



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PŘÍČINY VZNIKU BODLIN V LITINĚ S KULIČKOVÝM GRAFITEM

REASONS FOR PIN HOLES FORMATION IN DUCTILE IRON CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADIM OPAČITÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠENBERGER,
CSc.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat vznik vad v zadaném odlitku z tvárné litiny EN – GJS - 600 – 3 vyráběném litím do pískové bentonitové formy, která je formována strásáním s dolisováním a následně nalézt řešení k odstranění těchto vad. Při řešení problému byl sledován vliv složení formovací směsi, vliv proudění kovu v dutině formy a vliv dezoxidace kovu na výskyt vad. Dosažené výsledky prokázaly důležitost vlivu reoxidace kovu v dutině formy. Konkrétně v tomto případě se podařilo snížit výskyt BODLIN. Odstranění BODLIN se dosáhlo dezoxidací taveniny hliníkem. Tím se podařilo snížit výrobu neshodných odlitků pod 3% z původních 6,5%.

Klíčová slova:

bodliny, reoxidace, tvárná litina EN – GJS - 600 – 3, hliník

Abstrakt

The aim of this thesis was to analyze the formation of defects in a given casting of ductile cast iron EN - GJS - 600-3 cast in sand molds bentonite, which is formed jolting with coining and then find a solution to remedy these defects. To resolve this issue, the influence of the composition of the sand mixture, the effect of metal flow in a cavity forms and the influence of deoxidation of metal in the presence of defects. Obtained results showed the importance of the influence Reoxidation metal cavity mold. Specifically, in this case succeeded in reducing the incidence of PINHOLES. Removal of PINHOLES to achieve deoxidation aluminum melt. This has reduced the production of nonconforming castings under 3% from the original 6.5%.

Key words

Pinholes, reoxidation, ductile iron EN – GJS - 600 - 3, aluminium

Bibliografická citace

OPAČITÝ, R. *Příčiny vzniku bodlin v litině s kuličkovým grafitem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 52 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci „Příčiny vzniku bodlin v litině s kuličkovým grafitem” vypracoval samostatně na základě vlastních poznatků s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26. 5. 2010

.....
(podpis)

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Jaroslavu Šenbergerovi, CSc., za vstřícný lidský přístup, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v celém průběhu magisterského studia a především při řešení problematiky související se zpracováním diplomové práce.

Děkuji tímto rovněž panu Ing. Vladimírovi Krutišovi, Ph.D, s firmy MECAS ESI s.r.o za jejich cenné rady a konzultace. V neposlední řadě patří dík i rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia a projevila nejen obětavost, ale i velkou míru pochopení.

Obsah

Teoretická část	7
1. Úvod.....	7
2. Charakteristika vad:	8
2.1. Definice vad.....	9
2.2. Rozdělení vad	9
3. Analýza příčin vzniku vad typu bodlin v litinových odlitcích	10
3.1. Definice bodlin:	10
3.2. Rozdělení bodlin.....	12
Ad a) Fyzikální.....	12
Ad b) Výsledek oxidační reakce	13
Ad c) Výsledkem rozpouštění.....	14
Ad d) Typ vměstku.....	15
Ad e) Jiné bodliny	17
4. Dezoxidace	18
5. Vměstky v odlitcích	19
6. Reoxidace	21
7. Nastínění řešeného problému	21
8. Stanovení cíle diplomové práce	21
Experimentální část.....	22
9. Charakteristika odlévané slitiny a formovací směsi	22
9.1. Složení formovací směsi	23
10. Analýza příčin vzniku vad	24
10.1. Běžná prohlídka vady	24
10.2. Pozorování vad pod mikroskopem a mikroanalýza	25
10.3. Metalografický výbrus.....	25
10.4. Použití mikroanalytických metod.....	25
10.5. Interpretace laboratorních výsledků.....	28
11. Návrh experimentu.....	29
11.1. Provedení experimentu a vyhodnocení.....	29
11.2. Shrnutí výsledků	47
12. Návrh na úpravu technologického předpisu.....	47
13. Ekonomické zhodnocení stávajícího a navrženého řešení	48
14. Závěr	49
Seznam použitých symbolů a zkratk	51
Seznam použité literatury.....	52

Teoretická část

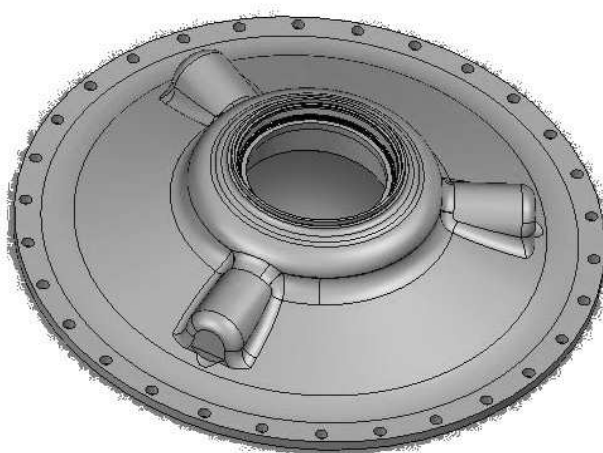
1. Úvod

Ve slévárně Tafonco se vyskytly v roce 2009 na některých typech odlitků vady typu povrchové dutiny. Tato vada je neopravitelná a způsobuje značné finanční ztráty. Nejvíce se vyskytovala vada na odlitku č. modelu Claas 2078290. Viz obr. 1

Jelikož bylo procento neshodných odlitků způsobených vadami za rok 2009 vyšší, než bylo přijatelné (8,63%), vedení slévárny vypsalo na řešení jakosti odlitků téma pro diplomovou práci. Na základě zadání byly v souladu s vedením slévárny Tafonco formulovány cíle práce, které jsou uvedeny v příslušné kapitole.

Slévárna Tafonco vyrábí vybrané odlitky k řešení v této práci na lince Stone-Wallwork FA 400, formovací bentonitová směs pro lití na syrovo, materiál EN – GJS - 600 - 3.

V kapitole charakteristika vad jsou zahrnuty vady, které souvisí se zadaným tématem.



Obr. 1.1 3-D model odlitku

2. Charakteristika vad:

Vady odlitků jsou ve svém důsledku nežádoucím a velmi nepříjemným problémem, který značně komplikuje plynulost výroby. Kromě ekonomických ztrát jsou také příčinou četných nedorozumění mezi pracovníky zajišťujícími výrobu odlitků, neboť téměř každá vada je výslednicí mnoha příčin. Jejich podíl na konečné zmetkovitosti je možno obvykle rekonstruovat jen s jistou přibližností, zatímco pracovníci ve výrobě zpravidla požadují jeho co nejpřesnější vymezení. Všechny vady odlitků zároveň snižují jakost odlitků, a jestliže je nezachytí výstupní kontrola a stanou se předmětem reklamací, pak poškozují dobré jméno příslušné slévárny, a snižují její konkurenční schopnost na trhu s odlitky. Z tohoto hlediska představují největší nebezpečí vady skryté a z nich zejména ty, které znamenají zhoršení funkční schopnosti odlitku a jejichž nepříznivý účinek se z nejrůznějších příčin projeví až ve fázi exploatace odlitku.

Víme, že jakost odlitku, zejména jeho zaručená (garantovaná) jakost, má v současnosti v řadě případů větší váhu než jeho cena, a že je jí dávana přednost, jako kritériu, které rozhoduje o tom, zda zákazník se pro odlitky vyráběné tou, či onou slévárnou rozhodne, nebo nikoli. Přitom je třeba si povšimnout skutečnosti, že v českém i slovenském slévárenství, nebyla na rozdíl od zahraničí, v posledních více než třiceti letech, problematika vad odlitků nikdy v popředí dostatečného zájmu jako problém, jehož řešení je zapotřebí věnovat, když už ne prvořadou, tak alespoň přiměřenou pozornost, Tento stav byl s ohledem na uplynulá léta celkem přirozený, neboť v poválečném českém i slovenském slévárenství nedominovala u odlitků ani tak jakost a kvalita s pestrostí sortimentu, jako kvantita odlitků a jejich hmotnost.[1]

2.1. Definice vad

Vadou odlitku se rozumí každá odchylka rozměru, hmotnosti, vzhledu, makrostruktury nebo vlastností zjištěných laboratorními zkouškami, od příslušných norem nebo sjednaných technických, či přejímacích podmínek. [1]

2.2. Rozdělení vad

Vady odlitků mohou být zjevné, nebo skryté, Zjevnou vadu odlitku je možno zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku pouhým okem nebo jednoduchými pomocnými měřidly. Skrytou vadu je možno zjistit až po obrobení odlitku, nebo prorýsováním pomocí vhodných přístrojů, anebo laboratorními zkouškami, defektoskopickými metodami zkoušení apod. Nutno si také uvědomit, že termín vada odlitku má význam podmíněný. Podle ustanovení příslušných norem, anebo sjednaných technických nebo přejímacích podmínek může být tatáž odchylka někdy přípustnou vadou, jindy vadou nepřipustnou, opravitelnou nebo odstranitelnou.

Přípustná vada je taková, kterou lze podle příslušných norem a technických, či přejímacích podmínek u odlitku připustit, tolerovat, aniž by bylo nutno ji odstranit. Nepřípustná vada je taková, kterou nelze odstranit opravou, nebo jejíž oprava je podle ustanovení příslušných norem a technických či přejímacích podmínek výslovně zakázána. Opravitelná vada je taková, jejíž oprava je příslušnými normami, technickými, či přejímacími podmínkami dovolena nebo alespoň není výslovně zakázána a odstranitelná vada je taková, kterou lze odstranit teprve po dohodě s odběratelem odlitku zvláštnímu úpravami nebo výrobními způsoby, které se původně, při sjednání přejímacích podmínek, nepředpokládaly. Co do závažnosti vlivu vad na jakost odlitků lze tedy seřadit vady do následující posloupnosti: přípustná, opravitelná, odstranitelná a nepřipustná vada.[1]

3. Analýza příčin vzniku vad typu bodlin v litinových odlitcích

3.1. Definice bodlin:

Bodliny mají označení v atlasu vad [2] 420 a řadí se do skupiny dutin. Jsou vyvolány rozpuštěnými plyny, oxidací tekutého kovu a tvorbou vměstků v makroskopické zóně. Za bodliny považujeme plynové bubliny o velikosti 1 – 5 mm, vnitřek vady má kovový vzhled lišící se od povrchu odlitku, nebo obsahuje vyloučený grafit, karbidy a strusky.

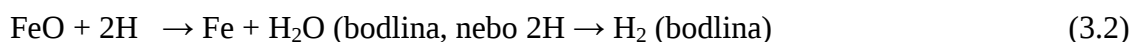
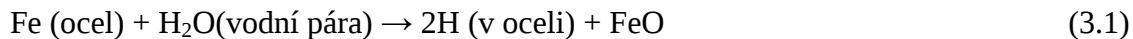
Po otryskání se projevují jako malé bublinky pokrývající buď zcela, nebo v nepravidelných shlucích povrch odlitku. Průměr bodlin je okolo 1 až 2 mm, jejich délka orientovaná kolmo k povrchu odlitku může až několikanásobně převyšovat průměr. Povrch bublin je podle druhu plynu, jež je vytvořil a základního materiálu odlitku pokryt buď oxidickými vrstvami, nebo je hladký a celkově, nebo částečně pokryt grafitovým povlakem. Pod grafitovým povlakem bývá oduhličená feritická vrstva.[2]

Tab. 3.1 Seznam tříd, skupin a vad odlitků [3]

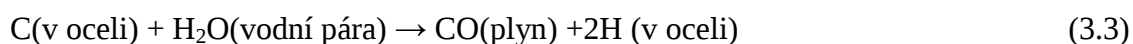
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny	311	Povrchové trhliny
				312	Podpovrchové trhliny
				313	Vnitřní trhliny
		320	Praskliny		
		330	Porušení souvislosti v důsledku mechanického poškození odlitku	331	Lom za tepla
				332	Lom za studena
		340	Porušení souvislosti v důsledku nespojení kovu	341	Svalení
				341	Nedokonalý svar
		400	Dutiny	410	Bubliny
				411	Bubliny způsobené kyslíkem
400	Dutiny			412	Bubliny způsobené vodíkem
				413	Bubliny způsobené dusíkem
				414	Sahlečný plyn
				415	Sítkovité bubliny
		420	Bodliny		
		430	Odvážení	431	Odvážení od formy, jádra
				432	Odvážení od chladítek a zalévaných předmětů
				433	Odvážení od vměstků
		440	Stažení	441	Otevřené stažení
				442	Vnitřní, uzavřené stažení
				443	Řezání
				444	Stažení od jader nebo ostrých hran formy
				445	Povrchové propadliny
				446	Plynné stažení
		500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost
				511	Struskovitost exogenní
				512	Struskovitost sekundární
		520	Kovové vměstky	521	Zatrosnění
				522	Rozplavený písek
				523	Odpuštěný náter
				524	Oxidické pleny
				525	Grafitové (uhlíkové) pleny
				526	Černé skvrny
		530	Makrosegregace a vycizeniny	531	Gravitační odměnění
				532	Makroodměnění
				533	Stvolové vycizeniny
				534	Mozetové vycizeniny
		540	Broky		
		550	Kovové vměstky		
		560	Nevyhovující lom		

Vycházejme z předpokladu vzniku bodlin v ocelových a litinových odlitcích, kde se přisuzoval jejich původ vodíku:

Jejich vznik se původně vysvětloval takto [4]:

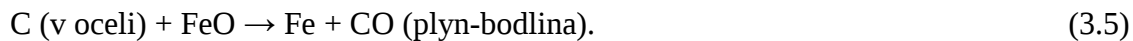


Nebo[4]:



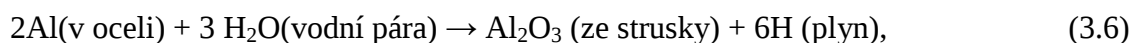
Tento mechanismus však nebyl experimentálně potvrzen.

Dalším předpokladem bylo, že bodliny vznikají reakcí:



Zdrojem FeO měl být fayalit. (FeO.SiO₂ se nalézá ve strusce).

Dále pak byla navržena reakce[4]:



Kontroverzní role H₂ a CO jako zárodku bodliny nebyla však do dneška rozřešen.

Poslední, velmi rozsáhlá práce [4] se přiklání k názoru, že bodliny v železných slitinách vznikají



nebo



za vzniku oxidu uhelnatého, při čemž je redukován kov.

Kde MeO je většinou FeO, (ale může být i MgO, Al₂O₃, CaO, BaO, MnO) a C je uhlík z taveniny.

Hlavním původcem vzniku bodlin je reoxidace a vznik CO a vlhkost, především z formovacích směsí a případně dusík z organických směsí. Impulem pro vznik bodlin je kyslík a vodík, které přecházejí z disociované vodní páry z formovacích směsí a rozpouštějí se v tavenině. Tvoří se kovové oxidy a atomární vodík. Podobným způsobem se štěpí sloučeniny dusíku a vodíku a ty mohou rovněž difundovat do taveniny. Jsou-li k dispozici dezoxidační prvky, vyváže se na ně kyslík ve formě pevných zplodin. Vodík, popřípadě dusík přecházejí do odlitku a mohou zde vytvářet uzavřené dutiny, bubliny. Není-li v tavenině přebytek dezoxidačních prvků, které by likvidovaly přebytek kyslíku z vlhké formy-jádra, vzniká oxid uhelnatý, který se při své minimální rozpustnosti ve slitinách železa vyloučí ve formě bodlin, do nichž pak může difundovat vodík i dusík. Dále působí stupeň průtočnosti daného místa odlitku, tloušťka stěny a atmosférická vlhkost vzduchu. S rostoucím stupněm průtočnosti a tloušťkou stěny náchylnost k tvorbě bodlin klesá, rostoucí atmosférická vlhkost náchylnost zvyšuje.[4]

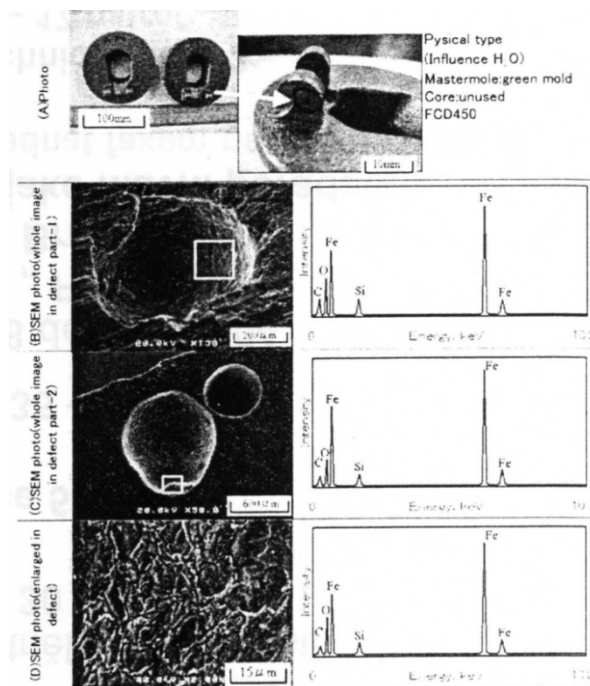
3.2. Rozdělení bodlin

- a) Fyzikální
- b) Výsledek oxidační reakce – tento typ se dělí na další dvě podskupiny
- c) Výsledek rozpuštění
- d) Vměstek – tento typ se dělí na další čtyři podskupiny
- e) Jiné bodliny

Ad a) Fyzikální [5]

Vady tohoto typu jsou vyvolávány plynem zachyceným v kovu. Tento plyn se uvolňuje z tekutého kovu nebo formy během lití nebo při turbulentním proudění během plnění formy. Tyto plynové dutiny nacházíme často přímo pod povrchem licí kůry odlitku na jeho horní ploše. Kulovité vady způsobené vodíkem vyvinutým z tekutého kovu nebo od formy před tuhnutím jsou označovány jako vodíkové bodliny. Jestliže vada zůstane uzavřena, má její vnitřek buď lesklý kovový vzhled, nebo vzhled grafitového filmu.

Grafitový film se tvoří během tuhnutí. Pro tento typ bodlin je charakteristické, že se v jeho okolí neobjevují vměstky nebo jsou úplně minimální. Jako fyzikální typ se klasifikují tehdy, když při výrobě odlitku vznikají v tekuté fázi. Dále do této skupiny řadíme bodliny vyvolané snížením povrchového napětí za přítomnosti Al nebo Ti v kovu nebo reakcí s vodní párou, ovšem pokud nejsou ve vadě pozorovány vměstky.



Obr. 3.1 Příklad analýzy bodlin Fyzikálního charakteru v litině s kuličkovým grafitem na SEM a EDS[6]

Ad b) Výsledek oxidační reakce [5]

Bodliny jako výsledek oxidační reakce se vyskytují ve dvou typech, a to:

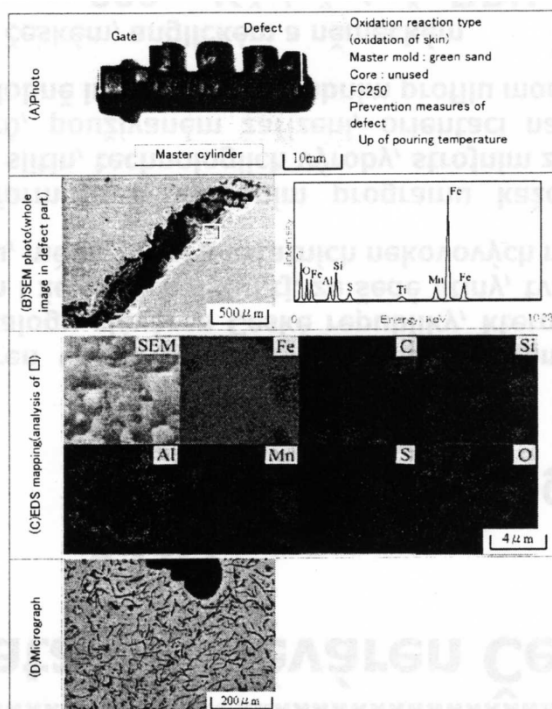
B-1 – Typ oxidace během tuhnutí

Během lití oxidují první pramínky tekutého kovu a reakcí FeO a C se tvoří CO , což má za následek vznik vady. Vada je často spojována s redukční reakcí při teplotě lití nebo s oxidační reakcí ve formě (oxidace tekutého kovu).

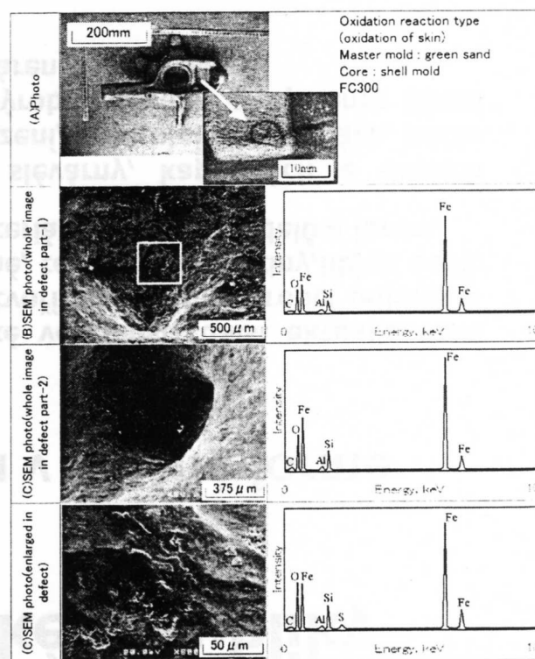
B-2 – Typ oxidace zbytkové taveniny a kondenzace [5]

V případě podeutektických litin, když primární krystaly austenitu krystalizují ve formě dendritů mohou vměstky FeO a uhlík v tavenině spolu navzájem reagovat za vzniku bodliny tohoto typu. Tyto vady mají tvar tlustých puklin (prasklinek) a mohou být izolovány nebo se nacházet na několika místech odlitku. Vnitřek vady byl oxidován. Vměstky působí jako

zárodek pro tvorbu plynové bublinky. Bublinka se tvoří, když je tekutý kov oxidován plynem z jádra nebo z formy.



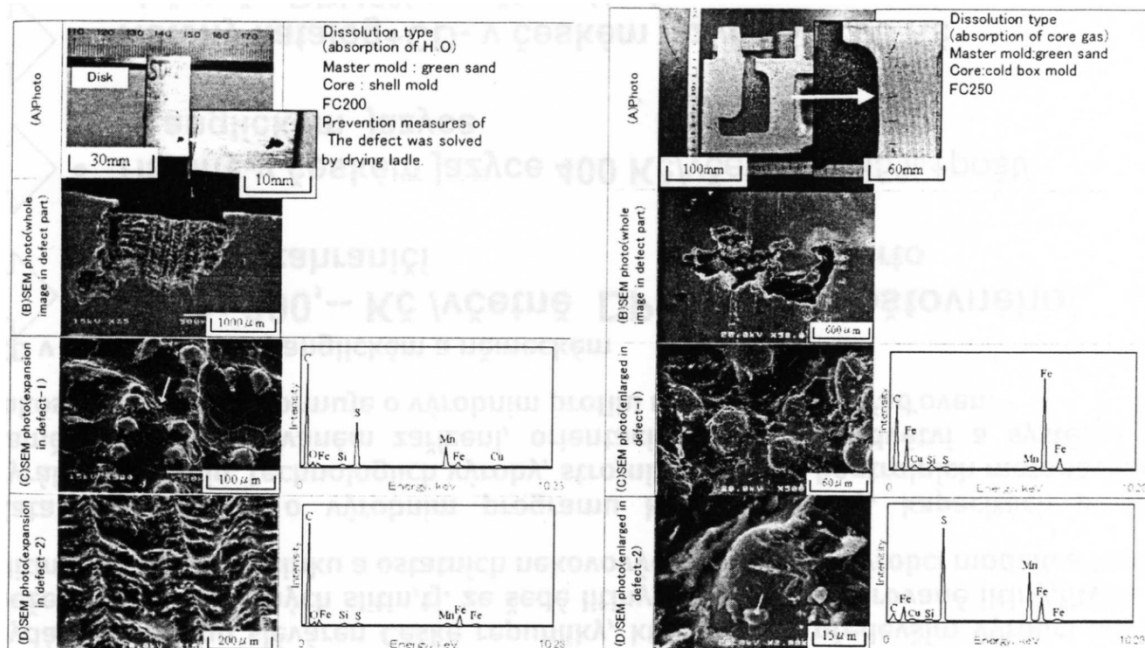
Obr. 3.2 Příklad analýzy bodlin oxidace během tuhnutí taveniny v prasklině na SEM a EDS. [6]



Obr. 3.3 Příklad analýzy bodlin oxidace zbytkové taveniny na SEM a EDS [6]

Ad c) Výsledkem rozpouštění [5]

Když je dusík a vodík rozpuštěn v tekutém kovu a vylučuje se ve formě plynu během eutektického tuhnutí za přítomnosti primárních dendritů, pak vznikají vady podobné typu oxidační reakce. Tento typ má vzhled puklinek (prasklinek) způsobených přítomností dusíku. Dusík se uvolňuje (generuje) těsně před spojováním dendritů při eutektické teplotě. V různých oblastech odlitku se tvoří mnoho bublin. Poněvadž plyny z formy a jádra tvoří směsný plyn, mají tyto bodliny charakter zároveň typu rozpouštění a oxidační reakce. Když oxidace uvnitř vady nepřevládá, jsou označeny jako typ rozpouštění.



Obr. 3.4 Příklad analýzy bodlin v tavenině s rozpuštěným N₂ v tavenině.[6]

Obr. 3.5 Příklad analýzy bodlin s rozpuštěnou H₂O na SEM a EDS.[6]

Ad d) Typ vměstku [5]

Tento typ bublin je rozdělen do dalších čtyř podskupin, a to:

D-1 – Vměstky silikátu manganu [5]

Jsou způsobeny hlavně oxidací manganu a křemíku na frontě tuhnutí. Vměstky reagují s uhlíkem tekutého kovu za tvorby CO a vytvářejí bodliny. Z tohoto důvodu se tento typ snadno tvoří v tuhnoucí kůrce nebo těsně pod ní. Během tuhnutí jsou Mn a Si oxidovány ve formě. V případě, že tekutý kov oxiduje, tvoří se u zářezů vtokové soustavy nebo ve vnitřních částech dutiny formy vměstky. Když silikát pochází z křemenného písku, tak jsou v bodlině patrné jak vměstky, tak i písek.

D-2 – Vměstek modifikátoru [5]

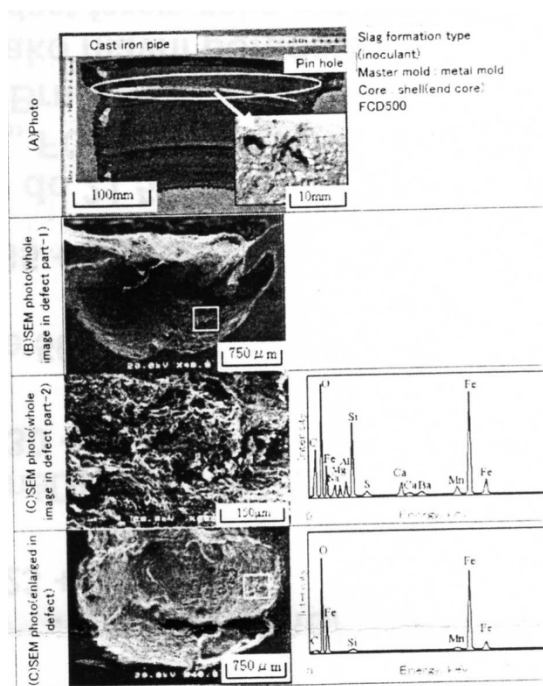
Vměstky modifikátoru reagují s uhlíkem v tekutém kovu a vytvářejí CO, který má za následek bodliny podobné těm, které jsou vyvolávány vměstky silikátu manganu. Kromě toho hliník z očkovačny a hořčík a hliník z modifikátoru reagují s vodní párou tvořící se v syrové formě a vytváří vodík.

D-3 – Vměstky sirníku manganu [5]

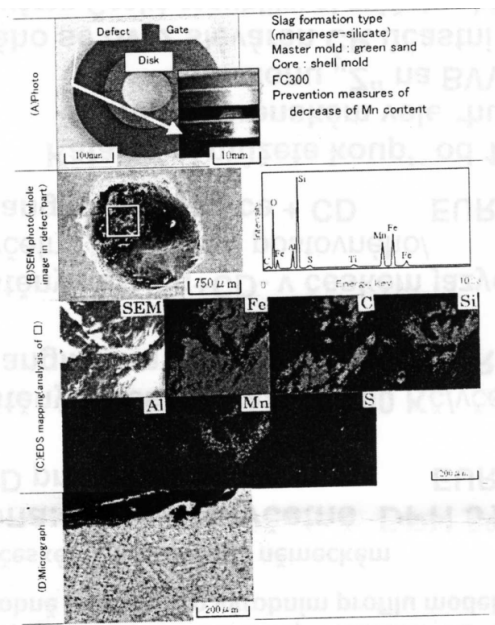
Sirník manganu MnS má bod tavení 1620°C a hustotu 4000kg/m³. Je tedy v tekutém kovu v pevném stavu a působí jako zárodek pro tvorbu plynů a zároveň bodlin. V případě, že MnS se transformuje na silikát MnS.SiO₂, reaguje s uhlíkem tekutého kovu za vzniku CO a tedy bodlin.

D-4 – Vměstek písku nebo cizorodé látky [5]

Tento typ vady vzniká tehdy, když tekutý kov reaguje s formovací směsí, po vyčerpání žárovzdornosti dochází k reakci kovu s formovací směsí, vzniká CO a tvoří se bodliny. Jiné cizorodé látky jako struska z pánve, různé šumy a zbytky žárovzdornin jsou zdrojem CO.



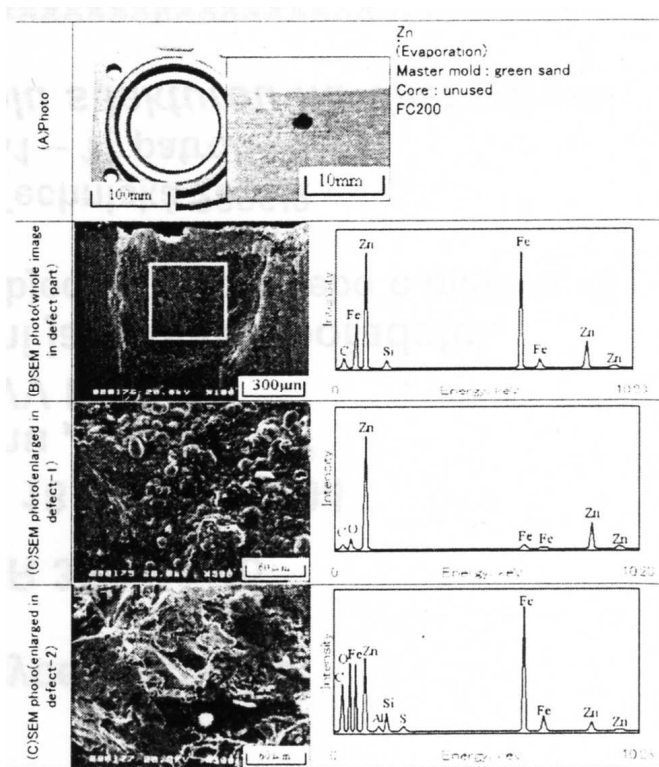
Obr. 3.6 Příklad analýzy bodlin se struskou v tavenině na SEM a EDS.[6]



Obr. 3.7 Příklad analýzy bodlin s vměstkem modifikátoru v tavenině na SEM a EDS.[6]

Ad e) Jiné bodliny [5]

Existuje mnoho dalších zdrojů tvorby bodlin. Nedávno se objevily vady přisuzované vypařování zinku obsaženému ve vsázce tavicí pece. Jiným zdrojem může být záhyb (zavalení) proudu tekutého kovu při velké rychlosti odlévání z automatického odlévacího zařízení. Povrch takového záhybu je oxidován a tvoří se bodlina. Bodliny komplexního původu se mohou tvořit a rozvíjet i v místech segregací Cu, Ti, Mo a Nb.



Obr. 3.8 Příklad analýzy bodlin s opařeným Zn na SEM a EDS[6]

4. Dezoxidace [7]

Při dezoxidaci se snižuje obsah kyslíku. Chemickou afinitu dvou prvků udává hodnota volné entalpie ΔG jejich vzájemné reakce (oxidů). Prvky, které vykazují v roztoku kapalného železa vysokou afinitu ke kyslíku, se nazývají dezoxidovadla. Nejčastěji se používá k dezoxidaci hliník a křemík. Dezoxidační reakci pomocí křemíku lze popsat následující rovnicí (4.1):



Jelikož v tomto případě je dezoxidace křemíkem nedostatečná a stále vzniká CO podle rovnice (4.2):



Je nutné zvolit dezoxidaci hliníkem, který má vyšší aktivitu ke kyslíku než křemík a proto je silnější dezoxidovadlo. Tato reakce probíhá podle rovnice (4.3):



5. Vměstky v odlitcích

Makrovměstky jsou definovány, jako oxidy které svou velikostí přesahují v průměru 20 mikronů [8].

Tyto vměstky vznikají:

- Reoxidací
- Interakcí mezi železnou taveninou a tekutou struskou
- Vířením v proudu taveniny
- Při plnění pánve a formy
- Při mísení inertním plynem (Argonem)
- Litím přes vrstvu strusky
- Erozí/korozí při odlévání železné taveniny
- Aglomerací nečistot jejich shlukováním a hrudkováním při lití ocelové taveniny

Reoxidace může probíhat reakcemi s:

- okolní atmosférou (ovzduším)
- méně stabilními komponentami strusky nežli jsou oxidy v desoxidantech
- žárovzdorninami v nichž jsou méně stabilní oxidy jako v předcházejícím případě

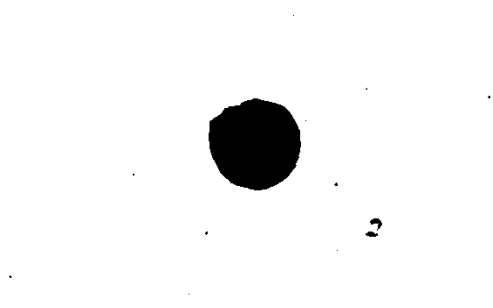
Tab. 5.1 Příčiny vzniku makro vměstků

Zdroje reoxidace	Typy vměstků	Poznámky
Styk s okolní atmosférou	„Chemizace“ vměstků může být velmi variabilní a závisí na množství reoxidačních produktů a jejich časovém rozvrstvení v tavenině po reoxidaci. Není neobvyklá přítomnost vměstků obsahujících všechny prvky z železné taveniny, jako FeO, MnO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ apod.	Závisí na úrovni teploty celého procesu a na přirozené razanci přestupu kyslíku z okolní atmosféry do taveniny. Množství „produktů“ dezoxidace může být značné.
Styk se struskami obsahujícími vysokou hladinu FeO, MnO a SiO ₂	V ocelích uklidněných hliníkem může vzrůst obsah oxidu hlinitého ve strusce.	Ačkoliv rychlost reakce mezi struskou a taveninou železa je obecně nižší než-li při vzdušné reoxidaci, pak při turbulenci taveniny při mísení a odlévání může reoxidace dosahovat poměrně vysoké úrovně.
Reakcí se žárovzdorninami	Ačkoliv všeobecně se jedná o nízkou reakční rychlost, může být pro vysoce čisté oceli významný zdroj.	U odlitků může být vlhkost formy významným činitelem vedoucím k vysokým reakčním rychlostem

Reoxidace je pravděpodobně nejběžnější způsob vzniku makrovměstků v železných slitinách

Ve slitinách železa převládají pochopitelně oxidy typu FeO a MnO. Reoxidací též vznikají shluky povrchových nečistot a „přirozených“ strusek. Tyto strusky mají velmi nízké povrchové napětí a velmi nízkou viskozitu, jsou tekuté a lehce se při turbulencích vměšují do taveniny. V případě, že není povrch taveniny dostatečně ošetřen a zbaven povrchové strusky, mohou tyto proniknout až do odlitku a způsobit rozsáhlé makrovměstky.[8]

V odlitcích se vyskytují makrovměstky u nedostatečně dezoxidovaných taveb současně s bublinami a bodlinami nebo v místech odlitku, kde proběhla intenzivní reoxidace a v uvedeném místě byl spotřebován zbytkový hliník. Příklad vměstku I. typu na odlehlém místě odlitku je uveden na obr. 5.1. Přítomnost vměstků I. typu v odlitcích signalizuje vždy nebezpečí výskytu dalších vad v odlitku. Vměstky vznikají v oceli při nízkém obsahu hliníku (0,002 až 0,015%). Vměstky mají kulovitý tvar a složení odpovídá oxisulfidům s proměnlivým složením Mn, Si , Al a S (při teplotě tavení jsou tekuté).[9]



Obr. 5.1 Vměstek I. typu vzniklý reoxidací během odlévání (100x) [9]

6. Reoxidace

V podstatě obrácený pochod k dezoxidaci, který vede k nežádoucím fyzikálně-chemickým reakčním produktům. Tyto produkty reoxidace v řadě případů silně znehodnocují požadovanou jakost vyráběných odlitků z těchto slitin. Chceme-li produkovat vskutku jakostní odlitky ze slitin železa, pak je zapotřebí reoxidační procesy a jejich důsledky podrobně zkoumat, klasifikovat a podat nástin cest k jejich zamezení.

Česká odborná terminologie rozeznává u oxidace litin a oceli dva termíny, podle jejich časové posloupnosti a teploty, a to sekundární a terciální oxidaci. Jako sekundární oxidace jsou označovány pochody, které jsou spojeny se zvyšováním koncentrace a aktivity kyslíku v oceli a litině po ukončení primární dezoxidace. Primární dezoxidací se myslí dezoxidace během odpichu, Sekundární oxidace probíhá jednak během setrvání kovu v pánvi, jednak při vlastním odléváním a plnění dutiny formy. Terciální oxidaci nebo také reoxidací je pak označovaná oxidace odlitku, kdy je teplota litiny mezi likvidem a solidem.[11] Rozlišení průběhů obou druhů oxidace, kdy jedná končí a druhá začíná, je experimentálně velmi obtížné.[10]

7. Nastínění řešeného problému

Jak již bylo uvedeno v úvodu, ve slévárně Tafonco měli u některých odlitků vady v podobě povrchový dutin. Na základě tohoto problému byla v první části práce vypracovaná teoretická rešerše o problematice vad zaměřená na bodliny. Následně byl ze slévárny dovezena část odlitku, který byl ve fakultních laboratoři rozřezán na požadované vzorky viz.obr. 10.2. Poté byla provedena metalografická analýza na elektronovém řádkovacím mikroskopu. Díky výsledkům z analýzy bylo provedeno několik zkušebních odlití odlitků různými způsoby, aby byly vyloučené ostatní vlivy. Po získání výsledku ze zkušebních taveb byla provedena numerická simulace v softwaru Quick Cast pro potvrzení hypotéz a následně navrženy řešení.

8. Stanovení cíle diplomové práce

Objasnit faktory, které se na vzniku bodlin podílejí a navrhnout nápravná opatření. Snížit výskyt problematické vady pod hranici 5%, která je považovaná za únosnou. Předat navržená řešení do slévárny Tafonco.

Experimentální část

9. Charakteristika odlévané slitiny a formovací směsi

V tabulce 9.1 je uvedeno chemické složení litiny předepsané zákazníkem a v tab. 9.2 je uvedeno chemické složení k 30. 11. 2009. Předepsané vlastnosti litiny jsou uvedeny v tab. 9.3 a v tab. 9.4 je uvedeno složení vsázky pro tavení v indukční peci. Tyto hodnoty jsou rovněž k 30. 11. 2009

Tab. 9.1 Chemické složení předepsané zákazníkem

Předpis		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu
	min.	3,500	2,200				0,035		0,300
	max.	3,900	3,000	0,400	0,060	0,020	0,065	0,080	0,450

Tab. 9.2 Chemické složení

30. 11. 2009	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu
	3,72	2,76	0,52	0,024	0,007	0,054	0,03	0,28
	Ni	Al	Mo	Zn	Ca	Ce	N	
	0,024	0,017	0,005	0,079	0,014	0,0139	0,0073	

Tavení probíhá na 4 - tunové středofrekvenční kelímkové indukční peci ABP
Doba tavení je 60 – 70 minut.

Tab. 9.3 Mechanické vlastnosti k 30. 11. 2009

Vlastnost	Jednotky	Hodnoty
Mez pevnosti v tahu	N/mm ²	713
Tažnost A ₅	%	8,9
Tvrдость	HB	226
Mez pevnosti Rp0,2	N/mm ²	435
Pevnost ve střihu	N/mm ²	*540
Pevnost v krutu	N/mm ²	*630
Modul pružnosti E	GN/m ²	*140
Poissonův poměr λ	-	*0,275
Pevnost v tlaku	N/mm ²	*1000
Vrubová houževnatost	J/m ² .10 ⁵	*0,6-1,3
Lomová houževnatost	MPa.√m	*15
Tepelná vodivost 500 °C	W/(k.m)	*27,2
Hustota 500 °C	kg/dm ³	*6,92
Struktura	-	Perlitická

* Hodnoty dle ČSN 422306

Tab. 9.4 Složení tavené vsázky (4000 kg)

Množství	Jednotka	Materiál
2000	Kg	pozinkovaný plech
1000	Kg	vratný materiál
1000	Kg	surové železo
80	Kg	nauhličovalo
30	Kg	FeSi kusové
7	Kg	Cu
10	Kg	třísky
75	Kg	modifikátor
12	Kg	FeSi drcený
16	Kg	očkovaadlo

9.1. Složení formovací směsi

Formovací směs může mít na vznik vady významný vliv. Proto bylo při dalších zkouškách sledováno složení formovací směsi. Jednotlivé složky formovací směsi jsou uvedeny v tab. 9.5,

Tab. 9.5 Obsah mísiče

Množství	Jednotka	Materiál
630	Kg	písku Grudzeń Las $d_{50} = 0,27$ mm
5	Kg	bentonitu, Keramost – Keribent K
6	Kg	letek
1,5	Kg	dextrin

*Uvedené hodnoty jsou k datu 30. 11. 2009

*Obsah mísiče = jeden formovací rám

Formování probíhá na lince Stone – Walkwork FA 4000 (1963) střešáním s dolisováním

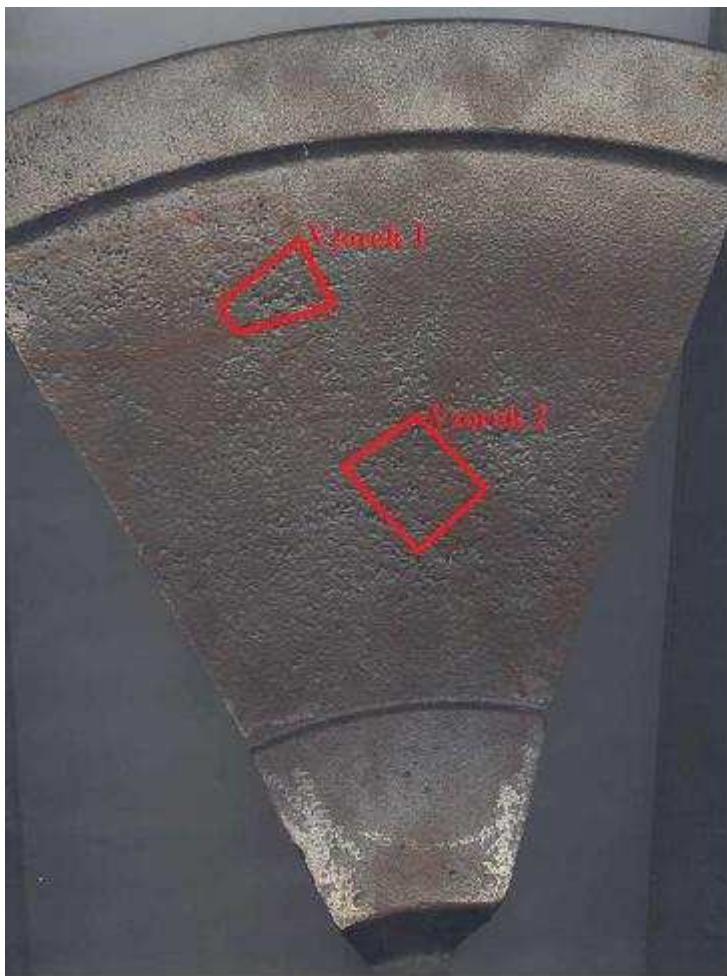
10. Analýza příčin vzniku vad

10.1. Běžná prohlídka vady

Ze slévárny Tafonco dovezen část zkoumaného odlitku Obr. 10.2. Při běžné prohlídce vady bylo zjištěno, že výskyt vad je na horní straně (ve vršku) odlitku v místech, kde je styk kovu s formovací směsí největší. Na obr. 10.2 je uvedeno místo častého výskytu vady. Odlitek byl následně rozřezán na požadované vzorky. Analýzou se má zjistit příčina vyskytované vady předběžně označena za bodliny.



Obr. 10.1 Hrubý odlitek po tryskání



Obr. 10.2 Výřez odlitku na vzorky pro metalografický výbrus

10.2. Pozorování vad pod mikroskopem a mikroanalýza

10.3. Metalografický výbrus.

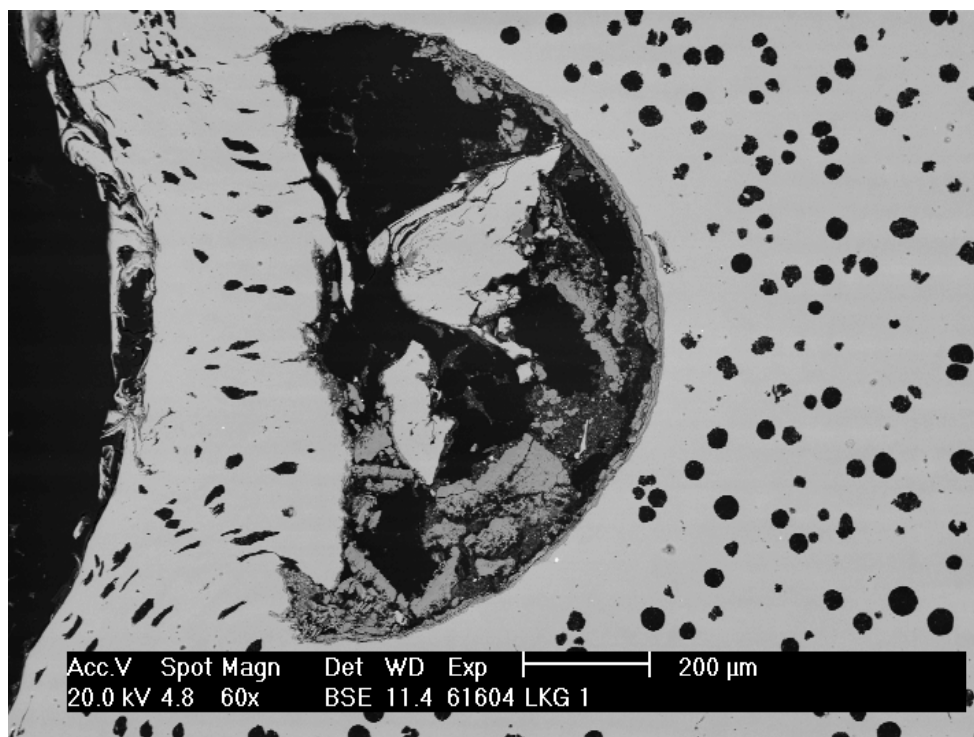
Příprava vzorků z požadované části odlitku byla provedena pouze dělením na laboratorní pásové pile. Vzorky byly poté zality do dentakrylu a analyzovány na rastrovacím elektronovém mikroskopu Philips XL 30 – EDAX (REM), kde bylo bodovou a plošnou mikroanalýzou stanoveno jejich chemické složení.

10.4. Použití mikroanalytických metod

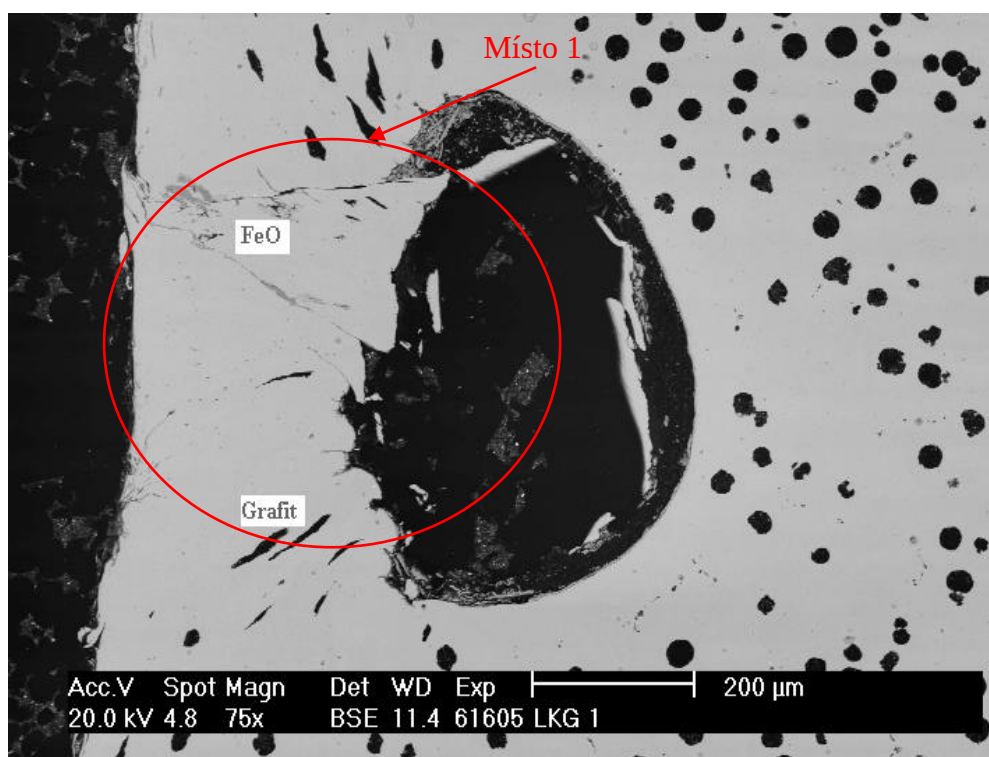
Vzorek 1

Těsně pod povrchem 2 dutiny viz obr. 10.3 a obr. 10.4, v těchto místech deformovaný grafit a oduhličení.

Dále na obr. 10.4 analyzovány útvary mezi vadou a povrchem – místo 1. Jedná se o FeO. Protáhlými útvary je grafit. Na obr. 10.5 je analyzován povrch dutiny a výsledky byly zaneseny do tab. 10.1



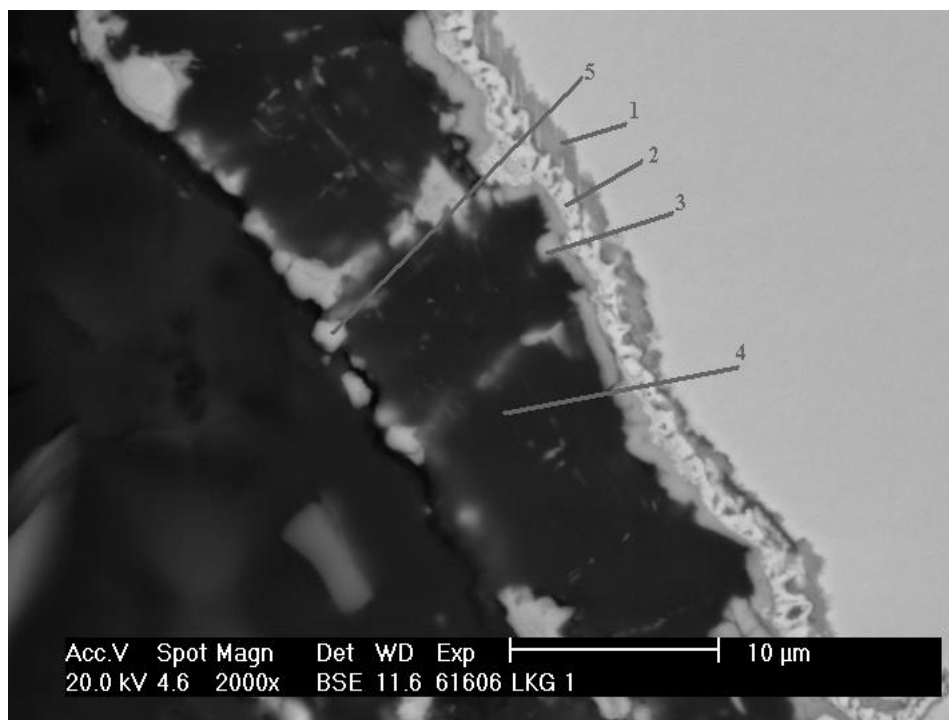
Obr. 10.3 Oxidická plena



Obr. 10.4 Oxidy FeO

Tab. 10.1 Bodová analýza snímku 10.3

Popis		Identifikované prvky v atomových %		
Vzorek	Zvětšení	O	Fe	Si
1	75x	58,06	39,15	2,79



Obr. 10.5 Analýza povrchu dutiny

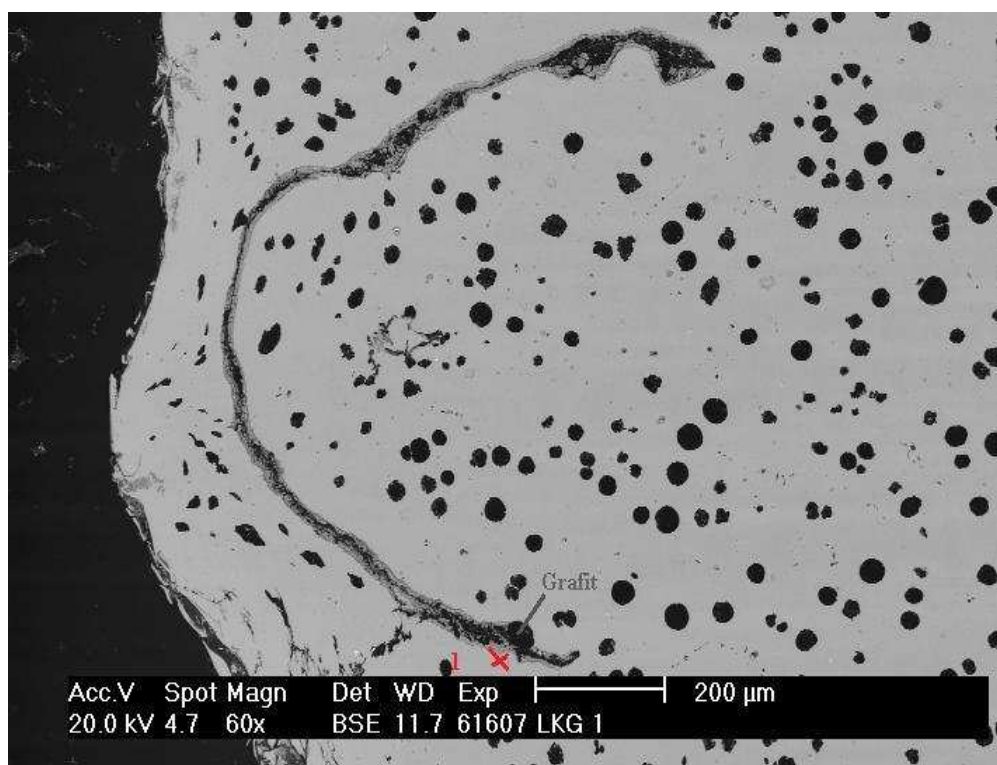
Tab. 10.2 Chemický rozbor

Místo 1	FeO + SiO ₂
Místo 2	Více Fe
Místo 3	Fe
Místo 4	Grafit
Místo 5	FeO + Mg + Si

Nad větší vadou na obr. 10.3 se nachází plena o šířce 40 μm. Podobný charakter jako dutina. Oxidy, uvnitř grafit. Na obr. 10.6 analyzováno na místě 1 oxidy na bázi FeO, černá fáze je grafit.

Tab. 10.3 Bodová analýza snímku 10.5

Popis		Identifikované prvky v atomových %				
Vzorek	Zvětšení	O	Fe	Si	C	Mg
1	Místo 1	47,65	47,14	5,21		
1	Místo 2	33,96	60,24	5,8		
1	Místo 3	48,32	49,81	1,87		
1	Místo 4		0,75		99,25	
1	Místo 5	59,18	36,83	2,35		1,64



Obr. 10.6 Analýza oxidů

Tab. 10.4 Bodová analýza snímku 10.6

Popis		Identifikované prvky v atomových %	
Vzorek	Zvětšení	O	Fe
1	Místo 1	59,96	40,04

Na vzorku nalezeny další dutiny obdobného vzhledu i oxidické pleny.

Vzorek 2

Na tomto vzorku analyzována velká dutina vyplněná dentakrylem, její okolí oduhličeno. Další dutiny na povrchu stejný vzhled jako ve vzorku 1. Dutina byla analyzována na povrchu, nikoliv v řezu jako v případě dříve analyzovaných bodlin, proto zde nalezeno lokálně Zn. Ve vzorku 1 takové množství nebylo analyzováno.

10.5. Interpretace laboratorních výsledků

Analýzou vzorků bylo zjištěno, že výskyt bodlin je způsoben reoxidací kovu ve formě za vzniku oxidu uhelnatého. Uhlík v litině reaguje s oxidem železnatým nebo popřípadě s rozpuštěným kyslíkem obsaženým v jiných málo stabilních oxidech a v povrchových vrstvách vytváří bodliny v tuhoucím kovu.

11. Návrh experimentu

Během experimentu bude sledován vliv složení formovací směsi, chemické složení tekutého kovu a vliv plnění odlitku na vznik bodlin.

Odletí 10 ks forem z jedné dávky kovu pro 4 zkušební návrhy odlití

Počet forem: 10 ks

Číslo první formy: 864

Číslo poslední formy: 873

Teplota liti: $T_{\text{licí}}$: 1380°C



Obr. 11.1 Licí pole



Obr. 11.2 Odlévání formy

11.1. Provedení experimentu a vyhodnocení

S ohledem na závažnost vady bylo zvoleno hned několik experimentů, které měly ověřit vliv technologických parametrů na výskyt vad. Jednalo se o úpravu složení formovací směsi a to navýšením obsahu letku. Výsledky tohoto experimentu potvrdilo zaformování kvádrů polystyrénu do dutiny formy. Dále přidáním filtru s očkovadlem do vtokové soustavy, nakloněním rámu formy a změnou obsahu hliníku v tavenině. Nejprve však byl navržen způsob hodnocení vad. Byly vytvořeny etalony zachycující rozsah vah na odlitcích, které umožňují kvantifikovat sledované vlivy na jakost odlitků.

a) Způsob hodnocení velikosti vad.

Po poradě ve slévárně Tafonco s Palánem byl navržen parametr velikosti vad, který je ještě přípustný. Příslušná data byly zaneseny do tabulky a doplněny o obrázky pro srovnání.

Tab. 11.1 Rozdělení odlitků dle etalonu

Parametr	Čísla odlitků						Přípustné/Nepřípustné
1	872	873	574	575	576	577	Přípustné
2	869	870	871				Přípustné
3	864	865					Nepřípustné
4	867	868					Nepřípustné

b) Surové odlitky

Č. odlitku 864 – 865:

Vliv složení formovací směsi:

Z hlediska reoxidace kovu během odlévání je ve formovací směsi důležitý obsah letku. Letek během odlévání se oxiduje na CO, který vytváří ve formě redukční atmosféru.

Forma bez přídavku letku ve formovací směsi, jako pojivo použit bentonit, součásti formy jsou dva filtry Vukopur 75 x 75 x 22, obě části formy jsou poprášeny dělicím práškem.

Čas lití: 6 s.



Obr. 11.3 Horní díl formy



Obr. 11.4 Spodní díl formy

V této variantě by se mělo ověřit, že výskyt bodlin bude nejvyšší, protože nebyla použita žádná modifikace směsi, filtru ani technologie při formování.

Vyhodnocení:



Obr. 11.5 Vrchní strana odlitku

Celkem byly sledovány 2 odlitky. 0 bylo dobrých 2 špatné

Výskyt bodlin je u této varianty značný, přesně jak bylo předvídáno. Odlitek byl označen číslem 3 viz. Tab. 11.1.

c) Vliv Naklonění formy při odlévání

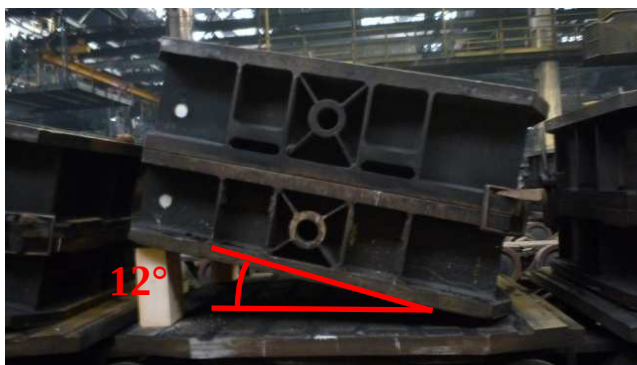
Č. odlitku 866 – 867:

Naklonění formy o 12° (maximální možné naklonění), forma bez přídavku letku ve formovací směsi, jako pojivo použit bentonit, součásti formy jsou dva filtry Vukopur $75 \times 75 \times 22$, obě části formy jsou poprášeny dělicím práškem.

Čas lití: 7 s.



Obr. 11.6 Nakloněné formy



Obr. 11.7 Stupeň naklonění

Tato varianta má za úkol zabezpečit klidnější plnění formy a tím menší naplynění, které při odlévání vzniká.

Vyhodnocení:



Obr. 11.8 Vrchní strana odlitku

Celkem byly sledovány 2 odlitky. 0 bylo dobrých 2 špatných

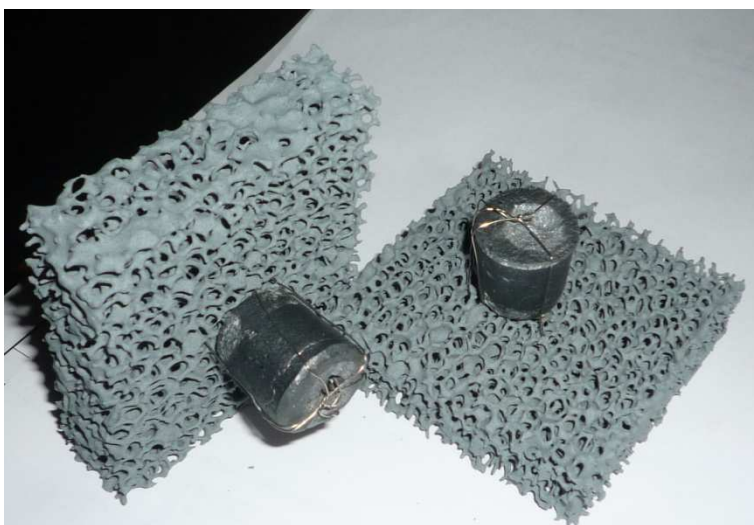
Výskyt bodlin je v oblasti s největším průřezem a nejdelším působením hladiny taveniny na povrch formy. V oblasti s menším průřezem a rychlejším zaplněním dutiny formy je výskyt bodlin minimální. Odlitek byl označen číslem 4 viz. Tab. 11.1.

d) Vliv očkování na filtru

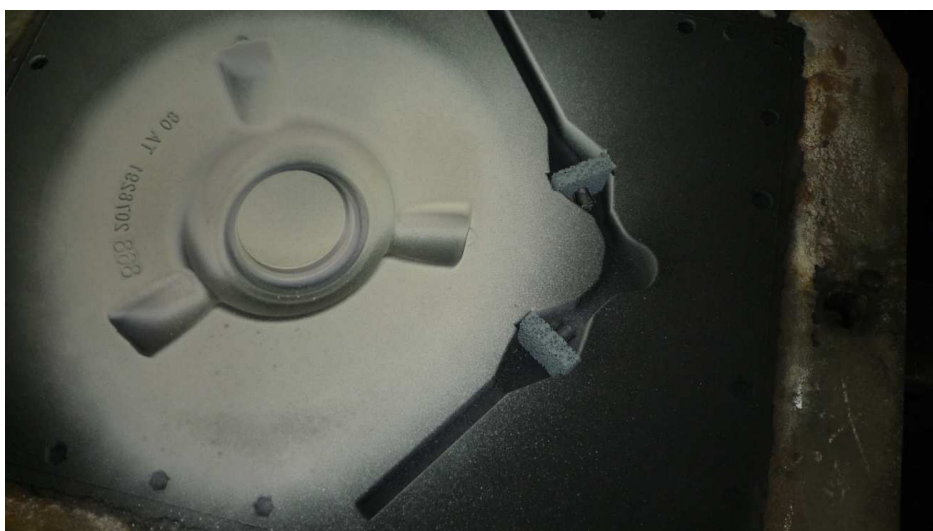
Č. odlitku 868 – 869:

Do formy vloženy upravené filtry Vukopur 75 x 75 x 22 s očkovadlem Optigran, forma bez přídavku letku ve formovací směsi, jako pojivo použit bentonit, obě části formy jsou poprášeny dělicím práškem

Čas lití: 5 s.



Obr. 11.9 Detail filtru s očkovadlem



Obr. 11.10 Filtr s očkovadlem ve spodní části formy

Úkolem této varianty je dodatečné naočkování taveniny ve formě proudem kovu přes filtry s očkovadlem.

Vyhodnocení:



Obr. 11.11 Vrchní strana odlitku

Celkem byly sledovány 2 odlitky. 2 bylo dobrých 0 špatných

Přidáním očkovadla Optigran do filtru, které mělo působit jako dezoxidovadlo neodstranilo výskyt bodlin, pouze snížilo. Odlitek byl označen číslem 2 Viz. Tab. 11.1.

e) Vliv zaprášení líce formy mletým grafitem

Č. odlitku 870 – 871:

Na povrch obou polovin nanesen letek, forma bez přídavku letku ve formovací směsi, jako pojivo použit bentonit, součásti formy jsou dva filtry Vukopur 75 x 75 x 22.

Čas lití: 5 s.



Obr. 11.12 Poprášený horní díl formy



Obr. 11.13 Poprášený spodní díl formy

Tato varianta ověřuje snížení deoxidace kovu poprášením povrchu dutiny formy mletým letkem

Vyhodnocení:



Obr. 11.14 Spodní strana odlitku



Obr. 11.15 Vrchní strana odlitku

Celkem byly sledovány 2 odlitky. 2 bylo dobrých 0 špatných

Tvorba bodlin byla v tomto případě mírně potlačena, ale vyskly se zapečeniny. Z hlediska výskytu bodlin je označen odlitek číslem 2 Viz. Tab. 11.1.

f) Letek ve formovací směsi (6,7%)

Č. odlitku 872 – 873:

Série obsahující dva filtry Vukopur 75 x 75 x 22, formovací směs obohacená letkem na 6,7%, jako pojivo použit bentonit, obě části formy jsou poprášeny dělicím práškem.

Čas lití: 5 s.

Přesun pánve na druhou dráhu pro lití poslední formy. Doba přesunu 5 minut.

Vyhodnocení:



Obr. 11.16 Vrchní strana odlitku

Celkem byly sledovány 2 odlitky. 2 bylo dobrých 0 špatných

Přidání 6% mletého letku snížil výskyt bodlin pod 5% a to bylo bráno za úspěšný výsledek. Z hlediska výskytu bodlin je označen odlitek číslem 1 Viz. Tab. 11.1. Zvýšení obsahu letku však bylo nevýhodné protože, výsledky nebyly vždy 100% a navíc zvýším obsahu letku se navýšila cena odlitku. Proto se hledely další možnosti snížení výskytu vad.

g) Vliv obsahu hliníku v tavenině

Zjistilo se, že největší výskyt bodlin je také při odlévání na syrovo do forem z bentonitových směsí a v takovém případě je iniciátorem CO vznikající v povrchových vrstvách odlitků. Proto se také doporučuje k potlačení bodlin u LKG přísada až 500 ppm Al.[12]

Vzhledem k tomuto zjištění bylo navrženo navýšit obsah Al na 0,05 % v tavenině.

Počet forem: 4 ks

Číslo první formy: 574

Číslo poslední formy: 577

Teplota lití: $T_{\text{lití}}$: 1397°C

Čas lití formy: 5-6 s

Tab. 11.2 Chemické složení

26.3.2010	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu
	3,69	2,50	0,44	0,033	0,008	0,042	0,03	0,22
	Ni	Al	Mo	Zn	Ca	Ce	N	
	0,019	0,057	0,004	0,083	0,003	0,0111	0,0069	

*Uvedené hodnoty jsou k datu 26.3.2010

Tab. 11.3 Složení tavené vsázky (4000 kg)

Množství	Jednotka	Materiál
2000	Kg	pozinkovaný plech
1900	Kg	vratný materiál
0	Kg	surové železo
75	Kg	nauhličovalo
15	Kg	FeSi kusové
3	Kg	Cu
10	Kg	třísky
70	Kg	modifikátor
12	Kg	FeSi drcený
16	Kg	očkovaadlo
3,7	Kg	Al

*Uvedené hodnoty jsou k datu 26.3.2010

Tab. 11.4 Obsah mísiče

Množství	Jednotka	Materiál
630	Kg	písku Grudzeń Las $d_{50} = 0,27$ mm
5	Kg	bentonitu, Keramost – Keribent K
1,5	Kg	dextrin

*Uvedené hodnoty jsou k datu 26.3.2010

*Obsah mísiče = jeden formovací rám

Vyhodnocení:



Obr. 11.17 Vrchní strana odlitku

Celkem byly sledovány 4 odlitky. 4 bylo dobrých 0 špatných

Jak je vidět u výše uvedeného obrázku, zvýšením objemu Al v tavenině, se zamezilo vzniku bodlin a odlitky lze považovat za „zdravé“ z hlediska výskytu bodlin. Vady, které se vyskytují na některých odlitcích přisuzujeme technice nanášení a složení zkušební formovací směsi. Z hlediska výskytu bodlin jsou odlitky označeny číslem 1 Viz. Tab. 11.1.

h) Vliv zaformovaných polystyrénových kvádrů

Po zjištění, že přidáním letku nad 6% do formovací směsi se sníží výskyt bodlin na přijatelnou hranici, byly pro ověření této skutečnosti zaformovány do horních polovin dvou zkušebních rámu dva polystyrénové kvádry o rozměrech 30 mm x 30 mm x 60 mm, protože polystyrén je největším zdrojem lesklého uhlíku.



Obr. 11.18 Zaformované polystyrenové kvádry

* složení vsázky, teplota lití, čas lití , složení formovací směsi a chemické složení stejné jako u předešle varianty g

Vyhodnocení:



Obr. 11.19 Vrchní strana odlitku



Obr. 11.20 Detail vrchní strany

Celkem byly sledovány 2 odlitky. 2 bylo dobrých 0 špatných

Na výše uvedených obrázcích lze vidět, že polystyrén jako zdroj lesklého uhlíku zamezil tvorbě bodlin a tak potvrdil předešlé mínění, že uhlík dokáže snížit výskyt bodlin. Z hlediska výskytu bodlin by byly odlitky označeny číslem 1 Viz. Tab.11.1, ale protože to byla pouze ověřovací zkouška, jsou tyto odlitky neshodné.

i) Modelování plnění dutiny formy pomocí simulace v Quick Castu

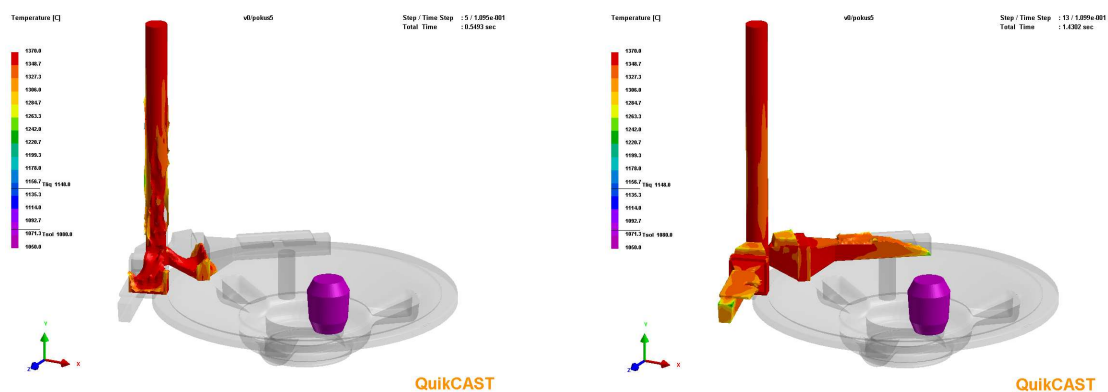
Pomocí numerické simulace byly vygenerovány data o plnění formy, rychlosti taveniny přesahující 4m/s a laminárním prouděním v kritické části dutiny formy.

Vyhodnocení:

Následující obrázky mají ukázat, že kov plní formu od spodu, kde zprvu rychle a turbulentně zaplní spodní část dutiny formy, ale následně klidně stoupá vzhůru a umožňuje svým pozvolným stoupáním a velkou plochou mezi kovem a dutinou formy vzniku zkoumaných vad.

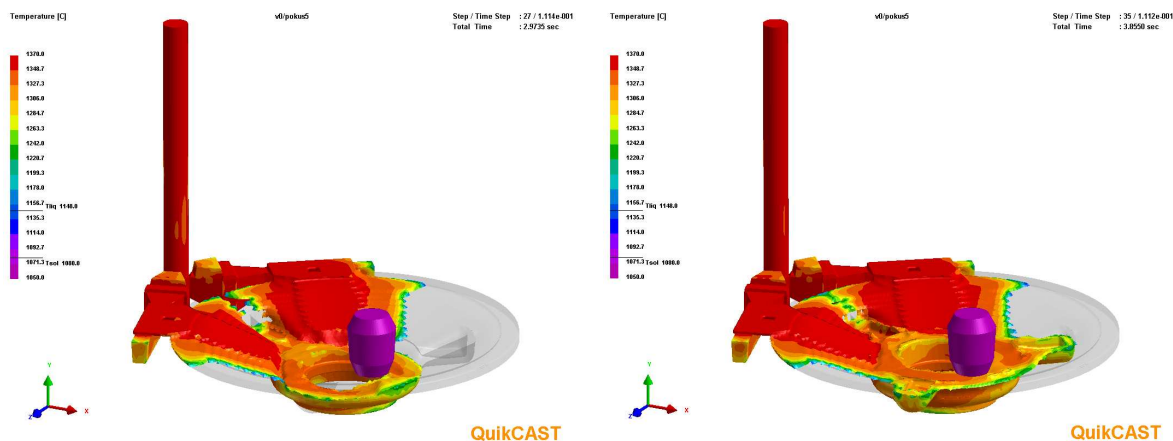
Plnění formy

V následujících obrazcích lze vidět, jak se plní dutina formy. Po zaplnění vtokové soustavy taveninou tavenina vytéká po spodní části dutiny formy na dno dutiny, ze které pak stoupá až do úplného zaplnění.



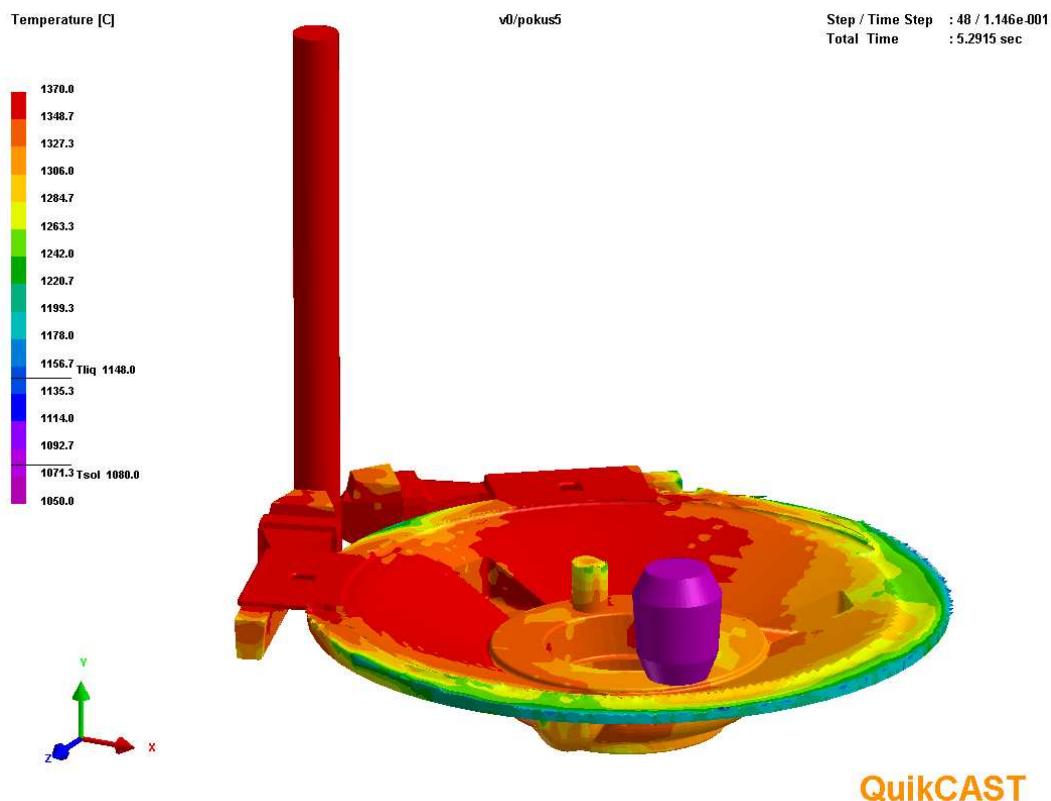
Obr. 11.21 Zaplnění vtokového kůlu po filtry

Obr. 11.22 Zaplnění vtoků po zářezu



Obr. 11.23 Plnění spodní částí dutiny formy

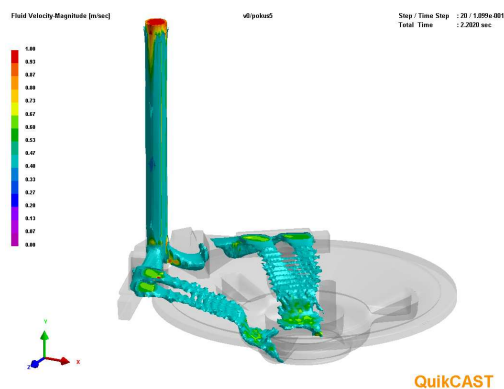
Obr. 11.24 Počátek plnění horní části dutiny formy



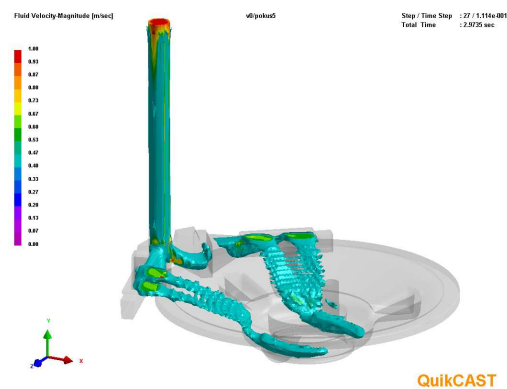
Obr. 11.25 Vyplnění dutiny formy

Rychlost taveniny přesahující 4 m/s

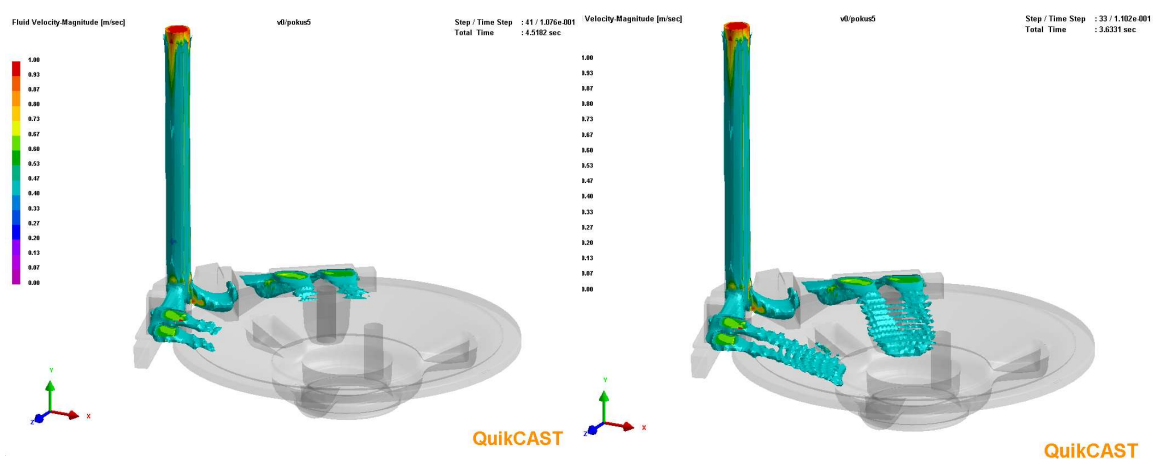
Na obrázcích níže lze vidět, jak se rychlost plnění sníží po zaplnění spodní části dutiny formy a při stoupání hladiny taveniny je rychlost nižší než 4 m/s. Modro - zeleně zobrazeny tok kovů je kov, který přesahuje 4 m/s. Z toho je vidět, že právě při zaplnění spodní části dutiny a stoupání kovu do míst , kde se vyskytují vady je rychlost plnění nižší než 4 m/s.



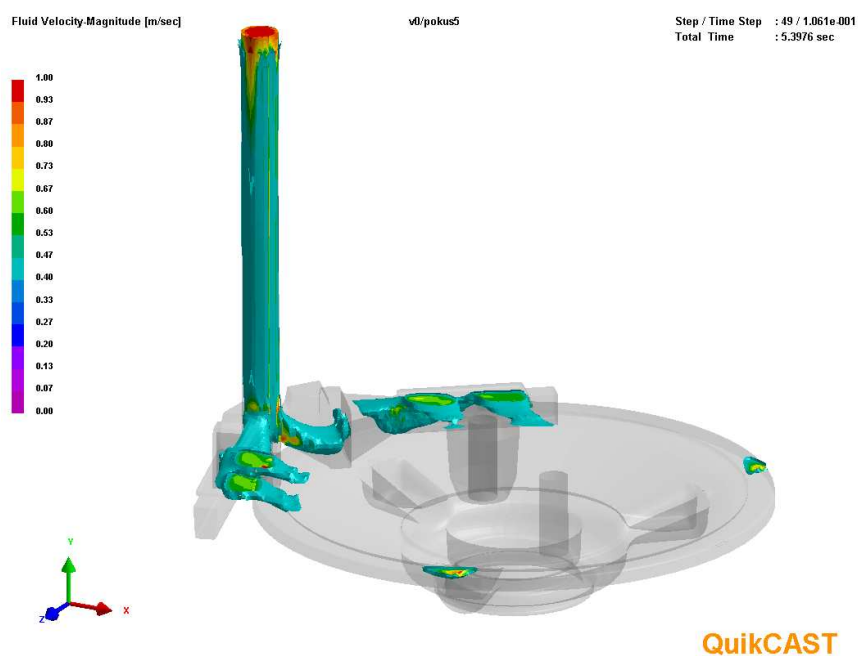
Obr. 11.26 Počátek plnění dutiny taveninou



Obr. 11.27 Zaplňování spodní části dutiny formy



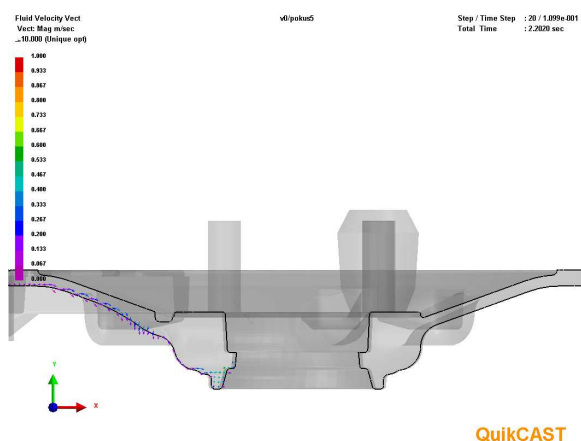
Obr. 11.28 Stoupání taveniny do vrchní části formy Obr. 11.29 Téměř úplné zaplnění dutiny formy



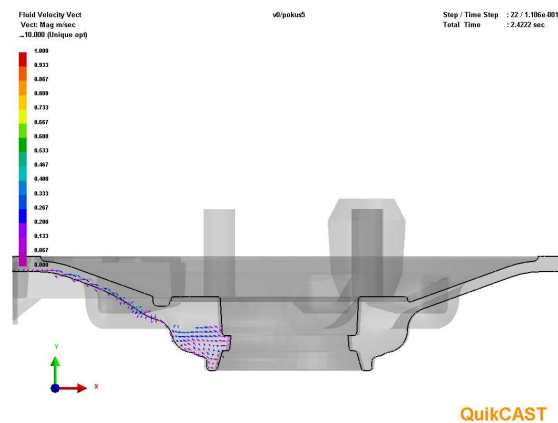
Obr. 11.30 Dutina formy vyplněna taveninou

Laminární proudění

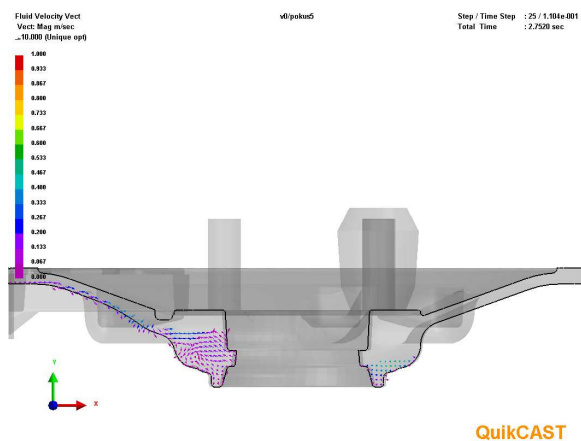
Na níže uvedených obrázcích je vidět jaký byl směr kovů při plnění dutiny formy. Ve spodní části dutiny je proudění taveniny turbulentní viz. Obr. 11.35, ale v horní části dutiny přechází do proudění laminárního a klidně stoupajícího viz. Obr. 11.37 a to může ovlivnit výskyt bodlin.



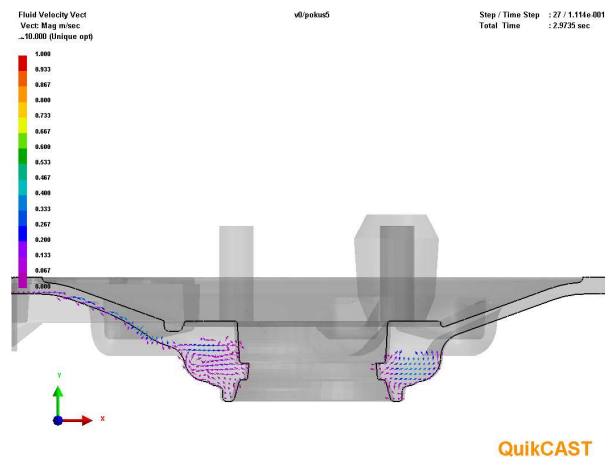
Obr. 11.31 Plnění spodní části dutiny formy



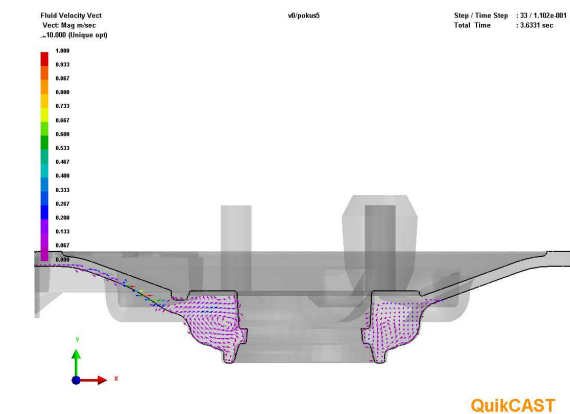
Obr. 11.32 Vznik turbulentního víření ve spodní části dutiny formy



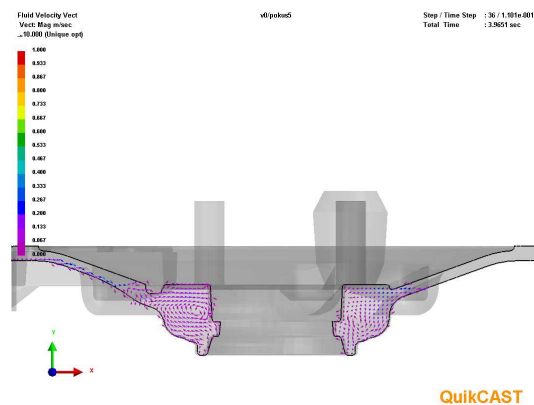
Obr. 11.33 Postupné zaplňování spodní části dutiny formy



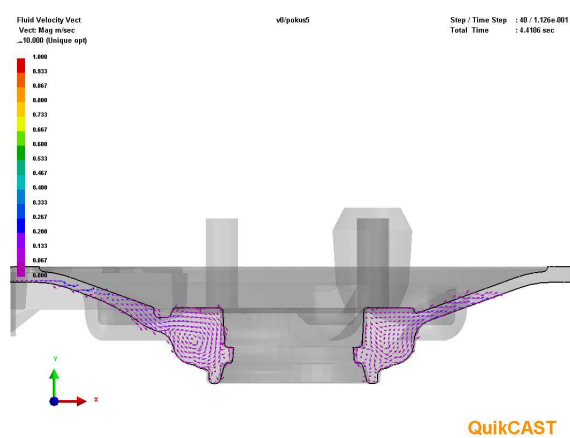
Obr. 11.34 Stoupání hladiny taveniny ze spodní části dutiny formy



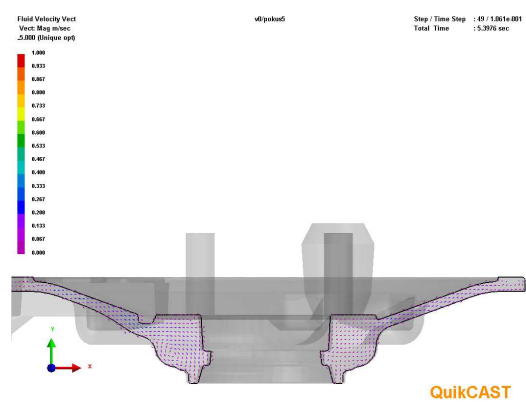
Obr. 11.35 Postupné zaplňování dutiny formy



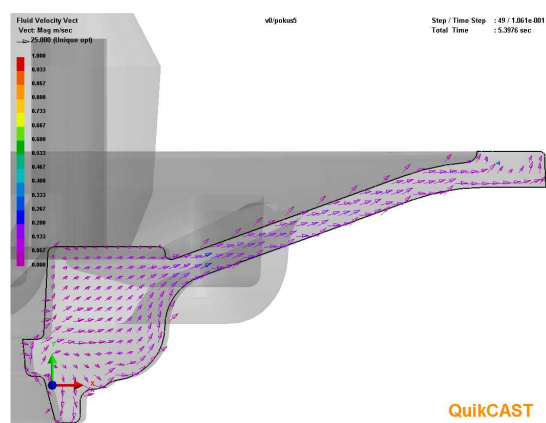
Obr. 11.36 Počátek laminárního plnění



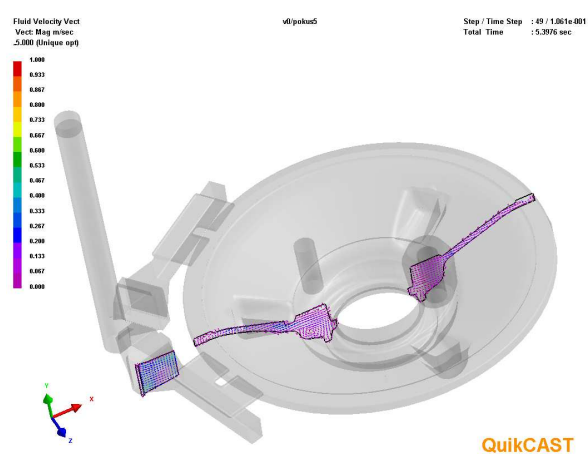
Obr. 11.37 Postupné vyplnění horní části dutiny formy



Obr. 11.38 Úplné zaplnění dutiny formy



Obr. 11.39 Detail laminárního proudění



Obr. 11.40 Zkoumaný průřez laminárního plnění

11.2. Shrnutí výsledků

Celkem byly navrženy 3 změny technologického postupu. Realizována byla jedna změna, která se jeví jako ekonomicky nejvýhodnější. K omezení výskytu bodlin vedly následující postupy:

Z navržených řešení se jako nejefektivnější osvědčilo zvýšení obsahu hliníku v tavenině. Tento způsob je velmi jednoduše aplikovatelný a výsledky jsou výborné. Zároveň je tento způsob řešení nejlevnější variantou na odstranění bodlin.

Dalším návrhem byla změna vtokové soustavy, protože pomocí výsledku numerické simulace bylo ověřeno, že plnění formy je velmi klidné a to dovoluje vznik reoxidace mezi stoupající taveninou a horní části dutiny formy. Nová vtoková soustava není zatím vyzkoušena, proto po konzultaci ve slévárně Tafonco nebude toto řešení zatím realizováno. Lze však doporučit, aby se v simulacích proudění kovu v dutině formy pokračovalo.

Posledním návrhem řešením je změna složení formovací směsi. Formovací směs je nutné obohatit o obsah spalitelných látek přidáváním 6 kg letku pro každý odlitek, aby byl jejich obsah nad 6%. Oproti běžné produkci, kdy se pohybuje obsah spalitelných látek v rozmezí 3 až 4%.

12. Návrh na úpravu technologického předpisu

Na základě zkoumání příčin výskytu bodlin bylo zjištěno, že bodliny jsou způsobeny reoxidací kovu při plnění dutiny formy. Po tomto zjištění byla navržena změna chemického složení taveniny zvýšením obsahu hliníku. Obsah hliníku je nutné zvýšit z původních 0,017% na hodnotu 0,05%. Při vyšších obsazích hliníku roste opět nebezpečí vzniku bodlin.

13. Ekonomické zhodnocení stávajícího a navrženého řešení

V první řadě je nutné zdůraznit, že bylo vypracováno srovnání neúplných nákladů, tedy nákladů, které nesledovaly režijní energie (osvětlení, vytápění budov), odpisy, mzdy apod.

Ve slévárně Tafonco bylo nutno při stávající technologii výroby tekuté litiny přidávat do každého zaformovaného rámu 6kg letku. Jedná se o zvýšení z původních 3kg o další 3 kg. K potlačení zkoumané vady bylo nutné zvýšit obsah uhlíkatých spalitelných látek ve formovací směsi nad 6%. Při ceně letku 6,4 Kč/kg je navýšení ceny odlitku o 19,2 Kč.

Navržené řešení spočívá v přidání 4 – 5 kg hliníku do 4 tunové pece, které působí jako silné dezoxidovadlo a tím nahrazuje zvýšené přidávání letku do formovací směsi. Navýšení ceny kilogramu kovu s přídavkem hliníku je o 0,06 Kč, to při surové hmotnosti odlitku 57kg zvýší cenu odlitku o 3,4 Kč. Na tomto jednoduchém srovnání lze vidět, že úspora vstupních nákladů je 15,8 Kč/odlitek.

Dalším nezanedbatelným hlediskem je snížení výskytu neshodných odlitků, které před výše uvedenými změnami byly 6,7% z celkové roční produkce (900 ks). Po zavedení opatření se snížil výskyt zkoumané vady pod 3%.

Pro podrobné ekonomické hodnocení nebyly poskytnuty údaje. Tyto údaje nehodlá slévárna zveřejnit.

Cenové srovnání těchto dvou procentuálních hodnot však nelze provést s ohledem na utajení stávajících hodnot jednotlivých nákladů.

14. Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo zjištění příčin výskytu vad u odlitků z tvárné litiny EN – GJS - 600 - 3 vyráběné střešáním s dolisováním do bentonitových forem litych na syrovo ve slévárně Tafonco Kopřivnice a navržení opatření pro jejich snížení. V zadání byl uveden požadavek na snížení zmetkovitosti pod 5%. Tento úkol předložená práce splnila.

Práce přispěla k získání a udržení si nejnáročnějších zákazníků a v neposlední řadě také ke snaze vedení slévárny Tafonco o kvalitativní růst všech vyráběných odlitků a neustálé rozvíjení nových možností. Tento progresivní přístup vedení společnosti napomáhá v udržení získaných pozic na trhu, který je v době finanční a průmyslové krize více než důležitý. Kombinace takového postupu spolu s investicemi do technického vybavení slévárny jistě povede ke zvyšování odborné úrovně a také k ekonomickému růstu.

V průběhu této práce byly nejprve provedeny měření na zjištění příčin vzniku vad, ty byly následně analyzovány a vyhodnocena příčina vzniku zkoumané vady. Měření bylo provedeno na vzorcích, které byly nařezány ve fakultních laboratořích. Na řádkovacím elektronovém mikroskopu bylo prokázáno, že místech výskytu bodlin se nacházejí produkty reoxidace. Na základě zkoumání míst odlitku s vadami zkoumání byl učiněn závěr, že vady typu BODLIN vznikly reoxidací kovů s formovací směsí během plnění dutiny kovem viz kapitola 10. Na základě těchto výsledků bylo provedeno několik ověřovacích experimentů, které měly vyloučit ostatní vlivy vzniku BODLIN viz kapitola 11. Po prozkoumání jednotlivých experimentálních odlitků byly navrženy etalony podle kterých byly jednotlivé odlitky považovány za přípustné nebo nepřípustné.

Dalším postupem v této práci bylo navrhnout řešení pro eliminaci vzniku BODLIN. Navrženy byly tři postupy, jak snížit výskyt BODLIN v odlitcích. Ty obsahovaly změny návrhu geometrie vtokové soustavy, změnu složení formovací směsi a poslední, která byla aplikovaná, změnu chemického složení tavené slitiny.

První návrh, změna geometrie vtokové soustavy byl navržen na základě výsledku z numerických simulací viz kapitola 11.2. i. Výsledky z průběhu simulace ukázaly, že plnění dutiny formy v kritickém místě je klidné a pozvolně stoupající. K odstranění tohoto klidného plnění je nutné změnit tvar rozváděcích kanálů a zářezu tak, aby se tavenina při plnění formy roztočila a tak se snížila heterogenita taveniny vzniklá reoxidací během plnění. Tento návrh nebyl experimentálně zcela ověřen a pro budoucnost se jeví jako zajímavý.

Druhým řešením jak snížit výskyt BODLIN v odlitcích byla změna chemického složení formovací směsi. Z výsledku experimentálních odlitků viz kapitola 11.2.f bylo

zjištěno, že při obsahu spalitelných látek ve formovací směsi nad 6% se výrazně snížil výskyt BODLIN. Proto bylo doporučeno přidávat do formovací směsi vyšší obsah uhlíkatých látek (letek) a to až 6 kg na jednu formu. Bohužel, tato metoda neměla vždy zaručené výsledky a proto od ní bylo upuštěno.

Posledním řešením, jak snížit výskyt BODLIN bylo změnou chemického složení taveného kovu. Při literární rešerši literatury [12] bylo zjištěno, že přidáním hliníku do taveniny by se měl snížit výskyt BODLIN. Za obsah dostatečný k dezoxidaci taveniny bylo určeno množství 0,05%Al. Dle těchto pokynů z výše uvedené literatury se uskutečnila experimentální tavba taveniny s navýšeným obsahem hliníku a odlití do čtyř zkušebních forem viz kapitola 11.1.g. Výsledky experimentu byli výborné. U odlitků vyrobených z této tavby se bubliny vůbec nevyskytly. Následně proběhla ověřovací tavba v běžné sérii, která potvrdila, že navržená změna chemického složení je plně dostačující.

Při zkoumání jiných typu odlitků s podobnými vadami by bylo vhodné se i dále zaměřit na reoxidaci, protože reoxidace kovu způsobuje výskyt některých druhů metalurgických vad, což následně vede i ke značným finančním ztrátám při výrobě všech slévárenských odlitků a polotovarů ze slitin železa.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Popis
A_5	%	Tažnost
E	GN/m^2	Modul pružnosti
EDS	-	Energiově - disperzní spektrometrická mikroanalýza
LKG	-	Litina s kuličkovým grafitem
REM	-	Řádkovací elektronový mikroskop
R_m	N/mm^2	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Smluvní mez kluzu
SEM	-	Řádkovací elektronový mikroskop
λ	-	Poissonův poměr
ρ	kg/dm^3	Hustota
σ_T	N/mm^2	Pevnost v tlaku
τ_K	N/mm^2	Pevnost v krutu
τ_S	N/mm^2	Pevnost ve střihu

Seznam použité literatury

- [1] STRÁNSKÝ, Karel K otázce tvorby bublin ve slitinách železa : Výběr přednášek ze semináře. In *Vady odlitků IV*. Kopřivnice : Česká slévárenská společnost, 2000. s. 8.
- [2] Slévárenský Bulletin 36: Vady odlitků ze slitin železa , Čs. slévárenská společnost ČSVTS, únor 1987; (Převzato z Otáhal, V.: Vady odlitku)
- [3] ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s.
- [4] International Atlas of Casting Defects, 1993, 1999, 2007 , AFS-INC Des Plaines IL, USA; (Převzato z Otáhal, V.: Vady odlitku)
- [5] Kurokawa, Y.: Analýza povrchu bodlin v litinových odlitcích, *Slévarenství*. 2005, 53, 4, s. 217-218.
- [6] Kurokawa, Y., Kambayashi, H., Ozoe, N., Ota, H., Mikaye, H.:AFS Transactions 2003, American Foundry Society, Paper 03-011(05),P. 1 až 9.
- [7] Ptáček, L.: Nauka o materiálu II, BRNO: CERM, s.r.o. ISBN: 80-7204-248-3
- [8] Otáhal, V.: Souhrn prací - Archív autora 1955 až 2005; (Převzato z Otáhal, V.: Vměstky v odlitcích ze železných slitin - Atlas vměstků)
- [9] ŠENBERGR, J.: *Www.zam.fme.vutbr.cz* [online]. 2007 [cit. 2010-03-12]. Server zaměstnanců FSI. Dostupné z World Wide Web: www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_9.doc.
- [10] Levíček, P., Stránský, K.: Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. Vyd. Praha : SNTL, 1984
- [11] Záděra, A., et al.: Reoxidační pochody při odlévání slitin železa. 1. Vyd. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009. 135 s. ISBN 978-80-02-02192-6
- [12] ELBEL, T.: Reakce produktu reoxidace kovu se slévárenskou pískovou formou. *Slévarenství*. 2005, 53, 4, s. 163-168.