

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství



**Vliv mikrostruktury a vad na mechanické vlastnosti Al-Si slitin  
po nízkotlakém odlévání**

**Effect of microstructure and defects on mechanical properties  
of low-pressure cast Al-Si alloys**

Autor práce: Bc. Ondřej Harabiš

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Monika Losertová

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Harabiš**

Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911T036 Progresivní technické materiály

Téma: **Vliv mikrostruktury a vad na mechanické vlastnosti Al-Si slitin po nízkotlakém odlévání**  
**Effect of microstructure and defects on mechanical properties of low-pressure cast Al-Si alloys**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rešerše k problematice mechanických vlastností v závislosti na vadách a mikrostruktuře Al-Si slitin po nízkotlakém odlévání, metodika hodnocení mikrostruktury a vad
3. Experiment: příprava a hodnocení Al-Si vzorků z odlitků kol, hodnocení výsledků, stanovení souvislosti
4. Diskuze a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Handbook of Aluminium. Volume 1. Physical Metallurgy and Processes. Ed. by Toten, E.G., Mc Kenzie, D.S. New York, 2003, 1296 p.
- [2] Handbook of Aluminium. Volume 2. Alloy Production and Materials Manufacturing. Ed. by Toten, E.G., Mc Kenzie, D.S. New York, 2003, 724 p.
- [3] Michna Š., a kol. Encyklopedie hliníku. Adin s.r.o., Prešov, 2005, 700s.
- [4] Zolotarevsky, V.S., Belov, N.A., Glazoff, M.V. Casting Aluminum Alloys. Elsevier Ltd., 2007, 530 p.
- [5] Odborné publikace v časopisech Progress in Material Science, Materials Science and Engineering, Science and Technology of Advanced Materials, Materials Science Forum aj.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Monika Losertová**

Datum zadání: 30.11.2016

Datum odevzdání: 10.05.2017

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách).

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2016/2017.

Ostrava 2. 12. 2016



**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě ..... 30.4.2017 .....

..... Ondřej Havábek .....

podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na slitiny Al-Si po nízkotlakém odlévání. Teoretická část obsahuje rešerši struktury, vad a mechanických vlastností daných slitin. Experimentální část je zaměřena na analýzu licích vad daných Al-Si slitin. Hlavním úkolem bylo vyhodnocení vlivu pórovitosti na mechanické vlastnosti po nízkotlakém odlévání.

**Klíčová slova:** Al-Si, mikrostruktura, nízkotlaké odlévání, vady slitiny, pórovitost, automobilová kola

## **Abstract:**

This thesis is focused on Al-Si alloys after low-pressure casting. The theoretical part investigates the structure, casting defects and mechanical properties of these alloys. The experimental part is focused on analysis of casting defects of given Al-Si alloys. The main task was to evaluate the influence of porosity on mechanical properties after low-pressure casting.

**Keywords:** Al-Si, microstructure, low-pressure casting, defects in alloys, porosity, car wheels

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval paní doc. Dr. Ing. Monice Losertové za vedení a poskytnutí cenných rad a připomínek při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat paní Naděždě Brychtové za pomoc s přípravou vzorků a provedením obrazových analýz, paní Ing. Jiřině Vontorové, Ph.D. a Ing. Jakobovi Dobřanskému za konzultace ohledně vzorků. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, přítelkyni a přátelům, kterým děkuji za podporu a motivaci při psaní této práce.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>7</b>
2.1	Slitiny Al	7
2.2	Al-Si slitiny	8
2.3	Struktura Al-Si slitin	9
2.3.1	Podeutektické slitiny	10
2.3.2	Eutektické slitiny	11
2.3.3	Nadeutektické slitiny	12
2.4	Modifikace struktury	12
2.5	Legující prvky a nečistoty:	13
2.6	Mechanické vlastnosti Al-Si	14
2.6.1	Účinek přehřátí na mechanické vlastnosti	15
2.7	Slévárenské slitiny Al-Si	17
2.7.1	Slévárenské slitiny typu Al-Si-Mg	17
2.8	Technologie tlakového lití odlitků Al-Si slitin	18
2.9	Metody lití odlitků	19
2.9.1	Gravitační lití	20
2.9.2	Nízkotlaké lití	20
2.9.3	Vysokotlaké lití	23
2.10	Vady v odlitcích Al-Si slitin	23
2.11	Vliv rychlosti průtoku plynu	27
2.12	Vybrané slitiny	31
2.12.1	Slitina AlSi7Mg0,3 - A356	31
2.12.2	Slitina AlSi11Mg – EN AC-44000	32
2.12.3	Srovnání mechanických vlastností slitiny AlSi7Mg0,3 a AlSi11Mg	32



<b>3</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>34</b>
3.1	Příprava vzorků .....	35
3.1.1	Nízkotlaké lití .....	36
3.1.2	Odplynění taveniny A356 T6 .....	37
3.1.3	Očkování hliníkových slitin .....	37
3.1.4	Tepelné zpracování a vytvrzení .....	38
3.2	Příprava metalografických vzorků .....	38
3.2.1	Vzorky odlitků .....	39
3.2.2	Vzorky hotových kol .....	41
3.2.3	Vzorky pro stanovení obsahu škodlivých prvků .....	43
3.3	Metoda hodnocení pórovitosti.....	44
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE.....</b>	<b>46</b>
4.1	Hodnocení mikrostruktury .....	46
4.1.1	Mikrostruktura odlitků.....	46
4.1.2	Mikrostruktura hotových kol.....	48
4.2	Hodnocení licích vad.....	49
4.2.1	Vzorky odlitků.....	49
4.2.2	Vzorky hotových kol .....	56
4.3	Hodnocení obsahu škodlivých prvků .....	60
4.3.1	Obsah vodíku.....	60
4.3.2	Obsah kyslíku a dusíku.....	63
4.3.3	Obsah uhlíku a síry .....	64
4.4	Mechanické vlastnosti .....	65
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>71</b>

# 1 ÚVOD

Slitiny hliníku mají stále rostoucí a nezastupitelnou roli v automobilovém průmyslu, a to jak díky svým mechanickým vlastnostem, tak nízké specifické hmotnosti a tím snížení hmotnosti součástí. Z těchto důvodů se využívají na konstrukční prvky karoserií a také zejména na kola automobilů.

Mezi hlavní používaný materiál pro litá kola patří slitina hliníku A356, kterou se zabývá tato diplomová práce. Tato slitina se vyznačuje vlastnostmi, jako jsou dobrá pevnost, tvařitelnost, korozní odolnost a výhodné slévárenské vlastnosti. Nejčastějším problémem při odlévání je výskyt vad, které snižují kvalitu a životnost výrobků, a jsou tedy nežádoucím projevem výrobního procesu. S rozvojem a zdokonalováním výrobních technologií je velmi důležité podchytit příčiny vzniku takových vad a stanovení parametrů, které jejich vznik ovlivňují. Z hlediska hodnocení a dokumentace vad v odlitcích je základním pomocníkem ke správné diagnostice systém klasifikace vad, případně atlasy vad pro dané typy materiálů.

Cílem této práce bylo vyhodnocení mikrostruktury a vad, které ovlivňují mechanické vlastnosti Al-Si slitin po nízkotlakém odlévání, jejichž vzorky byly dodány výrobcem litých kol ze slitin hliníku. V rámci hodnocení mikrostruktury byla provedena metalografická analýza na optickém mikroskopu, digitální obrazová analýza a stanovení obsahu vodíku. Z výsledků experimentální části bylo možné vyhodnotit vliv mikrostruktury a vad na výsledné mechanické vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3.

*Studium a experimentální práce byly provedeny v rámci projektů No. LO1203-„Regionální materiálově technologické výzkumné centrum – NPU I“, financovaného MŠMT a ze strukturálních fondů EU, smluvního výzkumu S004/17-600-01 v rámci projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/15\_007/0003397 (PLAKOTECH), SGS SP2017/58 „Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství“ a SP2017/60 „Rozvoj experimentálních metod charakterizace struktury a vlastností technických materiálů“.*

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Slitiny Al

Pro tuto diplomovou práci budou podstatné slévárenské slitiny hliníku. A hlavně slitin Al-Si tedy siluminy.

Prvky klíčové pro určení vlastností slitiny spolu se základním prvkem definují typ slitiny. Obsah těchto prvků ve slitině je obvykle druhý nejvyšší po základním prvku. Hlavními přísadovými prvky ve slitinách hliníku jsou křemík, měď a hořčík. Podle těchto tří prvků se slitiny hliníku dělí na tři základní skupiny:

- slitiny Al – Si – siluminy
- slitiny Al – Cu – duraluminium
- slitiny Al – Mg – hydronalium

Hliník a jeho slitiny jsou nejvíce využívány hlavně v oblastech dopravy. Hlavními spotřebiteli jsou letecký, automobilový a kosmický průmysl, dále také kolejová a lodní doprava. Největší zastoupení slitin hliníku je v leteckém oboru, kdy letadlo může obsahovat až 2/3 hliníkových slitin z celkové hmotnosti. V posledních letech jsou snahy o nahrazení hliníku kompozitními materiály a i přesto zůstávají Al slitiny nenahraditelnými. Zejména komponenty jako jsou křídla a trup, které jsou namáhané při vyšším napětí.

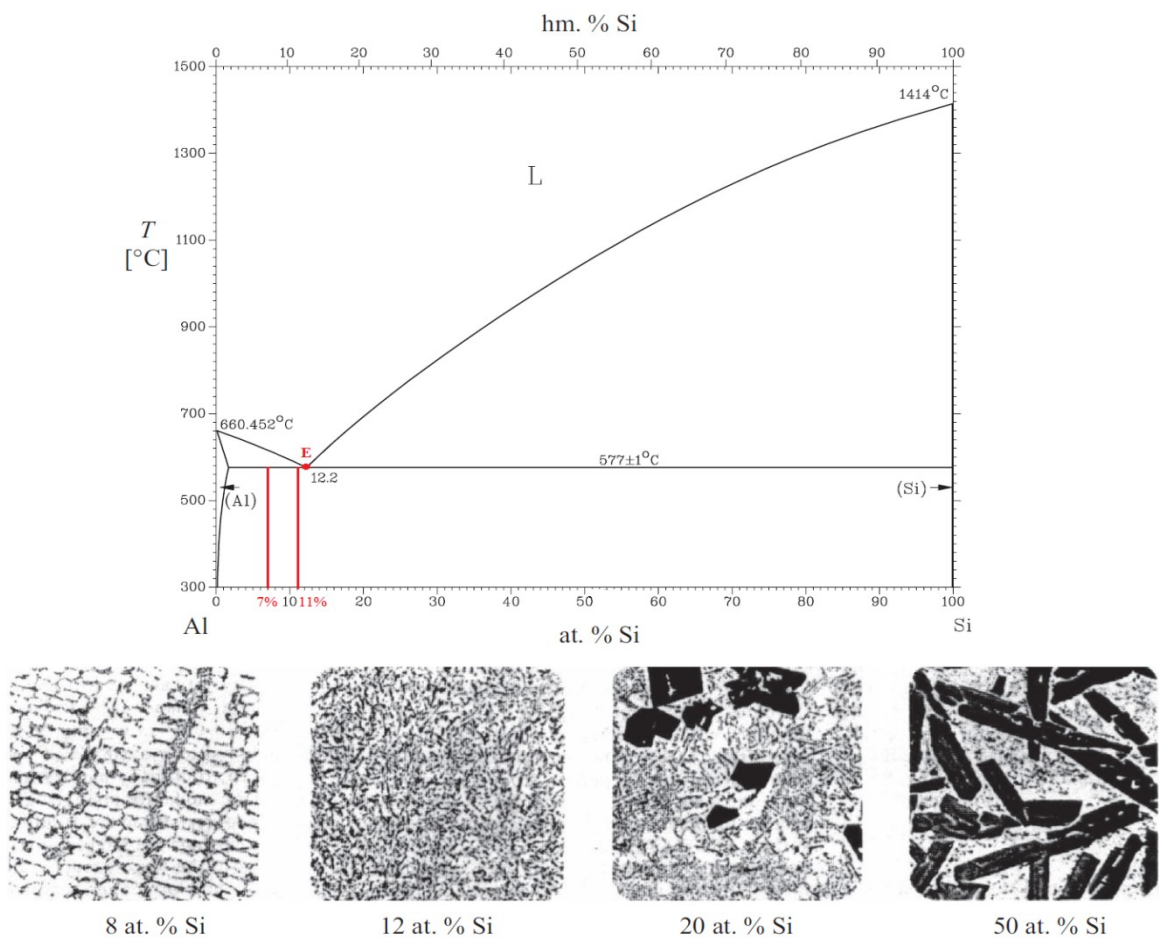
Dalším důležitým aspektem je snížení hmotnosti, které hliníkové slitiny umožňují oproti standardním materiálům jako například ocel. [1]

## 2.2 Al-Si slitiny

Slitiny hliníku a křemíku se nazývají siluminy a jsou hlavním typem Al slitin pro slévárství. Díky rovnovážnému binárnímu diagramu (viz. Obr. 1), můžeme siluminy rozdělit podle obsahu Si na:

- podeutektické
- eutektické
- nadeutektické

V binárním diagramu jsou vyznačeny dvě slitiny, které jsou probírány v teoretické a praktické části této diplomové práce. První slitina je AlSi7Mg0,3 a druhá AlSi11Mg. Podeutektické siluminy obsahují více než 5% křemíku, ve většině případů to bývá mezi 7 a 11% Si. Eutektické slitiny vykazují obsah kolem 11 - 13% Si, a jejich struktura je tvořena pouze eutektikem. Nadeutektické siluminy obsahují částice primárního křemíku, který se nachází v eutektické matici. Obsah křemíku se pohybuje kolem 14 - 17%, v některých případech může dosáhnout až 25 %.



**Obr. 1** Rovnovážený binární diagram soustavy Al-Si [1]



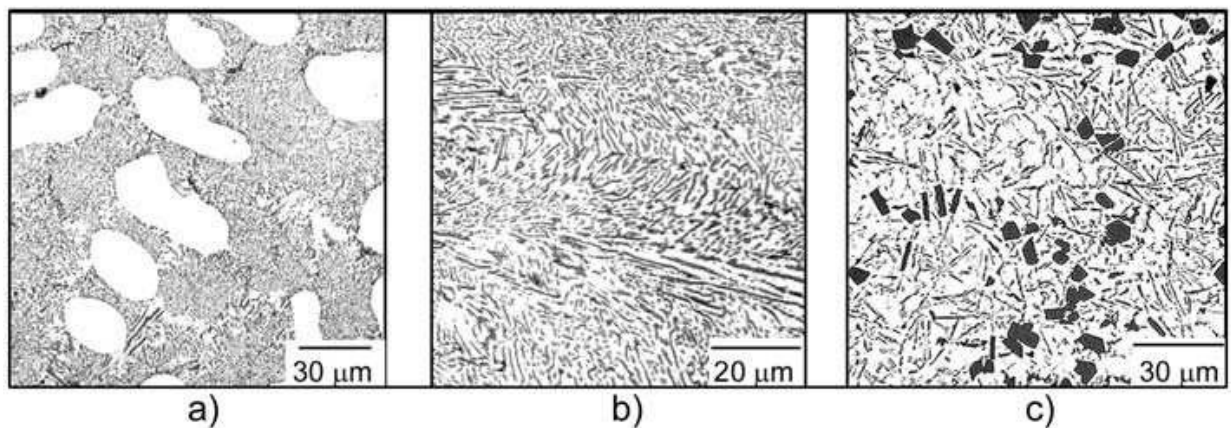
Eutektické nebo mírně podeutektické siluminy vykazují nejlepší slévárenské vlastnosti, z důvodů nejmenšího intervalu tuhnutí slitiny. Hliníková matrice má tendenci se stahovat, ale křemík zvětšuje svůj objem, díky tomu kompenzuje stahování matrice a zmenšuje objem staženin. Tyto slitiny jsou vytvrditelné pomocí přidávání Mg v obsahu 0,2 – 0,7 %. Siluminy se odlévají pomocí tlakového nebo přesného lití, jak do kovových i pískových forem [1, 2].

### 2.3 Struktura Al-Si slitin

Výsledná mikrostruktura je závislá na rychlosti ochlazování přesněji řečeno na ochlazovacím účinku slévárenské formy. Proto můžeme volbou materiálu pro formu ovlivnit výslednou strukturu. Tyto kritéria mají vliv na výsledné mechanické hodnoty. Strukturu litého stavu jde také ovlivnit pomocí očkování nebo modifikací.

*Struktura Al-Si slitin je tvořena (viz. Obr. 2):*

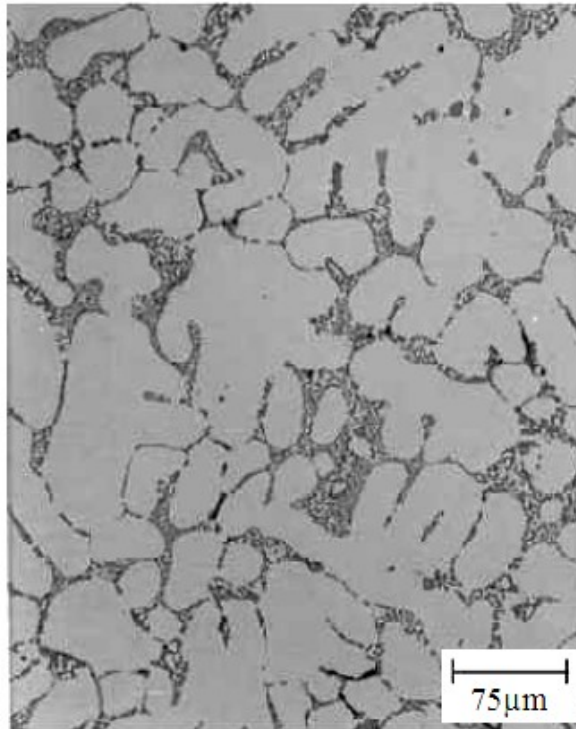
- a) podeutektická slitina - AlSi10 primární dendrity  $\alpha(Al)$  světlé + eutektikum  $\alpha(Al) + Si$
- b) eutektická slitina AlSi12 – eutektikum  $\alpha(Al) + Si$
- c) nadeutektická slitina AlSi18 – primární krystaly Si – tmavé + eutektikum  $\alpha(Al) + Si$  [3]



**Obr. 2** Mikrostruktury slitin Al-Si [3]

### 2.3.1 Podeutektické slitiny

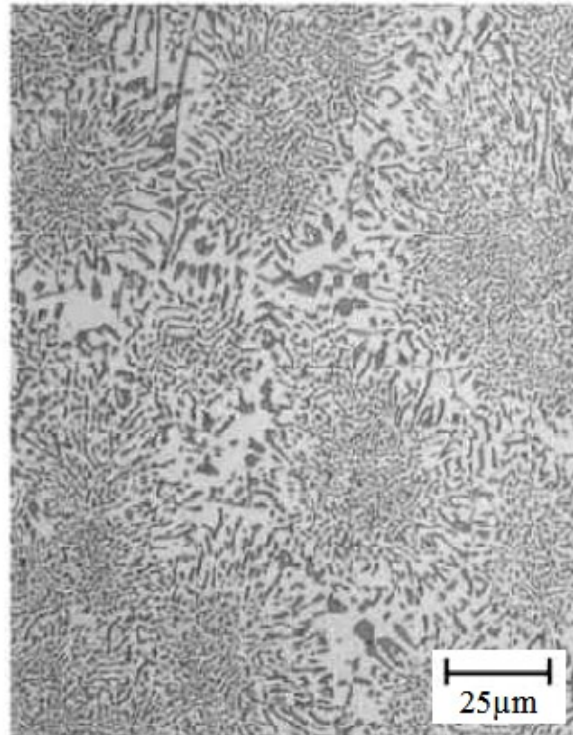
Tyto slitiny obsahují dendritickou strukturu  $\alpha(Al)$  a eutektikum (viz. Obr. 3), které se nachází v mezidendritických prostorech. Podeutektické slitiny vykazují nižší zabíhavost. Slévárenské vlastnosti jsou vyhovující a využívají se k odlévání tvarově jednodušších a méně namáhaných součástí.



**Obr. 3** Podeutektický silumin, dendritická struktura [4]

### 2.3.2 Eutektické slitiny

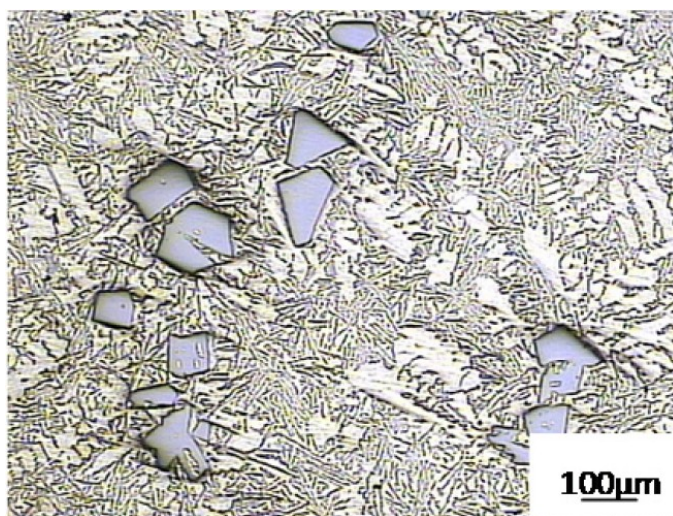
Vyznačují se pouze eutektickou strukturou (viz. Obr. 4). Hlavní výhodou těchto slitin je výborná zabíhavost. To dovoluje technologii tenkostěnných a tvarově složitých součástí. Hlavní zastoupení tvoří letecký a automobilový průmysl. Jsou vhodné pro odlévání do vytavitelného modelu, kovových forem nebo pro tlakové lití.



**Obr. 4** Eutektický silumin [4]

### 2.3.3 Nadeutektické slitiny

V jejich struktuře se objevuje eutektikum a velké krystaly Si (viz. Obr. 5). Velké hrubé krystaly vznikají z větší krystalizační schopnosti Si, z důvodu menšího přechlazení taveniny. Tato struktura a zejména krystaly křemíku způsobují křehkost těchto slitin, proto je nutné provést modifikaci. Poté se tyto slitiny vyznačují dobrou tepelnou roztažností. Využívají se na odlitky částí spalovacích motorů, zejména pístů [2, 5].



**Obr. 5** Nadeutektický nemodifikovaný silumin, hrubé krystaly křemíku v nemodifikované eutektické matrici – zbarveny do modra, výskyt  $\alpha$ -Al dendritů [8]

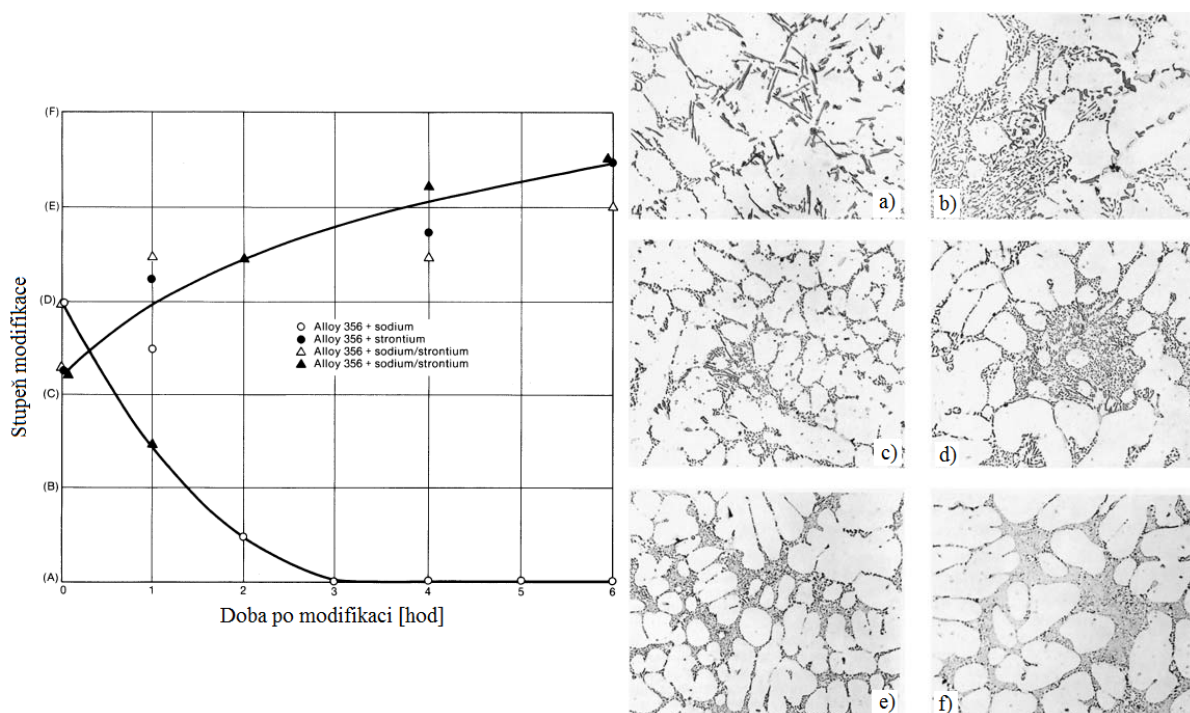
### 2.4 Modifikace struktury

Eutektikum ( $\alpha+\beta$ ) v Al-Si slitinách vytváří anomální strukturu, díky tomu je velký podíl křehkých a hrubých krystalů křemíku. Tyto slitiny krystalizují bez zásahu do mechanismu tvorby nepravidelného eutektika. Z tohoto důvodu mají nižší mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost). Zajištění vyšších mechanických parametrů lze pomocí zjemnění krystalů Si v eutektiku. Zjemnění struktury lze dosáhnout pomocí:

- modifikací pomocí alkalických kovů – stroncium, lithium, sodík
- zvýšením rychlosti ochlazení taveniny – rychlejší eutektická přeměna

Obě varianty se využívají, rychlejší ochlazování je vhodné pouze pro tenkostěnné odlitky v kovových formách za použití tlakového lití. Modifikace pomocí alkalických kovů (viz. Obr. 6) se využívá častěji, zejména přidáním menšího množství stroncia [2, 6].





**Obr. 6** Graf ukazuje účinnost modifikace sodíku a stroncia na slitinu A356, vlevo jsou snímky od a) nemodifikovaná struktura až po f) plně modifikovaná struktura [7]

Z obrázku je vidět, že s přidáním modifikujících prvků se mění struktura slitiny. Vyšší koncentrace stroncia a sodíku zjemňuje strukturu eutektika, ale velikost dendritů zůstává stále stejná.

## 2.5 Legující prvky a nečistoty:

**Křemík (Si)** - hlavní legující prvek u Al-Si slitin, zvyšuje většinu slévarenských vlastností. Příznivě ovlivňuje zabíhavost, otěruvzdornost a snižuje teplotní roztažnost. Také zvyšuje pevnost a korozivzdornost odlitků. S rostoucím obsahem křemíkové fáze stoupá tvrdost a klesá tvárnost slitiny.

**Hořčík (Mg)** - hořčík umožňuje vytvrzování Al-Si slitin po tepelném zpracování, vytváří intermetalickou fázi  $Mg_2Si$ . Obsah se většinou pohybuje v rozmezí 0,3 – 0,7 %. Špatná stabilita a stárnutí při pokojové teplotě slitin s vyšším obsahem Mg bývají důvodem pro jejich tepelné zpracování.

**Měď (Cu)** - legování slitin Al-Si mědí zvyšuje jejich pevnostní charakteristiky. S hliníkem tvoří intermetalickou fázi  $CuAl_2$ , která umožňuje vytvrzování a je neúčinnější

při obsahu 4 – 6 % mědi. Cu snižuje korozivzdornost, ale zvyšuje pevnost, tvrdost a obrobitelnost.

**Železo (Fe)** – patří u slitin hliníku k běžným nežádoucím prvkům, obsah železa zhoršuje mechanické vlastnosti slitiny. Do slitiny se dostává, ze vsázkových surovin nebo při použití druhotných surovin (z nářadí, tavicích kelímku, kovových forem atd.). Železo vytváří velké množství intermetalických fází, největší zastoupení zde mají  $\alpha$ -AlFeSi a  $\beta$ -AlFeSi. Obsah železa u odlitků bývá do 0,5 %, pro využití tlakového lití je obsah do 1 % (snižuje přilnavost kovu k formě). Ke kompenzaci nepříznivého vlivu železa je doporučeno přidávat přísady Mn, Co, Cr do taveniny.

**Nikl (Ni)** – přidává se zejména do Al-Si slitin určených pro práci za vyšších teplot. Slitiny s obsahem Ni do 1 – 2 % vykazují dobré mechanické vlastnosti při zvýšených teplotách. Jejich tepelná roztažnost je mírně snižena. Ni tvoří intermetalickou fázi  $Al_3Ni$ , jestliže slitina obsahuje železo nebo měď, vytváří se s těmito prvky vícesložkové fáze. Slitiny s obsahem niklu se využívají na odlitky pístů [1, 2, 9].

## 2.6 Mechanické vlastnosti Al-Si

Mechanické vlastnosti Al-Si slitin (viz. Tab. 1) závisí na řadě faktorů, jako je chemické složení, struktura slitiny, nečistoty, naplynění taveniny, rychlost ochlazování a další. Mechanické vlastnosti těchto slitin ovlivňuje ve velké míře obsah křemíku. Se zvyšujícím se obsahem Si se zvyšuje tvrdost Al-Si slitin a postupně se snižuje tažnost, zejména při nadeutektickém obsahu křemíku. Největší tvrdost mají nadeutektické Al-Si slitiny, proto se využívají u dílů namáhaných na otěr. U eutektické slitiny je tažnost cca 15% a pevnost v tahu cca 180 MPa.

Ke zvyšování pevnostních charakteristik jsou Al-Si slitiny legovány dalšími prvky. Mezi nejvýznamnější patří Cu a Mg. Tyto legující prvky umožní, že slitiny se stávají precipitačně vytvrditelnými a jejich pevnost dosahuje až cca 300 MPa. Dalším legujícím prvkem může být Ni, poté jsou tyto slitiny využívány pro aplikace za zvýšených teplot. Ke slitinám zpracovávaných tlakovým litím je přidáváno Fe pro snížení lepivosti odlitků k formě [10].

**Tab. 1** Mechanické vlastnosti vybraných slitin pro odlitky [11]

ČSN EN 1706			Mechanické vlastnosti			
Skupina Slitiny:	Označení procesu odlévání a stavu:	Chemická značka:	Rm [MPa] min.	Rp0,2[MPa] min.	A5 [%] min.	HB min.
<i>AlSi7Mg</i>	EN AC-42100-S-T6	AlSi7Mg0,3	230	190	2	75
	EN AC-42100-K-T6		250	200	3	90
AlSi10Mg	EN AC-43000-S-F	AlSi10Mg(a)	150	80	2	50
	EN AC-43000-S-T6		220	180	1	75
<i>AlSi11Mg</i>	EN AC-44000-S-T6	AlSi11Mg(a)	200	110	1	55
	EN AC-44000-K-T6		210	120	3	70
AlSi9Cu	EN AC-46200-S-F	AlSi8Cu3	150	90	1	60
AlMg	EN AC-51100-S-F	AlMg3(a)	140	70	3	50

Pozn.: *S* – lití do pískové formy

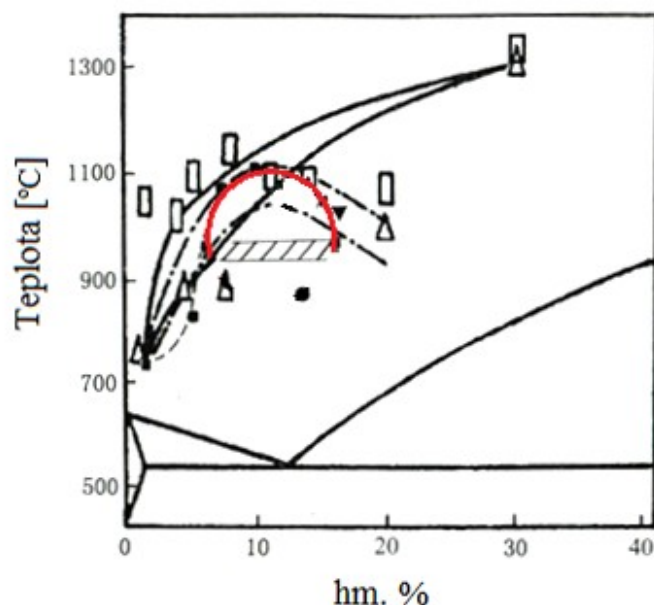
*K* – lití do trvalých forem

*F* – v litém stavu

*T6* – rozpouštěcí žihání, rychlé ochlazení a vytvrzování za tepla

### 2.6.1 Účinek přehřátí na mechanické vlastnosti

Jak je dobře známo, přehřátí taveniny je silným faktorem ovlivňujícím mikrostrukturu a vlastnosti komerčních slitin Al-Si. Účinek přehřátí je spojen s teplotou, výdrží a rychlostí ochlazování během tuhnutí. Při teplotách nad 1000°C vykazují tyto slitiny velmi drastické změny mechanických a fyzikálních vlastností. Pro eutektické Al-Si slitiny obsahující 10-14% křemíku je kritická teplota v rozmezí od 1050 až 1150 °C jak je uvedeno na následném diagramu (viz. Obr. 7). Nad kritickou teplotou se křemíková zrna a další heterogenní látky, jako jsou částice bohaté na železo, rozpustí v tavenině. To má za následek homogenní taveninu, která bude měnit krystalografické vlastnosti slitiny. Při rostoucí teplotě až do 875 °C se skokem mění atomární hustota a koordinační číslo v tavenině slitiny Al-13%Si, což ukazuje na změnu struktury taveniny doprovázené rozpouštěním klastru Si-Si v roztaveném hliníku. Při vyšších teplotách tavení se Al-Si slitina tedy skládá ze dvou iontových skupin: Al-Si a Si-Si, což umožňuje uspořádání na krátké vzdálenosti a přes neuspořádanou taveninu se pohybují elektrony [8].



**Obr. 7** Oblast rozpadu metastabilní mikro-heterogenity v Al-Si tavenině [8].

Přehřátí Al-Si slitiny přesouvá své eutektické reakce směrem k vyšším obsahům křemíku s výskytem Al dendritů. Pokud je teplota nad 780°C, křemík spolu s dendrity v  $\alpha$ -Al se zjemňuje. Při teplotách v rozmezí 900-1000°C je vločkový křemík menší než 7 $\mu$ m. Při zahřívání nad teplotu 1000°C se v eutektické slitině vyskytuje modifikovaný křemík. Čím je vyšší teplota, tím jsou jemnější zrna křemíku. V případě, že výdrž na teplotě je nedostačující pro rozpuštění částic Si v původní slitině, pak ani přehřátí při 1200°C nemění významně krystalografické charakteristiky slitiny a modifikovaná struktura nevzniká.

Přehřátí u podeutektické slitiny výrazně zvyšuje obsah Si, Mg a Fe v  $\alpha$ -Al dendritech. Například při přehřátí slitiny Al8Si po dobu 10min a teplotě 950 °C se v  $\alpha$ -Al dendritech zvýšila rozpustnost u křemíku na 1,9% a u hořčíku na 0,3%, což je mnohem vyšší, než jejich rozpustnost v základní Al matici při pokojové teplotě. Proto přehřátí je jedním z faktorů, pomocí kterých je možné ovlivnit mechanické vlastnosti a mikrostrukturu slitiny [8, 12].

## 2.7 Slévárenské slitiny Al-Si

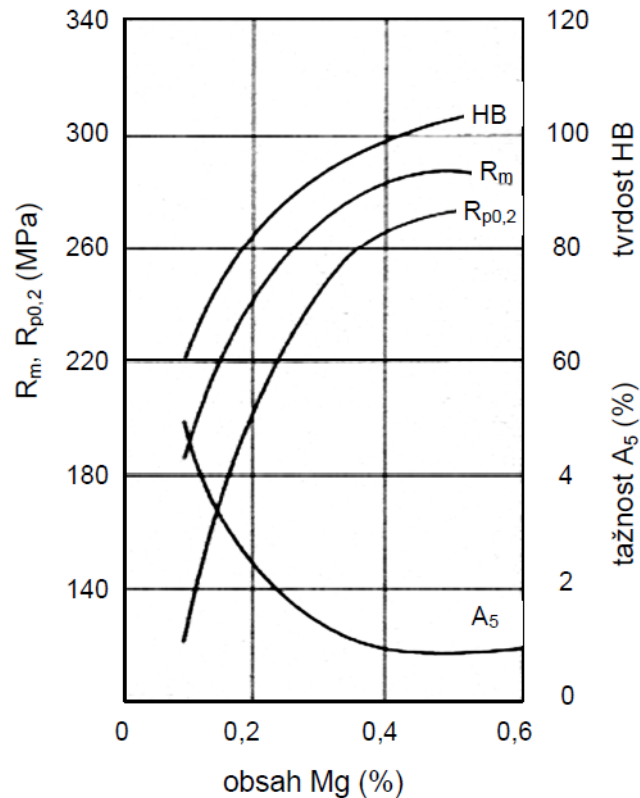
Slévárenské slitiny Al-Si, tzv. siluminy patří mezi hlavní slévárenské slitiny hliníku. Využívají Si jako hlavní legující prvek. Tyto slitiny mají chemické složení v rozmezí eutektického bodu, kolem 11,3 % Si. V tomto bodu se vyskytuje malý teplotní interval krystalizace, který je velmi důležitý u slévárenských slitin. Nejpoužívanější slitiny jsou s vyšším obsahem Si, kolem 7 – 13 %. Tyto podeutektické a eutektické slitiny jsou nejrozšířenější kvůli jejich dobrým vlastnostem.

Největší zastoupení mají v leteckém a automobilovém průmyslu. K jejich předním výhodám patří kombinace výborných mechanických vlastností při zachování dobré slévatelnosti. Také odolnosti proti korozi je na velice dobré úrovni, společně se svařitelností. Podle obsahu křemíku můžeme rozdělit na [1, 13]:

- podeutektické (4,5 až 10 %),
- eutektické (10 až 13 %),
- nadeutektické (14-17 výjimečně až 25 %)

### 2.7.1 Slévárenské slitiny typu Al-Si-Mg

Tyto slitiny hliníku jsou velmi univerzální, mezi jejich hlavní výhody řadíme dobrou slévatelnost a odolnosti proti korozi. Vzhledem k obsahu hořčíku ve struktuře je možné tyto slitiny precipitačně vytvrzovat, to má za následek zlepšení mechanických vlastností (viz. Obr. 8). Z důvodu obsahu hořčíku vykazují některé slitiny horší obrobiteľnosť. Běžně obsahují 0,25 až 0,45 % hořčíku, v některých případech až 0,7 %. Při běžné rychlosti ochlazování se hořčík vylučuje z taveniny jako  $Mg_2Si$  [13].



**Obr. 8** Vliv Mg na mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Mg po vytvrzení [2]

Al-Si-Mg slitiny jsou ve většině případů podeutektické nebo eutektické, podle obsahu Mg jsou nejčastější dva typy: *AlSi7Mg* – nejpoužívanější slitina s výbornými mechanickými vlastnostmi, *AlSi10Mg* – velice dobré slévárenské a mechanické vlastnosti, horší korozivzdornost. Veškeré slitiny tohoto typu je možné odlévat do pískových i kovových forem. Výsledné vysoké mechanické vlastnosti jsou patrné až po tepelném zpracování **T6** – Rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení a vytvrzování za tepla [2].

## 2.8 Technologie tlakového lití odlitků Al-Si slitin

Technologie tlakového lití je hlavní a nejrozšířenější proces využívaný pro výrobu tvarových odlitků z hliníkových slitin. Tento způsob technologie je využíván zejména u velkosériové výroby z důvodů velké produktivity. Tlakové lití je velice vhodné pro výrobu tvarově složitých a rozměrově přesných odlitků. Výsledné odlitky se vyznačují vysokou jakostí povrchu.

Technologie tlakového lití spočívá ve vstřikování taveniny pod určitým tlakem do dutiny kovové formy. Velkou výhodou je možnost využití na geometricky náročné odlitky, kdy tloušťka stěny může dosahovat hodnot menších než 1,5mm a to s přesností odlitku kolem 0,3 – 0,5%. Formy pro tlakové odlévání využívají kovová jádra, v některých případech i solná jádra. Výsledné rozložení formy je závislé na geometrii odlitku [14, 2].

Většina slévárenských metod je přímo používána pro výrobu odlitků z hliníkových slitin. Výsledná struktura Al-Si slitin je přímo úměrná s intenzitou ochlazování při tuhnutí odlitku. Vlivem rychlého tuhnutí vznikají tyto pozitivní vlastnosti:

- jemnozrná struktura
- nižší výskyt pórovitosti
- omezení vzniku mikrostaženin a ředin
- menší heterogenita struktury
- zvyšuje se disperzita intermetalických částic

Rychlé ochlazování vykazuje příznivý vliv, z tohoto důvodů je velice výhodné navrhovat odlitky jako tenkostěnné. Následné odlévání do kovových forem podporuje rychlé ochlazování [2].

## 2.9 Metody lití odlitků

Volbu výsledné technologie volíme podle konstrukce odlitku, slitiny, požadavky na užité vlastnosti odlitku, počtu kusů ve výrobě atd. Dnešní technologie pro lití hliníkových slitin se využívají tyto metody [1]:

- gravitační lití
- nízkotlaké lití
- vysokotlaké lití

V automobilovém průmyslu se velice často využívají metody tlakového lití, největší zastoupení mají nízko a vysokotlaké lití. Experimentální část této diplomové práce se zabývá vzorky z litých kol pro automobily. Tyto vzorky a výsledné kola jsou vyráběny nízkotlakým litím, proto bude v dalším textu podrobněji popsána metoda *nízkotlakého lití*.

Vysokotlaké lití se využívá zejména na výrobu bloků motorů, převodových skříní apod. Pomocí gravitačního lití se vyrábějí pístní kroužky, avšak má menší zastoupení než ostatní metody odlévání.



### 2.9.1 Gravitační lití

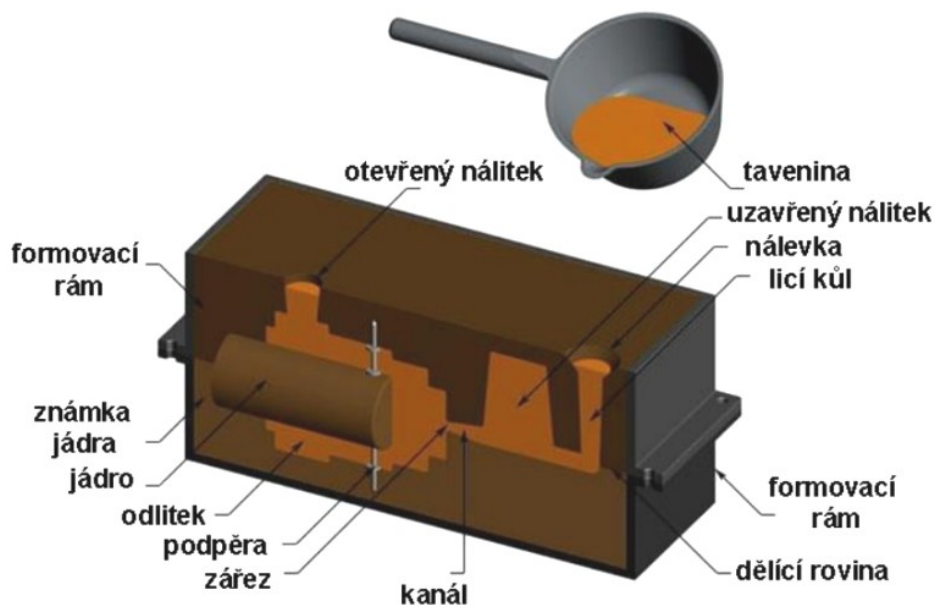
Gravitační lití využívá k plnění formy pouze hydrostatický tlak a rychlost proudění nepřesahuje 3 m/s. Odlévá se do pískových (viz. Obr. 9), netrvalých forem nebo do kokil, kdy jádro je většinou z pískové směsi. K působení statického tlaku v této technologii nedochází. Jako tepelná izolace jsou využívány žáruvzdorné nátěry a postříky. Gravitačním litím nelze odlévat složité a hlavně tenkostěnné odlitky [1, 15].

#### *Výhody gravitačního lití:*

- vysoká tvarová a rozměrová přesnost odlitků
- jemnozrná struktura

#### *Nevýhody:*

- velké náklady na formu
- nutné tepelné zpracování odlitků
- forma musí být odvzdušněná

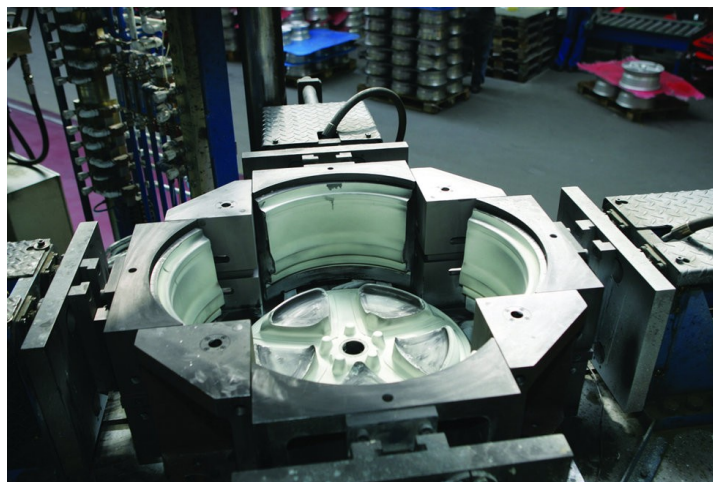


Obr. 9 Gravitační lití do písku [16]

### 2.9.2 Nízkotlaké lití

Tato metoda využívá přetlak okolo 0,3 – 5 barů (0,03 – 0,5 MPa) k vytlačení roztaveného kovu do formy. Tento tlak je navozován plynem nebo vysušeným vzduchem, v případě odlitků studovaných v experimentální části této práce se lití provádělo tlakem vysušeného vzduchu. Tavenina je vháněna do dutiny formy přes plnicí trubici a je zaplňována od dna formy. Tímto způsobem je dosaženo klidného plnění, díky kterému

se zlepšuje vnitřní kvalita odlitku. Při tomto druhu lití může být ovlivněna rychlost průtoku plynu, která má vliv na vnitřní strukturu a omezení pórovitosti slitiny. Součástí nízkotlakého stroje je i udržovací pec. Lití probíhá do kovové formy, která je předehřátá na určitou pracovní teplotu (většinou 200°C) a po celou dobu plnění je tato teplota udržována. Na líc formy je nanesen ochranný nástřík. Kovová forma se skládá z více částí, jedna část formy je pevně spojena se strojem a druhá je připojena na pohyblivé ústrojí (viz. Obr. 10). Po následném ztuhnutí vyhazovače uvolní odlitek z pohyblivé části formy. Celkové využití roztavené slitiny je 90 – 95% [17].



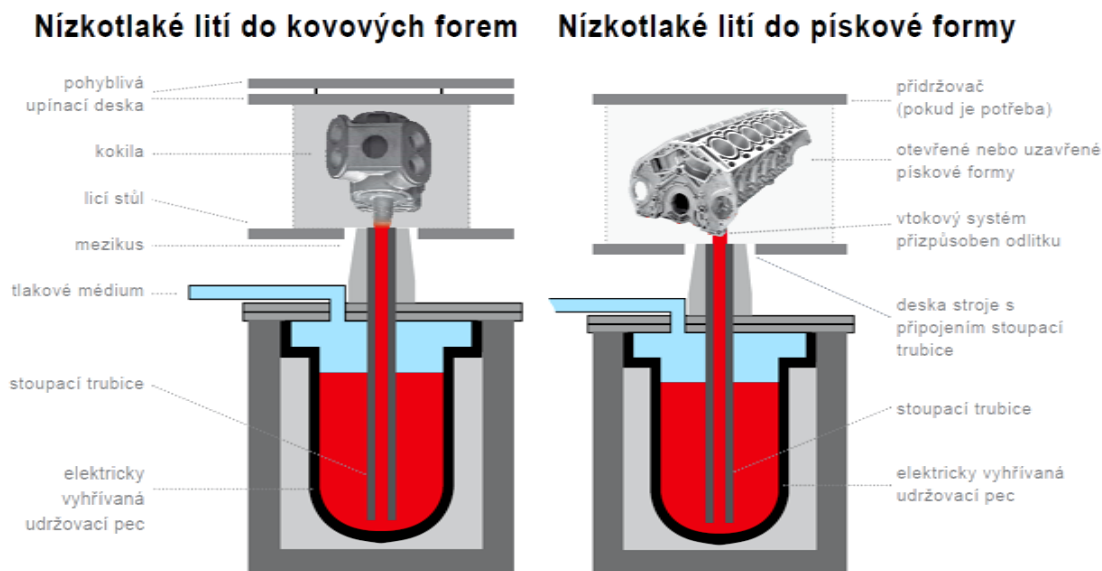
**Obr. 10** Forma pro nízkotlaké lití automobilových kol z Al-Si slitiny [18]

Zvolený pracovní tlak musí být dostatečně velký, protože musí překonávat veškeré odpory způsobené tlakem plynu ve formě. Dále ztrátami vzniklými z důvodu tenkých stěn formy nebo změny směru při plnění. A také dochází ke změně viskozity. Nástup pracovního tlaku musí zabezpečit optimální rychlost plnění formy. Nesmí dojít k zatuhnutí taveniny před úplným naplněním celé formy.

V dnešní době firmy využívají lící boxy a stroje s velkou flexibilitou nálitkování a vtokování odlitků a to nezávisle na geometrii odlitku. S touto technologií není potřebné dodávání přídatného tepla, a také umožňuje použití neomezeného počtu nálitků. Díky použití vícenásobných stoupacích trubic je možné lití i do pískových forem (viz. Obr. 11).

Nízkotlakým litím lze dosáhnout vysoké kvality povrchu i vnitřního objemu odlitku. Hlavním využitím nízkotlakého lití jsou slitiny lehkých kovů, zejména hliníkových

slitin v automobilovém průmyslu. Nejčastěji se touto metodou odlévají hlavy válců, součásti brzdných systémů a disky kol, s posledně jmenovanými pracuje experimentální část této diplomové práce [1, 20].



**Obr. 11** Nízkotlaké odlévání – kovová a písková forma [19]

**Nástřiky** formy jsou velice důležité, neboť určují kvalitu povrchu výsledného odlitku. Také mají za úkol ochránit formu jádra. Nástřiky mají ochranný charakter a mohou být tuhé, kapalné nebo vazelinové. Složení těchto emulzí jsou firemním tajemstvím. Nanesení nástřiku musí být ve formě velmi jemného filmu, který pokryje vnitřní část formy. Tato vrstva ulehčuje vyjmutí odlitku z formy.

***Výhody nízkotlakého lití:***

- klidné naplnění formy
- automatizace
- malé přídavky na obrábění
- 90 – 95% využití tekutého kovu
- ovládání rychlosti lití
- využití progresivních materiálů – keramika, písek atd.

***Nevýhody:***

- Výsledná kvalita odlitků je závislá na vhodné konstrukci formy

### 2.9.3 Vysokotlaké lití

Princip vstřikování taveniny do formy je stejný jako u nízkotlakého, ale zde probíhá vstřikování pod vysokým tlakem (2 – 450 MPa). Díky velkému tlaku je možné vyrábět velice přesné a komplikované odlitky. Některé slitiny umožňují tloušťku stěny menší než 1mm, a celkové rozměry odlitků lze vyrábět s odchylkou 0,3- 0,5%. U vysokotlakého lití se musí využívat jen kovové jádra, formy jsou z legovaných Cr - Mo ocelí a musí odolávat vysokým tepelným a mechanickým nárokům. Při plnění formy je kov zatížen jen malým tlakem. Až po dokončení plnění formy je tlak zvýšen, to umožňuje dokonalé naplnění formy i do úzkých a komplikovaných tvarů formy.

### 2.10 Vady v odlitcích Al-Si slitin

Vady litých hliníkových slitin jsou podobného typu jako v případě odlitků jiných kovových slitin. Každá slitina má ovšem jiné slévárenské vlastnosti jako například: zabíhavost, výskyt staženin, trhlin, prasklin a schopnost smrštění. Tyto vlastnosti určují rozdíly ve výskytu slévárenských vad. Hliníkové slitiny se vyznačují velmi vysokou vázaností ke kyslíku a to jak v tuhém tak i tekutém stavu. Proto jsou tyto slitiny náchylné k tvorbě oxidů. U hliníkových slitin je velmi odlišné chemické složení, kvůli kterému se výrazně liší i tvorba struktury. Struktura hliníkových slitin je velmi specifická a jsou s ní spojeny vady jak v makrostruktuře, tak i v mikrostruktuře. Mezi základní vady struktury patří dle normy ČSN 42 1240:

- staženiny, řediny
- makroskopické vměstky
- trhliny povrchové a vnitřní
- pórovitost

Jednou z důležitých vlastností litých Al-Si slitin je jejich **zabíhavost**. Slitiny přibližně eutektického složení (např. AlSi7Mg0,3, AlSi11Mg, AlSi12, AlSi10Mg, AlSi12CuNiMg), u kterých probíhá tuhnutí v úzkém teplotním intervalu, vykazují velmi dobrou zabíhavost. Tato vlastnost však může být velmi ovlivněna způsobem lití, vlastnostmi a tvarem formy, uspořádáním vtokové soustavy, konstrukcí odlitku apod.

Výrazný vliv na zabíhavost rovněž vykazuje lící teplota a její změny při plnění formy, což znamená, že se při odlévání musí počítat s teplotou a tepelnou vodivostí materiálu formy. Z hlediska technologie lití může výskyt vad vlivem snížené zabíhavosti eliminovat vyšší metalostatický tlak.

Při ochlazování odlitku ve formě již v ztuhlém stavu dochází ke *smrštění* spojenému s rozměrovou změnou objemu (zmenšení). Tento typ deformace způsobuje vady odlitků, jako jsou zborcení, nedodržení rozměrů a koncentrace pnutí při tuhnutí ve formě. Z důvodů špatné poddajnosti formy a zpomalení smrštění může docházet k tvorbě trhlin a prasklin. Mohou se vyskytovat na povrchu odlitku i ve vnitřní struktuře. Při lití pod tlakem do kovových forem se smrštění pohybuje u **AlSi7Mg** od 0,4 – 0,6 %.

Slitiny Al-Si vykazují rovněž sklon k tvorbě *trhlin a prasklin*. Tyto defekty jsou závislé na vlastnostech dané slitiny, která se bude odlévat. Mezi tyto vlastnosti slitiny patří například: typ krystalické mřížky, interval tuhnutí, velikost zrna a typ mikrostruktury. K tvorbě trhlin a prasklin dochází méně u materiálů, které vykazují snadnou plastickou deformaci. Vhodnou konstrukcí odlitku jde částečně odstranit vznik prasklin a také umožní pomalé ochlazování slitiny v tuhém stavu. Trhliny se u eutektických slitin tak často nevyskytují.

U odlitků z hliníkových slitin jsou zavedeny způsoby pro odstranění procesu *stahování*. Oba dva typy staženin uzavřené i otevřené se dají eliminovat procesem tzv. nálitkování, také je podstatné zvolit vhodnou konstrukci odlitku. V případě podeutektických hliníkových slitin se často vyskytují *řediny*. Tyto defekty jsou poměrně složitějšího charakteru, ale v dnešní době se dají dobře identifikovat pomocí defektoskopických metod. Dané metody jsou již na velice dobré úrovni. Řediny často oslabují nosný průřez – stěnu Al-Si odlitku. Nejčastěji se odhalí při procesu obrábění, kdy dochází k protržení stěny odlitku. Nejmenší staženiny byly zjištěny u slitin hliníku **AlSi11Mg**, slitina **AlSi7Mg** má větší objem staženin.

Velkým problémem u většiny odlévaných Al slitin je vznik *pórovitosti*. U hliníkových slitin vedou ke vzniku pórovitosti zejména plyny, jako jsou: vodík, kyslík, dusík a vodní pára. Nejčastější plyn je vodík a jeho rozpustnost v tekutém stavu Al slitiny se výrazně zvyšuje s rostoucí teplotou (viz. Tab. 2). Toto neplatí u tuhého stavu, kdy je rozpustnost nízká. Při procesu krystalizace se vodík vylučuje ve formě pórovitosti.

**Tab. 2** Rozpustnost vodíku v závislosti na teplotě a fázi [21].

Teplota [°C]	Fáze	Rozpustnost vodíku [cm <sup>3</sup> /100g Al]
560	tuhá	0,036
660	tekutá	0,69
900	tekutá - přehřátá	2,8

Také vodní pára přispívá při reakci s roztaveným hliníkem, kterou je možné popsat pomocí následující rovnice, k tvorbě vodíkové pórovitosti:



Následně vzniklé póry jsou v některých případech pokryty vrstvou  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , při analýze lomové plochy může být tato vrstva v některých případech viditelná. Značný vliv na vznik pórů mohou mít i znečištěné vstupní materiály, ingoty hliníku, na kterých se nachází vrstva oleje, nebo jiné nečistoty podporují vznik pórovitosti. Pro zamezení obsahu vodíkových pórů jsou důležité inertní plyny, tyto plyny slouží k navazování vodíkových bublin. Odplynění a následné naplynění taveniny slouží k odstranění vodíkových bublin a následné pórovitosti, při tomto procesu dochází k vhánění inertního plynu, nejčastěji Argonu do taveniny. Dále se přidává rafinační sůl  $\text{K}_2\text{SiF}_6$  (fluorokřemičitan draselný) a  $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (uhličitan draselný). Dalším důležitým faktorem je zvolení vhodné lící teploty. Nachází se u odlitků ve tvaru dutin a různě velkých pórů. Pórovitost je nejlépe zjištělná na příčném řezu. Řez odlitku musí být veden kolmě na směr lití [6, 22].

Makroskopické zkoušky jsou obvykle předběžný postup před zkoumáním mikrostruktury. Často se využívá jako kontrola kvality polotovarů a hotových odlitků. Typy těchto vad je možné zjistit v makrostruktuře slitiny. Vady v makrostruktuře jsou dobře zjištělné a hlavní výhodou je snadná příprava vzorků k jejich studiu. Pozorované vzorky jsou vybroušeny a naleptány. Nevýhodou této metody je omezení

na velké strukturní vady a také nemožnost identifikace chemického složení nebo morfologie. Tyto vady lze pozorovat zrakem nebo za použití světelného mikroskopu při malém zmenšení. Při dokumentaci zkoumaných ploch musí být vzorek dobře nasvícen, z důvodu špatného odrazu světla mohou být některé vady špatně viditelné. Makroskopické vady v slévárenských slitinách hliníku jsou nejčastěji [1, 23].

V praxi jsou využívány *rentgenové technologie* na zjištění vad odlitků z Al-Si slitin, odlitky jsou kontrolovány ještě před tepelným zpracováním a obráběním. U automobilových kol je RTG technologie využívána pro kontrolu vnitřní kvality odlitku a zejména se zaměřuje na pórovitost a další vady. Tato technologie se řadí do skupiny nedestruktivních zkoušek a probíhá na celém kole (viz. Obr. 12). Pomocí RTG technologie je možné odhalit 95 % všech vad.



**Obr. 12** RTG kontrola odlitků kol [18]

V některých případech se může využívat technologie *CT – Computer Tomography*. Tato metoda se využívá, jen když se na odlitku vyskytnou vady, které nebylo možno dobře analyzovat pomocí RTG paprsků. Tato technologie poskytuje detailnější a kvalitnější popis vady. Využívá k tomu kombinaci počítačové tomografie s přesným optickým senzorem. Tato zkouška se opět provádí nedestruktivně, ale pro nejlepší výsledky je vhodné odlitek rozřezat. CT technologie je časově náročný program, proto se využívá jen výjimečně při sériové výrobě odlitků [21].

Při absenci hrubých vad jsou vlastnosti odlitků do značné míry ovlivněny velikostí *mikrostrukturních defektů*, zejména mikropórů a oxidické vrstvy. Vady zjistitelné pouze ze studia mikrostruktury. Pro jejich zjištění se nejčastěji využívá elektronový rastrovací mikroskop a EDX chemická analýza. Únavová životnost hliníkových odlitků je velmi citlivá na velikost strukturních defektů. Většina odlitků obsahuje póry a oxidické vměstky různých tvarů a velikostí.



## 2.11 Vliv rychlosti průtoku plynu

### *Vliv rychlosti průtoku plynu na plnicí schopnosti při nízkotlakém odlévání*

Průtok plynu je jedním z nejdůležitějších parametrů procesu při výrobě odlitků. S rostoucím průtokem plynu se snižuje pórovitost odlitků, zjemňuje se mikrostruktura a zlepšuje se vnitřní kvalita odlitků. Srovnávací pokusy ukázaly, že proces EPSC-VL měl vynikající schopnost vyplňování, vnitřní kvalitu, a mechanické vlastnosti ve srovnání s procesem LFC.

Komplikované a tenkostěnné přesné odlitky z hliníkové slitiny se stále více používají v automobilovém průmyslu, protože lité hliníkové slitiny mají mnoho výhod, jako je vysoká tekutost, dobrá slévatelnost, vysoká pevnost v hmotnostním poměru a dobrá odolnost vůči korozi. Pro mnoho tradičních licích metod je obtížné vyrobit tyto odlitky bez licích vad, jako jsou nezabíhavost, pórovitost a oxidické vměstky. Tyto vady se často generují během procesu lití. Licí formy, trvalé licí formy, a lití do písku se obvykle používají k výrobě komponentů z hliníkových slitin. Nicméně, opakující se změny v návrhu formy jsou nákladné a časově náročné při procesu lití. Následné tepelné zpracování odlitků získaných metodou tlakového lití, není možno provést z důvodu tvorby puchýřů na povrchu odlitku [25, 26].

V trvalých licích formách je obvykle obtížné vyrobit tenkostěnné odlitky vzhledem k vysoké rychlosti tuhnutí roztaveného kovu při licím procesu. Odlévání v pískových formách nesplňuje požadavky rozměrové přesnosti a povrchové úpravy požadované u přesných odlitků.

Regulací průtoku plynu můžeme ovlivnit hodnotu tlaku plynu a rychlost naplnění formy. Pokud je nedostatečný tlak a rychlost plynu vznikají defekty jako je pórovitost, nezabíhavost a nedostatečné zaplnění dutin ve formě. A to především u tvarově složitých a tenkostěnných odlitků. Z tohoto důvodu má průtok plynu velký vliv na plnicí schopnosti a vnitřní kvalitu odlitků [25].

Zkoušky byly prováděny se slitinou A356 - T6 při nízkotlakém lití s vakuem EPSC-VL (viz. Obr. 13). Zde jsou popsány výsledky, které popisují vliv průtoku plynu na plnicí schopnosti odlitků ze slitiny A356. Teplota roztaveného kovu se pohybovala od 720 – 760 °C. Následně byla slitina odplyněna pomocí Argonu a byla odstraněna struska z povrchu taveniny, aby nedocházelo k zanášení oxidů do taveniny. Poté byla

slitina připravena na nízkotlaké odlévání. V tabulce 3 a 4 jsou uvedeny fyzikální a teplotní parametry a také parametry plnění formy.

**Tab. 3** Parametry pro experimentální plnění [25]

Číslo testu	Teplota lití [°C]	Průtok plynu [m <sup>3</sup> /h]	Tlak plynu [MPa]	Úroveň vakua [MPa]
1	720	5	0,03	0,03
2	720	12	0,03	0,03
3	720	19	0,03	0,03

**Tab. 4** Fyzikální a teplotní parametry hliníkové slitiny A356 [25]

Materiál	Hustota [g/mm <sup>3</sup> ]	Měrné teplo [J/(g·°C)]	Latentní teplo [J/g]
A356	(2,4-2,7)×10 <sup>-3</sup>	0,963	389

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti [W/(mm·°C)]	Teplota Solidu [°C]	Teplota Likvidu [°C]
A356	0,151	555	615

Hustota stálého tlaku plynu je vyjádřena následující rovnicí:

$$\rho_g = \rho_0 + \Delta\rho = \frac{P_f}{\bar{R}T_0} \quad (2)$$

$\rho_0$  – počáteční hustota plynu

$P_f$  – přechodný tlak plynu

$\bar{R}$  – měrná plynová konstanta

$T_0$  – teplota plynu

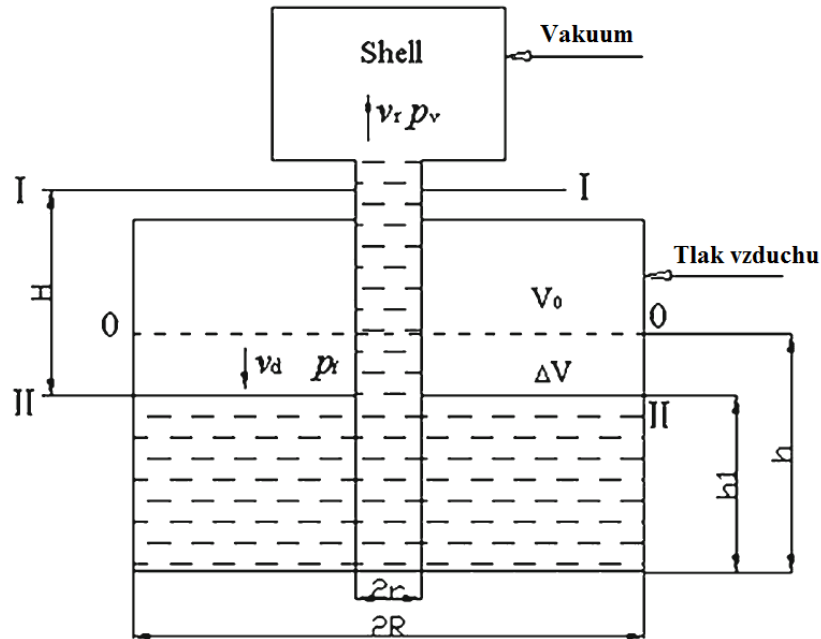
Délka naplnění je produktem rychlosti naplnění ( $v$ ) a časem ( $t$ ) a ještě před roztaveným kovem přestane plnění, vyjádřeno jako:

$$L = \frac{1}{4} * v * t \quad (3)$$

$v$  - rychlost naplnění

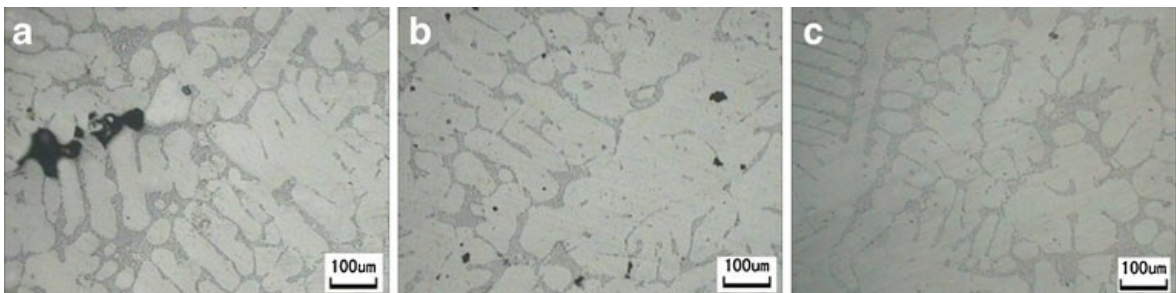
$t$  - čas

Faktory ovlivňující rychlost a dobu plnění formy mají velký vliv na schopnosti naplnění formy.



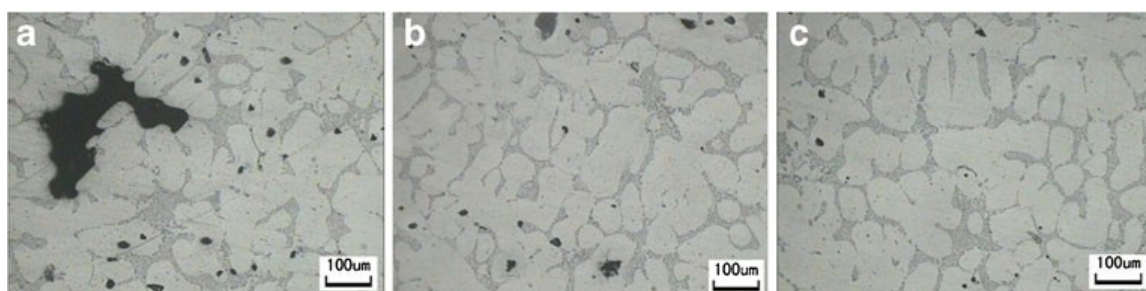
**Obr. 13** Schéma plnicího procesu experimentální metodou EPSC-VL

Se zvyšujícím se průtokem plynů se pórovitost materiálu značně sníží. Také se zlepšuje vnitřní kvalita slitiny, která je bez dalších výrazných defektů. Tyto výsledky byly zaznamenány pro širší část formy. Na dalších obrázcích můžeme porovnat vliv rychlosti toku plynu v závislosti na výsledné mikrostruktuře. Zejména pórovitost výsledné slitiny a to jak v širší tak tenčí části formy.

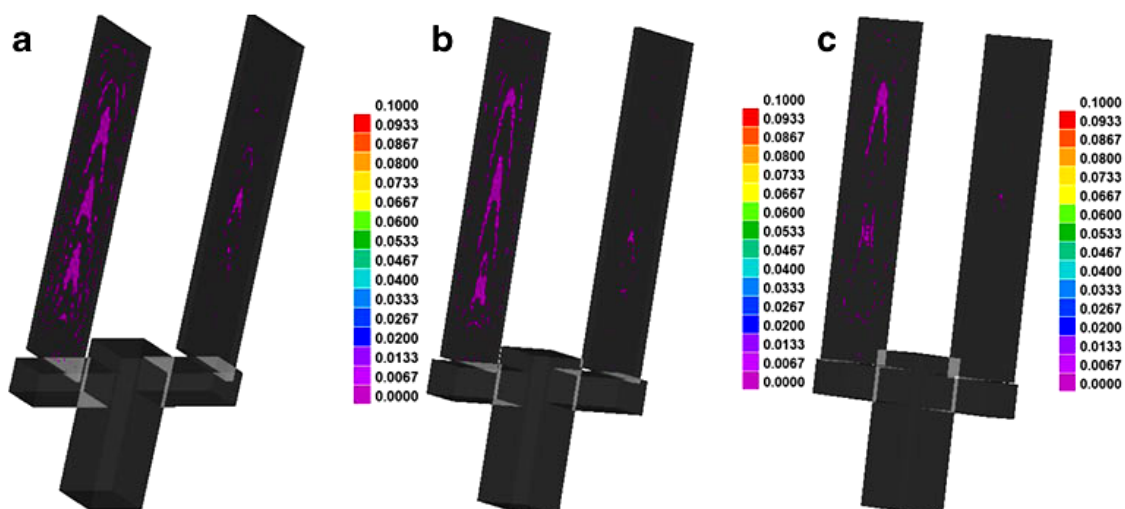


**Obr. 14** Mikrostruktura širší části formy, a)  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , b)  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ , c)  $19 \text{ m}^3/\text{h}$

V této části formy má výsledný odlitek větší objem a je nejširší částí formy. Z fotek výsledné mikrostruktury (viz. Obr. 14) je zřejmé, že při nejmenší rychlosti průtoku plynu je pórovitost největší. Velká pórovitost je vidět jako větší černé útvary na fotografii a). V případě zvýšení průtoku na 12 m<sup>3</sup>/h je vidět značné snížení pórů ve slitině. Při nejvyšším tlaku je mikrostruktura téměř bez vad (Obr. 14 c).



**Obr. 15** Mikrostruktura tenké části formy, a) 5 m<sup>3</sup>/h, b) 12 m<sup>3</sup>/h, c) 19 m<sup>3</sup>/h



**Obr. 16** Výsledky simulace poréznosti odlitků získaných různými průtoky plynu: a) 5 m<sup>3</sup>/h, b) 12 m<sup>3</sup>/h, c) 19 m<sup>3</sup>/h [25]

Mikrostruktura tenké části formy z Obr. 15) je pro odlitek s tloušťkou 5mm. V tenkých nebo složitě tvarovaných částech formy má rychlost průtoku plynu největší vliv.

I v případě průtoku plynu rychlostí 19 m<sup>3</sup>/h je výsledná struktura poznamenána pórovitostí (Obr. 15 c), která není již tak velká jako v případě nižší rychlosti, ale stále je patrná.

Zvýšením průtoku plynu se výrazně zlepší vnitřní mikrostruktura a schopnost vyplnění formy hliníkovou slitinou A356. Také se zvyšuje její výsledná hustota. Na následujícím Obr. 16 je průběh simulace pórovitosti na průtoku plynu. Opět se potvrdilo, že se zvýšenou rychlosti průtoku plynu se dosahuje daleko lepších výsledků, a to jak v případě pórovitosti, hustoty, tak zlepšení zabíhavosti slitiny A356 [25].

## 2.12 Vybrané slitiny

### 2.12.1 Slitina AlSi7Mg0,3 - A356

#### *Podeutektická slitina*

Silumíny jsou hlavními slitinami hliníku pro odlitky. Vyznačují se vynikající hermetičností, svařitelností, korozní odolností a slévárenskými vlastnostmi. Slitiny obsahující Mg jsou vytvrditelné pomocí fáze Mg<sub>2</sub>Si. Charakteristickým tepelným zpracováním pro vytvrzení na maximální pevnost je rozpouštěcí ohřev na 535 ± 5 °C po dobu 2 až 6 hodin, zakalení do horké vody 50 až 100 °C a následné stárnutí při 175 °C a 15 hodinách. Značení vybraných slitin dle normy se nachází v tabulce (viz. Tab. 5).

Pro použití v leteckém průmyslu jsou určené slitiny A356 a A357, které jsou modifikacemi běžných slitin A356 a A357. Mají vyšší čistotu a z toho vyplývá i vyšší plasticita. Slitina A356 má vyšší obsah Mg a obsahuje také malé množství Be. Některé slitiny Al-Si jsou legované současně Mg a Cu. Vytvrzením lze výrazně zvýšit mechanické vlastnosti, které je ale doprovázeno určitým snížením plasticity a korozní odolnosti. [27]

**Tab. 5** Značení slitin Al-Si a slitina A356

Hutní	Označení				
	ČSN	AA	GOST	DIN	EN
AlSi7Mg0,3	42 4332	A356	AL9	3.2371	AL-C27
AlSi7Mg0,6		A357			AL-C26
AlSi10MgMn	42 4331		AL4	3.2381	
AlSi5Cu1Mg	42 4380		AL5	3.2131	

## 2.12.2 Slitina AlSi11Mg – EN AC-44000

### *Eutektická slitina*

Tato slitina se vyznačuje velmi dobrými mechanickými i slévárenskými vlastnostmi, je vhodná na výrobu tenkostěnných a složitých odlitků. Její obrobiteľnosť je na velice dobré úrovni. Vyznačuje se dobrou odolností proti korozi, střední pevností a tažností. Výsledné mechanické vlastnosti jsou také závislé na způsobu odlévání (viz. Tab. 6). S klesajícím obsahem hořčíku se po žihání zlepšuje tažnost [28].

**Tab. 6** Porovnání metod lití na mechanické vlastnosti slitiny AlSi11Mg [28]

Metoda lití	Smluvní mez pružnosti [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Prodloužení As [%]	Tvrдость HB
Lití do písku	80-130	160-220	2-7	60-75
Obsah Mg 0,25 - 0,45 hm. %	180-290	120-310	2-5	60-75
Obsah Mg pod 0,3 hm. %	80-110	140-210	8-14	80-100
Gravitační lití	90-150	170-240	4-12	70-90
Obsah Mg 0,25 - 0,45 hm. %	190-300	240-320	4-12	90-110
Obsah Mg pod 0,3 hm. %	100-150	170-240	8-18	85-105

## 2.12.3 Srovnání mechanických vlastností slitiny AlSi7Mg0,3 a AlSi11Mg

V obou případech mají velice podobné chemické složení (viz. Tab. 7), slitina AlSi11Mg vykazuje mírně menší obsah Mg a vyšší obsah Si.

**Tab. 7** Chemické složení vybraných slitin

		Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Mg	Mn	P	Ca	Al
AlSi7Mg	min.	0,1	6,5	0,03	0,03	0,2	0,2	0,03	0,0015	0,002	zbytek
	max.	0,12	7,5	0,03	0,03	0,2	0,5				
AlSi11Mg	min.	0,12	10,5	0,03	0,03	0,2	0,1	0,03	0,002	0,002	
	max.		11,5				0,2				

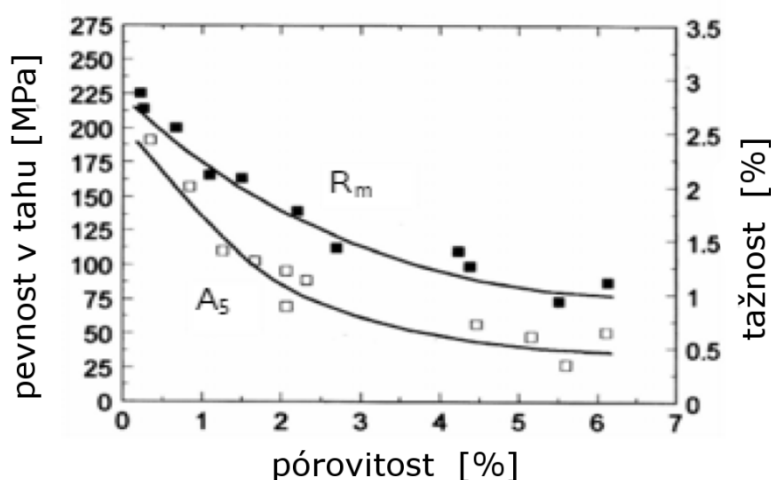
V případě porovnání mechanických vlastností jsou zde rozdíly už více patrné. Lepších vlastností v téměř všech případech vykazuje slitina AlSi7Mg0,3. V obou případech byly porovnávány vlastnosti slitin po tepelném zpracování T6.

**Tab. 8** Mechanické vlastnosti vybraných slitin podle Aluminium Rheinfelden GmbH, Germany ve srovnání s normou EN 1706 [11]

Slitina	Značení	TZ	Rm [MPa]	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]
		Tepelné zpracování	Mez pevnosti	Mez kluzu
AlSi7Mg0,3	EN AC-42 100	T6	240 - 320 (240)	220 - 280 (200)
AlSi11Mg	EN AC-44 000	T6	200 - 320 (200)	120 - 310 (110)

Slitina	Značení	A [%]	HB	σ <sub>bw</sub> [MPa]
		Tažnost	Tvrdoost (Brinell)	Odolnost proti únavě
AlSi7Mg0,3	EN AC-42 100	3 - 6 (2,5)	80 - 110 (80)	90 - 100
AlSi11Mg	EN AC-44 000	1 - 3 (0,5)	65 - 120 (55)	90 - 120

Mechanické vlastnosti, jako je pevnost, tažnost, únava nebo tvrdost u odlitků silně závisí na přítomnosti vad, které byly popsány v kap. 2.10. Vliv pórovitosti na pevnost a mez kluzu u slitiny Al-Si-Cu je uveden na následujícím Obr. 17, ze kterého je patrné, že pórovitost má největší vliv na mechanické vlastnosti v obsazích do 1,5 %, poté již pokles není tak výrazný.



**Obr. 17** Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti pro slitinu AlSi6Cu4 [2]



### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem diplomové práce bylo vyhodnocení vad a mikrostruktury Al-Si slitin po nízkotlakém odlévání a jejich vliv na výsledné vlastnosti slitiny. Vzorky byly ze slitiny AlSi7Mg0,3 (A356). Studium a analýzy byly provedeny na vzorcích před a po tepelném zpracování.

Vzorky pro následující experiment byly zajištěny od firmy, která se zabývá výrobou litých kol z Al-Si slitin pro automobilový průmysl (Obr. 18).

Experimentální část bude nejvíce zaměřena na vyhodnocení pórovitosti. Bude provedena obrazová analýza k porovnání procentuálního zastoupení všech vad ve výchozí slitině. Dále také mikroanalýza na elektronovém mikroskopu, analýza chemického složení a určení pórovitosti.



**Obr. 18** Výrobní linka kol ze slitin hliníku pro automobily

### 3.1 Příprava vzorků

Vsázka pro přípravu odlitků se skládá z normovaných dodávaných ingotů slitiny hliníku, ke které se do pece přidává zbytkový materiál z předešlého výrobního procesu. Vsázka materiálu je tedy tvořena:

- **70% - primární nový materiál**
- **30% - recyklát (odpad)**

Primární nový materiál je dodáván od výrobce. Odpadní materiál je recyklovaná slitina, která zůstala nevyužita z předchozího odlévání a dalších úprav (soustružení atd.). Do tohoto odpadního materiálu jsou přidávány i hotová kola, která byla vadná nebo sloužila pro analýzy nebo mechanické zkoušky. Pro odstranění nečistot se tento materiál tepelně zpracovává před přidáním do primární vsázky.

Složení primární slitiny s nízkým obsahem Stronciuma – *Sundal FA AlSi7Mg – low Sr* je uvedeno v následující tabulce (viz. Tab. 9).

**Tab. 9** Chemické složení primární slitiny AlSi7Mg – low Sr

Slitina	Al	Si	Mg	Ti	Fe	Sr	Mn	Zn
AlSi7Mg - low Sr	92,14	7,366	0,299	0,095	0,081	0,0204	0,001	0,002

Důležitým údajem je teplota odlévání a tuhnutí. Pomocí termické analýzy se určují křivky solidu a likvidu v tavenině. Teplota likvidu  $T_L$  je cca 615 °C, zjištěná teplota solidu  $T_S$  569 °C a teoretická teplota  $T_s$  je 573,6 °C podle složení slitiny bez očkovaadel a modifikačních činidel. Poté se analyzuje, jaký vliv mají intervaly tuhnutí na vady a mikrostrukturu.

V hliníku i jeho slitinách se vyskytuje vždy menší či větší množství prvků, které jsou považovány za nežádoucí, neboť negativně působí na mechanické vlastnosti materiálu. Mezi takové prvky patří zejména Fe, Mn, O a H. Železo i mangan se do kovového hliníku dostávají ze surovin pro elektrolýzu oxidu hlinitého, případně ze zpracovávaného hliníkového šrotu. Oba prvky se podílejí na tvorbě intermediálních fází v mikrostrukturu slitin, které zhoršují plastické vlastnosti slitin. Přesné složení těchto fází závisí na konkrétním druhu slitiny a mohou to být např. fáze  $FeAl_3$ ,  $FeSiAl_5$ ,  $Mg_2Si$  atd. V běžných hliníkových slitinách se obsahy uvedených prvků pohybují řádově v desetinách

hm. %. Existují však slitiny, kde je železo a zejména křemík záměrně přidávanými legujícími prvky.

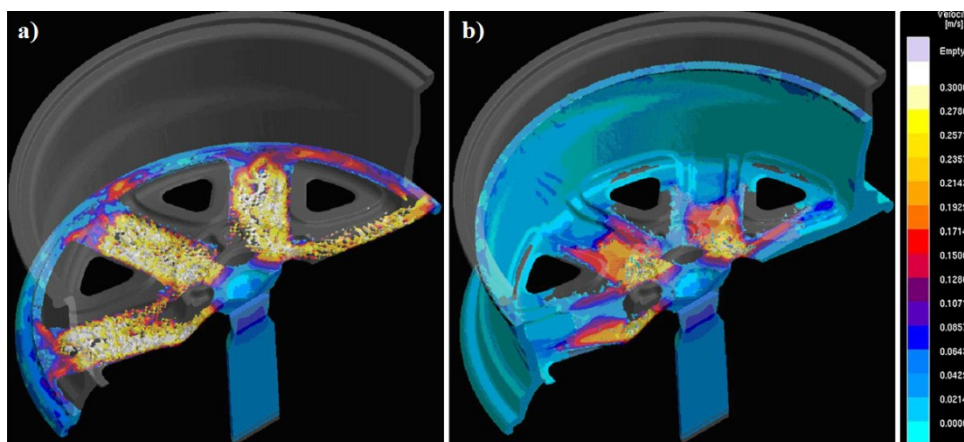
Kyslík se do hliníku dostává ze vzduchu při tavení. Na povrchu taveniny se tvoří poměrně kompaktní vrstva oxidu hlinitého, která má ochranný účinek proti dalšímu pronikání kyslíku. Pokud se však oxidická vrstva dostane do slitiny např. při přelévání taveniny, míchání, výrazně zhoršuje plastické a pevnostní vlastnosti slitin. Odstranění oxidických vměstků je možno realizovat filtrací taveniny přes keramické nebo ocelové filtry, probubláváním taveniny inertním plynem nejčastěji argon, pomocí tzv. krycích solí, což jsou směsi halogenidů alkalických kovů. Tyto halogenidy se rozprostírají na povrchu taveniny, čímž brání přístupu kyslíku a také v sobě oxidy částečně rozpouštějí.

### 3.1.1 Nízkotlaké lití

Probíhá pod konstantním tlakem 1 bar (0,1 MPa). Při plnění odlitku se dodržují následující parametry:

- předplnění formy po dobu 2s a pod tlakem 0,2 bar (0,02 MPa)
- plnění po dobu 15s a pod tlakem 0,4 bar (0,04 MPa)
- konečné dotlačení po dobu 10s a pod tlakem 1 bar (0,1 MPa)

Finální plnění formy pod největším tlakem má za úkol, aby se tavenina dostala do všech částí formy. Pro názornost je na následujícím obrázku (Obr. 19) ukázáno postupné plnění formy odlitku automobilového kola pomocí počítačové simulace [29].



**Obr. 19** Simulace zaplnění formy: a) 20 % zaplnění, b) 70% zaplnění [29]

### 3.1.2 Odplynění taveniny A356 T6

Pomocí odplynění taveniny se provádí čištění hliníkové slitiny prostřednictvím inertního plynu (Argon 5N). Před začátkem procesu odplynění se ke kovu přidává 80g směsi rafinačních solí (Aluxal), aby vyplavaly na povrch možné vměstky. Rafinační sůl se skládá z:

- $K_2SiF_6$  - fluorokřemičitan draselný
- $K_2CO_{3,1} \cdot 5H_2O$  - uhličitan draselný

Odplynění taveniny (viz. Obr. 20) probíhá ve dvou časových etapách. První trvá 6 minut a je pro kola bez dalších úprav povrchu, druhý trvá 10 minut a je pro kola, která se dále obrábějí z důvodů další povrchové úpravy tzv. " diamant ". Po procesu odplynění se tavenina znovu naplyňuje po dobu 15s směsným plynem Ar90H10. Tento proces napomáhá lepší zabíhavosti a následná hustota slitiny se pohybuje v rozmezí od 2,52 – 2,6 g/cm<sup>3</sup>. Poslední proces před odléváním je stažení povrchové strusky, která se udržuje na hladině roztaveného kovu. Je důležité, aby odstranění bylo provedeno precizně a oxidické vměstky nezanášely zpět do taveniny. Teplota taveniny po odlití z pece je 706°C a po odplynění se teplota pohybuje okolo 720°C.



**Obr. 20** Proces odplynění – a) rafinační sůl, b) odplynění a naplynění, c) stahování strusky z povrchu taveniny

### 3.1.3 Očkování hliníkových slitin

Základním účelem očkování je vnášení nukleačních zárodků do slitiny. To má za následek zjemnění primární fáze  $\alpha(Al)$  i eutektik. Tento způsob zjemnění struktury je nejúčinnější u slitin s obsahem křemíku 5 – 7 %. Velmi dobré zjemnění struktury vykazuje přidání titanu a bóru do taveniny, jak to například bylo provedeno u našich vzorků ze slitin AlSi7Mg, které byly očkovány kromě přídatku Sr také pomocí předslitiny  $Ti_5B$ .

### 3.1.4 Tepelné zpracování a vytvrzení

Pod pojmem vytvrzování rozumíme tepelné zpracování, skládající se z ohřevu na rozpouštěcí teplotu (Solution), prudkého ochlazení ve vodě – zakalení (Quench) a následujícím stárnutím materiálu (Aging) buď při normální, nebo při zvýšené teplotě.

Shrnuto:

- ohřev na rozpouštěcí teplotu
- prudké ochlazení
- stárnutí – přirozené, cyklus **T4**
- stárnutí – za zvýšené teploty, cyklus **T6**

U slitiny A356 se provádí tepelné zpracování pod označením T6 s následujícími parametry:

- rozpouštěcí žihání při  $\pm 523^{\circ}\text{C}$  po dobu 4 hodin
- zakalení do vody na  $80^{\circ}\text{C}$
- stárnutí při  $150^{\circ}\text{C}$  po dobu 4 hodin

### 3.2 Příprava metalografických vzorků

Vzorky slitiny AlSi7Mg0,3, tedy A356, byly odebrány z intervalu dvou měsíců. První sada vzorků byly odlitky, ty byly odebrány do kelímku přímo z taveniny, po procesu odplynění. Druhá sada vzorků je již z hotových kol, po nízkotlakém lití a následném tepelném zpracování. Spolu s vzorky hotových kol byly odebrány vzorky třísek, které se zpětně přidávají k primární slitině. Vzorky třísek byly před a po tepelném zpracování.

***Značení vzorků:***

*Odlitky kelímků:*

- první sada A, B, C, D
- druhá sada E, F

*Hotová kola:*

- vzorek č. 1, 2, 3, 4

*Třísky:*

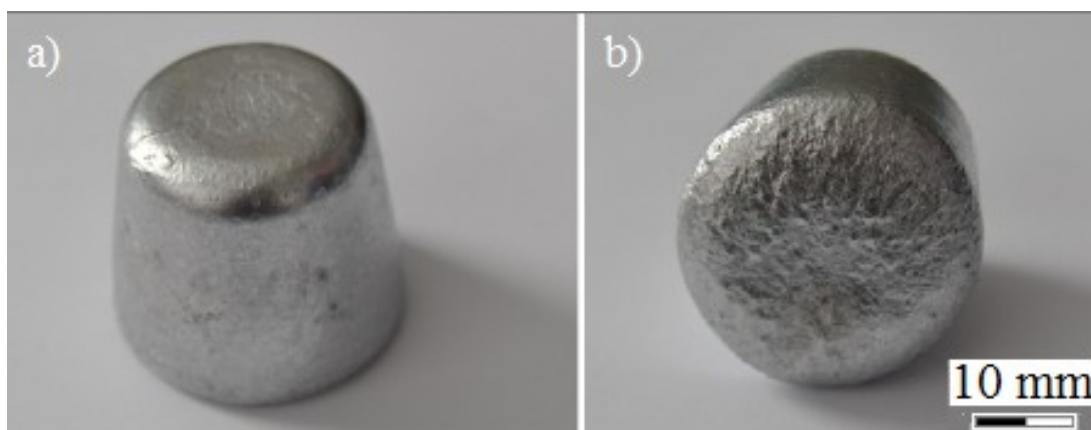
- špony před TZ
- špony po TZ

Vzorky odlitků z první sady byly odebrány dne 20. 2. 2017. A to v časech vzorek A – 6:15, B – 6:25, C – 6:40 a D – 7:00. Vzorky z druhé sady byly odebrány 6. 4. 2017. V časech vzorek E – 22:10 a F – 9:20 hodin. Vzorky hotových kol a třísky byly odebrány také 6. 4. 2017.

Veškeré metalografické práce a analýzy na vzorcích probíhaly v laboratořích FMMI VŠB-TU Ostrava.

### 3.2.1 Vzorky odlitků

Vzorky ve formě malých odlitků z obou sad (viz. Obr. 21) byly děleny jak podélně, tak příčně. Podélné a příčné řezy byly vybroušeny na diamantových brusných papírech. Poté byly vyleštěny a pro oba typy řezů zhotoveny makrografické snímky broušeného povrchu.



**Obr. 21** Vzorky odlitků

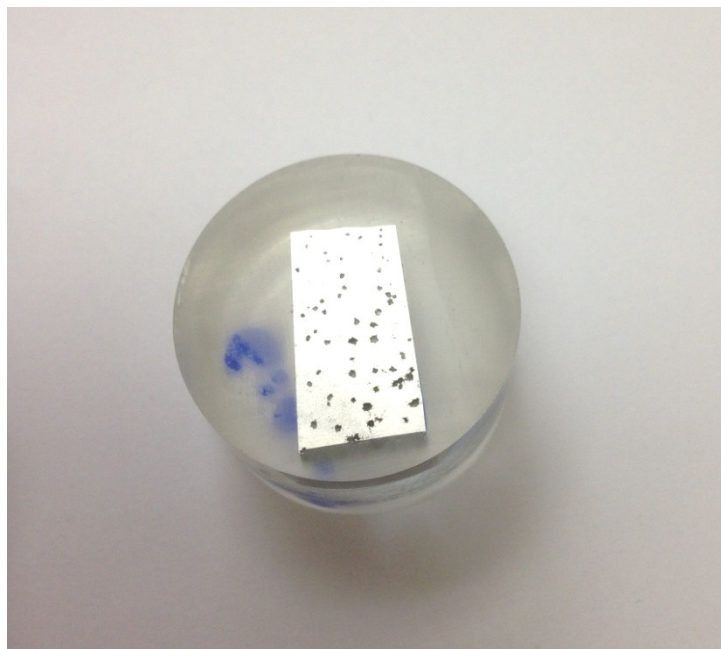
Následně bylo potřeba vzorky připravit na studium mikrografie, která probíhala na světelném mikroskopu. Ze vzorků byly připraveny malé obdélníky cca 15 x 10 mm. Tyto malé vzorky nebylo možné vybrousit a vyleštit z důvodu jejich malých rozměrů. Proto byly vloženy do formy a zalaty speciálním plastem Specifix Kit 40 (viz. Obr. 22).





**Obr. 22** Vzorky připraveny na zalití do plastu

Takto připravené vzorky musely být 24 hodin vytvrzeny, až poté byla možná další manipulace. Vzorky byly následně vytaženy z plastového přípravku a v této podobě (Obr. 23) následovalo broušení a leštění. Poté byly pomocí gravírovacího pera vzorky řádně popsány.



**Obr. 23** Vzorek zalitý v speciální pryskyřici Specifix Kit 40



Broušení probíhalo na laboratorní leštičce pod vodou za použití brusných papírů různých zrnitostí od 600, 800, 1000, 1200 a 1500. Přitom byl každý vzorek broušen cca 2 – 3 minuty. Po tomto procesu následovalo leštění za použití diamantové pasty se zrnitostí 3  $\mu\text{m}$ . Následný poslední krok pro přípravu metalografického výbrusu bylo mechanicko-chemické leštění OPCHEM. Probíhalo za pomoci leštidla OP-S po dobu 3 minut, následovalo oplachování lihem, čistou vodou a vysušení horkým vzduchem. Každý vzorek byl průběžně kontrolován na optickém mikroskopu, v případě poškrábané struktury mohl být vzorek ihned znovu přešetřen.

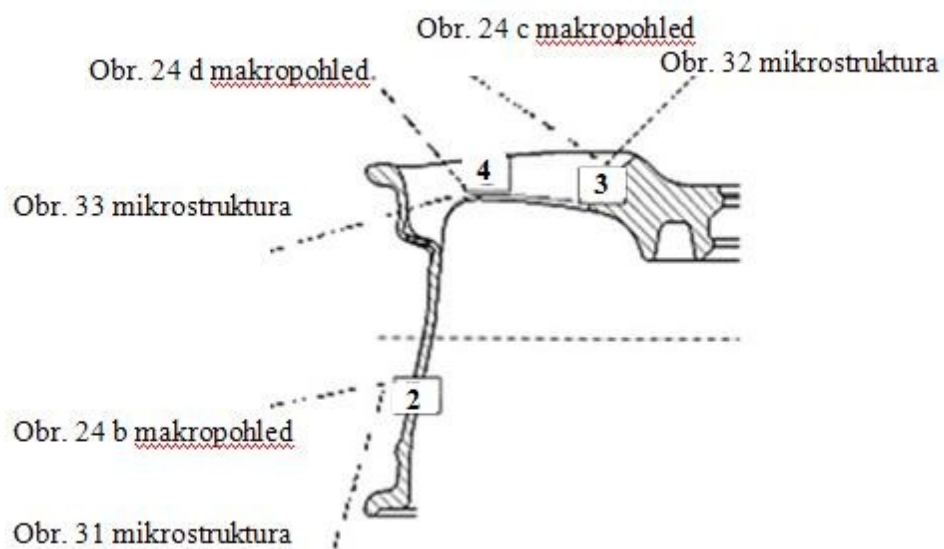
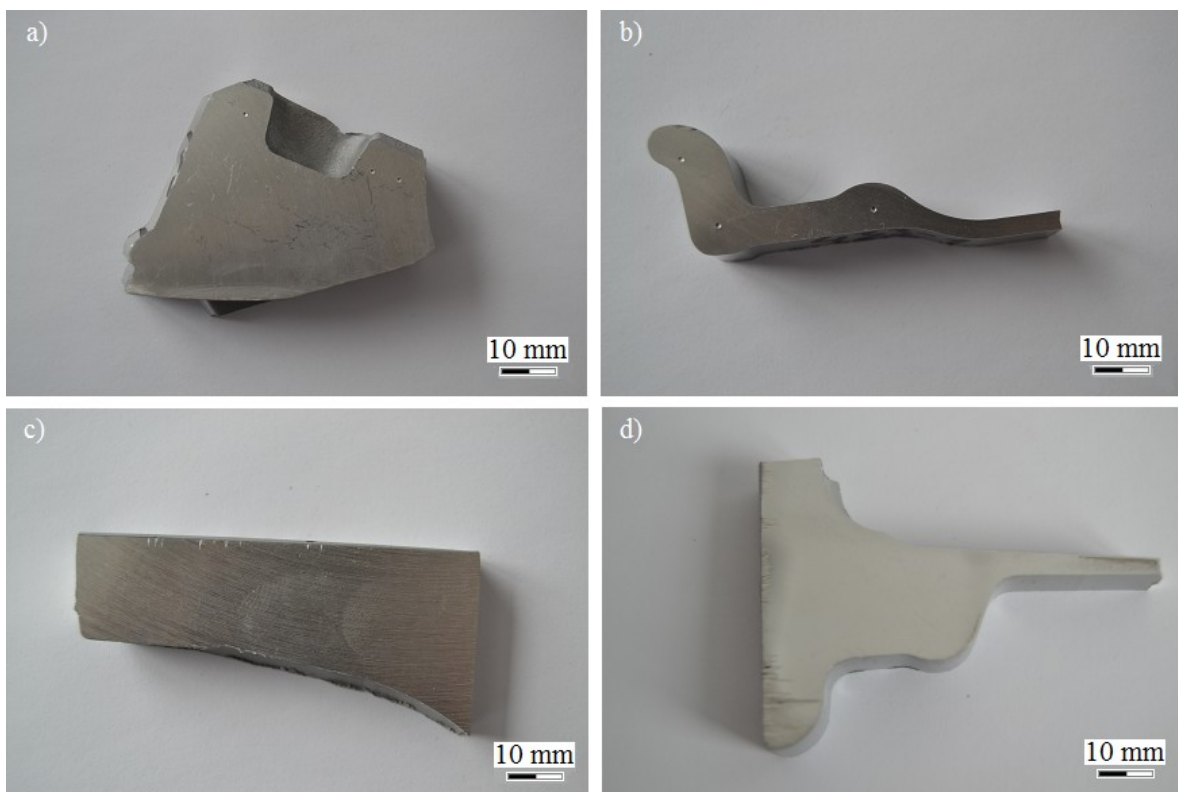
Následně bylo možné přes optický mikroskop Olympus IX70 s digitální kamerou DP12 pozorovat strukturu daných vzorků. Toto pozorování bylo zaměřeno na strukturu a vady dané slitiny.

### 3.2.2 Vzorky hotových kol

Tyto vzorky byly odebrány z různých částí (viz. Obr. 24) již hotového kola. Metalografická příprava vzorků byla obdobná jako v případě odlitků. Vzorek číslo 1 byl pouze vybroušen pod vodou, za pomoci brusného papíru se zrnitostí od 600 do 2500. Na tomto vzorku byla makrostruktura analyzována jen za pomoci digitálního fotoaparátu. Pórovitost a vady tohoto vzorku byly viditelné bez použití optického mikroskopu.



**Obr. 24** Finální kolo ze slitiny AlSi7Mg [30]



**Obr. 25** Vzorky odebrané z hotového kola a) vzorek č. 1, b) vzorek č. 2, c) vzorek č. 3, d) vzorek č. 4 e) schéma odběru vzorků a odpovídající snímky

Vzorky 2, 3 a 4 (viz. Obr. 25) byly nařezány na menší části. U vzorků 2 a 3 byla pozorována jen podélná část vzorku, vzorek číslo 4 byl zalisován jak podélně tak příčně. Nařezané části vzorků byly vloženy do přístroje HTM Standart 30 a zasypány průhlednou

termoplastickou pryskyřicí ALLIED 165-10005. Pro naše vzorky o průměru formy 30 mm byla stanovena teplota 150°C a tlak 180 – 250 baru (18 – 25 MPa) po dobu 8 minut. Vzorky byly poté nutné chladit po dobu 10 minut. Výsledné vzorky byly vybroušeny stejným způsobem jako vzorky odlitků. Vybroušené vzorky byly leptány přibližně 5 s pomocí leptadla Keller, které se skládá z: 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO<sub>3</sub> a 190 ml destilované vody. Pozorování probíhalo na stejném optickém mikroskopu Olympus IX70 jako u odlitků.

### 3.2.3 Vzorky pro stanovení obsahu škodlivých prvků

Množství vodíku v odebraných vzorcích bylo stanoveno pomocí analyzátoru vodíku LECO RH 600 (zařízení RMTVC, FMMI). Stanovení obsahu *vodíku* probíhalo na materiálu jak dodávaného do vsázky (třísky), tak z odlitků a finálního výrobku. Ze vzorků hotových kol a odlitků byly odebrány malé kousky o velikosti všech stran přibližně 5 mm a hmotností po 0,5 g (Obr. 26). Třísky splňovaly požadavky na danou velikost i hmotnost. Velikost vzorků byla omezena vnitřním průměrem grafitových kelímků (8 mm) a konstrukcí podavače.



**Obr. 26** Výsledné krychle pro analýzu obsahu vodíku

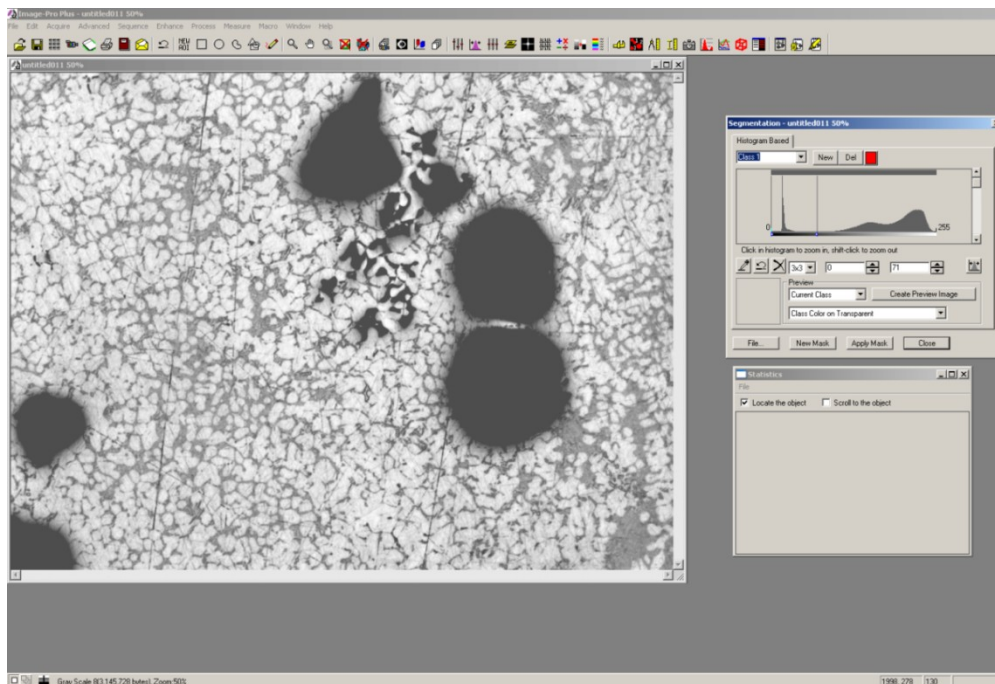
Třísky byly použity rovněž pro stanovení uhlíku, kyslíku, dusíku a síry, a to jak před, tak po tepelném zpracování. Tyto prvky byly stanoveny na analyzátoch ELTRA: CS – 2000 a ONH – 2000.

### 3.3 Metoda hodnocení pórovitosti

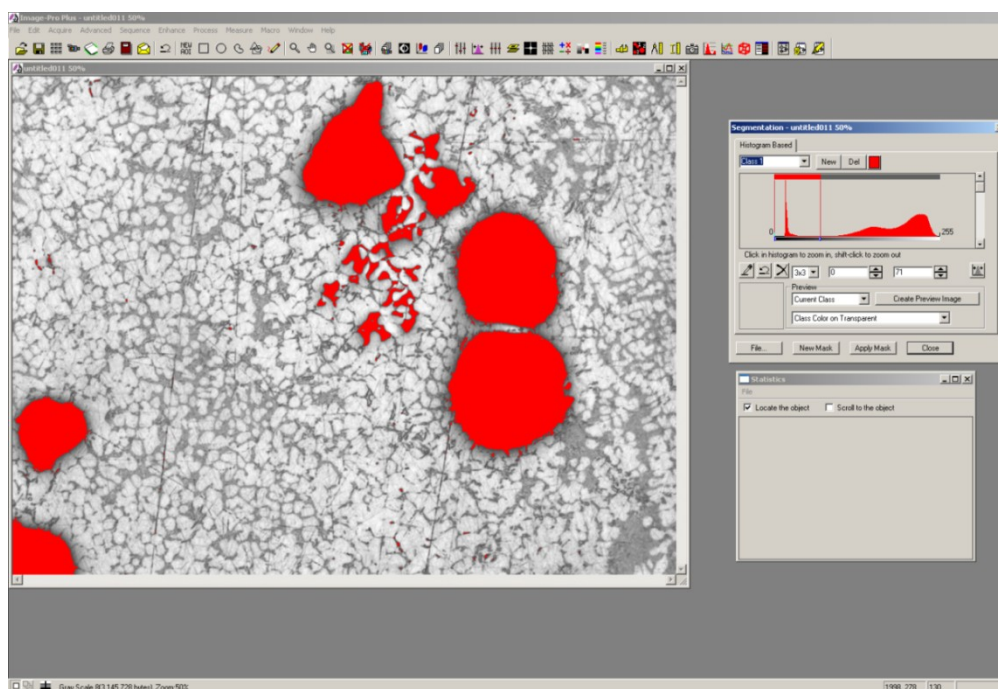
Vyhodnocení pórovitosti bylo provedeno za využití optické mikroskopie. Mikroskop je spojen s digitální kamerou a za její pomoci byl obraz převáděn do počítače. Následně byla struktura vzorků zaostřena a vyfocena, tyto fotografie bylo nutné upravit do odstínů černé. Takto upravené fotografie byly zpracovány obrazovou analýzou pomocí počítačového softwaru Image-Pro Plus od firmy Media Cybernetics. Na takto zhotovených fotografiích, bylo možné provést analýzu (viz. Obr. 27, 28).

Takto byla vyhodnocena každá fotografie, která byla zaznamenána ze třech náhodných míst na každém vzorku. Tento princip vyhodnocení byl stejný pro všechny vzorky podélných i příčných řezů. Na snímcích bylo následně možné provést hodnocení plošného zastoupení pórovitosti. Vzorky a jejich zkoumané části museli být dokonale vybroušeny a následně vyleštěny a to z důvodu, že program zaznamenává hodně tmavá místa, rýhy a jiné poškození by proto program mohl vyhodnotit jako póry nebo řediny.

V tomto případě by bylo měření zkreslené a chybné, výsledná pórovitost by byla výrazně vyšší, než je tomu ve skutečnosti. Program vyhodnocuje snímky pomocí grafického filtru. Ten je nastaven na určitou barevnou hloubku a má předem definovanou citlivost. Po vyhodnocení snímku programem je ve většině případů nutné ručně nastavit filtr, aby zabíral jen výsledné póry a řediny. Bez tohoto ručního nastavení by mohl vyhodnocovat rýhy a jiná poškození, popřípadě povrch eutektika (tmavé místa na snímcích). Analyzované místa se zbarví kontrastní barvou a program může začít vyhodnocovat data a ukládat do tabulek. V datech jsou vypočítány plochy pórů z daného úseku, výsledná velikost celého zkoumaného povrchu je zde také zaznamenána.



**Obr. 27** Snímek před vyhodnocením pórovitosti, vzorek E – podélný řez



**Obr. 28** Snímek po vyhodnocení pórovitosti, vzorek E – podélný řez

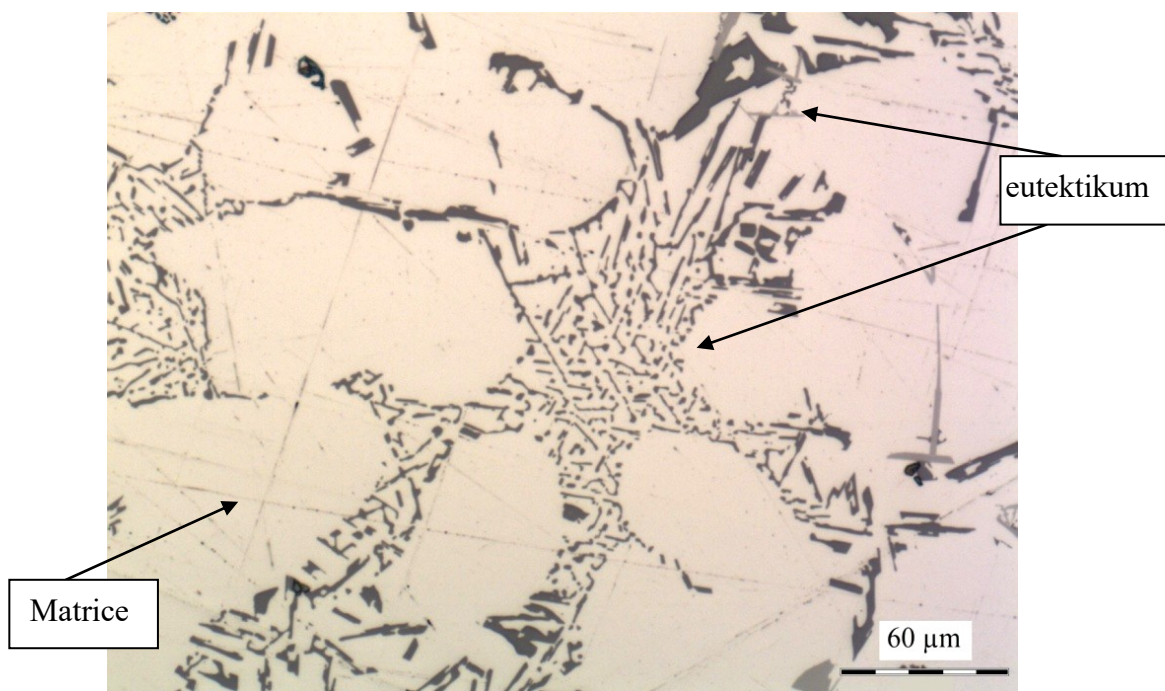


## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

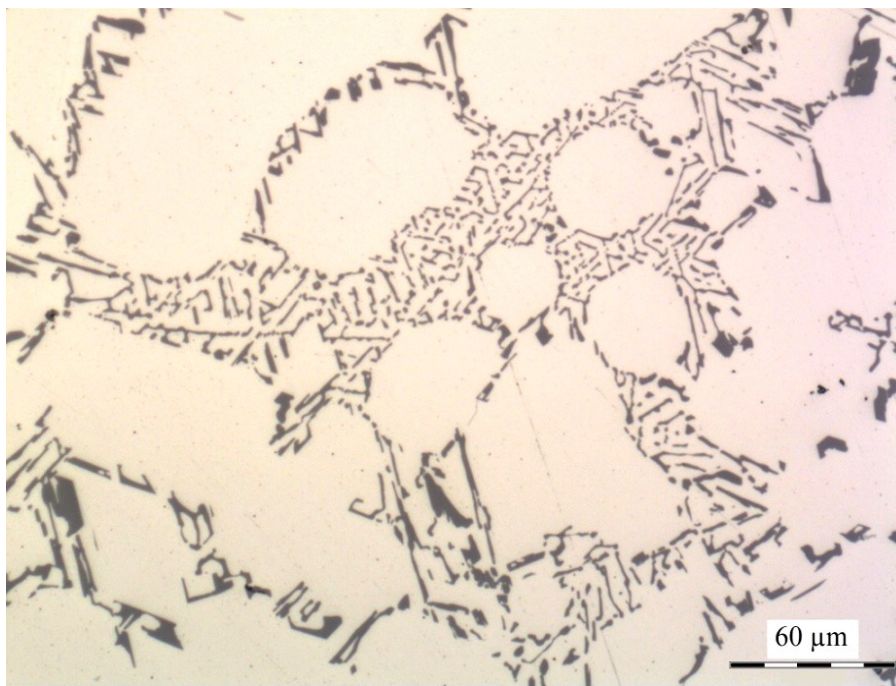
### 4.1 Hodnocení mikrostruktury

#### 4.1.1 Mikrostruktura odlitků

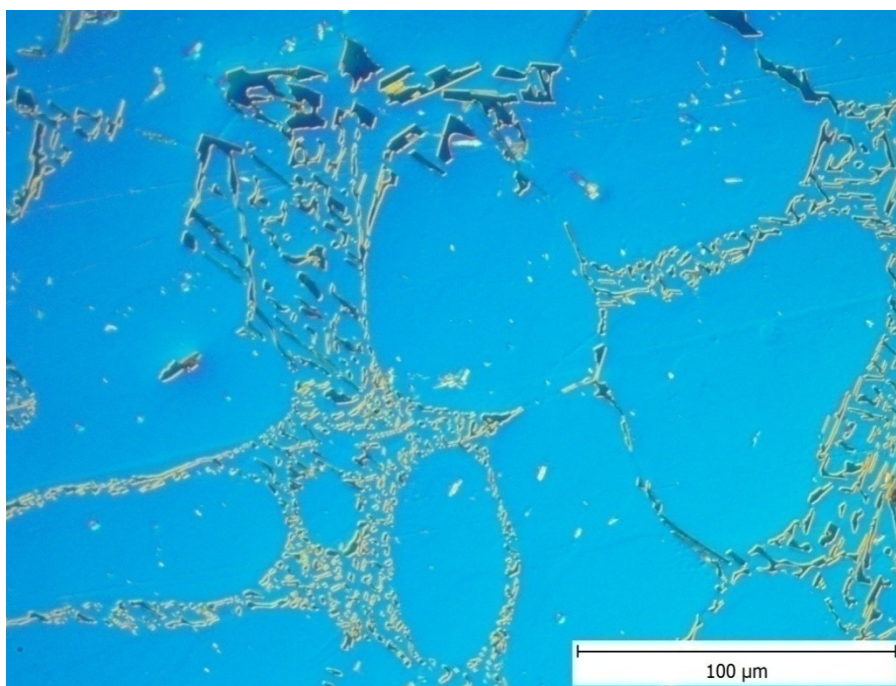
Mikrostruktura slitiny AlSi7Mg0,3 je tvořena matricí (tuhý roztok hliníku) ve formě dendritů a eutektikem tvořeným křemíkovými a intermetalickými částicemi. Na snímku na Obr. 29 je patrná jehlicová struktura eutektického křemíku. Tato struktura je modifikovaná stronciem (max. 0,020 hm. %) a očkovaná  $Ti_5B_1$ . Na následujícím snímku (Obr. 30) je vidět stejný vzorek, ale v příčném řezu. Snímky na Obr. 29 až 31 se týkají odlitků, které jsou odebírány před vlastním nízkotlakým litím přímo z taveniny, tzn., že podmínky tuhnutí se liší od mikrostruktury vzorků odebraných z hotových kol. Dendritická struktura je tedy v případě odlitků hrubší.



**Obr. 29** Mikrostruktura podélného řezu vzorku A1 s dendritickou strukturou



**Obr. 30** Mikrostruktura vzorku A7 – příčný řez



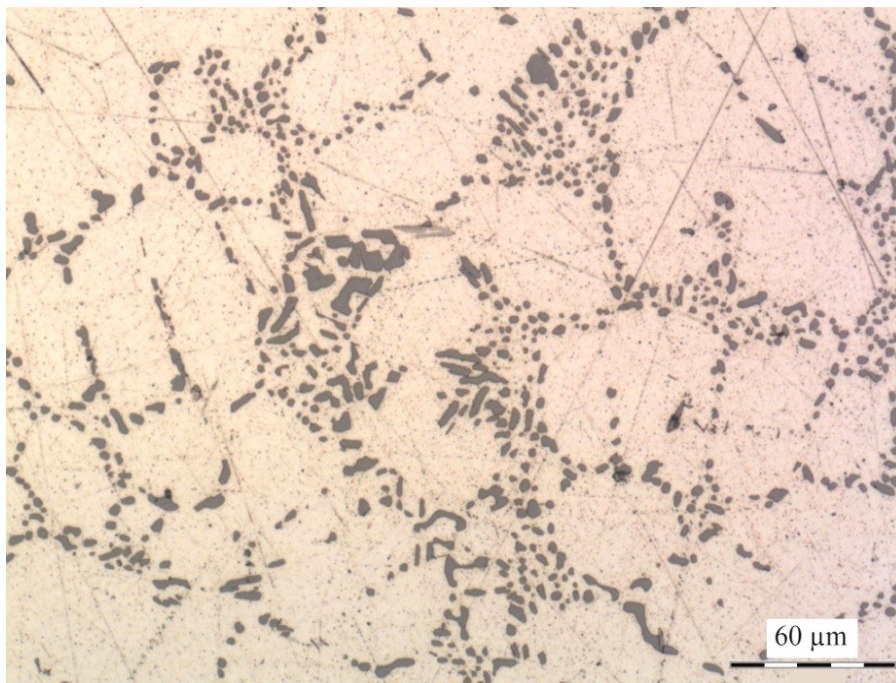
**Obr. 31** Mikrostruktura vzorku C6 – příčný řez

Na Obr. 31 můžeme vidět jehlicovitou (lamelární) strukturu eutektika, která není modifikovaná stronciem, struktura byla naleptána kyselinou Keller a pozorována pod polarizovaným světlem.

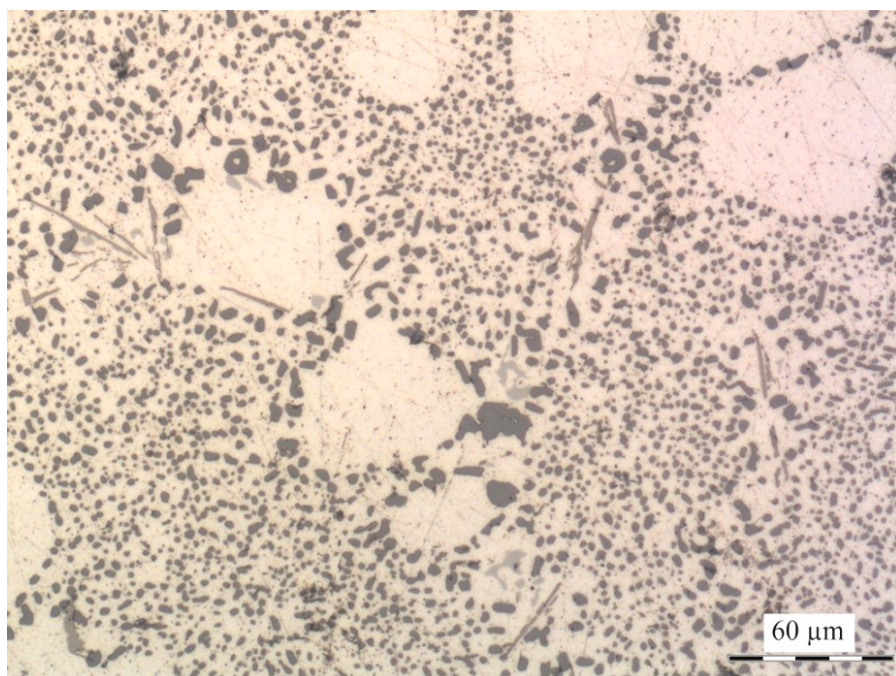


#### 4.1.2 Mikrostruktura hotových kol

Mikrostruktura vzorků odebraných již hotových kol, která jsou po tepelném zpracování a úpravě povrchu je uvedena na následujících snímcích (viz. Obr. 32, 33, 34).



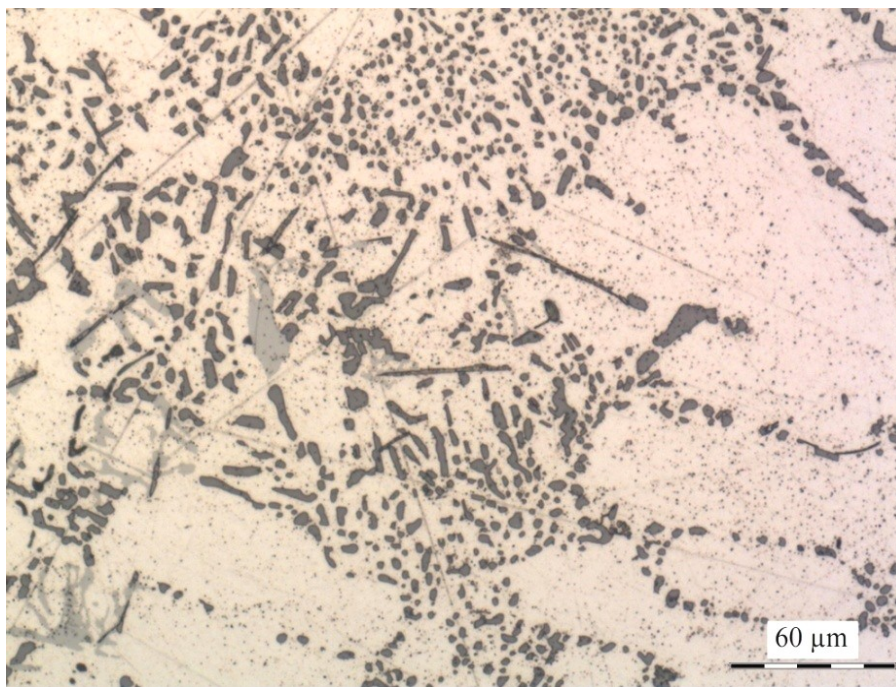
**Obr. 32** Mikrostruktura hotového kola, vzorek č. 2



**Obr. 33** Mikrostruktura hotového kola, vzorek č. 3



Jak je patrné, po tepelném zpracování došlo ke zjemnění eutektika, které přechází z jehlicovité na globulární strukturu. Ve srovnání s Obr. 29 až 31 se dendritická struktura jeví mnohem jemnější.

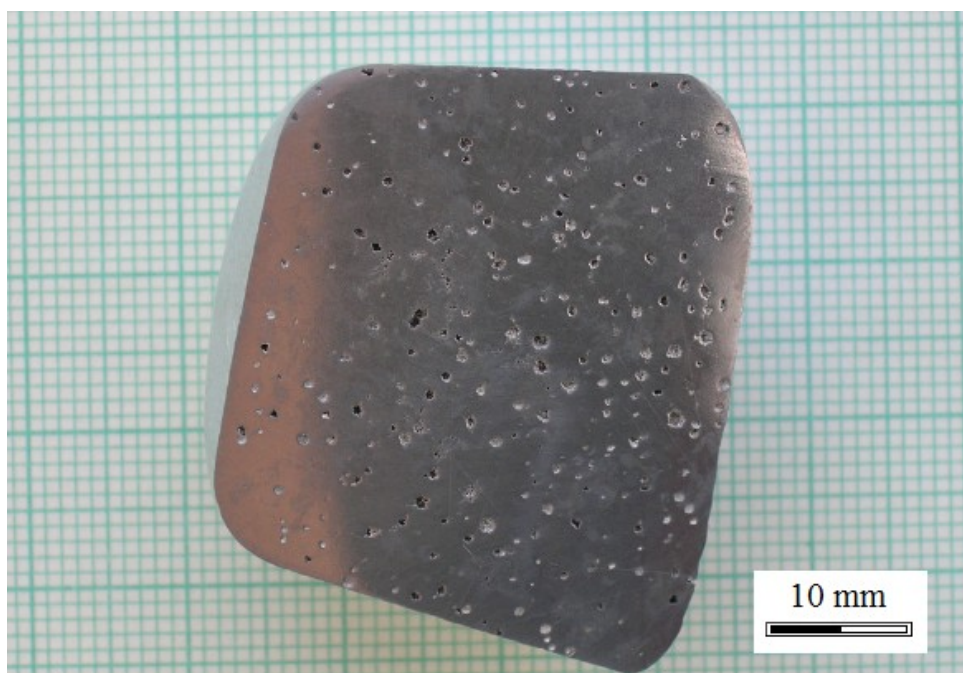


**Obr. 34** Mikrostruktura hotového kola, Vzorek č. 4

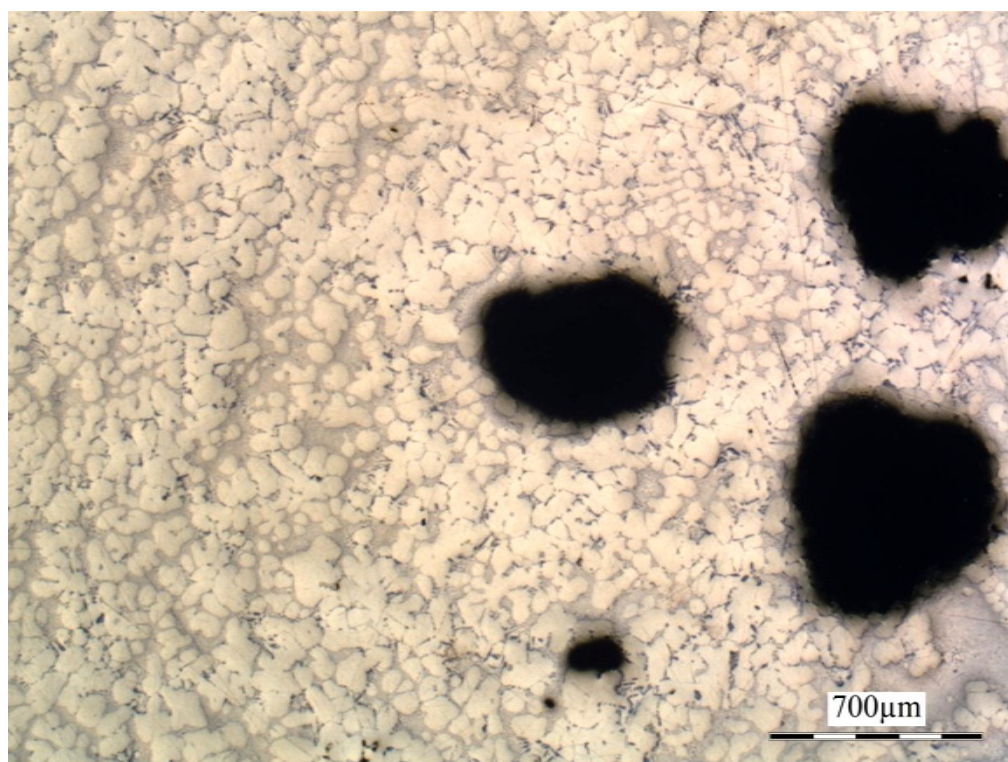
## 4.2 Hodnocení licích vad

### 4.2.1 Vzorčky odlitků

Hodnocení vad ve zkoumaných vzorcích bylo zaměřeno hlavně na póry, řediny a případné trhliny v odlitcích, jak uvádí mikrosnímek na Obr. 35. **Pórovité vady** mají většinou kulovitý tvar nebo kopírují dendritickou strukturu. Převážně jsou to bubliny v materiálu, ve kterých je uzavřený plyn. Ve většině případů se jedná o vodík, který se do taveniny dostal ze vstupního materiálu (kap. 3.1 a Tab. 18 v kap. 4.3) a zůstal v něm i po odplynění a následném naplynění taveniny. Tyto vady můžeme vidět na následujících snímcích (Obr. 36 a 37). **Řediny** jsou nepravidelného tvaru a kopírují tvar struktury, v našem případě kopírují tvar dendritů (viz. Obr. 38).



**Obr. 35** Makropórovitosť odebraného vzorku z taveniny Al-Si

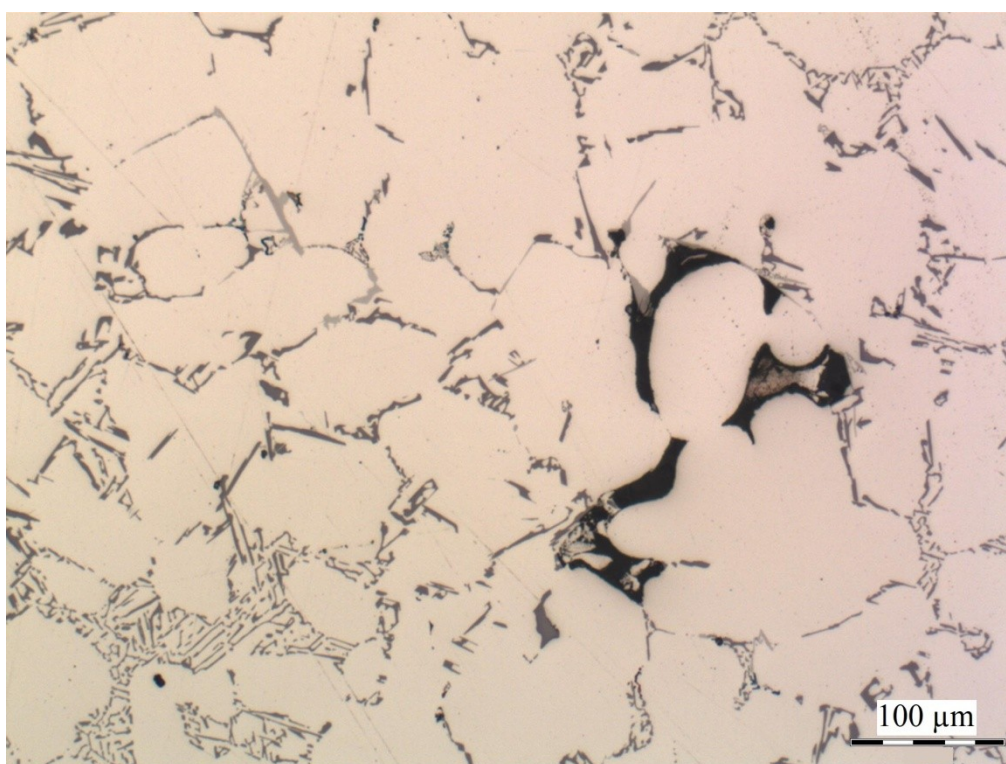


**Obr. 36** Podélný rez – vzorek A, pórovitosť





**Obr. 37** Podélný řez – vzorek F, pór



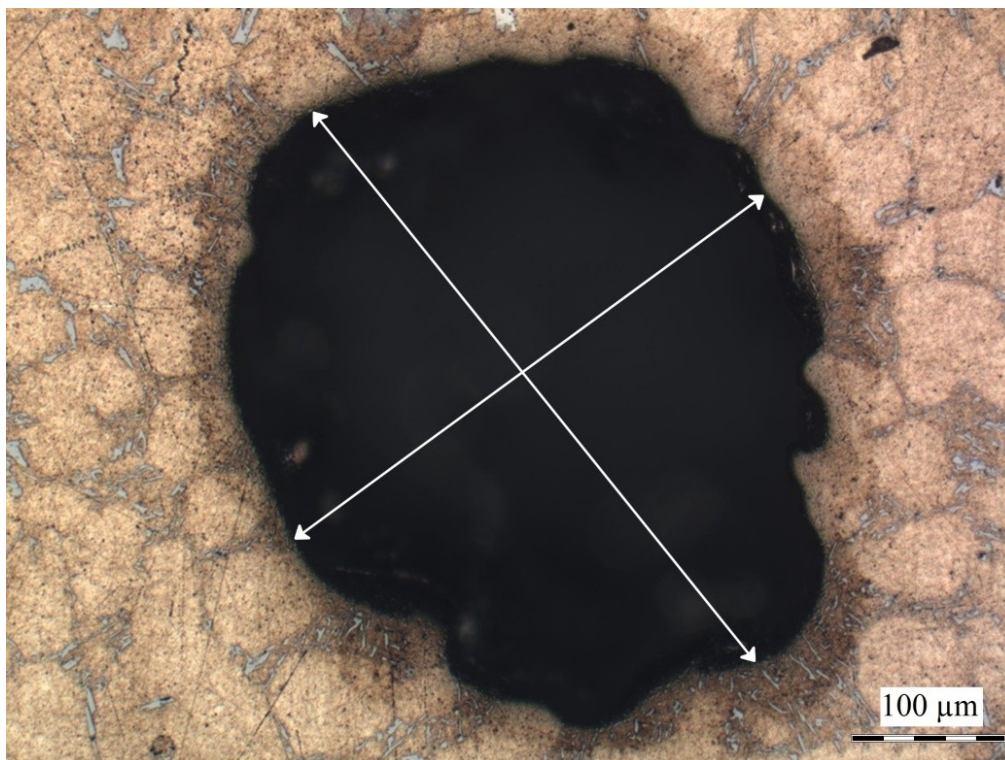
**Obr. 38** Příčný řez – vzorek A, řediny

### ***Průměrná velikost vad***

Výpočet průměrné velikosti vad. V Tab. 10 jsou vyhodnoceny vady, jako jsou póry a řediny a vypočítána jejich velikost v  $\mu\text{m}$ . Z každého vzorku odlitků byly vypočítány dvě náhodné vady jak v podélném řezu tak v příčném. Následně byly vypočítány průměrné hodnoty v podélném a příčném řezu (Tab. 11). Výpočet velikosti vady byl proveden na základě zvolených dvou na sebe kolmých úseček (Obr. 39). Z nich byla vypočítána průměrná velikost vady.

**Tab. 10** Průměrná velikost vad ve vzorcích

<b>Název vzorku</b>	<b>Řez</b>	<b>Měření č.</b>	<b>Velikost [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
A	Podélný	1	177,55
		2	97
	Příčný	1	53,5
		2	81,6
B	Podélný	1	209
		2	132,25
	Příčný	1	243,5
		2	215,18
C	Podélný	1	212
		2	187,26
	Příčný	1	311
		2	407
D	Podélný	1	71,5
		2	53
	Příčný	1	167
		2	88,6
E	Podélný	1	384
		2	139,5
	Příčný	1	93,5
		2	136
F	Podélný	1	306
		2	321,5
	Příčný	1	215
		2	311,25



**Obr. 39** Pórovitost, vzorek E – příčný řez, stanovení průměrné velikosti vady

**Tab. 11** Průměrné hodnoty

Název vzorku	Řez	Průměrná velikost [μm]
A	Podélný	137,28
	Příčný	67,55
B	Podélný	170,62
	Příčný	229,34
C	Podélný	199,63
	Příčný	359
D	Podélný	62,25
	Příčný	127,8
E	Podélný	261,76
	Příčný	114,7
F	Podélný	313,75
	Příčný	263,13
Průměr	Podélný	<b>190,88</b>
	Příčný	<b>193,66</b>
Celkový průměr		<b>192,24</b>

### **Procentuální zastoupení vad**

V následujících tabulkách (Tab. 12 a 13) a grafu jsou zaznamenány vyhodnocené hodnoty pórovitosti v materiálu AlSi7Mg0,3. Při této analýze se stanovuje množství vad ve zkoumaných vzorcích a následně procentuální zastoupení pórovitosti a ředin k dané zkoumané ploše. Tato plocha byla vypočtena a činí 24,08 mm<sup>2</sup>. Pro každý vzorek byla provedena dvě měření na podélném a příčném řezu. Každé měření se stanovovalo ze tří vybraných náhodných míst, ta byla následně vyhodnocena a z měření vypočítána průměrná hodnota (Tab. 12).

**Tab. 12** Procentuální zastoupení vad k dané ploše

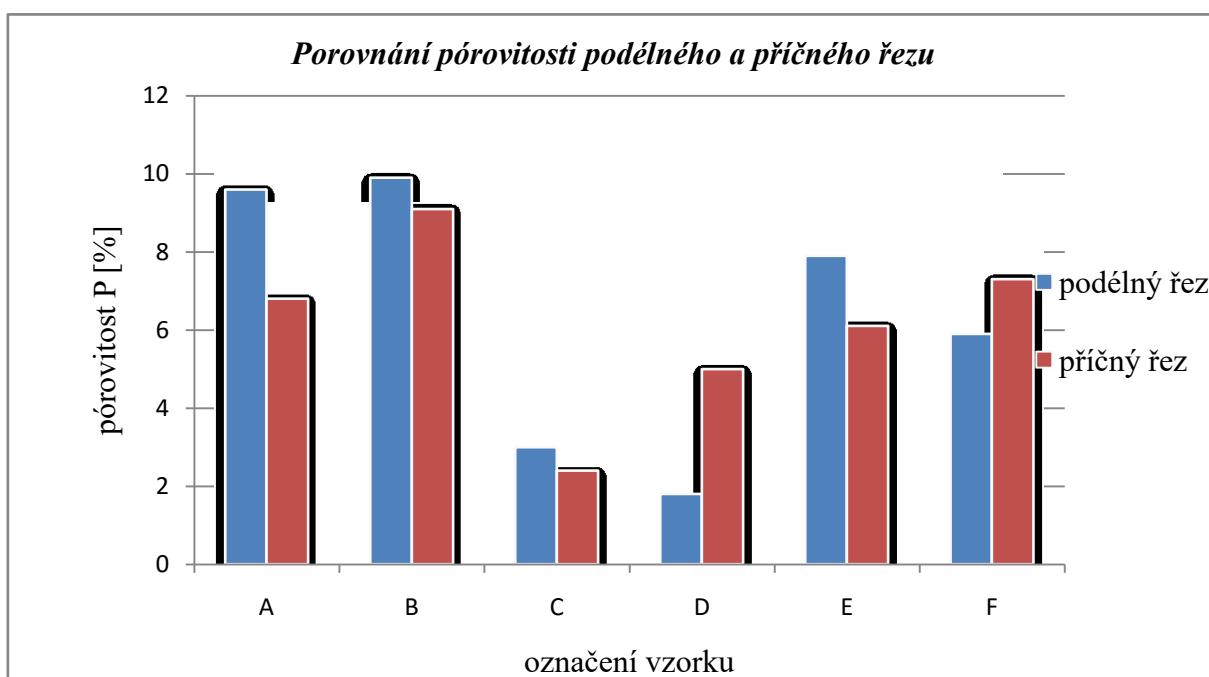
<b>Název vzorku</b>	<b>Řez</b>	<b>Měření č.</b>	<b>Detekovaná pórovitost P [%]</b>
A	Podélný	1	5,74
		2	13,69
	Příčný	1	3,85
		2	9,73
B	Podélný	1	10,19
		2	9,66
	Příčný	1	5,43
		2	12,86
C	Podélný	1	3,37
		2	2,53
	Příčný	1	2,07
		2	2,74
D	Podélný	1	0,76
		2	2,8
	Příčný	1	4,53
		2	5,45
E	Podélný	1	6,24
		2	9,54
	Příčný	1	7,32
		2	4,78
F	Podélný	1	6,34
		2	5,55
	Příčný	1	9,97
		2	4,54

V případě první sady vzorků vykazovaly vzorky A a B největší pórovitost, jak v podélném tak i příčném řezu. Nejmenší pórovitost vykazoval vzorek C. V případě druhé

sady měly vzorky E a F velice podobné výsledky. V následujícím grafu na Obr. 40 je zastoupení vyjádřeno graficky.

**Tab. 13** Celkový přehled průměrných hodnot

Název vzorku	Řez	Průměrná hodnota [%]
A	Podélný	9,6
	Příčný	6,8
B	Podélný	9,9
	Příčný	9,1
C	Podélný	3
	Příčný	2,4
D	Podélný	1,8
	Příčný	5
E	Podélný	7,9
	Příčný	6,1
F	Podélný	5,9
	Příčný	7,3
Průměr	Podélný	<b>6,35</b>
	Příčný	<b>6,12</b>
Celkový průměr		<b>6,24</b>

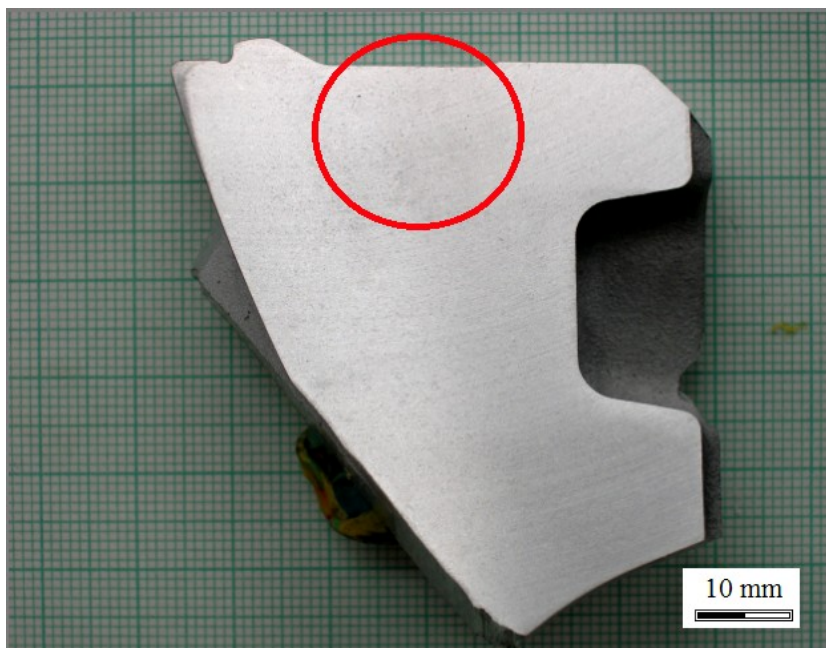


**Obr. 40** Grafické porovnání průměrné pórovitosti v příčném a podélném řezu odlitků

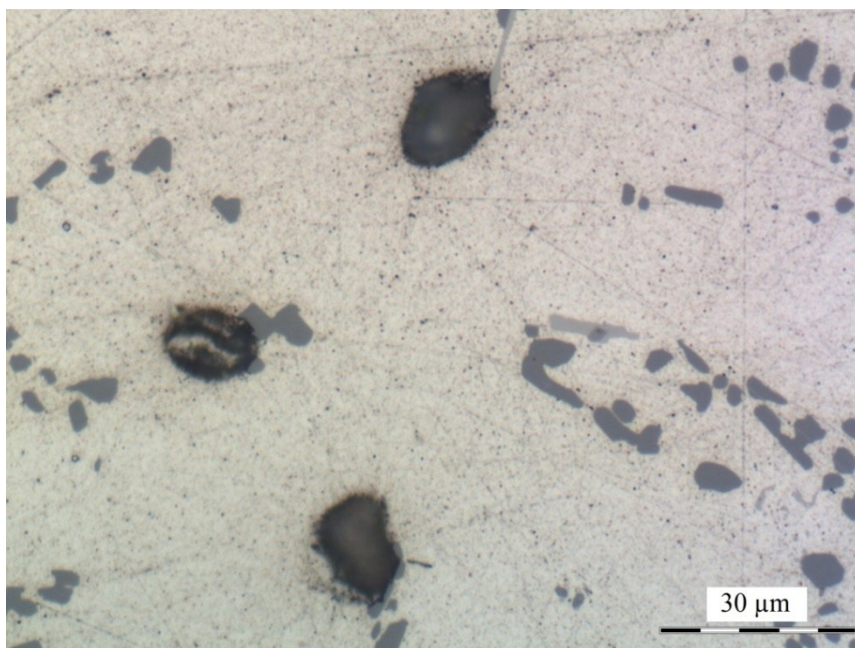


#### 4.2.2 Vzorky hotových kol

Následně byla stanovena pórovitost na vzorcích z hotových kol (viz. Obr. 41), to znamená u vzorků v konečné fázi výroby po tepelném zpracování a povrchové úpravě. Vzorky pro analýzu byly připraveny stejně jako odlitky, rozdíl byl pouze v zalisování odebraných vzorků do pryskyřice za tepla a pod tlakem.



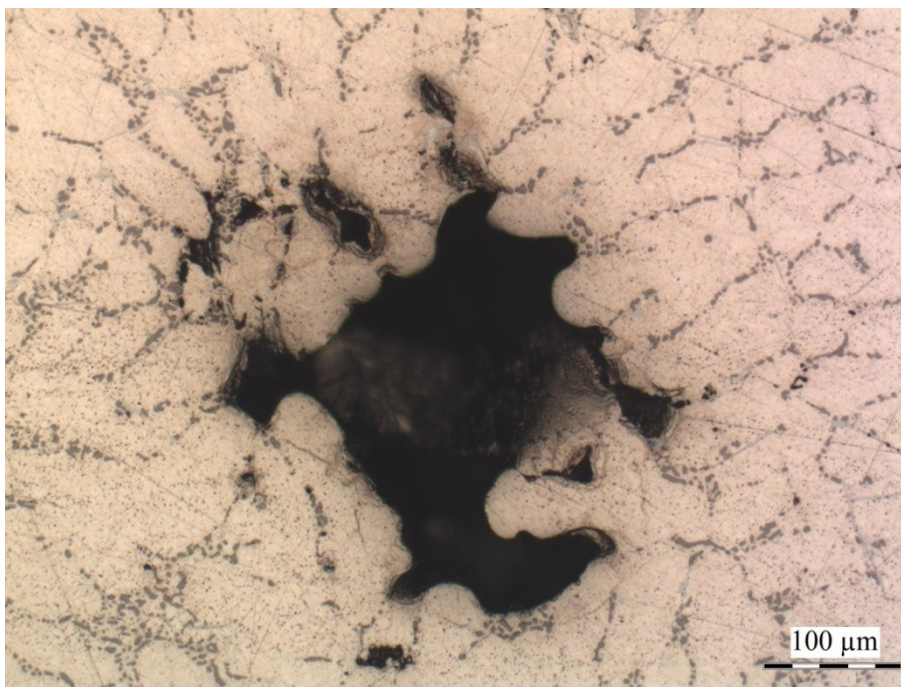
**Obr. 41** Vzorek č. 1 z hotového kola – pomocí červeného pole zaznačena pozorovaná makropórovitost



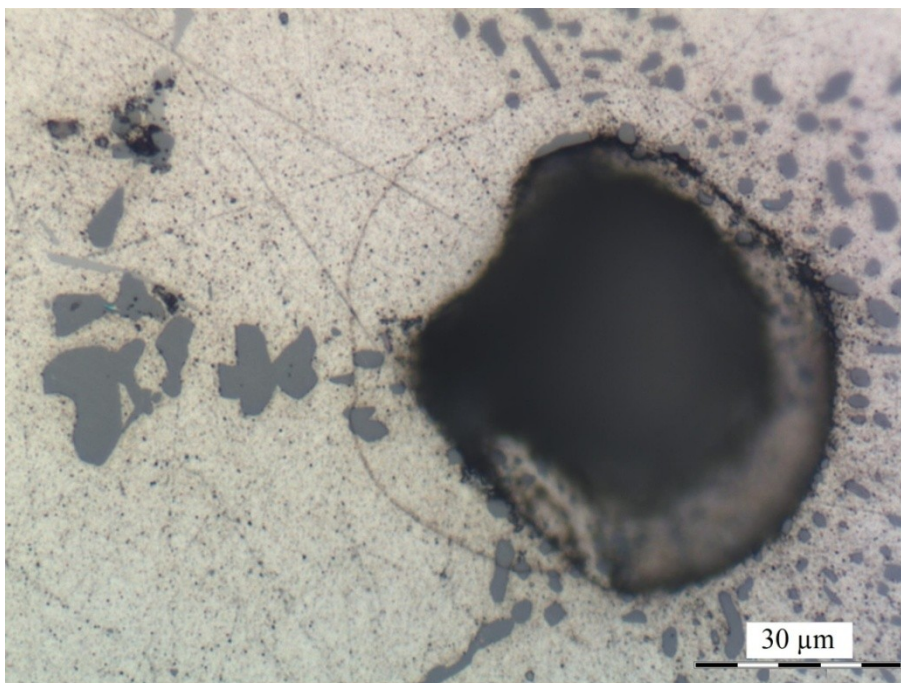
**Obr. 42** Vzorek č. 2 – pórovitost



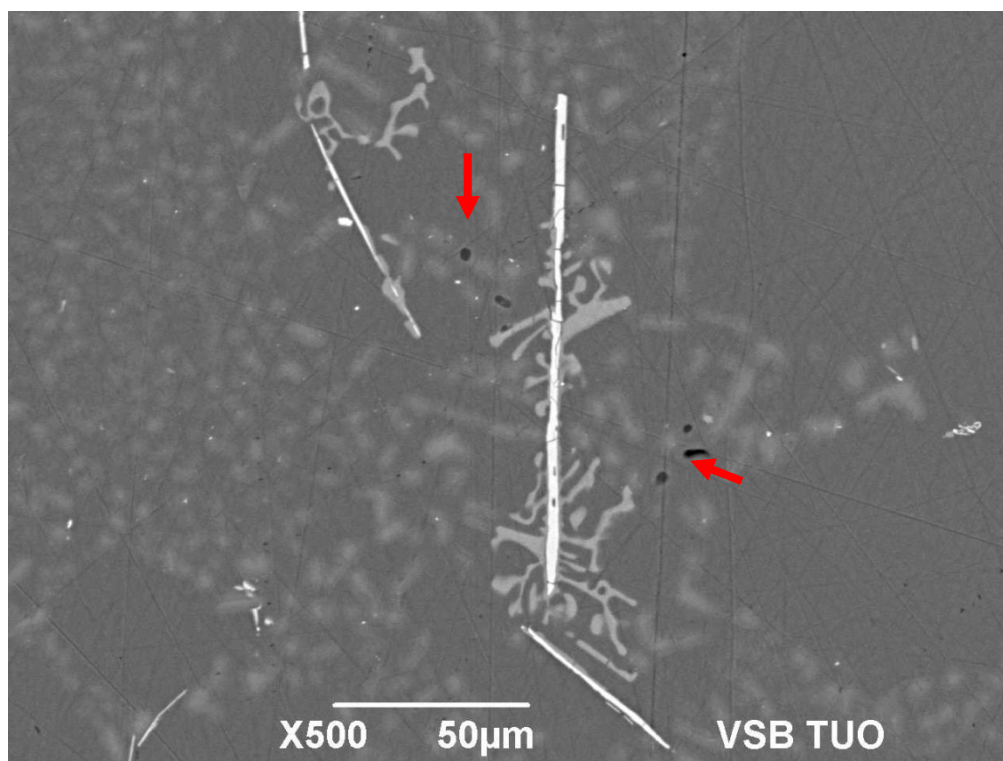
Na snímcích z optické mikroskopie můžeme pozorovat strukturu s pórovitostí (Obr. 42 a 44) a s výskytem ředin (Obr. 43). Na Obr. 45 je uvedena mikropórovitost zjištěná v oblasti eutektika u vzorku č. 4.



**Obr. 43** Vzorek č. 2 – ředina



**Obr. 44** Vzorek č. 3 – pór



**Obr. 45** SEM snímek vzorku č. 4 s mikropórovitostí (červené šipky)

*Průměrná velikost vad*

**Tab. 14** Průměrná velikost vad v hotovém kole

Název vzorku	Řez	Měření č.	Velikost [ $\mu\text{m}$ ]
Vzorek č. 2	Podélný	1	51,5
		2	42,57
		3	67,09
		4	37,77
Vzorek č. 3	Podélný	1	63
		2	60,87
		3	144,5
		4	120,9
Vzorek č. 4	Podélný	1	83,15
		2	82,12
		3	93,17
		4	286,8
Vzorek č. 4	Příčný	1	41,35
		2	60,92
		3	41,62
		4	28,87

Měřením náhodně vybraných vad na vzorcích číslo 2, 3 a 4, odebraných z hotových kol, byla vypočítána průměrná velikost vad v různých částech litých kol. Hodnoty měřené vždy pro čtyři náhodná místa u každého vzorku jsou zaneseny do Tab. 14. a vypočtená průměrná velikost vady v každém vzorku, odebraném z různých částí kola, uvádí Tab. 15. Velikost vad v litém kole dosahovala až 287  $\mu\text{m}$  (Obr. 43), přičemž střední velikost pórovitosti byla stanovena rovna 81,64  $\mu\text{m}$ . Bylo pozorováno, že častější zastoupení mají bubliny, tedy vodíkové póry (Obr. 42 a 44).

**Tab. 15** Průměrné hodnoty

Název vzorku	Řez	Průměrná velikost [ $\mu\text{m}$ ]
Vzorek č. 2	Podélný	<b>49,73</b>
Vzorek č. 3	Podélný	<b>97,32</b>
Vzorek č. 4	Podélný	<b>136,31</b>
	Příčný	<b>43,19</b>
Celkový průměr		<b>81,64</b>

### *Procentuální zastoupení vad*

V případě vzorků odebraných z hotových kol byla rovněž zvolena plocha 24,08 mm<sup>2</sup>, na kterou byl vztažen výpočet procentuálního zastoupení licích vad v podélném a příčném řezu. Analýza podílu vad byla prováděna vždy na třech náhodných polích zkoumaného vzorku a následně byla vypočítána průměrná hodnota, která je zaznamenána v Tab. 16. U vzorků 2 a 3 bylo provedeno jedno měření pouze na podélném řezu, zatímco u vzorku 4 bylo procentuální zastoupení stanoveno jak v podélném, tak příčném řezu.

**Tab. 16** Procentuální zastoupení vad k dané ploše hotových kol

Označení vzorku	Řez	Průměrná hodnota P [%]
Vzorek č. 2	Podélný	<b>0,34%</b>
Vzorek č. 3	Podélný	<b>0,49%</b>
Vzorek č. 4	Podélný	<b>0,86%</b>
	Příčný	<b>0,13%</b>
Průměr		<b>0,46%</b>

### 4.3 Hodnocení obsahu škodlivých prvků

#### 4.3.1 Obsah vodíku

Princip stanovení vodíku pomocí analyzátoru vodíku LECO RH 600 je založen na roztavení vzorku za vysokých teplot v grafitovém kelímku. Spalováním vzorku vznikají plynné produkty, tyto produkty jsou odváděny nosným plynem (nejčastěji argon nebo helium) přes filtry k měřicí infračervené cele a obsažený vodík je stanoven na základě nedisperzní infračervené absorpce.

Tento přístroj umožňuje stanovit absolutní obsah vodíku v materiálu s přesností 0,05 hm. ppm. V závislosti na hmotnosti vzorků a následné kalibraci můžeme stanovit velice nízké obsahy vodíku. Touto metodou byly analyzovány všechny vzorky, tedy odlitky, hotová kola a třísky před i po tepelném zpracování, které jsou využity jako vsázka.

**Tab. 17** Obsah vodíku ve vzorcích odlitků slitiny

Název vzorku	Měření č.	Vodík [hm. ppm]	Hmotnost vzorku [g]
A	1	19	0,1853
	2	23	0,1628
	3	12	0,2388
B	1	26	0,2499
	2	24	0,3396
	3	52	0,3394
C	1	15	0,333
	2	18	0,3358
	3	22	0,3501
D	1	14	0,5509
	2	22	0,2818
	3	19	0,2791
E	1	26	0,2651
	2	24	0,2248
	3	37	0,2283
F	1	28	0,3274
	2	21	0,2905
	3	23	0,2277

U každého vzorku byla provedena tři měření. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 17 a 18. Průměry z těchto hodnot shrnuje Tab. 19. Z porovnání obsahu vodíku

a procentuálního zastoupení není možné věrohodně posoudit souvislost mezi obsahem vodíku s výskytem pórů.

Největší naměřená hodnota koncentrace vodíku u odlitků byla 52 hm. ppm pro vzorek B (průměrná hodnota u tohoto vzorku dosahovala 34 hm. ppm) a odpovídala procentuálnímu plošnému zastoupení pórovitosti 9,9 % v podélném a 9,1 % v příčném řezu, zatímco nejnižší koncentrace vodíku 18 hm. ppm byla dosažena u tří vzorků (A; C; D), avšak pórovitost byla v podélném a příčném řezu z hlediska plošného zastoupení rozdílná: 9,6 a 6,8; 3 a 2,4; 1,8 a 5 %. Ve vzorcích odebraných z kola je průměrný obsah vodíku přibližně stejný jako u odlitků (29, 19 a 16 hm. % ppm podle odběru vzorku z kola).

**Tab. 18** Obsah vodíku ve vzorcích hotových kol a třísek

Název vzorku	Měření č.	Vodík [ppm]	Hmotnost vzorku [g]
Vzorek č. 2	1	33	0,2391
	2	20	0,2692
	3	34	0,2274
Vzorek č. 3	1	16	0,1926
	2	18	0,1730
	3	23	0,1426
Vzorek č. 4	1	19	0,2469
	2	14	0,2312
	3	15	0,2272
Špona před TZ	1	194	0,0347
	2	239	0,0423
	3	157	0,0466
Špona po TZ	1	256	0,0457
	2	229	0,046
	3	268	0,0433

Srovnáme-li jednotlivé hodnoty obsahu vodíku naměřené ve vzorcích odebraných z hotového kola (Tab. 18), je zřejmé, že množství vodíku souvisí s lokálním výskytem a nesteromerným rozdělením pórovitosti v jeho jednotlivých částech. Přesto, že procentuální zastoupení pórovitosti stanovené ve vzorcích z hotových kol bylo nízké (průměrná hodnota 0,46 %) oproti odlitkům (6,24 %), obsah vodíku byl v podstatě stejný. Z toho tedy je možné usuzovat, že pórovitost se ve vzorcích vyskytuje s velkou

nehomogenitou rozdělení napříč odlitkem i finálně opracovaným kolem. Rozpustnost vodíku, který představuje jediný plyn rozpustný v roztaveném hliníku, je v tuhém stavu nízká, což vede ke vzniku finální pórovitosti v odlitcích. Jak bylo uvedeno v kap. 2.10 v rov. (1), reakce taveniny s vodní parou může vést k absorpci vodíku. Vzhledem k reaktivnosti hliníku s kyslíkem musíme brát v úvahu vznik oxidické vrstvy na povrchu taveniny, která ji chrání před dalším účinkem vlhkosti z okolí. Avšak pokud je tato ochranná vrstva odstraněna například při odlévání do formy, která obsahuje určitou vlhkost, pak se rychle vytvářejí příznivé podmínky pro absorpci vodíku, jejíž rychlost je vysoká [32] (cca 10 sekund). Na Obr. 46 je znázorněno, jak s rostoucím obsahem vodíku prudce narůstá pórovitost.

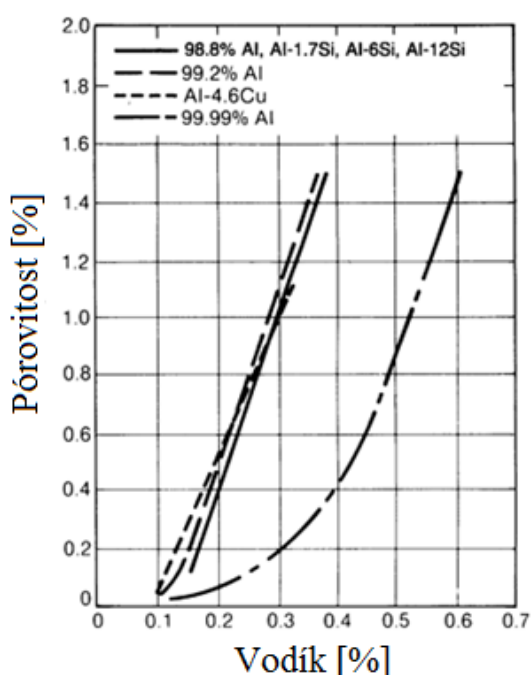
**Tab. 19** Srovnání obsahu vodíku v odebraných vzorcích

Název vzorku	Vodík [ppm]
A	18
B	34
C	18
D	18
E	29
F	24
Vzorek č. 2	29
Vzorek č. 3	19
Vzorek č. 4	16
Špona před TZ	197
Špona po TZ	251

U třísek byl naměřen poměrně velký obsah vodíku (Tab. 18), na který v podstatě nemělo tepelné zpracování, zařazené jako jejich úprava před zavedením do pece, žádný vliv. Jak bylo uvedeno v [1], třísky obsahují různé nečistoty pocházející z olejů, mazadel a nátěrových hmot, a pokud se přidávají jako recyklát do vsázky pro přípravu odlitků kol, musí projít tepelným zpracováním na vypálení těchto nečistot. Jak je však patrné z výsledků obsahu vodíku, toto tepelné zpracování nebylo dostačující na to, aby odstranilo veškeré nečistoty, které mohou zapříčinit vznik vad v odlitcích a snížení mechanických vlastností.

Dalším faktorem, který může ovlivnit výskyt pórovitosti, je obsah Sr ve slitině. S rostoucím obsahem této legující příměsi roste náchylnost k mikrostaženinám v odlitcích

s nepříznivým dopadem na tahové vlastnosti. Modifikace stronciem ovlivňuje zaplňování mezidendritického prostoru, zvětšuje polotekutou (kašovitou) oblast, zvyšuje viskozitu taveniny a zejména prodlužuje čas difuze vodíku a růstu pórovitosti díky rozšíření intervalu tuhnutí za současného snížení eutektické teploty. Slitina AlSi7Mg0,3 je nejen modifikována pomocí Sr, ale dále ještě očkována předslutinou Ti5B1. Obě tyto složky proti sobě působí, takže výsledkem může být vznik velkých mikrostaženin vlivem vzniku intermetalických sloučenin Al-Si-Sr v matici a příznivý účinek Sr na modifikaci eutektického křemíku je potom tedy potlačen [31]. Vliv obsahu vodíku na výskyt pórovitosti je znázorněn na Obr. 46, a to jak pro čistý hliník, tak pro slitiny Al-Si a Al-Cu.



**Obr. 46** Vliv vodíku na pórovitost [32]

#### 4.3.2 Obsah kyslíku a dusíku

U dodaných vzorků byly měřeny rovněž obsahy kyslíku a dusíku. Měření je založeno na stejném principu jako měření vodíku uvedené v kap. 4.3.1. Stanovené hodnoty uvádí Tab. 20, ze které vyplývá, že kyslík po tepelném zpracování se zvýší až na dvojnásobek, zatímco dusík zůstává nezměněn.

**Tab. 20** Obsah kyslíku a dusíku ve vzorcích třisek

Měření	Kyslík [ppm]	Dusík [ppm]
Špona před TZ		
1	174	126
2	236	113
3	208	117
4	164	144
Průměr	<b>196</b>	<b>125</b>
Špona po TZ		
1	272	106
2	358	122
3	319	121
4	201	124
Průměr	<b>287</b>	<b>119</b>

#### 4.3.3 Obsah uhlíku a síry

Z měření obsahu uhlíku na analyzátoru založeném na stejném principu jako v předcházejících dvou podkapitolách, že se uhlík výrazně zvýšil až na dvojnásobek, síra zůstala na stejné úrovni (Tab. 21).

**Tab. 21** Obsah uhlíku a síry ve vzorcích třisek

Měření	Uhlík [ppm]	Síra [ppm]
Špona před TZ		
1	625	41
2	589	68
3	557	56
Průměr	<b>591</b>	<b>55</b>
Špona po TZ		
1	999	51
2	1112	67
3	929	54
Průměr	<b>1013</b>	<b>57</b>

Ze stanovených hodnot pro výše uvedené škodlivé prvky je patrné, že tepelné zpracování třisek je nevyhovující. V další etapě výzkumu bude třeba upravit režim tepelného zpracování i poměr třisek a dalšího recyklovaného materiálu, který je přidáván k primární vsázce.

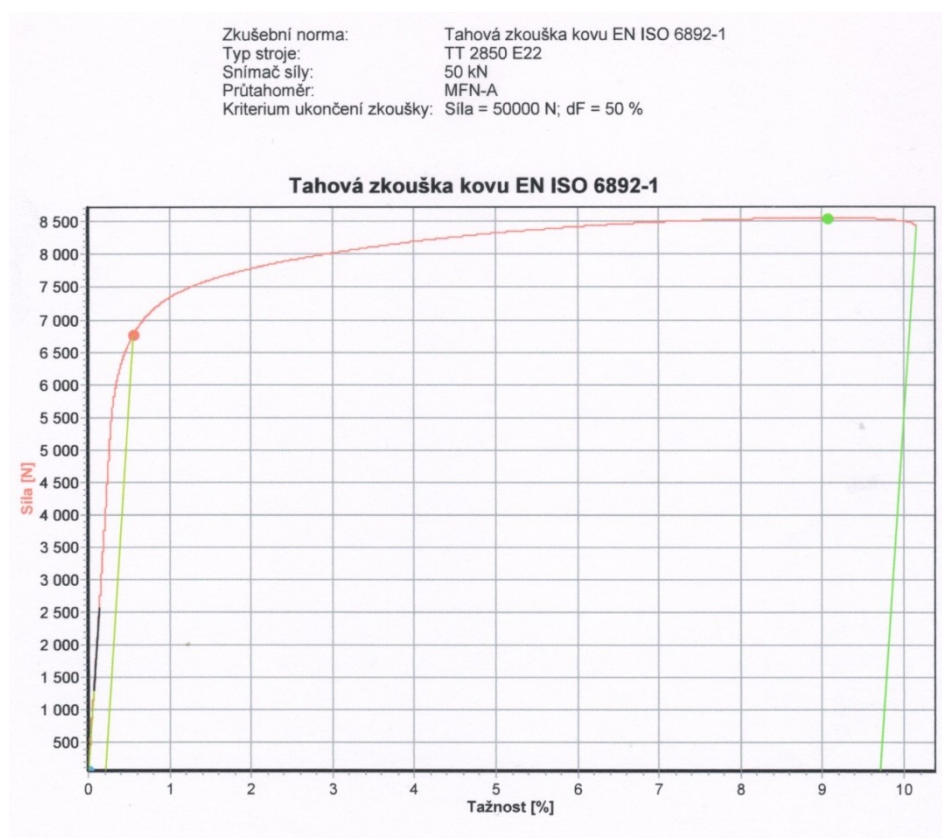


#### 4.4 Mechanické vlastnosti

Výsledky tahových zkoušek byly poskytnuty dodavatelem materiálu pro odběr vzorků. Test v tahu byl proveden na malých vzorcích (o celkové délce 36mm, průměru 6,02 a délce pracovní části 30,0 mm) odebraných z hotového kola ze slitiny AlSi7Mg0,3. Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny v Tab. 22 a jejich průběhy na Obr. 47 a 48. Ze srovnání obou zkoušek je zřejmé, že v případě druhého vzorku působilo na snížení mechanických charakteristik více faktorů, tedy nejen pórovitost, ale rovněž rozdíly v chemickém složení a charakteru mikrostruktury. Oba výsledky však podle požadavků zadavatele vyhovují kritériu pro mez kluzu 205 MPa. Vliv těchto faktorů nemohl být vyhodnocen detailněji, neboť nebyly dodány zkušební vzorky na analýzy.

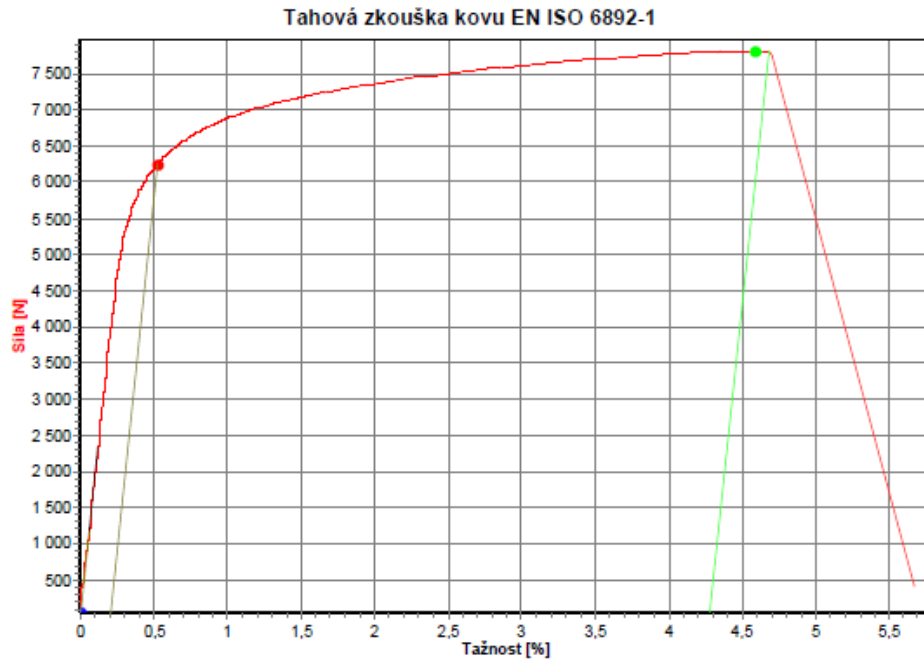
**Tab. 22** Srovnání mechanických vlastností hotových kol

Hodnoty	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm [MPa]	E [GPa]	A [%]
1	238	301	66	9,7
2	220	275	68	4,3

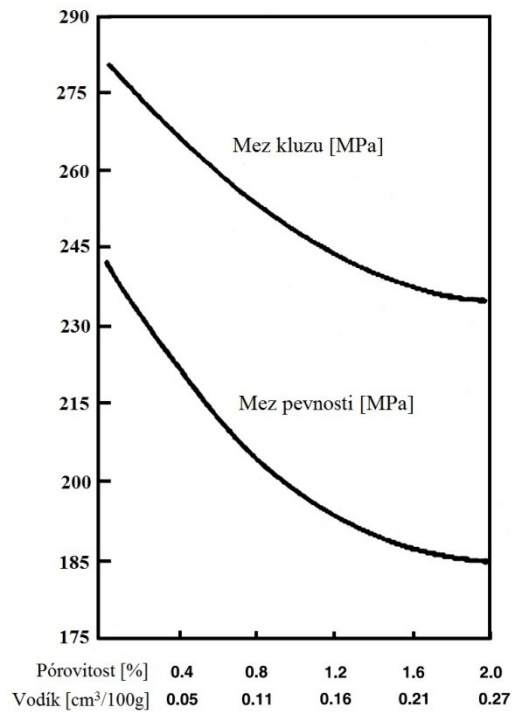


**Obr. 47** Tahová zkouška – vzorek z hotového kola

Zkušební norma: Tahová zkouška kovu EN ISO 6892-1  
 Typ stroje: TT 2850 E22  
 Snímač síly: 50 kN  
 Průtahoměr: MFN-A  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50000 N; dF = 50 %



**Obr. 48** Tahová zkouška – vzorek z hotového kola



**Obr. 49** Vliv pórovitosti a obsahu vodíku na mechanické vlastnosti slitiny A356.0 T6 [7]

Při rostoucím obsahu vodíku ve slitině A356.0 T6 klesá jak mez kluzu, tak mez pevnosti, jak bylo zjištěno v [7] a je uvedeno na Obr. 49. Můžeme tedy teoretický tvrdit, že čím větší je pórovitost vzorků v Al-Si slitině, tím víc klesají její mechanické hodnoty (mez pevnosti  $R_m$ , mez kluzu  $R_{p0,2}$ , tažnost  $A$ ).

## 5 ZÁVĚR

Teoretická část této diplomové práce byla zaměřena na Al-Si slitiny. A to zejména na tlakově odlévané slitiny využívané v automobilovém průmyslu na výrobu kol. V práci byly popsány základní charakteristiky těchto slitin, jako jsou využití, způsoby lití, vady, modifikace a mechanické vlastnosti. Následně byla práce zaměřena na slitinu A356.0.

V experimentální části bylo provedeno studium slitiny A356.0, která byla dodána výrobcem automobilových kol ze slitin hliníku. Studijní materiál byl dodán v podobě vzorků odebraných z taveniny před následným odléváním a vzorků již hotových kol. Také byly dodány třísky z dané slitiny (recyklát), které se dodávají k primární slitině do vsázky. Ze stanovení škodlivých prvků (H, O, N, C a S) byla hodnocena účinnost tepelného zpracování třísek před zavedením ke vsázce pro tavby. Metalografické pozorování mikrostruktury zaměřené na studium vad a zejména pórovitosti umožnilo vyhodnotit jejich velikost, tvar a charakter distribuce. Procentuální zastoupení licích vad v podobě pórů a ředin bylo stanoveno pomocí digitální obrazové analýzy.

Diskuzí a vyhodnocením výsledků se zabývá poslední část této diplomové práce. Dosažené výsledky ukazují na poměrně časté zastoupení vad v materiálu. Vzorky odebrané z taveniny před odléváním obsahovaly největší počet i velikost vad (nad 6 %), vzorky hotových kol měly tento poměr znatelně menší (pod 1 %). Tyto vady byly zejména pórovitého charakteru, který souvisí s obsahem vodíku v tavenině. Obsahy vodíku vykazovaly podobné hodnoty jak ve vzorcích odlitků, tak i hotových kol. Problematický obsah vodíku byl stanoven pro vzorky třísek, tedy recyklovaného materiálu. Byl diskutován vliv výsledné pórovitosti slitiny na mechanické vlastnosti, jak je patrné z kapitoly 4.4 a Obr. 47 až 49.

Tato pórovitost vzniká z důvodů vyššího obsahu vodíku v tavenině, z tohoto důvodu můžeme doporučit dostatečné odplynění taveniny. Další vliv na poměr vad ve slitině mají modifikující složky. Proto je důležité, aby obsahy stroncia a očkovací předslitiny Ti5B1 byly v optimálním poměru. Při zvýšeném obsahu stroncia nad 0,5 hm. % značně roste pórovitost materiálu.

V dalším výzkumu této problematiky bude zapotřebí provést větší podrobnější analýzu a statistiku výskytu vad v závislosti na výsledcích mechanických zkoušek dané slitiny v různých časových intervalech kampaní výroby.

## 6 SEZNAM LITERATURY

- [1] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [3] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály* [online]. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006 [cit. 2017-04-26]. ISBN 80-708-0600-1.
- [4] WARMUZEK, M. *Aluminium-Silicon Casting Alloys : Atlas of Microfractography*. 1. vyd. USA: ASM International, 2004. 124 s. ISBN 0-87170-794-2.
- [5] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P. a kolektiv. *Nauka o materiálu I. Část3*. 2. Vyd. Academica, Praha, 1973. 596 s.
- [6] *EVALUATION OF POROSITY IN AL-ALLOY DIE-CASTINGS* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6575/diplomka%20upravená%20na%20net.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] KAUFMAN, J. G. a Elwin L. ROOY. *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications* [online]. Materials Park, OH: ASM International, 2004 [cit. 2017-04-27]. ISBN 08-717-0803-5.
- [8] WANG, Ruyao a Weihua LU. *Al-Si Alloys – An Undercooled Alloy Self-Modified Structure and Mechanical Properties* [online]. [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.5772/52962. ISBN 10.5772/52962. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/electrolysis/direct-electrolytic-al-si-alloys-deasa-an-undercooled-alloy-self-modified-structure-and-mechanical-p>
- [9] MATSUDA, K., et al. New quaternary grain boundary precipitate in Al–Mg–Si alloy containing silver. *Scripta Materialia*. 2006, roč. 55, s. 127-129. ISSN 1359-6462. Dostupné z: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [10] HEGDE, S., PRABHU, K.N. Modification of Eutectic Silicon in Al-Si Alloys. *Journal of Materials Science*. 2008, roč. 43, s. 3009-3027. Dostupné z: [www.springerlink.com](http://www.springerlink.com)
- [11] *Primary Aluminium Casting Alloys: Mechanical properties*. Aluminium Rheinfelden GmbH, Germany - [www.alurheinfelden.com](http://www.alurheinfelden.com) [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [http://www.foundry-planet.com/fileadmin/redakteur/Material/08-03-10-Leporello\\_engl.pdf](http://www.foundry-planet.com/fileadmin/redakteur/Material/08-03-10-Leporello_engl.pdf)
- [12] LEE, Kyuhong, Yong Nam KWON a Sunghak LEE. Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, rheo-casting, and casting–forging processes [online]. [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2008.04.004. ISBN 10.1016/j.engfracmech.2008.04.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794408001008>
- [13] ROLEČEK, Jakub. *Mechanické vlastnosti a struktura slitiny hliníku po tepelném zpracování*. Brno, 2012. Vedoucí práce Ing. MARTIN JULIŠ, Ph.D.
- [14] STANČEK, L., VANKO, B., SEDLAČEK, E., BATYŠEV, A.I. Procesy tlakového liatia s vysokou spoľahlivosťou odliatkov a ich uplatnenie v automobilovom priemysle. *Mezinárodní konference TECHNOLOGY 2005*. Bratislava, Slovenská republika, 2005, str. 755-767
- [15] LEIS, W.: Giessen im CCT. Symposium 2003. Aalen, 2003
- [16] *Výroba odlítků ze slitin hliníku* [online]. In: . [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv\\_3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf)
- [17] MICHNA, Š. *Progresivní technologie odlévání* [online]. [cit. 2012-03-03]. Dostupné z WWW: [http://www.stefanmichna.com/download/progresivnitechnologie/progresivni\\_technologie\\_odlevani.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/progresivnitechnologie/progresivni_technologie_odlevani.pdf)
- [18] Forma pro nízkotlaké odlévání Al-Si disků kol. In: *Svět Motorů* [online]. 2014 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://svetmotoru.auto.cz/clanek/servis/4662/reportaz-hlinik-se-odstehoval-do-neuenrade.html>
- [19] *Gravitační a nízkotlaké lící stroje* [online]. 2011 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.sebestasro.cz/cz/get.php?id=331>

- [20] KOŘENY, R., GRIGEROVA, T. Zliévárnostvo neželezných kovov. Bratislava: ALFA, 1988
- [21] *Zjišťování obsahu plynu v tavenině* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: [http://www.rgu.cz/download/holec2009/12\\_prednaska.pdf](http://www.rgu.cz/download/holec2009/12_prednaska.pdf)
- [22] PTÁČEK, L. *Vady odlitků ze slitin*. Slévárnoství. 1998, č. 9-10.
- [23] WARMUZEK, M. *Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys: Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-706-2.
- [24] VAŇKOVÁ, Barbora. *Opatření ke snížení výskytu slévárenských vad na hlavové přírubě bloku motoru* [online]. Mladá Boleslav [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf13/2628.pdf>. Vedoucí práce Ing. Petr Zikmund.
- [25] JIANG, Wenming, Zitian FAN, Dejun LIU a Hebao WU. Influence of gas flowrate on filling ability and internal quality of A356 aluminum alloy castings fabricated using the expendable pattern shell casting with vacuum and low pressure [online]. [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1007/s00170-012-4663-5. ISBN 10.1007/s00170-012-4663-5. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4663-5>
- [26] WANG, Ruyao a Weihua LU. *Al-Si Alloys – An Undercooled Alloy Self-Modified Structure and Mechanical Properties* [online]. [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.5772/52962. ISBN 10.5772/52962. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/electrolysis/direct-electrolytic-al-si-alloys-deasa-an-undercooled-alloy-self-modified-structure-and-mechanical-p>
- [27] Hliník a jeho slitiny [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/URL/Z%C3%A1po%C4%8Det/Slitiny%20Al.doc>
- [28] LAŠTOVICA, Petr. *POUŽITÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN VE SLÉVÁRENSTVÍ* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54581](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54581). VUT Brno.
- [29] MERLIN, Mattia, Giulio TIMELLI, Franco BONOLLO a Gian Luca GARAGNANI. Impact behaviour of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, 209(2), 1060-1073 [cit. 2017-04-23]. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2008.03.027. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013608002318>
- [30] Alloy wheel Mitykas. In: *ŠKODA AUTO a.s. 2017* [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://eshop.skoda-auto.com/cz/en/b2c/rims/ratikon-alloy-wheel-mitykas-565071497b-8z8x/0/1/10000/43/1001>
- [31] LASHGARI, H.R., M. EMAMY, A. RAZAGHIAN a A.A. NAJIMI. The effect of strontium on the microstructure, porosity and tensile properties of A356–10%B4C cast composite. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2009, 517(1-2), 170-179 [cit. 2017-05-11]. DOI: 10.1016/j.msea.2009.03.072. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509309003864>
- [32] PREPARED UNDER THE DIRECTION OF THE ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990. ISBN 978-087-1703-781.

## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1</b>	Rovnovážný binární diagram soustavy Al-Si [1].....	8
<b>Obr. 2</b>	Mikrostruktury slitin Al-Si [3].....	9
<b>Obr. 3</b>	Podeutektický silumin, dendritická struktura [4] .....	10
<b>Obr. 4</b>	Eutektický silumin [4] .....	11
<b>Obr. 5</b>	Nadeutektický nemodifikovaný silumin, hrubé krystaly křemíku v nemodifikované eutektické matrici – zbarveny do modra, výskyt $\alpha$ -Al dendritů [8] .....	12
<b>Obr. 6</b>	Graf ukazuje účinnost modifikace sodíku a stroncia na slitinu A356, vlevo jsou snímky od a) nemodifikovaná struktura až po f) plně modifikovaná struktura [7].....	13
<b>Obr. 7</b>	Oblast rozpadu metastabilní mikro-heterogenity v Al-Si tavenině [8]. .....	16
<b>Obr. 8</b>	Vliv Mg na mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Mg po vytvrzení [2] .....	18
<b>Obr. 9</b>	Gravitační lití do písku [16].....	20
<b>Obr. 10</b>	Forma pro nízkotlaké lití automobilových kol z Al-Si slitiny [18].....	21
<b>Obr. 11</b>	Nízkotlaké odlévání – kovová a písková forma [19] .....	22
<b>Obr. 12</b>	RTG kontrola odlitků kol [18].....	26
<b>Obr. 13</b>	Schéma plnicího procesu experimentální metodou EPSC-VL.....	29
<b>Obr. 14</b>	Mikrostruktura širší části formy, a) 5 m <sup>3</sup> /h, b) 12 m <sup>3</sup> /h, c) 19 m <sup>3</sup> /h.....	29
<b>Obr. 15</b>	Mikrostruktura tenké části formy, a) 5 m <sup>3</sup> /h, b) 12 m <sup>3</sup> /h, c) 19 m <sup>3</sup> /h.....	30
<b>Obr. 16</b>	Výsledky simulace porézности odlitků získaných různými průtoky plynů: a) 5 m <sup>3</sup> /h, b) 12 m <sup>3</sup> /h, c) 19 m <sup>3</sup> /h [25] .....	30
<b>Obr. 17</b>	Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti pro slitinu AlSi6Cu4 [2].....	33
<b>Obr. 18</b>	Výrobní linka kol ze slitin hliníku pro automobily.....	34
<b>Obr. 19</b>	Simulace zaplnění formy: a) 20 % zaplnění, b) 70% zaplnění [29].....	36
<b>Obr. 20</b>	Proces odplynění – a) rafinační sůl, b) odplynění a naplynění, c) stahování strusky z povrchu taveniny .....	37
<b>Obr. 21</b>	Vzorky odlitků .....	39
<b>Obr. 22</b>	Vzorky připraveny na zalití do plastu.....	40
<b>Obr. 23</b>	Vzorek zalitý v speciální pryskyřici Specifix Kit 40 .....	40

<b>Obr. 24</b>	Finální kolo ze slitiny AlSi7Mg [30] .....	41
<b>Obr. 25</b>	Vzorky odebrané z hotového kola a) vzorek č. 1, b) vzorek č. 2, c) vzorek č. 3, d) vzorek č. 4 e) schéma odběru vzorků a odpovídající snímky .....	42
<b>Obr. 26</b>	Výsledné krychle pro analýzu obsahu vodíku .....	43
<b>Obr. 27</b>	Snímek před vyhodnocením pórovitosti, vzorek E – podélný řez .....	45
<b>Obr. 28</b>	Snímek po vyhodnocení pórovitosti, vzorek E – podélný řez .....	45
<b>Obr. 29</b>	Mikrostruktura podélného řezu vzorku A1 s dendritickou strukturou .....	46
<b>Obr. 30</b>	Mikrostruktura vzorku A7 – příčný řez .....	47
<b>Obr. 31</b>	Mikrostruktura vzorku C6 – příčný řez .....	47
<b>Obr. 32</b>	Mikrostruktura hotového kola, vzorek č. 2 .....	48
<b>Obr. 33</b>	Mikrostruktura hotového kola, vzorek č. 3 .....	48
<b>Obr. 34</b>	Mikrostruktura hotového kola, Vzorek č. 4 .....	49
<b>Obr. 35</b>	Makropórovitost odebraného vzorku z taveniny Al-Si .....	50
<b>Obr. 36</b>	Podélný řez – vzorek A, pórovitost .....	50
<b>Obr. 37</b>	Podélný řez – vzorek F, pór .....	51
<b>Obr. 38</b>	Příčný řez – vzorek A, řediny .....	51
<b>Obr. 39</b>	Pórovitost, vzorek E – příčný řez, stanovení průměrné velikosti vady .....	53
<b>Obr. 40</b>	Grafické porovnání průměrné pórovitosti v příčném a podélném řezu odlitků .....	55
<b>Obr. 41</b>	Vzorek č. 1 z hotového kola – pomocí červeného pole zaznačena pozorovaná makropórovitost .....	56
<b>Obr. 42</b>	Vzorek č. 2 – pórovitost .....	56
<b>Obr. 43</b>	Vzorek č. 2 – ředina .....	57
<b>Obr. 44</b>	Vzorek č. 3 – pór .....	57
<b>Obr. 45</b>	SEM snímek vzorku č. 4 s mikropórovitostí (červené šipky) .....	58
<b>Obr. 46</b>	Vliv vodíku na pórovitost [32] .....	63
<b>Obr. 47</b>	Tahová zkouška – vzorek z hotového kola .....	65
<b>Obr. 48</b>	Tahová zkouška – vzorek z hotového kola .....	66
<b>Obr. 49</b>	Vliv pórovitosti a obsahu vodíku na mechanické vlastnosti slitiny A356.0 T6 [7] .....	66