



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PROBLEMATIKA ODPLYNĚNÍ MENŠÍCH MNOŽSTVÍ TAVENINY U SLITIN HLINÍKU

DEGASSING OF SMALL AMOUNTS OF ALUMINUM ALLOY MELT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivo Spáčil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Ivo Spáčil**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Problematika odplynění menších množství taveniny u slitin hliníku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Odplynění taveniny je jedním ze základních kroků při metalurgickém zpracování slitin hliníku. V provozních podmínkách se běžně odplyňují hmotnosti 200 kg a více taveniny. V takovém množství nečiní odplynění při správném provedení potíže. Problémy ovšem mohou nastat, pokud potřebujeme odplynit menší množství taveniny, do 50–ti kg.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je literární rešerše shrnující problematiku odplynění hliníkových tavenin a také provedení a vyhodnocení experimentů popisujících možnosti odplynění taveniny o hmotnosti do 50 kg v podmínkách školní slévárny VUT v Brně.

Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 978-0-75-6-4790-8.

ZEMČÍK, L. Vodík ve slitinách hliníku. Slévárství. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2012, roč. LX (2-3), s. 154 - 157. ISSN 0037-6825.

BOLIBRUCHOVÁ, D., E. TILLOVÁ. Zlívarenské zliatiny Al - Si. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2005. 180 s. ISBN 80-8070-485-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

SPÁČIL Ivo: Problematika odplynění menších množství taveniny u slitin hliníku

Tavenina o hmotnosti 40 kg byla odplyněna dvěma metodami: Ponoření odplyňovací tablety do taveniny ponorným zvonem a probublávání argonu trubicí s porézní zátkou. V průběhu experimentu byly použity i tablety pro řízené naplynění. Pro vyhodnocení byla použita metoda dvojího vážení. Použitím odplyňovacích tablet nebylo dosaženo technicky významného odplynění. Po odplynění tabletami byl s rostoucím časem odstátí zaznamenán pokles hodnoty DI (Dichte Index). Nadměrné dávkování tablety nezajišťuje vyšší účinek odplynění, pouze zajišťuje vyšší bouřlivost reakce. Předehřev odplyňovacích tablet před použitím nemá vliv na odplynění. Předehřevem naplynovacích tablet je snížena jejich reaktivnost. Byly odzkoušeny dva ponorné zvony s rozdílnou geometrií. Zvony nezajišťují homogenní rozptýlení bublin v tavenině. Probubláváním argonu přes porézní zátku byla tavenina odplyněna na hodnotu $DI=1,87$ %. Spotřeba argonu pro odplynění menšího množství taveniny je vyšší než při odplynění větších množství taveniny. Rafinace plynem je vyšší než s použitím tablet.

Klíčová slova: odplynění, vodík, Dichte index, tablety, rafinace

ABSTRACT

SPÁČIL Ivo: Degassing of small amounts of aluminum alloy melt

The 40 kg melt was degassed by two methods: Immersion of a degassing tablet in a melt by an immersion bell and an argon degassing through a lance with a porous plug. Up-gassing tablets were also used during the experiment. The method of double weighing was used for evaluation. No technically significant degassing was achieved using degassing tablets. After degassing with tablets was observed a decrease in DI (Dichte Index) value with increasing residence time. Excessive dosing of the tablet does not ensure a higher degassing effect, it only ensures a higher turbulence of the reaction. Preheating the degassing tablets before use does not affect degassing. By preheating the up-gassing tablets, their reactivity is reduced. Two immersion bells with different proportions were tested. The bells do not ensure a homogeneous dispersion of bubbles in the melt. By argon degassing through the porous plug, the melt was degassed to a value $DI = 1,87$ %. The consumption of argon for degassing smaller amounts of melt is higher than for degassing larger amounts of melt. Argon refining is more efficient than using tablets.

Keywords: degassing, hydrogen, Dichte index, tablets, refining

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SPÁČIL, Ivo. Problematika odplynění menších množství taveniny u slitin hliníku [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124734>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňa.

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 20.6.2020

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji:

Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Společnosti KOVOLIT Česká, s.r.o. za poskytnutí tablet z jejich provozu a konzultace.

Společnosti PROMET CZ, s.r.o. za dodání tablet a konzultace.

Rodině a přítelkyni za podporu v průběhu tvorby práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	10
1 SLITINY HLINÍKU	11
1.1 Al-Si – Siluminy	11
2 PLYNY VE SLITINÁCH HLINÍKU	13
2.1 Zdroje vodíku	13
2.2 Vodík v čistém hliníku	14
2.3 Rozpusťnost vodíku v Al-slitinách	16
2.3.1 Teplota kovu	16
2.3.2 Tlak	17
2.3.3 Chemické složení	17
2.3.4 Rychlost ochlazování	18
3 VZNIK DUTIN V ODLITCÍCH	19
3.1 Vznik bublin a staženin	19
3.2 Homogenní nukleace	20
3.3 Heterogenní nukleace	20
4 VMĚSTKY A NEŽÁDOUCÍ PŘÍMĚSI	21
4.1 Ochrana taveniny před vodíkem	22
4.1.1 Ochrana tavidly	22
4.1.2 Ochrana plynem	23
5 RAFINACE	24
5.1 Rafinační přípravky	25
5.1.1 Soli rafinující strusku	25
5.2 Proublávání plyny	26
5.3 Odstátí a následná filtrace	26
6 ODPLYNĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN	28
6.1 Proublávání plyny	28
6.1.1 Statická trubice	30
6.1.2 Odplyňovací soli	30
6.1.3 Odplyňovací zařízení FDU	31

6.1.4	High shear degassing	34
6.2	Odplynění vakuováním.....	34
6.3	Metody měření naplynění.....	35
6.3.1	Straube-Pfeiffer (Drosstest)	36
6.3.2	Metoda první bubliny (Dardel)	36
6.3.3	Metoda dvojího vážení.....	36
7	EXPERIMENT ODPLYNĚNÍ	39
7.1	Vedení taveb	40
7.2	Průběh experimentu.....	40
7.2.1	Dávkování.....	41
7.3	První tavba.....	42
7.3.1	Vyhodnocení.....	43
7.3.2	Opatření	44
7.4	Druhá tavba	44
7.4.1	Vyhodnocení.....	45
7.4.2	Opatření:	47
7.5	Třetí tavba.....	47
7.5.1	Vyhodnocení.....	49
7.5.2	Shrnutí.....	50
7.6	Zkouška vypálení tablety.....	51
7.6.1	Experiment.....	51
7.6.2	Vyhodnocení.....	52
7.7	Čtvrtá tavba.....	52
7.7.1	Vyhodnocení.....	54
7.8	Pátá tavba	56
7.8.1	Vyhodnocení.....	57
7.9	Zhodnocení odplynění.....	59
7.9.1	Porovnání rafinačního účinku tablet a argonu	59
8	ZÁVĚRY.....	62

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD

Tavení hliníkových slitin je provázeno absorpcí vodíku a znečištění taveniny nekovovými vměstkami [1]. Platí čím kvalitnější roztavený kov je, tím kvalitnější může být konečný odlitek [2]. V automobilovém průmyslu je stále vyžadováno snižování hmotností jednotlivých dílů za účelem snížení spotřeby pohonných hmot a množství emisí. Tudíž se těžké ocelové a litinové díly nahrazují odlitky ze slitin hliníku, které jsou významně lehčí [3]. Pro splnění požadavků dnešního trhu pro hliníkové odlitky se slévárny zaměřují na zlepšení kvality tekutého kovu vyvinutím procesů k produkci čistého kovu. Tyto procesy eliminují celou škálu nečistot (např. vměstky), které představují vážný problém při výrobě kvalitních odlitků [4]. Pouze 6-8% energie potřebné k produkci primárního hliníku je spotřebována při přetavení hliníku pro sekundární použití, kterou je například výroba odlitků ze slitin hliníku [5]. Při tavení druhotného hliníku se vyskytuje vyšší obsah nečistot a oxidů [6]. Důležité je tedy zařadit pro každou technologii odlévání hliníkových slitin úpravu taveniny, případně její rafinaci. Kromě ocelí jsou slitiny hliníku nejpoužívanějším konstrukčním materiálem [7]. Čistota kovu je stanovena obsahem vodíku, množstvím chemických nečistot a vměstky přítomnými v kovové lázni předtím, než je odlita [8]. Odlitky ze slitin hliníku se dodávají dále do leteckého průmyslu, elektrotechniky a podobně [9].

1 SLITINY HLINÍKU

Hliník je součástí skupiny neželezných kovů. Jeho fyzikální a mechanické vlastnosti se odvíjí od struktury a stupně čistoty [10]. Mechanické vlastnosti hliníku se při teplotách pod 0 °C nemění a zároveň je charakteristický nízkou hmotností. Z těchto důvodů je hliník materiálem číslo jedna v leteckém průmyslu [6; 9; 11]. Při teplotách kolem 200 °C se mechanické vlastnosti hliníku snižují. Výhodou je dobrá pevnost při zmíněné nízké hmotnosti. Nevýhodou je špatná obrobiteľnosť a nízká tvrdost [6; 9]. Některé vlastnosti čistého hliníku jsou uvedeny v Tab.1.

Tab. 1 Vlastnosti čistého hliníku [9; 10; 11].

Chemická značka	Al
Teplota tavení	660 °C
Hustota	2 700 kg/m ³
Krystalická mřížka	Kubická plošně středěná

Ve slévárenské praxi se čistý hliník neodlévá. Odlévají se jeho slitiny, kde základním prvkem je hliník (obsah ve slitině vyšší než 50 %). Dále hlavní přísadové prvky (Si, Cu, Mg, Zn) a vedlejší přísadové prvky [9; 11; 12]. Přísadové prvky jsou přidány do slitiny za účelem zlepšení technologických a zvýšení mechanických vlastností. Tabulka 2 porovnává mechanické vlastnosti čistého hliníku a vybrané slitiny EN AC- $AlSi9Cu3$, označované také DIN 226. Množství a kombinace přísadových prvků určuje vlastnosti slitiny. Dalšími prvky ve slitinách jsou legury pro zlepšení mechanických vlastností a doprovodné prvky [9; 11].

Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností čistého Al a slitiny DIN 226 [10; 11; 12; 13].

Slitina	Čistota	R _m	R _{p0,2}	A ₁₀	HB
Čistý hliník	99,99 %	50	22	65	20–30 [13]
DIN 226	-	240	140	A ₅₀ ≤ 1	Min. 75 [10]

Výhodami hliníkových slitin jsou nízké teploty tavení z důvodu přítomnosti přísadových prvků, dobrá zabíhavost, úzké pásmo tuhnutí a odolnost vůči korozi [9; 11].

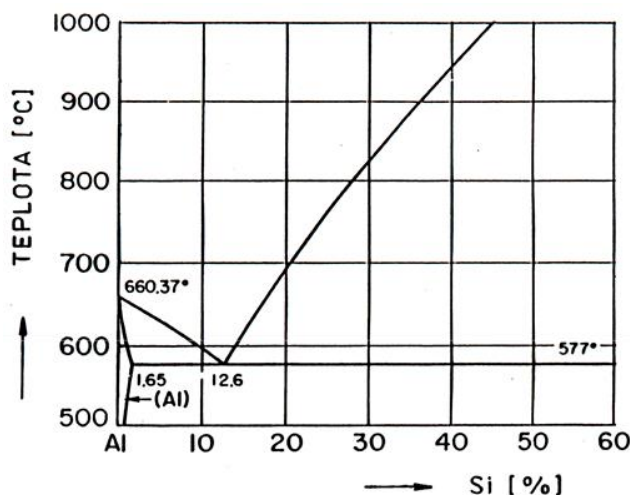
Hliníkové slitiny lze rozdělit do dvou skupin: pro tváření nebo slévárenské slitiny. Složení slévárenských slitin a slitin pro tváření se liší zejména obsahem prvků, které zlepšují slévárenské vlastnosti. Tyto prvky zároveň zhoršují plastické vlastnosti slitin (Si, Mg, Cu, Ti, Fe, Na, Sn, K, Be, Li) [12].

Pro výrobu odlitků se především používají slitiny hliníku, které se dělí dle hlavních přísadových prvků: Siluminy (Al-Si), Duralaluminium (Al-Cu), Hydronalium (Al-Mg) [11]. Jsou vhodné pro výrobu tvarových odlitků [9]. Mezi slévárenské slitiny patří i předslitiny [12].

1.1 Al-Si – Siluminy

Slitiny hliníku a křemíku se obvykle nazývají siluminy. Tvoří převážnou většinu výroby hliníkových odlitků. Maximální rozpustnost křemíku v hliníku je 1,65 % (Obr. 1), pouze při eutektické teplotě 577 °C. Rozpustnost se snižuje s klesající teplotou. Slévárenské slitiny vždy obsahují eutektikum, tedy přesahují maximální rozpustnost Si v $\alpha(Al)$. Při eutektické teplotě je eutektická koncentrace křemíku 12,6 % Si. Se zvyšujícím se obsahem křemíku ve slitině se zužuje interval tuhnutí a zlepšují se všechny slévárenské vlastnosti. Snižuje se smrštění, vznik mikrostaženin, sklon k tvorbě trhlin za tepla a tepelná roztažnost. Zlepšuje se zabíhavost, korozní odolnost a odolnosti proti otěru. Siluminy s eutektickým složením mají lepší

slévárenské vlastnosti. Legováním mědí, hořčíkem nebo niklem se zlepšují mechanické vlastnosti [9; 11].



Obr. 1 Rovnovážný Al-Si diagram [11]

Slitiny lze rozdělit podle procentuálního obsahu křemíku:

- Podeutektické – 7-11 %.
- Eutektické – 11-13 %.
- Nadeutektické – 13-17 % [11].

Většina hliníkových slitin nevyžaduje tepelné zpracování, odlitky jsou používány v litém stavu [11]. Vliv prvků v siluminech:

- Železo – má negativní vliv na plastické a pevnostní vlastnosti, ale zvyšuje odolnost vůči korozi. Už při malém obsahu tvoří intermetalické sloučeniny. Obsah železa ve slitině se liší dle technologie lití. Gravitační lití do písku připouští obsah železa 0,6 – 0,7 %. Slitiny pro tlakové lití zpravidla obsahují více železa (>1 %). Negativní vliv železa se kompenzuje manganem.
- Měď – obsah přibližně do 5 %. Zlepšuje tvrdost, pevnost, ale snižuje tažnost a korozní odolnost. Rozšiřuje interval tuhnutí, podporuje tvorbu ředin, trhlin za tepla a tvoří intermetalické fáze.
- Hořčíkem (až 0,7 %) stejně jako mědí se Al-Si slitiny legují, kvůli zvýšení pevnostních vlastností po vytvrzení. Účinnost vytvrzení Cu je vyšší než Mg, pouze Mg nesnižuje odolnost proti korozi.
- Titan a bór (Ti, B) – tvoří krystalizační zárodky, dosahuje se zjemněné struktury.
- Sodík, stroncium a antimon (Na, Sr, Sb) se používají jako modifikátory [11; 12].

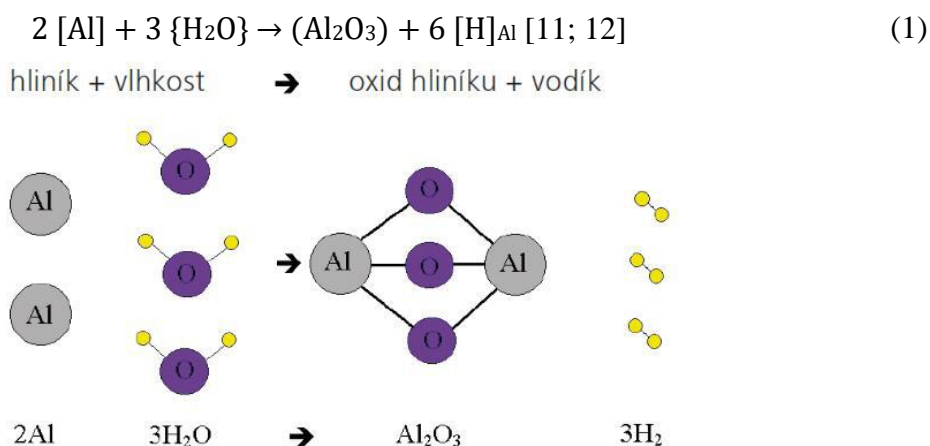
2 PLYNY VE SLITINÁCH HLINÍKU

Tavenina v sobě rozpouští určité množství plynu [14]. Rozpustné plyny v taveninách slitin hliníku jsou především vodík (tvoří 97 % [15]), dále oxid uhličitý, svítiplyn a jiné, jejichž rozpustnost je nevýznamná vzhledem k výsledné kvalitě odlitku. Některé plyny jako kyslík, dusík, oxid uhelnatý mohou tvořit v kovu sloučeniny (nekovové vměstky), například: oxidy, karbidy, nitridy [16]. Pro výrobu vysoce jakostních odlitků je nutné zajistit co nejmenší množství rozpuštěných plynů. Základním předpokladem je tedy znát, odkud se plyny dostanou do roztaveného kovu [14].

2.1 Zdroje vodíku

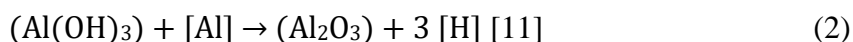
Samotný vodík s hliníkem netvoří sloučeniny. V tavenině je rozpuštěn atomárně a bubliny vytváří molekulárně [16]. Vodík se dostává do taveniny z vlhkosti okolní a pecní atmosféry, vlhkosti vyzdívky odlévacích pánví, tavicích kelímků, přípravků pro čištění taveniny (solí, tavidla), rozkladem fosilních paliv (uhlovodíky) [4]), nátěrů forem, znečištěné vsázky, kondenzací na vlhkém nářadí nebo legujících přísadách [4; 10; 11; 17].

Kontaktem vodní páry a taveniny nastane disociace vody. Reakcí kyslíku a vodíku (obsažených ve vodní páře, v okolní atmosféře nebo v dutině slévárenské formy) s hliníkem vzniká oxid hlinitý [3; 11]. Vrstvu Al_2O_3 je možno pozorovat po natavení vsázkových surovin na hladině tavicího kelímku [16]. Vodík ze vzdušné vlhkosti je rozpuštěn v hliníku dle rovnice (1) [11]. Kyslík má vysokou afinitu k hliníku, proto tvoří oxidickou vrstvu Al_2O_3 na suchém i vlhkém vzduchu [3], viz Obr. 2. Vlhkost tedy nereaguje s oxidy, nýbrž s hliníkem [11]. Zvýšením míchání taveniny dochází ke zvýšené absorpci vodíku [17].

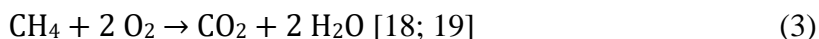


Obr. 2 Absorpce vodíku ze vzdušné vlhkosti [18]

Výrazný vliv na absorpci vodíku a tvorbu oxidů má zoxidovaný povrch vsázkových surovin. V závislosti na skladovacích podmínkách může blána obsahovat 30–60 % $\text{Al}(\text{OH})_3$. Z oxidované vsázky je vodík rozpuštěn dle rovnice 2. Chemicky vázaná vlhkost se těžko odstraňuje i při 900 °C [11; 12].



Spaliny užívaných plynů (C_xH_y) mohou obsahovat cca 10–20 % vodní páry. Zdroj vody při spalování metanu (CH_4) je popsán v rovnici (3). Další používané plyny mohou obsahovat etan (C_2H_6) nebo benzen (C_6H_6) [19]. Spálením 1 m³ metanu se vytváří 2 m³ vodní páry [18]. Tento problém odpadá při používání elektrických pecí [19].



Jedním z dalších zdrojů vodíku může být dodání nekvalitních vsázkových surovin či nekvalitních tavidel, technická nekázeň zaměstnanců slévárny, vliv počasí a jiné [20]. Při odstávce může vyzdívka absorbovat 5–10 % vody z hmotnosti vyzdívky [19].

2.2 Vodík v čistém hliníku

Obecně rozpustnost plynů v roztavených kovech je velmi malá. Rovnováha mezi vodíkem rozpuštěným v tekutém hliníku a plynem obsahujícím vodík udává proces složený z následujících kroků:

1. Přenos plynného vodíku k tekutému kovu.
2. Fyzikální adsorpce vodíku na hladině kovu (van der Waalsovými silami).
3. Disociace molekulárního (plynného) vodíku na hladině.
4. Rozpuštění atomárního vodíku na povrchu taveniny.
5. Přesun vodíku do objemu nataveného kovu [3].

Postup je popsán rovnicí (4) [3], kde (molekulární) plynný vodík z atmosféry $\{H_2\}$ přechází na (atomární) vodík rozpuštěný v tekutém kovu $[H]$ [3; 21].



Obsah vodíku v atmosféře i v tavenině je velice malý. Z toho důvodu je pro něj zvolen stav standardního 1 % roztoku a s ním i spojené Henryho aktivity. Rovnovážná konstanta (K) pro reakci (4) je [3]:

$$K = \frac{a_H}{\sqrt{a_{H_2}}} \quad (5)$$

kde: a_H – Henryho aktivita vodíku v tavenině
 a_{H_2} – aktivita plynného vodíku

Aktivita a_{H_2} je dána vztahem [3]:

$$a_{H_2} = \frac{p_{H_2}}{p_{0H_2}} \quad (6)$$

kde: p_{H_2} – parciální tlak plynného vodíku [Pa]
 p_{0H_2} – standardní tlak vodíku [101 325 Pa]

Úprava vztahu (5) na tvar dle Sievertsova zákona [3]:

$$a_H = f_H * [\%H] = K * \sqrt{a_{H_2}} \quad (7)$$

kde: f_H – Henryho aktivitní koeficient
 $[\%H]$ – koncentrace vodíku v čistém Al [hm.%]

Při uvážení, že standardní tlak vodíku (p_{0H_2}) je konstantní, získáme po úpravě vztahů (6) a (7) další tvar Sievertsova zákona (10) [3; 22]:

$$K = \frac{a_H}{\sqrt{a_{H_2}}} = a_H * \frac{\sqrt{p_{0H_2}}}{\sqrt{p_{H_2}}} \quad (8)$$

$$K_H = \frac{K}{\sqrt{p_{0H_2}}} \quad (9)$$

kde: K_H – konstanta, která je funkcí pouze teploty

$$a_H = f_H * [\%H] = K_H * \sqrt{p_{H_2}} \quad (10)$$

Protože vodík v čistém hliníku nevykazuje odchylku od Henryho zákona, platí pro něj $f_H=1$. Vztahy (7) a (10) jsou zjednodušeny [3]:

$$[\%H]_{Al} = K * \sqrt{a_{H_2}} \quad (11)$$

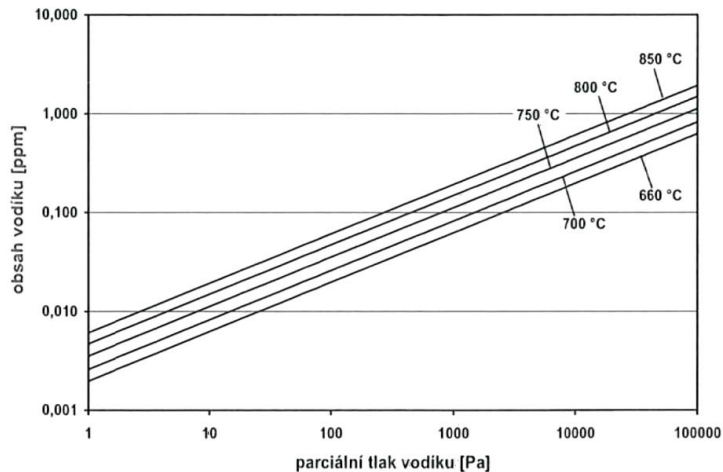
$$[\%H]_{Al} = K_H * \sqrt{p_{H_2}} \quad (12)$$

Pro závislost rozpustnosti vodíku v čistého hliníku $[\%H]_{Al}$ na teplotě T při tlaku vodíku 101 325 Pa je užíván vztah [3]:

$$\log[\%H]_{Al} = -\frac{2691,96}{T} - 1,32 \quad (13)$$

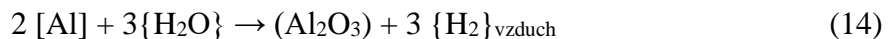
kde: T – termodynamická konstanta [K]

Za předpokladu parciálního tlaku vodíku ve vzduchu ($5 \cdot 10^{-2}$ Pa [3]) a použitím rovnic (13), (9) a (11) lze pro určitou teplotu stanovit rozpustnost vodíku v tekutém kovu. Obrázek 3 vyjadřuje závislost rozpustnosti na teplotě a parciálním tlaku [3].



Obr. 3 Obsah vodíku v čistém Al v závislosti na teplotě a tlaku vodíku [3]

Při reakci vodní páry (v pecní atmosféře nebo ve slévárenské formě) s taveninou hliníku dochází k chemické reakci [3; 22]:



Vzniklý molekulární vodík $\{H_2\}$ se atomárně rozpouští v tekutém hliníku $[H]$ dle rovnice (4) [3]:



Rovnovážná konstanta reakce (14) má tvar [3]:

$$K_a = \frac{a_{Al_2O_3} * a_{H_2}^3}{a_{H_2O}^3 * a_{Al}^2} \quad (15)$$

kde: $a_{Al_2O_3}$ – aktivita Al_2O_3 ve strusce
 a_{H_2O} – aktivita vodní páry
 a_{Al} – aktivita tekutého hliníku
 a_{H_2} – aktivita plynného vodíku

Oxid hlinitý a hliník vstupují do reakce jako čisté látky. Raultovy aktivity jsou proto $a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = a_{\text{Al}} = 1$. Parciální tlak vodíku vzniklého z reakce (14) lze stanovit pro určitý parciální tlak vodní páry určit úpravou vztahu (15) [3]:

$$p_{\text{H}_2} = p_{\text{H}_2\text{O}} * \sqrt[3]{K_a} \quad (16)$$

kde: p_{H_2} – parciální tlak plynného vodíku [Pa]

$p_{\text{H}_2\text{O}}$ – parciální tlak vodní páry [Pa]

K_a – rovnovážná konstanta

Vztah pro výpočet rovnovážné konstanty „ K_a “ [3]:

$$K_a = \exp\left(\frac{-\Delta G_0}{R * T}\right) \quad (17)$$

kde: ΔG_0 – Standardní změna volné entalpie reakce [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]

R – Univerzální plynová konstanta ($=8,314 \text{ [J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$)

Pro výpočet ΔG_0 platí následující vztah [3]:

$$-\Delta G_0 = -944370 + 161,37 * T \quad (18)$$

2.3 Rozpustnost vodíku v Al-slitinách

Rozpustnost znamená maximální množství vodíku, který se může za daných podmínek v tavenině rozpustit. Vodík má nižší rozpustnost ve slitinách hliníku než v čistém Al [23]. Jeho rozpustnost v tavenině je dána teplotou, tlakem a chemickým složením slitiny [16]. Tuto závislost popisuje následující vztah [11]:

$$\log S = \frac{1}{2} * \log p_{\text{H}_2} - \frac{A}{T} + B \quad (19)$$

kde: S – rozpustnost vodíku v tavenině [$\text{cm}^3/100 \text{ g}$]

p_{H_2} – parciální tlak vodíku v okolní atmosféře [kPa]

T – teplota taveniny [K]

A, B – konstanty dle hliníkové slitiny ($A=2550, B=1,62$) [11]

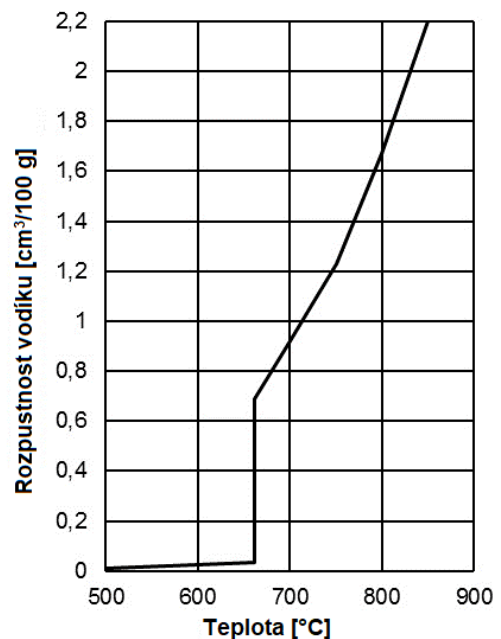
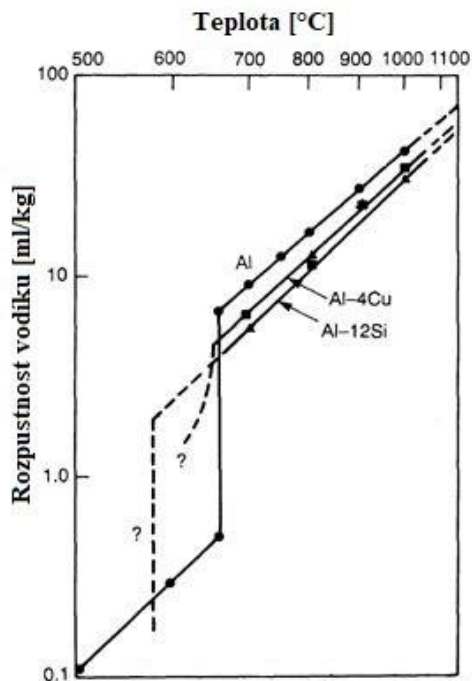
Pokud je obsah vodíku vyšší než je daná rozpustnost, přebytek plynů tvoří bubliny nebo difuzí odchází z taveniny. Koncentrace vodíku se udává v $1 \text{ cm}^3/100 \text{ g} = 0,9 \text{ ppm}$. Jeho rozpustnost v tekutém stavu při $660 \text{ }^\circ\text{C}$ je asi 20krát vyšší než rozpustnost v tuhém stavu při $660 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]. Rozpouštění vodíku v hliníku je endotermický proces a s teplotou se mění dle Tab. 3 [12]:

Tab. 3 Koncentrace vodíku s rostoucí teplotou [12].

Teplota [$^\circ\text{C}$]	300	660 (tuhý)	660 (tekutý)	1000
S [cm^3 na 100 g]	0,001	0,036	0,69	3,9

2.3.1 Teplota kovů

V čistém hliníku má rozpustnost vodíku stejný průběh jako u slitin (Obr. 4). S rostoucí teplotou se zvyšuje rozpustnost vodíku v tavenině. Ohřátím tekutého kovu o 110 K se rozpustnost v tekutém hliníku zdvojnásobuje. Přehřívání kovu vede k vyšším hodnotám rozpuštěného plynu (Obr. 5), proto by se slitiny neměly přehřívát na vysoké teploty, pokud to není nezbytné [11]. S poklesem teploty se sníží rozpustnost vodíku a ten hladinou odchází z taveniny. To je nejjednodušší metoda k odstranění vodíku z taveniny [4].



Obr. 5 Rozpustnost vodíku ve slitinách [19; 55] Obr. 4 Rozpustnost vodíku v čistém Al [63]

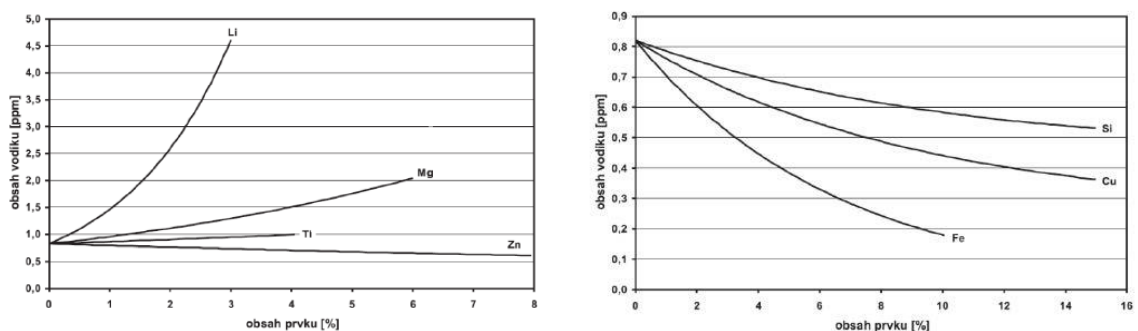
2.3.2 Tlak

Při dané teplotě rozpustnost vodíku závisí na parciálním tlaku vodíku v atmosféře nad hladinou. Vliv tlaku na rozpustnost vodíku se v metalurgické praxi často využívá při odplyňování. Tato závislost je popsána Sievertsovým zákonem pro dvouatomové plyny [11; 16]:

$$S = K * \sqrt{p_{H_2}} \quad (20)$$

2.3.3 Chemické složení

Různé slitiny mají odlišné rozpustnosti vodíku vlivem rozdílného chemického složení [23]. Vliv jednotlivých přísadových prvků na rozpustnost vodíku je vyznačen na Obr. 6. Hlavní přísadové prvky většinou snižují rozpustnost vodíku, zejména křemík, měď, železo, zinek, mangan. Mezi prvky zvyšující rozpustnost se řadí hořčík, sodík, stroncium, vápník, titan, lithium [3; 10; 11; 16]. Chrom nemá žádný vliv na rozpustnost vodíku [10].



Obr. 6 Vliv přísadových prvků na rozpustnost vodíku ($T=700^{\circ}\text{C}$, $p_{H_2}=100,3 \text{ kPa}$) [3]

Ve slitinách se, stejně jako u čistého Al, volí standardní stav 1 % roztoku pro plynné roztoky rozpustěné v taveninách. Henryho aktivita vodíku ve slitině (a_H) je vyjádřena vztahem [3]:

$$a_H = f_H * [\%H]_{SL} \quad (21)$$

kde: a_H – Henryho aktivita vodíku ve slitině hliníku
 f_H – Henryho aktivitní koeficient
 $[\%H]_{SL}$ – koncentrace vodíku ve slitině Al [hm.%]

Slitiny obsahují více přísadových prvků. Každý prvek ovlivňuje rozpustnost vodíku rozdílně. Henryho aktivitní koeficient zavádí vliv přísadových prvků na rozpustnost vodíku v tavenině, proto ve slitině neplatí, že $f_H=1$. Rozpustnost vodíku ve slitině [3]:

$$[\%H]_{SL} = \frac{a_H}{f_H} = \frac{K * \sqrt{a_{H_2}}}{f_H} = \frac{K * \sqrt{p_{H_2}}}{f_H} = \frac{[\%H]_{Al}}{f_H} \quad (22)$$

Henryho aktivitní koeficient (f_H) lze dopočítat ze vztahu [3]:

$$\log f_H = \sum_{i=2}^n \log f_H^i \quad (23)$$

kde: f_H^i – dílčí aktivitní koeficient, popisuje vliv určitého prvku na Henryho aktivitu vodíku

Dopočet f_H^i je popsán ve vztahu [3]:

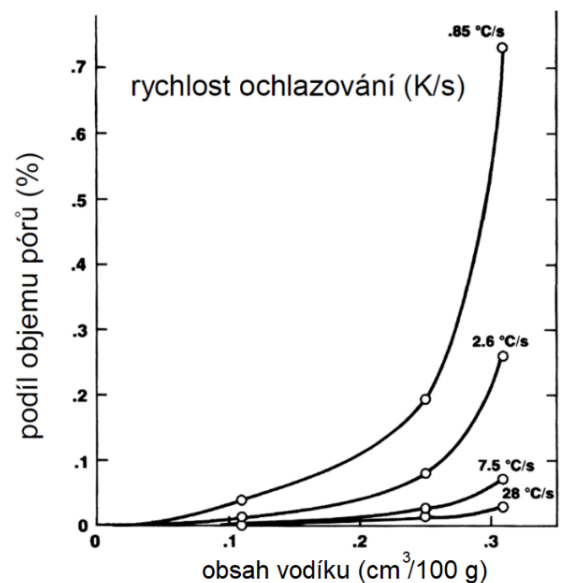
$$\log f_H^i = e_H^i * [\%i] + r_H^i * [\%i]^2 \quad (24)$$

kde: e_H^i – interakční koeficient 1. řádu
 r_H^i – interakční koeficient 2. řádu

Interakční koeficienty jsou tabulkové hodnoty, které jsou uvedeny v Příloze 1.

2.3.4 Rychlost ochlazování

Pro danou koncentraci vodíku v kapalně fázi hliníku je klíčové tuhnutí [4]. Rychlým ochlazením vzniká v kovu přesycený tuhý roztok, ve kterém je rozpuštěno větší množství vodíku než je jeho rovnovážná koncentrace. Vodík se vylučuje z taveniny difúzí, která je časově náročná [11]. S rychlejším ochlazováním se dosáhne vyššího přesycení roztoku a méně vyloučeného vodíku ve formě plynu (Obr. 7) [11; 17]. Proto je tento mechanismus vhodný pro technologie jako vysokotlaké lití, případně gravitační lití do kovových forem [16; 17; 20]. Problém nastává u odlitků s rozdílnou tloušťkou stěn nebo průřezů. Při stejné rychlosti chladnutí bude docházet k různým dobám tuhnutí, což vede k nárůstu pravděpodobnosti vzniku vodíkové pomezity [4]. Nerozpuštěný vodík nebo precipitovaný během odplynění nebo vyloučen během tuhnutí se vyloučí ve formě molekulárního vodíku dle reakce [22]:



Obr. 7 Vliv rychlosti ochlazování na výslednou pomezitu [11]

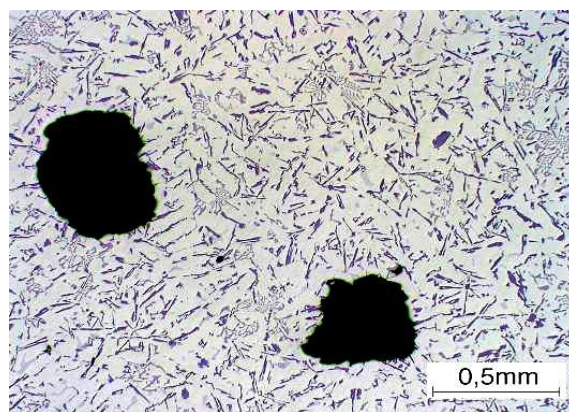
3 VZNIK DUTIN V ODLITCÍCH

Porezita je jeden z hlavních defektů v litých materiálech. Má neblahý vliv na povrchovou kvalitu, mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi odlitků. Problémem je i následné tepelné zpracování nebo tváření [24].

3.1 Vznik bublin a staženin

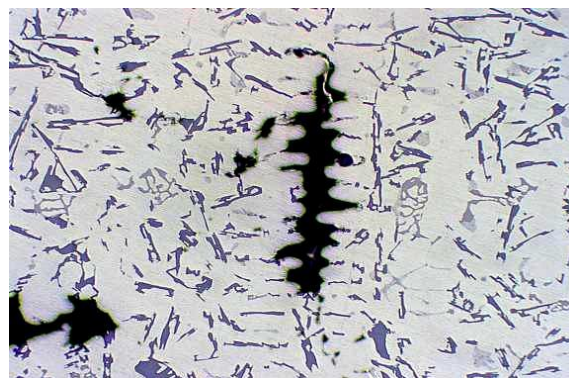
U slitin hliníku je ve slévárenské praxi většinou každá dutina nalezená v odlitku označována jako porezita [4; 23]. Dutiny jsou tvořeny staženinami nebo plynovými bublinami [25], které ovšem vznikají rozdílnými mechanismy, ale v odlitcích se často vyskytují společně.

Plynová porezita nejčastěji vzniká při tuhnutí odlitku, kdy rozdílná rozpustnost vodíku v tekutém a tuhém stavu, způsobuje vyloučení přebytečného plynu ve formě endogenních bublin [4; 12]. Rozpustnost jiných plynů je zanedbatelná a pro vznik bublin nepodstatná [23]. Dále může vznikat z exogenní porezita formovacího materiálu, jader, ochranného nátěru nebo konstrukčně nedostatečným odvodu vzdušného dutiny formy. Plynová porezita se vyznačuje často kulatým tvarem (Obr. 8) [4]. Slitiny s širokým dvoufázovým pásmem mají větší sklon k tvorbě plynových bublin [17]. Bubliny snižují mechanickou pevnost odlitku v důsledku zmenšení nosného průřezu, porušení celistvosti [12] a zapříčiňují netěsnost odlitku [23]. Při tepelném zpracování dochází expanzi uzavřených bublin a může dojít k poškození odlitku.



Obr. 8 Kulatý tvar plynové porezity [23]

Ke vzniku **staženin** dochází při objemové změně během tuhnutí odlitku [4]. Tato změna se nazývá smrštění kovu, jejímž důsledkem je vznik vnějších (otevřených) nebo vnitřních (uzavřených) staženin, viz Obr. 9. Objem čistého hliníku se zmenší při tuhnutí přibližně o 9 %, ale slitiny hliníku mají objemovou změnu menší – asi 4–5 % [23]. Dosazovací elementy (např. nálitky) poskytují zásobárnu tekutého kovu, kterým jsou zásobena místa ve vzdálenějších místech odlitku [4; 18]. Nálitky je možné staženiny pouze přemístit mimo odlitek, nikoliv zamezit objemové změně. Tepelné uzly jsou spoje dvou nebo více stěn a lokální zvětšení tloušťky stěny odlitku. Zároveň to jsou oblasti s dlouhou dobou tuhnutí, tudíž lze zde předpokládat vznik staženin i vodíkových bublin [9].



Obr. 9 Staženina [23]

Kombinace plynové porezity a staženin snižuje mechanické vlastnosti výsledného produktu, zejména odolnost vůči únavovému poškození, lomovou houževnatost, tažnost a pevnost [22]. Morfologie porezity (sféricita – „s“) má také podstatný vliv na pokles mechanických vlastností [23].

$$s = \frac{\text{obvod}^2}{4 \cdot \pi \cdot \text{plocha}} \geq 1 \quad (26)$$

Plynové bubliny mají sféricitu blízkou hodnotě $s=1$, proto je jejich vliv menší než vliv mikrostaženin. Vliv porezity je tím škodlivější, čím větší je objem dutin a jejich tvarová členitost, tedy vyšší hodnota „ s “ [23]. Výpočet sféricity je popsán vztahem (26) [23; 25].

3.2 Homogenní nukleace

Jakmile vodík překročí maximum své rozpustnosti v tekutém kovu, získá požadovaný parciální tlak a dojde k nukleaci bubliny. Během homogenní nukleace není bublina v kontaktu s tuhou částicí [14]. Homogenní nukleace je podmíněná vyšším tlakem v bublině p_{H_2} než součet tlaků: atmosférický (p_{atm}), metalostatický (p_{met}) a vyvolaný povrchovým napětím (p_{σ}) [11]:

$$p_{H_2} > p_{atm} + p_{met} + p_{\sigma} \quad (27)$$

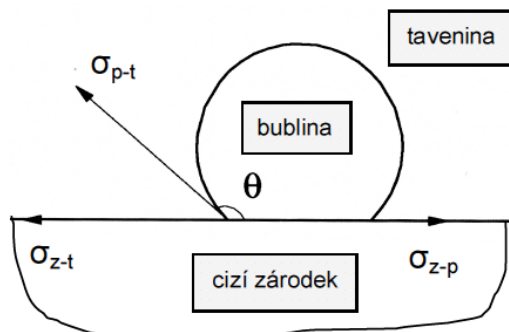
kde: $p_{\sigma} = \frac{2 \cdot \sigma}{r}$

σ – povrchové napětí na rozhraní tavenina – bublina
 r – poloměr bubliny

Ze vztahu pro výpočet „ p_{σ} “ vyplývá, že s menším poloměrem bubliny, vzroste tlak vyvolaný povrchovým napětím. Při nukleaci bubliny začíná nukleace s poloměrem $r \rightarrow 0$, proto je tento mechanismus termodynamicky nepravděpodobný. Vyžaduje prakticky nedosažitelné přesycení [14; 26]. V podmínkách slévárenské praxe jsou bubliny tvořeny jen heterogenní nukleací [11].

3.3 Heterogenní nukleace

Heterogenní nukleace je ovlivněna cizími nerozpustnými částicemi, které slouží jako vhodné krystalizační zárodky (Obr. 10) [11; 27]. Jako částice pro nukleaci slouží například vměstky, oxidy nebo vyzdívka pece. Z toho důvodu lze pozorovat bubliny (póry) v blízkosti vměstků. Dále při vzniku bubliny hraje roli úhel smáčení mezi bublinou a tuhou částicí. Na úhlu smáčení je závislá energie potřebná pro vznik bublin [14]. Bubliny se tvoří na částicích, které mají nízkou smáčivost vzhledem k tavenině, což jsou právě oxidy [28]. Nejpravděpodobnější vznik zárodků bublin je v nesouvislostech vyzdívky (otevřená dutina) pece či pánve. Tvorba bublin zde může probíhat v případě, že se molekuly plynu z taveniny mohou nahromadit v dutinách a počet molekul je dostatečný k vytvoření zárodku [26]. Vměstky slouží jako nukleační zárodky z důvodu vyšší mezifázové energie na rozhraní mezi fázemi hliník-vměstek než mezi hliník- H_2 [29]. Nukleace vodíkových bublin je funkcí oxidické čistoty taveniny [30]. Pro výpočet úhlu smáčení „ θ “ se využívá vzájemný poměr mezi napětími [11; 14]:



Obr. 10 Vznik bubliny heterogenní nukleací [11; 14]

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p}}{\sigma_{p-t}} \quad (28)$$

kde: σ_{z-t} – povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou
 σ_{z-p} – povrchové napětí mezi zárodkem a plynem
 σ_{p-t} – povrchové napětí mezi plynem a taveninou

Přítomnost vměstků je pro hliníkové slitiny méně významnou částí metalurgie v porovnání s plynovými dutinami. Obsah vměstků však souvisí s plynovými dutinami v odlitcích. Snížením obsahu vměstků se zároveň snižuje problematika spojená s plynovou porezitou [8; 15].

4 VMĚSTKY A NEŽÁDOUCÍ PŘÍMĚSI

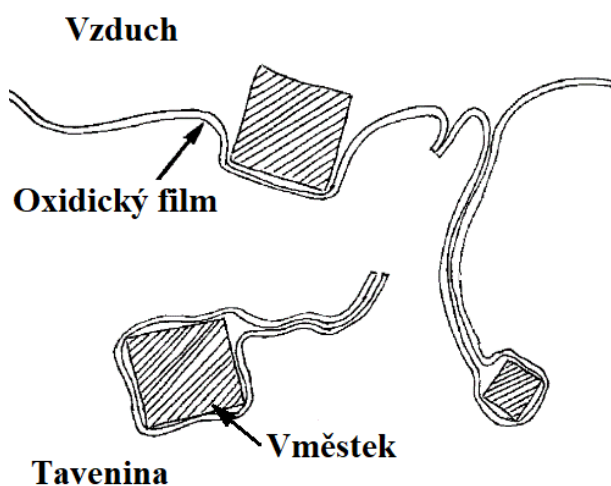
Před litím je třeba se zaměřit na přípravu taveniny. Kvalita kovu je ovlivněna chemickou čistotou taveniny. Tato čistota je ovlivněna obsahem vměstků ve vsázkových surovinách, které jsou základem pro tavení. Vliv mají rovněž typy a konstrukce tavících i udržovacích pecí. Dále způsoby zpracování taveniny a lití [2].

Vměstky se dělí dle chemického složení na kovové a nekovové. Mezi kovové se řadí například částice zárodků vznikající z očkovačů (TiB_2 , AlB_2), modifikátor, kal neboli „sludge“ (Cr-Fe-Mn) nebo legura [8; 11]. Nekovové vměstky jsou částice v objemu taveniny i ztuhlého kovu, které mají převážně vysokou tvrdost a jsou křehké [11]. Nekovové vměstky jsou rozděleny na:

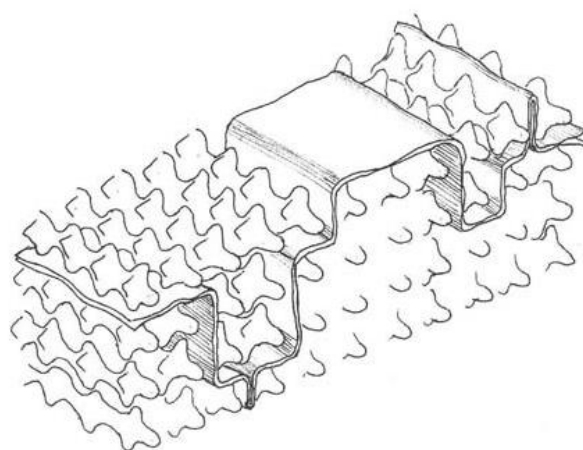
- Exogenní – původem zvenčí: během lití, přelévání nebo tavení (žárovzdorná vyzdívka z pece nebo pánve), z vsázkového a vratného materiálu, případně zbytky solí.
- Endogenní – reakce mezi prvky v tavenině (oxidy hliníku, karbidy, nitridy) [11; 20].

Dále lze nekovové vměstky rozdělit na dvě skupiny: Disperzní vměstky, jejichž rozměry jsou 0,03–0,5 μm a mají zaoblený případně ostrohranný tvar nebo oxidické blány s tloušťkou 0,1–1 μm a délkou až několik milimetrů [1; 12].

Reakcí taveniny se vzduchem a vyzdívkou dochází ke vnášení nečistot do roztaveného kovu (Obr. 11). Nečistoty mohou být vneseny i ze vsázkových surovin [2; 12]. Nejvíce nečistot vzniká tavením 100 % vratného materiálu. Naopak složení vsázky ze 100 % housek zajišťuje nejmenší množství vměstků [31]. Narušením kovové matrice vměstky (Obr. 12), dochází ke snížení mechanických vlastností [11; 25]. Slitina má horší slévárenské vlastnosti, těsnost, chemickou odolnost, obrobitelnost a jiné. Vliv vměstků na vlastnosti slitiny je dán jejich chemickým složením a tvarem [11; 15].



Obr. 11 Vnášení vměstků s narušením ochranné vrstvy na hladině [56]



Obr. 12 Oxidická plena mezi dendrity hliníku [19; 57]

Oxidy mají vysokou teplotu tání (2000 $^{\circ}C$), proto se v tavenině vyskytují jako tuhé fáze, které mohou snižovat zabíhavost slitiny. Dalšími negativy jsou vysoká tvrdost, problematická při obrábění, a viditelná nesouvislost povrchu [20]. Hustota oxidu hliníku je vyšší než čistého hliníku. Al_2O_3 s velkým povrchem a malým objemem oxidu se v tavenině vznáší [29]. Typy

dalších oxidů: MgO, Fe₃O₄, SiO₂, Al₂MgO₄ [8]. Odplynění a/nebo rafinace mohou snížit množství vměstků až o 40 % [31].

4.1 Ochrana taveniny před vodíkem

Ochrana taveniny může být pomocí tuhých strusek, tekutých strusek, použitím atmosféry ochranných [29] nebo inertních plynů [12].

Pokud se vytvoří na povrchu taveniny souvislý povlak chemické sloučeniny, potom není nutné použít ochranných opatření. V případě Al slitin se tavení uskutečňuje při přímém kontaktu hladiny taveniny s ovzduším. Pokud je povlak z propustných nebo nesouvislých sloučenin, je nevyhnutelné použít ochranné prostředky [12]. Opatřeními pro minimalizaci obsahu vodíku v roztaveném kovu jsou použití čisté vsázky, skladování přípravků na suchých místech, případně v uzavřených obalech, tavení pouze ve vysušených kelímcích a předeřhřívání nářadí. Slévárenské nářadí je doporučeno opatřit ochrannými nátěry a řádně vysušit [11].

Naopak rozpustnost kyslíku v hliníku je zanedbatelná (<5 ppm [32]) [12]. Kyslík s vysokou afinitou k hliníku tvoří amorfní oxidickou vrstvu na povrchu taveniny při tloušťce <1 μm [8]. Funkci ochrany plní, dokud nedojde ke změně vlastností nebo porušení vrstvy. Vlastnosti oxidické blány jsou ovlivněny teplotou [33], (dobou držení taveniny na určité teplotě) časem, legurami a přísadami. Neporušená vrstva oxidů proto taveninu poměrně dobře chrání před dalším naplyněním do teploty maximálně asi 900 °C [11]. Hliník s kyslíkem tvoří oxidy několika modifikací: amorfní Al₂O₃ [8], γ-Al₂O₃ nízkoteplotní (nestabilní spinel [11; 20]) a α-Al₂O₃ vysokoteplotní (stabilní korund [11]). Hustota γ-Al₂O₃ je 3,42-3,96 cm³ [11] a jeho tloušťka je přibližně 10 μm [8]. Tato modifikace zajišťuje pozvolné naplynění s rostoucí teplotou do teploty přibližně 780 °C. Po překročení této teploty roste obsah vodíku podstatně rychleji se zvyšující se teplotou. Tato změna je přičtena začínající transformaci oxidu γ-Al₂O₃ na hladině taveniny na α-Al₂O₃ [3]. Přechod z γ-Al₂O₃ na α-Al₂O₃ začíná při 700 °C. Při této teplotě je obsah α-Al₂O₃ nízký, ale jeho podíl roste s teplotou nebo dlouhou výdrží na vysoké teplotě. Úplná přeměna nastává okolo 1000 °C [12]. Hustota α-Al₂O₃ je 3,9 až 4,1 g/cm³ [11]. Díky podstatně menšímu měrnému povrchu, v porovnání s γ-Al₂O₃, může docházet k sedimentaci [32]. Po dobu přeměny klesá pevnost a ochranný účinek vrstvy, což zapříčiňuje zrychlení naplynování taveniny vodíkem [3; 8; 12].

Přítomnost kovů alkalických zemin a alkalických kovů může již při malých množstvích, zvýšit propustnost filmu, který pak zvyšuje oxidaci a tvorbu strusky [8].

- Kovy alkalických zemin: Be, Mg, Ca, Sr.
- Alkalické kovy: Li, Na, K [8].

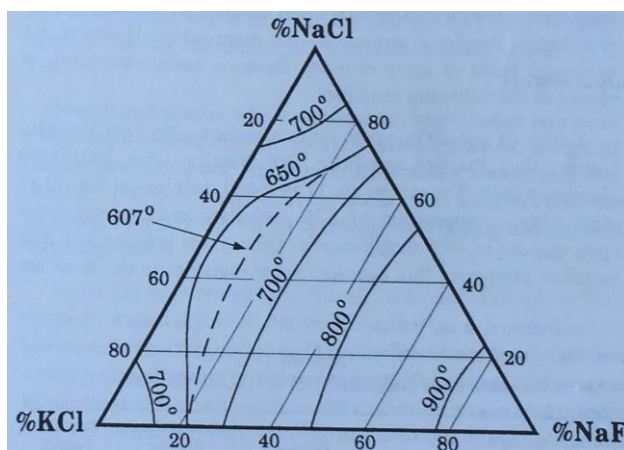
4.1.1 Ochrana tavidly

Chrání hladinu před vlhkostí a atmosférickým kyslíkem [11]. Na ochranu slitiny na bázi hliníku a hořčíku se používají materiály s teplotou tavení 500–600 °C. Většinou jsou to směsi různých solí – tavidla, skládající se z chloridů a fluoridů alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Nevýhodou použití strusek a tavidel je jejich vysoká reaktivita s vyzdívkou peci a chemické působení s prvky slitiny, což způsobuje snížení obsahu legujících přísad [12]. Tavidla mohou zvyšovat účinnost ochrany povrchu, usnadnění zpracování strusky, zjednodušení čištění stěn pece, zvyšování účinnosti čištění kovu a zjemňování zrna [34]. Požadavky na strusky a tavidla [12]:

- a) Nižší teplota tavení než teplota tavení slitiny.
- b) Nižší hustota než hustota slitiny.
- c) Nепropustnost plynů z okolního ovzduší.

- d) Viskozita – nízká na začátku tavení pro dobré roztékání na povrchu taveniny, vysoká po ukončení tavení pro lehčí odstranění z povrchu taveniny při odlévání.
- **Krycí soli** – Sůl je aplikována na hladinu [8], kde tvoří ochrannou bariéru proti oxidaci a naplynění kovu. Při provozní teplotě je v tekutém stavu. Složení je většinou na bázi NaCl a KCl s podílem NaF, KF [8; 35]. Přidáním fluoridu NaF (5 hm %) dojde ke vzniku ternárního eutektika s teplotou tavení 607 °C (Obr. 13) [35]. Využívá se především při tavení zoxidované vsázky nebo třísek. Sůl může být použita i pokud udržovací teplota překročí 770–790 °C [8]. Vyšší vrstva krycí soli zabraňuje propalu mikrolegur (např. Mg). Přídavkem $MgCl_2$ se zajišťuje vyšší tekutost strusky [35]. Krycí soli obsahující $MgCl_2$ mají sklon k tvorbě vměstků, které zůstávají v kovu [33]. Hladina by neměla být porušena, aby se zabránilo vniku vměstků ze soli do taveniny [35]. Krycí soli jsou použitelné pro všechny typy hliníkových slitin s výjimkou nadeutektických siluminů a Al-Mg slitin s obsah Mg vyšší než 7 % [8].

Důležitým faktorem je tekutost krycí soli. Při vysokých teplotách může dojít k nadměrnému ztekucení krycí vrstvy, která se obtížně stahuje. Naopak nižší teplota zapříčiní nedostatečné ztekucení soli [33].



Obr. 13 Ternární diagram složek krycích solí [35; 36]

4.1.2 Ochrana plynem

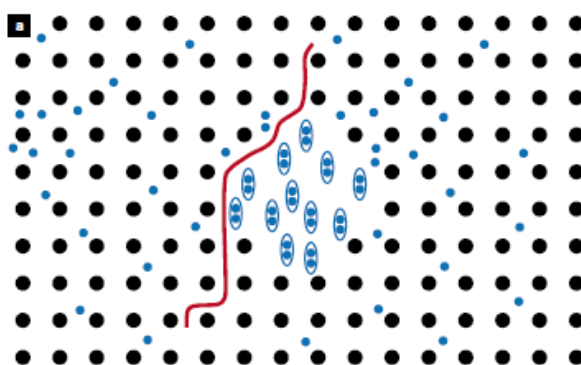
Složení atmosféry inertního nebo ochranného plynu se volí dle působení plynu s roztavenou slitinou [12]. Užitím plynů se zamezuje růstu tloušťky oxidické vrstvy [29]. V praxi se většinou ochrana plynem pro Al slitiny nepoužívá.

5 RAFINACE

Tavenina obsahuje kovy, endogenní a exogenní vměstky, dále oxidy (Al_2O_3 , MgO , MgAl_2O_4), nitridy (AlN , TiN , Mg_3N_2), karbidy (Al_4C_3), sulfidy, fosfidy, boridy (AlB_2 , TiB_2), halogenidy, soli a rozpuštěné plyny. K zabezpečení kvalitní produkce hliníkových odlitků se do zpracování taveniny zahrnuje proces rafinace [6; 8; 10; 11; 12]. Důvodem je odstranění rozpustných kovových příměsí, nerozpustných nekovových vměstků a plynů. Všechny tyto vměstky, bez ohledu na původ, jsou v odlitcích nežádoucí, protože významně snižují plastické vlastnosti při rázových zkouškách a snižují odolnosti proti korozi odlitých součástí [12].

Většinou převažují oxidy hliníku (Al_2O_3), jejichž Gibsova energie je několikanásobně vyšší než Gibsova energie karbidů nebo nitridů [20]. Sedimentace těchto vměstků je nepravděpodobná z důvodu malého rozdílu hustot a velkého specifického povrchu. Z toho důvodu se pro odstranění vměstků používá proces rafinace. Způsob rafinace se volí s ohledem na charakteru znečištění a možnosti slévárny [1; 12].

V rafinované slitině je na konci procesu méně krystalizačních zárodků pro vznik plynových pórů. Z toho důvodu je pórovitost odlitků při stejném obsahu plynu podstatně menší než při lití slitiny s vměstků bez rafinace [23]. Příkladem je Obr. 14, kde je znázorněn vznik vodíkové bubliny heterogenní nukleací v blízkosti oxidického vměstku.



Obr. 14 Heterogenní vznik pórů na nanooxidickém filmu [18]

Způsoby rafinace se rozdělují na absorpční a neabsorpční, viz tabulka 4. Při absorpčních dochází k narušení rovnováhy v soustavě tavenina–nečistota v objemu taveniny, která je v bezprostředním kontaktu s absorbentem. Při neabsorpčních způsobech se rovnováha porušuje v celém objemu taveniny. Neabsorpční jsou velice efektivní [12].

Tab. 4 Rozdělení způsobů rafinace [12].

Absorbční rafinace	Neabsorbční rafinace
Profukování inertními, případně aktivními plyny	Ultrazvukem
Použití atmosféry inertního plynu nad taveninou	Vakuováním
Zpracování taveniny tavidly	
Filtrace	

Z technického hlediska se rozlišují statické a kontinuální postupy rafinace. Během statického postupu se rafinuje pouze určitý objem taveniny, zatímco kontinuální postup se uskutečňuje během přelévání taveniny [12].

Rafinační prostředky s obsahem P by neměly být používány v kombinaci s modifikací sodíkem nebo stronciem (v podeutektických siluminech). U nadeutektických siluminů s úmyslným přidáním fosforu nesmí být použity rafinační prostředky obsahující Na. Fosfor

tvorí metalurgicky neaktivní sloučeniny s Sr a Na. Ve slitinách s obsahem vyšším než 2 % Mg se používá rafinace bez obsahu Na [33]. Výhodami rafinace taveniny jsou [12; 35]:

- a) Snížení nezreagovaného kovu ve stěrech.
- b) Snížení nákladů na opravy a čištění pecí.
- c) Vyšší živostnost pecí.
- d) V kovu zůstanou pouze menší vměstky – jemnější.
- e) Odstranění nahromaděných oxidů na stěnách [37].

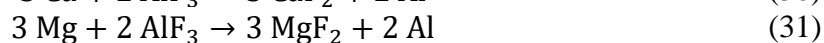
Čistota kovu zvyšuje tekutost taveniny a slévárny mohou odlévat při nižších licích teplotách. Tím se projevuje úspora v čase a zároveň v energiích potřebných pro tavení [38].

5.1 Rafinační přípravky

Chemicky se jedná o směs chloridů (AlCl_3 , NaCl , KCl , CaCl) s nebo bez fluoridů (AlF_3 , NaF , KF , CaF_2) a oxidačních sloučenin (uhličitany a dusičnany) [33; 35; 8]. Fluoridy ovlivňují povrchové napětí mezi struskou, taveninou a oxidem hliníku. V čistém stavu mají vysokou teplotu tavení (800–1400 °C). Působí „houstnutí“ strusky. Chloridy naopak mají nižší teplotu tavení (200–900 °C) a mají fluidizační účinek. Vliv chloridů na povrchové napětí je zanedbatelný. Ve směsi solí pro rafinaci bývají kombinace alespoň tří složek viz Obr. 13. Oxidické složky exotermicky reagují s drobnými částicemi kovového Al ve strusce. Kombinace složek tavidla ovlivňují hustotu, tekutost, smáčivost, reaktivnost. Přípravky lze aplikovat nahozením na hladinu, případně injektáží pod hladinu [8].

Rafinace solemi může ekonomicky odstranit stopové prvky ve slitině (Sr, Na, Ti, B a jiné). Není to prioritní použití rafinace, spíše vedlejší. Některé slévárny rafinují do proudu kovu při odpichu z tavící pece za účelem zvýšení kontaktu rafinačního přípravku s taveninou [35]. Zvýšení kontaktního povrchu tavidla a taveniny je dosaženo intenzivním mícháním [1; 12]. Tavenina se následně nechá 5-10 minut odstát a pečlivě se stáhnou produkty rafinace [35].

Rafinační prostředky mohou uvolňovat Cl-, F-, P- ve spalinách [33]. Reakcí NaF s kovem dochází ke vzniku stopových prvků Na. V určitém rozsahu AlF_3 může odstraňovat Ca, Sr a Mg. Chlor může odstranit Ca, Li, Mg, Na a Sr [35; 36]. Jejich možné odstranění je vyjádřeno v rovnicích (29), (30) a (31) [11]. Při částečných ztrátách legur může dojít ke snížení mechanických vlastností odlitku [33].



Snad všechny přísady jsou hygroskopické. Je doporučeno pořizovat přípravky v menších baleních, které se při otevření celé spotřebují. Vlhkost solí může při jejich aplikaci způsobit parní explozi. Po aplikaci je třeba důkladný stěr hladiny [33].

5.1.1 Soli rafinující strusku

Odstraňují z taveniny oxidické vměstky a snižují nezreagovaný kovový hliník obsažený ve stěrech [11]. Stěry mohou obsahovat až 80 % hliníku, nazýváme je „mokrý“ stěry. Sůl mění mokrý stěr na „suchý“. Správnou rafinací lze snížit podíl hliníku v suchém stěru na 30 % [4; 8; 35]. Suché stěry se snadněji odstraňují z hladiny. Celkové množství stěrů bývá 5–10 %. Oxidy, které jsou oddělitelné od taveniny většinou obsahují vyšší množství použitelného kovu [35].

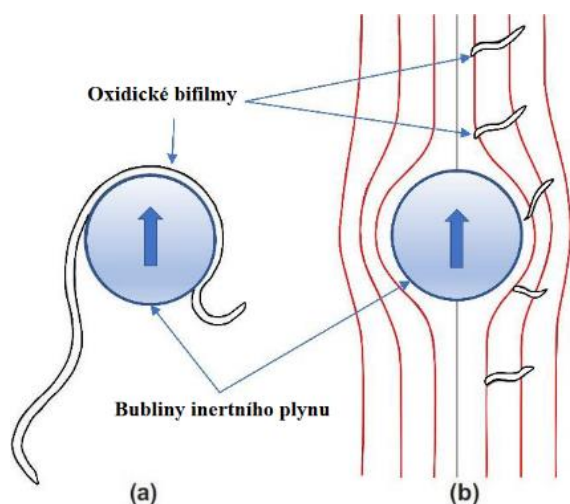
Soli jsou směsí chloridů, fluoridů (jedno – a dvojmocných) a oxidačních sloučenin. Oxidační sloučeniny vedou ke vzniku exotermické reakce, která ovlivňuje povrchové napětí mezi kovem a oxidy [8; 11], zároveň podporuje koalescenci zachycených kapek Al ve strusce. Vznik větších

kapek kovu, které se uvolňují ze strusky do lázně – snížení kovnatosti strusky a dochází k rozpouštění oxidů Al [8]. Složky rafinačních solí umožňují selektivní odstranění nežádoucích prvků [11]. Někteří výrobci přípravků snižují obsah dvoumocných fluoridů z důvodu jejich vysoké ceny. Tím se ovšem může snížit účinnost přípravků [8].

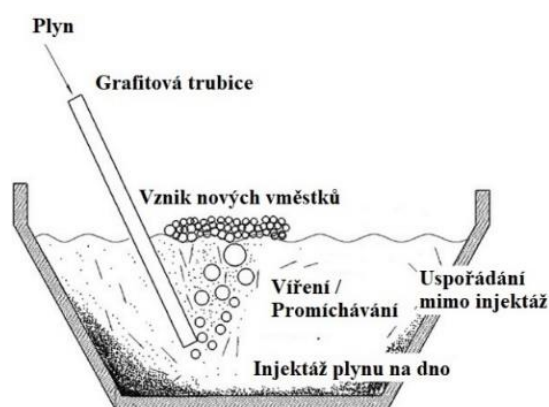
Více rafinační soli vede ke zvýšení exotermické reakce. Dochází k propalu kovu ve stěru. Bez použití soli jsou ztráty kovu až 4 % z hmotnosti tavby. Správným dávkováním soli se ztráty mohou snížit na 2,3 % z hmotnosti tavby [33].

5.2 Proublávání plyny

Bubliny plynu se při pohybu přes taveninu střetávají s vměstky a vynášejí je na povrch. Pro rafinaci hliníkových slitin se jako rafinační médium používá argon, dusík, chlor a jejich vzájemné kombinace. Obr. 15 znázorňuje vyplouvání bubliny a její rafinační účinek vzhledem k velikosti vměstků [12]. Na hladině se vměstky hromadí ve vzniklé strusce (Obr. 16) [8]. Účinnost této metody se zvyšuje se zmenšujícím se poloměrem bublin „ $r_b = 1 \text{ mm}$ “ a zvýšením jejich množství za čas profukování. Trubice je ponořena na dno kelímku. Důležitou podmínkou je minimální vlhkost plynu. Rafinace probíhá při teplotách 720–730 °C po dobu 5–20 minut s dávkováním 0,3–1 % z hmotnosti taveniny [12].



Obr. 15 Vliv velikosti vměstků na vynesení bublinou o stejném poloměru: a) vynášejí větší bifilmy b) nevynášejí menší bifilmy [28]



Obr. 16 Rafinace plynem [59]

Výběr plynu ovlivňuje výslednou strusku [4]. Při rafinaci dusíkem vzniká na hladině „mokrý“ struska. Naopak při rafinaci argonem vzniká „suchá“ struska s nižším obsahem nereagovaného hliníku. Přidáním 3–5 % chloru do směsi s inertním plynem vzniká „suchá“ struska, ale především je zvýšen rafinační účinek [32].

5.3 Odstátí a následná filtrace

Tato metoda je založená na rozdílu hustot taveniny a vměstků. Kinetika procesu je popsána Stokesovým zákonem. Vztah (32) popisuje rychlost vyplouvání vměstku v závislosti na jeho hustotě a poloměru sférického tvaru. Odpor proti pohybu vměstků je dynamická viskozita taveniny η [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$] [11]]. Větší částice se odstraní v průběhu několika minut, naopak drobné částice s průměrem pod 5 μm odstátí prakticky nelze odstranit [12]. Nevýhodami jsou pokles teploty po odstátí a přelití taveniny, čímž se zvyšuje technická náročnost metody. Filtrace

probíhá při přelévání taveniny z tavicí pece do transportní. Dále při přelévání do udržovacích pecí nebo ve formách [11].

$$v = \frac{2}{9} * \frac{r^2 * g * (\rho_{\text{tekutý kov}} \pm \rho_{\text{vměstek}})}{\eta} \quad [24] \quad (32)$$

Kontrola vměstků v tekutém kovu je většinou nákladná a složitá. Vyhodnocení probíhá většinou optickým odhadem. Často jsou metody časově i finančně náročné. Hodnocení obsahu vměstků je častější v hutích než ve slévárenských provozech. Pro stanovení obsahu vměstků ve slitině se používají metody [11; 15; 20]:

- Měření zabíhavosti.
- Lomová zkouška.
- Straube-Pfeiffer.
- Drosstest.
- PoDFA – Porous Disc Filtration Apparatus.
- Prefil – Pressure Filtration.
- LAIS – Liquid Aluminum Inclusion Sampler.
- LIMCA – Liquid Metal Cleanliness Analyser.
- Ultrazvuk – Ultrasonic Technique.

Měření zabíhavosti, lomová zkouška, Straube-Pfeiffer a Drosstest se řadí mezi technologické metody, kde je sledován vliv obsahu vměstků na vlastnosti slitiny. Metody PoDFA, Prefil nebo LAIS jsou založeny na průtoku kovu skrze speciální filtr a vyhodnocení vměstků zachycených ve filtru. LIMCA a ultrazvuk umožňují online měření vměstků v tavenině [11; 15; 20; 39].

6 ODPLYNĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Nedostatkem hliníkových slitin je sklon ke vzniku endogenních bublin a rozptýlených staženin, které jsou příčinou snížení mechanických vlastností a těsnosti odlitku [1; 3]. Hliníkové slitiny mají nízkou rozpustnost vodíku v tuhém stavu. Při přesycení roztoku se vodík vyloučí ve formě bublin [2; 3]. Obsah vodíku v kovu po natavení bývá 0,2–0,8 cm³/100 g Al [11].

Odplynění je proces odstranění plynů rozpuštěných v tavenině. Proces je vratný, tedy plyn se může opět rozpustit [12]. Cílem je tedy snížit koncentraci rozpuštěného plynu pod kritickou hranici (<0,2 cm³/100 g Al [11]) s ohledem na vznik bublin, nikoli úplné odstranění plynu z taveniny [1; 12]. Plynové bubliny mohou do určité míry nahrazovat objemovou změnu kovu při tuhnutí [16]. Pokud bude tavenina silně odplyněná, bude mít ve fázi tuhnutí vyšší sklon ke stahování, což je nutné kompenzovat většími nálitky [2].

Podstatou většiny odplyňovacích metod je využití rozdílných parciálních tlaků (difuzí) plynu v tavenině a v odplyňujícím médiu [12; 24]. Některé metody využívají změnu rozpustnosti s klesající teplotou (bublina → vznik, růst, vybublání) [12]. Jakákoliv odplyňovací metoda vytváří přebytek stěru [4]. Pro odplynění a odstranění nerozpustných nekovových vměstků z taveniny se používají totožné technologické způsoby. Častými metodami odplynění jsou [12]:

- Profukování taveniny interními nebo aktivními plyny.
- Odplyňování solnými přípravky (metalurgickými přípravky).
- Odstátí ve vakuu (vakuování [11]) [12; 16].

Další méně časté metody odplynění jsou vibrace, ultrazvuk nebo „shear degassing“ [12; 22; 24; 40]. Každý proces se uskutečňuje různou rychlostí, což určuje konečnou délku odplyňovacího procesu [12].

Stejně jako u rafinace se postupy odplyňování mohou rozdělit na statické a kontinuální. V této kapitole jsou zmíněny pouze některé, ze statických metod, které mají zastoupení ve slévárenské praxi.

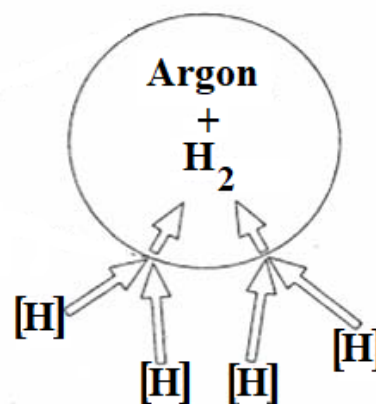
6.1 Probublávání plyny

Rozpuštěný atomární vodík difunduje do bubliny odplyňovacího média v důsledku rozdílu parciálních tlaků, viz obrázek 17 [12; 24]. Intenzita vyrovnávání koncentrace vodíku mezi taveninou a plynem se snižuje se snižující koncentrací se vodíku v roztoku. Vodík difunduje do bublin, dokud není dosažena rovnováha [24]. Účinnost odplynění se odvíjí od výběru plynu, velikosti bublin a výšky kovu v odplyňovací pánvi.

Odplyňovací médium bývá nejčastěji dusík, argon, chlor. Dusík a argon jsou vůči hliníkovým taveninám inertní. Naopak chlor reaguje s prvky v tavenině, proto je nazýván aktivním plynem [4; 8].

Dusík je nejčastěji používaný a zároveň nejlevnější plyn. Dusík rovněž vytváří „mokré“ stěry, které jsou bohaté na kovový hliník [4; 32]. Čistota dusíku musí být vyšší než „4,6“=99,996 %, takto čistý dusík se nazývá technický dusík. Hlavní nečistoty obsažené v takovém plynu jsou kyslík a vlhkost [16].

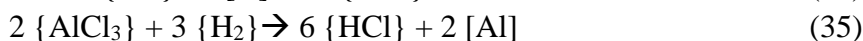
Difuze plynu do bubliny



Obr. 17 Mechanismus odplynění plynem [60]

Argon produkuje stěr s menším obsahem kovového hliníku než dusík, kromě toho je výrazně dražší než dusík. Je více inertní a těžší, proto poskytuje ochranný plášť nad hladinou zamezující další oxidaci a rozpouštění vodíku. Argon je snadnější udržet suchý a čistý [4; 32].

Chlor má vyšší účinnost než argon a dusík [12]. Inertní plyny s aktivními lze vzájemně kombinovat (90 % N₂ + 10 % Cl₂ [12]) [4; 8]. Většinou převažuje obsah inertního plynu, který pomáhá rozptýlení aktivního plynu v tavenině. Přesto použití takové směsi neřeší problematiku použití chloru. Problémem je jeho toxicita. Pánve by měly být hermeticky uzavřené a vybavené odsáváním plynů [12]. V práci [16] tvrdí, že s obsahem do 5 % chloru nehrozí kontaminace okolní atmosféry. Působením Cl₂ může zkorodovat pec nebo zařízení pro sběr spalin [33; 41]. Místo plynného chloru lze také použít sloučeniny chloru, které po kontaktu s taveninou vytváří plynné zplodiny. Například pro hliníkové slitiny to jsou MnCl₂, ZnCl₂, a C₂Cl₆. Všechny způsoby odplynění jsou podmíněny vysokou čistotou plynu z hlediska obsahu vlhkosti a kyslíku [12]. Reakce chloru v tavenině může probíhat dle rovnic [11; 12]:



Parciální tlak vodíku v bublině AlCl₃ a HCl je roven nule což způsobuje difuzi vodíku z taveniny do bublin. Probublávání chlorem probíhá za stejných teplot jako při probublání dusíkem nebo argonem, ale trvá pouze 10–12 min s dávkováním 0,2–0,8 % z hmotnosti tavby. Probublávání chlorem snižuje obsah hořčíku až o 0,2 % [12].

Výběr plynu je důležitý, ale není to hlavní ovlivňující prvek pro úspěšné odplynění. Kromě zřejmých ekologických problémů s halogenovými plyny, určitý odplyňovací proces (trubice, porézní zátka, FDU) ovlivňuje odplynění více než výběr plynu [4].

Rychlost vystoupaní bubliny plynu k hladině závisí na poloměru bubliny. Tato závislost je popsána Stokesovým zákonem viz kapitola 6.3. Pro plynovou bublinu platí vztah:

$$v = \frac{2}{9} * \frac{r^2 * g * (\rho_{\text{tekutý kov}} - \rho_{\text{plyn}})}{\eta} \quad [24] \quad (36)$$

Velikost bublin a hustota odplyňovacího média tedy ovlivňují dobu setrvání bubliny v tavenině, která je klíčová pro difuzi plynů do média. Ze vztahu (36) vyplývá, že menší bubliny vyplouvají menší rychlostí, tedy setrvávají delší dobu v tavenině. Mezifázové rozhraní je nepřímo úměrné velikosti bubliny, tedy snížením velikosti bubliny se zvyšuje. [24; 40]. Bubliny by měly být co nejmenší [11]. Hustoty jednotlivých plynů jsou uvedeny v Tab. 5.

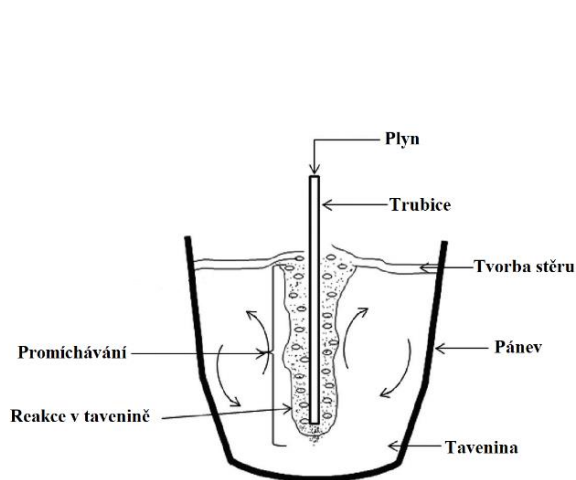
Tab. 5 Hustota různých plynů pro odplynění [42; 43].

Plyn	Hustota [kg.m ⁻³]
N ₂	1,234
Ar	1,759
Cl ₂	3,12
HCl	1,605
AlCl ₃	2,48
F ₂	1,673

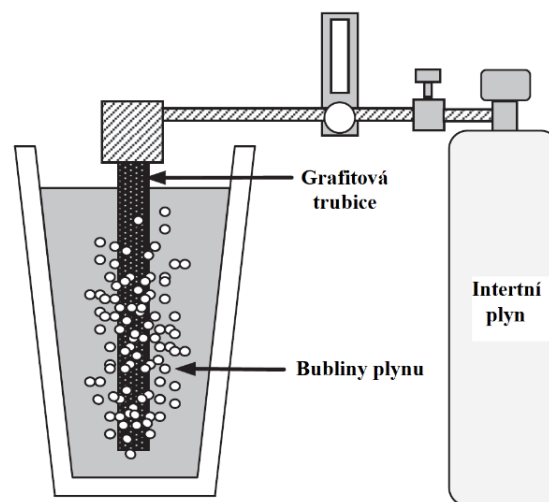
AlCl₃ má nízký bod tání a varu. Sublimuje při teplotě přibližně 180 °C [12; 43]. Koncentrace sloučenin ovlivňuje hustotu i teplotu vypařování. Například s rostoucí koncentrací chlorovodíku roste její hustota a bod vypařování klesá [44].

6.1.1 Statická trubice

Problém při této metodě je výsledná velikost bubliny s nízkým poměrem plocha–objem, proto je výstup bublin k hladině rychlý a s minimální reakční dobou pro absorbování vodíku (Obr. 18). Pro zajištění nejúčinnějšího odplynění touto metodou je zapotřebí míchání trubici celý objem taveniny v peci [4]. Další zvýšení účinnosti se zajišťuje zvětšením styčného povrchu probubláváním přes porézní zátku pro tvorbu jemnějších bublin o menším poloměru (Obr. 19) [12]. Velké bubliny bouřlivě promíchávají taveninu [4]. Materiál trubice bývá obvykle z grafitu nebo keramiky. Doporučeno je opatřit trubici nátěrem. Trubice je ponořena na dno kelímku, aby dráha stoupajících bublin byla co nejvyšší. Metoda je vhodnější pro odplynění menších množství tavenin [11]. Doba probublání dusíkem nebo argonem může být 10–12 min [12].



Obr. 18 Princip vyplouvání větších bublin z trubice [58]



Obr. 19 Probublávání přes porézní zátku [62]

Hodnoty pro odplynění v práci [45] touto metodou: Průtok plynu (argonu) 2 l/min při teplotě 740 °C po dobu 20 min. Odplyňováno bylo 22 kg hliníkové slitiny.

Alternativou může být zavedení plynu přes porézní tvárnici zabudovanou ve vyzdívce. Velikost bublin je menší a tím je menší i míchání taveniny. Pro zajištění míchání taveniny v průběhu procesu je třeba vhodné umístění tvárnice, případně trubice [4; 11].

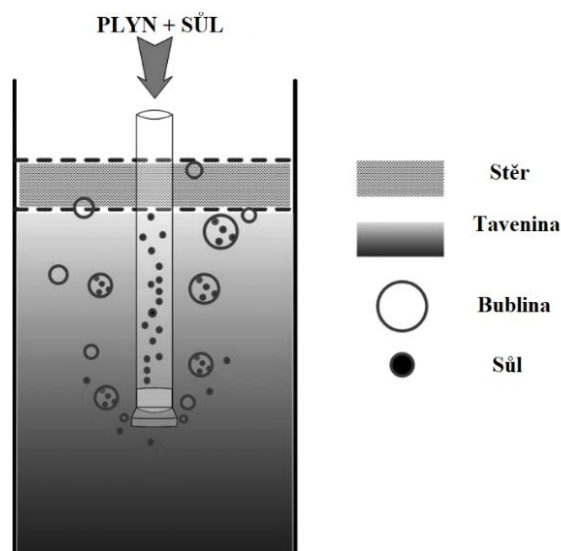
6.1.2 Odplyňovací soli

Odplyňovací soli neboli tablety, byly mezi prvními metodami, které našly široké uplatnění pro odplynění taveniny, především tedy u menších tavících pecí [4]. Jsou to směsi sloučenin, které se v tavenině rozkládají. Při rozkladu vzniká plynný dusík, chlor nebo fluor [11]. Tablety bývaly obvykle na principu rozložení hexachlorethanu (C_2Cl_6), kvůli toxicitě se od nich upustilo. V tavenině tableta vytvářela nerozpustnou metastabilní plynou fázi, chlorid hlinitý ($AlCl_3$) [4; 35; 36]. Bublina plynu je vynesena na povrch taveniny, kde je nadifundovaný vodík odveden do atmosféry [4]. V porovnání s probubláváním taveniny plynem je účinnost nižší [35; 36].

Odplyňovací sůl ve formě tablet uvolňující plynný dusík je vhodnější pro odplynění menšího množství taveniny [46]. Tableta je položena na hladinu a ponořena ponorným zvonem (Obr. 20) až ke dnu kelímku. Vyšší hladina kovu v pánvi zajišťuje vyšší účinek odplynění. Dávkování bývá 0,5–1 % z hmotnosti vsázky [11]. Soli mohou být do taveniny zavedeny i tryskou (Obr. 21) společně s plynem (N_2 nebo Ar) [47]. Tím je zvýšena účinnost v porovnání s použitím pouze odplyňovací soli [46].



Obr. 20 Ponorný zvon školní slévárny VUT v Brně

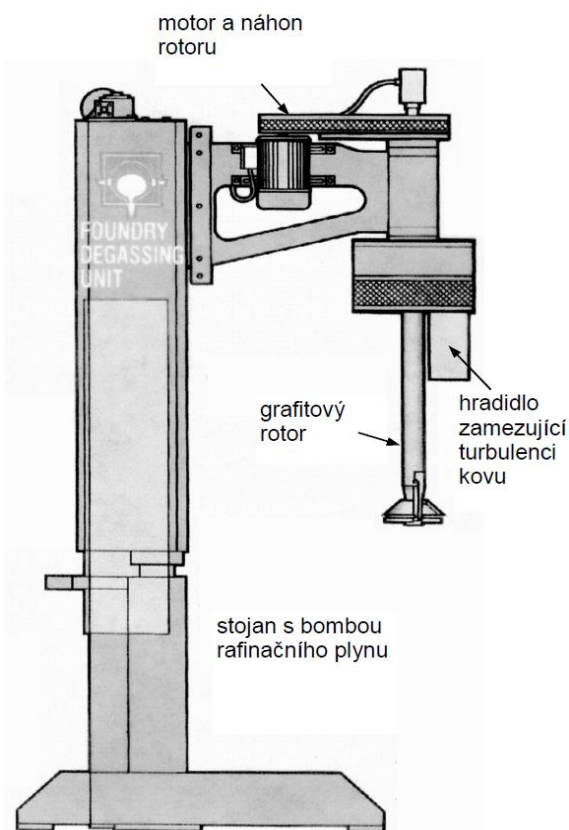


Obr. 21 Sůl zavedena do taveniny plynným médiem [61]

6.1.3 Odplyňovací zařízení FDU

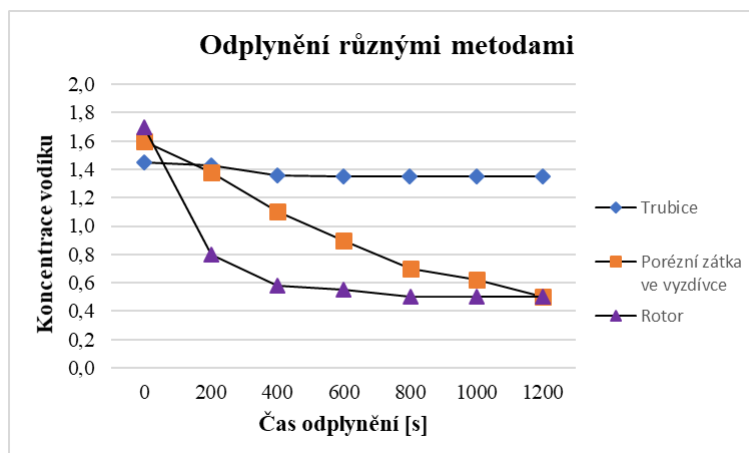
FDU (Foundry Degassing Unit) je odplyňovací jednotka (Obr. 22) [11]. Plyn je přiveden na dno pánve skrz dutou rotační hřídel s (lopatkovým) rotorem, který je umístěn na konci hřídele [16; 47]. Výška rotoru ode dna pánve je většinou 100–150 mm. Pohon je zajištěn elektromotorem v horní části zařízení [16]. Součástí jednotky je hradidlo, které je při procesu ponořeno v tavenině a zabraňuje tím nadměrné turbulenci kovu [11]. Bez hradidla může docházet k nadměrné tvorbě oxidů, které mohou být vtaženy do taveniny.

Odplynění pomocí rotoru je nejrozšířenější způsob odplynění pro hliníkové slitiny [16]. Navíc rotor vytváří „stříhem“ bubliny s menším poloměrem, které jsou rozptýlené v celém objemu taveniny. To zajišťuje vyšší mísení taveniny s plynem. Zmenšením velikosti bubliny dochází ke zvýšení rychlosti difuze. Důvodem je zvětšení plochy na rozhraní plyn–kov [2; 16; 47]. Zároveň dochází k delšímu setrvání bubliny v tavenině [4]. Doba odplyňovacího procesu se pohybuje kolem 3 minut [47]. Otáčky rotoru bývají obvykle mezi 350–500 otáček [11; 48], průtok plynu 15–25 l/min [48]. Lze odplynit taveninu o hmotnosti 150 [49] – 1 000 kg [28; 50].



Obr. 22 Odplyňovací jednotka FDU [11]

Ze všech zmíněných metod je neúčinnější [8]. Vliv jednotlivých metod odplynění na výslednou koncentraci vodíku v čase zpracování je vyznačen na obrázku 23.

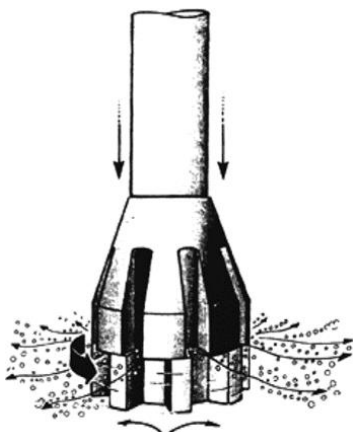


Obr. 23 Závislost koncentrace vodíku na čas odplynění zmíněnými metodami [4]

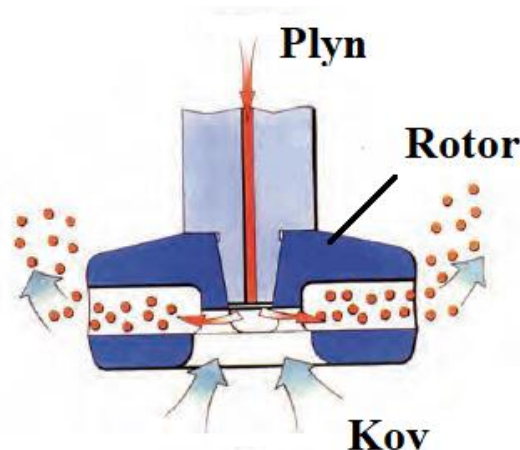
Výhodami rotačního odplynění jsou:

- Vyšší účinnost.
- Kratší doba zpracování.
- Automatizovaný postup.
- Přijatelný z pohledu ekologie [1].
- Homogenita rozptýlení očkovačla, modifikátoru [31].

Většinou je materiál rotoru z opracovaného grafitu a následně impregnován pro zvýšení oxidické a erozní odolnosti grafitového materiálu [48]. Design rotoru se může lišit, dle výrobce. Zpravidla se dělí na rotory bez nasávání kovu (Obr. 24) a s nasáváním (Obr. 25) nebo další příklady viz Příloha 2. Rotory s pumpou jsou, kromě odplynění, navíc využívány v případě užití solných přísad [16]. Dále jsou účinnější než rotory bez nasávání vzhledem k míchání, zlepšování kvality kovu, zajištění konstantní kvality a snížení ceny pro jeden odplyňovací cyklus [51; 52]. V práci [52] se rotorem bez nasávání nedosáhlo odplynění na požadovaných obsah vodíku 0,08 ml/100 g Al. Snížením otáček se dosahuje vyšší životnosti rotoru a tím nižšího znečištění taveniny nekovovými vměstkami [48]. Průměr rotoru se volí dle průměru kelímku pece nebo pánve [16].



Obr. 24 Design rotoru pro zjemnění bublin, případně soli (SNIF) [5; 59]



Obr. 25 Rotor s nasáváním kovu [50]

Hlavními účely rotoru jsou:

- Chemická i teplotní homogenizace.
- Rozptýl plynu.
- Suspendování pevných látek solemi.
- Míchání taveniny [52].

Parametry odplynění se stanovují individuálně pro vlastní potřeby slévárny. Cílem optimalizace procesu je za co nejkratší dobu s ohledem na finanční náklady a bez nadměrného víření dosáhnout řádného odplynění [4; 8]. Parametry odplynění jsou:

- Počáteční a požadovaný obsah vodíku.
- Objem/výška nádoby.
- Otáčky rotoru za minutu.
- Objem a průtok plynu.
- Čas pro dosažení požadovaného odplyňovacího výsledku [4; 28].

Zvýšením otáček rotoru je zmenšena velikost bublin v tavenině. Na druhou stranu, vyšší rychlost rotoru může způsobit víření kovu v oblasti hladiny, absorpci vodíku, zvýšenou tvorbu oxidů a bifilmů v kovu [40]. Zejména bez hradidla může dojít ke stažení vzniklých stěrů do objemu taveniny. Termální a chemická homogenita jsou významné pro odplyňovací cykly s modifikací nebo očkováním [52]. Delší doba zpracování vede k nárůstu stěru a vyšší spotřebě rafinační soli [31]. Prodloužení cyklu znamená vyšší ztrátu teploty, vyšší cenu procesu, vyšší spotřebu plynu a zvýšenou oxidaci kovu [51; 52].

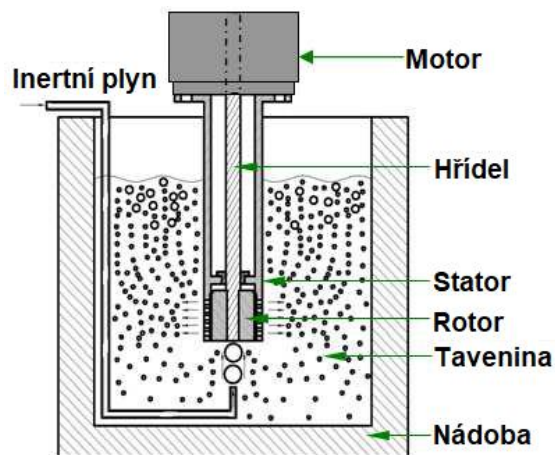
- **Přidání soli** – Kombinace soli, plynu a jejich rozptýlení zajištěné rotorem je přínos pro odplyňovací proces. Rotor nejen že zjemní a rozptýlí bubliny plynu v celém objemu, ale to samé platí i pro rafinační přísadu. Tedy dojde ke zvýšení povrchu a snížení spotřeby soli [47]. Většinou se dodávají ve formě granulátu. Ten se může aplikovat na povrch taveniny nebo do víru taveniny. Sůl je rozptýlena v celém objemu kov. V tavenině se při styku s vměstky spojí a společně jsou vyneseny na hladinu, kde míchání končí [16; 52]. Při aplikaci soli na hladinu, dochází k reakci na povrchu taveniny a atmosféry za vysokých teplot. To je důvodem snížení účinnosti soli v porovnání se zavedením soli pod hladinu [38]. Při aplikaci soli do víru se hradidlo vyjme z taveniny a rotorem se vytvoří vír taveniny. Do víru se přidá rafinační sůl, která je vtažena vírem do objemu taveniny. Přibližně po minutě se hradidlo ponoří zpět do taveniny a produkty reakce vyplavou k hladině [50]. Kombinací injekce rafinačního činidla a rotoru umožňuje snížit dávkování pod 0,05 % [47]. Většinou se používá dávkování 0,1–0,2 % soli z hmotnost tavby [38]. Při použití přísad na bázi soli bylo zjištěno zvýšené opotřebení hřídele i rotoru a tím snížení životnosti jednotky. Na hladině byly vytvořeny menší aglomeráty, jejichž teplota dosahovala až 1250 °C. Tím se potvrdila exotermická reakce solných přísad a objasnilo se vysoké opotřebení grafitové hřídele v oblasti hladiny [16]. Odplyňovací jednotka FDU zajišťuje při správném vedení procesu odplynění a přidáním solných přísad, dosažení nízkého množství stěru a nízkého obsahu kovu ve stěrech [38].

Důležitými podmínkami účinného odplynění jsou [16]:

- Homogenizace (promíchání) taveniny.
- Tvorba bublin u dna pánve.
- Malá velikost bublin – dostatečná rychlost otáčení [otáčky/min].
- Dostatečný čas procesu.

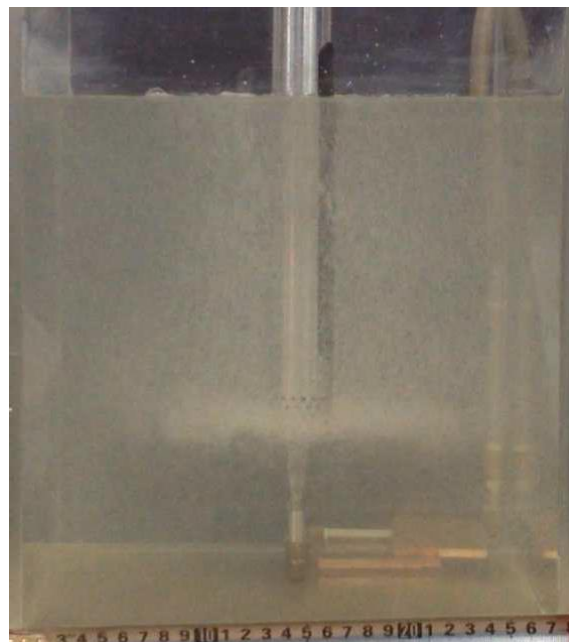
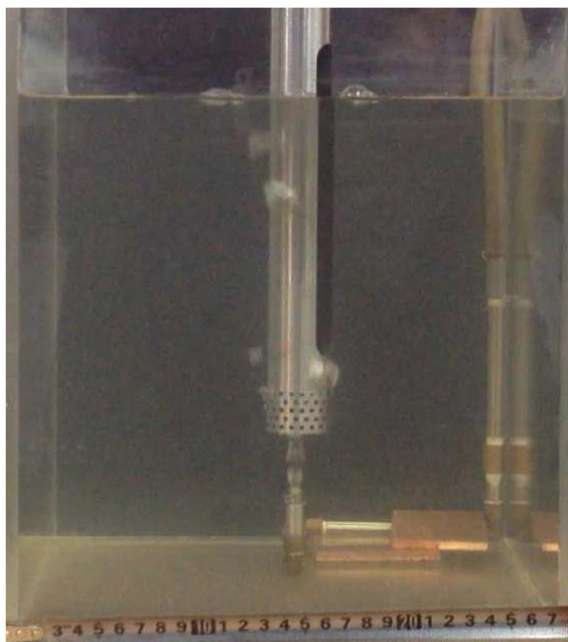
6.1.4 High shear degassing

Odplyňovací zařízení se skládá ze satorové a rotorové části. Inertní plyn je přiveden externí trubicí pod rotor. V průběhu procesu je rotor otáčen motorem a bubliny plynu jsou stříhány v mezeře mezi rotorem a satorovými otvory (Obr. 26). Pracovní podmínky v práci [24] byly: průtok plynu 1 l/min a rychlost rotoru 6000 ot/min. Inertní plyn byl zvolen argon. Při těchto podmínkách se podařilo snížit hodnotu DI z 13,25 % na 0,28 %. Tedy během pouhých 60 sekund byla koncentrace vodíku výrazně snížena. V tomto případě byly uspokojivé výsledky dosaženy již po 30 sekundách. Výhodou jsou malé bubliny, které jsou rovnoměrně rozptýlené. Zvyšuje se fázové rozhraní a čas setrvání v kovu, díky ještě menší velikost bublin než u FDU. Z toho vyplývá vysoká rychlost difuze a delší difuzní čas. Rozptyl bublin je nejen nad rotorem ale i pod rotorem [24; 40]. Přes vysoké otáčky rotoru nedochází k nadměrnému porušení souvislosti hladiny (Obr. 27).



Obr. 26 Princip odplynění metodou “High shear degassing” [24; 40]

Technologie dosahuje vyšší účinnosti odplynění s dosažením nižší výsledné koncentrace vodíku za podstatně kratší čas. To jsou hlavní důvody vysoké účinnosti v porovnání s odplyňovací jednotkou FDU [24; 40].



Obr. 27 Vliv otáček na velikost a rozptýlení bublin:
0 ot/min (vlevo), 4000 ot/min (vpravo) [40]

6.2 Odplynění vakuováním

Principem je rozdíl parciálního tlaku plynu rozpuštěného v tavenině a nad taveninou. Se snižujícím tlakem nad hladinou roztaveného kovu se snižuje rozpustnost plynu v tavenině.

Snížení rozpustnosti v závislosti na tlaku popisuje Sievertsův zákon pro dvouatomové plyny [11; 12; 16]. Samotné odstátí nemá žádný vliv na odplynění taveniny [11].

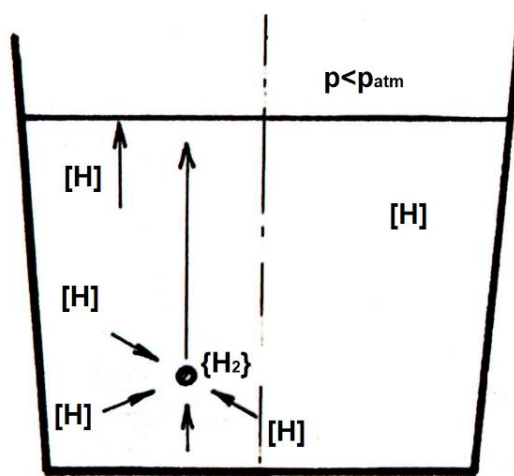
$$S = k * \sqrt{p_{H_2}} \quad (20)$$

Při překročení parciálního tlaku vodíku ve zbývající tavenině dochází k vzniku plynových bublin (Obr. 28). Molekuly plynu vznikají z vodíku, který je atomárně rozpuštěný v tavenině [4]. Vznik je popsán rovnicí (37) [11]:



Natavený kov je přelit do pánve a umístěn do vakuové komory ve které je ponechán při určitém tlaku, dle objemu taveniny [12]. Tlak v komoře je snížen na hodnotu asi 5 kPa [11]. Čas vakuování se odvíjí od množství kovu. Odplynění trvá 8–30 minut při teplotách 780–800 °C. Odplynění je účinnější čím nižší je hodnota tlaku nad taveninou a čím delší je doba odplynění. Tlak by měl být vyšší než tlak par ostatních složek slitiny, aby nedocházelo k jejich vypařování [12].

Bubliny se vytváří v povrchové části objemu taveniny. S hloubkou se tvorba zárodků bublin snižuje, viz kapitola 4.2. Rychlost difuze atomů se snižuje s rostoucí hloubkou tekutého kovu. Zvýšené účinnosti lze dosáhnout snížením výšky taveniny a zvýšením povrchu hladiny. Tímto opatřením ovšem vznikají velké tepelné ztráty. Rychlost odplynění lze zvýšit mícháním taveniny, a to buď mechanickým nebo probubláváním inertního plynu [11; 12]. Homogenní vznik bublin je z energetického hlediska nepravděpodobný, proto bubliny vznikají na nekovových vměstcích v tavenině. Vměstky jsou vynášeny vyloučenými bublinami. Z toho vyplývá, že při odplynění vakuováním dochází i k rafinaci nekovových vměstků [12]. Konečný obsah vodíku po vakuování může dosáhnout až 0,08 ml/100 g Al [11].



Obr. 28 Tvorba bublin v tavenině při vakuování [11]

6.3 Metody měření naplynění

Množství vodíku může být stanoveno pomocí metod laboratorních, provozních nebo v reálném čase (Tab. 6). Metody v reálném čase jsou často založené na využití inertního plynu. Uvnitř bubliny inertního plynu jsou shromažďovány rozpuštěné vodíkové atomy z taveniny (Telegas, Alscan). Laboratorní metody jsou drahé a většinou měření trvá delší dobu. Provozní metody jsou orientační, obvykle vyhodnoceny optickým posouzením hladiny vzorku ztuhlého za podtlaku a při atmosférickém tlaku. Při tuhnutí za sníženého tlaku se mění rozpustnost vodíku a ten se vyloučí ve formě bublin. Hladina naplyněného vzorku má proto vypouklý tvar. Hladina správně odplyněného vzorku má zpravidla propadlejší tvar [4; 11; 20; 28].

Někdy je důležitá operativnost metody více než její přesnost. Na základě výsledku se vyhodnotí další postup (další odplyňovací cyklus nebo přesun kovu k lícímu poli). Modernější provozní metody se snaží dosáhnout vyšší operativnosti, reprodukovatelnosti a přesnosti měření pro stanovení obsahu vodíku [11].

Tab. 6 Metody kontroly naplynění taveniny [11; 20].

Laboratorní	Provozní	V reálném čase
Vakuová extrakce	Gürtlerova zkouška	Telegas
	Straube-Pfeiffer	Alscan
	Metoda první bubliny (Dardel)	Chapel
	Metoda dvojího vážení	

Níže uvedené metody neměří stupeň naplynění jako obsah rozpuštěného vodíku, ale hodnotí sklon k tvorbě bublin při tuhnutí [15]. V tavenině jsou obsaženy rozpuštěné plyny a vměstky, zejména bifilmy, které obsahují pohlčený vzduch. Ten při tuhnutí za podtlaku expanduje a zvyšuje se plynová porézita vzorku [28].

6.3.1 Straube-Pfeiffer (Drosstest)

Vzorky o hmotnosti 200–230 g tuhnou v kelímcích při atmosférickém tlaku a za podtlaku (5–10 kPa). Více vodíku se vyloučí při tuhnutí za podtlaku. Pro metodu je důležité zajistit: stejnou dobu tuhnutí vzorků o stejném objemu a konstantní podtlak. Nekovové vměstky zapříčiňují vyšší naplynění, dokonce při stejném obsahu vodíku. Posuzuje se souhrnný obsah vměstků a naplynění. Metoda je podobná Gürtlerově zkoušce, kde se vzorek odlévá do pískové formy s předepsanou geometrií [11].

6.3.2 Metoda první bubliny (Dardel)

Vzorek je nalit do kelímku a tuhne za podtlaku (80 mbar [20; 24]). Průhledným víkem se pozoruje výskyt první bubliny. V ten okamžik se zaznamená teplota a tlak. Dále dle rovnice (19) se určí naplynění [11]. Vzorek taveniny má hmotnost 100 g [20]. Metoda se příliš nevyužívá ve slévárenské praxi, ale používá se v hutním průmyslu [11; 20].

$$\log S = \frac{1}{2} * \log p_{H_2} - \frac{A}{T} + B \quad (19)$$

6.3.3 Metoda dvojího vážení

Porovnání hustoty vzorku ztuhlého při atmosférickém tlaku „ p_{atm} “ (1000 mbar [20]) a za podtlaku „ p_{vak} “ (80 mbar) ve vakuové komoře (Obr. 29). Z hustot vzorků se určí tzv. „index hustoty“ (z německého „Dichte Index“ označován jako „DI“) [11]. Tato hodnota se vyjadřuje v procentech. Udává procentuální podíl pórů v celkovém objemu [20]. S rostoucí hodnotou DI klesají mechanické vlastnosti odlitku. Vliv indexu hustoty na některé z mechanických vlastností je znázorněn na obrázku 30. Zkouška vyžaduje stejné podmínky provedení: teplotu kelímku, množství a teplotu kovu [15]. Hmotnost jednoho vzorku je 100 g. Metoda je využívána ve slévárnách nejčastěji [11; 20].

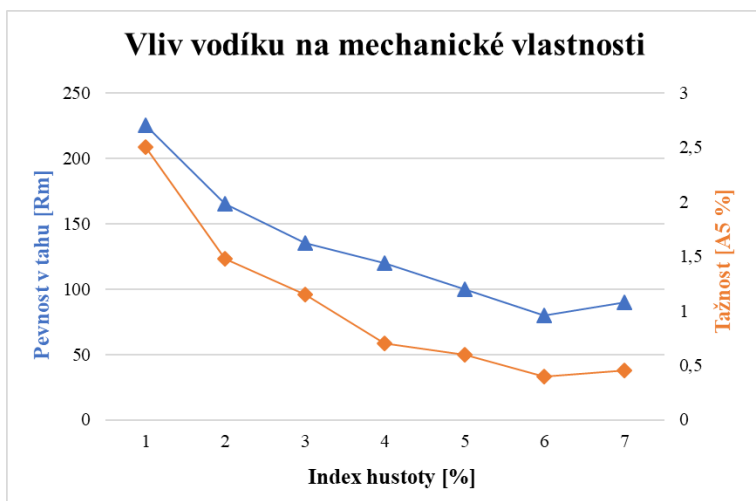


Obr. 29 Vakuové zařízení

Vyhodnocení probíhá na váze [20]. Prvně se zváží vzorek na vzduchu, poté se zavěsí ponoří do nádobky s vodou. Váha zaznamenaná přírůstek hmotnosti vody, která byla vytlačena objemem ponořeného vzorku (Archimédův zákon) [11]. Zařízením většinou neumožňuje trvalý záznam [20]. Zařízením na obrázku 31 je index hustoty

počítán automaticky [11]. Index hustoty je počítán z hustot dvou vzorků ztuhlých za různých tlaků, vztah pro výpočet hodnoty DI je uveden v rovnici (38).

$$DI = \frac{(\rho_{\text{atm}} - \rho_{\text{vak}})}{\rho_{\text{vak}}} * 100 \text{ [%]} \quad (38)$$

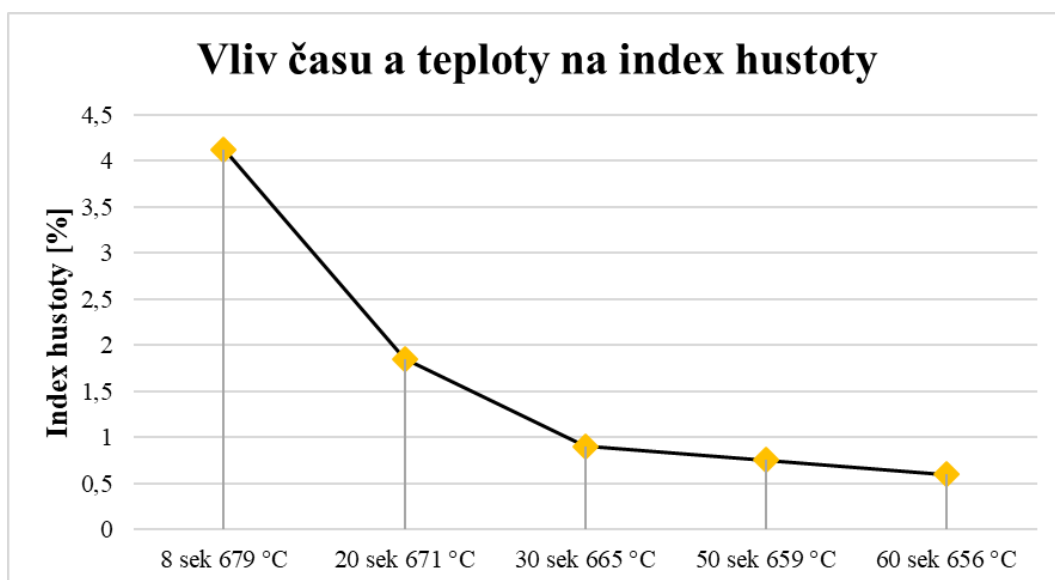


Obr. 30 Vliv vodíku na pevnost v tahu a tažnost [20]



Obr. 31 Váha s automatickým výpočtem hodnoty DI

Hodnota DI je ovlivněna dobou mezi odběrem vzorku a dosažením předepsaného smluvního tlaku. Tedy je to doba tvořená součtem času odběru vzorku, jeho nalití do zkušební kelímku, čas zapnutí vývěvy a dosažení požadovaného tlaku. Během této doby kov rychle chladne a jeho hustota se zvyšuje. Výsledné hodnoty DI jsou nižší. Výrazný vliv na stanovení obsahu vodíku má také teplota. S poklesem teploty taveniny se snižuje rozpustnost vodíku a vznikají nežádoucí bubliny (Obr. 32) [20].



Obr. 32 Časová prodleva a pokles teploty při odebrání vzorku na index hustoty [20]

Pokud je v poslední fázi tuhnutí viděna plynová bublinatost, předpokládá se relativně vysoký obsah vodíku a žádné oxidy. Absence plynových pórů značí vzorek bez oxidů a obsah vodíku pod práh rozpustnosti vodíku v tuhém stavu [17].

Slitiny s nízkým obsahem vměstků nemusí při vysokém naplynění nutně znamenat vysokou hodnotu DI. Naopak slitiny s vysokým obsahem vměstků mohou tvořit bubliny při nízkém obsahu vodíku [15].

7 EXPERIMENT ODPLYNĚNÍ

V kapitole 6. byly vysvětleny a popsány jednotlivé metody odplynění jak v laboratorních, experimentálních i reálných podmínkách. Každá z metod s sebou nese určité výhody a nevýhody. Slévárny používají metody jež jsou jim doporučeny na základě množství odplyňované taveniny, času zpracování, požadované čistotě tekutého kovu a jiné (například nákladovost metod).

Školní slévárna VUT FSI v Brně disponuje elektrickou odporovou pecí, ve které je možné tavit neželezné slitiny, především tedy slitiny hliníku. Pro tavení hliníkových slitin byl vybrán kelímek s maximálním obsahem 50 kg. Tavící agregát k výrobě prototypových kusů pro potřeby slévárny není nějak výrazně limitujícím faktorem. Limitující je zpracování taveniny, především její rafinace a odplynění. V některých případech bývá tavenina i řízeně naplyněna, pokud si to vyžaduje technologie nebo konstrukce odlitku. Při výrobě prototypových součástí dochází produkci neshodných dílů. Nejekonomičtější řešením je opětovné přetavení, čímž se zvyšuje znečištění taveniny, které musí být následnými postupy odstraněno nebo sníženo na přípustnou úroveň.

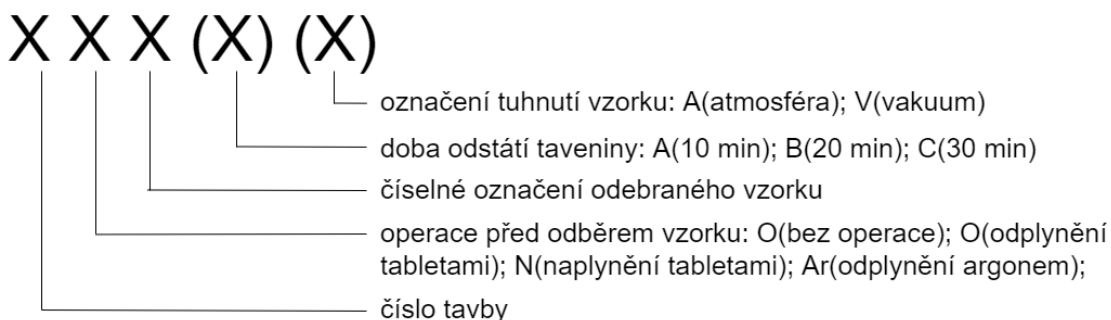
Účelem práce je shromáždění dat vlivu metod odplynění na výslednou hodnotu DI po odplynění v podmínkách školní slévárny VUT v Brně. Zvažovány byly metody: Odplynění tabletami, probublávání inertním plynem o vysoké čistotě přes statickou trubici s porézní zátkou nebo zapůjčení odplyňovací jednotky externí firmou.

Naměřená data byla shromážděna do předem vytvořených tabulek, které se upravovaly na pracovišti dle výběru metody. Data byla později přepsána do programu Microsoft Excel, ve kterém byly výsledky zpracovány. Následovalo otestování zvolené metodiky v průběhu orientačních cyklů odplynění, zdali je postup měření správně uspořádaný, aby nedocházelo k chybám.

Všechno nářadí, které přišlo do kontaktu s taveninou bylo předtím opatřeno ochranným nátěrem, vysušeno a předehřáto na plynovém hořáku. Kovové kelímky pro odběry vzorků byly opatřeny nátěrem. Tímto nátěrem bylo opatřeno i ponorné teplotní čidlo. Sibalová pánev pro odběr vzorků nebyla ošetřena nátěrem.



Obr. 33 Pracovní prostor s vybavením



Obr. 34 Značení vzorků

Označení v závorkách byla použita při identifikaci jednotlivých vzorků pro měření hodnoty DI nebo ve výjimečných případech.

7.1 Vedení taveb

V kelímku byla natavena vsázka o hmotnosti 40 kg. Vsázka byla tvořena houskami (Al-Si9-Cu3-Fe), které byly nařezány na třetinové kusy a uloženy na dno tavícího kelímku. Chemické složení slitiny je zaznamenáno v tabulce 7. V průběhu tavení byla vsázka doplněna kusy housek, které byly předeřhřáty na víku pece. Po celou dobu každého z experimentů byla pec nastavena na 700 °C. Po natavení vsázky se očistila hladina, zaznamenala teplota a odebraly se vzorky.

Tab. 7 Chemické složení slitiny EN AC-ALSi9Cu3(Fe) [11].

Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]
8-11	0,6-1,1	2-4	0,55	0,15-0,55	0,15
Ni [%]	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	Ti [%]	
0,55	1,2	0,35	0,25	0,2	

První vybranou metodou bylo odplynění tabletami. Důvodem byla cenová dostupnost metody a jejich snadná operativnost. Kontaktovali jsme slévárnu KOVOLIT Česká spol. s r.o., které nám dohodou poskytla tablety. Byly použity odplyňovací tablety „ECOSAL AL – 320“ (Obr. 35), které jsou využívány v jejich provozu. Byly zapůjčeny i naplyňovací tablety „PROBAT – FLUSS BEGASER T 200“ (Obr. 36), kterými je tavenina řízeně naplyněna.

Aplikováním naplyňovacích tablet je zvýšen obsah vodíku v tavenině a dosahuje se vyšších hodnot DI. Tomu se říká řízené naplynění. Tablety je vhodné použít s uvážením konstrukce a technologičnosti odlitku. V tomto experimentu je odzkoušen pouze vliv dávkování tablety na výslednou hodnotu DI po řízeném naplynění. Bližší informace o tabletách jsou v Příloha 3 a 4.

7.2 Průběh experimentu

V průběhu natavování vsázky bylo naváženo správné dávkování tablet dle výrobce. Tableta se mechanicky rozdělila. Při dělení docházelo ke vzniku různé kusovitosti částí tablety. Pro experiment byly naváženy vždy části o největší kusovitosti. Navážka byla zabalena do kusulobalové fólie a označena. Především bylo upřednostněno nepoužívat nejmenší kusovitost, tedy prach nebo drobky z tablet. Důvodem byla snaha zajistit co největší kompaktnost dávky, jako je tomu při použití celé tablety a zachovat tím funkčnost dávky.

Po změření teploty taveniny se patřičná dávka odplyňovací tablety umístila na hladinu kovu a byla ponořena ponorným zvonem na dno kelímku. Následně byly zapnuty stopky. V průběhu reakce byl zvon s dávkou držen na dně kelímku. Výška kovu v kelímku byla 300 mm.

Na konci reakce byl zvon vyjmut z kelímku a mechanicky očištěn pro další použití. Povrch taveniny byl očištěn od zbytků tablety a produktů reakce. Z očištěné hladiny byly odebrány vzorky do kovových kelímků. Vzorky ztuhly za atmosférického tlaku a sníženého tlaku. Doba tuhnutí ve vakuovém zařízení byla stanovena na 5 minut.

Proces byl opakován před každým odebráním vzorkem. Zbývající kov byl po experimentu ručně odlit do housek do předpřipravených natřených kovových kokil. Před další tavbou byly housky nařezány a taveny dle výše zmíněného postupu. Vyhodnocení většinou probíhalo až po odlití a popisu všech vzorků, z důvodu vysoké teploty vzorků pro manipulaci a měření.

7.2.1 Dávkování

Doporučené dávkování odplyňovací tablety dle výrobce je 0,05–0,2 % z hmotnosti vsázky (viz Příloha 3). Dávkování naplyňovací tablety dle výrobce je 0,05–0,3 % z hmotnosti vsázky (viz Příloha 4). Jako první byla odzkoušena dávka odplyňovací tablety množstvím 0,1 %, protože dávka 0,05 % (=20 g) odpovídá cca desetině hmotnosti tablety. Kusovitost dávky by byla nevhodná a mohla by projít otvory ve zvonu.



Obr. 35 Odplyňovací tableta



Obr. 36 Naplyňovací tableta

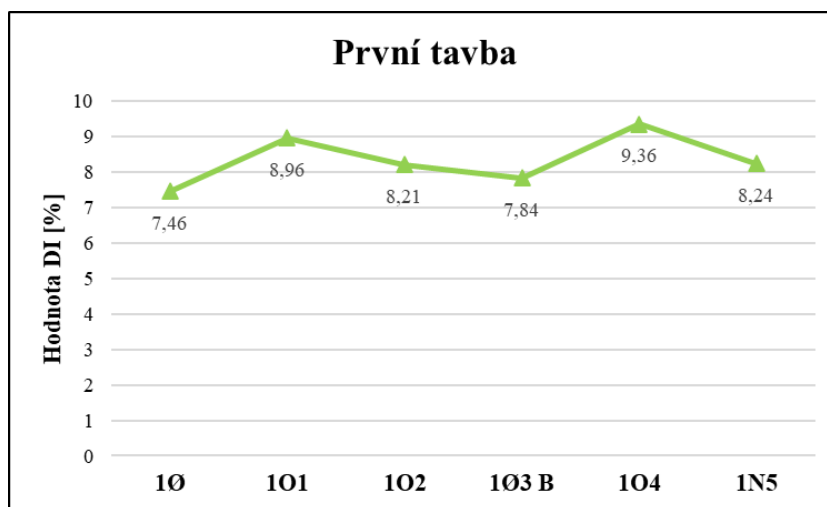


Obr. 37 Označené a navážené tablety zabalené do hliníkové fólie: N – naplyňovací, O – odplyňovací

7.3 První tavba

Po natavení byla změřena hodnota DI, následně byla tavenina odplyněna tabletou s dávkováním 0,1 %. Index hustoty poté vzrostl o hodnotu 1,5 %. Při zvýšení dávky na 0,2 %, což je horní hranice doporučené dávky, se opět nedosáhlo výrazného snížení hodnoty DI. Nárůst hodnoty jako u předchozího dávkování nebyl pozorován. Byla ale zaznamenána delší doba reakce (178 s) než při dávkování 0,1 % (103 s). Hodnota DI mírně klesla, ale neklesla pod počáteční hodnotu. Bouřlivost 101 a 102 byla srovnatelná. Následně se tavenina nechala 20 minut odstát.

Hodnoty naměřené v průběhu experimentu jsou zaznamenány v Tab. 8 a hodnoty DI jsou vyneseny na Obr. 38.



Obr. 38 Průběh odplynění tabletami – první tavba

Po odstátí taveniny (103 B) byl zaznamenán nejvyšší pokles hodnoty DI. Hladina byla očištěna a tavenina byla odplyněna tabletou s dávkováním 0,3 % (104). Toto dávkování je vyšší než doporučené dávkování. Reakce tablety v tavenině, překvapivě, trvala stejnou dobu jako při dávkování 0,2 %, ale byla nejbouřlivější ze všech reakcí.

Na konci byla odzkoušena i naplyňovací tableta s dávkováním 0,1 %. Bouřlivost i doba reakce jsou shodné s odplyňovací tabletou s dávkováním 0,1 %. Hodnota DI nevzrostla, naopak poklesla.

Tab. 8 Naměřené hodnoty z první tavby.

Značení	1Ø	101	102	103 B	104	1N5
Tepnota [°C]	666	-	679	683	-	-
Dávkování [%]	-	0,1	0,2	-	0,3	0,1
Čas [s]	-	103	178	-	160	110
DI [%]	7,46	8,96	8,21	7,84	9,36	8,24

7.3.1 Vyhodnocení

Dávkování do 0,2 % má výrazný vliv na dobu probublávání. Vyšší dávkování nezaručuje prodloužení doby reakce, pouze zvyšuje její bouřlivost. Odplynění s dávkováním 0,3% je nevhodné. Z tablety se sice uvolní více dusíku, ale ve formě velkých bublin. Ty jen krátce setrvávají v tavenině, protože rychleji stoupají k hladině. Doba trvání reakce je srovnatelná s dávkováním 0,2%. Zvýšením dávkování se v našich podmínkách nedosáhlo zvýšení účinnosti odplynění.

Doporučeným dávkováním od výrobce ani vyšším dávkováním se tavenina neodplynila. Nepodařilo se snížit hodnotu DI pod hodnotu, která byla změřena po natavení vsázky (1Ø). Předpokladem nárůstu indexu hustoty je vlhkost obsažená v odplyňovací tabletě zapříčiněná nevhodným skladováním.

Naplyňovací tableta je aplikována stejně jako odplyňovací tableta. Hodnota DI po aplikaci naplyňovací tablety nevzrostla, naopak klesla.

- Odplynění dávkou 0,1 %:
 - Byla tavenina naplyněna na vyšší hodnotu DI než hodnotu po natavení.
 - Doba reakce tablety v tavenině 103 sekund.
- Odplynění dávkou 0,2 %:
 - Byla tavenina mírně odplyněna.
 - Je zajištěna delší doba reakce (178 sekund) než s dávkováním 0,1 %.
 - Byla pozorována vyšší bouřlivost reakce než při předchozím dávkování.
 - Subjektivně je velikost unikajících bublin srovnatelná s dávkou 0,1 %.
- Odplynění dávkou 0,3 %:
 - Vyšší dávkováním než doporučeným, bylo dosaženo největší bouřlivost reakce. Docházelo k uvolňování velkých bublin.
 - Velké bubliny podstatně porušovaly souvislost hladiny.
 - Množství kovového i nekovového stěru je subjektivně větší (Obr. 39).
 - Nebyla prodloužena doba reakce. Doba trvání reakce je srovnatelná s dávkou 0,2 %.



Obr. 39 Stěr z hladiny před odběrem vzorku 104

- Naplynění dávkou 0,1 %:
 - Bouřlivost reakce jsou srovnatelné s odplyněním dávkou 0,1 %.
 - Reakce trvala 110 sekund.
 - Reakcí se tavenina řízeně nenaplynila a po reakci byl zaznamenán pokles hodnoty DI.

Odplynění tabletami uvolňující dusík je dle autora [46] nejvhodnější metodou pro odplynění menších množství taveniny. V našich podmínkách se odplynění tabletami nepodařilo. Aplikací odplyňovacích tablet se hodnota DI zvýšila a s vyšší dávkou mírně klesla. Při odstátí se dosáhlo nejvyššího poklesu hodnoty DI. Tento pokles je však pro nás technicky nevýznamný. V průběhu experimentu nebyla hodnota DI snížena pod počáteční hodnotu.

Uvolněné bubliny unikaly především středem zvonu podél rukojeti tyče (Obr. 40). Trajektorie bublin k hladině je krátká a rychlost vyplouvání se odvíjí dle poloměru bublin, viz Stokesův zákon (vztah 36 – str. 29). Zvon nezajišťuje rozptýlení bublin v celém objemu, čímž se podstatně snižuje účinnost odplynění.



Obr. 40 Vyplouvání bublin středem zvonu

7.3.2 Opatření

Ve slévárenských provozech se tablety, před aplikací do taveniny, nechávají předehřát na víku tavící nebo udržovací pece. Cílem předehřevu tablet je údajně snížení vlhkosti obsažené v tabletě. Před další tavbou byly odplyňovací i naplyňovací tablety označeny, zváženy a umístěny do žíhací pece. Podmínky sušení byly zvoleny následovně:

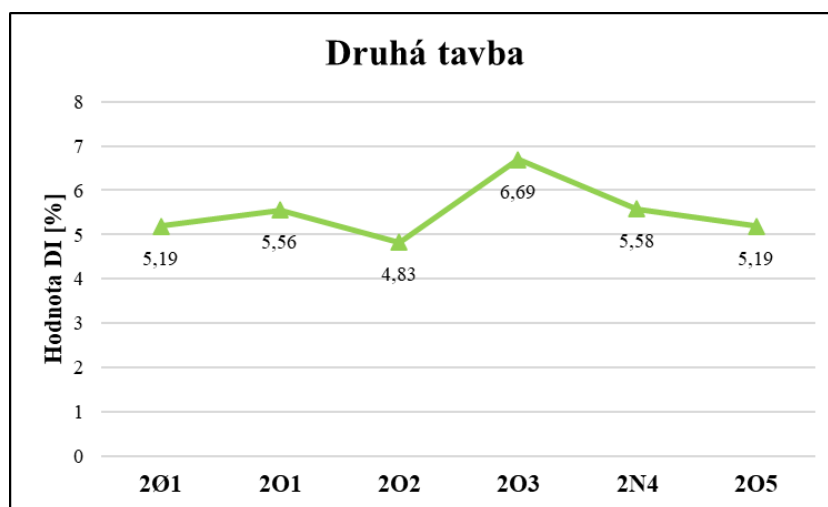
- Nastavená teplota v žíhací peci – 120 °C.
- Doba sušení – 24 hodin.

Ponořením vyšší dávky než 0,2 % byla zjištěna vyšší bouřlivost reakce a únik nadměrně velkých bublin při stejné době trvání jako u nižšího dávkování. Vyšší dávkování tedy nezaručuje vyšší účinnost odplynění. Pro dosažení vyšší účinnosti odplynění tabletami byl navržen přídatný odplyňovací cyklus. Návrhem je tedy ponořit dávku 0,2 % do taveniny dvakrát po sobě. Vyšší účinnost je odhadována delší dobou reakce tablety.

7.4 Druhá tavba

Následující tavba se odplyňovala tabletami, které byly předehřáté z žíhací pece. Tablety byly převáženy, mechanicky rozděleny a naváženy dle příslušného dávkování. Znovu bylo odzkoušeno dávkování 0,1–0,2–0,3 %. Doba trvání a bouřlivost reakcí se liší jen minimálně. Nejnižší hodnota DI byla naměřena u vzorku po odplynění s dávkováním 0,2 % (2O2). Ponořením odplyňovací dávky 0,3 % (2O3) se tavenina naplynila.

Při odzkoušení naplyňovací tablety s dávkováním 0,1% byl naměřen pokles indexu hustoty o více než 1 %. Bylo odzkoušeno odplynění dvěma po sobě jdoucími cykly. Jeden odplyňovací cyklus byl tvořen dávkou s 0,2 %. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 9 a vyneseny do grafu na obrázku 41.



Obr. 41 Průběh odplynění tabletami – druhá tavba

Tab. 9 Naměřené hodnoty z druhé tavby.

Značení	2Ø	2Ø1	2Ø2	2Ø3	2N4	2Ø5
Teplota [°C]	694	-	-	-	-	-
Dávkování [%]	-	0,1	0,2	0,3	0,1	2x0,2
Čas reakce [sek]	-	81	162	174	110	177+190
DI [%]	5,19	5,56	4,83	6,69	5,58	5,19

7.4.1 Vyhodnocení

Odplyňovací tableta váží 258 g. Po předehřátí odplyňovacích tablet byl zaznamenán minimální úbytek hmotnosti (1–2 g). Tento úbytek mohl vzniknout odrolením tablety při manipulaci. Neprokázala se ani vyšší účinnost odplynění. Doba reakce i výsledky jsou srovnatelné s předehřátou tabletou z první tavby.

- Odplynění dávkou 0,1 %:
 - Byla tavenina opět naplyněna.
 - Hodnota DI vzrostla o 0,37 %
 - Naplynění je menší než v předchozí tavbě, kde hodnota DI vzrostla o 1,5 %.
- Odplynění dávkou 0,2 %:
 - Byla tavenina odplyněna na hodnotu DI=4,83 %.
 - Bylo dosaženo nejnižší hodnoty DI z obou taveb.
- Odplynění dávkou 0,3 %:
 - Byla tavenina naplyněna stejně jako v předchozí tavbě.
 - Byla zaznamenána nejvyšší hodnota DI v této tavbě.
 - Docházelo opět k vysoké bouřlivosti reakce.
 - Doba reakce se neprodloužila.
 - Reakcí opět vznikaly velké bubliny, které významně narušovaly souvislost hladiny kovu.

U odzkoušeného dávkování 0,1–0,2–0,3% byl zaznamenán přibližně stejný průběh jako v předchozí tabuli včetně dob reakcí. Nejnižší hodnota DI byla naměřena u vzorku po odplynění s dávkováním 0,2 %.

- Naplynění dávkou 0,1 % :
 - Tavenina nebyla řízeně naplyněna, naopak byla mírně odplyněna.
 - Hodnota DI klesla o 1,09 %.
 - Doba trvání reakce je shodná s dobou trvání v první tabuli (1N4).
 - Bouřlivost reakce byla dosud nejnižší.
 - Tableta téměř nereagovala (Obr. 42).
 - Neunikaly téměř žádné bubliny.
 - Po reakci byla tableta vyjmuta v celku



Obr. 42 Naplyňovací tableta obsažená ve stěru – po přehřevu

Po přehřevu naplyňovací tablety byl naměřen úbytek hmotnosti 32 g (z původních 225 g). Vysušením naplyňovací tablety se výrazně snížila i reaktivnost tablety. Nedošlo k úniku téměř žádných bublin. Na základě úbytku hmotnosti mohlo dojít ke ztrátě účinné látky a tedy i naplyňovacího účinku. Další možností nenaplynění je vadný kus tablety. Naplyňovací tableta nevyšla hodnotu DI, naopak hodnotu snížila. Ve stěru byla tableta obsažena v nezreagovaném stavu. Přehřevem tablet nebylo dosaženo řízeného naplynění taveniny.

- Odplynění 2x0,2 %:
 - Doba trvání obou reakcí (2O5) byla obdobná s dávkami 0,2 % (cca 180 sekund).
 - Celková doba reakcí byla přibližně 6 minut (367 sekund).
 - Bouřlivost obou dávek byla srovnatelná jak vzájemně, tak s ostatními dávkami 0,2 %.
 - Tavenina se mírně odplyněla.
 - Změna hodnoty indexu hustoty se pohybovala v desetinách procent.
 - Konečná hodnota DI je shodná s počáteční hodnotou DI.

Zařazením přídatného cyklu nebylo dosaženo významných změn v odplynění taveniny. Byla prodloužena doba reakce, ale bez podstatného účinku na výslednou hodnotu DI. Aplikací dávky 2x0,2 % (2O5) nedošlo ke snížení hodnoty pod počáteční hodnotu DI (2Ø). Tavenina opět nebyla odplyněna.

Na základě vyhodnocení taveb bylo zjištěno:

- Přehřev odplyňovacích tablet:
 - Nezvyšuje účinnost odplynění.
 - Nesnižuje reaktivnost tablet.
 - Nemá vliv na úbytek hmotnosti.
- Přehřev naplyňovacích tablet:
 - Snižuje naplyňovací účinek
 - Snižuje reaktivnost tablet.
 - Má vliv na hmotnostní úbytek.
- Vyšším dávkováním než 0,2 % se v našich podmínkách nedosahuje vyššího odplynění:
 - Doba reakce tablety s vyšším dávkováním je stejná jako při dávkování 0,2 %.
 - Dochází k uvolnění nepříznivě velkých bublin.
 - Které rychleji stoupají k hladině.

- Které podstatně porušují souvislost hladiny taveniny.
- Zařazení přídavného odplyňovacího cyklu:
 - Vhodnější pro odplynění než zvýšení dávkování nad 0,2 %.
 - Nemá podstatný vliv na snížení hodnoty DI.
- Doby trvání všech reakcí (s vysušenými tabletami) jsou cca shodné s předchozí tavnou.

7.4.2 Opatření:

Tyto výsledky předchozích taveb byly konzultovány se slévárnou KOVOLIT Česká, i dodavatelem tablet Promet CZ, s.r.o. Konzultován byl i postup a průběh experimentu. Závěrem byly následující opatření a doporučení:

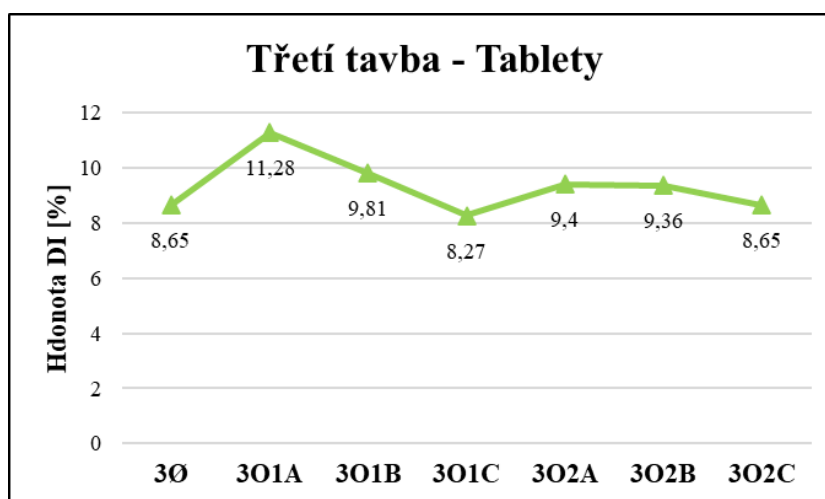
- Parametry odplynění (teplota taveniny, dávkování, doba reakce, ponoření zvonem, výška hladiny kovu) jsou v souladu s parametry pro správné odplynění.
- Dodání odplyňovacích tablet přímo od dodavatele v originálním balení.
- Po odplynění nechat taveninu odstát 10–20 minut.
- Před odběrem vzorku promíchat taveninu.

7.5 Třetí tavba

Byly použity nové odplyňovací tablety od dodavatele Promet CZ a nové naplyňovací tablety byly dodány slévárnou KOVOLIT Česká. Tablety jsou shodné s použitými v předchozích tavnách, viz Příloha 3 a 4, pouze byly dodány v originálním balení. Tím byl vyloučen nepříznivý vliv špatného skladování na funkčnost tablet. Balení byla otevřena a tablety byly ihned použity.

Postup experimentu byl upraven dle doporučení. Aplikovány byly pouze odplyňovací dávky 0,1 a 0,2 % s následným odebráním vzorku a odstátím taveniny před dalším odběrem.

- Odebrání vzorku po vyjmutí zvonu a očištění hladiny – 3O1A.
- Odstátí 10 minut od odběru prvního vzorku – 3O1B.
- Odstátí 30 minut od odběru prvního vzorku – 3O1C.



Obr. 43 Průběh odplynění tabletami – třetí tavba

Před odběrem vzorku po odstátí byla očištěna hladina a tavenina byla promíchána. Následně byly vzorky odebrány. Maximální doba 30 minut byla zvolena, protože ve slévárenských provozech zařazení delší doby odstátí vede k podstatnému poklesu teploty taveniny a může vést

k prodražení výroby. Hodnoty z odplynění tabletami jsou zaznamenány v tabulce 10. Průběh odplynění je znázorněn na obrázku 43.

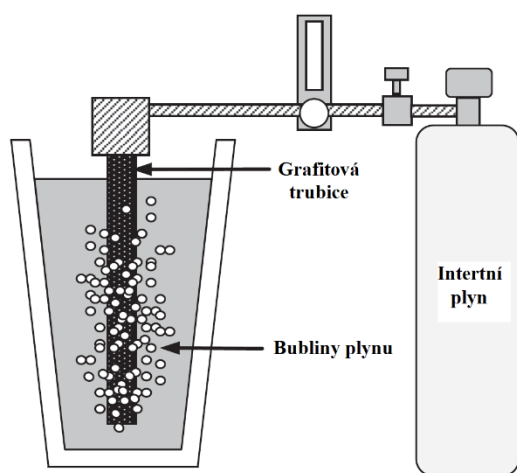
Tab. 10 Naměřené hodnoty z třetí tavby – odplynění tabletami.

Značení	3Ø	301 A	301 B	301 C	302 A	302 B	302 C
Teplota [°C]	706	692	680	681	680	674	677
Dávkování [%]	-	0,1	-	-	0,2	-	-
Čas [s]	-	97	-	-	143	-	-
DI [%]	8,65	11,28	9,81	8,27	9,4	9,36	8,65

Ke konci experimentu byla zprovozněna a odzkoušena trubice s porézní zátkou (Obr. 44). Trubice se skládala ze sibalových trubek navlečených na ocelovou trubku. Celá trubice byla ošetřena grafitovým nátěrem. Jako odplyňovací plyn byl použit argon (čistoty 5.0). Průtok plynu přes porézní zátku byl řízen redukčním ventilem.

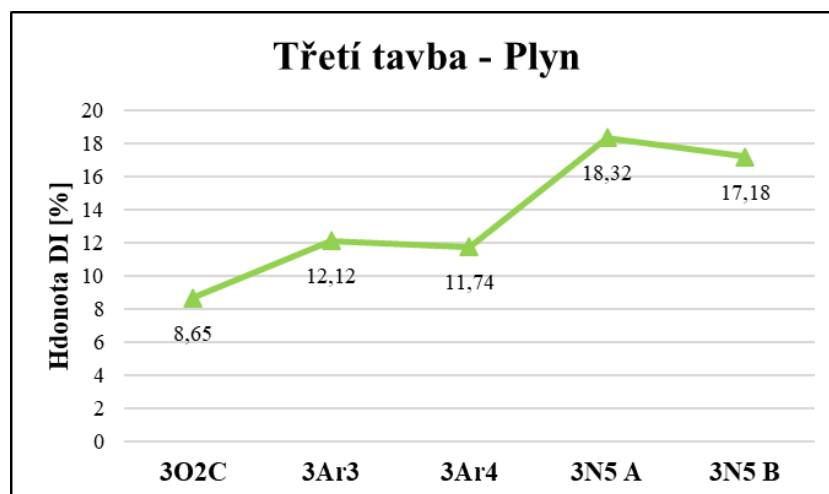
Nastavitelné parametry jsou pouze průtok plynu a doba ponoření trubice. Při odzkoušení metody byl průtok nastaven na 5 l/min. Tavenina byla probublávána argonem po dobu 3 minut. Trubice byla ponořena do taveniny na dno kelímku. Průběh probublávání byl klidný. Bubliny plynu opouštěly taveninu převážně v oblasti ponoření trubice. Tedy jejich rozptýlení v objemu bylo nízké. Velikost unikajících bublin hladinou subjektivně byla menší než bublin z odplyňovacích a naplyňovacích tablet.

Dále byla ke konci experimentu byla znovu odzkoušena naplyňovací tableta s dávkováním 0,1 % a následným odstátím 10 minut.



Obr. 44 Probublávání přes porézní zátku: Princip [62] (vlevo) a průběh metody (vpravo)

Hodnoty z probublávání argonem jsou zaznamenány v tabulce 11. Průběh odplynění je zaznamenán na obrázku 45.



Obr. 45 Průběh probublávání argonem – třetí tavba

Tab. 11 Naměřené hodnoty z třetí tavby – probublávání plynem.

Značení	3O2 C	3Ar3	3Ar4	3N5A	3N5B
Teplota [°C]	677	677	677	672	667
Dávkování [%]	-	5 l/min	5 l/min	0,1	-
Čas [s]	-	180	180	203	-
teplota po probublání [°C]	-	673	672	666	-
DI [%]	8,65	12,12	11,74	18,32	17,18

7.5.1 Vyhodnocení

Ponořením odplyňovací tablety s dávkováním 0,1 % vedlo ke zvýšení hodnoty DI o 2,63 %. Aplikací tablety (3O1A) byl naměřen pokles o více než 10 °C. Teplota se dále v průběhu odstátí držela na teplotě přibližně 680 °C. Dále v průběhu experimentu nebyly u taveniny zaznamenány výrazné změny teplot. V průběhu odstátí byl prokázán pokles hodnoty DI s rostoucím časem od doby reakce. Delší doba odstátí taveniny vede ke snížení indexu hustoty, důvodem je vyplouvání vměstků na hladinu.

- Tím je vysvětlen:
 - Nárůst hodnoty DI v předchozích tavbách při aplikaci dávky 0,1 %.
 - Pokles hodnoty DI po aplikaci dávky 0,2 %, kde hodnota DI pravděpodobně klesala s časovou prodlevou mezi odběry vzorků po dávkách 0,1 % a 0,2 %.

S odstátím 30 minut bylo dosaženo snížení hodnoty DI pod počáteční hodnotu, a to na hodnotu 8,27 %. Opět se tedy nepodařilo dosáhnout výrazně nižších hodnot DI než hodnot po natavení vsázky. Výsledný pokles DI nemá technický význam, protože tavenina má po odplynění stále vysoké hodnoty DI.

Aplikováním 0,2 % tablety byl opět pozorován mírný nárůst hodnoty DI. Nikoli však vyšší než v předchozím případě (3O1A). Teplota opět klesla cca o 10 °C. S následujícím odstátím teplota taveniny rostla k hodnotě 680 °C. V průběhu odstátí byl pokles hodnoty DI pozvolnější než při odplynění 0,1 % tablety. Výsledná hodnota DI (3O2) je shodná s hodnotou na počátku experimentu (3Ø) a příliš se neliší od 3O1C. Znovu se nedosáhlo technicky významného odplynění.

Po prvním probublávání (3Ar3) hodnota DI vzrostla o 3,47 %. Teplota se před a po odplynění probublávání argonem lišila pouze mírně. Na konci odplynění byla naměřena

nižší teplota o cca 4 °C. Probublávání plynem přes porézní zátku nemá podstatný vliv na pokles teploty.

- Probublávání 3Ar3:
 - Trvání 180 sekund.
 - Index hustoty vzrostl na hodnotu 12,12 %.
 - Menší velikost bublin než u bublin uvolněných z tablet.
 - Podstatně nižší porušení souvislosti hladiny a tím nižší množství stěru.
- Probublávání 3Ar4:
 - Taveninu mírně odplynilo, hodnota DI po odplynění klesla na 11,74 %.
 - Probublávání po dobu 3 minut snížilo hodnotu DI o 0,38 %.
 - Průběh a bouřlivost reakce je stejná s probubláváním 3Ar3.

Průběh odplynění plynem přes porézní zátku je klidný a snadno reprodukovatelný. Probubláváním argonem se dosáhlo zmenšení stoupajících bublin. Tím bylo dosaženo nižšího narušení souvislosti hladiny. Bubliny stoupaly k hladině převážně středem podél trubice. Jejich rozptýlení v tavenině bylo nízké stejně jako při odplynění tabletami.

Zároveň menším poloměrem bublin by mělo být docíleno vyšší míry odplynění. Bubliny argonu tvořené porézní zátkou byly menší než dusíkové bubliny uvolněné reakcí tablet. Vyšší účinek odplynění nebyl potvrzen. Prvotní nárůst hodnoty DI v tavenině mohl být zapříčiněn vlhkostí obsažené v odplyňovací trubici. Trubice byla přehřívána na peci. Přehřev tedy pravděpodobně nebyl dostatečný a tím mohla být tavenina naplyněna.

Odplyněním probubláváním plynem vznikají pouze „mokrý“ stěry. Naopak produkty reakcí tablet způsobují částečné znečištění hladiny kovu. Teplotní ztráty taveniny jsou na konci probublávání argonem nižší než při odplynění tabletami.

- Naplynění 0,1 %
 - Trvání doby reakce tablety – 203 sekund.
 - Pokles teploty byl pouze cca 5 °C.
 - Hodnota DI vzrostla o 6,58 %.

U nových naplyňovacích tablet byla zaznamenána nejdelší doba reakce ze všech tablet. Po reakci byl naměřen mírný pokles teploty. Tento pokles byl 2krát menší než při použití předchozích naplyňovacích tablet. Doba reakce nové tablety byla přibližně 2x delší než v předchozích tavbách. Tavenina byla řízeně naplyněna tabletami na hodnotu DI=18,32 %.

Odstátním taveniny po naplynění (3N5B) byl zaznamenán pokles o 1,14 %. Po odstátí se teplota taveniny držela na stejné teplotě jako po naplynění (3N5A).

7.5.2 Shrnutí

Aplikací odplyňovacích tablet byla tavenina zpočátku naplyněna. S rostoucím časem odstátí taveniny klesá hodnota DI. Odstátí taveniny má tedy příznivý vliv na konečnou hodnotu DI. Po odstátí 30 minut byl zaznamenán nejvyšší pokles hodnoty DI. Odplynění tabletami v našich podmínkách nemá technický význam. Tablety neumožňují snížení hodnoty DI pod počáteční hodnotu.

V našich podmínkách nemělo odstátí výrazný vliv na pokles teploty. Nejvyšší pokles teploty byl zaznamenán po reakcích tablet a vyjmutí zvonu. Teplotní ztráty mohly být zapříčiněny ponořením nedostatečně přehřátého zvonu.

U první a druhé tavby byla pozorována nejnižší hodnota DI vždy po skončení reakce dávky 0,2 %. Po odstátí dávky 0,1 % (3O1B) byl naměřen pokles hodnoty DI. Tento pokles u dávky 0,2 % je s největší pravděpodobností zapříčiněn prostojem mezi odběrem prvních vzorků (1O1 a 2O1) a ponořením zvonu s dávkou 0,2 % (1O2 a 2O2). Přesný čas prostoje nebyl

v dřívějších tavných záznamech. Odhadem byla stanovena doba prostoje na 10 minut. V těchto 10 minutách vzorky ztuhly, vzduchem se ochladily na manipulační teplotu a byly vyhodnoceny na váze. Poté byla tavenina odplyněna dávkou 0,2 %.

7.6 Zkouška vypálení tablety

Odplyňovacími tabletami uvolňujícími plynný dusík není tavenina odplyněna na požadovanou hodnotu DI pro výrobu odlitků. Při porovnání s metodou probublávání argonem plynem bylo dosaženo odlišných výsledků. Nastavitelným průtokem je zajištěno kontrolovatelné množství plynu. Otázkou zůstává, kolik plynu se uvolní reakcí tablety v tavenině. Zdrojem dusíku je sloučenina kyanamid vápenatý (CaCN_2 [53]), který je v tabletě obsažen z 10–30 %, viz Příloha 5.

7.6.1 Experiment

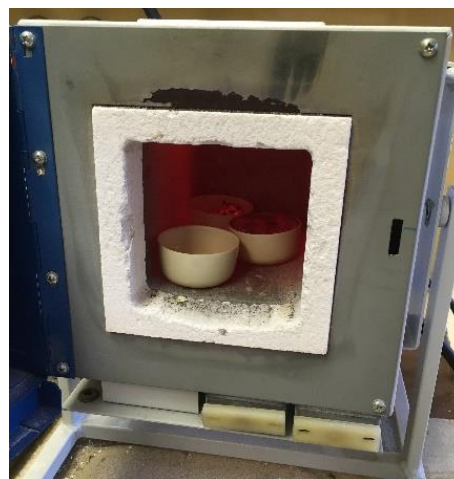
Ve školní laboratoři VUT byla využita žíhací pec, která byla nastavena na 700 °C. Tableta byla mechanicky rozdělena a umístěna do keramických mistichek. Množství tablety bylo zváženo a následně umístěno do pece, viz obrázek 46 a 47. Po reakci v peci byla misticška vyjmuta a po zchlazení převážena. Byl zaznamenán hmotnostní úbytek a celý proces byl třikrát opakován.

V tabulce 12 jsou zaznamenána naměřená data. Výpočet proběhl za zjednodušujícího předpokladu, že hmotnostní úbytek odpovídá 100 % uvolněného dusíku z tablety. Za tohoto předpokladu byl vypočítán obsah plynu v tabletě na 15,23 %.

Dávkování odplyňovací tablety 0,1 % z hmotnosti tavby odpovídá 40 g. Hustota dusíku je $\rho_N=1,234$ g/l. Za našeho předpokladu je v 40 g tablety obsaženo 15,23 % čistého dusíku, tedy 6,09 g plynu. Přepočtem bylo zjištěno, že ponořením dávky 0,1 % (=40 g) je v tavenině uvolněno 4,94 l čistého dusíku. Ze získaných dat z předchozích taveb byla vypočítána průměrná doba trvání reakce dávky 0,1 % na 94 sekund. Dle výpočtu je dávkováním 0,2 % (=80 g) z tablety uvolněno 12,18 g dusíku, tedy 9,88 l. Průměrná doba reakce dávky 0,2 % je 161 sekund.



Obr. 46 Navážka tablet v misticšce



Obr. 47 Tablety umístěné v peci

Tab. 12 Data pro stanovení obsahu dusíku v tabletě.

Značení	1	2	3	Průměr	Směrodatná odchylna
Hmotnost vzorku před ohřevem [g]	14,61	21,76	24,78	X	
Hmotnost vzorku po vyjmutí z pece [g]	12,29	18,45	21,16		
Hmotnostní rozdíl [g]	2,32	3,31	3,62	3,08	0,55
Přepočítání na objem [l]	1,88	2,68	2,93	2,50	0,53
Hmotnostní rozdíl [%]	15,88	15,21	14,61	15,23	0,52

7.6.2 Vyhodnocení

Při odplynění tabletami s dávkováním 0,1 % (=40 g) je z tablety uvolněno cca 5 litrů plynného dusíku. Během doby trvání reakce (94 s) tableta uvolňuje dusíkové bubliny. Při uvážení konstantního uvolňování bublin po celou dobu reakce lze stanovit průtok plynu na cca 3,72 l/min. Dávkou 0,2 % (=80 g) je uvolněno cca 10 litrů plynu během 161 sekund. Průtok plynu odpovídá 3,19 l/min.

Z tablety je během reakce v tavenině uvolněno určité množství plynu. Doba setrvání plynových bublin v tavenině je ovlivněna vlastní velikostí bublin. Protože při úniku velkých bublin k hladině je účinek odplynění podstatně nižší a to i při vhodném dávkování a stejné době reakce tablety v tavenině. Tedy kromě množství plynu je pro účinné odplynění nutné zajistit co nejmenší velikost unikajících bublin. V našich podmínkách je velikost bublin řízena především velikostí otvorů v ponorném zvonu.

U tablet je počítáno se 100 % využitím hmotnostního úbytku vyloučeného ve 100 % plynného dusíku. Přesto je průtok plynu nižší než u probublávání přes porézní zátku. Doba probublávání u tablet je závislá na množství tablety (do dávkování 0,2 %).

U probublávání argonu přes porézní zátku je nastavitelný průtok plynu i doba probublávání. V třetí tavbě byl odzkoušen průtok 5 l/min po dobu 180 sekund. Během této doby bylo do taveniny vehnáno celkem 15 litrů plynu. Na základě provedeného měření a výpočtu lze očekávat vyšší odplyňující účinek metody probublávání plynem přes porézní zátku. Vyšší účinnost probublávání plynem je zajištěna:

- Tvorbou menších bublin.
- Možným vyšším průtokem plynu.
- Řízenou dobou probublávání.

7.7 Čtvrtá tavba

Odplyňovací tablety z třetí tavby použité v tomto experimentu byly vysušeny za stejných podmínek jako v druhé tavbě. Byl zhotoven nový ponorný zvon (Obr. 48). Polotovarem byl rondel z ocelového plechu o průměru 220 mm a tloušťce 5 mm. Otvory ve zvonu byly vypáleny laserem. Průměr otvorů je 6 mm, pouze otvory u středu znovu mají průměr 5 mm.

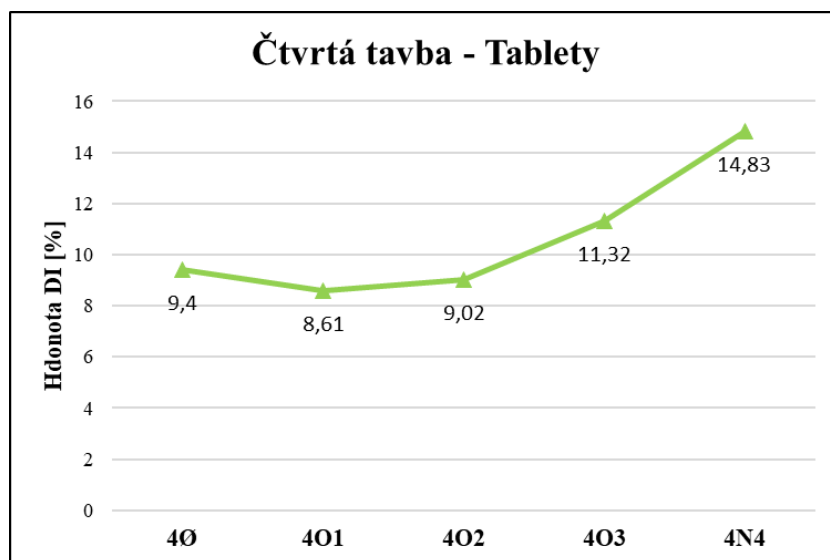
Střed zvonu byl ponechán bez otvorů pro snadnější navaření na rukojeť. Zároveň „plný“ střed bez otvorů zajišťuje lepší rozptýlení dusíkových bublin. Plynný dusík by neměl unikat k hladině středem zvonu (Obr. 40 – str. 44), ale měl by být nucen vyplouvat otvory, které jsou umístěny ve větší vzdálenosti od středu. Navíc otvory jsou podstatně menší, proto je očekáván menší i poloměr vzniklých bublin. Společně se zvětšením vzdálenosti otvorů od osy zvonu a zmenšením jejich průměrů je snahou zajistit delší setrvání bublin plynného dusíku v tavenině. Proto jsou očekávány lepší výsledky odplynění než v předchozích tavbách.



Obr. 48 Ponorný zvon: dosud používaný (vlevo) a nově zhotovený (vpravo)

V průběhu tavby nebyl zařazen krok „odstátí“. Cílem je zjištění vlivu geometrie zvonu na průběh reakce a výsledné odplynění. Byla odzkoušena naplyňovací (nesušená) tableta s dávkováním 0,1 % pro zjištění závislosti řízeného naplynění v našich podmínkách.

Odplyňovací tablety byly sušeny za stejných podmínek jako v druhé tavbě tedy, 120 °C po dobu 24 hodin. Dávkování všech tablet zůstalo zachováno. Průběh odplynění je na znázorněn na obrázku 49. Hodnoty naplynění a odplynění jsou zaznamenány v tabulce 13.

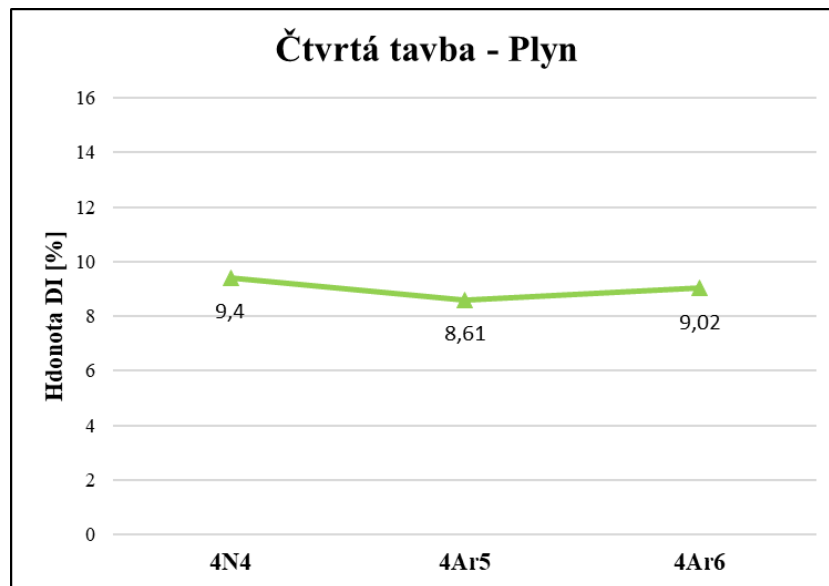


Obr. 49 Průběh odplynění tabletami – čtvrtá tavba

Tab. 13 Naměřené hodnoty z čtvrté tavby – odplynění tabletami.

Značení	4Ø	4Ø1	4Ø2	4Ø3	4N4
Teplota [°C]	668	668	672	670	672
Dávkování [%]	-	0,1	0,2	2x0,2	0,1
teplota po reakci [°C]	-	663	664	663	663
Čas [s]	-	110	150	116+152	230
DI [%]	9,4	8,61	9,02	11,32	14,83

Na závěr tavby bylo znovu odzkoušeno probublávání argonem přes porézní zátku. Byly odzkoušeny nové parametry probublávání. Průběh probublávání argonem je na znázorněn na obrázku 50. Hodnoty naplynění a odplynění jsou zaznamenány v tabulce 14.



Obr. 50 Průběh probublávání plynem – čtvrtá tavba

Tab. 14 Naměřené hodnoty z čtvrté tavby – probublávání plynem.

Značení	4N4	4Ar5	4Ar6
Teplota [°C]	672	667	669
Dávkování [%]	0,1	5 l/min	5 l/min
Teplota po probublání [°C]	663	669	670
Čas [s]	230	450	450
DI [%]	14,83	9,4	3,75

7.7.1 Vyhodnocení

Hodnota DI po natavení byla 9,4 %. Dávkou odplyňovací tablety s 0,1 % se hodnota snížila o 0,8 %. Po reakci (4O1) byl naměřen pokles teploty cca o 5°C. Odplynění dávkou 0,2 % hodnota DI vzrostla na 9,02 %. Zaznamenaný byl nárůst DI o 0,41 %. Teplota po reakci 4O2 poklesla o 8 °C. Doba reakcí 4O1 a 4O2 odpovídá předchozím dobám trvání z minulých taveb.

Pro 4O3 bylo odzkoušeno dávkování 2x0,2 %. Hodnota DI poté vzrostla na 11,32 %. Teplotní ztráty jsou srovnatelné s 4O2. Doba probublávání byla 116 a 152 sekund, celkem tedy 268 sekund.

Naplyňovací tableta s dávkováním 0,1 % (4N4) reagovala v tavenině 230 sekund. Na konci této reakce byla zaznamenána stejná teplotní ztráta jako u 4O2 a 4O3, cca 8 °C. Tavenina byla řízeně naplyněna na hodnotu 14,83 %.

Použití původního zvonu byl pozorován únik bublin pouze středem podél rukojeti tyče (Obr. 51 – vlevo), kde byly zhotovené podstatně větší otvory. Otvory v původním zvonu měly průměr 8 mm, některé z děr byly vlivem koroze propojené, viz obrázek 48.



Obr. 51 Vyplouvání bublin:
původním zvonem (vlevo) a novým zvonem (vpravo)

Geometrie nového zvonu zabraňuje úniku bublin středem. Únik dusíkových bublin byl pouze v místech, kde byla tableta „přilepená“ ke dnu zvonu, viz obrázek 51 – vpravo. Probublávání přesto probíhá pouze lokálně v závislosti na umístění tablety před ponořením. Nedochozí k optimálně homogennímu rozptýlu dusíkových bublin. Průběh odplynění tabletami se použitím nového zvonu výrazně nezměnil. Doba i bouřlivost reakce byly srovnatelné s pokusy o odplynění původním zvonem. Velikost bublin u hladiny byla subjektivně menší. Bublíny ale nebyly rozptýleny v celém objemu taveniny, jak se předpokládalo.

Teplota taveniny se v průběhu všech odplyňovacích nebo naplyňovacích procesů výrazně neměnila. Po vyjmutí zvonu z taveniny a očištění hladiny byl vždy naměřen pokles teploty taveniny v průměru 6,8 °C. Odplynění tabletami v našich podmínkách způsobuje snížení teploty kovu i přes předpokládanou exotermickou reakci s kovem. Teplotní ztráty jsou připsány ponořením kovového zvonu do objemu taveniny.

Po změření teploty byla do taveniny ponořena trubice s porézní zátkou. Průtok plynu byl nastaven na 6 l/min. Doba probublávání byla stanovena na 450 sekund. Během odplynění při průtoku plynu 6 l/min byla pozorována značná bouřlivost reakce. Tavenina ve formě menších i větších kapek opouštěla pecní prostor. Průběh odplynění byl nebezpečný jak pro samotné pecní zařízení, tak pro obsluhu odplyňovacího zařízení. Po 150 sekundách byl průtok snížen na 5 l/min. Tento průtok zůstal nastaven do konce trvání probublávání, tedy na zbylých cca 270 sekund.

Velikost bublin s průtokem 6 l/min byla nevhodná. Změnou průtoku na 5 l/min byla bouřlivost reakce potlačena a její průběh byl srovnatelný s předchozí tavnou. Po odplynění se teplota taveniny výrazně nelišila. Na hladině byly po celou dobu experimentu pozorovány „mokré“ stěry. Hodnota DI vzorku 4Ar5 klesla o 5,43 %.

Následující vzorek 4Ar6 byl odplyňován po dobu 450 sekund s průtokem plynu 5 l/min. Průběh reakce byl klidný. Odebraný vzorek měl hodnotu DI=3,75 %. Tedy po odplynění hodnota klesla o 5,65 %. Teplota kovu na konci odplynění zůstala opět bez významnější změny.

- Při odplynění s průtokem plynu 6 l/min dochází k rozstříku kovu mimo pecní prostor, tím je ohrožena obsluha.
- Probubláváním argonem bylo dosaženo vyšší účinnosti odplynění než odplynění tabletami. Hodnoty DI byly nejnižší ze všech předchozích taveb. Bylo prokázáno, že touto metodou jsme schopni v našich podmínkách docílit nižších hodnot DI než počátečních hodnot.

7.8 Pátá tavba

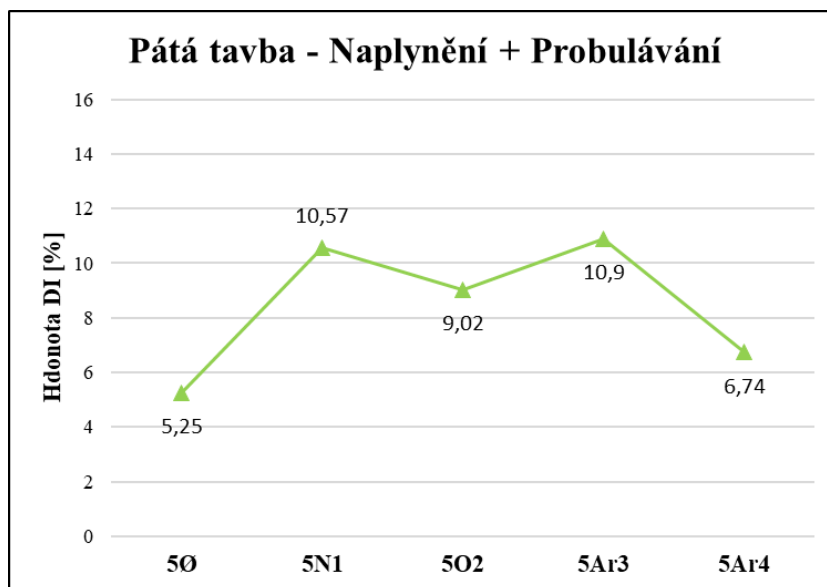
Z dat druhé a třetí tavby byl výpočtem zaveden vztah (39), který popisuje závislost hmotnosti dávky naplyňovací tablety na výslednou hodnotu DI v našich podmínkách.

$$m_N = \frac{(DI_V - DI_Z)}{A} * m_{tav} \quad (39)$$

- Kde: m_N – výsledná hmotnost dávky naplyňovací tablety [g].
 DI_V – Hodnota DI, které má být dosaženo naplyněním [%].
 DI_Z – Hodnota DI vzorku z pece [%].
 m_{tav} – Hmotnost taveniny v kelímku [kg].
 A – empirická konstanta ($A=5$) [-].

Cílem je řízené naplynění taveniny a ověření správnosti vztahu (39). Dále je snahou docílit odplynění taveniny probubláváním argonu přes porézní zátku. Zároveň je sledován vliv probublávání na výslednou hodnotu DI v čase. Průběh naplynění a následného odplynění taveniny je znázorněn na obrázku 52.

Na začátku tavby byla do taveniny ponořena naplyňovací (5N1) a odplyňovací (5O2) tableta. Dávkování viz tabulka 15. Po odběrech vzorků 5Ø, 5N1 a 5O2 byla do taveniny ponořena trubice s porézní zátkou. Následně byly vzorky odebírány průměrně každých 5–7 minut. Během experimentu byl průtok plynu 5 l/min.



Obr. 52 Naplynění tabletami a odplynění argonem – pátá tavba

Tab. 15 Naměřené hodnoty z páté tavby – naplynění a probublávání plynem.

Značení	5Ø	5N1	5O2	5Ar3	5Ar4
Teplota [°C]	686	695	685	678	-
Dávkování [%]	-	0,1	0,2	5 l/min	5 l/min
Teplota po probublání [°C]	-	682	674	-	-
Čas [s]	-	170	170	300	300
DI [%]	5,25	10,57	9,02	10,9	6,74

7.8.1 Vyhodnocení

Jak bylo již zmíněno v závěru první tavby, ve slévárnách jsou tablety před použitím sušeny na víku pece. V KOVOLIT Česká tabletu suší na víku přibližně 20–30 minut před použitím. V našich podmínkách byla měřena teplota na víku pece. Víko je vyrobené z žárobetonu a jeho obvod je osazen kovou konstrukcí s madly. Na žárobetonu byla dotykovým teploměrem naměřena teplota 200 °C (Obr. 53 – pozice 1). Teplota byla měřena ve vzdálenosti cca 10 cm od vsázečního otvoru. Na kovovém osazení víka (Obr. 53–pozice 2) byla naměřena teplota 125 °C.

Dva kusy odplyňovacích tablet o hmotnosti 258 g byly sušeny v žíhací peci na 200 °C po dobu 24 hodin. Po převážení byl úbytek hmotnosti 1–2 g. Srovnatelný úbytek byl zaznamenán v druhé tavbě při sušení na 120 °C.

Lze tedy konstatovat, že sušení tablet na víku pece případně v žíhací peci, nemá vliv na použití tablety při odplynění. Sušením nebyl prokázán vyšší ani nižší odplyňovací účinek tablet a zároveň nebylo prokázáno snížení obsahu vlhkosti v tabletě.



Obr. 53 Měření teploty víka pece

Množství naplyňovací tablety bylo spočítáno dle rovnice (39). Cílem bylo taveninu řízeně naplnit na hodnotu $DI=10\%$. Výpočtem byla navážka dávky stanovena na 38 g. Dávce 0,1 % z hmotnosti tavby odpovídá 40 g. Naplyňovací dávka byla z důvodu nízkého rozdílu hmotností ponechána na 40 g.

Tavenina byla naplyněna na hodnotu $DI=10,57\%$. Byla zaznamenána větší teplotní ztráta. Po naplynění klesla teplota o 13 °C. Teplotní ztráta je vysvětlena ponořením nedostatečně predehřátého zvonu do taveniny. Odplyněním s dávkováním 0,2 % ($5O_2$) byl zaznamenán pokles hodnoty DI o 1,55 %. Reakcí teplota klesla o cca 10 °C.

Po 5minutovém probublávání argonem ($5Ar_3$) byl odebrán vzorek s vyšší hodnotou DI než před začátkem probublávání. Nárůst hodnoty DI u vzorku $5Ar_3$ může být způsoben ponořením vlhké odplyňovací trubice s porézni zátkou. U vzorků $5O_2$ a $5Ar_3$ byly pozorovány změny hodnot DI oproti ostatním tavbám. Tyto změny jsou pravděpodobně způsobeny odběrem vzorků z hladiny s vyšším obsahem vměstků. Při prvním probublávání taveniny ($5Ar_3$) byly vměstky vyneseny na hladinu a společně s taveninou byly odebrány na vzorek. S vyšším množstvím vměstků roste sklon k naplynění taveniny a tím i vyšší hodnota DI .

Po následném pětiminutovém odplyňovacím cyklu byl u vzorku $5Ar_4$ naměřen významný pokles hodnoty DI , celkem o 4,16 %. Pokles je přičítán vysokému rafinačnímu účinku v průběhu prvního probublávání plynem ($5Ar_3$) během kterého kromě vměstků, mohly být plynem vyneseny na hladinu i zbytky tablet. Vyšší koncentrace rozpuštěného vodíku v tavenině způsobuje vyšší míru odplynění při prvním odplyňovacím cyklu. Současně od ponoření tablety $5O_2$, hodnota DI s rostoucím časem klesala vlivem odstátí, jehož vliv byl prokázán a popsán v třetí tavbě.

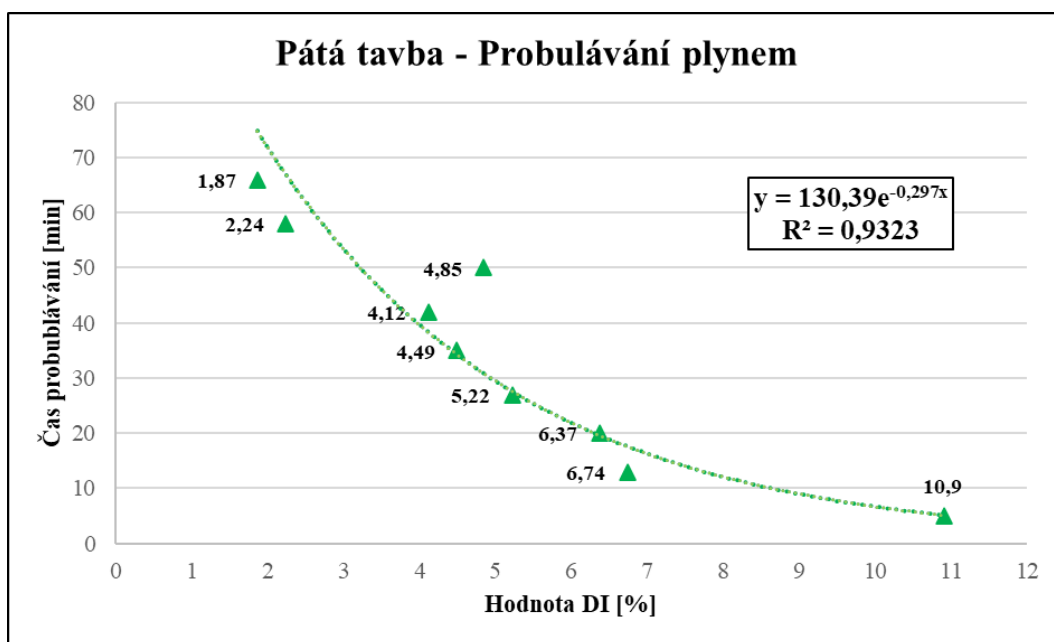
Tab. 16 Naměřené hodnoty z páté tavby – probublávání plynem.

Značení	5Ar5	5Ar6	5Ar7	5Ar8	5Ar9	5Ar10	5Ar11
Teplota [°C]	-	-	-	-	682	-	-
Dávkování [l/min]	5	5	5	5	5	5	5
Teplota po probublání [°C]	-	-	-	677	-	-	678
Čas [s]	300	300	300	300	300	300	300
DI [%]	6,37	5,22	4,49	4,12	4,85	2,24	1,87

Celkové probublávání argonem trvalo celkem 66 minut. Během této doby bylo z taveniny odebráno 9 vzorků (5Ar3–5Ar11), které jsou vyneseny v Obr. 54. V tabulce 16 jsou zaznamenány některé z těchto vzorků. Závislost odplynění na čase probublávání je popsána exponenciální rovnicí (40) s hodnotou spolehlivosti $R^2=0,9323$. Vztah byl vypočítán programem Microsoft Excel 2019.

$$y = 130,39 * e^{-0,297*x} \quad (40)$$

Kde: y – výsledný čas probublávání [min].
x – požadovaná hodnota DI [%].



Obr. 54 Pokles hodnoty DI s rostoucím časem

Vztah (40) byl upraven pro využití v našich podmínkách na vztah:

$$t = 130,39 * (e^{-0,297*DI_p} - e^{-0,297*DI_s}) \quad (41)$$

Kde: t – výsledná doba probublávání plynem [min].
DI_p – Požadovaná hodnota DI taveniny [%].
DI_s – Startovní (počáteční) hodnota DI taveniny [%].

Vyhodnocením vzorku 5Ar8 bylo zjištěno podstatné snížení hodnoty DI od řízeného naplynění. Po přibližné době 42 minut probublávání argonem bylo dosaženo hodnoty 4,12 %. Hodnota DI klesá s rostoucím časem probublávání. Hodnota (4,12 %) je neuspokojivá pro výrobu jakostních odlitků, proto bylo rozhodnuto v odplynění pokračovat.

U vzorku 5Ar9 byl naměřen nárůst DI o 0,73 %. Při kontrole vlivu odplynění na hodnotu DI byla tavenina odstavena a byl vyhodnocen vzorek 5Ar8. Doba odstátí byla 20 minut. Během odstátí byl zaznamenán nárůst teploty o 5 °C. Během odstátí došlo ke zpětnému naplynění taveniny.

Přídavnými dvěma odplyňovacími cykly byl dosažen pokles hodnoty DI na 1,87 %. Teplota v průběhu odplynění klesla o 4 °C.

S prostoji a odběry vzorků trvala celková doba experimentu probublávání přibližně 66 minut. Souhrnná doba probublávání taveniny argonem byla 45 minut. Během této doby byla tavenina odplyněna celkem 225 litry argonu.

7.9 Zhodnocení odplynění

Pro odplynění 40 kg taveniny byly použity odplyňovací tablety a probublávání argonem přes porézní zátku. Výpočtem bylo stanoveno, že odplyněním tabletami s dávkováním 0,1 % je do taveniny uvolněno 5 l dusíku. Ten je uvolňován po dobu 94 sekund a průtok plynu odpovídá 3,19 l/min. Odplynění dávkou s 0,2 % tablety bylo uvolňováno 10 l dusíku po dobu 161 s. Průtok plynu odpovídá 3,72 l/min. U obou průtoků je nevyhovující jejich krátká doba reakce. Odplyněním 10 litry dusíku je spotřeba plynu 0,25 l/kg taveniny.

V našich podmínkách bylo pro odplynění přes porézní zátku celkem spotřebováno 225 litrů argonu. Průtok plynu byl nastaven na 5 l/min. Při kontinuálním probublávání by doba odplynění byla 45 min. Spotřeba plynu odpovídá 5,6 l/kg taveniny.

Uvážením odplynění odplyňovací jednotkou FDU je možné nastavit podstatně vyšší průtok plynu (např. 20 l/min) než při použití trubice s porézní zátkou. Použitím rotoru se navíc dosahuje menší velikosti bublin a je zajištěno vyšší rozptýlení bublin v celém objemu kovu. Tyto vlastnosti příznivě ovlivňují účinnost samotného odplynění. Doba trvání odplyněním FDU bývá 3–5 minut. Při 5minutovém cyklu s průtokem 20 l/min je spotřeba plynu na cyklus 100 l. Tímto cyklem je obvykle odplyňováno 300 kg kovu. Spotřeba plynu odpovídá 0,33 l/kg taveniny.

Vyšší spotřebou plynu není zajištěn vyšší účinek odplynění. Ten je dán především velikostí bublin a výškou hladiny kovu v pánvi. Během probublávání argonem byl průtok i spotřeba plynu vyšší. Velikost bublin byla subjektivně menší než při odplynění tabletami. V našich podmínkách byla hladina kovu v kelímku 300 mm. Pánve pro 300–500 kg taveniny dosahují výšky hladiny přes 1000 mm. Z toho důvodu je při stejné velikosti bublin zajištěno jejich delší setrvání v tavenině a tím podstatně zvýšena účinnost odplynění.

7.9.1 Porovnání rafinačního účinku tablet a argonu

Na Obr. 55 je porovnán vzorek odebraný po natavení (1Ø) jehož hodnota DI=7,46 % a vzorek odebraný po aplikaci odplyňovací tablety s dávkováním 0,3 % (1O4). Jeho hodnota DI je 9,36 %. Vzorek 1Ø má zvrásněný povrch, což je zapříčiněno vměstkami, které vystoupaly k hladině během tuhnutí vzorku. U vzorku po odplynění tabletami je pozorováno mírné optické zlepšení povrchu. Přestože u vzorku 1O4 byla naměřena vyšší hodnota DI, je prokázán částečný rafinační účinek tablet. Účinek je přesto technicky nevýznamný.

Povrch vzorku po natavení (5Ø) je zvrásněn, viz obrázek 56. Po natavení jsou v tavenině obsaženy vměstky. Hodnota DI vzorku 5Ø je 5,25 %. Hodnota DI vzorku 5Ar4 je 6,74 %. Vzorek 5Ar4 byl vybrán pro porovnání čistoty se vzorkem 1O3. Vzorek 1O3 byl rafinován

tabletami s dávkováním 0,1–0,2–0,3 % v součtu po dobu 441 sekund. Vzorek 5Ar4 byl probubláván argonem (5 l/min) po dobu 600 sekund.

Před rafinací byl povrch vzorku po natavení znečištěn a to v obou případech. Po rafinaci byly na vzorku 5Ar4 pozorovány povrchové staženiny a mírné propadnutí hladiny vzorku. U rafinovaného vzorku jsou viděny na povrchu bubliny a jehlicovité útvary, které jsou tvořené oxidickými vměstkami.



Obr. 55 Pohled shora na vzorky ztuhnuté za atmosférického tlaku:
1Ø (vlevo) a 1O4 (vpravo)

Po celkové době 66 minut rafinace plynem byl odebrán vzorek 5Ar11 s hodnotou $DI=1,87$ %. Rafinační účinek je přímo úměrný době probublávání. Vzorek (Obr. 57) je subjektivně nejčistší ze všech odebraných vzorků. Souvislá hladina je porušena pouze propadnutím hladiny důsledkem objemové změny slitiny. Na povrchu nejsou pozorovatelné vměstky ani bubliny vyloučeného plynu.



Obr. 56 Pohled shora na vzorky ztuhnuté za atmosférického tlaku:
5Ø (vlevo) a 5Ar4 (vpravo)



Obr. 57 Vzorek 5Ar1

8 ZÁVĚRY

Slitina DIN 226 o hmotnosti 40 kg byla natavena v odporové peci ve školní slévárně VUT. Tavenina byla odplyňována rafinačními tabletami pro odplynění (Ecosal – AL 320) a probublávána plynným argonem přes porézni zátku. Byl zkoumán vliv jednotlivých metod odplynění na účinnost odplynění ve školních podmínkách. Vyhodnocení odplynění probíhalo porovnáním hodnot „indexu hustoty“ u jednotlivých vzorků. Pro řízené naplynění taveniny byly použity naplyňovací tablety (Probat – Fluss begaser T 200).

Aplikací tablet do taveniny nebylo v našich podmínkách dosaženo praktického odplynění. Tabletami se tavenina naplynila. S rostoucí dobou odstátí klesala hodnota DI. Pokles zpravidla nebyl nižší než hodnota DI taveniny po natavení. Bylo dosaženo technicky nevýznamného odplynění pro výrobu jakostních odlitků. Vyšší dávkování tablety než 0,2 % zajišťuje únik větších bublin přes ponorný zvon, avšak doba trvání není vyšším dávkováním prodloužena. Teplotní ztráty použitím tablet byly vyšší než při probublávání argonem.

Vliv naplyňovacích tablet na řízené naplynění byl odzkoušen, vyhodnocen a byl stanoven empirický vztah. Vztahem (39) lze taveninu řízeně naplynit na požadovanou hodnotu DI.

V provozních podmínkách jsou tablety před použitím předehřáty na víku pece. V našich podmínkách byly odplyňovací i naplyňovací tablety sušeny na 120 °C a 200 °C po dobu 24 hodin. Odplyňovací tablety po sušení nezměnily své chování v tavenině ani nebyl zaznamenán hmotnostní úbytek. Sušená naplyňovací tableta taveninu řízeně nenaplynila a podstatně se snížila její reaktivnost v tavenině. Po reakci byla vyjmuta téměř v nezreagovaném celku. Sušením tablet nebylo dosaženo praktického zlepšení v účinnosti odplynění ani naplynění.

Byla porovnána účinnost dvou ponorných zvonů. Zvonem s otvory ve středu zvonu unikaly velké bubliny, které jsou pro účinné odplynění nepříznivé. Střed nově zhotoveného zvonu je ponechán bez otvorů a menší otvory jsou umístěny mimo střed zvonu. Rozptýlení bublin v objemu taveniny je nízké obou zvonů. Použitím nového zvonu nebylo dosaženo podstatně rozdílného odplynění.

Odplynění probublávání argonem přes porézni zátku bylo odzkoušeno a vyhodnoceno. Dále byl stanoven vztah (41) popisující vliv odplynění argonem v čase. V našich podmínkách bylo dosaženo hodnoty $DI=1,87\%$. Při odplynění argonem vznikaly pouze stěry.

Byl porovnán rafinační účinek tablet a plynu. Rafinace plynem je vyšší než rafinace tabletami.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BOLIBRUCHOVÁ, Dana a Eva TILLOVÁ. Zlievarenské zliatiny Al-Si. V Žiline: Žilinská univerzita, 2005, 180 s. ISBN 80-807-0485-6.
2. NGUYENOVA, Isabel, J. VEČEŘA, P. LICHÝ a I. KROUPOVÁ. Optimalizace odplynění Al slitin. In: Sborník přednášek z 55. slévarenských dnů® Blok D – Sekce neželezných kovů a slitin a ekologie. Brno: Česká slévarenská společnost, z.s., 2018, s. 28-34. ISBN 978-80-02-02827-7.
3. ZEMČÍK, Ladislav. Vodík ve slitinách hliníku. Slévárství. 2012, **60**(5-6), 154-157.
4. NEFF, David. Understanding Aluminium Degassing. Modern casting. American Foundry Society, 2002, **92**(5), 24-26.
5. SCHMITZ, Christoph, Josef DOMAGALA a Petra HAAG. Handbook of aluminium recycling. Essen: Vulkan, 2006. ISBN 38-027-2936-6.
6. MICHNA, Štefan. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
7. Hliník a slitiny hliníku. In: Odbor povrchového inženýrství Západočeské univerzity v Plzni [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf.
8. GALLO, R. "I Have Inclusions! Get Me the Cheapest and Best Flux for Cleaning My Melt!"—Is This the Best Driven, Cost-Saving Approach by a Foundry?. In: AFS Transactions. Aurora, Ohio: American Foundry Society, 2017, s. 97-110.
9. SPÁČIL, Ivo. Návrh výroby odlitek potrubí ze slitin Al metodou sklopného lití. Brno, 2018. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/109545>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
10. BOLIBRUCHOVÁ, Dana a Richard PASTIRČÁK. Zlievarenská metalurgia neželezných kovov. 1. V Žiline: Žilinská univerzita, 2018. ISBN 978-80-554-1463-8.
11. ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 8021427906.
12. GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. Zlievárstvo neželezných kovov. 1. Bratislava: Alfa, 1988, 424 s. Edícia hutníckej literatúry (Alfa).
13. BAMBULA, Michael. Hodnocení obrobiteľnosti slitin hliníku - kritéria hodnocení [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/7035>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Bohumil Bumbálek.

14. MÍŠEK, Jakub. Vliv odplynění na kvalitu odlitků vyrobených technologií vysokotlakého lití [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/66696>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
15. PTÁČEK, Jiří. Rychlá kontrola kvality taveniny hliníku. In: 5. Holečkova konference: Trendy ve zpracování slitin neželezných kovů. Brno: Česká slévárenská společnost, 2013, s. 51-60. ISBN 978-80-02-02427-9.
16. KUFA, D. a R. ADAMUS. Odplyňování tavenin slitin hliníku. In: Sborník přednášek z 55. slévárenských dnů® Blok D – Sekce neželezných kovů a slitin a ekologie. Brno: Česká slévárenská společnost, z.s., 2018, s. 20-28. ISBN 978-80-02-02827-7.
17. ROOY, Elwin. Mechanism of Porosity Formation in Aluminium. *Modern casting*. 1992, **82**(9), 34-36.
18. JANKES, Erik. Využití řízeného naplyňování slitin Al-Si při tlakovém lití [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/41696>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
19. CAMPBELL, John. *Castings*. 2. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, 352 s. ISBN 9780750647908.
20. PTÁČEK, Jiří. Hodnocení kvality a kontrola tekuté fáze hliníkových slitin. In: 49. slévárenské dny®: Sekce neželezných kovů a slitin, ekologie. Brno: Česká slévárenská společnost, z.s., 2012, s. 26-31. ISBN 978-80-02-02405-7.
21. JEŘÁBEK, Petr. Vliv parametrů odplyňování na kvalitu Al odlitků [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2018 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/109055?zp_id=109055. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Patrik Vašťač.
22. ALBA-BAENA, Noé a Dmitry ESKIN. Kinetics of ultrasonic degassing of aluminum alloys. SADLER, Barry. *Light Metals 2013: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*,. 1. 2013, s. 957-962. ISBN 1118605721.
23. ROUČKA, Jaromír a Jan HOTAŘ. Řízené naplyňování siluminu. In: 5. Holečkova konference: Trendy ve zpracování slitin neželezných kovů. Brno: Česká slévárenská společnost, z.s., 2013, s. 36-43. ISBN 978-80-02-02427-9.
24. ZUO, Yu-bo, Yi-yao KANG, Yue LIN, Xu-dong LIU, Chao SUN, Sen-sen YUAN a Jian-zhong CUI. A new high shear degassing technology and mechanism for 7032 alloy. *China Foundry*. 2015, **12**(4), 293-298.

25. AKHTAR, S. a L. ARNBERG. A comparative study of porosity and pore morphology in a directionally solidified A356 alloy. *International Journal of Metalcasting*. 2009, **3**(9), 39-50.
26. ZEMČÍK, Ladislav. Kinetika odplynování slitin hliníku. *Slévárnictví*. 2014, **62**(7-8), 212-215.
27. ZEMČÍK, Ladislav. Fyzikální modely používané při popisu krystalizace kovů a jejich slitin. 1. Brno, 1990.
28. GYARMATI, Gábor, György FEGYVERNEKI, Tamás MENDE a Monika TOKÁR. The effect of melt treatments on the melt quality of aluminum alloys. University of Miskolc, 2019. ISBN 978-963-358-177-3.
29. CREAPEAU, Paul. Molten Aluminium Contamination: Gas, Inclusions and Dross. *Modern casting*. 1997, **87**(7), 39-41.
30. ROOY, Elwin. Preventing Porosity in Aluminum Castings. *Modern casting*. 1992, **82**(10), 32-34.
31. GALLO, R. Clean Up Your Aluminium Melts. *Modern casting*. 2008, **98**(11), 32-37.
32. KAŇA, Václav a Jaromír ROUČKA. Zkouška vlivu dusíku a argonu na rafinaci a odplynění slitiny AlSi7Mg. In: 8. HOLEČKOVA KONFERENCE: Metalurgie a technologie slitin neželezných kovů. Hotel Skalský dvůr, 2017. ISBN 978-80-02-02857-4.
33. CREPAU, P.N., B.P COCHRAN a R.P. MULAC. Solid Aluminium Fluxing Issues. *Modern casting*. 1992, **82**(8), 36-37.
34. Rafinace kovů pomocí soli. Pyrotek [online]. Spokane, 2020 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.pyrotek.com/na%C5%A1e-%C5%99e%C5%A1en%C3%AD/hlin%C3%ADk/odl%C3%A9v%C3%A1rna/udr%C5%BEov%C3%A1n%C3%AD-roztaven%C3%A9ho-kovu-odl%C3%A9v%C3%A1rna/rafinace-kov%C5%AF-pomoc%C3%AD-soli/index?Locale=cs_CZ
35. CREPEAU, P.N., M.L. FENYES a J.L. JEANNERET. Solid Fluxing Practices for Aluminium Melting. *Modern casting*. 1992, **82**(7), 28-30.
36. COCHRAN, B.P, M.L. FENYES a R.P. MULAC. Flux Practice in Aluminium Melting. In: AFS Transactions. 1992, s. 737-742.
37. Automatic flux injector. *Foundry Trade Journal*. 1992, **166**(3460), 543.
38. NEFF, David. Degassing and flux injection: combined effects shown to improve melt quality. *Foundry Trade Journal*. 1997, **171**(3528), 114-117.

39. DRATNAL, Lukáš. Analýza vad typu nekovových vměstků v odlitcích hlav motorů a návrh metod jejich odstranění [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/59607>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
40. KANG, Yi, Yue LING, Xu LIU, Chao SUN, Sen YUAN, Yu ZUN a Jian ZHONG CUI. Study on the High Shear Degassing Process with Water Simulation. *Advanced Materials Research* [online]. 2015, (1120-1121), 1214-1219 [cit. 2020-03-14]. DOI: <https://doi.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.4028/www.scientific.net/AMR.1120-1121.1214>. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMR.1120-1121.1214>
41. LIPING, Wang, Cao GUOJIAN a Guo ERJUN. Influences of different degassing processes on refining effect and properties of 4004 Al alloy. *China Foundry*. 2013, **10**(2), 104-107.
42. Hustota plynů [online]. 2002 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-plynu.htm>
43. Chlorid hlinitý. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Chlorid_hlinit%C3%BD
44. Kyselina chlorovodíková - Hydrochloric acid [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://cs.qwe.wiki/wiki/Hydrochloric_acid#Physical_properties
45. ULUDAĞ, Muhammet, Remzi ÇETIN, Derya DISPINAR a Murat TIRYAKIOĞLU. The effects of degassing, grain refinement & Sr-addition on melt quality-hot tear sensitivity relationships in cast A380 aluminum alloy. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2018, **90**, 90-102 [cit. 2020-04-10]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.03.025. ISSN 13506307. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630717312608>
46. HAMADELLAH, Abderrazzak, Aboubakr BOUAYAD a Christian GEROMETTA. Hot tear characterization of AlCu5MgTi and AlSi9 casting alloys using an instrumented constrained six rods casting method. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **244**, 282-288 [cit. 2020-03-29]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.030>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013617300304?via%3Dihub>
47. MAY, Bob. Beyond rotary degassing: A modification of the technique enables effective oxide removal from aluminium melts. *Foundry Trade Journal*. 1995, **169**(3507), 296-299.
48. GITTUS, M.S., D.T. WHINCUP a A.M. WYNN. A New Cost Effective Alternative for the Rotary Degassing of Aluminium Alloys. 68th World Foundry Congress [online]. Chennai, India, 2008, , 195-200 [cit. 2020-04-09].

49. HALAŠKA, Jan. Optimalizace metalurgických postupů ve slévárně hliníkových slitin [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/109509?zp_id=109509. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňa.
50. Foundry practice 264. Foundry practice [online]. England, (264), 1-36 [cit. 2020-04-09]. ISSN 0266 9994. Dostupné z: http://download-centre.foseco.com/fileadmin/GIFA2015/foundry_practice/FP_264-e.pdf
51. Intelligent degassing - Studies on controlling the process of hydrogen removal from aluminium [online]. Germany [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/00ab/9b8282a7978b5213cf3587f2205804be2d4b.pdf>
52. SIMON, Ronny a Roger KENDRICK. Degassing efficiency of different rotor design over rotor life: Foseco Europe. Foundry Trade Journal. 2014, **188**(3717), 238-240.
53. 7. Sloučeniny kovů alkalických zemin [online]. Masarykova Univerzita, 1999 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/sci/UChem/um/spchp/ch04s07.html>
54. Flexible approach to metal treatment. Foundry Trade Journal. 1996, **170**(3522), 430-432.
55. Provide a Good Quality Melt. In: Atlas Foundry Company [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.atlasfdry.com/rule1.htm>
56. CAMPBELL, John. Entrainment defects. Materials Science and Technology [online]. 2006, **22**(2), 127-145 [cit. 2020-03-16]. DOI: 10.1179/174328406X74248. ISSN 1743-2847. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1179/174328406X74248?scroll=top&needAccess=true>
57. CAMPBELL, John. The Bifilm Concept: Prospects of defect-free castings.: CAMPBELL, J. The bifilm concept: prospects of defect-free castings. In: World Foundry Congress, Chennai, India. 2008. In: 68th World Foundry Congress. Chennai, India, 2008, s. 1-6.
58. RIVERA-SALINAS, Jorge, Victor GUTIÉRREZ-PÉREZ a Mariza VARGAS-RAMÍREZ. Application of Computational Fluid Dynamic in Aluminum Refining Through Pneumatic Injection of Powders. Materials Research [online]. 2014, **17**(6), 1550-1562 [cit. 2020-03-29]. DOI: 0.1590/1516-1439.275414. ISSN 1516-1439. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392014000600025&lng=en&tlng=en
59. ZHANG, Lifeng, Xuewei LV, Alex TORGERSON a Mujun LONG. Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum: A Review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review [online]. 2011, **32**(3), 150-228 [cit. 2020-04-06]. DOI:

10.1080/08827508.2010.483396. ISSN 0882-7508. Dostupné z:
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08827508.2010.483396>

60. DAVIS, Boyd, Amjad JAVAID a E. ESSADIQI. Final Report on Refining Technologies of Aluminum. Natural Resources Canada [online]. 2003, , 1-21 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.13140/RG.2.2.27655.39847. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/306292489_Final_Report_on_Refining_Technologies_of_Aluminum/related
61. ZHANG, Lifeng, Xuewei LV, Lucas WIREDU DAMOAH a Chenguang BAI. Mathematical Modeling on the Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review [online]. 2012, **33**(1), 1-54 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.1080/08827508.2010.542210. ISSN 0882-7508. Dostupné z:
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08827508.2010.542210>
62. WANNASIN, J., R. CANYOOK a S. WISUTMETHANGOON. Grain refinement behavior of an aluminum alloy by inoculation and dynamic nucleation. Acta Materialia [online]. 2013, **61**(10), 3897-3903 [cit. 2020-04-09]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.03.029>. ISSN 1359-6454. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645413002395>
63. BELYAEV, Sergey a Aleksandr BEZRUKIKH. Saturation dynamics of aluminum alloys with hydrogen. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences [online]. 2017, **12**(21), 6243-6247 [cit. 2020-04-12]. ISSN 1819-6608. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/321677066_Saturation_dynamics_of_aluminum_alloys_with_hydrogen

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Konstanta dle hliníkové slitiny	[-]
A ₁₀	Tažnost měřená na dlouhé tyčince	[%]
A ₅₀	Tažnost na 80 mm délky	[%]
a _{Al}	Aktivita tekutého hliníku	[-]
a _{Al₂O₃}	Aktivita Al ₂ O ₃ ve strusce	[-]
a _H	Henryho aktivita vodíku v tavenině	[-]
a _{H₂}	Aktivita plynného vodíku	[-]
a _{H₂O}	Aktivita vodní páry	[-]
Al	Chemická značka hliníku	[-]
Al(OH) ₃	Hydroxid hlinitý	[-]
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	[-]
AlB ₂	Borid hliníku	[-]
AlCl ₃	Chlorid hlinitý	[-]
AlF ₃	Fluorid hlinitý	[-]
AlN	Nitrid hlinitý	[-]
AlSi9Cu3Fe	Slitina hliníku	[-]
Ar	Argon	[-]
B	Bór	[-]
B	Konstanta dle hliníkové slitiny	[-]
Be	Beryllium	[-]
C ₂ Cl ₆	Hexachlorethan	[-]
C ₂ H ₆	Etan	[-]
C ₆ H ₆	Benzen	[-]
Ca	Vápník	[-]
CaCN ₂	Kyanamid vápenatý	[-]
CaF ₂	Fluorid vápenatý	[-]
Cl	Chlor	[-]
CO ₂	Oxid uhličitý	[-]
Cr	Chrom	[-]
Cu	Měď	[-]
DI	Dichte index – index hustoty	[%]
DI _p	Požadovaná hodnota DI taveniny	[%]
DI _s	Startovní (počáteční) hodnota DI taveniny	[%]
DI _v	Hodnota DI, které má být dosaženo naplyněním	[%]
DI _z	Hodnota DI vzorku z pece	[%]
e	Eulerovo číslo	[-]
e _H ⁱ	Interakční koeficient 1. řádu	[-]
F	Fluor	[-]
FDU	Foundry Degassing Unit – Odplyňovací jednotka	[-]
Fe	Železo	[-]

Označení	Legenda	Jednotka
Fe ₃ O ₄	Oxid železa	[-]
f _H	Henryho aktivitní koeficient	[-]
f _H ⁱ	Dílčí aktivitní koeficient	[-]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
HB	Tvrдость dle Brinella	[HB]
HCl	Kyselina chlorovodíková	[-]
H ₂ O	Voda	[-]
[H]	Vodík – rozpuštěný v tavenině	[-]
{H ₂ }	Vodík – plynný	[-]
[%H]	Koncentrace vodíku v čistém Al	[hm.%]
[%H] _{SL}	Koncentrace vodíku ve slitině Al	[hm.%]
CH ₄	Metan	[-]
K	Draslík	[-]
K	Rovnovážná konstanta reakce (4)	[-]
K _a	Rovnovážná konstanta reakce (14)	[-]
KCl	Chlorid draselný	[-]
KF	Fluorid draselný	[-]
K _H	Konstanta – funkci teploty	[-]
Li	Lithium	[-]
Mg	Hořčík	[-]
Mg ₃ N ₂	Nitrid hořečnatý	[-]
MgAl ₂ O ₄	Spinell	[-]
MgCl ₂	Chlorid hořečnatý	[-]
MgO	Oxid hořečnatý	[-]
m _N	Výsledná hmotnost dávky naplyňovací tablety	[g]
Mn	Mangan	[-]
MnCl ₂	Chlorid manganatý	[-]
m _{tav}	Hmotnost taveniny v kelímku	[kg]
N	Dusík	[-]
η	Dynamická viskozita	[kg.s ⁻¹ .m ⁻¹]
Na	Sodík	[-]
NaCl	Chlorid sodný	[-]
NaF	Fluorid sodný	[-]
O	Kyslík	[-]
P	Fosfor	[-]
p _{0H2}	Standardní tlak vodíku	[Pa]
p _{atm}	Atmosférický tlak	[Pa]
p _{H2}	Parciální tlak plynného vodíku	[Pa]
p _{H2O}	Parciální tlak vodní páry	[Pa]
p _{met}	Metalostatický tlak	[Pa]
p _σ	Tlak vyvolaný povrchovým napětím	[Pa]

Označení	Legenda	Jednotka
R	Univerzální plynová konstanta	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
r _H ⁱ	Interakční koeficient 2. řádu	[-]
R _m	Pevnost v tahu	[MPa]
R _{p 0,2}	Mez kluzu	[MPa]
s	Sféricita	[-]
S	Rozpustnost vodíku v tavenině	[cm ³ /100 g]
Si	Křemík	[-]
SiO ₂	Oxid křemičitý	[-]
Sr	Stroncium	[-]
t	Výsledná doba probublávání plynem	[min]
T	Termodynamická konstanta	[K]
T	Teplota taveniny	[K]
Ti	Titan	[-]
TiB ₂	Borid titanu	[-]
TiN	Nitrid titanu	[-]
v	Rychlost	[m/s]
Zn	Zinek	[-]
ZnCl ₂	Chlorid zinečnatý	[-]
α(Al)	Homogenní tuhý roztok	[-]
α-Al ₂ O ₃	Vysokoteplotní – stabilní korund	[-]
γ-Al ₂ O ₃	Nízkoteplotní – nestabilní spinel	[-]
ΔG ₀	Standardní změna volné entalpie reakce	[J.mol ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
σ	Povrchové napětí	[N.m]
σ _{p-t}	Povrchové napětí mezi plynem a taveninou	[N.m]
σ _{z-p}	Povrchové napětí mezi zárodkem a plynem	[N.m]
σ _{z-t}	Povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou	[N.m]
°	Stupeň	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rovnovážný Al-Si diagram [11].....	12
Obr. 2 Absorpce vodíku ze vzdušné vlhkosti [18].....	13
Obr. 3 Obsah vodíku v čistém Al v závislosti na teplotě a tlaku vodíku [3].....	15
Obr. 4 Rozpustnost vodíku ve slitinách [19; 55]	17
Obr. 5 Rozpustnost vodíku v čistém Al [63]	17
Obr. 6 Vliv přísadových prvků na rozpustnost vodíku ($T=700^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{H}_2}=100,3\text{ kPa}$) [3]	17
Obr. 7 Vliv rychlosti ochlazování na výslednou porezitu [11].....	18
Obr. 8 Kulatý tvar plynové porezity [23]	19
Obr. 9 Staženina [23]	19
Obr. 10 Vznik bubliny heterogenní nukleací [11; 14].....	20
Obr. 11 Vnášení vměstků s narušením ochranné vrstvy na hladině [56]	21
Obr. 12 Oxidická plena mezi dendrity hliníku [19; 57].....	21
Obr. 13 Ternární diagram složek krycích solí [35; 36].....	23
Obr. 14 Heterogenní vznik pórů na nanooxidickém filmu [18]	24
Obr. 15 Vliv velikosti vměstků na vynesení bublinou o stejném poloměru: a) vynáší větší bifilm b) nevynáší menší bifilm [28]	26
Obr. 16 Rafinace plynem [59]	26
Obr. 17 Mechanismus odplynění plynem [60]	28
Obr. 18 Princip vyplouvání větších bublin z trubice [58].....	30
Obr. 19 Probublávání přes porézní zátku [62]	30
Obr. 20 Ponorný zvon školní slévárny VUT v Brně.....	31
Obr. 21 Sůl zavedena do taveniny plyným médiem [61]	31
Obr. 22 Odplyňovací jednotka FDU [11]	31
Obr. 23 Závislost koncentrace vodíku na čas odplynění zmíněnými metodami [4].....	32
Obr. 24 Design rotoru pro zjemnění bublin, případně solí (SNIF) [5; 59].....	32
Obr. 25 Rotor s nasáváním kovu [50].....	32
Obr. 26 Princip odplynění metodou “High shear degassing” [24; 40]	34
Obr. 27 Vliv otáček na velikost a rozptýlení bublin:	34
Obr. 28 Tvorba bublin v tavenině při vakuování [11]	35
Obr. 29 Vakuové zařízení	36
Obr. 30 Vliv vodíku na pevnost v tahu a tažnost [20]	37
Obr. 31 Váha s automatickým výpočtem hodnoty DI	37
Obr. 32 Časová prodleva a pokles teploty při odebrání vzorku na index hustoty [20]	37
Obr. 33 Pracovní prostor s vybavením	39
Obr. 34 Značení vzorků	40
Obr. 35 Odplyňovací tableta	41
Obr. 36 Naplyňovací tableta	41
Obr. 37 Označené a navážené tablety zabalené do hliníkové fólie: N – naplyňovací, O – odplyňovací.....	41
Obr. 38 Průběh odplynění tabletami – první tavba.....	42
Obr. 39 Sěr z hladiny před odběrem vzorku 1O4.....	43
Obr. 40 Vyplouvání bublin středem zvonu.....	44
Obr. 41 Průběh odplynění tabletami – druhá tavba	45

Obr. 42 Naplyňovací tableta obsažena ve stěru – po předeřevu	46
Obr. 43 Průběh odplynění tabletami – třetí tavba	47
Obr. 44 Probublávání přes porézní zátku: Princip [62] (vlevo) a průběh metody (vpravo)	48
Obr. 45 Průběh probublávání argonem – třetí tavba	49
Obr. 46 Navážka tablet v mističce	51
Obr. 47 Tablety umístěné v peci	51
Obr. 48 Ponorný zvon: dosud používaný (vlevo) a nově zhotovený (vpravo)	53
Obr. 49 Průběh odplynění tabletami – čtvrtá tavba	53
Obr. 50 Průběh probublávání plynem – čtvrtá tavba	54
Obr. 51 Vyplování bublin:	55
Obr. 52 Naplynění tabletami a odplynění argonem – pátá tavba	56
Obr. 53 Měření teploty víka pece	57
Obr. 54 Pokles hodnoty DI s rostoucím časem	58
Obr. 55 Pohled shora na vzorky ztuhnuté za atmosférického tlaku:	60
Obr. 56 Pohled shora na vzorky ztuhnuté za atmosférického tlaku:	60
Obr. 57 Vzorek 5Ar11	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti čistého hliníku [9; 10; 11].	11
Tab. 2 Porovnání mechanických vlastností čistého Al a slitiny DIN 226 [10; 11; 12; 13].	11
Tab. 3 Koncentrace vodíku s rostoucí teplotou [12].	16
Tab. 4 Rozdělení způsobů rafinace [12].	24
Tab. 5 Hustota různých plynů pro odplynění [42; 43].	29
Tab. 6 Metody kontroly naplynění taveniny [11; 20].	36
Tab. 7 Chemické složení slitiny EN AC- $AlSi9Cu3(Fe)$ [11].	40
Tab. 8 Naměřené hodnoty z první tavby	42
Tab. 9 Naměřené hodnoty z druhé tavby.	45
Tab. 10 Naměřené hodnoty z třetí tavby – odplynění tabletami	48
Tab. 11 Naměřené hodnoty z třetí tavby – probublávání plynem.	49
Tab. 12 Data pro stanovení obsahu dusíku v tabletě.	52
Tab. 13 Naměřené hodnoty z čtvrté tavby – odplynění tabletami.	53
Tab. 14 Naměřené hodnoty z čtvrté tavby – probublávání plynem.	54
Tab. 15 Naměřené hodnoty z páté tavby – naplynění a probublávání plynem.	56
Tab. 16 Naměřené hodnoty z páté tavby – probublávání plynem.	58

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Interakční koeficienty 1. a 2. řádu pro různé teploty [3]
Příloha 2	Rotory a jejich vliv na homogenizaci taveniny, případně rozptýlení soli
Příloha 3	Technický list tablety ECOSAL – AL 320
Příloha 4	Technický list naplyňovací tablety Probat – Fluss begaser T 200
Příloha 5	Bezpečnostní list přípravku Ecosal Al 320

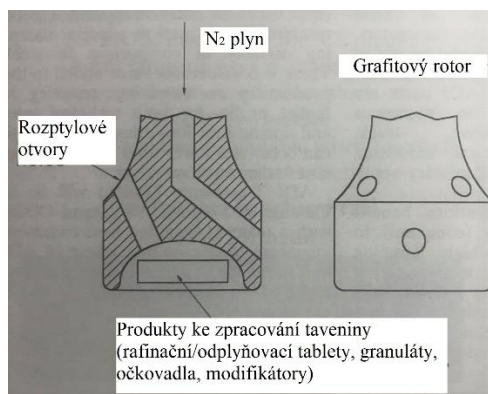
Příloha 1 – Interakční koeficienty 1. a 2. řádu pro různé teploty [3]

Tab. II. Interakční parametry 1. a 2. řádu pro roztok vodíku ve slitině Al-H-X pro parciální tlak vodíku 100,3 kPa a různé teploty [4]

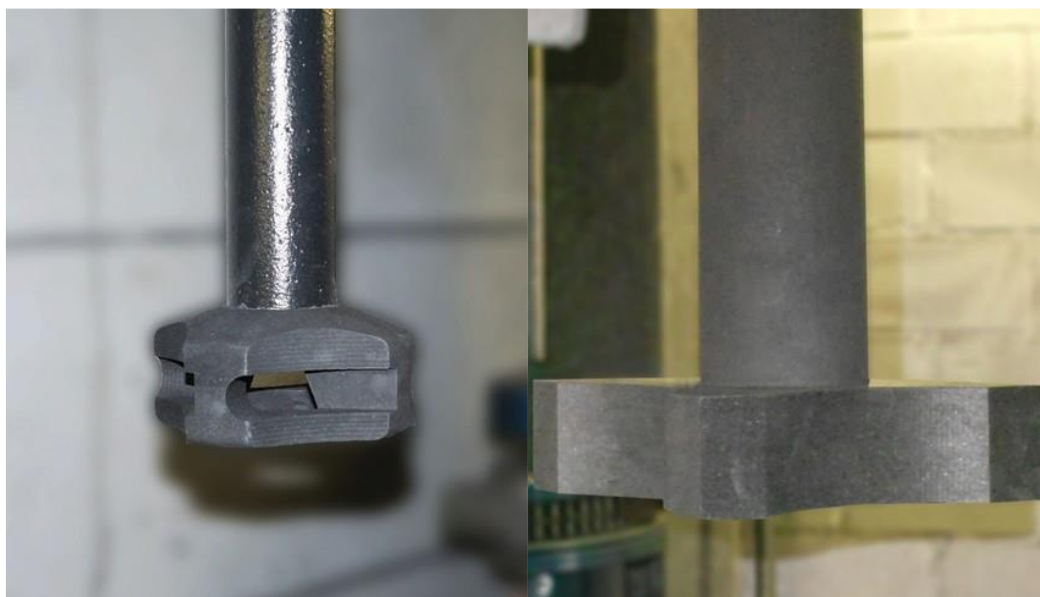
Tab. II. Interaction parameters of the 1st and 2nd order for the solution of hydrogen in the Al-H-X alloy for partial pressure of hydrogen 100.3 kPa and different temperatures [4]

Prvek	interakční parametry	teplota			
		973 K	1 023 K	1 073 K	1 123 K
Cu < 32 hm. %	e_H^{Cu}	0,0334	0,0310	0,0286	0,0266
	r_H^{Cu}	-0,00065	-0,00058	-0,00052	-0,00046
Si < 16 hm. %	e_H^{Si}	0,0193	0,0189	0,0182	0,0181
	r_H^{Si}	-0,00045	-0,00050	-0,00053	-0,00059
Fe < 10 hm. %	e_H^{Fe}	0,0659	0,0505	0,0371	0,0246
Zn < 8 hm. %	e_H^{Zn}	0,0163	0,0171	(0,0138)	(0,0120)
Mg < 6 hm. %	e_H^{Mg}	-0,066	-0,066	-0,066	-0,066
Ti < 4 hm. %	e_H^{Ti}	-0,0205	-0,0295	-0,0375	-0,0444
Li < 3 hm. %	e_H^{Li}	-0,2500	-0,2500	-0,2500	-0,2500

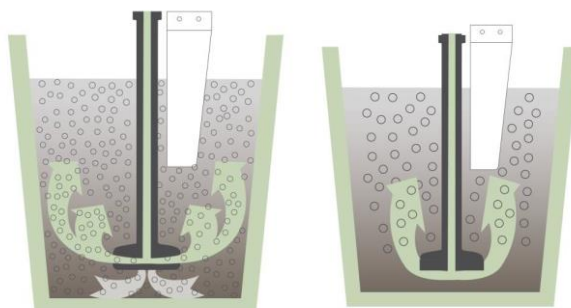
Příloha 2 – Rotory a jejich vliv na homogenizaci taveniny, případně rozptýlení soli



[54]



[51; 52]



[51]



**Vše pro metalurgii
neželezných kovů**

PROMET CZ s.r.o. 619 00 Brno, Vídeňská 127

TECHNICKÝ LIST ECOSAL – Al 320

Rafinační prostředek určený k odplynění a čištění tvářitelných a slévárenských slitin hliníku

Technické požadavky

Při tavení a odlévání hliníku a jeho slitin se používají přípravky na bázi solí, které jsou sestaveny tak, aby při chemicko-metalurgickém zpracování taveniny přinesly technologické účinky a ekonomický přínos. Při metalurgickém procesu v tavicích a udržovacích pecích nebo v přepravních pánvích se krycí a čistící prostředky a prostředky pro úpravu stěrů používají k čištění taveniny a k úpravě stěrů. Tato rafinace současně slouží k odplynění a vyčištění taveniny. Úpravou struktury odlitku modifikačními zjemňovacími přípravky se dosáhne modifikace případně zjemnění zrna při tuhnutí.

Příčinou znečištění taveniny bývá znečištění vratný materiál nebo nakupovaný šrot, organické podíly v tomto šrotu nebo vlhkost, nevhodný způsob tavby (druh plamene, přehřívání taveniny) a nebo také nevhodná úprava taveniny a použití znečištěného nářadí nebo přípravků. Oxidické vměstky, nehomogenita a páry od plynů uzavřených v tavenině zhoršují všechny fyzikální vlastnosti taveniny, jako např. tekutost a také všechny mechanické vlastnosti polotovarů nebo odlitků, jako jsou pevnost a tažnost. Odstranění nebo aspoň snížení těchto metalurgických nedostatků taveniny má rozhodující význam pro kvalitu výrobku.

Ošetření taveniny tvářitelných a slévárenských slitin hliníku aktivně působícími chemickými rafinačními přípravky lze snížit obsah plynu (vodíku) a odstranit z taveniny oxidické nečistoty. Jako vedlejší účinek se projeví odstranění nežádoucích doprovodných prvků nebo aspoň snížení koncentrace těchto prvků na přípustnou úroveň. Použitím speciálních aktivně působících rafinačních přípravků na bázi anorganických podvojných chloridů v tavicí nebo udržovací peci se může kvalita taveniny natolik zlepšit, že:

- se dosáhne požadované úrovně kvality taveniny
- nebo toto ošetření pomůže rafinačnímu procesu na principu probublávání nebo filtračního agregátu (zvýšení průtočného množství, prodloužení životnosti filtru)

PROMET CZ s.r.o.
Vídeňská 127
619 00 BRNO
CZECH REPUBLIC

Tel: 00420-5-47135214
Fax: 00420-5-47135277
Mobil: 00420-602540111
E-mail: promet.cz@tiscali.cz

IČO : 26272873
DIČ : CZ26272873

Bankovní spojení-Branch
ČSOB Brno, Joštova 5
Č.úctu-Account :

Popis přípravku

ECOSAL – Al 320 je přípravek ve formě tablet, určený k odplynění a rafinaci taveniny AL-Si slitin pro tlakové lití, na bázi uvolňování dusíku .

Popis použití

Před nasazením je třeba dbát na to , aby jak materiály, tak náradí byly suché a přehřáté, bez nánosů nečistot.

V kelímkových pecích je třeba klást rafinační tablety na povrch taveniny a pomocí zvonu tyto potopit do taveniny. Tablety reagují samočinně, reakce trvá 1-3 minuty, podle typu tablety a koncentrace. Zbytky po reakci stoupají na povrch taveniny, zapraví se do stěrů a mohou se z hladiny taveniny stáhnout.

Při práci ve velkých pecích se postupuje tak, že tablety nebo dózy se dají do rafinačního koše a bezprostředně nato se potopí do taveniny. K docílení intenzivního kontaktu mezi taveninou a prostředkem a vzhledem ke kratší reakci 1–2 minuty, je třeba rafinačním košem intenzivně pohybovat, pokud možno u dna pece.

V zásadě by měla následovat fáze ustálení (odstátí), aby proces reakce proběhl do konce. Doporučuje se kontrolovat kvalitu taveniny, to jest zejména obsah vodíku anebo obsah oxidů buď pomocí přístroje ALU – Schmelztester nebo přístrojem pracujícím na principu stanovení „DICHT-INDEX“ (v podstatě přístroj typu UDIP).

Dávkování

V závislosti na počáteční jakosti taveniny, možnostech pecního zařízení a také požadavcích na kvalitu stejně jako na koncentraci aktivních složek v přípravku se obvykle používá dávkování 0,05-0,20 % z hmotnosti vsázky. V zásadě by se ale měl kov ošetřovat při rafinaci tzv. „bezpečným“ dávkováním.

Balení

Standardní hmotnost tablet je 200 a 500 g; v hliníkové fólii je zabaleno více tablet, které jsou uloženy v kartonech s polyetylenovou vložkou chránící tablety před vlhkostí.

Příloha 4 Technický list naplyňovací tablety Probat – Fluss begaser T 200



PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 **Tableta pro účinné naplnění hliníkových tavenin**

- 01 Poznámky k technologii
Vysoké nároky na odlitky vyžadují stejnoměrnou homogenní strukturu. Při odlévání komplikovaných zaúhlených odlitků vznikají často, v závislosti na objemovém smrštění, povrchové staženiny a lunkry, které jsou vzájemně propojeny. Tyto jsou pak příčinou netěsností, nedostatečných mechanických hodnot a tím příčinou selhání stavebního dílu. Pokud se cíleně zvýší podíl vodíku v tavenině, potom se během tuhnutí vyloučí vodík v jemných pórech. Tyto póry jsou uzavřené a zpravidla nejsou vzájemně propojeny. Tlakem jejich plynu působí proti objemovému smrštění a zamezují tím tvorbě povrchových staženin.
- 02 Oblast použití
PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 jsou vhodné pro slévárenské slitiny hliníku.
- 03 Kvalitativní znaky
PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 zamezují tvorbě lunkrů.
PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 zabraňují tvorbě povrchových staženin.
PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 snižují zmetkovitost.
PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 zvyšují podíl vodíku v tavenině.
PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 zvyšují index těsnosti.
- 04 Přidávané množství
PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 mohou být dávkovány podle druhu použití mezi 0,05 až 0,3%.
- 05 Aplikační technika
Při normální lící teplotě je nutno položit PROBAT - FLUSS BEGASER T 200 na povrch taveniny a následně pomocí ponorného zvonu vnořit až na dno taveniny. Tablety se nechají v tavenině tak dlouho, dokud nevyreagují.
* Následně mohou být zbytky tablet odstraněny se stěry:
- 06 Typické vlastnosti
Vzhled: bělavé tablety
Reakční teplota: běžná lící teplota
- 07 Balení
V kartonech s vodotěsnou folií.
- 08 Zvláštní nebezpečí
Žádné.
- 09 Bezpečnostní rady
Žádné.
- 10 Skladování
Nejsou nutné žádné zvláštní skladovací předpisy.
Pokles účinnosti nebyl pozorován.

Příloha 5 Bezpečnostní list přípravku Ecosal AI 320

BEZPEČNOSTNÍ LIST

dle zákona 356/2003 Sb. a vyhlášky 231/2004

Datum vydání: 1. června 2009

Ecosal AI 320

1. IDENTIFIKACE PŘÍPRAVKU

Obchodní název: ECOSAL AI 320
Použití přípravku: rafinační prostředek pro metalurgii hliníku ve formě tablet

Identifikace výrobce: název: KVS EKODIVIZE a.s.
adresa: Leskovská 566, Horní Benešov
tel: 00420 554 748 050-1
fax: 00420 554 748 052

Nouzové číslo: Toxikologické informační středisko
tel: 00420 224 919 293

2. INFORMACE O SLOŽENÍ PŘÍPRAVKU

Výrobek obsahuje tyto nebezpečné látky:

Složka (název)	Obsah (%)	CAS	ES	Symbol nebezp.	R - věty	S - věty
kyanamid vápenatý	10 - 30	156-62-7	205-861-8	Xi	22-37-41	22-26-36/37/39

-úplné znění R – a S – vět viz. bod 15

3. ÚDAJE O NEBEZPEČNOSTI PŘÍPRAVKU

Nejzávažnější nepříznivé účinky na zdraví člověka při používání přípravku:

- škodlivý pro lidské zdraví
- působí zejména na základě dráždivých vlastností
- při rozkladu se uvolňuje chlorovodík a následně fluorovodík

Nejzávažnější nepříznivé účinky na životní prostředí při používání přípravku:

- kontaminace vod

4. POKYNY PRO PRVNÍ POMOC

- 4.1 Obecně: při požití a zasažení očí vyhledejte lékařskou pomoc
vyvolává dráždění sliznic, očí a pokožky
- 4.2 Inhalace: zasažené osoby vyved'te na čerstvý vzduch, vyčistěte nosní a hltanovou dutinu
- 4.3 Kontakt z kůží: svlékněte znečištěný oděv
zasaženou pokožku omyjte proudem tekoucí vody