



Vliv řízeného naplyňování taveniny na metalurgii a vlastnosti slitiny $AlSi7Mg0,3$

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Michal Stehlík**
Vedoucí práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Stehlík**

Osobní číslo: **S13000180**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Vliv řízeného naplyňování taveniny na metalurgii a vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3**

Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se slitinami hliníku používanými ve slévárenské praxi.
2. Prostudujte metalurgii slitin hliníku, zaměřte se na metalurgické ošetření - rafinaci a odplynění.
3. Na základě spolupráce s firmou Unitherm s.r.o. proveďte experimenty zaměřené na sledování vlivu řízeného naplyňování taveniny na metalurgii a vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] **ROUČKA, J.** *Metalurgie neželezných kovů [skripta]*. Akademické nakladatelství Cerm, Brno, 2004
- [2] **MICHNA, Š. et al.** *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd., Prešov 2005.
- [3] **RAGAN, E. a kol.** *Liatie kovov pod tlakom*, 1. vyd., Prešov, 2007.
- [4] **VALECKÝ, J. a kol.** *Lití kovů pod tlakem*. 1.vyd., Praha, 1963.
- [5] Časopisy: Slévárenství, Giesserei, atd.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Iva Nováková, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Vliv řízeného naplyňování taveniny na metalurgii a vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3

Abstrakt

Práce se zabývá vztahem mezi úpravou slitiny EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) procesem řízeného naplynění a jejími výslednými vlastnostmi. V teoretické části se tato práce zaměřuje především na metalurgii slitin hliníku a nezbytnými přípravnými procesy, kterými jsou rafinace, odplynění, očkování, modifikace a řízené naplynění. Experimentální část obsahuje vyhodnocení tahové zkoušky, zkoušky tvrdosti a chemického složení v závislosti na míře naplynění.

Klíčová slova

slitina EN AC-42100, naplyňování, mechanické vlastnosti

Impact of controlled melt-gassing on metalurgy and properties of AlSi7Mg0.3 alloy

Abstract

The work deals with the relation between the changes of EN AC-42100 (AlSi7Mg0.3) alloy by the process of controlled gassing and its chemical and mechanical properties. The theoretical part is focused on the metallurgy of aluminium alloys and preliminary processes as refining, out-gassing, inoculating, modification and gassing. The experimental part shows the dependence of tensile and hardness properties and the chemical composition on the level of gassing.

Key words

alloy EN AC-42100, gassing, mechanical properties of materials

Poděkování

Úvodem bych rád poděkoval Ing. Davidu Duždovi a firmě Unitherm s.r.o. za návrh tématu a přípravu experimentální části. Dále bych velmi rád poděkoval své vedoucí práce Ing. Ivě Novákové, Ph.D., za ochotný přístup a pomoc při řešení této práce.

Obsah

1	ÚVOD	7
2	TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1	HLINÍK	8
2.2	SLITINY HLINÍKU	9
2.2.1	SLITINY HLINÍKU S KŘEMÍKEM	11
2.3	TAVENÍ A METALURGIE SLITIN HLINÍKU	14
2.3.1	VMĚSTKY VE SLITINÁCH HLINÍKU A JEJICH RAFINACE	14
2.3.2	VODÍK VE SLITINÁCH HLINÍKU A ODPLYNĚNÍ TAVENINY	15
2.3.3	CÍLENÉ NAPLYŇOVÁNÍ	18
2.4	OČKOVÁNÍ PODEUTEKTICKÝCH SLITIN HLINÍKU	19
2.5	MODIFIKACE PODEUTEKTICKÝCH SLITIN HLINÍKU	20
2.6	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	22
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	23
3.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ	23
3.2	MĚŘENÍ INDEXU HUSTOTY	24
3.3	SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA	25
3.4	TERMICKÁ ANALÝZA	27
3.5	STATICÁ ZKOUŠKA TAHEM	29
3.6	ZKOUŠKA TVRDOSTI	31
3.7	METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ	33
4	ZÁVĚR	38

1 Úvod

Hliník se v průmyslu začal objevovat až v počátcích 19. století souběžně s probíhající průmyslovou revolucí. Čistý hliník byl poprvé získán dánským chemikem a fyzikem Hansem Christianem Oerstedem, který jej vytvořil chemickou redukcí draslíkem. Na konci 19. století byly postaveny první hutě, které umožnily velkovýrobu a hliník se tak stal dostupnou a rozvíjející se komoditou. Výrazný nárůst výroby proběhl v první polovině 20. století, který byl zapříčiněn rozvojem vojenské techniky v období druhé světové války. [1, 2]

V současné době se hliník řadí mezi nejvíce vyráběné neželezné kovy. Za rok 2015 se jej celosvětově vyrobilo přibližně 58 milionů tun. Velmi významným odběratelem hliníku je dopravní průmysl. Z hliníkových slitin se dnes vyrábí například části skeletu letadel, silničních a železničních vozidel, skříně motorů, hlavy válců a mnoho dalších komponentů. Díky svým dobrým elektrickým vlastnostem (disponuje přibližně 60% vodivosti mědi) se hliník uplatnil v oblasti elektrotechniky. S hliníkem se velmi často setkáme také ve stavebnictví, případně v potravinářském průmyslu při výrobě obalů a fólií. [2, 4, 10]

Mezi největší zpracovatele hliníku patří již tradičně slévárny. Zvyšujícím se požadavkům na odlitky odpovídá také množství sledovaných parametrů. Pro efektivní výrobu je vhodné pochopit vztahy mezi jednotlivými kritérii ovlivňujícími výrobu a výslednými vlastnostmi odlitku. Jedním z významných parametrů je metalurgie slitin. Kvalitu taveniny ovlivňují především použité způsoby rafinace, odplynění, případné řízené naplynění, očkování a modifikace a jejich posloupnost. Zmíněnou problematikou se zabývá i tato bakalářská práce.

Cílem této práce je analýza vlastností slitiny EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) v závislosti na míře naplynění taveniny, která je popsána indexem hustoty. Jedná se zejména o zhodnocení vlivu naplyňovací soli „*Probat Fluss Begaser 200*“ na chemické složení a mechanické vlastnosti slitiny.

2 Teoretická část

2.1 Hliník

Hliník (značka Al, latinsky Aluminium) je neušlechtilý, kujný, stříbřitě šedý kov. V periodické soustavě prvků patří do skupiny III.A. Řadí se tak mezi prvky jako jsou bor, galium, indium a thalium. Jeho protonové číslo je 13, z čehož plyne jeho elektronová konfigurace $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$. Má 3 valenční elektrony a v přírodě se tak vyskytuje ve třech oxidačních stavech +I, +II, +III, kde nejstabilnější stupeň je +III.

Hliník jakožto kov váže své atomy do kovové vazby. Tato vazba zaručuje sdílení všech valenčních elektronů, které se v určitém objemu materiálu mohou volně pohybovat ve formě „elektronového mraku“. Tímto jevem je vysvětlena relativně vysoká tepelná a elektrická vodivost kovů.

Hliník je jedním z nejčtenějších kovů v přírodě. Jeho zastoupení tvoří 7,5 až 8,0 % zemské kůry. Získává se především těžbou bauxitu, horniny obsahující směs několika různých minerálů a to především gibbsit, boehmit a diaspor. Hliník není možné jednoduše metalurgicky vyredukovat z jeho rudy jako např. železo koksem ve vysoké peci. Jedna z nejpoužívanějších metod výroby čistého hliníku je založena na principu elektrolyzy. [1, 2]

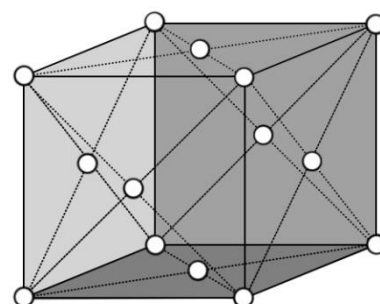
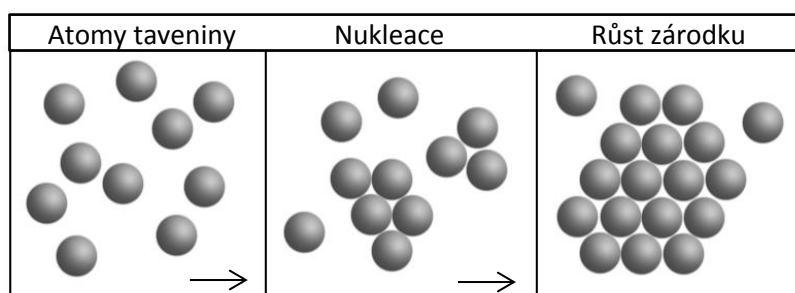
Ve svém čistém kovovém stavu je velmi reaktivní. Při kontaktu se vzdušnou atmosférou rychle oxiduje a vytváří na svém povrchu oxidační vrstvu Al_2O_3 , která má za normální teploty tloušťku přibližně 10 nm. Takto tenká vrstva vytváří ochranný film zabraňující hluboké oxidaci. [1]

Při krystalizaci hliníku dochází ke shlukování jednotlivých atomů kovu, které následně vytváří rostoucí krystalizační zárodky. Jednotlivé atomy zaplňují uzlové body a vytvářejí tak krystalovou mřížku, viz obr. 2-1. Hliník krystalizuje v kubické plošně centrované mřížce ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$; $a = b = c$). Jde o typ nejtěsnějšího uspořádání částic s vrstvením ABCABC. Elementární buňka obsahuje 14 uzlových bodů, tj. 4 atomy na jednu elementární buňku, viz obr. 2-2. [3, 4]

Fyzikální vlastnosti čistého hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.1. Čistý hliník vykazuje pevnost v tahu přibližně 70 MPa při tažnosti 30%, modul pružnosti v tahu dosahuje hodnot kolem 70 000 MPa a jeho tvrdost se pohybuje v rozmezí 20 až 30 HB. Takové hodnoty jsou pro konstrukční účely nedostačující, proto se běžně používají slitiny hliníku, kde legující prvky výrazně mění požadované vlastnosti. Velkou výhodou těchto slitin jsou relativně dobré mechanické vlastnosti při nízké objemové hustotě. [1, 2]

Tabulka 2.1 Vybrané vlastnosti hliníku

Hustota	2700	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Teplota tání	660	$^{\circ}\text{C}$
Teplota varu	2520	$^{\circ}\text{C}$
Měrné skupenské teplo tání	399	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrné skupenské teplo varu	10 500	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita	896	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost	235	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Elektrická vodivost	$37,7\cdot 10^6$	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$



Obr. 2-1 Mechanismus krystalizace

Obr. 2-2 Kubická plošně centrovaná mřížka

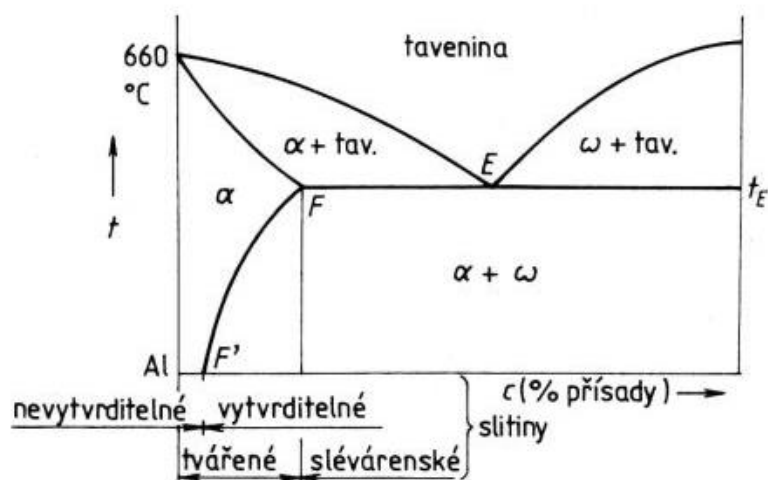
2.2 Slitiny hliníku

Pro praktické využití hliníku při konstrukčních a technických aplikacích je potřeba zajistit dostatečně dobré mechanické vlastnosti, proto se hliník používá ve formě slitin obsahujících legující prvky, které tyto vlastnosti zlepšují. Volba těchto prvků závisí především na technologii výroby, požadovaných mechanických vlastnostech odlitku, případně možnosti tepelného zpracování.

Označování slitin hliníku je dáno Českými technickými normami a je možné používat jak značení podle norem ČSN, tak i podle norem ČSN EN, které mají v technické praxi přednost. Obecně se slitiny hliníku dělí na slitiny určené pro tváření a pro odlévání a dále na slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné, viz obr. 2-3.

Označování slitin hliníku na odlitky udává norma ČSN EN 1706. Je složen z písmen EN AC a následuje pět číslic určující chemické složení, např. EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3). [2]

Podle ČSN norem se jednotlivé typy hliníku a slitin hliníku značí samostatnou normou a šesti číslicemi, např. ČSN 42 4331 (AlSi10MgMn). První dvě číslice udávají třídu norem (kde číslo 42 označuje hutnictví), další dvě skupinu norem v dané třídě a poslední dvě udávají číslo ve skupině norem. [2]



Obr. 2-3 Schéma obecného dělení slitin hliníku [6]

Pomocí chemických značek lze vyjádřit střední procentuální obsah hlavních prvků, kde se na první pozici v zápisu uvádí základní prvek a na dalších místech sestupně seřazené přísadové prvky. Např. v této práci zkoumaná slitina EN AC-42100 má chemický zápis AlSi7Mg0,3 . Obsahuje tedy přibližně 7% křemíku a 0,3% hořčíku. [1, 2]

Mezi nejrozšířenější slévárenské skupiny slitin hliníku patří:

- AlSi
- AlSi7Mg
- AlSi10Mg
- AlSi5Cu
- AlSi9Cu
- AlSiCuNiMg
- AlSiMgTi
- AlCu
- AlMg
- AlZnMg

Z chemického hlediska tyto slitiny obsahují základní prvek (hliník), hlavní přísadový prvek, vedlejší přísadové prvky a doprovodné prvky. Počet přísadových prvků rozděluje slitiny na binární, které obsahují pouze základní a hlavní přísadový prvek, ternární, kde se kromě základního a hlavního prvku vyskytuje ještě další vedlejší přísadový prvek, a vícesložkové, které obsahují několik vedlejších přísadových prvků.

Hlavní přísadové prvky – vymezují druh slitin. Jejich obsah je ve slitině tedy zpravidla nejvyšší hned za základním prvkem. Mezi nejběžnější patří křemík, měď a hořčík, v některých případech také zinek nebo mangan. Podle tohoto prvku nesou také některé hliníkové slitiny své slovní označení, kupříkladu slitiny hliníku a křemíku se nazývají siluminy, slitiny s mědí se označují jako duralaluminium a slitiny s hořčíkem jako hydronalium. [1]

Vedlejší přísadové prvky – ovlivňují především mechanické a technologické vlastnosti, přidávají se tedy do slitiny záměrně. Takovýchto prvků se ve slitině může objevovat hned několik a obsah těchto prvků je obvykle nižší než obsah hlavního přísadového prvku. Následně lze slitiny označit do skupin podle vedlejšího přísadového prvku, který má nejvyšší význam, co do ovlivnění výsledných vlastností slitiny. Konkrétně u siluminů to například mohou být skupiny Al-Si-Cu a Al-Si-Mg. [1]

Doprovodné prvky – lze je označit za takové prvky, které celkově zhoršují mechanické či technologické vlastnosti slitiny, jsou nežádoucí a do slitiny se nepřidávají záměrně. Jejich výskyt v tavenině má několik příčin. Jednou z nich je reakce s vyzdívkou pece případně se slévačským náradím, jakým jsou ocelové ruční pánvičky, shánky nebo ponorné zvony. Dalším zdrojem mohou být samotné vsázkové suroviny a vrat. Z taveniny se odstraňují obtížně, a proto se zavádí přípustná horní mez koncentrace, ve které se mohou vyskytovat. [1]

Vzhledem k experimentální části této práce se následující kapitola zabývá pouze slitinami na bázi Al-Si.

2.2.1 Slitiny hliníku s křemíkem

Ze všech druhů slitin hliníku je zdaleka největší skupina slitin hliníku s křemíkem, označovaných také jako siluminy. Běžně se používají pro svou dobrou slévateľnost, jelikož křemík zlepšuje zabíhavost. Dále disponují dobrou svařitelností a odolností proti korozi. Jejich nevýhodou je zhoršená obrobiteľnost. Eutektickému složení odpovídá přibližně 12% křemíku. Běžně se používají slitiny, jejichž obsah křemíku se vyskytuje v intervalu 5 až 13%. Jednotlivé prvky ve slitině mohou mít i při stopovém množství značný vliv na výsledné vlastnosti slitiny. V následujících odstavcích je uveden vliv nejvýznamnějších legujících prvků ovlivňujících vlastnosti slitin Al-Si. [1, 2]

Křemík – je v siluminech základním přísadovým prvkem. Obecně zlepšuje téměř všechny slévářenské technologické vlastnosti. Se zvyšujícím se obsahem křemíku se především zvyšuje zabíhavost taveniny. Dále se snižuje tepelná roztažnost a snižuje se také součinitel stahování během tuhnutí. Zlepšují se jím též kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru i korozi.

Měď – zlepšuje pevnost a tvrdost. Má pozitivní vliv na obrobiteľnost, jelikož zvyšuje lámavost třísky. Snižuje tažnost a také nepříznivě působí na korozní odolnost. Ve slitinách se její obsah obvykle pohybuje do 5%.

Hořčík – má významnou roli při vytvrzování za tepla. Po vytvrzení zvyšuje pevnost. Tvoří fáze s mědí nebo s železem, které snižují tažnosti slitiny. Běžně se přidává v množství od 0,3 až 0,7%.

Železo – obecně je jeho vliv nepříznivý. Do taveniny se dostává z vsázky, z nářadí nebo z forem. Tvoří různé typy intermediálních sloučenin, které mohou výrazně zhoršovat vlastnosti výsledné litiny a to zejména při pomalém tuhnutí. Negativní vliv železa lze kompenzovat přidáním manganu. Pro běžné odlitky se stanovuje horní přípustná hranice obsahu železa na 0,6 %.

Mangan – kompenzuje negativní vlivy železa. Mění nežádoucí jehlicové fáze železa na kompaktnější a tím snižuje celkovou křehkost litiny. Obsah manganu by měl být zhruba poloviční než je obsah železa.

Nikl – spolu s mědí a železem tvoří vícesložkové fáze, které vykazují dobrou tepelnou stabilitu. Tím lze zlepšit mechanické vlastnosti za zvýšených teplot. Ovšem nepříznivě působí na slévárenské vlastnosti.

Zinek – primárně zvyšuje tekutost, zabíhavost a obrobitelnost. Avšak jako běžný legující prvek se nepoužívá. Ve slitinách Al-Si-Cu se vyskytuje do 3%.

Titan – ve slitinách splňuje především očukující funkci, jelikož tvoří sloučeninu s hliníkem, která následně tvoří krystalizační zárodky. Docílí se tak zjemnění zrna. Následkem je zlepšená obrobitelnost a odolnost proti korozi.

Vápník – zvyšuje sklon k naplynění a tvorbě mikrostaženin. Běžně je považován za nežádoucí prvek. Do slitiny se obvykle dostává spolu s křemíkem a bývá přítomen ve stopovém množství (řádově tisícin procent).

Berylium – vytváří na hladině taveniny vrstvu chránící před oxidací a dále způsobuje příznivé změny tvaru intermetalických fází železa, avšak používá se jen zřídka a v malých koncentracích (řádově setiny procenta).

Struktura slitin na bázi Al-Si je v závislosti na chemickém složení tvořena homogenním tuhým roztokem a eutektikem. Ve struktuře se mohou dále vyskytovat intermetalické fáze.

Homogenní tuhý roztok hliníku se značí α . Jedná se o substituční roztok přísadového prvku v hliníku, tj. atomy přísadového prvku nahrazují atomy hliníku v jeho kubické plošně centrované mřížce. O substitučním tuhém roztoku hovoříme tehdy, pokud se poloměry atomů příměsi neliší od poloměru základního prvku o více jak 15%. Rozdílnost velikostí atomů v mřížce způsobuje její částečnou deformaci. Následkem toho roste pevnost a houževnatost

slitiny při snižujících se plastických vlastností. Maximální rozpustnost přísadových prvků je při eutektické teplotě a sklesající teplotou se snižuje.

Eutektikum je tvořeno fází α a přísadovým prvkem, který je buďto čistý nebo ve sloučenině, označované také jako intermetalická fáze. Podle polohy eutektického bodu, ve kterém je teplota tuhnutí slitiny nejnižší, rozdělujeme slitiny na podeutektické a nadeutektické. Eutektikum vzniká, když je množství přísadového prvku ve slitině vyšší, než je maximální rozpustnost tohoto prvku v tuhém roztoku při teplotě tuhnutí. Množství vyloučeného eutektika ovlivňuje i mechanické vlastnosti slitiny. [1]

U nadeutektických slitin na bázi Al-Si dochází při tuhnutí k vylučování primární fáze příměsí, tj. ve struktuře se vyskytuje **homogenní tuhý roztok křemíku**. Pokud se dosáhne eutektické teploty, tuhnutí pokračuje krystalizací eutektika. [1, 2]

Jako **intermetalické fáze**, popř. **intermediální fáze** jsou označovány takové strukturní složky, které mají vlastní krystalickou strukturu. Jsou to chemické sloučeniny, které vznikají z přísadových a doprovodných prvků za podmínky překročení jejich maximální rozpustnosti v základním kovu. Vyznačují se zvýšenou tvrdostí a křehkostí. Intermetalické fáze vznikají přeměnou tuhých roztoků, rozpadem tuhých roztoků nebo krystalizací z taveniny. [1]

V experimentální části je zkoumána slitina AlSi7Mg0,3. Jejimi charakteristickými vlastnostmi jsou dobrá tažnost a houževnatost. Má velmi dobré slévárenské vlastnosti, je dobře obrobitelná a svařitelná. Je pro ni typické minimální množství příměsí a nečistot. Odlévá se jak do pískových, tak do kovových forem gravitačně, případně nízkotlakým litím. Tendence ke vzniku staženin je u této slitiny nízká. Primární zrno se zjemňuje očkovaním. Její mechanické vlastnosti lze tepelným zpracováním zvýšit, viz tabulka 2.2. Používá se především v oblasti leteckého a automobilového průmyslu ve formě různých motorových dílů, součástí podvozků a rámců. [1]

Tabulka 2.2 Mechanické vlastnosti slitiny EN AC-42100 dle ČSN EN 1706

Způsob lití	Tepelné zpracování	R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	A [%]	Tvrdost [HBW]
Kovová forma	T6	290	210	4	90
Písková forma	T6	230	190	2	75
Vytavitelný model	T6	260	200	3	75

2.3 Tavení a metalurgie slitin hliníku

Tavenina se připravuje v pecích, do kterých se zavází housky případně vratný materiál. Housky slitin mívají nízký podíl nečistot a mají garantované chemické složení. Vratný materiál obsahuje především vtoky, nálitky, případně zmetky a bývá významnou složkou vsázky. Až polovina odlitého kovu se vrací zpátky do procesu tavení. Ovšem je třeba sledovat čistotu vratu, jelikož může do taveniny zanášet velké množství vměstků a nečistot. [1]

Samotné tavení probíhá v tavicích pecích, kde se tavenina ohřeje na lící teplotu. Provedou se nezbytné metalurgické procesy a tavenina se může přemístit do udržovacích pecí, které slouží jako místní zásobníky taveniny pro jednotlivá lící stanoviště. Podle způsobu vytápění lze pece rozdělit na plamenné, které využívají jako palivo především zemní plyn, a elektrické, které se dále dělí na odporové a indukční. V praxi se používá několik základních typů pecí lišících se zejména v konstrukci a způsobu tavení. [1, 2]

- **Kelímkové pece** – kelímky je možné po roztavení kovu naklopit a jejich obsah přelít a transportovat do udržovacích pecí.
- **Komorové pece** – jsou složeny z tavicí a nístějové části. Do tavicí části se umísťuje vsázka, která po natavení hořákem odtéká do části nístějové.
- **Šachtové pece** – do horní části pece se zavází vsázka, kde se postupně vysouší a předehřívá. Spodní část obsahuje tavicí zónu a udržovací komoru.
- **Vanové pece** – je pro ně typický vanovitý tvar s nízkou hloubkou. Používají se spíše jako udržovací pece. Jejich výhodou je klidná lázeň s nízkým naplyněním.
- **Dávkovací pece** – jsou určeny k automatickému dávkování taveniny a to především při odlévání do kovových forem pod tlakem.

Metalurgii hliníku je nutné provádět s ohledem na jeho specifické fyzikální a chemické vlastnosti. Slitiny hliníku totiž vykazují velký sklon ke vzniku nekovových vměstků a k naplynění taveniny vodíkem. Z tohoto důvodu je prováděna rafinace a odplynění taveniny.

2.3.1 Vměstky ve slitinách hliníku a jejich rafinace

Výskyt nekovových vměstků v kovu se projeví snížením mechanických a slévarenských vlastností. Podle chemického složení se rozlišují vměstky *oxidické* a *neoxidické*. Podle tvaru se dělí do třech základních typů, kterými jsou oxidické blány, dalším typem jsou makroskopické vměstky kompaktního tvaru a dále to jsou mikroskopické částice místně nebo rovnoměrně rozložené v kovu. Nejčastějším typem vměstků jsou oxidy hliníku Al_2O_3 .

Podle původu je dělíme na exogenní a endogenní. Exogenní vměstky se do taveniny dostávají zvenčí při tavení a odlévání a to především z vyzdívek pecí nebo z licích pánví. Výskyt endogenních vměstků v tavenině jsou důsledkem oxidace hliníku a chemických reakcí jednotlivých prvků v tavenině. Za endogenní vměstky lze označit také zbytky solí z metalurgických procesů. [1]

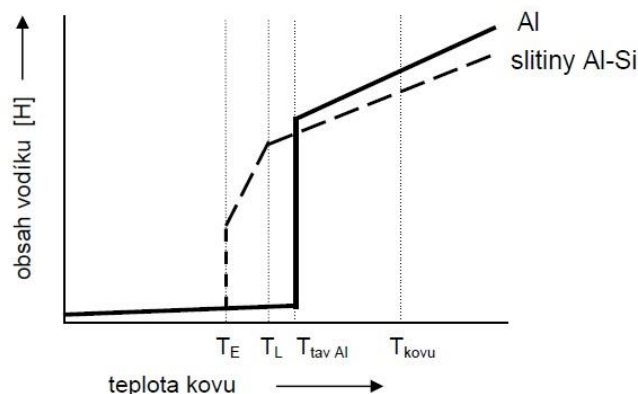
Po roztavení vsázky v pecích se tedy provádí rafinace, jejímž cílem je snížení množství vměstků a nečistot. Pro tento účel se používají čisticí a rafinační přípravky. Rafinační soli slouží k odstranění nežádoucích oxidických vměstků vyplavením a také ke snížení ztrát kovového hliníku vlivem odebírání strusky z hladiny. V tavenině totiž běžně dochází k vynášení hliníku obklopeného oxidy na hladinu. Rafinace má za cíl tuto obálku z oxidů rozrušit a uvolnit hliník zpět do lázně. Rafinační soli též umožňují snížit obsah některého z nežádoucích prvků (např. Na, Ca). [1, 2, 9]

Vyplouvání vměstků napomáhá také proces odplynění, při kterém se do taveniny vhání plyn, který s sebou strhává vměstky a vynáší je na hladinu. Pro tyto účely se používají odplyňovací přístroje, tzv. FDU (*foundry degassing unit*).

Další možností jak snížit počet vměstků je užití filtrace. Provádí se především při přelévání taveniny z tavicích pecí do udržovacích pecí nebo pánví, ale lze ji využít i přímo při odlévání do formy. Filtry k těmto účelům jsou buďto tkaninové, kovové nebo keramické. [1]

2.3.2 Vodík ve slitinách hliníku a odplynění taveniny

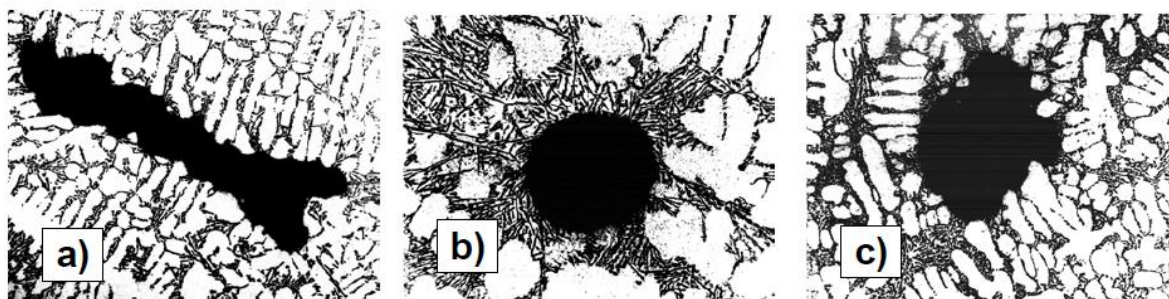
Vodík se do taveniny dostává z nejrůznějších zdrojů, především z vlhkosti okolní atmosféry nebo z vlhkosti kelímků a náradí. Dalším zdrojem může být samotná vsázka, která v případě nedostatečného vysušení a přehřátí absorbuje vodu v povrchových pórech. Roztavený hliník reaguje s molekulami vody za vzniku oxidu hlinitého a vodíku. Vznikající vrstva oxidů hliníku na povrchu taveniny reaktivní není, tudíž chrání taveninu před dalším naplyněním. [1]



Obr. 2-5 Vliv teploty na rozpustnost vodíku [1]

Samotný vodík má velmi malý atomový poloměr a je za vysokých teplot poměrně dobře rozpustný v tavenině, viz obr. 2-5. Prvky jako Si, Zn, Cu a Mn rozpustnost vodíku snižují a naopak prvky Mg, Na, Ca, Ti, Li rozpustnost navyšují. [1]

Při procesu tuhnutí se rozpustnost vodíku snižuje, což může vést ke vzniku plynových dutiny uvnitř odlitku – bubliny nebo póry. Zdrojem nukleačních zárodků bublin mohou být nesmáčivé oxidické vměstky v tavenině. Na vzniku bublin se podílí také lokální mikrostaženiny a výsledná porozita je často tvořena kombinací mikrostaženin a plynových bublin, viz obr. 2-6. Tvar pórů také závisí na rychlosti ochlazování. Obecně platí, že při pomalém tuhnutí může vodík difundovat do bublin z relativně velkých vzdáleností a bubliny tak mají velký objem. Naopak při rychlém ochlazování se zárodky bublin rychle obalí tuhým kovem a k další difuzi nedochází. Jejich tvar kopíruje dendritickou strukturu kovu. [1]



Obr. 2-6 a) mikrostaženina b) plynová bublina c) kombinace plynové bubliny a mikrostaženiny [1]

Výsledná pórovitost snižuje pevnost a tažnost, má nepříznivý vliv na únavové vlastnosti materiálu, zhoršuje těsnost odlitku a snižuje kvalitu obrobených ploch. Pórovitost ovšem částečně kompenzuje úbytek objemu vlivem stahování při tuhnutí. Obvyklý obsah vodíku se po natavení pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,8 cm³/100 g Al. [1]

Odplyňování taveniny se provádí za účelem snížení obsahu vodíku v tavenině pod hodnotu přibližně 0,2 cm³/100 g Al. Žádaný obsah vodíku vždy závisí na technologii odlévání, na tvaru a účelu odlitku. Během odplyňování dochází také k rafinaci taveniny, kdy se vměstky vynáší na hladinu a odstraňují se spolu se struskou. V technické praxi se můžeme setkat s různými metodami odplyňování. [1, 9]

Odplynění vakuováním se zakládá na principu snížení tlaku atmosféry nad hladinou taveniny. Podle Sievertsova zákona dojde v důsledku snížení parciálního tlaku ke snížení rozpustnosti vodíku. Tavenina se tak stává přesyceným roztokem a tvoří se drobné bubliny vodíku, které unikají z hladiny do okolí. Tento způsob odplynění se provádí ve vakuových komorách, do kterých se zaváží celé pánve s taveninou. Hodnota absolutního tlaku v komoře je přibližně 5 kPa. [1]

Odplynění probubláváním plynů probíhá díky difuzi vodíku do bublin jiných plynů. Podle toho, zda vodík s plyny reaguje či nikoliv, se jedná o odplyňování inertními (dusík, argon) resp. aktivními plyny (chlor, fluor).

Při inertním odplyňování je plyn vháněn do taveniny a vodík difunduje do bublin, které vyplouvají na hladinu. Pro efektivnější odplynění je nutno zajistit dostatečně malou velikost bublin a docílit toho, aby před vyplutím na hladinu taveniny urazily dostatečně dlouhou dráhu. Odplynění také závisí na délce trvání procesu, přičemž běžné odplyňovací časy se pohybují kolem 2 až 5 minut. V praxi se běžně používají odplyňovací jednotky s grafitovým rotorem, který se ponoří do pánve a do jeho spodní části se vhání plyn – obvykle dusík s čistotou 99,99%. [1, 7]

Pokud použijeme aktivní plyny, dojde k chemické reakci nejen s vodíkem ale i dalšími prvky. V tavenině vznikají chloridy respektive fluoridy prvků, jako jsou Sr, Na, Ca, Li, Mg. Proto je nutné tímto způsobem odplyňovat taveninu vždy před použitím modifikátorů. Intenzita odplynění bývá u aktivních plynů vyšší než u inertních, avšak jejich použití je v současné době omezeno ekologickými předpisy. [1]

Ve standardních výrobních podmínkách je třeba zajistit rychlou kontrolu stavu taveniny. Jednou z nejpoužívanějších provozních metod kontroly naplynění je metoda dvojího vážení, která spočívá v měření a porovnání hustoty dvou vzorků. Do dvou zkušebních kelímků se nalije tavenina, přičemž jeden ze vzorků se nechá ztuhnout za běžného atmosférického tlaku a druhý se umístí do vakuové komory, kde tuhne při podtlaku. Hustota obou vzorků se stanoví pomocí vážení na vzduchu a ve vodě. Na základě toho se stanoví „*Dichte Index*“ neboli index hustoty. [1]

$$DI = \frac{(\rho_{vz\ atm} - \rho_{vz\ vak})}{\rho_{vz\ atm}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Kde značí: $\rho_{vz\ atm}$... hustota vzorku ztuhlého za běžného tlaku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];
 $\rho_{vz\ vak}$... hustota vzorku ztuhlého ve vakuové komoře [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

2.3.3 Cílené naplyňování

Odplyňování taveniny je v technické praxi běžný proces, ovšem v některých případech je potřeba taveninu naopak naplynit. Naplynění se používá u některých tvarově složitých odlitků, které obsahují konstrukční tepelné uzly. Příliš vysoké odplynění taveniny je doprovázeno relativně velkým objemovým smrštěním, které u slitin hliníku činí zhruba 7%. To může vést k tvorbě soustředěných staženin. Snahou naplynění je tyto staženiny eliminovat. Mají totiž nepravidelnou strukturu, která vytváří vrubový účinek snižující pevnostní charakteristiky odlitku, jakými jsou např. mez pevnosti a tažnost. Přípustný obsah vodíku je závislý na technologii odlévání, tloušťkách stěn odlitku a účelu použití odlitku. [7, 8]

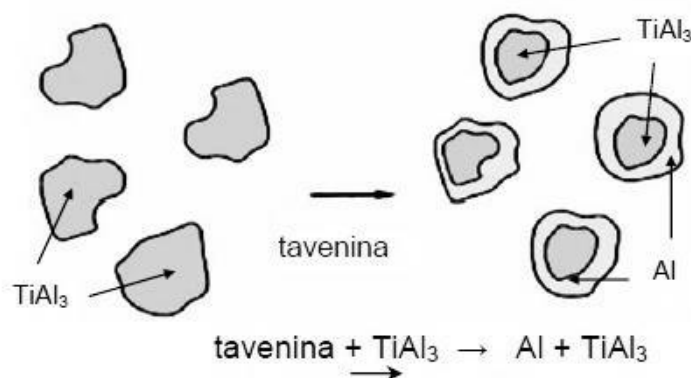
Pokud tavenina obsahuje velké množství vodíku a zároveň se v ní vyskytuje nízký obsah zárodků pro nukleaci bublin, výsledná struktura bude obsahovat malé množství relativně velkých bublin. Je daleko výhodnější v odlitku vytvořit rovnoměrně rozloženou mikropórovitost. Proto je zapotřebí zajistit vysoký počet vhodných zárodků pro tvorbu mikropórů. K tomu slouží například speciální předslitiny (přípravek *Probat Fluss Mikro 100*), které obsahují mikroskopické částice oxidů hliníku. Tyto částice poté slouží jako zárodky plynových bublin, kterých bude více, ale budou menší. Přípravek se vyrábí rozprašováním tekutého hliníku do proudu vzduchu. Vznikne prášek, který se následně slisuje do podoby tyčí, které lze přidat do kelímku při teplotě 700°C a vyšší. Doporučené dávkování je 0,05 až 0,4% hmotnosti taveniny a závisí na hmotnosti odlitku a tloušťce stěn. [7, 8, 9]

Další možností je přímé vhánění vodíku do taveniny. K tomu se nejčastěji používají naplyňovací tablety či soli (např. *Hydral 40*, *Probat Fluss Begaser 200*) případně formovací plyn, který je složen z dusíku a vodíku. Tablety a soli se několik minut rozpouští v tavné lázni pod ponorným zvonem při teplotách 650°C i vyšších a do taveniny uvolňují vodík. Ten se znovu při tuhnutí kovu vylučuje ve formě plynu a jeho tlak kompenzuje úbytek tuhajícího kovu. Po skončení reakce se odstraní stěr z hladiny taveniny. Spolu se stěrem mohou z taveniny odcházet některé legující prvky. Přidávané množství závisí na požadovaném množství vodíku v tavenině a bývá do 0,1% celkové hmotnosti taveniny. [9]

2.4 Očkování podeutektických slitin hliníku

Jednou z možností zlepšení výsledných mechanických vlastností odlitku je zjemnění primárního zrna. Jde tedy o proces, při němž se v důsledku přidání určitých prvků do taveniny zvyšuje počet krystalizačních zárodků. Tyto zárodky následně vytváří dendrity, ze kterých je zrna tvořeno. Finální velikost zrna závisí taktéž na rychlosti ochlazování při tuhnutí odlitku. Obecně lze tvrdit, že odlévání do kovových forem vykazuje jemnější strukturu oproti odlévání do pískových forem a to z důvodu rychlejšího odvodu tepla kovovou formou. Obdobně lze říci, že tenkostěnné odlitky mají jemnější zrna než stejným způsobem odlévané masivní odlitky.

Mezi nejběžnější očkovací prostředky patří předslitiny titanu či bóru (Al-Ti, Al-Ti-B), které mají podobu tyčí se specifikovanou hmotností, případně očkovací soli a tablety (K_2TiF_6 , KBF_4 a další). Titan, který má vlastní teplotu tání zhruba o $1000^\circ C$ vyšší než hliník, reaguje v tavenině a tvoří intermediální fáze $TiAl_3$, která má podobné mřížkové parametry jako kubická plošně centrovaná mřížka hliníku a zaručuje tak funkci krystalizačního zárodku, viz obr. 2-7. [1]



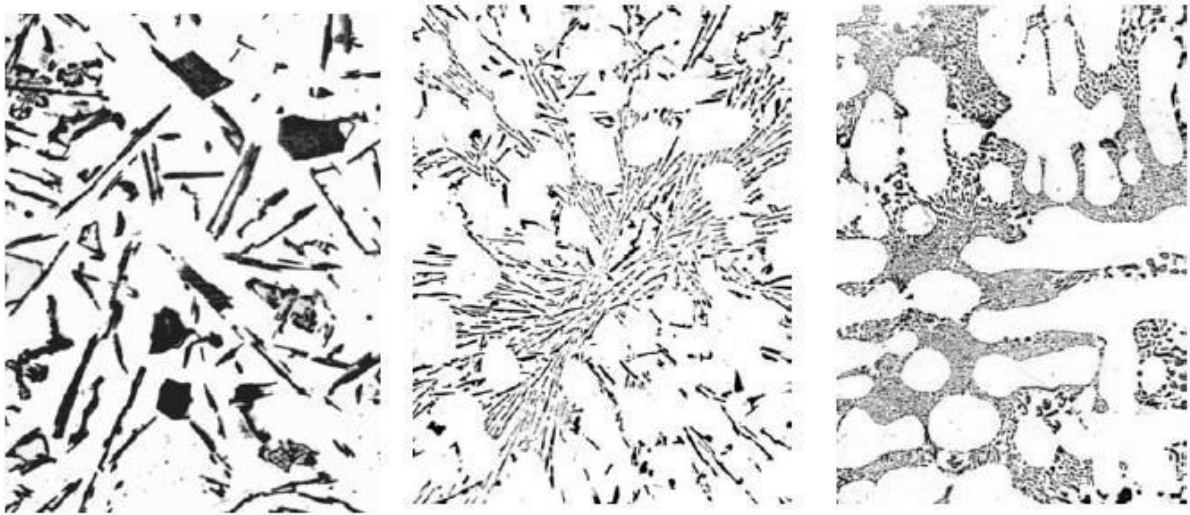
Obr. 2-7 Nukleace zárodků $TiAl_3$ [1]

Účinné očkování probíhá zhruba po přidání 0,02 až 0,1% Titanu. Očkovací efekt postupem času ztrácí svůj vliv, jelikož se zárodky $TiAl_3$ v tavenině postupně rozpouští. Jedním ze způsobů jak zhodnotit jemnost struktury je užití záznamu z termické analýzy. [1]

Výsledkem očkování jsou především zvýšené celkové mechanické a technologické vlastnosti slitiny. Zvýší se chemická a strukturní homogenita a tím také pevnost a tažnost. Odlitek má nižší tendenci k tvorbě trhlin a je méně pórovitý. Případné staženiny jsou lépe rozptýleny, jsou menší a odlitek má zvýšenou těsnost proti pronikání tlakových médií. [1]

2.5 Modifikace podeutektických slitin hliníku

Modifikace spočívá v ovlivnění procesu krystalizace pomocí některých přidaných látek s cílem změnit typ a tvar vyloučeného eutektika. Ve struktuře slitin hliníku se mohou objevit tři typy eutektika, viz obr. 2-8. V nemodifikované slitině Al-Si se eutektický křemík vylučuje ve tvaru hexagonálních desek, tj. vzniká zrnité eutektikum. Pro mechanické vlastnosti je tento tvar nepříznivý. [2]



Obr. 2-8 Typy eutektika u slitiny Al-Si (zleva zrnité, lamelární, modifikované)

Zrnité eutektikum vzniká při obsahu fosforu nad 0,0005%, který umožní tvorbu krystalizačních zárodků AlP. Vznikají polyedrická zrna nebo hrubé lamely. Takovéto eutektikum je typické pro většinu slitin běžných technických čistot. [1, 2]

Lamelární eutektikum vzniká při obsahu fosforu kolem 0,0001 %. Vzniká podobně jako zrnité eutektikum. Křemík utváří vedle sebe téměř rovnoběžné lamely. Zrna eutektika jsou však menší. [1, 2]

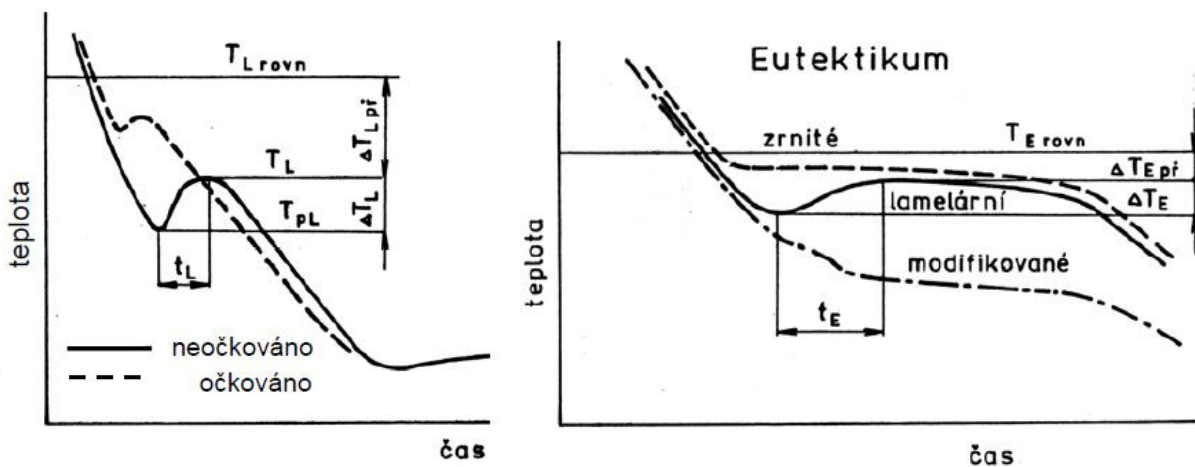
Modifikované eutektikum vzniká po modifikaci určitými prvky. Nejčastější modifikační prostředky jsou sodík a stroncium. Částice křemíku v tomto eutektiku mají vláknitý charakter a při pohledu na metalografický výbrus se jeví jako tečky. [1, 2]

Modifikátorem pro podeutektické slitiny hliníku může být sodík nebo stroncium. Modifikační efekt sodíku je velmi silný, avšak postupně ztrácí svůj účinek, jelikož se na hladině taveniny vypařuje do okolí. Pro prodloužení modifikačního účinku se používají modifikační tablety s pomalým rozpouštěním v tavenině. Sodík se z taveniny ztrácí také při odplyňování taveniny, proto se modifikuje až po odplynění. Obvykle se doporučuje, aby slitina obsahovala 0,005 až 0,01% Na. [1]

Stroncium je méně reaktivní než sodík a má nižší modifikační účinek. Používá se především ve formě předslitiny s hliníkem. Modifikační efekt stroncia nabíhá postupně, je proto vhodné odlévat až po několika minutách (řádově desítky minut) od modifikování. Stroncium se z taveniny ztrácí především oxidací, ale proces je relativně pomalý, proto modifikační účinek trvá kolem tří až šesti hodin. Dávkování se pohybuje obvykle v rozmezí 0,015 až 0,04% Sr. [1]

U slitin hliníku s křemíkem se vlivem modifikace mírně zvyšuje pevnost. Příčinou je právě změna tvaru eutektického křemíku. Výrazně se zvyšuje houževnatost a tažnost, která dosahují hodnoty až kolem 10%. [1, 2]

Kontrolu účinnosti modifikace lze provést například vyhodnocením záznamu z termické analýzy. Klasická termická analýza je jednou z metod, kterou lze stanovit teplotu likvidu dané slitiny a její další charakteristické teploty. Spočívá v odlití slitiny do zkušebního kelímku, kde přesný termočlánek zaznamenává průběh křivky chladnutí v závislosti na čase. Fázové přeměny, které ve sledovaném kovu probíhají, se projeví uvolňováním nebo pohlcováním tepla, tj. změnami na křivce $T = f(t)$. Výsledný tvar křivky závisí na celé řadě faktorů, přičemž velmi významnou roli hraje chemické složení zkoumaného systému a také rychlost ochlazování. Pro svoji jednoduchost a rychlost se klasická termická analýza používá ke kontrole stavu modifikace a očkování před odléváním. Účinek očkování se vyhodnocuje mírou přechlazení $\Delta T_{L\text{př}}$ pod rovnovážnou teplotu likvidu $T_{L\text{rovn}}$ a velikostí tzv. rekalescence ΔT_L . Čím menší tyto hodnoty jsou, tím lepší je účinek očkování. Morfologie eutektika se hodnotí v oblasti eutektické teploty. Vyhodnocuje se zde velikost přechlazení $\Delta T_{E\text{př}}$ pod rovnovážnou eutektickou teplotu $T_{E\text{rovn}}$, viz obr 2-9. [1, 14]



Obr. 2-9 Vyhodnocení očkování a modifikace z průběhu křivky chladnutí [1]

2.6 Tepelné zpracování

Převážná část odlitků ze slitin hliníku se používá ve stavu bez tepelného zpracování. Účelem tepelného zpracování hliníkových slitin je hlavně zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřních pnutí nebo zrovnoměnění chemického složení.

Pro značení způsobu tepelného zpracování odlitků se používají písmena F (odlitek pouze v litém stavu), O (odlitek žihán na odstranění vnitřního pnutí nebo žihán stabilizačně) nebo sada písmen T s jedním číslem nebo dvojčíslem upřesňujícím vlastnosti tepelného zpracování. [1]

Nejčastějším způsobem tepelného zpracování slitin hliníku je **vytvrzování**. Jedná se o způsob úpravy odlitků, které ztuhly relativně pomalu běžným způsobem v pískové nebo v kovové formě a přísadové prvky se tak vyloučily v rovnovážných intermediálních fázích, které jsou samy o sobě relativně hrubé a snižují houževnatost odlitku. Kompletní postup tohoto tepelného zpracování se skládá ze tří dílčích procesů. [1]

Prvním krokem je **rozpouštěcí žihání**, při kterém se odlitek ohřeje na teplotu, kde dochází ke zvýšení rozpustnosti přísady v tuhém roztoku hliníku a tím související rozpouštění intermediálních fází. Na této teplotě setrvá určitou dobu. Nesmí však dojít k překročení teploty solidu, což by vedlo k natavení hranic zrn a tím pádem i k degradaci mechanických vlastností slitiny.

Druhým krokem je **rychlé ochlazení**, které má za následek tvorbu přesyceného tuhého roztoku. Jako ochlazovací médium se zpravidla používá studená voda. Obsah rozpuštěné příměsi je tedy vyšší, než je rovnovážná rozpustnost při dané teplotě. Po tomto kroku je slitiny relativně měkká a dobře tvárná.

Posledním krokem je **stárnutí**, které má za následek rozpad nestabilního přesyceného tuhého roztoku a tvorbu precipitátů. Tento proces může být přirozený nebo umělý, podle toho při jaké teplotě probíhá. Přirozené stárnutí probíhá u některých slitin již při teplotě okolí, kdežto umělé stárnutí se provádí dodatečným ohřevem na předepsanou teplotu, na které se odlitek ponechá po určitou dobu a poté následuje pomalé ochlazení.

3 Experimentální část

Experiment byl proveden ve spolupráci s firmou Unitherm s.r.o. sídlící v Jablonci nad Nisou. Firma vyrábí odlitky ze slitin hliníku lité do pískových a kovových forem gravitačním i nízkotlakým odléváním.

V rámci experimentu byl sledován vliv řízeného naplynění na mechanické vlastnosti a chemické složení slitiny EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3). Míra naplynění byla klasifikována indexem hustoty a v závislosti na této hodnotě bylo provedeno metalografické zhodnocení pórovitosti. Byla provedena spektrální analýza, tj. měření obsahu jednotlivých prvků ve slitině a dále termická analýza k posouzení míry očkování a modifikace. Vyhodnocení mechanických vlastností bylo realizováno za pomoci statické zkoušky tahem a zkoušky tvrdosti podle Brinella.

3.1 Příprava vzorků

Tavenina slitiny AlSi7Mg0,3 o celkové hmotnosti 190 kg byla připravena z housek a vratu, jejichž poměr byl přibližně 3:2. Natavení proběhlo v elektrické odporové peci, další procesy byly provedeny v elektrické udržovací peci při teplotách přibližně 710 až 720°C, teplota taveniny byla měřena digitálním termočlánkovým teploměrem.

Tavenina byla pročištěna rafinační solí *Arsal 2125* (200 g) a dále odplyněna dusíkem za pomoci FDU. Proces odplyňování trval 6 minut při průtoku dusíku 17,5 l/min. Během odplyňování bylo do taveniny vmícháno 400 g AlTi5B1 (5 tyček) pro iniciaci očkování a po ukončení odplynění se následně za účelem modifikace přidalo 400 g AlSr10 (5 tyček). Takto rafinovaná, odplyněná, naočkovaná a modifikovaná tavenina je označena „stavem 0“.

V dalším kroku se do taveniny o teplotě 715°C přidalo 300 g soli *Probat Fluss Begaser 200*. Sůl byla vsypána do taveniny a přiklopena ponorným zvonem ke dnu. Po tomto naplynění je tavenina v metalurgickém stavu označeném jako „stav 1“. Dále proběhlo zopakování procesu naplynění dalšími 300 g naplyňovací soli, čemuž odpovídá označení „stav 2“.

V každém z těchto tří stavů bylo provedeno odebrání vzorků pro měření indexu naplynění, zhotovení vzorků na spektrální a termickou analýzu, odlití dvaceti zkušebních vzorků k tahové zkoušce, kde 10 zkušebních vzorků bylo ponecháno bez tepelného zpracování (F) a 10 zkušebních vzorků bylo následně tepelně zpracováno (T6 – rozpouštěcí žihání při teplotě 535°C po dobu 8 hod., ochlazení do vody o teplotě 40°C, umělé stárnutí při teplotě 150°C po dobu 4 hod.)

Označení stavů:

- „Stav 0“ – tavenina po rafinaci taveniny, odplynění, očkování a modifikaci
- „Stav 1“ – tavenina po prvním naplynění
- „Stav 2“ – tavenina po druhém naplynění

3.2 Měření indexu hustoty

Index hustoty (DI) je základním referenčním parametrem celého experimentu. Při naplyňování taveniny vodíkem se jeho hodnota zvyšuje, viz kapitola 2.3.2. Další zkoumané vlastnosti jsou hodnoceny právě v závislosti na velikosti tohoto parametru.



Obr. 3-1 Příklad přístroje *Vacuum Density Tester* od firmy *MK GmbH*

Z připravené taveniny byl odebrán materiál a vlit do dvou kelímků, přičemž jeden z nich byl umístěn ve vakuové komoře a tuhnul při nízkém tlaku (cca 8000 Pa), viz obr. 3-1. Takto připravené vzorky se měřili metodou dvojího vážení, viz kapitola 2.3.2. V každém stavu bylo měření provedeno dvakrát, výsledná hodnota DI je průměrem z obou měření. Výsledky jsou zapsány v tabulce 3.1.

Po prvním naplynění stoupl DI o cca 10%. Druhé naplynění nebylo již tak efektivní, hodnota DI stoupla jen o cca 3%. U většiny naplyňovaných odlitků vyráběných ve firmě Unitherm se hodnoty DI pohybují v rozmezí 15 až 20%.

Tabulka 3.1 Měření indexu hustoty

	DI [%]		Průměrná hodnota DI [%]
	1. měření	2. měření	
Stav 0	6,06	7,2	6,6
Stav 1	15,5	17,83	16,7
Stav 2	18,53	20,7	19,6

3.3 Spektrální analýza

Měření bylo provedeno na zařízení SPECTROCAST na vzorcích odebraných z každého ze tří stavů. Cílem měření bylo zaznamenat změny chemického složení taveniny po jednotlivých fázích naplynění. Na vzorcích proběhlo celkem šest měření v různých místech, viz obr. 3-2. Výsledky měření jednotlivých stavů jsou zapsány v tabulkách 3.2, 3.3 a 3.4.



Obr. 3-2 Přístroj SPECTROCAST s měřeným vzorkem

Tabulka 3.2 Výsledky měření spektrální analýzy vzorku stavu 0

Prvek	Obsah prvku [%]						Průměr
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	6. měření	
Si	7,18	7,18	7,14	7,18	7,14	7,20	7,17
Fe	0,158	0,159	0,154	0,159	0,158	0,159	0,158
Cu	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	0,31	0,31	0,30	0,31	0,32	0,31	0,31
Zn	0,031	0,032	0,032	0,031	0,031	0,031	0,031
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	0,007	0,007	0,007	0,007	0,006	0,007	0,007
Pb	0,005	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005	0,006
Sn	0,014	0,014	0,014	0,014	0,013	0,014	0,014
Ti	0,108	0,108	0,106	0,106	0,106	0,106	0,107
Ca	0,0000	0,0004	<0,0000	<0,0000	<0,0000	0,0005	<0,0005
Na	<0,0000	<0,0000	<0,0000	<0,0000	<0,0000	<0,0000	<0,0005
Sr	0,023	0,023	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Al	92,14	92,13	92,18	92,13	92,17	92,11	92,14

Tabulka 3.3 Výsledky měření spektrální analýzy vzorku stavu 1

Prvek	Obsah prvku [%]						
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	6. měření	Průměr
Si	7,14	7,19	7,24	7,03	7,08	7,25	7,16
Fe	0,155	0,160	0,158	0,156	0,157	0,162	0,158
Cu	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,29
Zn	0,031	0,030	0,029	0,030	0,030	0,030	0,030
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Pb	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Sn	0,013	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Ti	0,102	0,106	0,105	0,102	0,101	0,098	0,102
Ca	<0,0000	0,0004	0,0007	0,0006	0,0006	0,0007	<0,0005
Na	<0,0000	0,0009	0,0014	0,0002	<0,0000	<0,0000	<0,0005
Sr	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Al	92,21	92,16	92,16	92,33	92,27	92,10	92,21

Tabulka 3.4 Výsledky měření spektrální analýzy vzorku stavu 2

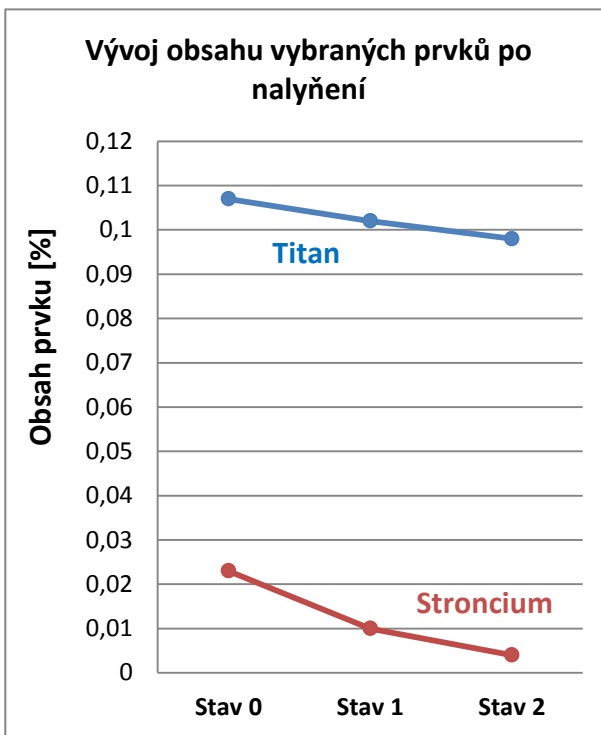
Prvek	Obsah prvku [%]						
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	6. měření	Průměr
Si	6,94	7,03	6,99	7,06	7,08	7,05	7,03
Fe	0,157	0,158	0,152	0,162	0,162	0,157	0,158
Cu	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	0,28	0,28	0,27	0,29	0,29	0,28	0,28
Zn	0,031	0,029	0,030	0,029	0,029	0,028	0,029
Ni	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Pb	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Sn	0,013	0,012	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
Ti	0,100	0,094	0,099	0,099	0,096	0,100	0,098
Ca	<0,0000	0,0005	0,0003	0,0005	0,0003	0,0009	<0,0005
Na	<0,0000	<0,0000	<0,0000	<0,0000	<0,0000	0,0008	<0,0005
Sr	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Al	92,44	92,36	92,4	92,31	92,29	92,34	92,36

Obsahy prvků jsou zapsány v procentech, označení „<0,0000“ nebo např. „<0,0005“ znamená, že obsah daného prvku je pod hranicí měřitelné prahové hodnoty přístroje.

V následující tabulce 3.5 s grafem jsou pro názornost shrnuty průměrné hodnoty obsahu jednotlivých prvků v každém ze stavů. U prvku důležitého při modifikaci (Sr) byl zaznamenán vysoký úbytek obsahu po prvním i po druhém naplynění. Optimální hodnoty obsahu stroncia udávané firmou se pohybují kolem 0,020%. Z měření vyplývá, že obsah stroncia poklesl výrazně pod optimální hodnotu. Obsah očkovačského prvku (Ti) se snížil slabě a vnitřním firemním předpisům vyhovuje. Dále se v tavenině nepatrně snížil podíl křemíku, hořčíku a zinku.

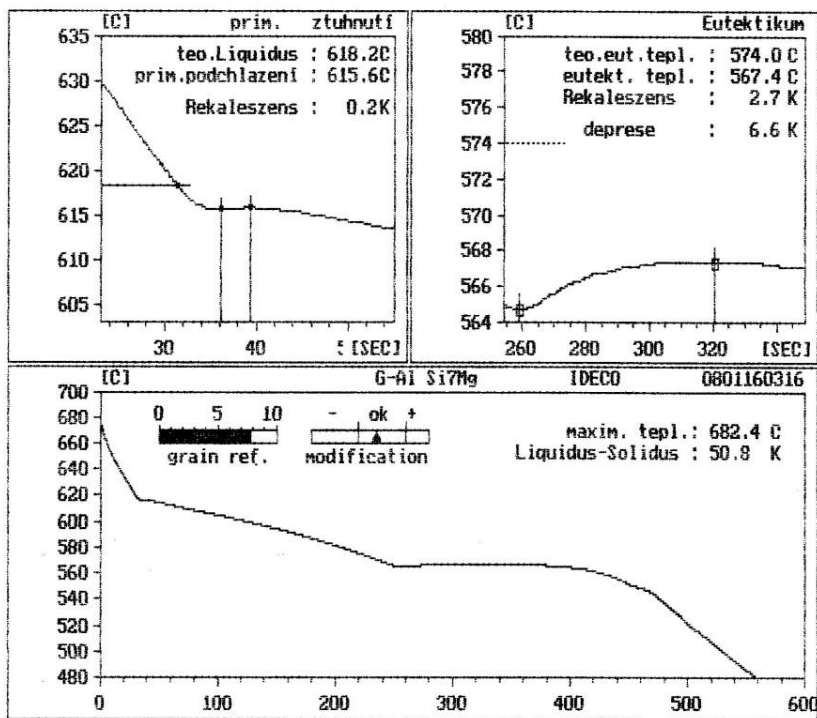
Tabulka 3.5 Souhrn výsledků spektrální analýzy v porovnání s hodnoty udávané normou

Prvek	Obsah prvku [%]			Dle normy ČSN EN 1706
	Stav 0	Stav 1	Stav 2	
Si	7,17	7,16	7,03	6,50 - 7,50
Fe	0,158	0,158	0,158	max. 0,190
Cu	0,005	0,005	0,005	max. 0,050
Mn	0,01	0,01	0,01	max. 0,100
Mg	0,31	0,29	0,28	0,25 - 0,45
Zn	0,031	0,030	0,029	max. 0,070
Ni	0,01	0,01	0,01	-
Cr	0,007	0,006	0,006	-
Pb	0,006	0,005	0,005	-
Sn	0,014	0,013	0,012	-
Ti	0,107	0,102	0,098	max. 0,250
Ca	<0,0005	<0,0005	<0,0005	max. 0,030
Na	<0,0005	<0,0005	<0,0005	-
Sr	0,023	0,010	0,004	-
Zr	0,002	0,002	0,002	max. 0,030
Al	92,14	92,21	92,36	zbytek

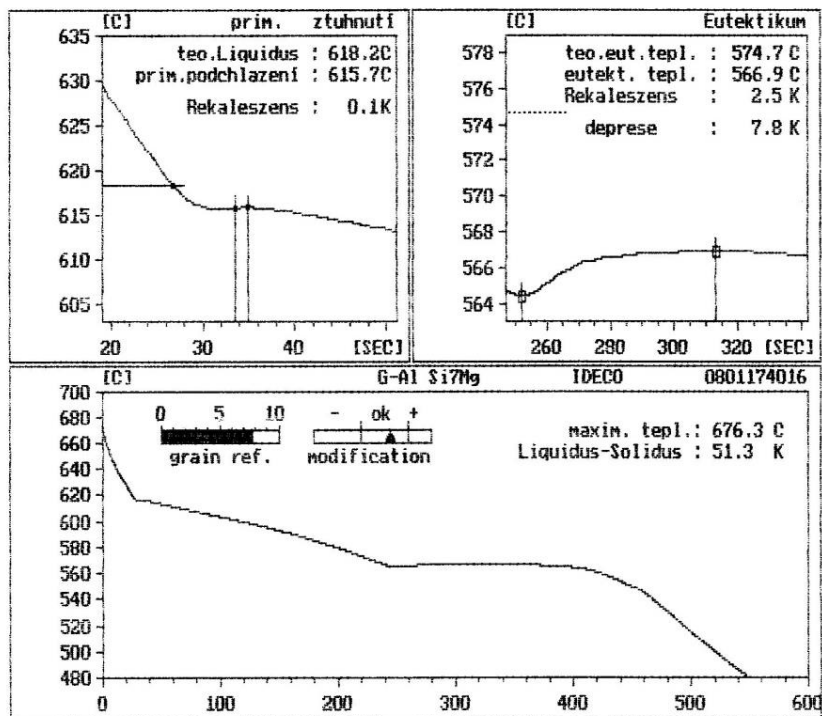


3.4 Termická analýza

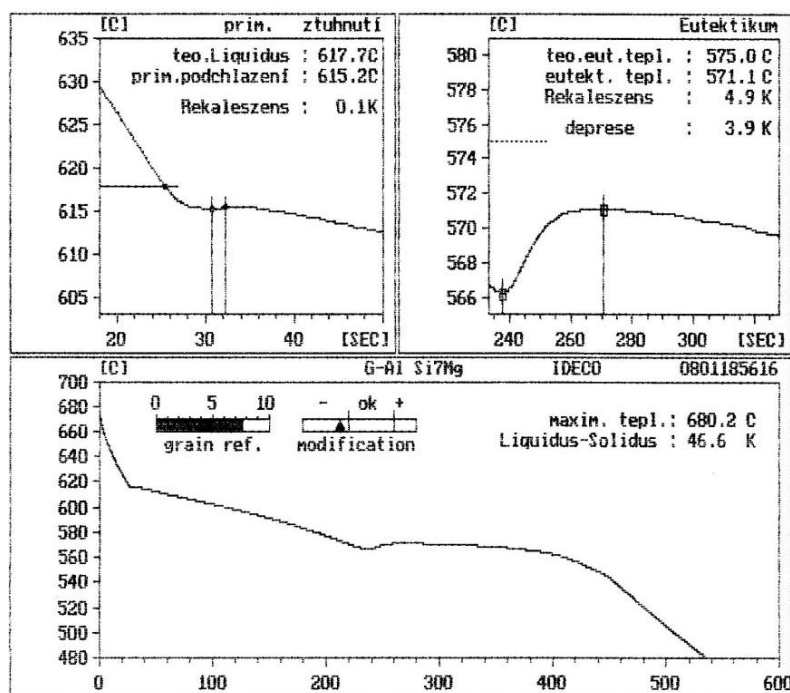
Měření probíhalo na přístroji IDECO. Vzorek pro tuto analýzu byl odlit v každém ze tří stavů. Záznamy na obrázcích 3-3, 3-4 a 3-5 ukazují, že po druhém naplynění, respektive ve stavu 2, se výrazně snížil účinek modifikace (ukazatel *modification* se nenachází v přípustném rozmezí, jako tomu bylo ve stavu 0 a stavu 1). Ukazatel velikosti zrna (*grain ref.*) zůstal přibližně stejný a na dostatečné úrovni.



Obr. 3-3 Záznam z termické analýzy stavu 0



Obr. 3-4 Záznam z termické analýzy stavu 1

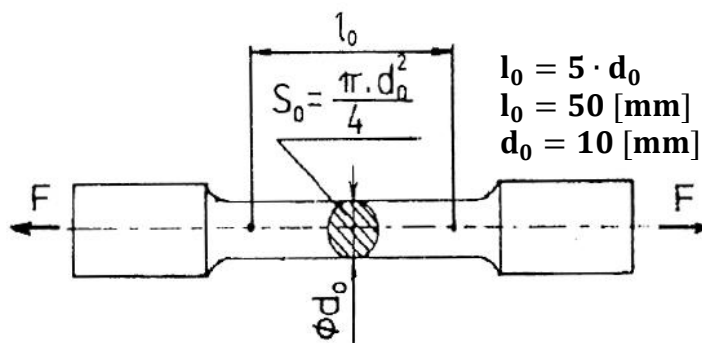


Obr. 3-5 Záznam z termické analýzy stavu 2

3.5 Statická zkouška tahem

Tahová zkouška byla provedena za účelem ověření mechanických vlastností slitiny před a po jejím naplynění. Z každého stavu bylo odlito 20 zkušebních vzorků, viz obr. 3-6. Po obrobení bylo 10 vzorků ponecháno bez tepelného zpracování, u zbylých 10 vzorků proběhlo vytvrzování. Některé vzorky byly vyřazeny ještě před samotným měřením a to z důvodu povrchových vad.

Parametry zkoušky jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška byla provedena na trhacím stroji firmy *VEB TIW Rauenstein* ovládaném pomocí počítače v místnosti s teplotou vzduchu 20°C. Rychlost zatěžování byla stanovena na 1 mm/min. Záznam obsahuje smluvní mez kluzu **Rp_{0,2}**, mez pevnosti **Rm**, tažnost **A₅** a kontrakci **Z**. Jednotlivé výsledky měření jsou zaznamenána do tabulek 3.6, 3.7 a 3.8.



Obr. 3-6 Rozměry zkušebního vzorku

Tabulka 3.6 Souhrn údajů z tahové zkoušky stavu 0

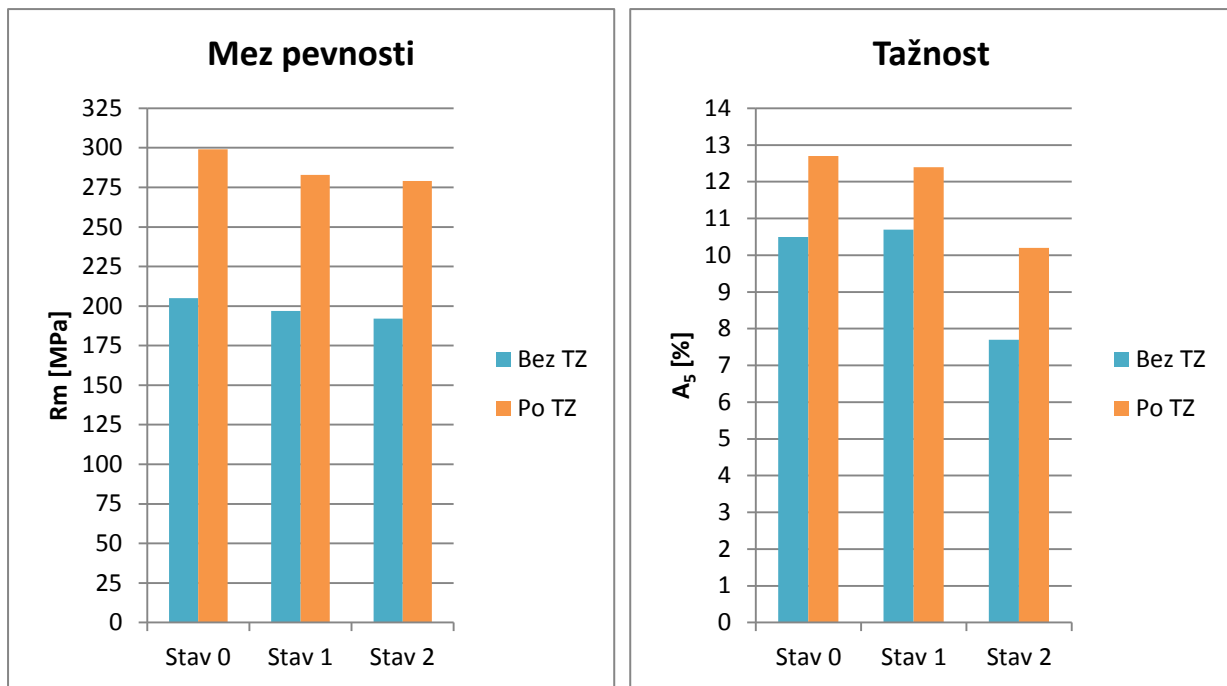
Stav 0 bez tepelného zpracování					Stav 0 po tepelném zpracování				
Číslo vzorku	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	Číslo vzorku	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]
1	113,0	211,5	11,7	8,5	1	215,8	300,9	15,7	17,6
2	110,2	206,0	10,8	11,3	2	217,3	291,7	7,9	10,2
3	116,5	211,3	13,1	14,9	3	215,8	300,6	14,9	17,4
4	113,3	204,5	12,3	13,0	4	217,3	301,6	14,3	17,6
5	112,9	206,6	11,3	10,9	5	217,4	290,8	7,0	7,0
6	112,8	203,1	8,9	10,6	6	221,6	303,0	12,9	15,2
7	111,7	192,7	6,2	6,2	7	219,4	302,8	16,4	15,2
8	110,6	201,8	10,2	12,5	8	218,6	300,0	12,6	11,7
9	107,9	206,4	10,0	9,8	9	-	-	-	-
Průměr	112,1	204,9	10,5	10,9	Průměr	217,9	298,9	12,7	14,0
S. odch.	2,4	5,6	2,0	2,6	S. odch.	1,9	4,9	3,5	3,9

Tabulka 3.7 Souhrn údajů z tahové zkoušky stavu 1

Stav 1 bez tepelného zpracování					Stav 1 po tepelném zpracování				
Číslo vzorku	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	Číslo vzorku	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]
1	106,6	197,0	10,8	12,1	1	202,6	280,9	12,7	13,3
2	106,4	198,9	12,0	12,5	2	206,6	283,1	13,2	12,4
3	108,8	199,1	10,3	10,2	3	203,2	283,1	10,6	12,4
4	106,9	195,4	9,9	9,2	4	207,1	286,8	15,4	13,2
5	105,2	197,7	10,2	9,1	5	203,2	283,7	11,1	14,1
6	105,2	197,7	11,6	10,8	6	202,8	280,8	13,2	13,7
7	107,2	198,1	11,9	11,1	7	207,9	284,3	13,2	12,2
8	107,5	196,1	9,5	9,4	8	203,4	281,8	9,8	10,3
Průměr	106,7	197,5	10,8	10,6	Průměr	204,6	283,0	12,4	12,7
S. odch.	1,2	1,3	1,0	1,3	S. odch.	2,2	2,0	1,8	1,2

Tabulka 3.8 Souhrn údajů z tahové zkoušky stavu 2

Stav 2 bez tepelného zpracování					Stav 2 po tepelném zpracování				
Číslo vzorku	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	Číslo vzorku	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]
1	108,2	189,6	6,7	6,9	1	200,9	275,9	8,9	11,8
2	105,1	192,3	8,7	8,3	2	199,0	274,6	9,5	11,6
3	104,7	190,3	8,3	7,7	3	205,3	287,0	12,3	13,5
4	103,5	189,7	7,6	6,9	4	205,2	285,5	10,2	14,4
5	109,4	196,9	8,0	7,1	5	197,9	274,1	9,5	13,0
6	106,5	193,7	7,0	5,7	6	207,1	287,4	11,0	15,4
7	105,4	190,8	7,5	8,6	7	204,7	277,3	11,8	13,5
8	105,6	192,2	7,1	7,5	8	200,0	275,9	10,0	12,8
9	105,3	192,4	8,1	8,8	9	197,2	271,5	8,7	9,3
Průměr	105,9	192,0	7,7	7,5	Průměr	201,9	278,9	10,2	12,8
S. odch.	1,8	2,3	0,7	1,0	S. odch.	3,7	6,0	1,3	1,8



Obr. 3-7 Porovnání výsledků tahové zkoušky

Měření ukazuje tendenci ke snižování mechanických vlastností slitiny po použití naplyňovací soli, viz obr 3-7. Ve vytvrzeném stavu vykazuje slitina výrazně vyšší mechanické vlastnosti oproti stavu bez tepelného zpracování (mez pevnosti vzrostla přibližně o 45%). Hodnoty mechanických vlastností v odplyněném a vytvrzeném stavu 0 odpovídají minimálním hodnotám udávaných normou, viz tabulka 2.2 v kapitole 2.2.1.

3.6 Zkouška tvrdosti

Pro doplnění proběhlo na vzorcích ze statické zkoušky tahem měření tvrdosti dle Brinella. Na vzorcích byla vyfrézována oblast, na níž se provedly tři vpichy, viz obr. 3-8. Zkouška je popsána v normě ČSN EN ISO 6506-1. Pro měření bylo použito zkušební tělísko z tvrdokovu o průměru 2,5 mm a zatěžující síla 62,5 kilopond, což je přibližně 613 N. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 3.9, 3.10 a 3.11.



Obr. 3-8 Místa vpichů pro měření tvrdosti

Tabulka 3.9 Souhrn naměřených hodnot tvrdosti stavu 0

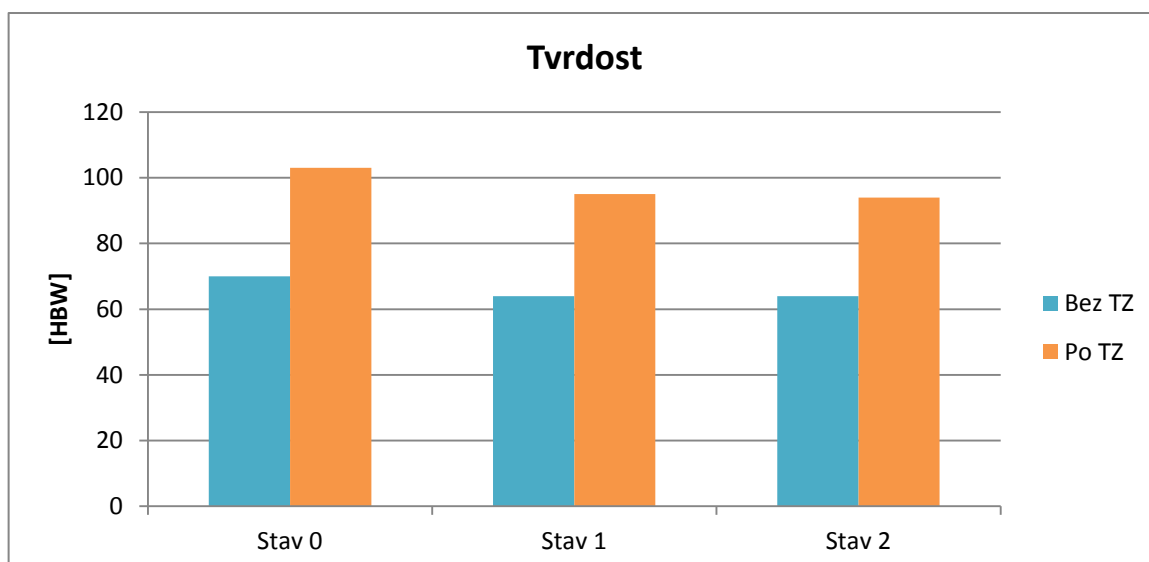
Stav 0 bez tepelného zpracování [HBW]					Stav 0 po tepelném zpracování [HBW]				
Číslo vzorku	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	Číslo vzorku	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota
1	67,5	68,2	72,0	69,2	1	104	103	105	104,0
2	72,0	68,8	71,7	70,8	2	106	106	106	106,0
3	68,8	67,5	73,3	69,9	3	104	102	104	103,3
4	72,8	74,7	72,4	73,3	4	102	102	104	102,7
5	70,2	68,5	68,2	69,0	5	101	104	102	102,3
6	69,9	69,5	68,8	69,4	6	101	108	101	103,3
7	70,6	67,8	69,2	69,2	7	101	102	101	101,3
8	68,2	68,2	69,5	68,6	8	102	104	104	103,3
9	68,2	67,5	62,4	66,0	-	-	-	-	-
Průměrná hodnota celého měření:				69,5	Průměrná hodnota celého měření:				103,3
Směrodatná odchylka:				1,9	Směrodatná odchylka:				1,4

Tabulka 3.10 Souhrn naměřených hodnot tvrdosti stavu 1

Stav 1 bez tepelného zpracování [HBW]					Stav 1 po tepelném zpracování [HBW]				
Číslo vzorku	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	Číslo vzorku	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota
1	64,2	63,9	63,6	64,0	1	97,7	95,5	95,0	96,1
2	63,3	62,7	65,5	63,8	2	93,9	89,7	92,3	92,0
3	63,9	64,6	64,2	64,2	3	93,3	94,4	93,9	93,9
4	63,9	63,3	63,3	63,5	4	96,6	96,6	97,7	97,0
5	64,2	64,9	64,6	64,6	5	97,7	98,3	92,8	96,3
6	63,9	62,7	63,6	63,4	6	94,4	95,5	93,9	94,6
7	63,0	64,6	63,6	63,7	7	94,4	96,6	97,2	96,1
8	65,2	63,6	64,9	64,6	8	95,5	97,7	94,4	95,9
9	67,5	63,3	63,6	64,8	9	96,6	97,7	93,3	95,9
Průměrná hodnota celého měření:				64,1	Průměrná hodnota celého měření:				95,3
Směrodatná odchylka:				0,5	Směrodatná odchylka:				1,6

Tabulka 3.11 Souhrn naměřených hodnot tvrdosti stavu 2

Stav 2 bez tepelného zpracování [HBW]					Stav 2 po tepelném zpracování [HBW]				
Číslo vzorku	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	Číslo vzorku	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota
1	67,5	67,8	66,8	67,4	1	94,4	94,4	95,5	94,8
2	66,5	67,5	66,8	66,9	2	97,2	94,4	93,9	95,2
3	65,2	63,3	62,7	63,7	3	95,5	97,7	98,3	97,2
4	62,4	63,0	63,9	63,1	4	89,7	91,2	91,2	90,7
5	61,8	63,3	63,0	62,7	5	95,0	97,7	97,2	96,6
6	63,9	64,6	66,2	64,9	6	98,3	90,7	92,3	93,8
7	65,5	66,2	64,6	65,4	7	92,3	90,2	94,4	92,3
8	63,3	62,1	64,2	63,2	8	91,2	91,8	90,7	91,2
9	66,8	67,1	63,9	65,9	9	92,8	94,4	90,7	92,6
Průměrná hodnota celého měření:				64,8	Průměrná hodnota celého měření:				93,8
Směrodatná odchylka:				1,7	Směrodatná odchylka:				2,3



Obr. 3-9 Grafické zpracování hodnot tvrdosti podle Brinella

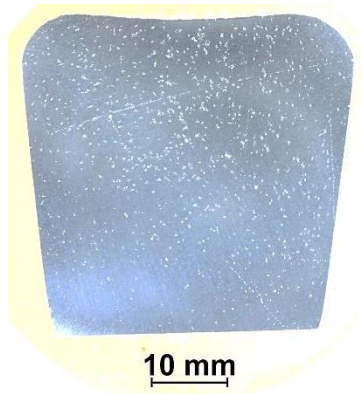

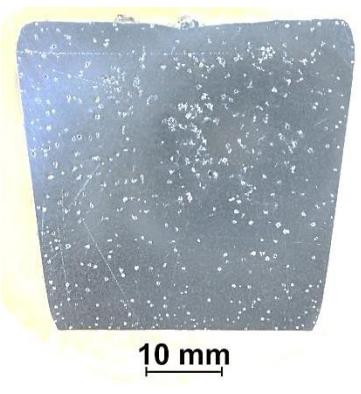

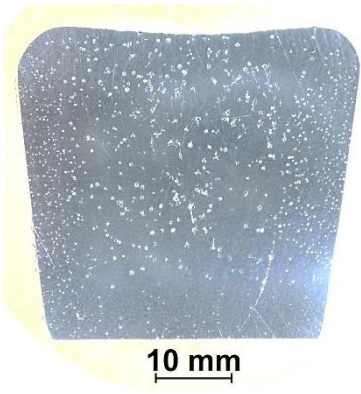
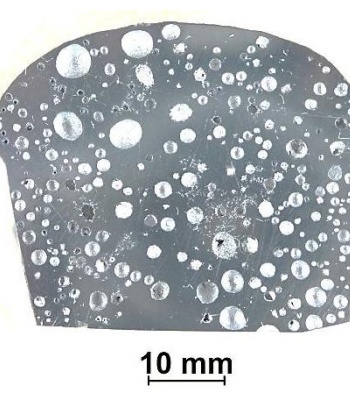
K poklesu tvrdosti došlo po prvním naplynění. Hodnoty tvrdosti ve stavu 1 a 2 se příliš neliší. Minimální velikost tvrdosti po tepelném zpracování udávaná normou ČSN EN 1706 je zaručena ve všech třech stavech, viz tabulka 2.2 v kapitole 2.2.1.

3.7 Metalografické hodnocení

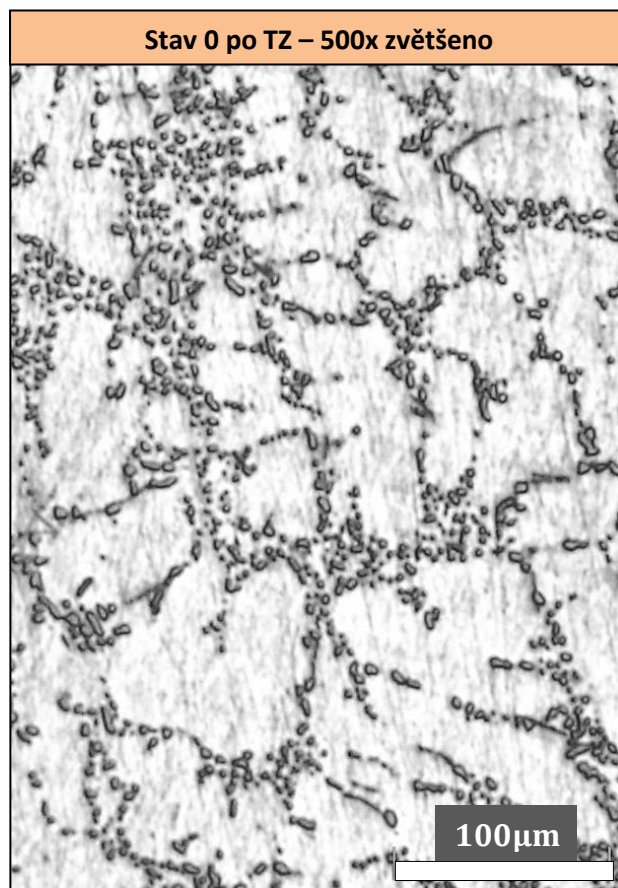
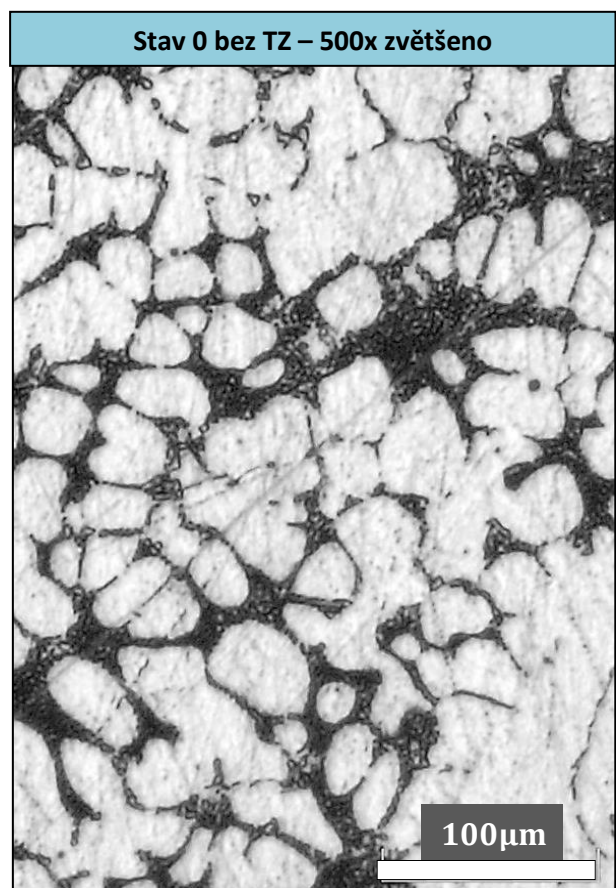
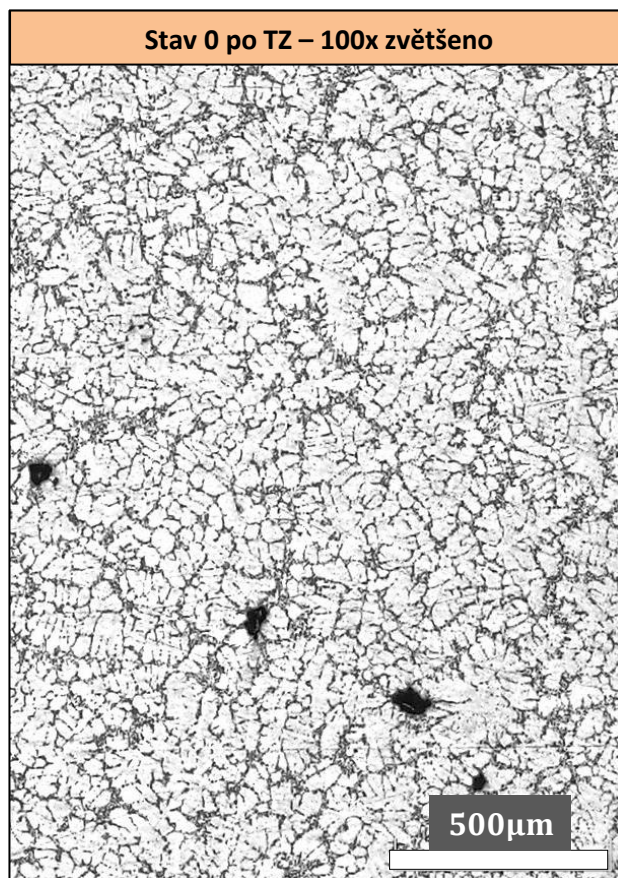
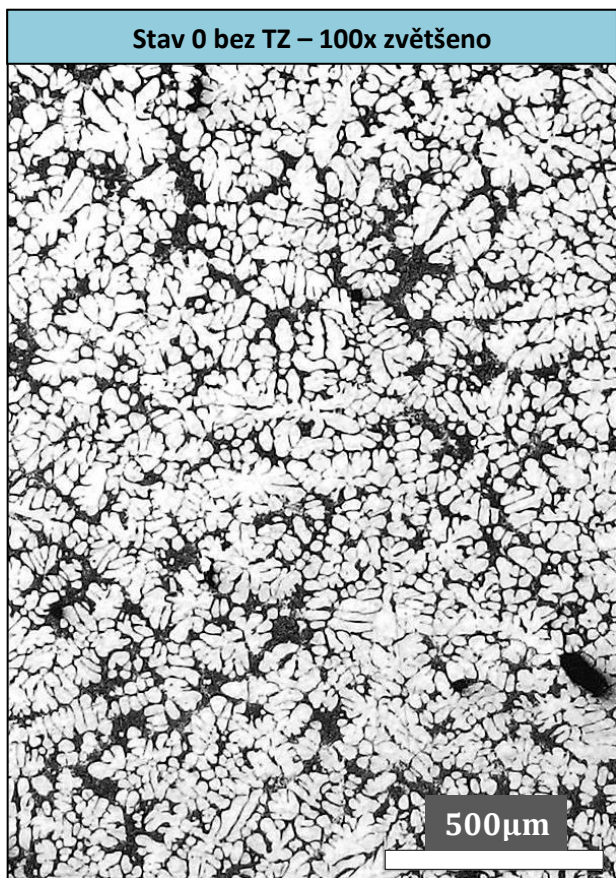
Pro orientační zhodnocení míry naplynění byly vzorky použité pro měření indexu hustoty (viz kap. 3.2) metalograficky zpracovány. Na vzorcích uvedených na obr. 3-10 bylo provedeno pouze vizuální zhodnocení koncentrace a velikosti bublin. Ze vzorků je patrné, že první i druhé naplynění se projevilo zvýšeným objemem bublin u vzorků tuhnuících ve vakuu, tj. vyšším obsahem vyloučeného vodíku.

Dále byla na částech odebraných ze zkušebních vzorků použitých při tahové zkoušce (z nedeformované části hlavy) sledována struktura. Vzorky byly připraveny běžným metalografickým procesem. Pro zvýraznění struktury byly naleptány 0,5% roztokem kyseliny fluorovodíkové ve vodě. Následně se zhotovilo několik fotografií pod mikroskopem s pětisetnásobným a stonásobným zvětšením, viz obr. 3-11, 3-12 a 3-13.

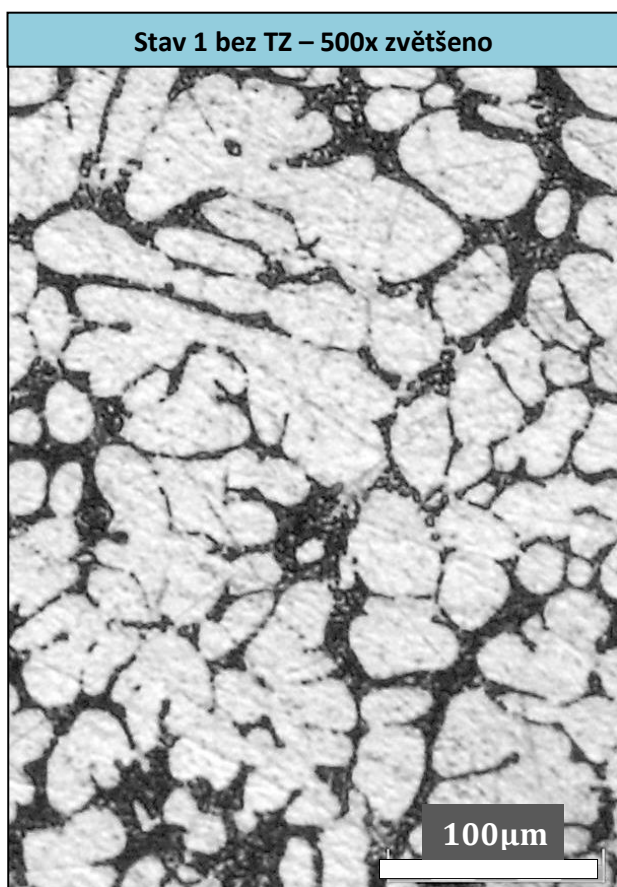
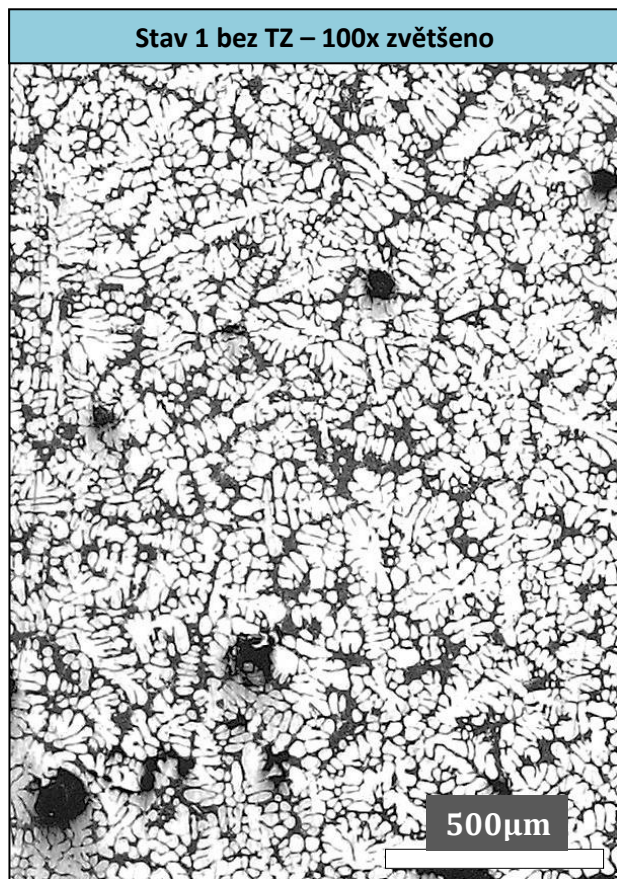
Na fotografiích je dobře patrná struktura modifikovaného eutektika, viz kapitola 2.5 a také porézita tvořená kombinací mikrostaženin a plynových bublin, viz kapitola 2.3.2. Na vzorku ze stavu 2 bez tepelného zpracování lze zaznamenat nedokonale modifikovanou strukturu eutektika.

 <p>10 mm</p>	<p>DI 6,6 %</p>	 <p>10 mm</p>
<p>Stav 0 – vzorek ztuhlý na vzduchu</p>		<p>Stav 0 – vzorek ztuhlý ve vakuu</p>
 <p>10 mm</p>	<p>DI 16,7 %</p>	 <p>10 mm</p>
<p>Stav 1 – vzorek ztuhlý na vzduchu</p>		<p>Stav 1 – vzorek ztuhlý ve vakuu</p>
 <p>10 mm</p>	<p>DI 19,6 %</p>	 <p>10 mm</p>
<p>Stav 2 – vzorek ztuhlý na vzduchu</p>		<p>Stav 2 – vzorek ztuhlý ve vakuu</p>

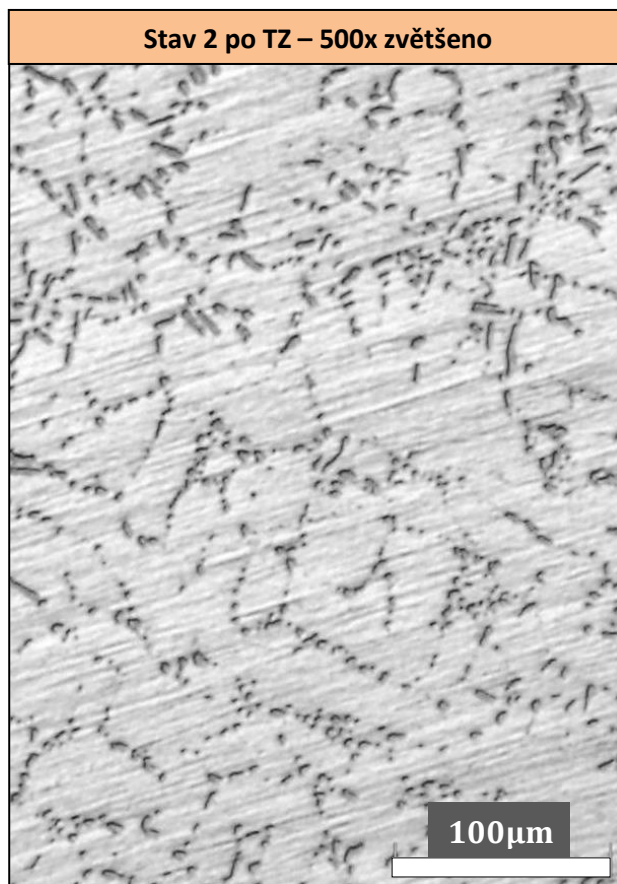
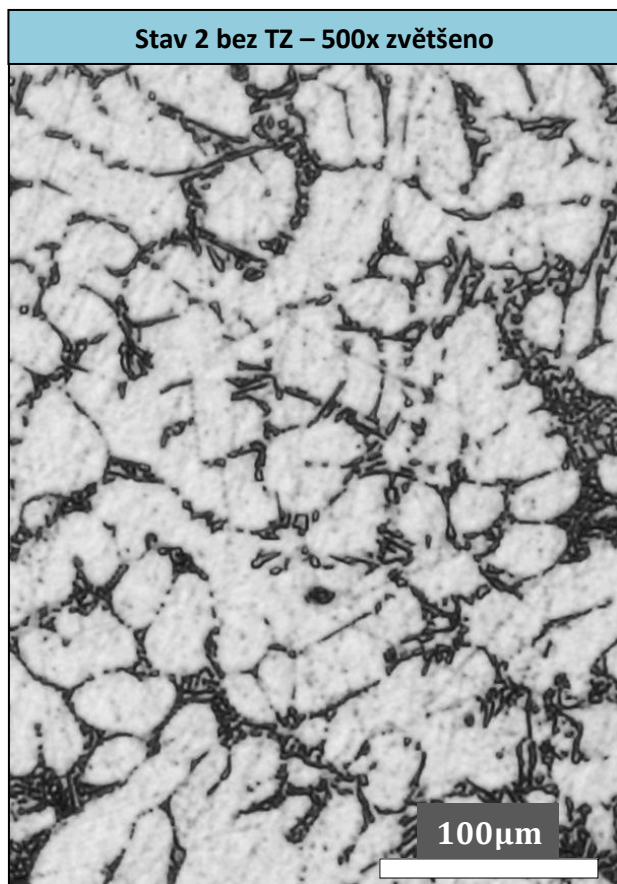
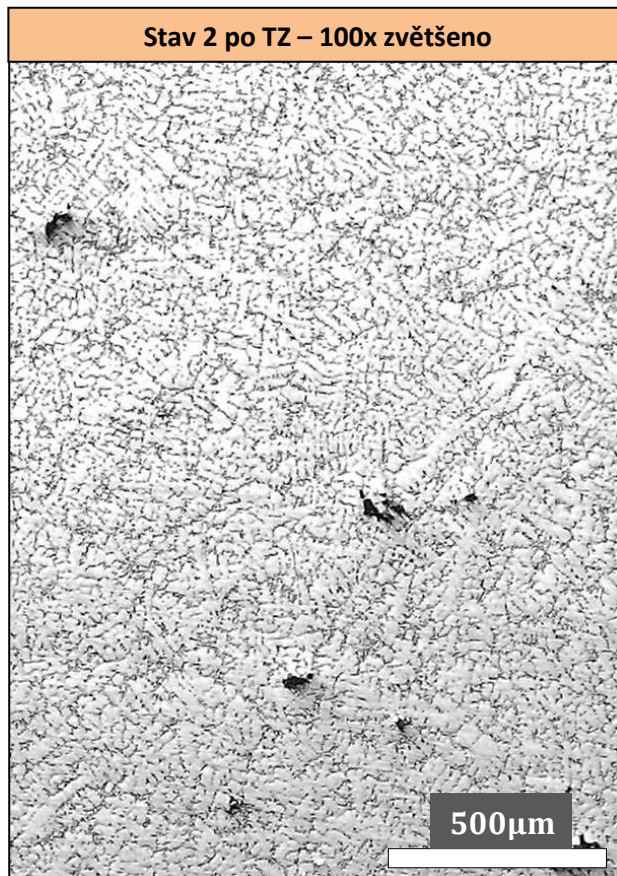
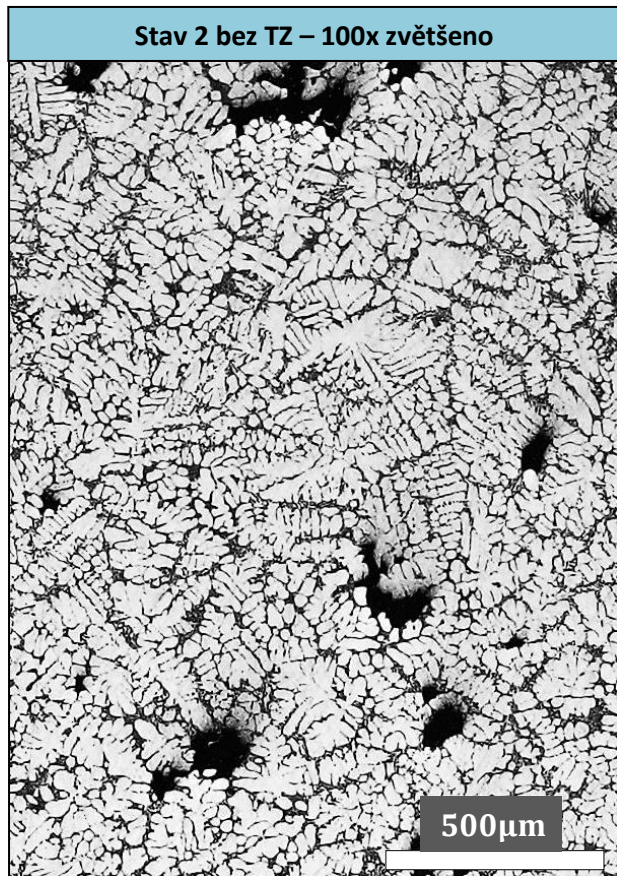
Obr. 3-10 Makroskopické fotografie vzorků



Obr. 3-11 Struktura vzorků stavu 0



Obr. 3-12 Struktura vzorků stavu 1



Obr. 3-13 Struktura vzorků stavu 2

4 Závěr

Hlavním cílem práce bylo zhodnotit vliv procesu naplynění na chemické složení slitiny EN AC-42100 a jeho dopady na mechanické vlastnosti jako jsou mez pevnosti v tahu, tažnost a tvrdost.

Práce se ve své teoretické části zabývá slitinami hliníku, respektive siluminy a jejich metalurgickému zpracování zahrnující rafinační a odplyňovací procesy, očkování a modifikaci. Samostatná kapitola je s ohledem na cíl práce věnována řízenému naplyňování taveniny.

V rámci experimentu bylo provedeno natavení a metalurgické zpracování slitiny AlSi7Mg0,3. Experimenty ukázaly, že přidáním 300 g soli *Probat Fluss Begaser 200* došlo ke zvýšení indexu hustoty o 10%. Další naplynění stejnou dávkou soli nemělo takový účinek, index hustoty stoupl pouze o 3%

Z výsledků spektrální a termické analýzy vyplynulo, že naplyňování výrazně odstraňovalo z taveniny stroncium, jehož obsah klesl z původní hodnoty 0,023% po prvním naplynění o více jak polovinu (pokles na 0,010%). Po druhém naplynění jej zbyla pouze přibližně jedna šestina z původního množství (pokles na 0,004%). Takto nízký obsah je již pro adekvátní modifikaci nevyhovující. Pokles obsahu ostatních prvků nebyl významný.

Po naplynění vykazovala slitina nižší hodnoty meze pevnosti, meze kluzu, tažnosti a kontrakce. Mez pevnosti byla vzhledem k počátečnímu stavu cca o 5% nižší po prvním naplynění a cca o 7% nižší po druhém naplynění. Tvrdost se po prvním naplynění snížila přibližně o 8%. Po druhém naplynění nedošlo k výrazným změnám tvrdosti.

Z metalografických snímků se dalo vypožorovat, že vyšší index hustoty se projevil vyšší koncentrací porezity. Na fotografiích struktur bylo také dobře patrné modifikované eutektikum na vzorcích stavu 0 a stavu 1 a struktura s vyloučeným precipitátem u vzorků po vytvrzování. Stav 2 vykazoval ve své struktuře nedokonalý modifikační účinek.

Prvotní experiment ukázal, že z praktického hlediska je nezbytné sledovat úbytky stroncia po naplynění a zajistit jeho doplnění, případně zahájit modifikaci až po řízeném naplynění. Pokles obsahu ostatních prvků nebyl příliš významný, ovšem je vhodné kontrolovat míru úbytku hořčíku, který má vliv na vytvrzování a také titanu, který zprostředkovává očkování.

Hodnoty DI ve stavech 1 a 2 (16,7% a 19,6%.) jsou pro některé odlitky vyráběné ve firmě Unitherm běžné a proto lze výsledky experimentu zohledňovat ve výrobním procesu.

Seznam použité literatury

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [2] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OTČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s. r. o., 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [3] JANOVEC, Jiří, Karel MACEK a Petr ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-80-01-02935-0
- [4] MURGAŠ, Marián. *Teória zlievarenstva*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2002. Edícia skript. ISBN 80-227-1684-7.
- [5] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [6] KRÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, 1994. ISBN 80-85827-58-1.
- [7] VRTÍLEK, Jan. *Způsoby naplynění taveniny a redukce staženin*. Brno, 2007.
- [8] HORKÝ, Karel a Jan VRTÍLEK. *Eliminace staženin pomocí přípravku Probat Fluss MIKRO 100*. Slévárenství. 2008, (7-8).
- [9] VOGEL, W., KADNER, M., STELTER, M., EIGENFELD, K.: *Vermeidung von schwindungsbedingten Gussfehlern durch nanostrukturierte Oxide*, In.: Giesserei, 02/2011.
- [10] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [11] *PRIMARY ALUMINIUM PRODUCTION* [online]. 2016 [cit. 2016-06-30]. Dostupné z: <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/#data>
- [12] BARTHELMY, David. Mineral Species containing Aluminium. In: *Mineralogy database* [online]. 2010 [cit. 2016-06-30]. Dostupné z: <http://webmineral.com/>
- [13] BRAY, Lee. Bauxite and alumina. In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY *Mineral Commodity Summaries* [online]. 2013 [cit. 2016-06-30]. Dostupné z: <http://minerals.usgs.gov/>
- [14] VŠCHT. *Termická analýza* [online]. Praha, 2008 [cit. 2016-06-30]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_termicka_analyza/index.htm