



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘÍZENÉ NAPLYNĚNÍ TAVENINY A JEHO VLIV NA VLASTNOSTI A STRUKTURU ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU

CONTROLLED MELT GASSING AND ITS INFLUENCE ON PROPERTIES AND STRUCTURE OF ALUMINUM
ALLOY CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adriana Jagošová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Bc. Adriana Jagošová
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:

Řízené naplynění taveniny a jeho vliv na vlastnosti a strukturu odlitků ze slitin hliníku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stále častěji se ve slévárnách hliníkových slitin používá řízené naplynění taveniny vodíkem. Při správném zvládnutí procesu totiž umožňuje cíleně kompenzovat stahování kovu při tuhnutí a tím účinně eliminovat množství a velikost staženin a ředin v odlitku.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je jednak teoretický rozbor dané problematiky a také praktické ověření řízeného naplynění na odlitku a srovnání s odlítkem bez naplynění.

Seznam doporučené literatury:

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

MICHNA, Š. Encyklopedie hliníku. Děčín: Adin, s.r.o., 2005, 722 s. ISBN 80-890-4188-4.

GRÍGEROVÁ, T., I. LUKÁŠ a R. KOŘENÝ. Zlievarenstvo neželezných kovov. 1. vyd. Bratislava: Hurbanovo nám. 3: Západoslovenské tlačiarne, 1988. ISBN 063-566-88.

HORKÝ, K., J. VRTÍLEK. Eliminace staženin pomocí přípravku Probat Fluss MIKRO 100. Slévárství. 2008. 7 - 8, s. 357 - 358. ISSN 0037-6825.

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

JAGOŠOVÁ Adriana: Řízené naplynění taveniny a jeho vliv na vlastnosti a strukturu odlitků ze slitin hliníku

První kapitola diplomové práce se věnuje výskytu plynů v hliníkové tavenině, jaké jsou jejich zdroje, jaká je rozpustnost vodíku v Al tavenině a vzniku plynových dutin. Druhá kapitola rozděluje vady způsobené či spojené s přítomností plynů v odlitku. Mohou to být bubliny, staženiny či řediny. Je rozebrána morfologie pórů a její vliv na mechanické vlastnosti. Třetí kapitola pojednává o způsobech odplynění taveniny, ať už vakuováním, probubláváním aktivními či inertními plyny, tak i za pomoci speciálních metod a přípravků. Ve čtvrté kapitole jsou rozděleny metody pro stanovení obsahu vodíku v Al tavenině na analytické metody, metody na základě Sievertsova zákona a indikační metody. Pátá kapitola se věnuje řízenému naplynění, jeho cílům a přípravkům, které se k tomuto účelu používají. V šesté kapitole je popsán experiment, kdy pomocí zkušebního odlitku byl zkoumán vliv množství přípravku Probat Fluss Mikro 100 na různé tloušťky odlitku a jeho výsledky.

Klíčová slova: hliníkové slitiny, porozita, řízené naplynění, Probat Fluss Mikro 100

ABSTRACT

JAGOŠOVÁ Adriana: Controlled melt gassing and its influence on properties and structure of aluminum alloy castings

The first chapter of the thesis deals with the occurrence of gases in the aluminum melt, what are their sources, what is the solubility of hydrogen in the aluminum melt and the formation of gas cavities. The second chapter divides the defects caused or associated with the presence of gases in the casting. They can be bubbles, shrinkage, or diluents. Pore morphology and its influence on mechanical properties are discussed. The third chapter deals with methods of melt degassing, either by vacuuming, bubbling with active or inert gases, or using special methods and preparations. In the fourth chapter methods for determination of hydrogen content in aluminum melt are divided into analytical methods, methods based on Sieverts law and indication methods. The fifth chapter deals with controlled gassing, its objectives and the preparations used for this purpose. The sixth chapter describes the experiment where the influence of the amount of Probat Fluss Mikro 100 on the different casting thicknesses and its results were investigated using a test casting.

Key words: aluminium alloys, porosity, controlled gassing, Probat Fluss Mikro 100

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAGOŠOVÁ, Adriana. *Řízené naplynění taveniny a jeho vliv na vlastnosti a strukturu odlitků ze slitin hliníku*. Brno, 2020, 55 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124729>. 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 vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26. 6. 2020

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu práce panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za cenné rady, které mi poskytnul v průběhu vypracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat slévárně Kovolit Česká, spol. s r.o. za poskytnutí všech prostředků a možnost realizace, hlavně panu Ing. Karlovi Neterderovi za vedení a praktickou pomoc při vypracování práce. Mé další poděkování patří firmě Šebesta, služby slévárnám, za velké množství slévárenských přípravků, které mi byly poskytnuty pro účely vypracování diplomové práce. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu.

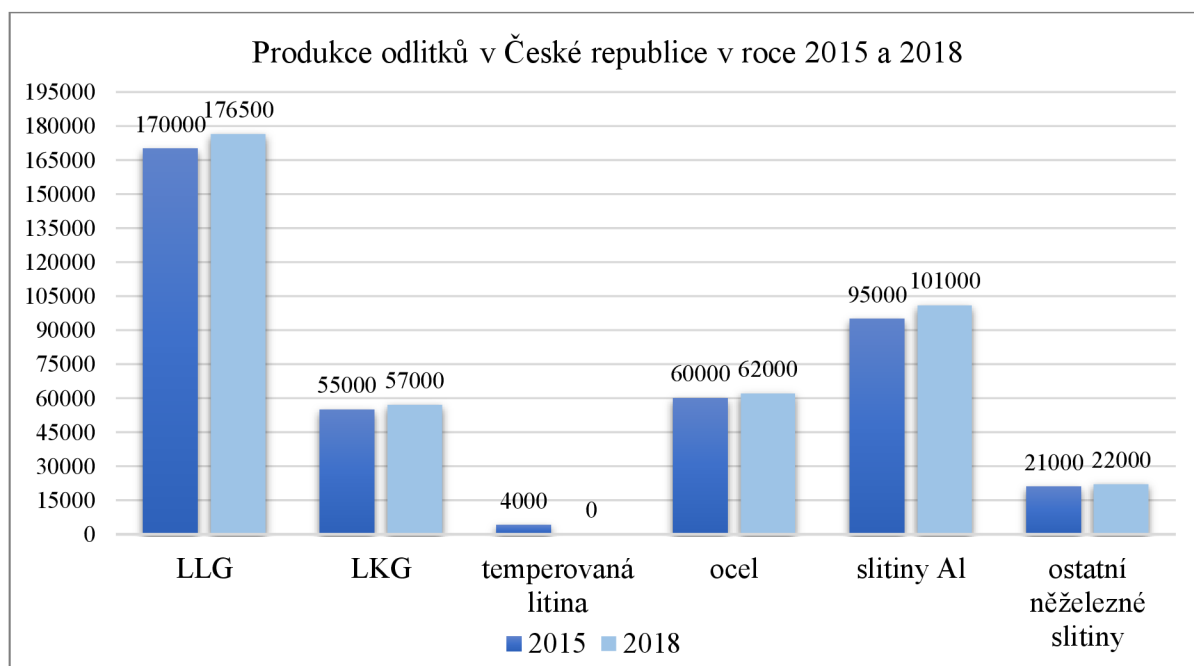
OBSAH

ABSTRAKT	1
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ	3
PODĚKOVÁNÍ	4
OBSAH	5
ÚVOD	7
1 PLYNY V HLINÍKOVÉ TAVENINĚ	9
1.1 ZDROJE VODÍKU	9
1.2 ROZPUSTNOST VODÍKU V TAVENINĚ	9
1.3 VZNIK PLYNOVÝCH DUTIN	11
2 VADY ZPŮSOBENÉ PLYNY A JEJICH ELIMINACE	13
2.1 BUBLINY	13
2.2 STAŽENINY	15
2.3 ŘEDINY	16
2.4 MORFOLOGIE PÓRŮ V AL SLITINÁCH	17
3 ODPLYNĚNÍ HLINÍKOVÉ TAVENINY	20
3.1 ODPLYŇOVÁNÍ VAKUOVÁNÍM	20
3.2 ODPLYŇOVÁNÍ PROBUBLÁVÁNÍM PLYNY	21
3.2.1 Způsoby odplyňování aktivními a neutrálními plyny	22
3.3 METODY ODPLYŇOVÁNÍ ZA POUŽITÍ SPECIÁLNÍCH PŘÍPRAVKŮ A TAVIV	24
3.4 ODPLYNĚNÍ POMOCÍ FYZIKÁLNÍCH METOD	25
4 STANOVENÍ OBSAHU VODÍKU VE SLITINÁCH AL	26
4.1 ANALYTICKÉ METODY	26
4.1.1 Metoda vysokoteplotní extrakce	26
4.1.2 Metoda nosného plynu	26
4.1.3 Metoda podtlaku	27
4.2 METODY NA ZÁKLADĚ SIEVERTSOVA ZÁKONA	28
4.2.1 Alu Speed Tester	28
4.2.2 Přístroj Chapel	29
4.3 INDIKAČNÍ METODY	29
4.3.1 Metoda stanovení indexu hustoty	29
5 ŘÍZENÉ NAPLYNĚNÍ TAVENINY A POUŽITÍ PŘÍPRAVKU PROBAT FLUSS MIKRO 100	32
5.1 PŘÍPRAVEK PROBAT FLUSS MIKRO 100	32
5.1.1 Výhody přípravku Probat Fluss Mikro 100	33
5.2 PŘÍPRAVEK PROBAT FLUSS BEGASER T 200	33
5.3 ZVYŠOVÁNÍ OBSAHU VODÍKU POMOCÍ FORMOVACÍHO PLYNU	34
6 PRAKTICKÁ ČÁST	35
6.1 NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ODLITKU	35
6.2 PRŮBĚH ODLÉVÁNÍ VZORKŮ	36
6.3 PŘÍPRAVA A MĚŘENÍ VZORKŮ	37

6.3.1	Hodnota Dichte indexu	38
6.3.2	Objem soustředné staženiny	39
6.3.3	Vnitřní porezita	45
6.4	VÝSLEDKY	51
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK	62

ÚVOD [1], [2], [3]

Výroba hliníkových komponent pomocí slévárenského procesu je nedílnou součástí světového průmyslu. Hliníkové odlitky jsou pro svou nízkou hustotu, dobré technologické, mechanické i korozní vlastnosti stále více zastoupené v celkové produkci odlitků na světě. Rostoucí trend výroby jasně ukazují statistiky. Za rok 2015 byla světová výroba hliníkových odlitků o necelé 3 mil. tun menší než za rok 2018, kdy se ve světě vyrobilo bezmála 19 mil. tun odlitků ze slitin hliníku. Z toho bylo přes 100 tis. tun v České republice, kde objem výroby hliníkových odlitků tvořil asi ¼ celkového objemu výroby. Srovnání produkce odlitků v roce 2015 a 2018 jde vidět na obrázku (Obrázek 1).



Obrázek 1: Produkce odlitků v České republice v roce 2015 a 2018 v tunách [1], [2]

S rostoucí produkcí odlitků se také zvyšují nároky na jejich kvalitu. V případě hliníkových odlitků je nejčastěji vyskytovanou vadou porezita. Jde o kombinaci staženin a plynových dutin, které značně ovlivňují mechanické vlastnosti odlitků. Takže aby kvalita odlitků rostla, musí se snižovat objem i velikost pórů, které se v odlitku nacházejí.

Z fyzikální podstaty dochází u všech kovových materiálů během procesu tuhnutí a ochlazení k objemovým změnám. Hliníkové odlitky se smršťují podle obsahu křemíku o cca 4 %. V takovém případě, musí být úbytek kovu kompenzován dostatečným nálitkováním, aby mohl vzniknout zdravý odlitek. Pokud se však na odlitku nachází místa, která není možné dostatečně nebo dokonce vůbec nálitkovat, nejčastěji se jedná o tepelné uzly nebo tlusté stěny odlitku, může dojít v průběhu tuhnutí ke vzniku staženin. Staženiny mají negativní vliv na mechanické vlastnosti, působí vrubovým účinkem a snižují únavové vlastnosti materiálu a také ovlivňují tlakotěsnost odlitku.

Úbytek kovu se dá do značné míry kompenzovat objemem plynů, které v případě vyloučení ve formě jemných bublin nijak nepříznivě neovlivňují vlastnosti odlitku. K tomuto způsobu se používá řízené naplynění vodíkem, který se vylučuje do bublin v místech, kde dojde k přesycení. Při malém počtu iniciačních zárodků dojde k vytvoření malého množství velkých bublin. Pokud se v tavenině nachází dostatečné množství vhodných heterogenních zárodků pro plynové bubliny a je zajištěna vyšší koncentrace vodíku v tavenině, dochází k vyloučení vodíku do jemných bublin, které jsou vzájemně nezávislé.

Řízené naplynění se tedy skládá ze dvou procesů, kterými jsou zvýšení obsahu vodíku a vnášení vhodných nukleačních zárodků. Pokud dojde ke splnění těchto dvou podmínek, dochází ke vzniku velkého množství malých, vzájemně nezávislých bublinek, které neovlivňují mechanické vlastnosti a díky jejich přítomnosti dochází k menšímu smršťování kovu. To má pozitivní vliv na odstranění staženin a celkovou kvalitu odlitku a možnosti menšího nálitkování obecně. Pro vnášení vhodných nukleačních zárodků do taveniny vyvinula firma Schaefer předslitinu s názvem Probat Fluss Mikro 100, která je tvořena nanostrukturními oxidy hliníku.

V rámci diplomové práce byl proveden experiment, jehož cílem bylo ukázat závislost porezity hliníkových odlitků na obsahu přípravku Probat Fluss Mikro 100 s ohledem na různé tloušťky odlitků. Byl navržen vhodný zkušební odlitek, který obsahoval 6 zkušebních vzorků na centrální vtokové soustavě, aby byly zajištěny stejné podmínky pro dané vzorky. Bylo odlito 8 odlitků o 4 různých koncentracích přípravku Probat Fluss Mikro 100 a k tomu vždy jeden jako výchozí stav. Na vzorcích probíhalo testování a vyhodnocení výsledků v podobě měření Dichte indexu, objemu soustředné staženiny, vyhodnocení vnitřní porezity pomocí obrazové analýzy z fotek ze stereolupy a vytvoření závislostí mezi pozorovanými veličinami.

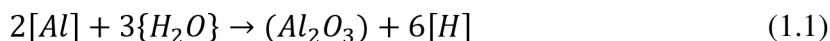
1 PLYNY V HLINÍKOVÉ TAVENINĚ [4], [5]

Při tavení slitin hliníku dochází k pohlcování plynů taveninou. Každá slitina je náchylná k absorpci plynů se zvyšující se teplotou a skokově při dosažení bodu tavení.

Z možných absorbovaných plynů se jedná o kyslík, dusík a vodík. Kyslík se v Al tavenině téměř nerozpouští, dochází k reakci pouze na povrchu taveniny za vzniku Al_2O_3 . Působení oxidů Al_2O_3 je dvojího charakteru, jednak taveninu znečišťuje, ale také ji chrání před dalším naplyněním až do teploty 900 °C, při vyšších teplotách dochází k rapidnímu nárůstu naplynění. Dusík se využívá jako čistící plyn, pro naplynění hliníkové taveniny je neškodný. Jediný plyn, jehož rozpustnost je v hliníkové tavenině technicky významná, protože může způsobovat vady, je vodík.

1.1 Zdroje vodíku [4], [5], [6]

Nejvýznamnějším zdrojem vodíku je vlhkost v pecní atmosféře, vyzdívkách, solích, neúplně vysušených kelímcích nebo na manipulačním nářadí. Při kontaktu roztaveného kovu s vodní párou dochází k disociaci vody. Kyslík reaguje s hliníkem za vzniku Al_2O_3 a vodík se v tavenině rozpouští dle rovnice (1.1).



Nové kelímky a vyzdívky je nutné před použitím vysušit a předeřhát. Starší déle nepoužívané kelímky mohou také absorbovat vlhkost. Kovové nářadí musí být řádně vysušeno a opatřeno ochrannými nátěry. Podstatným zdrojem vlhkosti jsou krycí a rafinační soli, které bývají hygroskopické, pohlcují vlhkost z okolního prostředí, proto musí být správně skladovány v suchu v uzavřených obalech. Soli se před aplikací vysušují při teplotách kolem 200 °C.

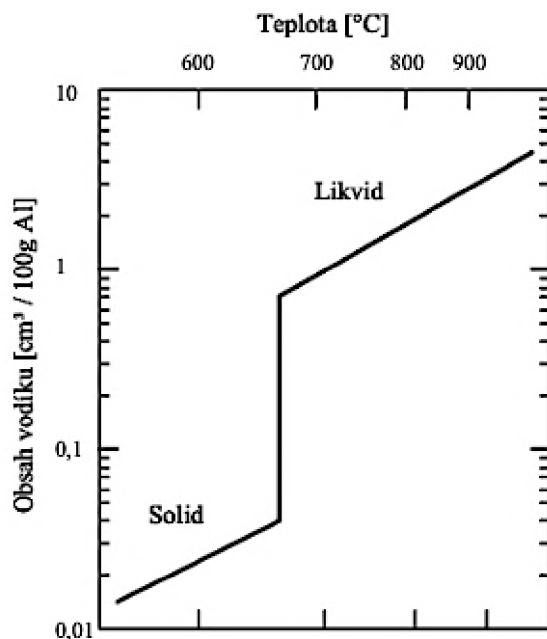
Dalším zdrojem vodíku mohou být vsázkové suroviny, a to v případě, že se nezačínají nahřívat z teploty okolí, kdy by při vysušování mohlo dojít k postupnému vypařování vlhkosti z povrchu nasazeného materiálu. Voda je obsažena nejen v pórech na povrchu vsázky, ale také v hydroxidech, které se vytváří na zoxidovaném povrchu. Reakcí s hliníkem dochází k uvolňování vodíku ze vsázkových surovin.

Uhlovodíky a vodní pára ze spalných plynů v tavicích agregátech mohou být dalším zdrojem vodíku.

1.2 Rozpustnost vodíku v tavenině [4], [5], [6]

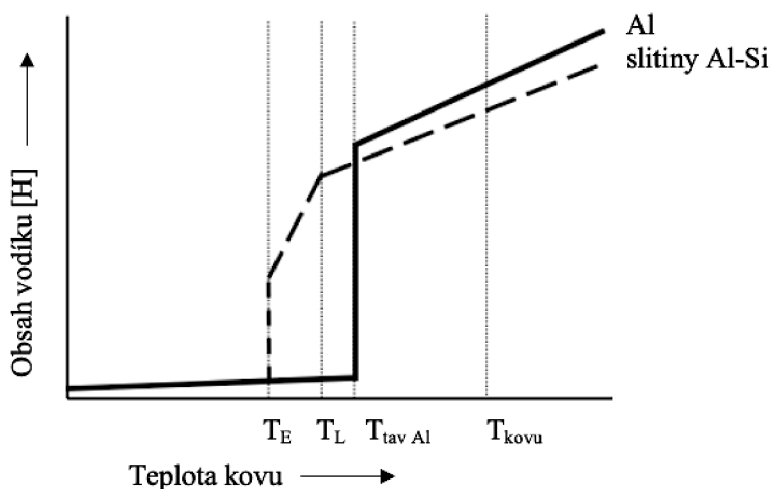
Jde o maximální množství vodíku, které se za rovnovážných podmínek může rozpustit v tavenině o určitém chemickém složení, za určité teploty a tlaku. Jeho skutečné množství může být menší než jeho maximální rozpustnost, k tomu dochází v případě, kdy se při tavení zamezí přístupu vlhkosti nebo se množství vodíku eliminuje např. odplyněním. Skutečné množství vodíku rozpuštěného v tavenině může být i vyšší. K tomu dochází při unikání přebytečného plynu difuzí nebo vytvářením bublin.

Vlastností hliníkových slitin je strmý pokles rozpustnosti vodíku v tuhém stavu. Za rovnovážných podmínek se v tuhém stavu vodík rozpouští pouze nepatrně. Závislost teploty na rozpustnost vodíku v čistém hliníku je vidět na obrázku (Obrázek 2). Pro srovnání na obrázku (Obrázek 3) je znázorněna závislost teploty na rozpustnosti vodíku v hliníku a hliníkových slitinách – siluminech. Množství vodíku nad rovnovážný stav se projeví vyloučením přebytku plynu v mikroskopických dutinách. Při značném naplynění dochází k vyloučení samostatných mikrobublín nebo difundovaných do mikrostaženin.



Obrázek 2: Závislost teploty na rozpustnosti vodíku u čistého Al [7]

Za nerovnovážných podmínek např. při rychlém ochlazení platí, že množství rozpuštěného vodíku může být vyšší, než odpovídá rovnovážné hodnotě. Tento stav se označuje jako přesycený tuhý roztok.



Obrázek 3: Srovnání závislostí teploty na rozpustnosti vodíku u čistého Al a slitin Al-Si [4]

Jednotkou pro určení množství rozpuštěného vodíku v tavenině jsou cm^3 vodíku na 100 g kovu. Limitní obsah vodíku stanovený pro hliníkové slitiny je 0,2 – 0,1 cm^3 na 100 g Al. Tento obsah udává množství vodíku, kdy ještě nedochází k tvorbě bublin. Podstatně záleží na rychlosti ochlazování odlitku, protože při vyšší rychlosti ochlazování, např. při kokilovém nebo nízkotlakém lití, nedochází k tvorbě bublin ani při vyšších obsazích vodíku.

Sievertův zákon vyjadřující závislost mezi rozpustností vodíku při dané teplotě na parciálním tlaku vodíku v okolní atmosféře má pro dvouatomové plyny tvar dle rovnice (1.2).

$$S = k \cdot \sqrt{p_{H_2}} \quad (1.2)$$

Kde:

S ... rozpustnost vodíku v tavenině [$\text{cm}^3 \text{H}_2 \cdot (100 \text{ g Al})^{-1}$]

k ...konstanta pro daný kov [$\text{cm}^3 \text{H}_2 \cdot (100 \text{ g Al})^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1/2}$]

p_{H_2} ...parciální tlak vodíku v okolní atmosféře [Pa]

1.3 Vznik plynových dutin [4], [5], [8]

Běžně používané termíny pro plynové dutiny jsou *bubliny* nebo *póry* a v případě slévárenských vad je to *bublinatost* nebo *porezita*. Příčinou jejich vzniku je změna rozpustnosti vodíku v tuhém stavu. Jedná se o jedny z hlavních vad hliníkových odlitků, které mají za následek snižování mechanických vlastností daných slitin.

Vodík je v tavenině přítomen pouze do obsahu daného křivkou rozpustnosti. Při ochlazování se jeho rozpustnost snižuje. Při překročení meze rozpustnosti dochází k difuzi plynu nebo tvorbě plynové dutiny.

Ke snížení obsahu plynu difuzí lze použít odstátí taveniny na teplotách blízkých tavicí teplotě. Po odstátí dojde k rychlému přehřátí taveniny na lící teplotu, tak aby nedošlo znovu k naplynění. Tento proces je však zdlouhavý a neúčinný, nemá v praxi velký význam.

Ke vzniku plynových dutin může docházet dvojím mechanismem. Jedná se o homogenní a heterogenní nukleaci. Při homogenní nukleaci musí být splněna podmínka, že tlak v bublině p_{H_2} je vyšší, než součet tlaku metalostatického p_{met} , atmosférického p_{atm} a tlaku vyvolaného povrchovým napětím p_σ viz rovnice (1.3).

$$p_{H_2} > p_{met} + p_{atm} + p_\sigma \quad (1.3)$$

Důležitý je také tlak vyvolaný povrchovým napětím pro kulovitou bublinu, který je dán vztahem dle rovnice (1.4).

$$p_v = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (1.4)$$

Kde:

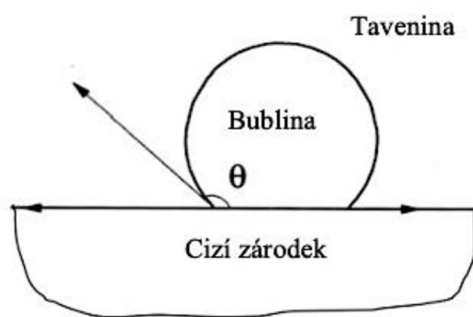
p_v ...tlak vyvolaný povrchovým pnutím [Pa]

σ ...povrchové napětí na rozhraní tavenina-bublina [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]

r ...poloměr bubliny [m]

Z tohoto vztahu plyne, že při poloměru bubliny blíží se 0, se hodnota povrchového napětí blíží ∞ . Skutečný tlak by pro homogenní nukleaci musel být v řádech stovek až tisíců MPa. Ke vzniku bublin mechanismem homogenní nukleace z těchto důvodů v praxi nedochází a bubliny vznikají pouze heterogenní nukleací, kde aktivační energie je mnohem menší.

Jako krystalizační zárodek pro heterogenní nukleaci bublin slouží cizí tuhá částice. Energetické podmínky této nukleace jsou dány velikostí povrchového napětí mezi taveninou, cizí částicí a plynem. Vhodnými zárodky jsou částice, které nejsou smáčivé taveninou. Hodnota povrchového napětí mezi zárodkem a taveninou je malá a úhel θ , který spolu svírají bublina a cizí zárodek, je větší než 90° , jak je vidět na obrázku (Obrázek 4). Tyto vlastnosti většinou vykazují oxidy a jsou proto častými nukleačními zárodky. Méně účinnými mohou být boridy, nitridy nebo karbidy. Nejhoršími nukleačními zárodky jsou očkovací prostředky.



Obrázek 4: Heterogenní nukleace bublin [4]

Během tuhnutí může vznikat slévárenská vada zvaná porezita. Dochází k poklesu rozpustnosti vodíku. Jako následek malé hodnoty rozdělovacího koeficientu vodíku, dochází k velkému obohacení taveniny vodíkem před krystalizační frontou, což výrazně zvyšuje parciální tlak vodíku v těchto místech a dochází k nukleaci bublin.

Ve stádiu tuhnutí jako nukleační zárodky mohou sloužit i krystaly vlastní tuhé fáze. V určitých případech nemusí docházet k tvorbě nových bublin, ale pouze využití již existujících iniciačních bublin. Ty mohou pocházet z vměstků žáruvzdornin, formovací směsi atd.

Při nukleaci plynových bublin se také uplatňují lokální tlakové poměry kromě koncentračních poměrů. Jedná se o uzavírání určitého mikro objemu taveniny, do kterého se již nemůže dosazovat tekutý kov. Vznikne podtlak a místně se sníží rozpustnost vodíku, vzniknou lepší podmínky pro tvorbu bublin. Také mikrostaženiny jsou pokaždé vhodným místem pro vznik plynových dutin.

2 VADY ZPŮSOBENÉ PLYNY A JEJICH ELIMINACE [4], [9]

Porezita je název pro nejčastěji zastoupenou vadu u hliníkových odlitků. Jedná se většinou o kombinaci mikrostaženin a plynových dutin. Její přítomnost ovlivňuje celou řadu vlastností hliníkových odlitků. Snižuje pevnost i tažnost. Dutiny jsou iniciátory pro vznik únavových lomů. Odliky jsou propustné při působení tlaku, dochází k pronikání tlakového media stěnou odlitku, což má za následek zmetkování odlitku. Porezita snižuje kvalitu obrobených ploch a povrchovou úpravu odlitku. Vady způsobené plyny se podle kategorizace vad řadí do třídy 400 – Dutiny. Většinou se jedná o vady neopravitelné, proto se dbá na přípravu taveniny a její metalurgickou čistotu, aby bylo dosaženo nízkého stupně naplynění taveniny.

2.1 Bubliny [9], [10], [11]

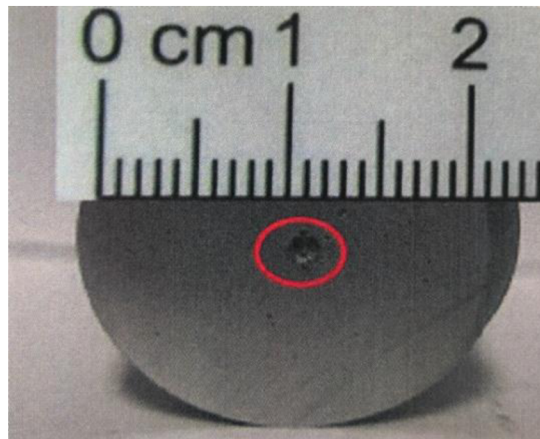
Jedná se o dutiny v odlitku, které mohou být spojené s povrchem tzv. otevřené nebo uvnitř odlitku tzv. uzavřené bubliny. V odlitku se vyskytují jednotlivě nebo tvoří shluky. Bubliny se mohou nacházet v celém objemu odlitku.

Obecně bubliny mohou být endogenní, způsobené rozpouštěním plynů – kyslíkem, vodíkem a dusíkem nebo exogenní, které vytváří vzduch uzavřený v dutině formy – zahlcený plyn.

Endogenní bubliny, které u hliníkových odlitků vytváří vodík se vyznačují kulatým tvarem dutiny a hladkým povrchem, viz obrázky (Obrázek 5, Obrázek 6).

K jejich vzniku dochází, když tlak rozpuštěných plynů je vyšší než odpor taveniny působící proti nim. Nejčastější příčiny vzniku endogenních bublin jsou:

- vlhká, studená nebo znečištěná vsázka, kde dochází ke kondenzaci vodní páry na povrchu,
- vlhké nářadí, kelímek, vyzdívka, metalurgické přípravky,
- špatně nebo nedostatečně odplyněná tavenina,
- přehřátá tavenina.



Obrázek 5: Endogenní bublina [10]

K odstranění vzniku těchto vad je nutné dbát na několik opatření jako jsou vsazení čistého, suchého vsázkového materiálu, používání suchého a přehřátého nářadí, kelímků, vyzdivek i přípravků na úpravu taveniny.

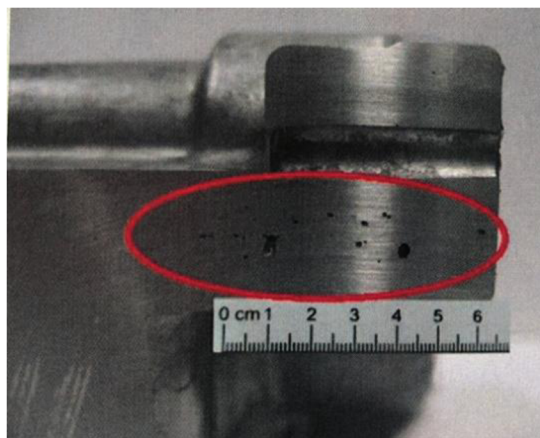


Obrázek 6: Příklad endogenních bublin [10]

Exogenní bubliny, které jsou na obrázcích (Obrázek 7, Obrázek 8), jsou nejčastěji uzavřené dutiny protáhlého či zploštělého tvaru, obvykle s hladkým povrchem. Vznikají ve chvíli, kdy tlak plynů ve formě je vyšší než odpor, kterým na ně působí chladnoucí a tuhnoucí povrchová vrstva taveniny a mohou se tak dostat do odlitku. Nejčastějšími příčinami pro jejich vznik jsou:

- nedostačující či disfunkční odvědušnění formy a jader,
- pohlcování vzduchu vtokovou soustavou.

Pro odstranění vzniku exogenních bublin je důležité správné navržení vtokové soustavy, poté kontrola funkčnosti odvědušnění formy a jader a zajištění těsnosti chlazení formy.



Obrázek 7: Exogenní bubliny [10]

Možností pro zjištění této vady je několik. Otevřené bubliny je možné najít pomocí vizuální kontroly ještě před obrobením. Uzavřené bubliny jsou zjistitelné pomocí ultrazvuku a prozáření nebo po obrobení, kdy se z nich stanou povrchové dutiny.



Obrázek 8: Exogenní bublina [10]

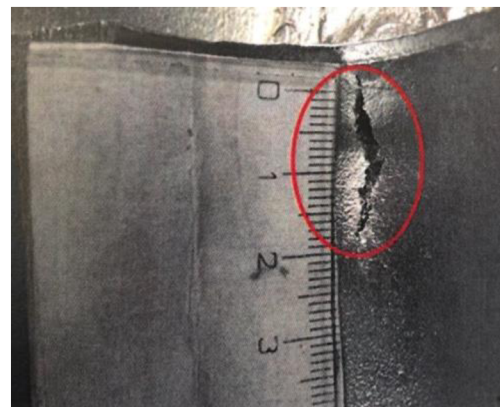
2.2 Staženiny [9], [10], [12]

Vznik staženin je v důsledku zmenšování objemu kovu při jeho tuhnutí. Staženiny mohou být vnější otevřené dutiny sahající do určité hloubky odlitku nebo vnitřní uzavřené. Nejčastější výskyt staženin je v podnálitkových oblastech či tepelných uzlech, které nebyly dostatečně nálitkovány.

Otevřené staženiny, obrázek (Obrázek 9), bývají způsobeny nejčastěji:

- neusměrněným tuhnutím odlitku,
- nedostatečným nálitkováním tepelných uzlů,
- nedolitím nálitků (nebo opožděným dolitím),
- vysokou lící teplotou.

K odstranění vzniku těchto vad je nutné zajištění usměrněného tuhnutí, dostatečné nálitkování a s tím spojené správné umístění nálitků, správné objemové plnění formy a snížení lící teploty.



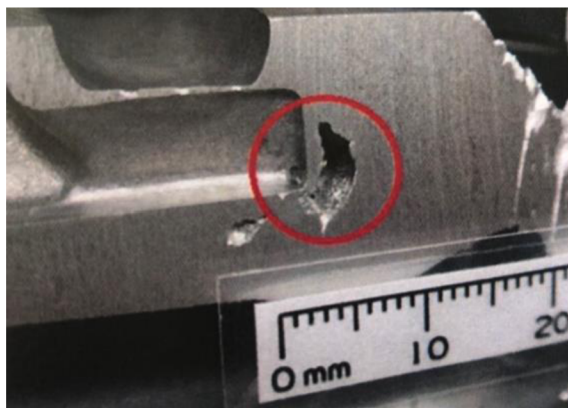
Obrázek 9: Otevřená staženina [10]

Vnitřní uzavřené staženiny, obrázek (Obrázek 10), se vyskytují v místech tepelné osy. Vždy se nachází v horní části odlitku, v tepelných uzlech nebo tlustějších stěnách. Jejich tvar je nepravidelný, ovlivněný odlišnou intenzitou odvodu tepla od stěn formy, jader nebo vtokové soustavy.

Jako nejobvyklejší příčiny vzniku mohou být:

- nevhodný průběh lití,
- vysoká lící teplota,
- špatně nastavené parametry lití.

Nápravná opatření k zamezení vzniku vnitřních staženin jsou změna chlazení formy, snížení lící teploty a optimalizace lících parametrů.



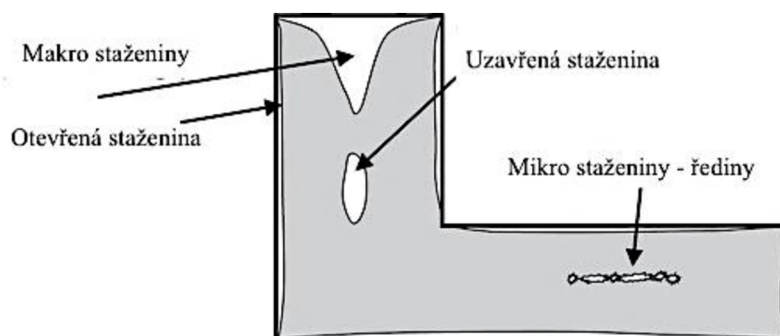
Obrázek 10: Uzavřená staženina [10]

V případě staženin se jedná vždy o vady neopravitelné. Jejich identifikace mohou být v případě otevřených staženin vizuální kontrola, u uzavřených staženin pomocí ultrazvuku, prozařovacích metod nebo na metalografickém výbrusu.

2.3 Řediny [9], [10], [12]

V případě ředin se jedná o vadu, která vzniká v samotném závěru tuhnutí a vznikají tzv. *řidká* místa. Jedná se o drobné staženiny, které vznikají nejčastěji v tepelné ose odlitku nebo tepelných uzlech, kde vytváří shluky nebo řetězce. Jelikož dochází ke spojování těchto řídkých míst pomocí kapilár, mohou být stěny odlitku porézní a díky tomu nesplňovat tlakovou zkoušku.

K jejich vzniku dochází u slitin s širokým intervalem tuhnutí, kdy mezi rostoucími dendrity zůstávají uzavřené malé objemy taveniny, kdy po jejich ztuhnutí dochází ke vzniku ředin. Výskyt ředin je také u odlitků s nepoměrnou délkou nebo výškou nad šířkou stěny. V tomto případě se jedná o osové řediny, kdy stěna odlitku tuhne v příčném směru od stěn odlitku v celé délce, a nikoliv směrem k nálitku. Dále řediny vznikají v mezinálitkové oblasti, do které již nedosazuje ani jeden z nálitků. Častý výskyt ředin je pod soustřednými staženinami v nálitcích. Dalšími místy vzniku jsou zaústění zářezů, místní přehřátí formy, prohřátá jádra, hrany formy apod. Schéma výskytu staženin a ředin je na obrázku (Obrázek 11).



Obrázek 11: Schéma výskytu staženin a ředin v odlitku [13]

Také při záporném gradientu teplot v odlitku dochází ke vzniku ředin. Nejčastějšími příčinami vzniku ředin jsou:

- nedostatečná metalurgická úprava taveniny,
- nevhodná konstrukce odlitku,
- vysoká lící teplota,
- neusměrněné tuhnutí odlitku,
- nedostatečné nálitkování odlitku.

Aby se zamezilo vzniku této vady je nutné dodržet určitá pravidla. Tavenina musí být dostatečně metalurgicky upravena, musí být zajištěna úprava konstrukce formy, snížená lící teplota, zajištění usměrněného tuhnutí pomocí změny ohřevu a chlazení formy, také nálitky musí mít dostatečný objem a správnou polohu, aby mohly dostatečně plnit svou funkci.

Slévárenská vada s názvem řediny je vidět na obrázku (Obrázek 12).



Obrázek 12: Řediny v odlitku [14]

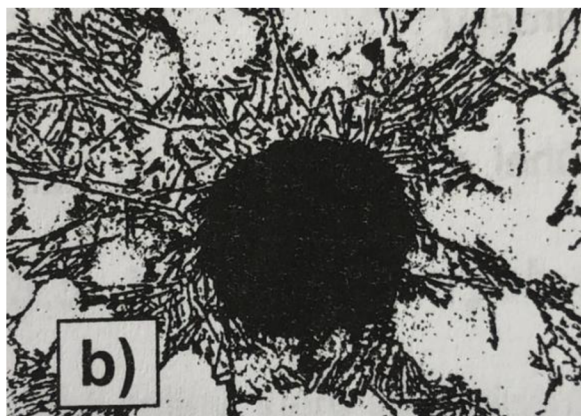
Identifikace ředin probíhá pomocí vizuální kontroly po obrobení nebo na metalografickém výbrusu. Je možné také použít RTG, ultrazvuk nebo tlakovou zkoušku, popřípadě kapilární zkoušku.

2.4 Morfologie pórů v Al slitinách [4], [15], [16]

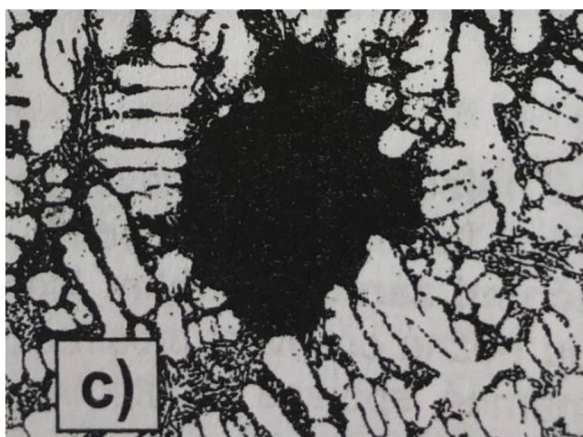
Výskyt pouze jednoho typu vady je velice ojedinělý. Pro vznik čistě plynových bublin se udává hodnota vodíku ve slitině vyšší než $0,4 \text{ cm}^3/100 \text{ g Al}$. Tvar póru se odvíjí od převažující fáze vzniku pórů, pokud tedy převažuje fáze staženin, budou vznikat dutiny s členitým tvarem, napodobující dendritickou stavbu kovu jako je na obrázku (Obrázek 13), když však převažuje fáze bublin, dochází k vzniku dutin s kulovitým tvarem, který je na obrázku (Obrázek 14). Nejčastější je však jejich kombinace, viz obrázek (Obrázek 15).



Obrázek 13: Staženina [4]



Obrázek 14: Plynová bublina [4]



Obrázek 15: Porezita (staženina a bublina) [4]

Porezita obecně vzniká v mezidendritických prostorech, jelikož se jedná o místa posledního tuhnutí odlitku. Velký vliv na porezitu má rychlost ochlazování. V případě pomalu tuhnoucího odlitku dochází k difuzi vodíku do bublin na velké vzdálenosti a následně ke vzniku velkých plynových dutin. Naopak v případě rychle tuhnoucího odlitku dochází k obalování bublin vrstvou tuhého kovu a tím k zamezení difuze a jejich dalšího růstu. Vznikají tím malé protáhlé nejčastěji členité dutiny, tzv. mikrostaženiny. Slitiny s širším pásmem tuhnutí mají větší sklon ke vzniku dutin než eutektické slitiny, které jsou méně náchylné.

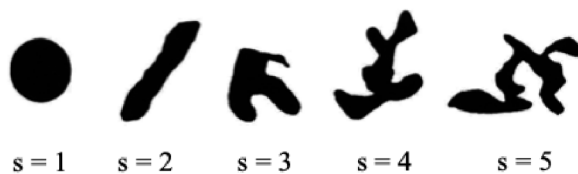
V praxi nedochází ke snižování obsahu vodíku až na rovnovážnou hodnotu, ale část vodíku zůstává vázaná v kovu jako přesycený tuhý roztok. Z toho plyne, že při rychlejším ochlazování je větší přesycení tuhého kovu a dochází k menšímu vylučování vodíku v podobě plynových bublin. Silnostěnné odlitky budou tedy pro vznik porezity náchylnější než tenkostěnné.

Očkování a modifikace také ovlivňují porezitu. Očkování i modifikace podporují vznik rozptýlených mikrostaženin, a naopak neočkované a nemodifikované slitiny mají sklon k tvorbě soustředných, velkých dutin.

K posouzení tvaru pórů nám slouží tzv. koeficient kulatosti s . Jeho výpočet je podle rovnice (2.1).

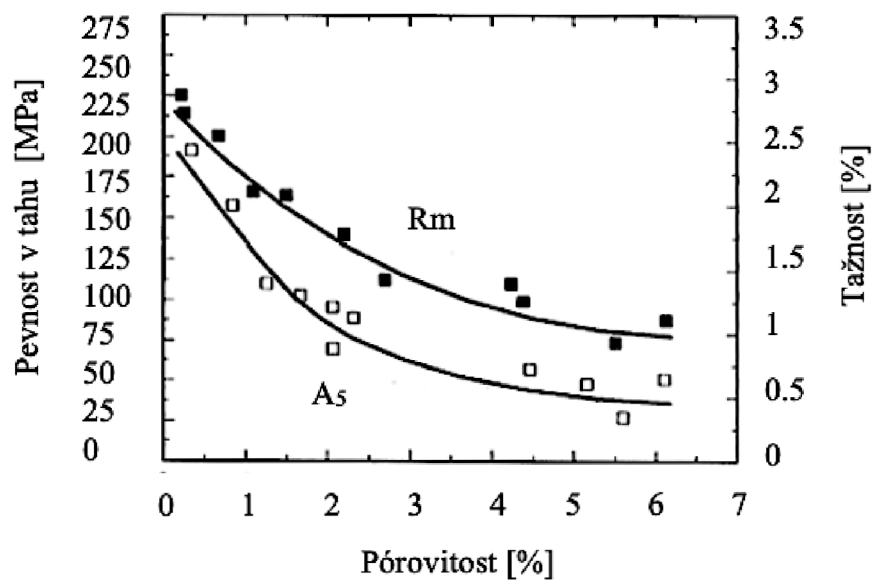
$$s = \frac{\text{obvod}^2}{4 \cdot \pi \cdot \text{plocha}} \geq 1 \quad (2.1)$$

V případě vnitřních staženin a mikrostaženin, které mají nejčastěji protáhlý dendritický tvar je koeficient kulatosti vysoký. Naopak u kulatých plynových dutin se koeficient kulatosti blíží hodnotě 1. Příklad dutin s jejich koeficientem kulatosti je na obrázku (Obrázek 16). Znamená to, že dutiny s menším koeficientem kulatosti, zejména plynové dutiny, nepůsobí na odlitek vrubovým účinkem a ovlivnění mechanických vlastností je menší než v případě dutin s vyšším koeficientem kulatosti. V praxi však dochází nejčastěji ke kombinaci obou vad a jejich vliv na vlastnosti odlitku je tím horší, čím je objem dutin větší a jejich tvar členitější.



Obrázek 16: Koefficient kulatosti [17]

Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti odlitku je značný. Dochází ke snížení pevnosti i tažnosti, viz obrázek (Obrázek 17). Přítomnost dutin znamená přítomnost iniciátorů pro vznik únavových lomů. Snižují kvalitu obráběných ploch a zhoršují povrchovou úpravu odlitku. Dalším důležitým problémem je snižování těsnosti odlitků.



Obrázek 17: Vliv obsahu pórovitosti na pevnost a tažnost u slitiny AlSi6Cu4 [4]

3 ODPLYNĚNÍ HLINÍKOVÉ TAVENINY [4], [5], [8]

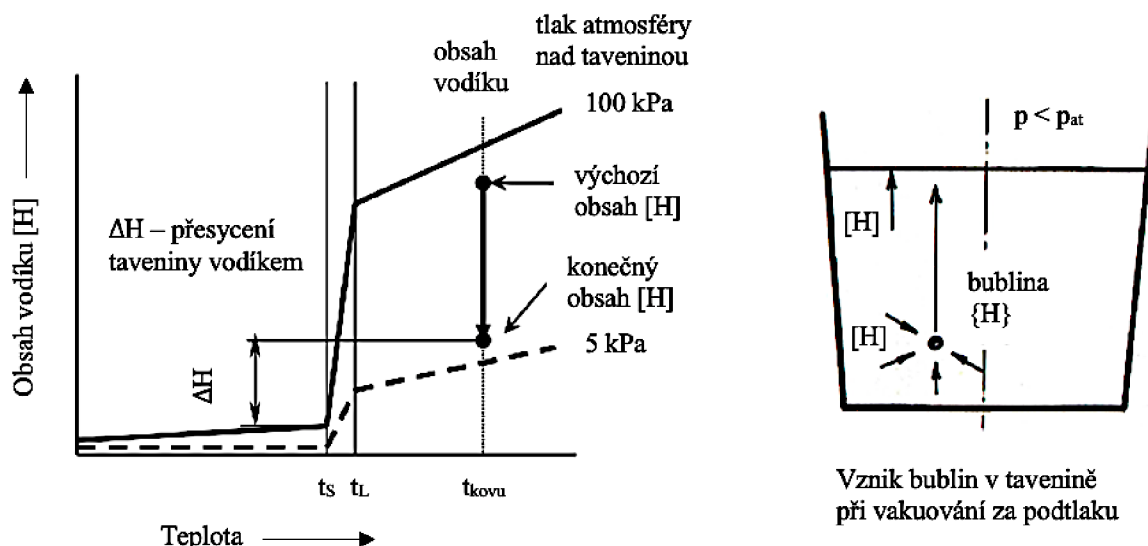
Díky vzájemnému působení taveniny s okolním ovzduším a vyzdívkou pece dochází ke znečištění slitiny i přes ochranná opatření. Aby vznikaly kvalitní odlitky, musí dojít k vyčištění taveniny v podobě rafinace a odplynění. Ty mají za úkol odstranit kovové příměsi, nerozpuštěné nekovové vměstky a plyny. Odplynění taveniny je metalurgický proces, při kterém dochází ke snižování obsahu vodíku na úroveň, kdy nedochází k vylučování endogenních bublin. Může být prováděno několika způsoby.

Nejčastější způsoby pro odplynění taveniny využívají rozdílné parciální tlaky plynů v tavenině a v odplyňovacím médiu nebo využití Sievertsova zákona změny rozpustnosti s teplotou a tlakem. Dále platí, že při pomalejším tuhnutí musí být tavenina lépe odplyněná, protože má větší sklon k tvorbě bublin.

Zajímavý je vztah mezi naplyněním a stahováním kovu, protože plynové dutiny jsou schopny částečně nahrazovat úbytek kovu stahováním při tuhnutí. Z toho plyne, že silně odplyněná tavenina má větší sklon k tvorbě soustředných staženin, které se musí kompenzovat dostatečným nálitkováním. Ideální je tedy držet se na optimální míře obsahu plynu.

3.1 Odplyňování vakuováním [4], [8], [15]

Při této metodě se využívá snižování tlaku atmosféry nad hladinou taveniny, z čehož podle Sievertsova zákona, rovnice (1.2), vyplývá snížení rozpustnosti vodíku v roztaveném kovu. Pokud je maximální rozpustnost vodíku za podtlaku menší než jeho současný obsah v tavenině, stává se z ní přesycený roztok a vodík z něj uniká pryč ve formě mikrobublin, viz obrázek (Obrázek 18).



Obrázek 18: Princip vakuového odplyňování [4]

Důležitou částí procesu je stanovení vhodného zbytkového tlaku nad taveninou, který musí být menší než rovnovážný tlak odpovídající maximální dovolené koncentraci plynu v tavenině. Zároveň musí být zbytkový tlak větší než tlak par složek slitiny, aby při vakuování

nevznikly ztráty jejich vypařováním. Jinak nedochází k zásadním změnám chemického složení. V provozu se tento princip provádí natavením vsázky v tavícím agregátu a poté s požadovanou teplotou kovu dojde k převozu taveniny v pánvi do vakuovacího zařízení. Komora se uzavře a sníží se tlak na 5 kPa. Víko komory obsahuje průzor, kterým se sleduje průběh reakce a dle její bouřlivosti se dá tlak regulovat. Tavenina je po několika minutách odplyněna až na hodnotu obsahu vodíku 0,1 cm³/100 g Al.

Celý proces lze zkvalitnit a urychlit dmýcháním inertního plynu do pánve pomocí trubice s porézní zátkou nebo porézní tvárnici. Vodík tak nemusí tvořit jen vlastní bubliny, ale může difundovat do bublin inertního plynu. Proces se stává energeticky méně náročný, ale jeho ekonomické náklady se značně zvyšují. Z těchto důvodů nenašel tento proces velké uplatnění v praxi.

3.2 Odplyňování probubláváním plyny [4], [8]

Proces funguje na základě difuze vodíku do bublin s jeho nulovým parciálním tlakem. Může s nimi chemicky reagovat nebo vyplouvají na hladinu taveniny, obrázek (Obrázek 19). Odplyňování může probíhat pomocí aktivních nebo inertních plynů, podle vzájemné reaktivity vodíku a plynu.

Pro odplyňování se používají inertní plyny – argon, interní pro všechny slitiny nebo dusík, interní pro hliníkové a měděné slitiny. Plyny jsou do taveniny uvolňovány ze dna pánve, aby docházelo ke vzniku malých bublinek a měly dlouhou dráhu na vyplouvání na hladinu rychlostí v , která je dána Stokesovým zákonem, viz rovnice (3.1).

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot (\rho_{kovu} - \rho_{plynu})}{\eta} \cdot r^2 \quad (3.1)$$

Kde:

g ... tíhové zrychlení [m·s⁻²]

ρ ... hustota kovu nebo plynu [kg·m⁻³]

η ... dynamická viskozita [kg·(s·m)⁻¹]

r ... poloměr bubliny [m]

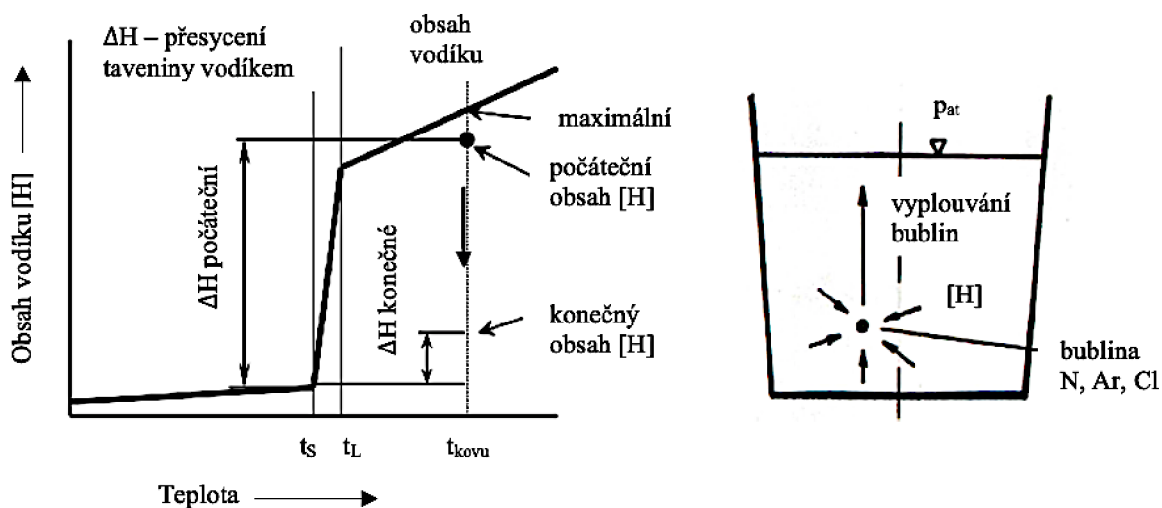
Bubliny inertního plynu s nulovým parciálním tlakem vodíku se nasytí vodíkem dle rovnice (3.2).

$$[H] < - > \frac{1}{2} \{H_2\} \quad (3.2)$$

Dokud se nevyrovná parciální tlak vodíku v bublinách a tavenině, probíhá přenos vodíku do bublin inertního plynu. Intenzita odplynění je daná velikostí kontaktní plochy obou médií a dobou, po kterou bubliny vyplouvají na hladinu.

Aby docházelo k efektnímu odplynění taveniny musí být vhněné bubliny co nejmenší velikosti a dráha jejich vyplouvání musí být dostatečně dlouhá. Bubliny musí být vytvářeny u dna a pánve musí být dostatečně vysoké. Důležitá je i dobrá homogenizace taveniny.

Požadavkem na vlastnosti inertních plynů je především vysoká čistota, při které je zajištěno minimální množství vlhkosti a kyslíku. Dusík se používá s čistotou min. 99,99 %, protože dusík běžné technické čistoty kvůli svému množství vlhkosti pro odplynění nevyhovuje. Výsledky odplynění za použití argonu a dusíku jsou podobné, mělo by však platit, že při vhanění argonu dochází k menšímu vytváření strusky a stěry jsou suché, takže obsahují méně kovového Al.



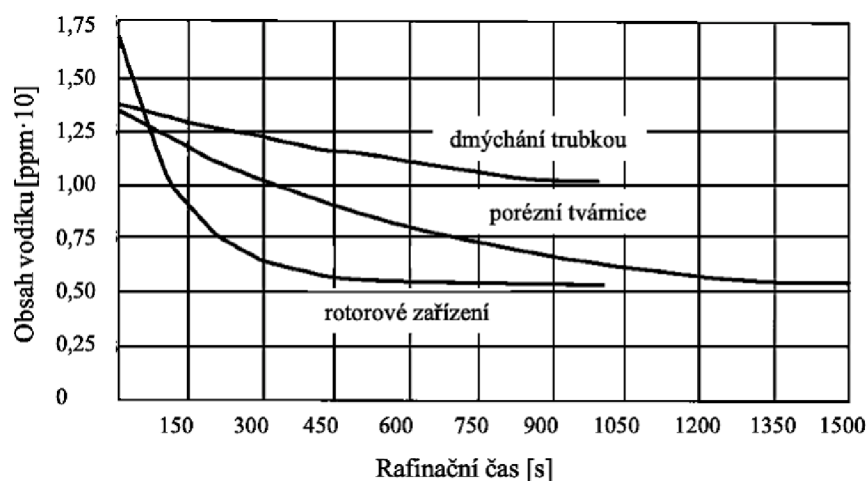
Obrázek 19: Princip odplyňování inertními a aktivními plyny [4]

Pokud dochází k chemické reakci mezi vhaněným plynem a vodíkem, jedná se o plyny aktivní. Na odplynění se používají chlor nebo fluor (dříve i freon). Chlor při reakci s hliníkovou taveninou vytváří $AlCl_3$. Jelikož má nízkou teplotu sublimace, nachází se v tavenině v plynné formě a dochází k reakci s vodíkem, který má v jeho bublinách nulový parciální tlak. Vzniká HCl a v podobě bublin vyplouvá na hladinu taveniny. Při průchodu $AlCl_3$ taveninou dochází k reakci chloru s prvky s vyšší afinitou ke chloru, než má hliník, takže dochází k odstraňování i dalších prvků. Jsou to zejména Sr, Na, Ca, Li, Mg. Při odplyňování aktivními plyny se degraduje účinek modifikování – Na a Sr a může být podstatně snížený obsah Mg. Důležité je, že tavenina se musí modifikovat až po odplynění.

Kvalita odplynění aktivními plyny bývá o něco vyšší než plyny inertními. Současná doba se však z ekologického hlediska snaží o zamezení používání aktivních plynů a jejich nahrazení inertními, které jsou po této stránce šetrnější. Chlor se používá pouze v takové koncentraci, aby došlo k úplnému zreagování v chemické sloučeniny a v plynné formě se využívá jeho kombinace (max. 15 % Cl) s inertními plyny. Fluorové přípravky jsou ještě agresivnější a toxičtější než chlorové, proto jsou v mnohých zemích zakázané.

3.2.1 Způsoby odplyňování aktivními a neutrálními plyny [4], [18], [19]

V případě aplikace plyných prostředků je vždy zásadní, aby vznikaly co nejmenší bubliny a tím byla zajištěna správná účinnost. Pro tyto účely se používají odplyňovací trubice, porézní tvárnice nebo rotorová zařízení, srovnání jejich účinnosti je na obrázku (Obrázek 20).



Obrázek 20: Srovnání účinnosti metod odplynění pomocí aktivních a neutrálních plynů [20]

Pro menší slévárny s menšími velikostmi kelímků je vhodné použít odplyňovací trubici, kdy se jedná o grafitovou, keramickou nebo kovovou trubku, která je uzavřena porézní zátkou. V případě absence zátky by docházelo ke vzniku bublin o velkém průměru a odplyňování by bylo neúčinné.

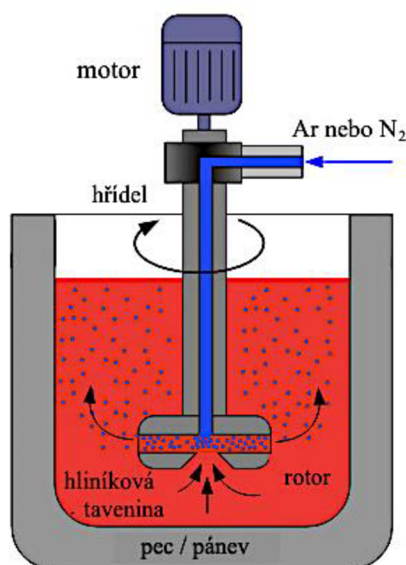
Další možností jsou porézní tvárnice, zabudované ve dně kelímku. Přívod plynného média je z vnějšku. Jak u odplyňovacích trubic, tak i porézních tvárnice musí být vhodné umístění, aby současně docházelo k míchání lázně. Jejich účinnost je srovnatelná.

Nejčastěji se však využívá rotorové odplyňovací zařízení, v praxi často označováno jako FDU (Foundry Degassing Unit), obrázek (Obrázek 21).



Obrázek 21: Zařízení FDU [19]

Toto zařízení je založeno na principu oběžného kola s rotorem, které míší inertní plyn (dusík nebo argon) s taveninou, viz obrázek (Obrázek 22). Dochází k rozptylu plynových bublin do celého objemu taveniny bez narušení její hladiny. Výhodou jsou krátké zpracovací časy, účinné odplynění a vyčištění taveniny. Odplyňovací zařízení může být mobilní či stacionární, dokáže se přizpůsobit podmínkám slévárny. Hřídele a rotory jsou vyrobeny nejčastěji z grafitu či karbidu křemíku a jejich uspořádání je voleno tak, aby vyhovovalo všem typům kelímků a přepravním pánvím. Pro zajištění dlouhé životnosti se může provádět impregnace grafitových komponent.



Obrázek 22: Schéma FDU [21]

Toto zařízení slouží nejen k odplyňovacímu procesu, ale při správném použití i k odstranění oxidů, které zůstávají na hladině taveniny za pomoci hradidla, které zamezuje turbulenci kovu. K celkovému zlepšení kvality taveniny se používá komplexní odplyňovací zařízení, kde dochází k vytvoření víru taveniny rotorem, do kterého se vloží rafinační přípravky ve formě granulátu, dojde k ponoření přepážky a následnému odplynění.

3.3 Metody odplyňování za použití speciálních přípravků a taviv [4], [6]

Přípravky se používají pro krytí taveniny v průběhu tavicího procesu. Použití těchto přípravků je zejména u slitin, které nevytváří v průběhu tavení souvislou krycí vrstvu oxidů na hladině taveniny. Tato vrstva pak zabraňuje další oxidaci taveniny.

Odplyňovací soli ve formě tablet, obrázek (Obrázek 23), prášku nebo granulátu se vkládají na dno kelímku s taveninou pomocí ponorného zvonu, kde se za vzniku plynného dusíku či chloru nebo fluoru rozkládají. Mohou se do taveniny dostávat taky pomocí dmýchání tryskou. Po rozkladu přípravku dochází k reakci s taveninou, kdy jejím produktem jsou reakční zplodiny, které posléze vyplavou na hladinu a spolu se struskou se stáhnou mimo kelímek. Existují různé druhy přípravku, které se vždy volí podle typu slitiny, teploty kovu atd.



Obrázek 23: Odplyňovací tablety [23]

3.4 Odplynění pomocí fyzikálních metod [6], [24]

Jedná se o metody odplynění založené na fyzikálních principech. Dochází k využití vibrací nebo ultrazvukového vlnění za vzniku mikroskopických bublin uvnitř taveniny s vysokým stupněm vakua, které se sytí rozpuštěným plynem v tavenině.

Při ultrazvukovém vlnění dochází k akustické kavitaci, která vytváří střídavé cykly nízkého a vysokého tlaku. Během nízkotlakých cyklů dochází k tvorbě malých vakuových bublin. Bubliny slouží jako zárodky pro tvorbu vodíkových bublin v tavenině. Při jejich shlukování dochází ke stoupání plynových bublin nahoru k hladině. Akustické proudění napomáhá k vynášení těchto bublin na hladinu taveniny. Jedná se o jednu z nejúčinnějších metod pro odplynění taveniny. Zařízení, které se k těmto účelům používá, je na obrázku (Obrázek 24).

Tyto metody však vyžadují nákladná příslušná zařízení, jak mechanická, tak elektronická. Může být použita i metoda odplynění za použití stejnosměrného elektrického proudu.



Obrázek 24: Ultrazvukové zařízení pro odplynění taveniny [24]

4 STANOVENÍ OBSAHU VODÍKU VE SLITINÁCH AI [4], [25]

Jedná se o provozně nutný proces, který musí být vyhodnocen v přijatelné přesnosti za co nejkratší dobu. Od jeho výsledků se odvíjí další práce s taveninou, buď uvolnění taveniny na lití nebo další odplyňování. Reálně doba, po kterou vyhodnocení trvá, se pohybuje kolem 10 minut.

Je třeba sledovat proces odplynění soustavně, aby bylo možné kontrolovat účinnost jednotlivých přípravků a stanovit jejich optimální množství pro daný materiál.

Metody, kterými dochází k vyhodnocení obsahu vodíku, mohou být provozní nebo laboratorní. Jak už z názvu vyplývá, provozní metody mají za úkol bez dalších úkonů vyhodnotit stav taveniny, nejčastěji se tak provádí optickým pozorováním vzhledu hladiny vzorku. Pozoruje se *propadnutí* či *růst* hladiny, kdy v případě dobře odplyněné taveniny má hladina propadlý tvar a v případě naplyněné vypouklý. Naplyněná tavenina pomocí bublin kompenzuje úbytek objemu kovu při stahování, proto se tento stav projeví jako růst hladiny. Přesnost této metody je nízká, ale pro zkušené taviče může být v praxi dostačující. Laboratorní metody jsou mnohem přesnější, ale časově náročnější. Z nich se nejčastěji uplatňuje princip vakuové extrakce vodíku ze vzorku, který byl připraven speciálním postupem.

Metod pro stanovení obsahu vodíku v hliníkové tavenině je celá řada. Jedno z možných rozdělení metod je na analytické, metody na základě Sievertsova zákona a indikační metody.

4.1 Analytické metody [25]

Do této skupiny metod se řadí metoda vysokoteplotní extrakce, metoda nosného plynu a také metoda podtlaku.

4.1.1 Metoda vysokoteplotní extrakce [4], [25]

Jedná se o metodu, kdy je vzorek laboratorně zpracováván. Extrakce se provádí na roztaveném vzorku nebo na tuhém vzorku při teplotách asi 50 °C pod teplotou solidu. Vzorek se nachází ve vakuové komoře s definovaným objemem a desorbovaný vodík je měřen pomocí spektrometru. Jsou kladeny vysoké nároky na skladování a přepravu vzorků, protože by vodík mohl ze vzorku difundovat, proto se používá teplot kapalného dusíku. Tato metoda v praxi nenašla velké uplatnění, čas na zpracování jednoho vzorku může být kolem 1 hodiny, což je pro provoz příliš dlouhá doba.

4.1.2 Metoda nosného plynu [25]

Jako nosný plyn se používá dusík nebo helium. Vzorek je roztaven v proudu plynu a dojde k vypuzení vodíku ze vzorku. Měří se změna tepelné vodivosti plynu a také analýzou vodní páry, na kterou se vodík přemění, je stanoveno množství vodíku ve vzorku. Čas potřebný na realizaci této analýzy je kolem 15 – 20 minut. Je však zapotřebí nákladné přístrojové vybavení.

4.1.3 Metoda podtlaku [4], [26], [27]

Na tomto principu pracuje např. zkouška Staube – Pfeiffer. Vzorek, obrázek (Obrázek 25), kolem 80 – 90 g taveniny se naleje do kovového nebo keramického kelímku umístěného v komoře, kde se tlak nastaví na 80 mbar. Tlak zůstává konstantní až do úplného ztuhnutí vzorku. Dochází k vyloučení vodíku, jehož množství je mnohem vyšší než za atmosférického tlaku, znamená to, že metoda je mnohem citlivější.

Vypoulená, tzv. houbová hlava ukazuje naplyněný vzorek, naopak propadlá ukazuje odplyněný vzorek. Tyto vzorky se běžně vyhodnocují v řezu, kdy jsou srovnávány se řadou standardů. Důležitý je tlak, při kterém vzorky tuhly, aby bylo možné testování opakovat a zaručit tak platné porovnání. Slévárna si může vytvořit vlastní standardy pro vyhodnocování vzorků.

Vznik bublin také záleží na přítomnosti vměstků, které slouží jako nukleační zárodky. Výsledky této zkoušky tak poukazují nejen na naplynění taveniny, ale i na obsah vměstků v tavenině.



Obrázek 25: Vzorek pro vyhodnocení zkoušky Straube-Pfeiffer [26]

Zkouška Straube-Pfeiffer je velmi podobná zkoušce Drosstest, která probíhá za finálního podtlaku 5 mbar. Nečistoty ve vzorku vyplavávají na hladinu a po ztuhnutí vzorku se tak neporovnává příčný řez, ale hladina vzorku, která ukazuje množství vměstků, obrázek (Obrázek 26).



Obrázek 26: Vzorek pro vyhodnocení zkoušky Drosstest [26]

Obě tyto zkoušky probíhají na stejném zařízení a jsou podobné indikační metodě pomocí dvojího vážení. Zařízení pro tuto zkoušku je na obrázku (Obrázek 27).



Obrázek 27: Zařízení pro zkoušku Straube – Pfeiffer [28]

4.2 Metody na základě Sievertsova zákona [25]

Pro stanovení obsahu vodíku v tavenině je potřeba znát teplotu, tlak a chemické složení slitiny. Pro měření teploty se u všech metod využívá měření termočlánkem. Vliv na rozpustnost jednotlivých prvků je zohledněn zadáním těchto prvků nebo přepočtem jednoho faktoru a jeho zadáním. Sievertův zákon viz rovnice (1.2).

4.2.1 Alu Speed Tester [4], [25]

Funguje na principu metody první bubliny. Vzorek tekutého kovu se naleje do nejčastěji vyhřívaného *hnízda*, které se nachází v komoře, která se uzavře víkem a je vakuovou pumpou postupně odsávána. S klesajícím tlakem začnou vyplavovat bubliny vodíku. S první bublinou se zapne měření. Současně se měří teplota kovu a tlak. Z rovnice Sievertsova zákona, rovnice (1.2), se dopočítá obsah vodíku ve vzorku.

Doba měření je kolem 1 minuty, ale vyhodnocení je špatně reprodukovatelné a odvíjí se od subjektivního hodnocení obsluhy, která zapíná měření. Proto tato metoda nemá v praxi příliš velké uplatnění. Přístroj pro tuto zkoušku je na obrázku (Obrázek 28).



Obrázek 28: Přístroj Alu Speed Tester [29]

4.2.2 Přístroj Chapel [25]

Metoda, při které má měřicí sonda na konci porézní grafit, který se chová jako umělá bublina. Po ponoření je sonda nejdříve vakuovaná. Dochází k difuzi vodíku přes grafit do sondy tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání tlaků vodíku v tavenině a v sondě. Tento tlak se kontinuálně měří. Přístroje, obrázek (Obrázek 29), mají vyhledávací funkci a dokážou rychle stanovovat hraniční hodnoty. Doba měření se pohybuje kolem 6 minut.



Obrázek 29: Přístroj Chapel [30]

4.3 Indikační metody [25]

Do indikačních metod patří metoda dvojího vážení, také zvaná jako metoda stanovení indexu hustoty. Jedná se o jednu z provozně nejčastěji používaných metod.

4.3.1 Metoda stanovení indexu hustoty [4], [25], [26]

Principem této metody je porovnávání hustoty vzorku slitiny, který ztuhl při atmosférickém tlaku se vzorkem, který tuhnul při sníženém tlaku. Také se využívá Sievertsova zákona, který říká, že za podtlaku je nižší rozpustnost vodíku v tavenině, díky tomu dojde k vyloučení více bublin než při tlaku atmosférickém, viz rovnice (1.2). Bubliny zůstávají ve vzorku uzavřeny a přispívají tím ke snížení jeho hustoty.

Postup této metody je následující. Tavenina se odebere do dvou zkušebních kelímků, které mohou být kovové, keramické nebo z pískových směsí. Objem vzorků je asi 40 – 80 ml. Jeden vzorek zůstává tuhnout při atmosférickém tlaku a druhý se zavře do vakuovací komory, kde tuhne za sníženého tlaku (nejčastěji kolem 80 mbar).

Dalším krokem je měření hustoty obou vzorků, což probíhá pomocí vážení vzorku na vzduchu a poté ponořeného do kádinky s vodou, kde se využívá Archimedova zákona. Vážení ve vodě probíhá tak, aby váha měřila pouze příbytek hmotnosti vody, která je vytlačena objemem ponořeného vzorku. Vážení vzorků je na obrázku (Obrázek 30).



Obrázek 30: Vážení vzorku pro stanovení Dichte indexu [26]

Výpočet objemu vzorku je dle rovnice (4.1).

$$V_{vz} = \frac{m_{vz H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad [m^3] \quad (4.1)$$

Hustota vzorku se poté vypočítá dle rovnice (4.2).

$$\rho_{vz} = \frac{m_{vz at}}{V_{vz}} = \frac{m_{vz at}}{m_{vz H_2O}} \cdot \rho_{H_2O} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (4.2)$$

Kde:

$m_{vz H_2O}$... hmotnost vzorku ponořeného ve vodě [kg]

$m_{vz at}$... hmotnost vzorku na vzduchu [kg]

ρ_{H_2O} ... hustoty vody [$kg \cdot m^{-3}$]

ρ_{vz} ... hustota vzorku kovu [$kg \cdot m^{-3}$]

Rozdílem měrných objemů obou vzorků získáme obsah vyloučeného plynu, rovnice (4.3).

$$V_{H_2} = \frac{1}{\rho_{vz vak}} - \frac{1}{\rho_{vz atm}} \quad [m^3 H_2 \cdot (kg Al)^{-1}] \quad (4.3)$$

Z hustot obou vzorků se poté dopočítá tzv. *index hustoty*, také se používá označení *Dichte index* z německého jazyka, zkratka DI, rovnice (4.4).

$$DI = \frac{(\rho_{vz atm} - \rho_{vz vak})}{\rho_{vz atm}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.4)$$

Celé zařízení se skládá z několika částí. První část na přípravu vzorku je vakuovací komora. Moderní přístroje vykazují možnosti, kdy na jednom zařízení lze připravit vzorky pro celou řadu vyhodnocovacích metod, jelikož je možné upravovat hodnotu podtlaku. Další důležitou částí je váha, kdy její požadovaná přesnost je 0,01 g. Váha má nádobu s vodou, ve které je speciální závěs na zkušební vzorek.

Metody stanovení indexu hustoty se v dnešní době v běžných provozech využívá asi nejčastěji. Jedná se o poměrně přesnou metodu a její vyhodnocení trvá do 10 minut. Hodnoty indexu hustoty se obvykle pohybují v řádu procent, jak jde vidět na obrázku (Obrázek 31).



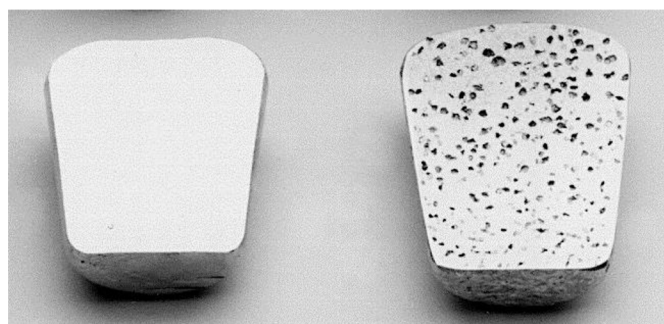
DI: >12 %

6-8 %

1 %

Obrázek 31: Vzorky a jejich DI [31]

Index hustoty je komplexní ukazatel sklonu slitiny ke vzniku bublin. Zahrnuje vliv obsahu plynu i oxidických vměstků, protože vznik bublin vždy úzce souvisí s obsahem krystalizačních zárodků. Pro názornost srovnání dvou vzorků, kdy první tuhnul při atmosférickém a druhý při sníženém tlaku je na obrázku (Obrázek 32).



$d_{\text{Atm}} = 2,62 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

$d_{80\text{mbar}} = 2,35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Obrázek 32: Srovnání řezů vzorků proměření indexu hustoty [32]

5 ŘÍZENÉ NAPLYNĚNÍ TAVENINY A POUŽITÍ PŘÍPRAVKU PROBAT FLUSS MIKRO 100 [16], [33]

Snížení objemu porezity u hliníkových odlitků pomocí řízeného naplynění taveniny je důsledek již výše zmíněného problému. Tavenina dokonaleji odplyněná stahuje více, je tedy potřeba ji více nálitkovat než taveninu odplyněnou méně, kdy pomocí plynu dochází ke kompenzaci úbytku materiálu. Na odlitku však mohou být místa, která se nedají dostatečně nálitkovat anebo se nedají nálitkovat vůbec. V takovém případě dochází bez řízeného naplynění ke vzniku objemového deficitu – staženin, ať už vnitřních nebo vnějších. Pokud je tavenina nedokonale odplyněná, dochází ke vzniku plynových pórů. Tyto póry budou ovlivněny stupněm naplynění taveniny, množstvím a typem vměstků, dobou tuhnutí odlitku atd. V důsledku jejich vyloučení, dochází k částečnému kompenzování úbytku materiálu, ale velikost těchto pórů bývá obvyklé příliš velká (i několik desetin mm) a jejich výskyt je zejména na obráběných plochách nepřijatelný.

Hlavním principem řízeného naplynění je kompenzace úbytku materiálu v důsledku stahování kovu pomocí jemných samostatných dutin. Jde tedy o vnášení velkého množství nukleačních zárodků do taveniny, které je spojené s dostatečným obsahem vodíku v tavenině nebo jeho zvýšením, který do těchto bublin bude difundovat. Jedná se o mikrobubliny, které mají koeficient kulatosti blízký 1 a vzájemně nejsou propojené. Tyto dutiny pak kompenzují částečně nebo i úplně úbytek kovu. Nedojde ke změně mechanických vlastností, ale odlitek nebude obsahovat staženiny a bude dosahovat dobré těsnosti.

Ke vzniku mikrobublin slouží jako zárodky nanostrukturální oxidy hliníku, které jsou obsaženy v přípravku Probat Fluss Mikro 100 od firmy Schaefer. Pro zvýšení obsahu vodíku se používají soli nebo tablety hydridu titanu (*Hydrosal 40* nebo *Begaser T 200*), ale také se může využít formovacího plynu, který se skládá z vodíku a dusíku.

5.1 Přípravek Probat Fluss Mikro 100 [16], [33]

Jde o předslitinu ve formě tyčí, která se vyrábí pomocí rozprašování tekutého hliníku do turbulentního proudu vzduchu. Kapky kovu se obalí do nanometrové vrstvy oxidů a vzniká prášek. Tento prášek se dále tvářením deformuje a zhutňuje do tvaru kompaktních tyčí, které jsou v této podobě dodávány zákazníkovi, viz obrázek (*Obrázek 33*).

V doporučeném dávkování od výrobce (0,05 – 0,4 % hmotnosti taveniny) se tyče aplikují přímo do taveniny. Dojde k jejich roztavení a homogenizaci taveniny. Důsledkem reakce předslitiny s roztaveným kovem vzniká na hladině jemný šum, který je třeba vmíchat do taveniny. Takto upravená tavenina by měla bez vnášení nových zárodků vydržet až 3 hodiny.

Vnesené nanooxidy slouží jako hetoregenní krystalizační zárodky pro vznik mikrobublin. Pokud se v tavenině nachází velké množství krystalizačních zárodků dojde k vylučování

bublin v celém objemu odlitku. Velikost bublin je limitována obsahem vodíku, který se z okolí zárodku stihne vyčerpat dřív, než má bublina nepřipustnou velikost.



Obrázek 33: Přípravek Probat Fluss Mikro 100 [34]

V případě přípravku Probat Fluss Mikro 100 se nejedná o naplyňování taveniny, ale pouze vnášení vhodných krystalizačních zárodků ke vzniku jemných bublin. Při měření indexu hustoty přesto dojde k malému zvýšení hodnoty po aplikaci přípravku. Je to v důsledku dokonalejšího vyloučení z přesyceného roztoku vodíku z kovu. Nedoporučuje se, aby před aplikací přípravku byla tavenina dokonale odplyněna. Ideální fungování přípravku zajistí naplynění taveniny na hodnotu Dichte indexu kolem 4 %, v případě odplynění pod 1 % nedojde téměř k žádnému výsledku pro příliš malý obsah vodíku.

Další možnou variantou řešení řízeného naplynění taveniny je použití přípravku Probat Fluss Mikro 100 do odplyněné taveniny a následné naplynění pomocí naplyňovacího přípravku Probat Fluss Begaser T 200.

5.1.1 Výhody přípravku Probat Fluss Mikro 100 [35]

K největším výhodám přípravku řadí výrobce zabránění tvorbě staženin při tlakovém a gravitačním lití. Dalšími výhodami jsou krátké reakční časy, zvyšování Dichte indexu bez zvyšování obsahu nečistot v kovu a také okamžité rozpouštění se v kovu beze zbytků.

5.2 Přípravek Probat Fluss Begaser T 200 [36], [37]

Tento přípravek, taktéž od firmy Schaefer, slouží pro naplynění hliníkové taveniny. Je vhodný pro slitiny lité do písku, gravitační lití a nízkotlaké lití. Pomocí něj je zvyšován obsah vodíku v tavenině a tím i index hustoty. Může být ve formě tablet nebo solí, kdy soli mají výhodu v jejich přesném a jednoduchém dávkování a jsou tak ekonomičtější variantou.

Doporučené dávkování od výrobce jsou 1 – 2 tablety na 100 kg taveniny v závislosti na požadavcích. Tableta nebo sůl je umístěna na hladinu taveniny a ponorným zvonem ponořena na dno kelímku, dochází k bouřlivé reakci, kdy produktem je šum na hladině, který spolu se struskou je odstraněn ven z kelímku.

Tablety i soli jsou hygroskopické, je nutné dodržet skladování v suchých prostorech. Jejich minimální doba trvanlivosti při správném skladování je dle výrobce 6 měsíců.

5.3 Zvyšování obsahu vodíku pomocí formovacího plynu [38]

Řízené naplynění formovacím plynem probíhá na rotorovém zařízení (FDU) stejně jako odplynění. Jako formovací plyn se používá směs vodík – dusík nebo vodík – argon v různém poměru.

Nejdříve dochází k důkladnému odplynění taveniny na co nejnižší hodnotu Dichte indexu a následnému naplynění taveniny. Proces musí probíhat klidně, aby nedocházelo k přílišnému vlnění hladiny. Po ukončení naplyňování dojde ke stažení vzniklého stěru na hladině a odstranění z taveniny spolu se struskou.

6 PRAKTICKÁ ČÁST [39]

Experiment probíhal ve slévárně Kovolit Česká, spol. s r.o., která se již dlouhou řadu let specializuje na gravitační lití hliníku do pískových a kokilových forem. Vyrábí hlavně menší a středně velké odlitky, pro větší kusy kolem 200 kg se používá ruční formovna. Kolem 60 % výroby je vyváženo do zahraničí. V areálu slévárny se nachází i dřevomodelárna, což bylo s výhodou využito při zpracování diplomové práce v rámci realizace výroby vhodných modelových desek pro zkušební odlitek.

Pro testování byla vybrána slitina AlSi10Mg, která je nejběžněji používaná v Kovolitu Česká, spol. s r.o. Vsázku tvořily hliníkové housky a vlastní vrat slévárny. Vsázka se tavila v plynové kelímkové peci o objemu 700 kg a poté byla transportní pánví přepravena do udržovací elektrické odporové pece o objemu 200 kg. V tomto udržovacím kelímku probíhaly další operace s taveninou – rafinace, odplynění. Slitina nebyla očkovaná ani modifikována.

Tavenina byla vždy standardně upravena – rafinace pomocí přípravku Ecosal Al 1135, dávkování 120 g na 200 kg taveniny, odplynění dusíkem pomocí rotorového odplyňovacího zařízení značky Pyrotek po dobu 3 minut. Poté se do taveniny vložil přípravek Probat Fluss Mikro 100 v různé koncentraci (0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,4%), která byla vybrána na základě doporučeného množství uváděného výrobcem a následně množství naplyňovací soli – Probat Fluss Begaser T 200 (v prvních třech případech 100 g, v posledním 200 g). Vzorky pro měření DI byly odebírány vždy dvakrát, jako vzorek 1 a vzorek 2, z důvodu zpřesnění měření a pro snadnější odhalení špatně odebraného vzorku vykazujícího zkreslené výsledky.

6.1 Návrh zkušebního odlitku

Odlitek byl navržen tak, aby dostatečně ukazoval vliv různého množství přípravku Probat Fluss Mikro 100 na různé tloušťky odlitku. Bylo navrženo 6 zkušebních těles na jedné centrální vtokové soustavě. Zkušební vzorky byly vždy stejného tvaru – dva kvádry 60x30 mm na sobě, pootočené o 90°, aby byl zajištěn tepelný uzel ve středu odlitku. Výška kvádrů byla 5, 10, 15, 25 a 30 mm, což pokrývá 85 % tlouštěk odlitků veškeré výroby ve slévárně.

Byly navrženy tenké zářezy, aby nedocházelo k dosazování taveniny do odlitku z vtoku nebo z méně objemných těles. Zkušební vzorky byly uspořádány do hvězdice v takovém pořadí, aby byl v celém průřezu podobný vztlak na bentonitovou formu.

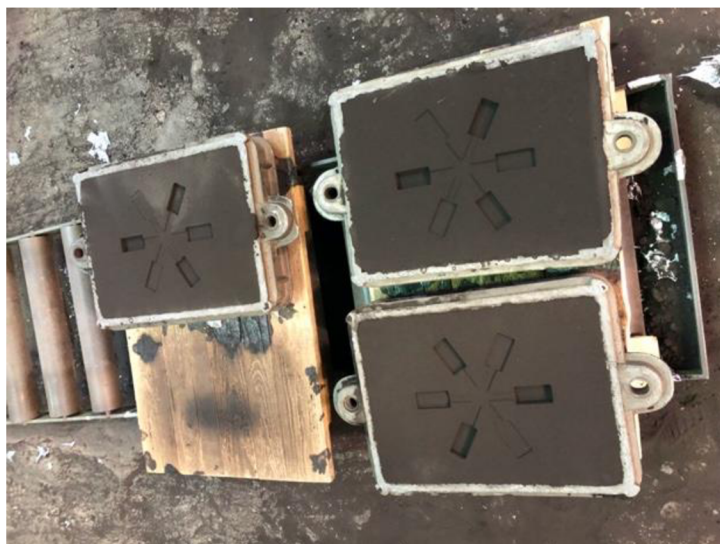
Modelové desky pro zkušební odlitek jsou na obrázku (Obrázek 34).



Obrázek 34: Modelové desky pro zkušební odlitek

6.2 Průběh odlévání vzorků

Formy byly odformovány na Foromatech F10 za použití technologie střešení s dolisováním. Tato varianta byla vybrána pro zaručení stejné tvrdosti všech bentonitových forem. Formovací směs byla připravena na průměrnou vlhkost směsi cca 3 % a spěchovatelnost cca 55 %. Dolní poloviny forem jsou vidět na obrázku (Obrázek 35) a složené formy na obrázku (Obrázek 36).



Obrázek 35: Dolní poloviny forem



Obrázek 36: Složené formy

Tavenina byla zpracovávána v 200kg elektrické odporové peci. Po přelití bylo aplikováno 120 g rafinační soli. Dále byla tavenina odplyněna dusíkem pomocí zařízení FDU (Foundry Degassing Unit) po dobu 3 minut. Teplota taveniny byla nastavena a průběžně kontrolována na 729 ± 5 °C. Po odplynění došlo k odlití prvního zkušební odlitku, aby byl vždy definován výchozí stav a také k odlití dvou vzorků pro měření hodnoty DI.

Poté byl do taveniny aplikovaný přípravek Probat Fluss Mikro 100, viz obrázek (Obrázek 37) v různém množství. Pro experiment bylo zvoleno 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 kg, po kterém následovalo 5min odstátí taveniny. Do taveniny bylo přidáno u prvních tří koncentrací 100 g u čtvrté 200 g naplyňovací soli Probat Fluss Begaser T 200. Na obrázku (Obrázek 38) je vidět samotná aplikace, kdy po jejím použití následovala 3min bouřlivá reakce a 10min odstátí. Následovalo odlití dvou zkušebních odlitků a dvou vzorků pro měření hodnoty DI.

Pro ověření účinnosti samotné naplyňovací soli Probat Fluss Begaser T 200 proběhla zkouška, při které 100 g soli způsobilo nárůst DI z 0,3 % na 13,22 %.



Obrázek 37: Aplikace Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 38: Aplikace Probat Fluss Begaser T 200

6.3 Příprava a měření vzorků

Po vytlučení odlitku z formy, viz obrázek (Obrázek 39), byla odstraněna vtoková soustava, vzorky byly otryskány a lehce přebroušeny pro odstranění přetoků a dalších nečistot.



Obrázek 39: Zkušební odlitky po vytlučení z formy

Ihned po vytlučení byly okem viditelné vnější staženiny, které se s tloušťkou zkušební vzorku zvětšovaly. Tyto staženiny byly analyzovány pomocí jemného zirkonového písku, kdy přes naměřenou hmotnost a známou hustotu písku byl stanoven objem staženiny. Dále byly vzorky rozřezány přes střed a pomocí skeneru bylo možné vidět soustřednou staženinu a její návaznost na vnitřní mikroporozitu. Vzorky musely být broušeny pro další možnost vyhodnocení na stereolupě, kde byl vzorek vyfocen jak ve své středové části, která se více podobá nálitku, díky svému tepelnému uzlu, tak i okrajové části, která by měla mít vyšší vypovídající charakter o jakosti odlitku.

Celkem bylo analyzováno 8 odlitků. Ty tvořily 4 sady různých koncentrací přípravku Probat Fluss Mikro 100 a vždy odlitek výchozího stavu. Každá sada měla 6 zkušebních vzorků s různou tloušťkou. Měření tedy proběhlo na 48 vzorcích.

6.3.1 Hodnota Dichte indexu

Vzorky pro měření hodnoty Dichte indexu byly odlity současně při odlévání zkušebních odlitků. V blízké dostupnosti od peci byl umístěn přístroj typ Martech VTCM 0017, obrázek (Obrázek 40). Byly odlity vždy 2 vzorky. Poté byly vzorky váženy na váze Nagata Fath-06S a DI byl vypočten pomocí počítačového programu Martech DI.



Obrázek 40: Měření Dichte indexu při experimentu

Pro koncentraci 0,05 % bylo nutné aplikovat 0,1 kg přípravku Probat Fluss Mikro 100 a 100 g naplyňovací soli. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 1).

Tabulka 1: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,05%

Definovaný stav	Hodnota Dichte Indexu [%]
Výchozí stav vzorek 1	0,33
Výchozí stav vzorek 2	0,55
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 1	13,00
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 2	12,68

Pro koncentraci 0,1 % bylo nutné aplikovat 0,2 kg přípravku Probrat Fluss Mikro 100 a 100 g naplyňovací soli. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 2*).

Tabulka 2: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,1%

Definovaný stav	Hodnota Dichte Indexu [%]
Výchozí stav vzorek 1	0,28
Výchozí stav vzorek 2	0,62
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 1	16,57
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 2	15,92

Pro koncentraci 0,2 % bylo nutné aplikovat 0,4 kg přípravku Probrat Fluss Mikro 100 a 100 g naplyňovací soli. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 3*).

Tabulka 3: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,2%

Definovaný stav	Hodnota Dichte Indexu [%]
Výchozí stav vzorek 1	1,04
Výchozí stav vzorek 2	0,63
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 1	16,75
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 2	15,33

Pro koncentraci 0,4 % bylo nutné aplikovat 0,8 kg přípravku Probrat Fluss Mikro 100 a množství naplyňovací soli bylo zvýšeno na 200 g. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 4*).

Tabulka 4: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,4%

Definovaný stav	Hodnota Dichte Indexu [%]
Výchozí stav vzorek 1	0,67
Výchozí stav vzorek 2	0,68
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 1	20,96
Po aplikaci Mikro 100 a naplyňovací soli vzorek 2	18,05

6.3.2 Objem soustředné staženiny

Na připravených vzorcích se měřil objem povrchové staženiny vytvořené v důsledku tuhnutí odlitku. Pro měření byla zvolena metoda použití zirkonového písku, který měl hustotu $2,79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a zrnitost $0,23 \pm 0,06 \text{ mm}$. Ten byl nasypán do dutiny vnější staženiny a jeho hmotnost byla zvážena. Výpočtem byl získán objem staženiny. Na obrázcích (*Obrázek 41*, *Obrázek 42* a *Obrázek 43*, *Obrázek 44*) je okem pozorovatelný rozdíl v objemu vnějších staženin. Pro porovnání koncentrace 0,1 % Probrat Fluss Mikro 100 a poté 0,4 % přípravku, kde však bylo i dvojnásobné množství naplyňovací soli. Veškeré hodnoty objemu staženin jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 5*).



Obrázek 41: Zkušební vzorky výchozí stav pro koncentraci 0,1 % Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 42: Zkušební vzorky koncentrace 0,1 % Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 43: Zkušební vzorky výchozí stav pro koncentraci 0,4 % Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 44: Zkušební vzorky koncentrace 0,4 % Probat Fluss Mikro 100

Tabulka 5: Objem soustředných stažení

	Číslo vzorku	Objem staženiny [%]
Výchozí stav pro koncentraci 0,05 %	1	0,00
	2	1,13
	3	1,31
	4	1,13
	5	1,17
	6	1,20
Koncentrace 0,05 %	1	0,00
	2	1,27
	3	1,12
	4	1,11
	5	1,03
	6	1,03
Výchozí stav pro koncentraci 0,1 %	1	0,00
	2	2,09
	3	1,50
	4	1,37
	5	1,54
	6	1,53
Koncentrace 0,1 %	1	0,00
	2	0,72
	3	0,53
	4	0,58
	5	0,72
	6	0,68
Výchozí stav pro koncentraci 0,2 %	1	0,00
	2	1,95
	3	1,64
	4	1,63
	5	1,58
	6	1,62
Koncentrace 0,2 %	1	0,00
	2	0,84
	3	0,66
	4	0,83
	5	0,80
	6	0,86

Výchozí stav pro koncentraci 0,4 %	1	0,00
	2	1,51
	3	1,19
	4	1,41
	5	1,30
	6	1,30
Koncentrace 0,4 %	1	0,00
	2	0,74
	3	0,40
	4	0,46
	5	0,39
	6	0,40

Pro navrhnuté zkušební vzorky byl vypočítán jejich modul, viz tabulka (*Tabulka 6*).

Tabulka 6: Označení a specifikace zkušebních vzorků

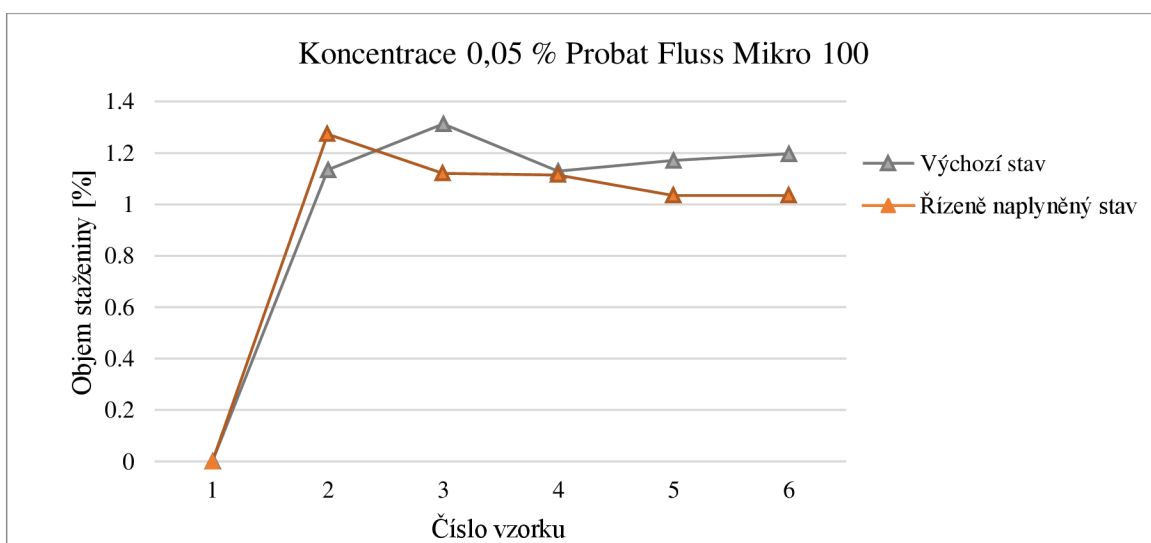
Označení vzorku	Tloušťka vzorku	Objem vzorku	Plocha vzorku	Modul vzorku
1	0,5 cm	9 cm ³	63 cm ²	0,14 cm
2	1,0 cm	18 cm ³	72 cm ²	0,25 cm
3	1,5 cm	54 cm ³	81 cm ²	0,67 cm
4	2,0 cm	72 cm ³	90 cm ²	0,80 cm
5	2,5 cm	90 cm ³	99 cm ²	0,91 cm
6	3,0 cm	108 cm ³	108 cm ²	1,00 cm

Pro měření musel být vynechán vždy vzorek č. 1 s tloušťkou 5 mm, protože nevykazoval staženinu, která by mohla být takto analyzována. Její velikost byla téměř nulová a naměřená hodnota by tak byla irelevantní. Dutina zkušebního vzorku vysypána zirkonovým pískem je na obrázku (*Obrázek 45*).

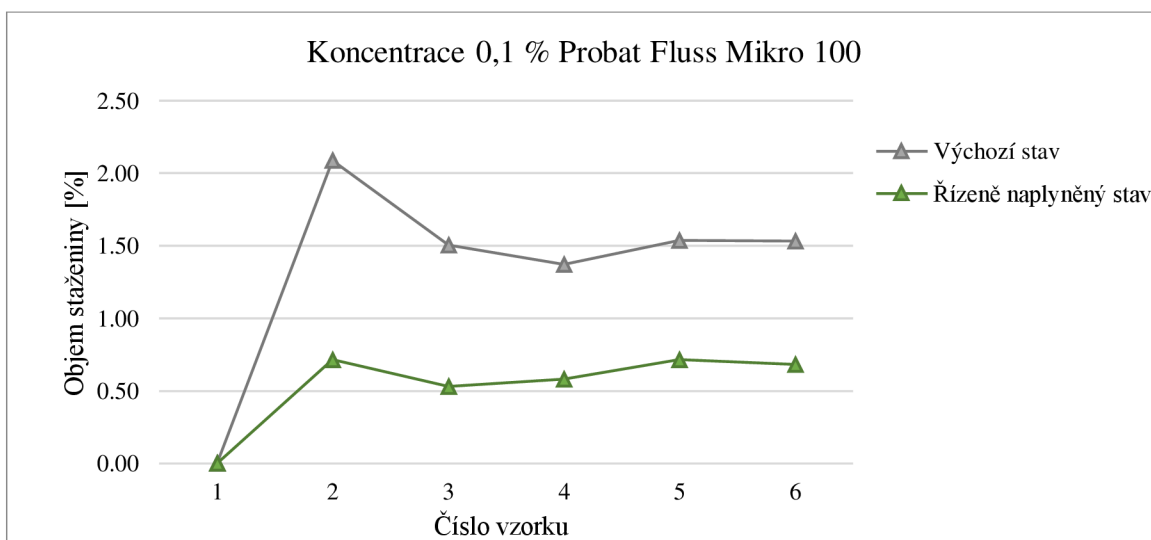


Obrázek 45: Měření objemu vnější staženiny

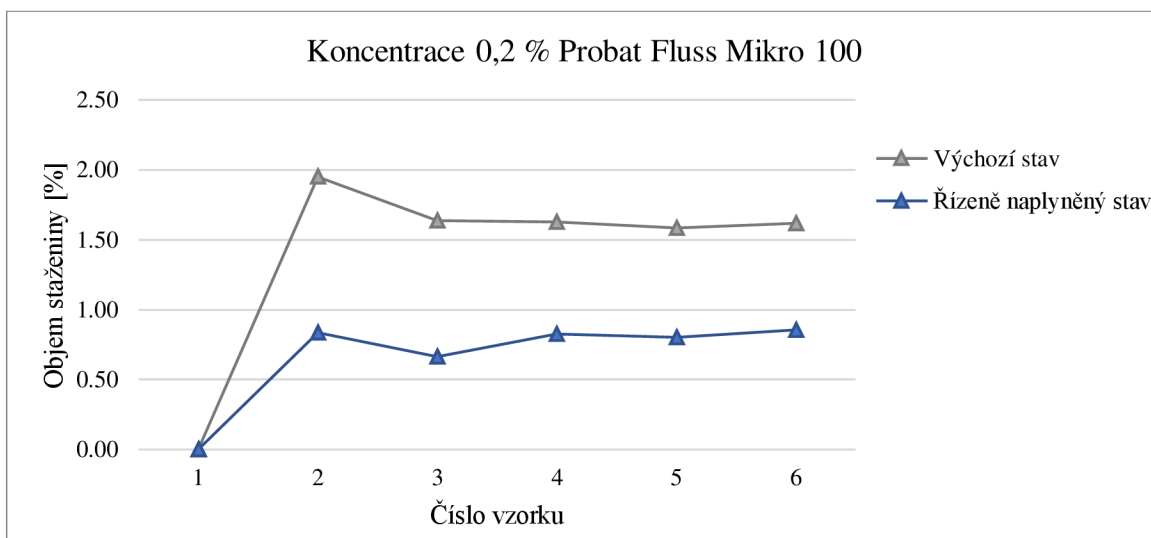
Všechny koncentrace vykazovaly podobný charakter. Na obrázcích (*Obrázek 46, Obrázek 47, Obrázek 48 a Obrázek 49*) jsou znázorněny křivky pro dané koncentrace vždy výchozí stav a řízeně naplyněný stav. V případě koncentrace 0,05 % přípravku Probat Fluss Mikro 100 je rozdíl mezi křivkami poměrně malý, znamená to, že tato koncentrace nepůsobí na soustřednou staženinu značným vlivem. I u této koncentrace však v případě tlustějších vzorků č. 5 a č. 6 dochází ke zmenšení soustředné staženiny o 0,1 – 0,2 %. V případech koncentrací 0,1, 0,2 a 0,4 % již jsou rozdíly mezi křivkami markantní a potlačení soustředné staženiny je naprosto jednoznačné. U koncentrací 0,1 % a 0,2 % dochází ke zmenšení soustředných staženin o 50 % a u koncentrace 0,4 % až o 70 %, což může být zapříčiněno i dvojnásobným naplyněním taveniny.



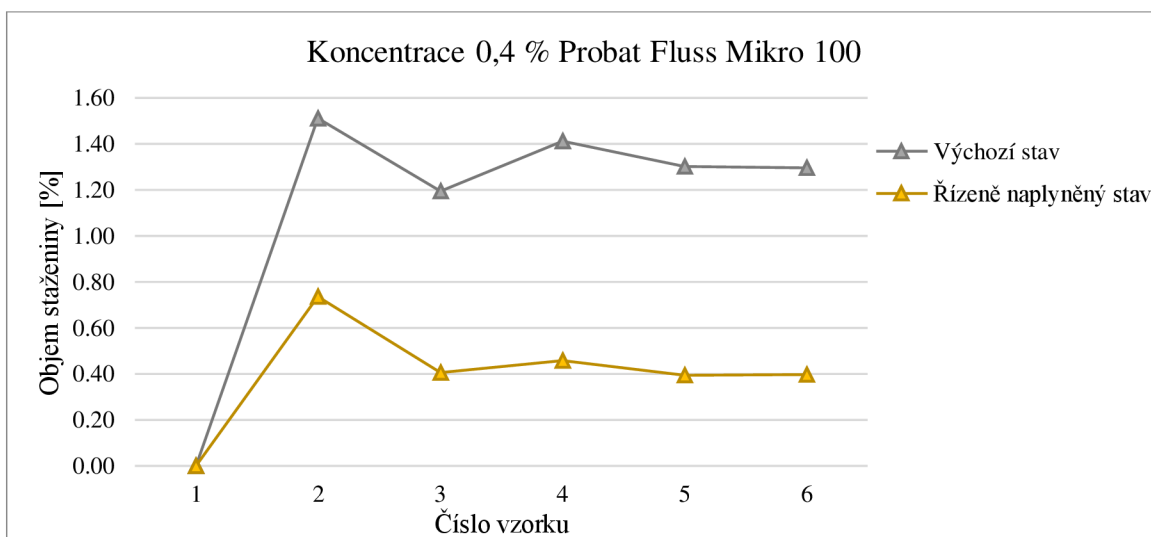
Obrázek 46: Soustředná staženina koncentrace 0,05 % Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 47: Soustředná staženina koncentrace 0,1 % Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 48: Soustředná staženina koncentrace 0,2 % Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 49: Soustředná staženina koncentrace 0,4 % Probat Fluss Mikro 100

6.3.3 Vnitřní porezita

Dalším krokem bylo rozřezání vzorků ve středu soustředné staženiny, aby bylo možné pozorovat řediny vzniklé pod touto staženinou. Takto rozřezané vzorky se musely brousit na brusných papírech o zrnitosti 223 a poté 800 a 1200.

Vzorky byly naskenovány skenerem a byl pozorovatelný rozdíl mezi vzorky odlitými bez Probat Fluss Mikro 100, kde byla větší vnější staženina a vnitřní porezita se nacházela zejména ve středu vzorku a vzorky s použitím přípravku Probat Fluss Mikro 100, které naopak vykazovaly menší vnější staženinu a vnitřní porezitu po celém objemu odlitku, nejen v jeho středu. Pro srovnání na obrázku (Obrázek 50) je vidět vzorek č. 4 bez použití přípravku Probat Fluss Mikro 100 a na obrázku (Obrázek 51) ten stejný vzorek za použití přípravku v koncentraci 0,05 %. Na obrázcích (Obrázek 52 a Obrázek 53) stejné srovnání vzorku č. 3 a koncentrací 0,2 %.



Obrázek 50: Vzorek č. 4 bez přípravku Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 51: Vzorek č. 4 s koncentrací 0,05 % Probat Fluss Mikro 100



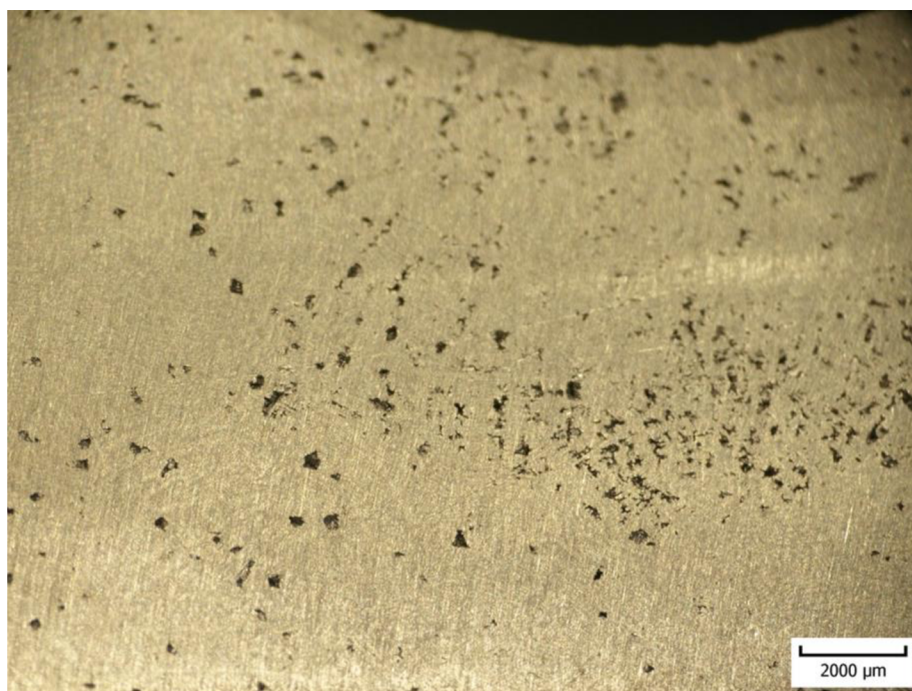
Obrázek 52: Vzorek č. 3 bez přípravku Probat Fluss Mikro 100



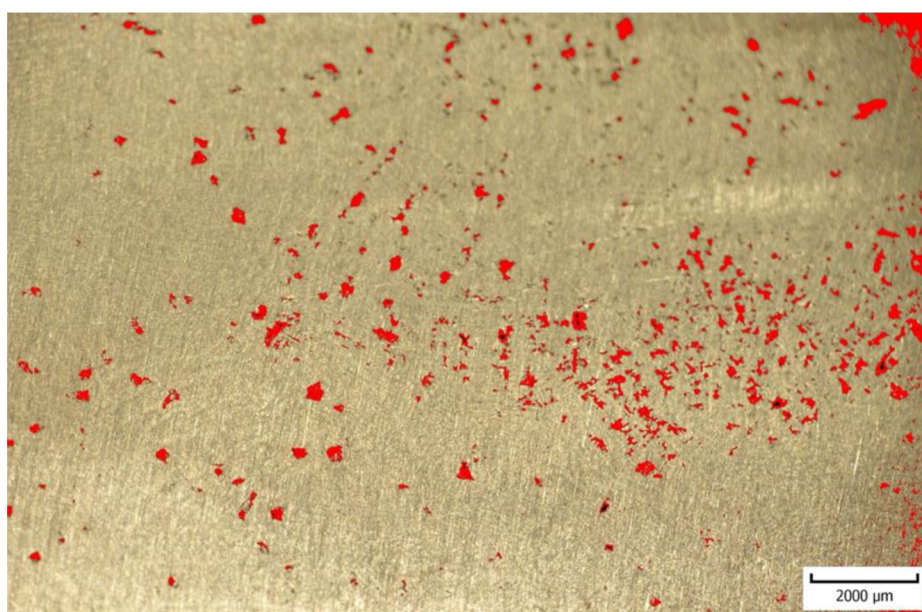
Obrázek 53: Vzorek č. 3 s koncentrací 0,2 % Probat Fluss Mikro 100

Vzorky byly dále analyzovány na stereoskopickém mikroskopu, kde došlo k vyfocení středové oblasti vzorku a okrajové části vzorku. Pro vzorky č. 1 a č. 2 se použilo zvětšení 50x,

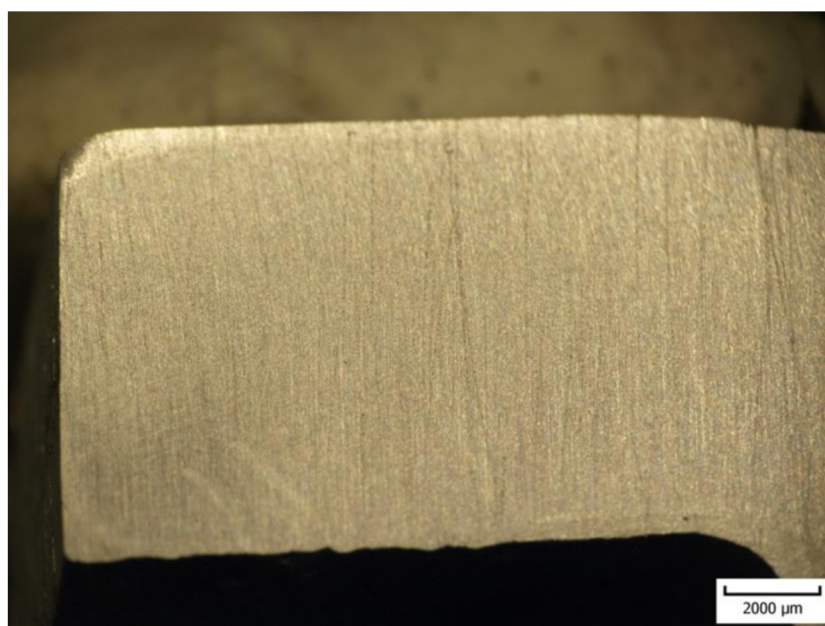
pro ostatní 20x. Pomocí počítačového programu QuickPhoto Industrial 2.2 byla provedena obrazová analýza, která vyhodnocovala poměr plochy pórů ve vzorku, viz obrázky (Obrázek 54 a Obrázek 55). Pro vzorky bez použití přípravku Probat Fluss Mikro 100 vždy platilo, že jejich okrajová část neobsahovala žádné měřitelné póry, viz obrázek (Obrázek 56), ale obsahovaly větší staženiny ve středové části. Vzorky s různou koncentrací přípravku naopak vykazovaly jemné póry v celém jejich objemu, viz obrázek (Obrázek 57).



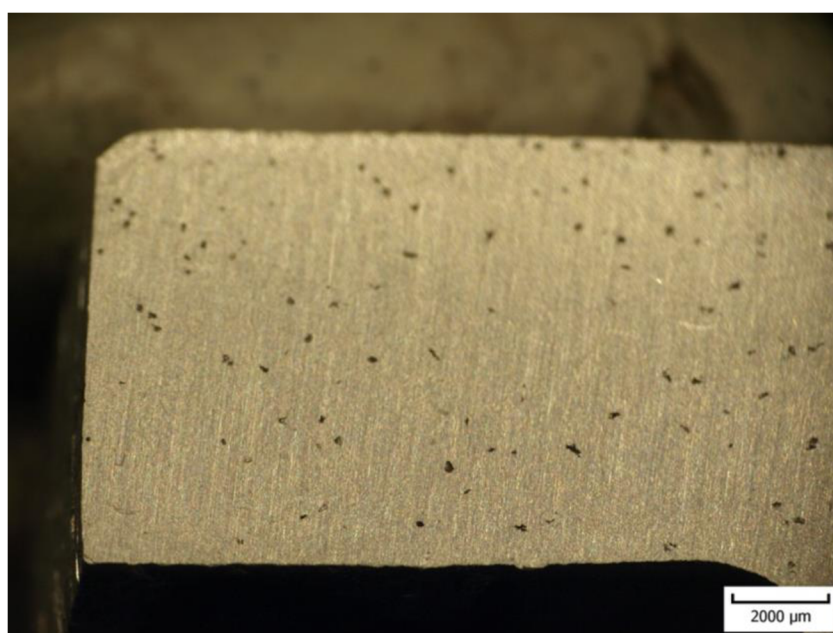
Obrázek 54: Vzorek č. 3 s 0,4 % Probat Fluss Mikro 100 středová část



Obrázek 55: Vzorek č. 3 s 0,4 % Probat Fluss Mikro 100 s obrazovou analýzou



Obrázek 56: Okrajová část vzorku č. 4 bez použití Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 57: Okrajová část vzorku č. 4 s použitím 0,1 % Probat Fluss Mikro 100

Objemy pórů se s rostoucí floušfkou u všech vzorků zvětšovaly a u vzorků s aplikovaným přípravkem Probat Fluss Mikro 100 také rostly objemy pórů v jejich okrajové části. Výsledky obrazové analýzy jsou zaznamenány v tabulce (*Tabulka 7*).

Tabulka 7: Výsledky obrazové analýzy

	Číslo vzorku	Objem pórů- středová část [%]	Objem pórů- okrajová část [%]
Výchozí stav pro koncentraci 0,05 %	1	2,3	0,0
	2	10,6	0,0
	3	0,4	0,0

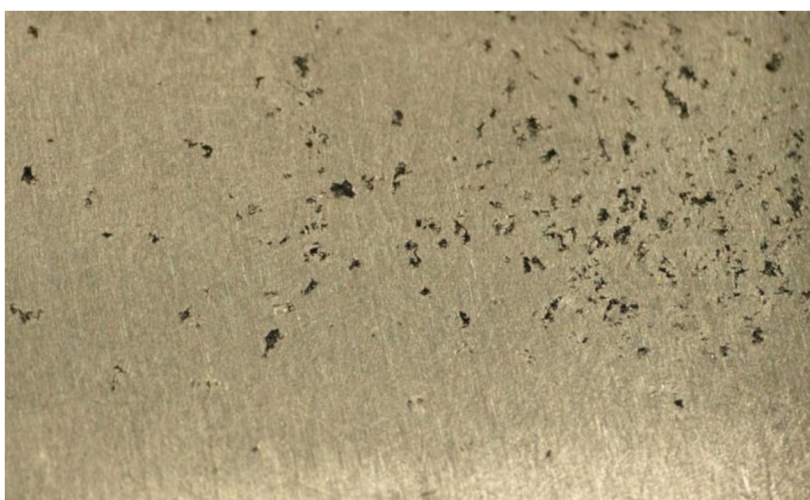
	4	1,8	0,0
	5	2,4	0,0
	6	4,0	0,0
Koncentrace 0,05 %	1	1,4	0,0
	2	3,6	0,0
	3	2,3	1,4
	4	4,4	0,2
	5	1,6	0,6
	6	14,9	1,1
Výchozí stav pro koncentraci 0,1 %	1	6,5	0,0
	2	7,0	0,0
	3	5,2	0,0
	4	4,3	0,0
	5	4,5	0,0
	6	8,1	0,0
Koncentrace 0,1 %	1	0,3	0,0
	2	2,6	0,0
	3	3,3	1,1
	4	4,9	2,0
	5	13,1	0,9
	6	13,2	1,8
Výchozí stav pro koncentraci 0,2 %	1	0,3	0,0
	2	3,2	0,0
	3	1,2	0,0
	4	1,3	0,0
	5	1,3	0,0
	6	1,9	0,0
Koncentrace 0,2 %	1	2,4	0,9
	2	2,8	1,3
	3	3,8	0,9
	4	3,3	1,3
	5	2,7	1,8
	6	1,2	0,3
Výchozí stav pro koncentraci 0,4 %	1	1,0	0,0
	2	6,7	0,2
	3	5,3	0,0
	4	4,1	0,0
	5	8,2	0,0

	6	11,7	0,0
Koncentrace 0,4 %	1	3,3	1,0
	2	2,0	1,6
	3	3,6	1,2
	4	3,6	1,9
	5	7,6	2,9
	6	8,4	1,5

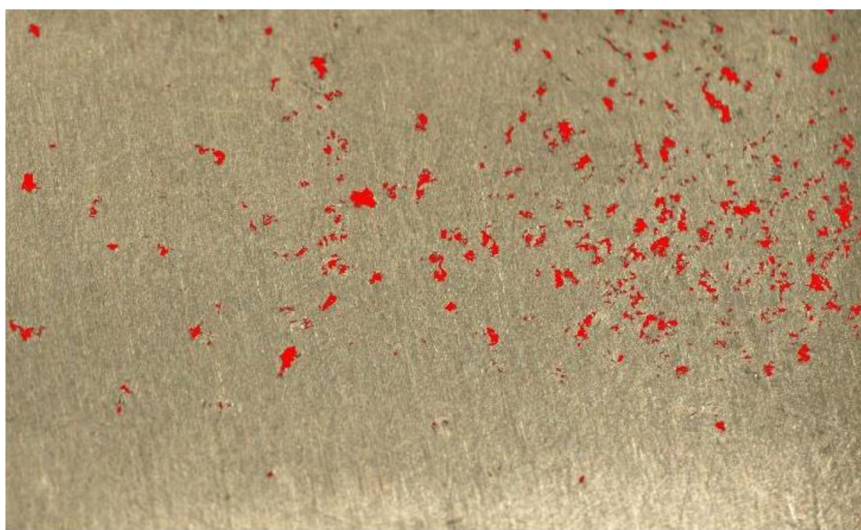
Další příklad vzhledu středové části vzorku č. 3 s koncentrací přípravku Probat Fluss Mikro 100 0,05 % je vidět na obrázku (Obrázek 58). Pro obrazovou analýzu musel být obrázek oříznut, viz obrázek (Obrázek 59). Na obrázku (Obrázek 60) jde vidět obrazová analýza toho vzorku.



Obrázek 58: Středová část vzorku č. 3 pro koncentraci 0,05 % Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 59: Výběr středové části vzorku č. 3 s 0,05 % Probat Fluss Mikro 100 pro obrazovou analýzu



Obrázek 60: Středová část vzorku č. 3 s 0,05 % Probat Fluss Mikro 100 a obrazovou analýzou

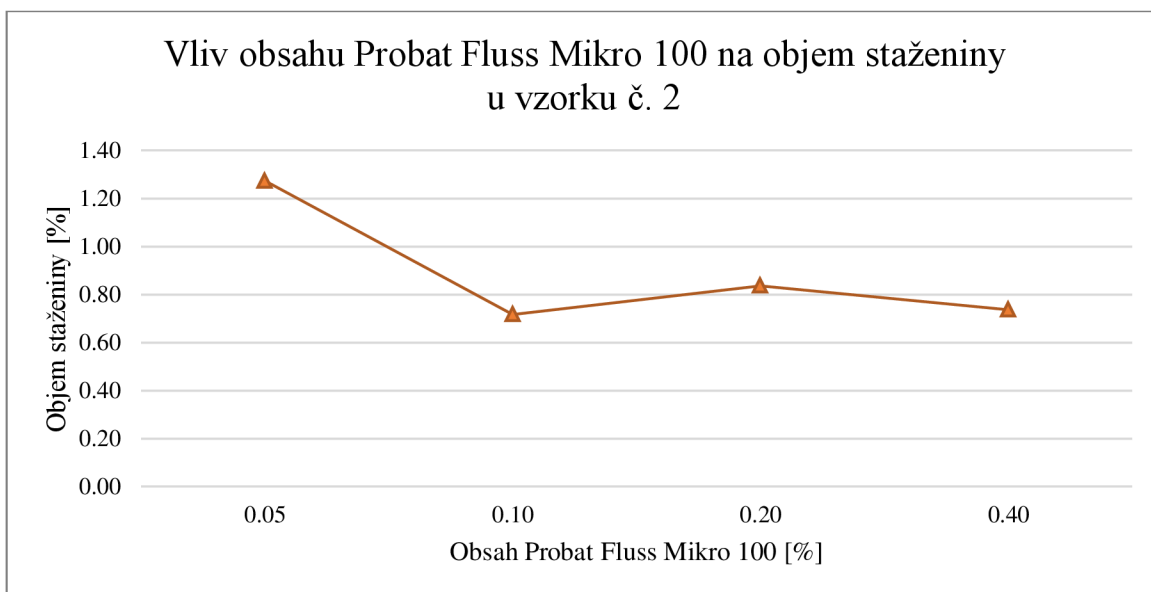
6.4 Výsledky

Experiment ukázal závislost pórovitosti odlitku na obsahu přípravku Probat Fluss Mikro 100, kdy se zvyšujícím se obsahem přípravku, dochází ke zmenšení vnější soustředné staženiny, a naopak ke zvyšující se vnitřní porezitě. U menších vzorků – tzn. vzorek č. 1 a č. 2 nebyly výsledky a závislosti tak jednoznačné jako pak u větších vzorků č. 3, č. 4, č. 5 a č. 6. Také výsledky u nižších koncentrací přípravku (např. 0,05 %) byly méně průkazné než u vyšších koncentrací (např. 0,4 %, kde však bylo aplikováno dvojnásobné naplynění).

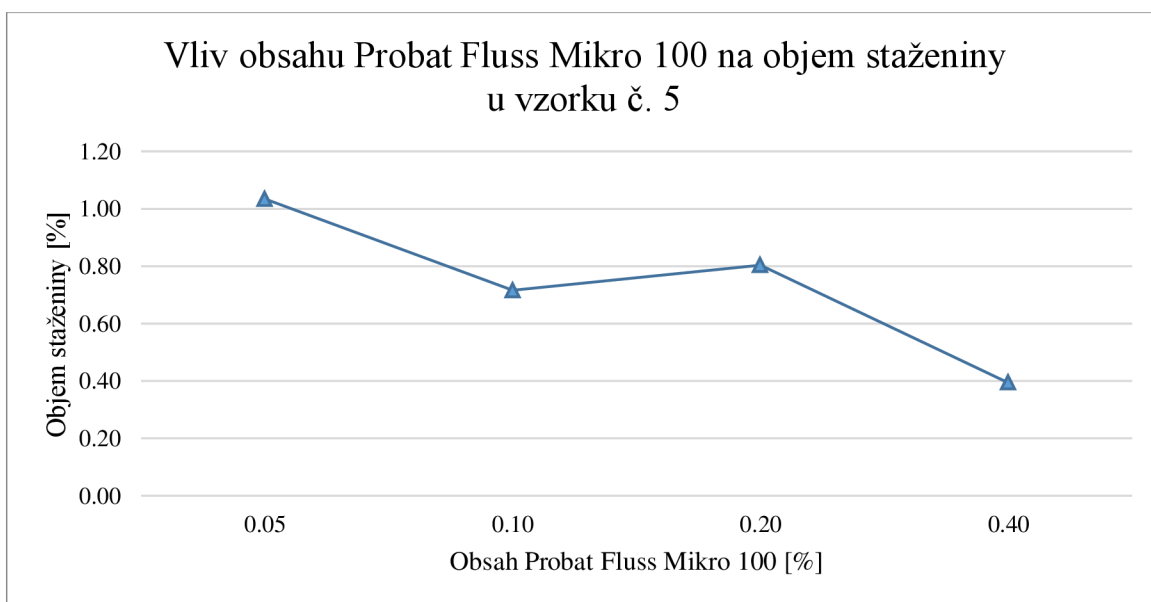
Hodnota DI byla pro koncentraci 0,05 % přípravku nejnižší – 12,8 %, pro koncentrace 0,1 % a 0,2 % bylo hodnota výsledného stupně naplynění srovnatelná – 16,2 % a 16,0 %, ale pro koncentraci 0,4 % při dvojnásobném naplynění byla hodnota DI 19,5 %.

Objem soustředné staženiny se při koncentraci 0,05 % přípravku pohyboval lehce přes 1 % objemu vzorku. U koncentrací 0,1 % a 0,2 % přípravku byly výsledky opět hodně podobné. Koncentrace 0,1 % ale dosáhla nižších objemů soustředných staženin, které se pohybovaly v rozmezí 0,53 – 0,72 %, než koncentrace 0,2 %, kde bylo rozmezí objemu staženin 0,66 – 0,86 %. Poslední koncentrace 0,4 % přípravku s dvojnásobným naplynění dosáhla nejmenších objemů staženin a to 0,39 – 0,74 % objemu vzorku.

Obrázky (Obrázek 61 a Obrázek 62) znázorňují závislost obsahu přípravku Probat Fluss Mikro 100 na velikosti soustředné staženiny u zkušební vzorku č. 2 a č.5, kdy vzorek č. 2 reprezentuje závislost tenkostěnných odlitků a vzorek č. 5 závislost silnostěnných odlitků.

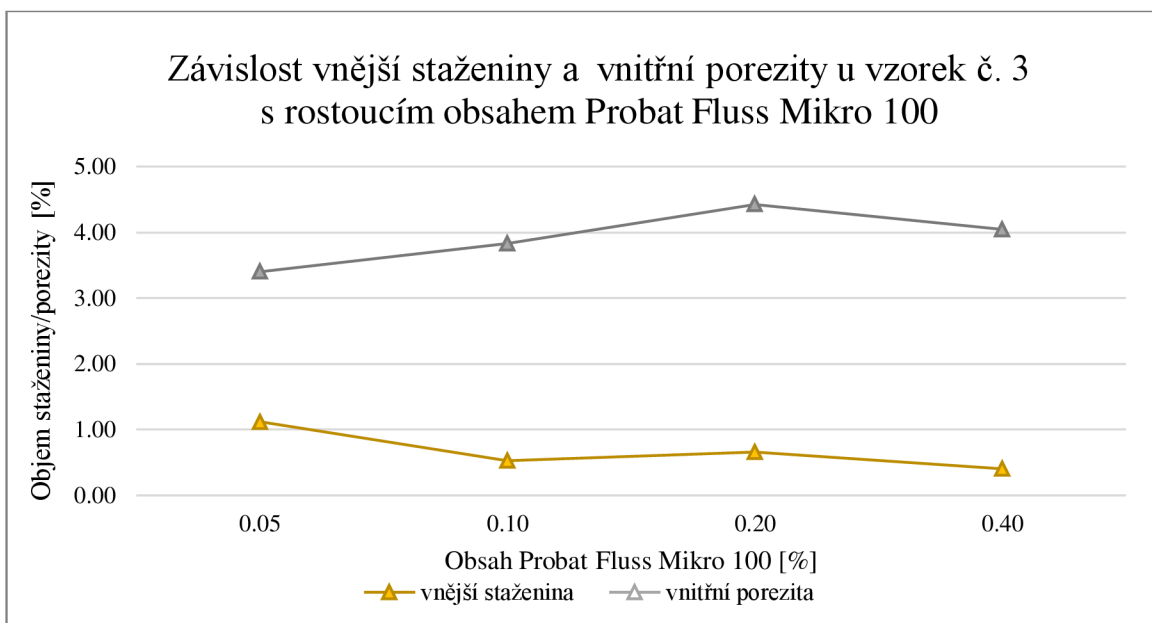


Obrázek 61: Vliv obsahu Probat Fluss Mikro 100 na objem staženiny u vzorku č. 2

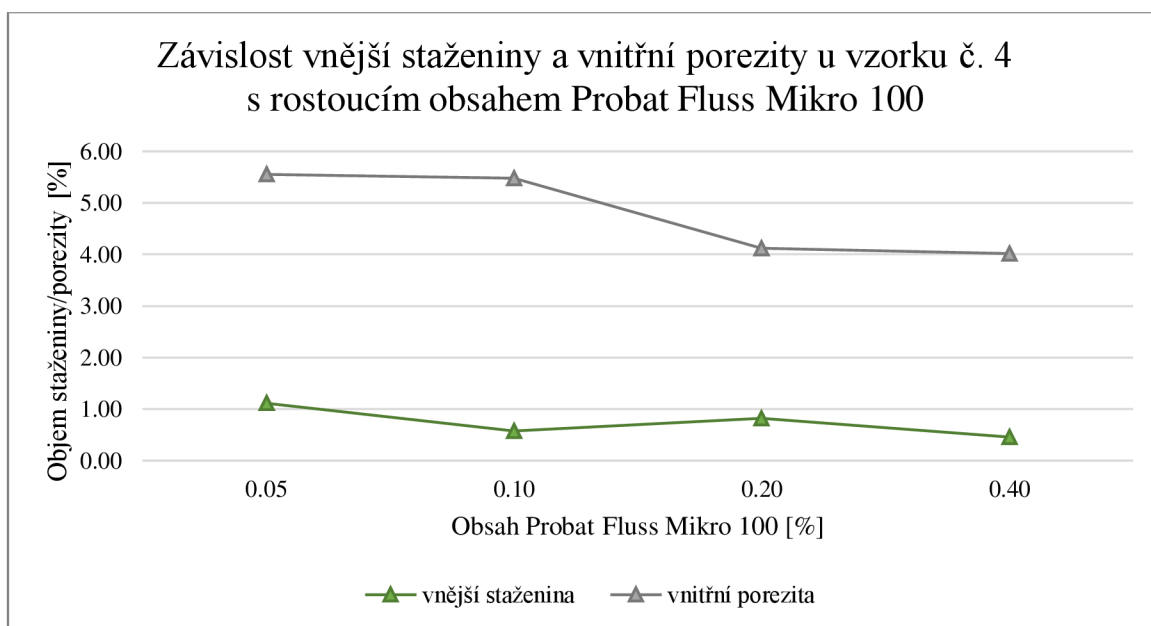


Obrázek 62: Vliv obsahu Probat Fluss Mikro 100 na objem staženiny u vzorku č. 5

Dalším pozorovaným jevem byla rostoucí vnitřní poretita v závislosti na obsahu přípravku Probat Fluss Mikro 100 a zároveň zmenšující se vnější soustředná staženina. Jak jde vidět na obrázcích (Obrázek 63 a Obrázek 64), kdy byly vybrány vzorky č. 3 a č. 4. Dochází ke kompenzaci úbytku kovu plynovými dutinami.



Obrázek 63: Závislost vnější staženiny a vnitřní porezity u vzorku č. 3 s rostoucím obsahem Probat Fluss Mikro 100



Obrázek 64: Závislost vnější staženiny a vnitřní porezity u vzorku č. 4 s rostoucím obsahem Probat Fluss Mikro 100

ZÁVĚR

Hliníkové odlitky a jejich rostoucí požadavky na kvalitu jsou a budou aktuálním tématem současného slévárenství. Řízené naplynění dává možnost slévárnám vyrábět odlitky s vysokou vnitřní kvalitou, které by bez použití speciálních přípravků jen těžko vyrobily.

V diplomové práci je v první kapitole rozebrána problematika plynů v hliníkové tavenině, kdy se zejména zaměřuje na vodík. Jsou zmíněny možné zdroje vodíku, jeho rozpustnost v hliníkové tavenině a popsány mechanismy vzniku plynových dutin. Druhá kapitola pojednává o nejčastějších vadách u hliníkových odlitků, jejichž příčinou často bývají plyny. Jedná se o bubliny, staženiny a řediny, obecně nazývané porezita. Definuje jejich tvar, výskyt, nejčastější příčiny vzniku a možné způsoby odstranění těchto vad. Také je v této kapitole rozebrána morfologie pórů a její vliv na mechanické vlastnosti odlitku.

Třetí kapitola shrnuje možnosti odplynění taveniny, kdy nejrozšířenější metodou je probublávání aktivním či neutrálním plynem, ale také může být tavenina vakuována nebo mohou být použity speciální přípravky.

Čtvrtá kapitola obsahuje přehled metod pro stanovování obsahu vodíku v hliníkové tavenině. Rozděluje metody do tří skupin na analytické, podle Sievertsova zákona a indikační metody. Kdy nejrozšířenější metodou díky svému relativně rychlému vyhodnocení a požadované přesnosti je metoda měření Dichte indexu, která funguje na základě měření rozdílné hustoty vzorků.

Pátá kapitola shrnuje poznatky k řízenému naplynění, které jsou v současné chvíli dostupné. Hlavním principem řízeného naplynění je kompenzace úbytku materiálu v důsledku stahování kovu pomocí jemných samostatných dutin. Jde tedy o vnášení velkého množství nukleačních zárodků bublin do taveniny, které je spojené s dostatečným obsahem vodíku v tavenině nebo jeho zvýšením, který tyto bubliny bude vytvářet.

Veškeré tyto teoretické vědomosti byly ověřeny na navrženém zkušebním odlitku, který obsahoval šest vzorků s rozdílnou tloušťkou od 5 do 30 mm. Byla testována závislost obsahu přípravku Probat Fluss Mikro 100 na velikosti soustředné staženiny, kdy docházelo při větším obsahu přípravku k výraznému snižování objemu staženiny. U koncentrace 0,05 % přípravku bylo snížení objemu staženiny minimální, u koncentrací 0,1 % a 0,2 % přípravku byly výsledky srovnatelné, došlo k redukci objemu staženiny o minimálně 50 %. V případě poslední koncentrace 0,4 % přípravku byly výsledky redukce objemu staženiny nejlepší, dosahovaly až 70% snížení objemu staženiny, ale za cenu dvojnásobné koncentrace přípravku a dvojnásobného naplynění taveniny.

Dále byla sledována závislost vnitřní porezity a vnější staženiny na obsahu přípravku Probat Fluss Mikro 100. S rostoucím obsahem přípravku se u všech vzorků projevil nárůst porezity v okrajových částech zkušebních odlitků, které byly v případech bez použití přípravku

naprosto bez vnitřní porezity. Docházelo také ke snižování velikosti soustředné staženiny a zároveň k nárůstu vnitřní porezity v celém objemu odlitku, podle očekávání.

Teorie řízeného naplynění se potvrdila nejlépe u vzorku č. 4, č. 5 a č. 6, kdy tloušťka vzorků byla 20 mm, 25 mm a 30 mm. U tenkostěnných odlitků neměl tento experiment tak jednoznačné výsledky. Většinou nezpůsobil obsah přípravku pozorovatelný rozdíl ve výsledcích měření.

V rámci experimentu vyšel jako optimální obsah přípravku Probat Fluss Mikro 100 0,1 % a 100 g naplyňovací soli. Toto množství dostatečně redukovalo obsah vnější soustředné staženiny a způsobovalo dostatečné naplynění odlitku. Nižší koncentrace 0,05 % přípravku hůře redukovala objem soustředné staženiny, a naopak vyšší koncentrace 0,2 % přípravku se od koncentrace 0,1 % příliš nelišila, bylo by tedy zbytečné a neekonomické zvyšování množství přípravku. Nejvyšší koncentrace 0,4 % měla nejlepší výsledky, ale pro běžné odlitky by bylo použití v této koncentraci naprosto neekonomické. Přípravek Probat Fluss Mikro 100 je značnou ekonomickou položkou, navíc se musí používat v kombinaci s dalším přípravkem – naplyňovací soli či tabletami, nejen proto je vhodné používat řízené naplynění u vybraných speciálních odlitků, a ne plošně pro celou výrobu. Jeho výsledky jsou však jednoznačné a už v minimální koncentraci snižuje objem soustředné staženiny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Slévárenská výroba v zahraničí. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2017, 65(1-2), 60-61.
- [2] Přehled světové výroby odlitků za rok 2018. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2020, 68(1-2), 46-47.
- [3] Sborník přednášek z 8. Holečkovy konference. Brno: Česká slévárenská společnost, 2019. ISBN 978-80-02-02857-4.
- [4] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [5] NĚMEC, Milan a Jaroslav PROVAZNÍK. Slévárenské slitiny neželezných kovů. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [6] MICHNA, Štefan. Encyklopedie hliníku. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [7] SIGWORTH, Geoffrey. Gas Fluxing of Molten Aluminum [online]. In: . 2016 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312273506_Gas_Fluxing_of_Molten_Aluminum
- [8] GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. Zlievarenstvo neželezných kovov. Bratislava, 1988. Edícia hutníckej literatúry (Alfa).
- [9] ELBEL, Tomáš, František HAVLÍČEK, Petr JELÍNEK, Petr LEVÍČEK, Jan ROUS a Karel STRÁNSKÝ. Vady odlitků ze slitin železa: (klasifikace, příčiny a prevence). Brno: MATECS, 1992.
- [10] Katalog vad odlitků ze slitin hliníku. Brno: Česká slévárenská společnost, 2018. ISBN 978-80-02-02817-8.
- [11] OTÁHAL, Vlastislav. Vady odlitků: Atlas vad [online]. In: . Brno [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vady_odlitku_vytah.pdf
- [12] ELBEL, Tomáš. Diagnostika a řízení kvality odlitků: studijní opory. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 78-80-248-3356-9.
- [13] STEFANESCU, Doru Michael. Momentum Mass Transport at the Macroscale. Chemistry and Materials Science [online]. 2015, , 119-134 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15693-4_7
- [14] Les causes de retassure en fonderie sous pression aluminium. In: Metal Blog [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <http://souspression.canalblog.com/archives/2010/12/17/8773772.html>
- [15] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie litin a neželezných kovů: návody do cvičení. Brno: VUT, 1984. Učební texty vys. škol.

- [16] ROUČKA, J., HOTAŘ, J., HLAVÁČEK, P.: Řízené naplyňování siluminu. Slévárství 2013, 7 – 8, s. 239 – 243.
- [17] SKRINSKY, Yuriy. Einfluß von heiß- und kaltisostatischem Pressen auf die „statischen“ mechanischen Werkstoffkennwerte von Gußteilen aus Aluminiumlegierungen. Magdeburg, 2002. Disertační práce. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [18] Úprava kovů při lití na vytavitelný model: Odplyňovací zařízení (FDU), Stanice pro úpravu tavenin (MTS) pro slitiny hliníku. In: Vesuvius[online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/cs-cz/foundry/investment-casting/melt-treatment-for-investment-casting.html>
- [19] Rotary degassing. In: Foundry Lexicon [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/rotary-degassing-4427/?cHash=5929b71f8da1b49a764755bc88f710cb>
- [20] Aluminium and Aluminium Alloys. ASM International, The Materials Information society, 1993, s. 784. ISBN 13 978 – 0 – 87170 – 496 – 2.
- [21] FDU Foundry degassing unit. In: Vesuvius [online]. 2015 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment/brochures/FDU-e.pdf.downloadasset.pdf>
- [22] KOPELIOVICH, Dmitri. Degassing treatment of molten aluminum alloys. In: SubsTech [online]. 2012 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=degassing_treatment_of_molten_aluminum_alloys
- [23] PROBAT-FLUSS BEGASER T 200. In: Schaefer Metallurgie GmbH [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.schaefer-metallurgie.com/probat-fluss-begaser-t-200/>
- [24] Ultrasonic Processing of Metal Melts. In: Hielscher [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.hielscher.com/ultrasonic-processing-of-metal-melts.htm>
- [25] BOLIBRUCHOVÁ, Dana a Eva TILLOVÁ. Zlievarenské zliatiny Al-Si. Žilina: EDIS, 2005. ISBN 80-8070-485-6.
- [26] Produktový katalog: Přesné zkoušky taveniny pro optimální kvalitu s měřicími přístroji od mk. In: Šebesta služby slévárnám s.r.o.[online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://www.sebestasro.cz/cz/get.php?id=72>
- [27] DAVIS, Joseph. Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio: The Materials Information Society, 1993. ISBN 978-0-87170-496-2.
- [28] Density. In: FMA Mechatronic Solutions [online]. 2018 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.fma.li/en/alu-tec/dichte>
- [29] Alu speed tester. In: FMA Mechatronic Solutions [online]. 2018 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.fma.li/en/produkte/alu-speed-tester>

- [30] Chapel portable. In: FMA Mechatronic Solutions [online]. 2018 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.fma.li/en/alu-tec/wasserstoff#chap>
- [31] MALPOHL, Klaus a Rudolf HILLEN. Aluminium-schmelzöfen für die druckgiesserei. In: Foundry planet [online]. 2010 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/de/d/aluminium-schmelzoefen-fuer-die-druckgiesserei/>
- [32] Unterdruck-Dichtepfung [online]. In: . Düsseldorf, 2015 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://docplayer.org/41744936-Unterdruck-dichtepruefung-bestimmung-des-dichte-index-fuer-aluminiumgusslegierungen.html>
- [33] HORKÝ, Karel a Jan VRTÍLEK. Eliminace staženin pomocí přípravku Probat Fluss MIKRO 100. Slévárství. 2008, (7-8).
- [34] Probat Fluss Mikro 100. In: Forni fond [online]. Modena [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.fornifond.it/en/probat-fluss-mikro-100/>
- [35] Probat Fluss Mikro 100. In: Schaefer metallurgie [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.schaefer-metallurgie.com/probat-fluss-mikro-100/>
- [36] Probat Fluss Begaser T 200. In: Schaefer metallurgie [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.schaefer-metallurgie.com/probat-fluss-begaser-t-200-kg/>
- [37] Produktový katalog Schaefer Metallurgie GmbH: Pro slitiny hliníku. In: Šebesta služby slévárnám s.r.o. [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://www.sebestasro.cz/cz/get.php?id=245>
- [38] JANKES, Erik. Využití řízeného naplyňování slitin Al-Si při tlakovém lití. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 74 s. 26 příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
- [39] Kovolit Česká: Výroba a prodej odlitků z hliníku litých do písku a do kokil [online]. 2009 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.kovolitceska.cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
DI	Dichte index	[%]
g	tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
k	konstanta pro daný kov	[cm ³ H ₂ · (100 g Al) ⁻¹ ·Pa ^{-1/2}]
$m_{vz\ at}$	hmotnost vzorku na vzduchu	[kg]
$m_{vz\ H_2O}$	hmotnost vzorku ponořeného ve vodě	[kg]
p_{H_2}	parciální tlak vodíku v okolní atmosféře	[Pa]
p_v	tlak vyvolaný povrchovým pnutím	[Pa]
r	poloměr bubliny	[m]
S	rozpuštnost vodíku v tavenině	[cm ³ H ₂ · (100 g Al) ⁻¹]
s	koeficient kulatosti	[-]
V _{H2}	objem vyloučeného plynu	[m ³ H ₂ · (kg Al) ⁻¹]
V _{vz}	objem vzorku	[m ³]
η	dynamická viskozita	[kg · (s · m) ⁻¹]
ρ	hustota kovu nebo plynu	[kg · m ⁻³]
ρ_{H_2O}	hustoty vody	[kg · m ⁻³]
ρ_{vz}	hustota vzorku kovu	[kg · m ⁻³]
σ	povrchové napětí	[N · m ⁻¹]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Produkce odlitků v České republice v roce 2015 a 2018 v tunách [1], [2]	7
Obrázek 2: Závislost teploty na rozpustnosti vodíku u čistého Al [7].....	10
Obrázek 3: Srovnání závislostí teploty na rozpustnosti vodíku u čistého Al a slitin Al-Si [4]	10
Obrázek 4: Heterogenní nukleace bublin [4]	12
Obrázek 5: Endogenní bublina [10].....	13
Obrázek 6: Příklad endogenních bublin [10]	14
Obrázek 7: Exogenní bubliny [10].....	14
Obrázek 8: Exogenní bublina [10].....	14
Obrázek 9: Otevřená staženina [10].....	15
Obrázek 10: Uzavřená staženina [10]	15
Obrázek 11: Schéma výskytu staženin a ředin v odlitku [13]	16
Obrázek 12: Řediny v odlitku [14]	17
Obrázek 13: Staženina [4].....	17
Obrázek 14: Plynová bublina [4]	17
Obrázek 15: Porezita (staženina a bublina) [4].....	18
Obrázek 16: Koeficient kulatosti [17]	19
Obrázek 17: Vliv obsahu pórovitosti na pevnost a tažnost u slitiny AlSi6Cu4 [4]	19
Obrázek 18: Princip vakuového odplyňování [4]	20
Obrázek 19: Princip odplyňování inertními a aktivními plyny [4].....	22
Obrázek 20: Srovnání účinnosti metod odplynění pomocí aktivních a neutrálních plynů [20] ...	23
Obrázek 21: Zařízení FDU [19].....	23
Obrázek 22: Schéma FDU [21]	24
Obrázek 23: Odplyňovací tablety [23].....	25
Obrázek 24: Ultrazvukové zařízení pro odplynění taveniny [24].....	25
Obrázek 25: Vzorek pro vyhodnocení zkoušky Straube-Pfeiffer [26]	27
Obrázek 26: Vzorek pro vyhodnocení zkoušky Drosstest [26]	27
Obrázek 27: Zařízení pro zkoušku Straube – Pfeiffer [28].....	28
Obrázek 28: Přístroj Alu Speed Tester [29].....	28
Obrázek 29: Přístroj Chapel [30]	29
Obrázek 30: Vážení vzorku pro stanovení Dichte indexu [26].....	30
Obrázek 31: Vzorky a jejich DI [31]	31
Obrázek 32: Srovnání řezů vzorků proměření indexu hustoty [32].....	31
Obrázek 33: Přípravek Probat Fluss Mikro 100 [34].....	33
Obrázek 34: Modelové desky pro zkušební odlitek.....	Chyba! Záložka není definována.

Obrázek 35: Dolní poloviny forem	36
Obrázek 36: Složené formy	36
Obrázek 37: Aplikace Probat Fluss Mikro 100	37
Obrázek 38: Aplikace Probat Fluss Begaser T 200	37
Obrázek 39: Zkušební odlitky po vytlučení z formy	37
Obrázek 40: Měření Dichte indexu při experimentu	38
Obrázek 41: Zkušební vzorky výchozí stav pro koncentraci 0,1 % Probat Fluss Mikro 100	40
Obrázek 42: Zkušební vzorky koncentrace 0,1 % Probat Fluss Mikro 100	40
Obrázek 43: Zkušební vzorky výchozí stav pro koncentraci 0,4 % Probat Fluss Mikro 100	41
Obrázek 44: Zkušební vzorky koncentrace 0,4 % Probat Fluss Mikro 100	41
Obrázek 45: Měření objemu vnější staženiny	43
Obrázek 46: Soustředná staženina koncentrace 0,05 % Probat Fluss Mikro 100.....	44
Obrázek 47: Soustředná staženina koncentrace 0,1 % Probat Fluss Mikro 100.....	44
Obrázek 48: Soustředná staženina koncentrace 0,2 % Probat Fluss Mikro 100.....	45
Obrázek 49: Soustředná staženina koncentrace 0,4 % Probat Fluss Mikro 100.....	45
Obrázek 50: Vzorek č. 4 bez přípravku Probat Fluss Mikro 100	46
Obrázek 51: Vzorek č. 4 s koncentrací 0,05 % Probat Fluss Mikro 100	46
Obrázek 52: Vzorek č. 3 bez přípravku Probat Fluss Mikro 100	46
Obrázek 53: Vzorek č. 3 s koncentrací 0,2 % Probat Fluss Mikro 100	46
Obrázek 54: Vzorek č. 3 s 0,4 % Probat Fluss Mikro 100 středová část.....	47
Obrázek 55: Vzorek č. 3 s 0,4 % Probat Fluss Mikro 100 s obrazovou analýzou.....	47
Obrázek 56: Okrajová část vzorku č. 4 bez použití Probat Fluss Mikro 100	48
Obrázek 57: Okrajová část vzorku č. 4 s použitím 0,1 % Probat Fluss Mikro 100	48
Obrázek 58: Středová část vzorku č. 3 pro koncentraci 0,05 % Probat Fluss Mikro 100	50
Obrázek 59: Výběr středové části vzorku č. 3 s 0,05 % Probat Fluss Mikro 100 pro obrazovou analýzu	50
Obrázek 60: Středová část vzorku č. 3 s 0,05 % Probat Fluss Mikro 100 a obrazovou analýzou	51
Obrázek 61: Vliv obsahu Probat Fluss Mikro 100 na objem staženiny u vzorku č. 2	52
Obrázek 62: Vliv obsahu Probat Fluss Mikro 100 na objem staženiny u vzorku č. 5	52
Obrázek 63: Závislost vnější staženiny a vnitřní porezity u vzorku č. 3 s rostoucím obsahem Probat Fluss Mikro 100	53
Obrázek 64: Závislost vnější staženiny a vnitřní porezity u vzorku č. 4 s rostoucím obsahem Probat Fluss Mikro 100	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,05%	38
Tabulka 2: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,1%	39
Tabulka 3: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,2%	39
Tabulka 4: Hodnoty Dichte indexu pro koncentraci 0,4%	39
Tabulka 5: Objem soustředných staženin	42
Tabulka 6: Označení a specifikace zkušebních vzorků	43
Tabulka 7: Výsledky obrazové analýzy	48