

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV ODPLYNĚNÍ NA KVALITU ODLITKŮ
VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ VYSOKOTLAKÉHO LITÍ
INFLUENCE OF DEGASING ON CASTING QUALITY BY HIGH PRESSURE CASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB MÍŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jakub Míšek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

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:

Vliv odplynění na kvalitu odlitků vyrobených technologií vysokotlakého lití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hodnocení kvality odlitků z hliníkových slitin odlévaných z taveniny s různým stupněm naplynění. Analýza výskytu vad.

Cíle diplomové práce:

Hodnocení vlivu stupně naplynění taveniny vybraných hliníkových slitin na výskyt vměstků, mikrostaženin a plynové pórovitosti. Stanovení optimálních podmínek rafinace.

Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-21-2790-6.

VALECKÝ, J. Lití kovu pod tlakem. SNTL Praha, 1963.

ANDREONI, L., M. CASE, G. POMESANO. The prepressure die casting process. Brescia, EDIMET, 1996. ISBN 88-86259-13-1.

Aluminium Permanent Mold Handbook. AFS Des Plaines, 2001. ISBN 0-87433-250-8.

Inclusions in Aluminium Casting Alloys, Compiled literature, AFS, Schaumburg. ISBN 0-87433-286-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce zkoumá vliv délky procesu odplynování na stupeň naplynění taveniny a na kvalitu odlitků litých technologií vysokotlakého lití. Je analyzován druh vad vyskytujících se v odlitku na základě pozorování makrostruktury i mikrostruktury. Pro celkové zhodnocení je použito statistické pozorování trendu vývoje zmetkovitosti v průběhu experimentu. Výsledky ukazují, že zkrácení doby odplynování může mít vliv na výskyt vady porezita.

Klíčová slova

Porezita, vysokotlaké lití, netěsnost, odplynování, slitiny hliníku.

ABSTRACT

This thesis examines the influence of the degassing process on hydrogen content and on the quality of part casted by high pressure casting technologies. The type of defects occurring in the casting is analyzed based on macrostructure and microstructure observations. For the overall assessment is used the statistical observation of the evolution trend of scrapping during the experiment. The results show that shortening of the degassing time may affect the incidence of porosity defect.

Key words

Porosity, high pressure die casting, leakage, degassing, aluminium alloys.

BIBLIOGRFICKÁ CITACE

MÍŠEK, J. *Vliv odplynění na kvalitu odlitků vyrobených technologií vysokotlakého lití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv odplynění na kvalitu odlitků vyrobených technologií vysokotlakého lití vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jakub Míšek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za cenné rady při zpracování diplomové práce. Dále velmi děkuji technologickému oddělení firmy Kovolit, a.s. za možnost realizace experimentu. Poděkování patří také přítelkyni, rodině a kolegům za podporu.

OBSAH

1	ROZPOUŠTĚNÍ VODÍKU VE SLITINÁCH HLINÍKU	10
1.1	Zdroj vodíku	10
1.2	Rozpustnost vodíku	10
2	NUKLEACE BUBLIN	13
3	ODPLYŇOVÁNÍ	16
3.1	Princip.....	16
3.2	Odplyňovací zařízení	17
3.3	Používané plyny	18
4	TAVENÍ SLITINY.....	19
4.1	Dávkovací pece	19
4.2	Použité slitiny.....	19
5	VADY	20
5.1	Porezita	20
5.2	Netěsnost.....	20
5.3	Vměstky.....	20
6	PODMÍNKY EXPERIMENTU.....	21
6.1	Popis průběhu experimentu	21
6.2	Sledované odlitky.....	21
6.2.1	Místa odběru vzorků	21
6.3	Rafinace	23
6.4	Specifikace povolené porezity	23
6.5	Specifikace povolené netěsnosti.....	23
7	VLIV ZAŘÍZENÍ MTS NA ODPLYŇOVÁNÍ	24
8	REŽIMY ODPLYŇOVÁNÍ.....	27
8.1	Fáze procesu odplyňování.....	27
8.2	Stanovení režimu odplyňování.....	28
9	VLIV REŽIMU ODPLYŇOVÁNÍ NA NAPLYNĚNÍ TAVENINY	30
9.1	Princip měření naplynění	30
9.2	Odběr vzorků	31
9.3	Vyhodnocení vlivu režimu odplyňování.....	32
10	VLIV ZMĚNY REŽIMU ODPLYŇOVÁNÍ NA KVALITU POZOROVANÝCH ODLITKŮ	35
10.1	Vyhodnocení rentgenové zkoušky	35
10.2	Vyhodnocení makrostruktury	37
10.2.1	Výskyt vzduchové porezity v odlitku B.....	39

10.3	Vyhodnocení mikrostruktury	41
10.4	Statistické výsledky.....	47
10.4.1	Porozita	47
10.4.2	Netěsnost	48
11	OVĚŘENÍ EXPERIMENTU.....	50
11.1	Podmínky pro ověření experimentu	50
11.2	Vliv režimu odplynování na naplynění taveniny v udržovací peci	50
11.3	Statistické výsledky.....	52
12	ZÁVĚR	53

ÚVOD

Problematika odplyňování hliníku je známa již dlouhé roky. Ve slévárnách na gravitační odlévání hliníku se jedná o běžný postup, kterým předcházíme vzniku vodíkové porezity. Tato technologie odplyňování je ale stejně frekventovaně využívána i ve slévárnách vysokotlakého lití.

Je známo, že rychlost tuhnutí, která je u vysokotlakých odlitku značně vyšší než u jiných technologií, má vliv na vylučování vodíku a vznik bublin. Nastává tedy otázka, jak hluboce je nutné hliník odplyňovat pro lití odlitku za vysokého tlaku do kovových forem.

Cílem této práce je proto ověřit hypotézu, která říká, že vyšší míra naplynění taveniny má nezanedbatelný vliv na výskyt vad odlitku, především na vadu porezita, netěsnost a možný výskyt vměstků. Toto naplynění taveniny bude prováděno zkracováním procesu odplyňování.

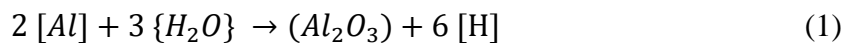
Experimenty byly prováděny ve firmě Kovolit, a.s.

1 ROZPOUŠTĚNÍ VODÍKU VE SLITINÁCH HLINÍKU

Tekutý kov vystavený vzdušné atmosféře v sobě rozpouští určité množství plynu. V případě slitin hliníku dochází k silnému rozpouštění vodíku, který se jako jediný plyn dokáže v hliníku rozpustit. Při výrobě odlitku je snahou pracovat s taveninou, ve které je rozpuštěno co nejméně vodíku. Předcházíme tak možnému vzniku bublin. Pro zajištění nízkého stupně naplynění (nízký obsah rozpuštěného vodíku) je nutné znát mechanismy, kterými se vodík do taveniny dostává.

1.1 Zdroj vodíku

Vodík se do taveniny může dostávat několika způsoby. První a nejvýznamnější způsob je disociací vodní páry obsažené v atmosféře. Při tavení slitiny a jejím transportu je tavenina vystavena působení atmosféry a dochází tedy k vzájemné reakci, kterou lze popsat podle rovnice [1,2]:

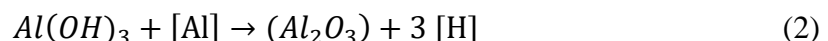


Vlivem silné afinity kyslíku ke hliníku dojde k disociaci vodní páry (H_2O) na kyslík a vodík. Kyslík následně reaguje s hliníkem a tvoří stabilní oxid hliníku Al_2O_3 . Vodík, který již není vázaný na kyslík se začne rozpouštět v tavenině. [1]

Disociace vodní páry je nejvýznamnější způsob, jakým se vodík rozpouští v tavenině. Je proto vhodné dbát na to, aby během zpracování bylo v okolí taveniny co nejméně vlhkosti. To znamená:

- stěny tavícího agregátu musí být před tavbou vysušené,
- rafinační a krycí soli musí být vysušené,
- nářadí používané při zpracování musí být vysušené a opatřené nátěrem.

Dalším významným zdrojem vodíku může být vsázka, která není dostatečně vysušená. Voda na povrchu vsázkových surovin je vázaná v podobě hydroxidů, které se tvoří na zoxidovaném povrchu v podobě $Al(OH)_3$. Vodík se následně uvolňuje podle rovnice [1]:



Zároveň hrozí riziko kondenzace vodní páry na povrchu studených nepředehřátých housek. Tento jev je obvyklý v zimních měsících, kdy přivážíme studený vsázkový materiál ze skladu do prostoru tavírny. Takto "orosené" housky je potřeba důkladně vysušit před vsazením do pece. K tomuto účelu slouží šachtové pece, které housky vysouší přirozeně. [1,2]

1.2 Rozpustnost vodíku

Rozpustnost je definována jako maximální množství látky, které je schopno se rozpustit v kovu o daném chemickém složení při daných podmínkách (teplota a tlak). Obecně je rozpustnost dána vztahem [1,3]:

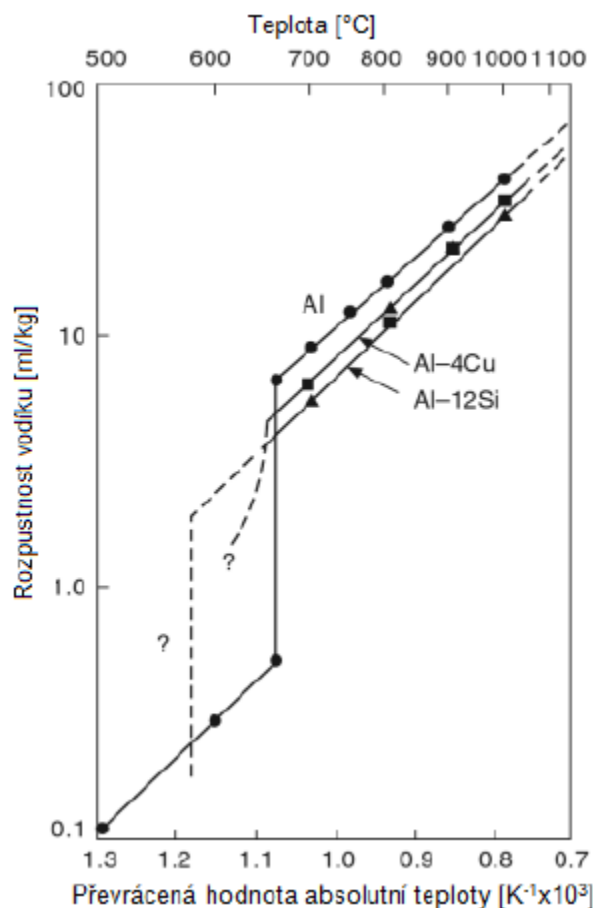
$$\log S = 12 \cdot \log p_{H_2} - A \cdot T + B \quad (3)$$

kde: S [cm³/100 g] rozpustnost vodíku v tavenině,
 p_{H_2} [kPa] parciální tlak vodíku v okolní atmosféře,
 T [K] teplota kovu,
 A, B [-] konstanty pro daný kov.

Rozpustnost vodíku závisí na:

1) Teplotě kovu

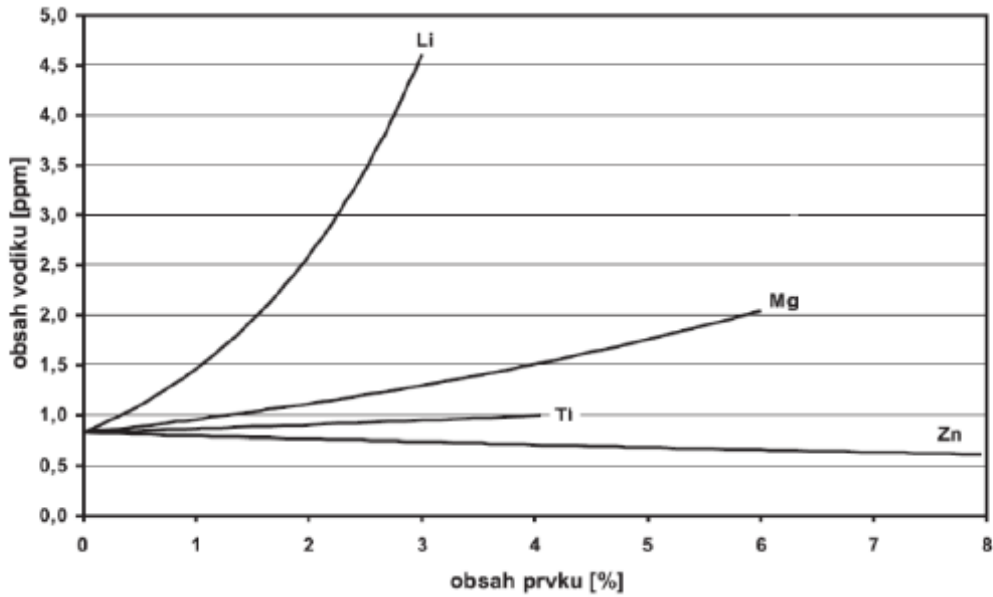
Na Obr. 1-1 lze pozorovat rozdíl rozpustnosti vodíku v tekutém a tuhém stavu taveniny. Vlivem tohoto rozdílu dochází při tuhnutí taveniny k vylučování přebytečného vodíku, který se již dále nedokáže v slitině rozpouštět. Nejčastěji se přebytečný vodík vyloučí ve formě bublin. V praxi dochází k heterogenní nukleaci bublin, která je popsána v kapitole 2



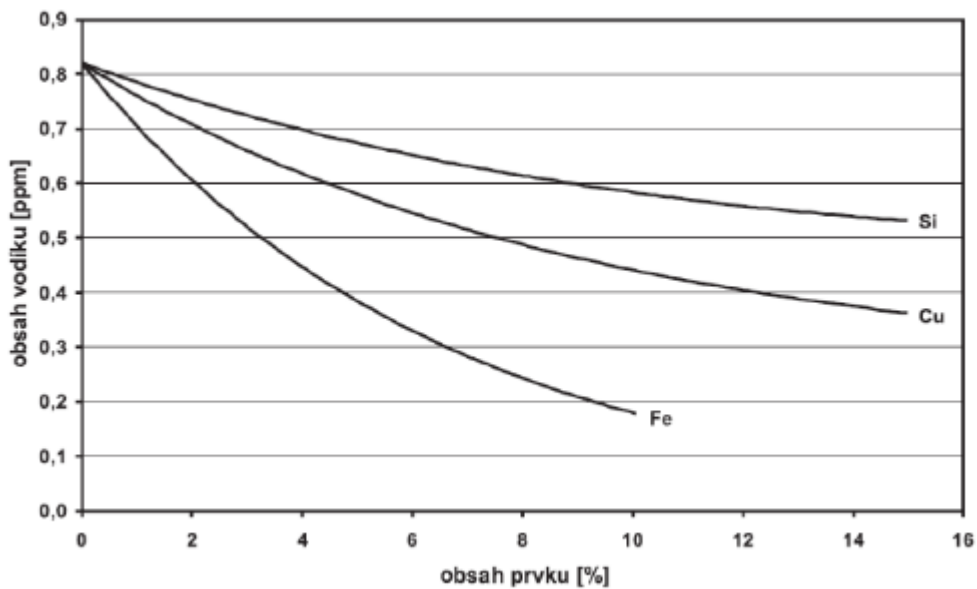
Obr. 1-1 Rozpustnost vodíku ve vybraných slitinách [4]

2) Chemickém složení

Rozpustnost vodíku se liší pro různé slitiny (různé chemické složení). Na Obr. 1-2 a Obr. 1-3 lze pozorovat vliv jednotlivých přísadových prvků na zvýšení nebo snížení maximální rozpustnosti vodíku [5].



Obr. 1-2 Vliv vybraných prvků na zvýšení rozpustnosti vodíku v Al slitině [4]



Obr. 1-3 Vliv vybraných prvků na snížení rozpustnosti vodíku v Al slitině [4]

3) Rychlosti ochlazování

Při nerovnovážných podmínkách tuhnutí (například rychlé ochlazování) se v tuhém stavu dokáže rozpustit větší množství vodíku, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti. Vyloučení vodíku je difuzní děj, který potřebuje čas. Vlivem rychlého ochlazování ale vodík nemá dostatek času na difuzi a zůstává tak rozpuštěn v tuhé slitině. Takovýto stav je označován jako přesycený tuhý roztok. [1]

Tohoto stavu lze běžně dosáhnout u odlitků litých metodou vysokotlakého lití.

2 NUKLEACE BUBLIN

Bubliny vodíku mohou vznikat pomocí homogenní nebo heterogenní nukleace. Proces vzniku vodíkových bublin se skládá z těchto kroků [6]:

- 1) Difuze atomů vodíku skrze tekutou fázi, obohacování taveniny před krystalizační frontou.
- 2) Růst parciálního tlaku vodíku vlivem zvyšujícího se obsahu vodíku.
- 3) Nukleace stabilní bubliny, jejíž velikost je větší, než kritická a dovoluje růst. Děje se tak v místech, kde parciální tlak vodíku dosáhl tlaku potřebného pro nukleaci.
- 4) Růst bubliny, dokud je v okolí dostatečné množství volného vodíku, který může difundovat.

Homogenní nukleace

Teorie homogenní nukleace vychází z principu růstu obsahu rozpuštěného vodíku v tekutém kovu. V případě, že množství rozpuštěného vodíku dosáhne nadkritického stavu a získá tak požadovaný parciální tlak, dojde k nukleaci bubliny. Množství vodíku, které tavenina dokáže rozpouštět, se mění s klesající teplotou taveniny. U principu homogenní nukleace bublina není v kontaktu s žádnou tuhou částicí. Jedná se o energeticky náročný proces, u kterého je zapotřebí překonat značné síly působící proti vzniku bubliny. [6]

Cambell s pomocí Fisherovy teorie počítá podmínky pro vznik bubliny následovně. Při tlaku v bublině p_e musíme provést práci P_e abychom zatlačili kov dostatečně daleko pro vznik bubliny do objemu V . [2]

Tvorba a rozpínání mezifázového rozhraní o ploše A mezi plynem a taveninou spotřebuje práci $\gamma \cdot A$, kde γ je energie mezifázového rozhraní na jednotku plochy. Práce nutná pro naplnění bubliny plynem je při tlaku p_i záporná a je rovná $p_i \cdot V$. Cambell uvádí tyto rovnice, popisující množství Gibbsovy energie potřebné pro vznik bubliny kulovitého tvaru:

$$\Delta G = \gamma A + P_e - P_i \quad (4)$$

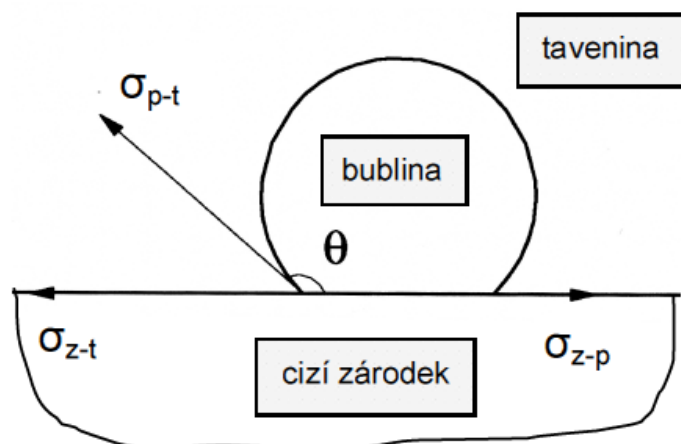
$$\Delta G = 4\gamma\pi r^2 + \frac{4}{3}\pi r^3(p_e - p_i) \quad (5)$$

Chen [3] dále spočítal, že pro vytvoření bubliny tímto principem je nutné dosáhnout saturačního tlaku (rozdíl mezi p_e a p_i) 500 až 1000 MPa. [2]

Je tedy přirozené, že bubliny budou za stejných podmínek (tlaků) nukleovat spíše heterogenním principem, jelikož velikost potřebné Gibbsovy energie bude menší.

Heterogenní nukleace

Při heterogenní nukleaci slouží tuhé částice jako krystalizační zárodek pro vznik bubliny. Při vzniku bubliny hraje významnou roli úhel smáčení mezi bublinou a tuhou částicí. Energie potřebná pro vznik bubliny je funkcí úhlu smáčení. [2]



Obr. 2-1 Tvorba bubliny na cizím zárodku [1]

Úhel smáčení je dán vzájemným poměrem mezi napětími podle rovnice 6 [1]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p}}{\sigma_{p-t}} \quad (6)$$

kde: σ_{z-t} [kg/s²] povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou,
 σ_{z-p} [kg/s²] povrchové napětí mezi zárodkem a plynem,
 σ_{p-t} [kg/s²] povrchové napětí mezi plynem a taveninou.

Je-li: $\theta = 0^\circ$ úplná smáčivost,
 $\theta < 65^\circ$ dobrá smáčivost,
 $\theta > 65^\circ$ špatná smáčivost,
 $\theta = 180^\circ$ úplná nesmáčivost. [4]

Jak moc snadnější je heterogenní nukleace oproti homogenní vyjádřil Fisher poměrem parciálních tlaků potřebných pro vznik bubliny. [2]

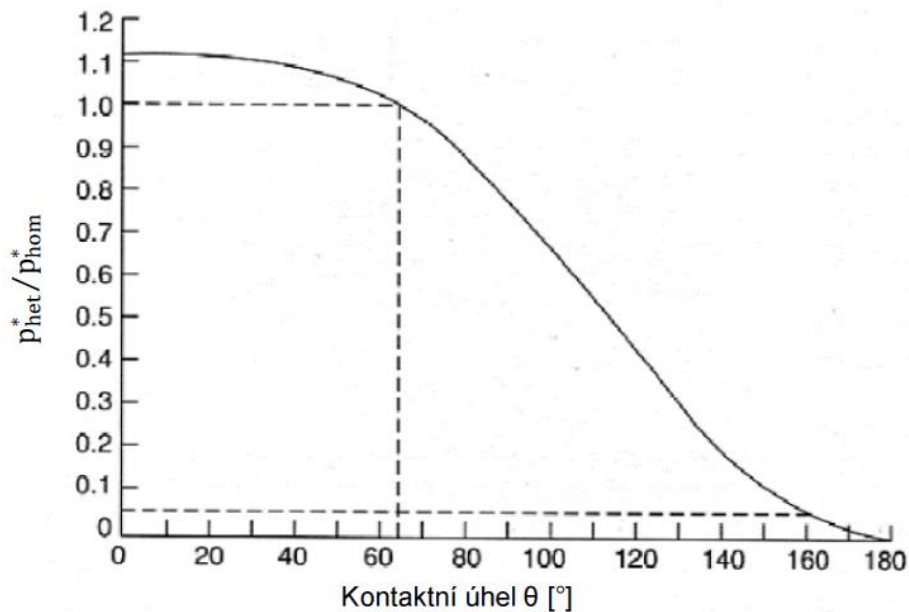
$$\frac{p_{het}}{p_{hom}} = 1,12 \left[\frac{(2 - \cos \theta) \cdot (1 + \cos \theta)^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

kde: p_{het} [MPa] parciální tlak vodíku nutný pro heterogenní nukleaci,
 p_{hom} [MPa] parciální tlak vodíku nutný pro homogenní nukleaci,
 θ [°] úhel smáčení mezi bublinou vodíku a tuhou částicí.

Jelikož v reálných provozních podmínkách se v tavenině vždy vyskytuje určité množství vměstků (převážně oxidů), probíhá nukleace bublin přednostně na nich, potažmo na stěnách nádoby, ve které se tavenina nachází.

V případě, že není dosaženo vysoké čistoty tekutého kovu, může nastat situace, že se při tuhnutí slitiny vyloučí větší množství vodíku, než by se vyloučilo při nižším obsahu vměstků. Na tento jev je nutné brát ohled při vyhodnocování naplynění taveniny pomocí měření Dichte Indexu.

Na Obr. 2-2 lze vidět, že úhel smáčivosti mezi pevnou fází a vznikající bublinou vodíku musí být menší než 65° , aby docházelo k heterogenní nukleaci. [2]



Obr. 2-2 Změna náročnosti nukleace bubliny se změnou úhlu smáčivosti [2]

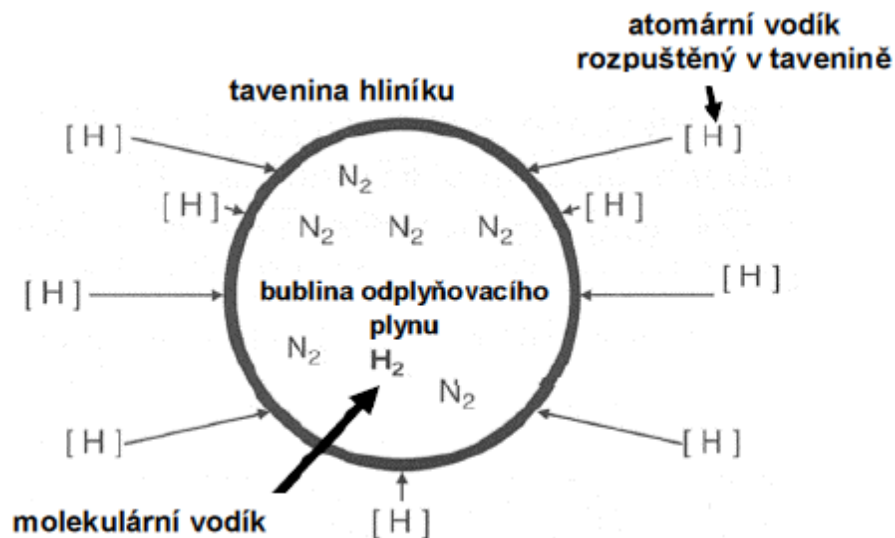
3 ODPLYŇOVÁNÍ

V této kapitole je vysvětlena teoretická podstata odplyňování taveniny

3.1 Princip

Odplyňování znamená snižování obsahu rozpuštěného vodíku v roztavené slitině hliníku. Cílem je dosáhnout takového množství vodíku, které při tuhnutí nevytvoří bubliny, jejichž velikost nebo množství bude nepřijatelné.

Existuje několik metod odplyňování, například odplyňování pomocí vakua, nebo ultrazvukem. V rámci této práce je však věnována pozornost odplyňování probubláváním inertním plynem. K odplyňování dochází mechanismem difuze vodíku do bublin inertního plynu. Princip lze vidět na Obr. 3-1. [7]



Obr. 3-1 Mechanismus difuze vodíku do bublin dusíku [4]

Na Obr. 3-2 můžeme vidět schématické znázornění postupného vyplouvání bubliny a difuze vodíku. Při vytvoření bubliny inertního plynu je parciální tlak v bublině téměř nulový. Poté je velice rychle vytvořena rovnováha mezi parciálním tlakem vodíku uvnitř bubliny a v hraniční vrstvě. Difuze vodíku z objemu taveniny do hraniční vrstvy je limitována, zatímco slučování atomárního vodíku do molekulárního stavu probíhá velice rychle. Nerovnováha parciálních tlaků tedy nastává mezi tenkou hraniční vrstvou v těsném okolí bubliny a okolním objemem taveniny. [9]

Velikost povrchové vrstvy bublin inertního plynu má vliv na účinnost odplynění. Difuzní děj je závislý na velikosti plochy, skrze kterou má atom vodíku difundovat. Pro vysokou účinnost odplynění je tedy vhodné vytvořit velké množství malých bublin, čímž dosáhneme velkého povrchu při stejném objemu inertního plynu.

Účinnost odplynění je také dána rychlostí vyplouvání bublin inertního plynu směrem k hladině. Rychle vyplouvající bubliny do sebe pohltí malé množství vodíku. Je proto

vhodné, aby bubliny inertního plynu vyplouvaly pomaleji. Vyplouvání těchto bublin se řídí Stokesovým zákonem, který říká, že malé bubliny vyplouvají pomaleji [8]:

$$v = \frac{1}{18} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{kovu}} - \rho_{\text{plynu}}}{\eta} \right) \cdot g \cdot d^2 \quad (8)$$

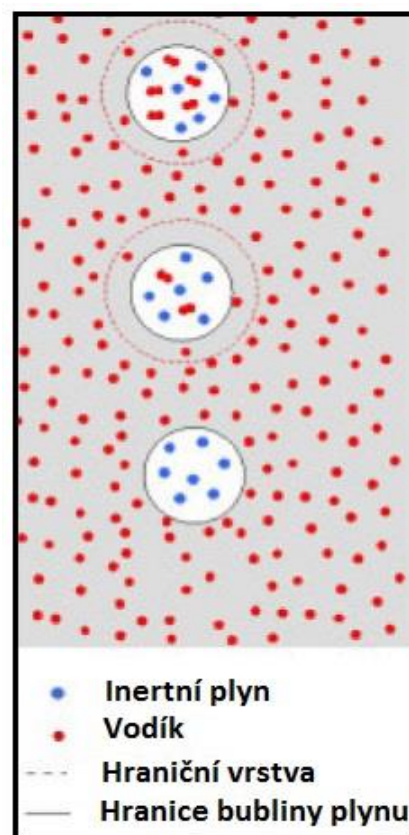
kde: v [m/s] rychlost vyplouvání bubliny,
 ρ [kg/m³] hustoty kovu a plynu,
 η [N·s/m²] dynamická viskozita kovu,
 d [m] průměr bubliny.

Je zřejmé, že pro dosažení nízké rychlosti vyplouvání bublin je potřeba zajistit jejich malý průměr. K tomuto účelu slouží různá odplyňovací zařízení.

3.2 Odplyňovací zařízení

K odplyňování pomocí probublávání inertním plynem se používá zařízení FDU (Foundry degassing unit). V případě, že se jedná o odplyňování a současně rafinaci kovu pomocí solí, je toto zařízení označováno jako MTS (Metal treatment station), viz Obr. 3-3. [5]

V Tab. 3-1 lze vidět nastavení odplyňovacího zařízení ve slévárně Kovolit Modřice, a.s. Během experimentu nedocházelo ke změně těchto parametrů. Před začátkem experimentu byly parametry vždy zkontrolovány a v průběhu experimentu byl kontrolován průtok plynu. Průtok byl vyhodnocen jako stabilní.



Obr. 3-2 Schéma difuze vodíku během vyplouvání bubliny [9]

Tab. 3-1 Přehled použitých prvků a nastavení

Typ zařízení	Typ hlavy rotoru	Otáčky rotoru	Druh inertního plynu	Průtok inertního plynu
MTS 1500	FDU XSR	450 ot/min	Dusík 99,999 %	17 l/min



Obr. 3-3 MTS 1500 [8]

3.3 Používané plyny

Vzhledem k ceně se nejvíce využívá jako inertní plyn dusík. Lze použít i argon, který je však násobně dražší. Podstatná je především čistota plynu. To znamená, že plyn musí být v tlakové nádobě obsažen z 99,999 %. Jinak by mohlo docházet k foukání vzduchu či vlhkosti spolu s dusíkem.

4 TAVENÍ SLITINY

Slévárna Kovolit Modřice, a.s. disponuje dvěma druhy tavicích agregátů pro přípravu tekutého kovu. Hlavními agregáty, které zásobují lící stroje tekutým kovem, jsou dvě šachtové pece Striko Westofen. Dále slouží k tavení dvě plynové kelímkové sklopné pece. Ty jsou určeny pro tavení slitiny, která se odlévá v menším objemu.

4.1 Dávkovací pece

K udržování a dávkování tekutého kovu na pracovišti lícího zařízení slouží dávkovací pece. Jedná se o pece značky Striko Westofen.

4.2 Použité slitiny

Při experimentu byl vliv režimu odplyňovacího procesu zkoušen pouze na slitině AlSi10Mg(Fe), také označované jako DIN 239. Tab. 4-1 udává interní předpis na chemické složení dané slitiny. To je sledováno pravidelnou kontrolou. V průběhu experimentu nebyla zaznamenána odchylka chemického složení od interního předpisu. Pro zobrazené tabulky platí, že hodnoty, které nemají uvedené rozmezí, znamenají povolené maximum daného prvku.



Obr. 4-1 Dávkovací pec Westomat Classic, firmy Striko Westofen [10]

Tab. 4-1 Interní předpis pro chemické složení slitiny AlSi10Mg(Fe) [11]

● EN AC–AlSi10Mg(Fe) – (původně DIN 1725/239 tlak)														
Čís.označení dle EN 1706	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti ³	Jiné ^{1,2}		Al
												každý	celkem	
T EN AC-43400 ⁴	9,0–11,0	1,0	0,10	0,55	0,20–0,50	---	0,15	0,15	0,15	0,05	0,20	0,05	0,15	zbytek

Následně při dlouhodobém ověření byly do experimentu zapojeny všechny slitiny v té době používané. Jejich seznam s chemickým složením udává Tab. 4-2.

Tab. 4-2 Interní předpis pro chemické složení vybraných slitin [11]

● ADC12 (Valeo Compressor Europe)														
Zákazník	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Jiné		Al
												každý	celkem	
T VALEO	9,6–12,0	1,3	1,5–3,5	0,5	0,3	---	0,5	1,0	0,20	0,30	0,15	0,05	0,25	zbytek
● EN AC–AlSi9Cu3(Fe)														
Čís.označení dle EN 1706	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti ³	Jiné ^{1,2}		Al
												každý	celkem	
T EN AC-46000	8,0–11,0	1,3	2,0–4,0	0,55	0,05–0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,15	0,25	0,05	0,25	zbytek
● EN AC–AlSi12Cu1(Fe) – (původně DIN 1725/231 tlak)														
Čís.označení dle EN 1706	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti ³	Jiné ^{1,2}		Al
												každý	celkem	
T EN AC-47100	10,5–13,5	1,3	0,7–1,2	0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20	0,05	0,25	zbytek

5 VADY

Mezi hlavní vady, které jsou řešeny v této práci, patří především porezita a netěsnost.

5.1 Porezita

Vodíková porezita

Vzniká mechanismem difuze rozpuštěného vodíku do bublin během tuhnutí slitiny. Princip vzniku bubliny je detailně popsán v kapitole 2 [12]

Vzduchová porezita

Jedná se o typickou vadu pro technologii tlakového lití. Vzduch, který nedokáže uniknout z formy je poté uzavřen v odlitku. Vlivem vysokých tlaků a vysoké plnicí rychlosti je vzduch rozptýlen ve formě menších bublin. Povrch těchto bublin je hladký a lesklý, jelikož je pokryt oxidy hliníku. [13]

Rozdíl mezi vzduchovou a vodíkovou porezitou je ve velikosti, poloze a tvaru bublin. Pro vodíkovou porezitu je typické rovnoměrné rozložení velmi malých a kulatých bublin v prostoru odlitku. Vzduchová porezita se však vyskytuje především lokálně a její tvar bývá méně kulatý. [13]

5.2 Netěsnost

U tlakově litých odlitků se často setkáváme s požadavkem na tlakotěsnost odlitku. Ta je specifikována povoleným únikem tlakového média při stanoveném zkušebním tlaku. V případě, že odlitek nedodrží při zkoušce předepsané podmínky, je vada označena jako netěsnost.

V případě, že je v stěně odlitku staženina, nebo vměstek v podobě oxidické blány, dochází k úniku tlakového média právě skrze tuto staženinu, popřípadě okolo oxidické blány. [14]



Obr. 5-1 Vada, která nezpůsobuje netěsnost [14]



Obr. 5-2 Vada, která způsobuje netěsnost odlitku [14]

5.3 Vměstky

V případě tlakově litých odlitků je výskyt vměstků nebezpečný vzhledem k obrábění odlitků. Jelikož odlitky většinou nevyžadují zvýšené mechanické vlastnosti, není podstatné, že vměstky mohou snižovat tyto hodnoty, zatímco zhoršená obrobiteľnosť je v případě sériové výroby vysoce podstatný faktor.

Nejčastějším typem vměstků u hliníkových slitin jsou oxidy hliníku Al_2O_3 . Ty se vyskytují převážně ve formě oxidických blan uzavřených v odlitku.

6 PODMÍNKY EXPERIMENTU

V této kapitole budou popsány podmínky experimentu, postupné úpravy procesu a jejich vysvětlení.

6.1 Popis průběhu experimentu

Během experimentu budou provedeny změny režimu odplyňování na zařízení MTS 1500. Bude pozorován vliv této změny na míru odplynění taveniny. Tato část experimentu bude probíhat 72 hodin. Zároveň budou odebrány vzorky odlitku, které byly z této taveniny nality. Na těchto odlitcích bude poté sledován vliv změny režimu odplynění na jejich kvalitu.

Po vyhodnocení vlivu na kvalitu odlitku bude proveden ověřovací experiment, který na základě statistického pozorování ověří vliv úprav režimů na odplyňování.

6.2 Sledované odlitky

Vliv změny režimu na kvalitu odlitku bude pozorován na dvou typech odlitků. Tyto jsou označeny jako odlitek A a odlitek B.

Z těchto odlitků budou odebrány vzorky, na kterých se bude vyhodnocovat možný zvýšený výskyt porezity skrze snímky makrostruktury a mikrostruktury. Rovněž budou odlitky podrobeny rentgenové kontrole.

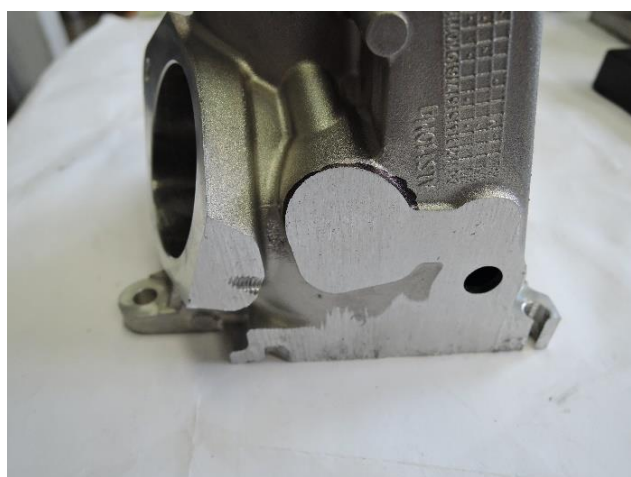
6.2.1 Místa odběru vzorků

Odlitek A

Snahou při zpracování vzorku je analyzovat případné vady a vyhodnotit, zda jejich počet stoupá či klesá v závislosti na různém nastavení procesu odplyňování (míře naplynění). Pro odběr vzorku bylo tedy vybráno nejkritičtější místo odlitku. Jedná se zároveň o místo posledního tuhnutí kovu. Forma v tomto místě není chlazena, nedochází proto k eliminaci vznikajícího „hotspotu“.



Obr. 6-1 Ukázka části odlitku A



Obr. 6-2 Řezná plocha, pro odběr vzorku z odlitku A

Odlitek B

Pro odlitek B platí stejné pravidlo jako pro odlitek A, tedy že místo odběru vzorku je kritické. Také se jedná o místo posledního tuhnutí kvůli největší šířce stěny, jakou je možno v odlitku nalézt. Zároveň se místo nachází nejdále od vtoku, předpokládá se zde tedy možný výskyt mikrostaženin. Obr. 6-3 zobrazuje odlitek včetně silnostěnné příruby v horní části odlitku, ze které byl vzorek odebrán. Červené čáry představují řezy.



Obr. 6-3 Odlitek typu B a místo odběru vzorku



Obr. 6-4 Detail na místo řezu odlitku B

6.3 Rafinace

Během procesu odplyňování byla na všechny slitiny použita rafinační sůl COVERAL MTS 1524, doporučovaná výrobcem zařízení MTS.

6.4 Specifikace povolené porezity

Pro odlitek A i B se povolená porezita řídí dle požadavků zákazníka.

Pro obráběné plochy:

VW50097 – F5/0,6/A3/P0,3. Což znamená, že na definovanou plochu je povoleno maximálně 5 pórů s rozměrem do 0,6 mm. Póry do velikosti 0,3 mm nejsou početně omezeny.

Pro neobráběné plochy (póry pozorovány rentgenem):

VW50097 – D5/1,2/A3/P0,6. Což znamená, že jsou povoleny maximálně 4 % pórů v objemu odlitku do velikosti 1,2 mm. Póry do velikosti 0,6 mm nejsou početně omezeny.

Všechny odlitky nevyhovující definované toleranci jsou výstupní kontrolou vyřazeny.

6.5 Specifikace povolené netěsnosti

Odlitek A i B se kontroluje na tlakotěsnost. V případě nedodržení podmínek definovaných zákazníkem je odlitek vyhodnocen jako zmetek s vadou netěsnost.

Odlitek A

Zkušební tlak 3 bary, povolený únik na straně vody do 5 cm³/min, na straně plynu do 11 cm³/min. Zkušební médium je vzduch.

Odlitek B

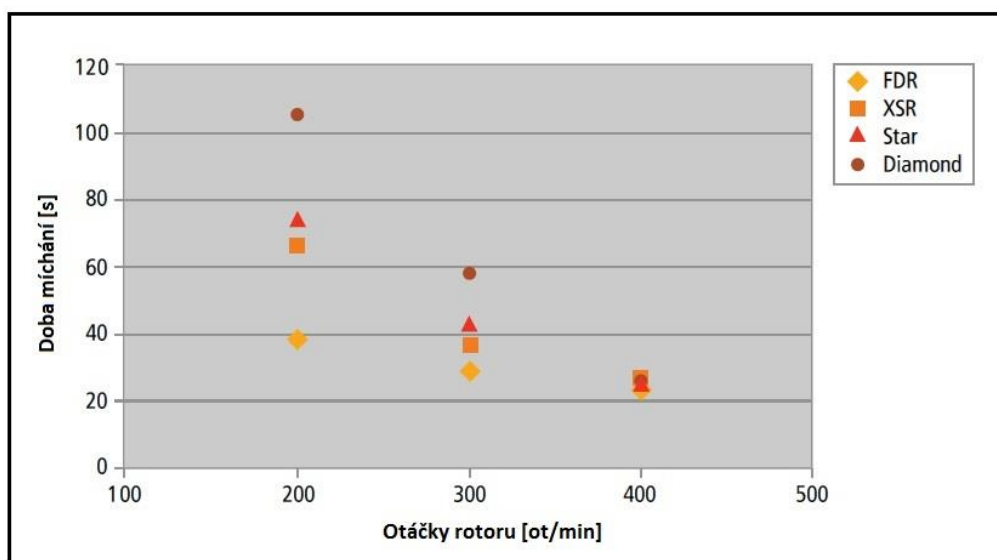
Zkušební tlak 3 bary, povolený únik do 5 cm³/min. Zkušební médium je vzduch.

7 VLIV ZAŘÍZENÍ MTS NA ODPLYŇOVÁNÍ

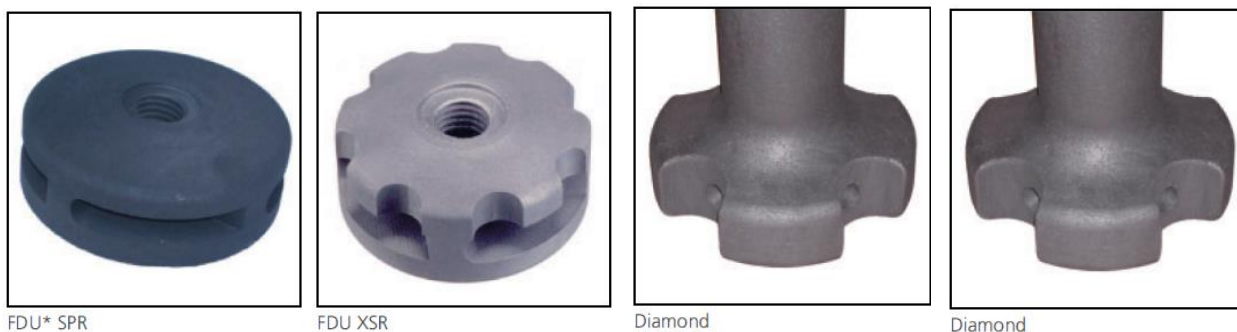
Vliv otáček a tvaru rotoru

Rotor odplyňovacího zařízení má při odplyňování dvě hlavní úlohy. První úlohou je dosažení dobré chemické a teplotní homogenity taveniny v transportním kelímku. Je snahou dosáhnout této homogenity v co nejkratším čase. Druhou úlohou je vytvoření velkého množství co nejmenších bublin inertního plynu a zároveň zajistit dobré rozložení těchto bublin v objemu transportního kelímku. [9]

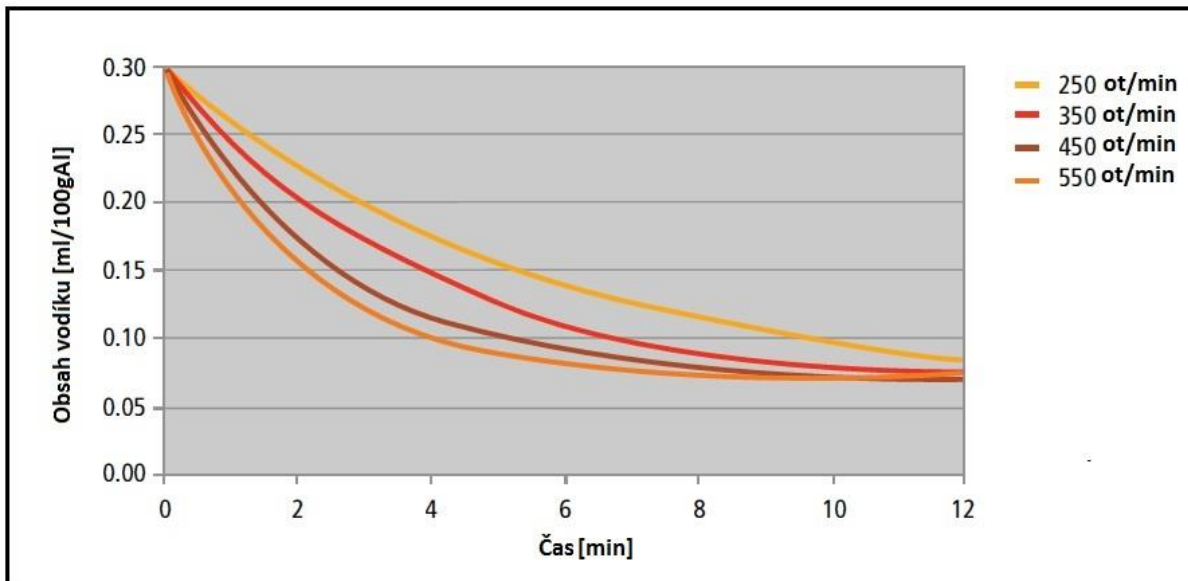
Na Obr. 7-1 lze vidět, že při vyšší rychlosti otáček rotoru klesá doba míchání. Dobou míchání je myšleno dosažení homogenního teplotního pole v definované toleranci. Jde zde také patrné, že tvar hlavy rotoru má vliv pouze při nízkých otáčkách. Při otáčkách na 400 ot/min je rozdíl zanedbatelný. Průtok inertního plynu byl 10 l/min, k měření teplotního pole bylo použito 8 termočlánků rozmístěných v kelímku. [9]



Obr. 7-1 Vliv tvaru rotoru a otáček na dobu míchání [9]



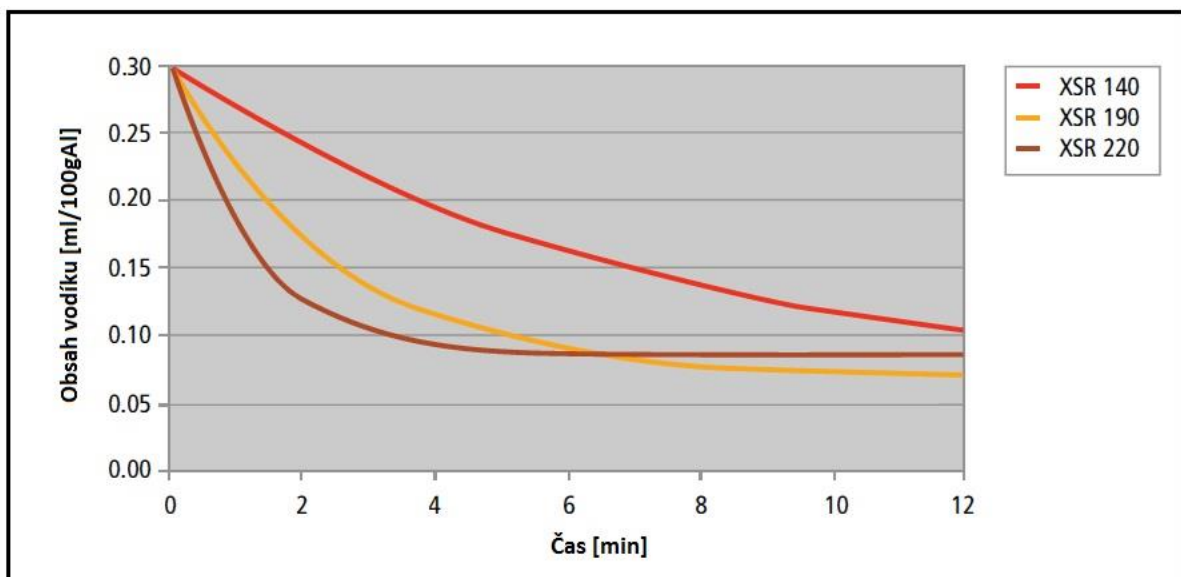
Obr. 7-2 Ukázka hlav rotorů [9]



Obr. 7-3 Vliv otáček hlavy rotoru na obsah vodíku [9]

Při vyšších otáčkách kromě rychlejší teplotní homogenizace dochází také k rychlejšímu odplyňování taveniny, viz Obr. 7-3. To je způsobeno tvorbou menších bublinek a jejich lepším rozložením v objemu taveniny. Typ rotoru XSR, průtok inertního plynu 20 l/min. [9]

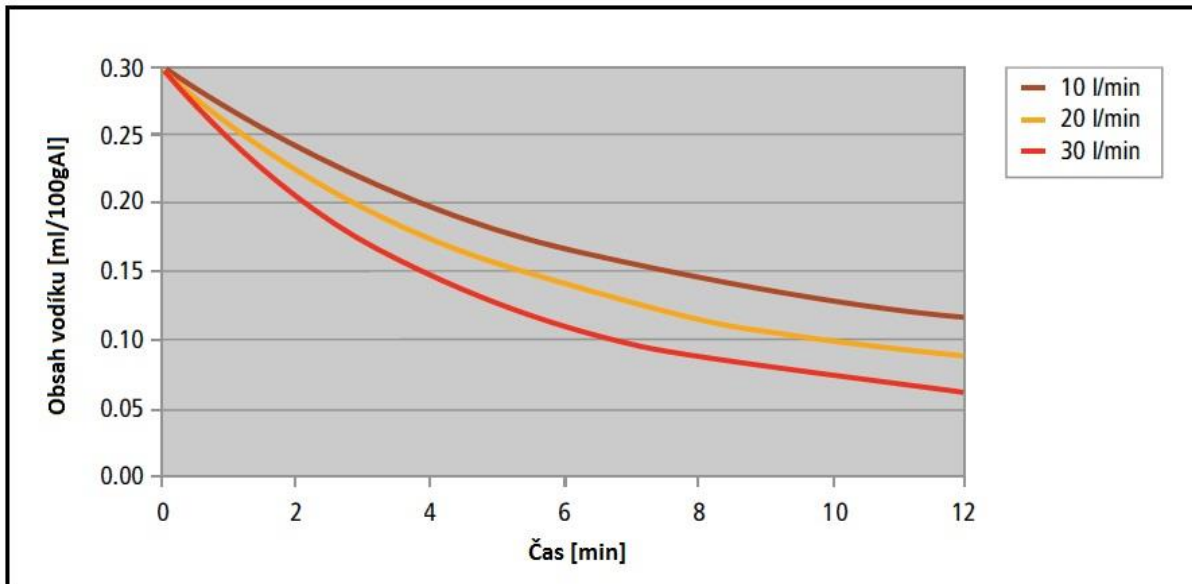
Vliv průměru hlavy rotoru



Obr. 7-4 Vliv průměru hlavy rotoru na obsah vodíku [9]

Na Obr. 7-4 lze vidět, že při zvyšování průměru hlavy rotoru lze snížit obsah vodíku v kratším čase. Je však nutné brát v potaz značnou turbulenci, která nastává při větších průměrech hlavy rotoru. Experiment byl prováděn při průtoku inertního plynu 20 l/min a otáčkách 450 ot/min. [9]

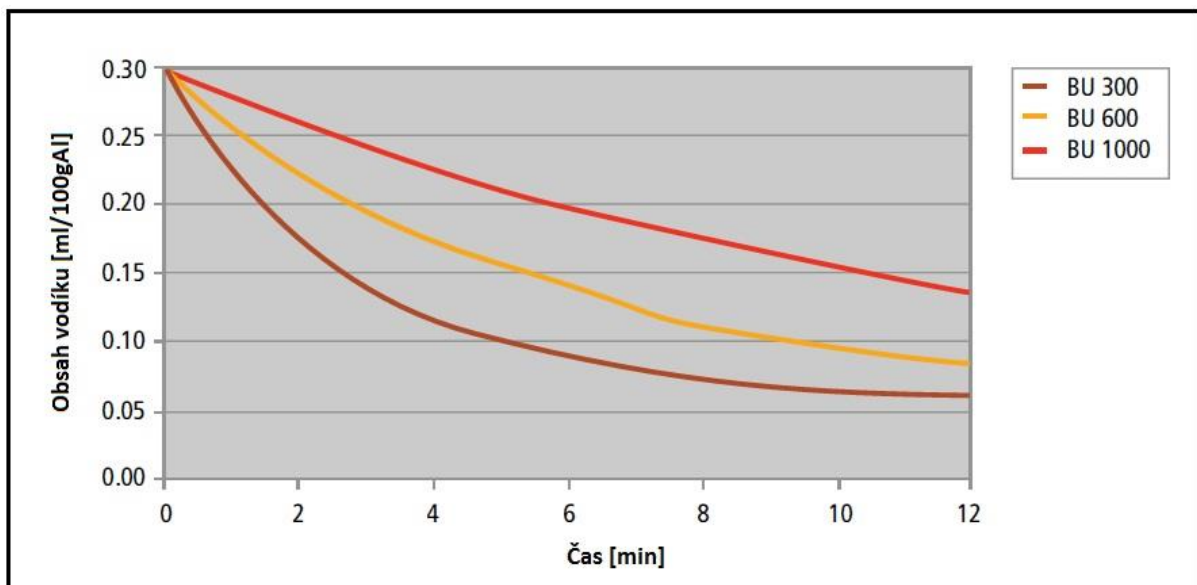
Vliv průtoku inertního plynu



Obr. 7-5 Vliv průtoku inertního plynu na obsah vodíku [9]

Je zřejmé, že při vyšším průtoku inertního plynu skrze rotor bude docházet k rychlejšímu snížení obsahu vodíku. Experiment byl prováděn při průtoku inertního plynu 20 l/min a otáčkách 450 ot/min. Hlava rotoru XSR. [9]

Vliv velikosti transportního kelímku



Obr. 7-6 Vliv velikosti transportního kelímku na obsah vodíku [9]

Při odplyňování větších objemů taveniny výrazně klesá účinnost odplynění. Z toho plyne, že pro větší množství taveniny je vhodné použít větší průměry hlav rotoru. Ve slévárnách však většinou disponují jedním rozměrem rotorové hlavy. Řešením je odplyňovat stále stejné množství kovu. [9]

8 REŽIMY ODPLYŇOVÁNÍ

Tato kapitola se věnuje popisu a volbě jednotlivých režimů odplyňování, jejichž vliv bude experimentálně ověřován.

8.1 Fáze procesu odplyňování

Proces odplyňování na zařízení MTS 1500 je možné rozdělit do pěti různých fází.

1. První zpracování

Po ustanovení transportního kelímku do žádané pozice dojde k sepnutí zařízení. V této fázi dojde k roztočení rotoru a pomalému sjíždění rotoru do taveniny. Otáčky rotoru v zatím nejsou na své nominální hodnotě, ale jsou snižené, aby nedocházelo k rozstříku kovu. Již v této fázi dochází k foukání inertního plynu do dutiny rotoru. Průtok plynu však není na nominální hodnotě, ale dosahuje třetiny z nastavené hodnoty. Hradidlo je zasouváno do taveniny společně s rotorem.

2. Tvorba víru

Dojde ke zvednutí hradidla, které brzdí víření taveniny. Otáčky rotoru dosahují nominální hodnoty nastavení. Během této fáze je v tavenině vytvořen výrazný vír.

3. Přísada soli

Do vytvořeného víru, který se tvoří ve středu kelímku, je vsypáno definované množství rafinační soli COVERAL MTS 1524.

4. Reakční doba

Dochází k opětovnému zasetí hradidla. Otáčky rotoru se zpomalují na polovinu nominální hodnoty. Rotace taveniny v kelímku se zpomalí a dojde k výraznému zamíchání rafinační soli do objemu taveniny. V průběhu této fáze dochází k rafinaci kovu.

5. Zpracování

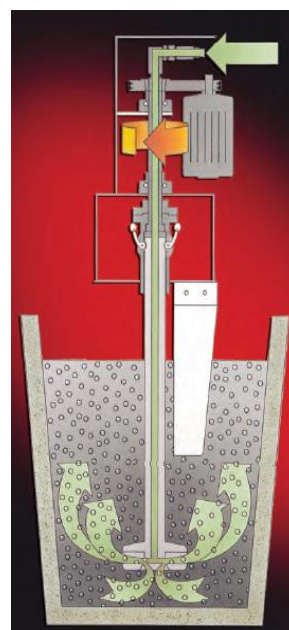
Během této fáze dochází k foukání inertního plynu nastaveným průtokem. Otáčky dosahují požadované hodnoty. Nejvýraznější odplynění probíhá právě v této fázi.

Dle Obr. 8-3 lze vidět, že časy fází 1 až 3 nejsou vzhledem k fázi 5 (zpracování) nijak zásadní a nemá smysl je zkracovat. Zároveň z technologického hlediska není vhodné tyto fáze urychlovat. Fáze 4 (reakční doba) je druhou nejdelší. Tuto fázi však také není vhodné zkracovat, protože by mohlo docházet k nesprávné rafinaci taveniny.

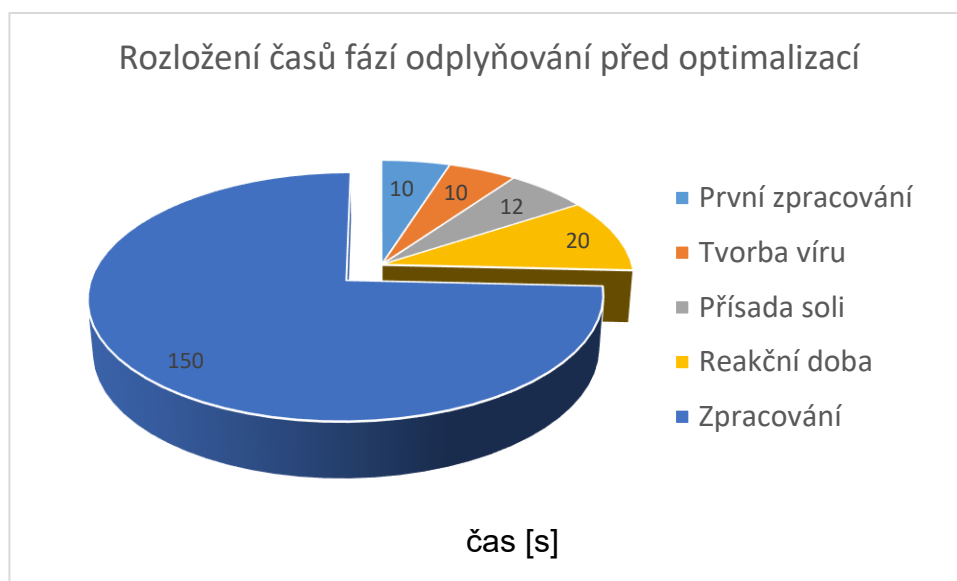
Jelikož fáze 5 představuje cca $\frac{3}{4}$ z celkového času procesu, je vhodné zaměřit se na optimalizaci či zkrácení času právě zde.



Obr. 8-1 Tvorba víru a malých bublin



Obr. 8-2 Schéma principu odplyňovacího



Obr. 8-3 Rozložení časů jednotlivých fází procesu odplyňování

8.2 Stanovení režimu odplyňování

Změny v režimu procesu odplyňování byly provedeny v délce páté fáze (zpracování).

Postupně byly provedeny tři úpravy režimu doby zpracování (nastavení 1 až 3). Každá z těchto úprav byla prováděna v samostatný den, v časovém rozmezí od 7 hodin ráno do 16 hodin odpoledne. V čase od 16:00 do 7:00 (přes noc) byl režim odplyňování standartní. Jelikož úprava procesu probíhala pouze na slitině AlSi10Mg(Fe), která se v čase provádění odlévala na dvou licích zařízeních, nebylo možné trvale upravit program zařízení MTS 1500. Čas zpracování byl tedy zkracován manuálně a to tak, že pro každé jednotlivé zpracování slitiny AlSi10Mg(Fe) byl reálný čas zpracování měřen pomocí stopek. Při dosažení požadované délky bylo zpracování ukončeno přerušovacím tlačítkem, zařízení vysunulo rotor z taveniny a zastavilo otáčky. Tabulka Tab. 8-1 uvádí označení jednotlivých režimů, které byly během experimentu použity.

Tab. 8-1 Přehled použitých režimů experimentu

Označení	Doba zpracování	Poznámka
N150	150 sekund	Původní doba zpracování
N90	90 sekund	
N70	60 sekund	
N0	0 sekund	Odplyňování neproběhlo

N150

Původní doba zpracování taveniny.

N90

Čas zpracování byl zkrácen o 60 sekund oproti standartu. Tato hodnota byla zvolena z toho důvodu, že minutové zkrácení celkového procesu odplyňování bude mít již pravděpodobně pozorovatelný vliv na výsledné odplynění taveniny.

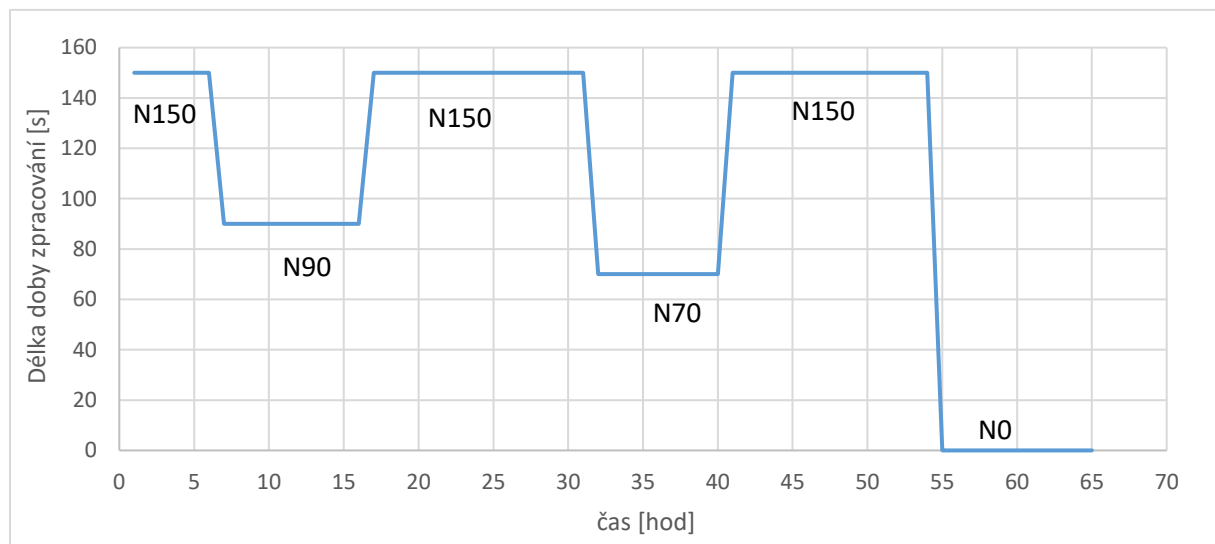
N70

Hodnota 70 sekund zpracování byla zvolena na základě měření délky reakce rafinační soli s taveninou. Jak již bylo zmíněno, vycházíme z předpokladu, že rafinace taveniny má významný vliv na výskyt pomezity. Je tedy nutné před ukončením procesu zajistit úplné zreagování rafinační soli.

N0

Označení N0 říká, že žádné odplyňování pomocí zařízení MTS 1500 neproběhlo. Jedná se o režim, při kterém tavenina tedy nebyla probublávána inertním plynem. Proběhla však rafinace taveniny pomocí rafinační soli COVERAL MTS 1524. Množství použité rafinační soli bylo stejné jako v předchozích případech, sůl však byla do taveniny zapracována ručně, pomocí děrovaného zvonu. Je nutné podotknout, že tato operace je časově náročná a nelze zajistit stabilní proces. Není tedy vhodné tento proces využívat ve standardním provozu.

Na Obr. 8-4 lze vidět, jak se mění hodnoty v průběhu experimentu. Opakované navrácení režimu na nastavení N150 je provedeno v nočních hodinách, kdy nebylo možné manuálně provádět lití při kratších režimech.



Obr. 8-4 Režimy odplyňování v průběhu experimentu

9 VLIV REŽIMU ODPLYŇOVÁNÍ NA NAPLYNĚNÍ TAVENINY

Během experimentu byly sledovány hodnoty naplynění taveniny. K tomuto účelu byla použita metoda měření naplynění pomocí Dichte Indexu.

9.1 Princip měření naplynění

Metoda spočívá v porovnání hustoty dvou vzorků, kde jeden vzorek tuhne za atmosférického tlaku, druhý za podtlaku. Využívá se zde platnosti Sievertsova vztahu, který říká, že za podtlaku je rozpustnost plynu v kovu nižší. Vyloučí se tedy více plynu ve formě bublin, než by tomu bylo za atmosférického tlaku. S větším počtem bublin klesá hustota měřeného vzorku. [1]

$$[H] = k \cdot \sqrt{p_{h2}} \quad (9)$$

kde: $[H]$ [%] rozpustnost vodíku v tavenině,
 K [-] konstanta,
 p_{h2} [Pa] parciální tlak vodíku.

Hustota vzorku je poté stanovena pomocí metody dvojího vážení, viz Obr. 9-1. Nejprve je vzorek zvážen na vzduchu a poté znovu zvážen ponořený ve vodě. Váha zaznamenaná hmotnost kapaliny vytlačené vzorkem. Takovým způsobem lze zjistit hustotu vzorku, viz rovnice [1]:

$$V_{vz} = \frac{m_{vzh2o}}{\rho_{h2o}} \quad (10)$$

kde: V_{vz} [kg] objem vzorku,
 m_{vzh2o} [kg] hmotnost vzorku ponořeného ve vodě,
 m_{vzat} [kg] hmotnost vzorku váženého na vzduchu.

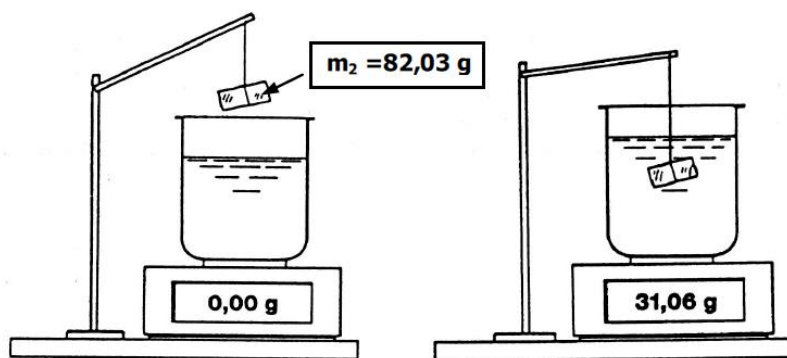
$$\rho_{vz} = \frac{m_{vzat}}{V_{vz}} \quad (11)$$

kde: ρ_{h2o} [kg/m³] hustota vody,
 ρ_{vz} [kg/m³] hustota vzorku.

Přístroje pro vážení vzorku provádí výpočty hustoty automaticky. Zároveň také spočítají výslednou hodnotu DI podle rovnice [1]:

$$DI = \frac{\rho_{vz atm} - \rho_{vz vak}}{\rho_{vz atm}} \cdot 100 \quad (12)$$

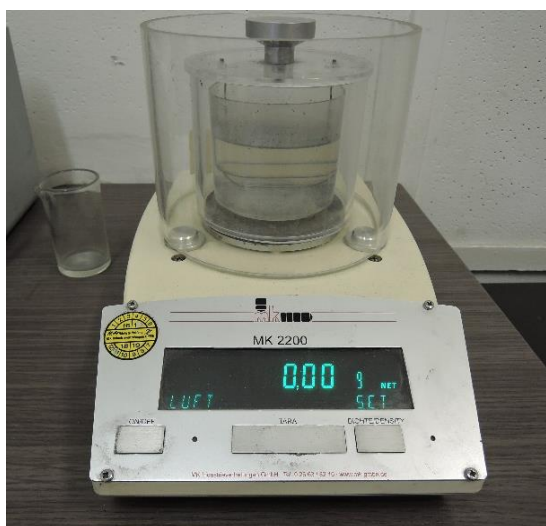
kde: DI [%] hodnota Dichte Indexu,
 $\rho_{vz atm}$ [kg/m³] hustota vzorku tuhnutého za atmosférického tlaku,
 $\rho_{vz vak}$ [kg/m³] hustota vzorku tuhnutého za podtlaku.



Obr. 9-1 Metoda dvojího vážení vzorků [1]

9.2 Odběr vzorků

K určení hodnoty DI ve slévárně Kovolit, a.s., bylo použito vážící zařízení MK 2200 a vakuovací zařízení Vacuum density tester. Délka vakuování vzorku byla 4 minuty za tlaku 80 mbar.



Obr. 9-2 Vážící zařízení MK 2200



Obr. 9-3 Vacuum density tester, Stahlhofen

Vliv teploty kelímku

Jelikož rychlost ochlazování ovlivňuje výsledek DI je nutné, aby teploty kelímku v rámci jednotlivých měření byly podobné. Zařízení Vacuum density tester umožňuje predehřev kelímku, a provádí také měření teploty v prostoru určeném pro vzorek tuhnoucí za atmosférického tlaku. Tato teplota může být indikátorem studeného, nebo naopak přehřátého kelímku. Z tohoto důvodu byla měřená teplota kontrolována a odběr vzorku probíhal v případě, že dosáhla hodnoty $200 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Tímto postupem lze částečně eliminovat možné nepřesnosti vlivem různých teplot kelímku.

Dále bylo sledováno, jaká teplota bude naměřena na konci vakuování, tedy 4 minuty po odlití vzorku. Vzorky, které příliš zvýšily sledovanou teplotu mohou indikovat, že tavenina měla před odlitím vzorku vyšší teplotu, nebo že kelímek byl příliš přehřátý či hmotnost vzorku byla výrazně odlišná. Vzorky, které teplotou na konci vakuování nespádaly do intervalu $240 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ byly ze statistického zpracování vyškrtnuty.



Obr. 9-4 Ukázka zobrazovaných hodnot v průběhu tuhnutí vzorku

9.3 Vyhodnocení vlivu režimu odplyňování

Při každém odplyňování sledované slitiny v průběhu experimentu byly odebrány vzorky na měření Dichte Indexu před odplyňovacím procesem a po něm. Cílem bylo určit, jak se sníží hodnota Dichte Indexu při použití kratší doby zpracování. Tab. 9-1 udává naměřené hodnoty.

Tab. 9-1 Hodnoty DI před odplyňováním a po odplyňování

čas [hod]	DI před [%]	DI po [%]	Nastavení
-16,00	10,8	1,08	N150
-13,00	12	1,13	N150
-11,25	11,55	0,97	N150
7,00	6,46	5,26	N90
9,00	11,83	6,79	N90
13,00	11,55	7,95	N90
15,50	6,54	5,80	N90
31,25	8,11	4,94	N70
32,50	13,43	7,98	N70
34,50	13,46	8,40	N70
37,00	8,43	6,44	N70
38,50	10,00	7,98	N70
39,25	13,03	7,22	N70
55,50	11,97	11,8	N0
57,50	13,6	11,96	N0
59,00	12,97	12,46	N0

Lze vidět výrazný rozptyl hodnot DI před samotným odplyněním. To je pravděpodobně způsobeno rozdílným typem vsázky.

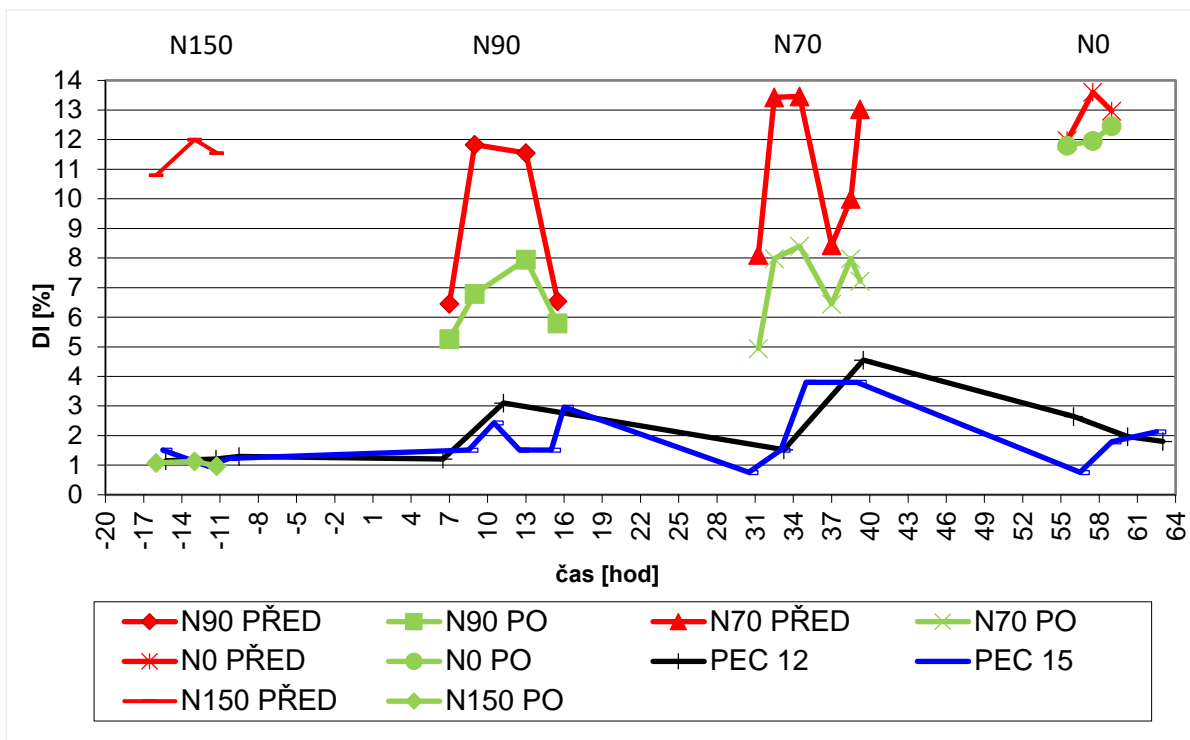
Zároveň byly také odebírány vzorky ze dvou udržovacích pecí, do kterých se upravená tavenina dolévala. Jedná se o dávkovací pece Striko Westofen, viz kapitola 4.1. Odběr vzorků probíhal mezi jednotlivými dávkami tekutého kovu. Z provozních důvodů nebylo možné zajistit vyšší četnost odběru vzorku.

Tab. 2 Hodnoty DI v udržovací peci č. 15

čas [hod]	DI v Peci č. 15 [%]	Nastavení
-15,50	1,51	N150
-12,00	0,97	N150
-10,25	1,23	N150
8,50	1,51	N90
10,50	2,43	N90
12,50	1,51	N90
15,00	1,51	N90
16,00	2,96	N90
30,50	0,76	N70
33,00	1,51	N70
35,00	3,8	N70
39,00	3,8	N70
56,50	0,76	N0
59,00	1,79	N0
62,50	2,13	N0

Tab. 3 Hodnoty DI v udržovací peci č. 12

čas [hod]	DI v Peci č. 12 [%]	Nastavení
-15,25	1,15	N150
-11,30	1,21	N150
-9,50	1,3	N150
6,50	1,21	N150
11,25	3,41	N90
33,25	1,52	N70
39,50	4,55	N70
56,00	2,65	N0
60,25	1,97	N0
63,00	1,8	N0



Obr. 9-5 Průběh hodnot DI během experimentu

Obr. 9-5 ukazuje, jak se hodnoty DI vzájemně mění. Je zde možné vidět několik trendů:

- 1) Je patrné, že hodnoty DI po odplynění u nastavení N90 a N70 se od sebe vzájemně příliš neliší. Lze tedy usuzovat, že rozdíl 20 sekund během odplyňování již nemá výrazný vliv na hodnotu DI. Zároveň při použití nastavení N70 existuje větší riziko, že rafinační sůl nebude plně vyhořelá. Z těchto důvodů je vhodné při ověření experimentu, kdy bude probíhat dlouhodobá zkouška, použít delší odplyňovací čas N90.
- 2) I přes výrazné kolísání hodnot DI před odplyněním mají hodnoty po odplynění menší rozptyl. Odplynění nesnížilo hodnotu DI vždy o stejnou míru.
- 3) Lze také pozorovat, že hodnoty DI v udržovací peci nedosáhly hodnot podobných po odplyňování. To je způsobeno tím, že v udržovací peci docházelo ke smíšení taveniny odplyněné standardním způsobem a taveniny odplyňované kratšími časy. Z provozních důvodů je nutné během výroby držet určité minimální množství tekutého kovu v udržovací peci. V případě dvou udržovacích pecí, na kterých probíhalo měření, se jedná o hodnotu 225 kg tekutého kovu. Na začátku experimentu tedy bylo v udržovací peci právě toto množství, když došlo k dolití první várky tekutého kovu odplyněného při v režimu N90. Po ukončení experimentu docházelo k dolévání kovu odplyněného při nastavení N150, a došlo tedy k opětovnému ustavení hodnoty DI dle standardního procesu. Interní měření ukazuje, že průměrná hodnota DI v peci při standardním nastavení (N150) je $DI = 1,13 \%$. Na jakou úroveň vystoupá hodnota DI při dlouhodobém použití taveniny odplyněné při nastavení N90 ukáže ověření experimentu.

10 VLIV ZMĚNY REŽIMU ODPLYŇOVÁNÍ NA KVALITU POZOROVANÝCH ODLITKŮ

Tato kapitola popisuje výsledky kvality pozorovaných odlitků.

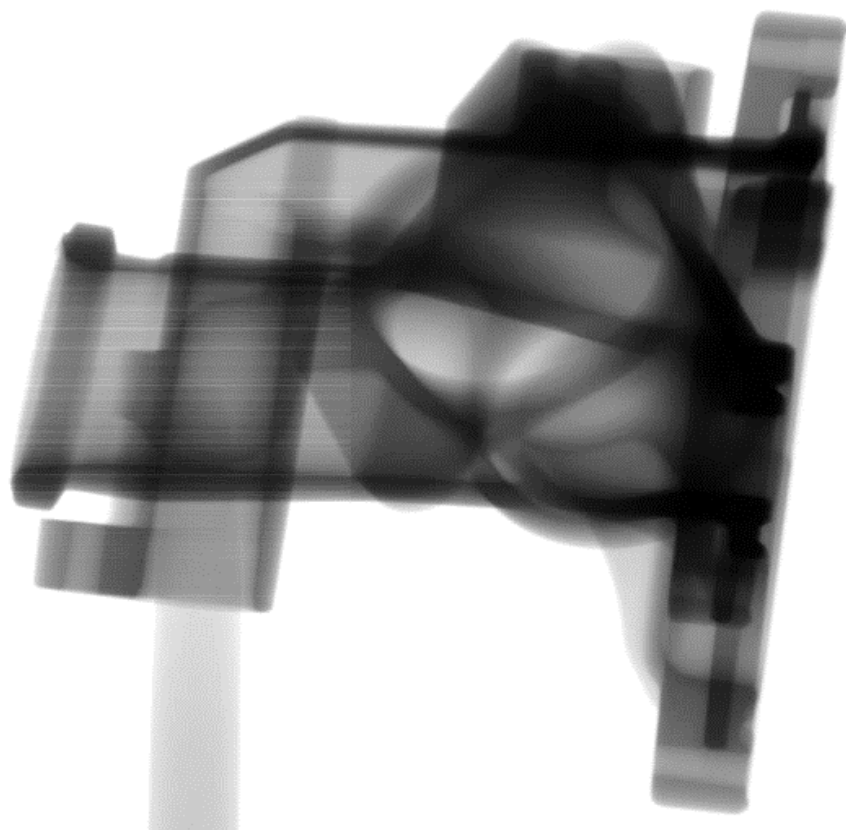
10.1 Vyhodnocení rentgenové zkoušky

V průběhu experimentu byly pravidelně odebírány odlitky na rentgenovou zkoušku. Cílem bylo kontrolovat stav odlitku a vyhodnotit, zda zvýšená hodnota naplynění bude mít přímý vliv na rentgenem viditelné vady. Byl použit rentgen YXLON MU 2000. Rozlišovací schopnost rentgenu je 0,4 mm.

Rentgenová zkouška však neodhalila porezitu, která by nespádala do povolené tolerance. Nebyl ani pozorován zvýšený výskyt pórů, které by spadaly do povolené tolerance. To je pravděpodobně způsobeno slabou rozlišovací schopností rentgenu. Zároveň také tím, že reálná hodnota DI taveniny, ze které byly odlitky odlity, nepřesahuje 4 % DI. Nelze vyloučit, že při použití výrazně více naplyněné taveniny (hodnota DI = 10 % a více) by případné vady mohly být již rentgenem pozorovatelné.

Obr. 10-1 ukazuje rentgenové snímky odlitku A. Jelikož při jiných režimech odplyňování nebyl patrný žádný rozdíl, je pro ukázkou uveden odlitek litý při režimu N90.

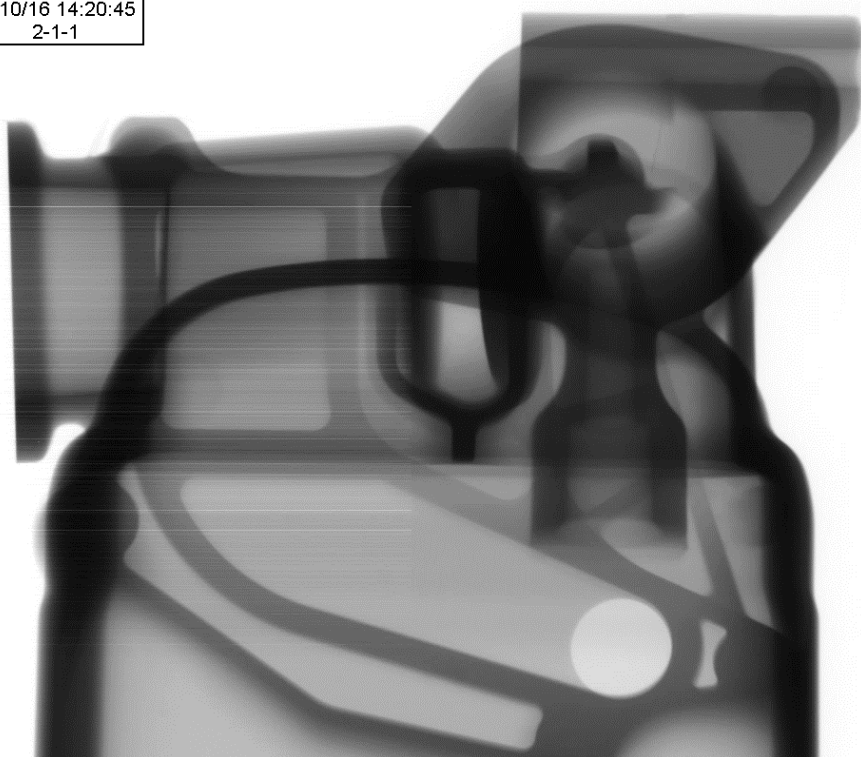
Obr. 10-2 ukazuje odlitek typu B při nastavení N70. I u tohoto odlitku nebyla na rentgenu patrná žádná změna v průběhu experimentu.



Obr. 10-1 Rentgenový snímek odlitku A, nastavení N90

11/10/16, 14:21:31,

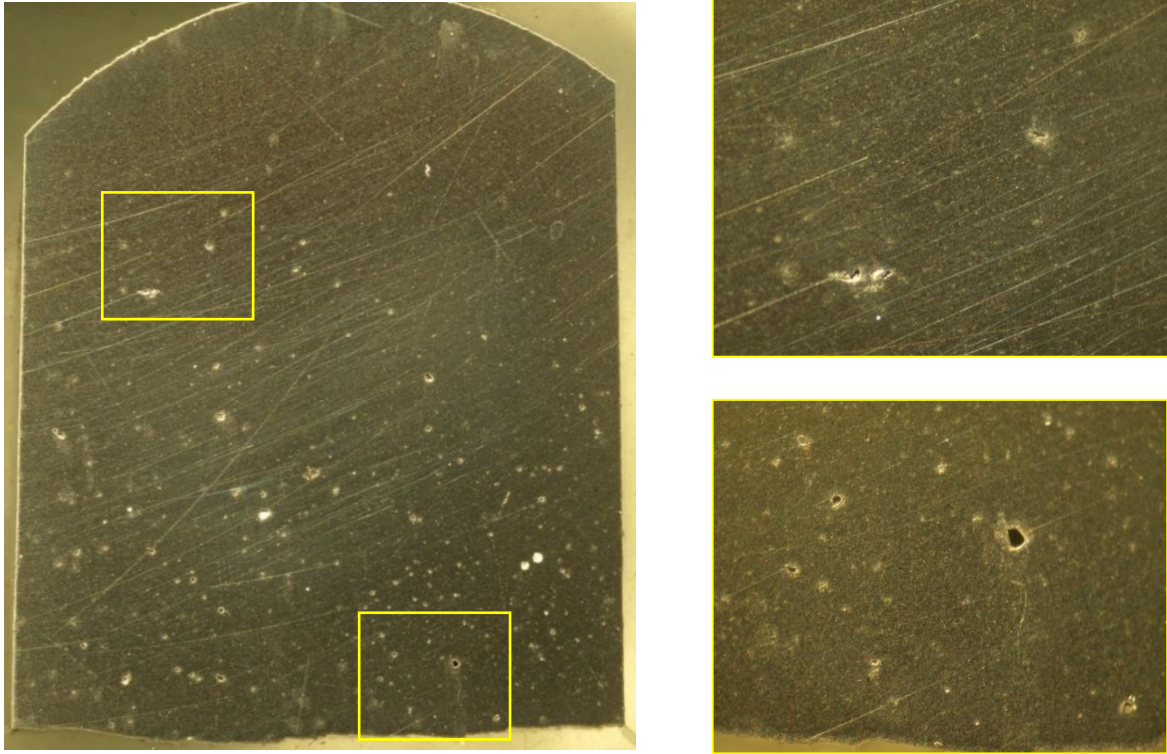
11/10/16 14:20:45
2-1-1



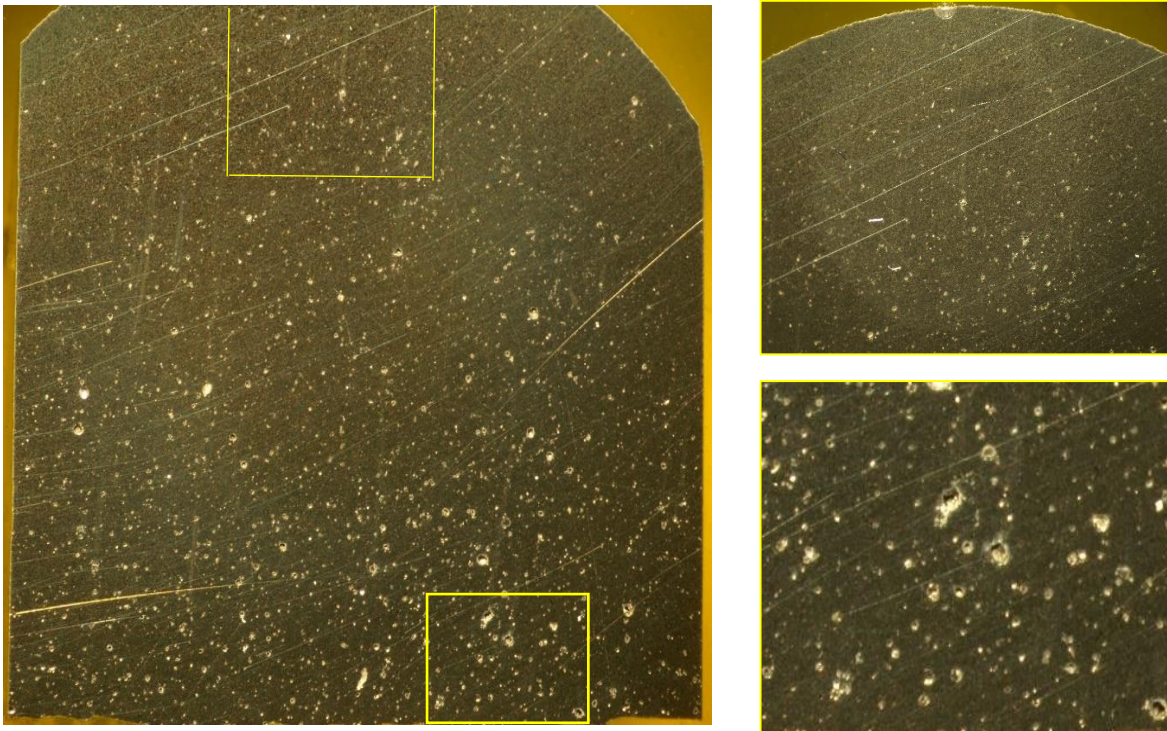
Obr. 10-2 Rentgenový snímek odlitku B, nastavení N70

10.2 Vyhodnocení makrostruktury

Z odebraných odlitků byly vyřezány vzorky, které slouží pro vyhodnocení struktury a k detailní analýze vad. Zároveň také poslouží k vyhodnocení makrosnímku.



Obr. 10-3 Makrosnímek vzorku z odlitku A, nastavení N150



Obr. 10-4 Makrosnímek vzorku z odlitku A, nastavení N90

Odlitek A – nastavení N150 (standartní stav)

Na Obr. 10-3 je viditelný makrosnímek vzorku z odlitku A při nastavení N150, tedy při standartním procesu odplyňování. Na vzorku je patrný nárůst porezity směrem dolů. Horní oblouková část vzorku je stěnou odlitku, jedná se tedy od rychle tuhnoucí partii vzorku. Naopak spodní část vzorku se nachází v tepelném uzlu a tuhnutí je zde nejpomalejší. To vysvětluje rozložení porezity v průřezu vzorku.

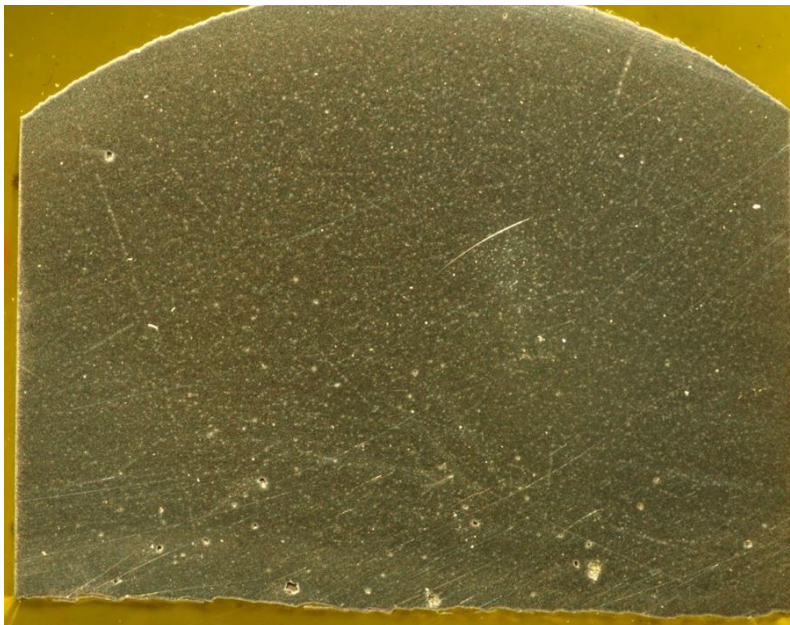
Odlitek A – nastavení N90

Na vzorku litém při nastavení N90, viz Obr. 10-4, je patrný nárůst porezity. I zde je vidět rozdílné rozložení pórů v horní a dolní partii vzorku. Přestože je patrný vyšší výskyt drobné porezity, dá se očekávat, že na obrobené ploše při výstupní kontrole odlitku tato porezita nebude zaznamenána. To je především z důvodu, že klasické obrábění dokáže velmi malou porezitu zakrýt vlivem deformace obráběné plochy.

Odlitek A – nastavení N70

Vzorek odlitku litého při nastavení N70 vykazuje opět mírně zvýšenou porezitu. Rozdíl ale není tak patrný jako mezi vzorky N150 a N90. To potvrzuje hypotézu, že 20 sekund rozdílu (mezi N90 a N70) má velmi malý vliv na množství zvýšení obsahu vodíku, hodnoty DI a také množství porezity.

Odlitek A – nastavení N0



Obr. 10-5 Makrosnímek vzorku z odlitku A, nastavení N0

Poslední vzorek z odlitku typu A ukazuje zcela jiné výsledky. Množství porezity je podstatně menší než na standartně litém odlitku (N150). Tento výsledek je dán chybou při odběru vzorku. Během řezání vzorku došlo k chybě a místo řezu bylo posunuto o cca 5 mm směrem ke stěně odlitku. Výsledný řez byl tedy proveden v oblasti s rychlejším tuhnutím, a tak nelze vzorek srovnávat s ostatními. Ukázka plochy je zde

uvedena pro demonstraci, jak výrazný vliv má rychlost tuhnutí na výslednou kvalitu odlitku.

Odlitek B – nastavení N90

Pro toto nastavení nebyl odlit žádný vzorek ze skupiny B. Výroba odlitku z této skupiny se zahájila až druhý den experimentu, tedy první vzorek byl odebrán až při nastavení N70.

Odlitek B – nastavení N70

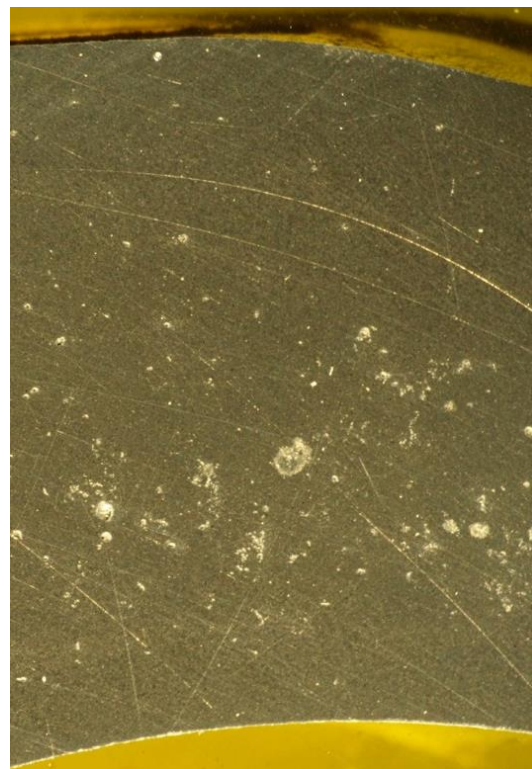
U odlitků typu B je patrný výrazně nižší výskyt pomezity. To je dáno především tím, že tloušťka stěny v kritickém místě nepřesahuje hodnotu 10 mm. Rychlost tuhnutí je tedy vyšší než u vzorku odlitku ze skupiny A.

Odlitek B – nastavení N0

Na rozdíl od vzorku N70 je zde patrná výrazná pomezita. Ta je soustředěna do tepelné osy stěny odlitku. Posunutí tepelné osy od geometrické osy stěny je způsobeno efektivnějším chlazením formy. Naopak zalité jádro, které tvoří dutinu uvnitř příruby odlitku, nestíhá odvádět teplo interním ani externím chlazením.



Obr. 10-6 Makrosnímek vzorku z odlitku B, nastavení N70



Obr. 10-7 Makrosnímek vzorku z odlitku B, nastavení N0

10.2.1 Výskyt vzduchové pomezity v odlitku B

Při následném obrobení odlitků B a vyhodnocování pomezity byla zaznamenána mírně zvýšená pomezita v určitém místě odlitku, viz Obr. 10-8. Je zde patrný lokální výskyt vady oblého tvaru s lesklým a hladkým povrchem. Tloušťka stěny, ve které se vada vyskytuje, je 4 mm, dochází tedy k velice rychlému tuhnutí. Charakteristika vady

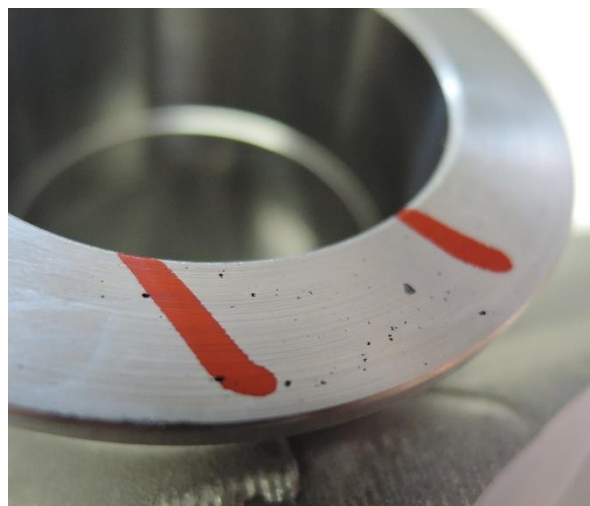
odpovídá vzduchové porezitě. Jelikož výskyt vady je v místě, které je špatně dostupné pro ošetření formy, může vada souviset se zbytkem postřiku. Ten při vypařování tvoří plyny, které mohou být v odlitku uzavřené.

Jelikož předmětem zkoumání je především porezita vodíková, není na výskyt této vzduchové porezity brán zřetel.

Na Obr. 10-9 a Obr. 10-10 je viditelný lokální výskyt vady. Zároveň je také patrná rozdílná velikost jednotlivých pórů, což snižuje pravděpodobnost vlivu vodíkové porezity. Na Obr. 10-11, Obr. 10-12, Obr. 10-13 je viditelný lesklý povrch jednotlivých bublin.



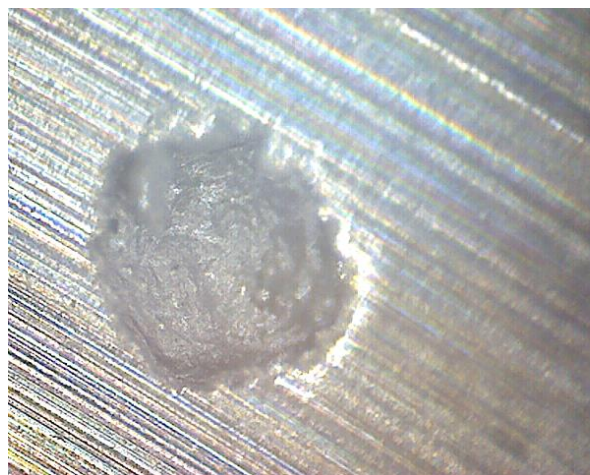
Obr. 10-8 Odlitek B, pohled na malou přírubu



Obr. 10-9 Detail vady na malé přírubě, lokální porezita



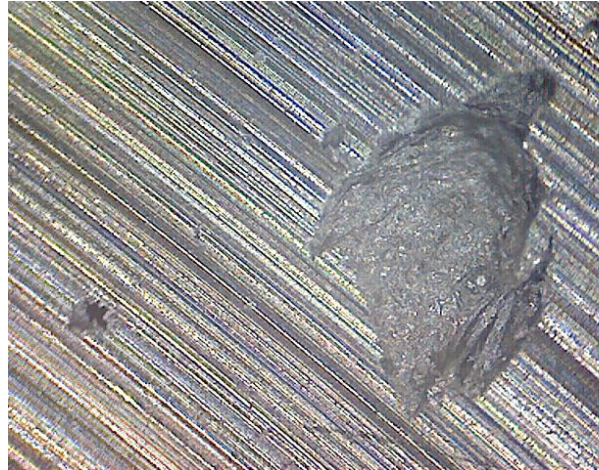
Obr. 10-10 Detail vady na malé přírubě



Obr. 10-11 Makrosnímek vady vyskytující se na malé přírubě, vada 1



Obr. 10-12 Makrosnímek vady vyskytující se na malé přírubě, vada 2



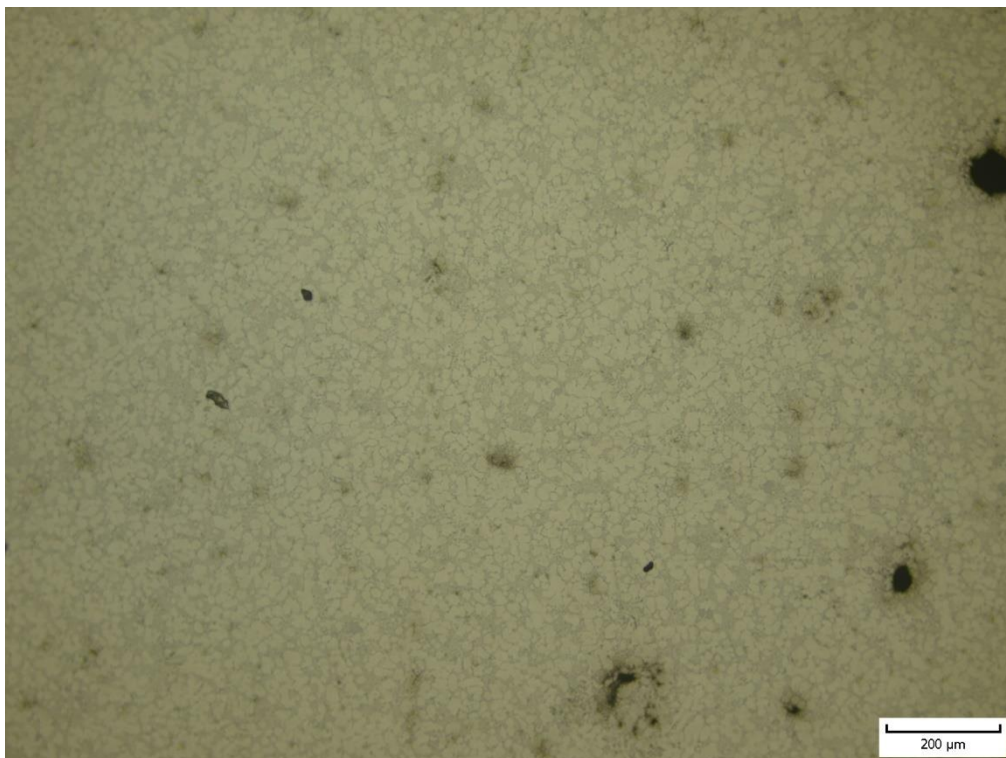
Obr. 10-13 Makrosnímek vady vyskytující se na malé přírubě, vada 3

10.3 Vyhodnocení mikrostruktury

Snímky struktury vzorku a detailní zobrazení vad slouží k určení jejich původu. Zde je velmi důležité rozlišovat, zda se jedná o vodíkovou porezitu, či o vzduchovou porezitu, někdy označovanou jako zahlcený vzduch.

Odlitek A při nastavení N150

U vzorku litého za standardního stavu, tedy při nastavení N150, bylo možné na snímcích mikrostruktury pozorovat občasný výskyt porezity. Převážně se jednalo o vzduchovou porezitu, viz Obr. 10-14.



Obr. 10-14 Mikrostruktura odlitku A při nastavení N150

Malé bubliny na Obr. 10-15 byly vyhodnoceny jako vzduchová pomezita. Přestože jejich rozměr je velmi malý (mezi 20 až 80 μm), což může napovídat pomezitě vodíkové, nepředpokládá se její výskyt v odlitku litého z hluboce odplyněné taveniny. Zároveň malá četnost výskytu nasvědčuje, že mechanismus vzniku je spíše uzavřený vzduch. Obr. 10-16 ukazuje zaostření na dno z otevřených pórů, kde je zřetelně viditelný lesklý a hladký povrch, který je způsoben oxidací.

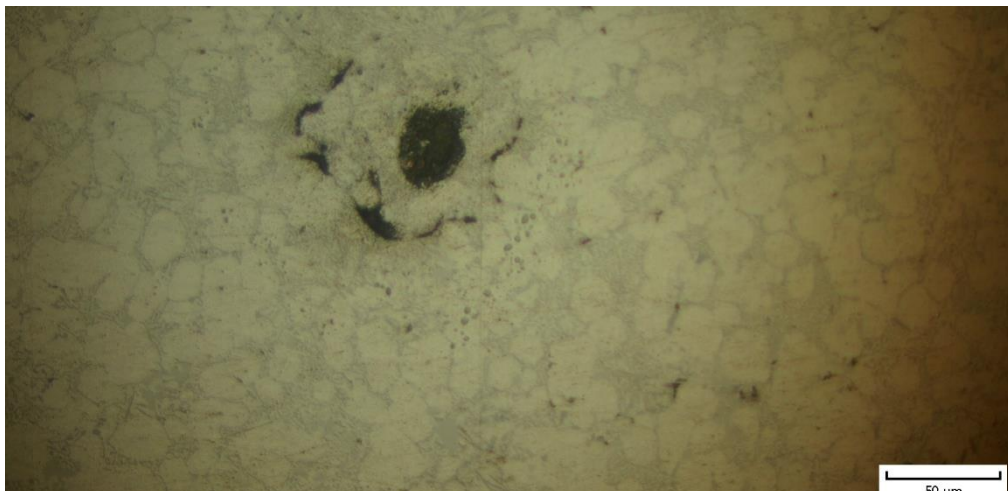
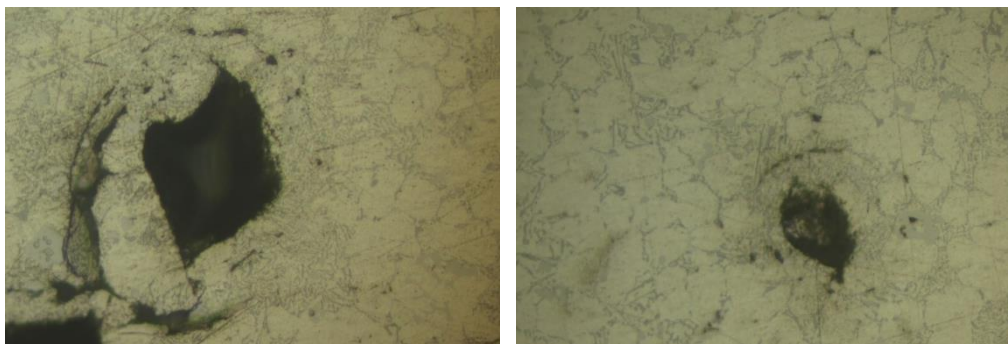


Obr. 10-15 Mikrostruktura odlitku A při nastavení N150, vzduchová pomezita



Obr. 10-16 Mikrostruktura odlitku A při nastavení N150, vzduchová pomezita

Dále je na vzorcích možné pozorovat vadu charakteristického tvaru, viz Obr. 10-17. Nutno podotknout, že vada se při nastavení N150 vyskytuje méně často, než na vzorcích N90 a N70. Jedná se pravděpodobně o oxidickou blánu s pomezitou uprostřed. Je pravděpodobné, že na výskyt této vady má vliv rafinace kovu.

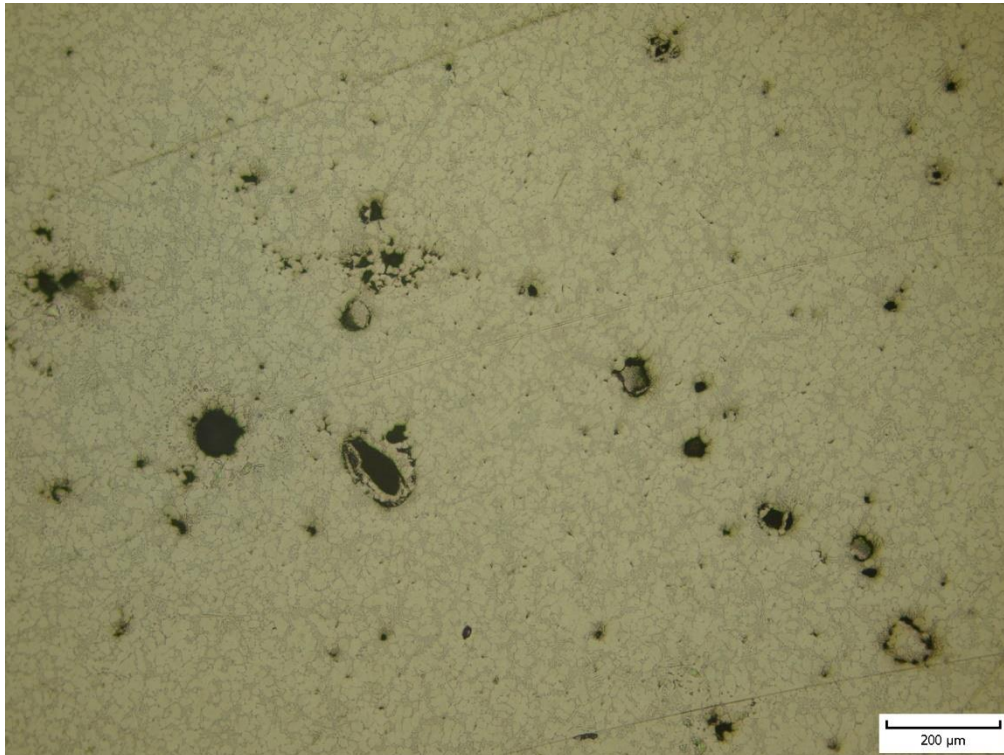


Obr. 10-17 Ukázka vady s charakteristickým tvarem

Odlitek A při nastavení N90

Na 10-18 lze pozorovat zvýšený výskyt porezity. Především je patrná vyšší frekvence výskytu kombinované vady oxid a porezita. Je možné pozorovat, že tyto vady se vyskytují v různých velikostech.

Viditelné je i zvýšení výskytu velice malé porezity (mikroporezita), která dosahuje rozměrů v jednotkách μm , její rozložení je poměrně rovnoměrné v prostoru pozorovaného vzorku. Jelikož jednotlivé póry jsou od sebe oddělené a jen ojediněle tvoří shluky, lze jejich výskyt přisuzovat vodíku.



Obr. 10-18 Mikrostruktura odlitku A při nastavení N90

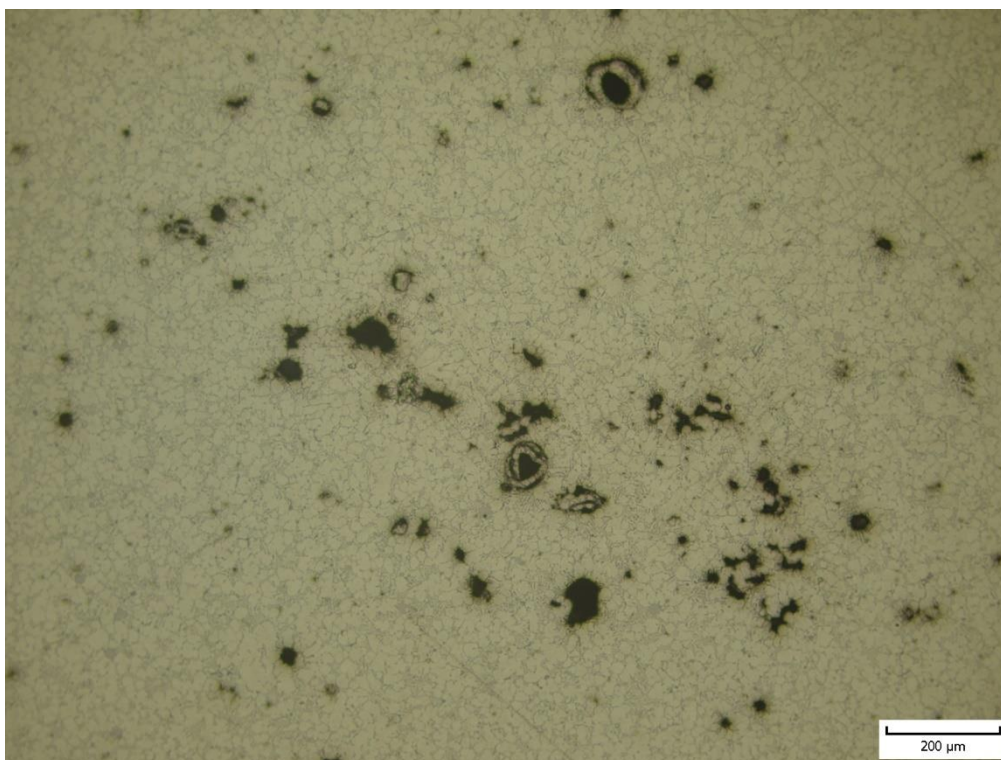
Ve fázi, kdy je v tavenině zvýšené množství vodíku, může zároveň docházet k difuzi vodíku do staženin, do prostoru vzduchové porezity, nebo do okolí oxidických blan, které se v kovu nacházejí. Vlivem vysokého tlaku v prostoru formy však nepředpokládáme nijak výrazný přírůstek objemu od difundujícího vodíku.

Odlitek A při nastavení N70

Při nastavení N70 již přírůstek porezity zobrazené na snímcích mikrostruktury není tak velký jako v případě rozdílu N150 a N90.

Mikroporezita se vyskytuje ve zhruba stejné četnosti jako v případě nastavení N90.

Mírné zvýšení výskytu je znatelné u vady typu oxid a porezita, což může indikovat, že vada souvisí s množstvím rozpuštěného vodíku v tavenině.

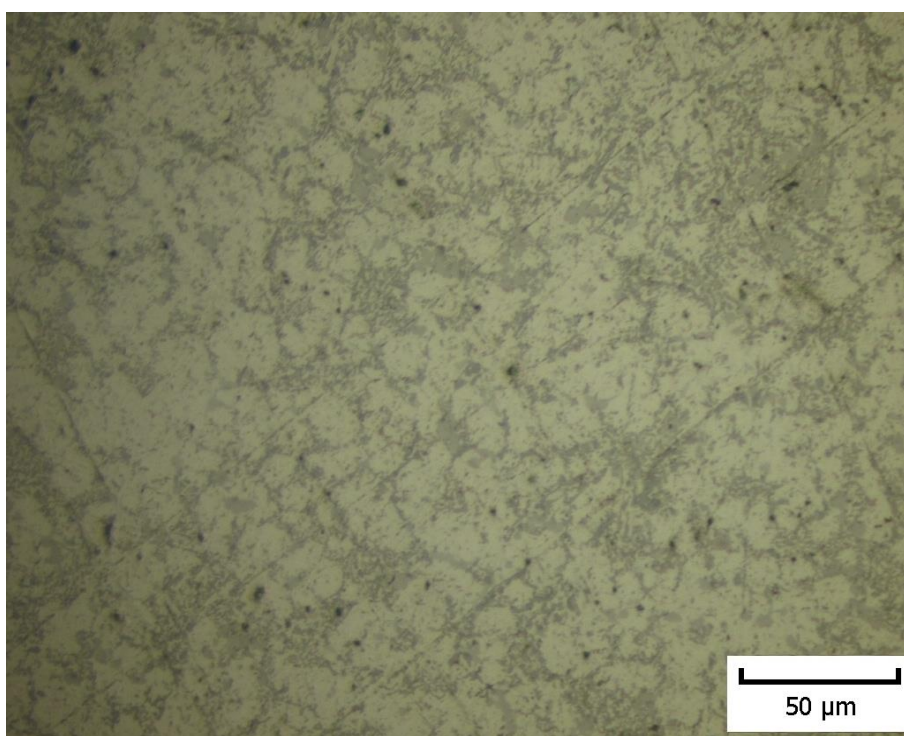


Obr. 10-19 Mikrostruktura odlitku A při nastavení N70

Odlitek A při nastavení N0

Z důvodu chybného odebrání vzorku není výsledek mikrostruktury reprezentativní a vhodný pro srovnání.

Odlitek B při nastavení N150



Obr. 10-20 Mikrostruktura odlitku B při nastavení N150

Vzorky struktury odlitků litých při standardním odplynění ukazují, že určité množství porezity se vyskytuje i za těchto podmínek. Vzhledem k nízkému stupni DI a velmi vysoké rychlosti ochlazování lze předpokládat, že se nejedná o vodíkovou porezitu. Zároveň lze také usuzovat, že se jedná o uzavřený vzduch, neboli vzduchovou porezitu. To potvrzuje také velikost a rozptýlení vady napříč vzorkem.

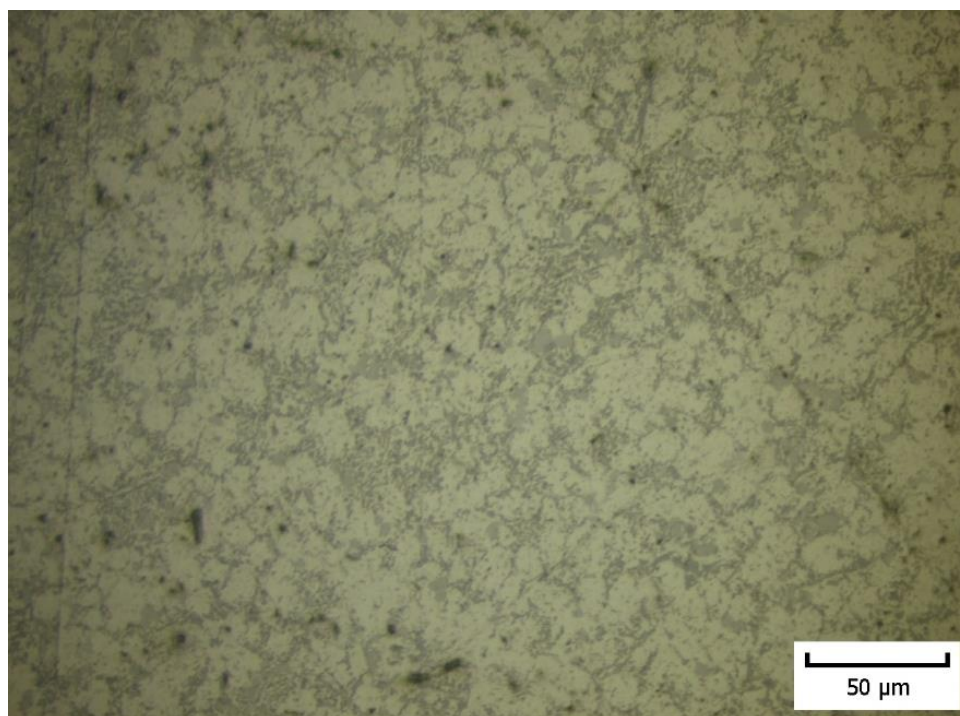
Při pohledu na konstrukci odlitku lze vadu přisuzovat absenci dotlaku ve třetí fázi lití odlitku. Průřezy stěn, velikost naříznutí a vzdálenost pozorovaného místa od vtoku indikují, že dochází k zatuhnutí kovu ve středové části odlitku dříve, než dojde ke kompletnímu zatuhnutí v místě velké příruby (pozorované místo). Dotlak, který má plnit funkci nálitku a dosazovat tekutý kov, nemůže skrze zatuhnuté průřezy působit a dosazovat kov do vznikajících staženin. Malá velikost pórů indikuje, že dotlak přestává působit až ke konci tuhnutí.

Větší vady jako vzduchová porezita či oxidické pleny nebyly na vzorku pozorovány ve zvýšené míře.

Odlitek B při nastavení N90

Pro toto nastavení nebyl odlit žádný vzorek ze skupiny B. Výroba odlitku z této skupiny se zahájila až druhý den experimentu, tedy první vzorek byl odebrán až při režimu odplynění N70.

Odlitek B při nastavení N70

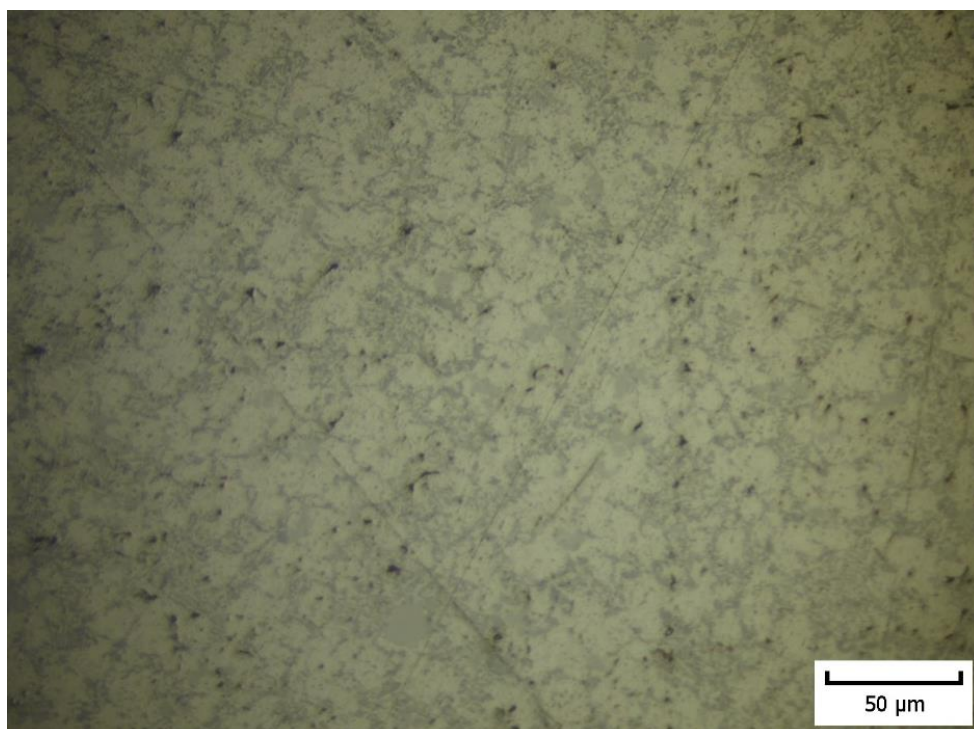


Obr. 10-21 Mikrostruktura odlitku B při nastavení N70

Srovnání nastavení N70 a N150 neukazuje výrazný rozdíl v množství vad. Přestože se může zdát, že se jedná o vodíkovou porezitu, její výskyt je vzhledem k rychlosti tuhnutí nepravděpodobný. U odlitku typu A při stejném stupni naplynění nebyla

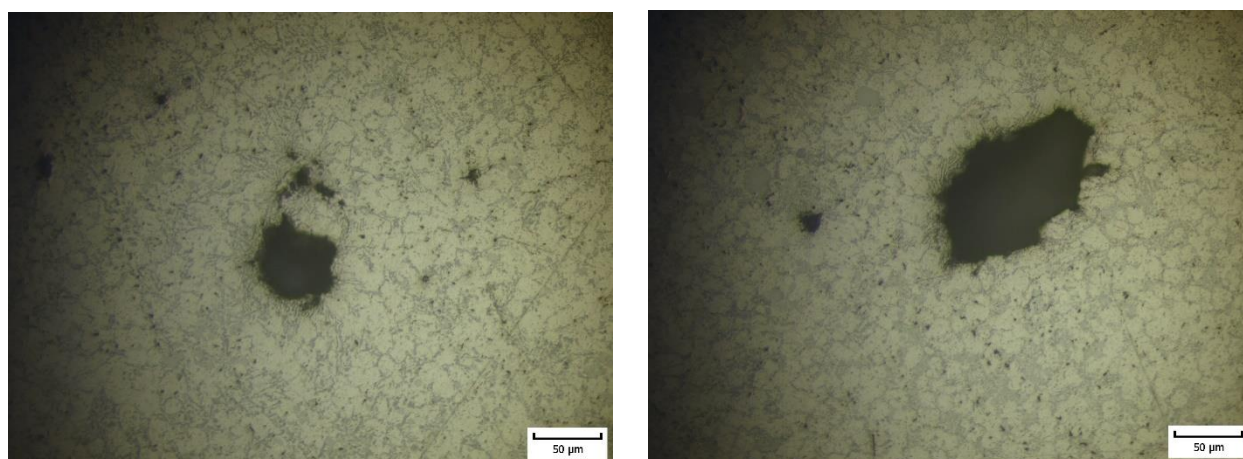
vodíková porezita pozorována i přesto, že doba tuhnutí je vzhledem k tloušťce stěny delší.

Odlitek B při nastavení N0



Obr. 10-22 Mikrostruktura odlitku B při nastavení N0

I zde je patrný výskyt velkého množství mikrostaženin. Na základě pozorování lze potvrdit, že výskyt mikrostaženin je mírně frekventovanější ve srovnání se vzorky N150 a N70. Je však možné konstatovat, že bylo zaznamenáno zvýšené množství vzduchové porezity. Příklad takové porezity je na Obr. 10-23.



Obr. 10-23 Mikrostruktura odlitku B při nastavení N0, ukázky vzduchové porezity

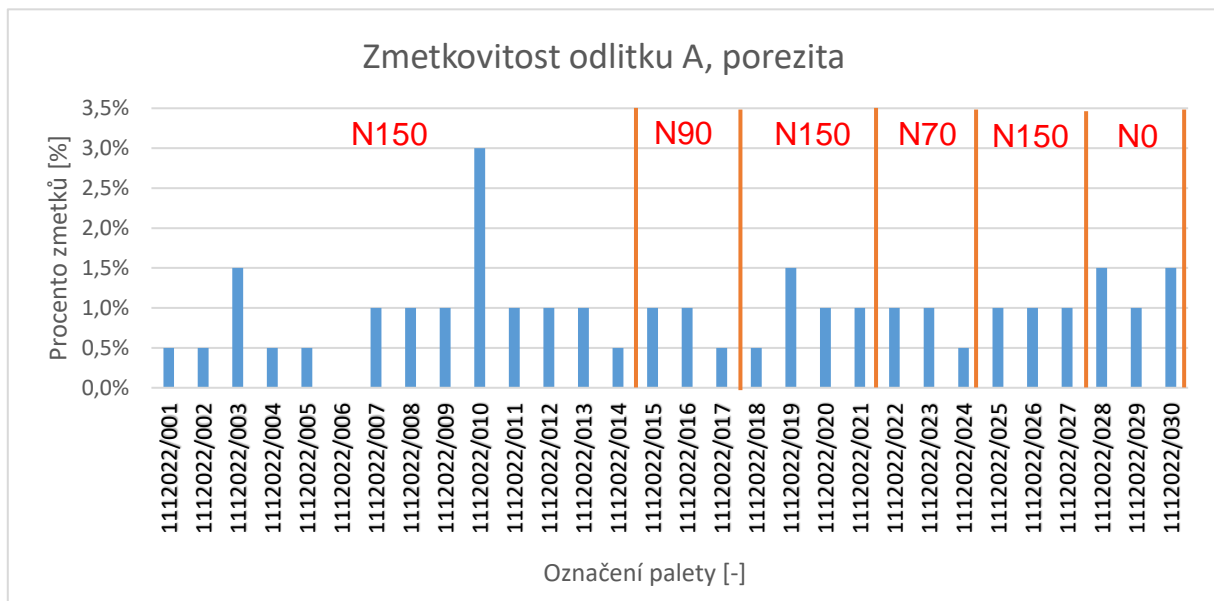
10.4 Statistické výsledky

Data pro statistické vyhodnocení byla získána z interního systému slévárny.

10.4.1 Porezita

Porezita je vyhodnocována po obrobení odlitku. Obrobené plochy jsou kontrolovány a v případě, kdy porezita přesáhne povolenou toleranci, je odlitek označen jako zmetek.

Odlitek A



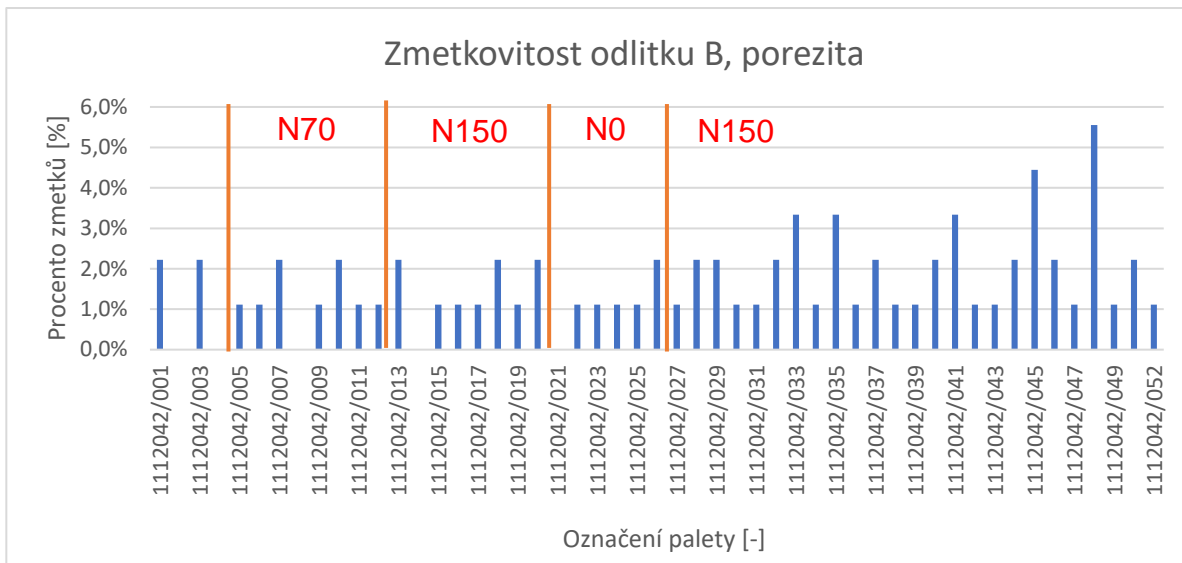
Obr. 10-24 Výsledky zmetkovitosti vady porezita, odlitek A

Na grafu je znázorněn výsledek zmetkovitosti u jednotlivých palet. V průběhu experimentu byly odlitky ukládány do palet podle standartního předpisu pro výrobu, přičemž každá paleta obsahovala cca 200 kusů odlitku A a 90 kusů odlitku B. Odlitky byly sledovány skrze evidenční číslo palety kvůli praktičtějšímu vyhodnocování.

V grafu jsou červenými čarami vyznačeny palety, které spadají do skupiny odlitků s příslušným režimem odplynování. V případě odlitků litých při nastavení N90 a N70 nelze konstatovat, že procento zmetkovitosti se výrazně změnilo. Avšak u nastavení N0 je možné pozorovat mírný nárůst. Jelikož ale hodnota zmetkovitosti při nastavení N0 také není výrazná, lze konstatovat, že zásahy do naplynění taveniny neměly výrazný vliv na zmetkovitost odlitku z pohledu porezity.

Odlitek B

Jak již bylo zmíněno, odlitek B se začal vyrábět až v průběhu experimentu. Ve statistickém zobrazení proto chybí vyznačené palety pro nastavení N90. Na rozdíl od odlitku A, licí série pokračovala po ukončení experimentu. Je tak možné pozorovat, jak se vyvíjí výskyt porezity po ukončení experimentu.

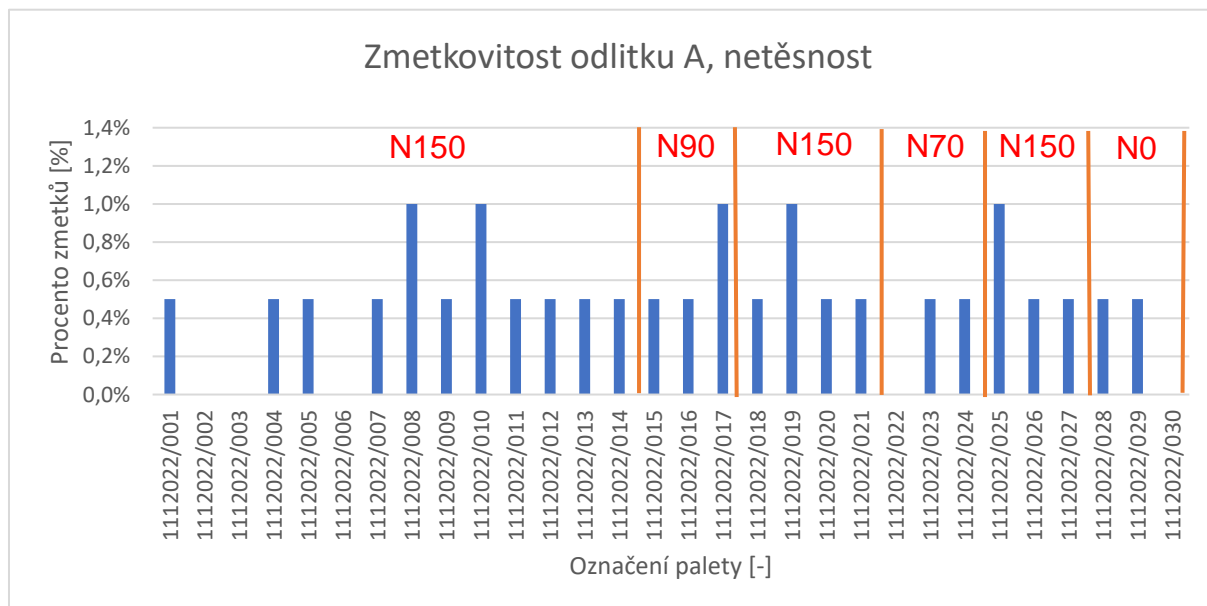


Obr. 10-25 Výsledky zmetkovitosti vady porezita, odlitek B

Podobně jako u odlitku A, není patrné, že by nastavení N70 nebo N0 zvyšovalo výskyt porezity. Hodnoty zmetkovitosti se drží standartního rozmezí. Zvýšené hodnoty zmetkovitosti po ukončení experimentu mu nejsou přisuzovány. Jelikož hodnoty DI v udržovací peci rychle klesají a současně dochází k dolévání silně odplyněného kovu, je návrat ke standartnímu procesu velice rychlý.

10.4.2 Netěsnost

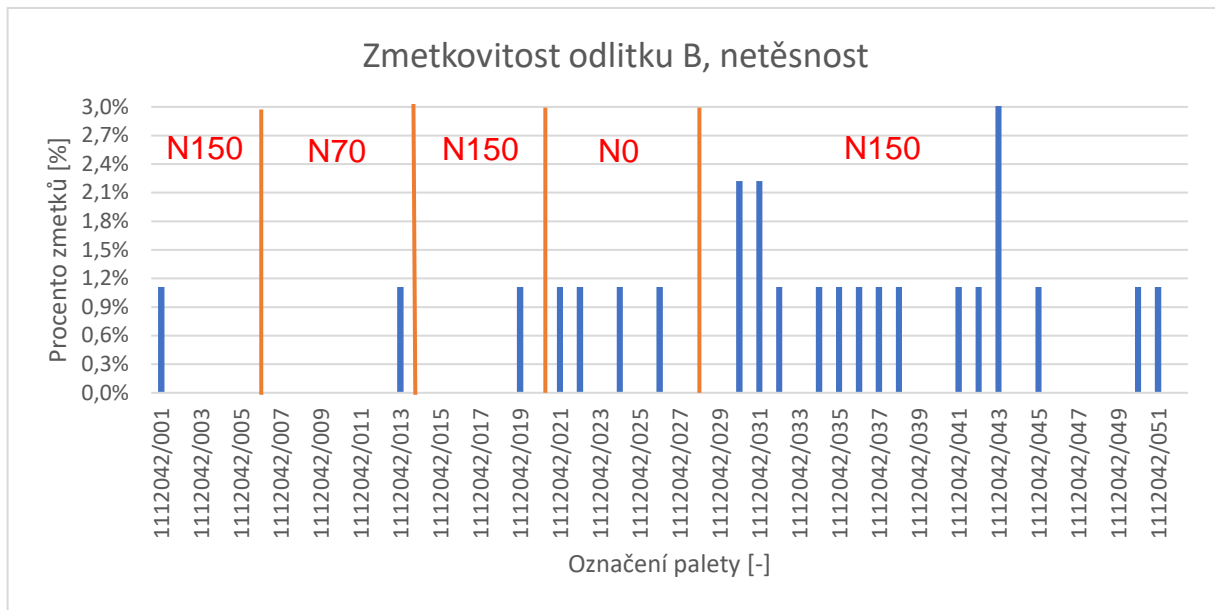
Odlitek A



Obr. 10-26 Výsledky zmetkovitosti vady netěsnost, odlitek A

Výsledky zmetků netěsnosti neukazují zvýšený výskyt této vady na odlitcích litých během experimentu. Lze proto předpokládat, že netěsnost odlitků se s větším DI taveniny nezhoršuje.

Odlitek B



Obr. 10-27 Výsledky zmetkovitosti vady netěsnost, odlitek B

Vady netěsnosti na odlitku B ukazují poměrně velkou nestabilitu v průběhu licí série. Výsledky ukazují, že některé palety s odlitky litými při nastavení N70 i N0 dosahují 0 % zmetků. I zde lze tvrdit, že experiment neměl vliv na výskyt této vady. Její mírně zvýšený výskyt v druhé polovině licí série koresponduje se stejným zvýšeným výskytem porezity, viz Obr. 10-27.

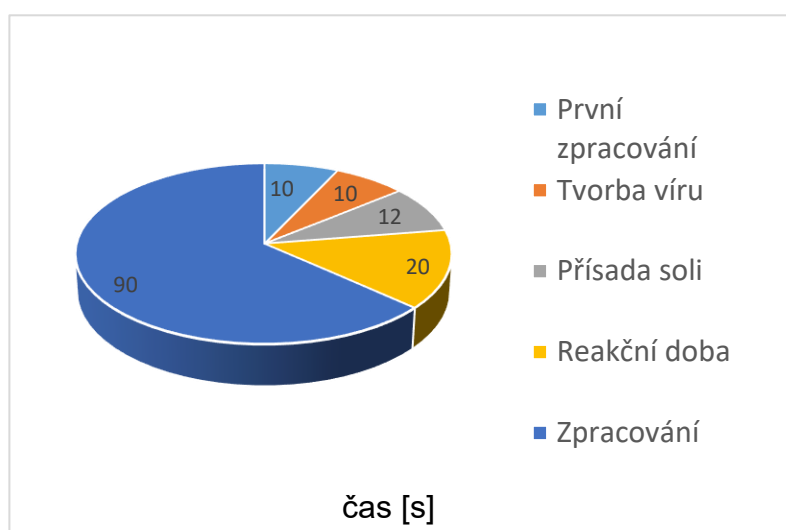
11 OVĚŘENÍ EXPERIMENTU

Ověření experimentu je provedeno pomocí dlouhodobé zkoušky. Vlivy krátkodobých uprav režimů odplyňování mohou být totiž zkresleny celou řadou proměnných, které se v provozu slévárny mohou vyskytovat.

11.1 Podmínky pro ověření experimentu

Nastavení procesu odplyňování

Během ověřování bude nastaven pouze jeden režim, který bude nastaven po celou dobu experimentu. Byl zvolen režim N90, tedy doba zpracování 90 sekund. Ostatní časy procesu nebyly změněny, viz Obr. 11-1. Všechna tavenina, která odcházela z tavníky, byla tedy upravena právě při tomto nastavení.



Obr. 11-1 Rozložení časů fází odplyňování při ověření experimentu

Délka experimentu

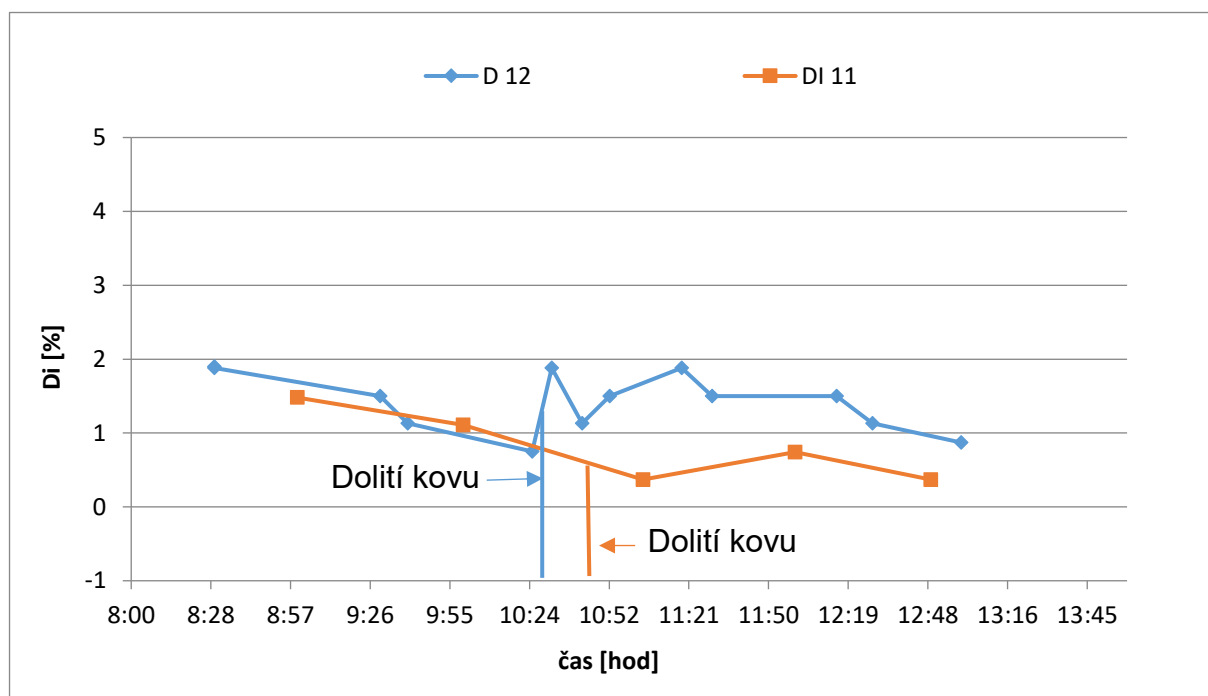
Jako optimální doba pro získání dostatečného množství dat byl zvolen časový úsek 14 dní. Předpokládá se, že již během prvního týdne se hodnoty DI taveniny v udržovacích pecích ustálí na nové rovnovážné hodnotě odpovídající změně provedené při jejím zpracování.

11.2 Vliv režimu odplyňování na naplynění taveniny v udržovací peci

Na rozdíl od první fáze již nebyly odebírány vzorky DI před a po procesu odplyňování. Klíčové zde bylo především určit, jakých hodnot DI je dosahováno v udržovacích pecích a zda se tyto hodnoty mění v průběhu dne. Poté bylo zvláště podstatné určit vliv dolévání kovu do udržovací pece.

Prioritní bylo odebírat vzorky z udržovací pece číslo 12, tedy ze stejné pece jako v první fázi experimentu. Vzorky jsou označeny jako „DI 12“. Zároveň byly odebírány vzorky z udržovací pece číslo 11, ve které ale byla jiná slitina, a to AlSi9u3(Fe).

Tyto vzorky jsou označeny jako „DI 11“. Měření bylo provedeno 7 dní po zahájení experimentu a odběr vzorků probíhal během jednoho dne.



Obr. 11-2 Průběh hodnot DI v udržovací peci č. 12 a č. 11

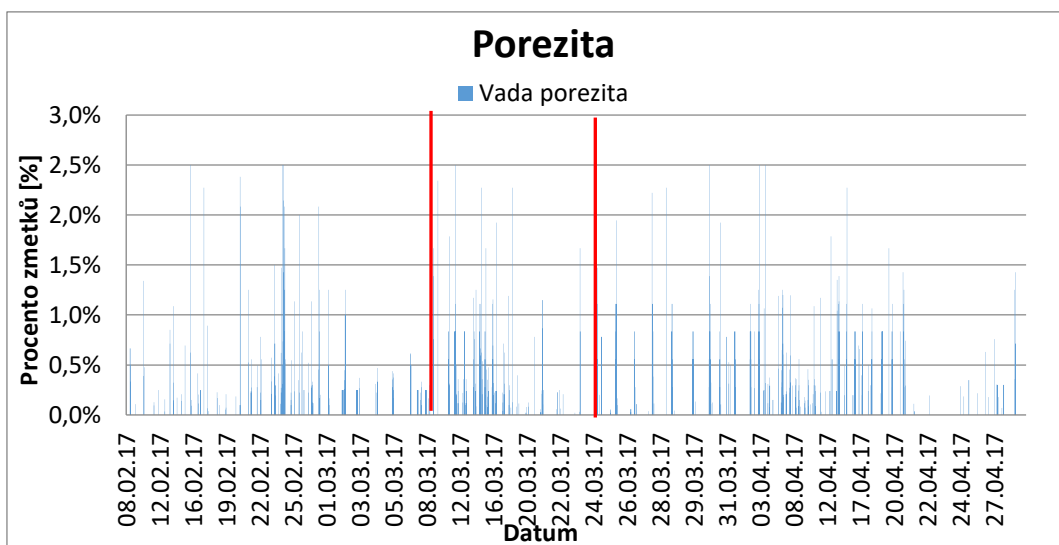
Výsledky z Obr. 11-2 ukazují, že hodnoty DI v udržovacích pecích nepřesahují 2 % DI. Hodnoty naměřené v první fázi ale ukazují, že DI taveniny v udržovací peci místy přesáhlo i hranici 3 % DI. To lze přisuzovat nepřesnosti měření DI, která je dána charakterem použité metody. I přesto je však patrné, že hodnoty DI v udržovací peci nestoupají a nepřibližují se DI dolévané taveniny. Tento jev lze přisuzovat udržovací peci, která prokazuje samoodplyňovací schopnost.

Je také viditelný rozdíl mezi hodnotou DI v peci 11 a v peci 12. To může být způsobeno několika vlivy. První a nejpodstatnější je druh obsahované slitiny. V kapitole 1.2 Rozpustnost vodíku na Obr. 1-2 a Obr. 1-3 je viditelné, že mangan zvyšuje rozpustnost vodíku a měď jeho rozpustnost snižuje. Tyto poznatky korespondují s naměřenými hodnotami, jelikož slitina v peci číslo 11 obsahuje násobně vyšší obsah mědi než slitina v peci číslo 12. Dalším vlivem je teplota taveniny. V udržovací peci číslo 12 byla teplota 695 °C a v peci číslo 11 byla 690 °C. I takto malý rozdíl v teplotách má vliv na rozpustnost vodíku.

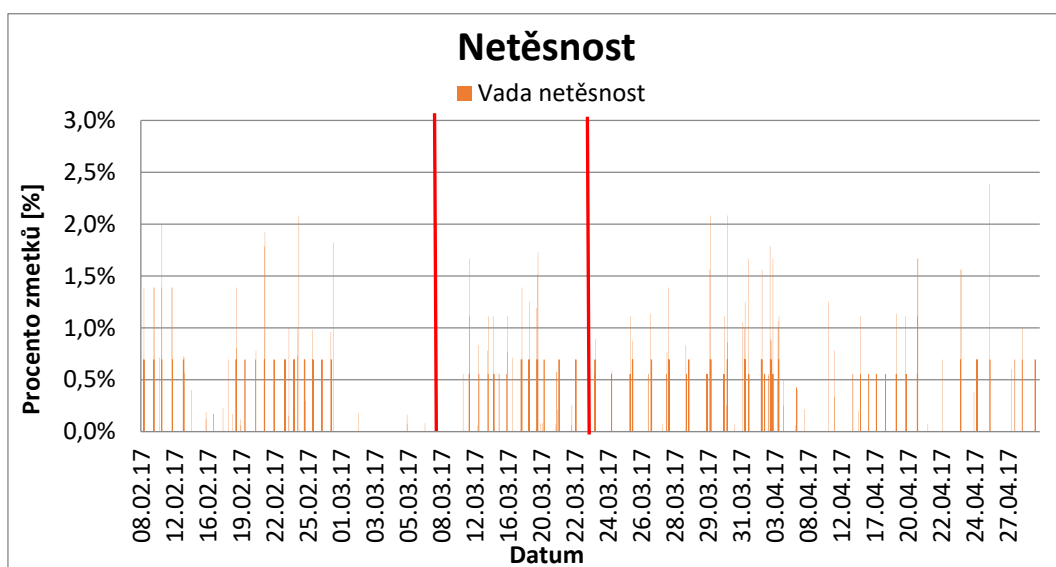
Pozorovatelný je prudký nárůst hodnot po dolití tekutého kovu. Ten dosahuje hodnot naplynění cca 5 až 7 % DI. Při smíchání s taveninou, která zůstává v peci, dochází k nárůstu o cca 1 % DI. Poté však dochází k poklesu hodnot DI na hodnoty před dolitím kovu. V případě, že bude vyšší odběr kovu z udržovací pece je možné, že bude dosahováno vyšších hodnot DI.

11.3 Statistické výsledky

Dlouhodobý experiment probíhal od 10. 3. 2017 do 24. 3. 2017. V rámci srovnání dat jsou v grafu zobrazeny hodnoty za období únor až duben roku 2017.



Obr. 11-3 Zmetkovitost odliktů na vadu porezita za období únor až březen



Obr. 11-4 Zmetkovitost odliktů na vadu netěsnost za období únor až březen

Data pro Obr. 11-3 i Obr. 11-4 jsou souhrnem výsledků zmetkovitosti pro jednotlivé palety s odliktými litými na všech tlakových licích strojích. V grafu je červenými čarami vyznačený časový úsek, kdy probíhala dlouhodobá zkouška.

Je viditelná vyšší hustota výskytu porézniých kusů v jednotlivých paletách v období 11. 3. až 18. 3. 2017. Tento trend ale nepřetrvává celé zkušební období, což snižuje pravděpodobnost, že souvisí s experimentem. Zároveň nelze potvrdit, že úprava procesu má zanedbatelný dopad na výskyt vady porezita.

Při pohledu na Obr. 11-4 je patné, že k nárůstu netěsniých kusů nedošlo. Je tedy možné potvrdit hypotézu, že vyšší míra naplynění nemá výrazný vliv na výskyt vady netěsnost.

12 ZÁVĚR

Podstatou práce bylo ověřit, zda má kratší doba procesu odplyňování zanedbatelný vliv na výskyt vad odlitku. Především se jednalo o vady typu porezita a netěsnost.

Optimalizace procesu odplyňování

Pro získání taveniny s vyšším obsahem vodíku, než je standartní byl zkracován proces odplyňování. Během experimentu proběhlo postupné zkrácení určité části procesu ze 150 sekund na 90, 70 a také na 0 sekund. Bylo vyhodnoceno, že odstavení procesu (0 s) je z praktického hlediska nevhodné a zkrácení na 70 sekund může ohrozit kvalitu rafinace taveniny. Proto byl zvolen čas 90 sekund, který se posléze aplikoval i při ověření experimentu. Je nutné podotknout, že zkrácení na 90 sekund představuje v rámci pracovní směny nemalou časovou úsporu.

Měření naplynění taveniny

Během experimentu bylo provedeno několik měření hodnot naplynění. Bylo zjištěno, že při zkrácení procesu odplyňování na 90 sekund je dosahováno hodnot Dichte Indexu v rozmezí 5 až 7 %. Pro vyhodnocování přesné závislosti mezi naplyněním taveniny a výskytem vad však není metoda měření Dichte Indexu příliš vhodná, z důvodu nepřesnosti metody.

Makrosnímky

Při pozorování řezných ploch na makrosnímcích bylo zjištěno, že u déle tuhoucích stěn je znatelný nárůst porezity. V tenkých stěnách byl tento efekt pozorován až u úplného odstavení procesu odplyňování. Nepředpokládá se však, že by se porezita projevila na obráběných plochách. Příklad pro obrábění je většinou do 0,5 mm od povrchu odlitku.

Snímky mikrostruktury

Na výbrusech byly pozorovány převážně vady charakteru uzavřený vzduch nebo mikrostaženina. Zároveň se v tepelných uzlech vyskytovala vada nespecifikovaného původu. Jednalo se o oxidickou blánu kulovitého tvaru s porezitou uprostřed. Souvislost této vady s vyšším obsahem vodíku nebyla potvrzena. Je však pravděpodobné, že souvisí s rafinací odlitku, která je při kratších časech odplyňování slabší.

Statistické výsledky

Vyhodnocení statistických trendů při dlouhodobém experimentu ukázalo, že při režimu N90 byl zaznamenán mírný nárůst výskytu vady porezita. Vada netěsnost nezvýšila četnost výskytu. Nelze však potvrdit hypotézu, že nárůst porezity souvisí se změnou odplyňovacího režimu nebo mírou naplynění. Výskyt porezity závisí na mnoha okolnostech, například nastavení licích periferií, licích parametrů stroje, typů odlitků atd. Z tohoto důvodu je statistické pozorování obtížné.

Doporučení

Na základě výše uvedených informací je doporučeno provést další dlouhodobé ověření experimentu (alespoň dva měsíce) při režimu odplyňování N90.

SEZNAM ZDROJŮ

1. ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6
2. MIRZAEI, Behzad. *Oxide hydrogen interaction and porosity development in Al-Si foundry alloys*. Norwegian University of Science and Technology, 2011. Master's thesis. Norwegian University of Science and Technology. Vedoucí práce Ragnhild Aune.
3. IGNASZAK, Z. a J. HAJKOWSKI. Contribution to the Identification of Porosity Type in AlSiCu High-Pressure-Die-Castings by Experimental and Virtual Way. *Archives of Foundry Engineering*. 2014, 2015(1), 9. ISSN 1897-3310.
4. JANKES, Erik. *Využití řízeného naplynování slitin Al-Si při tlakovém lití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2015. 74 s. 26 příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
5. MTS 1500: AUTOMATED MELT TREATMENT STATION. In: *Vesuvius.com: SMARTT Degassing* [online]. 2017 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment/brochures/MTS-e.pdf.downloadasset.pdf>
6. KAUFMAN, J. Gilbert a Elwin L. ROOY. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. ASM International, 2004. ISBN ISBN: 0-87170-803-5.
7. KAŇA, V. a J. ROUČKA. Zkouška vlivu dusíku a argonu na rafinaci a odplynění slitiny AlSi7Mg. *Sborník přednášek ze 7. Holečkovy konference: Metalurgie a technologie slitin neželezných kovů*. 2017, 7(1), 13.
8. SAMUEL, A.M., SAMUEL, F.H.: Various aspects involved in the production of low-hydrogen aluminium casting, *Journal of materials science* 27, (1992), s. 6533-6563
9. The technology of batch degassing for hydrogen removal from aluminium melts utilising different rotor designs. In: <http://www.foundry-planet.com/> [online]. 2011 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://www.foundry-planet.com/fileadmin/redakteur/pdf-dateien/technical-reports/12-12-11-Foseco_batch%20degassing%20for%20aluminium%20melts.pdf
10. Striko Westofen: Dosieren. *Striko Westofen* [online]. 2017 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.strikowestofen.com/produkte/dosieren/westomat/>
11. DOKOUPIL, V. Chemické složení vyráběných slitin - Kovolit. Modřice, 2013, 4s. Interní dokumentace firmy Kovolit. a.s.

12. WALKINGTON, William. NORTH AMERICA DIE CASTING ASSOCIATION. *Die casting defects*[online]. 2003 [cit. 2015-05-25]. Dostupnéz: <http://www.diecasting.org/education/online/courses/publications/515-tsg.pdf>
13. PETI, Ferencz a Lucian GRAMA. *ANALYZE OF THE POSSIBLE CAUSES OF POROSITY TYPE DEFFECTS IN ALUMINIUM HIGH PRESSURE DIECAST PARTS*. 2011, 8(1), 4. ISSN 1841-9267.
14. *Ultraseal: impregnation sealant* [online]. 2017 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.ultrasealamerica.com/porosity/technology/>

SEZNAM SYMBOLŮ

Římské symboly

A	Konstanta pro daný kov	[-]
Al	Hliník	[-]
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	[-]
Al(OH) ₃	Hydroxid hlinitý	[-]
B	Konstanta pro daný kov	[-]
d	Průměr bubliny	[m]
DI	Hodnota Dichte Indexu	[%]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
H	Vodík	[-]
[H]	Rozpustnost vodíku v tavenině	[%]
H ₂ O	Voda	[-]
K	Konstanta	[-]
<i>m_{vzat}</i>	Hmotnost vzorku na vzduchu	[kg]
<i>m_{vzh2o}</i>	Hmotnost vzorku ponořeného ve vodě	[kg]
<i>p_{H2}</i>	Parciální tlak vodíku v okolní atmosféře	[kPa]
S	Rozpustnost vodíku v tavenině	[cm ³ /100g]
T	Teplota kovu	[K]
<i>p_e</i>	Tlak v bublině	[Pa]
<i>P_e</i>	Práce pro vytvoření bubliny	[J]
<i>p_i</i>	Tlak v bublině po zaplnění	[Pa]
<i>P_i</i>	Práce pro zaplnění bubliny plynem	[J]
<i>p_{het}</i>	Parciální tlak vodíku nutný pro heterogenní nukleaci	[MPa]
<i>p_{hom}</i>	Parciální tlak vodíku nutný pro homogenní nukleaci	[MPa]
r	Poloměr bubliny	[m]
ΔG	Gibbsova energie	[J]
<i>v</i>	Rychlost vyplouvání bubliny	[m/s]
<i>V_{vz}</i>	Objem vzorku	[m ³]

Řecké symboly

γ	Energie mezifázového rozhraní na jednotku plochy	[J]
η	Dynamická viskozita kovu	[N.s/m ²]
θ	Povrchové napětí mezi zárodkem a plynem	[°]
π	Poissonova konstanta	[-]
ρ	Hustoty kovu a plynu	[kg/m ³]
ρ_{h2o}	Hustota vody	[kg/m ³]
ρ_{vz}	Hustota vzorku	[kg/m ³]
$\rho_{vz atm}$	Hustota vzorku tuhnutého za atmosférického tlaku	[kg/m ³]
$\rho_{vz vak}$	Hustota vzorku tuhnutého za podtlaku	[kg/m ³]
σ_{z-p}	Povrchové napětí mezi zárodkem a plynem	[kg/s ²]
σ_{z-t}	Povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou	[kg/s ²]
σ_{p-t}	Povrchové napětí mezi plynem a taveninou	[kg/s ²]