnici:

$$V_{jamky} = \frac{m_{O\ sur}}{t} \cdot \vartheta, \quad (19)$$

kde značí: $m_{O\ sur}$ – hmotnost surového odlitku;
 t – čas plnění formy;
 ϑ – součinitel závislý na velikosti odlitku (20 kg odlitek, $\vartheta = 1.5$).

Svislý kanál (licí kůl) svou konstrukcí zabezpečuje klidné a rovnoměrné proudění taveniny do spodních partií vtokové soustavy. Nesmí způsobovat přísávání plynů z formy do vtokové soustavy. Je to kanál, který vede taveninu od licí jamky do struskováku. Jeho tvar odpovídá hyperboloidu 4°. Ve slévárenské praxi se nahrazuje kuželovitostí 2. – 4°.

Struskovák (lapač strusky) je rozváděcí kanál, který má zadržet případné částice strusky, aby se struska nedostala do dutiny formy. Průřez struskováku bývá lichoběžníkového průřezu, kde převládá výška lichoběžníka nad délkou spodní podstavy.

Konstrukce zářezů je nejdůležitější z celého návrhu vtokové soustavy. Pomocí vtokových zářezů ústí tavenina do dutiny formy. Vtokové zářezy jsou v podstatě rozhodujícím průřezem vtokové soustavy. Obvykle se umísťují do dělicí roviny. Pro konstrukci této vtokové soustavy byly voleny zářezy obdélníkového průřezu. Také bylo dbáno na umístění zářezů vůči struskováku tak, aby se nedostávala struska do dutiny slévárenské formy.

Pro stanovení celkového průřezu zářezů lze použít tuto rovnici:

$$\sum S_z = \frac{m_o}{\mu \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\dot{U}} \cdot t}}, \quad (20)$$

kde značí: μ – součinitel hydraulických ztrát (odlévání litiny do bentonitové formy

$$\mu = 0,42)$$

m_o – hmotnost odlitku [kg];

ρ – hustotu odlévané taveniny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

t – čas plnění dutiny formy taveninou [s]

$H_{\dot{U}}$ – účinnou vtokové soustavy [m].

3.1.1.1 Výpočet hlavních rozměrů vtokové soustavy

Doba lití

$$t_{lití} = a \cdot \sqrt{m_o} = 2,35 \cdot \sqrt{15} = 9,1s$$

Stanovení účinné výšky vtokové soustavy $H_{\dot{U}}$ – v našem případě se počítá se spodním tokem.

$$H_{\dot{U}} = H - \frac{C}{2} = 300 - \frac{55}{2} = 272,5mm$$

Určení průřezu řídicího kanálu vtokové soustavy

$$\sum S_Z = \frac{m_o}{\mu \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\dot{U}} \cdot t}} = \frac{15}{0,42 \cdot 7200 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2725 \cdot 9,1}} = 2,357 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Stanovení plochy jednoho zářezu

$$S_Z = \frac{\sum S_Z}{n} = \frac{2,357 \cdot 10^{-4}}{2} = 1,178 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Stanovení velikosti struskováku

$$S_S = 1,2 \cdot \sum S_Z = 1,2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} = 2,828 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Stanovení průřezu licího kúlu

$$d_K = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,4 \cdot S_Z}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}}{\pi}} = 0,02 \text{ m}$$

Stanovení objemu licí jamky

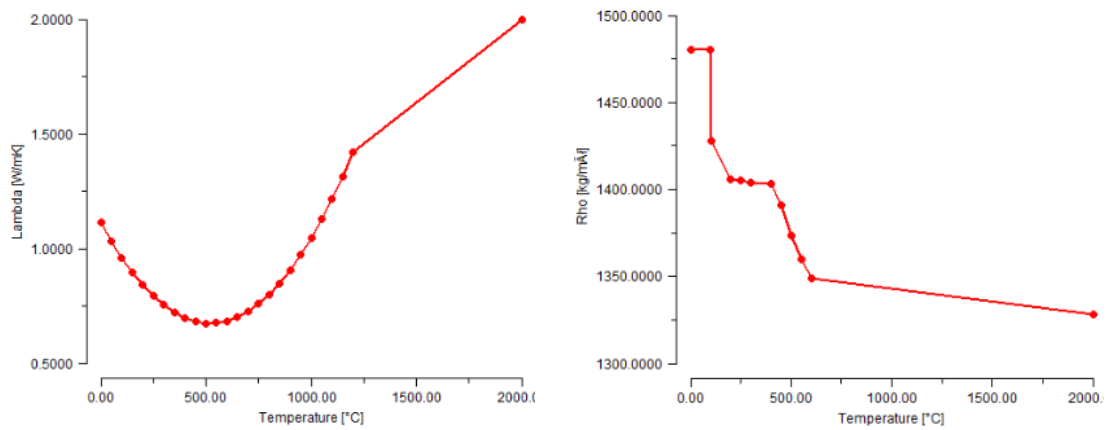
Lze ho stanovit empirickým výpočtem, dle různých veličin, jako např.:

$$V_{jamky} = \frac{m_{o\ sur}}{t} \cdot \vartheta.$$

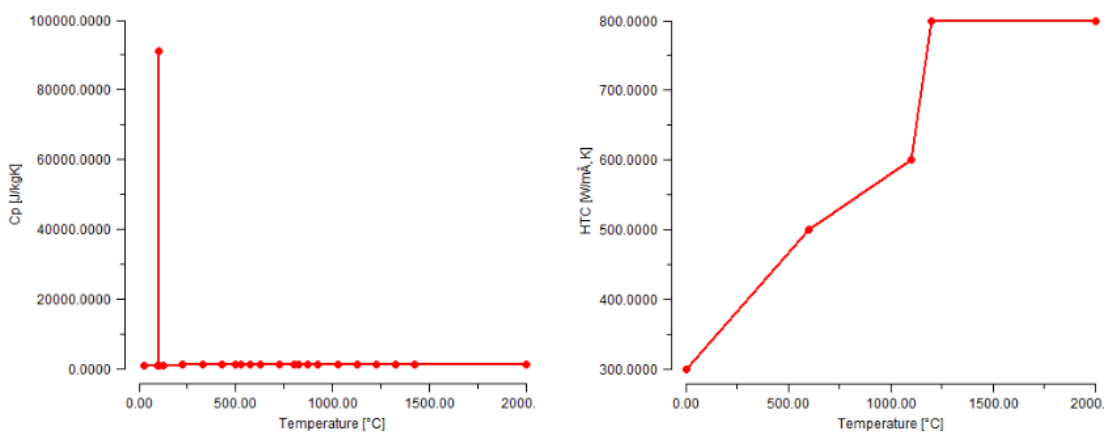
Objem vtokové jamky byl stanoven pomocí údajů z programu Autodesk Inventor professional 2015, objem jamky činí $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$.

3.2 Simulační výpočet tuhnutí a chladnutí odlitků brzdových kotoučů

Numerický simulační výpočet plnění formy taveninou, tuhnutí a chladnutí dvou typů brzdových kotoučů byl prováděn pomocí simulačního software MAGMA 5. Byl předpoklad, že kotouče jsou odlévány gravitačně do pískových bentonitových forem. Jádra byla volena na bázi furanové směsi. Pro simulační výpočty byly vybrány teplotní závislosti odpovídající termo-fyzikálních veličin pro bentonitovou formu, teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti, teplotní závislost hustoty bentonitové formy, viz obr. 3-3, teplotní závislost měrné tepelné kapacity a teplotní závislost součinitele přestupu tepla bentonitové formy, viz obr. 3-4.

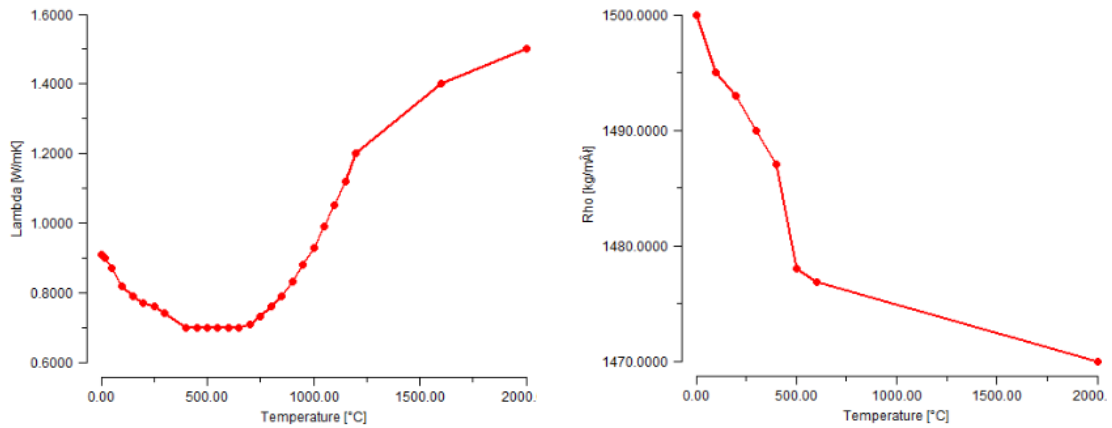


Obr. 3-3 Teplotní závislost tepelné vodivosti a teplotní závislost hustoty bentonitové formy, [12]

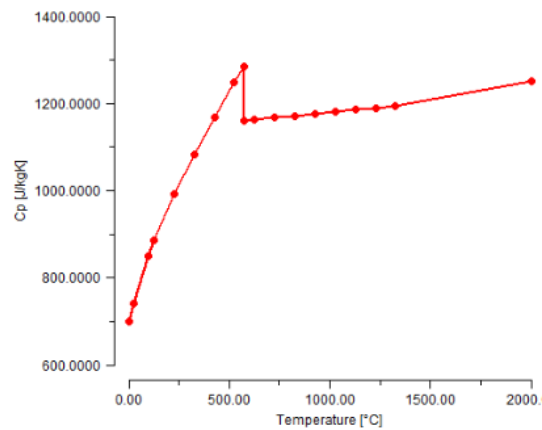


Obr. 3-4 Teplotní závislost měrné tepelné kapacity a teplotní závislost součinitele přestupu tepla bentonitové formy, [12]

Dále byly zvoleny odpovídající tepelně fyzikální veličiny pro materiál slévárenských jader pro výrobu odvětrávané části kotouče, v tomto případě bylo navrženo jádro s furanovou pryskyřicí a kulatým křemenným ostřivem. Na obr. 3-5 je uvedena teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti a teplotní závislost hustoty furanové směsi. Na obr. 3-6 je uvedena teplotní závislost měrné tepelné kapacity. Zrna ostřiva pro výrobu jader činila $d_{50} = 240 \mu\text{m}$.



Obr. 3-5 Teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti a teplotní závislost hustoty furanové směsi, [12]

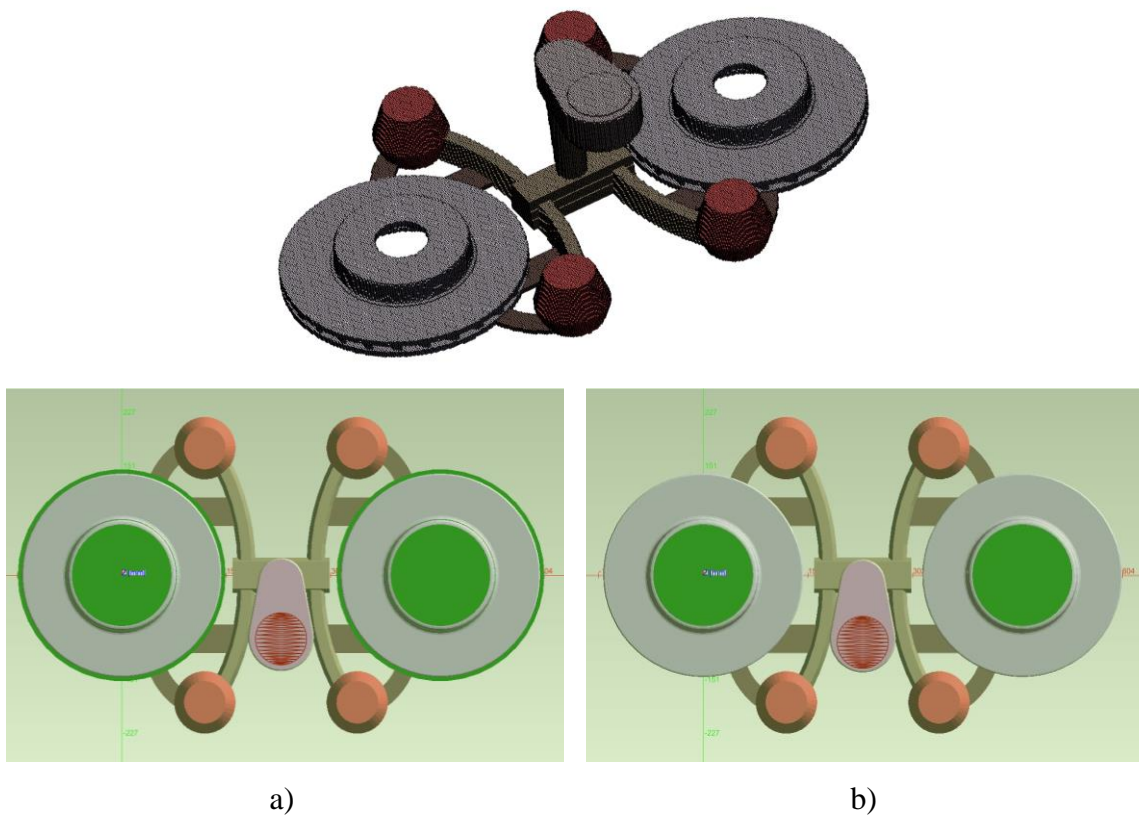


Obr. 3-6 Teplotní závislost měrné tepelné kapacity furanové směsi, [12]

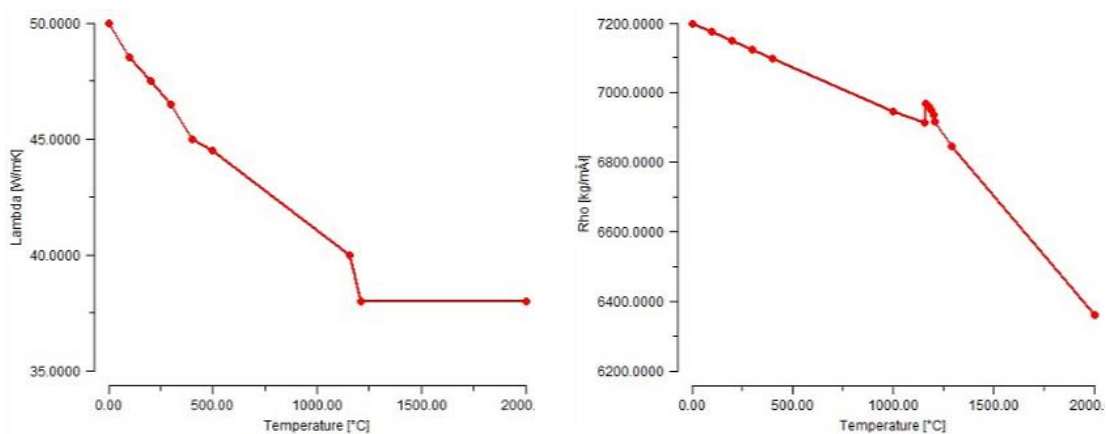
Současně byly vybrány také odpovídající hodnoty teplotních závislostí tepelně fyzikálních veličin použité litiny s lupínkovým grafitem. Na obr. 3-7 je uvedena teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti a teplotní závislost hustoty odlévané litiny s lupínkovým grafitem. Na obr. 3-8 je uvedena teplotní závislost měrné tepelné kapacity a teplotní závislost viskozity litiny s lupínkovým grafitem.

Vlastní simulační výpočet byl proveden na základě vložení geometrie, příslušného brzdového kotouče. Byl řešen brzdový kotouč neodvětrávaný a brzdový kotouč odvětrávaný. Na obr. 3-9 je uvedeno situování obou kotoučů ve slévárenské formě, včetně návrhu tvaru vtokové soustavy kotouče, vlevo je odvětrávaný a vpravo neodvětrávaný kotouč.

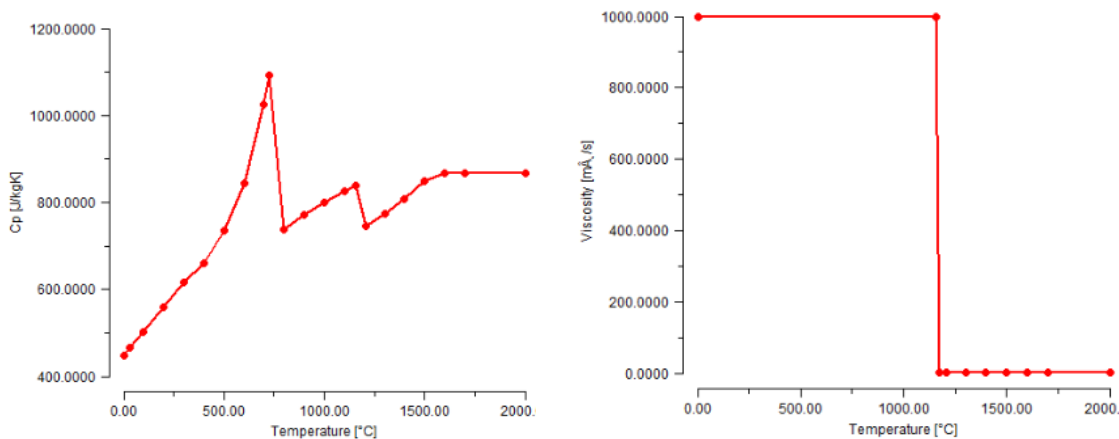
Dále, na základě volby odpovídajících tepelně fyzikálních veličin závislých na teplotě, byl proveden příslušný numerický simulační výpočet plnění dutiny slévárenské formy taveninou, a tuhnutí a chladnutí odlitků příslušných brzdových kotoučů.



Obr. 3-7 Simulační síť a situování obou typů kotoučů ve slévarenské formě,
a) odvětrávaný kotouč, b) neodvětrávaný kotouč



Obr. 3-8 Teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti a teplotní závislost hustoty odlévané litiny s lupinkovým grafitem, [12]



Obr. 3-9 Teplotní závislost měrné tepelné kapacity a teplotní závislost viskozity litiny s lupínkovým grafitem, [12]

V následující části diplomové práce jsou uvedeny výsledky numerických simulačních výpočtů. Tyto výsledky lze rozdělit do dvou skupin - *plnění slévárenské formy taveninou a průběhy tuhnutí a chladnutí litinových odlitků*. V průběhu plnění formy taveninou byly sledovány teploty taveniny, rychlost tečení taveniny do dutiny slévárenské formy. V průběhu tuhnutí a chladnutí odlitků byly sledovány teploty při tuhnutí a chladnutí v různých místech odlitku a v různých časových intervalech.

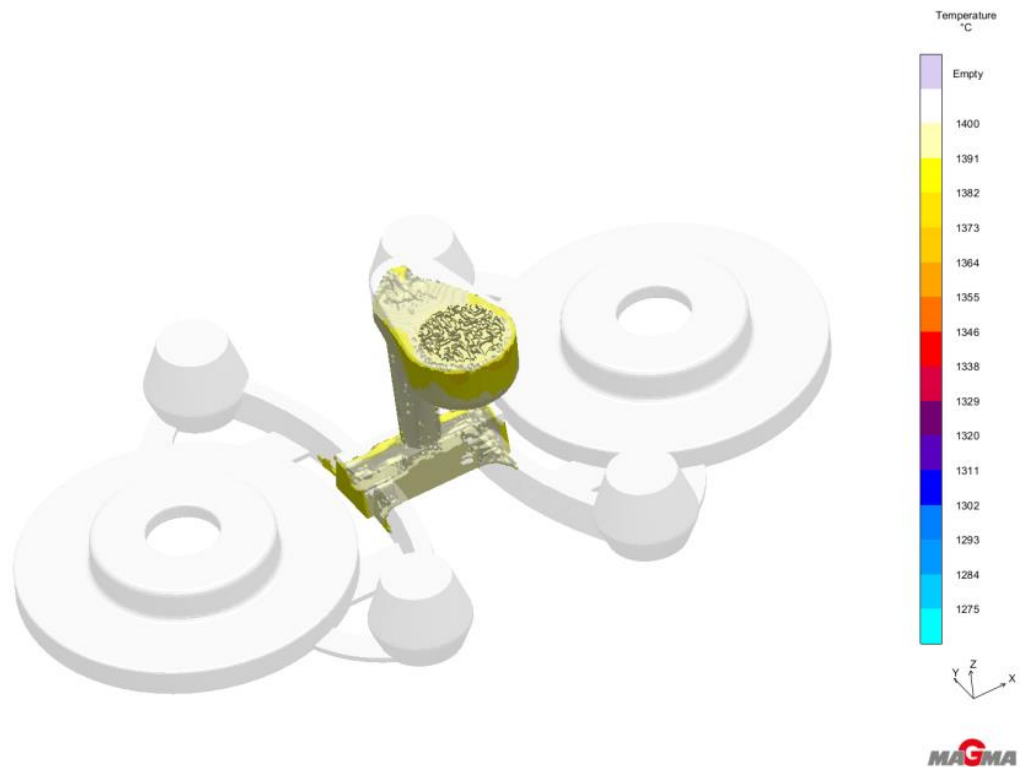
3.2.1 Vyhodnocení numerických výpočtů plnění slévárenské formy taveninou při výrobě neodvětrávaných a odvětrávaných brzdových kotoučů

Plnění slévárenské formy taveninou – rozložení teplot v tavenině

Na obr. 3-10 a 3-11 je uvedeno plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 1 s. Teplota lití taveniny byla u obou případů 1 400 °C. Z obr. 3-10 a 3-11 je zřejmé, že po nalití taveniny do formy její teplota klesá. V čase 1 s v průběhu lití tato teplota dosahuje cca 1 382 °C. Z obr. 3-9 a 3-10 je také patrné, že se zatím naplňuje pouze vtoková soustava.

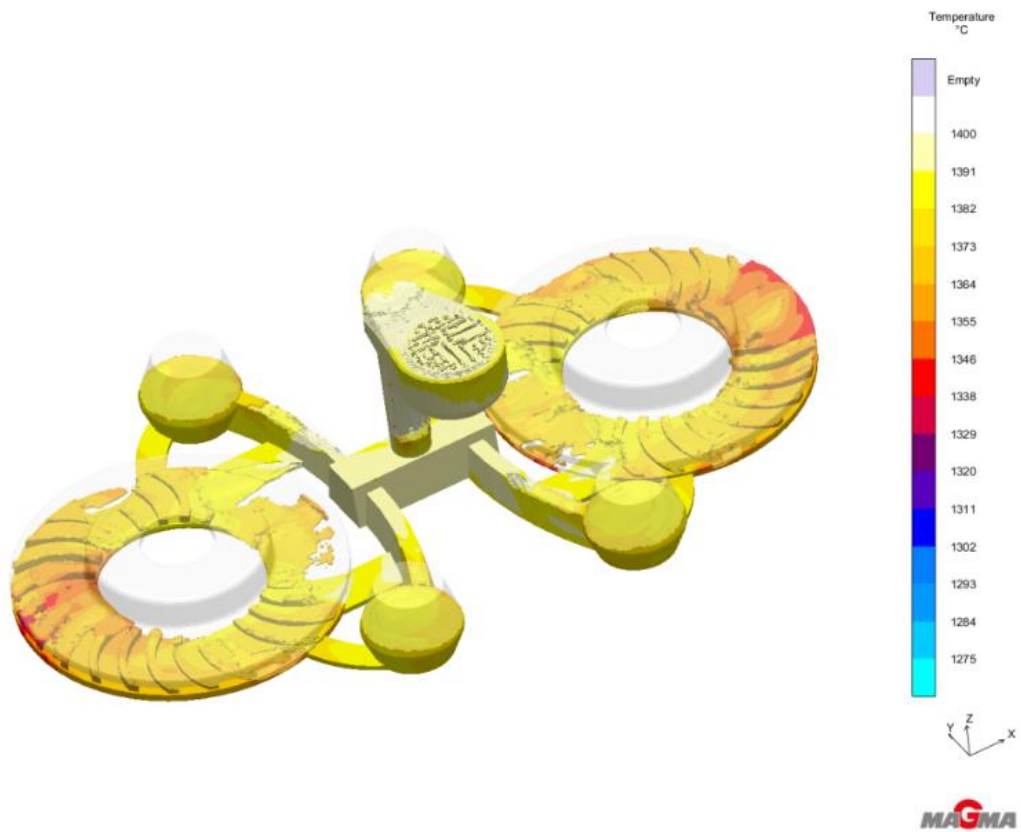


Obr. 3-10 Plnění slévárenské formy při výrobě odvětrávaného brzdového kotouče v čase 1 s po začátku odlévání

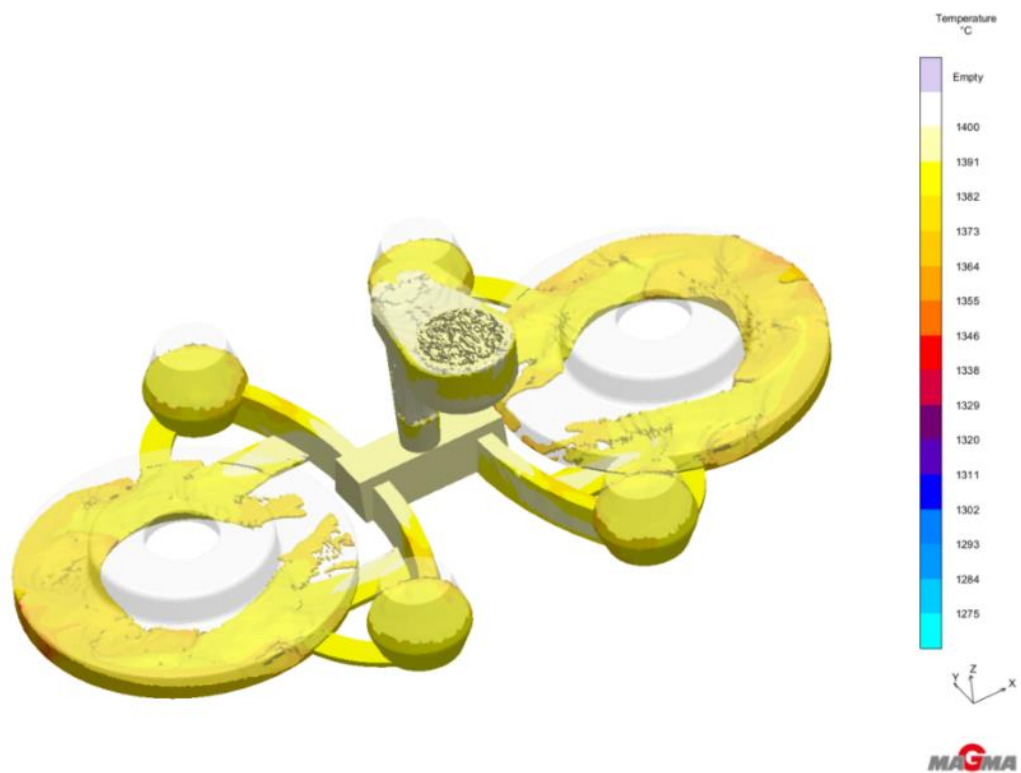


Obr. 3-11 Plnění slévárenské formy při výrobě neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 1 s po začátku odlévání

Na obr. 3-12 a 3-13 je uvedeno plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 5 s. Dutina slévárenské formy odvětrávaného kotouče ještě není zcela zaplněna taveninou. Teplota taveniny v kotoučích se pohybuje cca od 1 373 °C do 1 346 °C. Naopak, u neodvětrávaného kotouče je dutina slévárenské formy zaplňována taveninou o teplotě cca 1 373 °C. Též dutina kotouče není zcela zaplněna taveninou, viz obr. 3-13.

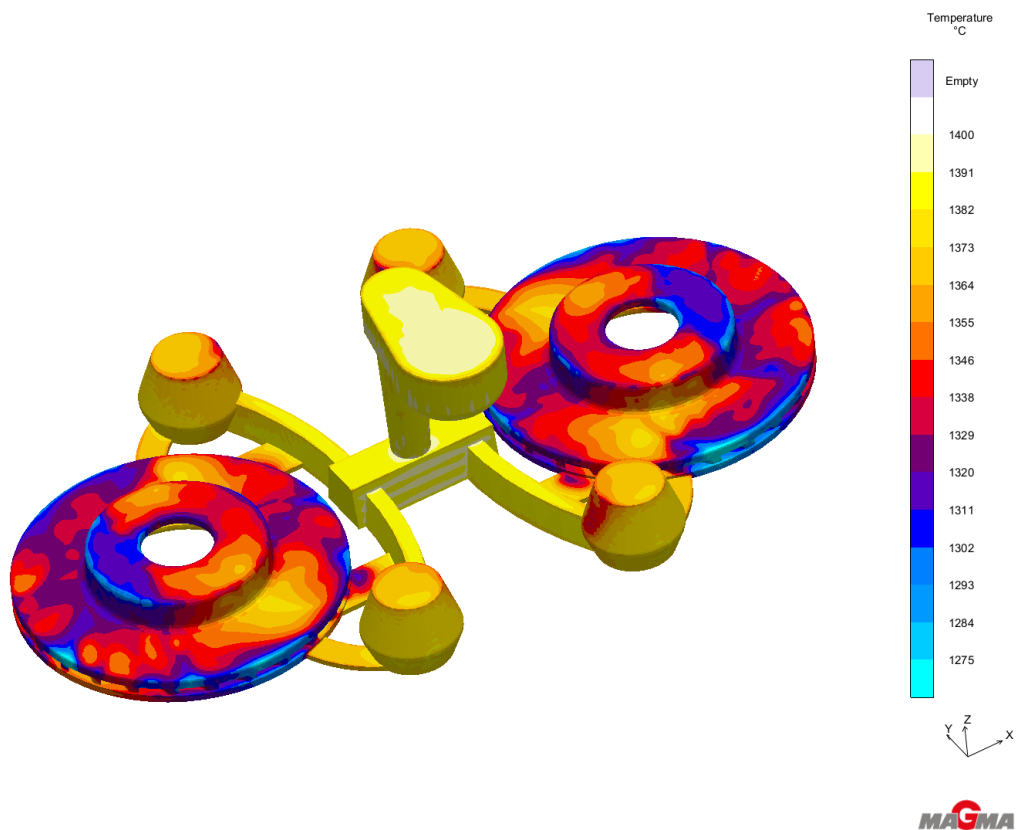


Obr. 3-12 Plnění slévárenské formy při výrobě odvětrávaného brzdového kotouče v čase 5 s po začátku odlévání

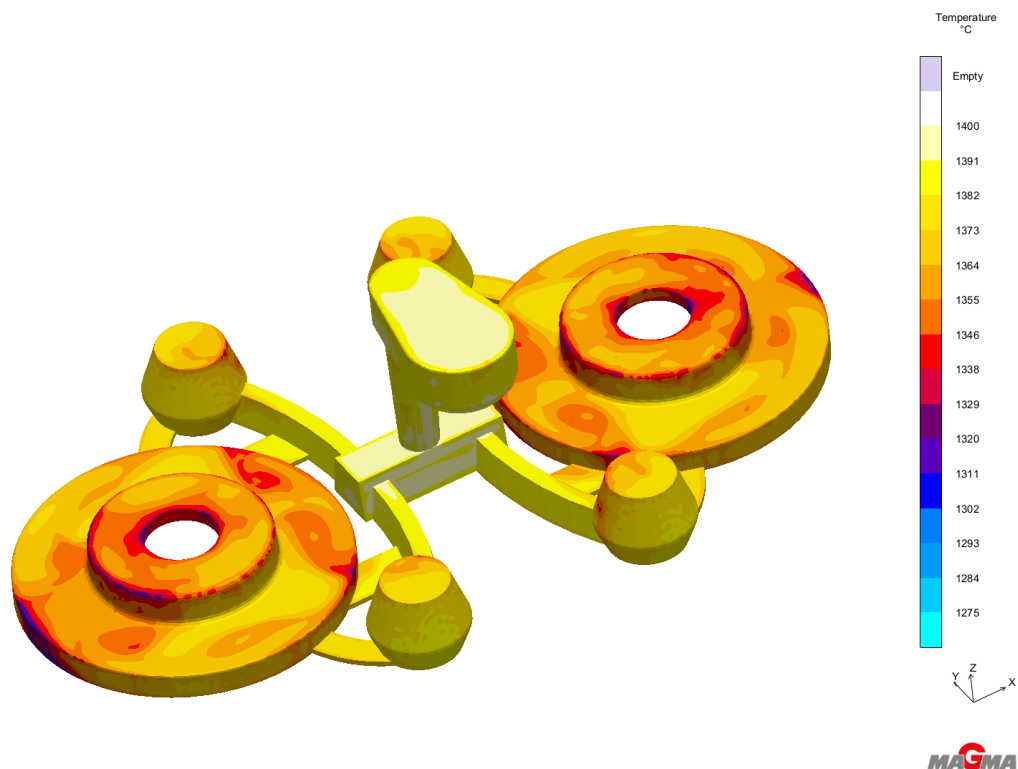


Obr. 3-13 Plnění slévárenské formy při výrobě neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 5 s po začátku odlévání

Na obr. 3-14 a 3-15 je uvedeno plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 10 s. To je čas, který byl předpokládán pro dobu lití. Dutina slévárenské formy odvětrávaného kotouče je zcela zaplněna taveninou. Teplota taveniny v kotoučích v blízkosti zářezů se pohybuje cca od 1 373 °C do 1 364 °C. Ve vzdálenějších partiích od zářezů jsou teploty nižší, cca 1 346 až 1 311 °C. Ojediněle na některých hranách kotouče je teplota pod 1 310 °C. Teploty pro neodvětrávaný kotouč jsou vyšší, pohybují se od 1 373 °C do 1 346 °C. Ojediněle na odlehlých hranách od vtokové soustavy je teplota 1 311 °C.



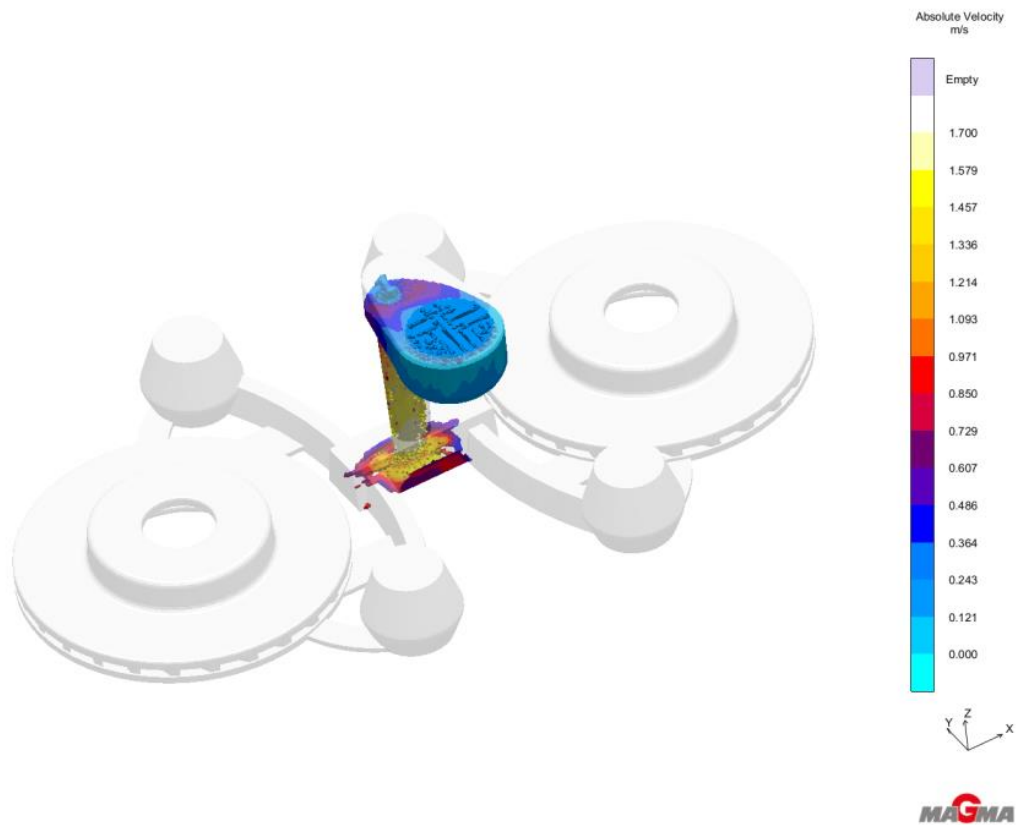
Obr. 3-14 Plnění slévárenské formy při výrobě odvětrávaného brzdového kotouče v čase 10 s po začátku odlévání



Obr. 3-15 Plnění slévárenské formy při výrobě neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 10 s po začátku odlévání

Plnění slévárenské formy taveninou – rychlost plnění, procenta zaplnění dutiny taveninou

Na obr. 3-16 a 3-17 je uvedena rychlost plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 1 s. Pro odvětrávaný kotouč je rychlost plnění dutiny formy od $1,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($1,579 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,607 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Pro neodvětrávaný kotouč je rychlost plnění od $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($1,457 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $0,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,364 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Pro oba případy simulačních výpočtů kotoučů je hodnota naplnění dutiny slévárenské formy taveninou 10 %.

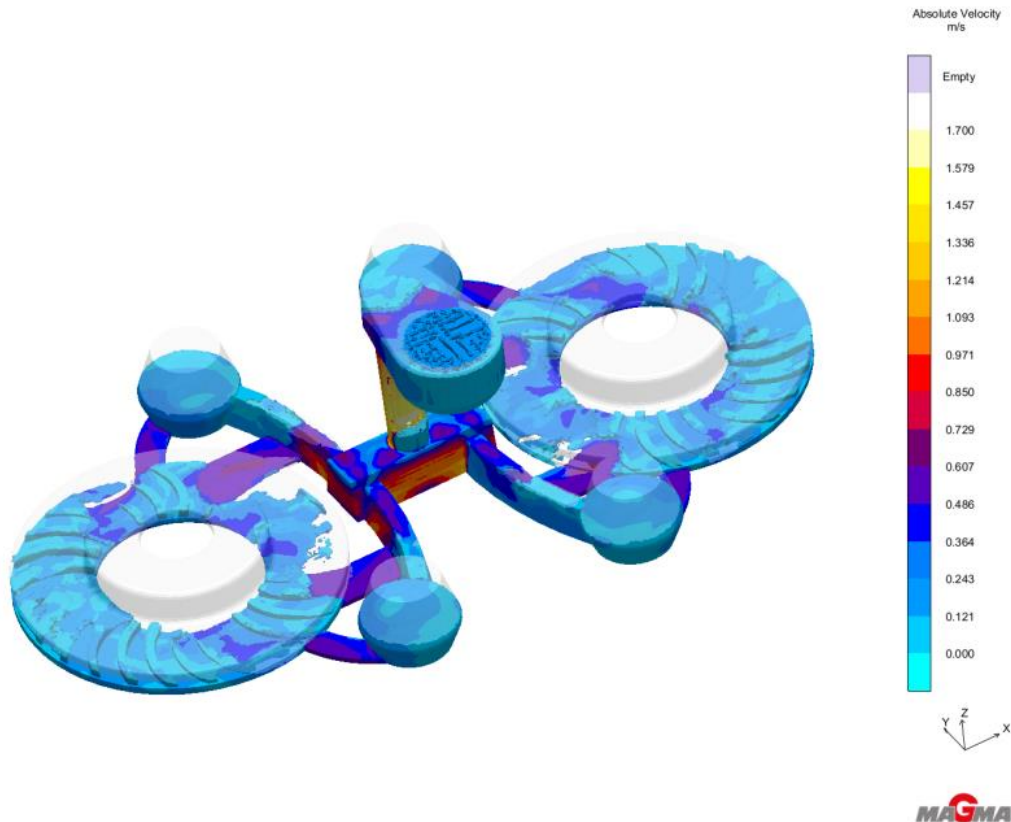


Obr. 3-16 Rychlost plnění slévárenské formy taveninou při výrobě neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 1 s po začátku odlévání

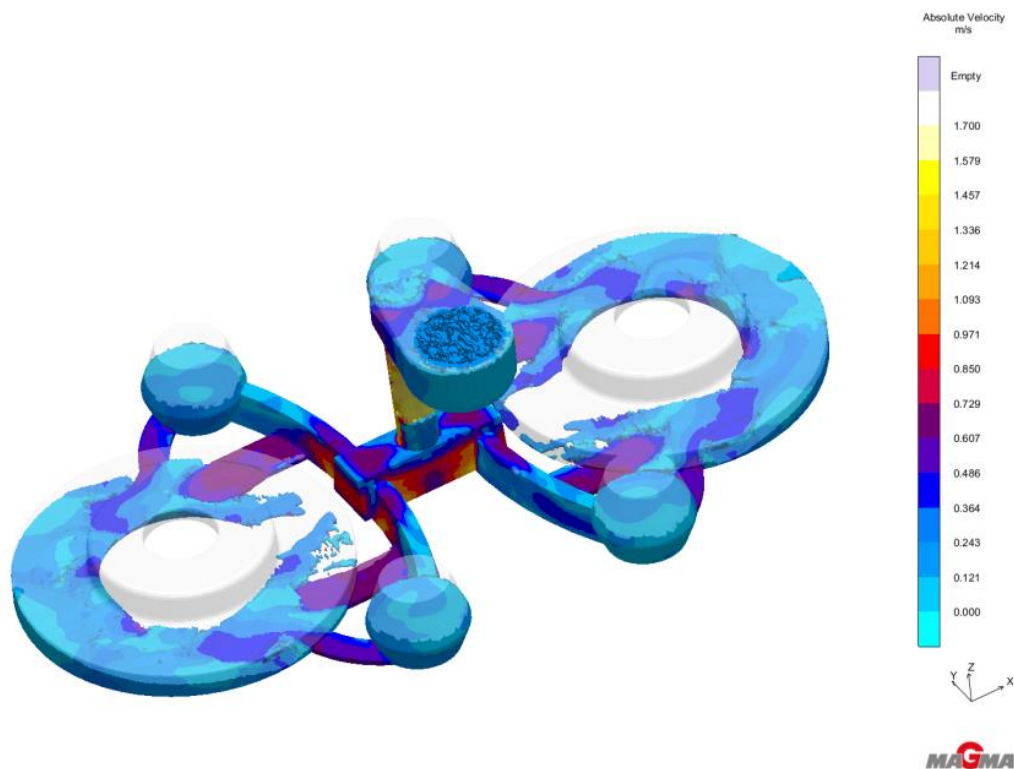


Obr. 3-17 Rychlost plnění slévárenské formy taveninou při výrobě odvětrávaného brzdového kotouče v čase 1 s po začátku odlévání

Na obr. 3-18 a 3-19 je uvedena rychlost plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 5 s. Rychlost plnění dutiny formy taveninou se snižuje. Pro odvětrávaný kotouč je rychlost plnění dutiny formy je $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), v odvrácených místech dutiny formy od zářezů, kde dutina je již zaplněna taveninou, rychlost plnění $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro neodvětrávaný kotouč je rychlost plnění od $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,729 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vyšší rychlosti plnění jsou blíže zářezům. Procentuální zaplnění formy taveninou u obou kotoučů je 50 %.

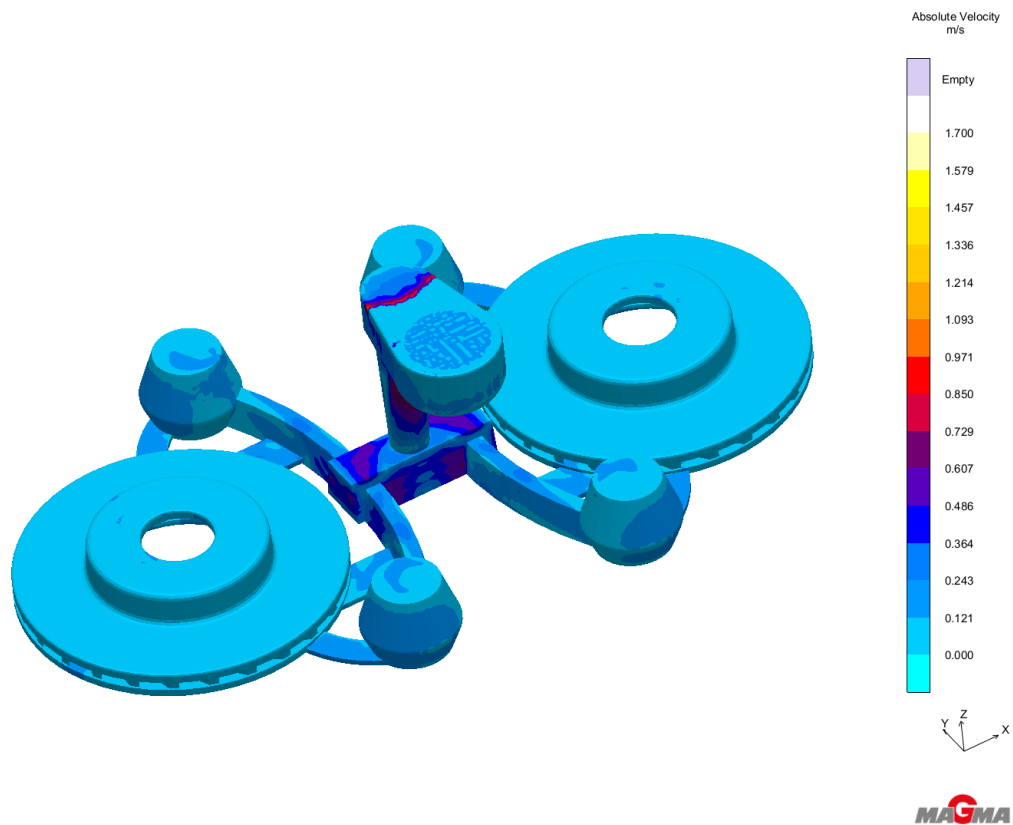


Obr. 3-18 Rychlost plnění slévárenské formy taveninou při výrobě odvětrávaného brzdového kotouče v čase 5 s po začátku odlévání

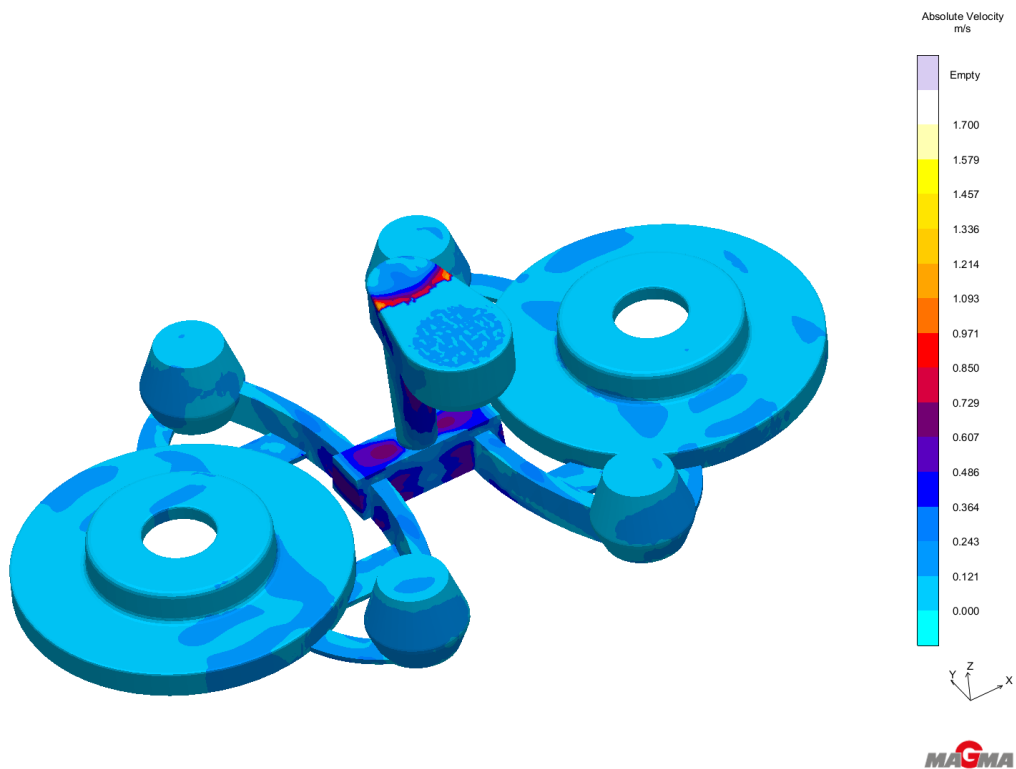


Obr. 3-19 Rychlost plnění slévárenské formy taveninou při výrobě neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 5 s po začátku odlévání

Na obr. 3-20 a 3-21 je uvedena rychlost plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 10 s, tj. předpokládaný čas plnění, který je výhodný i pro vlastní výrobu kotoučů. Rychlost plnění dutiny formy taveninou se snižuje. Pro odvětrávaný kotouč je rychlost plnění dutiny formy je $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), což odpovídá stejnoměrné rychlosti plnění v obou kotoučích připojených ke vtokové soustavě. Pro neodvětrávaný kotouč je rychlost plnění od $0,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,364 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vyšší rychlosti plnění jsou spíše blíže zářezům, avšak to neplatí v obecném smyslu. Procentuální zaplnění formy taveninou u obou kotoučů je 100 %.



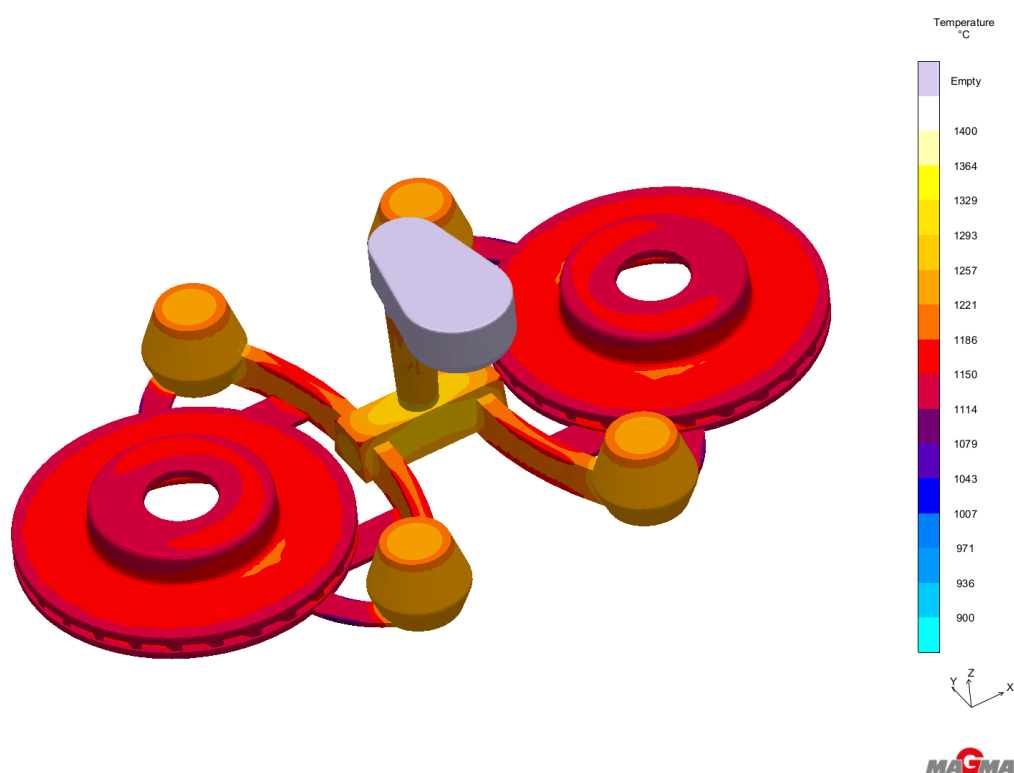
Obr. 3-20 Rychlost plnění slévárenské formy taveninou při výrobě odvětrávaného brzdového kotouče v čase 10 s po začátku odlévání



Obr. 3-21 Rychlost plnění slévárenské formy taveninou při výrobě neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 10 s po začátku odlévání

Tuhnutí odlitků ve slévárenské formě – rozložení teplot v odlitku

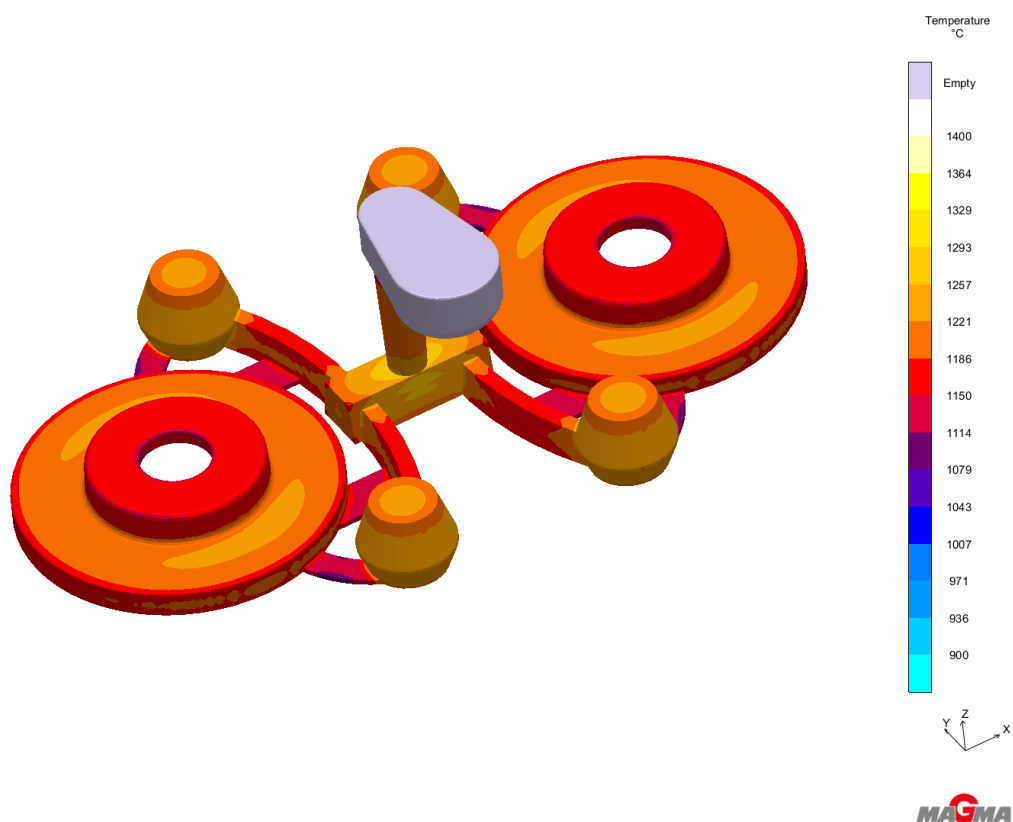
Na obr. 3-22 a 3-23 je uvedeno tuhnutí odvětrávaného a neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 50 s po začátku odlévání. Čas 50 s byl zvolen proto, že v 10 s po začátku lití je teprve okamžik začátku tuhnutí. Teplota tuhnutí taveniny u tohoto typu litiny s lupínkovým grafitem se předpokládá 1 143 °C (1 147 °C). Současně je nutno upozornit, že barevná škála příslušných hodnot teplot je v tomto případě jiná, než tomu bylo v předchozím případě, kdy se jednalo o plnění dutiny formy taveninou. Pokud bychom zanechali stejnou barevnou stupnici s příslušnou hodnotou teploty, pak by v průběhu tuhnutí se teploty pohybovaly v oblasti modré barvy a nebylo by možno blíže specifikovat teploty v průběhu tuhnutí.



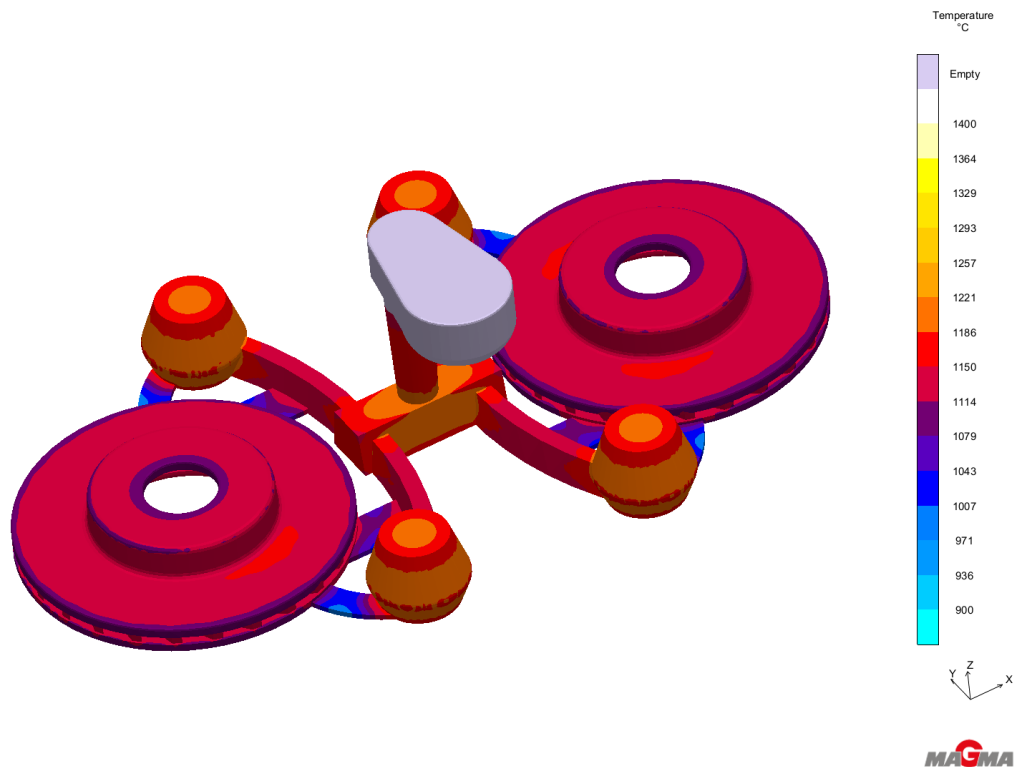
Obr. 3-22 Rozložení teplot v odvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 50 s po začátku odlévání taveniny do formy

Jak je z obr. 3-22 patrné, teploty v odvětrávaném kotouči se pohybují od 1 221 °C, což ještě není teplota tuhnutí litiny, do teploty 1 150 °C. Teplota 1 150 °C se objevuje na střední části kotouče pro jeho uchycení a současně také na jeho obvodových partiích. Rozložení teplot při tuhnutí neodvětrávaného brzdového kotouče je na obr. 3-23. Z tohoto obrázku je zřejmé, že teploty tohoto typu kotouče jsou vyšší, než je tomu u neodvětrávaného kotouče. Na úchytné části brzdových kotoučů se teploty pohybují okolo 1 186 °C a na hranách této partie 1 150 °C. Taktéž na obvodových hranách

brzdné části je teplota 1 186 °C. Teploty v brzdné partii tohoto kotouče jsou v rozmezí 1 257 °C až 1 221 °C. Z těchto obrázků je patrné, že ještě ani u jednoho brzdového kotouče neproběhlo tuhnutí.

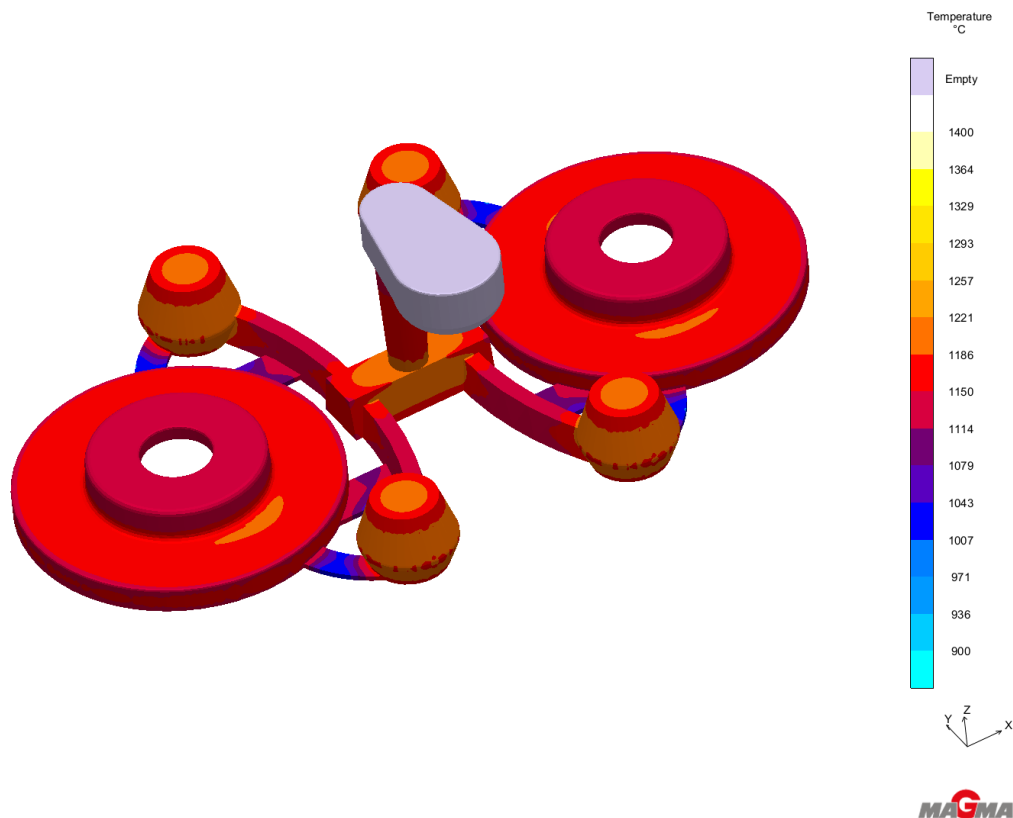


Obr. 3-23 Rozložení teplot v neodvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě v čase 50 s po začátku odlévání taveniny do formy



Obr. 3-24 Rozložení teplot v odvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 100 s po začátku odlévání taveniny do formy

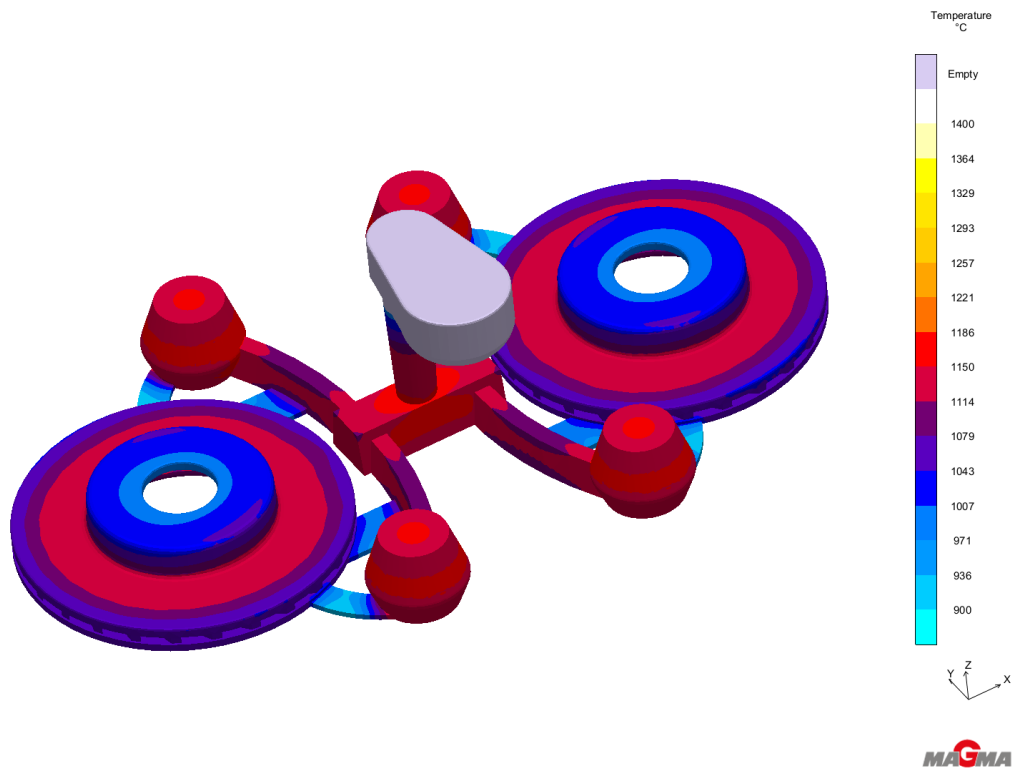
Na obr. 3-24 je uvedeno rozložení teplot v odvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 100 s po začátku odlévání. Lze vyčíst, že teplota na úchytné části brzdového kotouče je 1 150 °C a na obvodových částech 1 114 °C, což značí, že nám začíná probíhat tuhnutí (teplota tuhnutí 1 143 °C). V brzdné části brzdového kotouče se pohybují teploty v rozmezí 1 186 °C až 1 150 °C, na hranách této části jsou teploty 1 114 °C.



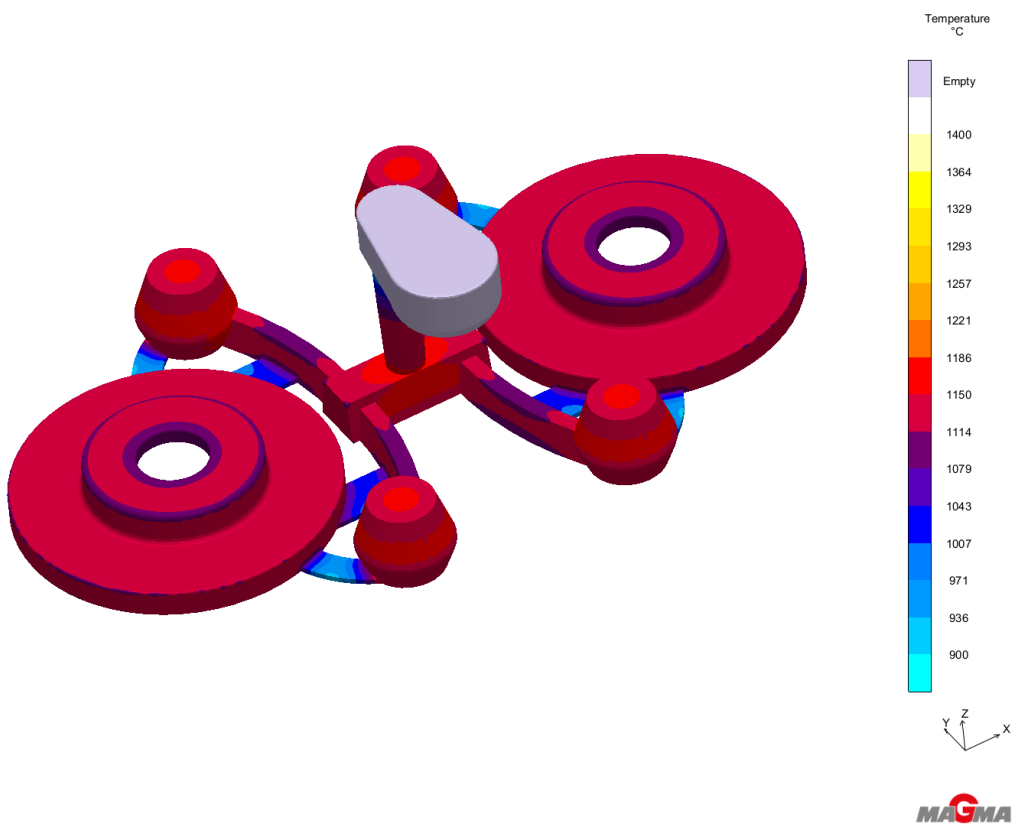
Obr. 3-25 Rozložení teplot v neodvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě v čase 100 s po začátku odlévání taveniny do formy

Na obr. 3-25 je uvedeno rozložení teplot v neodvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě v čase 100 s po začátku odlévání. Tmavě červená barva na úchytné části brzdových kotoučů nám signalizuje, že teplota je 1 150 °C. V brzdné ploše brzdových kotoučů jsou teploty od 1 186 °C do 1 150 °C. Obvodové části brzdné oblasti kotouče ukazují, že se teplota v těchto oblastech pohybuje kolem 1 150 °C.

Na obr. 3-26 a 3-27 je uvedeno rozložení teplot v odvětrávaném a neodvětrávaném kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 200 s po začátku odlévání. U odvětrávaného kotouče se teploty na úchytné části pohybují v rozmezí 1 079 °C až 1 043 °C, což signalizuje, že celá tato část je již ztuhlá. Teploty na obvodu brzdné části se pohybují od 1 114 °C do 1 079 °C, uprostřed této partie je teplota 1 150 °C. U neodvětrávaného kotouče se teploty na úchytné části pohybují v rozmezí 1 150 °C až 1 114 °C, nižší teplotou disponují hlavně okraje této partie. Ve zbylých partiích (brzdná část kotouče) je teplota cca 1 150 °C, až na velmi malé části na okrajích brzdné části, kde dosahuje 1 114 °C což je patrné z obr. 3-27.



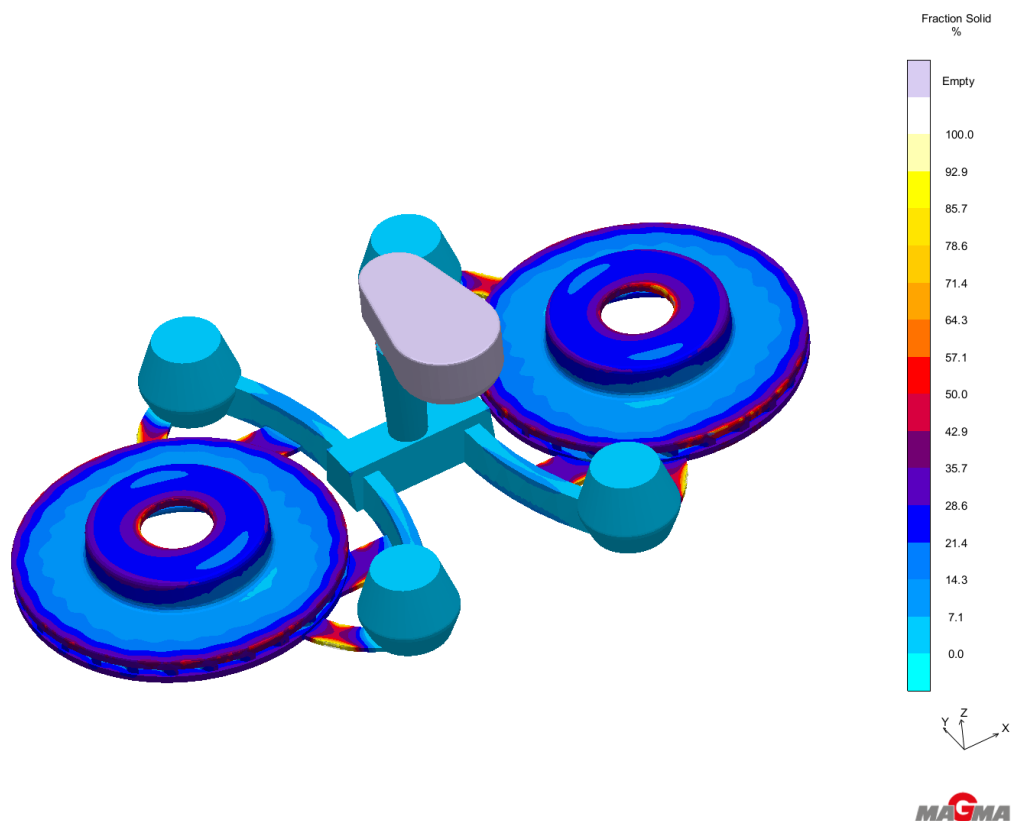
Obr. 3-26 Rozložení teplot v odvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 200 s po začátku odlévání taveniny do formy



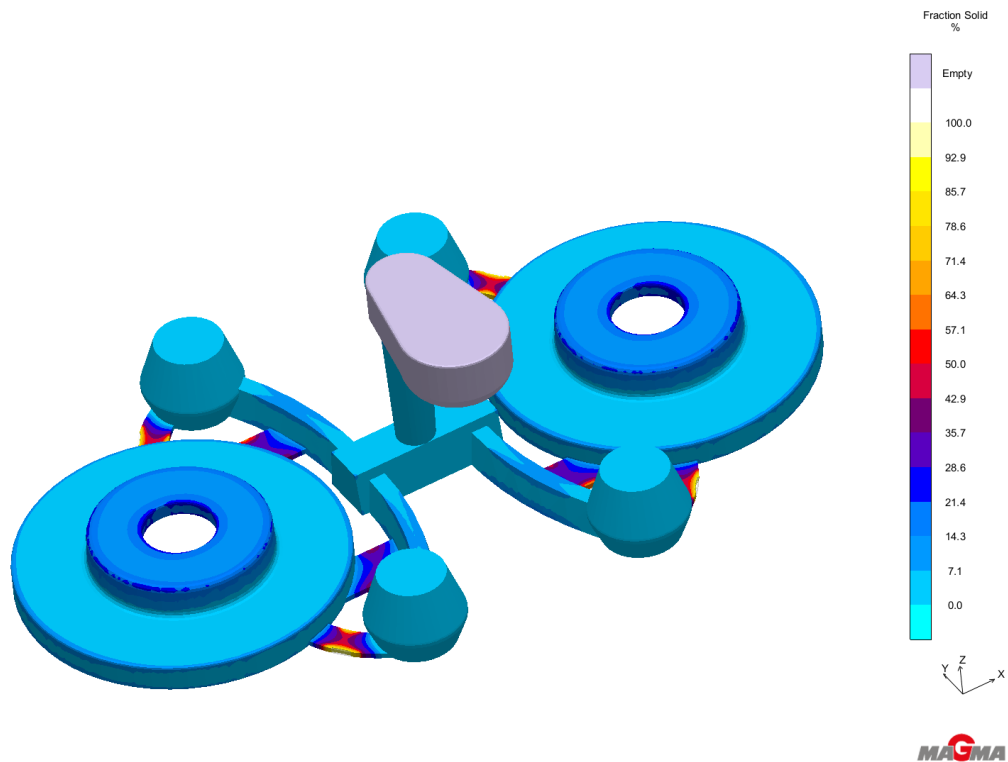
Obr. 3-27 Rozložení teplot v neodvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě v čase 200 s po začátku odlévání taveniny do formy

Tuhnutí odlitků ve slévárenské formě – podíl tuhé fáze

Na obr. 3-28 a 3-29 je uveden vznik podílu tuhé fáze pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 50 s po začátku odlévání. Jak je patrné z obr. 3-28, u odvětrávaného kotouče začíná vznikat v kotouči tuhá fáze, která má v určitých oblastech kotouče různé zastoupení. Pohybuje se od 7,1 % do 42,9 %, nejvíce se objevuje na úchytné části brzdového kotouče, a na jeho hranách dosahuje podíl tuhé fáze až 78,6 %. U neodvětrávaného kotouče, který je znázorněn na obrázku 3-29, je oproti odvětrávanému kotouči poměrně menší množství podílu tuhé fáze. Na úchytné části kotouče je podíl tuhé fáze cca 14,3 %, na hranách této části je tento podíl až 28,6 %, ve zbytku částí obou kotoučů je stále tavenina (tj. 0 % tuhé fáze).

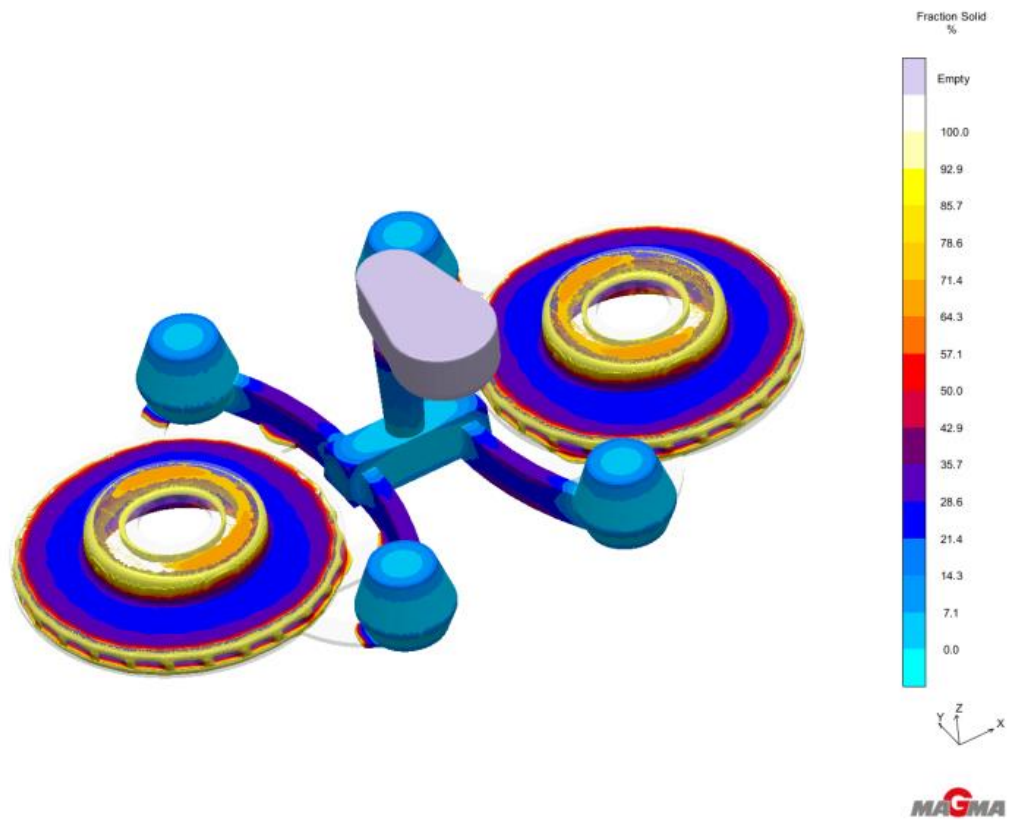


Obr. 3-28 Podíl tuhé fáze odvětrávaného brzdového kotouče při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 50 s po začátku odlévání taveniny do formy

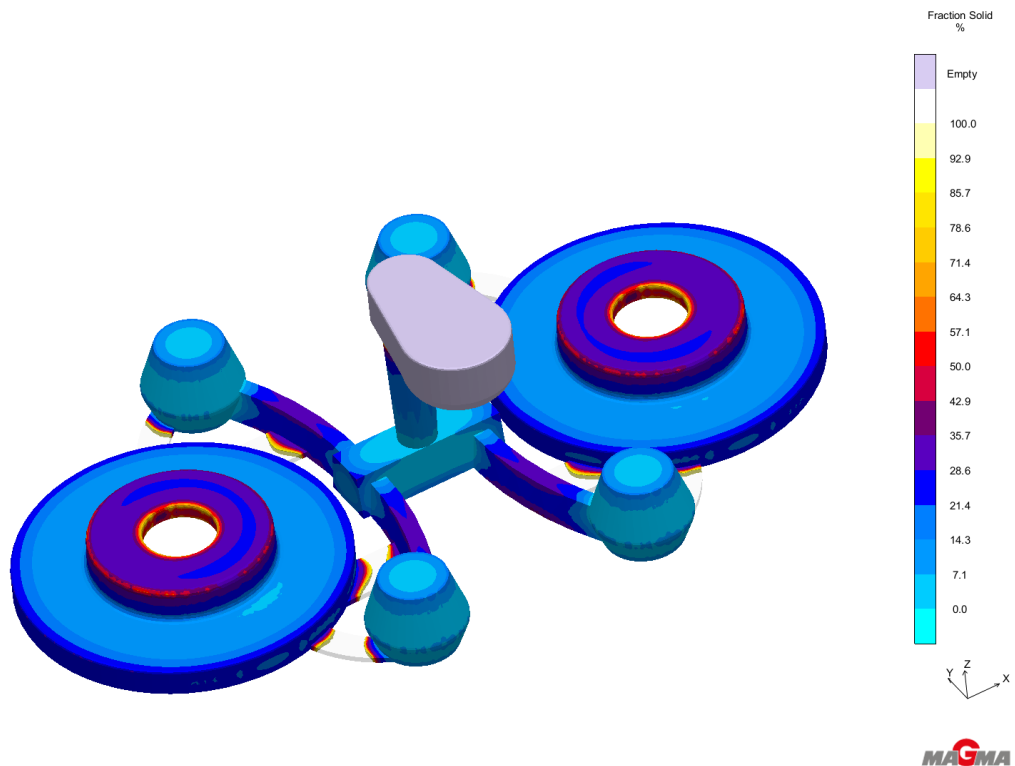


Obr. 3-29 Podíl tuhé fáze neodvětrávaného brzdového kotouče při jeho tuhnutí v bentonitové formě v čase 50 s po začátku odlévání taveniny do formy

Na obr. 3-30 a obr. 3-31 je uveden podíl tuhé fáze pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 100 s po začátku odlévání. Z obr. 3-30 je zřejmé, že na horní úchytné části obou kotoučů už proběhlo tuhnutí (bílé partie odlitku), jen na ojedinělých místech se pohybuje je zatím podíl tuhé fáze kolem 78,6 %. Na hranách brzdové části brzdového kotouče se pohybuje podíl tuhé fáze v rozmezí 42,9 % až 85,7 %. Na ploše kotouče (která se často označuje jako brzdová) je podíl tuhé fáze v rozmezí cca 28,6 % až 42,9 %. U neodvětrávaného kotouče, viz z obr. 3-31, je patrné, že podíl tuhé fáze na ploše úchytné oblasti brzdového kotouče je od 28,6 % do 42,9 %. Na hranách této oblasti se podíl tuhé fáze pohybuje od 50 % do 85,7 %. Zatímco u brzdové části brzdového kotouče je podíl tuhé fáze pouze kolem 21,4 %, na hranách této oblasti se podíl tuhé fáze dosahuje cca 28,6 %.

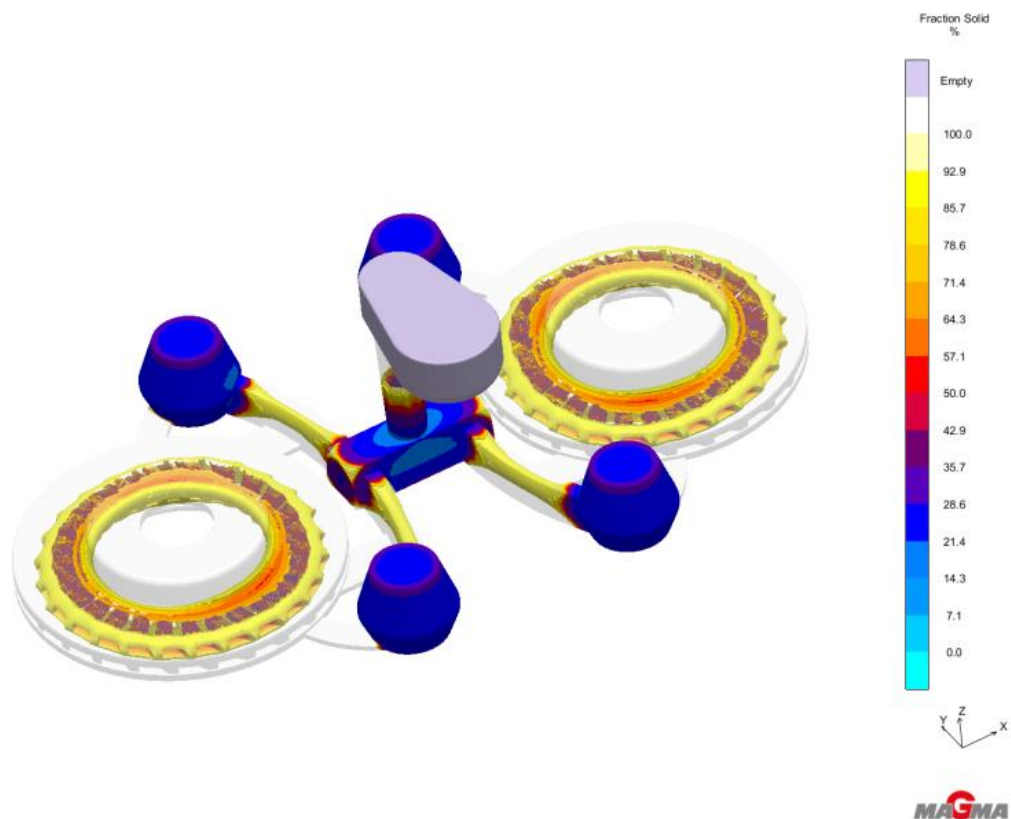


Obr. 3-30 Podíl tuhé fáze odvětrávaného brzdového kotouče při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 100 s po začátku odlévání taveniny do formy

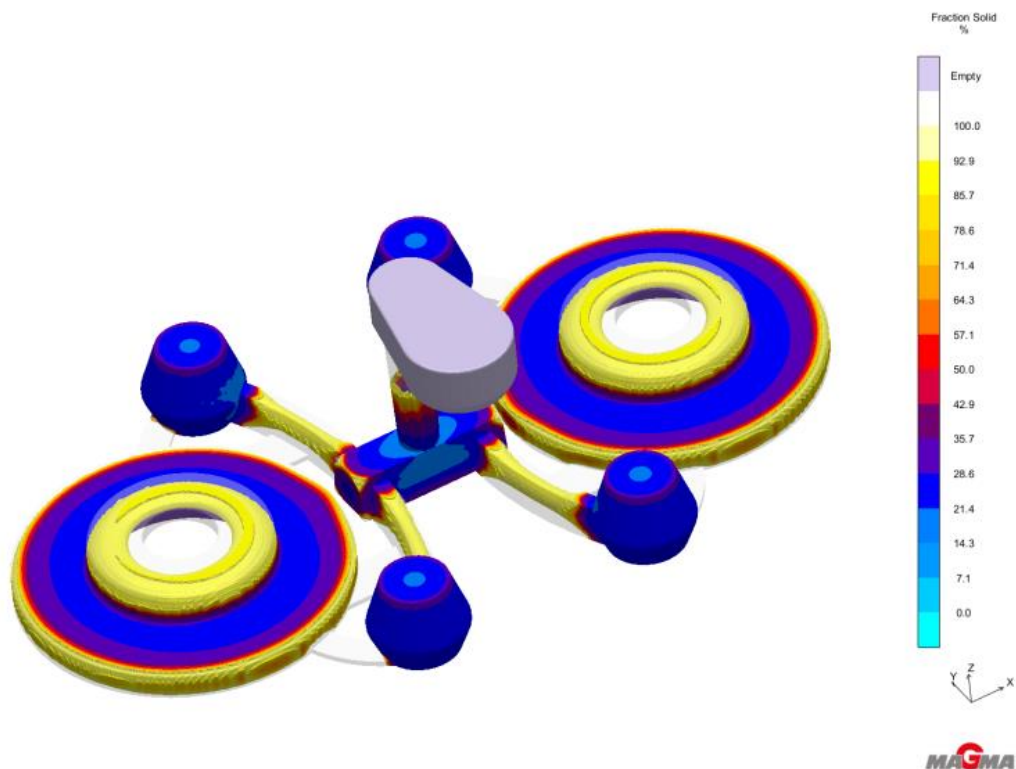


Obr. 3-31 Podíl tuhé fáze odvětrávaného brzdového kotouče při jeho tuhnutí v bentonitové formě v čase 100 s po začátku odlévání taveniny do formy

Na obr. 3-32 a 3-33 je uveden vznik podílu tuhé fáze pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 200 s po začátku odlévání. Jak je patrné z obr. 3-31, velká část kotoučů je ztuhlá, pouze v oblasti brzdné části brzdových kotoučů se pohybuje podíl tuhé fáze v rozmezí cca od 65 % do 92 %. Naopak u neodvětrávaného kotouče, viz obr. 3-33, je ztuhlá velmi malá část úchytné oblasti brzdového kotouče, avšak proces tuhnutí zde probíhá, což naznačuje podíl tuhé fáze, který činí již 92,9 %. Také tuhnutí probíhá na hranách hlavní brzdné oblasti brzdového kotouče. Zde je podíl tuhé fáze již 92,9 %. Naopak uprostřed této partie se podíl tuhé fáze pohybuje jen od 28 % do 50 %. Jak je patrné z obr. 3-32 a obr. 3-33, odvětrávaný brzdový kotouč tuhne rychleji, než je tomu u neodvětrávaného kotouče.



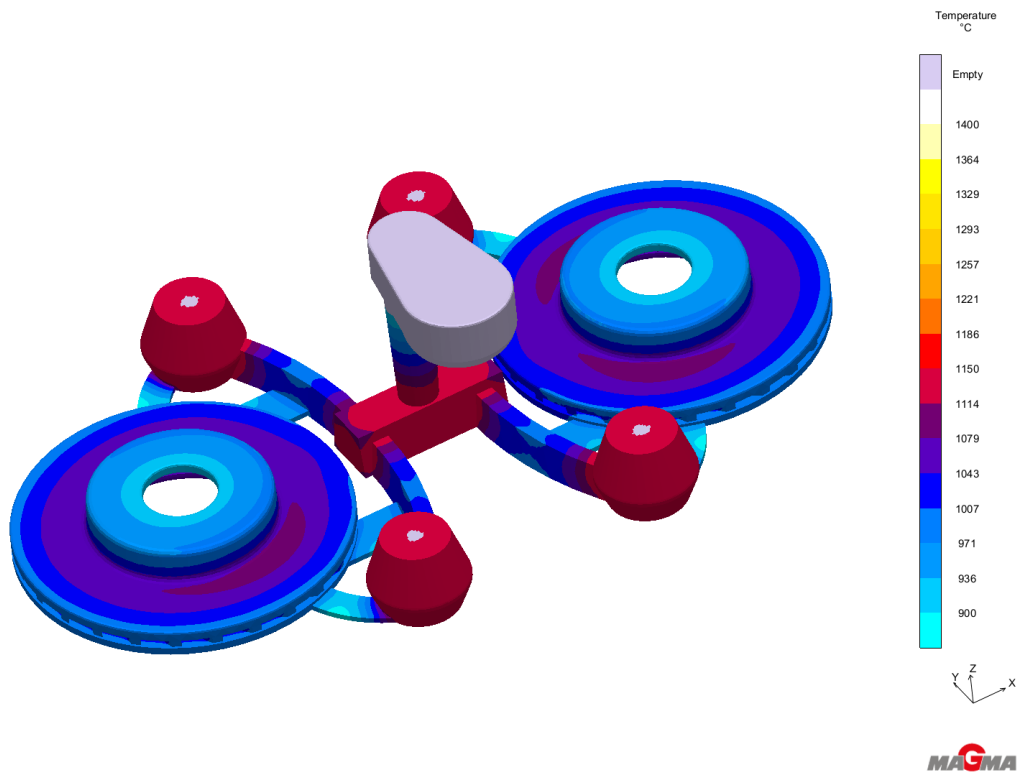
Obr. 3-32 Podíl tuhé fáze odvětrávaného brzdového kotouče při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 200 s po začátku odlévání taveniny do formy



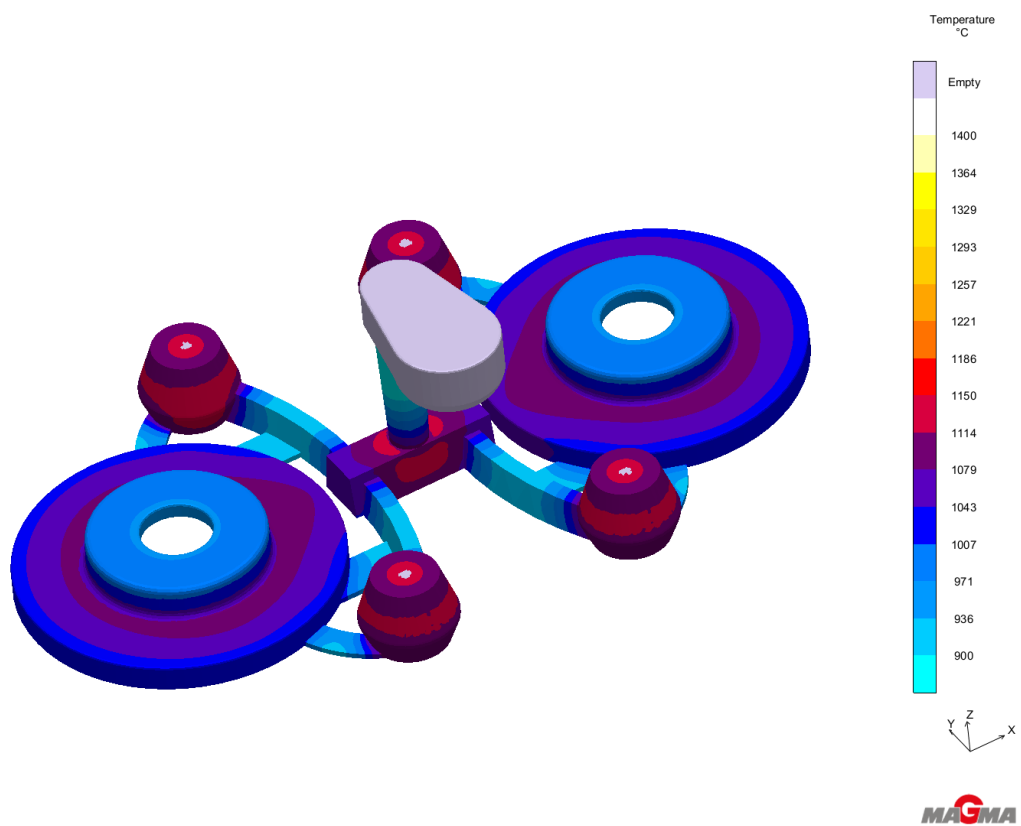
Obr. 3-33 Podíl tuhé fáze neodvětrávaného brzdového kotouče při jeho tuhnutí v bentonitové formě v čase 200 s po začátku odlévání taveniny do formy

Chladnutí odlitků ve slévárenské formě – rozložení teplot

Na základě numerického simulačního výpočtu bylo orientačně zjištěno, že tuhnutí odvětrávaného kotouče, končí cca v čase 300 s po začátku odlévání, a tuhnutí neodvětrávaného kotouče končí v čase 491 s po počátku odlévání. Pak následuje další snižování teplot. Rozložení teplot v průběhu chladnutí odlitků simulační software Magma 5 nezaznamenává, neboť rozhodující je především tuhnutí odlitků. Podle teoretických předpokladů chladnutí odlitků z litiny s lupínkovým grafitem probíhá pod teplotou 1 143 °C (1 147 °C). Na obr. 3-34 a obr. 3-35 je uvedeno rozložení teplot v chladnoucích odlitcích, odvětrávaných a neodvětrávaných brzdových kotoučů v čase 300 s a 491 s.



Obr. 3-34 Rozložení teplot v brzdovém odvětrávaném kotouče při jeho chladnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 300 s po začátku odlévání



Obr. 3-35 Rozložení teplot v brzdovém neodvětrávaném kotouče při jeho chladnutí v bentonitové formě v čase 491 s po začátku odlévání

Jak je z obr. 3-34 patrné, nejvyšší teplota na chladnoucích odvětrávaných brzdových kotoučích je 1 114 °C, nejnižší teplota je na hranách úchytných částí brzdových kotoučů, která činí 900 °C. Rozdíl teplot je 214 °C. Podobné rozložení teplot lze sledovat na neodvětrávaných kotoučích, viz obr. 3-35, nejvyšší teplota 1 114 °C je ve střední oblasti brzdné plochy kotoučů. Nejnižší teplota v úchytné části kotouče, která činí 971 °C. Rozdíl teplot je 143 °C.

4 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Tato diplomová práce přináší dílčí výsledky z oblasti predikce výroby brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem. Tato predikce je založena na numerickém simulačním výpočtu nejen pískové bentonitové slévárenské formy s furanovými jádry pro výrobu středících děr brzdových kotoučů, ale především s furanovými jádry pro zhotovení štěrbin odvětrávaných brzdových kotoučů. Pro tento simulační výpočet, plnění formy taveninou, tuhnutí a chladnutí odlitků se stanovením podílu tuhé fáze byl použit slévárenský simulační software MAGMA 5. Tento software je určen především pro gravitační lití.

Pro aplikaci numerických simulačních výpočtů výroby litinových brzdových kotoučů bylo nutné seznámit se s některými technologickými a materiálovými zásadami jejich výroby. Všechny potřebné informace pro výrobu brzdových kotoučů jsou uvedeny v teoretické části této diplomové práce.

Současně je třeba poznamenat, že rozměry obou brzdových kotoučů (odvětrávaného a neodvětrávaného) nejsou úplně rozměrově totožné (bez ohledu na odvětrávanou partii kotouče). Maximální průměr obou kotoučů pro obrobení činí 288 mm, tloušťka brzdné části je neodvětrávaného kotouče 24 mm, neodvětrávaného kotouče je 25 mm. Tloušťka odvětrávaného kotouče v upínací části je 10 mm a tloušťka neodvětrávaného kotouče v této části je 15 mm. Celkově je patrné, že na výrobu neodvětrávaného kotouče je nutno více taveniny, která zase více tepelně ovlivní slévárenskou formu a tím i dobu tuhnutí a chladnutí odlitku. S touto skutečností je nutno přijímat výsledky numerického simulačního výpočtu obou typů kotoučů.

1. *Materiál brzdových kotoučů*, pokud se týká materiálu brzdových kotoučů, neustále je doporučována litina s lupínkovým grafitem a také se používá pro většiny brzdových kotoučů automobilů. Litina s lupínkovým grafitem se vyznačuje velmi homogenní strukturou a nižším teplotním napětím. Tepelná vodivost litiny s lupínkovým grafitem je $52 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, tepelná roztažnost je $10\cdot 10^{-6}$ až $13\cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}]$ Tento materiál je doporučován asociací SAE (*Society of Automotive Engineers*), která definovala dle směrnice SAE J341 materiál pro výrobu brzdových kotoučů. Jedná se o legovanou šedou litinu s lupínkovým grafitem o obsahu 3,4 % uhlíku. K legování se používá např. molybden, měď, chrom nebo titan. Měď v litině zvyšuje její odolnost proti korozi, což je při výrobě kotoučů velmi důležité. Vedle litiny s lupínkovým grafitem se v současné době začínají také vyrábět brzdové kotouče

z hliníkového kompozitu s kovovou maticí (*Al –MMC*) a z kompozitů s uhlíkovými vlákny.

V této souvislosti je nutno poznamenat, že databanka simulačního programu MAGMA 5 obsahuje tepelně fyzikální a materiálové hodnoty pro litinu ČSN EN – GJL 250 (ČSN 422425). Současně je nutno poznamenat, že metalurgie litiny s lupínkovým grafitem je velmi významná, a že existují různé metalurgické procesy její výroby tak, jak je uvedeno v teoretické části této diplomové práce.

2. *Metoda výroby litinových brzdových kotoučů*, brzdové kotouče se vyrábějí gravitačním litím do pískových bentonitových forem. Tyto formy se vyrábí formováním na modelovou desku anebo bezrámovým formováním (výrobce DISA). Formovací bentonitová směs pro výrobu forem pro odlévání odlitků z litiny s lupínkovým grafitem je tvořena cca 88 % ostřivem SiO_2 se střední velikostí zrn $d_{50} = 0,27$ mm, vlhkost směsi je cca 3 %, obsah aktivního bentonitu cca 8 % a malý obsah kamenouhelní moučky, prodyšnost směsi je cca 98 n.j.p.

V této souvislosti je třeba poznamenat, že simulační software MAGMA 5 má v databance materiálů bentonitovou formovací směs, která obsahuje ostřívo s velikostí středního zrna $d_{50} = 0,24$ mm.

3. *Materiál jader pro výrobu brzdových kotoučů* je tvořen křemenným ostřivem kulatého charakteru s velikostí středního zrna $d_{50} = 0,19$ až $0,20$ mm. Jako pojivo se používá pryskyřice. Někteří výrobci používají polyuretanovou pryskyřici pro metodu studeného jaderníku. Pro výrobu jader byl také odzkoušen nově vyvinutý anorganický pojivový systém Inotec (je to pojivový systém z roku 2009 na bázi vodního skla vyvinuté společností ASK Chemicals ve spolupráci se slévárnou BMW, množství pojiva ve směsi se pohybuje v rozmezí 1,8 až 2,5 %. Jádra se vytvrzují dehydratací ve vyhřívaných jadernících o teplotě $150\text{--}200$ °C v kombinaci s profukováním horkým vzduchem). Speciální produkci jader pro výrobu odvětrávaných brzdových kotoučů zabezpečuje firma Hüttenes Albertus Werke GmbH (firma HA), [8]. Tato firma byla inspirována skutečností, že někdy klasické jádrové směsi nespĺňují podmínky pro výrobu kvalitní odvětrávaných kotoučů. V těchto směsích je používáno kulaté křemenné ostřívo s velikostí zrn $d_{50} = 0,20$ mm, avšak název pojiva firma neuvádí.

V této souvislosti je nutno poznamenat, že software MAGMA 5 pro výrobu jader uvažuje furanové pojivo.

4. Při numerickém simulačním výpočtu byly aplikovány všechny poznatky a znalosti týkající se tepelných procesů mezi taveninou, resp. odlitkem a pískovou slévárenskou formou. Sdílení tepla v pískové slévárenské formě je velmi složitým procesem. Zde se teplo současně sdílí sáláním, prouděním a vedením. Jednotlivé typy a jejich dominantní význam souvisí s příslušnou teplotou slévárenské formy. Při teplotách nad 600 °C převládá přenos tepla sáláním, při teplotách v rozmezí 200 až 600 °C je účinné proudění a při teplotách do 200 °C (cca do 300 °C) převládá přenos tepla vedením.

Pokud se zaměříme na matematicko-fyzikální aplikaci sdílení tepla v numerickém simulačním programu MAGMA 5, pak je zřejmé, že tento fyzikální popis sdílení tepla je založen především na řešení Fourierovy rovnice sdílení tepla vedením. S těmito poznatky je nutno přijímat i výsledky numerických simulačních výpočtů.

Dalším faktorem, který je důležitý pro zpřesňování numerických simulačních výpočtů je charakter tvorby simulační sítě. V případě programu MAGMA 5 je základním typem numerické metody – metoda konečných diferencí. Aplikace této metody numerický simulační výpočet prodlužuje. Dále jsou pro numerický simulační výpočet důležité odpovídající teplotní závislosti potřebných materiálových a tepelně-fyzikálních veličin, včetně teplotní závislosti součinitele přestupu tepla.

Pro materiál odlitku – litinu s lupínkovým grafitem – byly z databanky software MAGMA 5 použity tyto teplotní závislosti: součinitele tepelné vodivosti, hustoty, viskozity a měrné tepelné kapacity.

Pro materiál slévárenské formy a jádra byly použity tyto teplotní závislosti: součinitele tepelné vodivosti, hustoty, měrné tepelné kapacity a součinitele přestupu tepla.

Pro vytvoření geometrie odlitku, vtokové soustavy a nálitků bylo nutno zvládnout znalosti z oblasti modelování dílů Autodesk Inventor professional 2015, což bylo výhodnější, než provedení tohoto návrhu s použitím vlastního simulačního software MAGMA 5.

Samotné ovládání simulačního software pro získání odpovídajících výsledků simulačních výpočtů je založeno na pečlivém prostudování manuálu a dalších podkladů, i s ohledem na vlastní seznámení struktury simulačního software.

5. Výsledky numerických simulačních výpočtů plnění slévárenské formy taveninou, tuhnutím a chladnutí odlitků a jejich podílu tuhé fáze u dvou typů brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem, odvětrávaných a neodvětrávaných, lze hodnotit

následujícím způsobem. Současně je nutno upozornit, že v každé formě jsou ustaveny dutiny pro dva brzdové kotouče, avšak hodnocení numerických simulačních výpočtů je uvedeno v jednotném čísle – pro jeden kotouč (neboť je zachována souměrnost pro řešení příslušné úlohy).

a) *Plnění slévárenské formy taveninou* – rozložení teplot v tavenině. Teplota lití taveniny byla u obou případů výroby brzdových kotoučů 1 400 °C. Plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 1 s po začátku odlévání cca 1 382 °C a dochází k zaplňování zatím pouze k části vtokové soustavy.

Při plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 5 s po začátku lití dutina slévárenské formy odvětrávaného kotouče ještě není zcela zaplněna taveninou. Teplota taveniny v odvětrávaných kotoučích se pohybuje cca od 1 373 °C do 1 346 °C. Teplota taveniny u neodvětrávaných kotoučů dosahuje cca 1 373 °C. Též dutina pro výrobu těchto kotoučů není zcela zaplněna taveninou. Pokud se jednalo o čas 10 s po začátku odlévání (to je i předpokládaný čas lití), dutina slévárenské formy odvětrávaného kotouče je zcela zaplněna taveninou. Teplota taveniny v kotoučích v blízkosti zářezů se pohybuje cca od 1 373 °C do 1 364 °C. Ve vzdálenějších partiích od zářezů jsou teploty nižší cca 1 346 °C až 1 311 °C. Ojedinele na některých hranách kotouče je teplota pod 1 310 °C. Teploty pro neodvětrávaný kotouč jsou vyšší, pohybují se od 1 373 °C do 1 346 °C. Ojedinele na odlehklých hranách od vtokové soustavy je teplota 1 311 °C.

b) *Plnění slévárenské formy taveninou* – rychlost plnění, procenta zaplnění dutiny taveninou.

Sledování rychlosti plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 1 s po začátku lití bylo stanoveno, že pro odvětrávaný kotouč je rychlost plnění dutiny formy od 1,6 m·s⁻¹ (1,579 m·s⁻¹) do 0,6 m·s⁻¹ (0,607 m·s⁻¹). Pro neodvětrávaný kotouč je rychlost plnění od 1,5 m·s⁻¹ (1,457 m·s⁻¹) do 0,36 m·s⁻¹ (0,364 m·s⁻¹). Jak je z výsledků patrné, rychlosti plnění se liší od 6,25 % do 28 %. Pro oba případy simulačních výpočtů brzdových kotoučů v tomto časovém okamžiku je hodnota naplnění dutiny slévárenské formy taveninou 10 %.

Rychlost plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 5 s po odlévání se snižuje. To lze vysvětlit tím, že nalitá tavenina do slévárenské formy vytváří odpor pro vtečení dalšího množství taveniny. Pro odvětrávaný kotouč je rychlost plnění dutiny formy $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), v odvrácených místech dutiny formy od zářezů, kde dutina je již zaplněna taveninou, je rychlost plnění $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro neodvětrávaný kotouč je rychlost plnění od $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,729 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Rozdíl rychlostí plnění formy pro odvětrávaný a neodvětrávaný kotouč činí od 85 % do 100 %. Procentuální zaplnění formy taveninou u obou kotoučů je již 50 %.

Rychlost plnění slévárenské formy taveninou pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 10 s po odlévání, tj. předpokládaný čas plnění, který je výhodný i pro vlastní výrobu kotoučů, se výrazně snižuje. Rychlost plnění dutiny formy taveninou se snižuje. Pro odvětrávaný kotouč je rychlost plnění dutiny formy $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), což odpovídá stejnoměrné rychlosti plnění v obou kotoučích připojených ke vtokové soustavě. Pro neodvětrávaný kotouč je rychlost plnění od $0,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,364 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vyšší rychlosti plnění jsou spíše blíže zářezům, avšak to neplatí v obecném smyslu. Procentuální zaplnění formy taveninou u obou kotoučů je 100 %. Neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 10 s, tj. předpokládaný čas plnění, který je výhodný i pro vlastní výrobu kotoučů. Rychlost plnění dutiny formy taveninou se snižuje. Pro odvětrávaný kotouč je rychlost plnění dutiny formy je $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), což odpovídá stejnoměrné rychlosti plnění v obou kotoučích připojených ke vtokové soustavě. Pro neodvětrávaný kotouč je rychlost plnění od $0,36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,364 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) do $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,121 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vyšší rychlosti plnění jsou spíše blíže zářezům, avšak to neplatí v obecném smyslu. Procentuální zaplnění formy taveninou u obou kotoučů je 100 %.

c) *Tuhnutí odlitků ve slévárenské formě* – rozložení teplot v odlitku lze charakterizovat takto.

Numerickým simulačním výpočtem tuhnutí odvětrávaného a neodvětrávaného brzdového kotouče v čase 50 s po začátku odlévání bylo stanoveno, že v tomto čase neprobíhá ještě tuhnutí kotoučů. Teploty na odvětrávaném kotouči se pohybují od $1\,221 \text{ }^\circ\text{C}$, což ještě není teplota tuhnutí litiny, do teploty $1\,150 \text{ }^\circ\text{C}$ (teplota tuhnutí litiny je $1\,143 \text{ }^\circ\text{C}$). Na neodvětrávaném kotouči též ještě nezačalo

tuhnutí taveniny. Teploty na úchytné části kotouče jsou 1 186°C až 1 150°C. Teploty na brzdné části brzdového kotouče jsou v rozmezí 1 257 °C až 1 221 °C. Rozložení teplot v odvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 100 s po začátku odlévání je následující. Na úchytné části brzdového kotouče je teplota 1 150 °C až 1 114 °C. V této části kotouče, kdy byla dosažena teplota 1 143 °C a nižší, již probíhá tuhnutí taveniny. Zatím co v brzdné části kotouče se pohybují teploty v rozmezí 1 186 °C až 1 150 °C. Na hranách této části brzdového kotouče jsou teploty 1 114 °C. Rozložení teplot v neodvětrávaném brzdovém kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 100 s po začátku odlévání ukazuje, že teploty v úchytné části jsou 1 150 °C a na brzdné ploše kotouče jsou teploty v rozmezí 1 186 °C až 1 150 °C. V obvodových partiích této oblasti kotoučů je teplota 1 150 °C. Rozložení teplot v odvětrávaném a neodvětrávaném kotouči při jeho tuhnutí v bentonitové formě s furanovým jádrem v čase 200 s po začátku odlévání ukazuje, že u odvětrávaného kotouče na úchytné části proběhlo tuhnutí. Na brzdné části je teplota 1 150 °C a v krajních partiích této části kotouče jsou teploty v rozmezí 1 1114 °C až 1 079 °C. U neodvětrávaného kotouče v čase 200 s po začátku odlévání je rozložení teplot v úchytné části kotouče 1 150 °C až 1 114 °C. Nižší teploty jsou na okrajích této úchytné části kotouče. Na brzdné části kotouče je teplota 1 150 °C, avšak na okrajích této části kotouče se objevují nepatrné oblasti vykazující teplotu 1 114 °C. Numerický simulační výpočet uvádí, že ke ztuhnutí odvětrávaného brzdového kotouče dojde v čase 300 s po začátku odlévání. U neodvětrávaného brzdového kotouče dojde ke ztuhnutí v čase 491 s po začátku odlévání.

d) *Tuhnutí odlitků ve slévárenské formě* – podíl tuhé fáze pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 50 s po začátku odlévání byl stanoven, že u odvětrávaného kotouče začíná vznikat v kotouči tuhá fáze, která má v určitých oblastech kotouče různé zastoupení. Její obsah je od 7,1 % do 42,9 %. Tuhá fáze se nejvíce objevuje na úchytné části brzdového kotouče a na jeho hranách, kde je podíl tuhé fáze až 78,6 %. U neodvětrávaného kotouče je oproti odvětrávanému kotouči poměrně menší množství podílu tuhé fáze. Na úchytné části kotouče je tento podíl cca 14,3 %, na hranách této části kotouče podíl dosahuje až 28,6 %, ve zbytku částí obou kotoučů je stále tavenina (tj. 0 % tuhé fáze).

Hodnocením podílu tuhé fáze pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 100 s po začátku odlévání lze konstatovat následující skutečnosti. Na horní úchytné části obou kotoučů již v tomto časovém okamžiku proběhlo tuhnutí (bílé partie odlitku), jen na ojedinělých místech se pohybuje je zatím podíl tuhé fáze kolem 78,6 %. Na hranách brzdné části brzdového kotouče se pohybuje podíl tuhé fáze v rozmezí 42,9 % až 85,7 %. Na ploše kotouče (která se často označuje jako brzdná) je podíl tuhé fáze v rozmezí cca 28,6 % až 42,9 %. U neodvětrávaného brzdového kotouče je podíl tuhé fáze na ploše úchytné oblasti od 28,6 % do 42,9 %. Na hranách této oblasti se podíl tuhé fáze pohybuje od 50 % do 85,7 %. Zatímco u brzdné části brzdového kotouče je podíl tuhé fáze pouze kolem 21,4 %, na hranách této oblasti se podíl tuhé fáze dosahuje cca 28,6 %. Hodnocením podílu tuhé fáze pro odvětrávaný a neodvětrávaný brzdový kotouč v čase 200 s po začátku odlévání bylo zjištěno, že velká část kotoučů je ztuhlá. Podíl tuhé fáze v rozmezí cca od 65 % do 92 %. Naopak u neodvětrávaného kotouče je ztuhlá velmi malá část úchytné oblasti brzdového kotouče, avšak proces tuhnutí zde probíhá, což naznačuje podíl tuhé fáze, který činí již 92,9 %. Také tuhnutí probíhá na hranách hlavní brzdné oblasti brzdového kotouče. Zde je podíl tuhé fáze již 92,9 %. Naopak uprostřed této partie se podíl tuhé fáze pohybuje jen od 28 % do 50 %. Z výše uvedených výsledků je patrné, že odvětrávaný brzdový kotouč tuhne rychleji, než je tomu u neodvětrávaného kotouče.

- e) *Chladnutí odlitků ve slévárenské formě – rozložení teplot*, na základě numerického výpočtu, kterým bylo orientačně zjištěno, že tuhnutí odvětrávaného kotouče končí cca v čase 300 s po začátku odlévání. Tuhnutí neodvětrávaného kotouče končí až v čase 491 s po počátku odlévání. To je také způsobeno menším množstvím kovu, resp. taveniny, které je potřeba na výrobu jednoho odvětrávaného kotouče. To souvisí s jeho některými menšími rozměry než je u kotouče neodvětrávaného, viz příloha 1 a 2. Rozložení teplot v průběhu chladnutí odlitků simulační software Magma 5 nezaznamenává, neboť rozhodující je především tuhnutí odlitků. Podle teoretických předpokladů chladnutí odlitků z litiny s lupínkovým grafitem probíhá pod teplotou 1 143 °C (1 147 °C). Nejvyšší teplota na chladnoucích odvětrávaných brzdových kotoučích je 1 114 °C, nejnižší teplota je na hranách úchytných částí brzdových kotoučů, která činí 900 °C. Rozdíl teplot je 214 °C. Podobné rozložení teplot lze sledovat na

neodvětrávaných kotoučích, kde nejvyšší teplota je ve střední oblasti brzdné plochy kotoučů a činí 1 114 °C. Nejnižší teplota v úchytné části kotouče, která činí 971 °C. Rozdíl teplot je 143 °C.

Celkově lze hodnotit provedený numerický simulační výpočet pomocí software MAGMA 5 za orientační a současně pro základní podmínky slévárenské výroby za dostačující.

5 ZÁVĚR

Diplomová práce, která je zpracována na téma: „*Predikce tuhnutí a chladnutí brzdových kotoučů automobilů z litiny s lupínkovým grafitem*“, byla rozdělena do dvou základních částí – teoretické a experimentální.

V teoretické části jsou shrnuty základní informace o brzdových kotoučích a jejich materiálech. Pro výrobu brzdových kotoučů osobních automobilů se používá především litina s lupínkovým grafitem. Proto v další rešeršní části je hlavní pozornost zaměřena na litinu s lupínkovým grafitem a její metalurgii a výrobu.

Hlavní část práce – experimentální – byla zaměřena na numerický simulační výpočet tuhnutí a chladnutí dvou typů brzdových kotoučů (odvětrávaného a neodvětrávaného) a posouzení výsledků simulačních výpočtů. Na základě poznatků a výsledků řešení této diplomové práce lze stanovit tyto dílčí závěry:

1. Řešení této diplomové práce úzce souvisí s řešením mé bakalářské práce, které bylo zaměřeno na hodnocení struktury a mechanických vlastností brzdových litinových kotoučů. Při řešení této bakalářské práce mě napadlo zamýšlení nad výrobou těchto brzdových kotoučů. V důsledku absolvování výuky předmětu Simulace technologických procesů a zájmu o numerický slévárenský software jsem se rozhodl pro vypracování této diplomové práce.
2. Výroba brzdových kotoučů automobilů je v současné době spojena nejen s aplikací moderních a perspektivních ekologicky nezávadných jádrových směsí (Inotec, Cordis atd.), ale také je možno uplatnit progresivní metody výroby forem (např. bezrámové formování). Dále je možno při návrhu výroby aplikovat slévárenské software a na základě jejich výpočtů lze zpřesňovat technologické procesy při jejich zhotovení.
3. Použitý slévárenský simulační program MAGMA 5 je v současné době velmi používaný programem ve slévárenské praxi. Je založen na metodě konečných diferencí (FDM – Finite Differences Method) a na prostorovém řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla. Součástí programu je databáze vybraných vlastností materiálů odlitků, slévárenských forem. Možnost výběru materiálu pojiv slévárenských jader je omezen pouze na furanovou pryskyřici. Na základě vytvoření simulační sítě v souvislost s orientace dvou odlitků ve slévárenské formě s nálitky a vtokovou soustavou byly prováděny simulační výpočty.

4. S ohledem na výsledek plnění slévárenské formy taveninou a na výsledek tuhnutí obou typů brzdových kotoučů, bylo potvrzeno, že vypočítaná a navržená vtoková soustava odpovídá teoretickým předpokladům vlití taveniny v rámci 10 s pro oba kotouče.
5. Numerický simulační výpočet „výroby odvětrávaného a neodvětrávaného brzdového kotouče“ byl rozdělen do několika částí: na simulační výpočet plnění slévárenské formy taveninou, tuhnutí taveniny ve slévárenské formě a stanovení podílu ztuhlé fáze odlitku brzdového kotouče.

Získané výsledky simulačního výpočtu potvrzují, že zvolená teplota lití 1 400 °C taveniny litiny s lupínkový grafitem do slévárenské formy je vyhovující. Také suroviny pro výrobu slévárenských forem byly zvoleny standardním způsobem, avšak volba materiálu jader nemohla být ovlivněna. Také volba teplotních závislostí materiálů forem jader a litiny s lupínkovým grafitem je odpovídající pro získání věrohodných výsledků simulačního výpočtu.

Získané výsledky numerických simulačních výpočtů rozložení teplot u obou typů brzdových kotoučů při jejich výrobě, v okamžiku plnění dutiny formy taveninou, odvětrávaný kotouč vykazuje nižší teploty (některé jeho rozměry jsou menší, než u odvětrávaného kotouče, viz příloha 1 a 2). Také tuhnutí obou typů kotoučů je odlišné v časovém okamžiku 50 s po začátku odlévání. U odvětrávaných kotoučů se teploty pohybují v rozmezí teplot 1 221 °C až 1 150 °C (teplota 1 143 °C je teplota tuhnutí litiny s lupínkovým grafitem). U neodvětrávaných kotoučů se teplota pohybuje v rozmezí teplot 1 257 °C až 1 150 °C. V čase tuhnutí 100 s po začátku odlévání jsou teploty u neodvětrávaných kotoučů od 1 186 °C do 1 114 °C. V tomto čase tuhnutí (100 s po začátku odlévání) je rozložení teplot v neodvětrávaných brzdových kotoučích od 1 186°C do 1 150°C.

Také tuhnutí obou typů kotoučů je odlišné v časovém okamžiku 200 s po začátku odlévání. Rozložení teplot u odvětrávaných kotoučů se pohybuje v rozmezí 1 150 °C až 1 043 °C. U neodvětrávaného kotouče jsou v časovém okamžiku 200 s po začátku odlévání teploty 1 150 °C až 1 114 °C. Odvětrávané kotouče ztuhly v čase 300 s po začátku odlévání a neodvětrávané kotouče ztuhly v čase 491 s po začátku odlévání. To je také způsobeno menším množstvím kovu, resp. taveniny, které je potřeba na výrobu jednoho odvětrávaného kotouče. To souvisí s jeho některými menšími rozměry než je u kotouče neodvětrávaného, viz příloha 1 a 2.

6. V dalším řešení numerických simulačních výpočtů brzdových kotoučů doporučuji se zaměřit na vliv různých druhů materiálů slévárenských jader, avšak k tomuto účelu je třeba zjistit teplotní závislosti jejich tepelně-fyzikálních veličin.
7. Ekonomické hodnocení v této diplomové práci nebylo provedeno z důvodu, že tento numerický simulační výpočet byl projedán především z důvodu predikce odlišného chování těchto konstrukčně odlišných typů brzdových kotoučů.

6 POUŽITÁ LITERATURA

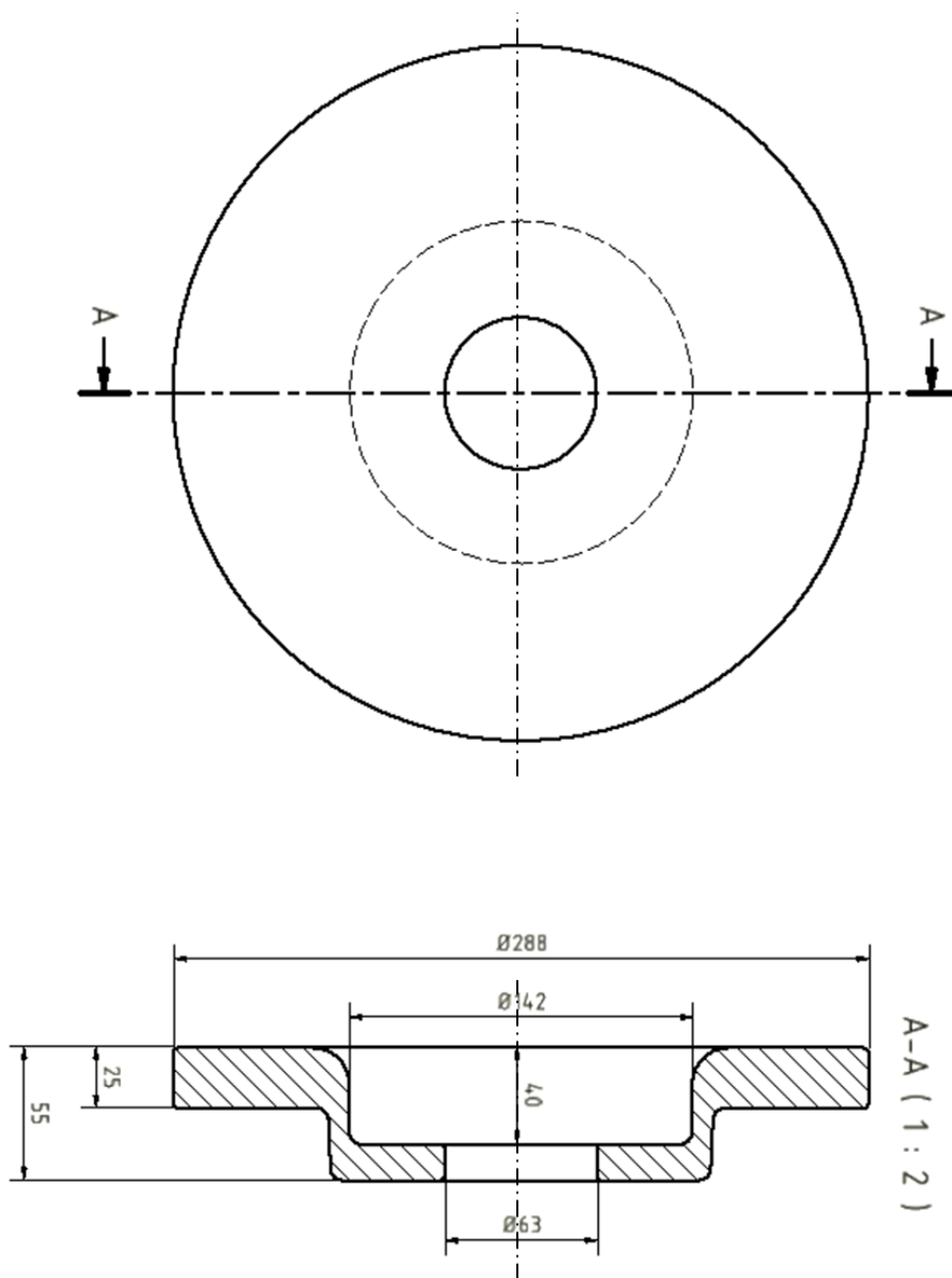
- [1] Technické materiály firmy ASK CHEMICALS, 2018. <https://www.foundry-planet.com/it/attrezzatura/detailview/12056/?cHash=997b42caee555522e774fe0c7ddf6094>.
- [2] MALCOLM,P. MACNAGHTAN, C. KROSNAR, J. *Cast Iron a drake discs material for the future*. 2nd International Seminar on automotive Braking. University of Leeds, UK May 1998. [cit. 2016-06]. [http://www.euracgroup.com/hres/cast %20iron %20a %20brake %20disc %20material %20for %20the %20future.pdf](http://www.euracgroup.com/hres/cast%20iron%20a%20brake%20disc%20material%20for%20the%20future.pdf).
- [3] ŽITNÝ, Vítek. *Hodnocení struktury brzdových kotoučů automobilů vyrobených z litiny s lupínkovým grafitem* [online]. 2016 [cit. 2018-05-08]. Bakalářská práce. TU v Liberci. Vedoucí práce prof. Ing. Iva Nová, CSc.
- [4] NOVÁ, Iva. *Teorie slévání II – Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin*. [Skripta]. FS, KSP – TU v Liberci, 2006.
- [5] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [6] HAMPL, Jiří. *Metalurgie slévárenských slitin*. Učební texty. FMFI, VŠB-TU Ostrava 2013.
- [7] OTÁHAL, Vlastislav. *Jakostní litiny – litina s lupínkovým grafitem: výroba, vlastnosti*. Brno. [s.n.].
- [8] PRAWDZIK, Saturnin et al. Speciální a obalovaná ostřiva z produkce Hüttenes Albertus Polsko – nová šance pro slévárny. Slévárenství LXV, září–říjen 2017, č. 9–10, s. 321-324. ISBN 0037-6825.
- [9] NOVÁ, Iva. *Přenos tepla ve slévárenských formách*. V Liberci: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-141-2.
- [10] Propagační materiály ZPA Slévárna Pečky.
- [11] Manuál numerického simulačního výpočtu Magma 5, MAGMA GmbH Aachen.
- [12] Numerický simulační slévárenský program MAGMA 5, MAGMA GmbH Aachen.
- [13] Propagační materiály firmy DISA.
- [14] NOVÁ, Iva a Jiří MACHUTA. TECHNOLOGIE I. *Docplayer.cz* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/12619353-Technologie-i-slevani-a-svarovani.html>

7 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 – ROZMĚRY NEODVĚTRÁVANÉHO BRZDOVÉHO KOTOUČE	94
PŘÍLOHA 2 – ROZMĚRY ODVĚTRÁVANÉHO BRZDOVÉHO KOTOUČE.....	95

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 – ROZMĚRY NEODVĚTRÁVANÉHO BRZDOVÉHO KOTOUČE



PŘÍLOHA 2 – ROZMĚRY ODVĚTRÁVANÉHO BRZDOVÉHO KOTOUČE

