

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

REOXIDAČNÍ POCHODY V OCELÍCH REOXIDATION IN STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR KOTÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠENBERGER, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Kotásek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Reoxidační pochody v ocelích

v anglickém jazyce:

Reoxidation in steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studie reoxidace ocelí v návaznosti na vznikající vady odlitků.

Cíle diplomové práce:

Teoreticky a experimentálně přispět k objasnění příčin vad odlitků, které vznikají reoxidací oceli.

Seznam odborné literatury:

1. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: VUT v Brně – Nakladatelství VUTIUM, 2008. 311 s. ISBN 987-80-214-3632-9.
2. PTÁČEK, L., aj. Nauka o materiálu II. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002.391 s. ISBN 80-7204-248-3.
3. Databáze METADEX.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 19.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc. doc.
Ředitel ústavu

RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá vývojem a ověřením metodiky sběru dat, která je následně použita při výzkumu reoxidačních pochodů v ocelových odlitcích. K posouzení míry reoxidace byla měřena aktivita kyslíku v peci, pánvi a ve formě. Dále se vyhodnotilo chemické složení strusky odebrané z nálitku formy, změny chemického složení kovu a změřily se objemy a plochy vad. Každá metoda má stručně popsán princip měření a výsledky jsou pro každou metodu vyhodnoceny. V závěru je experiment shrnut a jsou uvedeny poznatky z experimentu.

Klíčová slova

reoxidace, sekundární struskovitost, oxidace, vměstky, aktivita kyslíku, zbytkový hliník, ocel

ABSTRACT

This work is about development and methodology verification of data collection which will be used in the research of the reoxidation in steel castings. To examine reoxidation rate will be measured oxygen activity in the furnace, in the ladle and in the mould. Next it will be evaluated the chemical structure of mould slag, the chemical changes of steel and measured the volume and the area of the casting defects. Each technique is briefly described by the principle of measurement and each method has the results which are analysed. In the conclusion the experiment is summarized and there are mentioned the observations from this experiment.

Key words

reoxidation, secondary slag, oxidation, inclusions, oxygen activity, residual aluminium, steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOTÁSEK, P. *Reoxidační pochody v ocelích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Reoxidační pochody v ocelích vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 29.5.2009

.....

Petr Kotásek

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslavu Šenbergerovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady a kolektivu řešitelů z firmy DSB EURO pod vedením Ing. Pavla Veselého za umožnění provedení experimentů během provozu ve slévárně.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
1. ÚVOD	9
2. ZÁVAŽNOST ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	10
2.1. SOUČASNÝ STAV	10
3. CÍL.....	11
4. LITERÁRNÍ ROZBOR.....	12
4.1. REOXIDACE	12
4.2. VADY VZNIKLÉ REOXIDACÍ.....	14
4.2.1. Typy nekovových vměstků podle Bůžka	14
4.2.2. Plynové dutiny a jejich vznik	16
4.2.3. Kritérium vzniku bublin.....	19
5. NÁVRH EXPERIMENTU A METODIKA MĚŘENÍ	21
5.1. VYBRANÉ TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY, KTERÉ POPISUJÍ JAKOST ODLITKU	21
5.2. NUMERICKÁ SIMULACE PLNĚNÍ DUTINY FORMY	21
5.3. MĚŘENÉ VELIČINY	22
5.4. POPIS MĚŘENÍ AKTIVITY KYSLÍKU A TEPLoty KOVU	22
5.5. PŘILITÉ VZORKY	23
5.5.1. Příprava vzorků pro metalografický výbrus	25
5.6. METODIKA MĚŘENÍ PLOCH A OBJEMŮ VAD.....	25
6. PŘÍPRAVA EXPERIMENTU.....	27
6.1. POPIS STÁVÁJÍCÍ TECHNOLOGIE V DSB EURO	27
6.1.1. Model a odlitek	27
6.1.2. Materiál odlitku	27
6.1.3. Formovací materiály.....	28
6.1.4. Nátěr forem a jader.....	28
6.2. FORMOVÁNÍ A LITÍ	28
6.2.1. Forma č.1	29
6.2.2. Forma č.2	29
6.2.3. Forma č.3	29
6.2.4. Forma č.4	29
6.2.5. Sledování procesu formování a lití.....	30
7. PROVÁDĚNÁ MĚŘENÍ	31
7.1. VÝSLEDKY MĚŘENÍ AKTIVITY KYSLÍKU.....	31
7.1.1. Měření aktivity kyslíku v peci a pánvi	31
7.1.2. Měření aktivity kyslíku v odlitcích	31
7.1.3. Vyhodnocení odebraných strusek.....	35
7.2. ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ	36
7.2.1. Chemická analýza vzorků.....	36
7.2.2. Vyhodnocení změny $Al_{r.k.}$	37
7.2.3. Analýza metalografických výbrusů.....	38
7.3. MĚŘENÍ PLOCH A OBJEMŮ VAD	40
7.3.1. Naměřené hodnoty ploch a objemů vad	40
8. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ	43

8.1. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ NA ODLITKU 151 25 B2	43
8.1.1. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 1.1.....	43
8.1.2. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 2.1.....	44
8.1.3. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 3.1.....	46
8.1.4. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 4.1.....	46
8.1.5. Interpretace výsledků mikroanalýz vzorků odlitku 151 25 B2.....	48
8.2. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ NA ODLITKU 151 25 B3	49
8.2.1. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 1.2.....	49
8.2.2. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 2.2.....	51
8.2.3. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 3.2.....	51
8.2.4. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 4.2.....	53
8.2.5. Interpretace výsledků mikroanalýz vzorků odlitku 151 25 B3.....	53
8.3. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ NA ODLITKU 151 25 B4	54
8.3.1. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 1.3.....	54
8.3.2. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 2.3.....	57
8.3.3. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 3.3.....	57
8.3.4. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 4.3.....	58
8.3.5. Interpretace výsledků mikroanalýz vzorků odlitku 151 25 B4.....	61
9. INTERPRETACE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU.....	62
10. ZÁVĚR.....	64
11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	67

1. ÚVOD

Výroba ocelových odlitků je doprovázena vznikem vad. Vady se dělí na povrchové a vnitřní. Závažnou vadou je sekundární struskovitost, která se musí odstraňovat, čímž se slévárnám zvyšují náklady na výrobu odlitku.

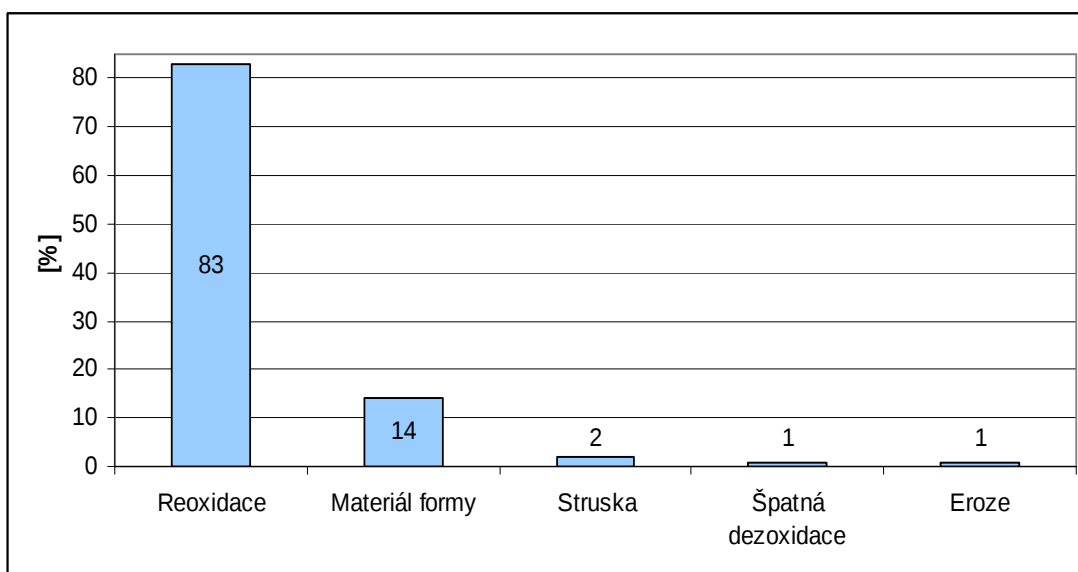
Struskovitostí jsou myšleny vady vzniklé během proudění kovu vtokovou soustavou a dutinou formy. Vady tvoří produkty reoxidačních pochodů v tavenině a vměstky z materiálů líce formy a nátěrů. Výsledkem je sekundární struska na odlitcích, která obsahuje produkty reoxidačních pochodů a materiál spláchnutý z líce formy a vtokové soustavy.

Slévárna DSB EURO s.r.o. řeší dlouhodobý problém se sekundární struskovitostí odlitků. Uvedená vada přináší významné vícenáklady zejména na čistírenské a opravárenské operace. Opravy zaberou často stovky hodin a mají vliv na kapacitu čistírny a dodržování termínů zakázek.

Firma provedla ve spolupráci s VŠB TU Ostrava a VUT Brno průzkum vzniku vad s cílem zjistit, jaké faktory mají na tvorbu sekundární strusky vliv. Z výzkumu vyšlo najevo, že příčinou struskovitosti jsou reoxidační pochody. Objem vad u některých odlitků činil řádově desítky až stovky cm³ [1,2]. Předpokládalo se, že zadržování jsou tvořeny produkty reoxidace a lze proto očekávat rozdíl v obsahu reoxidačních prvků v pánvi a v odlitku.

2. ZÁVAŽNOST ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Problémy s reoxidací se nevyhýbají žádné slévárně železných slitin. Opravy veškerých vad odlitků zvyšují náklady firmy na výrobu odlitku, jinými slovy snižují zisk. V roce 1987 provedla Americká slévárenská společnost (AFS) ve 300 slévárnách oceli průzkum zaměřený na zjištění původu vad ocelových odlitků [3]. Z grafu 2.1 je zřejmý vliv reoxidace na výskyt vměstků v odlitcích. Aktuálnost a akutnost řešení problému reoxidačních pochodů v ocelích je z daného průzkumu zřejmá.



Graf 2.1 – Rozdělení zdrojů makroskopických vměstků u uhlíkových a nízkolegovaných ocelí [3].

2.1. SOUČASNÝ STAV

Rešerší českých odborných časopisů a příspěvků z odborných konferencí bylo zjištěno, že k problematice reoxidace kovu u nás chybí práce, které by se jí zabývaly z fyzikálně-chemického hlediska. Dosavadní publikace vycházely ze sledování příčin vzniku vnitřních a vnějších vad z hlediska jakosti kovu v pánvi a reakce kovu s formovacím materiálem [2].

V současné době se kvalita povrchu ocelových odlitků řeší opravami, čímž se výrazně zvyšují náklady na výrobu daného odlitku. Předpokládá se, že výsledky výzkumu budou využity pro zlepšení jakosti metalurgických polotovarů. Tím bude také snížen objem práce na rizikových pracovištích alepší se hygiena výrobního prostředí. Zlepšení jakosti se dosáhne výzkumem reoxidace a následujícím vývojem technologie, která bude ověřena na vzorkových kusech.

3. CÍL

Cílem projektu je získání nových poznatků o reoxidačních a ostatních pochodech probíhajících během plnění formy. V práci se bude vyvíjet a ověřovat metodika sběru dat a další interpretace získaných dat. Získaná data a poznatky najdou uplatnění v dalším vývoji nové technologie výroby ocelových odlitků.

Tato diplomová práce je dílčí součástí řešeného projektu MPO/FT-TA5/089 – TANDEM - „Výzkum a vývoj nové technologie odlévání slitin železa“. V práci je řešen problém sledování reoxidačních pochodů na dále popsanych odlitcích.

Zadána byla část projektu, která na daném odlitku zahrnuje experimentální výzkum podmínek sekundární oxidace kovu během plnění formy, měření aktivity kyslíku v peci, pánvi a v odlitku, sběr a analýza produktů reoxidace, mikroanalýza vměstků v okolí vnitřních a povrchových vad, odhad míry reoxidace v místech odlitku ovlivněných reoxidací na základě složení jejich produktů včetně zkoumání morfologie vměstků. Dále bylo provedeno vyhodnocení experimentu a určení tendence dějů s možnou úpravou slévárenské technologie u vzorkového odlitku dle nových poznatků z experimentu. Posledním článkem práce bude ověření nové technologie na vzorkovém odlitku, pokud bude technologie upravována.

Zvládnutí technologie, která s využitím výsledků dokáže podstatně snížit rozsah vad, bude znamenat pro slévárnu zvýšení konkurenceschopnosti. Snížení rozsahu vad umožní orientaci výroby na náročný sortiment, který nyní mnozí naši výrobci odmítají, protože nejsou schopni zajistit požadovanou vnitřní a vnější kvalitu výrobků bez případných oprav. Výsledky práce přispějí k vypracování moderní technologie výroby odlitků o lepších parametrech vnitřní a vnější povrchové jakosti.

4. LITERÁRNÍ ROZBOR

4.1. REOXIDACE

Termín reoxidace označuje oxidaci taveniny od ukončení primární dezoxidace až po ztuhnutí kovu ve formě. Je to proces, kdy tekutý dezoxidovaný kov přijímá kyslík ze svého okolí, což je okolní atmosféra, dutina formy, vtoková soustava či vyzdívka pánve. Reoxidace se často dělí na dvě údobí – těmi jsou sekundární oxidace a terciární oxidace. Sekundární oxidace souvisí se zvyšováním koncentrace kyslíku během setrvání kovu v pánvi například při transportu, během přelévání tekutého kovu z větší do menší pánve či s prouděním a vířením kovu v dutině formy [4].

Terciární oxidací se rozumí oxidace kovu v odlitku během tuhnutí mezi teplotami likvidu a solidu. Hranice, kdy sekundární oxidace končí a terciární začíná je experimentálně složitě zjištělná. Chladnutím kovu roste jeho viskozita, čímž mají produkty reoxidace zhoršené podmínky pro přestup do strusky. Produkty terciární oxidace zůstanou v odlitku zachyceny všechny. V textu se od sebe tyto dvě údobí lišit nebudou a budou shodně označovány jako reoxidace. Produkty vzniklé za sekundárního a terciárního oxidačního údobí také nebudou rozlišovány [5].

Vliv reoxidace je zřejmý na zhoršené vnitřní čistotě oceli a s tím související zhoršení materiálových a slévárenských vlastností odlévané oceli – vrubová houževnatost, tažnost, obrobitelnost, zabíhavost a jiné. Dále reoxidační pochody způsobují vážné či neopravitelné vady jako jsou bodliny, bubliny či zadraveniny. Vliv na všechny tyto skutečnosti má zejména promíchávání kovu při lití či konstrukce vlastního odlitku a vtokové soustavy. V případě oxidace kovu v pánvi je možné vměstky zachytit na filtru vloženém do vtokové soustavy. Vliv konstrukce odlitku a vtokové soustavy lze omezit například spodními vtoky. [4,5]

Nejčastějším dezoxidačním prvkem v našich slévárnách je hliník. Ten je v oceli přítomen většinou ve velmi nízké koncentraci z důvodu možného negativního ovlivnění vlastností materiálu odlitku. Obsah zbytkového hliníku bývá obvykle udržován v rozmezí 0,030 až 0,060 hm.%. Spodní koncentrace je taková, která zabrání po celou dobu odlévání a tuhnutí proběhnutí uhlíkové reakce a je vyjádřena rovnicí (1).

Minimální koncentrace hliníku pro zabránění průběhu uhlíkové reakce [4]

$$[\%Al_{r.k.}] > 0,123[\%C]^{3/2} \quad (1)$$

Maximální množství hliníku je omezeno možností vzniku lasturových lomů. Závislost obsahu hliníku v kovu a střední tloušťky stěny **R** je vyjádřen rovnicí (2).

Maximální koncentrace hliníku, aby nevznikaly lasturové lomy [4]

$$[\%Al_{r.k.}] \geq \frac{0,26}{(2R)^{5/8}} \quad (2)$$

Hodnota střední tloušťky stěny R se vypočítá pomocí vztahu (3), kde P představuje plochu průřezu a O obvod průřezu stěny odlitku. Všechny hodnoty jsou udány v cm [4].

Rovnice pro výpočet střední tloušťky stěny [4]

$$R = \frac{P}{O} [cm] \quad (3)$$

Tloušťka stěny odlitku má vliv také na výskyt bodlin. Ocelové odlitky o menších tloušťkách stěn, které rychleji tuhnou jsou náchylnější na výskyt bodlin než odlitky tlustostěnné, u nichž krystalizace probíhá pomaleji. Souvisí to s difuzí kyslíku a vodíku z povrchu formy do odlitku. Vysoká počáteční koncentrace kyslíku na rozhraní forma – ocel je téměř stejná u tenkostěnného i tlustostěnného odlitku. U rychle chladnoucího tenkostěnného odlitku je pokles koncentrace kyslíku malý a odstranění vysokého obsahu kyslíku z kůry odlitku vyžaduje značný přebytek dezoxidačního hliníku [6].

Pokud dojde k silné reoxidaci, může se koncentrace hliníku snížit až na takovou hodnotu, při které se začnou oxidovat i prvky s nižší afinitou ke kyslíku než hlavní dezoxidační prvek. Těmi jsou křemík, mangan, železo a uhlík. Potom v odlitku vznikají oxidy či oxisulfidy. Pokud nastane oxidace uhlíku, vynikají bodliny a bubliny. Přítomnost chromu nebo titanu, které tvoří pevné nerozpustné oxidy, způsobuje zvýšení sklonu ke tvorbě zadrbenin.

Za běžných provozních podmínek nelze reoxidaci zcela zabránit, ale je možno ji omezit. Například pod dobře dezoxidovanou vrstvou strusky k reoxidaci nedochází, ovšem při lití působí na kov kyslík z atmosféry, po kontaktu kovu s formou také atmosféra a materiál formy. Další vliv má také charakter proudění kovu ve vtokové soustavě a formě [4].

Rozsah reoxidace je podle práce Rouse nejvíce ovlivněn formovací směsí. U syrových forem s bentonitem nebo vodním sklem lze předpokládat největší výskyt sekundární struskovitosti. Hlavním důvodem je vývin vodní páry, která vznikne po nalití taveniny do dutiny formy [7]. Vodní pára má silně oxidační charakter, čímž roste okysličovací potenciál formy. Mnohem menší oxidační charakter mají formy sušené a formy s organickými pojivy. Dalšími faktory ovlivňující rozsah reoxidačních pochodů způsobených formou jsou prodyšnost formy, obsah uhlíkatých látek ve formovací směsi a použité ostřívo.

Kvalitní odvod plynů z formy dovolí velkému objemu plynů uniknout do okolí formy, takže se nezvýší oxidační účinek dutiny formy natolik, jako kdyby byla forma neprodyšná. U forem s otevřenými nálitky je podmínky dobrého odvodu plynů dosaženo.

Při odlévání litin má vliv na vznik redukční atmosféry ve formě také obsah uhlíkatých přísad. Formy s organickými pojivovými systémy mají ve formovací směsi zpravidla větší vývin lesklého uhlíku než syrové formy. Lesklý uhlík má největší vliv na vznik redukční atmosféry. S rostoucím obsahem uhlíkatých přísad dochází ke snižování podílu vad vzniklých reoxidací, zejména pak bodlin a sekundární struskovitosti [5,7,8].

Použité ostřívo by mělo být chemicky netečné vůči odlévanému kovu. Pokud tomu tak není, musí se provést náležitá opatření – nátěr lícni strany formy např. zirkonovými nátery. Když tak neučiníme, po vytlučení odlitku lze na některých

místech sledovat zcela odlišné povrchové vlastnosti. Může docházet ke tvorbě oxidického filmu na bázi $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$. Oxidy MnO a FeO , které jsou zásaditého charakteru jsou silně reaktivní s kyselým SiO_2 . Mohou se tvořit nízkotavitelné silikáty podporující vznik zapečenin a sekundární strusky. Vznik křemičitanu železnatého a křemičitanu manganatého lze značně omezit snížením licí teploty, ale hlavně dokonalou dezoxidací taveniny. Další možností, jak silně omezit či téměř zamezit chemické penetraci, je provést nátěr dutiny formy bezvodným nátěrem zásaditého oxidu. Zcela zabránit průběhu chemických procesů lze změnou druhu formovacího materiálu s kyselým charakterem za formovací materiál s charakterem zásaditým – např. chromit. [5,9].

4.2. VADY VZNIKLÉ REOXIDACÍ

Reoxidační pochody v odlitcích bývají zdroji vad a vměstků, které mohou negativně ovlivnit výsledné vlastnosti odlitku. Základními typy vad, které jsou spojeny s reoxidací, jsou plynové bubliny, bodliny a sekundární struskovitost [4]. Vměstky sekundární a terciární oxidace – zde obecně reoxidace, ovlivní výsledné vlastnosti kovu mnohem více než vměstky vzniklé za primární oxidace [5].

Nekovové vměstky mají vliv na vlastnosti oceli, hlavně pak na houževnatost a přechodové chování. Vlastnosti jsou ovlivněny množstvím vměstků, jejich morfologií a rozložením vměstků v kovové matrici. Tvar (morfologie) vměstku závisí na jeho chemickém složení, které je přímo ovlivněno podmínkami dezoxidace kovu. Sims a Dahl studovali vliv obsahu hliníku na tvar vměstků v oceli a vliv jejich tvaru na houževnatost [4]. Výsledkem jejich práce je rozdělení vměstků do tří skupin. Další rozšíření o čtvrtou skupinu provedli Sims a Briggs. Tyto klasifikace doplnil Bůžek o další typy, protože s nástupem nových typů dezoxidovadel na základě kovů vzácných zemin (KVZ) v 60. letech 20. století vznikly nové typy vměstků, které bylo složité zařadit do stávajících skupin [10].

Vměstky vzniklé reoxidací mohou být mikroskopických až makroskopických rozměrů. Makroskopické vměstky bývají často tvořeny shluky. Rozložení vměstků v odlitku může být rovnoměrné nebo se mohou vměstky soustřeďovat do částí odlitku. Často obsahují oxidy prvků s menší afinitou ke kyslíku než hliník. Vyloučení produktů reoxidace může být v kombinaci se sulfidy, kterým slouží oxidy jako zárodky. V okolí reoxidačních vměstků bývá snížený obsah zbytkového hliníku nebo jiného dezoxidačního prvku [5].

4.2.1. Typy nekovových vměstků podle Bůžka

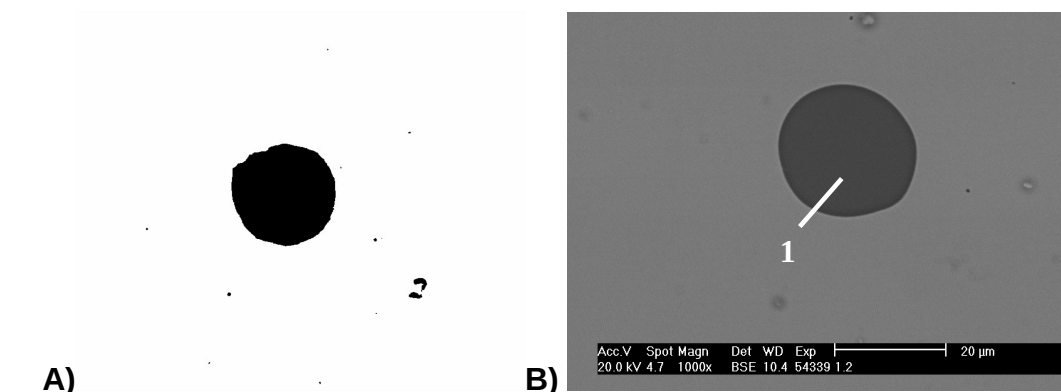
Podle typu vznikajících vměstků lze posoudit, jaký byl průběh reoxidace ve zkoumaném místě odlitku. Tavební vzorek dobře dezoxidované oceli má obsah $\text{Al}_{\text{r.k.}}$ nejméně 0,030%. Během doby, než dojde k odlití, tavenina reoxiduje a podle zvýšení aktivity kyslíku a na něm závislém snížení obsahu zbytkového hliníku, se různé morfologie vměstků.

Vměstky I. typu

Z hlediska zkoumání reoxidace nejdůležitější typ vměstku. Vzniká v taveninách nebo místech taveniny s vysokou aktivitou kyslíku. Objevuje se v místech, kde proběhla silná reoxidace a kde byl spotřebován veškerý zbytkový hliník. Je typický pro neuklidněné a polouklidněné oceli. U nedostatečně

dezoxidovaných taveb značí nebezpečí vzniku bodlin a bublin [4]. Jejich velikost obvykle bývá od jednotek mikrometrů do několika stovek mikrometrů.

Vměstky I. typu vznikají při obsahu $Al_{r.k.} < 0,005\%$, mají kulovitý tvar a pokud jsou rovnoměrně rozložené, nemají žádný negativní vliv na výsledné vlastnosti oceli [10]. Může se jednat o oxidické či o oxisulfidické vměstky. To závisí na aktivitě kyslíku. V tomto případě je vysoká, takže se oxiduje se mimo Al také Mn a další prvky a vměstky obsahují i síru. Pak se jedná o oxisulfidické vměstky na bázi Al, Si, Mn, Fe, které jsou při teplotě tavení oceli tekuté [4].



Obr. 4.1 - Srovnání vměstku I. typu uváděného v literatuře (A) [4] s vměstkem nalezeným ve vzorku 4.3. (B)

Podle literatury [11] je průměrné chemické složení produktů reoxidace v mezích, které uvádí *tab. 4.1*. Toto zjištění je pro syrovou formu s ostřivem SiO_2 . Vznik oxidu manganu je vysvětlitelný pouze pomocí reoxidačních pochodů v odlitku, protože mangan není obsažen v žádném formovacím materiálu či vyzdívce pánve.

Tab. 4.1 – Průměrné složení produktů reoxidace [11]

MnO	SiO_2	Al_2O_3	FeO
10-30%	40-70%	5-25%	3-8%

Ve zkoumaném odlitku Č.M.15 125 bylo bodově analyzováno složení několika vměstků. Podíl prvků na složení vybraných vměstků vystihuje následující *tab. 4.2*.

Tab. 4.2 – Průměrné chemické složení produktů reoxidace v at. %

Mn	Si	Al	Fe
12-18%	18-22%	10-45%	0-7%

Vměstky I.b typu

Zavedením vměstků typů „b“ byla Bůžkem zpřesněna Simsova klasifikace. Zpřesnění spočívá v tom, že rozdílné chemické složení od klasického vměstku je rozlišitelné podle odlišného zbarvení při zachování tvaru vměstku [10]. Běžně se toto porovnávání barev neprovádí a zkoumá se pouze tvar vměstku.

Vměstky I.b typu jsou kulovité vměstky, které jsou odlišné od vměstků I. typu chemickým složením. Vznikají zejména po modifikaci vměstků pomocí Ca. Při modifikaci dochází k přeměně vměstků II. a III. typu na kulovité vměstky.

V porovnání s II. a III. typem způsobí I.b typ lepší mechanické vlastnosti, zejména lepší houževnatost a plastické vlastnosti. Kulovitěho tvaru vměstku se požaduje tam, kde je potřeba snížit tranzitní teplotu oceli, tzn. oceli pro práci za teplot až - 60°C. Tyto vměstky také vznikají dezoxidací pomocí Al + KVZ [4,10].

Vměstky II. typu

Tento typ vměstků byl pozorován v práci Simse a Dahla při vyšším obsahu zbytkového Al, konkrétně $Al_{r.k.}$ od 0,005 do 0,015 % a z toho plynoucím nižším obsahem kyslíku než u předchozího typu vměstků [10]. Al_2O_3 se vyloučí jako samostatná fáze, která někdy může obsahovat Fe. Síra se vylučuje až na konci tuhnutí, a proto se MnS vylučuje až z posledních zbytků taveniny ve formě malých vměstků, které tvoří charakteristický tvar řetízků po hranicích zrn. Vměstky II. typu ve srovnání s vměstky I. typu výrazně zhoršují mechanické vlastnosti oceli. Proto se požaduje vměstky II. typu potlačit (nebo alespoň zjemnit zrna) zejména u ocelí pracujících za velmi nízkých teplot. Obecně platí čím hrubší zrna tím horší houževnatost, protože jak již bylo zmíněno, tyto vměstky se vylučují po hranicích zrn. [4].

Vměstky II.b typu

Tento typ vzniká při nadkritických množstvích titanu nebo tantalu [10].

Vměstky III. typu

Vměstky III. typu se tvoří při obsahu $Al_{r.k.} > 0,02\%$. Tato fáze má hranatý tvar a je náhodně rozmístěna v kovové matici. Zpravidla se nejedná o čistý MnS vměstek, ale obsahuje vměstky Al_2O_3 či oxidy jiného dezoxidovadla, na kterých často vyrůstá. Přítomnost vměstků III. typu znamená lepší vlastnosti oceli než v přítomnosti vměstků II. typu, ale horší než za přítomnosti vměstků I. typu [10].

Vměstky III.b typu

Vzniká při nadkritických množstvích titanu, zirkonu ($Zr_{r.k.} > 0,10\%$) a ceru [10].

Vměstky IV. typu

Vměstky IV. typu způsobuje přebytek silných dezoxidačních prvků (např. Al, KVZ). Dochází k vyloučení komplexních sulfidů KVZ, které se vyskytují ve shlucích a mají nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti oceli, zejména na houževnatost [10].

Z uvedeného rozdělení typů vměstků a jejich popisů vyplývá, že v důsledku silné reoxidace mohou vznikat zejména vměstky I. typu. Tyto vměstky vznikají při vysokých aktivitách kyslíku a nízkých obsazích zbytkového hliníku v tavenině.

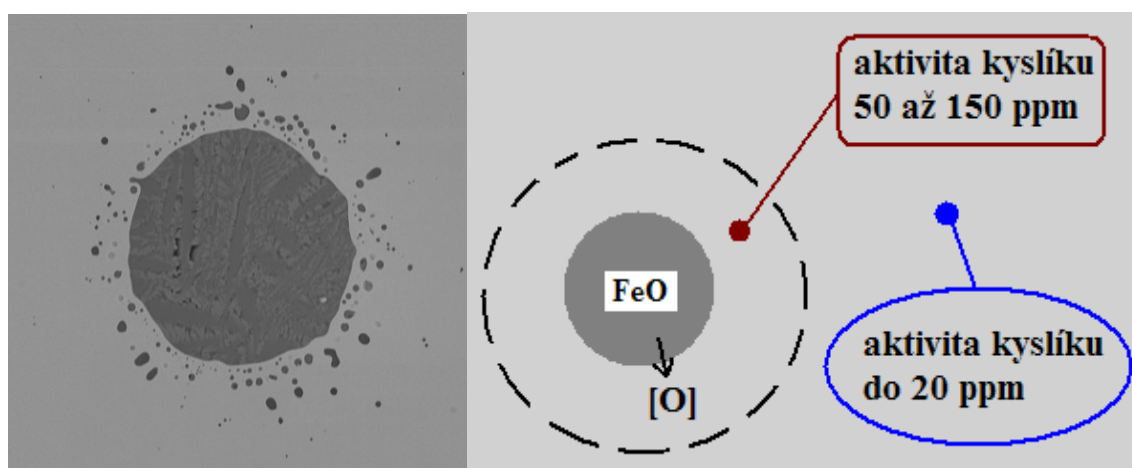
4.2.2. Plynové dutiny a jejich vznik

Reoxidace ocelí je doprovázena místním nebo celobjemovým zvýšením aktivity kyslíku. Po dezoxidaci tekutý kov hned přijímá kyslík z atmosféry a tím se oxidují prvky s vysokou afinitou ke kyslíku, které slouží jako dezoxidovadla. Oxidací těchto prvků klesá jejich obsah a roste koncentrace kyslíku. Pokud se sníží podíl hlavního dezoxidačního prvku (Al), dochází k oxidaci prvků s nižší afinitou ke kyslíku jako jsou Fe, Si, Mn nebo C [5]. Tyto pochody mohou vést

k sekundární struskovitosti, která bývá často doprovázena strusko-plynovými vadami. Pokud aktivita kyslíku překročí rovnovážnou koncentraci kyslíku a uhlíku, může být dané místo nebo celý objem odlitku postižen bublinami oxidu uhelnatého. Omezení reoxidace je předpokladem pro výrobu vysoce jakostních ocelových odlitků [4,5].

Jak již bylo zmíněno, nejdůležitějšími z hlediska sledování reoxidace jsou vměstky I. typu. Často se jedná o komplexní vměstky na bázi $\text{FeO-SiO}_2\text{-MnO-Al}_2\text{O}_3$. Vznikají při vyšších koncentracích kyslíku, tzn. malých koncentracích zbytkového hliníku nebo jiného dezoxidovadla. Při místním zvýšeném obsahu a aktivitě kyslíku dochází k obohacování okolí vměstku kyslíkem (viz. obr. 4.2), což může při kritických hodnotách poměru kyslík – uhlík vyvolat vznik plynových dutin CO (dle vzorce 4). Na vzniklé bubliny se dále mohou navazovat další plyny jako například vodík či dusík a bublinu tak zvětšovat [4].

Rovnice vzniku oxidu uhelnatého [12]



Obr. 4.2 – Aktivity kyslíku v okolí vměstku - obr.vlevo [2], obr. vpravo[12]

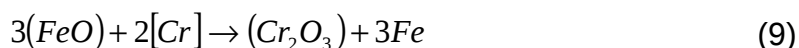
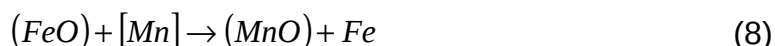
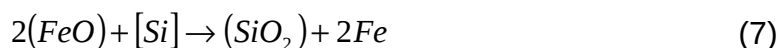
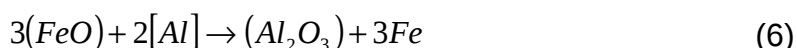
Dobře dezoxidovaná ocel má obsah $\text{Al}_{r.k.} > 0,030\%$ v rozboru vzorku tavby. Je to jedna z podmínek, která je nezbytná pro to, aby neproběhla reoxidace v celém objemu taveniny [4].

První produkty reoxidace se objevují ve vtokové soustavě, kde po obvodu rozváděcích kanálů vzniká tenká vrstva FeO. Děj vystihuje rovnice (5). Tato vrstva postupně narůstá až ji začne proudící kov strhávat do dutiny formy.

Vtažené vměstky FeO se pak dezoxidují hliníkem podle rovnice (6). Aktivita kyslíku bývá během tohoto údobí obvykle v rozmezí 4 až 20 ppm. Při postupném spotřebovávání nejsilnějšího dezoxidačního prvku a postupném zvyšování aktivity kyslíku přicházejí na řadu prvky s nižší afinitou ke kyslíku – slabší dezoxidovadla. Při aktivitě kyslíku kolem 50 ppm se začíná oxidovat křemík podle rovnice (7) a vzniká SiO_2 . Při dalším zvyšování aktivity kyslíku se může začít oxidovat Mn (8) a další prvky postupně podle klesající afinity prvku ke kyslíku.

Při obsahu kyslíku od 0,23 až 0,25% [4] v oblasti oxidického vměstku se již začíná tvořit čistý FeO a zvyšuje se nebezpečí vzniku bublin v jeho okolí. Tyto pochody vystihuje *graf 4.1*.

Rovnice oxidačních dějů [12]



Pokud vznikají čisté oxidy Al_2O_3 , vznik bublin není v okolí vměstku možný, protože hliník má velkou afinitu ke kyslíku a kyslík se nedokáže uvolňovat, aby mohl oxidovat okolí vměstku. Pokud vzniknou komplexní vměstky na bázi FeO-SiO₂-MnO-Al₂O₃ či oxid FeO, může být aktivita kyslíku na takové úrovni, že kyslík difunduje do okolí. Pokud se aktivita kyslíku zvýší nad úroveň možného vzniku CO, mohou vzniknout v odlitku bubliny nebo bodliny.

Pro hodnocení reoxidace je použit modelový výpočet oxidačních pochodů [13].

Výpočet byl proveden pro rovnice vznikajících oxidů, nikoliv pro reoxidační pochody, které jsou uvedeny v rovnicích 6 až 9. Je tedy potřeba zavést obecnou rovnici vzniku oxidu:

Rovnice vzniku obecného oxidu kovu [13]



Pro chemickou reakci číslo (10) sestavíme rovnice pro výpočet ΔG a rovnovážné konstanty. Tyto prvky včetně uhlíku jsou značeny pro jednoduchost rovnic jako „Me“.

Závislost rovnovážné konstanty a volné entalpie [13]

$$\Delta G_{Me} = -RT \ln K_{Me} \quad K_{Me} = e^{\left(\frac{-\Delta G_{Me}}{RT}\right)} \quad K_{Me} = \frac{a_{Me_xO_y}}{a_{Me}^x \cdot a_O^y} \quad (11)$$

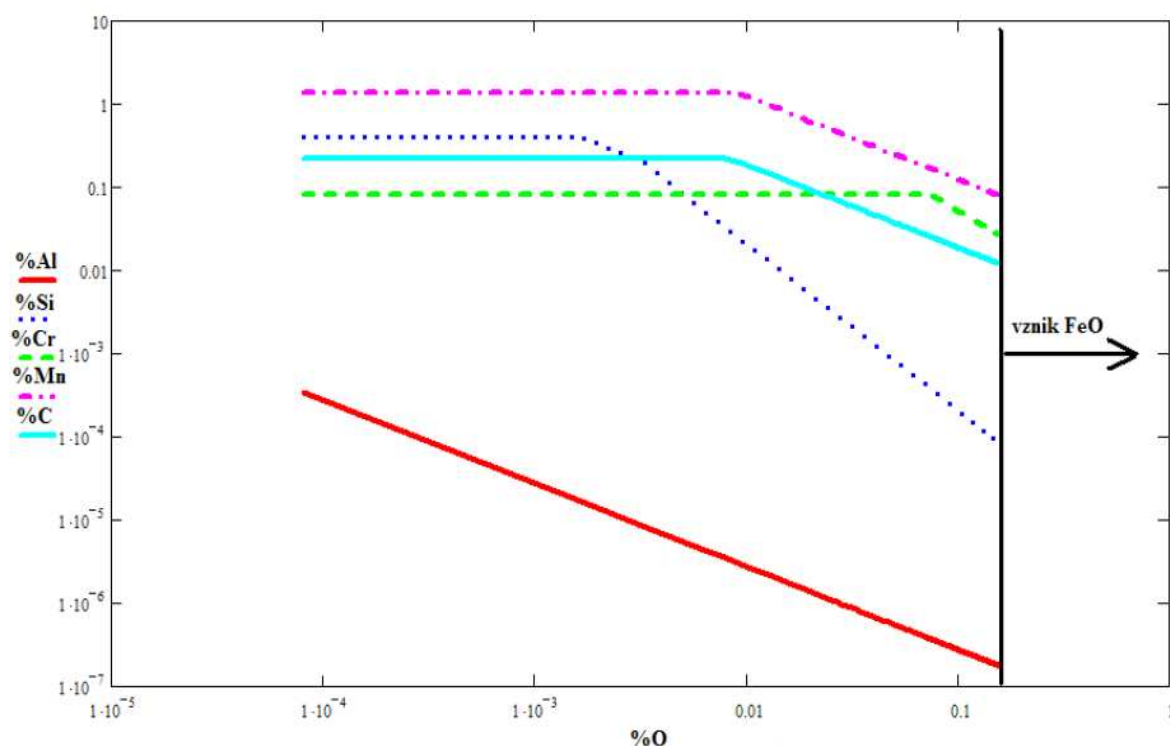
Pomocí výše uvedených rovnic vypočítáme zbytkové obsahy prvků během oxidace – průběhy koncentrací prvků pro jednotlivé obsahy kyslíku. Aktivitní koeficienty budou uvažovány rovny jedné a aktivity jednotlivých oxidů budou rovněž uvažovány rovny jedné. Pro zjednodušení zápisu budou uváděny číselně.

Množství kyslíku, od kterého se začíná oxidovat kov Me [13]

$$[\%O]_{Me} = \sqrt[y]{\frac{1}{K_{Me} \cdot [\%Me]^x}} \quad (12)$$

Výsledky výpočtů jsou zobrazeny v *grafu 4.1*, který je sestrojen pro teplotu 1500°C. Průběhy koncentrací prvků ukazují postupné zapojování prvků do procesu reoxidace. Graf má za účel demonstrovat chování prvků s nižší afinitou ke kyslíku, pokud jsou již silnější dezoxidační prvky zoxidovány nebo se vyskytují v tak malém množství, že nedokáží taveninu dostatečně dezoxidovat.

Graf 4.1 byl spočítán v prostředí MathCAD, a to za dvou předpokladů. Prvním, že oxidy uvedené v rovnici (10) vznikají i při vysokých aktivitách kyslíku a druhým, že děje probíhá za rovnovážných podmínek.



Graf 4.1 – Průběhy koncentrací prvků při rostoucí aktivitě kyslíku za rovnovážných podmínek [13]

4.2.3. Kritérium vzniku bublin

Pokud vyjdeme z rovnice vzniku bubliny CO (4) a rovnice vzniku FeO (5), lze dospět ke kritériu, při jehož splnění začnou vznikat v okolí produktů dezoxidace bubliny CO. Z rovnice (5) vycházíme z důvodu maximální rozpustnosti kyslíku v oceli. Pokud je překročena kritická hodnota aktivity kyslíku v oceli, vznikne nebezpečí tvorby bublin. Pro průběh těchto chemických reakcí sestavíme rovnice pro výpočet aktivity kyslíku.

Aktivita kyslíku potřebná pro vznik bubliny CO [13]

$$a_O^{CO} = \frac{a_{CO}}{a_C \cdot K_4} \quad (13)$$

Aktivita kyslíku v tavenině [13]

$$a_O = \frac{a_{FeO}}{a_{Fe} \cdot K_5} \quad (14)$$

Kritériem je aktivita kyslíku. Pokud je aktivita kyslíku v tavenině a_O nižší než aktivita kyslíku potřebná pro vznik bubliny CO a_O^{CO} , bublina nemůže vzniknout. Tuto podmínku vystihuje nerovnost (15).

Podmínka nutná k zabránění vzniku bublin CO [13]

$$a_O < a_O^{CO} \quad (15)$$

5. NÁVRH EXPERIMENTU A METODIKA MĚŘENÍ

Experimentální práce probíhaly ve slévárně DSB EURO. Výroba ocelových odlitků se zaměřuje zejména na odlitky o hmotnostech cca 1 až 10 tun. Významnou část výroby zastupují armaturní odlitky.

5.1. VYBRANÉ TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY, KTERÉ POPISUJÍ JAKOST ODLITKU

Reoxidační pochody lze posuzovat podle chemického složení tavebního vzorku, který bude následně porovnán s chemickým složením přilitých vzorků jednotlivých odlitků. Ze změny chemického složení – zejména ze změny obsahu dezoxidačních prvků lze posoudit míru průběhu reoxidace. Dále byly zkoumány vměstky a vady v jednotlivých přilitých vzorcích, které také ukazují na vnitřní kvalitu.

Rozsah vad odlitků byl posouzen pomocí měření ploch a objemů vad po vydrážkování. Tímto byly také získány hrubé informace o nákladech na opravu odlitků.

5.2. NUMERICKÁ SIMULACE PLNĚNÍ DUTINY FORMY

Simulace slévárenských procesů se stala standardní záležitostí výroby odlitku. Žádná slévárna vyrábějící kvalitní odlitky nemůže dnes simulaci považovat za nepotřebnou. Současná doba žádá rychlé reakce sléváren na požadavky zákazníků a jejich vzájemnou spolupráci při výrobě odlitku. Simulace jsou na takové úrovni, že dokáží lokalizovat přesné místo vzniku vady. To poté vede k úpravě konstrukce odlitku, vtokové soustavy, nálitků nebo třeba přidání chladítek. Vady se často odhalí dříve než se odlije první kus. Spolu s 3D modelářskými programy dokáží simulace zkrátit dobu než se dostane odlitek do výroby s již objevenými možnými vadami a jejich nápravami. Simulacemi bylo odstraněno až 90% vad spojených se špatnou konstrukcí odlitku, ostatní vady bývají způsobeny neočekávatelnými podmínkami nebo technologickou nekázní při výrobě. Je tedy zřejmé, že již pouhým vymodelováním 3D modelu odlitku a následnou simulací slévárenského procesu lze uspořit část nákladů na výrobu odlitku, protože se předejde nepříjemným překvapením, ke kterým by jinak mohlo dojít při návrhu výroby odlitku pouhým úsudkem a zkušenostmi z předchozí výroby jiných podobných odlitků [14].

Pro dnešní slévárny je simulace výroby odlitků před jejich výrobou každodenní záležitostí. Ze zkušeností se simulacemi bylo zjištěno, že lze ušetřit 3 až 6 % energií,lepší se kvalita vyráběných odlitků, dojde ke zvýšení produktivity, je méně zmetků a oprav na odlitcích. Návratnost bývá poměrně krátká a to řádově v době 1 až 2 let [14].

I zkoumaný odlitek prošel simulacemi. Slévárna DSB Blansko využívá na simulace program ProCAST. Na základě sledování vektorového pole rychlostí proudění kovu byla vybrána místa pro umístění válečkových vzorků pro další zkoumání. Vzorek č. 1 byl umístěn do průtočného místa, kde dochází k výraznému míchání taveniny. Vzorek č. 2 byl umístěn v místě nižší průtočnosti – neprůtočné místo. Vzorek č. 3 byl umístěn vedle zaústění jedné větve vtokové soustavy – tedy v místě s vysokou průtočností. Vzorek č. 4 byl umístěn v místě, kde se setkávají dva proudy kovu v závěru plnění formy.

5.3. MĚŘENÉ VELIČINY

- *Aktivita kyslíku v peci* – měřena pomocí kombinovaných kyslíkových sond TSO6 od firmy Termosondy Kladno s.r.o.
- *Aktivita kyslíku v pánvi těsně po odpichu* – měřena pomocí kombinovaných kyslíkových sond TSO 6 od firmy Termosondy Kladno s.r.o.
- *Aktivita kyslíku během chladnutí ve formě* – byla měřena v nálitcích forem pomocí senzorů pro kontinuální měření odvozených od sond TSO6.
- *Teplota kovu během chladnutí ve formě* – použity termočlánky typu B. Měření teploty kovu je nutné pro následné určení aktivity kyslíku po naměření elektromotorického napětí kyslíkovými senzory.
- *Chemické složení kovu v pánvi po odpichu* – zjištěno na spektrálním kvantometru ve firmě DSB EURO a kontrolováno v laboratoři ŽĐAS a.s.
- *Chemické složení přilitých vzorků* – stanoveno v laboratoři ŽĐAS a.s. na kvantometru ARL 4460, který umožňuje také určit hliník rozpustný v kyselině.
- *Chemické složení strusky odebrané během plnění dutiny formy* – analýza bude provedena na elektronovém rastrovacím mikroskopu.
- *Kriteria rozsahu vad* - určená jako % vad v poměru k celkovému objemu a povrchu odlitku.

5.4. POPIS MĚŘENÍ AKTIVITY KYSLÍKU A TEPLOTY KOVU

Pro hodnocení míry reoxidace ocelí a litin se musí nejprve zvolit kritérium. Pro hodnocení máme několik poznatků: během lití roste koncentrace a aktivita kyslíku, dochází ke tvorbě oxidických, sulfidických a oxidicko-sulfidických vměstků a klesá obsah hliníku rozpustného v kyselině [5].

Na základě těchto poznatků lze reoxidaci taveniny posuzovat čtyřmi způsoby:

1. analýzou chemického složení, tvaru a rozložení vměstků
2. sledováním změn chemického složení kovu
3. sledováním změn aktivity kyslíku
4. analýzou vad odlitku

Jediná metoda měření aktivity kyslíku je přímá. Aktivita kyslíku se měří v tekuté oceli až do začátku tuhnutí odlitku. V této práci bude využito pro zkoumání míry reoxidace oceli i přímé metody – tedy měření aktivity kyslíku v nálitku formy současně s teplotou [12].

Cílem měření je zjistit aktivitu kyslíku v peci, po odpichu v pánvi a po odlití v odlitku až po počátek tuhnutí. Měření v peci a pánvi vypovídá o míře závěrečné dezoxidace. Měření aktivity kyslíku v odlitku má vypovídat o míře reoxidace a možném vzniku s reoxidací spojených vad.

Nejprve byla změřena aktivita kyslíku v peci a po odpichu také v pánvi pomocí sond TSO 6. V této fázi před odlitím se odebere vzorek pro chemickou analýzu, který je v tabulce s rozborů vzorků nazván „v pánvi“.

Dalším krokem je odlití všech 4 odlitků. První nebude z důvodu nízké licí teploty měřen. U odlitku 2 a 3 budou měřeny jak aktivita kyslíku, tak teplota kovu.

Pro měření aktivity kyslíku v nálitcích forem budou použity kyslíkové senzory odvozené od kyslíkových sond firmy Termosondy Kladno. Senzor měří kontinuálně elektromotorické napětí, které se převádí dle rovnice (16) na aktivitu kyslíku. Pro přepočítání změřeného EMN a teploty na aktivitu kyslíku byla použita

rovnice ČSAV [15]. Dále bude vedle aktivit zjišťována také teplota v nálitcích pomocí termočlánků, které je třeba znát pro výpočty aktivit kyslíku v jednotlivých okamžicích měření. Při návrhu experimentu byly brány v úvahu poznatky z výzkumů [21-25].

Rovnice pro přepočet elektromotorického napětí na aktivitu kyslíku [15]

$$\log^H a_O = 8,516 - \frac{13272,349 - 10,08 \cdot EMN}{T} [ppm] \quad (16)$$

Dosazování jednotek do rovnice (16):

- Elektromotorické napětí - EMN [mV]
- Teplota podle Kelvina – T[K]

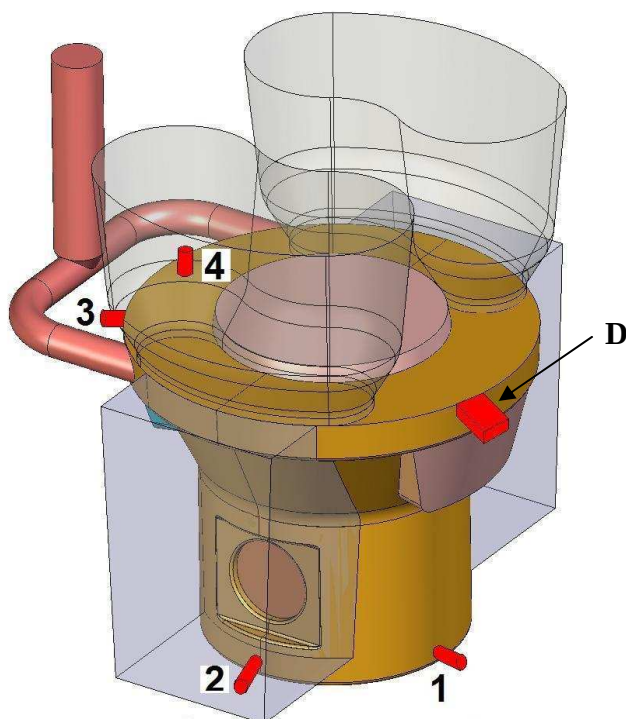
5.5. PŘILITÉ VZORKY

K odlitkům byla přilita zkušební tělesa tvaru válce o průměru 40 mm a délce 100 mm. Ke dvěma odlitkům byly přility zkušební deskové vzorky o rozměrech 100x50x10 mm. Umístění a označení přilitých vzorků je vyobrazeno na obr. 5.2. Zkušební vzorky ve tvaru válečků byly přility k odlitkům číslo 151 25 B2 až B4. Na každém z těchto odlitků byly 4 válečkové vzorky, na kterých bylo následně zkoumáno chemické složení, počítány vměstky na nenaleptaných výbrusech a byla provedena mikroanalýza vybraných vměstků. Deskové vzorky, které slouží jako záložní vzorky, byly přility v horní části pod dělicí rovinou druhého a čtvrtého odlitku a nebudou předmětem zkoumání v této diplomové práci.

Podle výsledků simulací byla vybrána místa pro umístění válečkových vzorků pro další zkoumání. Vzorek č. 1 byl umístěn do průtočného místa, kde dochází k výraznému míchání taveniny. Vzorek č. 2 byl umístěn v místě nižší průtočnosti – neprůtočné místo. Vzorek č. 3 byl umístěn vedle zaústění jedné větve vtokové soustavy – tedy v místě s vysokou průtočností. Vzorek č. 4 byl umístěn v místě, kde se setkávají dva proudy kovu v závěru plnění formy.



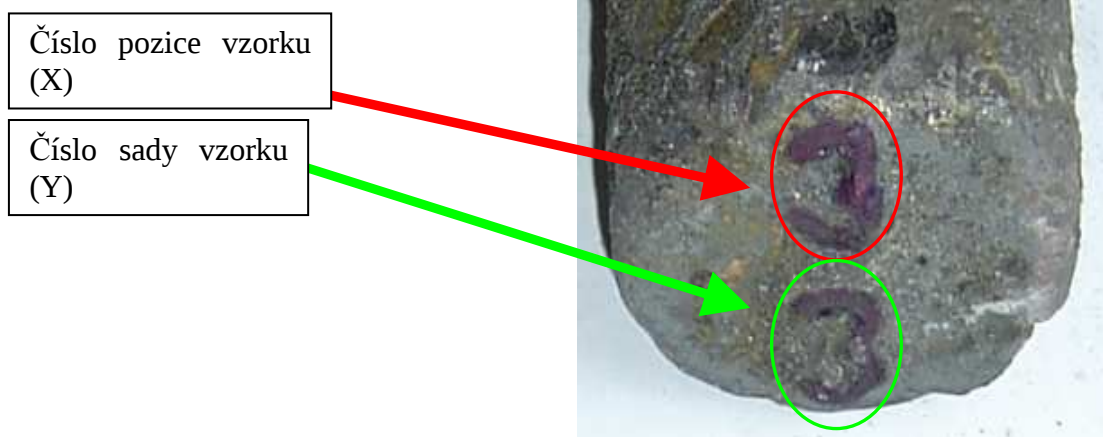
Obr. 5.1 – Odřezaný vzorek



Obr. 5.2 – Rozmístění přilých vzorků

Po odlití budou zkušební válečky odřezány úhlovou bruskou, nikoliv plamenem, aby nedošlo k jejich ovlivnění teplem. Analýza vměstků bude provedena na vzorcích v místě vzdáleném asi 70 mm od místa napojení válečku na odlitek.

Značení je prováděno pomocí identifikačních čísel „XY“. Číslice „X“ značí pozici vzorku na odlitku. Číslice „Y“ potom značí číslo odlitku viz obr. 5.3, kdy odlitek 151 25 B2 má vzorky s čísly X1, B3 má značení vzorků X2 a odlitek B4 značení X3. Číslování odlitků vůči válečkům je posunuto, protože na odlitku B1 žádné vzorky nebyly přilý.



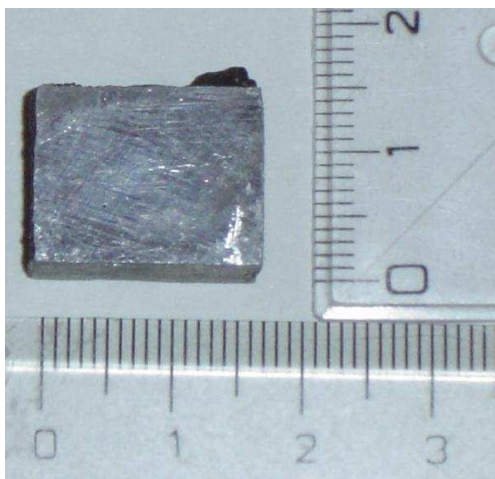
Obr. 5.3 – Způsob značení vzorků

Tab. 5.1 – Označení vzorků na odlitcích

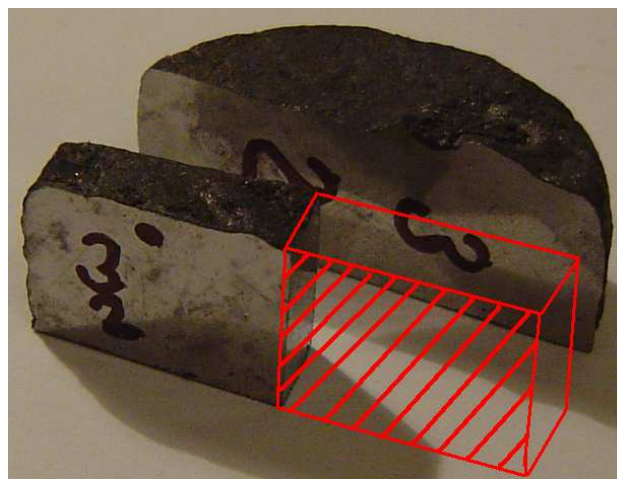
Značení přilýtých válečkových vzorků na odlitcích			
Označení odlitků	151 25 B2	151 25 B3	151 25 B3
Označení vzorků (X.Y)	1.1	1.2	1.3
	2.1	2.2	2.3
	3.1	3.2	3.3
	4.1	4.2	4.3

5.5.1. Příprava vzorků pro metalografický výbrus

Vzorky byly nařezány pro zhotovení metalografických výbrusů. Jejich značení odpovídá vždy číslu vzorku, ze kterého pocházejí. Tečka značí stranu od podstavy válečku, ze kterého byl vzorek odříznut. Rozměry vzorků pro analýzu byly přibližně 15x15 mm. Část, která je zobrazena na *obr. 5.4* byla použita pro metalografický výbrus. Vzorky na metalografické hodnocení a mikroanalýzu byly z válečků vyřezány na laboratorní pile Struers Labotom 3 s chlazením vzorků během řezání. Potom byly vzorky zality dentacylem. Na jejich povrchu byly připraveny metalografické výbrusy broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami.



Obr. 5.4 – Část určená pro metalografický výbrus



Obr. 5.5 – Analyzovaná plocha

5.6. METODIKA MĚŘENÍ PLOCH A OBJEMŮ VAD

Plochy vydrážkovaných vad byly obtaženy na průhlednou fólii a následně změřeny pomocí milimetrového papíru s přesností 0,5cm². Dokonalejší metoda byla vyvinuta po zkušenostech na tomto odlitku a dále a využita v práci [16]. Nevydrážkované plochy vad byly zjištěny pouze na odlitcích s čísly 151 25 B2 a B4. Zbýlé dva odlitky se bohužel nepodařilo změřit, protože již byly vydrážkovány. Při focení vad byl přiložen papír s ohraničenou plochou 1 cm² pro následnou možnost přibližný odhadu velikosti vady na fotografii.



Obr. 5.6 – Vydrážkované vady před měřením plochy a objemu vad

Objemy byly měřeny metodou vysypávání pískem a následným měřením objemu písku. Přesnost měření $\pm 1\text{ml}$. Objemy vad jsou v tabulce uvedeny vždy po více malých vadách na větší ploše, protože měření každé vady zvlášť by nebylo kvůli jejich velikosti přesné a v některých případech ani možné. S odlitkem bylo možné poměrně lehce manipulovat, takže objemy byly měřeny vždy po patřičném natočení ve vodorovné poloze dané stěny odlitku. Vady byly vydrážkovány plamenem.

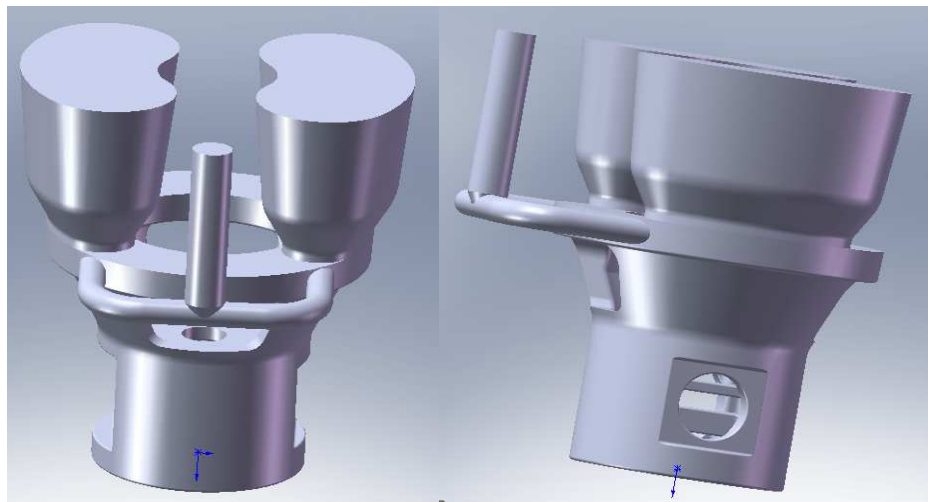


Obr. 5.7 – Způsob měření objemů vydrážkovaných vad

6. PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

6.1. POPIS STÁVÁJÍCÍ TECHNOLOGIE V DSB EURO

Firma DSB EURO používá technologii výroby forem zvanou sandwich. Model je obsypán ST směsí s křemenným ostřivem. Zbytek formy je vyplněn regenerovanou CT směsí vytvrzenou pomocí CO_2 . Tento tzv. sendvičový způsob se používá kvůli úspoře nákladů. Formy pro zkoumaný odlitek byly formovány ručně. Složení směsí a jejich podrobnější popis je uveden dále v textu.



Obr. 6.1 – Způsob zaústění vtokové soustavy

6.1.1. Model a odlitek

Číslo modelu 15 125 – Těleso radiálního ložiska. Odlévala se série 4 kusů odlitků. Jednotlivé odlitky byly značeny 15 125 B1 až 15 125 B4 shodně se značením forem od čísla 1 po formu č.4. Hrubá hmotnost odlitku činí 140 kg, surová hmotnost 420 kg.

6.1.2. Materiál odlitku

Odlitek je vyroben z materiálu ČSN 42 2712. Jedná se o nízkolegovanou feriticko-perlitickou manganovou ocel. Je určena k použití za normálních i zvýšených teplot od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proto je vhodná na odlitky pro energetické strojírenství, zejména součástí parních kotlů a turbín, tlakových nádob, parních a vodních potrubí, armatur, velmi namáhaných strojních součástí a svařovaných dílů. Svařitelnost je při tloušťkách stěn do 25 mm zaručená, nad tloušťky 25 mm zaručená s předehřevem minimálně 200°C , po svaření se žihá ke snížení pnutí [17,18]. Složení viz tab. 6.1.

Tab.6.1 – Normované složení oceli ČSN 42 2712 [17]

%C	%Mn	%Si	%P _{max}	%S _{max}	%Cr _{max}	%Ni _{max}	%Cu _{max}
0,17 - 0,25	0,90 - 1,40	0,20 – 0,50	0,040	0,040	0,30	0,40	0,30

6.1.3. Formovací materiály

Formovací směs se skládá z ostřiva, tvrdidla a pojiva. Ostřivo je křemenný písek Dolní Lhota $d_{50} = 0,36$ mm, tvrdidlo je kyselina benzensulfonová BAKELITE H 0984 H a pojivem je fenolová pryskyřice BAKELITE PF 9146 GN 01.

Jádrová směs se skládá ze dvou vrstev. Obal jader je chrommagnezitové ostřivo pojené fenolickou pryskyřicí, uvnitř jader se nachází formovací směs, nepravá jádra jsou vyrobena pouze křemenného ostřiva pojeného fenolickou pryskyřicí.

Výplňová směs je regenerát CT50 pojený vodním sklem a vytvrzovaný plynem CO_2 .

Formovací a jádrová směs se zkouší na pevnost v tlaku v intervalech 2, 4, 8 a 24 hodin po namísení. Rozhodující je pevnost v tlaku 24 hodin od namísení. Naměřené pevnosti formovací směsi jsou uvedeny v tab.6.2.

Tab. 6.2 – Naměřené pevnosti v tlaku daných směsí.

Jádrová směs		Formovací směs	
dobu	pevnost v tlaku [MPa]	dobu	pevnost v tlaku [MPa]
2	3,5	2	5,6
4	5	4	7,5
8	5,4	8	9,1
24	7	24	9,6

*23.9.08 -
6:55hod

*24.9.08 -
6:25hod

*Časy dodání vzorků směsí do laboratoře.

6.1.4. Nátěr forem a jader

Jádra i formy byly opatřeny zirkonovým nátěrem FOUNDRYLAC ZIRCONIO IPA C/85. Jedná se o žáruvzdorný lihový nátěr na bázi zirkonu, který je určen k nátěrům forem a jader silnostěnných ocelových a litinových odlitků. Nátěr je charakteristický svojí zvýšenou krycí schopností a velmi dobrou roztíratelností, čímž se dosahuje optimální rovnoměrné vrstvy.

Nátěr byl nanesen štětcem. Po zavadnutí byl zapálen, čímž došlo k jeho vysušení. Sledováním bylo zjištěno, že žádná forma nevykazovala známky poškození nátěru forem ani jader. Před sestavením forem byl nátěr v místech odchodu plynů z jader odstraněn.

6.2. FORMOVÁNÍ A LITÍ

Model je obsypán ST směsí s křemenným ostřivem. Zbytek formy je vyplněn CT směsí vytvrzenou CO_2 . Tento tzv. sendvičový způsob se používá kvůli úspoře financí. Po zaformování spodní části následuje formování vrchního rámu. Spodní část se skládá ze dvou rámu. Po dokončení formování a vytvrzení výplňové směsi je forma rozdělena, vyjme se model a následují opravy. Volný písek ve formě a vtokové soustavě je vyfoukán vzduchem. Opravená a čistá forma je natřena

jednou vrstvou nátěru. Nátěr se nechá vyschnout volně na vzduchu nebo je zapálen. Po aplikaci a vyschnutí nátěrů se dvě formy složí a dvě zůstanou volně rozložené. Vtoková soustava je sestavená z šamotových tvarovek. Odlévá se následující den. Před samotným litím byly složeny zbylé dvě formy.

6.2.1. Forma č.1

Do formy č.1 se nezaformovávaly žádné vzorky, sloužila pouze pro první odlití. Číslo odlitku ve formě č.1 je 15 125 B1. Vzorky se vkládaly až do dalších forem. Kolem odlitku se sypala formovací směs, jako výplňová směs sloužila směs CT50 kvůli urychlení vytvrzení formy a úspoře financí. První forma se po zapěchování, vytvrzení a vyjmutí modelu natřela zirkonovým nátěrem a po jeho vyschnutí se okamžitě skládala. Doba do odlití byla necelých 25 hodin. Další výpis časů daných operací viz *tab.6.3*.

6.2.2. Forma č.2

Forma č.2 již obsahovala 4 válcové vzorky a jeden deskovitý vzorek o rozměrech 100x50x10mm. Značení válcových vzorků bylo dáno čísly „X1“, kde X označuje pozici vzorku, jak jsou zobrazeny na *obr. 5.2*. Tyto vzorky byly válcové o průměru 40 mm a délce 100 mm. Deskovitý vzorek nemá označení a byl zaformován do dělicí roviny, jak je vidět na *obr. 5.2*. Číslo odlitku ve formě č.2 je 15 125 B2. Kolem odlitku se sypala formovací směs, jako výplňová směs sloužila směs CT50 kvůli urychlení vytvrzení formy a úspoře financí. Druhá forma se po zapěchování, vytvrzení a vyjmutí modelu i vzorků natřela zirkonovým nátěrem. Po jeho vyschnutí se okamžitě skládala. Doba do odlití byla 23 hodin. Podrobný výpis časů daných operací viz *tab.6.3*. V této formě probíhalo měření teplot 1 a 2 a aktivit 1 a 2.

6.2.3. Forma č.3

Forma č.3 obsahovala také 4 válcové vzorky, deskový vzorek nebyl zaformován. Značení válcových vzorků bylo dáno čísly „X2“, kde X označuje pozici vzorku, jak jsou zobrazeny na *obr. 5.2*. Číslo odlitku ve formě č.3 je 15 125 B3. Kolem odlitku se sypala formovací směs, jako výplňová směs sloužila směs CT50 kvůli urychlení vytvrzení formy a úspoře času. Třetí forma se po zapěchování, vytvrzení a vyjmutí modelu i vzorků natřela zirkonovým nátěrem. Po jeho vyschnutí se neskládala, ale nechala větrat až do druhého dne, složila se těsně před odlitím. Doba, po kterou byla forma rozebraná, je 22 hodin. Další výpis časů daných operací viz *tab. 6.3*. Ve formě č.3 probíhalo měření teploty 3 a aktivity 3.

6.2.4. Forma č.4

Forma č.4 obsahovala 4 válcové vzorky a jeden deskovitý vzorek o rozměrech 100x50x10mm. Značení válcových vzorků bylo dáno čísly „X3“, kde X označuje pozici vzorku, jak jsou zobrazeny na *obr. 5.2*. Tyto vzorky byly válcové o průměru 40 mm a délce 100 mm. Deskovitý vzorek má označení „D“ a byl zaformován do dělicí roviny, jak je vidět na *obr. 5.2*. Číslo modelu ve formě č.4 je 15 125 B4. Kolem odlitku se sypala formovací směs, jako výplňová směs sloužila směs CT50 kvůli urychlení vytvrzení formy a úspoře času. Čtvrtá forma se po zapěchování, vytvrzení a vyjmutí modelu i vzorků natřela zirkonovým nátěrem. Po jeho vyschnutí se neskládala, ale nechala větrat až do druhého dne, složila se těsně

před odlitím. Doba po kterou byla forma rozebraná je necelých 21 hodin. Podrobný výpis časů daných operací viz *tab. 6.3*.

6.2.5. Sledování procesu formování a lití

Tab. 6.3 – Sledování procesu formování a lití

číslo formy	1	2	3	4
číslo modelu	151 25 B1	151 25 B2	151 25 B3	151 25 B4
čísla vzorků	-	X1	X2	X3
destička	-	bez popisu	-	popis „D“
pořadí lití	1.	2.	3.	4.
čas lití	10:16	10:17	10:18	10:19
doba lití	40 s	31 s	35 s	33 s
formování	doba [min]	doba [min]	doba [min]	doba [min]
rám 2 a 3	25	15	25	20
rám 1	10	15	15	15
schnutí	doba	doba	doba	doba
nátěr	15 min	30 min	20 min	25 min
jádra	24 hod	24 hod	24 hod	24 hod
složení formy	ihned	ihned	po 22 hodinách	po 21 hodinách

7. PROVÁDĚNÁ MĚŘENÍ

Tavba nízkolegované oceli dle ČSN 42 2712 proběhla na elektrické obloukové peci se zásaditou výdusku. Odpichová teplota byla 1610°C. Konečná dezoxidace byla provedena výhradně hliníkem. Tavenina byla argonována pro zlepšení homogenity kovu. Nedošlo k modifikaci vápníkem, aby bylo možné provést posouzení míry reoxidace podle morfologie a složení nalezených vměstků. Chemické složení odlévaného kovu odebraného z pánve před odlitím viz *tab 7.1*.

Tab. 7.1 – Chemické složení po odpichu

Označení		Chemické složení oceli [hm.%]					
Číslo vzorku	2/6689H	C	Mn	Si	S	P	Al _{celk.}
		0,23	1,286	0,441	0,013	0,023	0,041
Materiál	ČSN 42 2712	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti
		0,068	0,058	0,144	0,016	0,007	0,011

7.1. VÝSLEDKY MĚŘENÍ AKTIVITY KYSLÍKU

7.1.1. Měření aktivity kyslíku v peci a pánvi

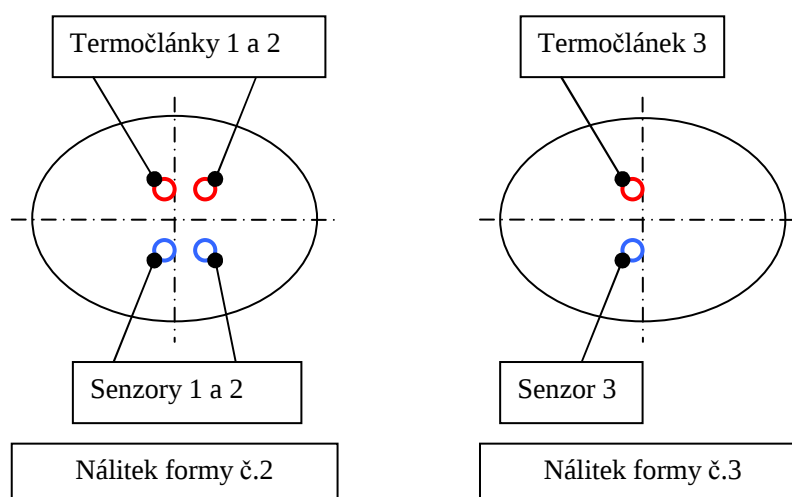
Měření aktivity v peci bylo provedeno během redukčního údobí. V pánvi byla aktivita měřena po odpichu. Naměřené hodnoty aktivit kyslíku jsou uvedeny v *tab. 7.2* včetně koncentrace hliníku. Hodnoty stanovené v laboratoři ŽĐAS a.s. jsou označeny symbolem „*“, zbylá měření byla provedena ve firmě DSB EURO.

Tab. 7.2 – Naměřené teploty a aktivity kyslíku v peci a pánvi

Označení		Obsah Al [hm.%]		teplota [°C]	Aktivita kyslíku [ppm]
Materiál	Místo měření	Al _{celk.}	Al _{r.k.}		
ČSN 42 271 2				1631	25,6
	v peci	-	-		
	v pánvi	0,041 0,038*	- 0,032*	1601	7,6

7.1.2. Měření aktivity kyslíku v odlitcích

V nálitcích forem 2 a 3 byla měřena teplota a elektromotorické napětí pro stanovení aktivity kyslíku. Rozmístění senzorů a termočlánků je zobrazeno na *obr. 7.1*, měření probíhalo v levém nálitku při pohledu od vtokového kůlu.



Obr. 7.1 – Rozmístění kyslíkových senzorů a termočláneků v nálitcích forem.

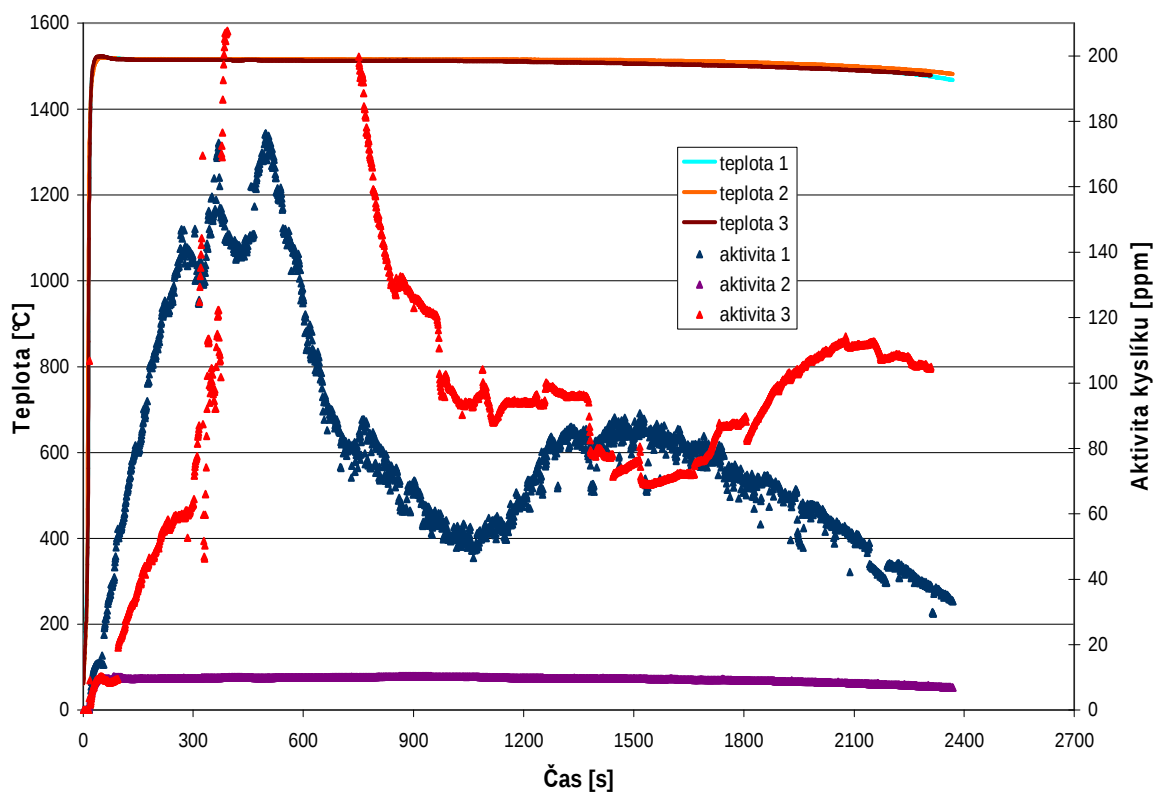
Forma č.2:

Ve formě byly umístěny 2 kyslíkové senzory na měření elektromotorického napětí a 2 termočláanky typu B (PtRh6–PtRh30). Senzory a termočláanky byly opatřeny ochrannými křemennými trubičkami a zasunuty do nálitku do hloubky cca 120 mm. Vedení senzorů a termočláanků bylo chráněno sibralem. Tato forma byla složena 23 hodin před odlitím.

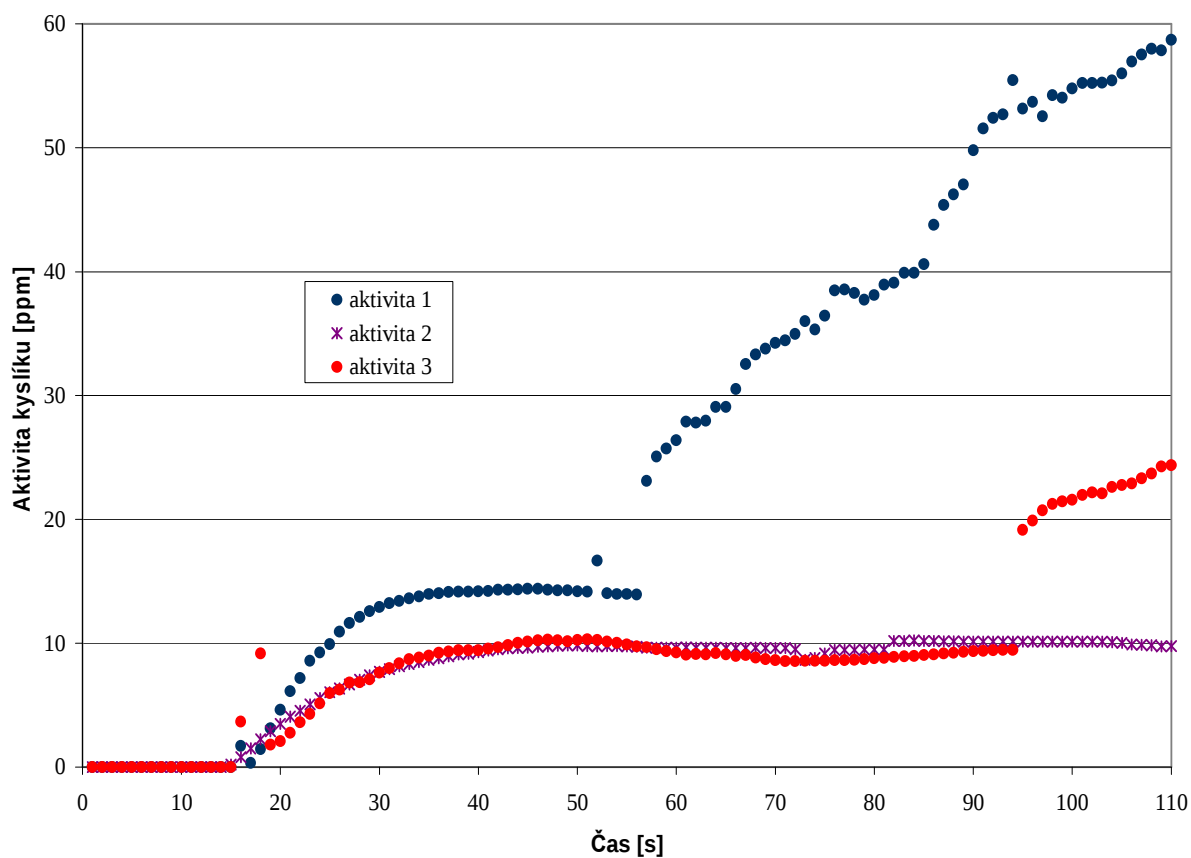
Forma č.3:

Ve formě byl 1 kyslíkový senzor na měření elektromotorického napětí a 1 termočlánek typu B (PtRh6–PtRh30). Senzor i termočlánek byly opatřeny ochrannými křemennými trubičkami a zasunuty do nálitku do hloubky cca 120 mm. Vedení senzoru a termočláanku bylo chráněno sibralem. Forma byla složena těsně před odlitím a před sestavením byla 22 hodin rozebraná.

Průběhy naměřených teplot a aktivit kyslíku jsou vyneseny v *grafech 7.1, 7.2 a 7.3*. Z grafů lze vyčíst, že kyslíkový senzor číslo 2, který byl v nálitku formy číslo 2, neměřil správně. Při rozebírání bylo zjištěno, že došlo k rozpojení vedení k tomuto senzoru. Nejspíše se tak stalo při obalování vedení ochrannou vrstvou sibrálu. Proto byl pro formu 2 získán jen jeden záznam aktivity kyslíku. Značení teplot a aktivit odpovídá značení termočláanků, tzn. termočlánek 1 měří teplotu 1 a podobně.

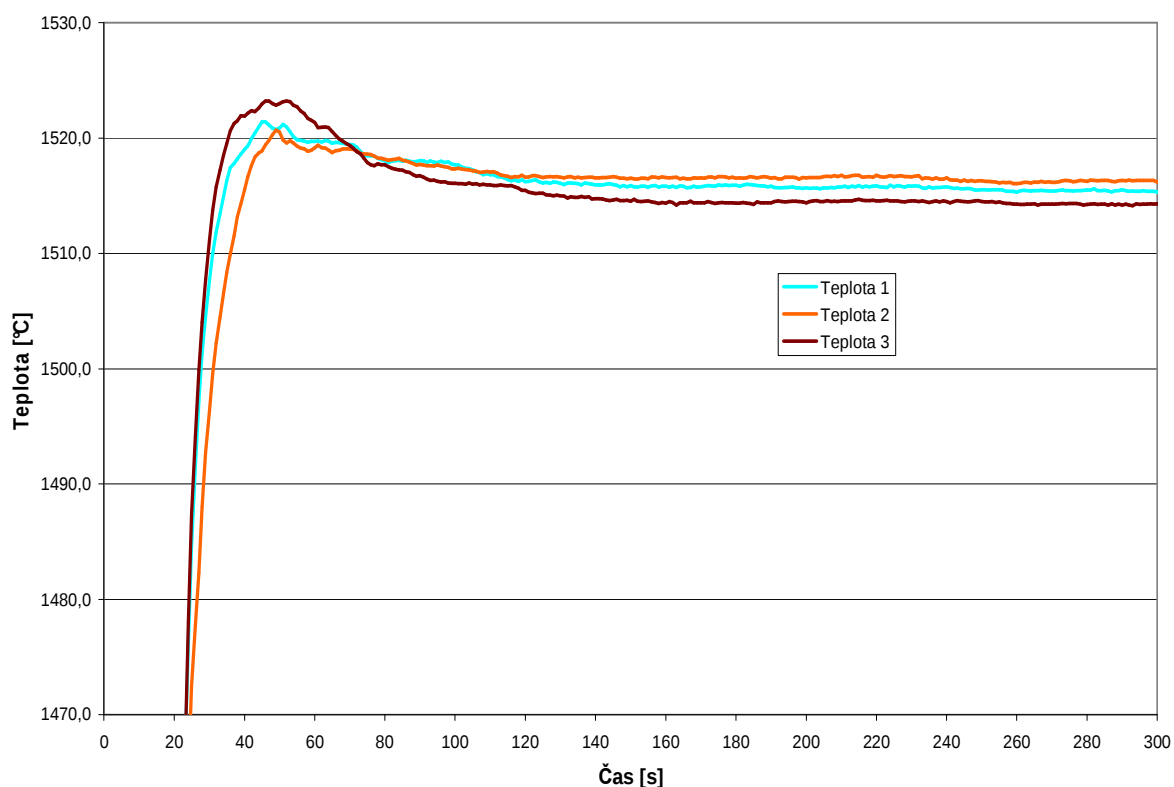


Graf 7.1 – Průběhy naměřených teplot a aktivit kyslíku ve formách 2 a 3



Graf 7.2 – Průběhy aktivit kyslíku ve formách 2 a 3

Pozn.: Senzor měřící „aktivitu 2“ nefungoval správně.



Graf 7.3 – Průběhy naměřených teplot ve formách 2 a 3

Z výše uvedených grafů lze vidět, že téměř ihned po naplnění dutin forem bylo dosaženo teploty likvidu. Nebyl proto zaznamenán pokles aktivity kyslíku během chlazení kovu právě na teplotu likvidu. Byly zachyceny aktivity kyslíku v blízkosti teploty likvidu a aktivity kyslíku během tuhnutí. Aktivity kyslíku při srovnávacích teplotách, při teplotách likvidu a na počátku tuhnutí jsou uvedeny v *tab. 7.3*. Senzor č. 2 nefungoval správně, tudíž hodnoty naměřené tímto senzorem nebyly do tabulky zahrnuty. Počátek tuhnutí provází skokové zvýšení aktivity kyslíku při minimální či dokonce nulové změně teploty oproti teplotě likvidu.

V *tab. 7.3* si můžeme všimnout, že teplota likvidu a počátek tuhnutí má stejnou teplotu, při velmi odlišných aktivitách. Z principu senzorů lze vyvodit, při jaké teplotě dojde k počátku tuhnutí, protože po natuhnutí kovu kolem senzoru není kyslík tak dobře odváděn, čímž se skokově zvýší měřená aktivita. Teplota likvidu byla odhadnuta z průběhu grafů teplot.

Tab. 7.3 – Aktivity kyslíku při srovnávacích teplotách

Teplota [°C]	Označení senzoru	
	1	3
	a_{O} [ppm]	a_{O} [ppm]
1523	-	10,21
1521	16,66	9,07
$T_{\text{likv.}}$	13,92 (1519,8°C)	9,45 (1516,4°C)
na počátku tuhnutí	23,09 (1519,7°C)	19,15 (1516,3°C)

Naměřené aktivity kyslíku jsou po odlití vyšší než byly v pánvi, kde měla naměřená aktivita kyslíku hodnotu 7,6 ppm. U odlitku č.2 – tedy na senzoru 1 byla naměřená aktivita 2,35 krát vyšší než po odpichu. Odlitek č. 3 s kyslíkovým senzorem 3 měl aktivitu kyslíku v nálitku vyšší o 34%. Zvýšení aktivit kyslíku v odlitcích může být způsobeno reoxidací taveniny při odlévání. Přesto jsou nejvyšší hodnoty aktivit kyslíku nízké a ukazují tak na dobře zvládnutou technologii dezoxidace kovu s dostatečným přebytkem dezoxidačního hliníku.

Při srovnání naměřených hodnot aktivit kyslíku ve formách s literárními údaji [2], které uvádí *tab. 7.4*, dojdeme k závěru, že při teplotě kolem 1521°C a obsahu zbytkového hliníku v rozmezí 0,02 až 0,04 hmotnostního %, by se aktivita kyslíku měla pohybovat v hodnotách nižších než cca 34 ppm.

Tab. 7.4 - Aktivity kyslíku podle literárních údajů [2]

a_O [ppm] při $T_{likv.}$	$T_{likv.}$ [°C]	$Al_{celk.}$ [hmot. %]	teplotní závislost a_O (T uvedeno v K)	odpovídající a_O [ppm] při $T = 1521$ °C
20,5	1 506	0,023	$\ln a_{ O } = -\frac{17\,065}{T} + 12,43$	18,51
15,9	1 511	0,047	$\ln a_{ O } = -\frac{8\,604}{T} + 7,57$	16,03
49	1 521	0,021	$\ln a_{ O } = -\frac{22\,581}{T} + 16,11$	33,92

Interpretace měření

Z *tab. 7.3* vyplývá, že naměřené hodnoty aktivit se při daných teplotách pohybují v rozmezí cca 9 – 23 ppm, což odpovídá údajům, které jsou uváděny literaturou [2]. Aktivita kyslíku byla v místech měření řízena aktivitou hliníku a nebyly tedy splněny termodynamické podmínky pro vznik bublin CO. Naměřené aktivity byly natolik nízké, že by se během chladnutí odlitku měly tvořit pouze oxidy na bázi Al_2O_3 . To znamená, že po celou dobu než se teplota kovu sníží na teplotu likvidu, je kov dobře dezoxidován hliníkem a tvorba oxidů slabších dezoxidovadel je termodynamicky nepravděpodobná.

7.1.3. Vyhodnocení odebraných strusek

U slitin železa se předpokládá, že během odlévání dochází ke strhávání strusek z pánve či jejich tvorbě v dutině formy při jejím plnění. Složení strusek také souvisí s aktivitou kyslíku, proto je zahrnuto pod tato měření. Každý druh strusky má většinou jinou příčinu výskytu, a proto také jiné nápravné opatření, které by zabránilo jejímu výskytu [19,20]. Během odlévání čtvrté formy byla odebrána z hladiny struska (odlitek 151 25 B4). Chemické složení strusek bylo stanoveno na pomletém vzorku strusky na třech místech při 30-ti násobném zvětšení plošnou analýzou na elektronovém rastrovacím mikroskopu Philips XL 30 – EDAX (REM). Chemické složení strusek viz *tab. 7.5*.

Tab. 7.5 - Chemické složení strusky odebrané z hladiny kovu během odlévání

Popis analýzy		Chemické složení vzorku [at.%]					
Odlitek	Plocha	O	Al	Si	Ca	Mn	Fe
151 25 B4	1	58,63	7,72	17,86	0,50	13,23	2,06
	2	59,98	7,38	17,80	0,61	12,44	1,79
	3	59,35	7,60	18,06	0,43	12,58	1,97
	průměr	59,32	7,57	17,91	0,51	12,75	1,94
	s. odchylka	0,552	0,141	0,111	0,074	0,344	0,112

Interpretace výsledků analýzy strusek

Struska je tvořena komplexními oxidy na bázi Al, Si a Mn. Dále lze vysledovat malé množství železa a stopové množství vápníku. Z uvedených průměrných obsahů a směrodatných odchylek lze usoudit, že koncentrace prvků byly na jednotlivých plochách totožné.

Z komplexního složení strusek se ukazuje, že struska vznikala postupně a na jejím vzniku se podílely i slabší dezoxidační prvky – Si a Mn. Z přítomnosti manganu lze jednoznačně usoudit, že struska vznikla reoxidací taveniny, protože ve výdusce pece ani pánve se Mn nevyskytuje v takovém množství, aby se ho dodalo tolik. Pokud by se struska zachytila na vršku nebo stěnách odlitku, mohla by způsobit vadu sekundární struskovitost.

7.2. ZPRACOVÁNÍ VZORKŮ**7.2.1. Chemická analýza vzorků**

Po odlití bylo stanoveno chemické složení kovu v pánvi. Chemická analýza jednotlivých přilitých vzorků byla provedena na přístroji ARL 4460 v laboratoři GRJ podniku ŽĐAS, a.s. dne 23.10.2008, číslo protokolu 374/2008 E. Pro chemickou analýzu byly odřezány z válečků „mince“ o tloušťce cca 15 mm.

Tab. 7.6 – Chemická analýza jednotlivých vzorků

	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu	%Mo	%Al	%Al _{r.k.}
v pánvi	0,22	1,35	0,40	0,017	0,006	0,08	0,10	0,13	0,02	0,038	0,032
1.1	0,22	1,36	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,040	0,030
1.2	0,22	1,36	0,40	0,018	0,008	0,08	0,10	0,13	0,02	0,039	0,026
1.3	0,22	1,37	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,040	0,028
2.1	0,22	1,34	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,039	0,028
2.2	0,22	1,35	0,40	0,017	0,008	0,08	0,10	0,13	0,02	0,038	0,026
2.3	0,22	1,34	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,036	0,027
3.1	0,22	1,36	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,039	0,027
3.2	0,22	1,35	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,039	0,030
3.3	0,22	1,36	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,040	0,030
4.1	0,22	1,35	0,40	0,016	0,006	0,08	0,10	0,13	0,02	0,041	0,032
4.2	0,22	1,38	0,40	0,017	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,041	0,031
4.3	0,23	1,39	0,40	0,018	0,007	0,08	0,10	0,13	0,02	0,041	0,031

Interpretace výsledků chemické analýzy vzorků

Z uvedených rozborů je patrné, že nejsou žádné výrazné výkyvy chemického složení. Pořadí lití také nemá vliv na změny chemického složení. Prvky jako chrom, nikl, měď a molybden nevykazují žádnou změnu koncentrace mezi pánvi a jednotlivými vzorky. Fosfor a síra se mění v řádu jedné tisícin procenta, což je na úrovni přesnosti měření.

Nedošlo k žádné změně obsahu křemíku, což ukazuje na fakt, že na dezoxidaci kovu se podílel hliník a podíl Si na dezoxidaci nebyl měřitelný. Při reoxidaci by tedy měly vznikat pouze vměstky Al_2O_3 . Jestli je tato domněnka správná, to potvrdí až následná analýza vměstků. V praxi je snížení obsahu křemíku sledováno, u tohoto odlitku se patrně díky jeho velikosti, jednoduchosti a rychlému plnění pokles obsahu křemíku neobjevil.

Podmínce pro minimální množství $\text{Al}_{r.k.}$, kdy musí být jeho obsah alespoň 0,030%, odpovídá polovina vzorků. Ostatní vzorky neměly výrazně nižší hodnoty zbytkového hliníku (nejnižší 0,026%). Tím je splněn předpoklad pro úplné potlačení uhlíkového varu. Zabráněním průběhu uhlíkového varu zabráníme vzniku bublin CO v odlitku.

7.2.2. Vyhodnocení změny $\text{Al}_{r.k.}$

Rozsah reoxidace lze posoudit podle rozdílu koncentrace hliníku celkového a hliníku rozpustného v kyselině ($\text{Al}_{r.k.}$). Čím větší je rozsah reoxidace v místech jednotlivých vzorků, tím větší je rozdíl jednotlivých koncentrací. Porovnání těchto rozdílů v jednotlivých vzorcích viz *tab. 7.7*. Vyhodnocení navazuje na hodnocení chemického složení vzorků z kapitoly 7.2.1. – Chemická analýza vzorků.

Tab. 7.7 – Změna obsahu hliníku v přilítých vzorcích a pánvi

odlitek	vzorek	Al [hm.%]	$\text{Al}_{r.k.}$	rozdíl
	v pánvi	0,038	0,032	0,006
151 25 B2	1.1	0,040	0,030	0,010
	2.1	0,039	0,028	0,011
	3.1	0,039	0,027	0,012
	4.1	0,041	0,032	0,009
151 25 B3	1.2	0,039	0,026	0,013
	2.2	0,038	0,026	0,012
	3.2	0,039	0,030	0,009
	4.2	0,041	0,031	0,010
151 25 B4	1.3	0,040	0,028	0,012
	2.3	0,036	0,027	0,009
	3.3	0,040	0,030	0,010
	4.3	0,041	0,031	0,010
	$\bar{x}$	0,039	0,029	0,011
	s	0,0014	0,0020	0,0013
	maximum	0,041	0,032	0,013
	minimum	0,036	0,026	0,009

Interpretace výsledků chemické analýzy vzorků

Vypočtené hodnoty pod získanými daty vycházejí pouze z hodnot obsahu hliníku u přilítých vzorků. Rozdíly hodnot hliníku se u všech vzorků pohybují v intervalu 0,009 až 0,013%. Veškeré rozdíly hliníku u přilítých vzorků jsou téměř dvojnásobné než hodnota rozdílu kovu v pánvi, což nasvědčuje tomu, že k reoxidaci dochází během dopravy kovu v pánvi a během odlévání. Lze vysledovat, že největší rozsah reoxidace byl na pozici 1 u odlitku 151 25 B3, ovšem nejedná se o výrazný rozdíl ve srovnání s ostatními vzorky.

7.2.3. Analýza metalografických výbrusů

Na vzorcích odebraných z přilítých válečků byl proveden metalografický výbrus. Vzorky byly prohlíženy po okrajích, byla změřena zoxidovaná povrchová vrstva, potom vrstva, ve které proběhla reoxidace a byly spočítány počty vměstků a ředin vždy na 10-ti plochách na každém vzorku. Na některých výbrusech bylo objeveno řádkování, shluky, penetrace a veliké vměstky. Některé vzorky neměly téměř žádnou reoxidovanou vrstvu nebo ve většině míst pod povrchem chyběla.

Na každém vzorku bylo náhodně vybráno 10 ploch, které odpovídaly obrazu přenášeném z mikroskopu. Plocha tohoto obrazu byla přibližně 430 x 330 μm . V několika místech byly změřeny tloušťky zoxidované vrstvy a tloušťky reoxidované vrstvy. Reoxidovaná vrstva byla určena vizuálně. Byly vypočteny aritmetické průměry měřených tlouštěk vrstev, zaokrouhleny a zapsány do *tab. 7.8*. Dále byly zjištěny počty vměstků a ředin, případně zjištěny rozměry velikých vměstků. Všechny poznatky byly zaznamenány a výsledky měření jsou také v *tab. 7.8*.

Vzorky byly sledovány při zvětšení 100x při nenaleptaném vybroušeném povrchu. Pro všechny vzorky byly vypočítány průměrné počty vměstků, mikrostaženin a jejich směrodatné odchylky. Tímto sledováním měla být určena čistota jednotlivých vzorků.

Pozn.: Hodnoty tlouštěk oxidovaných a neoxidovaných vrstev uvedené v *tab. 7.8* jsou průměrné a nelze se tedy řídit pouze nimi – přesnější popisy viz slovní popisy nálezů z analýz vad jednotlivých vzorků – kapitola Mikroanalýza vměstků. Nalezené řádky (řetízky) sulfidů potvrdí až mikroanalýza, protože při zvětšení 100x se v některých případech mohlo jednat o nečistoty.

Tab. 7.8 – Vyhodnocení počtu vad na vzorcích

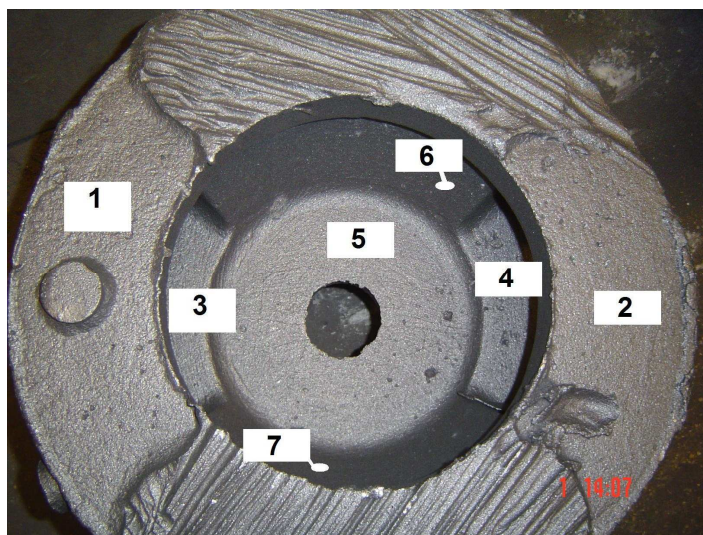
číslo vzorku	průměrná tloušťka vrstvy [μm]		průměrný počet		směrodatná odchylka		poznámka
	oxidická	reoxidovaná	vměstků	ředin	počtu vměstků	počtu ředin	
1.1	20	60	21,9	5,6	9,95	3,47	řádky
2.1	10	60	16,3	3,6	4,42	1,84	největší vměstek Ø 120 μm
3.1	100	max. 60	19,5	2,2	11,31	1,14	řádky, místy není reox.vrstva
4.1	30	110	17,9	2,6	5,07	1,84	řádky, penetrace, vměstek Ø 130μm
1.2	90	50	18,9	3,8	8,45	3,08	řádky, ox.vrstva až 400 μm, vměstek 2 x 2,7 mm
2.2	40	80	18,1	2	3,51	1,15	penetrace, největší vměstky Ø 30 μm
3.2	150	10	13,6	1,1	3,57	0,99	téměř bez reoxidace, řádky, 2 velké vměstky Ø 50 μm,
4.2	80	40	13,6	2,6	3,72	1,43	penetrace
1.3	200	40	40,8	2	20,05	1,15	penetrace, 3 vměstky Ø 45 μm, vměstek 2,5 x 1,5 mm
2.3	20	90	12,5	1,7	4,43	1,16	řádky, penetrace
3.3	300	110	16	2,6	12,04	1,84	shluky
4.3	40	40	12,5	1,1	4,62	0,99	penetrace, řádky, vměstky Ø 120 μm a Ø 130 μm, vměstek 1,5 x 1 mm

7.3. MĚŘENÍ PLOCH A OBJEMŮ VAD

Měřením ploch a objemů vad získáme informace o ploše povrchu odlitku zasaženém vadami a objemu kovu, který bude potřeba vydrážkovat a následně navařit. Z těchto podkladů by bylo možné spočítat náklady na opravy jednotlivých odlitků a porovnat, jestli došlo k výkyvům jejich kvality.

7.3.1. Naměřené hodnoty ploch a objemů vad

Na *obr. 7.2* jsou označeny plochy, na kterých byly měřeny plochy a objemy vad. Jiné plochy měřeny nebyly, protože se neopravovaly. Abychom se zorientovali, je třeba objasnit pozice ploch na odlitku. Pozice č. 1 je plocha mezi nálitky situovaná blíže vtokovým kanálům, plocha č. 2 je protější horní plocha. Plochy 3 a 4 jsou spodní plochy bočních otvorů odlitku. Pozice č. 5 je z daného pohledu dno. Plochy 6 a 7 jsou šikmé stěny pod nálitky.

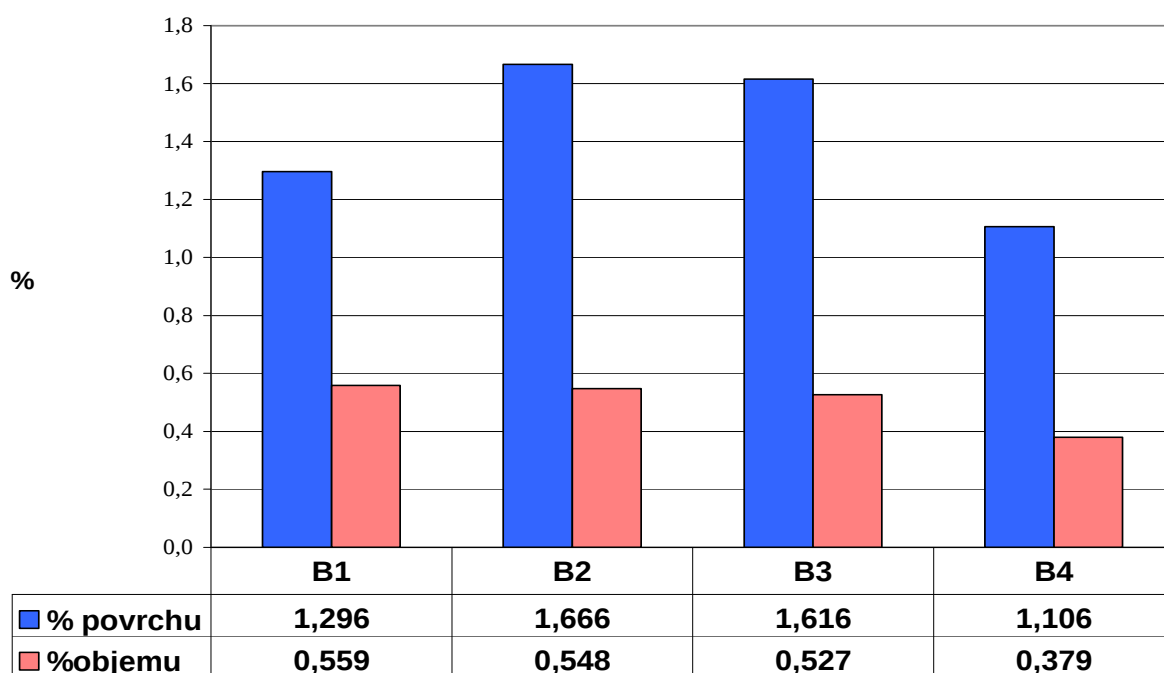


Obr. 7.2 – Rozmístění a značení jednotlivých zkoumaných ploch

Po změření veškerých měřitelných ploch a objemů byly tyto hodnoty zaznamenány do *tab. 7.9* a *grafu 7.4*. Graf 7.4 znázorňuje procentuelní podíl ploch a objemů vad na celkové ploše a objemu odlitku. Celkový objem odlitku je $18\,977,3\text{ cm}^3$ a celková plocha odlitku je $10\,801,1\text{ cm}^2$.

Tab. 7.9 – Naměřené hodnoty objemů a povrchů vad na jednotlivých pozicích odlitků

číslo odlitku	místo vady	nevydrážkovaná plocha vad [cm ²]	vydrážkovaná plocha vad [cm ²]	vydrážkovaný objem vad [ml]
151 25 B1	1	-	35	22
	2	-	25	20
	3	-	17,5	8
	4	-	27	28
	5	-	35,5	28
	6	-	-	-
	7	-	-	-
	suma	-	140	106
151 25 B2	1	4	77,5	36
	2	3	58	36
	3	1	5,5	2
	4	2,5	12	6
	5	0,5	26	22
	6	1	1	2
	7	-	-	-
	suma	12	180	104
151 25 B3	1	-	46	42
	2	-	41	14
	3	-	7	2
	4	-	33	22
	5	-	28	12
	6	-	17,5	6
	7	-	2	2
	suma	-	174,5	100
151 25 B4	1	1	52	32
	2	1	9,5	8
	3	1	18	8
	4	2	20,5	12
	5	0,5	19,5	12
	6	-	-	-
	7	-	-	-
	suma	5,5	119,5	72



Graf 7.4 – Procentuelní podíly vad na celém odlitku

Interpretace výsledků měření ploch a objemů vad

Z uvedeného grafu je zřejmé, že nejméně čistírenských a opravárenských operací se bude dělat na odlitku B4. Nejvíce – téměř stejně na odlitcích B2 a B3.

Dle tab. 7.9 je zřejmé, že největší objemy vad jsou na všech odlitcích, mimo odlitek B1 shodně na pozici č. 1, která se nachází mezi nálitky blíže vtokovým kanálům.

8. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ

Popis vyhotovení vzorků je uveden v kapitole 5.5.1 – Příprava vzorků pro metalografický výbrus. Každý vzorek byl podroben mikroanalýze vměstků na REM Philips XL 30 – EDAX. Cílem měření bylo zjistit chemické složení vměstků nacházejících se v analyzovaných vzorcích. Analýza byla provedena se školitelem.

8.1. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ NA ODLITKU 151 25 B2

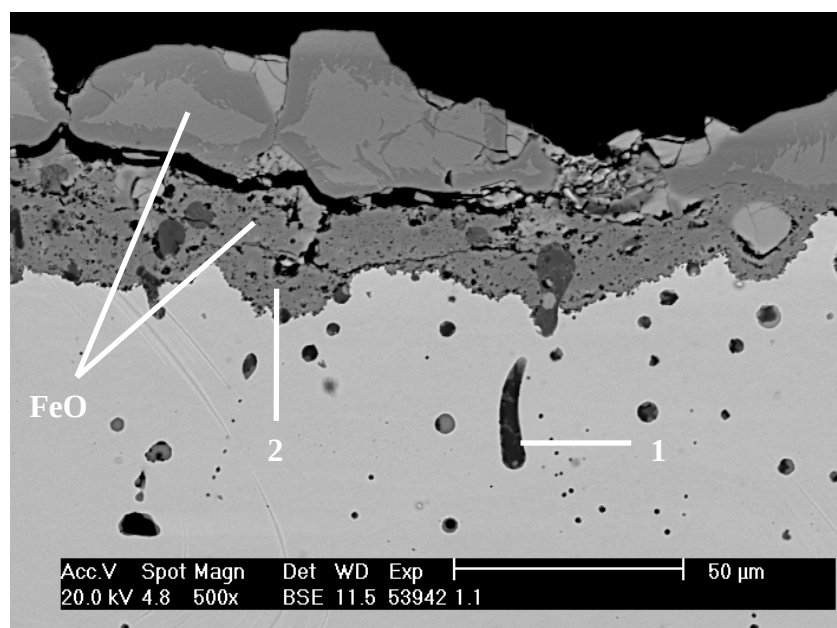
8.1.1. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 1.1

Vzorek měl na povrchu místy výrazné oxidické a reoxidované vrstvy – viz. obr. 8.1. Největší tloušťky oxidické vrstvy jsou kolem 40 μm , celkově pak oxidická vrstva s reoxidovanou mají tloušťku do 100 μm . Povrchová vrstva obsahovala FeO a FeS, povrchová slupka obsahuje 10-15% S.

Ve vzorku se nacházely rovnoměrně rozptýlené vměstky na bázi Al_2O_3 o průměru maximálně 5 μm . Sulfidické vměstky se nacházely ve formě MnS, většina o velikostech 1x2 μm , 2x4 μm , maximálně až 5x5 μm . Morfologicky je lze zařadit jako vměstky III. typu.

Pod povrchovou slupkou byly také nalezeny komplexní oxidy Al, Si a Mn I. typu.

Výsledky analýz vměstků vzorku 1.1 viz tab. 8.1.



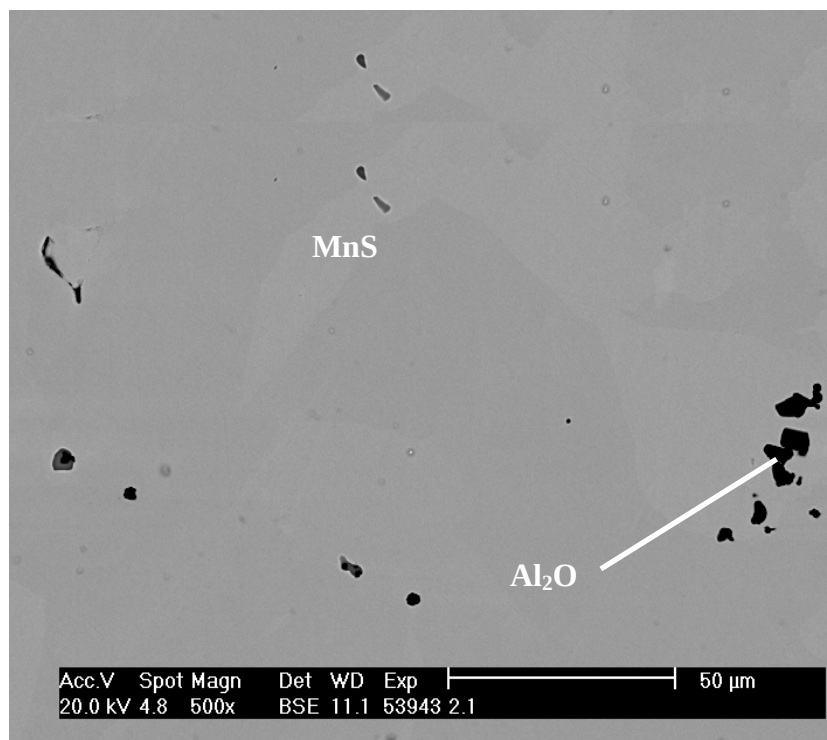
Obr. 8.1 - snímek 53942 vzorku 1.1

Tab.8.1: Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1 a 2 na vzorku 1.1 – snímek 53942

č.snímku	místo	Prvek					
		O	Al	Si	S	Mn	Fe
53942	1	54,89	1,69	19,78	0,64	16,59	6,41
53942	2	38,34	-	-	16,81	0,34	44,51

8.1.2. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 2.1

Vzorek byl dost znečištěn oxidickými vměstkami – jeho čistota byla horší než u vzorku 1.1. Oxidická vrstva poměrně tenká (kolem 10 μm), ovšem místy tloušťka až 80 μm . Místy se nacházely shluky Al_2O_3 IV. typu viz *obr 8.2*. Sulfidy ve formě MnS se nacházely samostatně jako vměstky III. typu, místy tvořily vměstky II. typu.

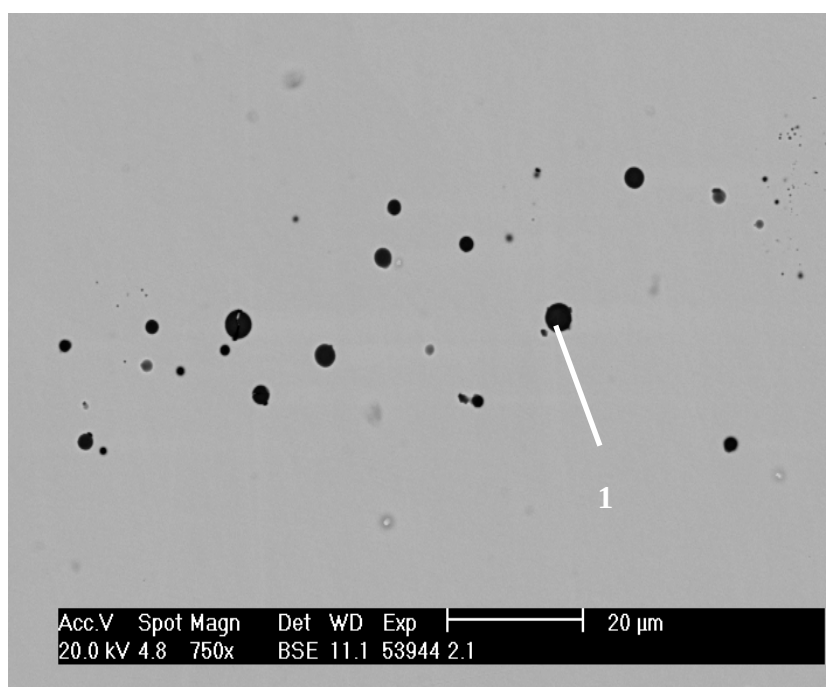


Obr. 5.2 - snímek 53943 vzorku 2.1

Ve vzorku byl nalezen shluk oxidů Al_2O_3 I. typu. Shluk má charakter hliníkem redukováné oxidické blány. Výsledky analýzy vměstku vzorku 2.1 viz *tab. 8.2*.

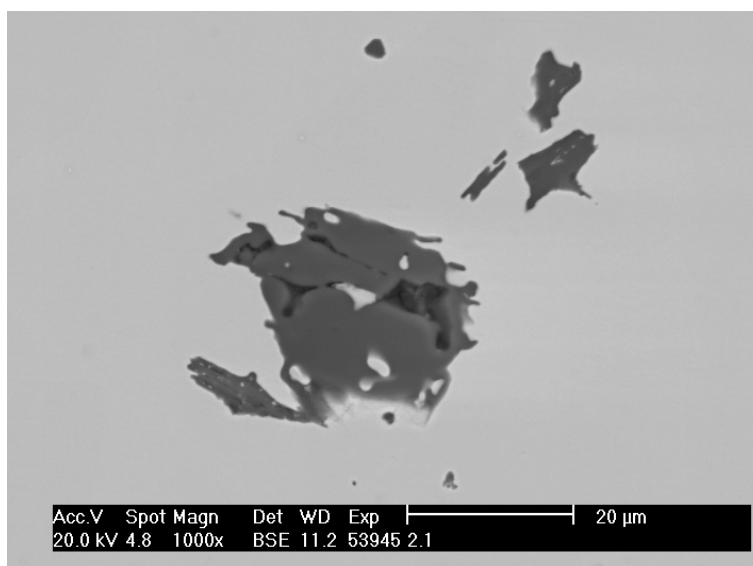
Tab. 8.2 - Složení analyzovaných fází v at. % na vzorku 2.1 – snímek 53944

č. snímku	pozice	Prvek			
		O	Al	Mn	Fe
53944	1	51,49	45,53	0,57	2,40



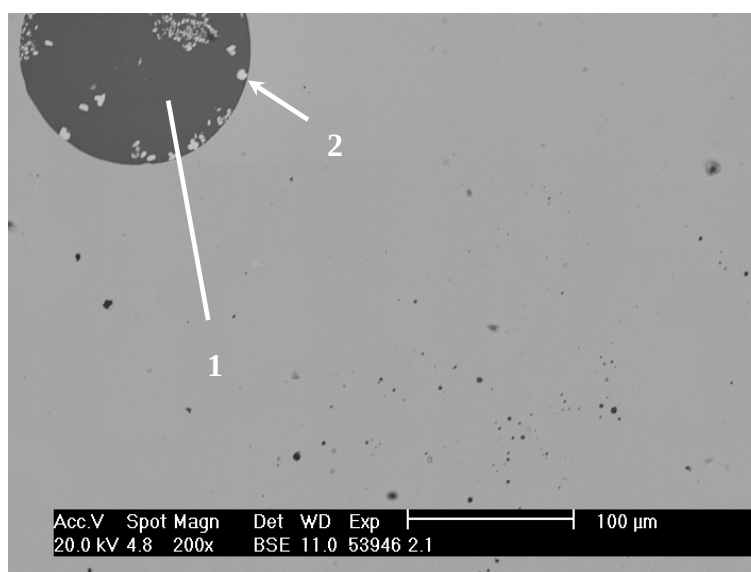
Obr. 8.3 - snímek 53944 vzorku 2.1

Ve vzorku byla nalezena místa se shluky oxidů Al_2O_3 vzniklých patrně koagulací vměstků – viz *obr. 8.4*. Tento vměstek byl několikanásobně větší než běžně nacházené oxidy Al_2O_3 ve vzorku.



Obr. 8.4 - snímek 53945 vzorku 2.1

V podpovrchové oblasti cca 650 μm pod povrchem byl nalezen velký vměstek o průměru cca 120 μm na bázi Si, Mn, Al, O, který uvnitř obsahoval zrníčka Zr – viz *obr.8.5*. Pod tímto vměstkem nalezen shluk oxidů podobného složením analyzovanému velkému vměstku. Výsledky analýzy vměstku viz *tab. 8.3*.



Obr. 8.5 - snímek 53946 vzorku 2.1

Tab. 8.3 - Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1 a 2 na vzorku 2.1 – snímek 53946

č.snímku	místo	Prvek					
		O	Al	Si	Zr	Mn	Fe
53946	1	52,27	8,01	21,65	0,59	17,49	-
53946	2	45,05	-	-	51,16	1,68	2,11

Výsledky analýzy naznačují, že vměstek na *obr. 8.5* vznikl reoxidačními pochody. Vysoké obsahy slabších dezoxidovadel Si a Mn v místě 1 jsou toho důkazem. Shluk oxidů objevený pod velikým vměstkem je podobného složení jako analyzované místo vměstku a výskyt těchto oxidů také souvisí s reoxidací taveniny po odpichu.

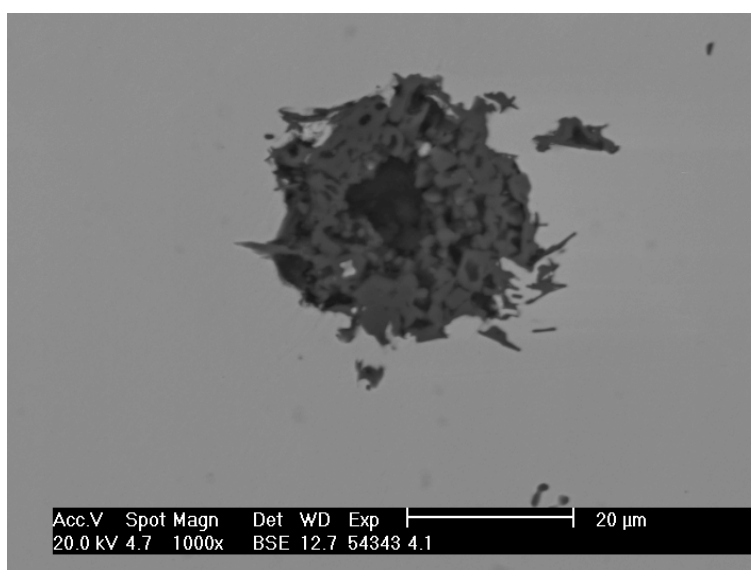
8.1.3. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 3.1

Analýza vměstků nebyla prováděna, ve vzorku bylo nalezeno řádkování – vměstky II. typu. Reoxidovaná vrstva téměř chybí nebo je velmi tenká, pouze v jednom místě má tloušťku cca 60 μm . Vrstva oxidů je rovnoměrná o tloušťkách kolem 100 až 150 μm .

8.1.4. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 4.1

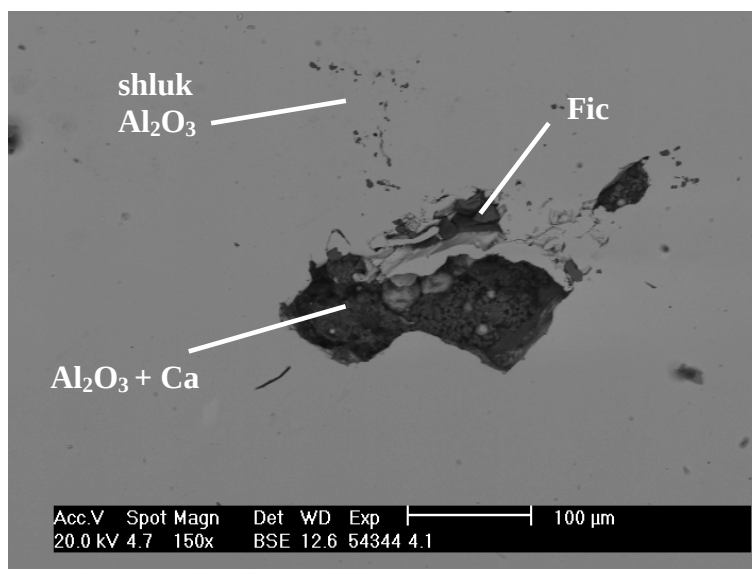
Vzorek 4.1 byl znečištěn oxidickými i sulfidickými vměstkami. Reoxidovaná vrstva místy úplně chybí, běžně do 110 μm . Vměstky Al_2O_3 III. typu o velikosti 1 až 5 μm . Ve vzorku bylo pozorováno více vměstků MnS samostatně, byly drobné, ale patrné. Některé z nich rostou na vměstcích Al_2O_3 . Výskyt sulfidů II. typu zaznamenán nebyl.

Byl nalezen vměstek Al_2O_3 (viz *obr. 8.6*) několikanásobně větší než běžně nalezené, téměř dokonale kulatý o průměru cca 30 μm . Vznikl patrně koagulací jednotlivých vměstků v průběhu plnění dutiny formy.



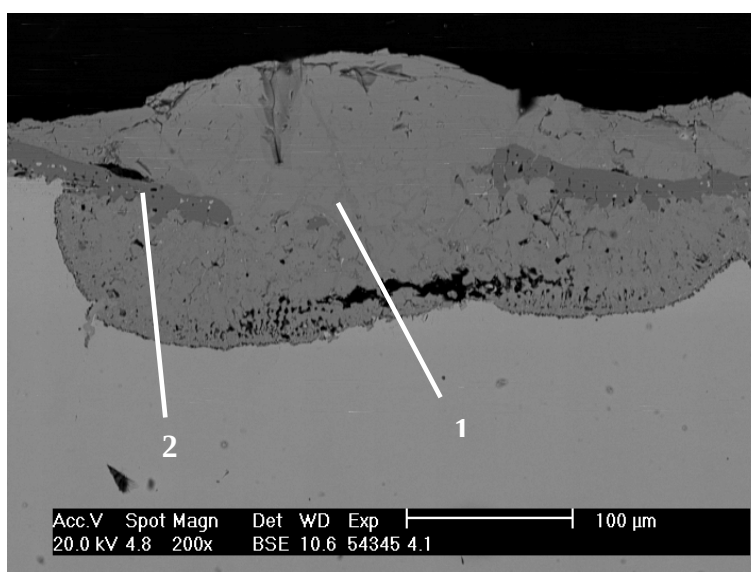
Obr. 8.6 - snímek 54343 vzorku 4.1

U povrchu vzorku byla nalezena výrazná zadrobenina, viz *obr. 8.7* - velký vměstek o velikosti cca 200 x 90 μm. V okolí zadrobeniny se nacházel shluk oxidů Al_2O_3 . Shluk oxidů byl orientován směrem k povrchu.



Obr. 8.7 - snímek 54344 vzorku 4.1

Povrchová vrstva měla v nejtlustším místě 170 μm, skládá se ze základní světle šedé fáze (1) a tmavě šedé fáze (2), která se vyskytuje pouze místy viz *obr. 8.8*. Výsledky analýzy fází viz *tab. 8.4*.



Obr. 8.8 - snímek 54345 vzorku 4.1

Tab.8.4 - Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1 a 2 na vzorku 4.1 – snímek 54345

č. snímku	místo	Prvek			
		O	Si	Mn	Fe
54345	1	44,47	0,57	0,88	54,08
54345	2	49,90	18,16	0,62	31,32

8.1.5. Interpretace výsledků mikroanalýz vzorků odlitku 151 25 B2

Ve zkoumaných vzorcích byly analyzovány oxidické vměstky na bázi Al_2O_3 ve formě vměstků III. typu, některé tvořily zárodky pro MnS. Běžná velikost vměstků byla běžně do 5 μm . V některých místech byly objeveny vměstky o velikosti několika desítek mikrometrů, které vznikly koagulací drobných vměstků. Dále byly nalezeny vměstky vzniklé redukcí oxidických plen. Výskyt oxidických vměstků III. typu ukazuje na to, že minimální obsah $\text{Al}_{\text{r.k.}}$ se i během reoxidace kovu držel nad hodnotou 0,020%. Pouze místy byly nalezeny kulovité vměstky I. typu, které vznikají při $\text{Al}_{\text{r.k.}} < 0,005\%$.

Dále byly nalezeny komplexní vměstky s vysokou koncentrací slabších dezoxidovadel jako jsou Si a Mn. V povrchové vrstvě byly nalezeny oxidické vrstvy s vysokým podílem FeO. Nalezené vměstky dosahují velikosti až stovek mikrometrů.

Vznik komplexních oxidů a oxidických vrstev lze připsat reoxidačním pochodům v tavenině.

Síra byla vázána na sulfidy MnS III. typu. Výskyt sulfidů II. typu byl zaznamenán u vzorku 2.1.

Nejčistší se jevil vzorek 1.1, nejvíce znečištěn byl vzorek 2.1. Ke vzorku 3.1 nebyly dodány výsledky analýzy vměstků, protože nebyl podrobně analyzován.

8.2. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ NA ODLITKU 151 25 B3

8.2.1. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 1.2

Oxidická vrstva dosahovala místy tloušťky až 400 μm , běžně se její tloušťka pohybovala kolem 90 μm . Tloušťka reoxidované vrstvy byla do 50 μm , místy chyběla. Ve vzorku bylo poměrně málo vměstků, analyzováno bylo několik velkých vměstků.

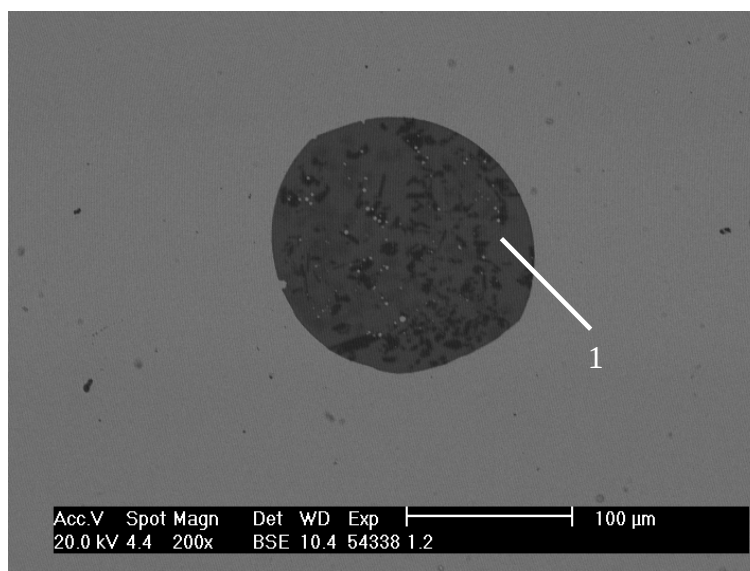
Vměstky na bázi Al_2O_3 III. typu byly ve vzorku rovnoměrně rozptýleny, někdy tvořily zárodky pro MnS.

Síra se vyskytovala ve formě vměstků MnS III. typu, které rostly na vměstcích Al_2O_3 . Byly nalezeny i sulfidy vyloučené ve formě řetízků jako vměstky II. typu.

Byl nalezen kulatý makrovměstek o průměru cca 150 μm – viz *obr. 8.9*. Malé bílé kuličky ve vměstku je čisté Fe, tmavší fáze je Al_2O_3 . Šedá fáze (1) byla analyzována – složení viz. *tab. 8.5*. Podle zjištěného složení lze usoudit, že tento vměstek je produktem reoxidačních pochodů, které proběhly v tavenině.

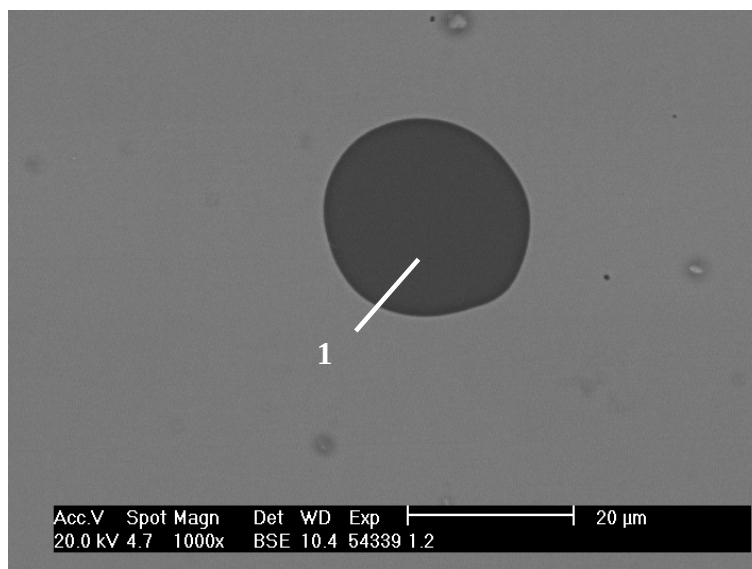
Tab. 8.5 - Složení analyzovaných fází v at. % v místě 1 na vzorku 1.2 – snímek 54338

		Prvek							
č.snímku	místo	O	Mg	Al	Si	P	Zr	Ca	Mn
54338	1	48,65	1,45	13,20	21,38	0,49	0,54	1,21	13,1



Obr. 8.9 - snímek 54338 vzorku 1.2

Dále byl nalezen dokonale kulatý vměstek o průměru 26 μm viz *obr. 8.10*, který byl analyzován – složení viz. *tab. 8.6*. Podobných vměstků bylo nalezeno více a v některých případech rostly na ZrO_2 . Zkoumaný vměstek byl z nich největší.



Obr. 8.10 - snímek 54339 vzorku 1.2

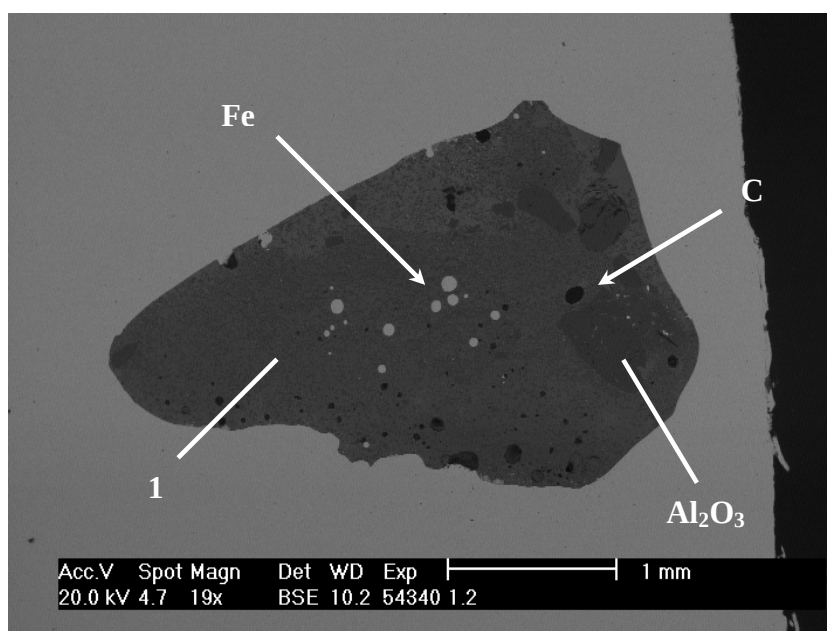
Tab. 8.6 - Složení analyzovaných fází v at. % v místě 1 na vzorku 1.2 – snímek 54339

		Prvek					
č. snímku	místo	O	Al	Si	P	S	Mn
54339	1	48,30	15,57	19,08	0,80	1,29	14,96

Ve vzorku byla těsně pod povrchem nalezena velká makronečistota - v nejširších místech měla rozměry 3,52 x 2,2 mm (viz *obr. 8.11*). Světlé kuličky uvnitř vměstku je čisté Fe, černé kuličky jsou čistý uhlík, tmavě šedá fáze je oxid Al_2O_3 a šedá fáze (1) byla analyzována – její složení viz *tab. 8.7*.

Tab. 8.7 - Složení analyzovaných fází v at. % v místě 1 na vzorku 1.2 – snímek 54340

		Prvek							
č. snímku	místo	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn
54340	1	49,13	1,06	2,03	20,63	17,17	0,48	4,17	5,33



Obr. 8.11 - snímek 54340 vzorku 1.2

8.2.2. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 2.2

Analýza vměstků nebyla prováděna, protože vzorek byl velice čistý. Nalezeny byly pouze běžné velmi malé vměstky Al_2O_3 někdy tvořící zárodky pro MnS.

Ve vzorku byl pouze jeden vměstek Al_2O_3 vzniklý koagulací o velikosti cca 20 μm , který měl členitý tvar podobně jako vměstek na obr. 8.6. Další nalezené oxidy byly o velikosti maximálně 5 μm . V některých oxidech byl identifikován Mg. Oxidická vrstva místy úplně chybí, po zbytku okraje je souměrná vrstva kolem 65 μm , maximální tloušťka místy až 200 μm . Reoxidovaná vrstva je souměrná o tloušťce kolem 80 μm .

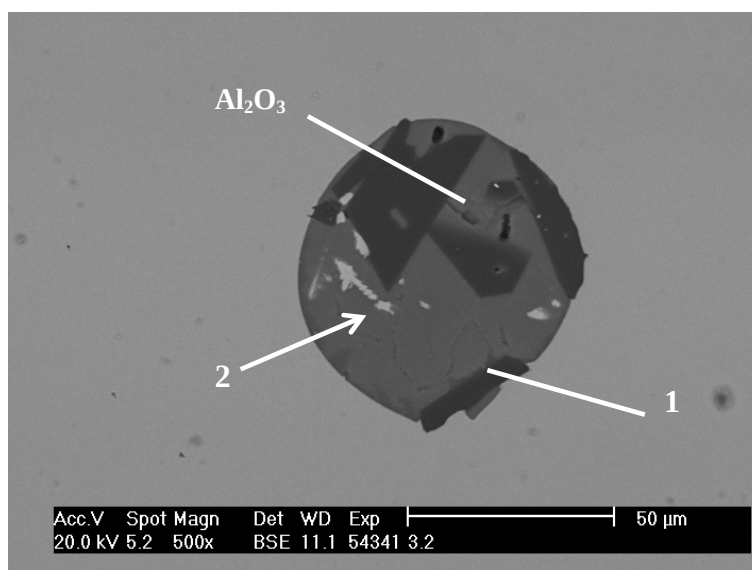
8.2.3. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 3.2

Bylo nalezeno větší množství vměstků – čistota vzorku je horší jak u vzorku 2.2. Tloušťka oxidované vrstvy byla místy až 400 μm , místy chyběla. Reoxidovaná vrstva téměř chyběla. Povrch vzorku s otřepy, na jedné straně koroze. Ve vzorku byl nalezen vměstek o velikosti cca 40 μm obsahující Al, Si, Ca a hlavně C.

Dále byly nalezeny drobné vměstky Al_2O_3 III. typu, které navíc obsahovaly Mg nebo Ca. Byly většinou samostatné o velikostech do 5 μm . Těchto drobných vměstků je poměrně dost.

Sulfidy se vyskytovaly ve formě MnS III. typu. Ve vzorku je velmi málo sulfidů, většinou velikost kolem 1-2 μm , maximálně 3 μm . Sulfidy II. typu ve formě řetízků byly také v malé míře nalezeny.

Ve vzorku na *obr. 8. 12* byl nalezen větší vměstek o průměru cca 70 μm , který byl analyzován. Složení šedé fáze (1) a bílé fáze (2) viz *tab. 8.8*.

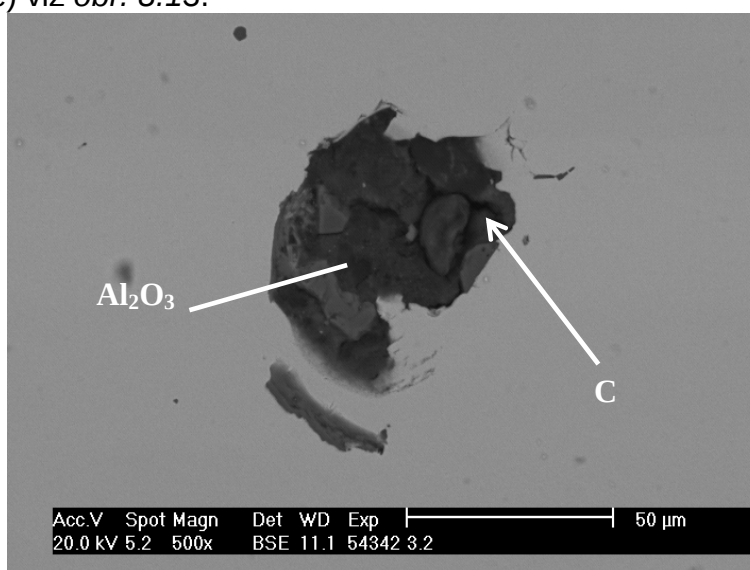


Obr. 8.12 - snímek 54341 vzorku 3.2

Tab. 8.8 - Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1 a 2 na vzorku 3.2 – snímek 54341

č.vzorku	místo	Prvek							
		O	Mg	Al	Si	Zr	Ca	Ti	Mn
54341	1	47,40	1,17	11,80	20,33	0,90	0,34	0,79	16,68
54341	2	50,61	-	-	-	42,19	-	2,34	4,86

Dále byl nalezen vměstek o velikosti 50 x 75 μm obsahující Al_2O_3 (šedá fáze) a C (černá fáze) viz *obr. 8.13*.



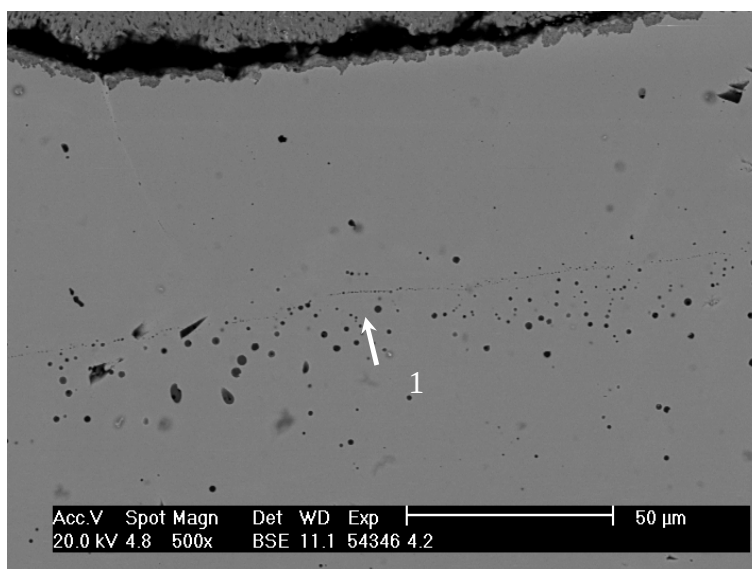
Obr. 8.13 - snímek 54342 vzorku 3.2

8.2.4. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 4.2

Čistota je podobná jako u vzorku 3.2, tedy horší ve srovnání se vzorky 1.2 a 2.2. Ve vzorku byly nalezeny oxidy Al_2O_3 III. typu, které navíc obsahují Mg a Ca. Jsou velmi drobné, velikosti jsou do 5 μm . Tyto oxidy jsou buď samostatné nebo tvoří zárodky pro MnS.

Sulfidy se nacházejí ve formě MnS a rostou na Al_2O_3 nebo jsou samostatné III. typu. Bylo zjištěno větší množství těchto drobných vměstků o velikostech 1 až 2 μm , maximálně 5 μm . Sulfidy II. typu nalezeny nebyly.

Pod povrchem vzorku byly nalezeny podobné vrstvy oxidů jako u analyzovaného vzorku 4.1 (obr. 8.8). Pod touto vrstvou je pásma oxidů – viz obr. 8.14. Ve vzdálenosti cca 50 μm pod povrchovou vrstvou bylo analyzováno pásmo oxidů o tloušťce 30 - 50 μm . Toto pásmo bylo odděleno vrstvou téměř bez oxidů. Jeden vměstek byl analyzován – ostatní mají podobný vzhled i složení. Pásmo oxidů se jeví být orientováno směrem do hloubky materiálu. Oxidy v tomto pásmu dosahují velikosti do 5 μm . Pásmo vměstků pod povrchem je patrně plná, která se v kovu prohnula a redukovala.



Obr. 8.14 - snímek 54346 vzorku 4.2

Tab. 8.9 - Složení analyzovaných fází v at. % v místě 1 na vzorku 4.2 – snímek 54346

		Prvek					
č.snímku	místo	O	Al	Si	S	Mn	Fe
54346	1	29,77	2,47	15,47	0,67	11,98	39,64

8.2.5. Interpretace výsledků mikroanalýz vzorků odlitku 151 25 B3

V jednotlivých vzorcích byly analyzovány oxidické vměstky na bázi Al_2O_3 ve formě vměstků III. typu, některé tvořily zárodky pro MnS. Běžná velikost vměstků byla obvykle v rozmezí od 1 μm do 3 μm . Dále byly nalezeny vměstky vzniklé redukcí oxidických plen. Výskyt oxidických vměstků III. typu ukazuje na to, že minimální obsah $\text{Al}_{r.k.}$ se i během reoxidace kovu v daném místě držel nad

hodnotou 0,020%. Pouze místní nálezy kulovitých vměstků I. typu ukazují na místa, kde proběhla silná reoxidace. Tyto vměstky vznikají při obsahu $Al_{r.k.} < 0,005\%$. Kulovité vměstky byly nalézány zejména pod povrchovými vrstvami. V povrchových vrstvách některých vzorků byly nalezeny oxidické filmy, které měly vysoký podíl FeO. Pod povrchovými vrstvami s vyšší aktivitou kyslíku bylo nalézáno větší množství oxidů, které vznikaly při redukci FeO z povrchových vrstev.

Síra byla vázána na sulfidy MnS III. typu. Výskyt sulfidů II. typu byl v malé míře zaznamenán u vzorku 3.2.

Až na vzorek 2.2 byly ve všech vzorcích nalezeny vměstky o velikostech několika desítek až stovek mikrometrů. Jednalo se o komplexní vměstky na bázi Al, Si a Mn s malým podílem Fe, které jsou výsledkem reoxidačních pochodů. Ve vzorku 1.2 byl nalezen vměstek o velikosti řádově v milimetrech.

Nejčistší se jevil vzorek 2.2, pak vzorek 1.2, který byl až na veliký vměstek (viz *obr. 8.11*) poměrně čistý. Nejvíce znečištěny vměstky byly vzorky 3.2 a 4.2.

8.3. MIKROANALÝZA VMĚSTKŮ NA ODLITKU 151 25 B4

8.3.1. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 1.3

Ve vzorku bylo nalezeno malé množství drobných vměstků Al_2O_3 III. typu o velikosti 1 až 3 μm . Některé vměstky měly výjimečně velikost až 40 μm , obsahovaly navíc Si a Mn. Vzhledem i složením byly podobné jako vměstky ze vzorku 2.1, který je na *obr. 8.9*. V některých případech tvořily vměstky zárodky pro MnS. Vměstky byly rovnoměrně rozptýlené ve vzorku.

Sulfidy se vyskytovaly ve formě MnS III. typu. Ve vzorku je velmi málo sulfidu, většinou velikost kolem 1-2 μm , maximálně 3 μm . Sulfidy II. typu ve formě řetízků nalezeny nebyly.

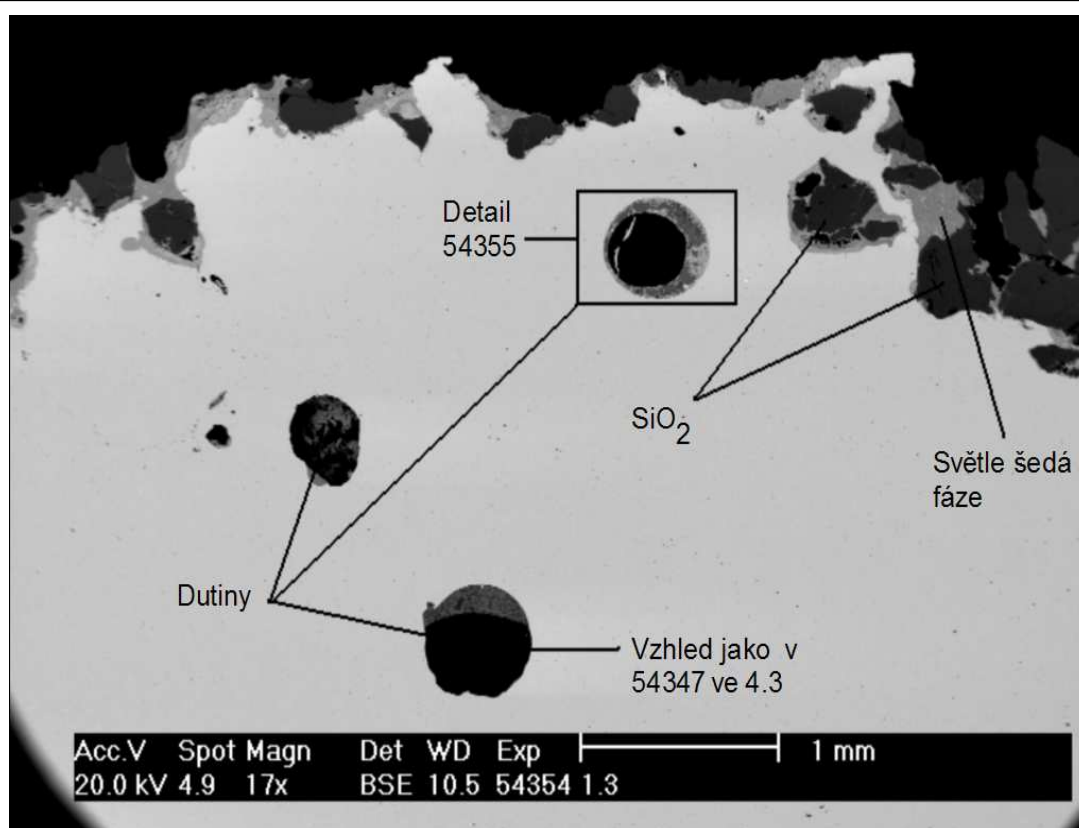
Vzorek jinak poměrně čistý.

V blízkosti povrchu byly nalezeny zadrobené částičky ostřiva SiO_2 . Byly nalezeny dutiny, v nichž jsou obálky z oxidů viz analýza snímku 54355 – *obr. 8.16*. Dále byla analyzována světle šedá fáze (pozice 1), jejíž složení uvádí *tab. 8.10*.

Tab. 8.10 - Složení analyzované světle šedé fáze v at. % na vzorku 1.3 – snímek 54354

č. snímku	pozice	Prvek			
		O	Si	Mn	Fe
54354	1	44,87	20,12	1,74	33,67

Ze snímku 54354 – *obr. 8.15* byla při větším zvětšení provedena mikroanalýza vměstku, který je zvětšený na *obr. 8.16*. Průměr útvaru je 550 μm , analýzou bylo zjištěno, že patrně pochází z náteru. Černý střed je dutina, která vznikla patrně před ztuhnutím oceli. Na jejím povrchu se vyloučily jednotlivé oxidy. Složení jednotlivých analyzovaných fází uvádí *tab. 8.11*.

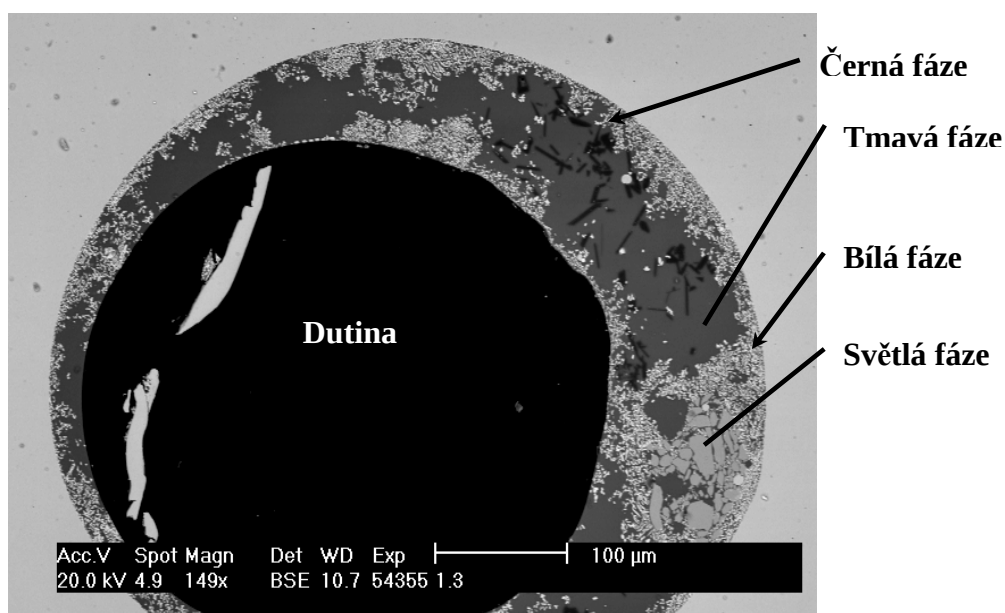


Obr. 8.15 - snímek 54354 vzorku 1.3

Tab. 8.11 - Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1,2,3 a 4 na vzorku 1.3 – snímek 54355

č.snímku	místo	Prvek							
		O	Mg	Al	Si	Zr	Ca	Ti	Mn
54355	1	44,95	-	55,05	-	-	-	-	-
54355	2	48,08	1,25	17,11	19,29	0,85	0,40	0,30	12,72
54355	3	57,09	-	4,90	5,28	29,53	-	-	3,20
54355	4	52,35	-	-	23,56	24,09	-	-	-

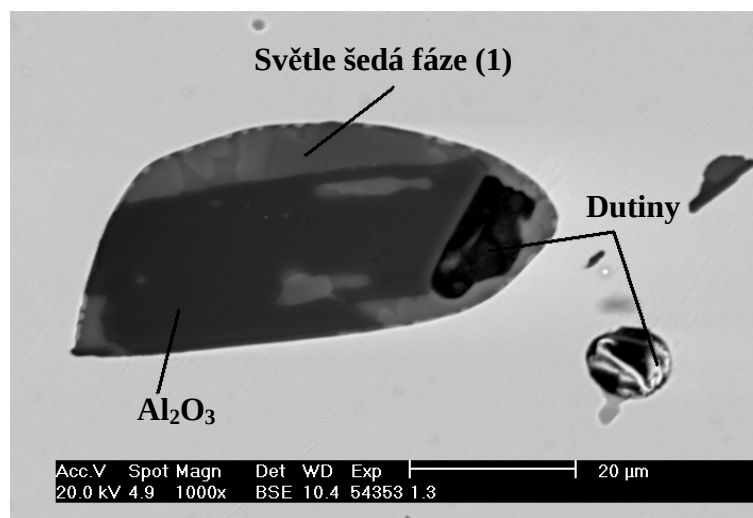
Značení fází: Černá fáze – 1; Tmavá fáze – 2; Bílá fáze – 3; Světle šedá fáze – 4



Obr. 8.16 - snímek 54355 vzorku 1.3

Černá fáze složením odpovídá oxidu Al_2O_3 , tmavě šedá fáze odpovídá složením komplexnímu oxidu na bázi Al, Si a Mn s menším množstvím Mg, Ca a dalších prvků. Světle šedá fáze patrně pochází z lícní strany formy, protože obsahuje vysoký obsah Si a Zr. Bílá fáze pochází z nátěru.

Vměstek nalezený asi 0,5 mm pod povrchem. Výsledky analýzy vměstku viz tab. 8.12.



Obr. 8.17 - snímek 54353 vzorku 1.3

Tab. 8.12 - Složení analyzovaných fází v at. % v místě 1 na vzorku 1.3 – snímek 54353

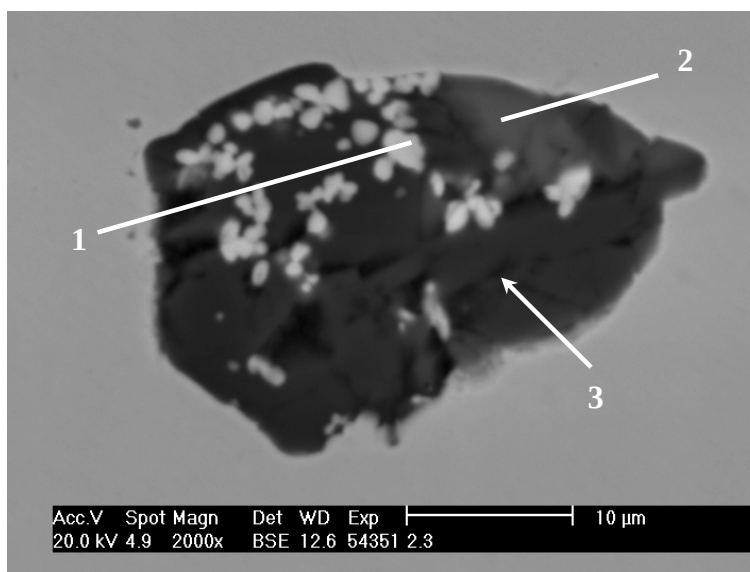
		Prvek					
č.snímku	místo	O	Mg	Al	Si	Ti	Mn
54353	1	45,13	6,06	37,30	0,65	0,83	10,02

8.3.2. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 2.3

Ve vzorku bylo nalezeno malé množství drobných vměstků Al_2O_3 III. typu o velikosti do 5 μm . Některé z nich tvořily zárodky pro MnS. Vměstky byly rovnoměrně rozloženy.

Sulfidy se vyskytovaly ve formě MnS III. typu. Ve vzorku je velmi málo sulfidu, většinou velikost kolem 1-2 μm , maximálně 3 μm . Sulfidy II. typu ve formě řetízků byly nalezeny v zanedbatelném rozsahu.

Tloušťka oxidické vrstvy byla běžně kolem 20 μm , místy až 150 μm . Reoxidovaná vrstva měla průměrnou tloušťku kolem 90 μm . Ve vzorku se nenacházely žádné velké vměstky ani zadrobeniny a vzorek byl relativně čistý. Byl analyzován vměstek o velikosti cca 30 x 20 μm viz obr. 8.18.



Obr. 8.18 - snímek 54351 vzorku 2.3

Tab. 8.13 - Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1,2 a 3 na vzorku 2.3 – snímek 54351

č.snímku	místo	Prvek							
		O	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Zr	Fe
54351	1	58,49	12,32	-	-	-	-	27,24	1,95
54351	2	48,44	10,86	19,09	0,86	1,02	16,35	-	2,73
54351	3	50,54	49,46	-	-	-	-	-	-

Bílá fáze (1) patrně pochází z nátěru, šedá fáze (2) je komplexní oxid na bázi Al a Mn s malým obsahem Fe a Ca a dalších prvků. Černá fáze složením odpovídá oxidu Al_2O_3 .

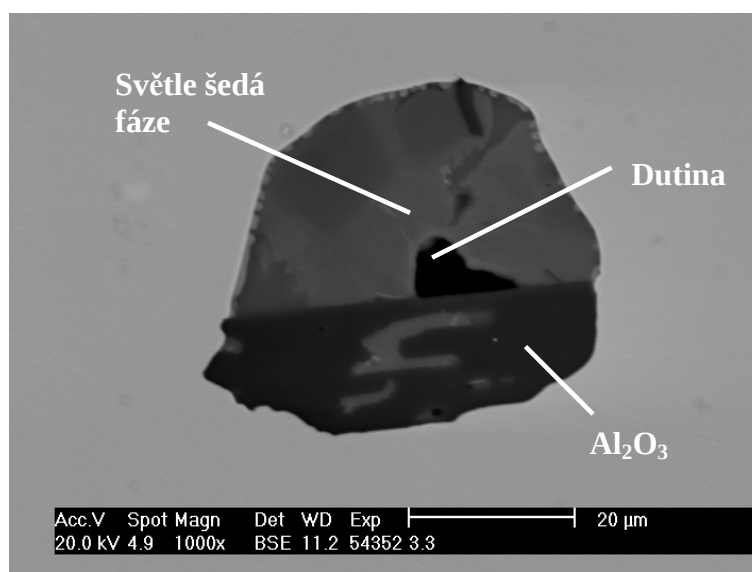
8.3.3. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 3.3

Vzorek s oxidickou vrstvou tloušťky kolem 150 μm , místy až 300 μm . Reoxidovaná vrstva měla tloušťku kolem 110 μm . Ve vzorku nalezeny shluky oxidů.

Ve vzorku bylo nalezeno malé množství drobných vměstků Al_2O_3 III. typu o velikosti do 5 μm . Některé z nich tvořily zárodky pro MnS. Vměstky byly rovnoměrně rozloženy.

Sulfidy se vyskytovaly ve formě MnS III. typu. Ve vzorku je velmi málo sulfidu, většinou velikost kolem 1 až 3 μm . Sulfidy II. typu ve formě řetízků nalezeny nebyly.

Ve vzorku byl nalezen vměstek přibližně kulovitěho tvaru – jeho velikost byla cca 50 x 50 μm . Jeho složení je podobné jako u analyzovaného snímku 54350 ze vzorku 4.3 (obr. 8.23). Vměstek byl nalezen asi 1,5 mm pod povrchem. Černá fáze uprostřed je dutina, tmavě šedá fáze je Al_2O_3 a světle šedá fáze je komplexní oxid na bázi Al, Si a Mn s malým obsahem Ti a Ca.



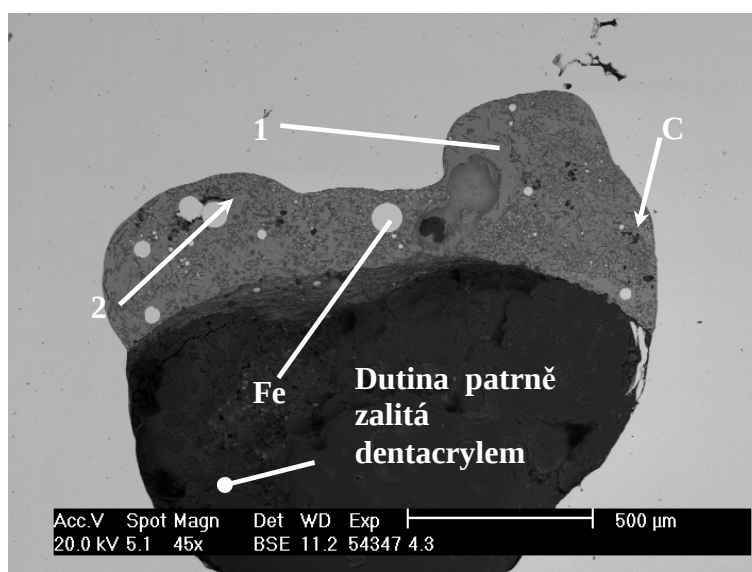
Obr. 8.19 - snímek 54352 vzorku 3.3

8.3.4. Hodnocení mikroanalýzy vměstků vzorku 4.3

Tloušťka oxidické vrstvy na vzorku je od 40 do 150 μm , reoxidovaná vrstva měla tloušťku kolem 40 μm a místy chyběla úplně.

Ve vzorku byly nalezeny vměstky Al_2O_3 III. typu, více se jich nachází u povrchu v pásmech oxidů, hlouběji se jich nacházelo podstatně méně. Jejich velikost je do 5 μm .

Dále nalezeny vměstky MnS ve formě III. typu, které se vyskytují samostatně nebo rostou na Al_2O_3 . Sulfidy jsou drobné o velikostech 1 až 3 μm . Sulfidy II. typu ve formě řetízků nalezeny nebyly. Ve vzorku byl nalezen makrovměstek (obr. 8.20) o velikosti cca 1500 x 500 μm . Tento vměstek sousedí s dutinou, která je vyplněna CaO – jedná se patrně o dentacryl, který tuto dutinu vyplnil. Uvnitř šedé fáze (1) je tmavě šedá fáze Al_2O_3 (2) jehlicovitého nebo deskovitého tvaru. Dále jsou viditelné světle šedé kuličky, což je čisté Fe a černá fáze je uhlík. Výsledky analýzy zkoumaných míst vměstku uvádí tab. 8.14.

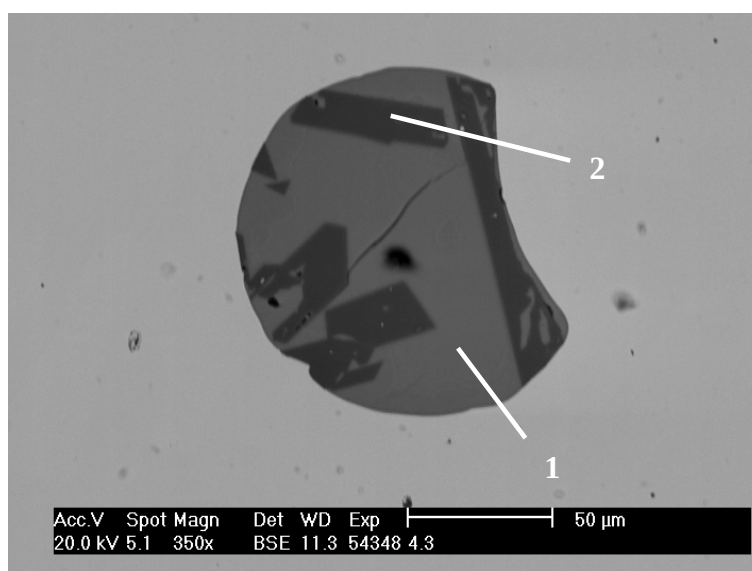


Obr. 8.20 - snímek 54347 vzorku 4.3

Tab. 8.14 - Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1 a 2 na vzorku 4.3 – snímek 54347

		Prvek						
č.snímku	místo	O	Mg	Al	Si	Zr	Ca	Mn
54347	1	48,06	0,95	12,68	20,50	0,86	0,91	16,04
54347	2	47,64	-	51,80	-	-	-	0,56

V blízkosti makrověstku, který je zobrazen na *obr. 8.21*, byl nalezen vměstek o průměru asi 125 μm (viz *obr. 8.21*). Výsledky analýzy vměstku jsou uvedeny v *tab 8.15*.



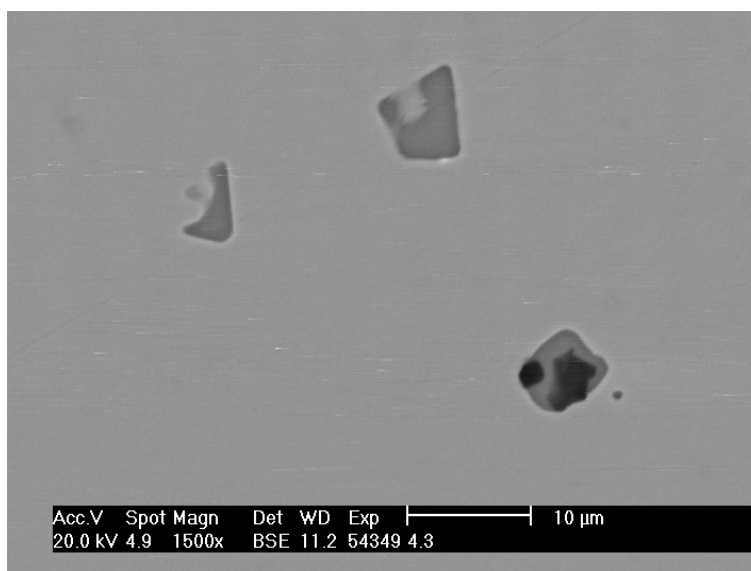
Obr. 8.21 - snímek 54348 vzorku 4.3

Tab. 8.15 - Složení analyzovaných fází v at. % v místech 1 a 2 na vzorku 4.3 – snímek 54348

č.snímku	místo	Prvek							
		O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn
54348	1	48,03	0,91	14,45	18,48	0,50	0,27	0,55	16,81
54348	2	48,02	-	51,98	-	-	-	-	-

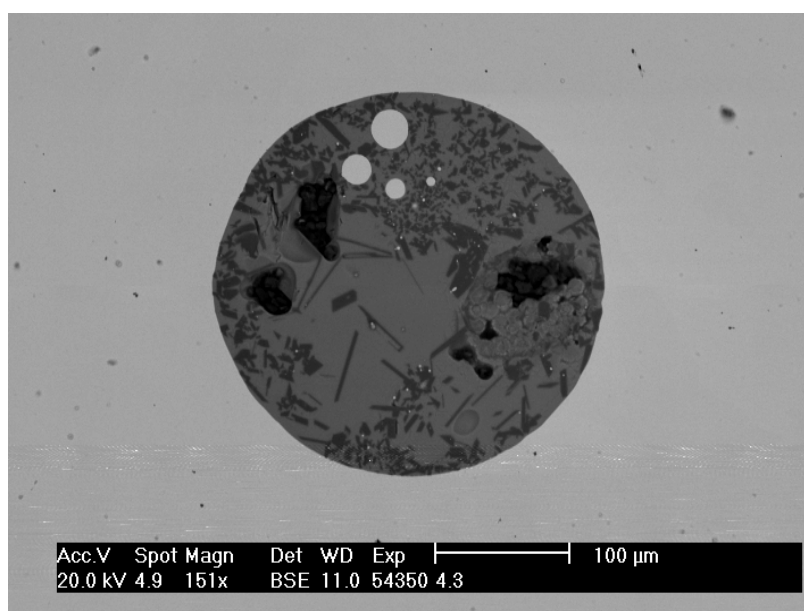
Z analýzy vyplývá, že na *obr. 8.21* se nachází vměstek složený z komplexního oxidu na bázi Al a slabších dezoxidovadel Si a Mn s malým obsahem dalších prvků. Tento komplexní oxid roste na zárodcích Al_2O_3 .

Vměstky MnS, některé z nich rostoucí na zárodku Al_2O_3 .



Obr. 8.22 - snímek 54349 vzorku 4.3

Snímek vměstku typického pro vzorek, který byl nalezen cca 2,5 mm pod povrchem. Vzhled i chemické složení je obdobné jako u analyzovaného vměstku na *obr. 8.21*.



Obr. 8.23- snímek 54350 vzorku 4.3

8.3.5. Interpretace výsledků mikroanalýz vzorků odlitku 151 25 B4

V jednotlivých vzorcích byly analyzovány oxidické vměstky na bázi Al_2O_3 ve formě vměstků III. typu, některé tvořily zárodky pro MnS. Běžná velikost vměstků byla obvykle v rozmezí od $1\text{ }\mu\text{m}$ do $3\text{ }\mu\text{m}$. Výskyt oxidických vměstků III. typu ukazuje na to, že minimální obsah $\text{Al}_{\text{r.k.}}$ se i během reoxidace kovu v daném místě držel nad hodnotou $0,020\%$. Pouze místní nálezy kulovitých vměstků I. typu ukazují na místa, kde proběhla silná reoxidace. Tyto vměstky vznikají při obsahu $\text{Al}_{\text{r.k.}} < 0,005\%$. Kulovité vměstky byly nalézány zejména pod povrchovými vrstvami. Ukazuje to na strhávání vměstků z povrchových vrstev nebo redukci oxidických povrchových vrstev.

Síra byla vázána na sulfidy MnS III. typu. Výskyt sulfidů II. typu byl zaznamenán v malém rozsahu u vzorku 2.3.

Až na vzorek 2.3 byly ve všech vzorcích nalezeny komplexní vměstky na bázi Al, Si a Mn s malým podílem Fe, které jsou výsledkem reoxidačních pochodů. U těchto vzorků byly nalezeny taktéž dutiny, na jejichž povrchu se vyloučily komplexní oxidy. Dále v nich byl nalezen Zr, který pochází z nátěru formy.

Více znečištěn oxidy byl pouze vzorek 4.3, ostatní vzorky obsahovaly poměrně málo vměstků. V povrchových vrstvách vzorků z tohoto odlitku se nevyskytoval FeO, jak tomu bylo v případech ostatních odlitků.

9. INTERPRETACE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

1. Formování proběhlo v pořádku a nebyla zaznamenána žádná poškození hran forem nebo jader, která by mohla způsobit v konečném důsledku vadu na odlitku. Nátěry byly celistvé, v místech odchodu plynů z jader byl nátěr při sestavování formy odstraněn.
2. Teplota v peci před odpichem byla 1631°C, odpichová teplota 1610°C, v pánvi byla naměřena teplota 1601 °C. Hodnota aktivity kyslíku v pánvi po závěrečné dezoxidaci hliníkem byla 7,6 ppm. Naměřená aktivita kyslíku naměřená v pánvi je dostatečně nízká, aby bylo zabráněno oxidaci slabších dezoxidovadel. Tavenina byla v pánvi argonována, aby bylo dosaženo homogenity chemického složení kovu v pánvi.
3. Sledovaná tavba byla dezoxidována pouze hliníkem. Chemické složení odpovídalo předpisu pro danou značku oceli dle zdroje [17]. Modifikace vápníkem prováděna nebyla z důvodu možnosti sledování morfologie vměstků v přilítých vzorcích. Výsledný obsah $Al_{r,k}$ v pánvi byl 0,032 %.
4. Licí časy jednotlivých forem byly mezi 31 až 40 sekundami. Nejdéle byla odlévána první forma, aby se dostatečně prohřála výlevka.
5. Měření teplot a EMN pro následný výpočet aktivity kyslíku se zdařil ve 2 ze 3 případů. Kyslíkový senzor č. 2 měl porušeno vedení a nedodával správné hodnoty, takže se s těmito hodnotami ani dále nepočítalo. Z průběhu teplot po odlití můžeme vysledovat, že kov brzy po nalití natuhával. Brzké natuhávání kovu bylo způsobeno nízkou licí teplotou.
6. Aktivity kyslíku naměřené ve formě jsou v souladu s očekáváním vyšší než v pánvi, což je důkazem, že tavenina reoxidovala. V odlitcích byla naměřena aktivita kyslíku při teplotě likvidu od 9,5 do 14 ppm, v pánvi pak 7,6 ppm.
7. Analýzou strusek bylo zjištěno, že se skládaly z komplexních oxidů na bázi Al, Si, Mn, v malé míře bylo obsaženo Fe a další stopové prvky. Analýza odebrané strusky ukazuje na fakt, že se jedná o produkty reoxidačních pochodů a nejedná se o žáruvzdorniny stažené z pánve, vtokové soustavy nebo formy.
8. Z hlediska chemického složení odebraných vzorků jde usoudit, že nebyly nalezeny výrazné rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Menší nehomogenity chemického složení vzorků lze vysvětlit umístěním jednotlivých vzorků na odlitku. Byl oxidován pouze Al. Tento jev je dán patrně malými rozměry, jednoduchostí, rychlým plněním formy a nízkou licí teplotou.
9. Pokles obsahu křemíku byl menší, než je chyba jeho stanovení.
10. Odlévání a manipulace s taveninou je doprovázeno oxidací kovu, což dokazuje pokles hlavního dezoxidačního prvku – hliníku. Průměrná změna %Al je u všech vzorků 0,011 %. Jednotlivé hodnoty se pohybovaly mezi 0,009 až 0,013%.

11. Na povrchu odlitků nebyla nalezena sekundární struska. Nebyly nalezeny bubliny ani bodliny. To je dáno patrně tlustostěnnou konstrukcí a plněním odlitku. Můžeme usoudit, že výzkum vad spojených s reoxidačními pochody v tavenině by měl být směřován k těžkým a tvarově složitějším odlitkům či odlitkům s tenkými stěnami. U těžkých odlitků vznikne velký objem sekundárních strusek. Tuto domněnku potvrzuje i práce [16], kde bylo na těžkých odlitcích nalezeno mnoho vad spojených s reoxidací taveniny.
12. Mikroanalýzy vměstků potvrdily, že většina vzorků byla relativně čistá. Objevovaly se oxidy a oxisulfidy. Byly nalezeny komplexní vměstky s vysokými obsahy slabších dezoxidovadel i přes to, že dosavadní zjištění poukazovala na fakt, že jejich vznik by byl termodynamicky nepravděpodobný. Obsah Al se v těchto vměstcích pohyboval mezi 10 – 45 at.%, Mn se pohyboval v rozmezí 12 – 18 at.%, Si byl mezi 18 – 22 at.% a Fe se pohybovalo mezi 0 až 7 at.%. Ze vzniku komplexních oxidických vměstků jde vyvodit značná nehomogenita odlévaného kovu a silná místní oxidace.
13. V některých vměstcích byly v malém množství objeveny sulfidy II. typu. Velikosti vměstků se pohybovaly v řádech jednotek mikrometrů až po jednotky milimetrů. Velikých vměstků bylo málo. Jednalo se o shluky oxidů nebo o spláchnuté povrchové vrstvy.
14. Z chemických analýz vzorků vyplývá, že nejméně oxidovány byly vzorky na pozici č.4.

10. ZÁVĚR

Předložená práce obsahuje teoretické poznatky v oblasti reoxidačních pochodů v ocelích. Na teoretický rozbor navazuje návrh experimentů, které mají přispět k objasnění příčin vad odlitků vznikajících reoxidací oceli. Cílem práce bylo objasnit vznik vad a také ověřit nebo vyvinout některé postupy při získávání dat a jejich možnosti využití pro další výzkum. V praktické části byly oba tyto úkoly splněny. Souběžně s vypracováváním této diplomové práce byly odevzdávány průběžné zprávy [19,20], které v reálném čase podávaly informace o probíhajících měřeních a jejich výsledcích.

Na zkušenosti s měřením objemů a ploch vad volně navazuje práce [16], která je také součástí řešeného projektu. Uvedená práce provádí výzkum ve větším měřítku.

Dále bylo provedeno vyhodnocení experimentů s následnou interpretací získaných dat. Technologie výroby odlitku upravována nebyla. Nebyly totiž vyráběny další odlitky. Pokud by k výrobě došlo, bylo by vhodné přidat výfuky mezi nálitky do dělicí roviny, do který by případně mohly uniknout některé vměstky, které vyplaví kov během plnění. Plnění probíhá z boku, což je dáno konstrukcí odlitku. Při spodním plnění by patrně byla silně namáhána jádra a plnění by probíhalo tenkou stěnou, kde vzniká nebezpečí vymílání lící strany formy.

Byl ovšem učiněn závěr, že studium reoxidace ocelí a vad s reoxidací spojených by se mělo zaměřit na těžké tvarově složité odlitky, kde je objem sekundární strusky nezanedbatelný nebo na tenkostěnné lehké odlitky.

Nové poznatky jsou využívány při dalším výzkumu na řešeném projektu, jehož je tato práce dílčí součástí.

11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZÁDĚRA, A., ŠENBERGER, J., VAVRINEC, P., VESELÝ, P., BŘINČIL, T.: *Reoxidační pochody při odlévání a vznik některých vad u odlitků z oceli*. In: Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada hutnická, č.1, roč. L, 2007, s. 261-268, ISSN 1210 – 0471.
- [2] ZÁDĚRA, A., ŠENBERGER, J.: *Vnitřní a povrchové vady ocelových odlitků*. In: *Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem*, 8.–10. října 2008, Svratka, Česká republika, s. 108–117, ISBN 80-02-01848-6.
- [3] MONROE, R.W., BLAIR, M. Steel Foundry research. *American Foundry Association* [online]. 2005 [cit.2009-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.sfsa.org/sfsa/news/2005/WFO2005%20Paper.pdf>>.
- [4] ŠENBERGER, J., a kol.: *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2008. 311 s. ISBN 987-80-214-3632-9.
- [5] ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., ELBEL, T.: *Reoxidační pochody při výrobě odlitků ze slitin železa*. V tisku.
- [6] STRÁNSKÝ, K.: Termodynamické podmínky vzniku bodlin v ocelových odlitcích. *Slévárenství*, roč. 28, č. 9, 1980 s. 373-377.
- [7] ROUS, J. a kol.: Reoxidační pochody v dutině formy. *Slévárenství*, roč. 53, č. 1–2, 1991 s. 33–41.
- [8] JELÍNEK, P.: *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí*, 2004, s. 241, ISBN 80-239-2188-6.
- [9] RUSÍN, K. *Teorie slévárenských procesů*. 2. nezměněné vyd. Praha: SNTL, 1987. 224 s. ISBN 411-33767.
- [10] BŮŽEK, Z., SCHINDLEROVÁ, V.: Zpřesnění Simsovy klasifikace typů sirníkových vměstků vznikajících v ocelích na odlitky. *Slévárenství*, roč. 20, č. 10, 1972 s. 409-413.
- [11] ELBEL, T. a kol.: *Vady odlitků ze slitin železa*. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992.
- [12] ŠENBERGER, J.: Ústní sdělení, kontakt: Senberger@fme.vutbr.cz.
- [13] ZEMČÍK, L.: *Interaktivní matematické modely vybraných metalurgických procesů v programovém prostředí MATHCAD* [online]. 2009 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>>.
- [14] LUOVO, A.: *Casting Simulation as a Tool in Concurrent Engineering* [online]. 1 Espoo: CT-Castech Inc. Oy, 1997, 14.9.2007 [cit. 2009-04-16]. Kódování iso-8859-1 (windows-1252). Text v angličtině. Dostupný z WWW: <<http://www.castech.fi/ARTICLES/ADI/index.html>>.
- [15] KUBĚNA, J. a kol.: Měření a využívání aktivity kyslíku v současné ocelářské teorii a praxi. *Hutnické aktuality*, č. 5, VÚHŽ, 1982.
- [16] PERNICA, V.: *Optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.
- [17] *Slévárenská ročenka 2008*. 1. vyd. Brno: Česká slévárenská společnost, 2008. 215 s. ISBN 978-80-02-02000-4.
- [18] PTÁČEK, L., aj. *Nauka o materiálu II*. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 391 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [19] ZÁDĚRA, A.: Měření aktivity kyslíku, odběry vzorků strusek a formovací směsi z experimentálních taveb oceli ve slévárně DSB EURO, s.r.o. Blansko, *zpráva 1/2008*, 31. 10. 2008.

- [20] ZÁDĚRA, A.: Měření aktivity kyslíku, odběry vzorků strusek a formovací směsi z experimentálních taveb oceli ve slévárně DSB EURO, s.r.o. Blansko, *zpráva 2/2008*, 4. 11. 2008.
- [21] ZÁDĚRA, A., ŠENBERGER, J., LAŠTOVICA, J.: Měření změn chemického složení kyslíkových měrek během jejich použití a stanovení jejich čistoty, Termosondy Kladno, s.r.o, : *zpráva 1/2008*. 29.1.2008.
- [22] ZÁDĚRA, A., a kol.: *Reoxidační pochody při odlévání a vznik některých vad u odlitků z oceli*. In. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada hutnická, č.1, roč. L, 2007, s. 261- 268, ISSN 1210 – 0471.
- [23] OPUSTILOVÁ, L., a kol.: *Vliv reoxidačních pochodů na vznik sekundární struskovitosti*. In Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a litiny s kuličkovým grafitem, 8.–10. října 2008, Svratka, Česká republika, s. 108–117, ISBN 80-02-01848-6.
- [24] ŠENBERGER, J., a kol.: *Reoxidace oceli při odlévání a jakost hutních polotovarů*. In Teorie a praxe výroba a zpracování oceli. 2.–3. dubna, 2008, Rožnov pod Radhoštěm, s. 205–215, ISBN 978-80-86840-39-0.
- [25] ZÁDĚRA, A., ŠENBERGER, J.: Měření aktivity kyslíku v pánvi a během chlazení odlitku ve slévárně DSB EURO, s.r.o. Blansko, *zpráva 4/2007*, 20. 9. 2007.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<u>Zkratka/Symbol</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Popis</u>
AFS		Američan Foundry Society
Al _{r.k.}	[hmot.%]	Hliník rozpustný v kyselině
a _{MexOy}		Aktivita obecného oxidu
a _{Me}	-	Aktivita kovu Me
a _O	-	Aktivita kyslíku
a _O ^{CO}	-	Aktivita kyslíku potřebná ke vzniku bubliny plynu CO
EMN	[mV]	Elektromotorické napětí měřené na kyslíkovém senzoru
ΔG _{Me}	[J.mol ⁻¹]	Změna volné entalpie obecné reakce
log ^H a _O	-	Dekadický logaritmus aktivity kyslíku podle Henryho
K _{Me}	-	Rovnovážná konstanta reakce
KVZ		Kovy vzácných zemin (např. Cer)
Me _x O _y		Oxid obecného kovu Me
[Me]		Obecný kov Me
[%O] _{Me}	[hmot.%]	Množství kyslíku, od kterého se začíná oxidovat kov Me
O	[cm]	Obvod řezu stěny odlitku
P	[cm ²]	Plocha řezu stěny odlitku
R	[cm]	Střední tloušťka stěny
R	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]	Univerzální plynová konstanta
REM		Rastrovací elektronový mikroskop
T	[K]	Termodynamická teplota
TSO		Termosonda
x[Me]		x atomů obecného kovu Me
y[O]		y atomů kyslíku
Zr _{r.k.}	[hmot.%]	Zirkon rozpustný v kyselině