



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA A VADY MASIVNÍCH ODLITKŮ
MANUFACTURE OF MASSIVE CASTINGS AND THEIR DEFECTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR DOLEŽAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Doležal

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:

Výroba a vady masivních odlitků

v anglickém jazyce:

Manufacture of massive castings and their defects

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě masivních ocelových odlitků dochází v průběhu chladnutí a tuhnutí ke vzniku celé řady metalurgických vad souvisejících s dlouhou dobou tuhnutí odlitku. Výroba masivních odlitků proto vyžaduje věnovat zvláštní pozornost nejen metalurgii kovů, výrobě forem a slévárenské technologii, ale i možnostem řízení krystalizace a odvodu tepla v průběhu chladnutí a tuhnutí.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je v provozních podmínkách provést analýzu sortimentu vybrané slévárny oceli. Pro typové masivní ocelové odlitky a stávající technologii jejich výroby provést analýzu vzniku slévárenských a metalurgických vad. Analýza bude provedena na základě výsledků numerické simulace chladnutí a tuhnutí a z rozborů vad na reálných odlitcích. U typových odlitků na základě provedeného rozboru navrhnout nápravná opatření a směry dalšího výzkumu ve výrobě masivních ocelových odlitků.

Seznam odborné literatury:

1. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s.
2. LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
3. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
4. ŠENBERGER, J., aj. Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků. Hutnické listy. Květen 2009, roč. LXII, č. 5, s. 81-86. ISSN 0018- 8069.
5. KAŇÁK, J. a SAIP, J. Způsoby snižování vlivu stvolových vycezenin na jakost odlitků. Slévárství. Říjen 1984, roč. XXXII, č. 10, s. 420-424. ISSN 0037-6825.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty



Abstrakt

Cílem této diplomové práce je provést analýzu sortimentu slévárny oceli ŽĎAS a.s., Žďár nad Sázavou a dále provést pro typové masivní ocelové odlitky a stávající technologii analýzu vzniku slévárenských a metalurgických vad. Počátek práce je věnován výrobnímu sortimentu slévárny oceli ŽĎAS a.s., Žďár nad Sázavou. Následující část práce je věnována výrobním technologiím pro výrobu masivních ocelových odlitků. V závěrečné části práce jsou uvedeny metalurgické a slévárenské vady typových odlitků slévárny a návrhy na odstranění těchto nežádoucích vad. Závěr práce obsahuje shrnutí výsledků a směry ve vývoji výzkumu ve výrobě masivních ocelových odlitků.

Klíčová slova: výroba, vady, masivní, těžký, odlitek, ocelový, ŽĎAS a.s.

Abstract

Object of this master's thesis is accomplished analyze the range of foundry of steel ŽĎAS a.s., Zdar nad Sazavou and make the type massive steel castings and analysis of existing technology foundry and metallurgical defect. The beginning of this master's thesis is dedicated to the manufacturing of steel foundries range ŽĎAS a.s., Zdar nad Sazavou. The following section is devoted to manufacturing technologies for the production of massive steel castings. In the final part of this thesis are described metallurgical and foundry defects of the typical castings of steel foundry and proposals to eliminate these undesirable defects. End thesis includes a summary of the results and trends in the development of research in the production of massive steel casting.

Key words: productions, defects, massive, heavy, casting, steel, ŽĎAS a.s.

Bibliografická citace:

DOLEŽAL, P. *Výroba a vady masivních odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 93 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24.5.2010

.....

Podpis



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky k této práci.

Dále děkuji svým rodičům za poskytnutí technického a finančního zázemí k vytvoření této práce.



Obsah

Obsah

Abstrakt.....	5
Obsah	8
1 Úvod	11
1.1 Cíle diplomové práce	11
2 Sortiment výroby slévárny oceli ŽĐAS a.s.....	12
2.1 Historie	12
2.2 Výroba oceli.....	12
2.3 Výrobní program slévárny.....	12
2.4 Výrobní zařízení	12
2.4.1 EOP (Elektrická Oblouková Pec).....	13
2.4.2 LF (Ladle Furnace) – Pánvová pec	13
2.4.3 VD (Vacuum Degassing) / VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation)	13
2.5 Formovna	15
2.5.1 Mísiče formovací směsi.....	15
2.6 Čištění a povrchová úprava	15
2.7 Regenerace formovací směsi:	16
3 Vady odlitků	17
3.1 Rozdělení vad odlitků	17
3.1.1 Typy vad	17
3.2 Identifikace vad.....	18
3.3 Způsoby a postup zjišťování vad odlitků	19
3.4 Postup určení příčiny vady.....	19
3.5 Shrnutí vad odlitků	21
4 Nejčastější vady masivních ocelových odlitků	22
4.1 Stvolové vycezeniny	22
4.1.1 Vliv metalurgických faktorů.....	23
4.1.2 Vznik stvolových vycezenin.....	23
4.1.3 Shrnutí a opatření proti vzniku stvolových vycezenin	23
4.2 Lasturový lom	23
4.2.1 Teorie vzniku lasturových lomů	24
4.2.2 Vznik a výskyt lasturových lomů.....	24
4.2.3 Shrnutí a opatření proti vzniku lasturových lomů	25
4.3 Trhliny a praskliny.....	25



4.3.1	Vnitřní trhliny a praskliny	26
4.3.2	Praskliny po upálení nálitku.....	26
4.3.3	Shrnutí a opatření proti vzniku trhlin a prasklin.....	27
5	Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků.....	28
5.1	Simulace typových odlitků.....	29
6	Typové odlitky slévárny ŽŽAS a.s.	30
6.1	Tlakový válec.....	30
6.1.1	Geometrie odlitku a formy	31
6.1.2	Průběh plnění dutiny formy	31
6.1.3	Průběh tuhnutí odlitku	32
6.1.4	Porozita (makroporozita a mikroporozita) odlitku.....	32
6.1.5	Shrnutí výsledků simulace – tlakový válec	33
6.1.6	Analýza vad u typového odlitku tlakový válec (vzorek U 4252).....	33
6.2	Ložisko	37
6.2.1	Geometrie odlitku a formy	38
6.2.2	Průběh plnění dutiny formy	38
6.2.3	Průběh tuhnutí odlitku	39
6.2.4	Porozita odlitku	40
6.2.5	Shrnutí výsledků simulace - ložisko.....	40
6.2.6	Analýza vad u typového odlitku ložisko (vzorek U 4248)	41
6.3	Stojan	44
6.3.1	Geometrie odlitku a formy	45
6.3.2	Průběh plnění dutiny formy	45
6.3.3	Průběh tuhnutí odlitku	46
6.3.4	Porozita odlitku	47
6.3.5	Shrnutí výsledků simulace - stojan.....	47
6.3.6	Analýza vad u typového odlitku stojan (vzorek U 4324)	47
6.4	Traverza	51
6.4.1	Geometrie odlitku a formy	52
6.4.2	Průběh plnění dutiny formy	52
6.4.3	Průběh tuhnutí odlitku	53
6.4.4	Porozita odlitku	54
6.4.5	Shrnutí výsledků simulace - traverza.....	54
6.4.6	Analýza vad u typového odlitku traverza (vzorek U 4212 AB)	55
6.4.7	Analýza vad u typového odlitku traverza (vzorek U 4212XY)	60



6.5	Pánev	65
6.5.1	Geometrie odlitku a formy	66
6.5.2	Průběh plnění dutiny formy	66
6.5.3	Průběh tuhnutí odlitku	67
6.5.4	Porezita odlitku	68
6.5.5	Shrnutí výsledků simulace - pánev	68
6.5.6	Analýza vad u typového odlitku pánev (vzorek U4098)	69
6.6	Celkové zhodnocení vad u typových odlitků	73
7	Úvod do experimentů	74
8	Hodnocení vzorků dezoxidované kombinovanou dezoxidací Al + Ce, Al + Zr	74
8.1	Kombinovaná dezoxidace Al + Ce	76
8.1.1	Vzorek číslo 3.1	77
8.1.2	Vzorek číslo 3.5	78
8.1.3	Vzorek číslo 3.10	79
8.1.4	Vyhodnocení vzorků oceli dezoxidované cerem	80
8.2	Kombinovaná dezoxidace Al + Zr	80
8.2.1	Vzorek číslo 4.1	81
8.2.2	Vzorek číslo 4.5	82
8.2.3	Vzorek číslo 4.10	83
8.2.4	Vyhodnocení vzorků oceli dezoxidované zirkoniem	84
9	Hodnocení vzorků dezoxidované kombinovanou dezoxidací Al + Mg	85
9.1	Vzorek číslo 1	85
9.1.1	Metalografické vyhodnocení vzorku	85
9.2	Vzorek číslo 2	86
9.2.1	Metalografické vyhodnocení	86
9.3	Shrnutí kombinované dezoxidace Al + Mg	87
10	Závěr	88
11	Seznam použité literatury	89
12	Seznam použitých zkratk a symbolů	93



1 Úvod

Při výrobě masivních ocelových odlitku dochází v průběhu chladnutí a tuhnutí ke vzniku celé rady metalurgických vad souvisejících s dlouhou dobou tuhnutí odlitku. Výroba masivních odlitku proto vyžaduje věnovat zvláštní pozornost nejen metalurgii kovu, výrobě forem a slévárenské technologii, ale i možnostem řízení krystalizace a odvodu tepla v průběhu chladnutí a tuhnutí.

Podstatným znakem slévárenské výroby je skutečnost, že konečný výsledek práce, kterým je odlitek, je významně ovlivněn lidským činitelem. Slévárenství přitom nepatří mezi pracovně přitažlivé obory, naopak, stále méně lidí je ochotno v často obtížném pracovním prostředí sléváren vykonávat fyzicky i technicky náročnou práci. Tato skutečnost silně ovlivňuje nedostatek kvalifikovaných pracovníků ve slévárnách, což se zcela přirozeně také odráží v konečné jakosti vyráběných odlitků, které jsou vždy více či méně postihovány vadami [1], [2].

Vady odlitků jsou konečným důsledkem nedokonalých a zastaralých technologií, nekázně i nedodržení příslušných výrobních postupů a nízké úrovně organizace a řízení ve slévárně. Kromě ztrát zisku způsobují vady odlitků i mnohé nedorozumění mezi zákazníkem a dodavatelem, která mohou vést ke ztrátě trhu [2].

Náročné a komplikované jsou především ty vady, které úzce souvisí s krystalizačními procesy v pískové formě. Tato oblast neustále se měnících vlastností tuhnoucího kovu a teplem šokem namáhané formy, je obtížně modelovatelná. Příčiny vzniku vad jsou komplexní a také řešení musí zvažovat všechny technické, organizační i lidské faktory [1], [2].

Diplomová práce je dílčí součástí projektu TIP č. FR-TI1/070 – Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků, řešeného ve slévárně oceli ŽĎAS a.s., Žďár nad Sázavou ve spolupráci s VUT Brno. Cíle tohoto projektu je optimalizace výroby masivních odlitků s cílem snížit ekonomické důsledky vad a zvýšit užitnou hodnotu strojírenských polotovarů. Formulace opatření na snížení ztrát způsobených vadami. Ověření návrhu na reálných odlitcích. Statistické hodnocení účinnosti navržených opatření. Návrh nové optimalizované technologie [3].

1.1 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je v provozních podmínkách provést analýzu sortimentu vybrané slévárny oceli. Pro typové masivní ocelové odlitky a stávající technologii jejich výroby provést analýzu vzniku slévárenských a metalurgických vad. Analýza bude provedena na základě výsledku numerické simulace chladnutí a tuhnutí a z rozboru vad na reálných odlitcích. U typových odlitků na základě provedeného rozboru navrhnout nápravná opatření a směry dalšího výzkumu ve výrobě masivních ocelových odlitku.



2 Sortiment výroby slévárny oceli ŽĎAS a.s.

2.1 Historie

Akciová společnost ŽĎAS se sídlem ve městě Žďár nad Sázavou, zahájila svoji výrobu před více než 57 lety. Výroba odlitků byla zahájena první tavbou dne 27. 8. 1951. ŽĎAS a.s. patří do skupiny firem Železiarne Podbrezová Group, jejímž lídrem je přední světový výrobce trubek ŽP a.s. Podbrezová, Slovenská republika. Tržby za rok 2008 činili 5 131,2 mil. Kč (192,6 mil. eur). Výsledek hospodaření po zdanění byl vykázán ve výši 404,0 mil. Kč (15,2 mil. eur) [4].

Výrobní program firmy ŽĎAS, a.s., je zaměřen na výrobu tvářecích strojů, kovací lisů, zařízení na zpracování šrotu, zařízení na zpracování válcovaných výrobků, odlitků, výkovků, ingotů a nástrojů, především pro automobilový průmysl [5].

2.2 Výroba oceli

Roční kapacita ocelárny je 60 tis. tun oceli. Vyrobená ocel je odlévána buď do kokil (ingoty) nebo do forem (odlitky). Výrobní sortiment zahrnuje širokou škálu značek ocelí od konstrukčních, nízko a středně legovaných včetně nástrojových ocelí až po vysokolegované (Cr, Ni, Mn), austenitické a speciální oceli pro letecký průmysl a energetiku [5].

2.3 Výrobní program slévárny

V současné době je výrobní program směřován k tvarově a materiálově náročným odlitkům s programovou podporou MAGMA v hmotnostních skupinách od 200 kg do 40 000 kg hrubé hmotnosti odlitku a maximálních rozměrech 8500 x 4800 x 3000 mm. Odlitky slouží zejména v energetickém průmyslu. Roční produkce odlitků se pohybuje kolem 9000 tun [5].

2.4 Výrobní zařízení

Výroba je realizována na třech elektrických obloukových pecích (EOP), jedné pánvové peci (LF) a na zařízení pro hlubokou dezoxidaci a odplynění oceli ve vakuu s možností vakuového oduhličování vysokolegovaných chromových tavenin (VD/VOD) [5].



2.4.1 EOP (Elektrická Oblouková Pec)

V elektroocelárně jsou tři EOP, jedná se o výrobky firmy Siemens-Elin Union, výrobní kapacity jednotlivých tavicích agregátů jsou uvedeny v *tab. 2.1*. Agregáty využívají elektromechanické regulace pohybu elektrod. EOP byly postupem času výrazně modernizovány. EOP č. 2 a EOP č. 4 jsou vybaveny technologií mezitavbové opravy struskových čar za tepla (torketování). EOP č. 2 je vybavena dvojicí excentricky uložených kamenů pro řízené dmýchání dusíku, případně argonu do nístěje pece. Na EOP. č. 2 bylo zkoušeno využití kyslíko-palivových hořáků (výkon od 0,5 do 2 MW). Od tohoto intenzifikačního kroku je v současnosti upuštěno z důvodu vysokého teplotního namáhání pece [6], [7].

Tab. 2.1 Kapacity EOP

Tavicí agregát	Kapacita	Výkon transformátoru	Průměr elektrod
EOP č. 2	16–22 tun	7,5 MW	350 mm
EOP č. 3	4–8 tun	3,7 MW	250 mm
EOP č. 4	12–19 tun	7,5 MW	350 mm

2.4.2 LF (Ladle Furnace) – Pánvová pec

V elektroocelárně je umístěna pánvová pec (*obr. 2.1*), jež vznikla přestavbou původní EOP č. 1. Hmotnost tavby v LF je 15 – 23 tun. Transformátor o výkonu 7,5 MW byl použit z původní EOP č.1, u něhož byl omezen výkon na max. 3,5 MW, aby při použití elektrod o průměru 250 mm bylo dosaženo ohřevu 3 – 4 °C/min. Vodou chlazené víko dodala firma FUCHS G.m.b.H. Pánve jsou vyzděny po úroveň hladiny kovu žárobetonem, nad úrovní hladiny kovu se nachází vyzdívka z vysokouhlíkatého magnezitu. Pánve jsou osazeny šoupátkovým uzávěry.

Přesunutím redukční fáze tavby na zařízení LF došlo ke zkrácení doby tavby na EOP cca o 40 min na současných cca 160 min. Doba tavby na LF se pohybuje od 40 do 120 min. Obsah vodíku při ukončení zpracování na LF se pohybuje od 4 do 5 ppm, obsah dusíku v tavenině se pohybuje kolem 80 ppm [6], [7], [8].

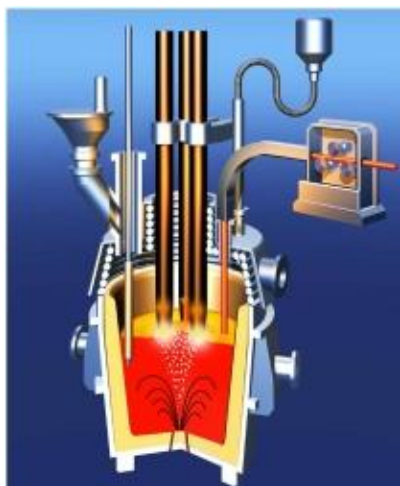
Pánvová pec (LF) je rovněž základním článkem mezi tavicím agregátem a technologickými procesy zpracování ve vakuu [9].

2.4.3 VD (Vacuum Degassing) / VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation)

Elektroocelárna je vybavená zařízením pro vakuové zpracování oceli kesonového typu (VD - *obr. 2.2*). Toto zařízení umožňuje i oxidační vakuové oduhlíčení vysokolegovaných ocelí (VOD - *obr. 2.3*). VOD proces je vhodný zejména pro výrobu vysokolegovaných chromových a chromniklových ocelí s nízkým obsahem uhlíku. VD/VOD pracují v součinnosti s pánvovou pecí. Zařízení dodala firma Mannesmann-Demag-MESSO.

Technické provedení zařízení se skládá z pevného kesonu a pojízdného víka kesonu. Hmotnosti taveb jsou od 12 do 18 tun. Výhledově se počítá i pro menší hmotnosti taveb [6], [7], [8].

K dosažení hlubokého vakua (pod 200 Pa za 4 minuty) slouží 6 paroproudých vývěv, které jsou osazeny Lavalovou dýzou. U procesu VD je použita ultrasonická tryska s výstupní rychlostí plynného kyslíku cca 2 Machy s maximálním průtokem až $500\text{Nm}^3\text{h}^{-1}$. Běžně dosahované hodnoty času VD procesu je 28min a VOD procesu 110min, mezní hodnoty se pohybují kolem 22min u VD resp. 95min u VOD. Koncentraci plynů lze požitím těchto procesů výrazně snížit, běžně se dosahuje 1,3ppm vodíku a cca 40ppm dusíku. Lze dosáhnou i obsahu síry 10ppm, což už je rozlišovací schopnost měření. Hodnoty koncentrací plynů a síru závisejí na vyráběné značce oceli [6], [7], [10].



Obr. 2.1 Princip pánvové pece [11]



Obr. 2.2 Princip metody VD [12]



Obr. 2.3 Princip metody VOD [13]



2.5 Formovna

V roce 2009 přešla formovna na nový druh formovací směsi a to na ST směs pojenou furanavou pryskyřicí. Spotřeba formovací směsi ve slévárně Žďas a.s. je cca 42500 tun za rok. Po vytvrzení směsi dochází k jejímu ztuhnutí v celém objemu, proto je nezbytné tuto směs regenerovat. Praxe mimo jiné ukazuje, že při použití vratných furanových směsí se mnohem méně vyskytují vady odlitků, jako jsou zálupy, zdarobeniny, penetrace apod., než když se používá výlučně nový písek. Použití ST směsí má řadu výhod jako např. rychlá a snadná výroba formy, dobrá rozměrová přesnost a kvalita povrchu odlitků. ST směsi mají dobrou pevnost formy po odlití a taky dobrou rozpadavost při uvolňování. K nevýhodám patří vysoká cena pojiv, nutnost rychlého zpracování a problematika ochrany životního prostředí. Dávkování pryskyřice a tvrdidla je v *tab. 2.2* [14].

Formuje se do formovacích rámců. Nejtěžší odlitky se formují do betonových kesonů. Formovací směs je regenerovaná. Na modelovou směs se používá chromitové ostřívo, výplňová směs je z křemenného ostříva.

Tab. 2.2 Dávkování v hm.% [15]

	Pryskyřice	Tvrdidlo
Křemenná směs	0,8	0,4
Chromitová směs	1,2	0,5

2.5.1 Mísiče formovací směsi

Formovna využívá průběžné žlabové mísiče fy Wöhr ve dvouramenném i jednoramenném provedení. V těžké části formovny jsou umístěny 2 mobilní průběžné žlabové mísiče. Výkony mísičů jsou uvedeny v *tab. 2.3* [16].

Tab. 2.3 Výkony mísičů [16]

Mobilní mísiče	80t křemenné směsi/h, min 10t - 20t chromit. směsi/h
Stabilní mísiče dvouramenné	20t/h
Stabilní jednoramenný mísič	8t/h
Pneudoprava, směsový křemen	2x15t/h
Pneudoprava, směsový chromit	7,5t

2.6 Čištění a povrchová úprava

K čištění se používá komorového tryskače (*tab. 2.4*). Manipulace s těžkými odlitky je tam zajištěna pomocí 80 t mostového jeřábu. Na stole vozu se v komoře tryskají rotační odlitky do průměru 5m a odlitky hranolovitého tvaru. Dlouhé díly se čistí při pohybu vozíku před metačkami. Ruční obsluha v kabině může v případě potřeby dočišťovat odlitky tlakovzdušným tryskačem [16].



Tab. 2.4 Výkony komorového tryskače[13]

Max. rozměr odlitků: válcový hranolovitý	f 5m, v =3m š = 5m, l = 7,5m, v = 3m
Max. hmotnost břemena	80 t (vč. písku)
Vnější rozměry komory	18x7x4,5 m
Pojízdný vozík	5x7m
Max. zatížení	80t
Instalovaný příkon tryskače	215 kW _i
Vytryskané množství abraziva	6 metaček x 300kg/min

Čištění a povrchová úprava je součástí výrobního postupu. Provádí se běžnými čistírenskými operacemi, tlakovzdušným tryskáním ocelovou drtí. Hrubé broušení se provádí na robotizovaném pracovišti ANDROMAT a ručními bruskami [5].

2.7 Regenerace formovací směsi:

Z ekonomických a ekologických důvodů musí být vyřešená regenerace formovací směsi. Regenerací se snažíme zbavit ostřívo od všech nežádoucích složek a získat písek vhodné morfologie, velikosti a čistoty. Kvalita regenerátu se musí neustále sledovat (příklady sledovaných hodnot - ztráta žíháním do 2%, vyplavitelné látky 1,6%, obsah dusíku do 0,05% regenerát ve směsi 90%) [14].

Regenerace ST směsi v ŽĐAS a.s. je založena na mechanickém principu – pneumatická regenerace. První stupeň regenerace je tvořen vytloukacím roštem pracujícím na vibračním principu. Rošt je vybaven děrovaným dnem, na kterém jsou odloučeny hroudy a hrubé zbytky kovu. Horký regenerát je vynášen do akumulárního síla horkého vratu. Následuje drtič a regenerační zařízení.

Jelikož je používán chromit na tepelně exponovaná místa jako ostřívo, je nutné tento materiál také regenerovat (ekonomické hledisko). ŽĐAS a.s. používá čtyřstupňovou separaci chromitu od firmy GUT. Popis čtyřstupňové separace chromitu v systému pryskyřičné ST směsi je podrobněji popsán v [17].

Tab. 2.5 Kvalita regenerátu[16]

Teplota písku na výstupu z regenerace	25±3°C
Ztráta žíháním u křemenného regenerátu	max. 2,6% při dodržení vstupních parametrů
SiO ₂ v chromitovém regenerátu	max. 1%
Prach v regenerátech	max. 0,5% (částice menší 0,09mm)
Chromit v křemenném regenerátu	max. 1,5%
Účinnost regenerace a separace	křemen 90%, chromit 80%
Využití regenerátu ve formovací směsi	křemen 90%, chromit 80%



3 Vady odlitků

Vady odlitků jsou ve svém důsledku nežádoucím a velmi nepříjemným problémem, který značně komplikuje plynulost výroby. Kromě ekonomických ztrát jsou také příčinou četných nedorozumění mezi pracovníky zajišťujícími výrobu odlitků, neboť téměř každá vada je výslednicí mnoha příčin. Jejich podíl na konečné zmetkovitosti je možno obvykle rekonstruovat jen s jistou přibližností, zatímco pracovníci ve výrobě zpravidla požadují jeho co nejpřesnější vymezení. Všechny vady odlitků zároveň snižují kvalitu odlitků, jestliže je nezachytí výstupní kontrola, stanou se předmětem reklamací, pak poškozují dobré jméno příslušné slévárny a snižují její konkurenční schopnost na trhu s odlitky. Z tohoto hlediska představují největší nebezpečí vady skryté a z nich zejména ty, které znamenají zhoršení funkční schopnosti odlitku. Je nutno si uvědomit, že ani nejdokonalejší metalurgický a technologický postup nezaručuje výrobu ocelových odlitků bez vad. Výsledné požadavky na jakost každého odlitku vyplývají ze způsobu jeho využití a zejména z podmínek zatěžování po celou dobu exploatace [18], [19].

Víme, že jakost odlitku, zejména jeho zaručená jakost, má v současnosti v řadě případů větší váhu než jeho cena, a že je jí dáována přednost, jako kritériu, které rozhoduje o tom, zda zákazník se pro odlitky vyráběné touto, či onou slévárnou rozhodne, nebo nikoli [18].

3.1 Rozdělení vad odlitků

Termín vada odlitku má ve výrobně technickém pojetí podmíněný význam, Vadou odlitku se rozumí každá odchylka vzhledu, tvaru, rozměru, hmotnosti, struktury a vlastností zjištěných laboratorními, či jinými zkouškami od sjednaných technických podmínek, popřípadě od norem, které s výrobou příslušného typu odlitku souvisejí [2].

3.1.1 Typy vad

3.1.1.1 Zjevné vady

Zjevná vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku prostým okem, nebo jednoduchými pomocnými měřidly [2], [19].

3.1.1.2 Skryté vady

Skrytá vada odlitku je vada, kterou je možno zjistit až po obrobení odlitku, nebo speciálními měřidly či prostředky, například prorýsováním, pomocí vhodných přístrojů, nebo laboratorními či jinými zkouškami [2],[19].



Dále lze rozdělit vady dle současné konvence na vady přípustné a nepřípustné, či opravitelné nebo neopravitelné [2], [19].

3.1.1.3 Přípustná vada

Přípustná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, kterou tyto dokumenty připouštějí, aniž by požadovaly její odstranění u výrobce odlitku, pokud není zvláštními podmínkami výslovně zakázána [2], [19].

3.1.1.4 Nepřípustná vada

Nepřípustná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, kterou nelze odstranit opravou, nebo jejíž oprava je podle sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem nepřípustná (tzn. Je výslovně zakázána) [2], [19].

3.1.1.5 Opravitelná vada

Opravitelná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, jejíž oprava vhodným způsobem (např. zavařením, vyrovnáním, aj. technologiemi) je sjednanými technickými podmínkami nebo příslušnými normami povolena nebo není výslovně zakázána [2], [19].

3.1.1.6 Odstranitelná vada

Odstranitelná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, kterou je možno odstranit po dohodě s odběratelem odlitku jen zvláštními úpravami nepředpokládanými původním výrobním postupem (např. vypouzdřením odlitku, nepředepsaným tepelným zpracováním, speciálním opravným svařováním) [2], [19].

3.2 Identifikace vad

Správná identifikace vady je jedním z hlavních problémů, které řeší slévárenští odborníci po celou dobu historie slévárenství. Diagnostika vady je klíčem ke snížení nákladů ve slévárně [1].

Ke správné diagnostice vad odlitků se užívá klasifikační systém vad. Z těchto systémů jsou uspořádány atlasy vad. Nejznámější atlas vad byl vypracován mezinárodní komisí CIATF (International Committée of Foundry Technical Association) nebo International Atlas of Casting Defects vydaný Americkou slévárenskou organizací (AFS) [18].

Mezinárodní atlas vad odlitků je koncipován do čtyř hlavních sekcí (1. Klasifikace vad formou tabulek; 2. Detailní popis vady, příčiny vzniku, zamezení vzniku; 3. Bibliografie pro další studium; 4. Jmenný index všech běžných vad) [18].



Z mezinárodního atlasu vad čerpal kolektiv českých autorů, který publikoval knihu popisující vady odlitků ze slitin železa s vlastní klasifikací vad. Tato klasifikace použila jako základ 7 tříd a zachovala si výchozí třídění z ČSN 42 1240 a z mezinárodního atlasu vad. Každá třída má své charakteristické číslo 100 až 700 (*tab. 3.1*). Skupiny vad charakterizují první dvě čísla znaku. Skupin vad je celkem 38. Z toho 18 skupin se dále člení na 70 jednotlivých druhů vad, pro které se využívají všechna tři čísla znaku. Pokud se skupina vad dále nedělí (20 případů), používá se k označení vady název skupiny. Klasifikace vad zahrnuje k celkem $70 + 20 = 90$ vad a $70 + 38 = 108$ možností k vyjádření jejich názvů [1], [20].

3.3 Způsoby a postup zjišťování vad odlitků

Identifikace vad spojená se stanovením příčin jejich vzniku a se stanovením opatření k zamezení jejich výskytu a prevenci vychází nejprve ze vzhledových (morfologických) a technologických znaků. Rozhodující význam pak mají informace pocházející ze sběru dat o podmínkách výroby [20].

Celkem můžeme zaznamenat 21 způsobů, pomocí nichž můžeme vady zjišťovat (*tab. 3.2*). Nejčastější metodou je vizuální kontrola odlitku, pak následuje stanovení mikrostruktury a prozařování odlitků. Často však musíme metody kombinovat a stává se, že k určení vady musíme použít postupně několik způsobů. Identifikace vady je složitý intelektuální výkon, který vyžaduje kromě kvalifikace též zkušenosti a intuici. Aby kontrolor, metalurg nebo jiný slévárský technik byl dobrým diagnostikem vad, je třeba, aby používal vhodnou měřicí a laboratorní techniku, schopnosti kritického myšlení, analýzy a syntézy vztahů mezi různými činiteli a dokázal být objektivní [1], [20].

3.4 Postup určení příčiny vady

Postupná klasifikace vad, která vznikla pod patronací CIATF, nebo jako český návrh, si kladla za cíl rozčlenit vady odlitku tak, aby se dala po identifikaci vady přímo a jednoznačně určit její příčina. Lze to tak učinit v případě vad tvaru, rozměru a hmotnosti nebo u povrchových vad (prasklé jádro, ...). Většina vad však má mnoho příčin [18].

Při určování příčin vzniku, vady bychom vždy měli znát co nejvíce údajů o výrobním procesu a o podmínkách výroby jednotlivých odlitků. Pokud nejsme schopni určit příčiny vady z její definice, výběrem několik možných příčin a z těch se pak snažíme v následujících krocích vybrat jednu nebo více dominantních. Z toho pak vyhodnocujeme základní statistické charakteristiky a používáme různé statistické metody podle různého stupně zavedení statistického řízení procesu SQC (Statistical Quality Control) [20].



Tab. 3.1 Třídění slévárenských vad na třídy, skupiny a druhy vad [2]

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Názve skupiny vad	Počet druhů
100	Vady tvaru rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu	8
		120	Chybějící část odlitku s lomem	3
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar	4
		140	Nedodržení hmotnosti odlitků	-
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny	3
		220	Zálupy	3
		230	Nárasty	4
		240	Výronky	-
		250	Výpotky	-
		260	Zatekliny	3
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku	7
		280	Vady povrchové ochrany odlitku	-
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny	3
		320	Praskliny	-
		330	Porušení souvislosti mechanickým poškozením	2
		340	Porušení souvislosti nespojením kovu	2
400	Dutiny	410	Bubliny	5
		420	Bodliny	-
		430	Odvařeniny	3
		440	Staženiny	6
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost	2
		520	Nekovové vměstky	6
		530	Makrosegregace a vycezeniny	4
		540	Broky	-
		550	Kovové vměstky	-
		560	Nevyhovující lom	-
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny	3
		620	Vměstky	-
		630	Nesprávná velikost zrna	-
		640	Nesprávný obsah strukturních složek	-
		650	Zatvrdlina, zákalka	-
		660	Obrácená zákalka	-
		670	Oduhličení povrchu	-
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury	-
700	Vady chemického složení a vlastností odlitků	710	Nesprávné chemické složení	-
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností	-
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností	-
		740	Nevyhovující homogenita odlitku	-



Tab. 3.2 Způsob zjišťování vad odlitků [20]

Skupina	Poř. č.	Název	četnost
Prohlídka odlitku	1	Vizuální kontrola odlitku (surového, hrubého, opracovaného)	70
	2	Prohlídka odlitku (vady) pomocí lupy	11
Měření, vážení	3	Rozměrová kontrola (rýsování, kontrola podle šablon a etalonů)	4
	4	Měření drsnosti povrchu odlitku (porovnání s etalonem)	2
	5	Stanovení hmotnosti	1
Defektoskopie	6	Zvuková zkouška (poklepáním)	1
	7	Prozařování odlitků (RTG, radioaktivní, neutronové)	10
	8	Ultrazvuková defektoskopie (odrazová a průchodová metoda)	7
	9	Magnetická prášková metoda (polévací, napravovací, magnetofluorescenční metoda)	2
	10	Kapilární zkoušky (metoda barevné indikace a fluorescenční metoda)	4
	11	Zkoušky propustnosti (tlakování odlitků)	4
Chemické rozbory	12	Stanovení chemického složení materiálu	5
	13	Stanovení obsahu plynů	4
	14	Rentgenová spektrální mikroanalýza	8
	15	Metody určování fázového složení (difrakční, spektrální, termické, optické aj.)	5
Strukturní rozbory	16	fraktografie	6
	17	Stanovení makrostruktury (včetně Baumanova otisku)	4
	18	Stanovení mikrostruktury světelnou mikroskopií	14
	19	Elektronová mikroskopie (řádovací, transmisní)	4
Rozbor vlastností materiálu	20	Stanovení mechanických vlastností	1
	21	Stanovení fyzikálních vlastností	1

3.5 Shrnutí vad odlitků

K určení druhu vady odlitku slévačům většinou slouží pouze vizuální kontrola a tak se často stává, že vadu může jeden pozorovatel označit jiným termínem než druhý kontrolor, který když se dívá na stejný odlitek, vysvětluje vadu jako jiný druh se zcela odlišnou genezí vzniku. K tomu, aby s těmito omylům předešlo, lze použít další metody kontroly vyžadující většinou složité přístroje a zdlouhavé postupy. Méně nákladným způsobem je však každodenní systematická práce ve slévárně, důslednost a pořádek, který je dán určitým systémem řízení jakosti [20].



4 Nejčastější vady masivních ocelových odlitků

Slévárenské vady se vyskytují u všech odlitků. Neexistuje odlitek, který by byl bez vady. Vady jsou odchylky od sjednaných technických podmínek. Záleží na zákazníkovi a na sjednaných technických zda odlitek přijme či nikoliv. U těžkých odlitků se též vyskytují běžné slévárenské vady, ale mají i své specifické vady, které se u hmotnostně menších odlitků nevyskytují. Mezi tyto zvláštní vady lze zařadit Stvolové vycezeniny (zvané rovněž A-vycezeniny), lasturové lomy, praskliny a trhliny (zejména vnitřní trhliny a praskliny po upálení nálitku) a vady spojené se segregací nežádoucích prvků.

4.1 Stvolové vycezeniny

Stvolové vycezeniny jsou specifickou vadou, která se vyskytuje u masivních odlitků. Vznik této vady souvisí se selektivním charakterem tuhnutí. Stvolové vycezeniny jsou podpovrchové vady a často bývají odhaleny až během mechanického opracování masivních odlitků. Jedná se o vady typu makroodmíšení – fyzikální odmíšení. Tato vada je výsledkem fyzikálního pochodu během tuhnutí taveniny v rozmezí teplot likvidu a solidu. V závislosti na hodnotě rozdělovacího koeficientu mezi pevnou fází a taveninu příslušného prvku ve slitině dochází během tuhnutí k odmíšení tohoto prvku mezi osami dendritu a prostoru mezi dendrity, u masivních odlitků dochází k odmíšení v pásmu, či zóně a hovoříme o pásmovém odmíšení prvku. Odmíšení prvků je výsledkem fyzikálního děje krystalizace vlastností příslušné slitiny [21], [2].

Stvolové vycezeniny mají nejčastěji podobu tmavého pásu, orientovaných rovnoběžně se svislou osou odlitku, přičemž mají zvýšený obsah těchto prvků: síry, fosforu a uhlíku. Tímto se jejich uspořádání liší od stvolových vycezenin u těžkých ingotů. Tyto se přiklánějí pod úhlem 4 – 8° k podélné ose. Stvolové vycezeniny představují nejen místa lokální nehomogenity, ale jsou to zároveň místa s výrazně nižšími mechanickými a plastickými vlastnostmi. V jistých případech mohou snižovat odolnost proti opotřebení. Pokud jsou stvolové vycezeniny v dostatečné hloubce pod povrchem odlitku a zároveň nezmenšují nosný průřez v místech vysokého mechanického namáhání, nemusí být nutně ovlivněna užitečná hodnota odlitku [21]. V současné době existují 3 hypotézy vzniku stvolových vycezenin.

1. Skupina plynových hypotéz
2. Skupina rozdílné hustoty obohacené taveniny a zbývající tekuté fáze
3. Skupina působení gravitace a objemového smrštění

Teorii a analýzu stvolových vycezenin shrnují články [21], [22].



4.1.1 Vliv metalurgických faktorů

Výsledky analýzy autorů [2] ukázaly, že nejvýraznější z faktorů, které mohou ovlivnit výskyt vad typu stvolových vycezenin je tepelná akumulace formy. Použitím formovacích materiálů s vyšším koeficientem tepelné akumulace (b_f) se podstatně zmenšil výskyt stvolových vad a změnil se jejich charakter. Přechodem od formovacích směsí na bázi vodního skla na furanovou technologii výroby forem, lze ve slévárně Žďas a.s. předpokládat zvýšení výskytu vad z titulu odmíšení a vycezenin.

Pásmo jejich výskytu se zatlačovalo do větší vzdálenosti od povrchu odlitku. Tam již zpravidla nejsou vycezeniny na závadu. O vlivu rychlosti jsou vedeny velké diskuze v [21]. Z toho vyšly nejmenší rychlosti tuhnutí, které zaručí potlačení tvorby stvolových vycezenin. Nejčastěji udávané hodnoty jsou v článku [21].

4.1.2 Vznik stvolových vycezenin

V průběhu tuhnutí se před frontou tuhnutí zvyšuje koncentrace kyslíku a uhlíku jako důsledek segregace, přičemž za daných podmínek může docházet k uhlíkové reakci, podrobnější popis vzniku stvolových vycezenin je popsán autory [21], [22].

Vnitřní povrch bublin a ředin je lesklý, svíslá orientace nasvědčuje vylučováním plynů. Vycezeniny v podobě bublin a ředin se vyskytují převážně v horních partiích odlitku. Činitelé jsou popsány v práci [21].

4.1.3 Shrnutí a opatření proti vzniku stvolových vycezenin

Opatření k úplnému zabránění vzniku stvolových vycezenin neexistují. Výskyt této vady je možné potlačit opatřeními jako u makroodmíšení a snížením co možná nejvíce obsahu síry, fosforu a uhlíku. Prvotní a hlavní příčinou vzniku vad typu stvolových vycezenin, jakou jsou segregáčnické pásy, pásové řediny a bublinové kanálky, je uhlíková reakce. Výraznost stvolových vycezenin je závislá na obsahu uhlíku v oceli. Rozsah stvolových vad je možno omezit vhodným způsobem dezoxidace, s výrazným zbytkovým obsahem dezoxidačních prvků, hlavně hliníku. Nicméně nejúčinnějším prostředkem je zvýšení rychlosti tuhnutí. V neposlední řadě se jedná o maximální možné snížení obsahu segregujících prvků, jako je síra a fosfor taktéž i maximální možné snížení obsahu plynů, více se k této tématice věnují autoři [2], [22]. V tomto směru se v podmínkách slévárny Žďas a.s. přímo nabízí v co největší míře aplikovat pochody sekundární metalurgie také při výrobě oceli na odlitky.

4.2 Lasturový lom

Lasturovými lomy se rozumějí lomy probíhající po hranicích primárních austenitických zrn, přičemž primárními zrny jsou v odlitcích austenitická zrna vznikající při tuhnutí a chladnutí odlitku [23].



K dezoxidaci oceli se používají hliníkové housky či odpadní hliník. U ocelí na odlitky se používá vždy závěrečná dezoxidace hliníkem v pánvi [22].

4.2.1 Teorie vzniku lasturových lomů

Lze považovat za prokázané, že se na iniciaci lasturových lomů podílí nitrid hliníku a vlastní lomová plocha se vytváří dutinovým mechanismem. Ocel, která rychleji tuhne a chladne, má jemnější primární austenitické zrna a je méně náchylná k tvorbě lasturového lomu [23].

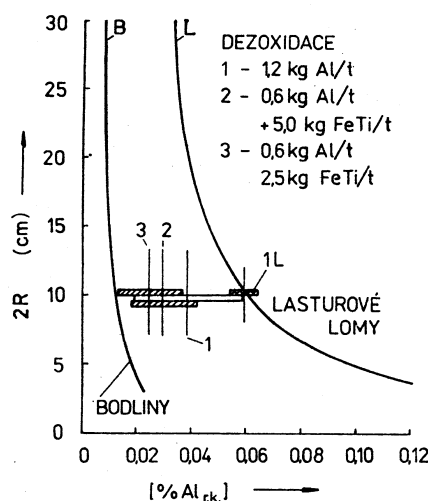
Dále je možno pokládat za prokázané, že lasturové lomy tohoto typu se netvoří v oceli, kde se nenachází volný dusík nebo hliník. Z fyzikálně metalurgických parametrů snižují sklon oceli k lasturovému lomu vyšší rychlost tuhnutí a chladnutí, které v rozhodující míře určují velikost primárního austenitického zrna [24].

Spodní hranice obsahu zbytkového hliníku musí být dostatečná, aby bylo zabráněno uhlíkové reakci po celou dobu odlévání a tuhnutí odlitku. Horní obsah zbytkového hliníku je limitován nebezpečím vzniku lasturových lomů. V ocelích s velmi nízkým obsahem dusíku nebo hliníku se lasturové lomy netvoří. Při výrobě oceli v obloukových pecích jsou výsledné obsahy dusíku v nelegovaných ocelích obvykle 90 – 130 ppm. Při takovém obsahu dusíku je nutné – po dezoxidaci hliníkem – počítat, u odlitků s větší tloušťkou stěn se vznikem nitridu hliníku [2].

Pro výrobu ocelových odlitků jsou doporučené obsahy hliníku závislé na relativní tloušťce stěny odlitku R . Směrodatná tloušťka stěny odlitku – $2R$ [2]. Podrobnější informace k teorii vzniku lasturového lomu lze najít v [22], [23].

4.2.2 Vznik a výskyt lasturových lomů

Na obr. 4.1 jsou znázorněny křivky výskytu lasturového lomu a bodlin v závislosti na směrodatné tloušťce odlitku pro oceli s $C=0,28\%$ a $N=0,010\%$



Obr. 4.1 Mezní křivky výskytu lasturového lomu a bodlin [2]



Jak vidět o z grafu na obr. 4.1, pro tenkostěnné odlitky vychází větší interval rozpuštěného hliníku než u odlitků tlustostěnných. Lasturové lomy se vyskytují zejména v silnostěnných odlitcích. Koncentrace hliníku je omezena jak z minimální tak i maximální hodnoty. Povolené rozmezí koncentrací hliníku se s rostoucí tloušťky stěny odlitku zužuje [2], [23].

4.2.3 Shrnutí a opatření proti vzniku lasturových lomů

Lasturový lom lze omezit jednak hlubokým snížením obsahu dusíku nebo použitím legujících prvků, které zjemňují primární austenitické zrno a tvoří s dusíkem nitridy stabilnější než nitrid hliníku. K těmto prvkům patří titan, zirkonium, niob molybden, a také síra. Při kombinované dezoxidaci hliníkem a titanem váže hliník kyslík a titan dusík. Titan působí substituční zpevnění matrice a zvyšuje sklon ke vzniku trhlin. Koncentrace titanu v oceli se doporučuje vyšší než 0,040% [2].

Ve ŽĐAS a.s. používají ke kombinované dezoxidaci hliník a zirkonium. Tento prvek má větší silnější dezoxidační a denitridační účinek než titan, váže se jak na dusík, tak na kyslík, takže v kombinaci s hliníkem musí být výsledné rozptyly prvků v provozních tavbách větší než při použití titanu. Společná přísada Al a Zr nezabraňuje vzniku lasturových lomů zcela spolehlivě [24].

Uspokojivých vlastností u odlitků s lasturovými lomy lze i u masivních odlitků dosáhnout homogenizací s výdrží na teplotách vyšších než 1000°C, jež se předřadí vlastnímu tepelnému zpracování odlitků. Podstatné zlepšení materiálových vlastností se dá očekávat i ve masivních stěnách odlitků [25].

Aplikace homogenizačního žíhání nemůže nahradit zásadní metalurgické řešení výroby oceli, které musí spolehlivě zaručit podkritické obsahy hliníku a dusíku, aby lasturové lomy nevznikaly [24]. Pro dosažení nízkých obsahů dusíku je v podmínkách slévárny Žďas možné zvážit aplikaci pochodu sekundární metalurgie (VD).

4.3 Trhliny a praskliny

Trhliny a praskliny jsou vady poruchy souvislosti materiálu. V naší slévárenské terminologii označení **trhlina** charakterizuje vznik vady při vysokých teplotách (zpravidla v určitém teplotním intervalu v oblasti solidu), termín **prasklina** vyjadřuje vadu vzniklou při nízkých teplotách. V zahraniční literatuře se pro obě vady užívá termínu trhlina vzniklá za studena nebo za tepla [26].

Trhlinou označujeme vadu porušení souvislosti materiálu odlitku při vysokých teplotách, v určitém teplotním gradientu pod teplotou krystalizace. Trhlina probíhá po hranicích zrn, má menší pevnost než zrno, má křivolaký průběh a interkrystalický hrubozrný lom. Vyskytuje se v tenkých stěnách odlitku nebo na povrchu masivního



odlitku. Povrch trhliny je zoxidován. Příčinou vzniku trhliny je tahové smršťovací pnutí, které může být vyvolané mechanickým odporem formy a nebo metalostatickým tlakem kovu [27], [28].

Prasklina je porušení soudržnosti materiálu. Má transkrystalický lom. Lom je hladký, rovný nebo mírně zakřivený. Praskliny přímo souvisejí s konstrukčním řešením odlitku. Jsou vyvolány vnitřním tepelným tahovým napětím. Podrobněji se prasklinám věnuje autor [27], [28].

4.3.1 Vnitřní trhliny a praskliny

Vnitřní poruchy souvislosti materiálu (trhliny a praskliny) se vyskytují zejména u těžkých a masivních odlitků. Jsou velmi nebezpečné, protože se obtížně zjišťují a jsou v podstatě neopravitelné [29].

Vnitřní trhlina vzniká po ztuhnutí celého průřezu odlitek při poměrně vysokých teplotách (nad 1000°C), níže však než povrchová trhlina. Vnitřní trhlina má kamenitý vzhled. **Vnitřní prasklina** se vyvíjí shodně jako trhlina, její lom je však rovnější, struktura lomu jemnější a zasahuje-li velký průřez odlitku, potom okrajové oblasti, které ještě spojují obě části. Mají vzhled houževnatého lomu. Prasklina vzniká převážně nebo zcela v pružné oblasti materiálu [28], [29].

Vznik vnitřních poruch v odlitku je složitý tepelně-fyzikální jev. Závisí na fyzikálních, strukturních a pružně-plastických vlastnostech materiálu, na modulu pružnosti, hodnotě lineárního dilatace, tepelné vodivosti, na intenzitě teplotních změn ohřevu nebo ochlazení a také na konstrukci odlitku. Podrobněji vzniku vnitřních trhlín a prasklin se věnuje Havlíček v [29].

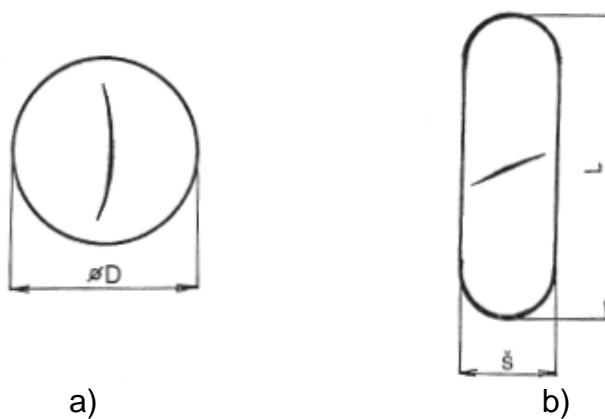
4.3.2 Praskliny po upálení nálitku

Častou vadou jsou také praskliny, vzniklé po upálení nálitku kyslíko-acetylenovým hořákem, tedy nikoliv v době upalování nálitku, jak se většinou předpokládá. Protože se teploty ve středu řezné plochy ve zbytku nálitku po jeho odstranění pohybují kolem 450 - 500 °C, lze mluvit o prasklině, protože se vše odehrává převážně v pružné oblasti materiálu [29].

Pouze v případě velkých nálitků, odstraňovaných z teploty chladnutí odlitku ve formě, což je však mimořádné, se teplota uvnitř nálitku pohybuje kolem cca 900 °C a porucha je charakteru trhliny. Tyto vady vyvolává tahové dočasné napětí, způsobené jednak rychlým ochlazením a smrštěním řezné plochy (především jejího středu, který je teplejší než okraje), jednak sáláním tepla do okolí a odvodem tepla vlastním odlitkem (zvláště když má nízkou teplotu). Dočasné napětí se sčítá s rostoucím trvalým napětím v nálitku (obě jsou tahová), takže výsledné napětí snadněji překoná pevnost materiálu a vznikne porucha souvislosti [29].



Průběh vady v kruhovém nálitku je znázorněn na *obr. 4.2*. V oválném nálitku s převažující podélnou osou (v jejímž směru působí větší tahové napětí), má prasklina kolmý nebo šikmý směr k této hlavní ose (*obr. 4.2*). Méně náchylné jsou k těmto poruchám odlitky z nízko i středně uhlíkatých ocelí, které mají vyhovující plastické vlastnosti, takže se nemusí pro operaci odstraňování nálitků (do cca 400 mm) ani předeheřívat. Zvýšené nebezpečí je u vysokouhlíkových a středně legovaných ocelí a odlitky s nálitky se musí předeheřívat. Teplota se řídí podle druhu oceli a rozměru nálitku a nemá být nižší než 150 °C a vyšší než 400 °C [29].



Obr. 4.2 Vznik praskliny v kruhovém (a) a oválném (b) průřezu nálitku po upálení kyslíko-acetylenovým hořákem

4.3.3 Shrnutí a opatření proti vzniku trhlin a prasklin

Řešením je zvýšení rychlosti chladnutí odlitku použitějším hmotnějším chladítkem a zmenšením velikosti nálitku.

Zvýšení rychlosti tuhnutí umožní prodloužení délky kolumnárních krystalů a snížení velikosti a množství slévárenských vad. Tyto vady budou zatlačeny hlouběji pod povrch odlitku. Důležité je odvádět teplo zejména ze spodních partií odlitku tak, aby odlitek tuhl od spodu do nálitku. K detekci vzniku trhlin a prasklin slouží v dnešní době zejména numerická simulace [28], [29].

Prasklinám pod nálitky lze zabránit tepelnou izolací řezné plochy (zasypáním suchým pískem, azbestem apod.), nejlépe však ponecháním teplého upáleného nálitku na řezné ploše odlitku nebo zavezením odlitku do předem vyhřáté pece s teplotou cca 350 °C a s pozvolným chladnutím [28], [29].



5 Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků

Výroba odlitků ve slévárenských formách je velmi složitý proces transportu tepla a hmoty při nestacionárních podmínkách a současném průběhu fyzikálních a chemických dějů. V minulosti, kdy nebyla dostupná potřebná technika, se tuhnutí a krystalizace kovu a jejich slitin sledovalo nejčastěji na základě metalografického posouzení makrostruktury nebo mikrostruktury. Teprve v nedávné minulosti, kdy byl zaznamenán rozvoj experimentálních metod a výpočetní techniky, je možno sledovat tuhnutí odlitků nejen v celém komplexu, ale také v krátkých časových okamžicích. K těmto účelům byla v posledním desetiletí na světě vyvinuta celá řada software. V našich podmínkách našly uplatnění německé programy SIMTEC a MAGMASOFT a software od švédské firmy NOVACAST a americký PROCAS [30].

Jedním z problémů, se kterým se technolog potýká při návrhu nové technologie, se týká zabránění vzniku slévárenských vad typu staženin a ředin, případně jejich minimalizace nebo přemístění tak, aby byly akceptovatelné. Tento typ vad se vyskytuje u většiny technických slitin a jejich podstata je spojena s úbytkem objemu tzv. stahováním, ke kterému dochází v průběhu ochlazování taveniny a tuhnutí. Nemá-li v odlitku vzniknout staženina, je nutno tento objemový deficit doplnit z dostatečně dimenzovaných nálitků. Technolog se rozhoduje, zda použije nálitky, jakého typu a velikosti a jaké bude jejich rozmístění. Na tyto otázky nám může pomoci odpovědět numerická simulace. Simulace se provádí v několika krocích, které závisí na složitosti daného odlitku. Většinou posledním krokem bývá provedení termomechanických výpočtů tuhnutí a chladnutí za účelem určení napěťových stavů a predikce vzniku trhlin a prasklin v odlitku při teplotách pod solidem. Místo pro výpočet bývá zvolen v kritické části odlitku. V těchto místech se vyskytují drobné slévárenské vady, které iniciují vznik trhlin při dynamickém namáhání [31], [32].

Přírůstek tuhé fáze závisí nejen na čase (parabolický zákon tuhnutí), ale i na geometrii odlitku. Vznik slévárenských vad může dále ovlivňovat šířka dvoufázového pásma ohraničeného v tuhoucím odlitku teplotou likvidu a solidu. Znám je také vliv usměrněného tuhnutí. Rychlost tuhnutí v jednotlivých částech odlitku lze stanovit pomocí simulačních programů. Rychlost tuhnutí u masivních odlitků ovlivňuje zejména lící teplota, jakost formovacího materiálu, umístění vtokové soustavy, Ze známých způsobů ovlivňování rychlosti chladnutí je technicky dostupné použití vnějších chladítek. Rychlost tuhnutí určuje výslednou strukturu v odlitku. V případě malé rychlosti tuhnutí vzniká v odlitku hrubá rovnoosá struktura a odlitek pak může obsahovat velké množství ředin. S rostoucí intenzitou ochlazování dochází k rozšíření pásma kolumnárních krystalů, které obsahuje zpravidla i nejmenší množství ředin. Optimalizací velikosti použitých vnějších chladítek je možné toto pásmo rozšířit a zatlačit tak slévárenské vady typu dutin hlouběji od odlitku, kde již zpravidla nejsou tak nebezpečné [32].



5.1 Simulace typových odlitků

Jedná se o simulaci gravitačně litých těles typových odlitků. 3D geometrie odlitku a ostatních technologických částí byla dodána ŽĎAS a.s. Výpočet byl proveden pro technologii navrženou zákazníkem. Výpočet proudění a tuhnutí byl proveden při použití tzv. virtuální formy, což je fiktivní „skořápka“ v okolí modelu odlitku o zadaném materiálu a tloušťce.

Výpočet byl proveden zejména se zaměřením na odhalení kritických míst v odlitku s ohledem na jeho plnění a tuhnutí. Výpočet by měl napomoci při rozhodování o případné změně tvaru a umístění nálitků, chladítek a dalších technologických částí. Součástí výpočtu byla rovněž predikce vzniku staženin a ředin v odlitku.

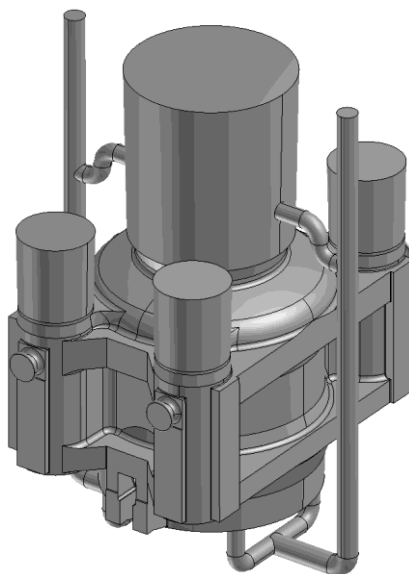
Geometrie vlastního odlitku, jader a formy byla dodána zadavatelem. Povrchová a objemová síť všech částí řešené soustavy, tvořená metodou konečných prvků (FEM), byla vytvořena v programu VisualCAST. Definice počátečních a okrajových podmínek výpočtu byla provedena v modulu PreCAST programu ProCAST. Po kontrole provedených definicí byl spuštěn výpočet plnění dutiny formy, tuhnutí odlitku a predikce vzniku slévárenských vad typu staženin a ředin. Simulace byly provedeny firmou MECAS ESI s.r.o.

6 Typové odlitky slévárny ŽĎAS a.s.

V úvodní fázi výzkumu probíhajícího v rámci projektu TIP byl rozdělen sortiment odlitků ve slévárně Žďas podle tvaru a velikosti do několika tříd (5). U každého typového odlitku byla následně provedena analýza slévárenské technologie pomocí numerických simulací chladnutí a tuhnutí v programu PROCAST. Jejím cílem bylo posoudit, zda zvolená technologie zajišťuje výrobu odlitku bez nepřijatelných vad. Dále byla provedena analýza vad u vzorků odebraných z těchto typových odlitků v průběhu posledních několika let.

6.1 Tlakový válec

Tlakový válec je odlitek (*obr. 6.1 a obr. 6.2*), jehož hmotnost se pohybuje od 4 do 20 tun, tloušťky stěny jsou 200 – 400mm se odlévá nejčastěji z oceli GS20Mn5. Vady, které se u tohoto typu odlitku nacházejí jsou zejména v podnálitkové oblasti. Jedná se o vady typu trhlin, vycezenin, lasturových lomů, mikroporozity a hrubého primárního zrna [33].

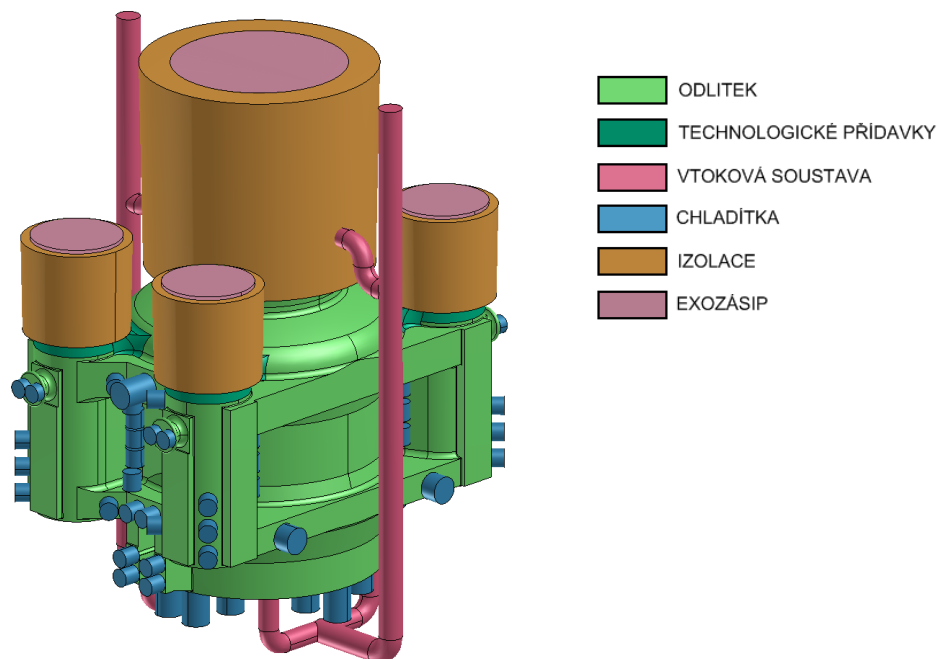


Obr. 6.1 Tlakový válec

Tab. 6.1 Podmínky při odlévání – tlakový válec [33]

Materiál odlitku	GS20Mn5
Forma	Líc formy zhotoven z chromitového ostřiva s tloušťkou cca 10cm, zbytek formy vyplněn křemenným ostřivem
Jádro	Chromitové ostřivo
Nálitek	Izolační
Chladítka	Ocel
Teplota lití	cca 1590°C
Doba lití	cca 2,5 min

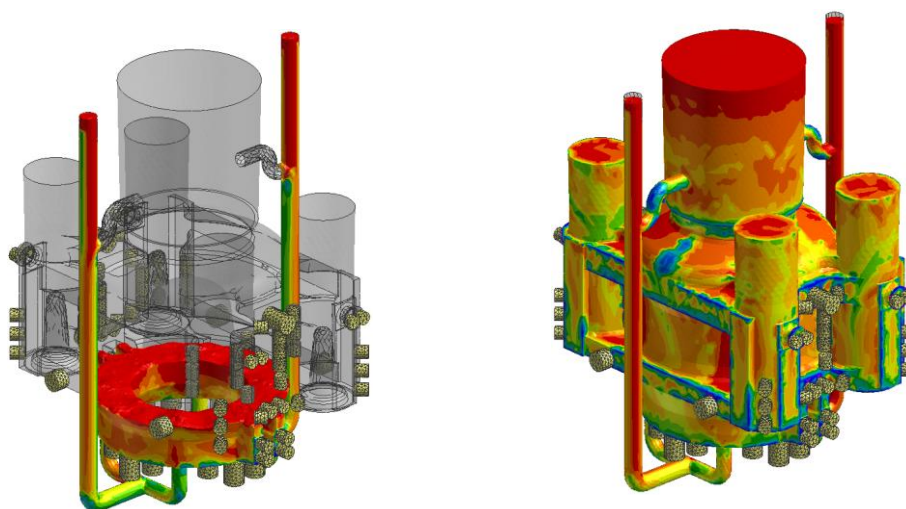
6.1.1 Geometrie odlitku a formy



Obr. 6.2 Geometrie odlitku - tlakový válec

6.1.2 Průběh plnění dutiny formy

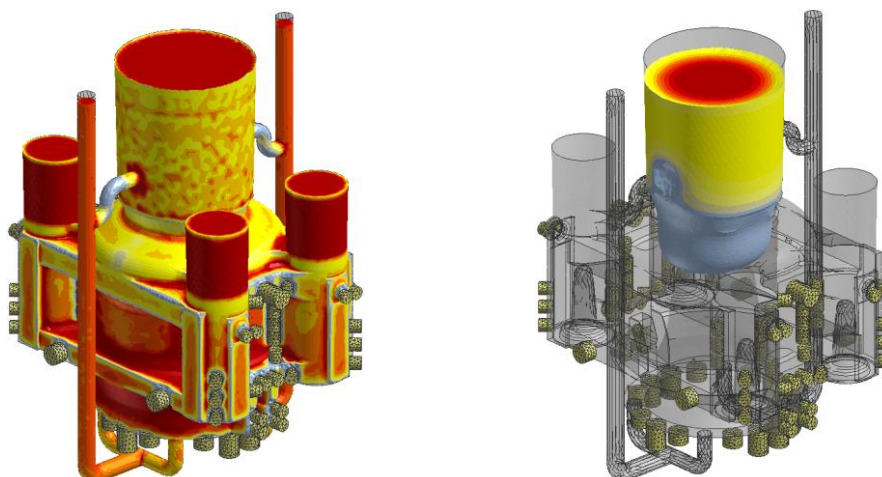
Teplota lití byla zvolena podle dodaných podmínek 1590 °C. Plnění dutiny formy probíhá plynule od spodního zaústění vtoků. Simulace proudu kovu neukazuje žádné nežádoucí jevy s ohledem na vznik studených spojů, případně nedolití. Velmi pozvolna stoupá velká plocha volné hladiny kovu, což může přispívat k tvorbě oxidů na povrchu kovu. Tyto oxidy však pravděpodobně budou vytlačeny do otevřeného středového nálitku. *obr. 6.3* zobrazuje simulaci plnění dutiny formy [33].



Obr. 6.3 Počátek a konec plnění dutiny formy tekutým kovem - tlakový válec

6.1.3 Průběh tuhnutí odlitku

Celkový čas tuhnutí dle simulace je přibližně 40 hodin. Použitá technologie se z hlediska tepelných uzlů ukazuje být vyhovující, neboť všechny tepelné uzly jsou vytlačeny do nálitků a v odlitku nedochází k oddělování front tuhnutí. Tepelná osa v uzavřených nálitcích je posunuta směrem k ose odlitku (středovému nálitku), což má za následek vznik mikro-porezity na přechodu odlitku a krčku nálitku. Obr. 6.4 zobrazuje počátek a konec tuhnutí odlitku [33].

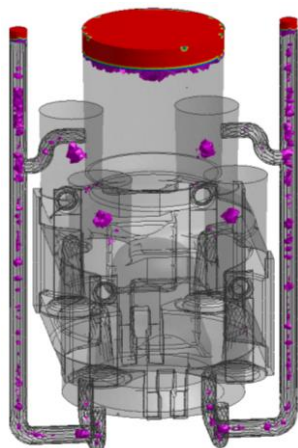


Obr. 6.4 Počátek a konec tuhnutí odlitku tlakového válce

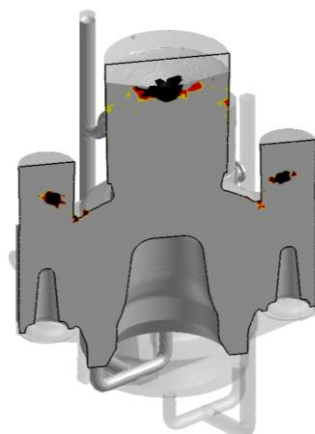
6.1.4 Porezita (makroporezita a mikroporezita) odlitku

Predikce makroporezity v odlitku je na obr. 6.5. Při nastavení kritických hodnot pro zobrazování této vady (úbytek kovu v objemovém elementu větší než 10%), nebyl výskyt makroporezity v odlitku pozorován mimo stažení a úbytek kovu v nálitcích a ve vtoku [33].

Predikce mikrostaženin je na obr. 6.6. Mikrostaženiny byly nalezeny zejména v místech pod čtyřmi uzavřenými nálitky, kde se od sebe oddělují fronty tuhnutí. Vznik této vady odpovídá postupu tuhnutí [33].



Obr. 6.5 Makroporezita



Obr. 6.6 Mikroporezita



6.1.5 Shrnutí výsledků simulace – tlakový válec

Simulace plnění odlitku neindikuje žádné problematické sekce s ohledem na vznik studených spojů, případně nedolití odlitku. S ohledem na zavtokování vtokové soustavy do spodní části odlitku dochází velmi rychle k uklidnění prvního proudu kovu vnikajícího do odlitku a dále se odlitek plní klidně, bez větších turbulencí. Horní větev vtokové soustavy začíná být funkční v okamžiku, kdy kov ze spodní části dosáhne krčku nálitku [33].

Z průběhu tuhnutí je patrné, že chladítka byla navržena správně a že dochází k tzv. usměrněnému tuhnutí. Celý tepelný uzel je vytažen do nálitku. Tento náletek je tepelně i objemově dostatečný, spíše předimenzovaný [33].

Technologie by mohla být optimalizována za účelem maximálního využití kovu. Další simulací by bylo možné ověřit, zda by pro tento odlitek bylo možné využít pouze středového nálitku. Za tímto účelem by bylo nutné posílit chladítka ve spodní oblasti, tak aby bylo zajištěné rychlejší tuhnutí a vytažení celého tepelného uzlu do středového nálitku [33].

Podrobnější informace k simulaci jsou uvedeny v [33].

6.1.6 Analýza vad u typového odlitku tlakový válec (vzorek U 4252)

Po ohrubování odlitku se detekovaly v podnálitkové oblasti vizuálně i defektoskopickou zkouškou (UZ) vady charakteru drobných trhlinek. Jedná se o odlitek s č. m. 8120658, p. č. 15 z materiálu GS20Mn. Následně byl z podnálitkové oblasti odebrán vzorek pro analýzu příčiny výskytu těchto vad. Chemický rozbor materiálu (konečná tavbová zkouška) je v *tab. 6.2* a chemický rozbor v podnálitkové oblasti je v *tab. 6.3* [34].

Tab. 6.2 Chemické složení v hm. % - konečná zkouška tavby

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Zr
0,20	1,30	0,52	0,010	0,008	0,18	0,13	0,12	0,05	0,025	0,028

Tab. 6.3 Chemické složení v hm.% - podnálitková oblast

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Zr
0,38	1,58	0,57	0,022	0,012	0,23	0,14	0,14	0,05	0,020	0,040

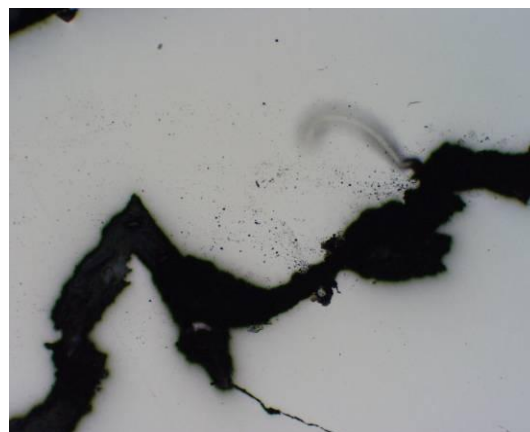
Z chemického rozboru je zřejmé, že je materiál odlitku v podnálitkové oblasti značně odmišlen. Obsah uhlíku je téměř dvojnásobný vůči tavbovému vzorku. Dále je významné odmišlení u manganu fosforu, síry a zirkonia.

6.1.6.1 Metalografické hodnocení

Vzorek obsahoval okem zjevnou trhlinu jdoucí napříč celým vzorkem. Cílem bylo ověřit, o jaký typ vady se jedná (trhlina, prasklina) a určit z jaké příčiny pravděpodobně ke vzniku této vady došlo. U vzorků byl sledován charakter vady (vada po hranicích zrn, přes zrna), struktura v okolí vady, morfologie a rozložení vměstků v odlitku. Na *obr. 6.7* až *obr. 6.10* jsou uvedeny snímky struktury v leptaném i neleptaném stavu při různém zvětšení. Snímky zachycují jednak vlastní strukturu tak i okolí vady [34].



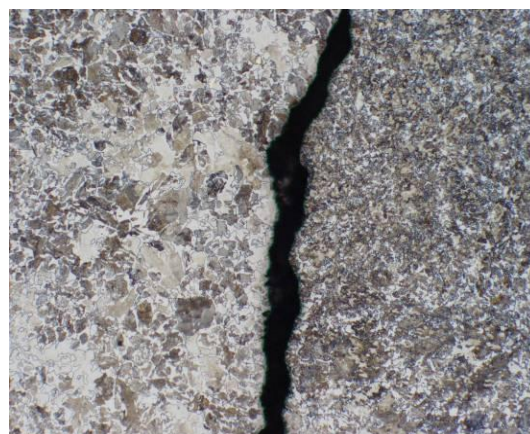
Obr. 6.7 Vzorek U 4252 nelept. 50x



Obr. 6.8 Vzorek U 4252 nelept. 100x



Obr. 6.9 Vzorek U 4252 lept. 100x



Obr. 6.10 Vzorek U 4252 lept. 200x

6.1.6.2 Vyhodnocení metalografie

Jak vyplývá z neleptaných snímků, nachází se ve struktuře minimum samostatných vměstků III. typu. Vměstky II. typu nebyly ve vzorku pozorovány, což souvisí s vysokým obsahem uhlíku v podnálitkové oblasti.

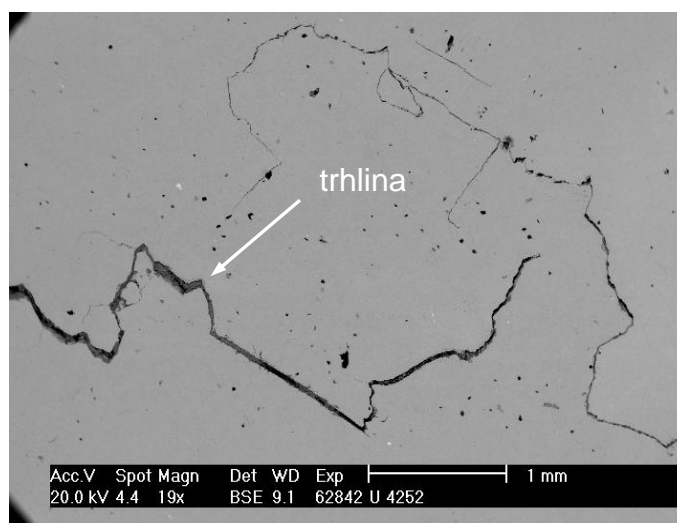
Struktura analyzovaného vzorku je tvořena feriticko-perlitickou strukturou. Jsou patrné rozdíly v hrubozrnnosti struktury, jejichž hranici mezi jemnějším a hrubším zrnem, tvoří často trhliny (*obr. 6.9* a *obr. 6.10*). Jak vyplývá ze snímků v leptaném i neleptaném stavu, tak lineární vada má členitý charakter, což ukazuje na to, že se jedná o trhlinu [34].



6.1.6.3 Hodnocení na elektronovém mikroskopu

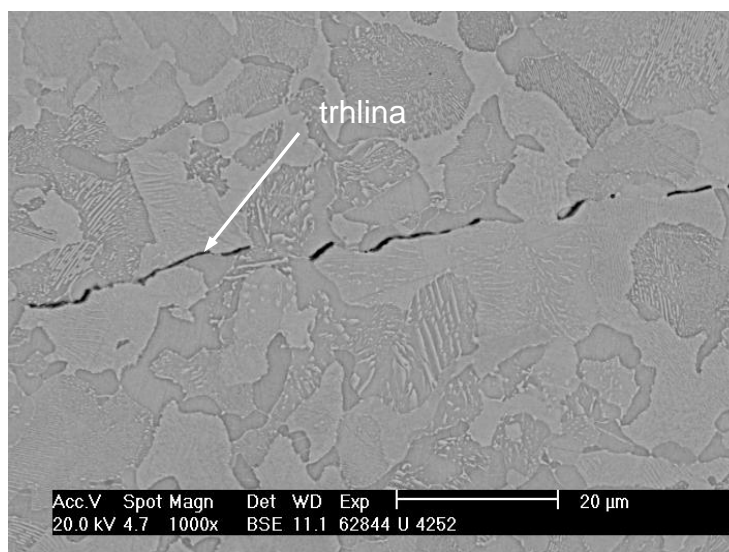
Vzorek U4252 obsahoval velké množství trhlin. Řada trhlin se šířila přes hranice feritu a perlitu. Trhliny nejsou iniciovány od vměstků, což je vidět na snímku č. 62842 (obr. 6.11).

Ve struktuře se nacházejí pouze vměstky MnS a vměstky na bázi Zr. Vměstky nejsou makroskopické velikosti a také jejich počet není neobvykle vysoký. Síra je vázána jako sulfid MnS III. typu. Někdy tento sulfid obsahuje též i Mg



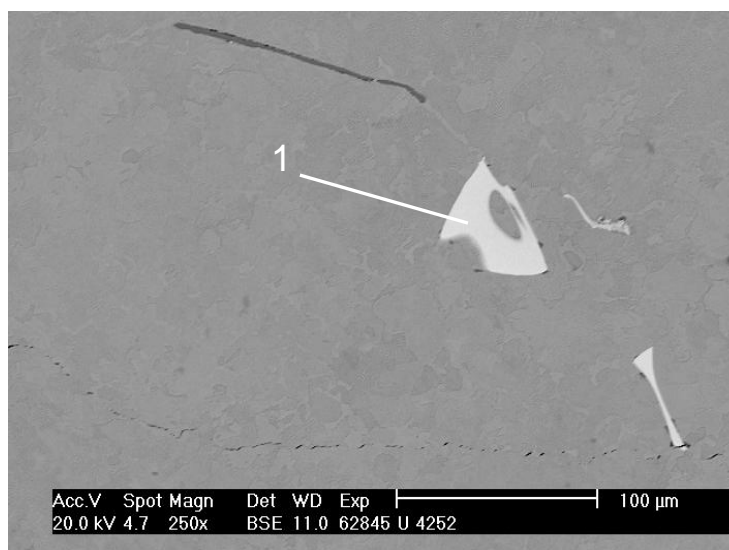
Obr. 6.11 Vzorek 4252, č.snímku 62842

Na snímku č. 62844 (obr. 6.12) je zobrazeno šíření trhliny, jak je vidět trhlina postupuje po hranicích sekundárních zrn.



Obr. 6.12 Vzorek 4252, č.snímku 62844

Ve struktuře vzorku U4252 byly nalezeny útvary nalezeny bílé útvary Zr, které neobsahovaly kyslík, ale obsahovaly větší množství dusíku. Tyto útvary jsou zobrazeny a označeny na snímku č. 62845 (*obr. 6.13*) místo 1. Podle chemického složení se nejspíše jedná o nitrid zirkonia. Ze snímku je dále zřejmé, že na tomto vměstku také probíhá iniciace trhliny.



Obr. 6.13 Vzorek 4252, č.snímku 62845

Tab. 6.4 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku U4252

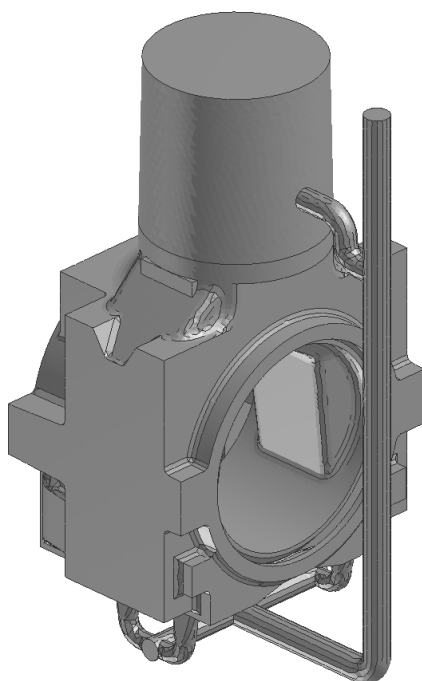
Popis analýzy			Prvek			
č. snímku	místo	poznámka	N	Zr	Ti	Fe
62845	1	bílá	44,87	49,82	3,20	2,11

6.1.6.4 Shrnutí výsledků analýz provedených na vzorku U4252 – tlakový válec

Z výrazné změny struktury materiálu lze usuzovat na vznik velkých transformačních pnutí v průběhu eutektoidní přeměny, kdy se trhliny šíří po hranicích sekundárních zrn. V některých případech byly nalezeny trhliny šířící se od hranatých vměstků Zr. Možnou příčinou vzniku trhlin bylo velké napětí vzniklé z upalování náliťků a nevhodná morfologie vměstků na bázi Zr [34].

6.2 Ložisko

Odlitek ložiska má hmotnost od 4 do 20 tun (*obr. 6.14 a obr. 6.15*). Tloušťka stěny tohoto odlitku se pohybuje od 300 do 600mm. Ložisko je odléváno nejčastěji z oceli GD20Mn5, GS45, GP240GH, GS30Mn5, G28Mn6, GS42CrMo4. Vady se vyskytují nejčastěji v podnálitkové oblasti a jedná se zejména o vady typu trhlin, vycezenin, lasturových lomu, produktů dezoxidace či hrubého primárního zrna [35].

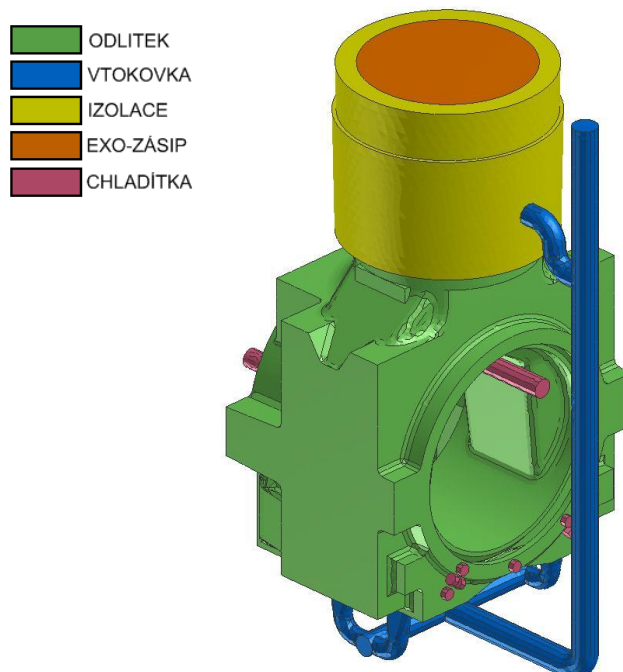


Obr. 6.14 Ložisko

Tab. 6.5 Počáteční podmínky při odlévání [35]

Materiál odlitku	GS20Mn5
Forma	Líc formy zhotoven z chromitového ostřiva s tloušťkou cca 10cm, zbytek formy vyplněn křemenným ostřivem
Jádro	Chromitové ostřivo
Nálitek	Izolační
Chladítka	Ocel
Teplota lití	cca 1590°C
Doba lití	cca 3min

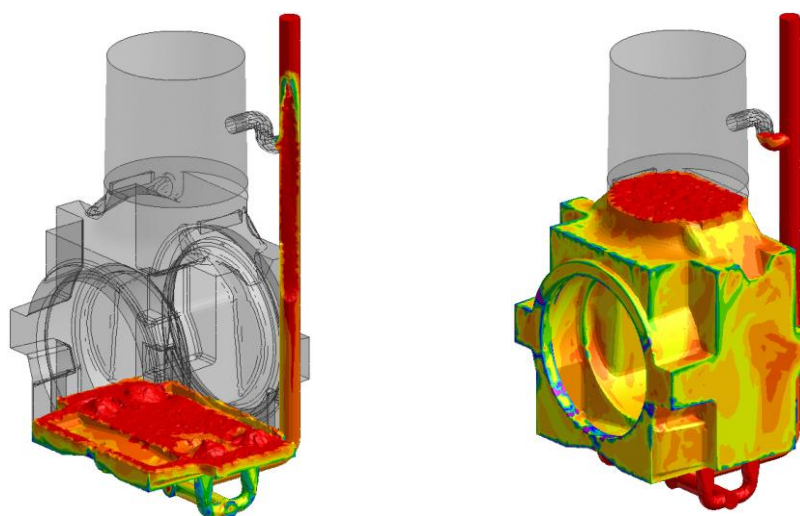
6.2.1 Geometrie odlitku a formy



Obr. 6.15 Geometrie odlitku - ložisko

6.2.2 Průběh plnění dutiny formy

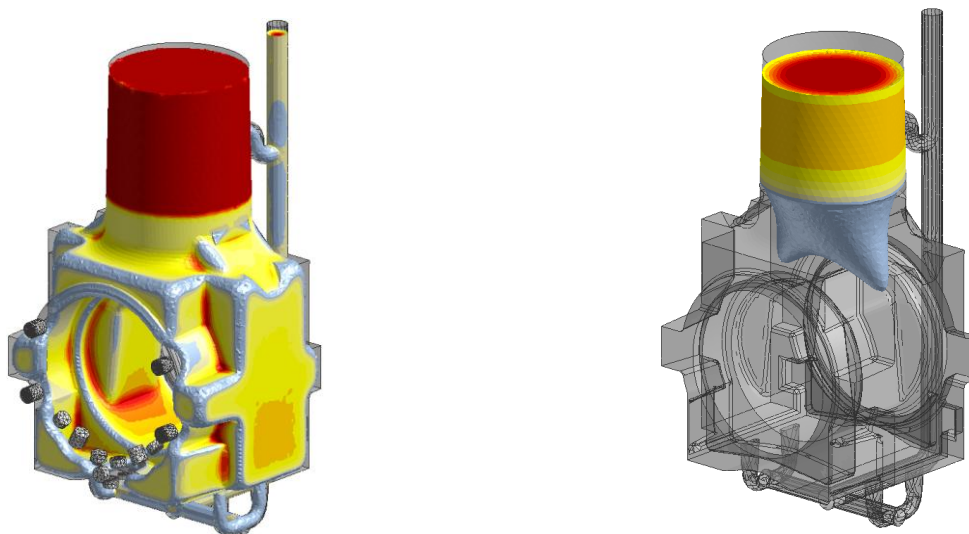
Teplota lité byla zvolena podle dodaných podmínek 1590 °C. Plnění probíhá plynule a na chování proudu kovu se neprojevuje žádný nežádoucí jev. Rychlost kovu na vstupu do vtokové soustavy byla přibližně 1 m/s odlitek kov stoupá rychlostí nižší než 0.2 m/s. Plnění formy je zobrazeno na obr. 6.16 [35].



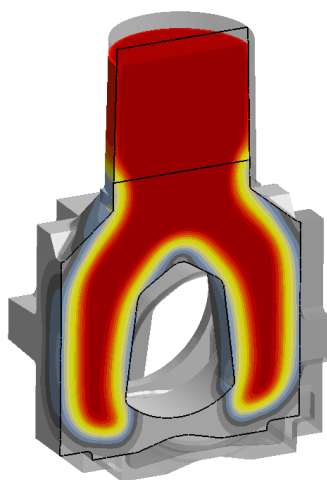
Obr. 6.16 Počátek a konec plnění dutiny formy

6.2.3 Průběh tuhnutí odlitku

Použitá technologie se z hlediska tepelných uzlů ukazuje být vyhovující, neboť všechny tepelné uzly jsou vytlačeny do nálitku a v odlitku nedochází k oddělování front tuhnutí. Přestože velikost chladítek ve spodní partii je poměrně malá (vůči ochlazovanému objemu odlitku) a dochází velice brzy k jejich tepelnému „vyčerpání“, tvar odlitku napomáhá tomu, že tuhnutí je odděleno na dvě sekce-ramena, které se celé následně vytahují do středového nálitku. Na *obr. 6.17* je vizualizace tuhnutí odlitku. Dosazovací klín (*obr. 6.18*) z nálitku je velice dlouhý a z tohoto důvodu dochází v jeho tepelné ose ke vzniku mikroporezity [35].



Obr. 6.17 Počátek a konec tuhnutí odlitku ložiska



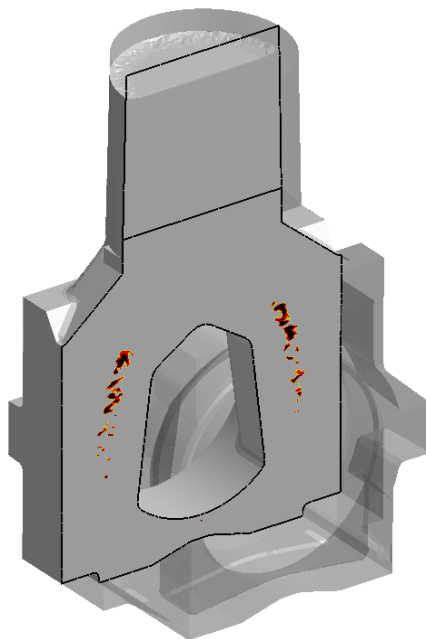
Obr. 6.18 Dosazovací klíny nálitku



6.2.4 Porezita odlitku

Při nastavení kritických hodnot pro zobrazování této vady, nebyl výskyt makroporezity v odlitku pozorován mimo stažení a úbytek kovu v nálitcích a ve vtoku.

Predikce vzniku mikrostaženin je naznačena na *obr. 6.19*. Mikrostaženiny byly nalezeny v tepelných osách a vznik této vady odpovídá přerušení dosazování kovu do mezidendritických prostor [35].



Obr. 6.19 Mikrostaženiny v odlitku ložiska

6.2.5 Shrnutí výsledků simulace - ložisko

Rozložení teplotních polí po naplnění odlitku zajišťuje usměrněné tuhnutí, přestože během plnění je nejvíce prohřátá spodní část odlitku. Vrchní etáž vtoků přispívá ke konci plnění k prohřátí nálitku, tak aby nedošlo k zatuhnutí hladiny nálitku a byla zajištěna správná funkce otevřeného nálitku [35].

Tuhnutí odlitku opět postupuje od spodní partie odlitku k nálitku, přičemž nedochází k oddělení tepelných uzlů v nálitku. Dosazovací klín je velice dlouhý a metalostatická výška nálitku již není schopna dosadit kov do mezidendritických prostor v tepelné ose tuhnutí [35].

Doporučujeme posílit chlazení spodní části odlitku, tak aby dosazovací klín byl tak více otevřený, čímž by se odstranil vznik ředin. Se zvýšením rychlosti ochlazování bude možné následně zmenšit velikost středového nálitku, tak aby se zvýšilo využití tekutého kovu [35].

Detailní informace jsou uvedeny v [35].

6.2.6 Analýza vad u typového odlitku ložisko (vzorek U 4248)

Pro metalografické posouzení byl dodán výřez z odlitku ložiska č. m. 459030, EOP č. 1, materiál GP 240GH ve stavu po ohrubování. Na odlitku se detekovala trhlina. Chemický rozbor tavby a vzorku je v *tab. 6.6* a *tab. 6.7* [34].

Tab. 6.6 Chemický rozbor tavby

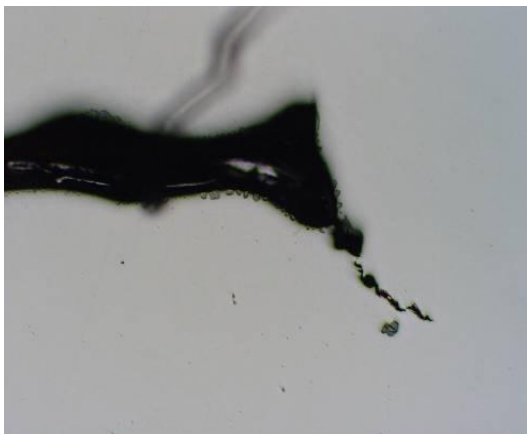
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Zr
0,20	0,82	0,46	0,009	0,010	0,21	0,10	0,10	0,04	<0,01	0,02	0,02

Tab. 6.7 Chemický rozbor vzorku

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Zr
0,22	0,84	0,48	0,012	0,010	0,22	0,10	0,10	0,04	<0,01	0,024	0,021

6.2.6.1 Metalografické hodnocení:

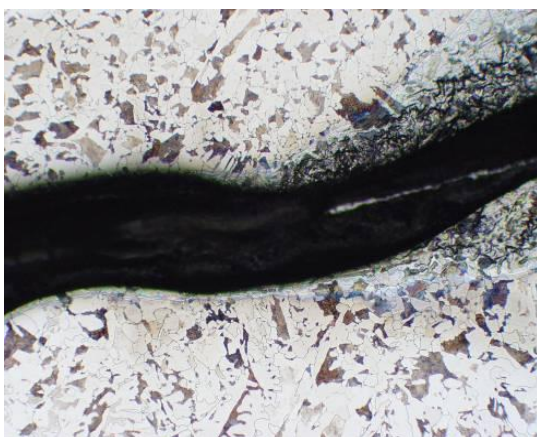
Na vzorku bylo vidět již pouhým okem trhlinu o délce asi 10 mm a dále řediny. U vzorků byl sledován charakter vady (vada po hranicích zrn, přes zrna), struktura v okolí vady, morfologie a rozložení vměstků v odlitku. Na *obr. 6.20* až *obr. 6.23* jsou uvedeny snímky struktury v leptaném i neleptaném stavu při různém zvětšení. Snímky zachycují jednak vlastní strukturu tak i okolí vady [34].



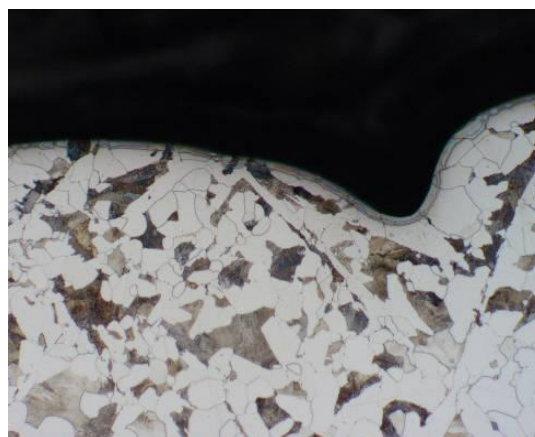
Obr. 6.20 Vzorek U4248 nelept. 100x



Obr. 6.21 Vzorek U4248 nelept. 100x



Obr. 6.22 Vzorek U4248 lept. 100x



Obr. 6.23 Vzorek U4248 lept. 200x



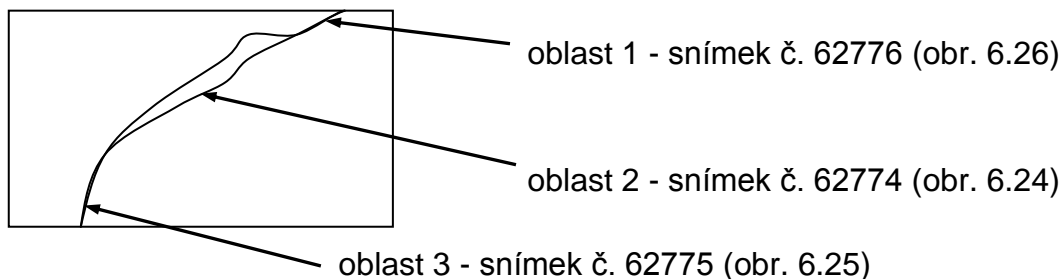
6.2.6.2 Vyhodnocení metalografie vzorku

Struktura analyzovaného vzorku je tvořena feriticko-perlitickou strukturou. Jak vyplývá z neleptaného snímku (obr. 6.21) i leptaných snímků (obr. 6.22 a obr. 6.23) nachází se ve struktuře jednak samostatné vměstky III. typu tak i vměstky II. typu. Vměstky II. typu tvoří dlouhé útvary po hranicích zrn, která tím mohou hůře odolávat napětím vzniklých při pálení náliček. Na leptaných snímcích je zřejmé, že okolí těchto vměstků je feritické, tzn. lze očekávat, že se jedná o sulfidy MnS. Feritický pás uvedený na obr. 6.21 představuje „zhojenou vnitřní trhlinu“. Trhlina vznikla při teplotách mezi likvidem a solidem. Do trhliny vnikla mezidendritická tavenina obohacená sírou. Vysoká koncentrace síry zvýšila aktivitu uhlíku a tím se snížila významně jeho rozpustnost a došlo k jeho vyloučení v trhlíně [34].

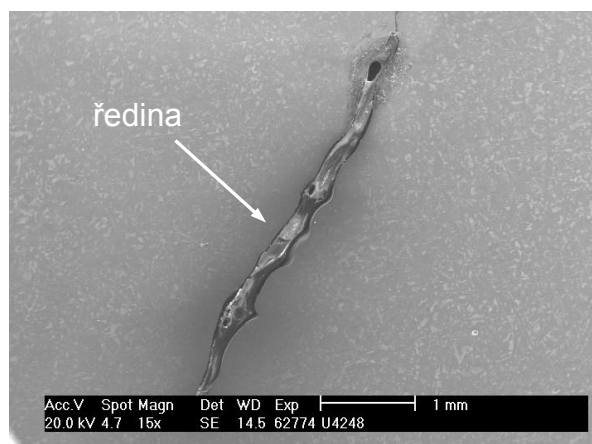
Jak vyplývá z některých snímků v leptaném i neleptaném stavu, tak lineární vada má členitý charakter, což ukazuje na to, že se jedná o trhlinu. Tato trhlina není podle uvedených snímků lokalizována přímo v oblastech, ve kterých jsou uloženy dlouhé útvary vměstků II. typu. Trhlina není šířena po hranicích sekundárních zrn perlitu či feritu a lze předpokládat, že její šíření probíhá po hranicích primárních zrn [34].

6.2.6.3 Hodnocení na elektronovém mikroskopu:

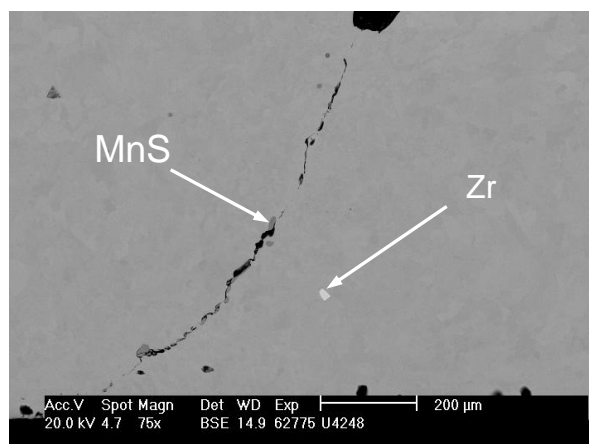
Schéma místa provedení snímků pro hodnocení trhliny na vzorku U4248



Oblast 2 (obr. 6.24, snímek č. 62774) označuje ředinu, jež je vyplněna uhlíkem. V této části vzorku (oblast 3) se trhlina šíří podél vměstků. Tyto vměstky jsou vyloučeny na volném povrchu trhliny viz. snímek č. 62775 (obr. 6.25).

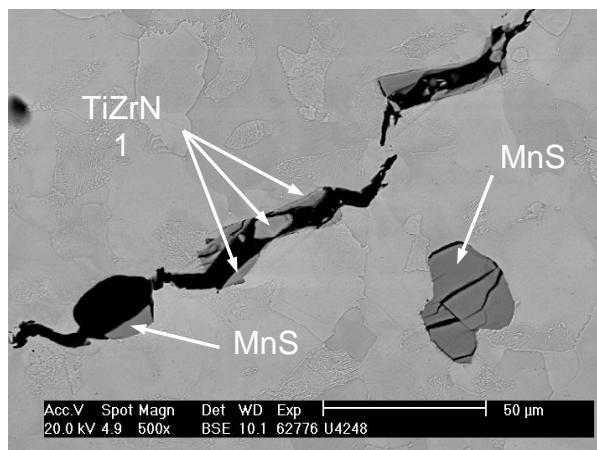


Obr. 6.24 Vzorek U4248 č. snímku 62774

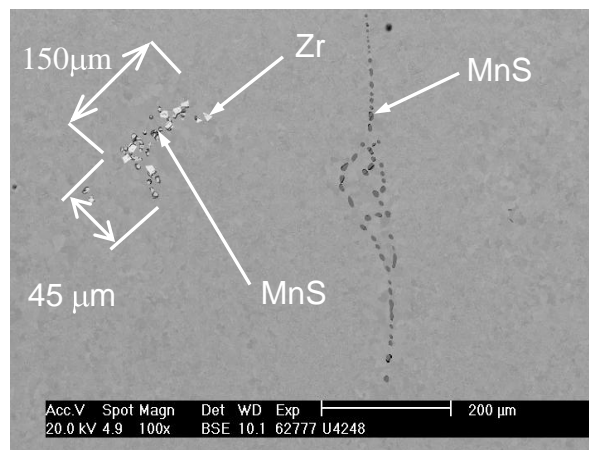


Obr. 6.25 Vzorek U4248 č. snímku 62775

Síra je vázána na MnS, jedná se o III. typ, velikost těchto vměstků je 20-30 μm . Vměstky MnS rostou v některých případech na zárodcích na bázi Zr. Některé vměstky na bázi Zr jsou tvořeny Ti + Zr + N. Snímek č. 62776 (obr. 6.26) zobrazuje dutinu, ve které je vměstek TiZrN a MnS a v jeho okolí.



Obr. 6.26 Vzorek U4248 č. snímku 62776



Obr. 6.27 Vzorek U4248 č. snímku 62777

Tab. 6.8 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku U4248

Popis analýzy			Prvek			
č. snímku	Místo	poznámka	N	Zr	Ti	Fe
62776	1	TiZrN	48,09	11,26	38,57	2,07

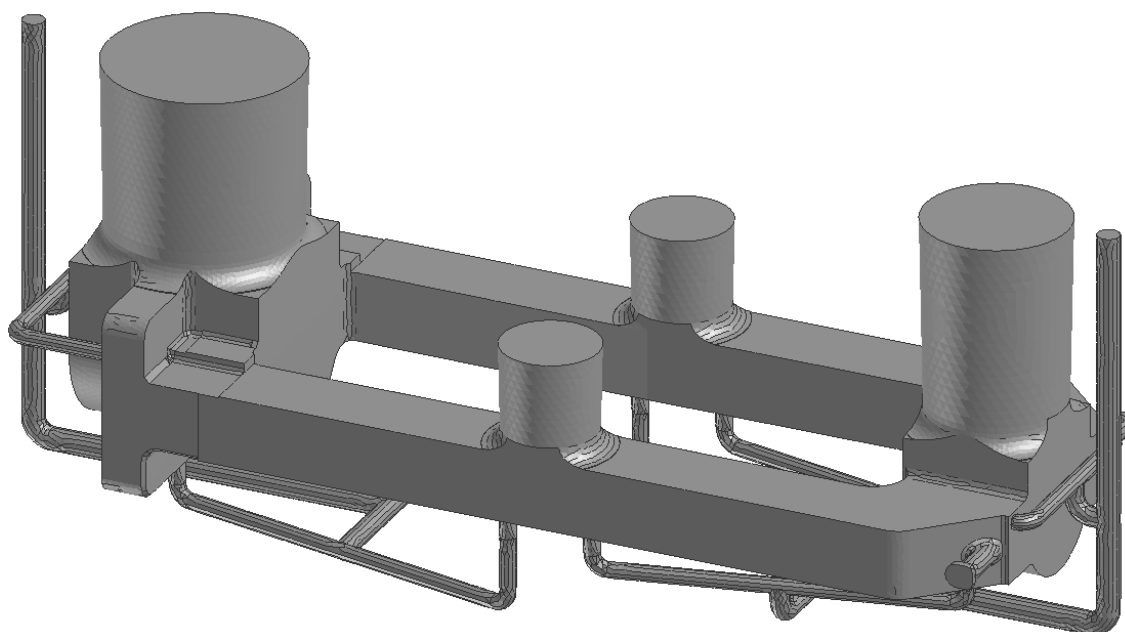
Jak je zřejmé ze snímku č. 62777 (obr. 6.27), je patrná tendence tvorby vměstků II. typu a v některých místech tvoří zřetelné orientované vměstky (zhojená trhliny). V části snímku se nachází oblast, kde se vyskytuje shluk Zr a MnS tvořící shluky obdobné vměstkům IV typu.

6.2.6.4 Celkové zhodnocení analýz provedených u vzorku U4248 - ložisko

Na vzorku byly nalezeny trhliny, které se šířily přes vměstky a to jak na bázi MnS tak Zr. Ve vzorku byla dále nalezena místa, kde se tvořily shluky jinak drobných vměstků, které mohou také iniciovat vznik trhlín. Volný povrch trhlín pak u tohoto vzorku sloužil jako zárodek pro nukleaci a vyloučení uhlíku. Na vzorku bylo dále nalezeno místo, které svým vzhledem i výskytem vměstků odpovídá místu, kde utuhla mezidendritická o síru a uhlík obohacená tavenina – zhojená trhlina. Toto místo může také být při namáhání zdrojem iniciace trhlín.

6.3 Stojan

Hmotnost odlitku stojanu (obr. 6.28 a obr. 6.29) se pohybuje od 5 do 30 tun. Tloušťky stěn jsou 400 až 1000mm. Odlitek je nejčastěji odléván z materiálu GS20Mn5. Místo výskytu s největším množstvím vad je podnálitková oblast. V této oblasti se vyskytují vady typu trhlin, vycezenin a produktů deoxidace [36].

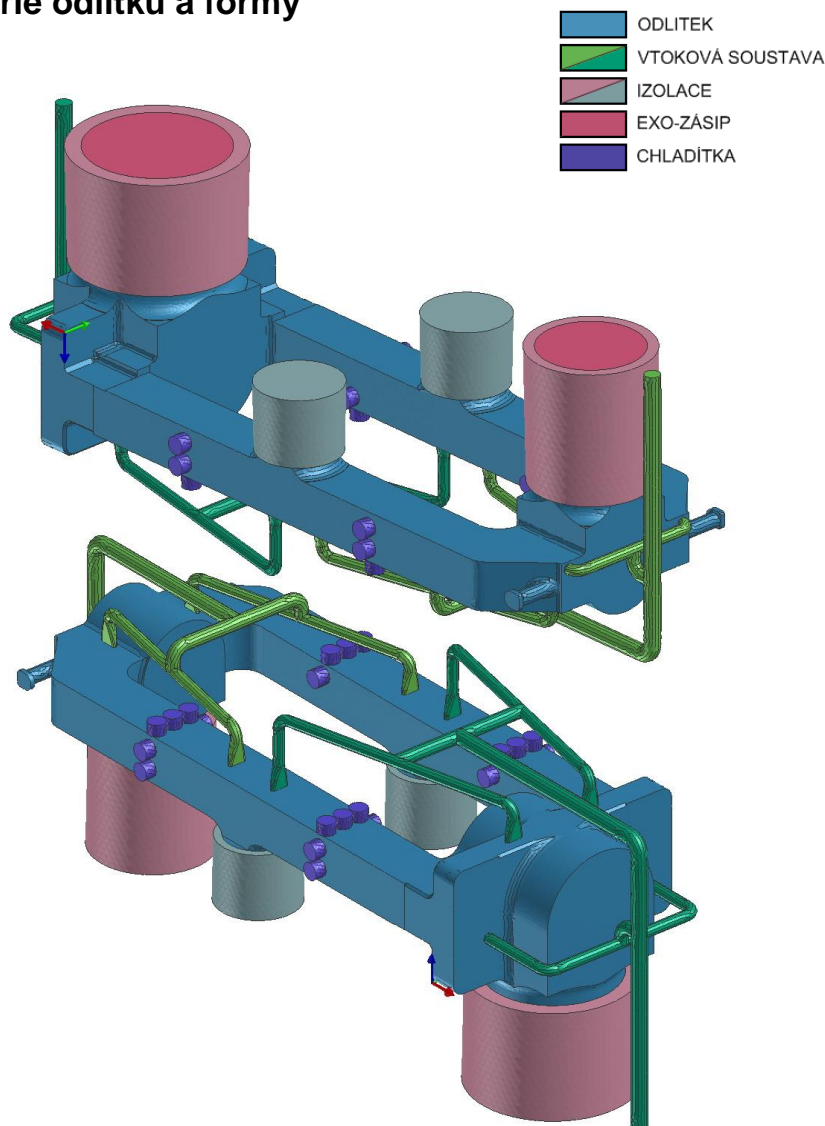


Obr. 6.28 Stojan

Tab. 6.9 Podmínky při odlévání – stojan [36]

Materiál odlitku	GS20Mn5
Forma	Líc formy zhotoven z chromitového ostřiva s tloušťkou cca 10cm, zbytek formy vyplněn křemenným ostřivem
Jádro	Chromitové ostřivo
Nálitek	Izolován
Chladítka	Ocel
Teplota lití	cca 1600°C
Doba lití	3,5 min

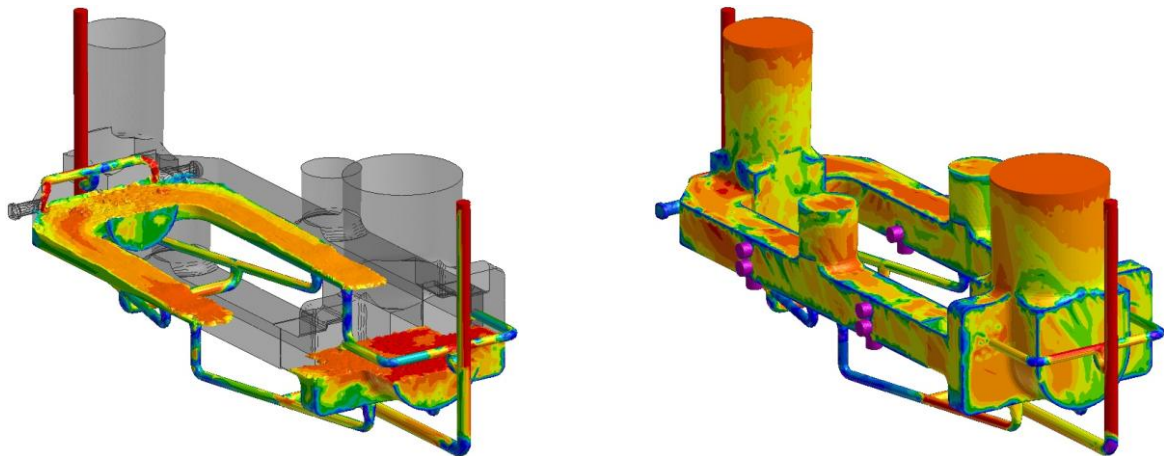
6.3.1 Geometrie odlitku a formy



Obr. 6.29 Geometrie odlitku - stojan

6.3.2 Průběh plnění dutiny formy

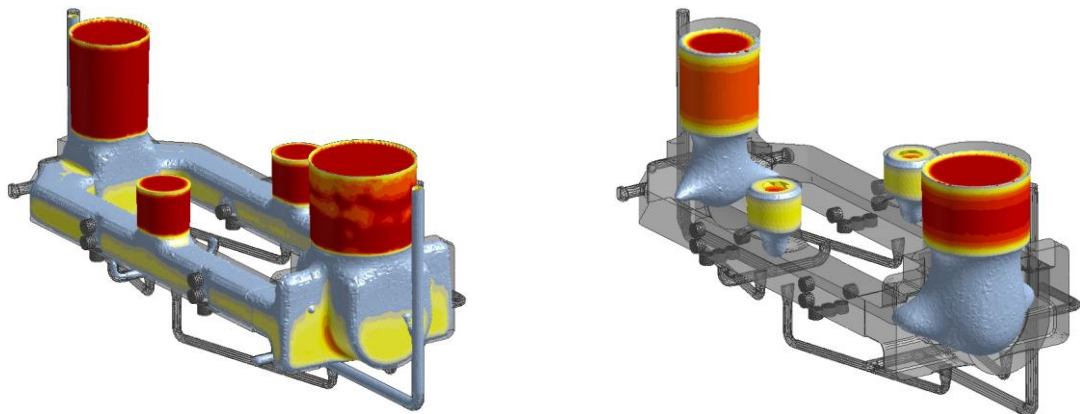
Teplota lití byla nastavena podle dodaných podmínek 1600 °C. Teplota kovu v nálitcích na konci plnění je asi 1550°C. Odlitek je plněn ze dvou vtokových systémů, přičemž začátek lití je ve stejný časový okamžik. S ohledem na tvar odlitku dochází k rozdílnému plnění z obou vtoků, avšak plnění je klidné, bez větších turbulencí. Ke spojení front plnění dochází blíže k velkému nálitku. Teplota spojení čel proudu kovu je dostatečná, takže nedochází ke vzniku studených spojů. Po zaplnění celého průřezu vtokových kúlů a se zvýšením odporu při prodění kovu, dochází k plnění kovu rovněž z vrchní etáže. Kov padá z určité výšky na volnou hladinu kovu. Výška není nikterak velká, tudíž nepředpokládáme nějakou výraznou oxidaci kovu. Průběh plnění formy je na obr. 6.30 [36].



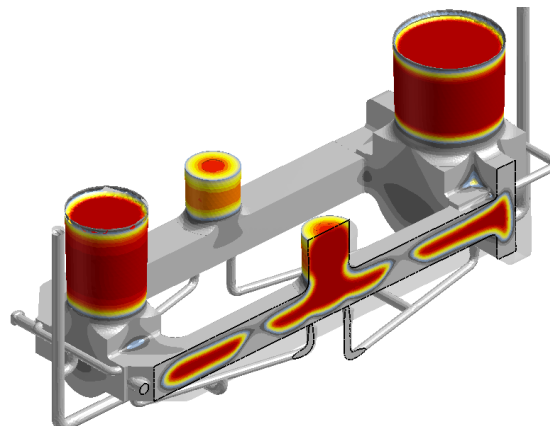
Obr. 6.30 Počátek a konec plnění odlitku stojanu

6.3.3 Průběh tuhnutí odlitku

Pozice chladítek na středu odlitku vytvářejí umělou koncovou zónu a rozdělují tuhnutí na několik sekcí. Středovou oblast nálitkují dva uzavřené nálitky. Zbytek odlitku je nálitkován ze dvou izolovaných otevřených nálitků. Simulace (obr. 6.31) ukazuje, že uzly jsou vytaženy do nálitku a tedy nevzniká žádný separovaný tepelný uzel [36].



Obr. 6.31 Počátek a konec tuhnutí odlitku stojanu

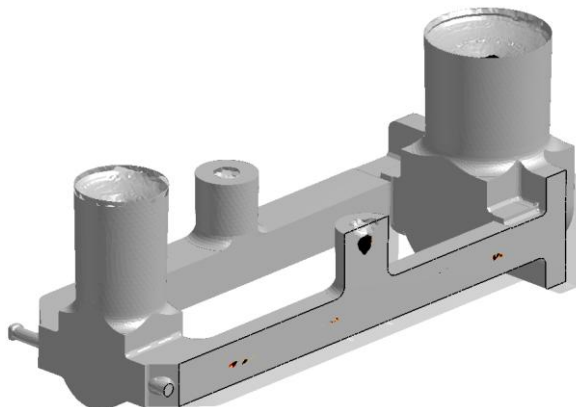


Obr. 6.32 Průběh tuhnutí odlitku stojanu



6.3.4 Porezita odlitku

Mikrostaženiny se objevují v dlouhých částech odlitku v úseku mezi chladítky a nálitkem, kde tvoří fronta tuhnutí úzkou oblast, jak je patrné i z analýzy tuhnutí na *obr. 6.33*. Při nastavení kritických hodnot pro zobrazování této vady, nebyl výskyt makroporezity v odlitku pozorován mimo stažení a úbvek kovu v nálitcích a ve vtoku [36].



Obr. 6.33 Mikrostaženiny v odlitku stojanu

6.3.5 Shrnutí výsledků simulace - stojan

Během zaplňování dutiny formy dochází ke spojování dvou front plnění. Nedochází ke vzniku studených spojů ani ke tvorbě výraznějších turbulencí. Velice rychle dojde k vyrovnání hladin kovu [36].

Pozice chladítek byla navolena správně a tuhnutí odlitku je rozděleno na sekce, přičemž každý náliček rovnoměrně pokrývá svoji oblast. Simulace predikuje možný výskyt ředin viz. *obr. 6.33*. Toto je způsobeno dlouhým dosazovacím klínem.

K odstarnění by bylo vhodné zvýšit rychlost tuhnutí koncové zóny a to větší dimenzí použitých chladítek, případně mírnou změnou jejich pozice ve směru k velkým nálitkům [36].

Detailní informace jsou uvedeny v [36].

6.3.6 Analýza vad u typového odlitku stojan (vzorek U 4324)

K rozboru do metalografie byl dodán vzorek odlitku Stojanu stolice – č. m. DLZ-M1100, p.č.1, materiál GS20Mn5Zr, z podnálitkové oblasti, ve stavu po ohrubování, kde se objevily vady klasifikované jako „staženina pod nálitkem“. V *tab. 6.10* je chemický rozbor tavby v *tab. 6.11* pak chemický rozbor materiálu z podnálitkové oblasti [34].

Tab. 6.10 Chemický rozbor tavby

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Zr
0,19	1,45	0,47	0,01	0,008	0,17	0,07	0,09	0,02	0,016	0,027

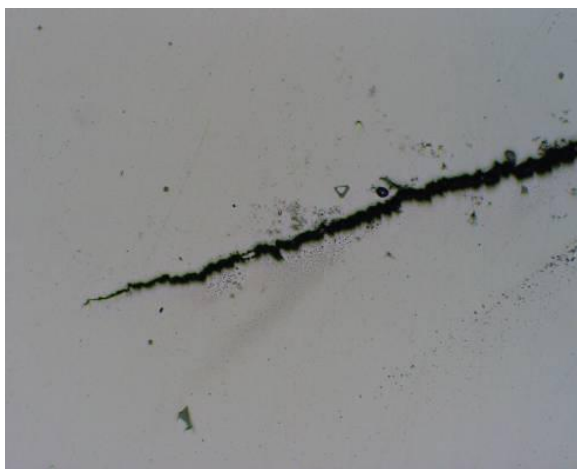
Tab. 6.11 Chemický rozbor vzorku

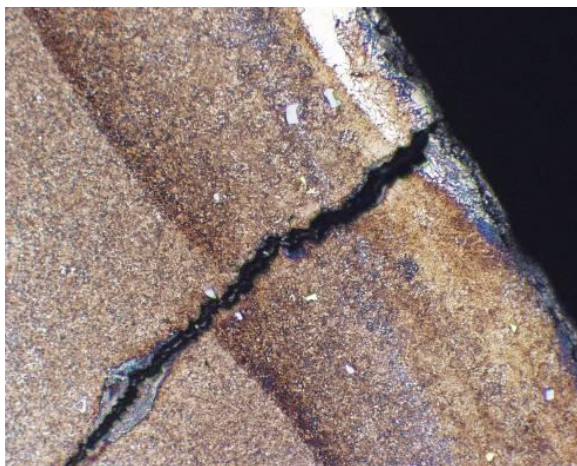
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Zr
0,38	1,63	0,47	0,025	0,020	0,25	0,09	0,10	0,03	0,016	0,020

Je opět patrné silné odmišení C, Mn, Cr, P a S.

6.3.6.1 Vyhodnocení metalografie

Na dodaném vzorku z podnálítkové oblasti odlitku stojanu bylo provedeno metalografické hodnocení. Na vzorku byla opět okem patrná lineární vada. Cílem bylo ověřit, o jaký typ vady se jedná (trhlina, prasklina) a určit z jaké příčiny pravděpodobně ke vzniku této vady došlo. U vzorků byl sledován charakter vady (vada po hranicích zrn, přes zrna), struktura v okolí vady, morfologie a rozložení vměstků v odlitku. Na *obr. 6.34 až obr. 6.37* jsou uvedeny snímky struktury v leptaném i neleptaném stavu při různém zvětšení. Snímky zachycují jednak vlastní strukturu tak i okolí vady [34].


Obr. 6.34 Vzorek U4324 nelept. 100x

Obr. 6.35 Vzorek U4324 nelept. 200x

Obr. 6.36 Vzorek U4324 lept. 100x

Obr. 6.37 Vzorek U4324 lept. 200x



6.3.6.2 Vyhodnocení metalografie vzorku:

Struktura analyzovaného vzorku je tvořena feriticko-perlitickou strukturou. Jak vyplývá z neleptaných snímků, nachází se ve struktuře samostatné vměstky tvořící drobné shluky. Vměstky II. typu nebyly ve vzorku pozorovány [34].

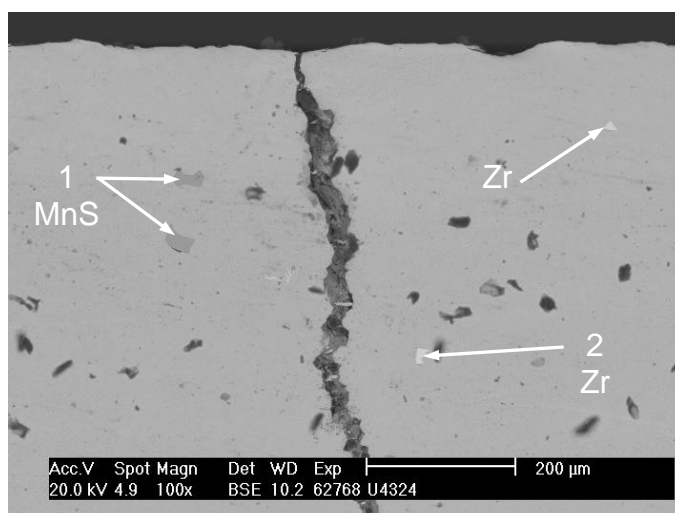
Dutina je opět v některých místech na povrchu pokryta filmem, patrně oxidů. Jedná se o otevřenou dutinu, která mohla vzniknout během chladnutí kovu po upálení nálitků. Jak vyplývá z některých snímků v leptaném i neleptaném stavu, tak lineární vada má opět členitý charakter, což ukazuje na to, že se jedná o trhlinu. V bezprostředním okolí vady se nachází velké množství drobných kulovitých vměstků. Dále se na povrchu trhliny nachází i polygonální vměstky III. typu [34].

Podle charakteru vady lze říci, že se jedná o trhlinu, která se šířila v důsledku oslabení hranic zrn v důsledku působení vměstků. Pro potvrzení tohoto závěru bylo v další fázi provedeno hodnocení na elektronovém mikroskopu. V tomto případě se jednalo zejména o identifikaci drobných shluků vměstků v okolí vady. Je v tomto případě nutné určit zda se jedná o produkty reoxidačních pochodů [34].

6.3.6.3 Vyhodnocení na elektronovém mikroskopu

Ve vzorku U4324 se nachází trhlinu, jež je vyplněna oxidy. Oxidy vznikly z důvodu koroze, poněvadž se jedná o již dříve odebraný vzorek s otevřenou trhlinou. Z tohoto důvodu nebyla trhlinu analyzována. Vzorek obsahuje feriticko-perlitickou strukturu s významně odlišnou jemnozrností.

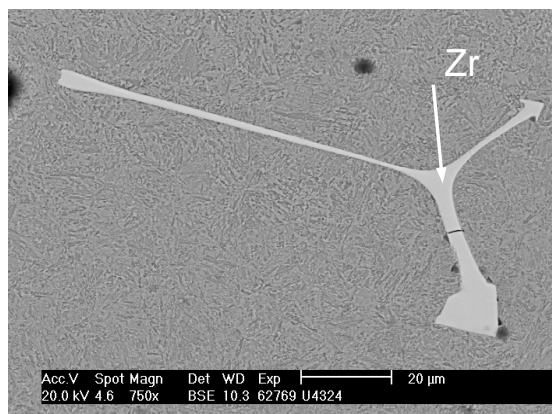
Snímek č. 62768 (*obr. 6.38*) zobrazuje již zmiňovanou trhlinu. V okolí trhliny se nacházejí vměstky MnS. Jedná se o vměstky III. typu, jejichž velikost se pohybuje od 20 μ m do 40 μ m, a v některých případech mají podlouhlý tvar o velikosti cca 120 μ m. Dále se v okolí trhliny nacházejí Zr vměstky. Zr vměstků je ve struktuře poměrně hodně. Tyto vměstky neobsahují kyslík a jejich velikost je 20 – 60 μ m. Struktura obsahuje i dlouhé protáhlé vměstky na bázi Zr o velikosti cca 100 μ m, což je zobrazeno na snímku č. 62769 (*obr. 6.39*).



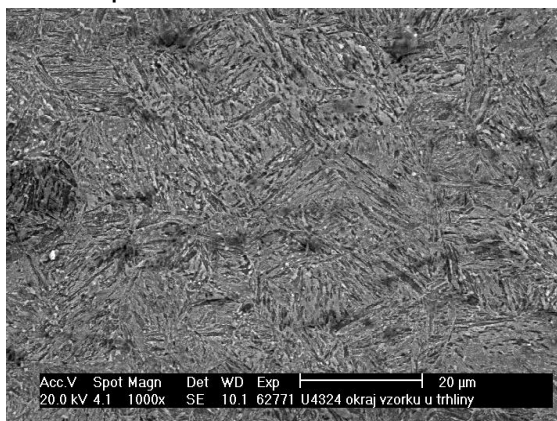
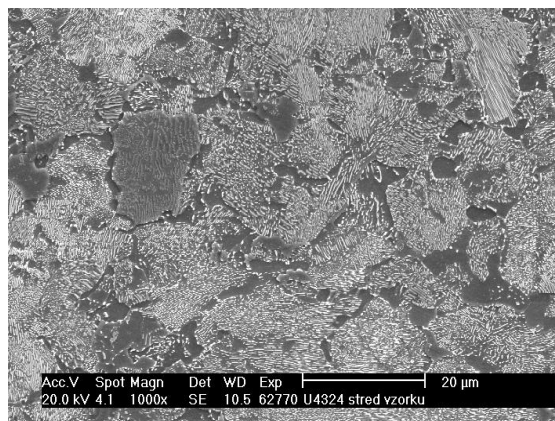
Obr. 6.38 Vzorek U4324 č. snímku 62768

Tab. 6.12 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku U4324

Popis analýzy			Prvek				
č. snímku	místo	poznámka	S	Mn	Zr	Ti	Fe
62768	1	MnS	50,34	49,66			
62768	2	Zr			93,40	2,82	3,78


Obr. 6.39 Vzorek U4324 č. snímku 62769

Vzorek obsahuje strukturu s odlišnou morfologií. Oblast 1 vzorku zobrazená na snímku č. 62771 (*obr. 6.40*) je tvořena jehlicovitou strukturou. Černá místa na snímku jsou způsobena nečistotami na povrchu vzorku. Oblast 2 vzorku (střed) je zobrazena na snímku č. 62770 (*obr. 6.41*), ze kterého je již zřejmý běžný vzhled feriticko-perlitické struktura.

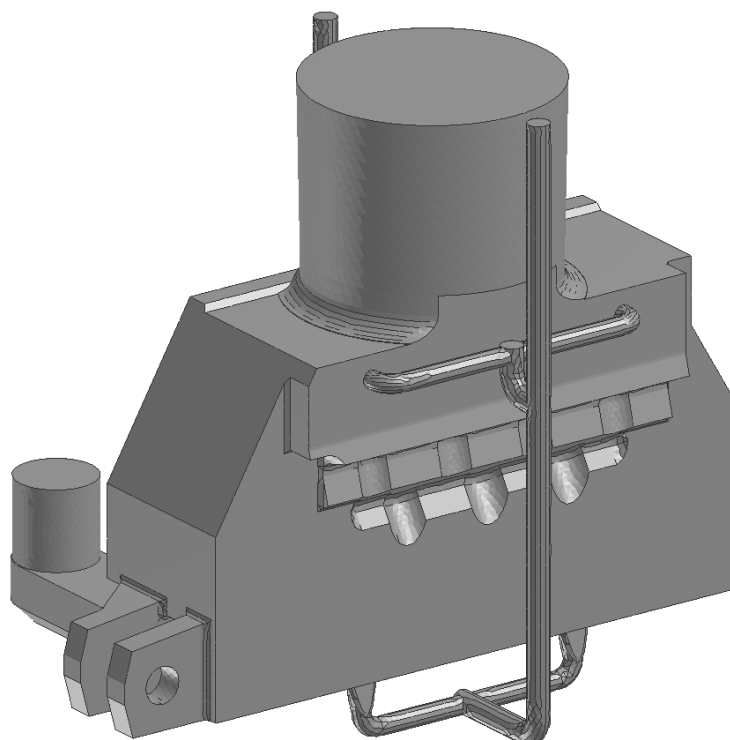

Obr. 6.40 Vzorek U4324 č. snímku 62771

Obr. 6.41 Vzorek U4324 č. snímku 62770

6.3.6.4 Celkové zhodnocení analýz provedených u vzorku U 4324 (stojan)

Vzorek obsahuje větší množství sulfidů III. typu a dále opět rozměrné útvary vměstků na bázi Zr. Struktura je dále značně heterogenní z hlediska velikosti a morfologie sekundárního zrna, což ukazuje na významně odlišné rychlosti chladnutí při pálení nálitku a tedy i vznik vysokých transformačních pnutí. Jako možná příčina vzniku trhlin se jeví zkřehnutí v důsledku vzniku deskovitých vměstků na bázi Zr a vznik pnutí, jemuž zeslabené hranice zrn nedokázaly odolat.

6.4 Traverza

Odlitek traverzy (obr. 6.42 a obr. 6.43) o hmotnosti 4 až 25 tun je odléván nejčastěji z materiálu GS20Mn5, G20MnMoNi55. Tloušťka stěn se pohybuje od 300 do 1000 mm. Vady se opět nejčastěji vyskytují v podnálitkové oblasti. Nejčastější vady jsou trhliny, vycezeniny a produkty deoxidace [37].

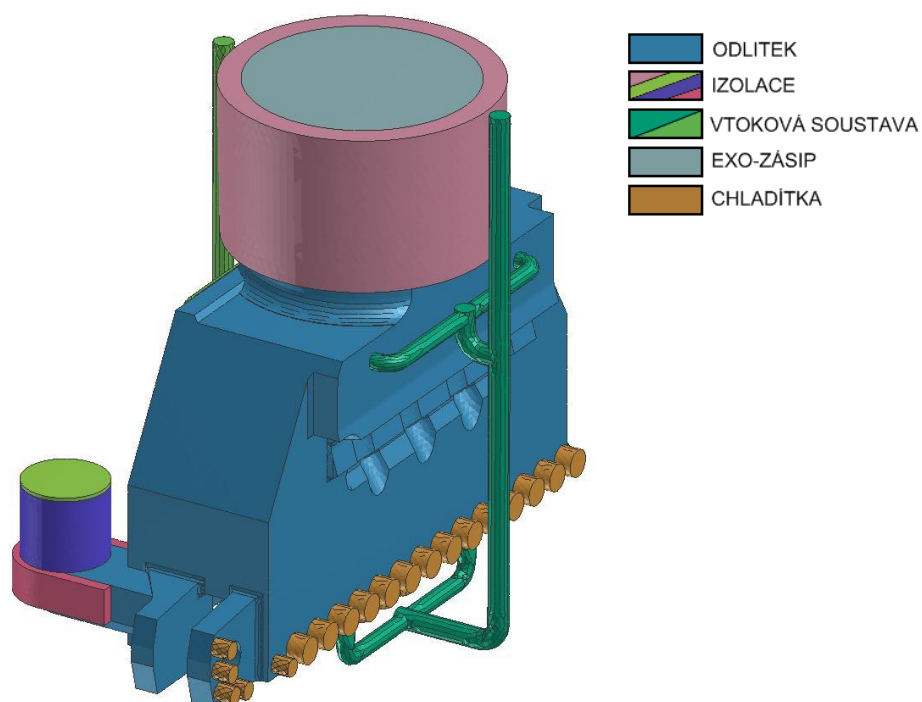


Obr. 6.42 Traverza

Tab. 6.13 Podmínky při odlévání – traverza [37]

Materiál odlitku	GS20Mn5
Forma	Líc formy zhotoven z chromitového ostřiva s tloušťkou cca 10cm, zbytek formy vyplněn křemenným ostřivem
Nálitek	Izolovaný
Chladítka	Ocel
Teplota lití	cca 1590°C
Doba lití	cca 3 min

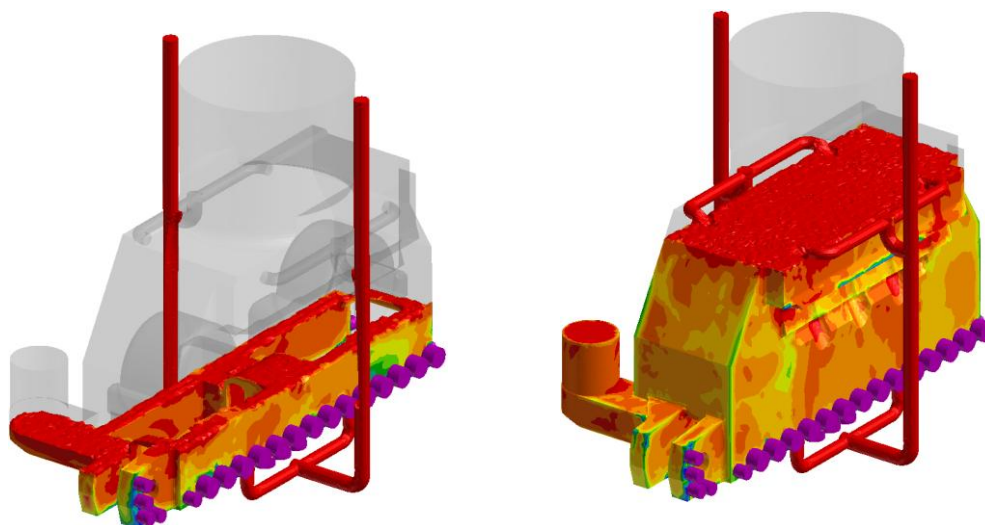
6.4.1 Geometrie odlitku a formy



Obr. 6.43 Geometrie odlitku traverzy

6.4.2 Průběh plnění dutiny formy

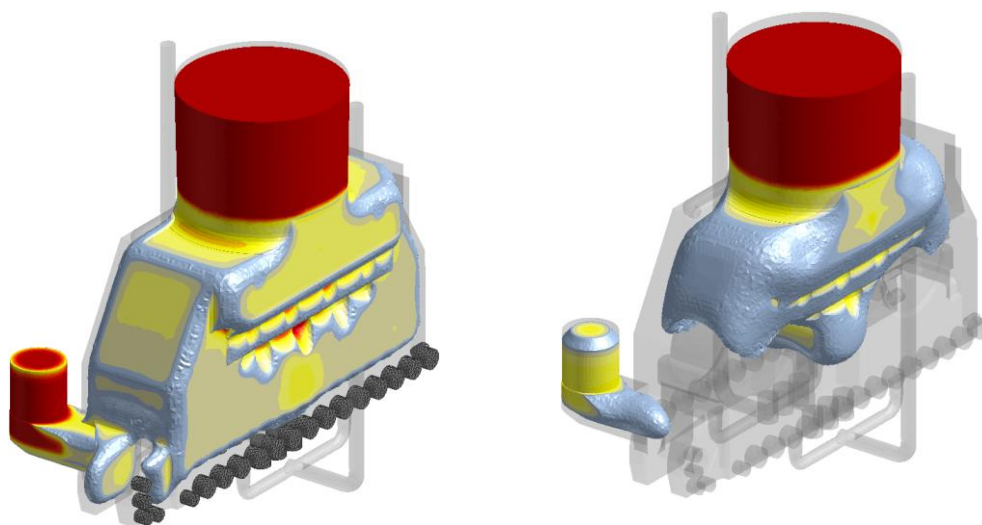
Teplota lití byla zvolena podle dodaných podmínek 1590 °C. Plnění dutiny (obr. 6.44) formy je zabezpečeno ze dvou vtokových soustav, které jsou zaplňovány ve stejný časový okamžik. Během doby plnění poklesla teplota odlitku o 40 - 50 °C v místech v okolí chladítek o 80 - 100 °C. Plnění je rovnoměrné z obou vtoků. Poté co hladina kovu dosáhne úrovně chladítek dochází k ochlazení kovu, který následně stoupá do vrchní části odlitku. Zde je kov promíchán s novým kovem z vrchní etáže [37].



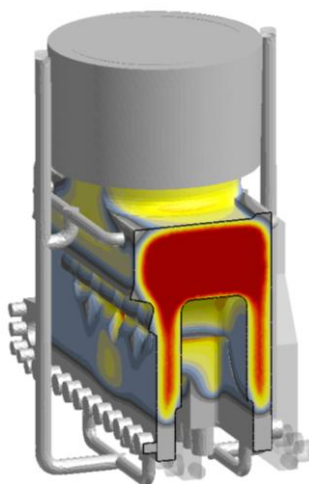
Obr. 6.44 Počátek a konec plnění odlitku traverzy

6.4.3 Průběh tuhnutí odlitku

Použitá technologie se z hlediska tepelných uzlů ukazuje být vyhovující, neboť všechny tepelné uzly jsou vytlačeny do náliček a v odlitku nedochází k oddělování front tuhnutí. Tuhnutí odlitku je rozděleno pouze do dvou větších sekcí. Spodní tepelný uzel je náliťován z bočního náličku. Zbytek odlitku je dosazován z vrchního otevřeného náličku. Stěna odlitku tuhne přibližně rovnoměrně, přičemž vzniká velice úzký dosazovací klín. Středový náliček následně není schopen celou tuto oblast dosadit. Průběh tuhnutí je zobrazen na *obr. 6.45* a *obr. 6.46* [37].



Obr. 6.45 Počátek a konec tuhnutí odlitku stojanu

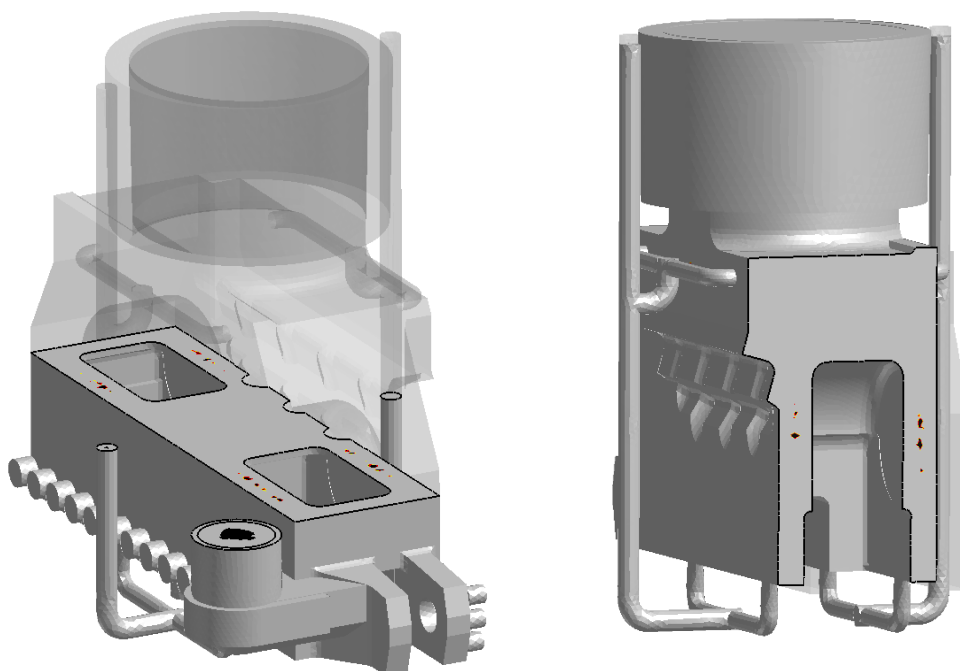


Obr. 6.46 Průběh tuhnutí odlitku stojanu

6.4.4 Porezita odlitku

V odlitku, při nastavení kritických hodnot pro zobrazování makroporezity, nebyl výskyt makroporezity (*obr. 6.47*) v odlitku pozorován mimo stažení a úbytek kovu v nálitcích a ve vtoku [37].

Predikce vzniku mikrostaženin je naznačena na obrázku mikrostaženiny, byly nalezeny zejména v místech pod čtyřmi uzavřenými nálitky kde se od sebe oddělují fronty tuhnutí. Vznik této vady odpovídá postupu tuhnutí [37].



Obr. 6.47 Výskyt mikroporezity v odlitku traverzy

6.4.5 Shrnutí výsledků simulace - traverza

Plnění odlitku probíhá rovnoměrně bez větších turbulencí a vzniku studených spojů. Z tuhnutí je zřejmé, že může docházet ke vzniku ředin ve stěnách odlitku. Pozice vad přibližně odpovídá geometrické ose stěn odlitku. K odstranění tohoto jevu by bylo zapotřebí zvýšit rychlost ochlazování spodní části, i když na spodní části je již velké množství chladítek. Bylo by vhodné zvýšit tepelnou kapacitu těchto chladítek například žebrováním, tak aby nedošlo k vyčerpání podstatné části jejich tepelné kapacity již ve fázi plnění [37].

Podrobné informace k simulaci lze nalézt v [37].



6.4.6 Analýza vad u typového odlitku traverza (vzorek U 4212 AB)

Byly vyříznuty dva vzorky z odlitku traverzy Fissa, č. m. 8120658, p. č. 14, materiál GS20Mn5 po ohrubování, kde se v podnálikové oblasti objevily vady typu „řediny“. Ultrazvuková zkouška indikovala tyto vady do hloubky až 100 mm. Lití se zúčastnily celkem 3 tavby – 272 538, 461 845, 370 450. Chemický rozbor odebraných vzorků je uveden v *tab. 6.14*, taveb pak v *tab. 6.15* [34].

Tab. 6.14 Chemický rozbor vzorků U 4212

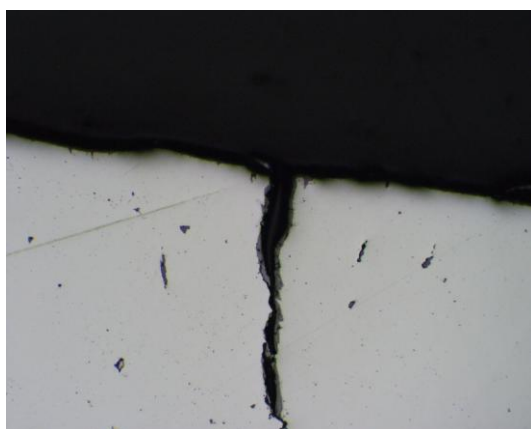
Vzorek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Zr
AB	0,18	1,28	0,49	0,008	0,005	0,24	0,16	0,10	0,04	0,020	0,024
XY	0,29	1,34	0,53	0,008	0,004	0,24	0,14	0,10	0,04	0,023	0,015

Tab. 6.15 Chemický rozbor zúčastněných taveb

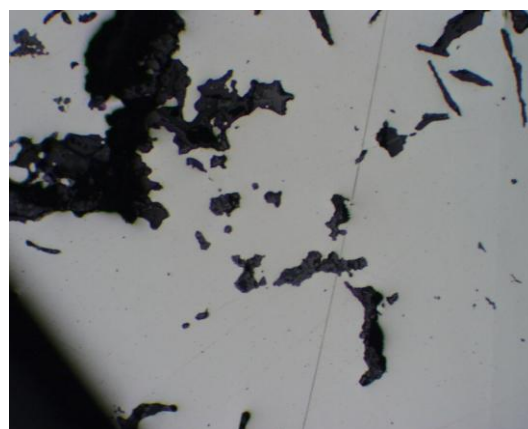
Tavba	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Zr
272538	0,24	1,30	0,48	0,010	0,005	0,26	0,20	0,09	0,04	0,022	0,033
461845	0,20	1,34	0,50	0,006	0,008	0,21	0,12	0,11	0,04	0,022	0,040
370450	0,21	1,38	0,55	0,007	0,005	0,24	0,08	0,08	0,04	0,022	0,036

6.4.6.1 Metalografické hodnocení vzorku U 4212AB

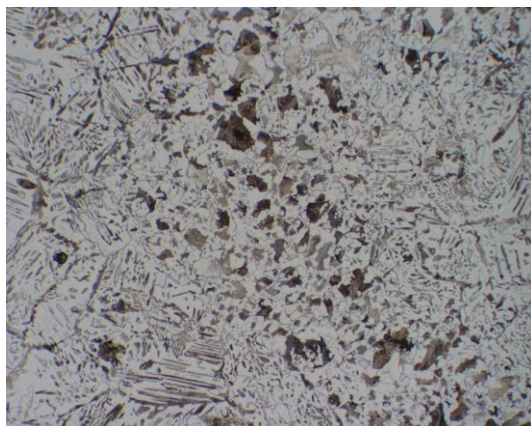
Na dodaném vzorku z podnálikové oblasti odlitku traverzy bylo provedeno metalografické hodnocení. Na vzorku byla okem patrná ředina vyplněná po zalisování zalévací hmotou. Na *obr. 6.48* až *obr. 6.51* jsou uvedeny snímky struktury v leptaném i neleptaném stavu při různém zvětšení. Snímky zachycují jednak vlastní strukturu tak i okolí vad [34].



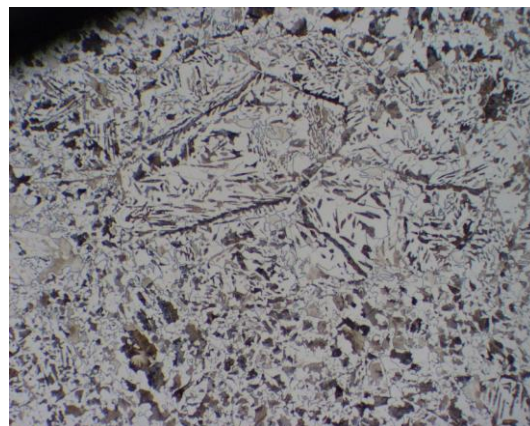
Obr. 6.48 Vzorek U 4212AB nelept. 100x



Obr. 6.49 Vzorek U 4212AB nelept. 100x



Obr. 6.50 Vzorek U 4212AB lept. 200x



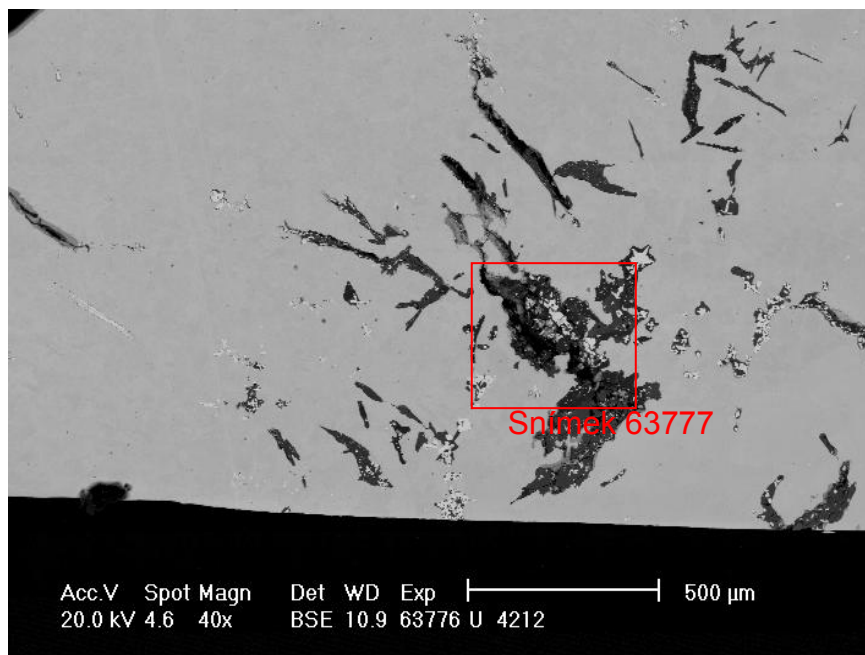
Obr. 6.51 Vzorek U 4212AB lept. 200x

6.4.6.2 Vyhodnocení metalografie vzorku AB:

Struktura analyzovaného vzorku je tvořena feriticko-perlitickou strukturou. Jak vyplývá z neleptaných snímků (*obr. 6.48 a obr. 6.49*) nachází se ve struktuře vady (trhliny) tak i shluky vměstků a zadrobenin. Výskyt těchto vměstků a vad může vést ke vzniku trhliny v důsledku snížené pevnosti a to zejména v kombinaci s hrubým primárním zrnem. Významné rozdíly ve velikosti a morfologii feriticko-perlitické sekundární struktury naznačují, že ve vzorku byly významné změny v rychlosti ochlazování. Tyto rozdíly jsou dobře patrné ze snímků na *obr. 6.50 a obr. 6.51* lze pozorovat jehlicovitou strukturu. Pro posouzení původu vměstků a fází vyplňujícím útvary zadrobenin bylo provedeno hodnocení na elektronovém mikroskopu [34].

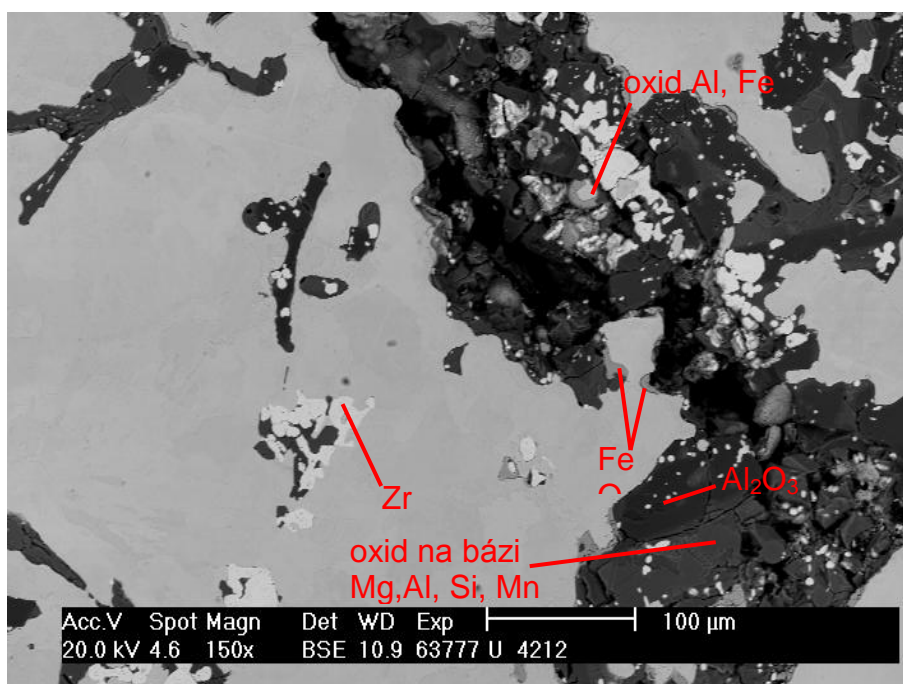
6.4.6.3 Hodnocení vzorku AB na elektronovém mikroskopu:

Čistota vzorku je z pohledu výskytu vměstků velice špatná. Vzorek obsahuje menší množství ředin a masivní útvary dutin vyplněné nekovovými fázemi. Ve vzorku byly zjištěny hranaté rovnoměrné rozmístěné vměstky na bázi Zr, které obsahovaly minimum kyslíku a žádný dusík. Sulfidy byly ve vzorku rozmístěny stejnoměrně o velikosti do cca 5 μm výjimečně o velikosti až 10 – 20 μm . Vměstky II. typu nebyly na vzorku nalezeny. Na snímku 63 776 (*obr. 6.52*) je zachycena oblast dutin vyplněná nekovovými fázemi. Na dílčí části tohoto útvaru (*obr. 6.53, snímek 63 777*) byla provedena bodová analýza [34].



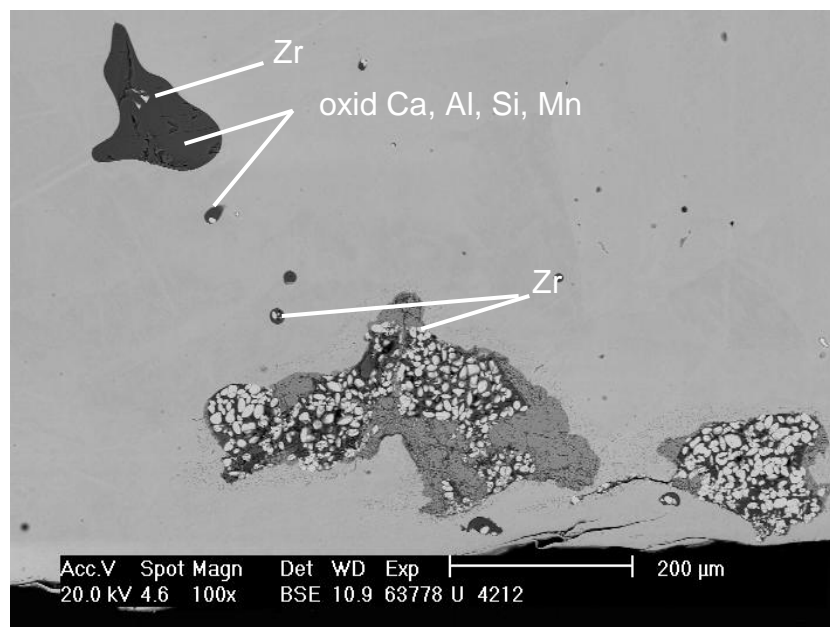
Obr. 6.52 Vzorek U4212AB č.snímku 63776

Jak vyplývá z výsledků bodové analýzy snímku 63 777 (obr. 6.53) je dutina většinou vyplněna oxidickými fázemi. Nacházejí se zde oxidy hliníku, dále komplexní oxidy na bázi Al, Mg, Si a Mn. V okrajových částech těchto útvarů byly nalezeny také oxidy FeO. Bílé se jevící fáze jsou tvořeny čistým Zr [34].



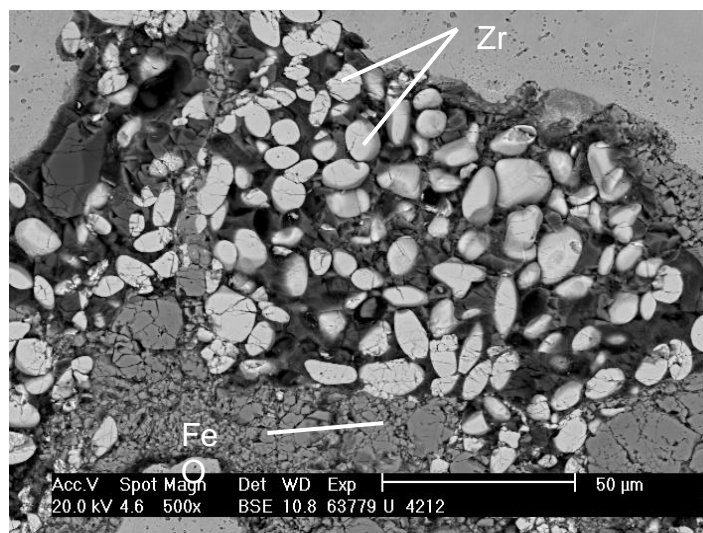
Obr. 6.53 Vzorek U4212AB č.snímku 63777

Místo zachycující oblast s vměstkou Zr je znázorněno na snímku 63 778 (obr. 6.54). Jedná se o vměšky čistého Zr, v jejichž okolí se vyskytují další fáze. Tyto fáze patrně snadno rostou (vylučují se) na zrníčkách primárně vyloučeného Zr [34].



Obr. 6.54 Vzorek U4212AB č.snímku 63778

Na snímku 63 778 (obr. 6.54) je v horní části zachycen makrovměstek komplexních oxidů Al, Ca, Si a Mn. Stejný typy vměstků byly analyzovány ihned pod tímto vměstkem ovšem mnohem menší velikosti. Nižší jsou na snímku zachyceny rozsáhlé útvary makroskopických rozměrů tvořených z velké části čistým Zr. Detail tohoto útvarů je zobrazen na snímku 63 779 (obr. 6.55) [34].

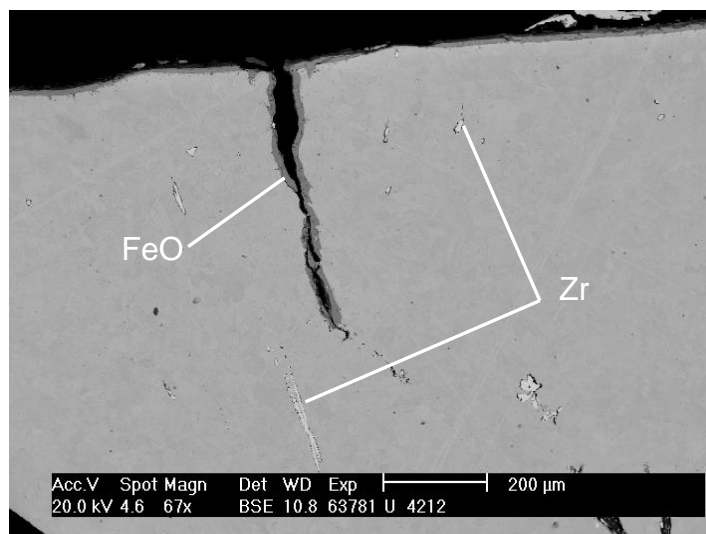


Obr. 6.55 Vzorek U4212AB č.snímku 63779



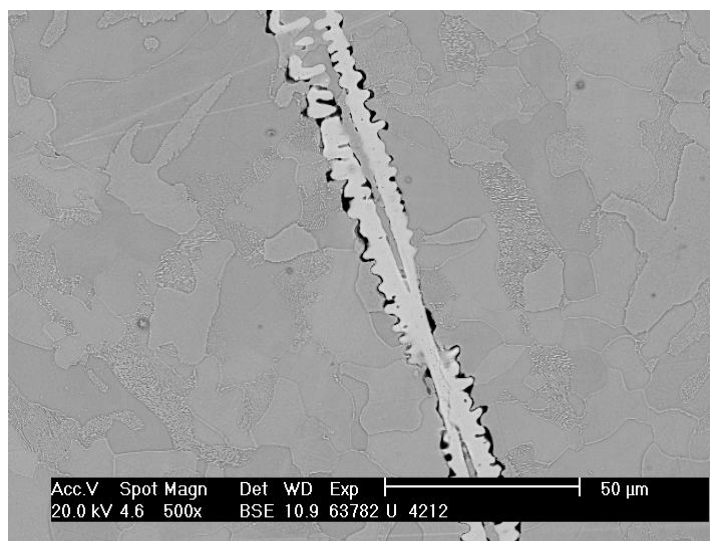
Jak vyplývá z provedené analýzy, nachází se v těsném okolí částic Zr fáze na bázi FeO. Zr má výrazně větší afinitu ke kyslíku než Fe, a dala by se proto očekávat redukce oxidů FeO. Zirkonium tvoří s železem sloučeninu $ZrFe_3$. Při teplotě 912 °C je rozpustnost zirkonia v železe 0,08 % a s klesající teplotou rozpustnost klesá. Z tuhého roztoku se pak vylučuje metalikum $ZrFe_3$. V místech se zvýšenou segregací zirkonia se může uvedená sloučenina vyskytovat i při nižších koncentracích Zr v tavebním vzorku. Přítomnost dalších prvků zejména obsahu uhlíku poněkud mění rozpustnost zirkonia v oceli proti fázovému diagramu. Lze však vycházet ze zkušenosti, že při nízkých koncentracích uhlíku a ostatních prvků v oceli lze při posuzování rozpustnosti zirkonia vycházet z fázového diagramu. Nalezené vměstky s vysokým obsahem zirkonia bez přítomnosti dusíku a kyslíku mohou odpovídat sloučenině $ZrFe_3$ [34].

Na vzorku se nacházela trhlina. Jednalo se o otevřenou dutinu pokrytou vrstvou oxidů na bázi Fe. V těsném okolí trhliny se opět nacházely vměstky makroskopických rozměrů na bázi Zr, které však s iniciací trhliny nesouvisely.



Obr. 6.56 Vzorek U4212AB č.snímku 63781

Detail jednoho z makrovměstků Zr z levé spodní strany snímku 63 781 (obr. 6.56) je zobrazen na snímku 63 782 (obr. 6.57). Na povrchu tohoto vměstku jsou patrné vyloučené fáze. Opět se jedná o komplexní oxidy na bázi Mg, Al a Mn. Z měřítka zobrazenému na snímku je zřejmé, že rozměr tohoto vměstek v jednom směru přesahuje 200 μ m [34].



Obr. 6.57 Vzorek U4212AB č.snímku 63782

6.4.6.4 Celkové zhodnocení analýz provedených u vzorku U4212AB (traverza Fissa)

Vzorek obsahoval makrovměstky na bázi Zr. Jedná se o protáhlé deskovité vměstky, jejichž délka přesahuje v některých případech velikosti i 200 μm a výjimečně i 400 μm . Tyto vměstky neobsahovaly v podstatě žádný kyslík nebo dusík (téměř čisté Zr), což ukazuje na lokální přebytek Zr nebo jeho nevhodné rozložení a rozpuštění v matici. Na vzorku nebylo nalezeno to, že by jejich vyloučení vedlo ke vzniku trhlin. Přesto lze předpokládat, že v takto značném výskytu a velikosti mohou vznik trhlin iniciovat.

Ve struktuře byly dále nalezeny rozsáhlé shluky vměstků na bázi čistého Zr makroskopických rozměrů, v jejichž bezprostředním okolí se nacházely oxidy FeO a komplexní oxidy na bázi Al, Mg, Si a Mn. Rozměry těchto útvarů jsou natolik rozsáhlé, že značně narušují matici a mohou iniciovat vznik trhlin [34].

6.4.7 Analýza vad u typového odlitku traverza (vzorek U 4212XY)

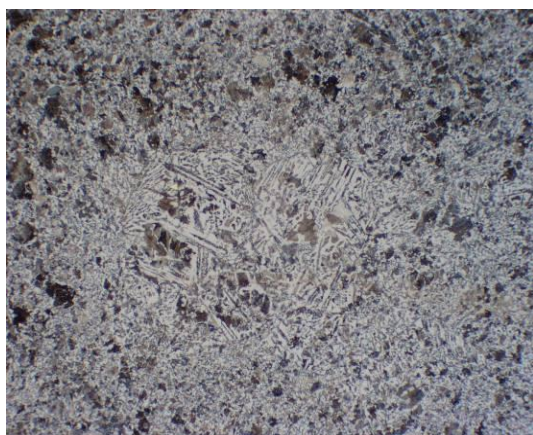
Na dodaném vzorku z podnálitkové oblasti odlitku traverzy bylo provedeno metalografické hodnocení. Na vzorku byla okem patrná ředina. Na obr. 6.58 až obr. 6.61 jsou uvedeny snímky struktury v leptaném i neleptaném stavu při různém zvětšení. Snímky zachycují jednak vlastní strukturu tak i okolí vady [34].



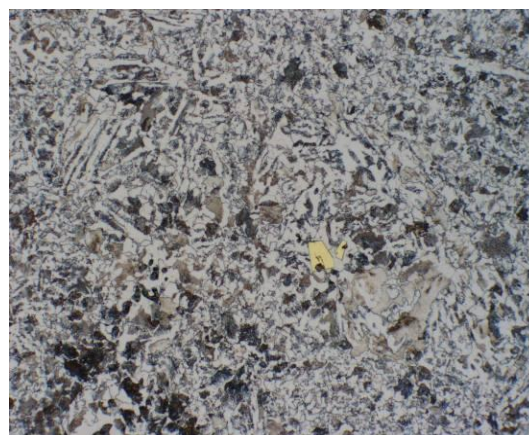
Obr. 6.58 Vzorek U 4212XY nelept. 100x



Obr. 6.59 Vzorek U 4212XY nelept. 100x



Obr. 6.60 Vzorek U 4212XY lept. 100x



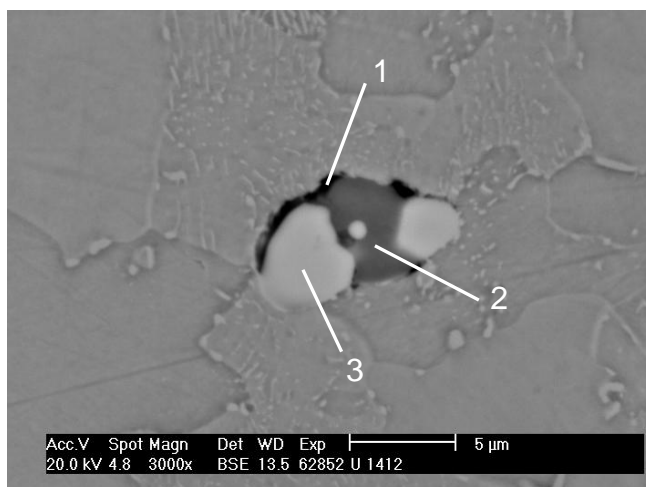
Obr. 6.61 Vzorek U 4212XY lept. 200x

6.4.7.1 Vyhodnocení metalografie vzorku XY:

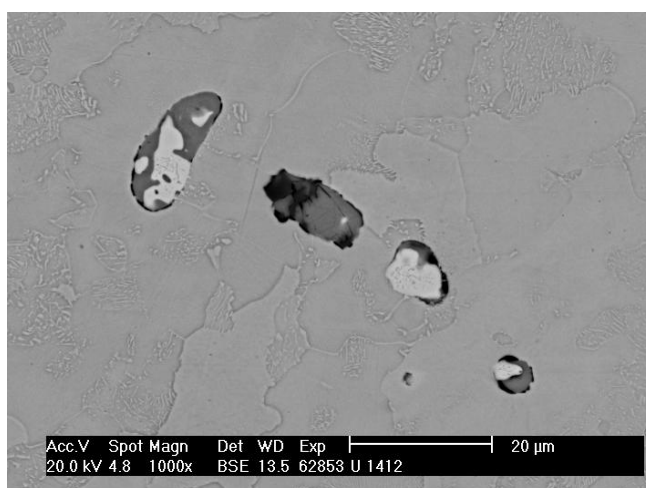
Struktura analyzovaného vzorku je tvořena feriticko-perlitickou strukturou. Jak vyplývá z neleptaných snímků (*obr. 6.58* a *obr. 6.59*) i leptaného snímku (*obr. 6.61*) nachází se ve struktuře jednak samostatné vměstky III. typu tak i vměstky II. typu viz *obr. 6.58*. Výskyt těchto vměstků může mít vliv na vznik trhliny v důsledku snížené pevnosti a to zejména v kombinaci s hrubým primárním zrnem. Dále se ve vzorku vyskytují karbonitridy. Na *obr. 6.60* a *obr. 6.61* lze pozorovat jehlicovitou strukturu [34].

6.4.7.2 Hodnocení vzorku XY na elektronovém mikroskopu:

Čistota vzorku je z pohledu množství vměstků dobrá. Vzorek obsahuje minimum ředin. Ve vzorku byly zjištěny hranaté rovnoměrné rozmístěné vměstky na bázi Zr, jedná se o sloučeniny Ti+Zr+N, většinou se jedná vměstky ZrN, které jsou hranaté a mají bílou barvu. Dále tyto vměstky obsahují síru obsaženou v sulfidech. Velikost těchto vměstků se pohybovala obvykle kolem 50 μ m, ale v některých případech byly i nalezeny rozměrnější. Síra je vázána na druhý a třetí typ vměstků. Na snímcích č. 62852 a č. 62853 jsou zobrazeny vměstky MnS.

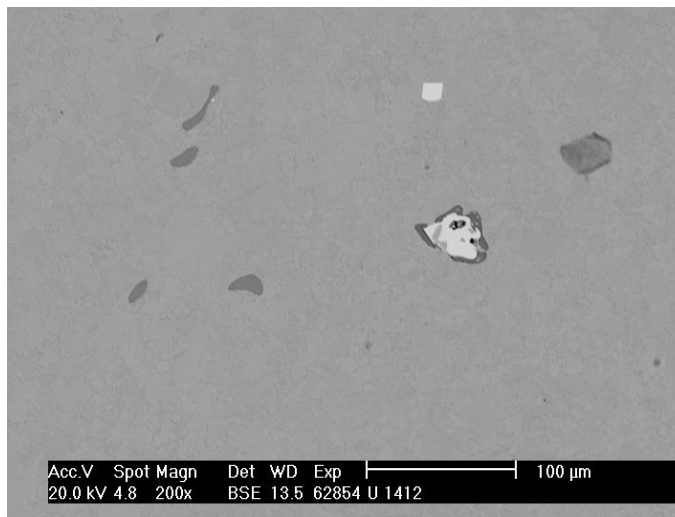

Obr. 6.62 Vzorek U4212XY č. snímku 63852

Na snímku č. 62852 (obr. 6.62) je zobrazen analyzovaný oxid. Tento vměstek se skládá z 3 fází, velikost tohoto vměstku je do 10 μm . Množství vměstků podobné morfologie i složení je v analyzovaném vorku místně více. Na těchto vměstcích rostou sulfidy, což je zobrazeno také výše na snímku č. 62853 (obr. 6.63) [34].


Obr. 6.63 Vzorek U4212XY č. snímku 63853
Tab. 6.16 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku U4212XY

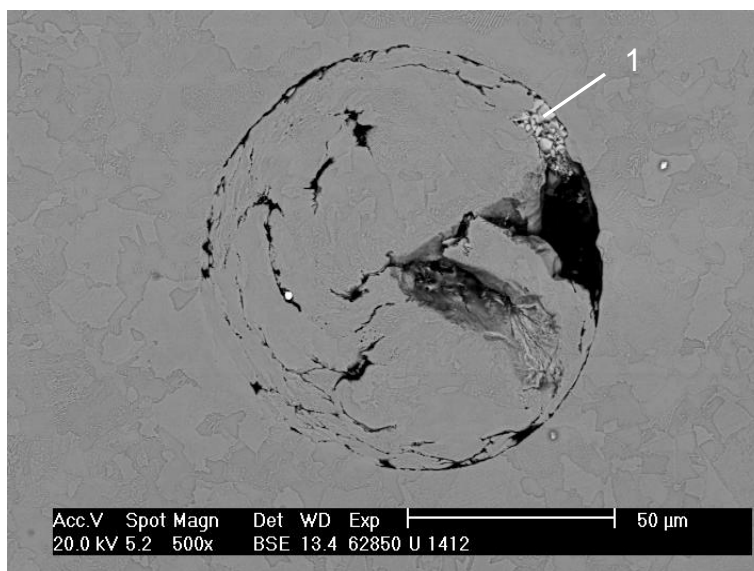
Popis analýzy			Prvek								
č. snímku	Místo	poznámka	O	Mg	Al	Zr	Ca	Fe	Mn	S	K
62852	1	tmavá	43,04	10,14	15,47	1,80	0,57	23,37	2,26	2,63	0,71
62852	2	světlejší		7,42			7,48	4,38	35,27	45,45	
62852	3	světlá	63,25	2,66		28,16	2,46	2,81	0,67		

Na snímku č. 62854 (*obr. 6.64*) je také zachyceno nejvíce vměstky znečištěné místo vzorku.



Obr. 6.64 Vzorek U4212XY č. snímku 63854

V části vzorku se nachází těleso kulatého tvaru nezcela dobře spojeného s matricí, patrně se jedná o kapku kovu - brok. Těleso je zobrazeno na snímku č. 62850 (*obr. 6.65*). Velikost broku se pohybuje kolem 105 μm . Místo 1 označuje ZrN. Podobné útvary se nacházejí na více místech vzorku a opět nejsou dokonale spojeny s matricí.

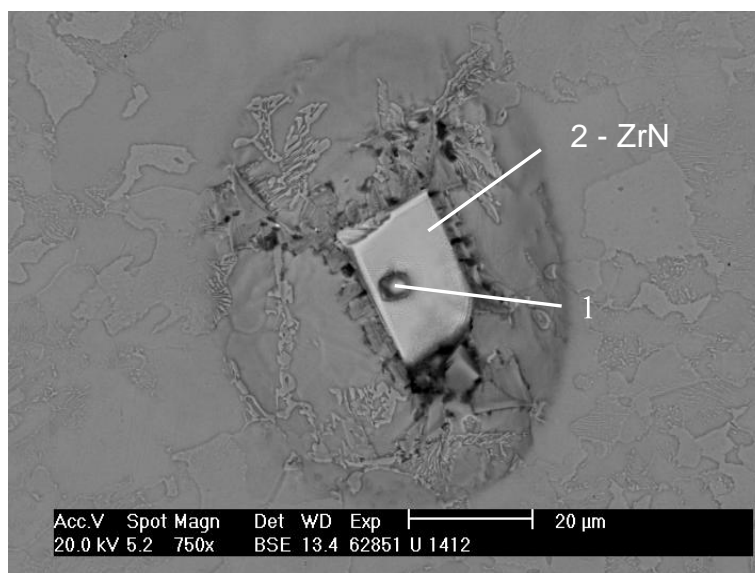


Obr. 6.65 Vzorek U4212XY č. snímku 63850

Tab. 6.17 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku U4212XY

Popis analýzy			Prvek				
č. snímku	místo	poznámka	N	O	Zr	Ti	Fe
62850	1	světlá	27,25	21,21	40,62	4,06	6,86

Snímek č. 62851 (obr. 6.66) zobrazuje analyzovaný vměstek ZrN, na němž se nachází tmavá fáze.



Obr. 6.66 Vzorek U4212XY č. snímku 63851

Tab. 6.18 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku U4212XY

Popis analýzy			Prvek							
č. snímku	místo	Poznámka	O	Mg	Al	Zr	Ca	Fe	N	Ti
62851	1	Tmavá fáze	73,28	2,57	2,79	18,54	0,61	2,21		
62851	2	Světlá				48,96		3,75	43,82	3,47

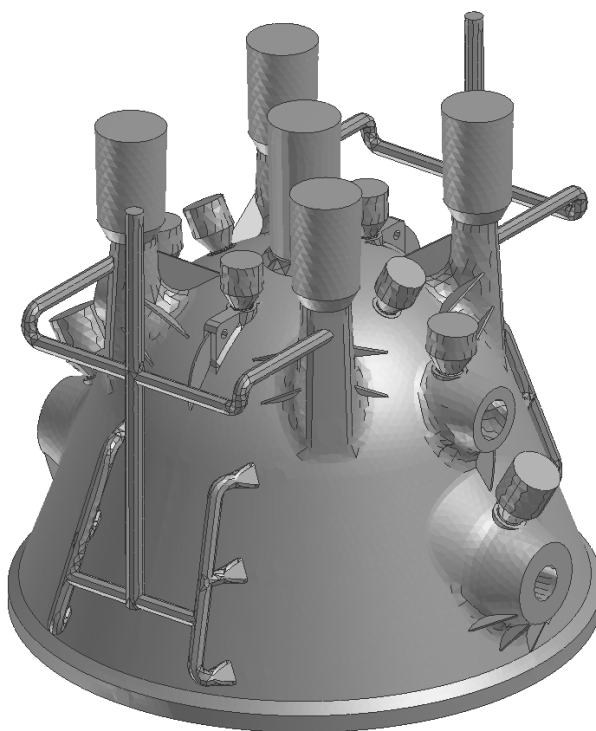
6.4.7.3 Celkové zhodnocení analýz provedených u vzorku U4212XY (traverza Fissa)

Vzorek obsahoval vměstky II a III typu. Vyloučení vměstků II typu společně s deskovitými útvary vměstků na bázi Zr mohlo vést k zhoršení vlastností materiálu z hlediska odolávání vzniku trhlin během upalování nálitku.

Ve struktuře byly dále nalezeny kulovité útvary částečně nespojené s matricí, které mají patrně původ ve fázi odlévání - broky. Ty mohly podobně jako nevhodně vyloučené vměstky vést k iniciaci trhlin.

6.5 Pánev

Hmotnost odlitku pánve (*obr. 6.67 a obr. 6.68*) se pohybuje od 8 do 25 tun, tloušťky stěn jsou od 150 do 400mm. Odlitek je odléván nejčastěji z materiálů GS20Mn5, G20Mo5, GS45. Vady se opět vyskytují nejčastěji v podnálitkové oblasti. Nejčastějšími vadami v této oblasti jsou lasturové lomy a mikroporozita [38].

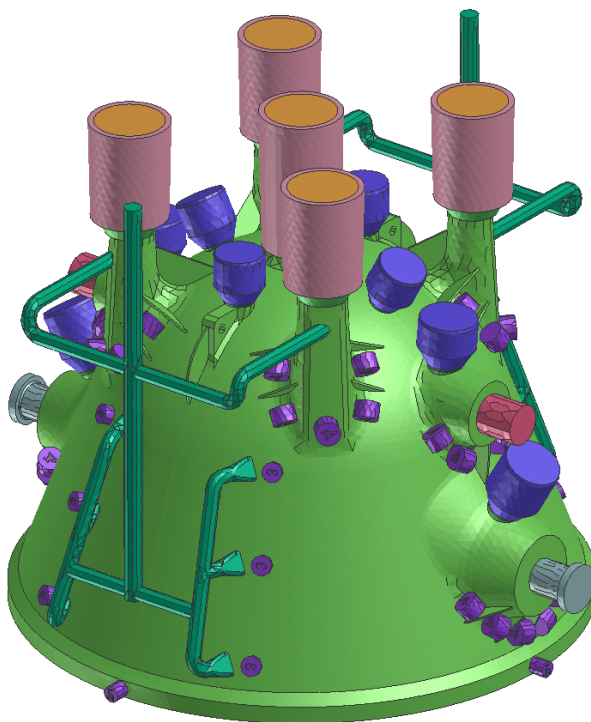


Obr. 6.67 Pánev

Tab. 6.19 Podmínky při odlévání – pánev [38]

Materiál odlitku	GS45
Forma	Líc formy zhotoven z chromitového ostřiva s tloušťkou cca 10cm, zbytek formy vyplněn křemenným ostřivem
Jádro	Chromitové ostřivo
Nálitek	Izolovaný
Chladítka	Ocel
Teplota lití	1580°C
Doba lití	cca 2 min.

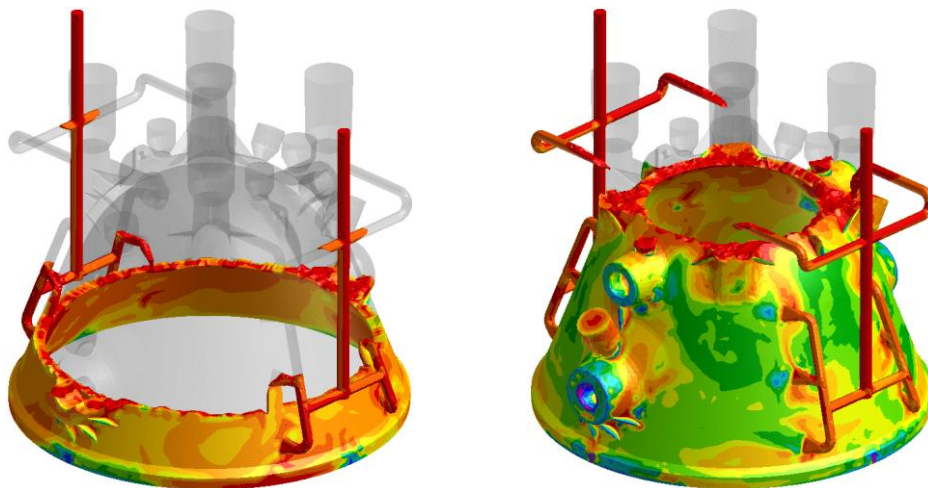
6.5.1 Geometrie odlitku a formy



Obr. 6.68 Geometrie odlitku pánve

6.5.2 Průběh plnění dutiny formy

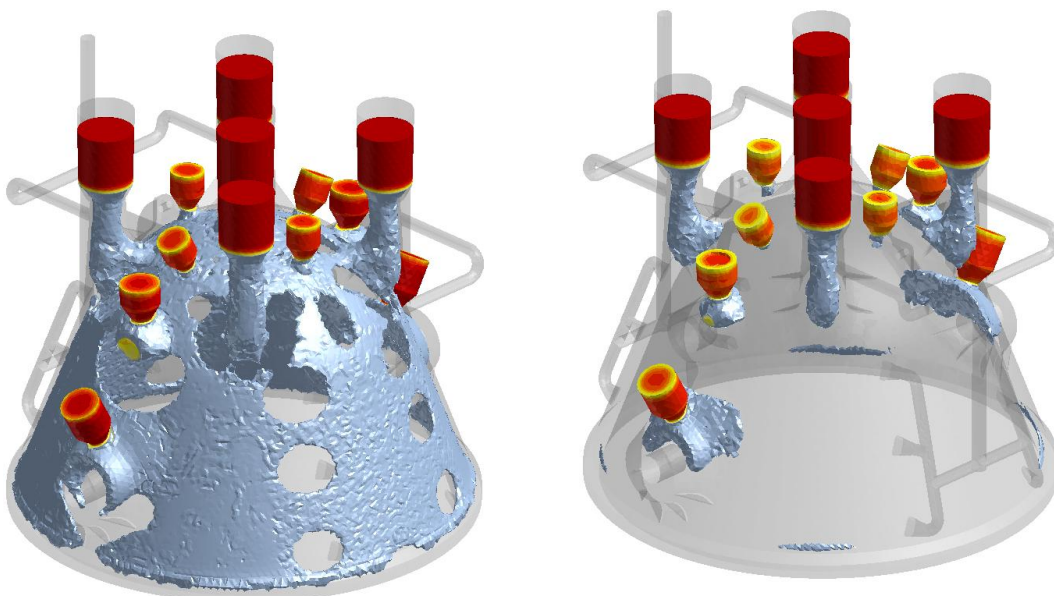
Vtoková soustava je zaústěna do těla odlitku pomocí štěrbinových zářezů a pomocí horní etáže pod nálitky. Vtoková soustava v místech napojení zářezů způsobuje místní prohřátí, což vede ke tvorbě lokálních tepelných uzlů. Proud kovu je přiváděn přímo na stěnu formy/jádra. Poté co hladina kovu dosáhne určité výšky, jsou aktivovány zářezy a jako poslední proudí tavenina vrchním patrem a prohřívá nálitky. Průběh plnění je zobrazen na obr. 6.69 [38].



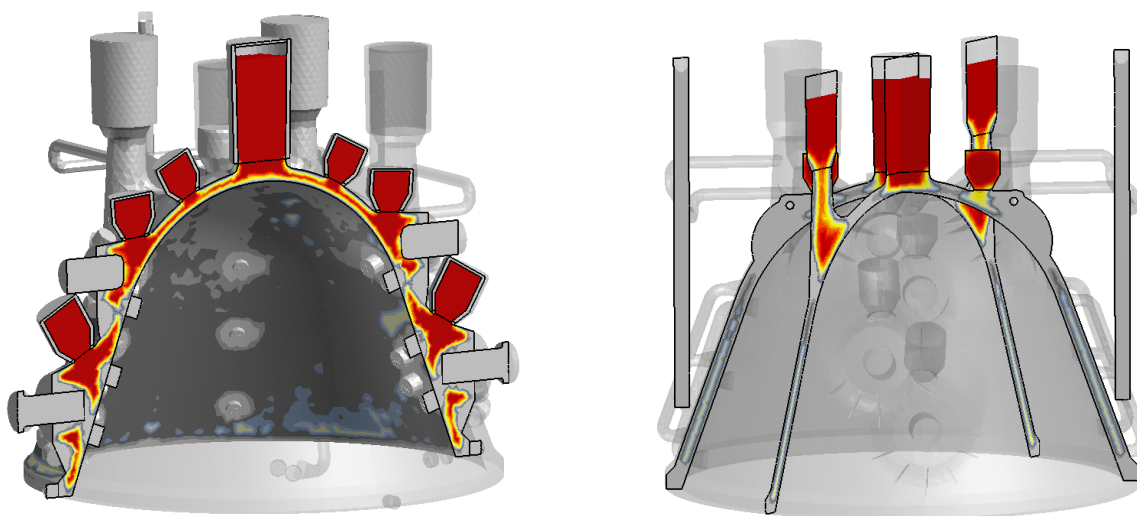
Obr. 6.69 Počátek a konec plnění odlitku pánve

6.5.3 Průběh tuhnutí odlitku

Simulace použité technologie prokázala, že během tuhnutí dochází k oddělování několika míst odlitku od dosazování tekutého kovu z nálitky. Jedná se o oblast spodního okraje pánve a místa pod horními nálitky. Průběh tuhnutí zobrazují obr. 6.70 a obr. 6.71 [38].



Obr. 6.70 Začátek a konec tuhnutí odlitku pánve

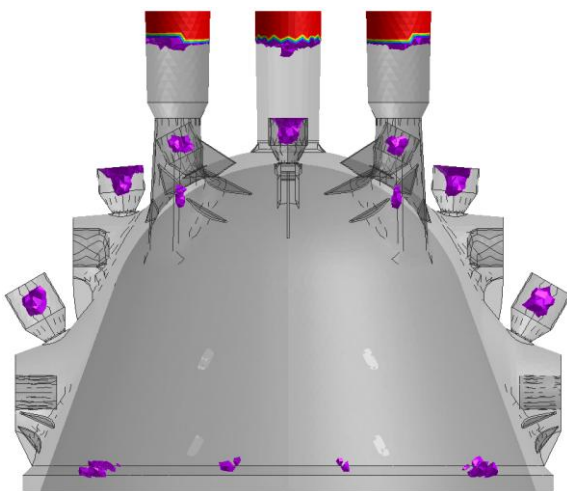


Obr. 6.71 Podíl tuhé fáze při tuhnutí

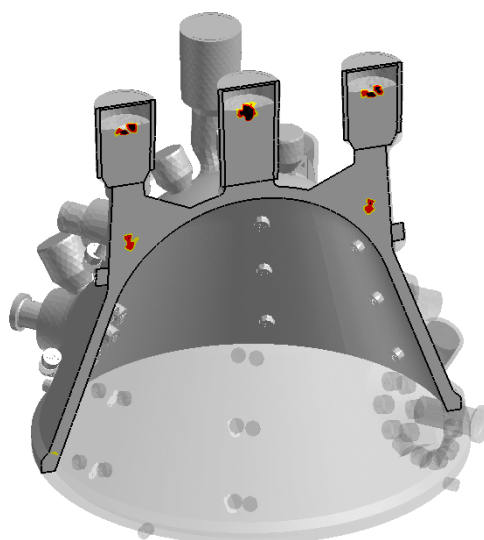
6.5.4 Porezita odlitku

Na *obr. 6.72* je znázorněna predikce vzniku makroporezity v odlitku. Při nastavení kritických hodnot pro zobrazování této vady, byl výskyt makroporezity, kromě stažení a úbytku kovu v nálitcích a ve vtokové soustavě pozorován v místech spodního okraje pánve a pod čtyřmi horními nálitky [38].

Predikce vzniku mikrostaženin je naznačena na *obr. 6.73*. Mikrostaženiny se objevují ve stěnách pánve v oblastech mezi chladítky kde dochází k oddělování front tuhnutí [38].



Obr. 6.72 Predikce makrostaženin



Obr. 6.73 Predikce mikrostaženin

6.5.5 Shrnutí výsledků simulace - pánve

Plnění odlitku probíhá dynamičtěji, než u odlitků zavtokovaných spodními vtoky. Takto zvolená vtoková soustava je vhodnější, než spodní vtok, s ohledem na rozložení teplotního pole a následné usměrněné tuhnutí.

Během tuhnutí dochází k oddělení řady tepelných uzlů. Odlitek pánve díky stejné tloušťce stěny tuhne přibližně ve stejném časovém okamžiku a není zajištěno dosazování tekutého kovu z nálitků do spodních partií. Rozložení chladítek na spodní hraně je nedostatečné a v odděleně tuhoucích částech odlitku dochází ke vzniku staženin a ředin. K odstranění této vady doporučujeme použít kontaktní kovová chladítka na spodní hranu odlitku, tak aby došlo k urychlení tuhnutí. Doporučujeme rovněž přidat chladítka na tělo odlitku, tak aby bylo vytvořeno více koncových zón a urychleno tuhnutí odlitku. Rychlejší tuhnutí může zabránit formování sekundární staženiny pod nálitky [38].

Podrobné informace i simulaci jsou obsaženy v [38].



6.5.6 Analýza vad u typového odlitku pánve (vzorek U4098)

Vzorek pochází z odlitku pánve, u kterého bylo kvůli lomové ploše podezření na lasturový lom. Materiál pánve GS20Mn by normalizačně žíhán. Chemický rozbor materiálu je v *tab. 6.20* [34].

Tab. 6.20 Chemické složení v hm. %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
0,19	1,47	0,38	0,009	0,006	0,20	0,14	0,11	0,045

6.5.6.1 Metalografické hodnocení

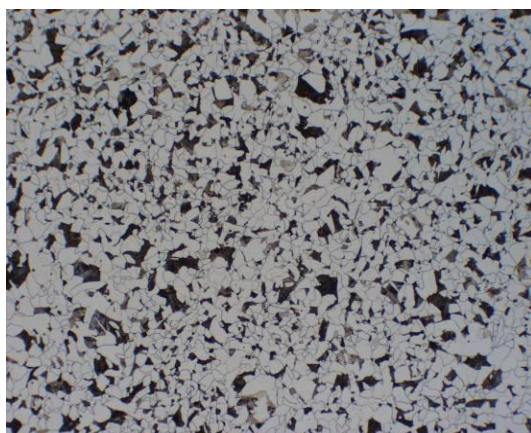
Cílem bylo ověřit, o jaký typ vady se jedná (trhlina, prasklina) a určit z jaké příčiny pravděpodobně ke vzniku této vady došlo. U vzorků byl sledován charakter vady (vada po hranicích zrn, přes zrna), struktura v okolí vady, morfologie a rozložení vměstků v odlitku. Na *obr. 6.74* až *obr. 6.77* jsou uvedeny snímky struktury v leptaném i neleptaném stavu při různém zvětšení. Snímky zachycují jednak vlastní strukturu tak i okolí vady [34].



Obr. 6.74 Vzorek U 4098 nelept. 100x



Obr. 6.75 Vzorek U 4098 nelept. 100x



Obr. 6.76 Vzorek U 4098 lept. 100x



Obr. 6.77 Vzorek U 4098 lept. 100x



6.5.6.2 Vyhodnocení metalografie

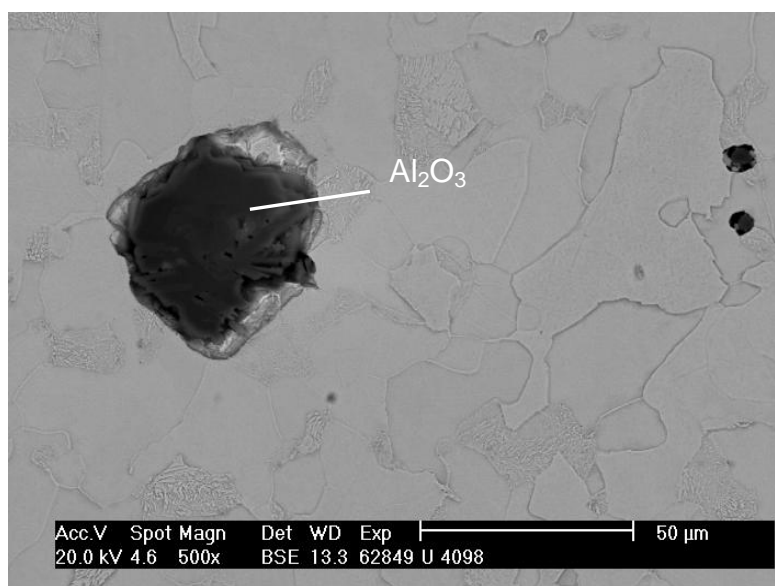
Na naleptaném vzorku lze pozorovat větší množství ředin a vměstků (*obr. 6.74 a obr. 6.75*). Na okraji vzorku vystupuje nepravidelná trhlina (*obr. 6.75 a obr. 6.77*) v jejíž okolí byly nalezeny řediny a vměstky. S ohledem na rovný průběh porušení souvislosti přes sekundární zrna je možné určit, že se jedná o prasklinu vzniklou při nízkých teplotách [34]

Vzorek po naleptání vykazuje rovnoměrnou strukturu feritu a perlitu jak prokazuje *obr. 6.76 a obr. 6.77*. Okraje trhlin vykazují výhradně feritickou strukturu s minimem výskytu perlitu v jinak feriticko-perlitické matrici (*obr. 6.77*). To může být spojeno s výskytem nitridů hliníku a zvýšené koncentrace hliníku na hranicích primárních austenitických zrn. Pro potvrzení tohoto předpokladu bylo provedeno sledování vzorku na elektronovém mikroskopu [34].

6.5.6.3 Hodnocení na elektronovém mikroskopu

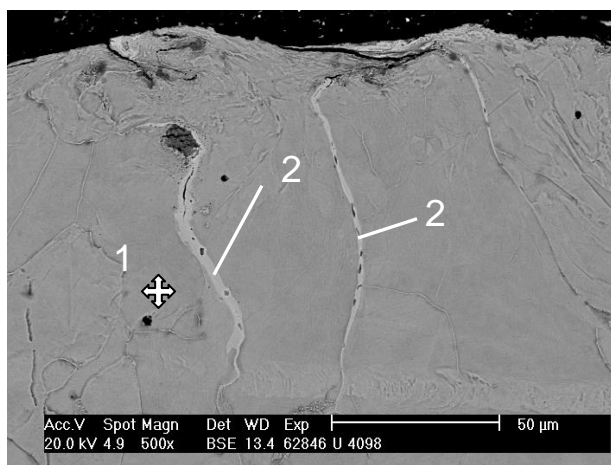
Struktura obsahuje velké množství drobných oxidů Al_2O_3 o velikosti 1 - 3 μm a velké množství neanalyzovaných vměstků s velikostí pod 1 μm . Některé vměstky s Al obsahují také Mg. Dále jsou ojediněle obsaženy vměstky oxidů na bázi Al_2O_3 s velikostí až 40 μm , což je zobrazeno na snímku 62849 (*obr. 6.78*).

Sulfidy MnS, které byly obsaženy ve struktuře, rostou vždy na Al_2O_3 . Dříve vyloučené oxidy hliníku jsou krystalizačními zárodky pro sulfidy II. typu MnS. Zcela výjimečně rostou MnS samostatně [34].



Obr. 6.78 vzorek 4098, č. snímku 62849

Ve vzorku 4098 byly analyzovány protáhlé útvary zasahující hluboko pod povrch odlitku, jež vycházejí z jedné plochy a jedné strany - viz. snímek č. 62846 na obr. 6.79. V místě 2 se nachází fáze bohatá na Ni, po hranicích těchto fází (obsahuje Ni a Cu) se šíří praskliny.

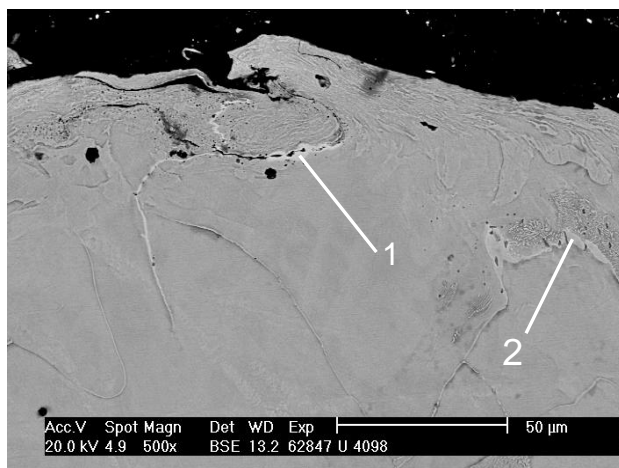


Obr. 6.79 vzorek 4098, č.snímku 62846

Tab. 6.21 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku č. 4098

Popis analýzy			Prvek					
č. snímku	místo	Poznámka	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
62846	1	Tmavší	1,52	0,50	1,72	96,26		
62846	2	světlá fáze				72,01	19,23	8,76

Snímek č. 62847 (obr. 6.80) je z jiného místa. Opět jsou zde oblasti obohacené o Ni a Cu (místa 1 a 2). Po hranicích zrn bohatých o Ni se šíří trhliny. Tyto fáze se vyskytují pouze v povrchových oblastech a nezasahují do hloubky. Povrch zrna je zdeformován pouze z jedné strany, což je nejspíš způsobeno upalováním nálitku.

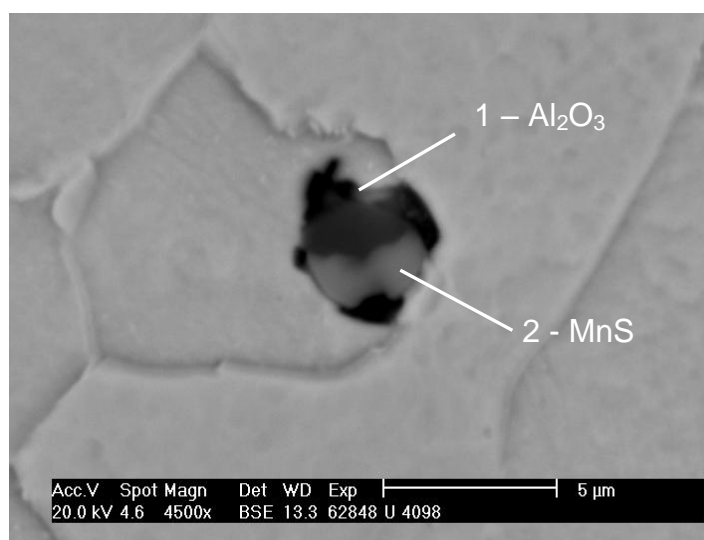


Obr. 6.80 vzorek 4098, č.snímku 6284

Tab. 6.22 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku č. 4098

Popis analýzy			Prvek		
č. snímku	místo	poznámka	Fe	Ni	Cu
62847	1	světlá fáze	72,75	19,67	7,58
62847	2	světlá fáze	89,70	5,55	4,75

Snímek č. 62848 (*obr. 6.81*) zobrazuje oxid Al o velikosti cca 2,5 μ m, na němž roste sulfid.


Obr. 6.81 vzorek 4098, č.snímku 62848
Tab. 6.23 Složení analyzovaných fází v at. % ve vzorku č. 4098

Popis analýzy			Prvek						
č. snímku	místo	poznámka	O	Mg	Al	S	Ca	Mn	Fe
62848	1	tmavá	55,03	7,14	31,38	2,46	0,40	1,42	2,17

6.5.6.4 Celkové zhodnocení analýz provedených u vzorku U4098 (pánev)

Na okraji vzorku vystupuje nepravidelná trhlinka. S ohledem na rovný průběh porušení souvislosti přes sekundární zrna je možné určit, že se jedná o prasklinu vzniklou při nízkých teplotách [34].

Na zkoumaném vzorku lze pozorovat větší množství ředin a vměstků. Vměstky jsou vesměs drobné do cca 5 μ m s menším množstvím vměstků o velikosti až 40 μ m. Množství ani morfologie vměstků nenaznačují, že iniciací porušení souvislosti byly oxidické či sulfidické vměstky.

Vzorek po naleptání vykazuje rovnoměrnou strukturu feritu a perlitu. Okraje prasklin vykazují strukturu s minimem výskytu perlitu v jinak feriticko-perlitické matici [34].



Ve vzorku byly dále analyzovány protáhlé útvary zasahující pod povrch odlitku. Tyto fáze byly zjevné při pozorování na elektronovém mikroskopu a vycházejí pouze z jedné plochy vzorku. Jedná se o fáze bohaté na Ni (příp. i Cu), po hranicích těchto fází (obsahuje Ni a Cu) se šíří praskliny. Opět jsou zde oblasti obohacené o Ni a Cu (místa 1 a 2), kdy po hranicích zrn bohatých o Ni se šíří trhliny. Tyto fáze se vyskytují pouze v povrchových oblastech a nezasahují do hloubky. Povrch zrna je zdeformován pouze z jedné strany, což je nejspíš způsobeno upalováním nálitku.

Hodnocení lomových ploch nebylo dosud provedeno. Pro není možné potvrdit, výskyt lasturového lomu. Analýza lomových ploch bude provedena dodatečně [34].

6.6 Celkové zhodnocení vad u typových odlitků

Cílem simulací byla predikce vzniku některých typů vad a možnosti optimalizace slévárské technologie. Z nich následně i vyplynulo, že tuhnutí odlitků probíhá usměrněně do nálitků a případné rezervy jsou pouze v redukci velikosti nálitků. To je však možné pouze za předpokladu současného zvyšování intenzity chlazení (zvětšení objemu chladítek).

Součástí této etapy řešení vad v rámci DP bylo dále určení hlavních příčin výskytu vad typu trhlin po odstranění nálitků, aby bylo možné zvolit vhodné nápravné opatření. Z výsledků těchto analýz vyplynulo, že nejčastější příčinou vad u sledovaných odlitků byl velký výskyt vměstků na bázi Zr navíc často s velice nevhodnou morfologií a rozložením, výskyt dutin (staženiny a řediny) a výskyt vměstků II typu MnS [39].

Na základě tohoto zjištění byl pro druhou etapu řešení zvolen následující postup.

- 1 Pro potlačení vzniku vad v důsledku nevhodné morfologie produktů dezoxidace Zr bylo zvoleno použití komplexní dezoxidace jinými, vhodnějšími prvky. Před jejich aplikací budou provedeny zkoušky v laboratorních a poloprovozních podmínkách.
- 2 Pro potlačení vzniku vměstků MnS II. typu bude ověřeno použití prvků sekundární metalurgie (LF, VD). V případě jejich použití dochází k výraznému snížení koncentrace síry, a tím i ke snížení vlivu sulfidických vměstků na plastické vlastnosti oceli v podnálitkové oblasti.
- 3 Pro potlačení výskytu ředin je doporučeno u vybraného typového odlitku použití maximální snížení velikosti nálitků a zvýšení teplotního gradientu do nálitku prostřednictvím chladítek.



7 Úvod do experimentů

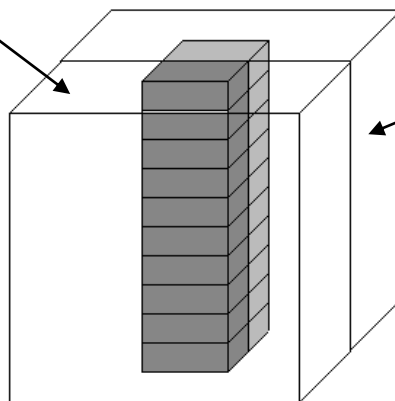
V kapitole č. 6 byly provedeny analýzy vad typových odlitků slévárny, vzorky byly odebrány z podnálitkových oblastí, analýzou bylo zjištěno, že iniciátory vad jsou ve většině případů vměstky na bázi zirkonia. Ke kombinované dezoxidaci lze použít i jiné prvky než zirkonium, např. titan, cér, hořčík, kovy vzácných zemin. Cílem experimentu bylo v poloprovozních podmínkách zjistit, jaký má vliv druh dezoxidovadla na morfologii vměstků. V provozních podmínkách byla provedena analýza kombinované dezoxidace Al + Ce, Al + Zr. V poloprovozních podmínkách byla analyzována kombinovaná dezoxidace Al + Mg.

8 Hodnocení vzorků dezoxidované kombinovanou dezoxidací Al + Ce, Al + Zr

Zkušební odlitek měl tvar krychle o rozměrech 500x500x500mm. Byl vyroben z oceli GS 20Mn5 (NORSOK GR 420) ve slévárně Žďas z tavby na 4t EOP. Chemické složení materiálu podle normy je uvedeno v *tab. 8.1*. Mechanické hodnoty udávané normou jsou uvedeny v *tab. 8.2*.

Byla provedena kombinovaná dezoxidace hliníkem a dalším dezoxidovadlem (cér a zirkonium). Dezoxidovadla byla přidávána ve formě feroslitin. Ve zkušebním vzorku se obsahy dezoxidovadel po výšce měnil, což byl důsledek segregace prvků během tuhnutí. Zkušební odlitek byl rozřezán podle rozřezového plánu (*obr. 8.1*). Jedna polovina vzorků byla analyzována v tepelně nezpracovaném stavu (v litém stavu) druhá polovina vzorků byla tepelně zpracována. K hodnocení vzorků byly vybrány vzorky s nejmenším, průměrným a nejvyšším obsahem dezoxidovadla.

tepelně zpracovaný stav



*tepelně nezpracovaný
stav (litý stav)*

Obr. 8.1 Rozřezový plán vzorků



Chemické složení udávané normou

Norma udává jen horní hranice chemických prvků, z tohoto důvodu jsou uvedeny tavírenské limity ve slévárně oceli ŽĐAS a.s.

Tab. 8.1 Chemické složení GS 20Mn5 (NORSOK GR 420)

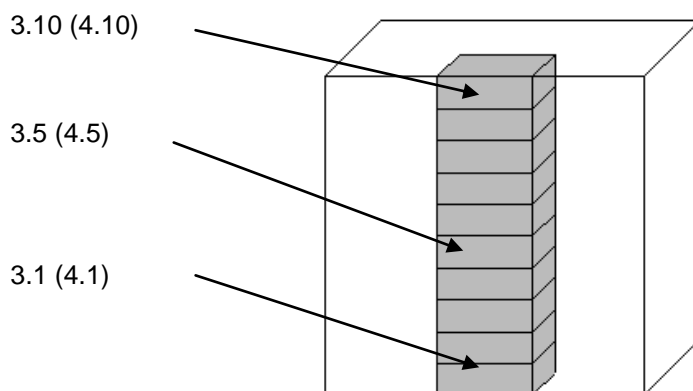
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Norma max.	0,14	1,6	0,6	0,012	0,0080	0,250	1,1	0,25	0,3
min. tav.	0,1	1,25	0,3				0,9		0,2
max. tav.	0,12	1,4	0,5	0,012	0,0050	0,250	1,05	0,25	0,25

	V	Al	Sn	Ti	Zr	W	B	N
Norma max.	0,05	0,05	0,0150	0,04	0,02		0,001	0,012
min. tav.	0,01	0,015						
max. tav.	0,03	0,025	0,0150	0,01	0,04	0,1	0,001	0,01

Tab. 8.2 Mechanické hodnoty pro přilýtý klín tloušťky 60mm

Mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Pevnost R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Kontrakce Z [%]	Nárazová práce KV [J]
min. 420	min. 420	min. 20	-	42 pro -40°C

Polovina zkušební kostky určená ke zkouškám v litém stavu byla rozřezána na jednotlivé zkušební vzorky, rozřezový plán a označení jednotlivých zkušebních vzorků je zobrazeno na obr. 8.2.



Obr. 8.2 Rozřezový plán vzorků v litém stavu



8.1 Kombinovaná dezoxidace Al + Ce

Polovina zkušební kostky byla rozřezána dle plánu na jednotlivé vzorky viz. obr. 8.2. Z porovnání chemického složení dané normou (tab. 8.1) a chemického složení vzorku (tab. 8.3) vyplývá, že se pohybujeme v mezích dané normou.

Tab. 8.3 Chemické složení v hm. %

Číslo vzorku	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
3.1	0,11	1,17	0,42	0,006	0,008	0,24	0,87	0,14	0,21
3.5	0,12	1,21	0,44	0,007	0,003	0,25	0,92	0,14	0,22
3.10	0,11	1,22	0,45	0,008	0,008	0,24	0,92	0,15	0,22

Číslo vzorku	V	Al	Ca	As	Sn	Sb	Ti	Ce
3.1	0,02	0,021	<0,0005	0,005	0,008	<0,0030	0,004	0,030
3.5	0,02	0,022	<0,0005	0,006	0,009	<0,0030	0,004	0,020
3.10	0,02	0,024	0,0005	0,007	0,009	<0,0030	0,004	0,055

Vysoké obsahy O₂ a N₂ jsou způsobeny segregací do podnálitkové oblasti, právě v této oblasti se nejvíce vyskytují vady. Stanovené obsahy plynů jsou uvedeny v Tab. 8.4. Obsah H₂ není věrohodný, neboť analýza obsahu plynů byla provedena po delší době a vodík stačil ze vzorku částečně oddifundovat.

Tab. 8.4 Obsahy plynu v jednotlivých vzorcích ppm

Číslo vzorku	O ₂	N ₂	H ₂
3.1	50	99	1,9
3.5	57	100	7,6
3.10	75 101 67	98	1,6

Porovnáním mechanických hodnot dané normou (tab. 8.2) a hodnot naměřených (tab. 8.5) vyplývá, že námi naměřené hodnoty jsou menší. Nižší hodnoty mechanických zkoušek jsou způsobeny tím, že vzorky jsou v tepelně nezpracovaném stavu.

Tab. 8.5 Mechanické hodnoty vzorků 3.1, 3.5, 3.10

Číslo vzorku	Mez kluzu R _{p0.2} [MPa]	Pevnost R _m [MPa]	Tažnost A ₅ [%]	Kontrakce Z [%]	Nárazová práce KV [J]	
3.1	314	489	19,4	22,6	62	61
3.5	326	458	7,4	12,4	9	10
3.10	326	487	6,2	4,7	11	11



8.1.1 Vzorek číslo. 3.1

8.1.1.1 Metalografické vyhodnocení

Na naleptaném vzorku lze pozorovat vesměs rovnoměrně rozložené vměstky. Ojedinelé jsou ve struktuře vměstky větších rozměrů (*obr. 8.3*). Dále se ve struktuře vyskytují vměstky typu Ib dle Bůžka - *obr. 8.4*. Místně se objevují vměstky IV. typu *obr. 8.5*.



Obr. 8.3 - vzorek 3.1 neleptán 100x



Obr. 8.4 - vzorek 3.1 neleptán 100x



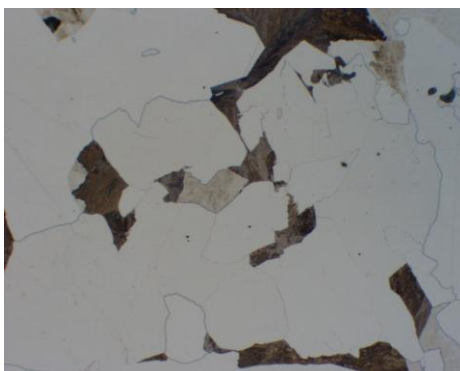
Obr. 8.5 - vzorek 3.1 neleptán 100x



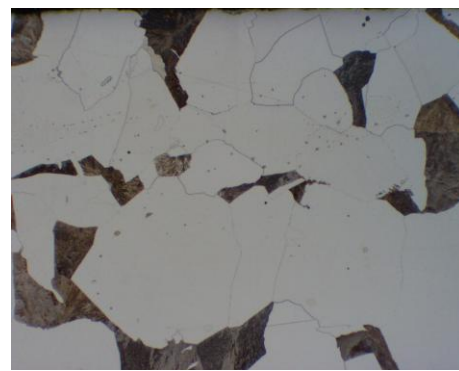
Obr. 8.6 - vzorek 3.1 neleptán 100x

8.1.1.2 Strukturní vyhodnocení

Po naleptání lze pozorovat, že struktura je feriticko – perlitická, s větším zastoupením feritu. Struktura je hrubozrná, což je způsobeno litým stavem *obr. 8.7* a *obr. 8.8*.



Obr. 8.7 - vzorek 3.1 leptáno 100x



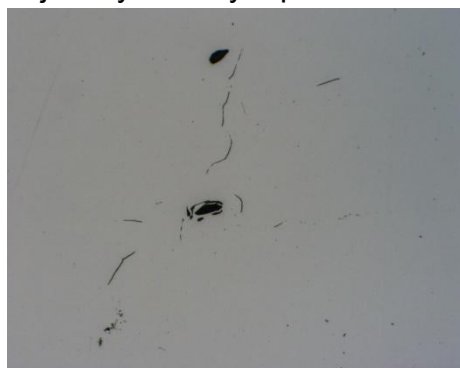
Obr. 8.8 - vzorek 3.1 leptáno 100x



8.1.2 Vzorek číslo 3.5

8.1.2.1 Metalografické vyhodnocení

Na neleptaném vzorku je vidět velké množství trhlinek či prasklinek *obr. 8.9* a *obr. 8.10*. Ve vzorku bylo nalezeno také množství větších vměstků Ib a IV. typu *obr. 8.11*. V důsledku vyšší koncentrace Ce je ve vzorku 3.5 vyšší podíl vměstků IV. typu, což koreluje s významným poklesem tažnosti a nárazové práce.



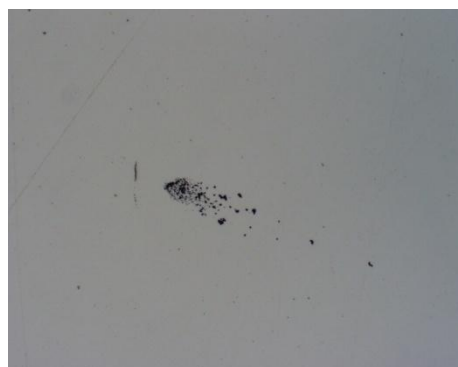
Obr. 8.9 - vzorek 3.5 neleptáno 100x



Obr. 8.10 - vzorek 3.5 neleptáno 100x



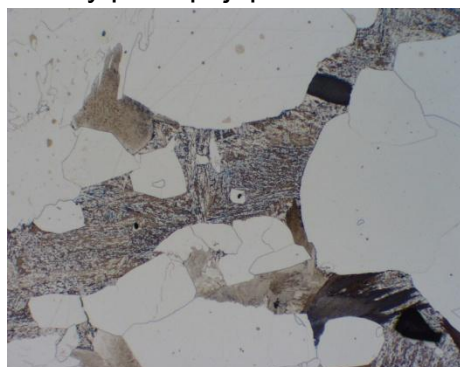
Obr. 8.11 - vzorek 3.5 neleptáno 100x



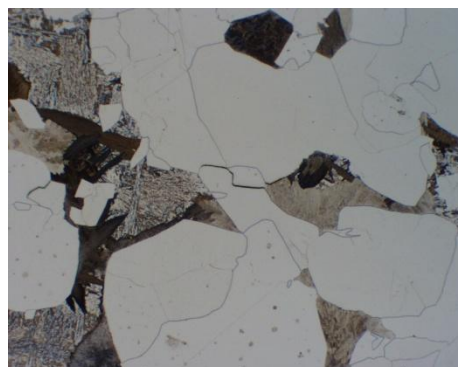
Obr. 8.12 - vzorek 3.5 neleptáno 200x

8.1.2.2 Strukturní vyhodnocení

Po naleptání opět vzorek vykazuje feriticko – perlitickou strukturu *obr. 8.13* a *obr. 8.14*. Struktura je velmi hrubozrnná, což znamená, že se jedná o zrna v litém stavu. Trhlinky postupují po hranicích zrn *obr. 8.14*.



Obr. 8.13 - vzorek 3.5 leptáno 100x



Obr. 8.14 - vzorek 3.5 leptáno 100x



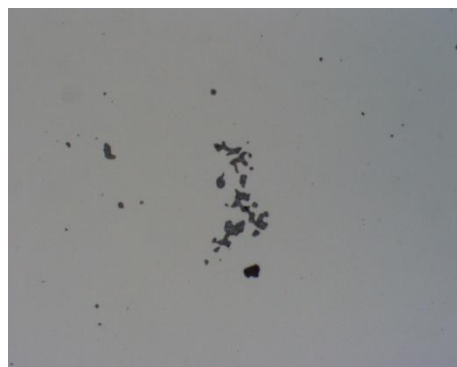
8.1.3 Vzorek číslo 3.10

8.1.3.1 Metalografické vyhodnocení

V neleptaném stavu nebyly na vzorku nalezeny žádné trhliny nebo praskliny. Na *obr. 8.15* a *obr. 8.16* jsou zobrazeny vměstky IV. typu. Vzorek taktéž obsahoval samostatné vměstky typu Ib dle Bůžka viz. *obr. 8.17* a *obr. 8.18*. Výskyt vměstků IV. typu byl ze všech tří vzorků dezoxidovaných Al+Ce nejvyšší, což odpovídá i nejnižším hodnotám tažnosti a nárazové práce.



Obr. 8.15 - vzorek 3.10 neleptáno 100x



Obr. 8.16 - vzorek 3.10 neleptáno 200x



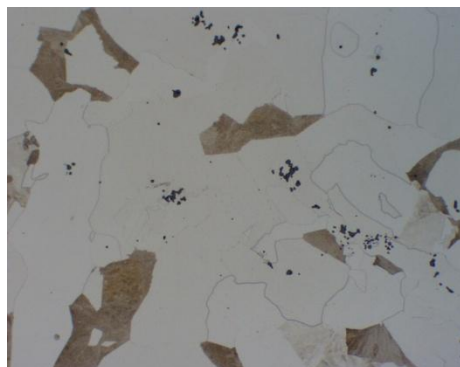
Obr. 8.17 - vzorek 3.10 neleptáno 100x



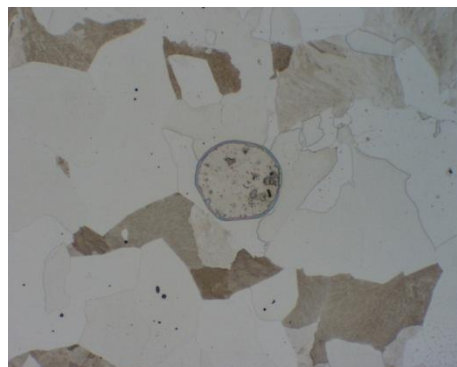
Obr. 8.18 - vzorek 3.10 neleptáno 100x

8.1.3.2 Strukturní vyhodnocení

V leptaném stavu vykazuje vzorek feriticko – politickou strukturu, zrna jsou poměrně velká opět z důvodu, že se jedná o litý stav. Na *obr. 8.19* je vidět rozmístění vměstků IV. typu ve struktuře.



Obr. 8.19 - vzorek 3.10 leptáno 100x



Obr. 8.20 - vzorek 3.10 leptáno 100x



8.1.4 Vyhodnocení vzorků oceli dezoxidované cerem

Při dezoxidaci oceli na odlitky hliníkem jsou ve struktuře obsaženy vměstky II. (sulfidy) a III. typu (sulfidy, oxidy). Po přísadě hliníku a ceru (cca 0,015) se vyskytují v oceli vměstky Ib. typu. S dalším zvýšením obsahem ceru se mění morfologie vměstků z Ib na IV. typ. Struktura potom obsahuje oba typy těchto vměstků. Vměstky IV. typu tvoří ve struktuře shluky.

Se zvyšujícím obsahem ceru se mez kluzu výrazně nemění, plastické vlastnosti a nárazová práce se naopak velice mění, snižují se. Mechanické hodnoty by se mohly zvýšit tepelným zpracováním.

Doporučený obsah ceru by se nejspíš měl pohybovat v rozmezí 0,015 – 0,20%. Pro přesnější stanovení koncentrace Ce lze doporučit metalografické hodnocení doplnit analýzou zkoumaných vzorků na elektronovém mikroskopu.

8.2 Kombinovaná dezoxidace Al + Zr

Polovina zkušební kostky byla rozřezána dle plánu na jednotlivé vzorky viz. obr. 8.2. Opět jsme porovnávali chemické složení dané normou (tab. 8.2) a námi analyzovaný vzorek (tab. 8.6). Hodnoty obsahy prvků se pohybují v daném rozmezí.

Tab. 8.6 Chemické složení v hm. %

Číslo vzorku	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
4.1	0,11	1,18	0,46	0,006	0,006	0,25	0,89	0,15	0,21
4.5	0,11	0,19	0,47	0,006	0,006	0,25	0,91	0,15	0,21
4.10	0,10	1,19	0,47	0,006	0,007	0,25	0,92	0,15	0,22

Číslo vzorku	V	Al	Ca	As	Sn	Sb	Ti	Zr
4.1	0,02	0,021	0,0005	0,005	0,009	<0,0030	0,005	0,014
4.5	0,02	0,020	<0,0005	0,006	0,009	<0,0030	0,005	0,015
4.10	0,02	0,021	0,0005	0,006	0,008	<0,0030	0,005	0,019

Vysoké obsahy O₂ a N₂ jsou opět způsobeny segregací do podnálítkové oblasti. Obsahy plynů jsou v tab. 8.7. Obsah H₂ není věrohodný, poněvadž analýza obsahu plynů byla provedena po delší době, tím pádem H₂ stačil oddifundovat.

Tab. 8.7 Obsahy plynu v jednotlivých vzorcích ppm

Číslo vzorku	O ₂	N ₂	H ₂
4.1	59	92	1,4
4.5	41	100	4,5 6,4 5,6
4.10	87	98	1,7



Porovnáním mechanických hodnot dané normou (*tab. 8.2*) a hodnot naměřených (*tab. 8.8*) vyplývá, že námi naměřené hodnoty jsou menší. Nižší hodnoty mechanických zkoušek jsou způsobeny tím, že vzorky jsou v tepelně nezpracovaném stavu.

Tab. 8.8 Mechanické hodnoty vzorků 4.1, 4.5, 4.10

Číslo vzorku	Mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Pevnost R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Kontrakce Z [%]	Nárazová práce KV [J]	
4.1	297	487	22,0	25,4	10	34
4.5	310	487	13,2	16,8	9	10
4.10	309	448	6,2	4,7	12	11

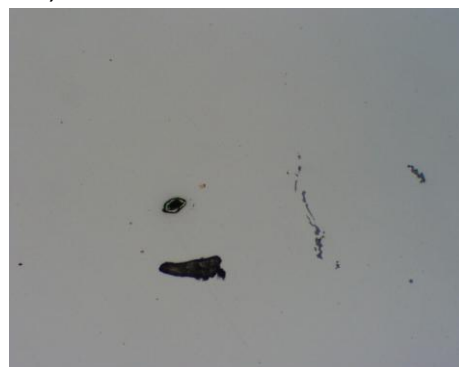
8.2.1 Vzorek číslo 4.1

8.2.1.1 Metalografické vyhodnocení

Analyzovaný vzorek je bez trhlin a prasklin. Ve vzorku se vyskytuje menší množství rozměrnějších vměstků (shluky) *obr. 8.21* a *obr. 8.22*. Dále jsou zastoupeny vměstky IV. typu (*obr. 8.21*) a II. Typu (*obr. 8.22*).



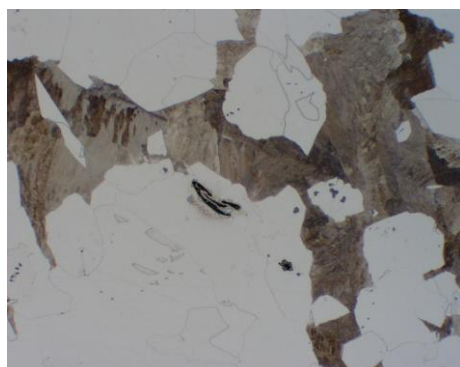
Obr. 8.21 - vzorek 4.1 neleptáno 100x



Obr. 8.22 - vzorek 4.1 neleptáno 100x

8.2.1.2 Strukturní vyhodnocení

Struktura vzorku je hrubozrnná, perliticko–feritická viz. *obr. 8.23*. Ve struktuře se nacházejí různé útvary, nejspíš se jedná o vměstky na bázi zirkonia (*obr. 8.24*).



Obr. 8.23 - vzorek 4.1 leptáno 100x



Obr. 8.24 - vzorek 4.1 leptáno 500x

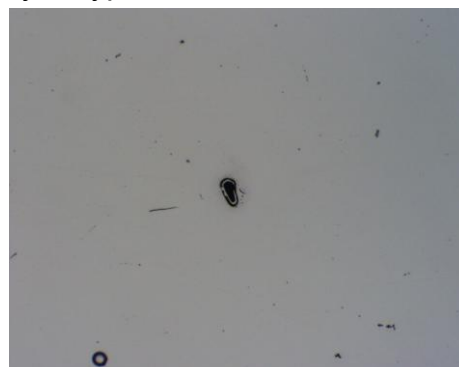
8.2.2 Vzorek číslo 4.5

8.2.2.1 Metalografické vyhodnocení

Na neleptaném vzorku lze pozorovat množství trhlin, trhliny tvoří shluky trhlin (*obr. 8.25 a obr. 8.26*). V analyzovaném vzorku se nacházejí vměšky IV. typu, což je zobrazeno na *obr. 8.27* dále jsou zde i vměšky II. typu viz. *obr. 8.28*.



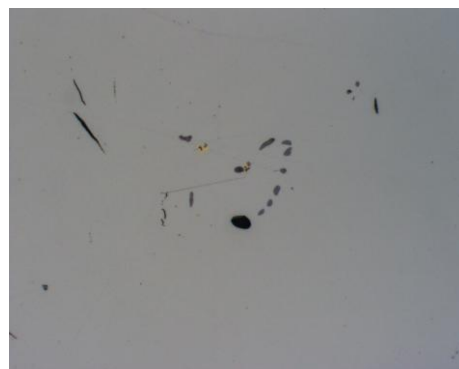
Obr. 8.25 - vzorek 4.5 neleptáno 100x



Obr. 8.26 - vzorek 4.5 neleptáno 100x



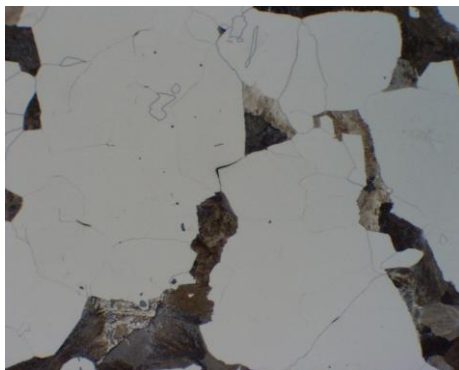
Obr. 8.27 - vzorek 4.5 neleptáno 200x



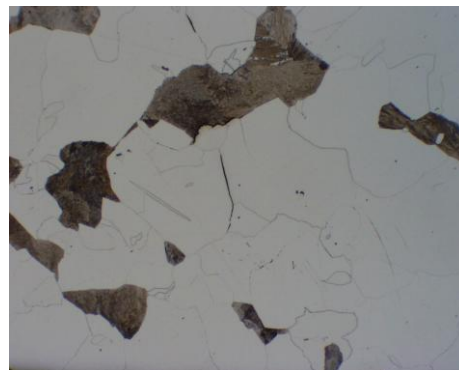
Obr. 8.28 - vzorek 4.5 neleptáno 200x

8.2.2.2 Strukturní vyhodnocení

Po naleptání vzorku je vidět, že se jedná o feriticko - perlitickou strukturu, s větším podílem feritu. Zrna jsou poměrně velká, opět je to z důvodu litého vzorku. Jak je vidět na *obr. 8.29 a obr. 8.30* trhlínky jdou po hranicích zrn.



Obr. 8.29 - vzorek 4.5 leptáno 100x



Obr. 8.30 - vzorek 4.5 leptáno 100x



8.2.3 Vzorek číslo 4.10

8.2.3.1 Metalografické vyhodnocení

Analýza neleptaného vzorku ukazuje, že vzorek neobsahuje jako v ostatních případech trhliny. Vměstky jsou rovnoměrně rozložené v matici. Vzorek obsahuje malé množství velkých vměstků viz. *obr. 8.31* a *obr. 8.32*. Vzorek obsahuje vměstky III. typu a IV. typu. (*obr. 8.31* a *obr. 8.34*).



Obr. 8.31 - vzorek 4.10 neleptáno 100x



Obr. 8.32 - vzorek 4.10 neleptáno 100x



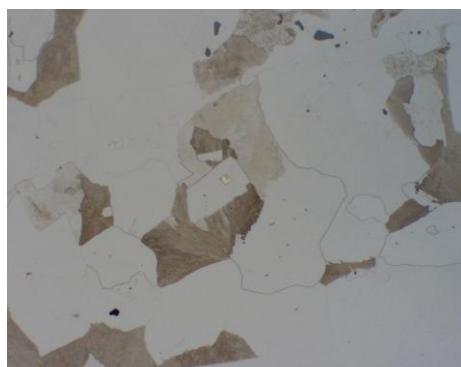
Obr. 8.33 - vzorek 4.10 neleptáno 100x



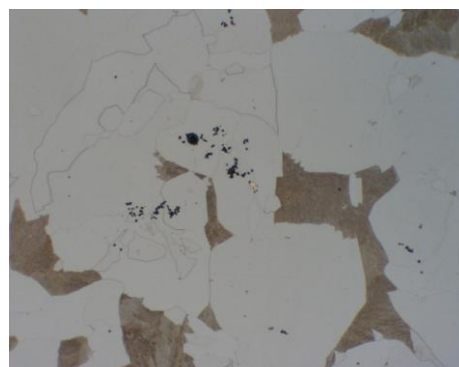
Obr. 8.34 - vzorek 4.10 neleptáno 200x

8.2.3.2 Strukturní vyhodnocení

Struktura vzorku je hrubozrnná, feriticko – politická s větším zastoupením feritu. Analýzou bylo zjištěno, že vzorek obsahuje i vměstky na bázi Zr (*obr. 8.35*), což je prvek, který byl použit k dezoxidaci. *obr. 8.36* zobrazuje rozložení vměstků IV. typu.



Obr. 8.35 - vzorek 4.10 leptáno 100x



Obr. 8.36 - vzorek 4.10 leptáno 100x



8.2.4 Vyhodnocení vzorků oceli dezoxidované zirkoniem

Se zvyšujícím obsahem zirkonia se mění morfologie vměstků, i při malých obsazích se ve struktuře nacházejí vměstky III. a IV. typu. Se zvětšujícím množstvím zirkonia se množství vměstků IV. typu zvětšuje. IV. typ vměstků má za následek snížení plastických vlastností sledovaného materiálu.

Jak vyplývá z kapitoly 6, kde se obsah zirkonia ve vzorcích z podnálitkové oblasti pohyboval kolem 0,04%, je nutné tento obsah snížit. Vady byly důsledkem vyloučení vměstků na bázi zirkonia, tyto vměstky byly iniciátory již zmíněných vad. U tří výše zkoumaných vzorků, však nebyly nalezeny vměstky deskovitěho tvaru jakou u vzorků odebraných z typových odlitků. Pro přesnou klasifikaci vměstků a stanovení rozdílu mezi experimentálními vzorky a vzorky z odebraných z reálných odlitků lze doporučit pozorování na elektronovém mikroskopu.

Doporučený obsah zirkonia by se měl pohybovat na hranici 0,014 hm. % pro dosažení optimálních mechanických hodnot již v litém stavu.



9 Hodnocení vzorků dezoxidované kombinovanou dezoxidací Al + Mg

Cílem experimentu bylo stanovit, jakou morfologii vměstků, a s ní související mechanické vlastnosti (zejména tažnost a nárazovou práci), lze očekávat při kombinované dezoxidaci Al a Mg. Z tavby byly odlity zkušební klíny (Y2), ze kterých budou následně zhotoveny zkušební tělesa pro tahovou zkoušku a zkoušku vrubové houževnatosti. Hodnocení těchto materiálových charakteristik již není součástí této práce.

Zkušební odlitky (Y2) byly odlity z nelegované oceli daného chemického složení viz. *tab. 9.1* a *tab. 9.2*. Tavba byla provedena na elektrické indukční peci (EIP) s kyselou výduskou. Hmotnost tavby byla 40kg. Dezoxidace oceli byla provedena kombinovanou dezoxidací Al a Mg. Mg byl přidáván ve formě předslitiny NiMg. Tavby byly provedeny ze stejné oceli, měnil se pouze obsah dezoxidovačla v oceli (Mg), což je patrné z *tab. 9.1* a *tab. 9.2*.

9.1 Vzorek číslo 1

Tab. 9.1 Chemické složení tavby č.1 v hm.%

Tavba	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Mg
č.1	0,27	0,82	0,28	0,018	0,013	0,09	0,95	0,20	0,15	0,050	0,021

9.1.1 Metalografické vyhodnocení vzorku

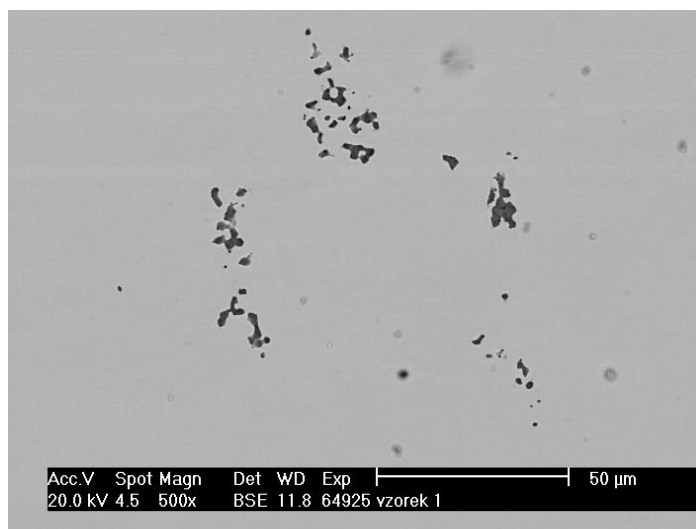
Na neleptaném vzorku je možno vidět jednak menší množství rovnoměrně rozložených vměstků typu Ib. Většina vměstků tvoří shluky, tzn. jedná se o vměstky IV. typu viz *obr. 9.1*. až *obr. 9.3* Zkoumaný vzorek tak odpovídá nemodifikované oceli Mg.



Obr. 9.1 vzorek č.1 neleptán 200x



Obr. 9.2 vzorek č. 1 neleptán 200x



Obr. 9.3 Morfologie vměstků vzorku č.1

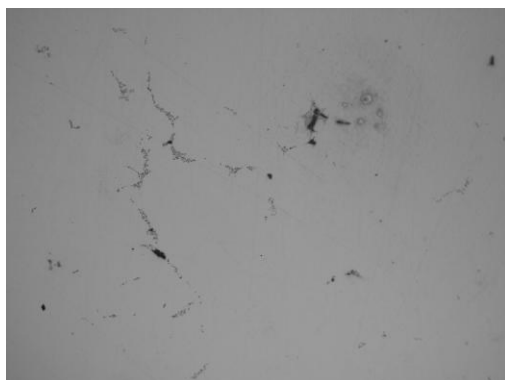
9.2 Vzorek číslo 2

Tab. 9.2 Chemické složení tavby č.2 v hm. %

Tavba	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Mg
č.2	0,26	0,73	0,28	0,017	0,013	0,09	0,97	0,21	0,15	0,040	0,018

9.2.1 Metalografické vyhodnocení

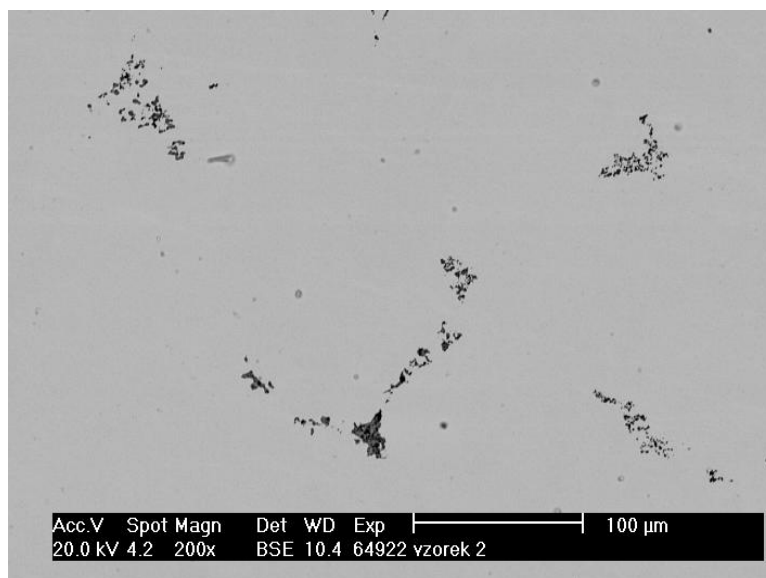
Na vzorku v neleptaném stavu je možno opět vidět zejména vměstky IV. typu obr. 9.4 a obr. 9.5, které tvoří shluky těchto vměstků, vměstky jsou rozmístěny po hranicích zrn, což je nejlépe vidět na obr. 9.6. Jedná se opět o přemodifikovanou ocel Mg.



Obr. 9.4 vzorek 2 neleptán 100x



Obr. 9.5 vzorek 2 neleptán 100x



Obr. 9.6 Morfologie vměstků vzorku č.2

9.3 Shrnutí kombinované dezoxidace Al + Mg

Tavba č. 1 a tavba č. 2 mají podobné složení i morfologii vměstků (IV. typ). Na elektronovém mikroskopu byly pozorovány pouze dva typy komplexních vměstků. U prvního typu byly analyzovány sulfidy zejména Mg a MnS. Druhý typ byl komplexní oxid s dominantním obsahem Mg a Al. Oba typy vměstků se vyskytovaly současně.

Vměstky typu Ib se shlukují a mění svoji morfologii na nežádoucí IV. typ. S přibývajícím množstvím hořčíku se množství vměstků Ib snižuje a naopak vměstky IV. typu přibývají. Množství vměstků IV. typu má nežádoucí vliv zejména na mechanické hodnoty.

Pro dosažení vhodnější morfologie vměstků (Ib) je nutné zajistit nižší koncentraci Mg, než v případě námi zkoumaných vzorků (0,018 a 0,021%). Pro stanovení přesné koncentrace Mg lze doporučit provedení dalších experimentů. Výskyt přemodifikované oceli - vměstků IV. typu naznačuje, že použití Mg jako komplexního dezoxidovadla v kombinaci s Al je možné.

V provozní praxi však může být překážkou reaktivnost hořčíku související s jeho intenzivním odpařováním za teplot ocelářských pochodů a patrně i obtížná reprodukovatelnost, tj. dosažení a dodržování úzkého rozmezí koncentrací Mg.



10 Závěr

Práce byla zaměřena na analýzu vzniku slévárenských a metalurgických vad pro typové masivní ocelové odlitky vyráběné v podmínkách slévárny ŽĎAS a.s. Práce je dílčí součástí projektu TIP č. FR-TI1/070 – výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků.

Simulací tuhnutí a chladnutí typových odlitků vyplynulo, že slévárenská technologie je správně navržena. Tuhnutí odlitků probíhá usměrněně do nálitků. V případě odlitku typu „pánev“ jsou rezervy v redukci velikosti nálitku, což je možné pouze za současného zvyšování intenzity chlazení. Z výsledků analýz, které byly provedeny na vzorcích odebraných z typových odlitků, vyplývá, že nejčastější příčinou vzniku trhlin v podnálitkových oblastech po odstranění nálitků je výskyt vměstků na bázi zirkonia. Tyto vměstky mají nevhodnou morfologii a také rozložení v matici. Pro potlačení vzniku vad v důsledku nevhodné morfologie produktů dezoxidace zirkonia bylo zvoleno použití dezoxidace jinými prvky. Kombinovaná dezoxidace zirkonia a hliníku byla brána jako standart. Vzorky ze zkušební tavby, u které byla provedena kombinovaná dezoxidace Zr a Al neobsahovaly vměstky deskovitého tvaru jako u vzorků odebraných z typových odlitků, z tohoto důvodu lze doporučit detailní analýzu těchto vzorků na elektronovém mikroskopu. Z časových důvodů nebyla tato část v práci řešena. Doporučený obsah zirkonia by se měl pohybovat na hranic 0,014% pro dosažení optimálních mechanických vlastností.

Po kombinované dezoxidaci oceli hliníkem a cérem (cca 0,015%) se vyskytují v oceli vměstky typu Ib, což je pro nás výhodné. Se zvýšeným obsahem céru se mění morfologie vměstků z Ib. na vměstky IV. typu. Zároveň se výrazně snižují plastické vlastnosti oceli. Doporučený obsah céru, pro dosažení optimálních vlastností materiálu, by se měl pohybovat v rozmezí 0,015 – 0,020%.

U vzorků určených k tepelnému zpracování nebyly dosud provedeny analýzy, tudíž výsledky nejsou součástí této práce.

V oceli, u které byla provedena kombinovaná dezoxidace hliníkem a hořčíkem, se vyskytují vměstky typu Ib a IV. typu. Vměstky typu Ib se shlukují a mění svoji morfologii na IV. typ. S přibývajícím množstvím hořčíku se množství vměstků Ib snižuje a naopak vměstky IV. typu přibývají. Množství vměstků IV. typu má nežádoucí vliv zejména na mechanické hodnoty. Pro dosažení vhodnější morfologie vměstků je nutné zajistit nižší koncentraci Mg, než v případě námi zkoumaných vzorků (0,018 a 0,021%). Pro stanovení přesné koncentrace Mg lze doporučit provedení dalších experimentů.



11 Seznam použité literatury

- [1] ELBEL, T., aj. Vady odlitku ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s
- [2] ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [3] *Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací* [online]. 2009 [cit. 2010-05-14]. Projekt FR-TI1/070 - Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků (2009-2012, MPO/FR). Dostupné z WWW: <<http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=FR-TI1%2F070>>.
- [4] *Železiarne Podbrezová a.s. - home page* [online]. 2009 [cit. 2010-04-17]. Ročné správy. Dostupné z WWW: <[http://www.zelpo.sk/zelpo/homezp.nsf/4A65084CE819A7F6C12575E100239133/\\$File/RocnaSprava2008.pdf](http://www.zelpo.sk/zelpo/homezp.nsf/4A65084CE819A7F6C12575E100239133/$File/RocnaSprava2008.pdf)>.
- [5] *ŽĎAS a.s.* [online]. 2007 [cit. 2010-03-17]. Metalurgie. Dostupné z WWW: <<http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?catid=93>>.
- [6] MARTÍNEK, Ludvík ; FILA, Pavel; BALCAR, Martin. Současný stav a perspektivy rozvoje výroby elektrooceli ve ŽĎAS, a.s.. *Hutnické listy*. 2001, LV, 10, s. 9-12.
- [7] MARTÍNEK, Ludvík; SOCHOR, Stanislav; FILA, Pavel . Modernizace ocelárny ŽĎAS, a.s.. *Slévárenství*. 1996, 6, s. 388-392.
- [8] BALCAR, Martin; MARTÍNEK, Ludvík; FILA, Pavel. Charakteristika současných základních metalurgických postupů s využitím prvků sekundární metalurgie v elektroocelárně divize Metalurgie ŽĎAS, a.s.. *Hutnické listy*. 2001, LV, 10, s. 13-17.
- [9] BALCAR, Martin, et al. Technologické procesy při výrobě oceli : Pánvová metalurgie. In BALCAR, Martin, et al. *XIX. celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem*. Žďár nad Sázavou : Česká slévárenská společnost, 2009. s. 46-60. ISBN 978-80-02-02179-7.
- [10] MARTÍNEK, Ludvík, et al. Sekundární metalurgie ve slévárnách. *Slévárenství*. 2006, 6, s. 218-221.



- [11] SMS MEVAC UK - *Leading in secondary metallurgy* [online]. 2009 [cit. 2010-05-19]. Ladle Furnace. Dostupné z WWW: <<http://www.sms-mevac.co.uk/references/ladle-furnace.htm>>.
- [12] SMS MEVAC UK - *Leading in secondary metallurgy* [online]. 2009 [cit. 2010-05-19]. Ladle Degasser with Oxygen Blowing. Dostupné z WWW: <<http://www.sms-mevac.co.uk/references/ladle-degasser.htm>>.
- [13] SMS MEVAC UK - *Leading in secondary metallurgy* [online]. 2009 [cit. 2010-05-19]. Vacuum Oxygen Decarburisation (VOD). Dostupné z WWW: <<http://www.sms-mevac.co.uk/references/vacuum-oxygen-decarburisation.htm>>.
- [14] CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Vyd. první. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 256 s. ISBN 80-7204-455-9.
- [15] *Portál pro tiskové zprávy : Aktuální zpravodajství - tiskové zprávy z oblasti ekonomiky, politiky, státní sféry, kultury* [online]. 3.8.2009 [cit. 2010-04-15]. Strojírny Podzimek, s.r.o. z Třeště dodávají technologii do slévárny Žďas, a.s. Dostupné z WWW: <<http://www.pressweb.cz/tiskova-zprava/12515-strojirny-podzimek-sro-z-treste-dodavaji-technologie-do-slevarny-zdas>>.
- [16] CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. (přednáška) Brno :VUT FSI, 7.12.2009.
- [17] HINDRICH, Milan. Zařízení pro separaci chromitu ve slévárně oceli ŽĐAS, a.s., Žďár nad Sázavou. *Slévárenství*. 2002, číslo 1, s. 39-42.
- [18] STRÁNSKÝ, Karel ; RUSÍN, Karel; KOPLÍK, Radovan. Vady odlitků : Vady odlitků - jejich klasifikace, příčiny a prevence. *Slévárenství*. 1997, 4, s. 133-135.
- [19] LEVÍČEK, Petr; STRÁNSKÝ, Karel . *Metalurgické vady ocelových odlitků : příčiny a odstraňování*. Praha : STNL - Nakladatelství technické literatury, 1984. Vady ocelových odlitků zaviněné metalurgií, s. 272.
- [20] ELBEL, Tomáš. Vady odlitků : Identifikace vad odlitků a příčin jejich vzniku. *Slévárenství*. 2001, 9, s. 539-543.
- [21] SAIP, Jiří; KAŇÁK, Jan. Stvolové vycezeniny u těžkých ocelových odlitků. *Slévárenství*. 1984, 10, s. 414-419.



- [22] KAŇÁK, Jan; SAIP, Jiří. Způsoby snižování vlivu stvolových vycezenin na jakost ocelových odlitků. *Slévárenství*. 1984, 10, s. 420-424.
- [23] LEVÍČEK, Petr; STRÁNSKÝ, Karel . *Metalurgické vady ocelových odlitků : příčiny a odstraňování*. Praha : STNL - Nakladatelství technické literatury, 1984. Dezoxidace oceli v pánvi a její vliv na jakost oceli a vyráběných odlitků, s. 272.
- [24] BŮŽEK, Z.; KOSŇOVSKÝ, Z. : Lasturový lom těžkých odlitků. *Sborník přednášek – Mezinárodní vědecká konference VŠB- Technická univerzita Ostrava*, 1995, str. 109-113.
- [25] PLUCHÁČEK, J.; KUBOŇ, M. : Možnosti potlačení působení nitridů AlN v masivních ocelových odlitcích pomocí tepelného zpracování. *Perspektivy slévárenství*, číslo K 444, rok 1997, str. 183-186.
- [26] HAVLÍČEK, František. Vady odlitků : Trhliny a praskliny v odlitcích. *Slévárenství*. 1998, 1, s. 37-46.
- [27] HAVLÍČEK, František. Vliv konstrukce odlitků na vznik trhlin a prasklin. *Slévárenství*. 2007, 2-3, s. 109-116.
- [28] HAVLÍČEK, František; KOZELSKÝ, Petr; SZROMEK, Pavel. *METAL 2001* [online]. 2001 [cit. 2010-03-16]. PODMÍNKY VZNIKU PORUCH SOUVISLOSTI MATERIÁLŮ U ODLITKŮ A INGOTŮ. Dostupné z WWW: <<http://konference.tanger.cz/data/metal2001/sbornik/papers/48.pdf>>.
- [29] HAVLÍČEK, František. Vady odlitků : Vnitřní trhliny a praskliny. *Slévárenství*. 1998, 3-4, s. 109-116.
- [30] MICHNA, Štefan. Štefan Michna - studijní materiály - Katedra technologií a materiálového inženýrství Univerzity J.E.Purkyně;Ústí nad Labem [online]. 2008 [cit. 2010-02-17]. Počítačové simulační programy . Dostupné z WWW: <http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie/pocitacove_simulacni_programy.pdf>.
- [31] KRUTIŠ, Vladimír; KUZMA, Zbyněk. Numerická simulace ve slévárenské technologii . *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, 10, [cit. 2010-02-13]. Dostupný z WWW : <<http://www.mmspektrum.com/clanek/numericka-simulace-ve-slevarenske-technologie>>.



- [32] ŠENBERGER, J., aj. Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků. *Hutnické listy*. Květen 2009, roč. LXII, č. 5, s. 81-86. ISSN 0018- 8069.
- [33] KOLDA, Vlastimil. *Numerická simulace lití, tuhnutí a predikce vzniku staženin v odlitku : tlakový válec*. Brno : MECAS ESI s.r.o., 11.11.2009. 15 s.
- [34] ŠENBERGER, J. aj. Analýzy vzorků s vadami odebraných z podnálitkových partií odlitků. *Dílčí zpráva projektu TIP č. FR-TI/070 - Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků*, VUT Brno, 2010.
- [35] KOLDA, Vlastimil. *Numerická simulace lití, tuhnutí a predikce vzniku staženin v odlitku : ložisko*. Brno : MECAS ESI s.r.o., 11.11.2009. 14 s.
- [36] KOLDA, Vlastimil. *Numerická simulace lití, tuhnutí a predikce vzniku staženin v odlitku : stojan*. Brno : MECAS ESI s.r.o., 11.11.2009. 15 s.
- [37] KOLDA, Vlastimil. *Numerická simulace lití, tuhnutí a predikce vzniku staženin v odlitku : traverza*. Brno : MECAS ESI s.r.o., 11.11.2009. 14 s.
- [38] KOLDA, Vlastimil. *Numerická simulace lití, tuhnutí a predikce vzniku staženin v odlitku : pánev*. Brno : MECAS ESI s.r.o., 11.11.2009. 15 s.
- [39] ČECH, Jan; ZÁDĚRA, Antonín; ŠENBERGER, Jaroslav; DOLEŽAL, Petr; SOCHOR, Jiří. Vady masivních ocelových odlitků. *Slévárenství*. 2010, 5-6, (v tisku).



12 Seznam použitých zkratek a symbolů

<i>Zkratka / symbol</i>	<i>Popis</i>	<i>Jednotka</i>
A ₅	Tažnost	%
AFS	American Foundry Society	
CIATF	International Committée of Foundry Technical Association	
ČSN	Československá norma	
EIP	Elektrická indukční pec	
EOP	Elektrická oblouková pec	
FEM	Finite Elements Method (metoda konečných prvků)	
KV	Nárazová práce	J
LF	Ladle Furnace (pánvová pec)	
R	Směrodatná tloušťka stěny odlitku	m, mm
R _m	Pevnost v tahu	MPa
R _{p0.2}	Smluvní mez kluzu	MPa
RTG	Rentgen	
SQC	Statistical Quality Control	
ST směs	Samotvrdnoucí směs	
VD	Vacuum Degassing (vakuové odplynění)	
VOD	Vacuum Oxygen Decarburisation (oxidační vakuové oduhličení)	
Z	Kontrakce	%