

Optimalizace technologie výroby odlitku z LKG

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Jan Bredl

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Optimalizace technologie výroby odlitku z LKG

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Bredl**
Osobní číslo: S18000220
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s litinou s kuličkovým grafitem, její výrobou a aplikačními možnostmi.
2. Prostudujte slévárenské vady litinových odlitků a seznamte se se simulačními programy, které umožňují jejich predikci.
3. V rámci spolupráce s firmou Metalurgie Rumburk s.r.o. u vybraného odlitku z LKG zdokumentujte původní technologii výroby a proveďte její optimalizaci.
4. Na základě získaných výsledků formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tabulky, grafy
cca 50
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] NOVÁ, Iva. Teorie slévání. 1. díl, Teoretické základy technologických procesů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-149-X.
- [2] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie litin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] VONDRÁK, V. Sekundární metalurgie litin. [Skripta]. VŠB – TU Ostrava 2004.
- [4] HRZÁN, M. Slévárenská technologie litin s kuličkovým grafitem. Svaz sléváren ČR, 2007.
- [5] OTÁHAL, V. Tvárná litina – Litina s kuličkovým grafitem [Monografie]. 2. rozšířené vydání. Technicko-ekonomické poradenství Brno.
- [6] HAMPL, J. Metalurgie slévárenských slitin. [Skripta – studijní opora]. VŠB-TU Ostrava 2013.
- [7] WALTON, Charles Francis; OPAR, Timothy J. (ed.). Iron Castings Handbook: Covering Data on Gray, Malleable, Ductile, White, Alloy, and Compacted Graphite Irons. Iron Castings Society, 1981.
- [8] ALAGARSAMY, Al. Ductile iron handbook. American Foundrymen's Society, 1992.
- [7] Časopisy: Slévárenství, Giesserei, atd.

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:


31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2021


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




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

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

18. května 2020

Bc. Jan Bredl

Abstrakt

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou částí, na teoretickou a experimentální. Teoretická část se zabývá především litinou s kuličkovým grafitem, její výrobou v minulosti i současnosti, mimopecním zpracováním a kontrolou metalurgické kvality. Hlavní pozornost je věnována tvorbě technologického postupu výroby litinového odlitku. Experimentální část této práce je věnována návrhu výrobní technologie pro vybraný odlitek. Je navrženo zaformování, vtoková soustava, nálitkování atd. Vzhledem k výskytu vad odlitků, však bylo nutné provést její optimalizaci. Optimalizace byla rozdělena do dvou fází. Vzhledem k potřebě rychlého řešení, byla optimalizována nejprve výrobní technologie pomocí simulačního softwaru QuikCAST. Vzhledem k tomu, že na řadu vad ve struktuře odlitků má ale vliv i metalurgické zpracování taveniny, byla ve druhé fázi experimentu pozornost věnována také kvalitě metalurgického zpracování taveniny. Úroveň očkování a modifikace litiny byla hodnocena pomocí termální analýzy.

Klíčová slova: litina s kuličkovým grafitem, modifikace, očkování, simulace plnění a tuhnutí, termální analýza

Abstract

This final thesis consists of two parts, a theoretical and an experimental one. The theoretical part treats cast iron with spheroidal graphite. In particular its production both, in history and at the present, out-of-furnace treatment and quality control in metallurgy. The experimental part deals with designing a production technology for a specific piece of a metal casting. It concerns of the process of moulding, designing the inflow system, rising etc. Having taken the amount of casting defects into consideration, it was necessary to optimise these processes. The optimisation was divided into two phases. To achieve a short-term solution, the simulation software QuikCAST was used to improve the processes. Nevertheless, a number of casting structure defects is caused during the alloy treatment. For this reason, it was focused on the metallurgical alloy treatment quality in the second phase of the experimental part. Particularly inoculation levels and cast-iron modification were assessed by means of the thermal analysis.

Key words: cast iron with spheroidal graphite, modification, inoculation, simulation of filling and solidification, thermal analysis

Poděkování

Mé největší poděkování patří vedoucímu této diplomové práce – paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. z katedry strojírenské technologie TU Liberec za odborný dohled, velice cenné rady a včasné připomínky při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval celému pracovnímu kolektivu METALURGIE Rumburk s.r.o. za podporu, trpělivost a vstřícnost během mého studia. V neposlední řadě bych velmi rád poděkoval panu Dr. Ing. Markovi Grzinčičovi za velmi cenné rady a předané zkušenosti.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teoretická část	11
2.1	Litina s kuličkovým grafitem.....	11
2.2	Výroba litiny s kuličkovým grafitem	15
2.2.1	Tavení litin	17
2.2.2	Mimopecní zpracování LKG.....	21
2.2.3	Kontrola taveniny termickou analýzou.....	25
2.3	Technologický postup výroby litinového odlitku	30
2.3.1	Poloha odlitku při lití – volba dělicí roviny	31
2.3.2	Konstrukce vtokové soustavy.....	33
2.3.3	Výpočet vtokové soustavy	37
2.3.4	Nálitkování.....	39
2.3.4.1	Zásady použití nálitků.....	40
2.3.4.2	Exotermické nálitky.....	44
2.3.5	Chladítka	46
2.3.6	Výpočet hmotnosti úkladu	49
3	Experimentální část.....	51
3.1	Představení odlitku Vřeteník WHR13	52
3.2	Představení původní technologie výroby odlitku.....	53
3.2.1	Volba dělicí roviny a polohy odlitku ve formě	53
3.2.2	Výpočet vtokové soustavy pro odlitek Vřeteník WHR 13	55
3.2.3	Výpočet hmotnosti úkladku	59
3.2.4	Původní systém nálitkování Vřeteníku WHR 13	60
3.2.5	Původní rozmístění chladítek u Vřeteníku WHR 13	61
3.2.6	Shrnutí původní technologie na Vřeteníku WHR 13.....	61
3.3	Optimalizace technologie pomocí numerického výpočtu.....	63



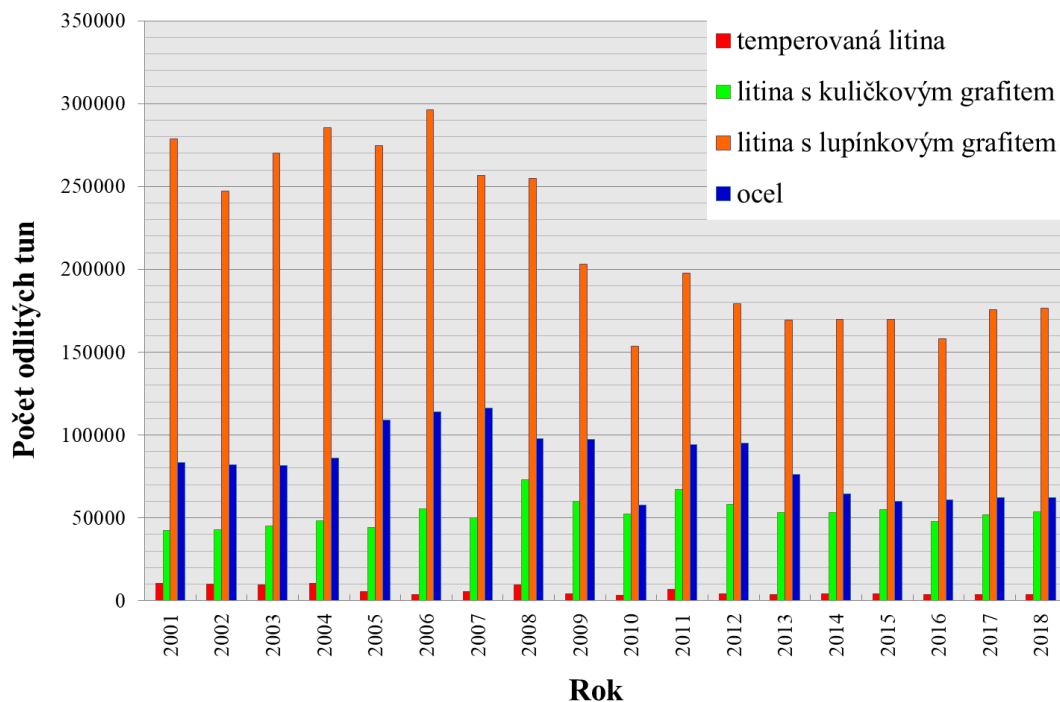
3.3.1	Simulační výpočet pro původní technologii	63
3.3.2	První návrh optimalizace	65
3.4.3	Druhý návrh optimalizace	67
3.4	Vyhodnocení průběhu optimalizace technologie	68
3.5	Tavení a metalurgická úprava taveniny	69
3.6	Průběh měření kvality kovu termickou analýzou.....	71
3.6.1	Vyhodnocení charakteru tuhnutí a T_{liq} základní taveniny z RBP.....	74
3.6.2	Vyhodnocení efektu primárního očkování.....	76
3.6.3	Vyhodnocení stavu taveniny po primárním očkování a modifikaci	77
3.6.4	Sekundární očkování – porovnání vlivu různých typů očkovačel	78
3.6.5	Ověření výdrže očkovacího účinku a kombinace očkovačel.....	79
3.6.6	Vyhodnocení kondice tekutého kovu termickou analýzou AccuVo	81
3.7	Kontrola chemického složení a mechanických vlastností vzorků z TA.....	83
4	Závěr.....	85
5	Použitá literatura	86

Seznam použitých symbolů a zkratek

LLG, GJL	- litina s lupínkovým grafitem
LKG, GJS	- litina s kuličkovým grafitem
LVG	- vermikulární litina
t	- doba plnění formy [s]
s	- součinitel času
tl	- střední tloušťka stěn odlitku [mm]
G	- hmotnost odlitku včetně vtokové soustavy a nálitků [kg]
m	- hrubá hmotnost odlitku (odlitek s přídavky) [kg]
H₀	- počáteční maximální ferostatická výška [m]
P	- výška odlitku nad rovinou zářezu [m]
C	- celková výška odlitku v poloze při liti [m]
S_z	- plocha všech zářezů [mm ²]
G	- hmotnost odlitku včetně vtokové soustavy a nálitků [kg]
v	- lící rychlost [m.s ⁻¹]
h_{stř}	- střední ferostatická výška [m]
ρ	- hustota tekutého kovu pro LLG kg/m ³
S₀	- plocha průřezu odlučovače strusky (struskováku) [mm ²]
S_v	- plocha průřezu vtokového kůlu [mm ²]
Q	- teplo [J]
λ_{LLG}	- součinitel tepelné vodivosti u LLG [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{LKG}	- součinitel tepelné vodivosti u LKG [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
F_v	- vztlaková síla [N]
F_G	- tíhová síla [N]
S_d	- plocha tekutého kovu v dělící [m ²]
h_d	- výška hladiny kovu nade dnem [m]
g	- tíhové zrychlení [m/s ²]
T_{liq}	- teplota likvidu [°C]
T_{eut}	- eutektická teplota [°C]
MR	- Metalurgie Rumburk s.r.o.
TSK	- Technical Service Kuehn GmbH
T_t	- teplota tavení [°C]
T_v	- teplota vypařování [°C]

1 Úvod

I když v současnosti nelze prohlásit, že by produkce litiny s kuličkovým grafitem v ČR zažívala nárůst, ba naopak v posledních letech objem její výroby spíše stagnuje, tak se stále jedná o velmi oblíbený materiál, který má uplatnění v řadě odvětvích (*automobilový, potravinářský průmysl, energetika atd.*). Na **obr. 1-1** je pak zachycen objem produkce jednotlivých slitin železa v ČR od roku 2001. [1]



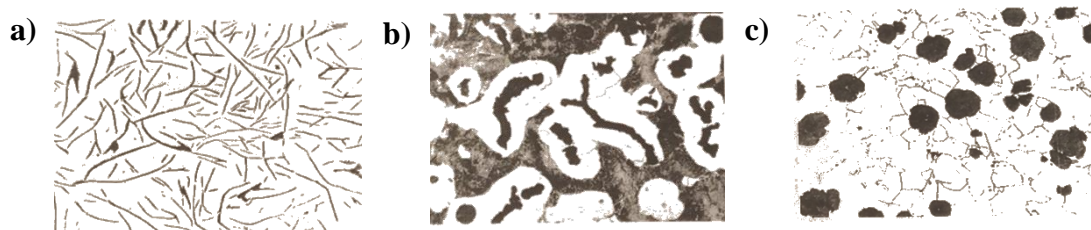
Obr. 1-1 Výroba odlitků ze slitin železa v ČR [1]

Oblíbenost tohoto materiálu je dána především jeho mechanickými vlastnostmi, které se se svými hodnotami přibližují k mechanickým vlastnostem oceli, ovšem výrobní cena litiny je nižší. To znamená, že litina s kuličkovým grafitem se svými mechanickými vlastnostmi nachází někde mezi litinou s lupínkovým grafitem a ocelí. Toto bohužel neplatí jen pro mechanické vlastnosti, ale i pro ty technologické – konkrétně slévárenské jako je např. zabíhavost nebo sklon ke tvorbě staženin a ředin. Litina s kuličkovým grafitem je tedy na výrobu z technologického hlediska náročnější a vyžaduje více pozornosti než litina s lupínkovým grafitem. Požadavky jak na metalurgickou kvalitu, tak na mechanické vlastnosti se neustále zpřísňují, a proto se v dnešní době již v řadě sléváren využívají simulační programy pro kontrolu technologie výroby. Pro kontrolu metalurgické kvality kovu může dobře posloužit např. termální analýza.

2 Teoretická část

2.1 Litina s kuličkovým grafitem

LKG patří mezi grafitické litiny, jejichž struktura se skládá z primární fáze a eutektika. U grafitických litin se během tuhnutí podle stabilního diagramu Fe-C vytváří grafitické eutektikum, které je tvořeno austenitem a grafitem. Podle tvaru grafitu se pak rozlišuje několik druhů grafitických litin, které tvoří hlavní podíl všech odlévaných litin. Mezi hlavní zástupce patří LLG – litina s lupínkovým grafitem často označovaná jako šedá litina, výše zmiňovaná LKG a LVG – vermikulární litina (*litina s červíkovým grafitem*). Tvar grafitu v litinách je zachycen na **obr. 2-1**. [2]

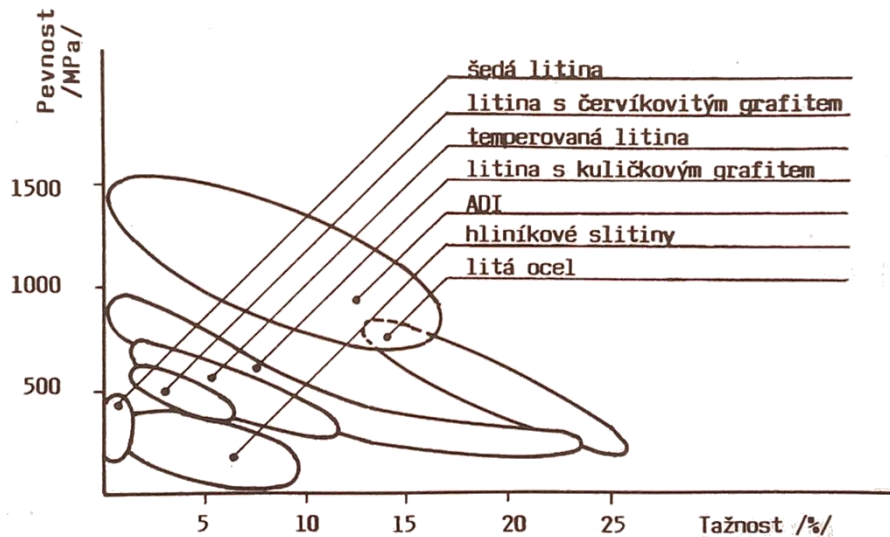


Obr. 2-1 Tvar grafitu jednotlivých litin [2]

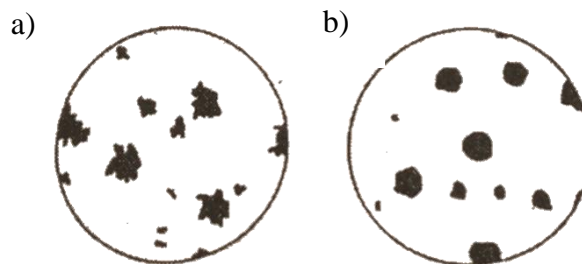
a) lupínkový grafit LLG, b) vermikulární – LVG, c) kuličkový grafit LKG

Právě *tvar grafitu* a jeho rozložení má pak zásadní vliv na mechanické a technologické vlastnosti litin. Grafit samotný má nízkou pevnost a svou přítomností v základní kovové hmotě zmenšuje její nosný průřez a tím u litin snižuje pevnost. Grafit ve struktuře působí vrubovým účinkem, čím ostřejší je zakončení grafitu, tím je vrubový účinek větší. Z tohoto pohledu je nejvýhodnější kuličkový grafit, který nemá žádné ostré konce, a naopak největší vrubový účinek má lupínek. Obráceně jsou na tom technologické (*slévárenské*) vlastnosti, jako je např. zabíhavost či grafitická expanze, kdy jsou tyto vlastnosti přívětivější u litiny s lupínkovým grafitem. Vermikulární litina se svými mechanickými i technologickými vlastnostmi nachází mezi LLG a LKG. [2] Na **obr. 2-2** jsou pak zobrazeny oblasti mechanických vlastností jednotlivých litin.

Grafit obsažený v LKG by měl být vyloučený v dokonale kuličkové formě, jemný a rovnoměrně rozložený. Přesto může LKG ve své struktuře obsahovat do jisté míry i nedokonale kuličkový grafit, jehož akceptovatelné množství může cca 5 %. [2] Nedokonale kuličkový grafit je zachycen na **obr. 2-3**.



Obr. 2-2 Oblasti mechanických vlastností litin [3]



Obr. 2-3 Rozložení grafitu [2]

a) nedokonale kuličkový grafit, b) dokonale kuličkový grafit

Mezi nestandardní (*degenerované*) tvary grafitu v LKG patří:

- **grafit nedokonale zrnitý** - příčiny jeho vzniku mohou být různé – např. přítomnost Ti či nízký obsah Mg v tavenině,
- **mezizrnový grafit** - tento druh grafitu vzniká díky přítomnosti antiglobulizačních prvků jako je Sb, Pb, Cd, Bi, As, Al a Cu, nejvíce se vylučuje na hranicích eutektických zrn,
- **explodovaný grafit a chunky grafit** - jedná se o grafit, který se vylučuje jako „rozsypané“ částice a nevytváří ucelené kuličky, tento druh grafitu se vyskytuje především u odlitků s větší tloušťkou stěn a jeho vznik je podpořen vyšším obsahem prvků, jako je např. Ca, Si, Ni či kovy lehkých zemin [2]

Disperzita (*hrubost*) grafitu je hodnocena jako počet kuliček na mm^2 . Běžný počet je 100-150 kuliček/ mm^2 . Technologické vlastnosti LKG se zlepšují s rostoucí jemností vylučovaného grafitu, avšak příliš jemně vyloučený grafit může naopak

zapříčinit zhoršení technologických vlastností a stejně tak rozsah mikrostaženin a pórovitosti. Se zvětšující se tloušťkou stěn odlitku se zmenšuje disperzita grafitu, může klesnout až na 50 kuliček/mm². Větší částice grafitu jsou pak náchylnější k nedokonale kuličkovému tvaru. Mezi kuličkami grafitu pak dojde k segregaci prvků po hranicích zrn, kde se pak mohou vylučovat karbidy. U LKG je tedy nejsložitějším metalurgickým problémem zajistit vznik grafitu v dokonale kuličkové podobě, kterého se dosáhne pomocí modifikace. Dalším důležitým metalurgickým úkolem je zajištění pravidelného rozložení grafitu a optimální disperzity, čehož se dosáhne správným očkováním. [2] Tato problematika je podrobněji popsána v kap. 2.2.2.

V kovové matici nelegované LKG lze nalézt různé procentuální zastoupení perlitické a feritické fáze, které pak určuje výsledné mechanické vlastnosti. Ferit u LKG zajišťuje její plastické vlastnosti a houževnatost. Díky perlitu pak LKG získá tvrdost a pevnost.

Podíl zastoupení feritu k perlitu je ovlivněn poměrem obsahu uhlíku a křemíku. Jeli zapotřebí dosáhnout vyššího podílu perlitické fáze, tak poměr C a Si musí být vyšší, naopak pokud bude třeba větší podíl feritické struktury, tak poměr mezi C a Si musí být nižší, to vše při shodném uhlíkovém ekvivalentu. Doporučený obsah C v LKG by se měl pohybovat v rozmezí 3,4 - 3,9 % C a obsah Si mezi 2,2 - 2,8 % Si. Uhlíkový ekvivalent je volen podle rychlosti ochlazování, tj. podle tloušťky stěn odlitku. Doporučený obsah C a Si u nelegovaných a nízkolegovaných LKG je uveden v **tab. 2-1**. [2]

Tab. 2-1 Doporučený obsah C a Si v LKG odvislý od tloušťky stěn odlitku [2]

Tloušťka stěny (mm)	Struktura v litém stavu					
	Převážně perlitická			Převážně feritická		
	C (%)	Si (%)	C _E	C (%)	Si (%)	C _E
6	3,85	2,65	4,7	3,85	2,85	4,8
12	3,70	2,45	4,5	3,70	2,60	4,55
25	3,60	2,35	4,4	3,55	2,50	4,4
50	3,45	2,20	4,2	3,40	2,35	4,2
75	3,40	2,20	4,15	3,35	2,35	4,15
100 a více	3,40	2,15	4,1	3,35	2,25	4,1

Kromě *uhlíku* a *křemíku* mají na strukturu a vlastnosti litin vliv i další prvky, jako mangan, fosfor a síra, dále karbidotvorné prvky jako Cr, V, Mo a další legury a mikrolegury. Za pomoci legování a následného tepelného zpracování lze získat litinu se strukturou sorbitickou, bainitickou, martenzitickou nebo i austenitickou.

U nelegované LKG pak mohou ve struktuře vzniknout karbidy nebo ledeburity, což není žádoucí. Karbidy pak vznikají na hranicích zrn důsledkem segregace manganu, tento jev lze pozorovat zejména u silnostěnných odlitků. Vznik ledeburitu je podpořen především při rychlém ochlazení odlitku. [2]

Mangan je důležitým perlitotvorným prvkem. Proto pro získání feritické struktury je nutné držet obsah Mn co nejnižší, tak aby nepřesáhl hranici 0,15 % Mn. Pokud je cílem získání litiny s perlitickou strukturou, tak je obsah manganu volen v rozmezí 0,6 - 0,7 % Mn. Obsah manganu je třeba volit i s ohledem na tloušťku stěn, neboť u silnostěnných odlitků se projevuje výrazná segregace Mn na hranicích zrn. V místech, kde se mangan takto koncentruje, dochází pak ke tvorbě jeho karbidů. Proto se v těchto situacích volí nižší obsah manganu, v rozmezí od 0,3 - 0,4 % Mn. Pokud je zapotřebí zajistit perlitickou strukturu LKG, tak toho lze dosáhnout i dolegováním za pomoci mědi, jejíž obsah by měl být v rozmezí 0,5 - 1,5 % Cu. [2]

Fosfor se vylučuje po hranicích zrn, kde se železem tvoří eutektikum zvané steadit, který je ve struktuře velmi nežádoucí, neboť velice zhoršuje mechanické vlastnosti, především lomovou houževnatost a tažnost. Jeho obsah v LKG by neměl přesáhnout 0,08 % a u silnostěnných odlitků by měl být dokonce ještě nižší, až pod 0,02 %. [2]

Síra je nežádoucí prvek, protože má silný sklon k segregaci a pokud není vázána na Mn, tak zabraňuje grafitizaci a způsobuje křehkost litiny. Při přípravě LKG se v průběhu modifikace slučuje s hořčíkem (*modifikátorem*) za vzniku sulfidu hořečnatého. Díky tomu je finální obsah síry v tavenině velmi nízký (*cca 0,01 % S*), nehledě na to, jaký byl obsah síry před modifikací. To ale neznamená, že na obsahu síry ve výchozím kovu nezáleží. Její přítomnost v tavenině při modifikaci způsobuje vznik sekundární strusky a s jejím rostoucím obsahem rostou i náklady na modifikaci, neboť se hořčík zbytečně spotřebovává na vznik MgS. Navíc při modifikaci předslitinou FeSiMg dojde i ke zvýšení obsahu křemíku v litině. Z těchto důvodů je žádoucí udržovat co nejnižší obsah síry v tavenině před modifikací, nejlépe 0,02 - 0,03 % S. Toto doporučení platí při modifikaci za pomoci předslitiny FeSiMg, při modifikaci čistým hořčíkem je možné použít taveninu s obsahem síry až do 1 %. [2]

Karbidotvorné prvky musí mít u LKG velmi nízký obsah, protože jejich účinek se zde projevuje silněji než u LLG. U perlitické struktury LKG by měl být např. obsah Cr menší než 0,1 % a u feritické dokonce menší než 0,04 %.

Mezi nejproblémovější prvky lze počítat Pb, Cd, Bi. Jsou to prvky, které se běžně vyskytují u LLG jako doprovodné a jejich přítomnost nečiní žádný problém. U LKG mají však velmi záporný vliv na tvar grafitu, zapříčiňují tzv. degeneraci grafitu. Povolný obsah těchto prvků se pohybuje v řádech setin až tisícín procenta. Právě z tohoto důvodu jsou pro LKG mnohem vyšší nároky na jakost vsázky a pokud je to možné nepoužívá se žádný litinový šrot. [2]

V **tab. 2-2** jsou uvedeny mechanické vlastnosti vybraných LKG.

Tab. 2-2 Základní mechanické vlastnosti u nelegovaných LKG [2]

značení materiálu	pevnost v tahu R _m [MPa]	mez 0,2 R _{p0,2} [MPa]	tažnost A _{5min} [%]	tvrdost HB 4)	struktura	pozn.
EN-GJS-350-22	350	220	22	<160	F	1)
EN-GJS-400-18(15)	400	250	18	130-175	F	2)
EN-GJS-450-10	450	310	10	160-210	F	
EN-GJS-500-7	500	320	7	170-230	F+P	
EN-GJS-600-3	600	370	3	190-270	P+F	
EN-GJS-700-2	700	420	2	225-305	P	
EN-GJS-800-2	800	480	2	245-335	P, S	
EN-GJS-900-2	900	600	2	270-360	B, S	3)

Vysvětlivky: 1) zaručené vlastnosti za nízkých teplot, 2) tažnost 15 a 18 % + zaručené vlastnosti za nízkých teplot, 3) pro dosažení vlastností je nutné tepelné zpracování či legování, 4) tvrdost měřena na přilítných zkušebních tělesech, F= ferit, P= perlit, S= sorbit, B= bainit

2.2 Výroba litiny s kuličkovým grafitem

Jak je obecně známo, princip výroby LKG spočívá v přípravě výchozí taveniny o vhodném chemickém složení a její následné metalurgické úpravě, tj. provedení modifikace a očkování.

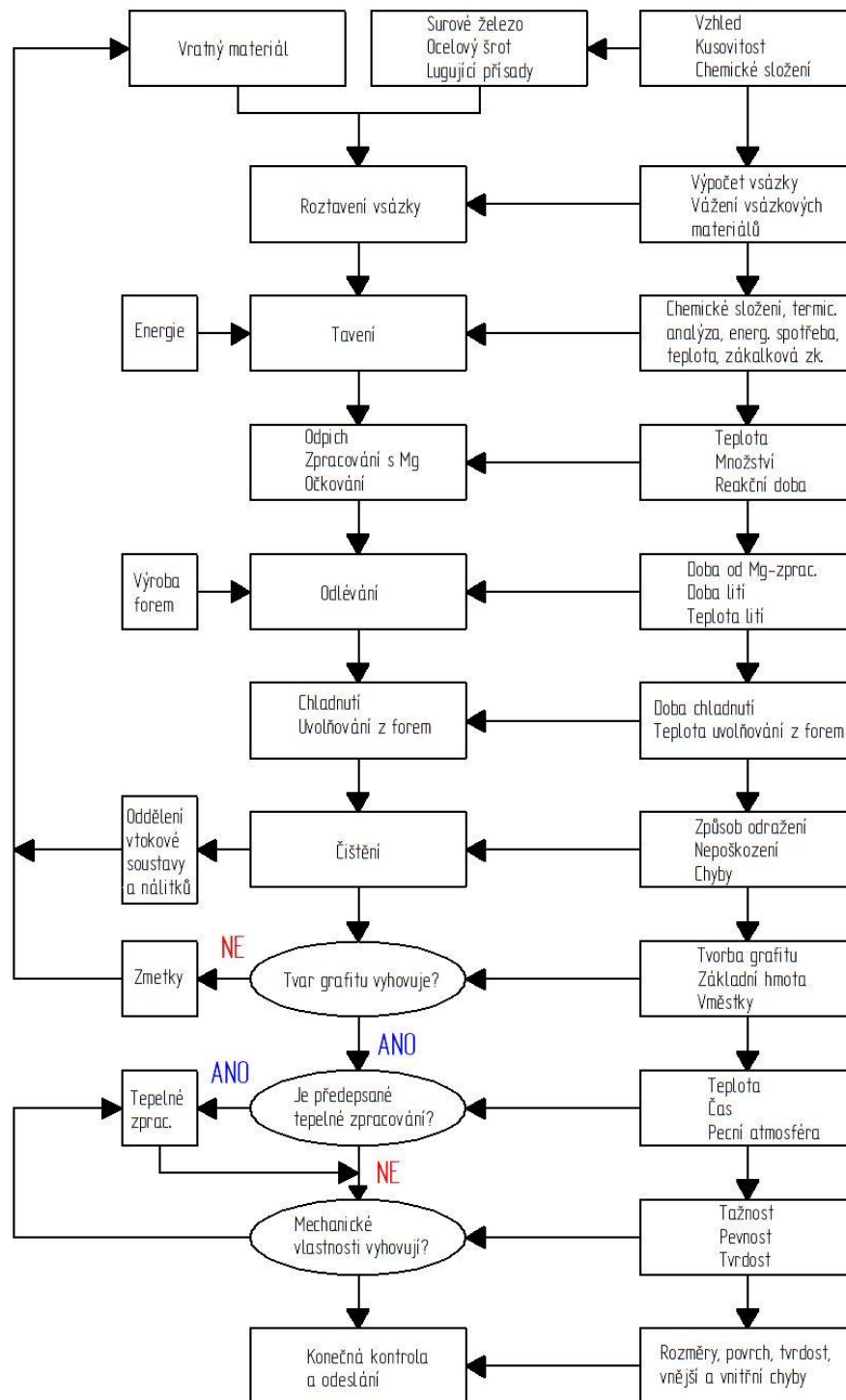
Průmyslová výroba litiny s kuličkovým grafitem započala v roce 1948, ale její první zkušební odlití se uskutečnilo již koncem druhé světové války a následně po jejím skončení. Tehdejší vědecké práce prověřovaly především nodulační účinek ceru a hořčíku na vyloučený grafit. Po mnoha zkouškách byl pro tyto účely jako vhodnější z těchto dvou prvků vybrán hořčík. Jeho hlavními přínosy byla spolehlivost a cenová dostupnost, z těchto důvodů se jevil jako vhodný kandidát pro výrobu LKG. Použití hořčíku však přinášelo jistá úskalí. Šlo především o jeho prudkou reakci s tekutým kovem, kterou bylo možné zmírnit dvěma způsoby. [4]

V počátcích výroby se provozní zkoušky a výroba realizovaly pomocí ponorného zvonu, kde byl do taveniny o vhodném chemickém složení ponořován čistý hořčík. Tato metoda pak byla nahrazena polévacími metodami. Další často používaný způsob modifikace byl pomocí tlakových pánví, kde se modifikace pomocí hořčíku realizovala při zvýšeném tlaku. Dalším významným milníkem při výrobě LKG bylo používání autoklávů, do kterého se umístila celá pánev s tekutým kovem o určitém chemickém složení. Tento způsob se v dnešní době již moc nepoužívá. [4]

Druhý způsob snížení prudkosti reakce hořčíku a taveniny byla založena na snížení obsahu hořčíku v modifikační přísadě jeho nahrazením pomocí dalších prvků, jako byly např. Ni, Cu, Si. Z těchto prvků to byl právě křemík, díky kterému se dosáhlo největšího rozšíření tohoto způsobu modifikace, vznikly tak známé předslitiny FeSiMg, které se nejen používají dodnes, ale mají i největší uplatnění při výrobě LKG. [4]

Po natavení se jako první provede modifikace, tj. do taveniny se přidá modifikátor na bázi Mg, díky kterému dojde ke snížení obsahu S a O₂, čímž se vytvoří předpoklad pro vznik grafitu v globulární podobě. Ve druhém kroku se provádí grafitizační očkování pomocí očkovadla na bázi křemíku. Očkování zajistí přítomnost dostatečného počtu aktivních grafitových zárodků a zároveň eliminuje výrazné podchlazení taveniny způsobené aplikací hořčíku. Použití jen samotného modifikátoru by totiž vedlo ke krystalizaci dle metastabilní soustavy a ve struktuře by se pak vyskytovaly ledeburit. Tavenina se tedy grafitizačně očkuje buď souběžně s modifikací, nebo až po ní. Účinek modifikátoru i grafitizačního očkovadla je krátkodobý a proto musí dojít k odlití namodifikované a naočkované taveniny neprodleně po mimopecním zpracování. [2] Problematice modifikace a očkování je věnována samostatná kap. 2.2.2.

Na **obr. 2-4** je pak zachyceno schéma výroby litiny s kuličkovým grafitem, kde jsou zobrazeny jednotlivé pracovní kroky, příslušné zkoušky, kontroly procesů a jakosti.



Obr. 2-4 Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem [5]

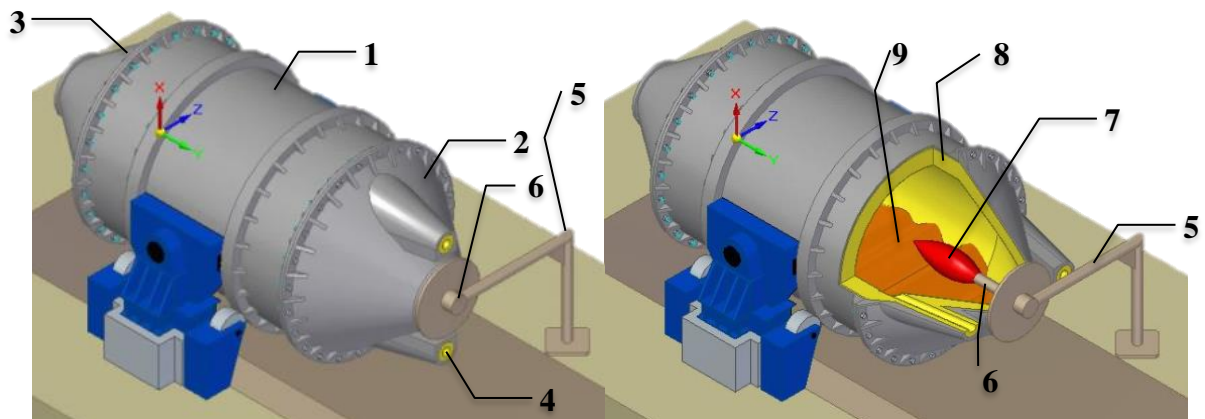
2.2.1 Tavení litin

V současné době lze pro tavení litiny použít několik typů tavicích agregátů. Dříve byly nejrozšířenějším zařízením pro tavení *kuplovný*, byly velmi oblíbené pro svou technickou nenáročnost a efektivnost. Mají však i své nevýhody, jako je např. jejich ekologická náročnost (*neplnění stále přísnějších emisních limitů*), produkují

kov nevhodný pro přípravu LKG. Tavenina z kuploven je poměrně bohatá na síru, proto musí dojít k odsíření kovu před jeho modifikací, což je operace navíc, která u jiných tavících agregátů není potřeba. Další možnostmi jsou **elektrické indukční pece**, mezi jejichž výhody patří velká operativnost, snadná regulace tavícího procesu, homogenita teploty a chemického složení taveniny, atd. Posledním typem tavících agregátů, které se používají pro přípravu litiny, jsou **rotační bubnové pece** (RBP). Mezi jejich hlavní výhody patří zejména nízké pořizovací náklady, snadné tavení různých jakostí litin, nízké náklady na provoz pece. Dalším kladem je pak použití kyslíkového hořáku, díky kterému nevzniká mnoho spalin a je snadné zajistit účinné odprašení. Díky tomu velice dobře splňují ekologické limity. [3]

Vzhledem k tomu, že firma Metalurgie Rumburk s.r.o. (MR) používá pro přípravu taveniny plynovou rotační bubnovou pec, je zde podrobněji popsána její konstrukce.

Základem **rotační bubnové pece** (RBP) je válcovité tělo, které je na každém konci opatřeno kuželovitým čelem, které je k tělu pece připevněno pomocí šroubových spojů. Tyto dvě kónická čela nejsou zcela totožná. Oba dva tyto kužely mají ve vrchní části otvor, u předního kuželu slouží otvor pro zasunutí hořáku a vysypání zbytků strusky, které v peci zůstanou po odlití. Na předním kuželu se pak hned vedle hlavního otvoru nachází ještě dva odpichové, které jsou uzavřeny žáruvzdornou hmotou. Před vylitím taveniny se tato hmota musí prorazit bouracím kladivem, aby mohl kov vytéct ven. Před započítím nové tavby musí být odpichový otvor zazděn novou žáruvzdornou hmotou. Z důvodu rovnoměrného „vymílání“ žáruvzdorné vyzdívky kuželu se odpichový otvor používá jen jeden licí den, následující den se používá druhý otvor a takto se pak střídají. Zadní kužel je osazen pouze jedním hlavním otvorem, který slouží pro odtah spalin a po naklonění pece přes něj probíhá zavážení vsázky. [3] Na **obr. 2-5** je uvedeno schématické zobrazení této pece.



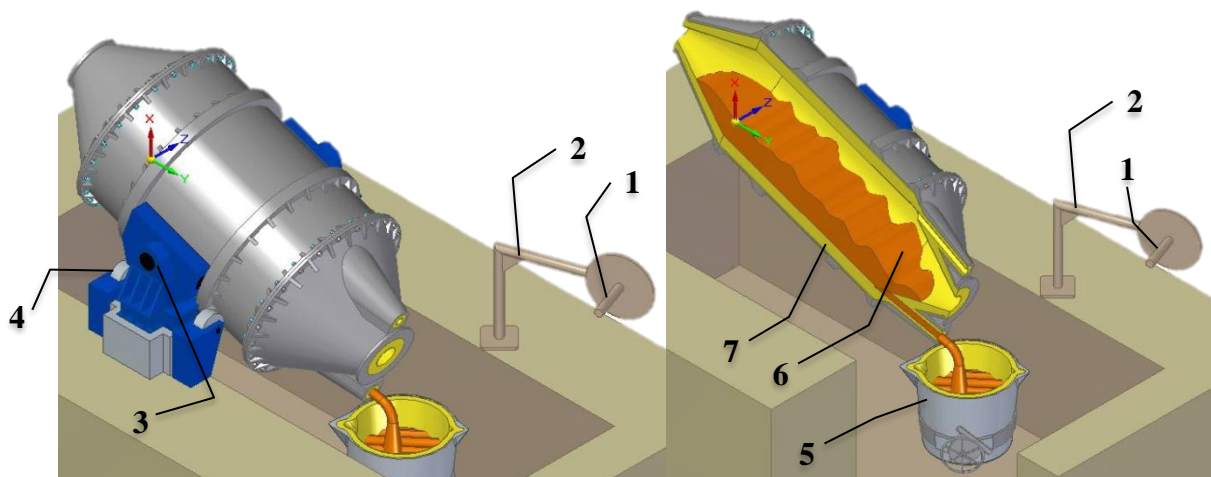
Obr. 2-5 Rotační bubnová pec

Vysvětlivky: 1) hlavní tělo pece, 2) přední kužel, 3) zadní kužel, 4) odpichový otvor, 5) pantografické zařízení držící hořák, 6) hořák, 7) plamen, 8) žáruvzdorná vyzdívka, 9) tavenina

Pec je usazena na čtyřech podpěrných kolech, které pomocí elektromotorů zajišťují rotační pohyb pece kolem podélné osy. Pomocí hydraulického naklápěcího zařízení lze pec během vylévání kovu naklopit až o 45° nahoru či dolů. Při přezdívání žáruvzdorné vyzdívky lze tělo pece naklopit o 90°. Naklápění pece se uplatňuje i při zavážení vsázky. Po jejím nasazení se pec sklopí zpět do horizontální pozice a proběhne vlastní tavení.

K vytápění rotační bubnové pece lze použít topný olej, kapalným plyn či zemní plyn. MR používá k vytápění pece zemní plyn. Spalování pak probíhá především za pomoci kyslíku. Hořák lze i v průběhu tavby vysunout ven pomocí pantografického zařízení, např. kvůli měření teploty kovu nebo při vsázkování, kdy se hořák vysune a zamění se za něj kovová ucpávka. Kyslíkový plamen zajistí vysokou teplotu za vzniku malého množství spalin, které se musí před zachycením na filtrech nejprve ochladit buď vhněním studeného vzduchu do filtračního systému, nebo pomocí tepelného výměníku. Vyzdívka u odtahu z pece je pak velmi namáhána. Konečný obsah prachových částic, který se pak vypouští do ovzduší je do 6 mg.Nm⁻³. [3] Na **obr. 2-6** je zobrazena RBP při odpichu kovu a pro názornější ukázkou je odpich zobrazen i v řezu.

RBP má vysokou tepelnou účinnost v porovnání s ostatními tavicími agregáty jako jsou např. kuplovny či indukční pece. Využití spalného tepla se u RBP uvádí mezi 50 až 60 %, což je vysoká hodnota, neboť u ostatních agregátů se pohybuje cca na 30 %.



Obr. 2-6 Rotační bubnová pec při vylévání taveniny

Vysvětlivky: 1) hořák, 2) pantografické zařízení, 3) hydraulický naklápečí systém pece, 4) pohon pece, 5) hrncová lící pánev, 6) tavenina, 7) žáruvzdorná vyzdívka

RBP je vyzděna kyselou vyzdívkou, která je silně namáhána nejen vysokými teplotami, ale i mechanickým opotřebením především při navážení vsázky a při započetí tavby a „převalování“ obsahu pece. Životnost vyzdívky pak závisí na mnoha faktorech např. na kvalitě jejího upěchování při vyzdívání nebo na počtu taveb za den atd. Standardní počet taveb na jednu kampaň (*počet taveb na novou vyzdívku*) se pohybuje okolo 300 taveb.

Celý proces tavení a metalurgie taveniny je velmi ovlivněn hořením spalin v pecní atmosféře, které jsou v přímém kontaktu s kovem. Velikost propalu jednotlivých prvků se pak odvíjí od charakteru pecní atmosféry. U RBP se propal základních prvků nejčastěji uvádí v rozmezí: 10 – 15 % C, 15 – 20 % Si, 25 – 32 % Mn. Komplikované je pak udržet požadovaný obsah uhlíku v peci především, když se provádí více odpichů a litina tak musí zůstat delší dobu v peci na odpichové teplotě. [3]

Vsázka do RBP je tvořena surovým železem (30 - 50 %), vratným materiálem (*zmetkové odlitky, vtokové soustavy, nálitky*), ocelovým odpadem a struskotvornými přísadami (0,5 – 1 %). Obsah uhlíku získává tavenina především ze surového železa, lze ho však následně upravit pomocí nauhličovadel. Feroslitiny lze přidat do taveniny, nebo mohou být též součástí vsázky.

Délka jedné tavby se pohybuje mezi 90 - 180 minutami, záleží na odpichové teplotě a na velikosti pece. Maximální teplota v RBP může dosáhnout až 1550 °C,

ale to už je velmi nežádoucí pro životnost vyzdívky, proto se nedoporučuje přesahovat teplotu 1480 °C. [3]

2.2.2 Mimopecní zpracování LKG

Jak již bylo několikrát zmíněno, vyloučení grafitu ve formě kuliček se docílí modifikací za pomoci hořčíku. K dosažení tohoto tvaru grafitu musí být obsah hořčíku v litině minimálně 0,025 %, obvykle se obsah Mg pohybuje mezi 0,03 - 0,06 %. Hořčík není jediný prvek, který lze k tomuto účelu použít, teoreticky lze aplikovat i jiné prvky, které disponují sferoidizačním účinkem, jako jsou například kovy vzácných zemin. Ale aplikace těchto prvků je technicky velmi náročná a jejich účinek není dostatečný. Z těchto důvodů je hořčík prakticky jediným technicky vhodným modifikačním prvkem. [5]

Jaký je přesně mechanismus vlivu hořčíku a ostatních prvků obsažených v modifikátoru (Ca, Ce, KVZ) na globularizaci grafitu, tj. na podmínky růstu grafitu v eutektických buňkách, není ani v dnešní době úplně jasný. Existuje však řada hypotéz.

Jedna z hypotéz uvažuje, že tvar grafitu je určen *druhem zárodku*. Sloučeniny hořčíku, které vznikají v tavenině, musí tedy vytvářet vhodné zárodky. To by znamenalo, že zárodky s hexagonální mřížkou, mezi které patří např. FeS, SiO₂, SiC atd. způsobují růst grafitu v lupínkové podobě. Naproti tomu pak zárodky s krychlovou mřížkou jako je MgS, MgO či Mg₂Si iniciují vznik grafitu v globulární formě. Základním stavebním kamenem těchto hypotéz jsou výsledky metalografie a rentgenových spektrálních mikroanalýz, které potvrdily přítomnost hořčíku a síry, ve středu grafitové kuličky. Přítomnost vhodného zárodka již byla ověřena i nejnovějšími výzkumy, ale vhodný zárodek není jedinou podmínkou pro vznik kuličkového grafitu. [5]

Další hypotézy uvažují, že na utváření grafitu v globulární podobě se podílí *fyzikálně-chemické vlastnosti taveniny*. Nejvýznamněji se projevuje zejména povrchové napětí taveniny. Bylo zjištěno, že po zpracování hořčíkem povrchové napětí taveniny roste. Pokud se hodnota povrchového napětí taveniny pohybuje v rozmezí:

- $\sigma = 1,4 - 1,3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ vzniká globulární grafit,
- $\sigma = 1,3 - 1,1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ vzniká podchlazený grafit,
- $\sigma = 1,1 - 0,8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ vzniká hrubý lupínkový grafit.

Různé hodnoty povrchového napětí grafitu jsou však jen doprovodným jevem, *sferoidizace grafitu*. [5]

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, modifikace Mg má svá úskalí, viz **tab. 2-3**. Vzhledem k nízké hustotě Mg při aplikaci vyplouvá na hladinu a při reakci s taveninou probíhá bouřlivá reakce, která souvisí s poměrně nízkou teplotou vypařování. Hořčík také podporuje metastabilní tuhnutí taveniny. Z toho důvodu byly vyvinuty různé typy modifikačních metod.

Tab. 2-3 Základní vlastnosti Mg [2]

ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	T_t [°C]	T_v [°C]	silná afinita k	podpora vzniku zákalky
1740	650	1107	S, O₂	ANO

Modifikace samotná probíhá tak, že páry hořčíku prostupují v bublinkách ode dna až na hladinu taveniny. Při tomto probublávání dojde k reakci hořčíku se sírou a kyslíkem, rozpuštěným v litině a vytvoří často ještě spolu s křemíkem chemické sloučeniny, které se pak vylučují v tekutém kovu jako sekundární struska. Ne všechny hořčíkové páry se podílejí na modifikaci, část par na hladině taveniny jen shoří. Tuto část par samozřejmě do modifikace počítat nelze, neboť se nerozpustí v tavenině a nepodílí se tak na vzniku grafitu v jeho globulární podobě. Tato část hořčíku se označuje jako „zbytkový hořčík“ – Mg_{zbyt}. Obsah zbytkového hořčíku je často vyšší než 0,03 %, neměl by však přesahovat 0,06 %, neboť při jeho vyšším obsahu je i větší podíl vměstků a litina samotná je pak náchylnější k tvorbě zákalky. Samozřejmě záleží i na tloušťce stěn odlitku, u tenkostěnného odlitku bude postačující obsah hořčíku jen nepatrně nad hranicí 0,03 % Mg, kdežto u silnostěnného odlitku bude zapotřebí, aby se obsah hořčíku pohyboval mezi 0,045-0,06 % Mg. [2]

Využití hořčíku pak závisí především na typu modifikační metody, důležitá je i teplota kovu, neboť čím bude vyšší teplota litiny při modifikaci, tím nižšího vyžití hořčíku se dosáhne. Dávkování je zapotřebí v každé slévárně prakticky ověřit, neboť provoz každé slévárny je specifický a po nastavení dávkování je nutné dodržovat stále stejné podmínky modifikace. [2]

Jak již bylo zmíněno, tavenina určená k modifikaci by měla obsahovat co nejmenší podíl síry, neboť ta se přímo podílí na množství spotřebovaného hořčíku, který reaguje se sírou za vzniku sulfidu hořečnatého. Obsah síry na konci modifikace

se pohybuje okolo 0,01 % S. Protože pro odstranění 1 % S je zapotřebí 0,75 % Mg, je velmi důležité, aby výchozí kov obsahoval, co nejmenší obsah S. Existuje spousta druhů tavících agregátů, které dokáží natavit kov s velmi nízkým obsahem síry (*např. rotační pec*), ale v praxi se používají i taková tavící zařízení, která touto schopností nedisponují (*např. kuplovna*) a proto při použití těchto agregátů musí před samotnou modifikací dojít k odsíření tekutého kovu. [2]

Modifikaci lze provádět kovovým hořčíkem nebo pomocí hořčikovými předslitin. Při modifikaci kovovým hořčíkem vzniká bouřlivá reakce, způsobená prudkým vypařováním. Může se používat jen u těch modifikačních metod, které dokáží bouřlivost reakce nějakým způsobem regulovat – *např. metody využívající sferokláv či GF konvertor*. [2]

Aby se předešlo bouřlivým reakcím hořčíku, tak se používají jeho předslitiny, nejčastěji FeSiMg, ale ve výjimečných případech lze použít i předslitinu NiMg.

V předslitinách FeSiMg je obsaženo přibližně 3 – 15 % Mg a 45 % Si. Při vyšším obsahu hořčíku reaguje předslitina o to bouřlivěji. Nejčastější obsah hořčíku v předslitině tedy bývá 5 – 8 %. Předslitiny FeSiMg mají menší hustotu než modifikovaná litina, a proto je důležité je v modifikační pánvi zajistit tak, aby jen nevyplavaly na hladinu, kde by shořely a k modifikační reakci by došlo jen v malé míře nebo vůbec. Předslitiny s Ni mají výhodu, neboť mají větší hustotu než litina a tím pádem sami klesnou ke dnu. U modifikačních předslutin, které obsahují navíc kovy vzácných zemin (*především Cér*), je zajištěna jednak jejich podpora modifikačního účinku Mg, a jednak kompenzace ovlivnění taveniny škodlivými prvky. [2]

Při modifikaci předslitinou FeSiMg a následným grafitizačním očkováním se do taveniny vnáší velké množství křemíku. Jak již bylo uvedeno, křemík je grafitizační prvek, zajistí přítomnost dostatečného počtu aktivních grafitových zárodků a zároveň eliminuje výrazné podchlazení taveniny způsobené aplikací hořčíku. Množství křemíku, které se do taveniny vnese modifikací a očkováním je nutné zohlednit a ponížít obsah křemíku ve vsázce.

Očkování je možné aplikovat současně s modifikací anebo neprodleně po ní. Očkovat lze i dvoustupňově, kdy první očkování proběhne při modifikaci a to druhé během lití. Očkuje se za pomoci předslitiny FeSi a dávkování se pohybuje v rozmezí 0,5 – 1 %. Namodifikovanou a naočkovanou litinu je zapotřebí co nejdříve odlít, nejlépe do 15-20 minut, v ideálních případech do 30 minut. Je to z toho důvodu, že

postupně dochází k odeznívání modifikačního účinku, protože z již namodifikované taveniny dochází k vypařování hořčíku, čímž se snižuje jeho obsah v tavenině a úměrně tomu slábne i modifikační účinek. Kdyby došlo k odlití taveniny až po delší době, tj. modifikační účinek hořčíku by byl slabší, tak by se grafit vyloučil ve tvaru nedokonale zrnitém nebo by mohla vzniknout litina s červíkovitým grafitem. [2]

V dnešní době existuje již celá řada metod modifikace LKG, od těch méně technicky náročných jako je např. metoda *Sandwich*, *Tundish* a *Inmold* přes technicky náročnější metody jako např. modifikace ve *sferoklávu* či *konvertoru* nebo modifikace za pomoci *plněného profilu*. Právě poslední zmíněná metoda je jako jediná z výše jmenovaných blíže představena v této práci. Není tomu tak z hlediska její důležitosti či jejího rozšíření v průmyslové výrobě, ale z toho, že v MR je používána k výrobě LKG právě tato metoda.

Modifikace plněným profilem se realizuje pomocí speciálního drátu, který je naplněný modifikační předslitinou. Aplikace plněného profilu do taveniny se provádí přes modifikační stanici, což je speciální podávací zařízení. Množství modifikátoru je přesně dáno délkou drátu, kterou je nutno nastavit na podavači. Důležitá je ale i rychlost podávání profilu, pokud by byla moc rychlá, tak by docházelo k “zapichování“ drátu do dna pánve. Optimální rychlost je taková, aby se plněný profil rozpouštěl u dna pánve, kde pak dojde k reakci s hořčíkem a jeho páry budou prostupovat směrem k hladině a namodifikují taveninu. Neexistuje žádné univerzální nastavení tohoto procesu, v každé slévárně se musí nastavit individuálně. [2]

Standardní průměr modifikačního drátu se pohybuje v rozmezí od 5 do 13 mm a jeho přesné chemické složení se bude lišit buď podle výrobců, nebo podle specifických požadavků daných sléváren. Obvyklé chemické složení modifikátoru je 13 – 25 % Mg, 20 – 40 % Si, 10 – 20 % C, 1 % kovů vzácných zemin a zbytek tvoří Fe.

Jak již bylo uvedeno v úvodu kap. 2.2, vzhledem k tomu, že Mg podporuje metastabilní tuhnutí taveniny, tak po modifikaci nebo souběžně s ní je nutné provádět grafitizační očkování. Metod pro aplikaci očkovačel je mnoho (*např. očkování v pánvi, v lící jamce, do proudu kovu atd.*). [2] V MR vzhledem k tomu, že provádí modifikaci plněným profilem přes modifikační stanici, která umožňuje dávkovat 2 profily, se používá grafitizační očkování plněným profilem.

Na **obr. 2-7** je ukázán řez jak modifikačním, tak očkovacím plněným profilem. Jiný odstín snímku očkovadla je způsoben použitím jiného nasvícení než při fotografování modifikátoru, snímky byly pořízeny v MR.



Obr. 2-7 Řez plněným profilem používaným v MR (*vlevo modifikátor Progelta LSK 13412BS, vpravo očkovadlo Progelta WIN 13A*)

Pro zajištění požadované výsledné struktury odlitku je žádoucí kontrolovat stav taveniny v průběhu výroby a případně rovnou provést určité úpravy. Jako vhodný nástroj ke kontrole taveniny během její výroby může velmi efektivně posloužit např. termická analýza.

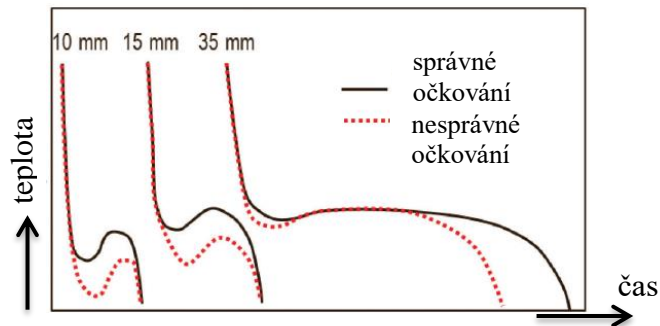
2.2.3 Kontrola taveniny termickou analýzou

Termická analýza zaznamenává a interpretuje změny teploty v čase při chlazení nebo ohřívání materiálu. Ve své nejjednodušší podobě se používá ve slévárenství pro interpretaci křivky chladnutí kovu, který je analyzován při tuhnutí ve speciální formě. Fázové přeměny, ke kterým dochází v průběhu tuhnutí a chladnutí kovu, se projevují na křivce jako anomálie. Lze ji tedy použít i na hodnocení úrovně modifikace a očkování taveniny. [6]

Při měření podchlazení na křivce chladnutí u její eutektické části je pak možné odhadnout, zda-li je tavenina správně naočkována pro výrobu konkrétního odlitku. [6]

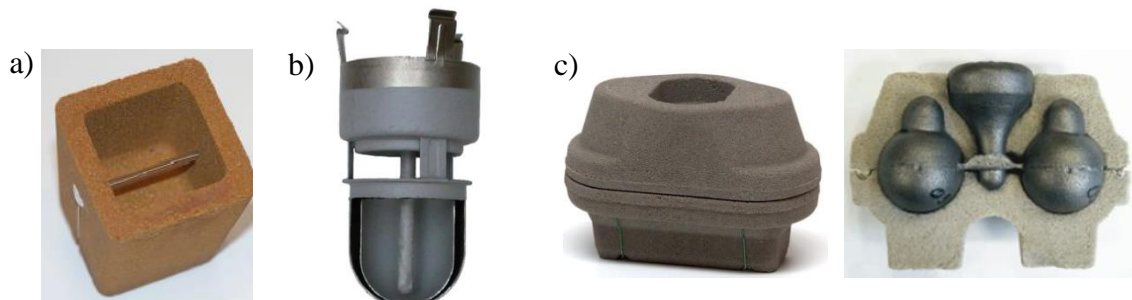
Ve své nejjednodušší podobě lze při TA použít pouze jeden termočlánek, který je vložený ve zkušební formičce. Samotná konstrukce testovacího kelímku má ale značný vliv na výsledky a jejich prezentaci. Tvar křivky chladnutí je určen rovnováhou mezi latentním teplem uvolněným během tuhnutí a ztrátami tepla mezi zkušebním kelímkem a okolní atmosférou. Je důležité, aby konstrukce kelímku zaručovala konzistentní podmínky při měření vzorků, především kvůli reprodukovatelnosti měření. Tvar křivky chladnutí pak může být ovlivněn zejména:

licí teplotou, množstvím kovu v testovacím kelímku a stupněm oxidace kovu v kelímku. Důležitá je i velikost testovacího kelímku, neboť v menších kelímcích, zchladne vzorek rychleji, což ovlivní tuhnutí kovu a velikost podchlazení. Tento jev je zachycen na **obr. 2-8**. [6]



Obr. 2-8 Schématické znázornění ovlivnění tvaru křivky chladnutí pomocí velikosti testovacího kelímku a očkování kovu [6]

Na **obr. 2-8** je tedy vidět, že se zmenšující se velikostí zkušebního kelímku se zvyšuje podchlazení. V současnosti se používají při TA dva druhy zkušebních kelímků – pískové a kovové. Výhodou pískových je nesporně jejich pořizovací cena, ovšem kovový kelímek umožňuje přesnější umístění termočlánku a stupeň naplnění kalíšku je snadno reprodukovatelný. Touto schopností pak disponuje i speciální, uzavřený, dvoukomorový, pískový kelímek AccuVo, u kterého je stupeň naplnění vždy zaručen. Jednotlivé zkušební kelímky jsou zachyceny na **obr. 2-9**. [6]

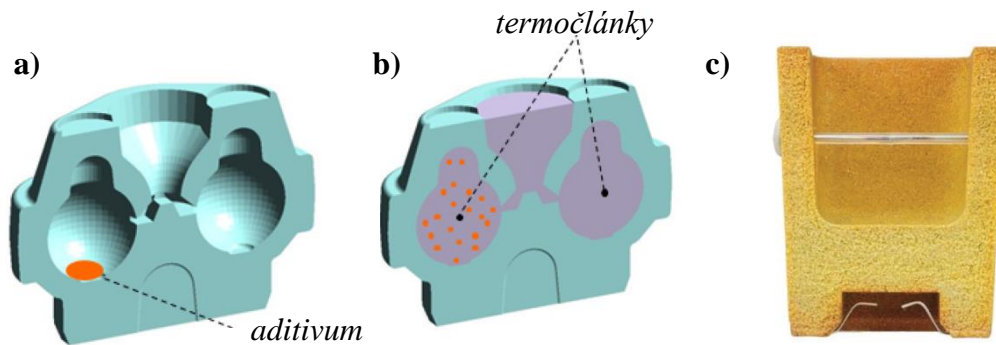


Obr. 2-9 Znázornění zkušebních kelímků pro TA

Vysvětlivky: a) klasický pískový kelímek (Open Cup) s termočlánkem [7], b) ocelový kelímek s dvěma termočlánky v ochranné trubičce [6], c) dvoukomorový kelímek AccuVo [8], [9]

V rámci experimentu byly používány pro hodnocení úrovně očkování a modifikace pískové kelímky, a to klasický otevřený kelímek (*Open Cup*) a uzavřený dvoukomorový kelímek AccuVo, který obsahuje termočlánek v každé komůrce. Tento kelímek navíc umožňuje přidávat do každé komůrky různé přísady

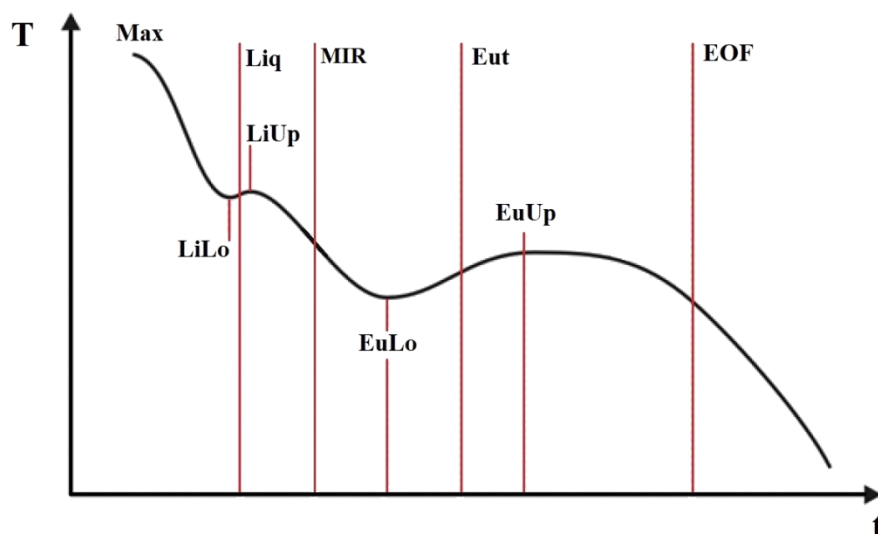
jako např. očkovaadlo, díky čemuž lze rovnou vyhodnotit chování taveniny při použití určitého druhu očkovaadla. Tím, že je tento kelímek uzavřený, je zajištěno, že objem vzorku bude vždy konstantní, čímž jsou eliminovány nesrovnalosti, které by mohly vznikat ve výsledcích při opakovaném měření v důsledku změn hmotnosti vzorku. Podrobnější pohled na vnitřní stavbu kelímku AccuVo a Open Cup je zobrazen na **obr. 2-10**. [9]



Obr. 2-10 Zobrazení pískových kelímků pro TA

Vysvětlivky: a) svislý řez středem kelímku AccuVo, kde jedna komůrka je prázdná a druhá obsahuje aditivum [9], b) svislý řez kelímkem AccuVo po naplnění, kdy po nalití kovu se aditivum smíchá s taveninou bez toho, aby došlo k úniku aditiva ven z komory [9], c) svislý řez středem kelímku Open Cup s termočlánekem [9]

Termické analýzy nepoužívají pro vyhodnocení jen samotnou křivku chladnutí, ale i její první a druhou derivaci. Na **obr. 2-11** je zobrazena křivka chladnutí, na které jsou pak označeny pomocí zkratek veškeré plochy, maximální, minimální body a rozdíly mezi nimi. Identifikace jednotlivých bodů a jejich význam je zanesen v **tab. 2-4**. [9]

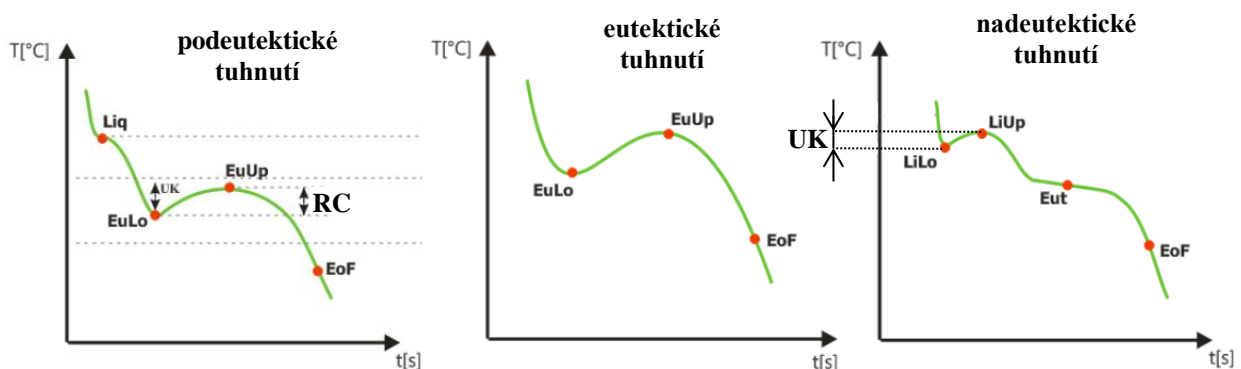


Obr. 2-11 Zobrazení křivku závislosti teploty na čase včetně důležitých bodů [9]

Tab. 2-4 Definice bodů z křivky chladnutí [9]

Označení	Jednotky	Popis
Max	[°C]	maximální teplota naměřená termočlánkem
LiLo (dolní likvidus)	[°C]	nejmenší teplota naměřená před dosažením teploty likvidu
Liq (likvidus)	[°C]	teplota likvidu korespondující s lokálním minimem první derivace
LiUp (horní likvidus)	[°C]	maximální teplota naměřená před dosažením teploty likvidu
MIR	[°C]	teplota mezi likvidem a eutektickým bodem s nejvyšší rychlostí ochlazování (maximum v první derivaci)
EuLo (spodní hranice eutektické teploty)	[°C]	nejmenší teplota naměřená před dosažením eutektického bodu
Eut (eutektická teplota)	[°C]	eutektická teplota korespondující s lokálním minimem křivky první derivace
EuUp (horní hranice eutektické teploty)	[°C]	nejvyšší teplota naměřená po dosažení eutektického bodu
EoF (konec chladnutí)	[°C]	odhadovaný bod konce tuhnutí, charakterizovaný maximem v křivce první derivace

Na obr. 2-12 jsou ukázány záznamy z termální analýzy, resp. jednotlivé křivky tuhnutí získané ze vzorků tavenin o podeutektickém, eutektickém a nadeutektickém složení, které zchladly v uzavřeném kelímku (*konstantní objem*). [9]



Obr. 2-12 Ilustrace reprezentativního tvaru křivek pro podeutektické, eutektické a nadeutektické tuhnutí [9]

U *podeutektické* taveniny je křivka tuhnutí charakterizována dvěma částmi. Ta první je rozpoznatelná pouze mírným skloněním křivky, kdy se jedná o změnu teploty maximálně 2 °C a to během krátké doby (*max. 4 s*). Tato první část je

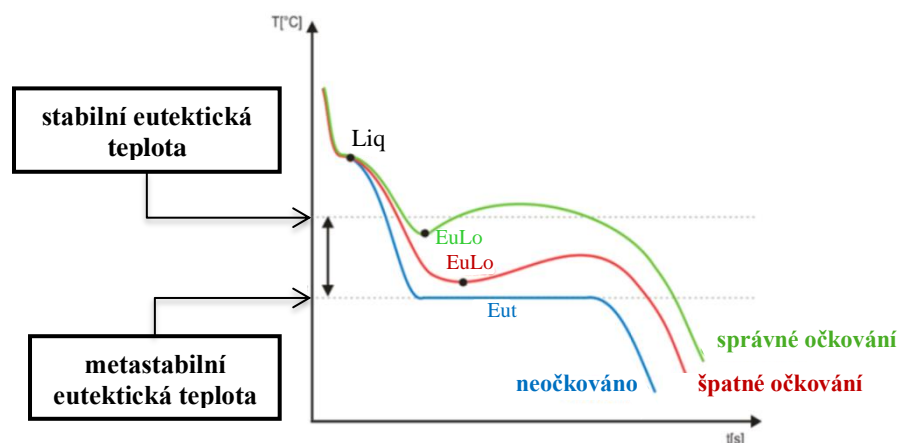
označena jako teplota likvidu - **Liq**, následně teplota klesá až do bodu **EuLo**, kde začíná druhá významná část křivky, která je charakteristická větší rekalescencí a to jak teploty (oboustranná šipka se symbolem **RC**), tak času (vzdálenost mezi body **EuLo** a **EuUp**). Tato část diagramu charakterizuje eutektickou přeměnu. Poté už křivka pouze klesá, dokud není dosaženo bodu **EOF** – konce tuhnutí. [9]

U *nadeutektických* tavenin je křivka tuhnutí charakterizován též dvěma důležitými částmi, které mají však zcela jiný charakter, než tomu bylo u podeutektické taveniny. První část křivky vykazuje vyšší rekalescenci času i teploty, v diagramu označeno oboustrannou šipkou a symbolem **UK** (vzdálenost mezi body **LiLo** a **LiUp**) oproti druhé části křivky, která je spíše plochá a už jen klesá přes bod **Eut** až do bodu **EOF**, který označuje konec tuhnutí. První část křivky charakterizuje primární tuhnutí grafitu a druhá část zase eutektickou přeměnu. [9]

Taveniny, které tuhnou *eutekticky*, jsou pak snadno rozeznatelné, neboť jejich křivka chladnutí je plynulá a není přerušena dílčími vrcholy, má tak pouze jen jednu důležitou část, která odpovídá eutektické přeměně (body **EuLo** až **EuUp**).

Při měření podchlazení na křivce chladnutí u její eutektické části je pak možné odhadnout, zda-li je tavenina správně naočkována pro výrobu konkrétního odlitku. Podle principu heterogenní nukleace se přidáním dalších zárodků do taveniny sníží potřebné množství energie pro odstartování nukleace, což se u podeutektických a eutektických tavenin projevuje velikostí podchlazení. [9]

Pro křivku neočkované taveniny je charakteristické, že její eutektická teplota se shoduje s metastabilní eutektickou teplotou (často bez jakékoli rekalescence), což je znázorněno na **obr. 2-13**. Přidání očkovadla se pak projeví rekalescencí a zvednutím eutektické části na křivce tuhnutí, je to způsobeno latentním teplem, které se uvolní při krystalizaci grafitu. [9]



Obr. 2-13 Zobrazení vlivu očkování na jednotlivých křivkách

2.3 Technologický postup výroby litinového odlitku

Vyhotovení technologického postupu ve slévárně je pro technologa komplexní úkol, jehož součástí je úplná připravenost nové výroby daného dílce, který mohl být již dříve vyráběn podle jiného postupu.

Technologický postup se musí přizpůsobit na míru dané slévárně, každá slévárna bude mít postupy odlišné dle svých zvyklostí, technologií a strojního zařízení. První etapou je kontrola stávající výkresové dokumentace (*at' 2D či 3D*) z technologického hlediska, kdy musí dojít ke kontrole vyrobitelnosti dílce a případně rovnou k jeho úpravě. Následně pak už mohou vzniknout výrobní podklady – tzv. postupový výkres, který obsahuje všechny nezbytné informace pro výrobu odlitku.

Postupový výkres může obsahovat následující informace:

- tvar jednotlivých jader a jejich počet
- počet jaderníků
- charakter modelu (*volný či na deskách*),
- sestava modelu (*u volného modelu počet jeho dílů včetně volných částí + případně podoba formovací podložky, u modelu na deskách rozměr form. desek*)
- smrštění, přídavky, úkosy, vřile na známkách pro jádra atd.
- umístění dělicí roviny
- poloha a rozměry vtokové soustavy
- rozměry, poloha a počet výfuků
- rozmístění technologických prvků – chladítka, nálitky, termonálitky

Bývalo zvyklostí všechny tyto informace zanášet přímo do strojního výkresu dané součásti, ale z hlediska přehlednosti a praktičnosti je lepší tyto informace vytvářet v podobě 3D dat, neboť tyto data dokáží obsáhnout mnohem více informací a zacházejí do větších podrobností, než jsme schopni zanést do klasického strojního výkresu v papírové podobě. 3D data si pak technolog může dovolit doplnit o další informace jako je např.:

- konkrétní sestavení jaderníků – jejich volné části, kování atd.
- podrobnější informace o podobě modelu
- konkrétní podoba jednotlivých dílů modelu, pokud se jedná o volný model, konkrétní tvar volných částí modelu

- pokud se jedná o model na deskách, tak 3D data mohou obsahovat informace o rozměrech desek, jejich kování, rozmístění zaváděcích jader, umístění pouzder pro skládací tyče atd.

Všechny výše zmíněné body jsou pak podrobněji popsány v dalších kapitolách.

2.3.1 Poloha odlitku při lití – volba dělicí roviny

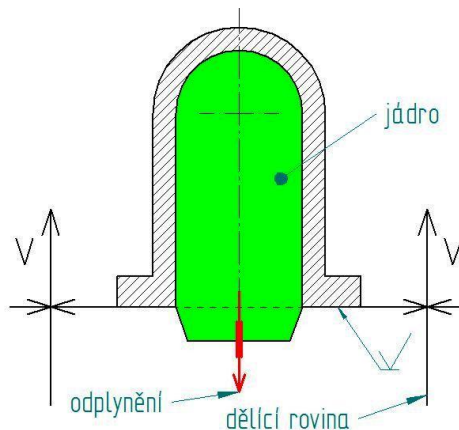
Jedním ze zásadních rozhodnutí technologa je volba dělicí roviny a polohy odlitku ve formě, neboť od toho se odvíjí zbytek technologie. Existují určité zásady při volbě dělicí roviny a polohy odlitku, které je nutné dodržovat. Je důležité, dosáhnout jednak usměrněného tuhnutí odlitku, a jednak důležité plochy odlitku musí být čisté a bez vnitřních vad. U litinových odlitků toho lze dosáhnout např. tak, že nejdůležitější plochy jsou umísťovány do spodní části formy, kde se nachází nejčistší kov. Tím, jak tavenina proudí formou, odnese veškeré nečistoty jako je např. struska, písek atd. směrem nahoru ven z dutiny formy.

Dalším důležitým aspektem je ekonomika výroby odlitku. Aby byly náklady na výrobu co nejnižší, měla by být technologie navržena tak, aby bylo použito co nejmenšího počtu jader, hlavní jádra (*ty největší*) by měla být umístěna ve spodní části formy a neměla by být vázána do vrchní části formy. Dále by se mělo dbát na to, aby bylo docíleno rovné dělicí roviny a celková výška formy byla co nejnižší.

Bohužel do všech těchto rozhodnutí zasahuje ještě technologičnost konstrukce daného odlitku. V některých případech nelze dodržet všechny tyto zásady naráz a musí se volit kompromis.

Jednotlivé zásady pro zvolení nejvhodnější polohy odlitku a pro volbu dělicí roviny jsou vyobrazeny na **obr. 2-14** a **obr. 2-15**, kde je zachycen jednoduchý odlitek. [10] Na **obr. 2-14** je ukázáno zaformování modelu svisle. **Výhodou** tohoto způsobu zaformování je:

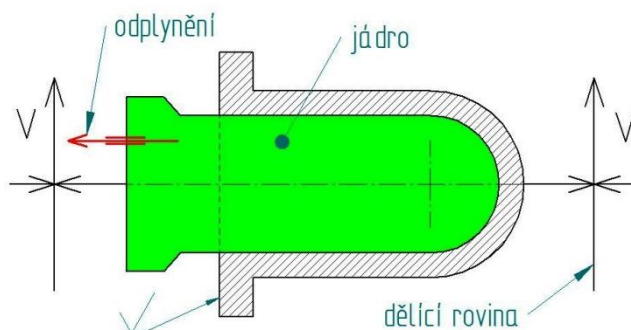
- možnost použití spodního vtoku, který zajistí klidné plnění formy,
- snadná manipulace s jádrem při jeho zakládání,
- rovná dělicí rovina,
- důležitá plocha s přídavkem je umístěna ve spodní části formy. [10]



Obr. 2-14 Model zaformovaný svisle [10]

Nevýhodou tohoto formování je, že:

- při špatném založení (*přesazení*) jádra, nebude dodržena tloušťka stěny odlitku,
- je nutné použít vyšší formovací rám,
- na vnější straně modelu vzniknou velké slévárenské úkosy kvůli vyjmutí modelu z pískové formy,
- nevhodné odplynění jádra (*spodem*). [10]



Obr. 2-15 Model zaformovaný vodorovně [10]

Výhodou zaformování modelu vodorovně, viz **obr. 2-15**, je:

- nižší formovací rám – možná úspora formovací směsi,
- menší slévárenské úkosy, které zmizí při obrábění,
- klidný průběh plnění formy,
- použitím podpěrek může být zajištěna poloha jádra a tím i požadovaná tloušťka stěny odlitku. [10]

Nevýhody tohoto formování je:

- že, pro dosažení správné tloušťky stěn musí být použity slévárenské podpěrky, které mohou být nežádoucí (*podpěrky se zcela neroztaví a budou tvořit kovový vměstek, což může být nežádoucí např. při požadavku těsnosti*),
- náročnější odstranění výfuků a nálitků (*možné „vyštípnutí“ nálitku s částí odlitku*). [10]

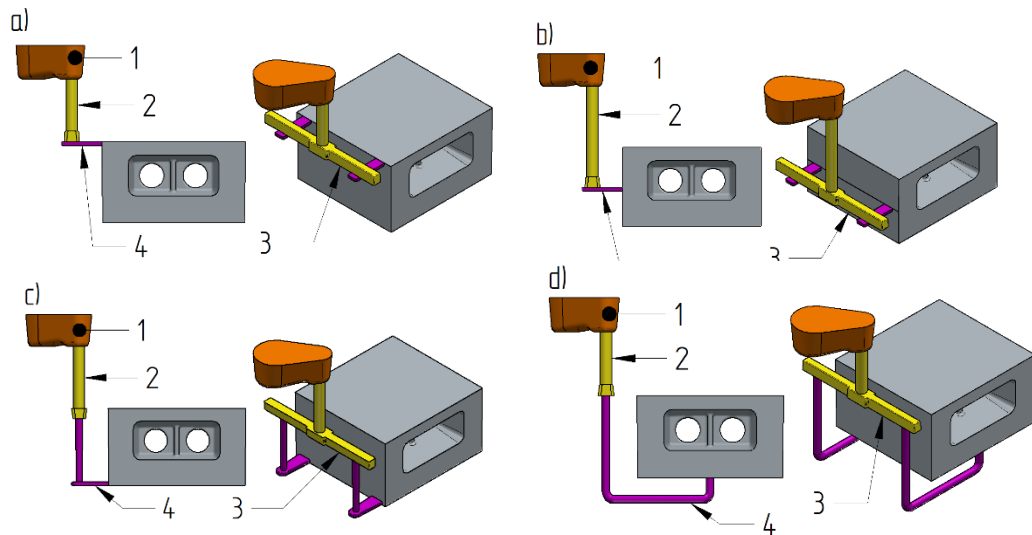
2.3.2 Konstrukce vtokové soustavy

Hlavním úkolem vtokové soustavy je zajistit klidné, rovnoměrné a plynulé plnění dutiny formy tekutým kovem, který bude naveden do konkrétních míst. Zároveň musí vtokový systém zachytávat strusku a jiné nečistoty, které by se mohly do formy dostat spolu s tekutým kovem. Vtoková soustava by také měla zásobovat odlitek tekutým kovem při jeho tuhnutí a měla by zajistit usměrněné tuhnutí a chladnutí celého odlitku.

Rozměry vtokové soustavy musí brát zřetel na co největší úsporu tekutého kovu a na rozměrovou nenáročnost, aby mohl být maximálně využit prostor ve formovacím rámu. Volba zaústění zářezu ve formě může do značné míry ovlivnit jak kvalitu, tak náklady na výrobu daného odlitku. Ke všem těmto aspektům se musí přihlídnout nejen při konstrukci vtokové soustavy, ale i celkově při tvorbě technologického postupu. [11]

U návrhu vtokové soustavy pro litinové odlitky se musí klást důraz na to, aby se vtokovou soustavou do odlitku nedostala žádná struska, která může být obsažena v tekutém kovu. Účinných způsobů, jak zabránit vniknutí strusky do odlitku je celá řada – od speciálních konstrukcí vtokové soustavy, přes filtry a cedítka atd. Při dnešní velké rozmanitosti odlitků je hospodárné používání těchto technologických prvků velmi důležité, neboť to v celkovém důsledku může ovlivnit nákladovost výroby.

Vtoková soustava je tvořena licí jamkou, licím kulem, odlučovačem strusky a zářezy. Zářezy mohou být zaústěny v horní části odlitku (**obr. 2-16 a**), z boku odlitku (**obr. 2-16 b**), ve spodní části odlitku (**obr. 2-16 c**) a jako spodní vtok (**obr. 2-16 d**). Pro nepřiliš vysoké odlitky je nejvhodnější plnění z boku odlitku přímo v dělicí rovině, viz **obr. 2-16 b**, neboť tento způsob zaručuje snadnou výrobu vtokové soustavy a dobrou jakost odlitku. [11]

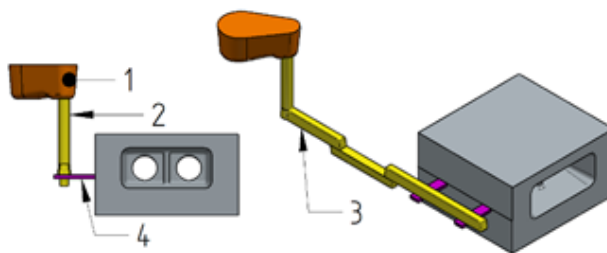


Obr. 2-16 Schémata nejčastěji používaných vtokových soustav [11]

a) zářezy v horní části odlitku, b) zářezy z boku odlitku, c) zářezy ve spodní části odlitku, d) plnění spodem

Vysvětlivky: 1- licí jamka, 2- licí kůl, 3- odlučovač strusky, 4- zářez

Oddělit strusku od tekutého kovu není však jediným úkolem, který musí odlučovač zajistit. Dalším důležitým účelem odlučovačů je zpomalení proudění kovu a dosažení co nejvhodnější rychlosti proudění kovu do formy. Právě k tomuto účelu dokáže dobře posloužit brzdící element. Další možností je tedy použití vtokové soustavy, která obsahuje odlučovač strusky s brzdícím elementem, viz **obr. 2-17**. [11]

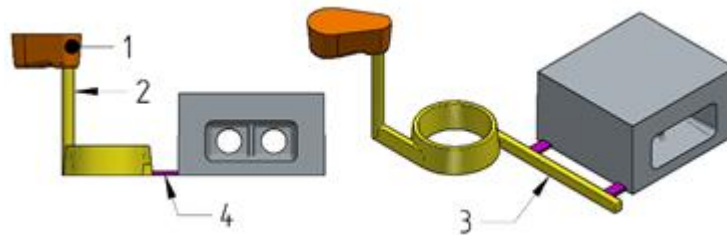


Obr. 2-17 Vtoková soustava s brzdícím elementem [11]

Vysvětlivky: 1- licí jamka, 2- licí kůl, 3- odlučovač strusky, 4- zářez

Avšak tento způsob má také svá úskalí. Takováto vtoková soustava bude těžší (*sníží se % využitelnosti tekutého kovu*) a mnohem náročnější na prostor. Bude tedy nutné použít rozměrnější formovací rám, čímž se spotřebuje více formovací směsi a finanční náklady tak porostou. Proto se musí dobře zvážit, zda je výhodné použít zrovna tento typ vtokové soustavy. [11]

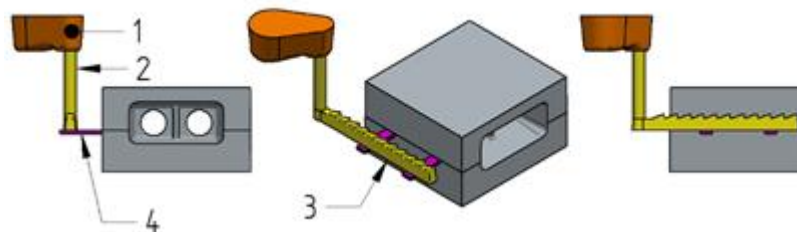
Dalším typem vtokové soustavy, je soustava zobrazená na **obr. 2-18**. Jedná se o vtokovou soustavu s odstředivým odlučovačem strusky (tzv. „kružák“), jehož hlavní částí je kruhový rezervoár, ve kterém kov krouží dokola a tím se z něj odděluje struska. Aby se docílilo krouživého pohybu v odlučovači, tak je kov přiváděn a odváděn pomocí kanálů, které jsou ke kruhovému rezervoáru umístěny tangenciálně. [11]



Obr. 2-18 Vtoková soustava s odstředivým odlučovačem strusky [11]

Vysvětlivky: 1- lící jamka, 2- lící kůl, 3- odlučovač strusky, 4- zářez

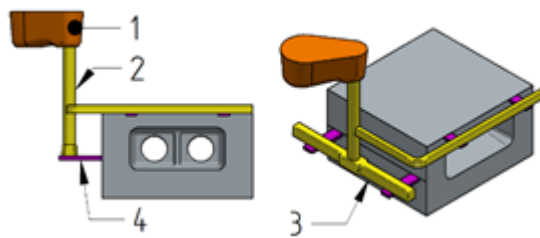
Účinnějšího zachytávání strusky v odlučovači se dá dosáhnout i pomocí jeho pilovitého tvaru, který je vyobrazen na **obr. 2-19**. Prohlubně na horním povrchu odlučovače mají tvar zubů pily a efektivněji zachytávají strusku. [11]



Obr. 2-19 Vtoková soustava s pilovitým odlučovačem strusky [11]

Vysvětlivky: 1- lící jamka, 2- lící kůl, 3- odlučovač strusky, 4- zářez

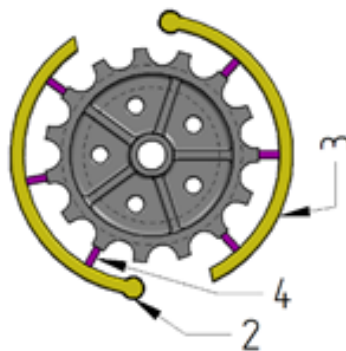
Plnění dutiny formy může probíhat i ve více rovinách, jedná se pak o použití tzv. pomocného zářezu, kdy vtokový systém obsahuje ještě jeden pomocný odlučovač strusky a zářezy. Díky tomu lze přivádět tekutý kov např. do míst, kde často dochází k nedoběhnutí tekutého kovu, zavaleninám či jinému problému. Přívod kovu do těchto kritických míst pak může pomoci při plnění dutiny formy. Nevýhodou tohoto způsobu je použití více formovacích rámců, přidání další dělicí roviny a tím pádem větší pracnost. Vtoková soustava s pomocnými zářezy je zachycena na **obr. 2-20**. [11]



Obr. 2-20 Vtoková soustava s pomocným vtokem [11]

Vysvětlivky: 1- lící jamka, 2- lící kůl, 3- odlučovač strusky, 4- zářez

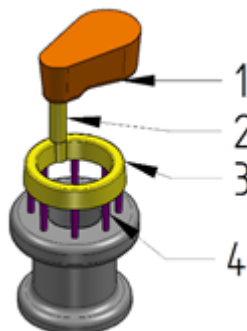
Při odlévání odlitků kruhovitěho tvaru, u kterých se obrábí vnější povrch, se používá tangenciální přívod kovu podle obrázku **obr. 2-21**. Krouživý pohyb kovu v dutině formy zaručí čistý vnější povrch odlitku. Při tomto způsobu zaústění zářezů se však musí brát zřetel na náhlou změnu proudění kovu při přechodu proudu kovu z odlučovače do zářezů. [11]



Obr. 2-21 Vtoková soustava s tangenciálním přívodem kovu [11]

Vysvětlivky: 2- lící kůl, 3- odlučovač strusky, 4- zářez

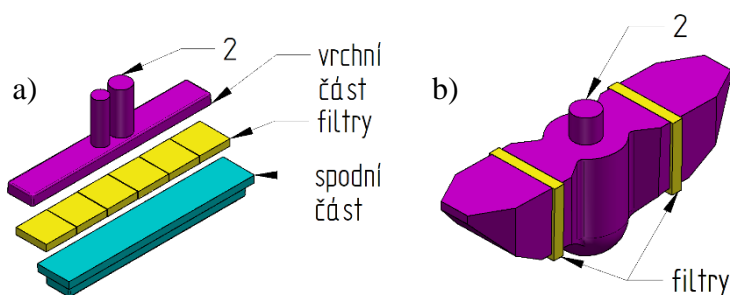
Při odlévání různých bubnovitých, válcovitých odlitků či pouzder se velmi často využívá „dešťového“ (*sprchového*) vtoku, který je konstruován jako větší počet tenkých zářezů rovnoměrně umístěných v horní ploše odlitku, viz **obr. 2-22**. Rizikem při použití dešťového vtoku je vznik „broků“, což jsou ochlazené kapky kovu, které se již nespojí s materiálem odlitku. Broky mohou snadno vzniknout rozstříkáním kovu v dutině formy. Dalším nedostatkem je nutnost použití vyšší lící teploty kvůli použitým tenkým zářezům. [11]



Obr. 2-22 Vtoková soustava s dešťovým (*sprchovým*) vtokem [11]

Vysvětlivky: 1- licí jamka, 2- licí kůl, 3- odlučovač strusky, 4- zářez

Všechny tyto typy vtokových soustav účinně zachytávají strusku z tekutého kovu, ale i přes to se může stát, že struska pronikne až do dutiny formy a objeví se ve struktuře odlitku. Proto existují různé druhy slévárenských filtrů, které nám zaručí, že do dutiny formy struska nepronikne. Filtry samozřejmě snižují zabíhavost tekutého kovu a proto je nutné při použití filtrů odlévat kov z vyšší teploty. Různé použití filtrů je zobrazeno na **obr. 2-23**. [11]



Obr. 2-23 Vtoková soustava s různě umístěnými filtry [11]

a) licí komůrka s filtry, **b)** licí hlava s filtry

Vysvětlivky: 2- licí kůl

2.3.3 Výpočet vtokové soustavy

Jak již bylo uvedeno, vtoková soustava je složena z vtokového kůlu, pomocí kterého se tekutý kov dostane z vtokové jamky do odlučovače strusky, tzv. struskováku a z něj se následně tavenina pomocí zářezů dostane do dutiny formy.

Při návrhu průřezů částí vtokové soustavy je nejprve nutné stanovit **optimální dobu plnění formy**. [11] Ta se stanovuje na základě rovnice (2):

$$G = 1,2 \times m \quad (1)$$

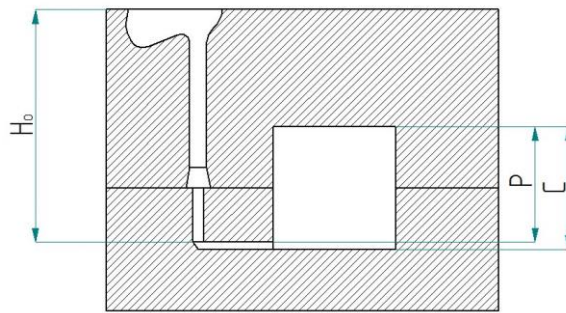
$$t = s \times \sqrt[3]{tl \times G} \quad (2)$$

kde značí: t - dobu plnění formy [s],
 t_l - střední tloušťku stěn odlitku [mm],
 G - hmotnost odlitku včetně vtokové soustavy a nálitků [kg],
 m - hrubou hmotnost odlitku (*odlitek s přídávky a úkosy*) [kg],
 s - součinitel času [-], jehož hodnota pro středně těžké odlitky (*1 až 10 t*) je 1,5 až 1,9.

Dále je nutné stanovit **střední ferostatickou výšku** (*účinnou výšku vtokové soustavy*) [6]. Střední ferostatická výška se stanoví na základě vztahu (3):

$$h_{stř} = H_0 - \frac{P^2}{2 \times C} \quad (3)$$

kde značí: H_0 - počáteční maximální ferostatickou výšku [m],
 P - výšku odlitku nad rovinou zářezu [m],
 C - celkovou výšku odlitku v poloze při lití [m].



Obr. 2-24 Střední ferostatická výška – vtoková soustava se zářezy ve spodní části odlitku [10]

V dalším kroku výpočtu je stanovena **plocha průřezu zářezů** S_z . [10]

$$S_z = \frac{G}{\rho \times \mu \times \sqrt{2 \times 9,81 \times h_{stř}} \times t} \times 10^6 \quad (4)$$

kde značí: S_z – plochu všech zářezů [mm²],
 G – hmotnost odlitku včetně vtokové soustavy a nálitků [kg],
 v – licí rychlost [m.s⁻¹],
 t – optimální dobu odlévání odlitku [s],
 $h_{stř}$ – střední ferostatickou výšku [m],
 ρ – hustotu tekutého kovu [kg.m⁻³],
 μ - odporový součinitel vtokové soustavy [-], pro litinové odlitky se volí 0,27 až 0,55.

Na základě celkové plochy průřezu všech zářezů, se dále stanoví plochy průřezů odlučovače strusky a licího (*vtokového*) kúlu. [11] Pro výpočty těchto průřezů pro litinové odlitky do 10 t platí předpoklad:

$$S_z : S_o : S_v = 1 : 1,2 : 1,4 \quad (5)$$

kde značí: S_z – plochu průřezu všech zářezů [mm²],

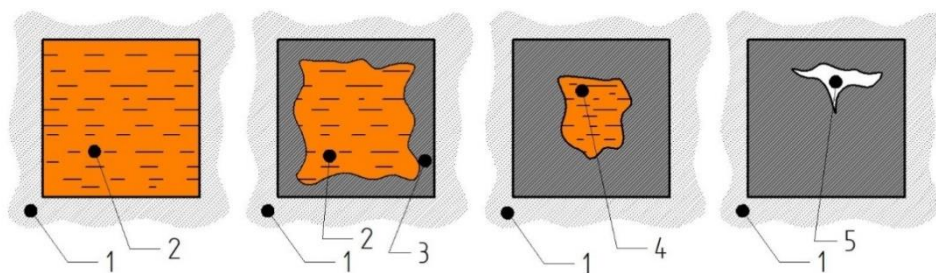
S_o – plochu průřezu odlučovače strusky (*struskováku*) [mm²],

S_v – plochu průřezu vtokového kúlu [mm²].

2.3.4 Nálitkování

Slévárenské materiály používané v technické praxi (*litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem, ocel i neželezné slitiny*) mají v tekutém stavu objem větší než ve stavu tuhém. Toto objemové smrštění během tuhnutí způsobuje v místě posledního tuhnutí vznik staženin.

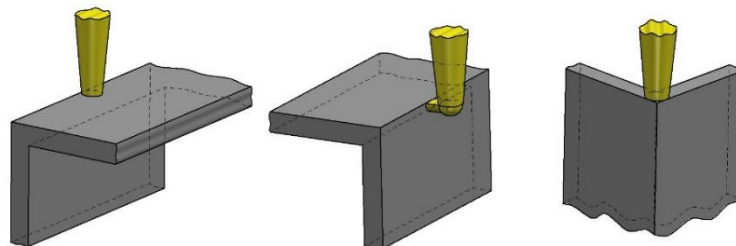
Vznik staženiny je zachycen na **obr. 2-25**.



Obr. 2-25 Tuhnutí odlitku – vznik staženiny [10]

1- písková forma, 2- tekutý kov, 3- tuhá kůra, 4- počátek vzniku dutiny,
5- staženina

Pro eliminaci vzniku staženin v odlitku se používá tzv. nálitek. Jedná se o technologický prvek, který se umísťuje nad tzv. „tepelné uzly“, což jsou kritická místa na odlitku, kde tekutý kov ztuhne jako poslední. Hlavním úkolem nálitku je tedy zajištění usměrněného tuhnutí odlitku, resp. doplňování tepelného uzlu tekutým kovem. Nálitek je třeba nadimenzovat na správnou velikost a vhodně jej umístit. Ukázka tepelných „L“ uzlů a jejich nálitkování je zobrazeno na **obr. 2-26**. [10]

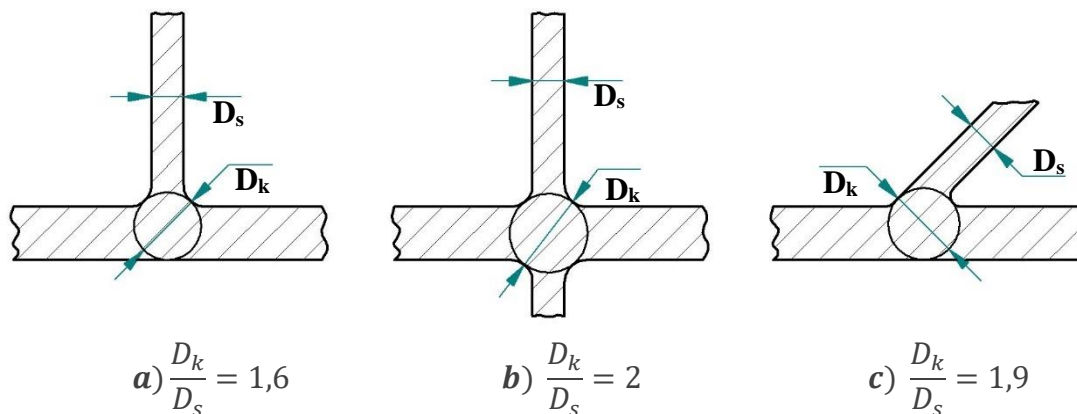


Obr. 2-26 Ukázka umístění nálitků u „L“ uzlu [10]

2.3.4.1 Zásady použití nálitků

Jedním z prvních úkolů při určení pozice nálitku je ve výkresové dokumentaci vyznačení tzv. „tepelných uzlů“. Jak již bylo uvedeno, jsou to místa s nahromaděním největšího množství kovu, která jsou od zbytku odlitku oddělena tenčími, rychleji tuhnoucími stěnami. Po označení všech tepelných uzlů je nutno stanovit, které z nich bude zapotřebí doplňovat pomocí nálitků a u kterých bude stačit jejich ochlazování pomocí vnějších či vnitřních chladítek. [11]

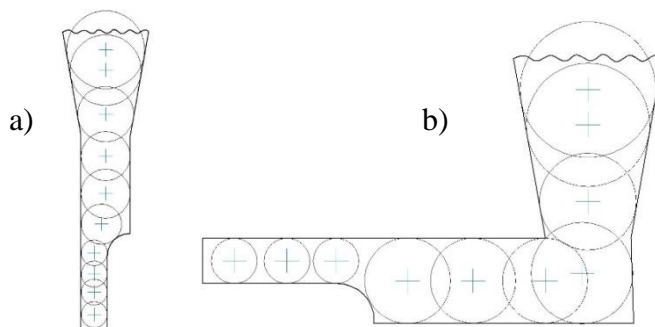
Orientačně je možné spočítat velikost tepelného uzlu pomocí poměru koule vepsané do tepelného uzlu D_k a koule vepsané v přilehlé stěně D_s . Větší hodnota tohoto poměru pak značí větší hodnotu tepelného uzlu. Pro nejčastější druhy napojení stěn odlitku jsou velikosti tepelných uzlů uvedeny na **obr. 2-27**. [10]



Obr. 2-27 Orientační znázornění tepelného uzlu v závislosti na způsobech napojení stěn [10]

Často se pro dimenzování nálitků používá systém vepsaných koulí, kde nejmenší koule se nachází v krčku nálitku a směrem ven z nálitku se koule postupně zvětšují. Systém vepsaných koulí je zachycen na **obr. 2-28**. Správně fungující nálitek doplní kov do tuhajícího odlitku a sám ztuhne jako poslední a případné vnitřní vady se vytvoří v něm. Nálitek může být umístěn nad tepelným uzlem přímo (**obr. 2-28 a**), pokud to z nějakého důvodu není možné, tak lze nálitek

umístít i z boku (**obr. 2-28 b**). Svislé umístění nálitku je pak výhodnější díky větší ferostatické výšce nálitku. [10]



Obr. 2-28 Napojení nálitků k nejtlustším částem odlitků [10]

a) svisle, b) vodorovně

Ani v dnešní době neexistuje žádná zaručená metoda výpočtu přesného počtu a rozměrů jednotlivých nálitků. Tyto údaje se často určují na základě zkušeností technologa, či při kontrole odlitků, kde se zjistila nějaká vada typu staženin či ředin. [11]

Mezi jednotlivými nálitky by měl být udržován určitý rozestup, neboť prohřátá formovací směs mezi dvěma blízko u sebe rozmístěnými nálitky by pak působila jako klín a toto místo by pak bylo náchylné k tvorbě staženin. V úvahu je třeba brát i dokončovací práce a nálitky umisťovat tak, aby byly dobře přístupné, snadno oddělitelné a aby očištění zbytku nálitků nebylo zbytečně obtížné.

Nálitky je také vhodné umisťovat na nejvyšší místa odlitku, neboť nefungují jen jako rezervoár tekutého kovu, ale také jako výfuk, pomocí kterého se z dutiny formy odplaví veškeré nečistoty, které se do tekutého kovu dostanou při zaplňování dutiny formy. [11]

Nejrozšířenějšími nálitky jsou **horní otevřené nálitky**, viz **obr. 2-29 a**. Jsou umístěny přímo nad tepelným uzlem a plní tak nejen doplňovací funkci, ale slouží i jako výfuky, které odvedou ven z dutiny formy nečistoty a plyny. Horní nálitky doplňují tekutý kov intenzivněji než nálitky boční, neboť dosáhnou vyšší ferostatické výšky. **Hlavními výhodami těchto nálitků jsou:**

- snadné složení formy,
- možnost překontrolování formy skrz výfuk před odlitím,
- možnost pozorování průtoku kovu, či zaplnění formy [11].

Nevýhodou těchto nálitků je to, že:

- výška nálitku je závislá na použitém formovacím rámu,
- je větší spotřeba tekutého kovu,
- je možnost napadání nečistot do dutiny formy [11].

Horní otevřené nálitky se přiloží na vrchní část modelového zařízení na konkrétní místo a zaformují se spolu s modelem. Model nálitku se pak vytáhne z vnější strany formy, kdežto model odlitku se vyndá z vnitřní strany. Takovýto nálitek je nutno odříznout pomocí kotoučové brusky. Pokud je nálitek opatřen podnálitkovou vložkou, která v nálitku vytvoří vrub, tak je možné jej „urazit“ kladivem a zbylé nerovnosti po nálitku následně zabrousit. [11]

Protikladem otevřených nálitků jsou nálitky uzavřené, které není zapotřebí nikam přikládat, neboť jsou součástí modelového zařízení. Těto metody se nejčastěji užívá při strojním formování, kde by otevřené nálitky překážely. Horní část uzavřeného nálitku má tvar polokoule. Koule má ze všech geometrických těles největší objem s nejmenším povrchem, díky čemuž při použití tohoto tvaru nebude forma tolik ochlazovat kov v nálitku. Výhodou uzavřeného nálitku je, že při použití vyššího formovacího rámu nemá vliv na spotřebu tekutého kovu, neboť výška nálitku zůstává stejná. [11]

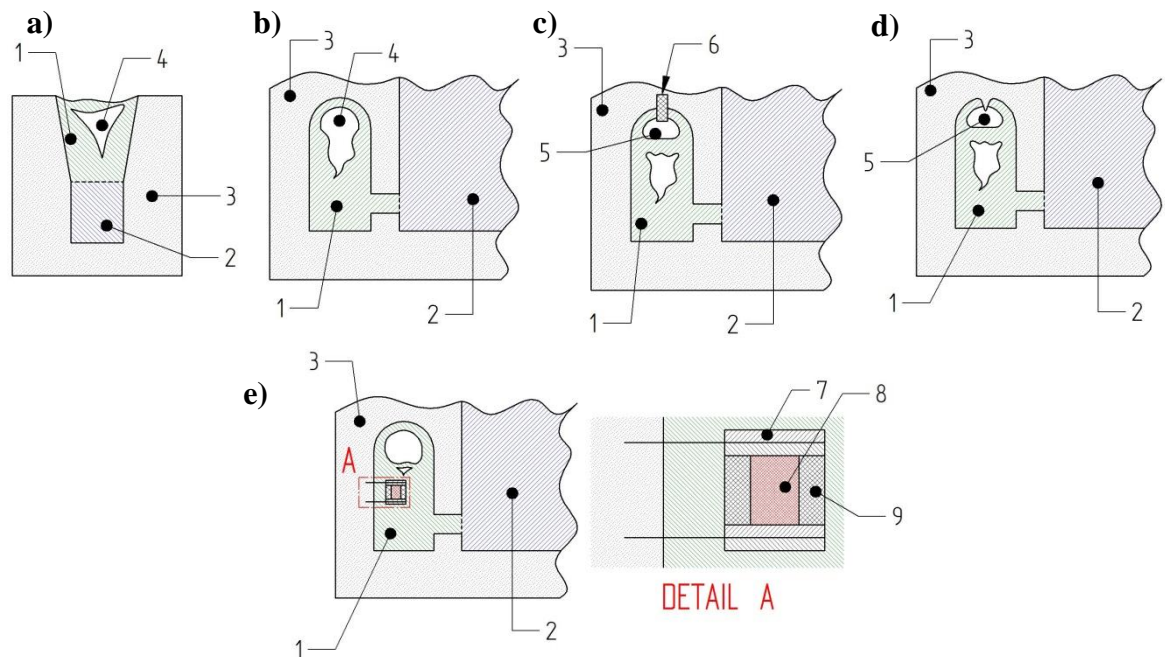
Pokud tvar odlitku znemožňuje umístění horních nálitků, nebo pokud se tepelný uzel nachází ve spodní části formy, tak je zapotřebí použít **boční nálitky**, viz **obr. 2-29 b až e**.

Hlavními výhodami bočních nálitků je:

- menší práce při odstranění nálitku a zahlazení stop po něm,
- umožnění nálitkování tvarově náročných dílců [11]

Nevýhodami těchto nálitků je potom, že:

- jsou méně účinné než horní nálitky,
- potřebují větší obrysové rozměry formy,
- napojením krčku nálitku na stěnu formy se vytvoří tenké místo, kde proud kovu může formu vydrolit [11].



Obr. 2-29 Různé typy nálitků [12]

- a) náletek podtlakový horní otevřený, b) náletek podtlakový uzavřený boční,
c) uzavřený náletek atmosférický s Wiliamsonovým jádérkem,
d) uzavřený náletek atmosférický s výřezem, e) náletek vysokotlaký

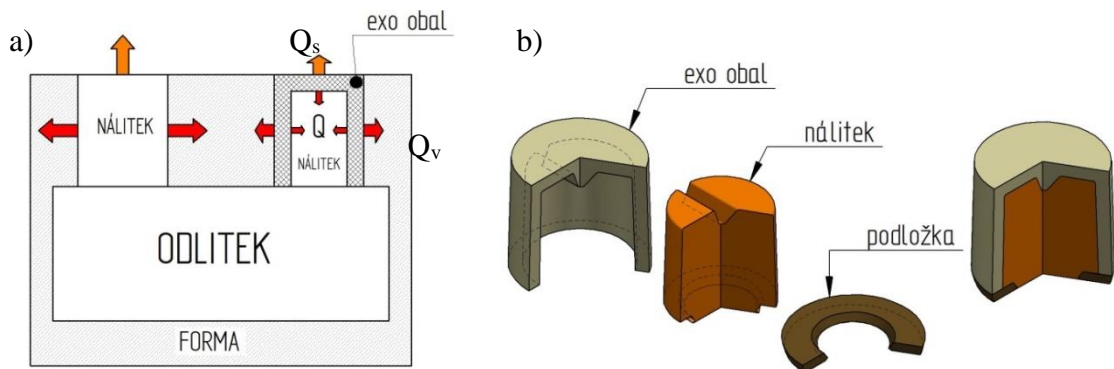
Vysvětlivky: 1) náletek, 2) odlitek, 3) forma, 4) podtlak, 5) atmosférický tlak, 6) Wiliamsonovo jádérko, 7) plynotvorná nábojka, 8) zátka, 9) plynotvorná směs

Uzavřené nálitky (*horní i boční*) lze zhotovit jako atmosférické nebo jako vysokotlaké. Atmosférický náletek je vždy spojen s okolní atmosférou např. jeho provrtáním nebo pomocí prodyšného jádérka umístěného ve vrchní části nálitku (**obr. 2-29 c**).

Pokud má být zaručené doplňování kovu z nálitku do odlitku, lze náletek vyrobit také jako přetlakový, viz **obr. 2-29 e**. Toho se docílí za použití keramického tělíska umístěného v dutině nálitku. Tělísko, které je naplněné vápencem, musí mít určitou tloušťku izolačního materiálu, aby jeho obsah reagoval s tekutým kovem opožděně až po vytvoření povrchové vrstvy ztuhlého kovu. Vápenec se za působení vysoké teploty bude rozkládat na oxid vápenatý a oxid uhličitý.[12] Z ekonomického hlediska je žádoucí zmenšení velikosti nálitku při zachování jeho „doplňovací“ schopnosti. Zvýší se tím využitelnost tekutého kovu a zároveň dojde ke snížení nákladů při tavení. Tohoto stavu lze dosáhnout pomocí exotermických a izolačních nálitků či zásypů.

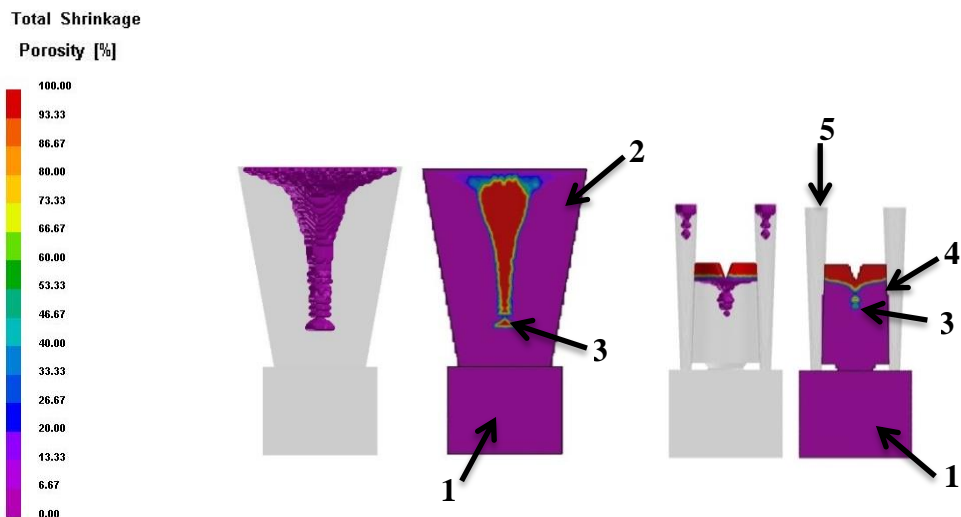
2.3.4.2 Exotermické nálitky

Dalším způsobem, jak zajistit vyšší efektivitu nálitku je použití izolačních či exotermických (*dále jen jako exosměs*) nálitků. Podstatou exosměsi je produkování tepla, které izoluje tekutý kov v nálitku od okolního prostředí formy a díky tomu zpomalí nebo dokonce na určitý čas zastaví přestup tepla z nálitků do formy, kterou je exosměs obklopena. Účinek exosměsi je zachycen na **obr. 2-30 a**. [13]



Obr. 2-30 a) Ukázka tepelné bilance systému bez exotermického obkladu a s obkladem [13], b) Exotermický uzavřený nálitek s podložkou

Na **obr. 2-31** lze pak vidět rozdíl mezi doplněním tekutého kovu pomocí horního otevřeného nálitku a pomocí exotermického nálitku.



Obr. 2-31 Porovnání schopnosti doplnění tekutého kovu pomocí horního otevřeného a exotermického nálitku

Vysvětlivky: 1) odlitek, 2) horní otevřený nálitek, 3) porezita, 4) horní exotermický nálitek, 5) výfuk

V současnosti je použití exotermických nálitků ve výrobě běžné. Avšak jejich užívání nepřináší jen výhody.

Hlavním přínosem využívání exotermických náliček je:

- snížení tekutého kovu v náličce až o 50 %,
- lepší dosazování u materiálů s větším objemovým smrštěním,
- u neželezných kovů a ocelí se zvětší účinná vzdálenost dosazení o 30 %,
- lepší řízení podmínek dosazování, především u tenkostěnných odlitků z LKG,
- snížení výskytu trhlin, neboť náliček s menší plochou nebude působit tak velký odpor tuhnoucí vrstvě odlitku [13].

Hlavní komplikace, které je nutné brát v úvahu, jsou:

- lidský faktor – nutnost odborného zaučení obsluhy pro správné použití,
- nutno použít správnou velikost a druh exotermu,
- komplikace během formování na některých automatických linkách – např. rozpraskání obkladů,
- zvětšení nároků na nepřelití formy,
- u uzavřených náliček možnost jejich nedolití,
- potřeba držení skladových zásob [13].

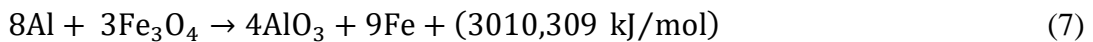
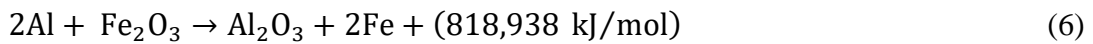
Exosměsi lze rozdělit podle způsobu jejich aplikace na *zásypové materiály* a *formovací materiály*.

Zásypové materiály se používají u otevřených náliček, kde se aplikují na jejich hladinu ve formě prášku nebo v podobě lisovaných tablet. Snižují tak ztráty tepla sáláním a díky tomu lze usměrnit tuhnutí tekutého kovu tak, aby bylo dosaženo co nejvyššího využitelnosti tekutého kovu a předešlo se vzniku staženin a ředin v odlitku. Aplikace zásypových hmot se provádí po skončení lití a to tím způsobem, že předem určené množství zásypu se vhodí na hladinu kovu v náličce, zásypová hmota se musí rozprostřít rovnoměrně po celé hladině. [13]

Formovací materiály se používají při výrobě exotermických obkladů. Nejčastěji jsou dodávány už jako hotový výrobek - **obklad**, ale v některých případech si je slévárny vyrábějí sami spojením exosměsi, vody a vodního skla. Tvar obkladů je definován způsobem jejich použití a také typem odlévaného materiálu. [13]

V praxi se využívá několik typů exosměsí, tj. *termitová směs*, *směs křemíkového a uhlíkového typu*.

Termitová směs se skládá z hliníku v práškové podobě a oxidu železitého. Termit hoří podle reakce (6) nebo (7):



Jedná se o velmi rychlou reakci s konečnou teplotou produktů okolo 2000 °C. Ke zpomalení rychlosti reakce se termitová směs smísí ještě s žáruvzdorným materiálem, pomocí kterého se dosáhne nižší rychlosti spalování a nižší konečné teploty. Atmosférický kyslík není při reakci zapotřebí, neboť kyslík, který je nutný k oxidaci hliníku, je získáván přímo z termitové směsi. Termitové směsi mají však i své nedostatky a to, že:

- zapálení reakce vyžaduje vysokou teplotu,
- termitová směs vykazuje po zreagování velkou tepelnou vodivost, která je dána vznikem kovového železa přímo v obkladu, tímto se pak do značné míry snižují izolační vlastnosti termitové směsi,
- tekuté Fe, které vzniká během hoření, se následně smísí s taveninou a znesnadní tak následné cídírenské práce [13].

U *směsi křemíkového typu* je jako základním redukcujícím prvkem kovový Si a chemická reakce postupuje dle rovnice (8):



Křemík je do směsi přidáván v podobě FeSiCa nebo FeSi75. Během fáze tuhnutí může křemík proniknout až do vrchní vrstvy tekutého kovu, kterou pak naleguje. Tato slitina pak tuhne pomaleji, neboť její teplota tuhnutí je o cca 50 °C nižší. [13]

U *směsi uhlíkového typu* je redukcujícím prvkem uhlík a reakce probíhá dle rovnice (9):



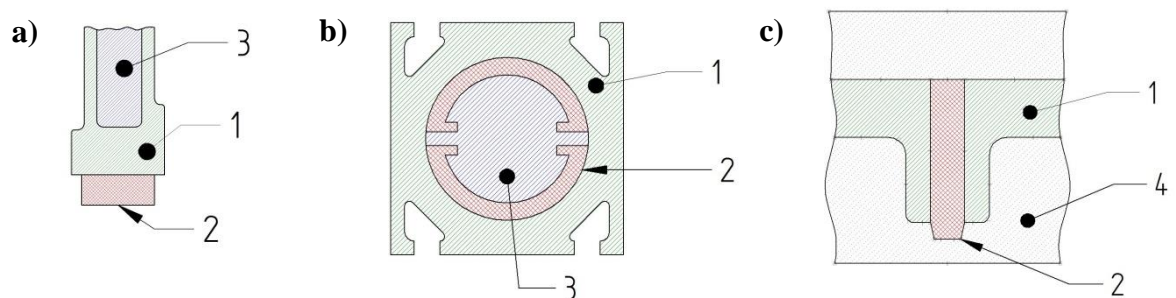
Jako zdroj uhlíku lze použít mletý koks či dřevěné uhlí. U použití tohoto typu exosměsi nastává podobný jev jako u křemíkového typu, neboť uhlík taktéž může proniknout do tekutého kovu a způsobit pak snížení teploty tuhnutí. [13]

2.3.5 Chladítka

Chladítka jsou dalším technologickým prostředkem, kterým se dá velmi účinně předcházet staženinám. Je ale důležité zmínit, že pomocí chladítek nikdy nedojde k odstranění staženin, ale pouze k jejich „odsunutí“ na jiné místo, kde se pak

tato vada již neodkryje např. obráběním. Použití chladítek bude tedy závislé na technologičnosti konstrukce daného odlitku.

Chladítka lze podle použití rozdělit na chladítka **vnější** a **vnitřní**, viz **obr. 2-32 a, b, c**. Vnitřní chladítko může být v některých případech použito jako zálievek a stane se tak součástí odlitku. V praxi se u litinových odlitků používají častěji vnější chladítka. [11]

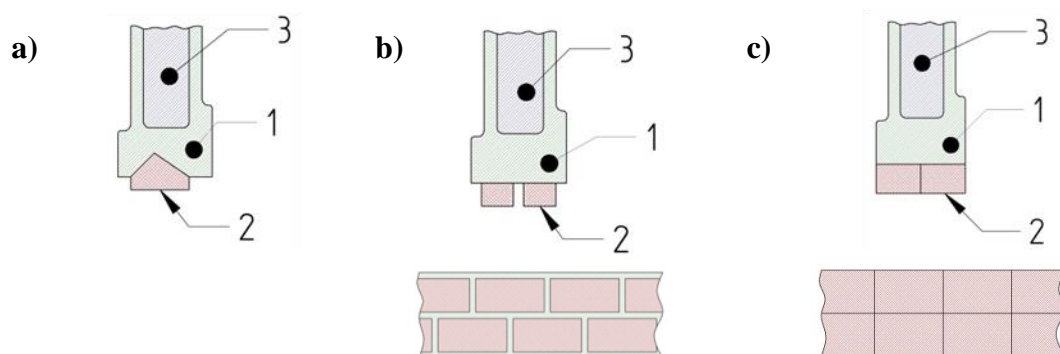


Obr. 2-32 Základní typy chladítek a možnosti jejich použití [11]

a) vnější chladítko, b) vnitřní chladítko, c) vnitřní chladítko jako zálievek

Vysvětlivky: 1) odlitek, 2) chladítko, 3) jádro, 4) písková forma

Vnější i vnitřní chladítka pak lze dále rozdělit na **univerzální** (**obr. 2-32 a**), které lze použít libovolně u různých odlitků a **tvarová** (**obr. 2-33 a**), která lze použít jen u konkrétního odlitku.



Obr. 2-33 Základní typy chladítek a jejich použití [11]

a) vnější chladítko tvarové, b) správné užití chladítek s rozestupy, c) špatné použití chladítek bez rozestupů

Vysvětlivky: 1) odlitek, 2) chladítko, 3) jádro

Tloušťka chladítek je závislá na velikosti ochlazovaného tepelného uzlu (*tloušťce stěny odlitku*) a na druhu litiny. Pokud je třeba zachladit větší plochu odlitku je výhodnější, už jen kvůli manipulaci s chladítkem, použít větší počet menších chladítek, která jsou rozmístěna šachovnicově s rozestupy minimálně 2-3

cm (**obr. 2-33 b**). Pokud by odstupy byly menší, tak je možné, že dojde k vydrolení příliš tenké vrstvy formovací směsi mezi chladítka a k jejímu rozplavení do odlitku. Navíc příliš malé vzdálenosti u chladítek znemožní jejich roztažení po zahřátí kovem a dojde k jejich vytlačení, což může vést až k poškození povrchu odlitku. Oba tyto případy jsou nežádoucí, neboť mohou vést až ke zmetkovému odlitku (**obr. 2-33 c**).

Chladítka lze používat opakovaně, a proto je důležité se o ně náležitě starat. Jejich povrch a zejména funkční plocha, která je do styku s tekutým kovem by měla být hladká, čistá, bez rzi, prasklin či pórovitosti. Povrch chladítek by se měl brousit či hoblovat a po každém vyjmutí z odlité formy by se měly nechat očistit v brokovém tryskači či omílacím bubnu. Po takovémto očištění se funkční plocha ještě před vložením do nové formy přetře speciálním nátěrem, pokud ne, tak je povrch chladítka ošetřen stejným nátěrem jako zbytek povrchu formy. Chladítka, která na sobě mají defekty typu prasklin, prohnutí či pórovitosti se musí vyřadit a nahradit novými chladítky. [11]

Použití chladítek má však také své nedostatky, neboť neexistuje úplně přesná metoda výpočtu jejich rozměrů. S tím je spojené např. riziko nedostatečného zchlazení, kdy dojde pouze ke zdánlivému zlepšení povrchu odlitku a vady, které bylo zapotřebí odstranit, se objeví hned pod povrchem. Naopak při velkém rozdílu tepelné vodivosti mezi kovovými chladítky a formovací směsí může dojít k lokálnímu zakalení povrchu (zákalky) a tím pádem k znesnadnění budoucího obrábění odlitku. Velký rozdíl rychlosti ochlazování u vnějších a hlubších vrstev odlitku může způsobit dokonce jeho prasknutí. [11]

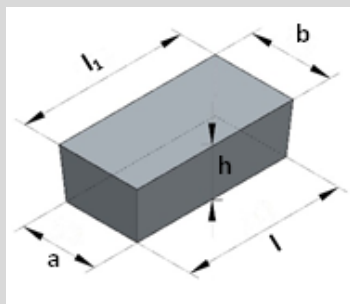
Kovová chladítka pro litinové odlitky mohou být vyrobena z LLG, u které je součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{LLG} = 49,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, ale výhodnější je pro výrobu chladítek použít LKG (např. *EN-GJS-400-15* nebo *EN-GJS-500-7*), i za cenu vyšších nákladů a nižšího $\lambda_{LKG} = 32,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Je to z toho důvodu, že lupínkový grafit prostupuje celým odlitkem chladítka. Po těchto lupíncích (*lamelách*) postupuje vlhkost, koroze a vznikají tak velmi těžko odstranitelné okuje, které velmi často nelze odstranit ani důkladným otryskáním. Chladítka z LLG pak často způsobují odvařeniny přímo na pracovní ploše.

Chladítka by měla mít, pokud je to možné feritickou, nebo alespoň feriticko-perlitickou strukturu, neboť feritická struktura je stabilní. Chladítka z perlitické LKG (např. *EN-GJS-600-3* nebo *EN-GJS-700-2*) nejsou úplně vhodná, neboť na pracovní ploše chladítka pak může docházet k pomalé přeměně perlitu na ferit, ale odvrácená

strana zůstane perlitická a mohou tak vznikat pnutí a deformace chladítek, což vede ke snížení jejich životnosti, někdy až na pouhých 10 použití. V MR byla vyvinuta univerzální chladítka kruhového tvaru a tvaru desky, která se používají již řadu let, jejich rozměry jsou uvedeny v **tab. 2-5** a **tab. 2-6**.

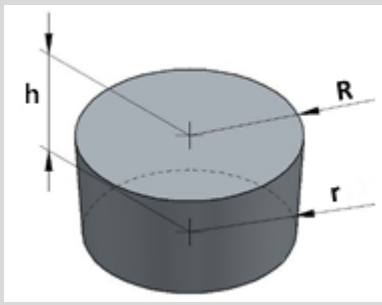
Tab. 2-5 Rozměry chladítek tvaru desky z LKG, odlito dle normy ČSN 422304

	rozměr: a x b / h, l, l ₁ [mm]	m [kg]
chladítko č. 1	95 x 105 / 25, l = 210, l ₁ = 220	3,78
chladítko č. 2	60 x 70 / 40, l = 240, l ₁ = 250	4,5
chladítko č. 3	60 x 70 / 40, l = 110, l ₁ = 120	2
chladítko č. 4	100 x 110 / 50, l = 330, l ₁ = 340	12,5
chladítko č. 5	100 x 110 / 50, l = 110, l ₁ = 120	4,2
chladítko č. 6	100 x 110 / 70, l = 210, l ₁ = 220	11,1
chladítko č. 7	100 x 110 / 70, l = 110, l ₁ = 120	5,8



Tab. 2-6 Rozměry chladítek kulatého tvaru z LKG, odlito dle normy ČSN 422304

	rozměr: R, r, h [mm]	m [kg]
chladítko č. 1	R= 37,5; r = 30, h = 30	0,8
chladítko č. 2	R= 47,5; r = 40, h = 40	1,74
chladítko č. 3	R= 57,5; r = 50, h = 50	3,3
chladítko č. 4	R= 67,5; r = 60, h = 50	4,6
chladítko č. 5	R= 77,5; r = 70, h = 60	7,4
chladítko č. 6	R= 87,5; r = 80, h = 60	9,5



2.3.6 Výpočet hmotnosti úkladu

Při odlévání těžkých odlitků je nutné stanovit hmotnost úkladků (*závaží*), které zabrání přizvednutí vrchní části formy v důsledku působení vztlakové síly. Vztlak na vrchní část formy je způsoben statickou a dynamickou silou kovu při lití. Stanovení velikosti úkladku se v praxi stanovuje ze statické vztlakové síly. Výsledná hmotnost úkladku se zvyšuje o 40 – 60 %, čímž je zahrnuta i dynamická vztlaková síla [12].

Vztlakovou sílu F_v lze vypočítat [10]:

$$F_v = S_d \times h_d \times \rho \times g \quad [N] \quad (10)$$

kde značí: S_d - plochu tekutého kovu v dělicí rovině [m^2],
 h_d - výšku hladiny nad dělicí rovinou [m],
 ρ - hustotu tekutého kovu – taveniny [$kg \cdot m^{-3}$],
 g - tíhové zrychlení [m^2].

Aby nedošlo při odlévání k přizvednutí vrchní části formy, musí gravitační síla vyvolaná závažím odpovídat minimálně síle vztlačové. Minimální hmotnost závaží lze tedy stanovit dle následujícího vzorce (11):

$$m = \frac{F_G}{g} \quad [kg] \quad (11)$$

kde značí: m - hmotnost úkladku [kg],
 F_G - tíhová síla ($F_G = F_V$) [N],
 g - tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

3 Experimentální část

Tato část diplomové práce byla řešena v rámci spolupráce s firmou METALURGIE Rumburk s.r.o. a zabývá se optimalizací technologie odlitku Vřeteník WHR 13 (Q), dále označovaný jako vřeteník. Tento odlitek je součástí stroje WHR 13 (Q), který je vyráběn ve firmě TOS Varnsdorf. Stroj WHR 13 (Q) je nejnovější představitel vodorovných stolových vyvrtávaček, který byl vyvinut z nejúspěšnější generace stolových strojů WHN 13 CNC.

Cílem této práce je optimalizace stávající technologie výroby vřeteníku, pomocí které se tento odlitek vyráběl téměř jeden rok. Během této doby se na žádném z odlitých kusů nevyskytovaly žádné vady. Avšak po cca 20. vyrobeném odlitku se na dalších odlitých kusech začaly ve velké míře vyskytovat neopravitelné vady typu staženin a ředin. V takovémto případě je nejsnazší a nejrychlejší možností, jak opět docílit požadované jakosti odlitku, úprava stávající technologie.

V úvodu praktické části je tedy představen samotný odlitek. Následující kapitola 3.2 se zabývá popisem původní technologií, která byla použita na začátku výroby. Postupně je popsána volba polohy odlitku ve formě, volba dělicí roviny, nálitků, chladítek a návrh vtokové soustavy (*dimenzování zářezů, odlučovače strusky a vtokových kúlů*). Následně je popsán typ, rozsah a poloha vad, kvůli kterým se musela technologie upravit.

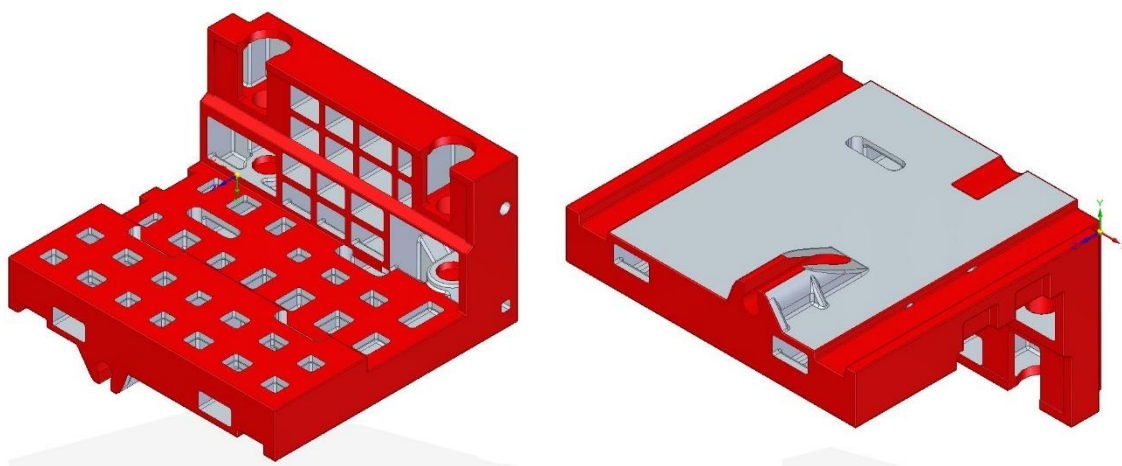
K optimalizaci technologie byl použit simulační program pro plnění a tuhnutí odlitků QuikCAST od firmy MECAS. Průběh optimalizace pomocí QuikCASTU a ukázka finální technologie je podrobně popsán v kapitole 3.3.

Úprava technologie by však neměla být konečné řešení, protože jen zabraňuje vzniku výše zmíněných vad, ale nepředchází příčině jejich vzniku. Téměř celý rok výroby vřeteníku byla dostačující původní technologie, ke které by se slévárna chtěla vrátit, neboť byla ekonomicky výhodnější.

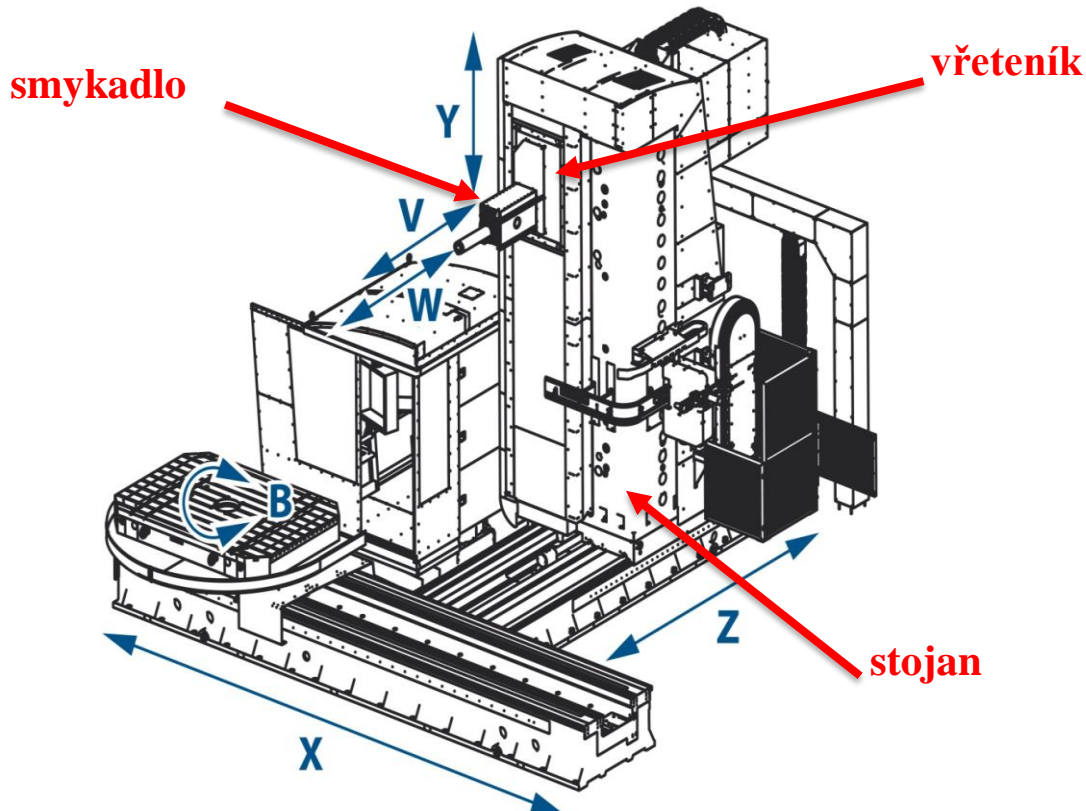
Proto se poslední část této práce zabývá jakostí materiálu EN-GJS-600, ze kterého je vřeteník vyráběn. Při optimalizaci a prověření metalurgické kvality byla navázána spolupráce s firmami Technical Service Kuehn GmbH a DETYCON Solutions s.r.o., ve slévárně bylo uskutečněno měření kvality tekutého kovu pomocí termické analýzy AccuVo a následné vyhodnocení v softwaru Apromace. Cílem tohoto měření bylo zjistit metalurgickou kvalitu taveniny v průběhu výroby litiny s kuličkovým grafitem v MR.

3.1 Představení odlitku Vřeteník WHR13

Vřeteník WHR 13 viz **obr. 3-1** je součástí vodorovné stolové vyvrtávačky WHR 13 (Q), viz **obr. 3-2**. Tento odlitek není klasický vřeteník. Slouží jako držák smykadla, které pak může vykonávat vodorovný pohyb a díky vřeteníku, který se pohybuje nahoru či dolů po stojanu i svislý pohyb. Jednotlivé parametry vřeteníku jsou zaneseny v **tab. 3-1**.



Obr. 3-1 Vřeteník WHR 13 Q – červeně označené plochy jsou s přídavkem



Obr. 3-2 Vodorovná stolová vyvrtávačka WHR 13 (Q)

Tab. 3-1 Parametry odlitku Vřeteník WHR 13

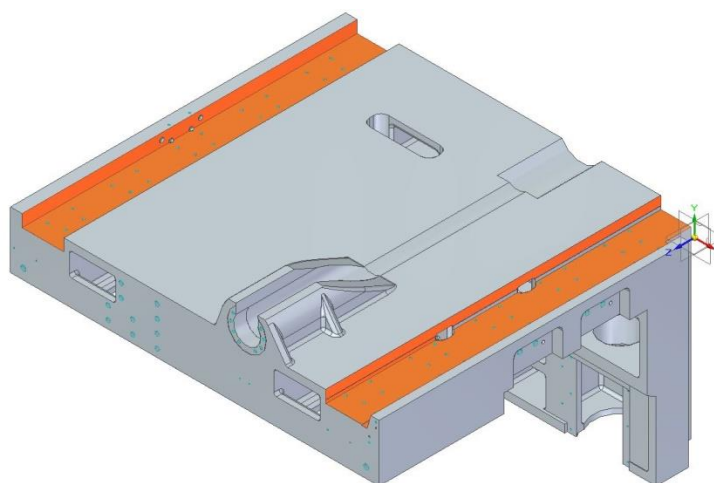
rozměry (délka x šířka x výška) [mm]	1450 x 1320 x 892
střední tloušťka stěn [mm]	30
hrubá hmotnost odlitku [kg]	2350
materiál odlitku	EN-GJS-600-3

3.2 Představení původní technologie výroby odlitku

V rámci této kapitoly je popsán důvod volby dané dělicí roviny, dimenzování vtokové soustavy – výpočet průřezu zářezů, odlučovače strusky, vtokových kúlů a výpočet hmotnosti úkladků. Dále je zde ukázáno umístění technologických prvků – nálitků a chladítek.

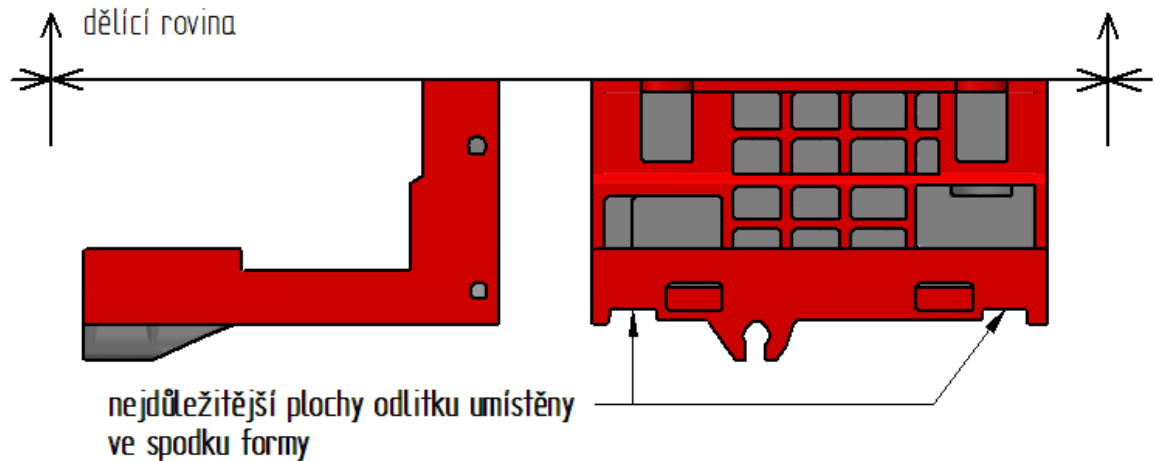
3.2.1 Volba dělicí roviny a polohy odlitku ve formě

Na **obr. 3-3** je ukázán obrobek vřeteníku, kde jsou oranžově vyznačeny funkční plochy s požadavky na kvalitu.

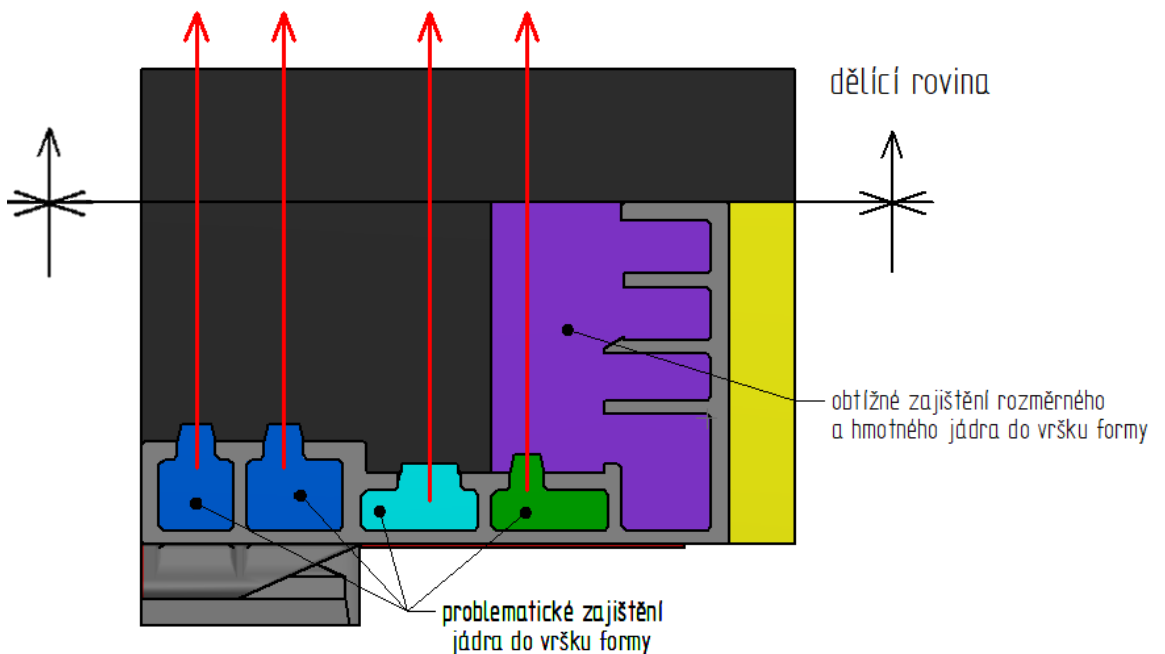


Obr. 3-3 Obrobek vřeteníku WHR 13 Q

Proto první návrh polohy odlitku ve formě uvažoval o umístění těchto ploch do spodní části formy, aby byla zajištěna jejich kvalita, viz **obr. 3-4**. Jak je však patrné z obrázku, tak tato varianta je velmi náročná při samotném vkládání jader do formy. Ve vrchní části formy by vznikla velká masa formovací směsi, do které by musely být zajištěny další jádra (*přivázáním či vlepením*), což by bylo problematické už jen při otáčení vrchního rámu, jak je ukázáno na **obr. 3-5**.



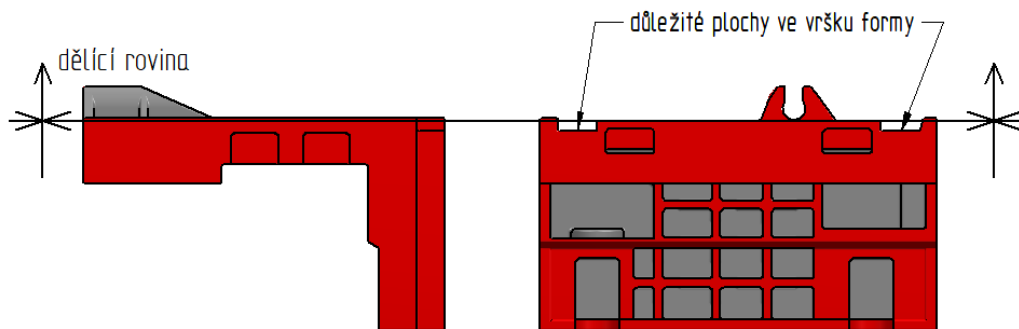
Obr. 3-4 První návrh polohy odlitku ve formě



Obr. 3-5 Obtížné vkládání jader do formy (jejich vázání do vršku formy) při umístění důležitých ploch odlitku do spodní části formy

Z těchto důvodů vůbec nedošlo k realizaci tohoto návrhu a muselo být použito jiné řešení. Oproti prvnímu návrhu byl odlitek ve formě otočen o 180° i za cenu umístění funkčních ploch do vrchní části formy. U tohoto řešení je zvýšené riziko výskytu různých vad či nečistot. Takovýto způsob zaformování je ale mnohem vhodnější pro zakládání jader, a navíc bude výhodnější i pro formíře vzhledem k rozebírání spodní a vrchní části formy. Vrchní část formy bude nyní v podstatě rovná, což ulehčí mnoho práce při otáčení vrchního dílu formy pro nanesení nátěru. Finální poloha odlitku ve formě a volba dělicí roviny je zobrazena na **obr. 3-6**.

Odpovídající kvalita funkčních ploch bude muset být zajištěna použitím dalších technologických prvků, jako jsou chladítka, nálitky případně EXO nálitky. Tyto technologická opatření jsou předmětem dalších kapitol.



Obr. 3-6 Finální poloha odlitku ve formě

3.2.2 Výpočet vtokové soustavy pro odlitek Vřeteník WHR 13

Po stanovení polohy odlitku ve formě a volbě dělicí roviny byla dále dimenzována vtoková soustava. Předtím než lze začít dimenzovat jednotlivé části vtokové soustavy, tak musí být známa poloha odlitku ve formě a rozměr formovacího rámu, tyto dva body jsou prvopočátkem všeho.

Aby bylo možné pokračovat ve výpočtu jednotlivých průřezů vtokové soustavy, musí být známa optimální doba plnění formy a střední ferostatická výška.

Pro výpočet *optimální doby plnění formy* dle rovnice (2) byla nejprve stanovena hrubá hmotnost odlitku m pomocí programu SolidEdge 3D ($m = 2350 \text{ kg}$), na základě které byla dále stanovena hmotnost odlitku včetně vtokové soustavy a nálitků G (*hrubá hmotnost*) dle rovnice (1). Pro výpočet bylo také nutné stanovit pomocí SolidEdge 3D střední tloušťku stěn tl ($tl = 30 \text{ mm}$) a dále zvolit součinitel času s ($s = 1,5$).

Dle rovnice (2) byla tedy stanovena s dosazením ze vztahu (1) *optimální doba plnění formy*:

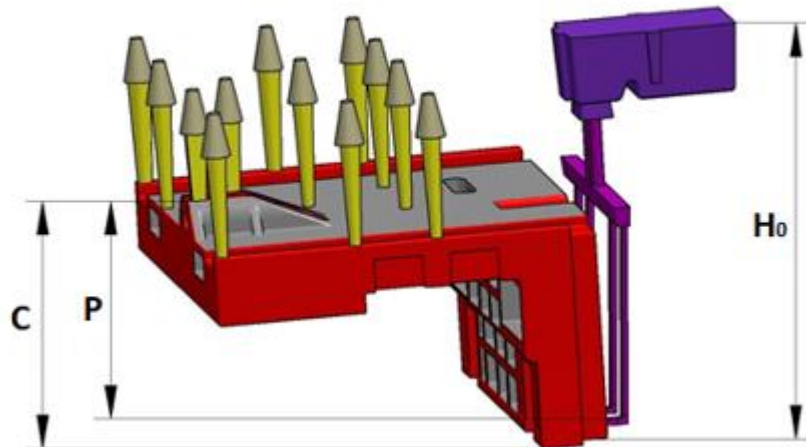
$$G = 1,2 \times m = 1,2 \times 2350 = 2820 \text{ kg} \quad (12)$$

$$t = s \times \sqrt[3]{tl \times G} = 1,5 \times \sqrt[3]{30 \times 2820} = 65,85 \approx 66 \text{ s} \quad (13)$$

V dalším kroku byla určena střední ferostatická výška. Na základě obr. 3-7 byla stanovena Počáteční maximální ferostatická výška H_0 ($H_0 = 1,485 \text{ m}$), výška odlitku nad rovinou zářezu P ($P = 0,875 \text{ m}$) a celková výška odlitku v poloze při liti

C ($C = 0,893 \text{ m}$). Na základě rovnice (3) byla potom stanovena *střední ferostatická výška* $h_{stř}$:

$$h_{stř} = H_o - \frac{P^2}{2 \times C} = 1,485 - \frac{0,875^2}{2 \times 0,893} = \mathbf{1,056 \text{ m}} \quad (14)$$

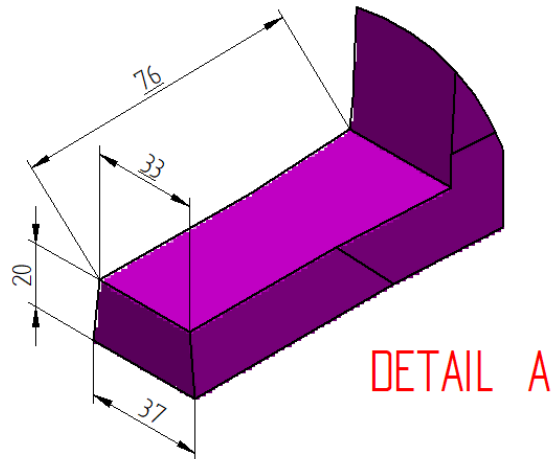


Obr. 3-7 Střední ferostatická výška

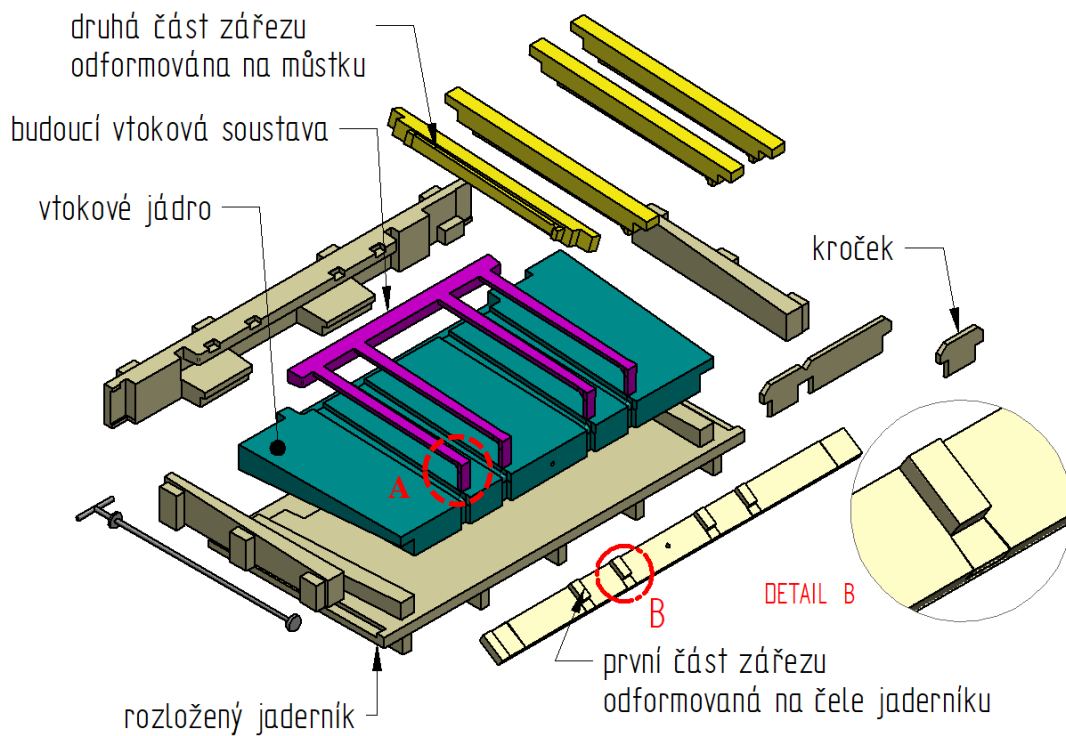
Na základě výše stanovených hodnot a za předpokladu, že odporový součinitel vtokové soustavy μ byl zvolen 0,55, byl dle vztahu (4) proveden výpočet plochy zářezu:

$$S_z = \frac{G}{\rho \times \mu \times \sqrt[2]{2 \times 9,81 \times h_{stř}} \times t} \times 10^6 = \frac{2820}{6100 \times 0,55 \times \sqrt[2]{2 \times 9,81 \times 1,056} \times 66} \times 10^6 \cong \mathbf{2801 \text{ mm}^2} \quad (15)$$

Celková plocha zářezů S_z tedy činí 2081 mm². Vzhledem k potřebám plnění dutiny formy byly zvoleny 4 zářezy, a tudíž plocha jednoho zářezu bude 700 mm². Pro zářez byl zvolen lichoběžníkový profil o rozměrech 33 x 37/20 mm a délka zářezu 76 mm, viz **obr. 3-8**. Úkos zářezu nutný pro vyjmutí zářezu z jaderníku byl zvolen 3°. Zářezy budou odformovány v jádru, které bude sloužit jen jako vtokové jádro, viz **obr. 3-9**.



Obr. 3-8 Detail zářezu vřeteníku WHR 13 (Q)



Obr. 3-9 Vtokové jádro (zeleně), jednotlivé části vtokového jaderníku, budoucí vtoková soustava (fialově)

Na základě stanovené celkové plochy zářezů byly dle rovnice (5) stanoveny průřezy odlučovače strusky a vtokového kůlu.

Plocha průřezu odlučovače strusky je tedy:

$$S_o = S_z \times 1,2 = 2801 \times 1,2 = 3361 \text{ mm}^2 \quad (16)$$

V MR je zvykem používat odlučovače strusky s lichoběžníkovým profilem, jehož rozměry jsou v poměru uvedeném na **obr. 3-10**.



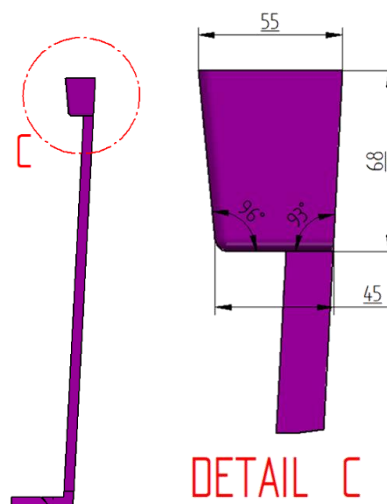
Obr. 3-10 Profil odlučovače strusky vytvořený dle vzorce (17)

Strana lichoběžníku **a** byla stanovena na základě následujícího vztahu (17):

$$S_o = \frac{(0,6a+a) \times 1,3a}{2} \quad (17)$$

$$a = \sqrt{\frac{2 \times S_o}{2,08}} = \sqrt{\frac{2 \times 3361}{2,08}} = 57 \text{ mm} \quad (18)$$

Odlučovač strusky pro větvení však bude součástí vtokového jaderníku, proto nelze použít přesně tento lichoběžníkový profil a musí být přizpůsoben tak, aby bylo možné jádro z jaderníku vyjmout. Proto byl profil odlučovače strusky uzpůsoben a výsledný tvar odlučovače strusky je zachycen na **obr. 3-11**.



Obr. 3-11 Skutečný profil odlučovače strusky

Dále byl stanoven ve zvoleném poměru průřez vtokového kůlu a z něho následně určen jeho průměr.

$$S_v = S_z \times 1,4 = 2801 \times 1,4 = 3921 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times S_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 3921}{\pi}} = 70,6 \cong \mathbf{71 \text{ mm}} \quad (20)$$

Dle uvedeného výpočtu je \emptyset licího kůlu 71 mm. U licího kůlu však platí nepsané pravidlo, že vhodnější, než jeden větší licí kůl je větší počet menších licích kůlů. Struska, která má menší hustotu než tavenina, plave na hladině licí jamky a pro slévače je mnohem snazší udržet hladinu licí jamky s větším počtem menších licích kůlů, tavenina pak nebude proudit do formy tak rychle, a navíc se tím sníží riziko vniknutí strusky do vtokového systému, potažmo do odlitku. Proto byl počet licích kůlů upraven, místo jednoho o \emptyset 71 mm byly použity tři o \emptyset 41 mm. Licí kůly budou zhotoveny pomocí odformovaných dřevěných kolíků.

Dimenzování vtokové soustavy není nějak extrémně náročné, ale může být někdy zdlouhavé, neboť vzorce nemusí vždy poskytnout finální hodnoty a někdy je zapotřebí opakovaně přepočítávat, viz dimenzování odlučovače strusky, zářezů, vtokového kůlu. Z tohoto důvodu byla v rámci řešení této práce vytvořena výpočtová tabulka vtokových soustav v programu Microsoft Excel, která kombinuje již výše zmíněné vzorce, a navíc umožňuje navrhnout průřezy zářezů a licích kůlů dle zadaného počtu, profil odlučovače strusky, hmotnost úkladků atd. Výpočtová tabulka je uvedena v příloze.

3.2.3 Výpočet hmotnosti úkladku

Hmotnost úkladku byla stanovena na základě vztahů (10) a (11). Plocha tekutého kovu v dělicí rovině S_d ($S_d = 1,905 \text{ m}^2$) a výška hladiny nad dělicí rovinou h_d ($h_d = 0,777 \text{ m}$) byla opět stanovena pomocí programu SolidEdge 3D. Ve výpočtu byla uvažována hustota taveniny ρ 6100 kg.m^{-3} .

$$F_v = S_d \times h_d \times \rho \times g = 1,905 \times 0,777 \times 6100 \times 9,81 = 88575,75 \text{ N} \quad (21)$$

$$m = \frac{F_G}{g} = \frac{88575,75}{10} = 8857,5 \text{ kg} \rightarrow 8857,5 \div 10^3 = 8,86 \text{ t} \quad (22)$$

Výpočet je zjednodušen, neboť neuvažuje dynamický účinek vztakového působení kovu a počítá jen se statickým účinkem. Vypočtená hmotnost úkladku po zaokrouhlení činí cca 9 tun.

Mezi slévači platí nepsané pravidlo, že hmotnost úkladku by se měla rovnat čtyřnásobku hmotnosti odlitku. Hrubá hmotnost vřeteníku je 2350 kg a čtyřnásobek této hmotnosti je 9400 kg, tzn. závažím o hmotnosti 9 t je cca splněna i tato podmínka, přestože toto pravidlo není směrodatné a slouží spíš jen pro kontrolu.

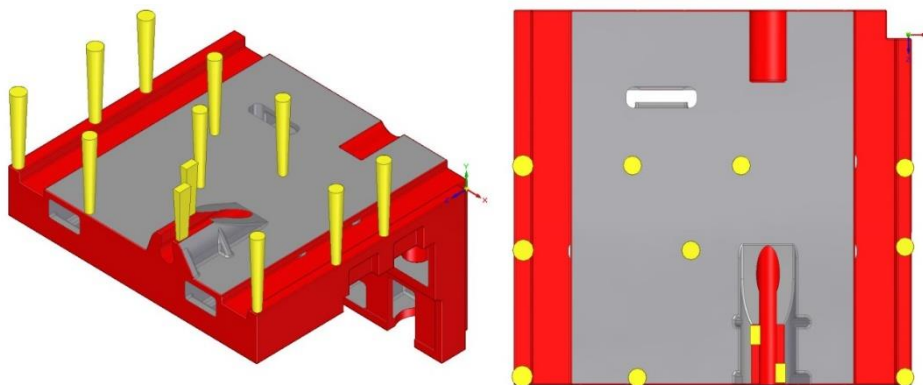
Navíc dalším prvkem zabraňujícím přizvednutí rámu jsou speciální svorky a dřevěné klíny, pomocí kterých se spodní a vrchní část formy zajistí k sobě (tzv. „kramlování“).

3.2.4 Původní systém nálitkování Vřeteníku WHR 13

Ve firmě Metalurgie Rumburk se odlitky obecně příliš nenálitkují, odlitky z LLG prakticky vůbec, neboť tento materiál není příliš náchylný k tvorbě staženin či ředin. Dobrá grafitická expanze během krystalizace grafitu dokáže vykompenzovat objemové změny (*smrštění odlitku*), proto není nutné odlitky z LLG tolik nálitkovat a nálitky na odlitcích mají spíše funkci výfuku pro odvedení plynů a nečistot.

Odlitky z LKG však nemívají tak účinnou grafitickou expanzi, a proto vyžadují více nálitků.

Vřeteník WHR 13 je odléván z LKG, a navíc poloha odlitku byla zvolena tak, že „deskovitá“ část odlitku je ve vrchní části formy. Proto lze očekávat, že vrchní část odlitku bude ošetřena nálitky. Přesto nálitky umístěné na vřeteníku mají v podstatě pouze funkci výfuků. K rozmístění nálitků byl použit program SolidEdge 3D a umístění nálitků (*výfuků*) je vidět na **obr. 3-12**.

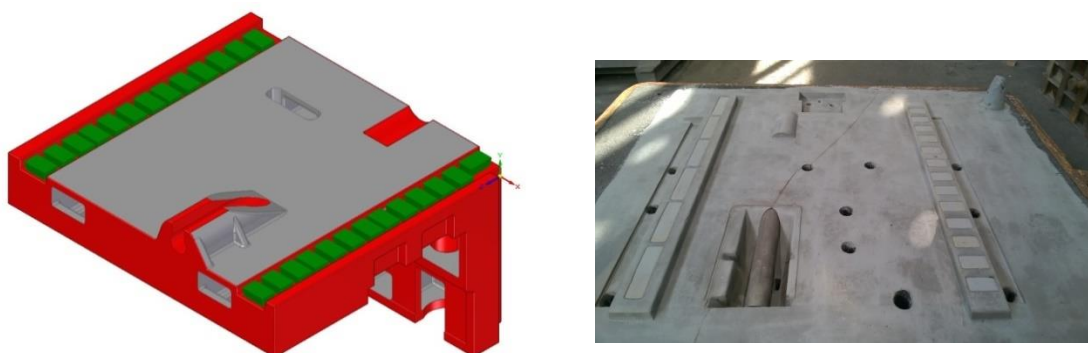


Obr. 3-12 Náhled na rozmístění nálitků u Vřeteníku WHR 13

Tato skutečnost má své opodstatnění, neboť MR má již s odlitky tohoto typu zkušenosti, a proto byla použita obdobná technologie, která je již prověřena výrobou dalších typově podobných odlitků. Zkušeností slévárny je, že přílišné nálitková deskovitých odlitků z LKG ve vršku formy může někdy zvýšit výskyt vad, jako jsou řediny či staženiny. Navíc ani při prohlídce výkresové dokumentace nebylo zjištěno žádné místo, které by bylo zapotřebí speciálně nálitkovat.

3.2.5 Původní rozmístění chladítek u Vřeteníku WHR 13

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.2.1, tak dělicí rovina při výrobě odlitku byla umístěna tak, že funkční plochy odlitku byly umístěny ve vrchní části formy. Aby byla zaručená odpovídající kvalita povrchu těchto ploch bez vnitřních vad, došlo k jejich osazení univerzálními vnějšími chladítky, která se používají v MR. Konkrétně se jedná o chladítko č. 3, jehož parametry lze vidět v **tab. 2-5** v teoretické části této práce. Pro ošetření celých ploch bylo nutné použít 26 chladítek s rozestupy cca 3 cm. Rozmístění chladítek lze vidět na **obr. 3-13**.

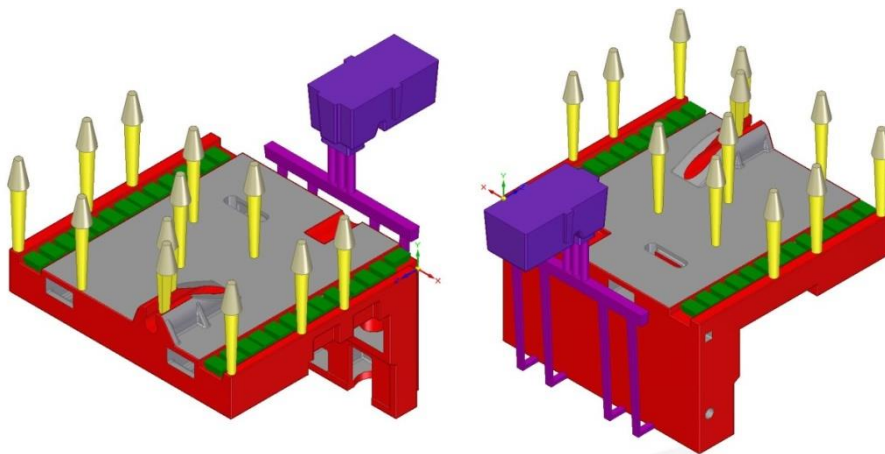


Obr. 3-13 Rozmístění chladítek – 3D model odlitku s chladítky (vlevo) a vrchní část formy s již zaformovanými chladítky (vpravo)

3.2.6 Shrnutí původní technologie na Vřeteníku WHR 13

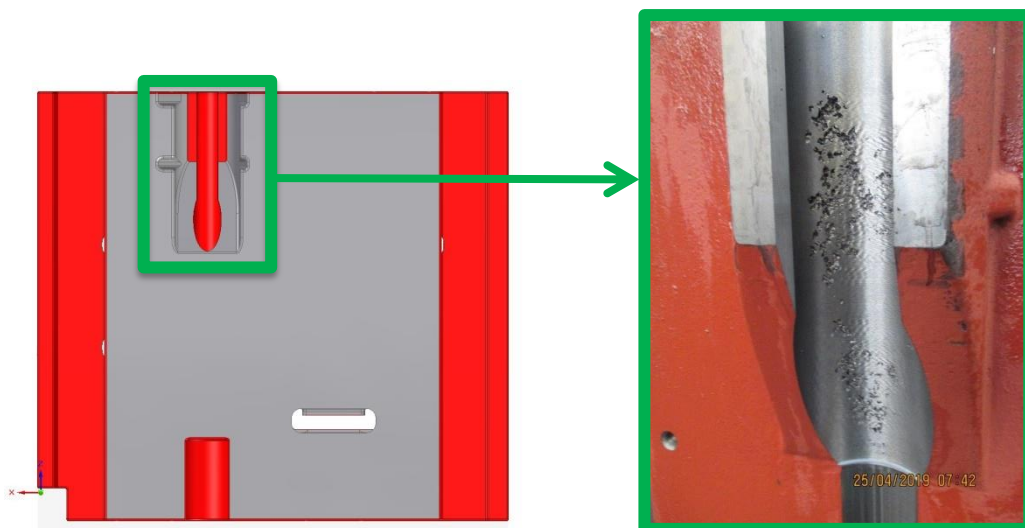
Na **obr. 3-14** je zobrazena kompletní původní technologie, která byla použita při výrobě prvních odlitků vřeteníků. Můžeme zde vidět rozmístění nálitků, chladítek a kompletní vtokovou soustavu včetně vtokové jamky, odlučovače strusky a zářezů.

S odléváním vřeteníku pomocí takto nastavené technologie bylo odlito cca 20 kusů, kdy při jejich obrábění nebyly nalezeny žádné vady typu staženin či ředin a nebyly zákazníkem fakturovány ani žádné vícepráce.

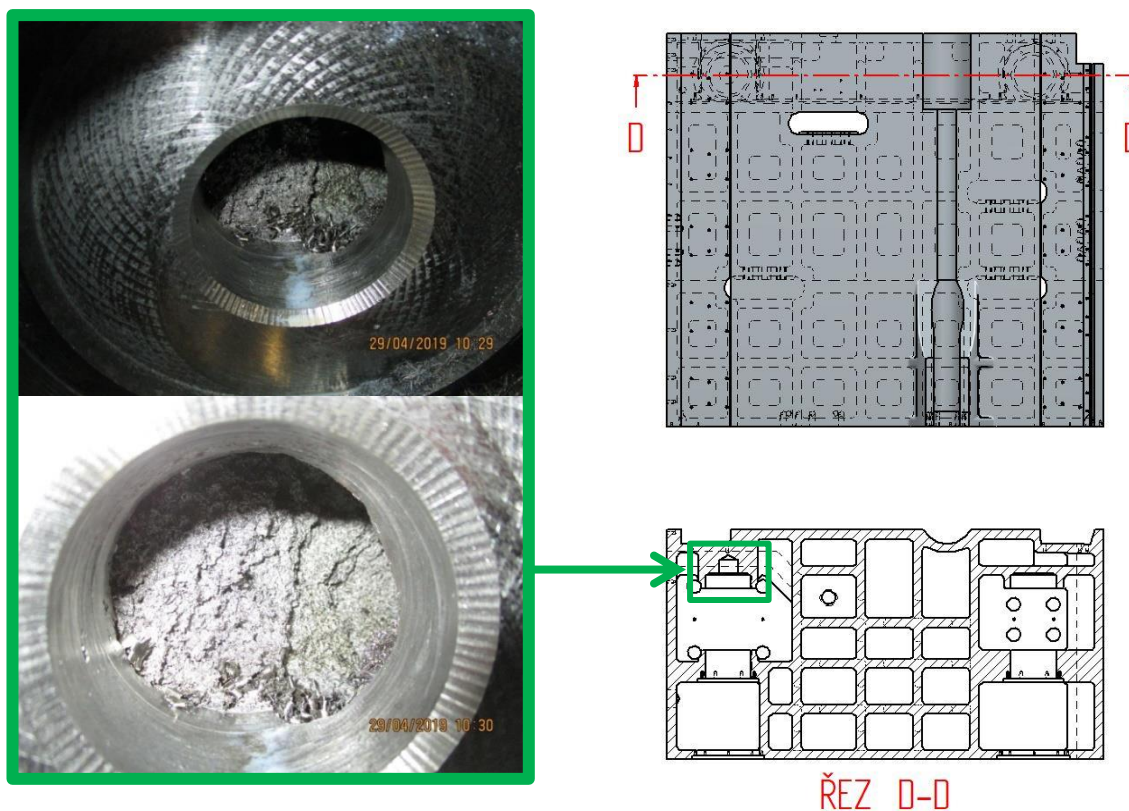


Obr. 3-14 Původní technologie Vřeteníku WHR 13

Po těchto odlitých kusech však nastal přelom a na dalších odlitcích byly zákazníkem reklamovány první kusy vřeteníku na neopravitelné vnitřní vady – řediny a staženiny lze vidět na **obr. 3-15** a na **obr. 3-16**. Tyto vady se vyskytovaly na dvou místech odlitku.



Obr. 3-15 Označení první oblasti výskytu vad – staženiny a řediny v hlavním uložení pro kuličkový šroub



Obr. 3-16 Označení druhé oblasti výskytu vad – staženiny a řediny ve vrtaném otvoru zobrazeném na řezu D-D

Výskyt těchto vad byl velký problém, neboť jak je psáno výše, jednalo se o neopravitelné vady, a navíc se vyskytly hned na několika odlitcích. Slévárna bohužel dodává jen hrubé odlitky, neboť nedisponuje hrubovnou, kde by se případné vady daly odhalit mnohem dříve. Zákazník bohužel nepracuje jen jeden odlitek, ale čeká až na celou sérii odlitků (4-5 kusů), proto když se objeví jakákoli vada, tak se může objevit hned u několika odlitků, což se bohužel stalo u Vřeteníku WHR 13.

Zákazník reklamoval několik kusů a vzhledem k tomu, že zákazník nemá žádné skladové zásoby odlitků, tak byly po slévárně požadovány nové kusy v co nejbližším termínu. Proto muselo dojít k okamžité úpravě stávající technologie.

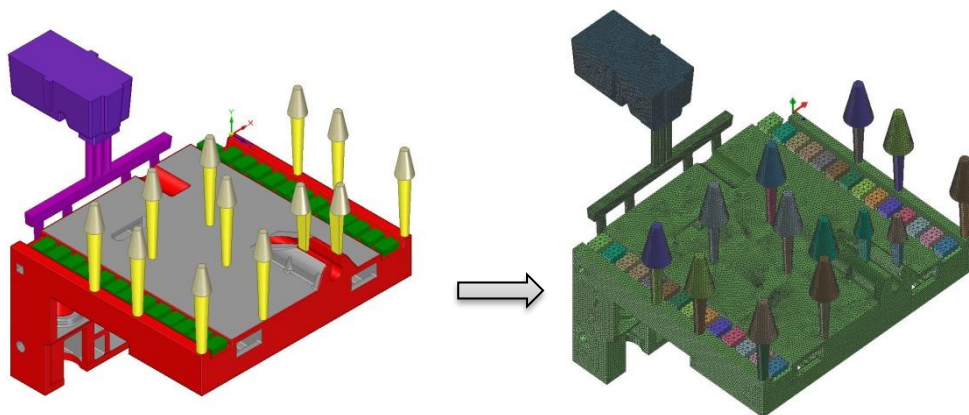
Optimalizace technologie byla provedena pomocí simulačního softwaru na plnění a tuhnutí odlitků QuikCAST od firmy MECAS ESI. Tento software řeší problematiku slévárenské technologie pomocí metody konečných diferencí. V tomto programu bylo odzkoušeno hned několik variant řešení. Průběhem optimalizace technologie se zabývají další kapitoly této práce.

3.3 Optimalizace technologie pomocí numerického výpočtu

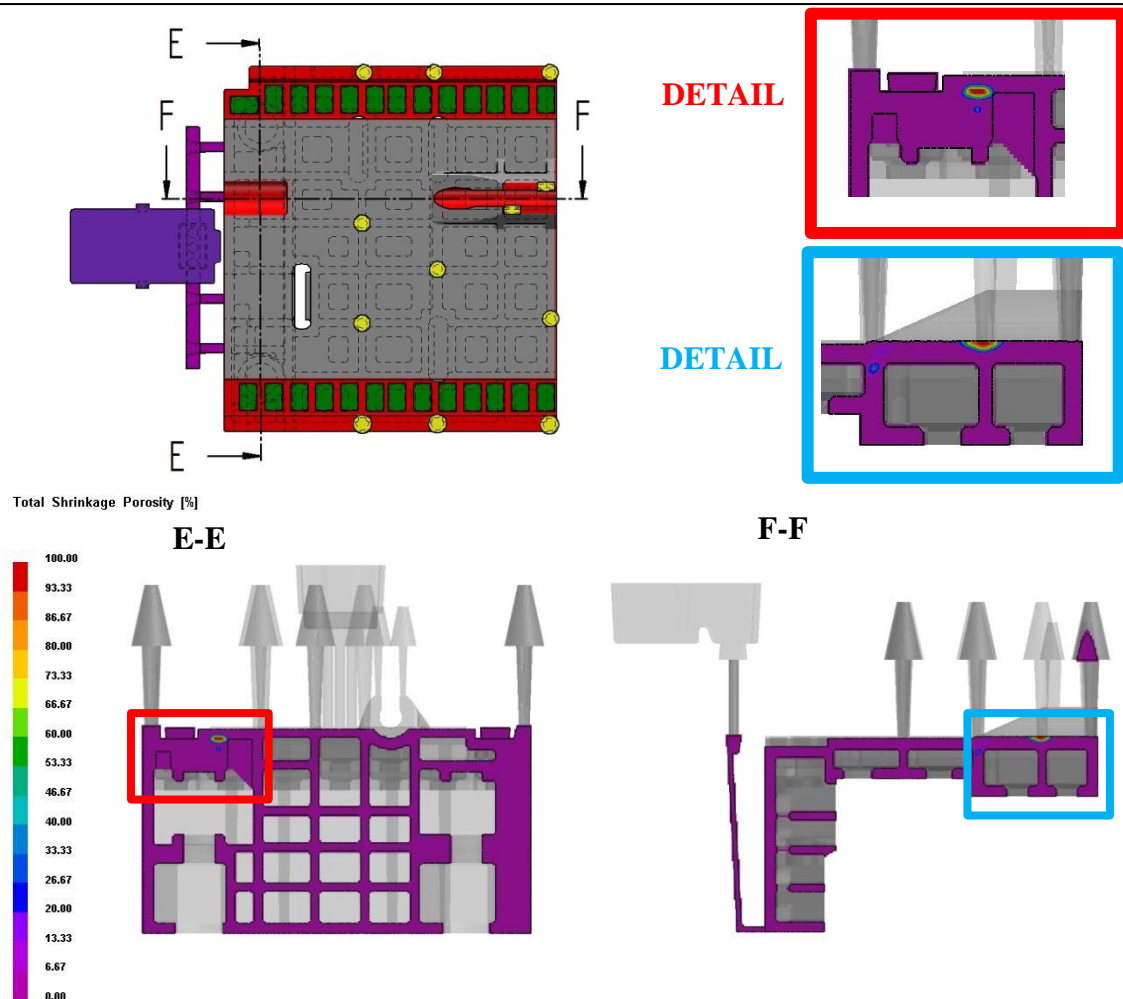
Vzhledem k tomu, že při návrhu původní technologie nebyl proveden simulační výpočet plnění a tuhnutí odlitku, tak jako první krok byl tento výpočet proveden pro původní technologii.

3.3.1 Simulační výpočet pro původní technologii

Tento výpočet byl proveden za účelem potvrzení výskytu vad, které se vyskytovaly na odlitcích. Výsledky první simulace tedy posloužily hlavně k ověření správnosti výpočtů z QuikCASTU. Průběh úpravy dat pro simulaci a výsledek simulace je znázorněn na **obr. 3-17** a **obr. 3-18**.



Obr. 3-17 Příprava dat simulace v QuikCASTU



Obr. 3-18 Výsledek simulace původní technologie – zobrazení poretizy

Jak je patrné z **obr. 3-18**, simulace predikuje poretizu přesně v místech, kde se vyskytovala i ve skutečnosti. Po tomto kroku následoval první návrh úpravy.

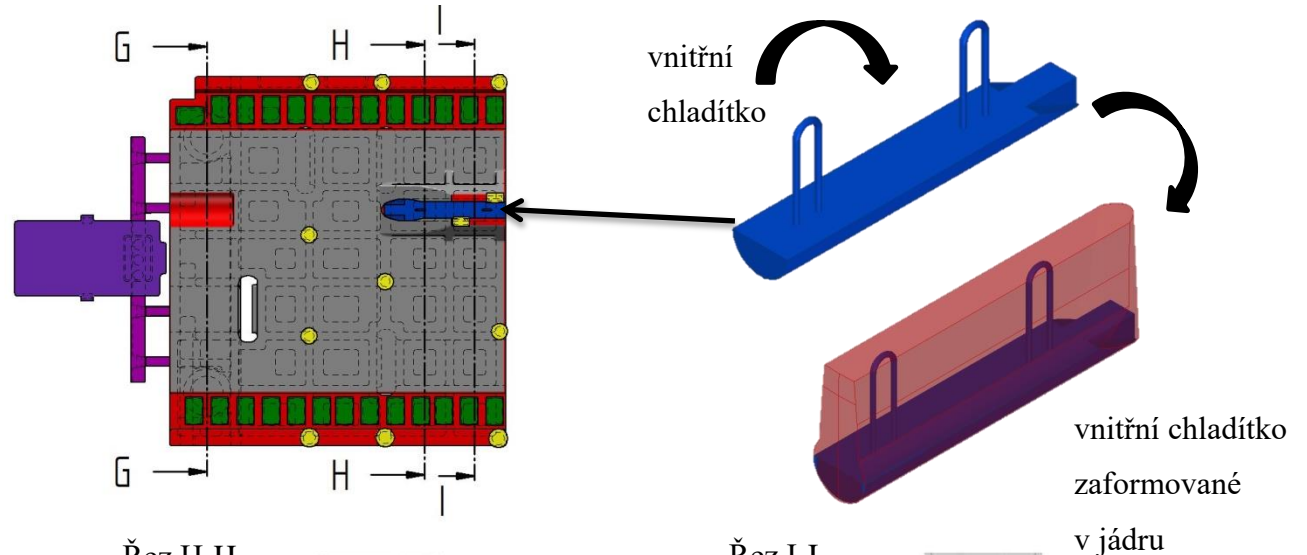
3.3.2 První návrh optimalizace původní technologie

Při první optimalizaci původní technologie, došlo pouze k přidání vnitřního chladítka z LKG válcovitého tvaru a půlkruhového průřezu (**obr. 3-19**), které se zaformovalo přímo do jádra. Rozmístění ostatních chladítek a výfuků se nezměnilo. Rozměry vtokové soustavy se též zůstaly stejné.

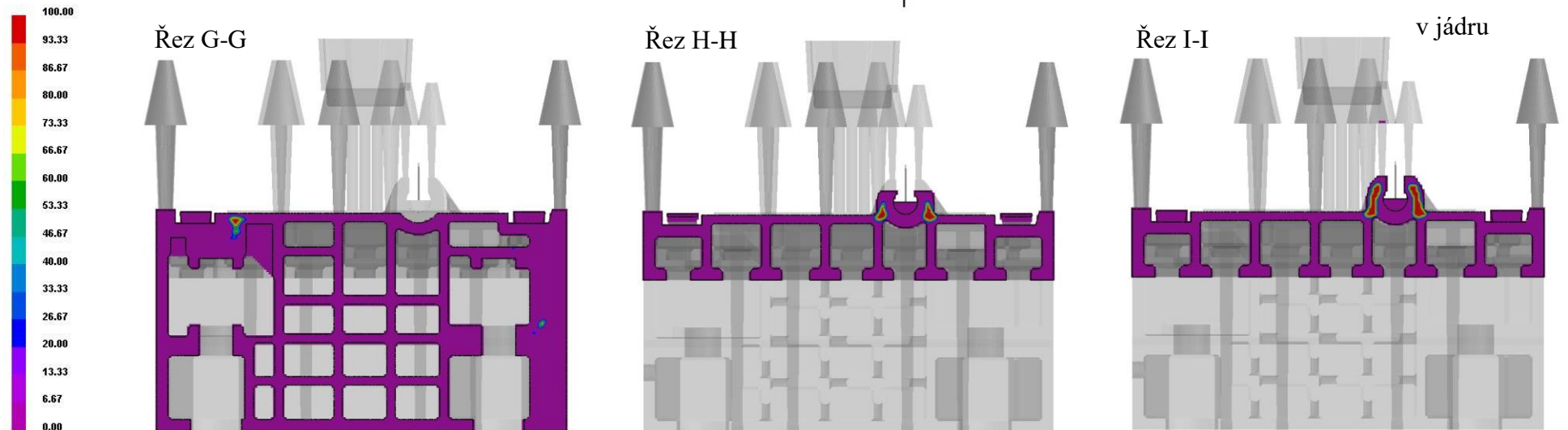
Vnitřek uložení pro kuličkový šroub, kde se poretiza vyskytovala při původní technologii, je tvořen jádrem, které se váže do vršku formy. Do tohoto jádra bylo zaformováno toto válcovité chladítko, které bylo vyrobeno přímo pro tento odlitek a nelze ho použít pro jiný odlitek. Po odlití a vytlučení odlitku z formy lze chladítko vyjmout a opětovně ho použít. Na **obr. 3-19** je ukázán první optimalizační návrh a výsledek jeho simulace.

3.3.2 První návrh optimalizace

Při první optimalizaci původní technologie, došlo pouze k přidání vnitřního válcovitého chladítka, které se zaformovalo přímo do jádra. Rozmístění ostatních chladítek a výfuků se nezměnilo. Rozměry vtokové soustavy též zůstaly stejné.

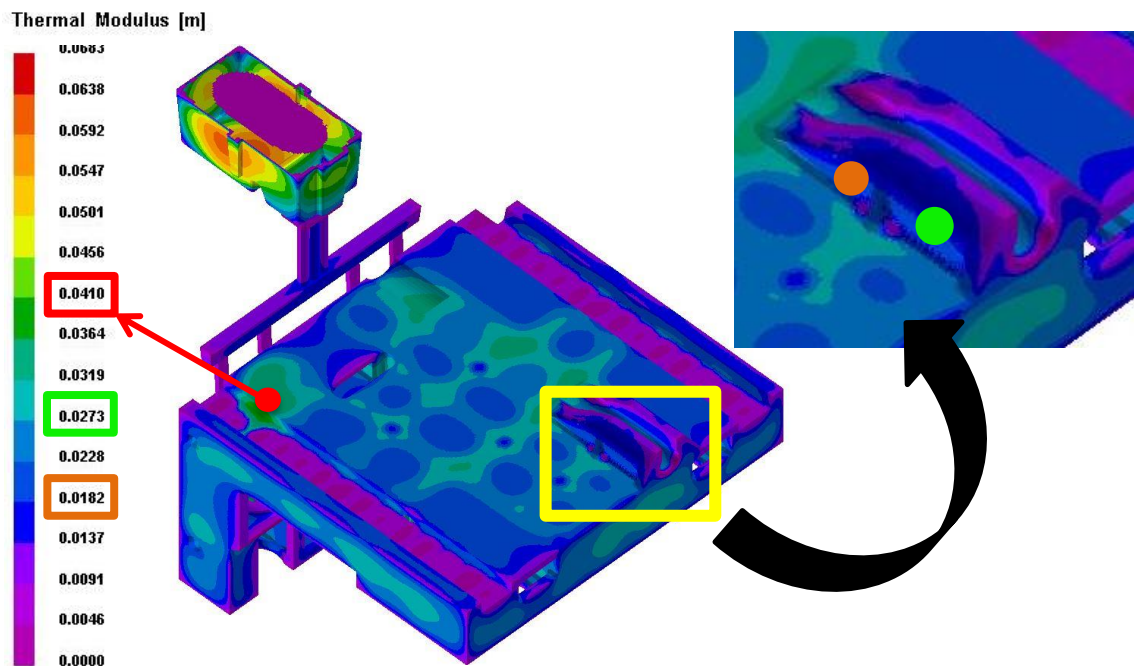


Total Shrinkage Porosity [%]



Obr. 3-19 Výsledek simulace pro první návrh optimalizace (použití vnitřního chladítka do uložení pro kuličkový šroub) – zobrazení porezity

Na základě výsledků simulace je patrné, že tento návrh technologie nebude tím finálním. V řezu G-G je zobrazena porezita, která zůstala ve srovnání s původní technologií prakticky stejná, ba naopak se ještě mírně prohloubila. Vada se nachází v tepelném uzlu, který nelze ošetřit pomocí chladítek, proto se nad tento tepelný uzel bude muset umístit exo-nálitek. QuikCAST disponuje zobrazením tepelných modulů, viz **obr. 3-20** a pomocí tohoto nástroje byl pro tento tepelný uzel určen exo-nálitek s modulem 4,5 EKW 160 W od firmy HA Kovochem.



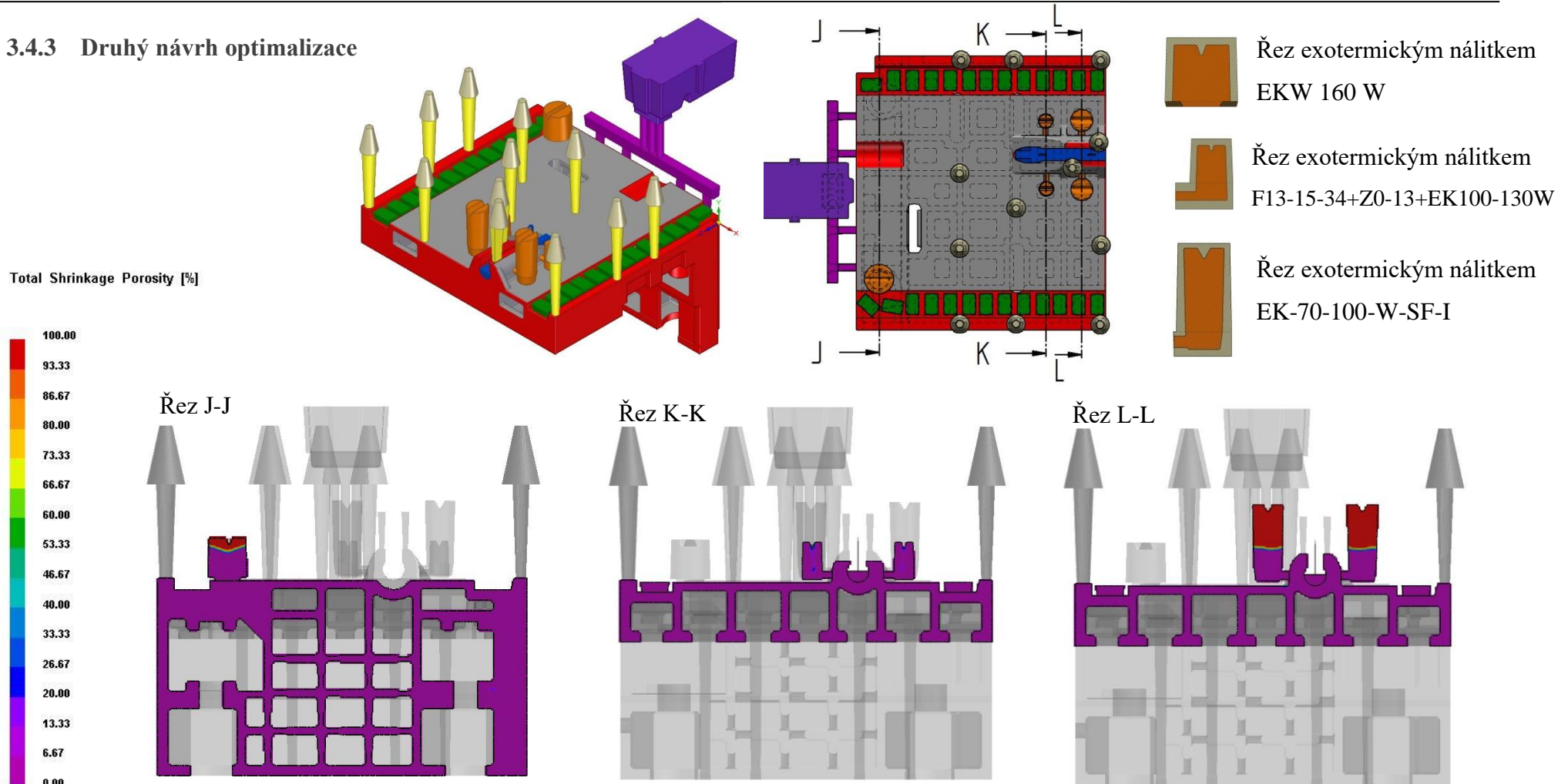
Obr. 3-20 Zobrazení tepelných modulů – určení velikosti exo-nálitky

Zbývající dva řezy H-H a I-I zobrazují porezitu v uložení pro kuličkový šroub. Podle výsledků simulace chladítko zafungovalo dle očekávání a „odsunulo“ porezitu od povrchu odlitku dál do stěn. Riziko výskytu vad v této oblasti je však stále vysoké, a proto byl proveden druhý návrh optimalizace.

3.3.3 Druhý návrh optimalizace původní technologie

V rámci druhého návrhu byly do stěn uložení kuličkového šroubu kromě vnitřního válcovitého chladítka a horního uzavřeného exotermického nálitku doplněny 4 bočních exo-nálitky, viz **obr 3-21**. Velikost bočních nálitků byla určena opět pomocí nástroje tepelných modulů programu QuikCAST (**obr. 3-20**). Znovu byl zvolen výrobek firmy HA Kovochem a to konkrétně boční náliček s modulem 3,3 F13-15-34+Z0-13+EK100-130W (2x) a druhý s modulem 2,1 EK-70-100-W-SF-I (2x). Zobrazení technologie a výsledek simulace této upravené technologie je zachycen na **obr. 3-21**.

3.4.3 Druhý návrh optimalizace

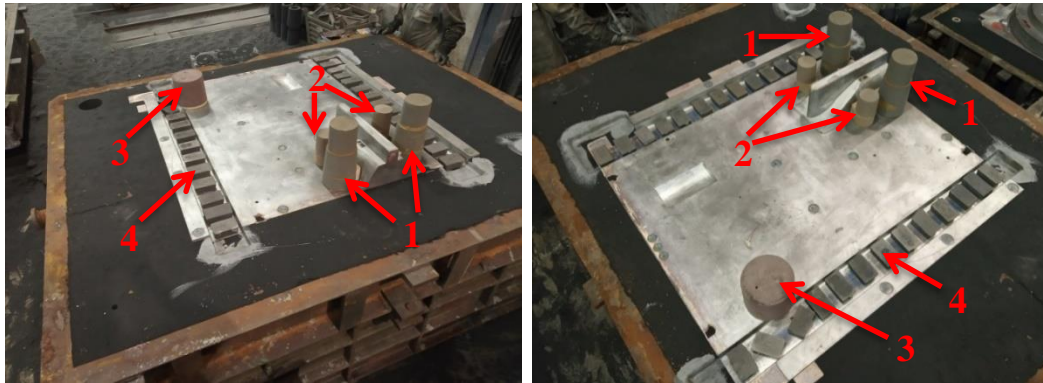


Obr. 3-21 Výsledek simulace pro druhý návrh optimalizace (kombinace vnitřního chladítka a exo-nálitků) - zobrazení porezity

Již druhá optimalizace technologie se podle výstupních dat ze simulace zdá být velmi úspěšná. Jak je vidět v řezu J-J, tak horní uzavřený exo-náliek doplnil potřebný kov a porezita se již v tomto tepelném uzlu nevyskytuje.

V řezech K-K a L-L, které zobrazují kombinaci vnitřního chladítka a bočních exotermických nálieků je patrné, že spojení těchto dvou protichůdných technologií je taktéž úspěšné. Dle simulačního výpočtu se v uložení pro kuličkový šroub porezita již nevyskytuje a exo-nálieky doplnily potřebný tekutý kov, což je v řezu L-L patrné z červeného zbarvení nálieků.

Tato technologie se podle výsledků ze simulace jeví jako optimální, a proto došlo k její aplikaci pro výrobu nových kusů. Uvedení druhého návrhu optimalizace do výroby je zachyceno na **obr. 3-22**.



Obr. 3-22 Zaformování Vřeteníku WHR 13 při použití optimalizované technologie
Vysvětlivky: Na obou fotografiích je vidět zaformovaný model ve spodním dílu formy a připravená technologie před nasypáním vrchního dílu formy.

- 1) exotermický náliek EK-70-100-W-SF-I, 2) exotermický náliek F13-15-34+Z0-13+EK100-130W, 3) exotermický náliek EKW 160 W, 4) chladítka č. 3

3.4 Vyhodnocení průběhu optimalizace technologie

Pomocí inovované technologie byly odlity 4 kusy vřeteníku, které byly následně převezeny k zákazníkovi, kde proběhlo jejich kompletní opracování. Všechny 4 odlitky byly v pořádku a vady, které se vyskytovaly na předchozích kusech, se neobjevily. Nově nastavená technologie tedy fungovala správně, tak jak predikoval simulační program QuikCAST.

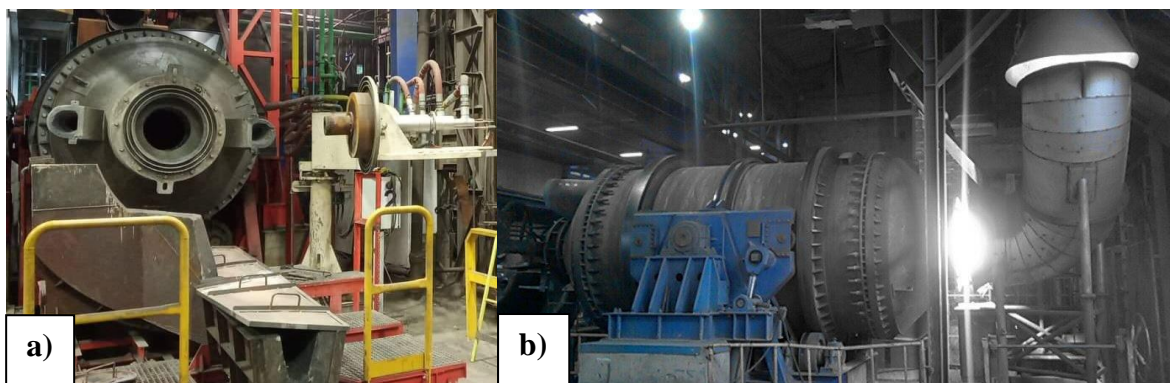
Nově nastavená technologie umožňuje výrobu zdravých odlitků, ale ve srovnání s původní technologií je ekonomicky náročnější. Je zde navíc nutná aplikace jednoho chladítka a 5 exotermických nálieků, s čímž jsou spojené oproti původní technologii vícenáklady.

Jak již bylo uvedeno v úvodu experimentální části práce, na vznik vad u odlitku vyrobeného původní technologií mohla mít vliv i samotná metalurgie taveniny. Z toho důvodu byla v rámci druhé části experimentu sledována úprava taveniny, tj. typ, množství a způsob očkování a modifikace.

3.5 Tavení a metalurgická úprava taveniny

Jak je obecně známo, u litin je charakter tuhnutí, sklon ke vzniku vad a výsledná struktura závislá na chemickém složení taveniny, rychlosti ochlazování (*tloušťce stěny odlitku*) a také na zárodečném stavu taveniny. Zárodečný stav taveniny je ovlivněn zejména teplotou přehřátí taveniny, časem setrvání taveniny na této teplotě (*doba držení taveniny v peci*) a očkováním.

Standardní příprava taveniny LKG ve firmě Metalurgie Rumburk probíhá ve dvou rotačních bubnových pecích (RBP) s kyslíko-plynovým hořákem. První RBP má objem 12 t a její výkon je 12 tun/2-2,5 h. Objem druhé RBP je menší – pouze 5 t a výkon je 5 tun/ 2-2,5 h. Obě pece jsou vidět na **obr. 3-23**.



Obr. 3-23 Rotační bubnové pece v METALURGII Rumburk s.r.o.

a) 5 t rotační bubnová pec, b) 12 t rotační bubnová pec

Příprava taveniny pro LKG v obou pecích pak probíhá analogicky. Samotné tavení probíhá až na teplotu 1420 °C, po dosažení této teploty se realizuje odpich pece, při kterém probíhá i první očkování taveniny přímo do proudu kovu pomocí 0,2 % očkovačla VP216 v práškové podobě. Takto naočkovaný kov pak teče přes přehřátý licí žlábek do hrncové licí pánve (*taktéž přehřáté*) o objemu 4 - 10 tun.

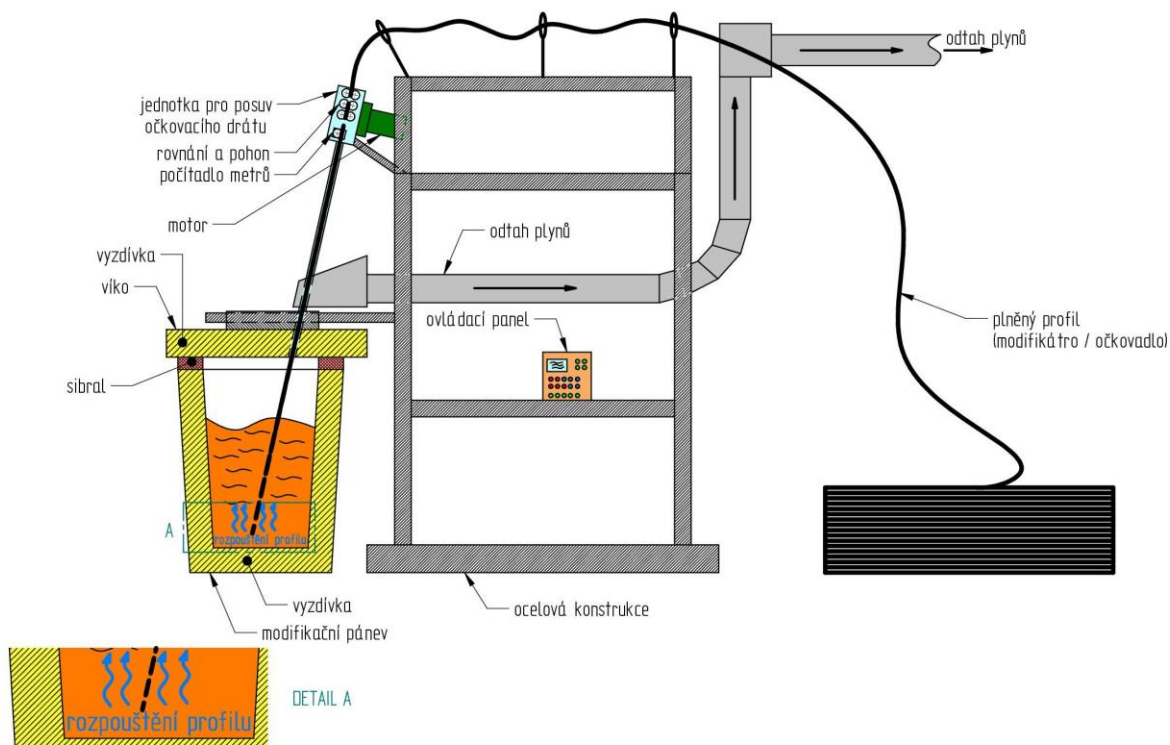
V MR se při výrobě LKG používá pouze 4 t hrncová pánve, do které se „vylije“ 2 - 3 tuny tekutého kovu. Po prvním očkování do proudu kovu proběhne měření teploty taveniny a následně se tavenina v hrncové pánvi převezde na pracoviště, kde probíhá příprava LKG. Na tomto pracovišti se nachází metalurgická

stanice Progelta, viz **obr. 3-24**, na které probíhá výroba litiny s kuličkovým grafitem pomocí plněného profilu. Schématické zobrazení metalurgické stanice, modifikace a sekundárního očkování na této stanici je zobrazeno na **obr. 3-25**. Vřeteník WHR13 je vyráběn z LKG o eutektickém chemickém složení. Jakost LKG pro tento odlitek odpovídá normě EN-GJS-600-3.



Obr. 3-24 Modifikační stanice Progelta v METALURGII Rumburk s.r.o.

Vlevo modifikační stanice, vpravo plněný profil.



Obr. 3-25 Schématické zobrazení modifikace pomocí stanice Progelta

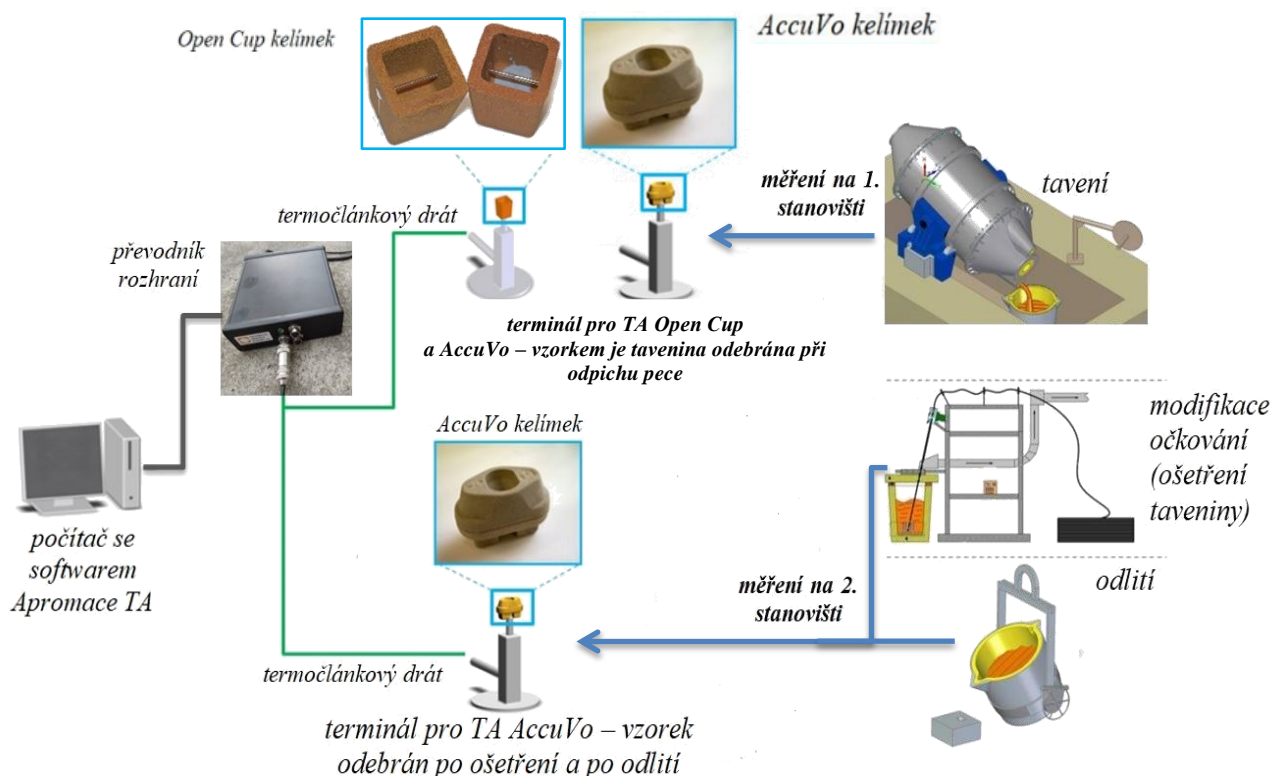
Po převozu na pracoviště LKG proběhne při teplotě cca 1370 °C modifikace taveniny plněným profilem Progelta LSK 13412BS a neprodleně po skončení modifikace proběhne druhé očkování plněným profilem Progelta WIN 13A

(metalurgická stanice pro dávkování plněných profilů dokáže dávkovat 2 plněné profily). Po skončení modifikace a očkování dojde ke stažení strusky z hladiny, po kterém následuje další měření teploty. Přibližně při teplotě 1330 °C – 1350 °C dojde k odlití kovu do forem.

3.6 Průběh měření kvality kovu termickou analýzou

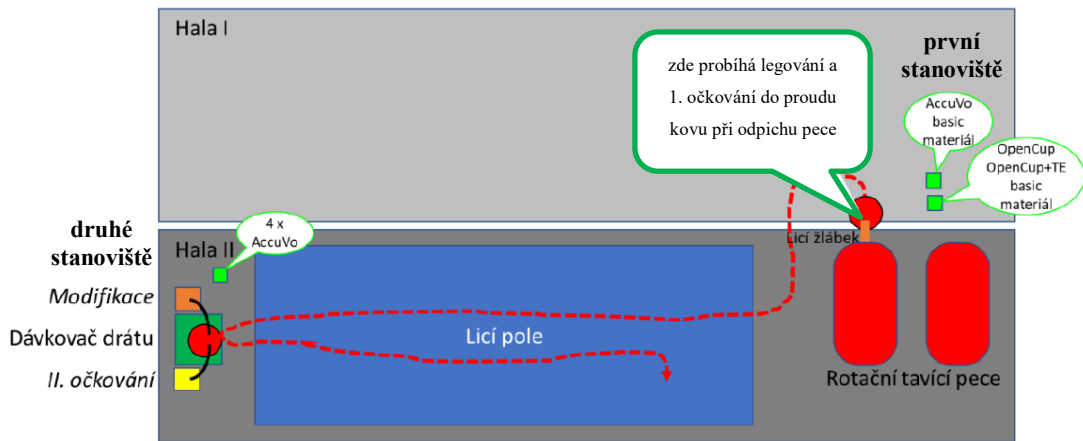
Pro hodnocení metalurgické kvality tekutého kovu u LKG bylo ve spolupráci s firmami Technical Service Kuehn GmbH a DETYCON Solutions s.r.o. uskutečněno měření kvality tekutého kovu termickou analýzou AccuVo a následným vyhodnocením pomocí softwaru Apromace. Účelem tohoto měření bylo zjistit, zda používané očkovaadlo a modifikátor má při výrobě LKG odpovídající normě EN GJS 600-3 požadovaný účinek nebo zda by nebylo vhodné použít jiný typ modifikátoru či očkovaadla nebo zda by nebyla vhodná úprava jejich dávkování. V dalších kapitolách je pak podrobně popsán průběh měření a jeho vyhodnocení.

Samotné měření kvality taveniny pomocí TA probíhalo na dvou stanovištích. Schéma průběhu měření je zachyceno na **obr. 3-26**.



Obr. 3-26 Zapojení aparatury při měření v MR [9]

První stanoviště se nacházelo v blízkosti rotační pece a druhé stanoviště bylo zřízeno u stanice Progelta pro dávkování plněných profilů. Na **obr. 3-27** je pak schéma uspořádání jednotlivých stanovišť v rámci celé výrobní haly v MR.



Obr. 3-27 Schématické uspořádání pracoviště se stanovišti termické analýzy při měření kvality tekutého kovu v MR

Při tomto měření se k tavení kovu používala pouze 12 t rotační bubnová pec. Na prvním stanovišti byly umístěny 2 stativy. Na prvním stativu byl umístěn jeden dvoukomorový kelímek AccuVo a na druhém stativu byly umístěny dva zkušební kelímky Open Cup jeden s telurovým nátěrem a druhý bez nátěru. Otevřené kelímky s Te se používají na analýzu taveniny eutektického chemického složení. Kelímek bez Te, ve kterém vzorek tuhne stabilně podle rovnovážného diagramu Fe-C, se používá na podeutekticky tuhnoucí taveninu (*nadeutekticky tuhnoucí tavenina se prakticky téměř nepoužívá*). Stativ může být i kombinovaný a může nést jeden až dva Open Cup kelímky a jeden AccuVo kelímek naráz, nebo 2 AccuVo. Jednotlivé stativy jsou zachyceny na **obr. 3-28**.



Obr. 3-28 Stativy pro měření termální analýzy - *stativ pro dva kelímky AccuVo a druhý kombinovaný pro 1 AccuVo a 2 Open Cup [14] (vlevo) a konkrétní stativy při měření v MR (vpravo)*

Tavenina byla nabrána z proudu kovu keramickou naběračkou při odpichu pece ještě před primárním provozním očkováním pomocí 0,2 % práškového očkovač VP216. Keramická naběračka nijak chemicky neovlivní vzorek taveniny a teplotní ztráta je nízká a reprodukovatelná. Tento „čistý“ základní kov byl pak nalit

do dvou Open Cup kelímků, kdy jeden byl opatřen telurovým nátěrem. Telurový kelímek zaručí rychlé metastabilní ztuhnutí vzorku (*podle metastabilního diagramu Fe-Fe₃C*) a tak lze oddělit fázi tuhnutí austenitu a tím reprodukovatelně změřit oblast začátku tuhnutí taveniny. Tento postup je při měření TA již dlouhodobě zaveden, neboť z křivky tuhnutí lze za určitých podmínek poměrně spolehlivě určit hodnotu teploty likvidu včetně případné rekalescence. Pokud je chemické složení přibližně eutektické, tak reprodukovatelnost měření s běžným Open Cup kelímkem zajišťujícím tuhnutí dle rovnovážného stabilního diagramu Fe-C není zaručena. Metoda použití Open Cup je navíc zatížena chybami měření typu nestejnoměrného množství taveniny v kelímku, podmínek tuhnutí vzorku (*otevřená hladina, exotermický efekt vyhořívání organického pojiva, tenká stěna kelímku*), zda se tavenina nalije do kelímku po stěně či přímo na termočlánek, a tak u stejného vzorku taveniny jsou zaznamenány při každém dalším měření rozdílné hodnoty, resp. nejsou vytvořeny stabilní podmínky měření. Při měření v MR se záměrně teplota likvidu měřila jak pomocí Open Cup kelímků, tak pomocí AccuVo. Z výstupu tohoto měření (*blíže v kapitole 3.6.1*), které je zaneseno v **tab. 3-2** je patrná nepřesnost měření T_{liq} při použití Open Cup kelímků.

Po odlití těchto dvou Open Cup kelímků na prvním stanovišti (*tavenina bez metalurgické úpravy*) došlo ještě k odlití jednoho kelímku AccuVo, kdy jedna z komůrek byla „čistá“ a druhá obsahovala 0,04 % očkovač VP216, tj. stejný typ jaký se používá v MR standardně. Ovšem při sériovém dávkování do proudu kovu se v MR používá 0,2 % VP216. Cílem odběru na prvním stanovišti bylo získat záznam tuhnutí ze základního „čistého“ kovu a z očkovaného kovu 0,04 % VP216. Tímto postupem lze posoudit kondici základní taveniny v tavící peci, jak reaguje na velmi nízké dávkování očkovačů. Pokud mezi křivkami není rozdíl, poukazuje to na již velmi dobrý stav taveniny charakteristický dostatkem vhodných krystalizačních zárodků.

Následně byla tavenina provozně primárně očkovaná standardním postupem (*do proudu taveniny 0,2 % VP216*) a byla převezena na pracoviště LKG k stanici dávkování plněných profilů Progelta, kde se nacházely další dva stativy pro 4 kelímky AccuVo. Zde byl ještě před modifikací a sekundárním očkováním odebrán další vzorek (*kontrola stavu taveniny po primárním očkování pomocí 0,2 % VP216*). Takto šlo porovnat stav taveniny očkované v AccuVo 0,04 % a v sérii 0,2 % očkovačem VP216. Následně proběhla modifikace plněným profilem Progelta LSK

13412BS. Namodifikovaná tavenina byla odlita do kelímku AccuVo, přičemž komůrka neobsahující žádné očkovadlo prověřovala stav modifikované taveniny a komůrky s dotací očkovadel 0,04 % Inoculin nebo 0,04 % SMW605 umožňovaly zobrazit reakci taveniny na tato očkovadla ještě před sériovým sekundárním očkovaním. Po skončení 3. odběru proběhlo sekundární očkování plněným profilem Progelta WIN 13A za sériových podmínek. Opět byl odebrán vzorek za účelem zjištění stavu taveniny. Cílem těchto odběrů bylo zjistit účinnosti různých typů sekundárních očkovadel.

Po stažení strusky byly odlity formy. Ze zbytku taveniny v lící pánvi, byl odebrán poslední vzorek do kelímku AccuVo, který obsahoval v jedné komůrce očkovadlo 0,04 % Inoculin a v druhé 0,04 % SMW605. Cílem tohoto posledního odběru bylo zjistit kondici taveniny na konci lití a zda bude kov ještě nějakým způsobem reagovat na třetí očkování v řadě.

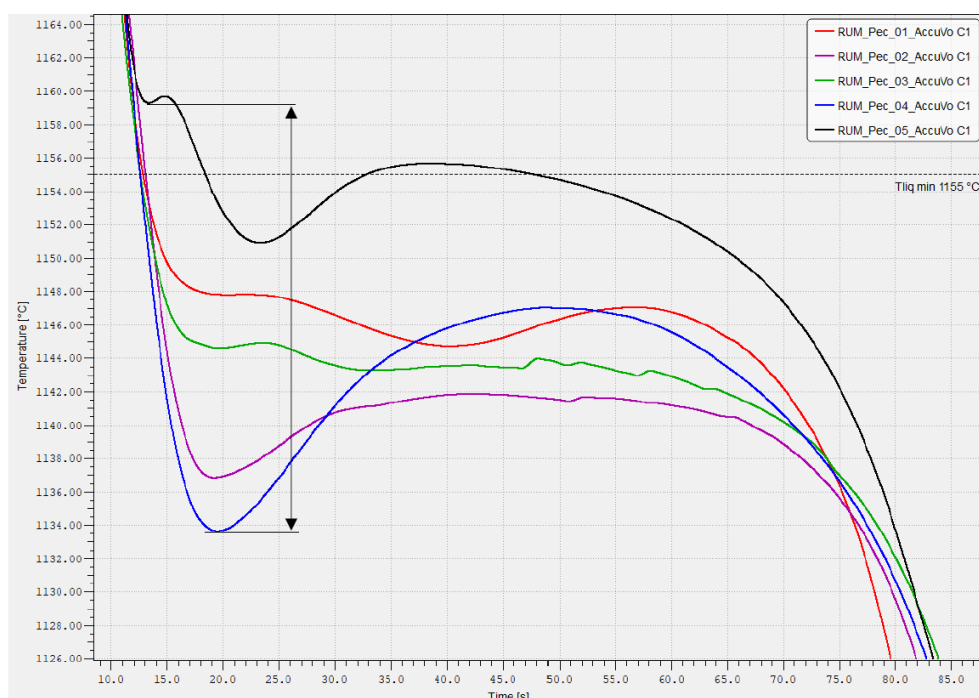
3.6.1 Vyhodnocení charakteru tuhnutí a T_{liq} základní taveniny z RBP

Na **obr. 3-29** je zobrazeno 5 záznamů křivek tuhnutí (z pěti pánví) z kelímku AccuVo, všechny tyto vzorky byly odebrány keramickou naběračkou z proudu kovu ještě před primárním sériovým očkovaním 0,2 % očkovadlem VP216. Ze zobrazení jednotlivých křivek tuhnutí je pak vidět velká rozdílnost teplot likvidu u jednotlivých vzorků, viz **tab. 3-2**. Je to názorná ukázka toho, jak je problematické při eutektickém složení taveniny docílit stabilního tuhnutí. Z analýzy 5 vzorků vyplývá, že rozsah teplot, při kterém začne tavenina tuhnout, dosahuje přes 25 °C (1133,6 - 1159,2 °C), viz černá kóta v **obr. 3-29**.

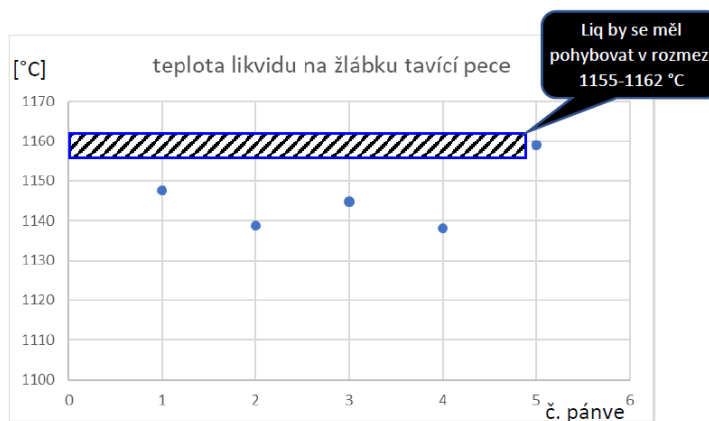
Jelikož vsázka dle nastavení v MR měla eutektické chemické složení, tak by nemodifikovaný, neočkovaný kov měl tuhnout eutekticky, ale jak je z **obr. 3-29** patrné, tak průběh tuhnutí u vzorků odebraných z různých pánví je velmi odlišný. Z jedné pece byla tavenina rozlita do 5 pánví a jak je vidět, tak pánev 1 (*červená křivka*) tuhla podeutekticky, pánev 2 (*fialová křivka*) eutekticky, pánev 3 (*zelená křivka*) podeutekticky, pánev 4 (*modrá křivka*) eutekticky, pánev 5 (*černá křivka*) nadeutekticky. Průběhy tuhnutí označené zelenou a červenou křivkou jako podeutektické mohou být ovšem označeny jako „dvoustupňové blízce eutektické tuhnutí“. [15]

Samotné eutektické složení vsázky tedy ještě nezaručí, že tavenina bude tuhnout eutekticky bez toho, aniž by tuhnutí mělo sklon k tuhnutí nad- či

podeutektickému. K tomuto jevu dochází u tavenin připravených zejména v rotačních pecích, u kterých není zajištěna homogenita chemického složení taveniny odebírané z pece vždy pro každý odpich. V peci v tavenině uhlík zůstává při hladině, a tedy jeho největší obsah je vždy v poslední pánvi, viz vzorek odebraný při posledním odpichu – pánev 5. Řízení chemického složení jednotlivých odpichů je problematické (viz kap. 3.7), ale přesná a především rychlá termická analýza dává možnost stav taveniny řešit a to buď následným douhličením či ředěním, příp. za určitých omezujících podmínek cíleným dávkováním vhodného modifikátoru a očkovačla.



Obr. 3-29 Stav taveniny v 5 pánvích určujících „homogenitu“ tavby rotační pece
Legenda: pánev 1 (červená křivka), pánev 2 (fialová křivka), pánev 3 (zelená křivka),
pánev 4 (modrá křivka), pánev 5 (černá křivka)



Obr. 3-30 Teplota likvidu na žlábků u jednotlivých pánví

Tab. 3-2 Porovnání hodnot teploty likvidu dle různých metod TA

číslo pánve	Teplota likvidu T_{liq} [°C]		
	OpenCup + Te	OpenCup bez Te	AccuVo
1	1148,9	1143,3	1147,7
2	1144,7	chyba měření	1138,8
2	1146,2	1142,3	1144,7
4	1131,4	1141,0	1138,1
5	1115,2	1168,1	1159,0

Proto bylo rozhodnuto, že pro tavby v MR je vhodnější volit vsázku jemně podeutektického chemického složení, které by zajistilo, že teplota likvidu před modifikací bude ležet přibližně v oblasti od 1155 °C do 1162 °C. Takto nastaveným chemickým složením se pak docílí lehce podeutektického tuhnutí, které má nízký sklon k tvorbě vnitřních vad, tak jako eutektické tuhnutí.

Toto rozhodnutí vychází z ověřené metalurgické praxe, že mírně podeutektické tavby se dají metalurgicky řídit za pomoci výsledků termické analýzy, kdy je průběh křivky tuhnutí jednoznačný (*jasné oddělení teplotního pásma tuhnutí austenitu od eutektického tuhnutí*) a případné korekce teploty likvidu se řeší nauhličením nebo ředěním. Popřípadě lze využít „méně kvalitní“ taveninu na odlitky, které nejsou tak náročné na kvalitu. [15]

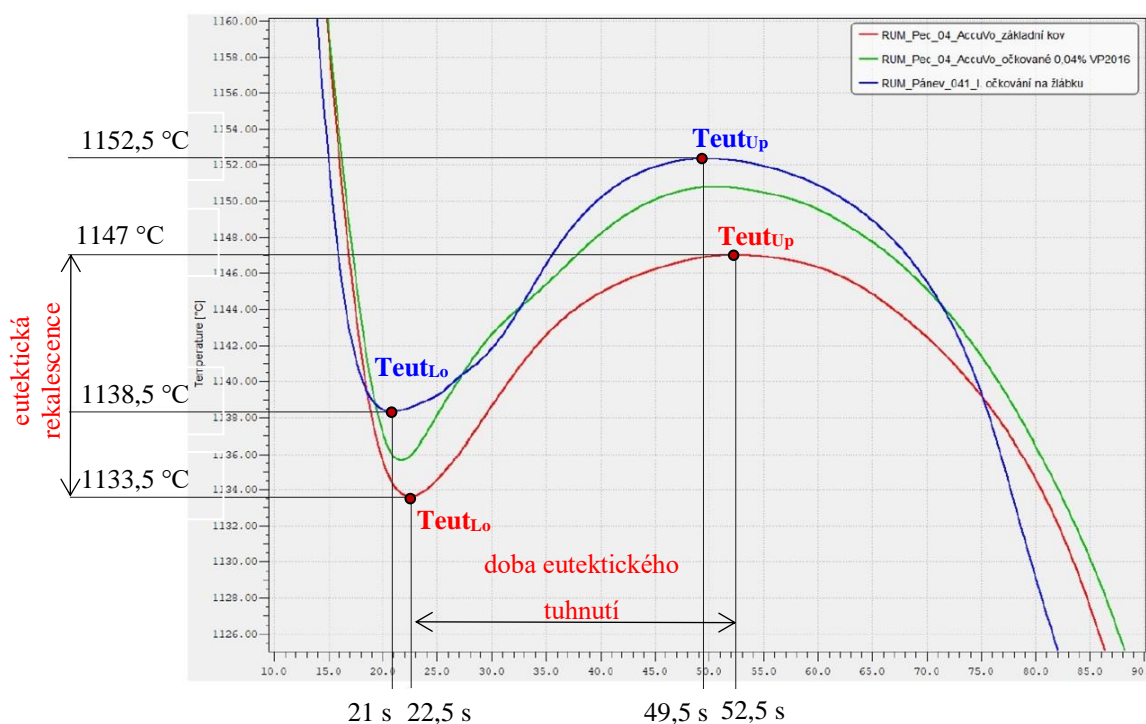
3.6.2 Vyhodnocení efektu primárního očkování

Vyhodnocení jednotlivých měření bylo provedeno u všech 5 pánví, ale pro prezentaci ovlivnění eutektické reakce různým množstvím očkovačla byly zvoleny vzorky z pánve č. 4.

Na **obr. 3-31** jsou tedy zobrazeny křivky tuhnutí základního kovu z rotační pece před primárním očkováním (*červená křivka*), standardně primárně očkovaného kovu na žlábků do proudu kovu s 0,2 % VP216 (*modrá křivka*) a kovu očkovaného v kelímku AccuVo, který obsahoval 0,04 % očkovačlo VP216 (*zelená křivka*).

Jak je z průběhu modré a zelené křivek patrné, tak 5násobné očkování na žlábků (0,2 % VP216 ve srovnání s 0,04 %), které se v MR provádí standardně, nemá příliš velký efekt. Ani mezi průběhy červené a modré křivky nejsou velké rozdíly. Teploty $Teut_{Lo}$ a $Teut_{Up}$ se u primárně očkovaného kovu (0,2 % VP216 – *modrá křivka*) zvýšily o cca 5 °C oproti neočkovanému stavu (*červená křivka*). Navíc rozdíl mezi **eutektickou rekalescencí** u neočkovaného kovu (*červená křivka* $Teut_{Up}$ -

$Teut_{Lo} = 13,5 \text{ } ^\circ\text{C}$) a primárně očkovaného kovu (modrá křivka $Teut_{Up} - Teut_{Lo} = 14 \text{ } ^\circ\text{C}$) je pouhých $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Podobně malý rozdíl ($1,5 \text{ s}$) je však i u doby eutektického tuhnutí, kdy tato doba byla u neočkovaného kovu (červená křivka) 30 s a u primárně očkovaného (modrá křivka) $28,5 \text{ s}$. Ze záznamu je patrné, že rozdíl eutektického tuhnutí mezi primárně očkovaným a neočkovaným kovem je minimální. Křivky tuhnutí mají velmi podobný průběh, z čehož vyplývá, že se primární očkování jeví jako zcela zbytečné. Zcela jistě by stačilo očkovat $0,04 \text{ } \%$ VP216 (zelená křivka) a i to se jeví jako neopodstatněné.



Obr. 3-31 Ovlivnění eutektického tuhnutí množstvím očkovačla VP216 u pánve č. 4

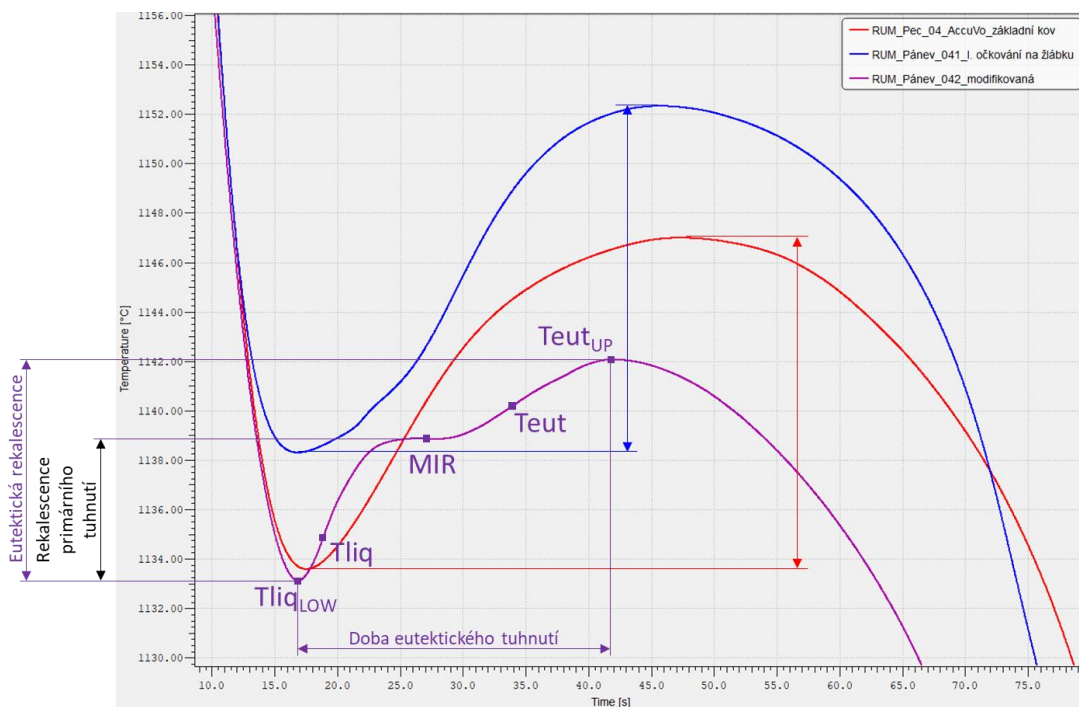
Legenda: základní kov před primárním očkováním (červená křivka), primární očkování na žlábkku $0,2 \text{ } \%$ VP216 (modrá křivka), kov očkovaný v AccuVo $0,04 \text{ } \%$ VP216 (zelená křivka)

3.6.3 Vyhodnocení stavu taveniny po primárním očkování a modifikaci

Pro zobrazení výsledků, jak samotná modifikace ovlivní tekutý kov, byly opět zvoleny záznamy vzorků z pánve č. 4. Na obr. 3-32 jsou pak zobrazeny jednotlivé křivky tuhnutí, které ukazují, jak se mění eutektická teplota a charakter tuhnutí po modifikaci tekutého kovu.

Červená křivka zde opět reprezentuje základní kov před primárním očkováním a modrá křivka charakterizuje kov již po primárním očkování. Fialová křivka nám prezentuje stav tekutého kovu po modifikaci. Hořčík jako antigrafitizační

prvek mění celý charakter eutektického tuhnutí, které se mění na 2stupňové (viz zobrazení T_{liq} a T_{eut} na obr. 3-32), kdy tuhnutí austenitu je oddělené od tuhnutí grafitu, snižuje se teplota tuhnutí o více jak 4 °C a podstatně se snižuje rekalescence.



Obr. 3-32 Zobrazení T_{eut} a charakteru tuhnutí před a po modifikaci u pánve č. 4
Legenda: základní kov před očkováním (červená křivka), primární očkování na žlábků (modrá křivka), kov po primárním očkování a modifikaci (fialová křivka)

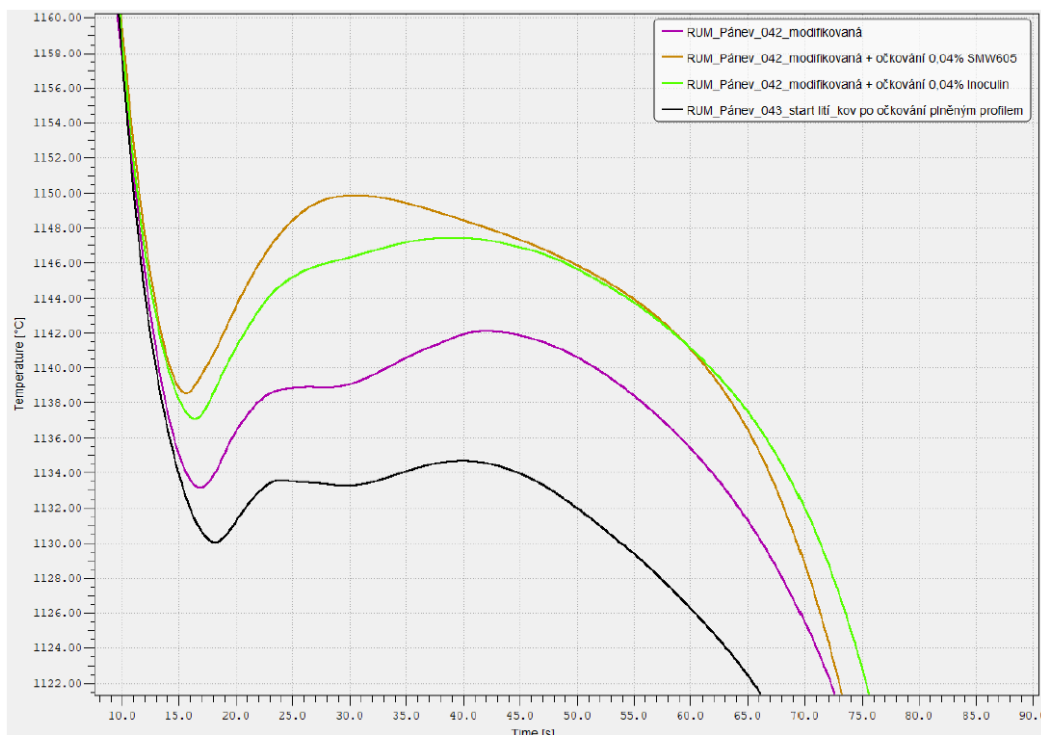
3.6.4 Sekundární očkování – porovnání vlivu různých typů očkovaadel

Pomocí kelímků AccuVo, kde bylo v každé komůrce jiné očkovaadlo, došlo k testování alternativních očkovaadel na již modifikované litině. Konkrétně byly použity očkovaadla **Inoculin** a **SMW 605** obě v množství 0,04 %.

Porovnání těchto očkovaadel s plněným profilem Progelta WIN 13A, který se používá při výrobě LKG v MR standardně, proběhlo na již modifikovaném kovu u vzorků z pánve č. 4.

Po modifikaci bylo odklopeno víko modifikační stanice, aby mohlo dojít k odkrytí hladiny od strusky a k rychlému odběru vzorku pro AccuVo, kde se nacházela očkovaadla Inoculin a SMW 605. Po odebrání vzorků bylo víko modifikační stanice opět přiklopeno a pokračovalo se v očkování kovu pomocí plněného profilu Progelta WIN 13A. Po sekundárním očkování plněným profilem byl také odebrán vzorek pro AccuVo kvůli zjištění stavu taveniny.

Výstup tohoto porovnání je zobrazen na **obr. 3-33**, kde je zcela zřejmé, že standardně používané očkování plněným profilem nefunguje správně (viz *černá křivka*). Po modifikaci dojde ke snížení eutektické teploty, přičemž pomocí očkování by naopak mělo dojít k jejímu zvýšení, ale stav očkovaného kovu pomocí plněného profilu se v porovnání s modifikovaným (*fialová křivka*) ještě zhorší, neboť dojde k dalšímu poklesu eutektické teploty, což je špatně. Naopak očkování Inoculinem (*zelená křivka*) a SMW 605 (*oranžová křivka*) dopadla obě v pořádku, neboť se výrazně zvýšila eutektická teplota oproti eutektické teplotě modifikovaného kovu (*fialová křivka*).



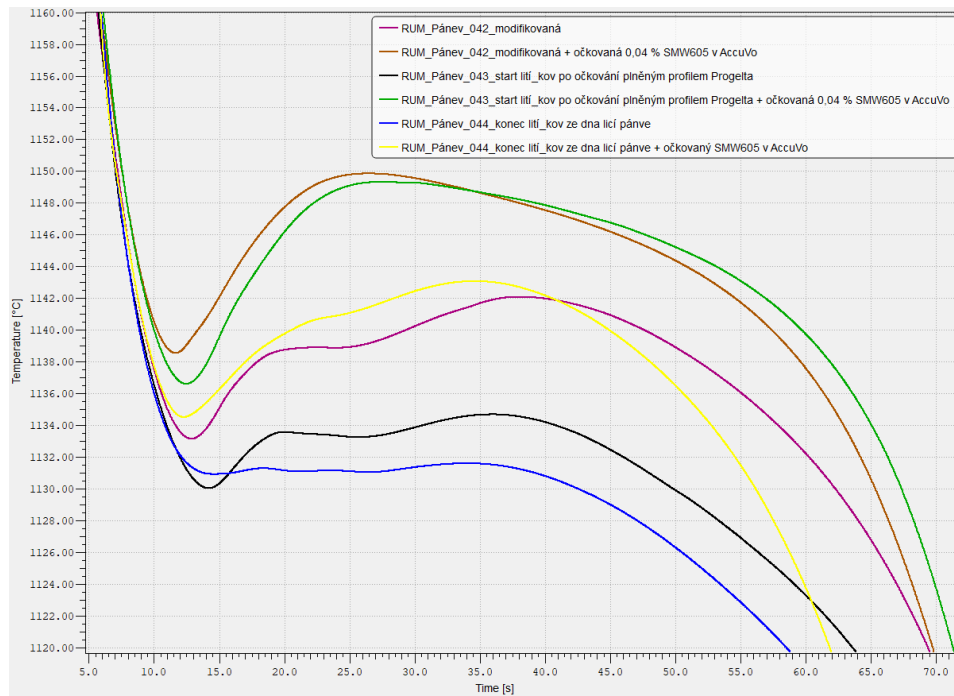
Obr. 3-33 Porovnání sekundárních očkovadel u vzorků z pánve č.4

Legenda: modifikovaný kov (fialová křivka), modifikace + následné očkování pomocí 0,04 % SMW 605 v AccuVo (oranžová křivka), modifikace + následné očkování pomocí 0,04 % Inoculin v AccuVo (zelená křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progelta WIN 13A - standardní postup (černá křivka)

3.6.5 Ověření výdrže očkovacího účinku a kombinace očkovadel

Jako ověření, zda plněný profil Progelta pracuje správně a má dostatečný očkovací účinek i na konci lití, byly použity vzorky, které byly odebrány před litím s teplotou 1270 °C a ze dna lící pánve při teplotě taveniny 1230 °C (*tzn. tekutý kov po 1. očkování, modifikaci, 2. očkování plněným očkovacím profilem*). Uvedená teplota je maximální zaznamenaná termickou analýzou, *tzn. skutečná teplota*

taveniny v pánvi je vyšší (*ztráta teploty v keramické naběračce při ručním lití vzorků*). Tento vzorek taveniny pak byl nalit do kelímků AccuVo, kde bylo připraveno 0,04 % očkovaadlo SMW 605. Výstup, který prokazuje, že plněný profil Progelta WIN 13A nefunguje správně, je zachycen na **obr. 3-34**.



Obr. 3-34 Porovnání očkování – porovnání očkování 0,04 % SMW 605 přímo po modifikaci a po očkování plněným profilem Progelta

Legenda: modifikovaný kov (fialová křivka), modifikace + následné očkování pomocí 0,04 % SMW 605 (hnědá křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progelta - standardní postup, vzorek před začátkem odlévání (černá křivka) a vzorek na konci odlévání (modrá křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progelta + další očkování v AccuVo 0,04 % SMW 605 (zelená křivka), modifikace + očkování plněným profilem Progelta, vzorek odebraný na konci lití + další očkování v AccuVo 0,04 % SMW 605 (žlutá křivka)

Černá křivka zde opět představuje kov po sekundárním očkování plněným profilem Progelta WIN 13A a **fialová křivka** charakterizuje kov po modifikaci, stejně jako tomu bylo u **obr. 3-33**. **Zelená křivka** uvádí, jak lze u již sekundárně očkované taveniny docílit lepšího tuhnutí přidávkem očkovaadla SMW605 – průběh je téměř identický jako u taveniny očkované v AccuVo shodným očkovaadlem SMW605, ale bez ovlivnění materiálem Progelta (*tzn. přímo po modifikaci - hnědá*

křivka). **Modrá křivka** představuje stav taveniny po 4 minutách lití – vzorek je odebraný ze dna licí pánve a v porovnání s černou křivkou lze vidět další degeneraci očkovacího účinku v čase. **Žlutá křivka** prezentuje stav taveniny taktéž na konci lití – vzorek byl opět odebrán ze dna licí pánve a následně byl v AccuVo očkován 0,04 % SMW 605 (*kov tedy absolvoval primární očkování, modifikaci, sekundární očkování plněným profilem, určitou časovou výdrž v licí pánvi a poslední třetí očkování v AccuVo*). Jak je vidět i na toto očkování kov stále reaguje (*žlutá křivka*), neboť dojde k nárůstu eutektické teploty oproti stavu po sekundárním očkování (*černá křivka*), kvalita taveniny však úrovně prezentované zelenou a hnědou křivkou již nedosahuje. Experimentálně se prokázalo, že závěry z kapitoly 3.6.4 ohledně nefunkčnosti plněného profilu Progelta jsou věrohodné.

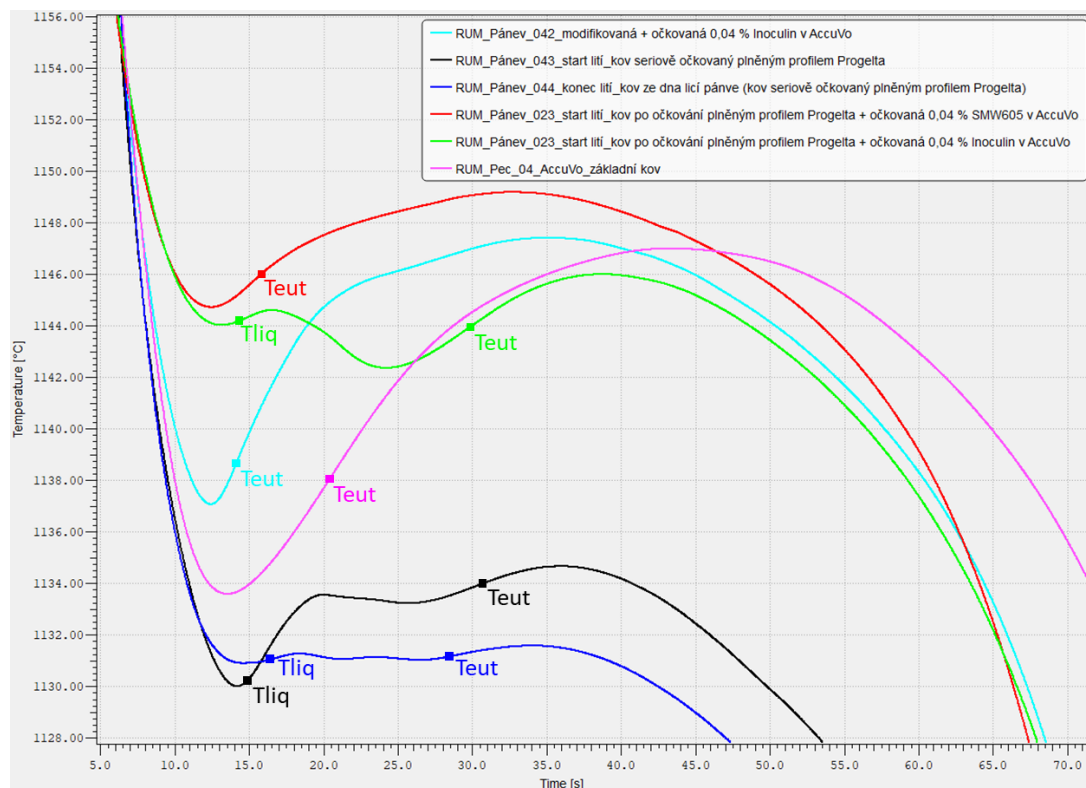
3.6.6 Vyhodnocení kondice tekutého kovu termickou analýzou AccuVo

Dle naměřených údajů nemá primární očkování žádný smysl a očkování plněným profilem po modifikaci nemá kýžený efekt. Ve spojení s eutektickým chemickým složením se pak zvyšuje riziko nestabilního eutektického tuhnutí, což se projevuje nestabilní strukturou materiálu měřitelnou mechanickými vlastnostmi.

Na **obr. 3-35** jsou zobrazeny křivky tuhnutí z pánve č. 2 a 4, přičemž tyto křivky zobrazují tuhnutí z různých fází (*primární očkování, modifikace atd.*) přípravy LKG. **Tyrkysová křivka** představuje stav taveniny ze 4. pánve po modifikaci a očkování 0,04 % Inoculinem v AccuVo. **Černá křivka** prezentuje stav kovu po sériovém očkování plněným profilem Progelta taktéž z pánve č.4. **Modrá křivka** rovněž zobrazuje stav taveniny po provozním očkování, vzorek však byl odebrán až na konci lití ze dna pánve č. 4. **Červená křivka** prezentuje stav taveniny po očkování plněným profilem Progelta a následným přeočkováním 0,04 % SMW605 v AccuVo, tento vzorek byl odebrán z pánve č. 2. **Zelená křivka** zobrazuje stav kovu po očkování plněným profilem Progelta a následným přeočkováním 0,04 % Inoculinem v AccuVo, vzorek byl odebrán z pánve č. 2. **Růžová křivka** pak prezentuje základní kov z pánve č. 4.

Všech 6 křivek tuhnutí představuje jednoznačně eutektické tuhnutí se začátkem teploty tuhnutí hluboko pod eutektickou teplotou rovnovážného diagramu Fe-C, 3 křivky představují jednostupňové tuhnutí (*růžová, tyrkysová a červená*) a další 3 křivky dvojestupňového tuhnutí (*černá, modrá a zelená*). Křivky jsou navíc velmi různorodé, zobrazují minimální či rozsáhlou rekalescenci, pozvolný nebo

prudký náběh teploty po dosažení T_{liq_LOW} resp. $Teut_{LOW}$. Jakmile by teplota likvidu byla významně výše než teplota eutektická, lze označit tuhnutí již za podeutektické, i když je diskutabilní hovořit o podeutektickém tuhnutí při teplotě likvidu < 1144 °C.



Obr. 3-35 Příklady eutektických tuhnutí naměřených v MR termickou analýzou AccuVo z jedné tavby rotační tavicí pece

Materiálové vady (*staženiny, řediny*) lze řešit nálitkováním a vtokovým systémem ve spojení s lící teplotou, ale výroba se tak prodražuje a riziko kvalitativních vad přetrvává. Samotné eutektické chemické složení nezaručí eutektické tuhnutí kovu bez toho, aniž by v některých případech kov tuhl vícestupňově eutekticky či směřoval do podeutektického a nadeutektického tuhnutí. Proto by se měla MR držet lehce podeutektického chemického složení pro zajištění lehce podeutektického tuhnutí (T_{liq} od 1155 °C do 1162 °C), které má nízký sklon k tvorbě vnitřních vad (*staženiny, řediny*). Navíc lze podeutekticky nastavené litiny lépe metalurgicky řídit (*nauhličení, ředění*) s predikovatelným průběhem tuhnutí (*nevzniká tak pestrá variabilita charakterů tuhnutí jako při eutektickém složení*). Tím se naskýtá nejlepší kombinace vlastností, jako je homogenita materiálu a mechanické vlastnosti. MR by se zcela měla vyhnout nadeutektickému tuhnutí, které má sklon k tvorbě slévárenských vad a to především u tlustostěnných odlitků. [9]

Z výsledků vyplývá nutnost jak procesních, tak materiálových změn, především v oblasti očkovaní. Následná kontrola kvality by se neměla ověřovat pouze kvalitou vyrobených odlitků, ale také termickou a metalografickou analýzou a testováním mechanických vlastností.

3.7 Kontrola chemického složení a mechanických vlastností vzorků z TA

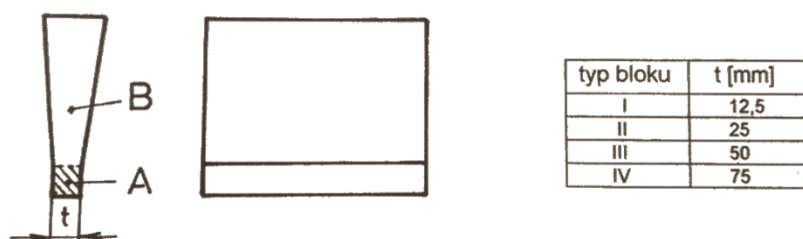
Kontrola chemického složení se v MR provádí na jiskrovém spektrometru Tasman Q4, který je propojený se systémem řízení slévárny OPTI, kam přenáší veškerá data. Z každé tavby je do kokily odlit malý vzorek ve tvaru „penízku“, na kterém se pak provádí kontrola. V **tab. 3-3** je zaneseno chemické složení jednotlivých pánví. Chemické složení jednotlivých pánví bylo v souladu s vnitřním předpisem MR pro GJS 600-3.

Tab. 3-3 Chemické složení jednotlivých pánví

Prvek	základní kov	pánev 1	pánev 2	pánev 3	pánev 4	pánev 5
C [%]	3,505	3,547	3,625	3,562	3,573	3,701
Mn [%]	0,48	0,5	0,504	0,51	0,515	0,522
Si [%]	2,027	2,49	2,445	2,511	2,532	2,574
P [%]	0,052	0,058	0,057	0,057	0,056	0,056
S [%]	0,025	0,014	0,012	0,013	0,013	0,014
Cu [%]	0,155	0,587	0,511	0,161	0,165	0,318
Mg [%]	0,001	0,055	0,064	0,049	0,051	0,052
Ce - uhlíkový ekvivalent	4,181	4,377	4,44	4,399	4,449	4,559

U materiálu bylo dále provedeno hodnocení mechanických vlastností, resp. byla provedena statická zkouška v tahu. Vzorky pro tuto zkoušku byly odlity ze standardně připravované taveniny (*pánev č. 4*). Byl odlit Y-blok typu 2, viz **obr. 3-36**, ze kterého byly následně vyrobeny 2 zkušební tyčky o průměru 10 mm pro zkoušku tahem a 1 vzorek pro metalografii.

Statická zkouška tahem probíhala na trhacím zařízení TIRA test 2300 v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1. Výsledky zkoušky jsou zaznamenány v **tab. 3-4**.



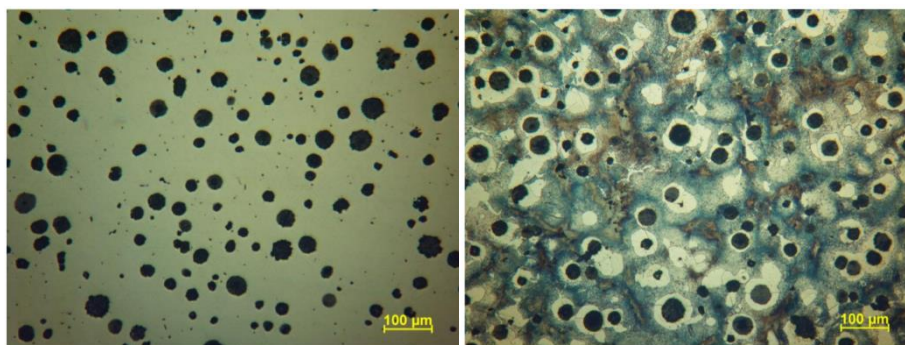
Obr. 3-36 Zkušební Y-blok (z části A byly vyrobeny zkušební vzorky) [2]

Tab. 3-4 Naměřené mechanické vlastnosti litiny

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{g50mm} [%]
Zkouška vzorku 1	391,5	568,8	6,90
Zkouška vzorku 2	395,1	575,6	7,17
Průměrná hodnota	393,3	572,2	7,03
Směrodatná odchylka	2,6	4,8	0,19

Hodnoty dosažené při statické zkoušce tahem odpovídají hodnotám, které jsou předepsané normou EN GJS 600-3.

Dále bylo provedeno metalografické hodnocení struktury vzorku z pánve č. 4. Vzorek byl připraven běžným metalografickým postupem a pro zvýraznění struktury byl použit 3% Nital. Na **obr. 3-37** je uvedena struktura standardně modifikované a očkované litiny z pánve č. 4.



Obr. 3-37 Zobrazení struktury vzorku odlitého z pánve č. 4

Jedná se o litinu s kuličkovým grafitem vyloučeným ve tvaru pravidelně zrnitém. Ve struktuře se vyskytuje pravidelně zrnitý grafit třídy velikosti 6 (*od 30 do 60 µm*) a 7 (*od 15 do 30 µm*). Litina je perlitická, obsah perlitu se pohybuje v rozmezí od 60 do 80 %.

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat technologii výroby za účelem odstranění vad typu staženin a ředin, které se začaly objevovat na odlitcích Vřeteníku WHR 13, který je součástí vodorovné stolové vyvrtávačky.

S ohledem na téma diplomové práce byla v teoretické části popsána výroba LKG a její vlastnosti. Hlavní pozornost byla věnována tvorbě technologického postupu.

V rámci experimentální části byla navržena technologie výroby odlitku Vřeteníku WHR 13. Vzhledem k výskytu vad muselo dojít neprodleně k úpravě stávající technologie. Byla tedy provedena optimalizace stávající technologie pomocí softwaru QuikCAST. V průběhu optimalizace byly zpracovány dva optimalizační návrhy, z nichž jeden byl dle výsledků simulace z hlediska odstranění vad velmi úspěšný, a proto byl aplikován do výroby. Pomocí nově nastavené technologie byly odlity 4 odlitky, které byly následně u zákazníka obrobeny a u těchto odlitků se vady již nevyskytovaly a tím lze optimalizovanou technologii tedy považovat za úspěšnou.

Nicméně vzhledem k finanční náročnosti optimalizované technologie byla řešena otázka, zda výskyt vad u odlitků po určité době výroby způsobil technologický problém nebo problém metalurgického charakteru. Z toho důvodu byla v rámci spolupráce s firmami Technical Service Kuehn GmbH a DETYCON Solutions s.r.o. sledována i kvalita taveniny. Pro tento účel byla použita termická analýza AccuVo.

Na základě této analýzy bylo zjištěno, že by při přípravě LKG mělo dojít jak k procesním, tak materiálovým změnám. Materiálové změny by se týkaly především očkování. Před provozní změnou je ovšem nutné provést opakovaná měření a ověřit tak, že výsledek měření, které proběhlo v MR je reprodukovatelný. Hledání ideálního očkovačla, ostatní analýzy a zkoušky by pak mohly posloužit jako námět pro další práci.

5 Použitá literatura

- [1] MORES, A. *Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice – stav v roce 2019*, Slévárenství č. 3-4/2020, str. 67-75. ISSN 0037-6825.
- [2] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*, VUT Brno 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] SÝKORA, P. *Metalurgie litin II*, Svaz sléváren Brno 2007. ISBN 80-87088-14-2.
- [4] MORES, A. *Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice, stav v roce 2012*, Slévárenství č. 3-4/2013. ISSN 0037-6825
- [5] GEDEONOVÁ, Z., JELČ I. *Metalurgia liatin* – vydání HT TU Košice 2000. ISBN 80-7099-5165.
- [6] STEFANESCU, D. M. Thermal Analysis—Theory and Applications in Metalcasting. *Inter Metalcast* 9, 7–22 (2015). ISSN 1939-5981.
- [7] Forma 2. *Detycon Solutions s.r.o.* [online]. Copyright © [cit. 31.03.2020]. Dostupné z: <https://www.detycon.com/images/Portfolio/forma2.jpg>
- [8] Forma. *Detycon Solutions s.r.o.* [online]. Copyright © [cit. 31.03.2020]. Dostupné z: <https://www.detycon.com/images/Portfolio/forma.jpg>
- [9] ANJOS, V. *Use of Thermal Analysis to Control the Solidification Morphology of Nodular Cast Irons and Reduce Feeding Needs*. Disertační práce. Universität Duisburg-Essen, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik. 2015. 197 s.
- [10] ČADA, R. *POSTUPY ÚDRŽBY I Studijní opora*, Ostrava 2007. ISBN 978-80-248-1506-0.
- [11] SKARBIŃSKI, M. *Navrhování technologických postupů ve slévárnách*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. Řada strojírenské literatury.
- [12] NOVÁ, I. *Teorie slévání I*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-149-X.
- [13] KRUTIŠ, V. *Vliv tepelného ošetření nálitků na tuhnutí kovu*. Disertační práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003. 187 s.
- [14] Probetiegel. *Technical Service Kühn | Buscheritz* [online]. Copyright © 2019 All rights reserved. [cit. 06. 11. 2019]. Dostupné z: <https://tsk-web.eu/de/start.html>

- [15] GRZINČIČ, M. *Termická analýza litin použitím systému AccuVo®*,
Slévárství č. 3-4/2020, str. 89-96. ISSN 0037-6825.

PŘÍLOHY

Příloha č. 1

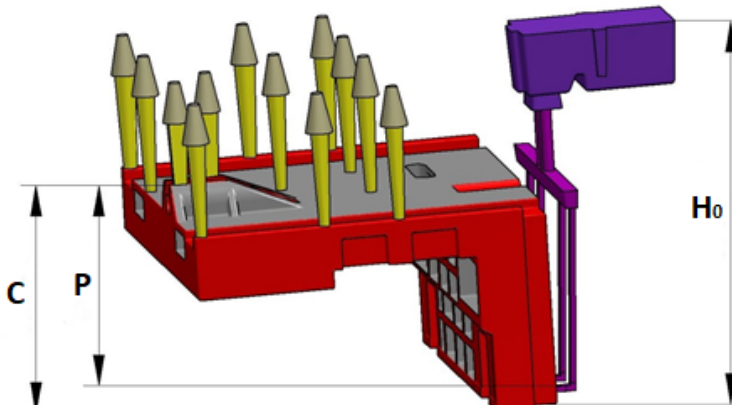
Výpočet vtokových soustav - odlitky od 1t do 10t

Legenda

zadávané hodnoty

hodnoty pevně dané

hodnoty vypočtené



1) $G = 1,2 \times m$

2) $t = s \times \sqrt[3]{tl \times G}$

3) $h_{stř} = H_0 - \frac{P^2}{2C}$

4) $v_g = \frac{G}{t}$

5) $v = 0,55 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times h_{stř}}$

6) $S_z = \frac{G}{\rho \times v \times t} \times 10^6$

7) $S_0 = 1,2 \times S_z$

8) $S_v = 1,4 \times S_z$

9) $F_{vztlak} = S \times h \times 9,81 \times \rho$

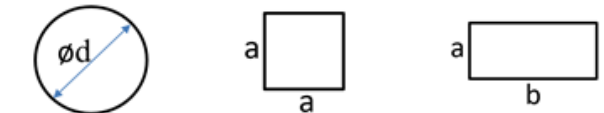
10) $m_{úkladku} = F_{vztlak} \div 10^4$

Výpočet vtokových soustav - odlitky od 1t do 10t		Legenda	
Optimální doba odlévání odlitku [s]	t	65,85	
stř. tloušťka stěn odlitku [mm]	tl	30	
součinitel času	s	1,5	
hm. odlitku s vtok. soustavou a nálitky [kg]	G	2820	
hrubá hmotnost odlitku [kg]	m	2350	
Střední ferostatický tlak [m]	hstř.	1,06	
Výška vtokového kanálu nad zářezem [m]	Ho	1,42	
Výška odlitku nad rovinou zářezů [m]	P	0,73	
Celková výška odlitku v poloze při liti [m]	C	0,75	
Plocha průřezu zářezů [mm ²]	Sz	2793	
Počet zářezů	n	4	
Plocha průřezu jednoho zářezu [mm ²]		698	
Střední tíhová rychlost liti [kg/s]	vg	43	
Licí rychlost [m/s]	v	2,51	
Hustota tekutého kovu pro LLG kg/m ³	ρ	6100	
Plocha průřezu odlučovače strusky [mm ²]	So	3351	
Celková plocha průřezu vrchního kúlu [mm ²]	Sv	3910	
Počet vrchních kúlů	n	3	
Plocha průřezu jednoho vrchního kúlu [mm ²]	Si	1303	
Vztlaková síla působící na vršek formy [N]	G	88576	
Půdorysná plocha odlitku [m ²]	S	1,905	
Výška hladiny kovu nade dnem [m]	h	0,777	

1) průměr zářezu [mm] d 30

2) čtvercový zářez [mm] a 26

3) obdélníkový zářez [mm] a b

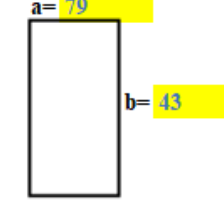


Návrh různých obdélníkových profilů pro zářezy			
a	5	b	140
a	10	b	70
a	15	b	47
a	20	b	35
a	25	b	28
a	30	b	23
a	35	b	20

Návrh rozměrů odlučovače strusky pro obdélníkový profil - pro polystyrénové modely

a=79

b=43



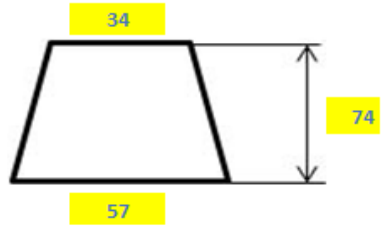
Návrh rozměrů odlučovače strusky [mm] základna a [mm] 57

Návrh rozměrů odlučovače strusky pro liti ze dvou stran [mm] základna a [mm] 40

průměr vrchního kúlu [mm] d 41

hmotnost použitého závaží [t] m 9

Návrh rozměrů odlučovače strusky při liti z jedné strany

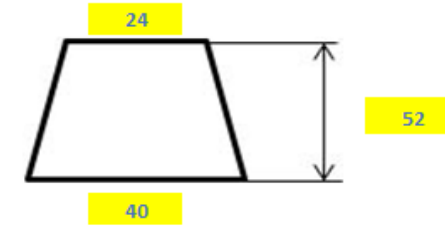


34

74

57

Návrh rozměrů odlučovače strusky při liti ze dvou stran



24

52

40