



Identifikace a analýza vad u odlitku příruby ze slitiny $AlSi7Mg0,3$

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Michal Stehlík**
Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Machuta, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Stehlík**
Osobní číslo: **S16000295**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Identifikace a analýza vad u odlitku příruby ze slitiny
AlSi7Mg0,3**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

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

1. Seznamte se s technologií nízkotlakého lití do kovových forem a s parametry, které tuto technologii ovlivňují. Tato technologie lze uplatnit pro výrobu odlitků z Al- slitin.
2. Prostudujte podklady stávající výroby odlitku příruby ze slitiny AlSi7Mg0,3 ve společnosti Unitherm s.r.o. a shromážděte veškeré vstupní parametry procesu.
3. Seznamte se se simulačním softwarem Magma 5 a proveďte simulační výpočty technologie nízkotlakého lití odlitku tělesa spojky příruby ze slitiny AlSi7Mg0,3 za pomoci tohoto softwaru.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky simulace a doporučte úpravu procesních případně technologických parametrů s ohledem na eliminaci potenciálních vad odlitku.
5. Experimentálně porovnejte vhodnými metodami výsledky simulace s reálnými vadami na odlitcích a vyhodnoťte potenciální příčiny těchto vad.
6. Zhodnoťte dosažené poznatky a formulujte dílčí závěry.

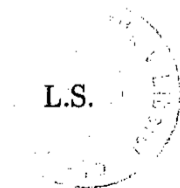
Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

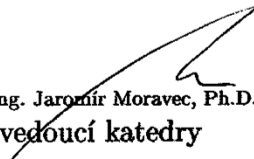
- [1] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
[2] SLOVÁK, S., RUSÍN, K. *Teorie slévání*, SNTL, Praha, 1990.
[3] MACHUTA, J., NOVÁ, I. *Slévárenské formy*, Technická univerzita v Liberci, 2014, ISBN 978-80-7494-083-5.
[4] VETIŠKA, A. a kol. *Teoretické základy slévárenské technologie*. 1. vyd. Praha 1974.
[5] Časopisy: Slévárenství, Giesserei, atd.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Machuta, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. ledna 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:

Identifikace a analýza vad u odlitku příruby ze slitiny AlSi7Mg0,3

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou vad v odlitku příruby ze slitiny EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) lité nízkotlakou technologií do kovové formy. Teoretická část je zaměřena především na slévárenské slitiny hliníku, konkrétně pak na slitiny hliníku s křemíkem a hořčíkem. Dále je v práci popsána technologie nízkotlakého lití a s ní související metalurgické procesy. Experimentální část se zaměřuje na identifikaci vad na zhotovených vzorcích prostřednictvím optické a elektronové mikroskopie a chemické analýzy. Součástí experimentu je simulační výpočet v programu *MAGMA* a vyhodnocení jeho výsledků.

Klíčová slova

nízkotlaké lití, slitina hliníku EN AC-42100, slévárenské vady, simulace

Identification and analysis of defects in aluminum flange casting from AlSi7Mg0.3 alloy

Abstract

The thesis deals with the analysis of defects in aluminum flange casting EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) that is made with low-pressure die casting technology. The theoretical part focuses mainly on aluminum alloys, namely aluminum alloys with silicon and magnesium. It also describes low-pressure casting technology and related metallurgical processes. The experimental part focuses on the identification of defects on samples using optical and electron microscopy and chemical analysis. The experiment consists of a simulation calculation in the *MAGMA* software and an evaluation of its results.

Key words

low pressure die casting, alloy EN AC-42100, casting defects, simulation

Poděkování

Na úvod bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D., za ochotný přístup, cenné rady a věnovaný čas. Mé díky patří také Ing. Davidu Duždovi za návrh tématu a za dlouhodobou spolupráci v dobách mého studia. Dále chci poděkovat Ing. Pavlu Matochovi, Ing. Tomáši Rumlovi, Ing. Davidu Jelínkovi a Ing. Pavlu Kejzlarovi, Ph.D., za pomoc při kompletaci podkladů k experimentální části.

Sonate 16 in C major Sonata facile

W. A. Mozart
K 545

Allegro

Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0

... speciální poděkování patří Mozartovi.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Teoretická část	8
2.1	Hliník a jeho slévárenské slitiny.....	8
2.1.1	Slitiny Al-Si	13
2.1.2	Slitiny Al-Si-Mg.....	17
2.2	Technologie nízkotlakého lití	20
2.2.1	Rafinace taveniny	22
2.2.2	Očkování a modifikace.....	26
2.3	Slévárenské vady v odlitcích	29
2.3.1	Vady povrchu (třída 200).....	30
2.3.2	Porušení souvislosti (třída 300).....	31
2.3.3	Dutiny (třída 400).....	31
2.3.4	Makroskopické vměšky (třída 500)	32
2.3.5	Vady mikrostruktury (třída 600)	33
3	Experimentální část.....	34
3.1	Identifikace vad na vzorcích z příruby	35
3.1.1	Spektrální analýza chemického složení.....	38
3.1.2	Digitální optický mikroskop	39
3.1.3	Rastrovací elektronový mikroskop.....	42
3.2	Simulační výpočet odlitku příruby	49
3.2.1	Příprava podkladů a vstupních parametrů.....	49
3.2.2	Výsledky výpočtu.....	54
4	Diskuse.....	58
5	Závěr	60

1 Úvod

Odlévání, jak jej známe dnes, má kořeny již v dávných dobách starověkých civilizací Mezopotámie, Egypta, Číny a Řecka. Nejstarší nálezy pocházejí z období přibližně 3000 let př. n. l. Zprvu se vyráběly nejrůznější náboženské předměty, sošky, šperky, ale také užité výrobky, zbraně a nástroje. Tehdejší technologie umožňovaly natavit pouze kovy a slitiny s relativně nízkou teplotou tání, tedy materiály na bázi mědi, cínu, zinku, olova, stříbra či zlata. Zhruba od 12. století př. n. l. se začala uplatňovat výroba odlitků ze železa a později také z litiny. [1, 2]

Hliníkové odlitky známy nebyly, jelikož čistý hliník nebylo po velmi dlouhou dobu možné získat, i když se jedná o třetí nejčtenější prvek v zemské kůře. Změnu přinesla až průmyslová revoluce, kdy se několika vědcům a chemikům povedlo získat malé množství tohoto kovu. Cena za výrobu jednoho kilogramu hliníku se v roce 1855 pohybovala kolem 130 £, což byla pro hromadnou výrobu příliš vysoká částka. Teprve na konci 19. století bylo možné tento kov efektivněji vyrábět elektrolytickou metodou, tzv. Hall-Heroultovým procesem, který se při výrobě používá dodnes. Pro výrobu 1 t hliníku je potřeba zhruba 15 000 kWh. Jako vstupní suroviny slouží kryolit (Na_3AlF_6) a bauxit, což je hornina obsahující směs různých minerálů (gibbsit, boehmit, diaspor a další). [2, 3]

Významný rozvoj v poznacích o hliníku a jeho slitinách probíhal v první polovině 20. století, kdy se začínal uplatňovat v konstrukci motorů, probíhaly experimenty na zlepšení materiálových vlastností a to např. tepelným zpracováním nebo modifikací sodíkem. Rozvoj hliníkových slitin s nízkou měrnou hmotností byl urychlen v období obou světových válek. V současnosti jsou typickými odběrateli hliníkových odlitků dopravní, stavební, strojírenské, energetické a potravinářské společnosti. [3]

I v dnešní době je však samotný proces zhotovení hliníkových odlitků náchylný na správné dodržení všech technologických a procesních parametrů. V praxi se můžeme setkat s různorodými vadami, jejichž eliminace bývá často velmi obtížná. Z tohoto důvodu se používají simulační programy, které mohou odhalit potenciální rizika. Schopnosti takového softwaru využívá i tato diplomová práce. Cílem je realizace simulačního výpočtu odlitku příruby ze slitiny AlSi7Mg0,3 v programu *MAGMA* a porovnání výsledků s reálnými vadami na odlitcích. Snahou je tyto vady identifikovat a vyhodnotit potenciální příčiny jejich tvorby.

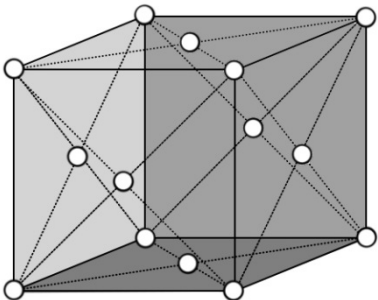
2 Teoretická část

2.1 Hliník a jeho slévárenské slitiny

Čistý hliník disponuje několika výhodnými vlastnostmi, kterými jsou např. dobrá elektrická a tepelná vodivost, odolnost proti korozi, nízká teplota tavení či nízká hustota. Vybrané vlastnosti čistého hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.1.

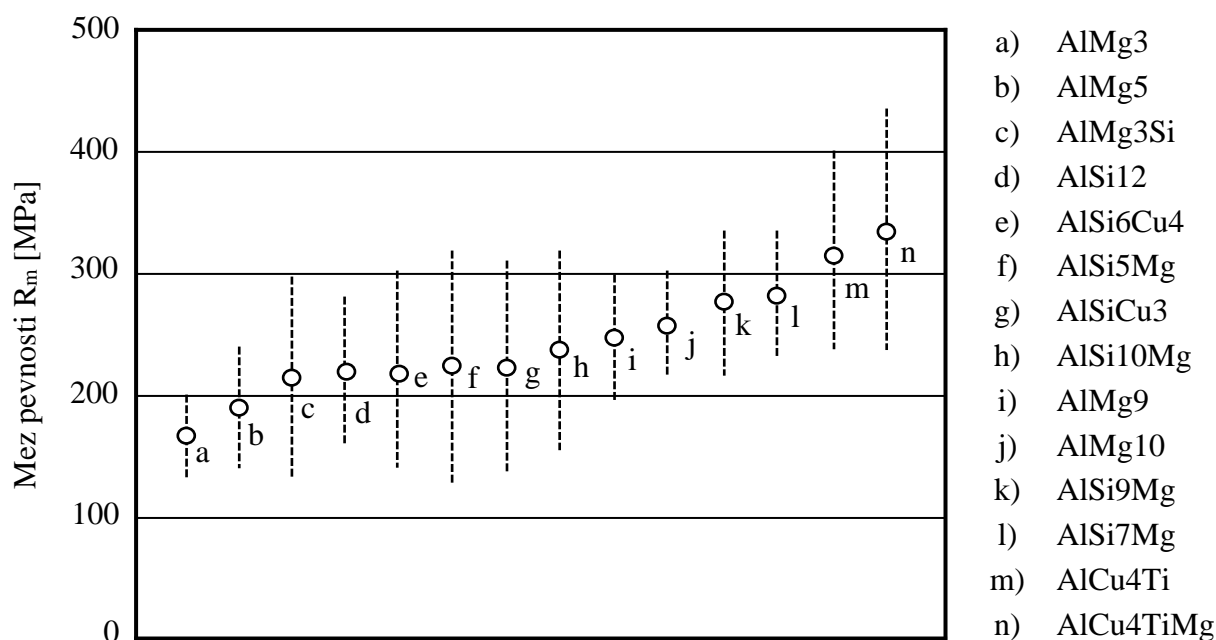
Hliník při přechodu z kapalné do tuhé fáze krystalizuje v soustavě kubické plošně centrované, viz obr. 2.1. Během chladnutí se krystalická mřížka nemění, na rozdíl od kovů vykazující alotropii, jakými jsou např. železo nebo titan. Pro hliník je typická také vysoká afinita ke kyslíku a vzniklé oxidy jsou velmi stabilní s teplotou tání okolo 2070 °C a vysokou tvrdostí. Při kontaktu s okolní vzdušnou atmosférou se na jeho povrchu tvoří oxidační vrstva Al_2O_3 , která funguje jako tenký ochranný film zabraňující další oxidaci. Hloubka vrstvy se pohybuje kolem 10 nm. [3, 4, 5]

Tab. 2.1 Vlastnosti čistého hliníku [3, 4]

Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti Al		Krystalická mřížka Al
Hustota (při 20 °C)	2699 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	 <p>Obr. 2.1 Mřížka kubická plošně centrovaná [autor]</p>
Teplota tání	660,4 [°C]	
Teplota varu	2494 [°C]	
Tepelná vodivost	247 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	
Elektrická vodivost	$37,7\cdot 10^6$ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]	
Součinitel teplotní roztažnosti	$23\cdot 10^{-6}$ [K^{-1}]	
Pevnost v tahu	40 až 50 [MPa]	
Tažnost	70 až 90 %	
Modul pružnosti v tahu	70 000 [MPa]	
Tvrдость	20 až 30 HB	

Pro zhotovení funkčních odlitků potřebujeme řadu dalších vlastností, a to zejména mechanických a slévárenských. Požadované vlastnosti nám zajistí právě slitiny, které obsahují přísadové prvky. Na vzájemné kombinaci a množství těchto prvků závisí výsledný charakter odlitku a jeho použití. Variabilita vlastností v závislosti na chemickém složení je patrná z obr. 2.2.

Mechanické vlastnosti závisí především na složení a druhu základové kovové matrice, disperzitě jednotlivých strukturních složek a také na tvaru intermetalických fází. Obecně lze říci, že čím jemnozrnější struktura, tím jsou mechanické vlastnosti lepší. Mezi nejčastěji sledované mechanické vlastnosti patří mez pevnosti, tažnost a tvrdost. [3]



Obr. 2.2 Rozmezí mechanických vlastností vybraných slitin [4]

Pro samotný proces odlévání je nezbytné zajistit dobré **slévárenské vlastnosti** slitiny tak, aby byly co možná nejvýhodnější pro danou technologii. Je známo, že nejlepší slévárenské vlastnosti vykazují slitiny s chemickým složením blízcím se eutektickému bodu. Významné slévárenské vlastnosti jsou zejména zabíhavost, kterou mimo jiné ovlivňuje šířka intervalu tuhnutí, sklon ke vzniku soustředěných staženin, sklon ke vzniku trhlin, a v neposlední řadě také sklon ke tvorbě plynových dutin a celkového naplynění.

Druh slitiny je definován především **hlavním přísadovým prvkem**, jehož procentuální obsah bývá nejvyšší. Pokud slitina obsahuje základový prvek a jeden hlavní přísadový prvek, hovoříme o binárních slitinách. Ve slévárenství se běžně setkáváme se slitinami hliníku, které obsahují jakožto hlavní přísadový prvek křemík. Jeho přítomnost ve slitině zlepšuje slévárenské vlastnosti. Takové slitiny pak označujeme jako siluminy. V jiných případech je hlavním přísadovým prvkem měď, která ovlivňuje zejména pevnostní vlastnosti. Pro tyto slitiny používáme pojem dural či duraluminium. Další významnou skupinou jsou hydronaly, což jsou slitiny hliníku s hořčíkem. [3, 4]

Kromě hlavního přísadového prvku obsahují slitiny hliníku také **vedlejší přísadové prvky**, jejichž hlavním úkolem je zlepšit některé její vlastnosti, ať už se jedná o pevnostní, chemické, fyzikální, technologické, únavové či lomové. Jde tedy o legury, které jsou do slitiny přidány záměrně. Slitiny obsahující kromě hlavního přísadového prvku jeden vedlejší přísadový prvek nebo více vedlejších přísadových prvků se nazývají ternární, respektive vícesložkové. [3, 4]

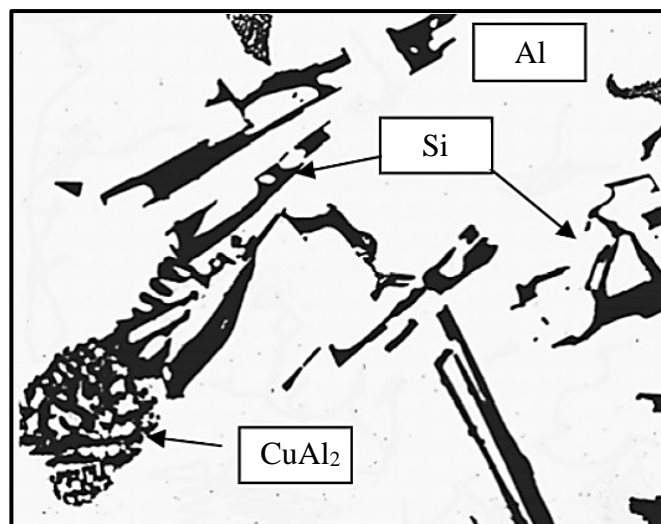
Oproti tomu rozlišujeme **doprovodné prvky**, které svou přítomností ve slitině ovlivňují výsledné vlastnosti negativně. Jejich koncentrace v tavenině je omezena horní přípustnou mezí. Často se do taveniny dostávají nekontrolovatelně reakcemi s vyzdívkou pece, z nečisté vsázky či vratu nebo v důsledku kontaktu taveniny se slévačským nářadím. Jejich odstranění z taveniny bývá obtížné. [3, 4]

Existuje celá řada legujících prvků, jejichž přítomností mění slitina své vlastnosti. V následujících odstavcích jsou uvedeny některé významné přísadové i doprovodné prvky a jejich předpokládané žádoucí, respektive nežádoucí vlastnosti. [3, 4, 5, 6, 12]

Křemík (Si) je hlavní přísadový prvek siluminů. Nejčastěji se používá obsah mezi 7 až 13 %. Jeho přítomnost ve slitině výrazně zlepšuje technologické a slévárenské vlastnosti. Zvyšuje zabíhavost a snižuje sklon k mikrostaženinám. Dále zlepšuje kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru u nadeutektických slitin. Příznivě zvyšuje korozní odolnost, snižuje koeficient tepelné roztažnosti a snižuje riziko vzniku trhlin a prasklin. Je důležitý také během vytvrzování, jelikož spolu s hořčíkem tvoří Mg_2Si .

Hořčík (Mg) je hlavním přísadovým prvkem hydronalií. Používá se také ve slitinách s křemíkem a ve slitinách s mědí, kde zvyšuje pevnostní vlastnosti skrze vytvrzování za tepla. Běžný obsah v těchto slitinách je 0,3 až 0,7 %. Je schopen tvořit precipitáty Mg_5Al_3 , Mg_5Al_8 , které se mohou vyloučit na hranicích zrn a zvýšit tak riziko interkrystalické koroze. Riziková je i jeho vysoká afinita ke kyslíku. U slitin, které neobsahují měď, reaguje se železem za vzniku fází snižujících tažnost.

Měď (Cu) se používá jako hlavní přísadový prvek u duralů nejčastěji do 5 až 10 %. Jejím charakteristickým účinkem je zvyšování pevnosti a tvrdosti slitiny při procesu vytvrzování. U siluminů zvyšuje interval tuhnutí a tím i sklon ke vzniku ředit a trhlin za tepla. Dále zlepšuje obrobiteľnosť a prispívá ke tvorbe lámavé třísky. Naproti tomu ale snižuje odolnost proti korozi. Také ji nelze ze slitiny odstranit běžnými metalurgickými postupy. Měď může vytvářet intermetalické fáze $CuAl_2$, jejichž tvar je dobře patrný na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Fáze CuAl_2 ve slitině Al-Si [3]

Nikl (Ni) se používá v obsahu do 2 % u slitin se zvýšenými pevnostními vlastnostmi za vyšších teplot. Spolu s některými dalšími prvky (především s mědí) tvoří fáze s dobrou tepelnou stabilitou. Dále snižuje koeficient teplotní roztažnosti a zvyšuje odolnost proti korozi. Mezi jeho negativní účinky patří zhoršení slévárenských vlastností.

Kobalt (Co) má modifikační účinek v siluminech, které jsou znečištěny železem. Mění zde jehlicovou fázi Al_5FeSi na tvarově příznivější – kulovitou, což vede k navýšení pevnostních a plastických vlastností.

Beryllium (Be) působí proti nepříznivým účinkům železa podobně jako kobalt, tedy mění tvar intermetalických fází bohatých na železo. Dále je schopno vytvářet na hladině taveniny ochrannou vrstvu proti oxidaci. Používá se zřídka a pouze v nízkých koncentracích v setinách procent. Nejvyšší riziko představuje jeho jedovatost pro lidský organismus.

Zinek (Zn) mírně zvyšuje tekutost, zabíhavost a obrobitelnost. Jeho obsah ve slitině bývá do 5 %. Při vyšším obsahu roste sklon ke vzniku trhlin. Spolu s hořčíkem umožňuje vytvářet intermetalickou fázi MgZn_2 .

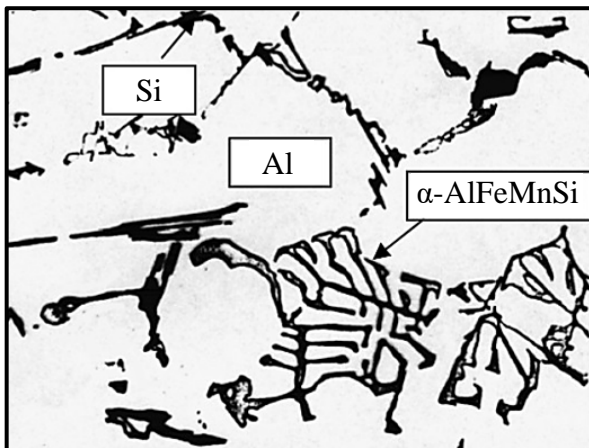
Cín (Sn) je důležitý legující prvek u ložiskových slitin. V případě výskytu u slitin s mědí má vliv na citlivost ke stárnutí za vyšších teplot. Ovšem při koncentraci již nad 0,05 % zvyšuje riziko trhlin za tepla. U většiny slitin je však považován za nepříznivý doprovodný prvek.

Stříbro (Ag) zvyšuje odolnost vůči korozi za napětí u slitin s hořčíkem a zinkem. Zároveň zlepšuje pevnostní vlastnosti zejména po tepelném zpracování. Přidávané množství se pohybuje kolem 0,5 až 1 %.

Bór (B) a **titan (Ti)** slouží primárně jako očkovačla pro zjemnění struktury. Bór má navíc schopnost stabilizovat některé precipitáty vzniklé při vytvrzování. Samotný titan vytváří krystalizační zárodky $TiAl_3$ a v kombinaci s borem TiB_2 . Podobné očkovací vlastnosti má i **zirkonium (Zr)**, které tvoří jemné precipitáty zamezující rekrystalizaci, čímž přispívá k jemnozrnné struktuře. **Molybden (Mo)** je další, avšak zřídka používaný prvek, který má podobné schopnosti.

Olovo (Pb) a **bismut (Bi)** jsou obecně považovány za nečistoty, které zhoršují celkovou houževnatost slitiny. Olovo je navíc toxický prvek a u slitin s mědí a hořčíkem může zvyšovat riziko trhlin za tepla. Oba prvky svým působením zlepšují mechanickou obrobiteľnosť.

Železo (Fe) je významná nečistota. V tuhém hliníku nemá téměř žádnou rozpustnost a tvoří nežádoucí intermetalické fáze v kombinaci s dalšími prvky. Na výbrusu na obr. 2.4 je zachycena fáze $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ zvaná „čínské písmo“. Na druhém snímku na obr. 2.5 můžeme pozorovat ostré útvary jehlicové fáze Al_5FeSi . Obě dvě fáze mají negativní vliv na tažnosť a dynamické vlastnosti. Příznivou vlastností železa je snížení lepení slitiny na stěny formy. Železo navíc mírně snižuje obrobiteľnosť a odolnosť proti korozi. Limitní množství pro běžné odlitky je do 0,6 %.



Obr. 2.4 Fáze $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ [3]



Obr. 2.5 Jehlicová fáze Al_5FeSi [3]

Mangan (Mn) ve slitině zvyšuje pevnostní vlastnosti a zjemňuje zrno. Jeho důležitou vlastností je potlačení vylučování železa v destičkovitém tvaru, tím do jisté míry kompenzuje jeho negativní vliv. Dále navyšuje teplotu rekrystalizace a přispívá ke zvýšení citlivosti ke kalení. Podíl manganu by měl být zhruba polovina obsahu železa.

Lithium (Li) ve slitině může snížit její měrnou hmotnost, jelikož se jedná o prvek s velmi nízkou hustotou. Je schopný tvořit koherentní precipitáty $LiAl_3$, které významně zvyšují pevnostní vlastnosti slitiny.

Sodík (Na) a **stroncium (Sr)** se používají zejména jako modifikátory u slitin s křemíkem. V případě nadeutektických siluminů může být pro modifikační účely použit **fosfor (P)**.

Antimon (Sb) může být v některých případech podobně jako sodík nebo stroncium použit k modifikaci. Dále zvyšuje korozní odolnost proti mořské vodě a u slitin s hořčíkem snižuje náchylnost ke vzniku trhlin za tepla.

Vápník (Ca) bývá považován za nežádoucí prvek, jelikož přispívá k naplynění a ke tvorbě mikrostaženin.

Důležitým faktorem, který ovlivňuje výsledný odlitek a jeho vlastnosti, je kromě chemického složení také způsob výroby, konkrétně volba výrobní technologie a vhodné nastavení jejích parametrů. Dále se jedná o případné zařazení následných mechanických, tepelných či jiných dodatečných zpracovatelských operací do procesu výroby.

2.1.1 Slitiny Al-Si

Obecně je označování všech slitin hliníku popsáno normou ČSN EN 1706. Zápis je složen z písmen „EN“ a „AC“, kde písmeno „A“ označuje hliník (z anglického *Aluminium*) a písmeno „C“ značí odlitek (z anglického *Casting*). Za písmeny následuje pět číslic, které určují typ na základě chemického složení.

V této diplomové práci je sledována jedna ze slitin ze skupiny siluminů, konkrétně EN AC-42100, pro kterou se také používá chemické označení AlSi7Mg0,3. Zápis pomocí chemických značek vždy obsahuje základní prvek na první pozici a dále následují střední procentuální obsahy přísadových prvků. To znamená, že tato slitina obsahuje přibližně 7 % křemíku a 0,3 % hořčíku (podrobněji o této slitině v kapitole 2.1.2). V tabulce 2.2 je uvedeno rozdělení slitin podle číselných řad v závislosti na chemickém složení. [3]

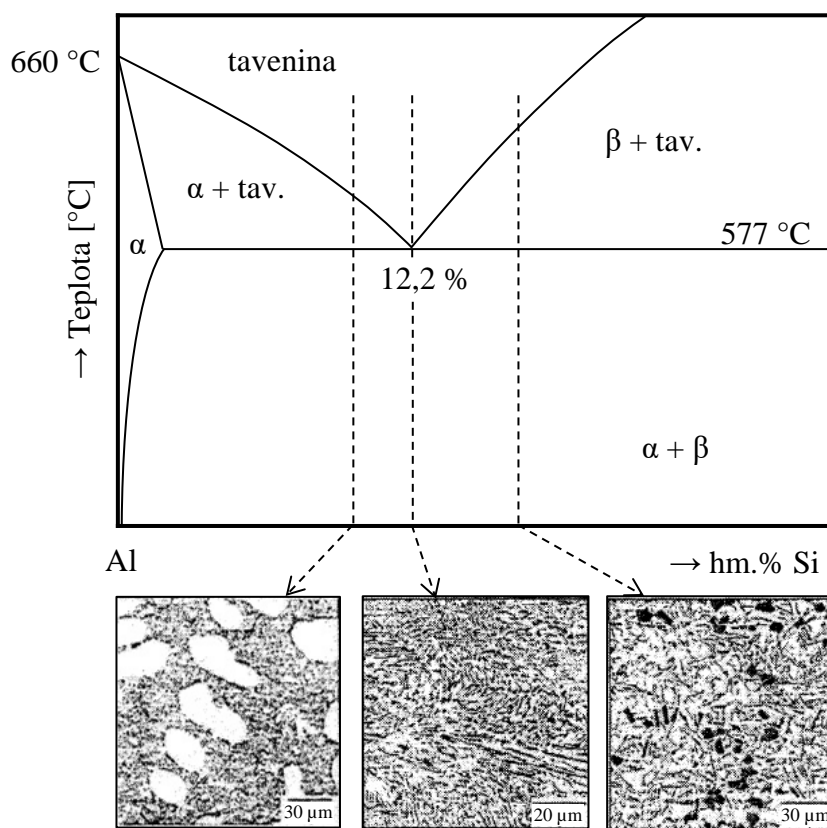
Tab. 2.2 Řady slitin dle chemického složení [4]

Označení řady	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000
Chemické složení	Al min. 99 %	AlCu	AlMg	AlSi	AlMg	AlMgSi	AlZn	Al s různými prvky

Slitiny hliníku s křemíkem jsou ve slévárenské praxi jedny z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších slitin. Obsah dalších doprovodných prvků je limitován na relativně nízké hodnoty. Disponují tak dobrými slévárenskými vlastnostmi, které jsou výrazně ovlivněny přítomností křemíku. Ten, na rozdíl od jiných prvků, při tuhnutí zvětšuje svůj objem, což vede k částečné kompenzaci stahování hliníkové matrice. Míra smrštění slitin hliníku se tak

pohybuje obvykle mezi 1,2 až 1,5 %. Další jejich předností je vysoká zabíhavost, mají také dobrou svařitelnost a korozní odolnost. Jsou vhodné pro odlévání jak do pískových, tak do kovových forem. Z obr. 2.6 je patrné, že eutektická teplota je 577 °C a eutektické složení odpovídá přibližně 12,2 % Si. Tento bod obecně rozděluje slitiny na 3 druhy.

Prvním z nich jsou slitiny **podeutektické**, které obsahují přibližně 5 až 11 % Si. Dále jsou to slitiny, které mají obsah křemíku blízký eutektickému složení, tedy přibližně 11 až 13 % Si, takové slitiny označujeme jako **eutektické**. Poslední skupinou jsou slitiny **nadeutektické**, které se běžně příliš nepoužívají. Obsah křemíku je zde vyšší než u eutektických slitin, ale většinou se pohybuje do 14 %. [3, 6]



Obr. 2.6 Binární diagram Al-Si [6]

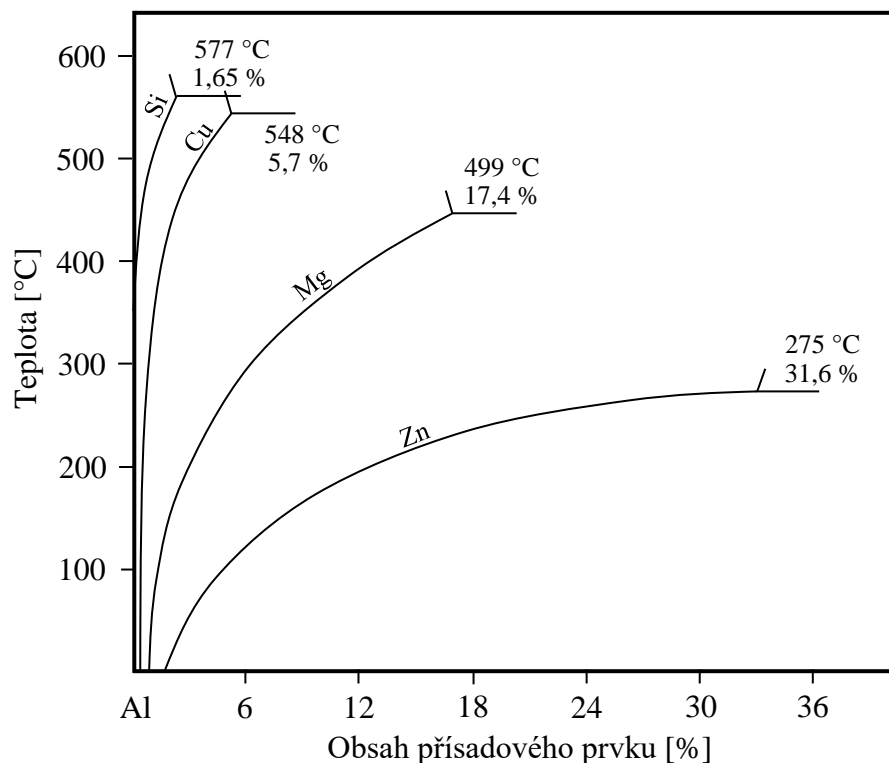
Struktura siluminů je v závislosti na chemickém složení tvořena homogenním tuhým roztokem a eutektikem, případně některými intermetalickými fázemi.

Homogenní tuhý roztok α je substituční roztok hlavního přísadového prvku v hliníku, kde atomy přísadového prvku nahrazují některé atomy hliníku v jeho kubické plošně centrované mřížce. Substituční atomy mají jinou velikost, ale svým poloměrem se liší od atomu hliníku maximálně o 15 %. Tento rozdíl velikostí způsobuje nepatrnou deformaci původní krystalové mřížky, což vede k růstu pevnosti a houževnatosti slitiny, ale k poklesu

plastických vlastností. Nejvyšší rozpustnost přísadových prvků v hliníku je při eutektické teplotě a po ochlazování se snižuje, což může vést k vylučování fáze přísadového prvku. Na tomto jevu stojí princip tepelného zpracování – vytvrzování, označované též jako precipitační zpevnění. Podle této schopnosti dělíme slitiny **vytvrditelné** a **nevytvrditelné**. [3, 5]

V případě nadeutektických slitin hliníku a křemíku rozlišujeme i **homogenní tuhý roztok β** . Při tuhnutí dochází k vylučování primární fáze křemíku a po dosažení eutektické teploty pokračuje tuhnutí krystalizací eutektické fáze. [3, 5]

Eutektikum je složeno z fáze α a přísadového prvku (u siluminů eutektickým křemíkem) anebo jeho sloučeninou, označovanou také jako intermetalická fáze. Eutektikum vzniká tehdy, když je množství přísadového prvku ve slitině vyšší, než je maximální rozpustnost tohoto prvku v homogenním tuhém roztoku α při teplotě tuhnutí. Všechny používané slitiny hliníku s křemíkem tuto podmínku splňují, jelikož maximální rozpustnost křemíku v hliníku je 1,65 %, viz obr. 2.7, kde jsou uvedeny maximální rozpustnosti některých dalších prvků. Množství vyloučeného eutektika, a zejména jeho tvar, výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti slitiny. [3, 5]



Obr. 2.7 Rozpustnost vybraných prvků v Al slitinách [5]

Intermetalické fáze mají vlastní krystalickou strukturu. Jsou to chemické sloučeniny, které vznikají z přísadových a doprovodných prvků v případě překročení jejich maximální rozpustnosti. Mohou vznikat krystalizací z taveniny během tuhnutí nebo rozpadem či

přeměnou tuhých roztoků. Obecně se tyto fáze vyznačují zvýšenou tvrdostí a křehkostí. Rozlišujeme fáze, které se podílejí na procesu vytvrzování, např. CuAl_2 a Mg_2Si . A dále fáze, které se na tomto procesu nepodílejí a svou přítomností negativně ovlivňují zejména plastické a únavové vlastnosti, např. AlFe_3 . Tyto částice mají jiné pevnosti a plastické vlastnosti než okolní matrice a stávají se koncentrátoři napětí. To může vést až ke vzniku mikroporuch, které se při dalším zvyšování napětí mohou šířit materiálem. [4]

V tabulce 2.3 jsou uvedeny některé intermetalické fáze vznikající ve slitinách hliníku. Podle své krystalické struktury se intermetalické fáze rozdělují na 3 typy. Konkrétně to jsou valenční sloučeniny, elektronové sloučeniny a intersticiální sloučeniny. [3, 5, 7]

Valenční sloučeniny jsou tvořeny iontovými vazbami vznikajícími mezi silně elektropozitivními a silně elektronegativními kovy. Tyto sloučeniny mají vysokou tvrdost a teplotu tání. Příkladem může být sloučenina Mg_2Si .

Elektronové sloučeniny jsou definovány poměrem valenčních elektronů vůči počtu atomů. Podle tohoto poměru se rozlišují tři typy sloučenin, přičemž každá má svou vlastní krystalografickou mřížku. Oproti valenčním mají nižší teplotu tání a jsou méně stabilní. Řadíme mezi ně např. Al_2Cu nebo Al_3Ni .

Intersticiální sloučeniny jsou takové fáze, u nichž se atomové poloměry jednotlivých složek liší o více než 15 %. Takové sloučeniny mají vlastní krystalovou mřížku a vykazují vysoký bod tání. Mezi intersticiální sloučeniny patří např. AlB_2 nebo Al_4C_3 .

Tab. 2.3 Vybrané fáze vyskytující se ve slitinách Al [3]

Fáze	Mřížka	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$]
CuAl_2	tetragonální	4340	591
FeAl_3	monoklinická	3780	1160
Mg_2Al_3	krychlová plošně středěná	2230	452
MnAl_6	rombická	3210	710
NiAl_3	rombická	3960	854
TiAl_3	tetragonální	3370	1340
Mg_2Si	krychlová plošně středěná	1990	1102
MgZn_2	hexagonální	5200	590
CuMgAl_2	rombická	4130	850
$\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$	krychlová plošně středěná	3800	530
Cu_3NiAl_6	krychlová prostorově středěná	5480	820

2.1.2 Slitiny Al-Si-Mg

Slitiny hliníku s křemíkem a hořčíkem se řadí mezi pondeutické slitiny a jsou určeny především pro tepelné zpracování vytvrzováním, díky kterému získávají zvýšené mechanické vlastnosti. Tuto schopnost zajišťuje hořčík, jehož obvyklé množství ve slitině se pohybuje mezi 0,25 – 0,45 %, v některých případech až 0,7 %. Z obr. 2.8 je patrný výrazný vliv hořčíku ve slitině na její mechanické vlastnosti. Podle obsahu křemíku se dělí na dva typy: AlSi7Mg a AlSi10Mg.

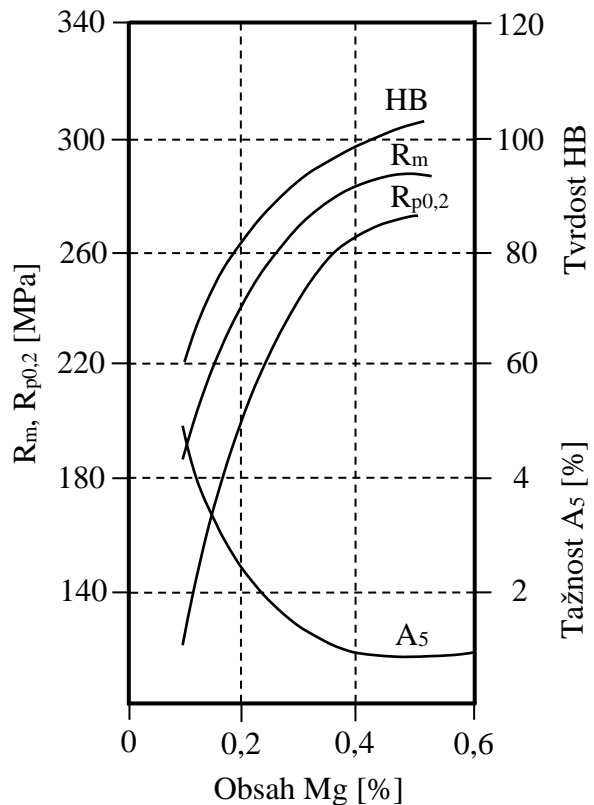
Lze je použít pro gravitační lití do pískových a kovových forem i pro lití pod tlakem. Hotové odlitky jsou určeny především pro namáhané výrobky, častou aplikaci najdeme v automobilovém a také v leteckém průmyslu.

Slitina AlSi7Mg0,3 (EN AC-42100) je jednou z vysokopevnostních slitin disponující dobrou tažností a houževnatostí. Obvykle obsahuje minimální množství příměsí a nečistot. Rozmezí obsahu křemíku a hořčíku a maximální dovolené obsahy některých dalších prvků udává norma ČSN EN 1706, viz tabulka 2.4. [3, 4]

Tab. 2.4 Chemické složení slitiny EN AC-42100 [9]

Prvek	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Ca	Zr
Obsah [%]	6,50 – 7,50	0,25 – 0,45	max. 0,190	max. 0,050	max. 0,100	max. 0,070	max. 0,250	max. 0,030	max. 0,030

Mezi další výhody patří dobré slévárenské a technologické vlastnosti, odolnost proti korozi, obrobitelnost a nižší sklon ke vzniku staženin, viz tabulka 2.5. Může být odlévána gravitačně do pískových či kovových forem a je také vhodná pro nízkotlaké lití do kovových forem. Používá se výhradně po tepelném zpracování vytvrzováním v režimu, který se označuje T6. Mechanické vlastnosti ve stavu T6 dle normy ČSN EN 1706 jsou vedeny v tabulce 2.6. [3, 4]



Obr. 2.8 Vliv obsahu hořčíku ve slitině AlSi na její mechanické vlastnosti [3]

Tab. 2.5 Slévárenské vlastnosti slitiny EN AC-42100 [9]

Parametr	Hodnocení
Zabíhavost	B
Odolnost proti vzniku trhlin	A
Nepropustnost	B
Obrobitelnost	B
Svařitelnost	B
Odolnost proti korozi	B
Anodická oxidace	D
A – výborné, B – velmi dobré, C – dobré, D – nízké, E – nedoporučené, F – nevhodné	

Tab. 2.6 Mechanické vlastnosti slitiny EN AC-42100 [9]

Způsob lití:	Kovová forma	Písková forma
R _m [MPa]	290	230
R _{p0,2} [MPa]	210	190
A ₅₀ [%]	4	2
Tvrдость [HBW]	90	75

Tepelné zpracování vytvrzováním se skládá ze tří hlavních procesů uvedených v následujících odstavcích. [3, 6, 7]

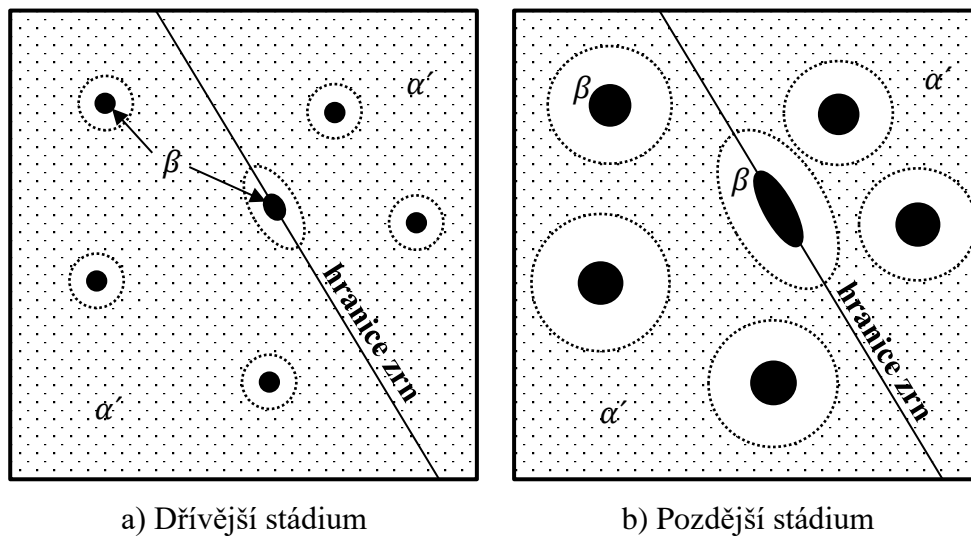
První z nich je **rozpouštěcí žihání**. Nejprve je nutné odlitky v peci zahřát na teplotu, při které dochází ke zvýšení rozpustnosti přísadového prvku v tuhém roztoku hliníku. Ohřev probíhá na teplotu ležící přibližně pár desítek °C pod eutektickou teplotou. Dojde tak k rozpouštění intermediálních fází. Na této teplotě je odlitek ponechán určitou dobu, nejčastěji 4 až 12 hodin. Tato teplota nesmí být výrazně překročena z důvodu nežádoucího překročení teploty solidu a následného natavení hranic zrn.

Po žihání následuje **rychlé ochlazení**. Jeho cílem je tvorba přesyceného tuhého roztoku, který je termodynamicky nestabilní. Tento nerovnovážný stav je charakteristický vyšším obsahem rozpuštěné příměsi, než udává rovnovážná rozpustnost. V této fázi má odlitek zhoršené mechanické vlastnosti a je relativně dobře tvárný. Ochlazovacím médiem může být voda nebo olej.

Posledním krokem celého tepelného zpracování je **umělé stárnutí**. Zajišťuje se dodatečným ohřevem na teploty kolem 140 až 180 °C po předepsanou dobu, která se pohybuje v rozmezí 3 až 8 hodin. Na počátku této fáze se začíná rozpadat nestabilní přesycený tuhý roztok α' a vznikají drobné precipitáty fáze β , tento stav je označen na obr. 2.9 a). V průběhu času ochuzuje vznikající fáze β okolní oblasti obohacené matrice a postupně roste, jak je zobrazeno na obr. 2.9 b).

Odlitek je následně pomalu ochlazován na běžnou teplotu. Po tomto procesu dostává již vytvrzená slitina své charakteristické vlastnosti. Precipitáty mohou vznikat také samovolně již při teplotě okolí, v takovém případě mluvíme o **přirozeném stárnutí**, které probíhá zpravidla pomaleji než umělé.

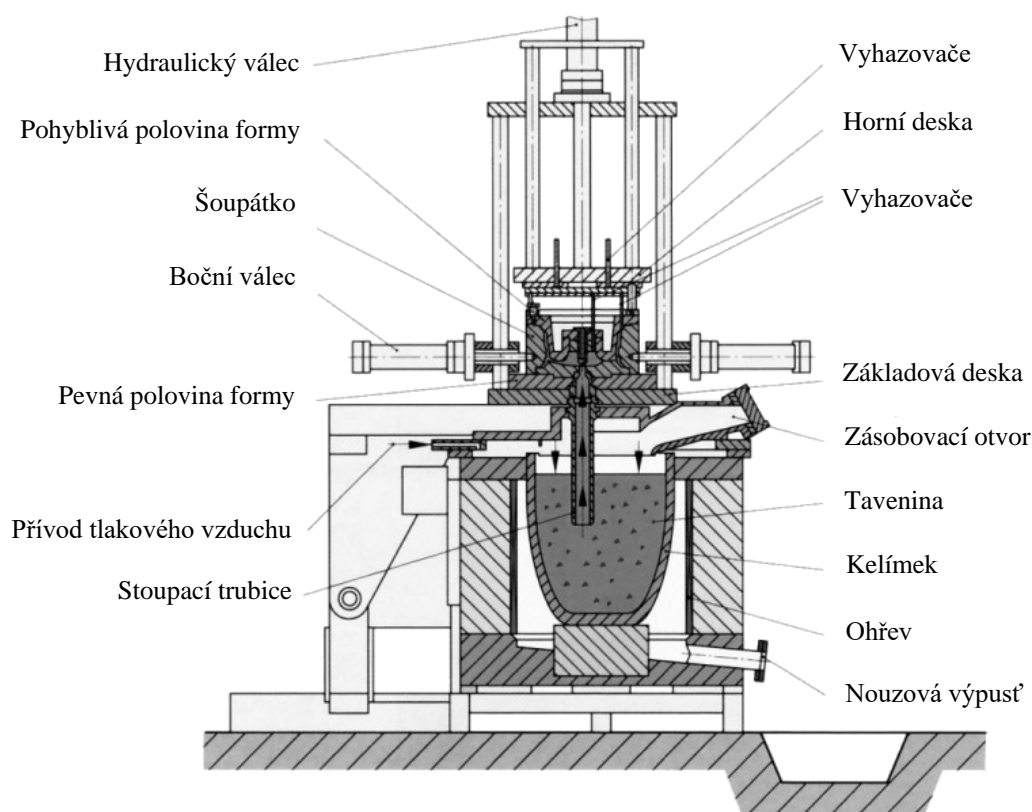
Pro slitinu AlSi7Mg0,3 a vytvrzení do stavu T6 jsou doporučené teploty rozpouštěcího žíhání 535 – 540 °C po dobu 12 hodin s následným ochlazením do vody a umělé stárnutí při teplotách 150 – 155 °C po dobu 2 až 5 hodin s postupným ochlazením na pokojovou teplotu na vzduchu.[4]



Obr. 2.9 Schéma kontinuální precipitace [7]

2.2 Technologie nízkotlakého lití

Mezi konvenčními způsoby odlévání hliníkových slitin patří gravitační, vysokotlaké a nízkotlaké lití. Samotná technologie lití a způsob tuhnutí ve formě ovlivňují výslednou strukturu a vlastnosti odlitků. Obecně lze říci, že čím vyšší intenzita ochlazování, tím vzniká jemnozrnější struktura, snižuje se riziko vzniku mikrostaženin i ředin, a vylučování rozpuštěných plynů ve formě velkých plynových dutin je omezeno. S ohledem na téma práce se tato kapitola zaměří pouze na technologii nízkotlakého lití do kovových forem.



Obr. 2.10 Schéma stroje pro nízkotlaké lití [18]

Obr. 2.10 ukazuje schéma stroje a procesu nízkotlakého lití, kde spodní polovina formy je upevněna na pevnou desku stroje a vrchní polovina formy na pohyblivou část na vodících sloupech. V horní polovině formy se nachází vyhazovače. Dělicí rovina je obvykle vodorovná. Eventuálně mohou být součástí formy i boční jádra. Formy se běžně vyrábí z nízkolegované oceli nebo litiny s lupínkovým grafitem. Ve formě může být zaveden temperanční systém. Forma by měla být konstruována tak, aby tuhnutí probíhalo odshora směrem dolů. Pro odvod vzduchu a plynů během plnění bývá ve formě provedeno odvzdušnění pomocí drážek v dělicí rovině a vzdušníků. Forma vyžaduje ochranný postřík,

který zlepšuje kvalitu povrchu odlitku a chrání formu i eventuální jádra před přímým stykem s taveninou. Další funkcí postříku je zlepšení vyjímání odlitku z formy. [3]

Celý stroj je vertikálně vyrovnán a udržovací pec s roztaveným kovem je umístěna pod pevnou deskou. Pracovní prostor s pecí musí být během plnění hermeticky uzavřen. Plnění formy probíhá skrze stoupací trubici směrem vzhůru proti působení gravitace. Kov se téměř nedostává do styku s okolní atmosférou a nedochází tak k vysoké oxidaci. Toto plnění zajišťuje přetlak plynu nebo vysušeného vzduchu na hladinu taveniny. Přetlak bývá řádově v setinách MPa (cca 0,02 až 0,06 MPa) a působí až do ztuhnutí odlitku. Obvykle je plnění klidné, pomalé a bez víření. [3, 4]

Po naplnění formy kovem má trubice funkci nálitku, jelikož pomocí dodatečného přetlaku doplňuje smršťujícímu se objemu materiálu ve formě další roztavený kov. Spodní ústí trubice je permanentně ponořeno pod hladinou taveniny. Stoupací trubice musí být vyrobena ze žáruvzdorného materiálu, např. z oceli s ochranným nátěrem, případně z keramiky nebo grafitu. Neměla by způsobovat chemické interakce s taveninou. [3, 4]

Technologie nízkotlakého lití se díky svému specifickému způsobu plnění používá zejména pro slitiny lehkých neželezných kovů. Typickými odlitky jsou symetrické rotační součásti, které se plní ze středu za pomoci vhodné vtokové soustavy. Touto technologií se odlévají např. disky kol. Při dobré konstrukci formy a optimálním teplotním režimu je výhodou této technologie vysoké využití tekutého kovu (až 90 %), jelikož ztuhlá část vtokové soustavy je relativně malá. Tloušťky stěn se pohybují nejčastěji mezi 8 a 30 mm. Na rozdíl od vysokotlakého lití nelze touto technologií efektivně vyrábět vysoce členité a tenkostěnné odlitky s tloušťkou stěny pod 3 mm. Výrobní cyklus je oproti vysokotlaké technologii pomalejší. U středně velkých dílů se čas cyklu od uzavření formy do vyhození odlitku pohybuje řádově v jednotkách minut. [3, 4]

Obecně lze hlavní výhody nízkotlakého lití shrnout v následujících několika větech. Odlitky mají dobrou rozměrovou přesnost a pevnostní vlastnosti. Díky funkci stoupací trubice je využití materiálu vysoké. Výhodná je též absence nálitků. Rychlosti proudění kovu jsou nízké a plnění dutiny je klidné, což vede ke kvalitnějším odlitkům. Technologie umožňuje vyrábět i složitější odlitky s pomocí jader. Pořizovací náklady na stroje a formy jsou oproti vysokotlaké technologii řádově nižší. A v neposlední řadě je tato technologie vhodná také k automatizaci a robotizaci.

2.2.1 Rafinace taveniny

Slitiny hliníku jsou obecně náchylné ke vzniku nekovových vměstků. Podle chemického složení je můžeme rozdělit na oxidické a neoxidické. Dle svého původu se dělí do dvou skupin, a to na vměstky exogenní a endogenní.

Vměstky exogenní mají původ externí, pronikly do taveniny zvenčí buďto během tavení nebo během samotného odlévání. Typickými představiteli jsou hlinitany, křemičitany, případně karbidy křemíku, tedy částice ze žárovzdorných materiálů vyzdívek pecí, kelímků a licích pánví. [3]

Vměstky endogenní vznikají v tavenině skrze probíhající reakce mezi jednotlivými prvky. Mezi tyto vměstky můžeme zařadit např. oxidy hliníku nebo spinely $MgAl_2O_4$, a také zbytky metalurgických solí a přísad. [3]

Podle tvaru vměstků se rozlišují tři základní druhy, kterými jsou oxidické blány, makroskopické vměstky kompaktního tvaru a mikroskopické částice (místně nebo rovnoměrně rozložené v kovu). Nejtypičtějším příkladem nečistot jsou oxidické vměstky Al_2O_3 . Mohou se vyskytovat buď jako disperzní částice o velikosti řádově jednotek až desítek μm nebo jako souvislé oxidické blány dlouhé až několik mm, které jsou z hlediska vlivu na výsledné vlastnosti odlitku nepříznivější. Při statickém a zejména při dynamickém zatěžování působí v odlitku jako vruby a jsou iniciátory tvorby trhlin. Některé další nežádoucí vměstky vyskytující se ve slitinách hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.7. [3, 4]

Vměstky mohou sloužit také jako zárodky pro vznik bublin a přispívají tak ke snížení těsnosti odlitku. Celá řada vměstků disponuje vysokými teplotami tavení, jinak řečeno při odlévání se vyskytují v tuhém stavu. Působí proto jako nežádoucí překážky v toku taveniny a snižují tím celkovou zabíhavost. Dále se mohou negativně projevit také při obrábění, jelikož jsou to obecně velmi tvrdé částice (viz Al_2O_3 – v mineralogii označován jako korund s číslem 9 na Mohsově stupnici tvrdosti). Navíc výrazně snižují možnosti povrchových úprav, eloxování či leštění. [3, 4, 13]

Tab. 2.7 Nečistoty ve slitinách hliníku [4, 12]

Oxidy	Karbidy	Spinely	Nitridy	Sulfidy	Fosfidy	Boridy	Soli
Al_2O_3	Al_4C_3		AlN			AlB_2	chloridy fluoridy
SiO_2	SiC	$MgAl_2O_4$	Mg_3N_2	Al_2S_3	AlP	TiB_2	
MgO	TiC		TiN			VB_2	
	ZrC					ZrB_2	
	CaC_2						

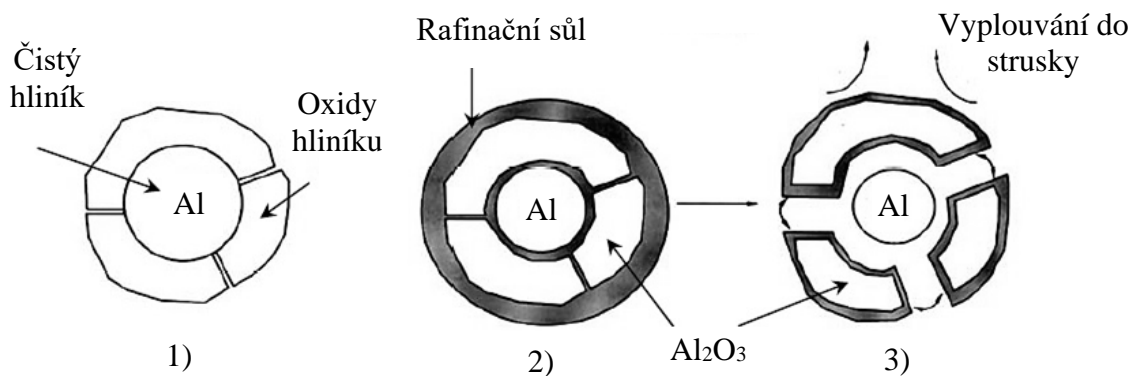
Tab. 2.7 Nečistoty ve slitinách hliníku – pokračování

Specifikace vybraných vměstků:			
Vměstky	Zdroj	Tvar	Velikost [μm]
Al_2O_3	struska	částice	0,2 – 30
		blány	10 – 5000
MgO	struska	částice	0,1 – 5
		blány	10 – 5000
MgAl_2O_4	struska	částice	0,1 – 5
		blány	10 – 5000
Chloridy Fluoridy	rafinační soli	částice	0,1 – 5
TiC	očkovačla	částice	0,1 – 5
AlB_2 TiB_2	očkovačla	shluky	1 – 30
		částice	0,1 – 3

V provozu, před transportem slitiny do udržovací pece, je nutné nejprve taveninu připravit v tavicích pecích, do kterých se zaváže housky a vratný materiál. Ten by měl být predehřátý a dobře vysušený. Důležitým faktorem je chemická čistota vsázky. Materiál by neměl být znečištěný nebo mastný a neměl by zahrnovat třísky z obrábění. Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly, potenciální riziko kontaminace exogenními vměstkami představují i vyzdívkami pecí a licí pánve.

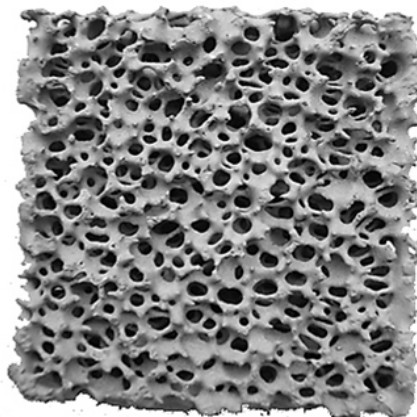
Znečištěná slitina ztrácí své výhodné mechanické a slévárenské vlastnosti. Z výše zmíněných důvodů je vždy nutné provádět rafinaci, tedy proces, který má za cíl snížit množství vměstků a zajistit co nejvyšší kvalitu taveniny.

Jednou z nejběžnějších metod rafinace taveniny je použití **rafinčních a čistících přípravků**. Skládají se z různých anorganických sloučenin, obsahují chloridy a fluoridy a obvykle mají formu prášku, granulí nebo tablet. Přísadové složky jsou náchylné na vlhkost, a proto vyžadují skladování v suchém prostředí. Jejich úkolem je eliminace nežádoucích oxidických vměstků a některých doprovodných prvků chemickým navázáním. Tyto procesy probíhají snadněji za vyšších teplot. Výsledné sloučeniny mají nižší hustotu a vyplouvají na hladinu. Tyto přípravky dále slouží ke snížení odběru kovového hliníku spolu se struskou, jelikož uvolňují v oxidické obálce uvězněný hliník zpět do taveniny, jak je schematicky zobrazeno na obr. 2.11. [3]



Obr. 2.11 Princip účinku rafinačních solí [3]

Vměstky lze zachytávat také mechanickou cestou, a to za pomoci **filtrace** při přelévání tavenin z pecí nebo přímo při odlévání do formy. Filtry mohou být keramické, tkaninové, kovové z ocelových drátů, šamotové s kruhovými otvory, případně lze použít i sítky ze skelných vláken. U pěnových keramických filtrů očekáváme vysokou účinnost filtrace, zapříčiněnou vysokým styčným povrchem taveniny s filtrem. Účinek filtrace je také založen na principu změny rychlosti a směru proudění uvnitř filtru. Tyto vlastnosti jsou způsobené vnitřní pórovitou stavbou filtru, viz obr 2.12. [3, 4]

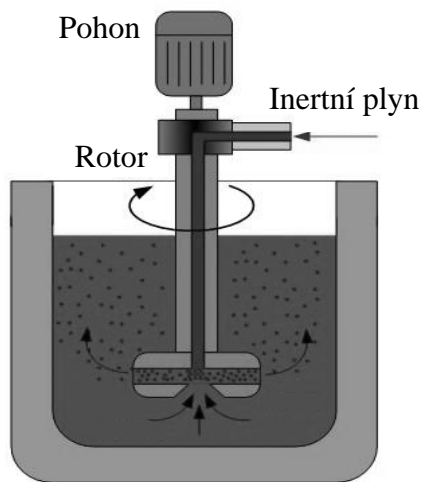


Obr. 2.12 Pěnový keramický filtr [15]

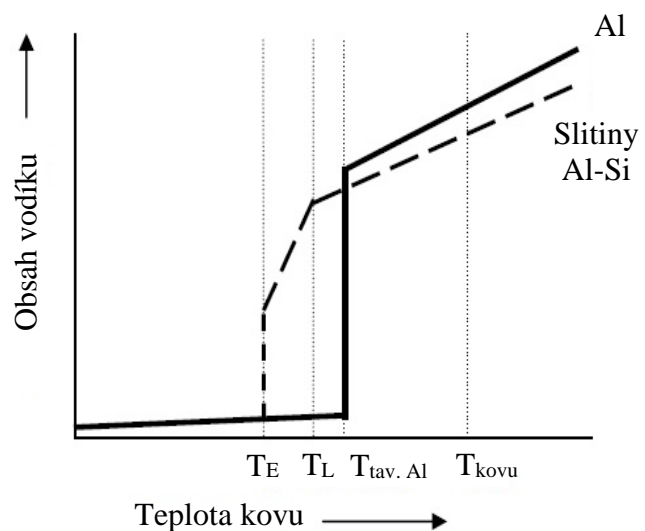
Další metodou, která přispívá k vyplouvání vměstků, je proces **odplynění**. Používají se odplyňovací přístroje, tzv. **FDU** (zkratka z anglického *foundry degassing unit*), které fungují na principu vhánění plynu do taveniny. Plyn proudí otvory na konci ponořeného grafitového rotoru, strhává s sebou vměstky a stoupá vzhůru na hladinu, viz obr. 2.13. Jako plynné médium se používá nejčastěji dusík. Ten se při teplotách, které má tavenina, chová inertně. Dále se také jako inertní plyn může použít argon. [4]

Kromě čistícího účinku se FDU používá primárně pro snížení obsahu rozpuštěného vodíku v kovu. Tento proces je založen na difuzi vodíku z taveniny do bublin jiných plynů. Účinnost procesu závisí na celkovém povrchu bublin a na dráze, kterou v tavenině urazí. Obecně platí, že by bubliny měly mít co nejmenší poloměr a měly by stoupat ode dna pánve. Důležitým parametrem, který lze při odplyňování taveniny nastavit, je průtočné množství plynu. [3, 10]

Vodík disponuje malým atomovým poloměrem a jeho rozpustnost ve slitině je funkcí teploty a závisí také na chemickém složení slitiny. Prvky, které rozpustnost vodíku snižují, jsou křemík, zinek, měď a mangan. Naopak prvky zvyšující rozpustnost jsou zejména hořčík, sodík, vápník, titan a lithium. Vodík se do taveniny dostává zejména z okolní atmosféry nebo z nevysušených vsázek či nářadí, přičemž vodní páry reagují s hliníkem podle rovnice $2 \text{ Al} + 3 \text{ H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{ H}_2$. Vrstva oxidů na hladině taveniny částečně brání kov před dalším naplyněním, proto se při jejím porušení, např. při promíchávání a přelévání kovu, obsah vodíku v tavenině zvyšuje. [3, 10]



Obr. 2.13 Schéma FDU [16]



Obr. 2.14 Rozpustnost vodíku v Al [3]

Při tuhnutí se rozpustnost vodíku skokově snižuje, viz obr. 2.14. V tabulce 2.8 je tento skok dobře zřetelný mezi rozpustností ve stavu solidu a ve stavu likvidu. Tato skutečnost má za následek tvorbu plynových dutin uvnitř ztuhlého odlitku. Velikost dutin závisí mimo jiné i na rychlosti ochlazování. Při pomalém ochlazování má vodík čas difundovat do bublin i z relativně velké vzdálenosti a vznikající dutina nabývá vysokého objemu. Jako nukleační zárodky těchto bublin mohou sloužit nesmáčivé vměstky obsažené v tavenině. Na vzniku bublin mají podíl i mikrostaženiny vznikající při tuhnutí. Porozita odlitku je pak kombinací

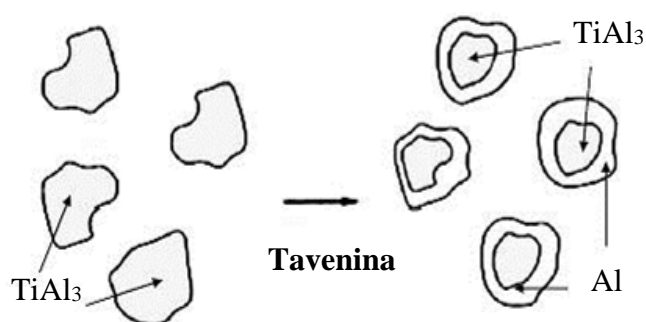
vlivu plynových bublin a mikrostaženin. Celková porozita má neblahý vliv na mechanické a únavové vlastnosti, zhoršuje těsnost a snižuje kvalitu obrobených ploch. Do jisté míry však kompenzuje úbytek objemu vlivem tuhnutí. [3, 4, 10]

Tab. 2.8 Rozpustnost vodíku v hliníku při tlaku vodíku 101 325 Pa [4]

Teplota [°C]	0	300	400	500	600	660 solidus	660 likvidus	700	800
Rozpustnost [cm ³ /100 g Al]	10 ⁻⁷	0,001	0,005	0,012	0,026	0,036	0,690	0,920	1,670

2.2.2 Očkování a modifikace

Očkování je významná metalurgická procedura probíhající po rafinaci a odplynění. Spočívá ve vnášení látek tvořící nukleačních zárodky do taveniny. Důsledkem je změna výsledné struktury – zjemnění zrna primární fáze. Jednotlivá zrna jsou tvořena několika dendrity, které vyrůstají z jednoho nukleačního zárodku. Jemnozrnná struktura se přirozeně vyskytuje u tenkostěnných odlitků litých do kovových forem, u kterých dochází k intenzivnímu ochlazování. Míra přechlazení pod rovnovážnou teplotu krystalizace taveniny je v těchto případech natolik vysoká, že se do krystalizace zapojí i méně příznivé nukleační zárodky. Pro ostatní tlustostěnné odlitky je použití očkovadla výhodné, ale účinek očkování bývá obecně nižší než účinek rychlého ochlazování. Jako očkovací látka se nejčastěji používá titan, případně kombinace titanu a bóru. Do taveniny se zanáší ve formě tablet, solí (K₂TiF₆, KBF₄) nebo předslitin (Al-Ti, Al-Ti-B). [3, 4, 6]



Obr. 2.15 Nukleace dendritů kolem částic TiAl₃ [3]

Titan tvoří s hliníkem intermetalickou fázi TiAl₃, která má stejnou kubickou plošně centrovanou krystalickou mřížku a velmi podobný parametr mřížky, čímž vytvoří účinný nukleační zárodek. Zárodečné částice TiAl₃ mohou mít velikost až 100 μm. Kolem tohoto zárodku se začne tvořit vrstva tuhého roztoku α(Al), jak je zakresleno na obr. 2.15, ze které

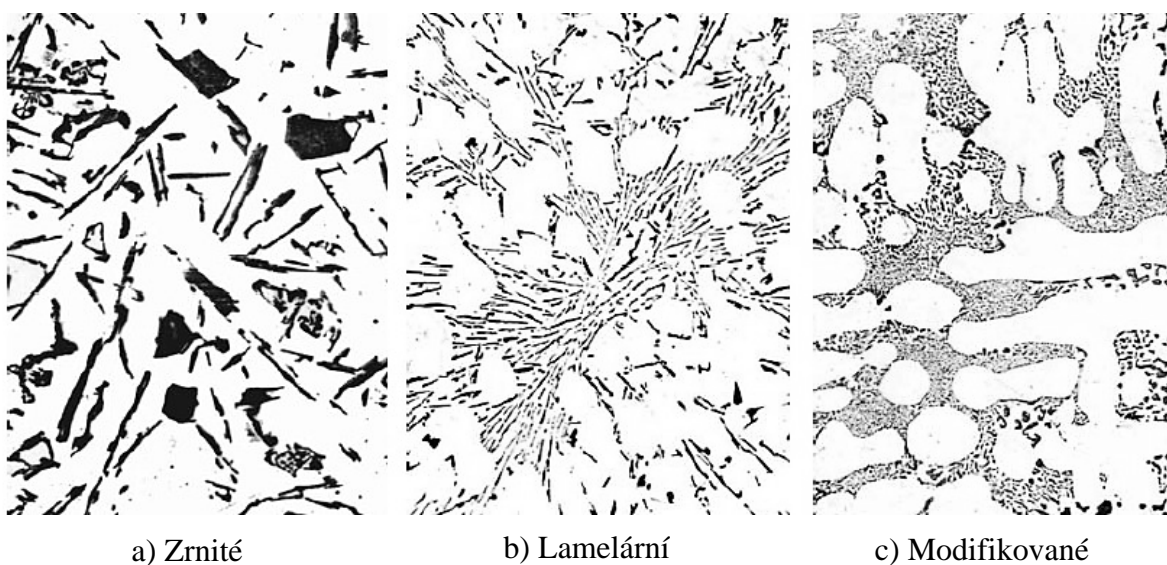
posléze pokračuje růst dendritů. Vnesením přibližně 0,02 až 0,1 % Ti do taveniny lze zajistit dostatečné zjemnění primární fáze. Očkovací efekt je ovšem časově omezený, jelikož se částice TiAl_3 v tavenině následně rozpouští. Účinek trvá obvykle kolem 30 až 45 minut, a proto je nutné očkovat taveninu jen těsně před odléváním. [3, 4, 6]

Zlepšený účinek vykazují očkovadla s obsahem Ti a B (předslitiny s obsahem do 5 % Ti a do 1 % B). Bór spolu s titanem a hliníkem tvoří intermetalické fáze AlB_2 , TiB_2 o velikosti přibližně 0,5 až 2 μm . Jsou tedy podstatně menší než částice TiAl_3 . Účinkují již při menším přechlazení pod teplotu likvidu a pomalém ochlazování, které se může vyskytovat u lití do písku nebo u velkých odlitků litých do kokil. Očkovací účinek bóru přetrvává velmi dlouhou dobu, někdy se vyskytuje i po přetavení. Obsah bóru v tavenině by neměl být vyšší než 0,004 %. [3, 4, 6]

Očkováná slitina je charakterizována zlepšenými mechanickými i technologickými vlastnostmi. Vnitřní struktura je homogennější a odlitek je méně náchylný k tvorbě trhlin. Vlivem očkování roste také pevnost a tažnost. Výsledná porozita je mírnější a staženiny jsou rovnoměrněji rozptýleny, což vede také ke zvýšení těsnosti odlitku. [6]

Modifikace je další z důležitých metalurgických procesů, jelikož mění morfologii vyloučených fází. Provádí se přidáním vhodné látky do taveniny před odléváním s cílem zvýšit u slitiny tažnost a houževnatost.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.1, v siluminech má křemík omezenou rozpustnost a při tuhnutí vzniká eutektická fáze, ve které se vylučuje křemík. Eutektikum je tvořeno eutektickými buňkami, což jsou krystalizační jednotky. Částice eutektického křemíku mohou mít různou velikost i tvar, podle kterého rozlišujeme tři typy eutektika, viz obr. 2.16. [3]



Obr. 2.16 Typy eutektika v Al slitinách [3]

Tvary charakteristické pro vyloučený nemodifikovaný křemík jsou hexagonální desky, které mohou být rozloženy v eutektiku bez orientace. Takový typ pak nazýváme zrnité eutektikum. Druhým typem nemodifikovaného eutektika je eutektikum lamelární, kde dochází k vějířovitému rozložení desek. Na metalografickém výbrusu se tyto dva typy eutektika jeví jako jehlice s ostrými konci. Z hlediska mechanických vlastností jsou nežádoucí, a proto je nutné provádět modifikaci, která uskuteční změnu struktury a křemík je vylučován ve formě tyčinek a vláken. V tomto případě uvidíme na povrchu výbrusu oblá zrna. Tato tvarová změna eutektika způsobí pozitivní efekt na výsledné vlastnosti. Zvýší se pevnost v tahu, tažnost a houževnatost. [4, 6]

K účelu modifikace se používají prvky, které zpožďují a omezují růst eutektického křemíku. Nejběžnějšími modifikátory jsou sodík a stroncium, které se do taveniny zanáší nejčastěji v podobě solí či tablet. Aktivní účinek mají již v malých koncentracích 0,001 až 0,1 %. Při překročení optimální koncentrace může dojít k nežádoucímu přemodifikování. Účinky modifikace sodíkem trvají přibližně 30 minut, u některých solí 60 minut. Sodík je velmi reaktivní, má vysokou slučivost s kyslíkem a v průběhu času se vypařuje z taveniny. Modifikace sodíkem musí probíhat těsně před odlitím, jelikož případné další rafinační operace by jeho účinek eliminovaly. Nevýhodou používání sodíku je zvýšený stupeň naplynění a zvýšení koeficientu objemové smrštivosti, což vede k riziku nárůstu rozptýlené porozity. [4, 6]

Stroncium vykazuje modifikační účinek po delší dobu, ta se běžně pohybuje okolo 1 až 2 hodin, avšak přidáním 0,05 až 0,2 % beryllia ji lze prodloužit na 10 hodin. Stroncium je dávkováno do taveniny nejčastěji v podobě předslutin (AlSi13Sr10 , AlSi16Sr10 , AlSr5 , AlSr10), které obsahují intermetalické fáze Al_4Sr , případně $\text{Al}_2\text{Sr}_2\text{Si}$. [3, 4, 6]

2.3 Slévárenské vady v odlitcích

I přes veškerou snahu zajistit co možná nejlepší vstupní podmínky pro zhotovení kvalitního odlitku se v praxi setkáme s celou řadou vad. Proto se provádí průběžná kontrola odlitků, jejímž cílem je tyto vady zachytit. Seznam vad a jejich názvosloví udává norma ČSN 42 1240. Jsou rozděleny do 7 skupin, viz tabulka 2.9.

Tab. 2.9 Skupiny slévárenských vad [11]

Číslo skupiny vad	Název skupiny vad	Číselné označení vady	Název druhu vady
1	Vady tvaru, rozměrů a váhy	11	Nezaběhnutí
		12	Přesazení
		13	Zatekliny
		14	Vyboulení
		15	Zborcení
		16	Mechanické poškození
		17	Nedodržení rozměrů
		18	Nedodržení váhy
2	Vady povrchu	21	Přípečeniny
		22	Zavaleniny
		23	Zálupy
		24	Nárosty, strupy
		25	Výronky
		26	Výpotky
		27	Opálení, okujení
		28	Omačkání, potlučení, pohmoždění
3	Porušení souvislosti	31	Trhliny
		32	Praskliny
4	Dutiny	41	Bubliny
		42	Bodliny
		43	Staženiny
		44	Řediny
		45	Mikrostaženiny
		46	Mikrobubliny
5	Vměstky	51	Struskovitost
		52	Zadobeniny
		53	Nekovové vměstky
		54	Broky
		55	Kovové vměstky

Tab. 2.9 Skupiny slévárenských vad – pokračování

Číslo skupiny vad	Název skupiny vad	Číselné označení vady	Název druhu vady
6	Vady struktury	61	Odmíšení
		62	Nevyhovující lom
		63	Zatvrdlina, zákalka
		64	Obrácená zákalka
		65	Nesprávná struktura
7	Vady chemického složení, nesprávné fyzikální nebo mechanické vlastnosti	71	Nesprávné chem. složení
		72	Nevyhovující mech. vlastnosti
		73	Nevyhovující fyz. vlastnosti

Vady mohou svým charakterem ohrozit funkčnost daného dílu a považujeme je za nepřijatelné. V jiných případech se mohou vyskytnout vady přijatelné, které jsou normami a technickými podmínkami tolerovány. [11]

Podle možnosti odstranění vad se dále dělí na odstranitelné a neodstranitelné. Neodstranitelné vady nelze odstranit opravením, anebo je jejich případná oprava dle daných norem nepřijatelná. Za odstranitelnou vadu považujeme takovou vadu, která může být po dohodě se zákazníkem odstraněna eventuálním dodatečným výrobním postupem. [11]

Dle možnosti odhalení vady rozlišujeme vady zjevné a vady skryté. Zjevná vada může být odhalena u odlitku, který ještě neprošel obráběním, a to běžnou vizuální kontrolou nebo prohlídkou pomocí jednoduchých měřidel. Skrytou vadu lze objevit vizuálně po obrobení, případně přístroji, např. rentgenem nebo ultrazvukem. [11]

S ohledem na téma diplomové práce jsou v následujících podkapitolách zmíněny pouze vybrané třídy a nejčastější slévárenské vady vznikající u slitin hliníku litých nízkotlakým způsobem. Značné procento těchto slévárenských vad je možné pozorovat přímo na makrostrukturaře, případně na mikrostrukturaře.

2.3.1 Vady povrchu (třída 200)

U odlitků litých do kovových forem nacházíme jakost povrchu zpravidla daleko lepší než u pískového odlévání a povrchové vady tvoří pouze zlomek zmetkovitosti odlitků. Důležitou roli hraje také fakt, že bývají většinou opravitelné nebo vznikají v místech, kde se počítá s přídavkem na obrábění. [11]

Zatekliny jsou charakteristické pro slitiny s dobrou zabíhavostí, jelikož jsou způsobeny zatečením materiálu do mezer v dělicích rovinách, případně do trhlinek v opotřebované formě. Na odlitku se jeví jako hladké výčnělky různého tvaru a velikosti. Těmto vadám lze předcházet zajištěním dostatečné těsnosti formy, případně opravením části formy s prasklinami. Na odlitku lze tyto vady odstranit obráběním nebo broušením. [11, 17]

2.3.2 Porušení souvislosti (třída 300)

Najdeme zde vady převážně nepřijatelné a neopravitelné. Patří sem **trhliny za tepla**, které probíhají po hranicích zrn za teplot mírně pod teplotou solidu, a **praskliny za studena**, které vznikají při nižších teplotách. Prasklina za studena je charakteristická svým transkrystalickým průběhem. U hliníkových odlitků však tyto vady nejsou příliš časté. [11]

Studené spoje (zavaleniny) se na odlitku jeví jako rýhy, prohlubně nebo zvrásnění. Vyšší riziko vzniku těchto vad mají kovy se značnou oxidací, kde se při lití vytvářejí na čele proudící taveniny blány s vysokou teplotou tání – typické pro slitiny Al. Vyskytují se zejména u tvarově složitých odlitků či u odlitků s rozsáhlými horizontálními plochami způsobujícími intenzivní ochlazování povrchu kovu. Dalším faktorem, který přispívá k jejich tvorbě, je neklidné nebo přerušované plnění formy. Pro snížení rizika výskytu těchto vad je vhodné zvolit dostatečně vysokou teplotu lití případně co nejkratší dobu lití. [11, 17]

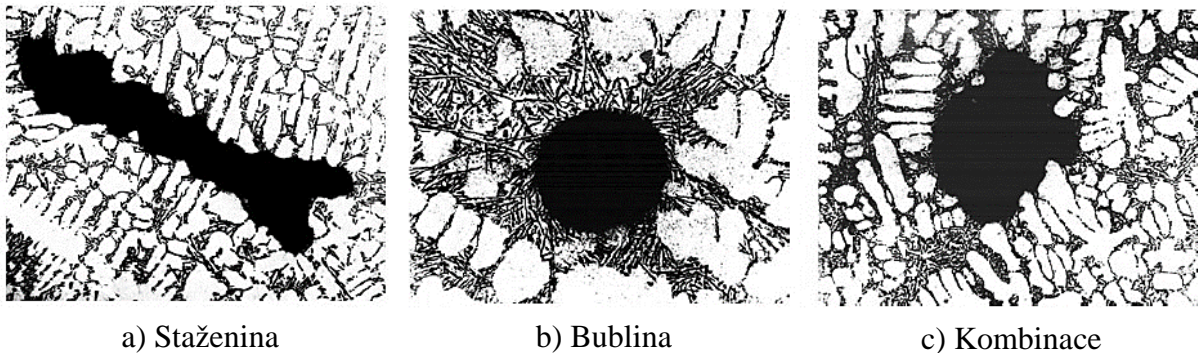
2.3.3 Dutiny (třída 400)

Tato třída patří mezi nejrozšířenější slévárenské vady. V souvislosti s dutinami hovoříme zejména o **porozitě – naplynění**. Nežádoucí může být tehdy, pokud nedošlo k dostatečnému odplynění taveniny a v odlitku se po ztuhnutí nachází nepříznivě velké póry a bubliny. Jak je popsáno v kapitole 2.2.1, hlavní příčinou těchto vad u slitin hliníku je vodík. Bubliny mohou být otevřené – povrchové, nebo uzavřené – vnitřní, které mohou být odhaleny až po obrábění, případně ultrazvukem nebo RTG. V odlitku se mohou vyskytovat buď jednotlivě nebo ve shlucích. Tvar plynových bublin bývá převážně kulovitý, viz obr. 2.17 b), a velikost se pohybuje od několika desetin milimetrů až po jednotky, výjimečně desítky milimetrů, v závislosti na rychlosti ochlazování. [3, 11, 17]

Dutiny v odlitku může způsobovat také zahlcený plyn. V tom případě mívají podobu hladkého zploštělého puchýře se zaoblenými stěnami a většinou bývají otevřené. Příčinou je nejčastěji špatně navržené nebo zanesené odvzdušnění. [11]

Pod třídu dutin spadají i **staženiny**. Jsou to další z relativně často se vyskytujících vad v odlitcích obsahujících nežádoucí tepelné uzly, tedy převážně v místech, kde není uplatněna

zásada usměrněného tuhnutí. Vznikají následkem objemového smršťování během tuhnutí odlitku. Ve větší míře vznikají tehdy, pokud je lící teplota kovu příliš vysoká. Charakteristické jsou pro ně ostrohranné a nepravidelné tvary kopírující dendritickou strukturu, které výrazně snižují mechanické a zejména plastické vlastnosti materiálu. Jejich tvar je dobře patrný na obr. 2.17 a). Dle velikosti je můžeme rozdělit na makrostaženiny a mikrostaženiny. Mikrostaženiny vznikají u slitin se širokým intervalem tuhnutí, kdy mezi jednotlivými rostoucími dendrity se vytváří uzavřené oblasti taveniny. Často se tvoří spolu s plynovými bublinami, viz obr. 2.17 c). [3, 11, 17]



Obr. 2.17 Typy dutin dle mechanismu vzniku [12]

Řediny popisujeme jako shluky menších staženin vznikajících při konečné fázi tuhnutí. Mohou vznikat v tepelných uzlech, případně v tepelné ose v tlustších stěnách. Snižují těsnost odlitku, jelikož mohou být kapilárně spojeny s povrchem. [11, 17]

2.3.4 Makroskopické vměstky (třída 500)

Charakter vměstků byl popsán v kapitole 2.2.1. Do této třídy vad spadají především **nekovové vměstky**, zejména pak **oxidické pleny (blány)**. Kromě Al_2O_3 mohou vznikat ve slitinách s hořčíkem také spinely a struktury jim podobné. Blány vznikají zejména při neklidném plnění, pokud rychlost taveniny přesáhne kritickou mez, kdy se tenké oxidické vrstvy na čele zahrnou tuhnoucí taveninou. Pokud se dva takovéto filmy složí na sebe, může vzniknout oslabené a nesoudržné místo. Pod makroskopické inkluze patří také částice žáruvzdorných materiálů. [11]

Další významnou skupinou jsou **kovové vměstky**. Jedná se o cizorodé částice různých velikostí. Spadají sem i neroztavené přísady a jiné nečistoty vnesené během procesu odlévání do formy. [11]

2.3.5 Vady mikrostruktury (třída 600)

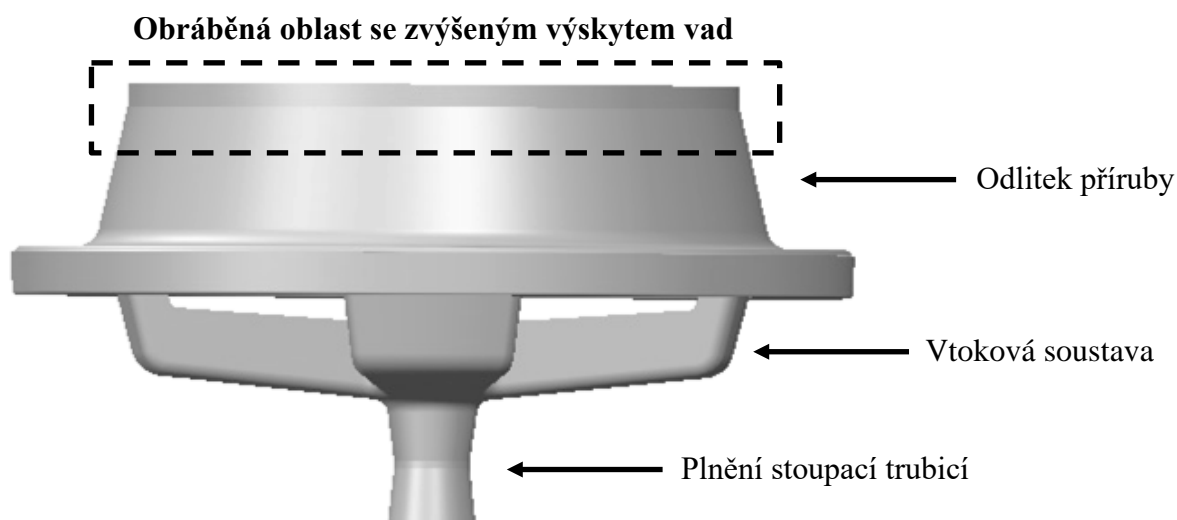
Do této třídy patří veškeré vady, které jsou prostým okem neviditelné. Lze je odhalit zpravidla až na metalografickém výbrusu pod mikroskopem. Jedná se zejména o **mikrostaženiny**, **mikrobubliny** a **mikrotrhliny**. Zařazujeme zde i mikroskopické vměstky kopírující hranice zrn. Běžně se v odlitcích může vyskytovat kombinace makroskopických dutin s mikrobublinami spolu se staženinami. Případně mikrostaženiny s mikrotrhlinami, které lze ovšem mezi sebou obtížně odlišit. Nebezpečí mikroskopických poruch hrozí zejména u dynamicky zatěžovaných dílů, kde mohou způsobit únavový lom. [4, 11]

Za další vadu mikrostruktury můžeme považovat nesprávný obsah strukturních složek, kde množství, velikost či tvar neodpovídá normě nebo požadavkům zákazníka. Spadá sem i nesprávná velikost zrna. [11, 17]

3 Experimentální část

Podklady pro experimentální část byly získány ve spolupráci s firmou Unitherm s.r.o. se sídlem v Jablonci nad Nisou. Slévárna se orientuje na lití hliníkových slitin do pískových i kovových forem metodami gravitačního, sklopného a nízkotlakého lití.

Experiment je zaměřen na analýzu vad vyskytujících se v odlitku příruby ze slitiny EN AC-42100 (AlSi7Mg0,3) lité do jednonásobné kovové formy nízkotlakým způsobem. Po obrobení rotačních ploch vrchní části odlitku se objevují zřetelné vady. Vysoká zmetkovitost se vyskytuje téměř výhradně u odlitků z prvního cyklu lití. Samotný odlitek má hmotnost přibližně 20 kg. Dalších 5 kg hmoty přidává ztuhlá vtoková soustava, která obsahuje 4 symetricky rozmístěné kanály ústící do spodní části odlitku. Model odlitku spolu s vtokovou soustavou je zobrazen na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Model odlitku s vtokovou soustavou

Proces přípravy taveniny spočívá v natavení housek a vratu v elektrické odporové peci. Teplota taveniny se udržuje na teplotě okolo 715 °C. Dále proběhne rafinace solí Aarsal a odplynění taveniny dusíkem. Tavenina je přelita do kelímku a je provedeno očkování předslitinou AlTi5B1 a modifikace předslitinou AlSr10. Posledním krokem je přelití obsahu kelímku do udržovací pece pod nízkotlakým strojem, zde je tavenina udržována na teplotě kolem 700 °C. Udržovací pec je plněna pro každou licí dávku přibližně 200 kg taveniny. Jedna licí dávka vystačí na 8 cyklů, poté je nutné do udržovací pece znovu přelit dávku z připraveného kelímku.

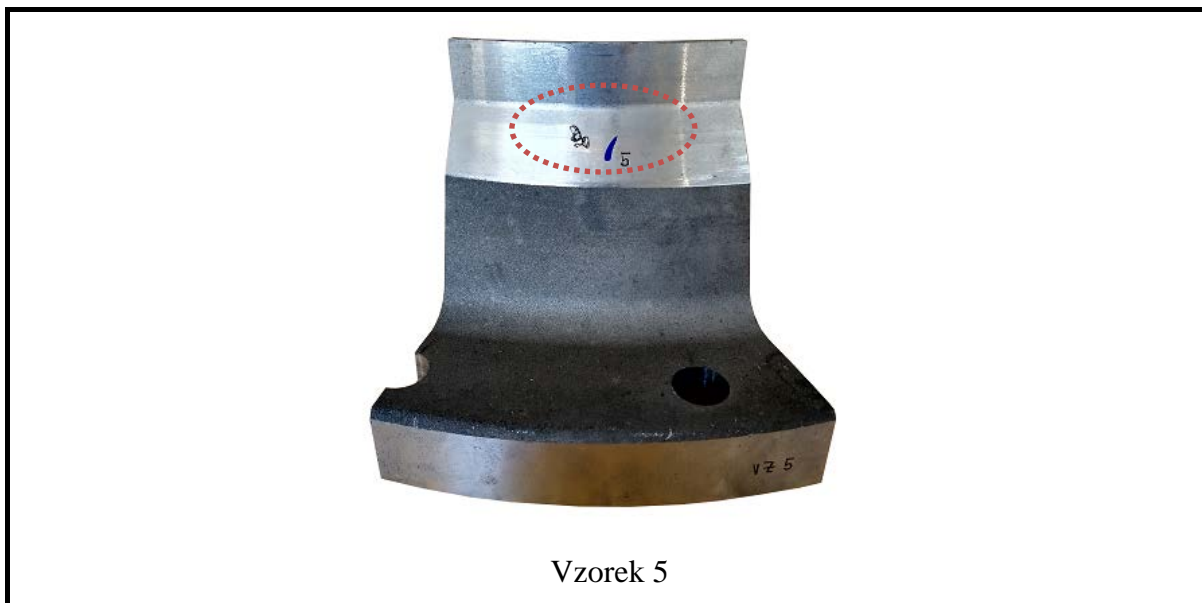
3.1 Identifikace vad na vzorcích z příruby

Experiment zahrnuje zkoumání vad metodami optické a elektronové mikroskopie, dále optickou emisní spektrometrií a mikroanalýzou elektronově disperzním spektrometrem. Pro tyto účely bylo zhotoveno několik vzorků – výřezů z již obrobených zmetkových odlitků. Jednotlivé vzorky byly označeny a jejich fotodokumentace je uvedena v následující tabulce 3.1, kde jsou červeně vyznačeny oblasti s vyskytujícími se vadami.

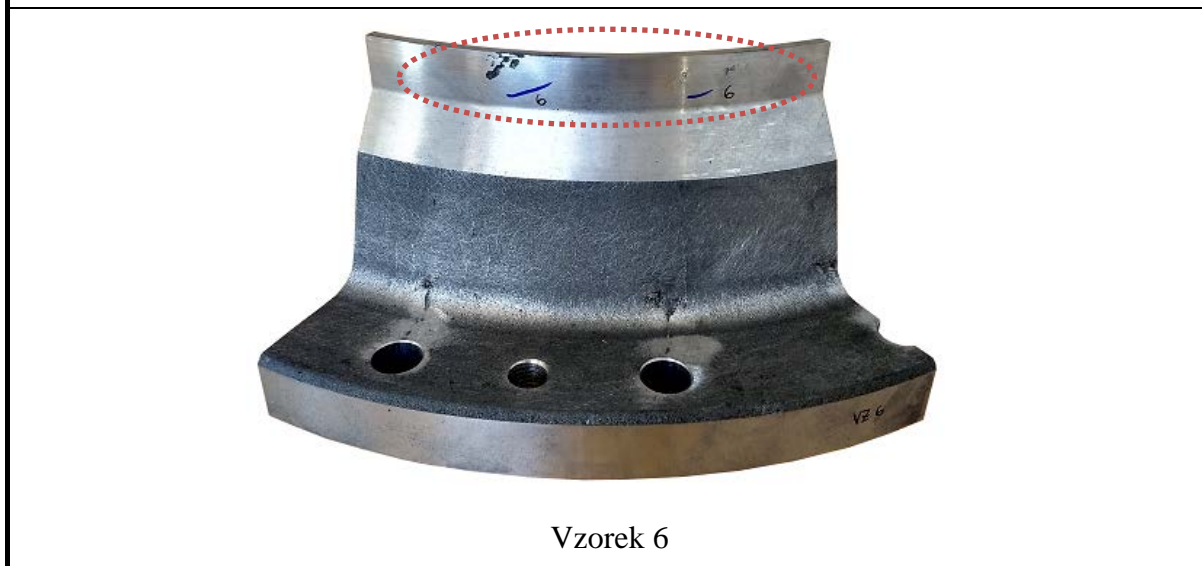
Tab. 3.1 Fotodokumentace vzorků



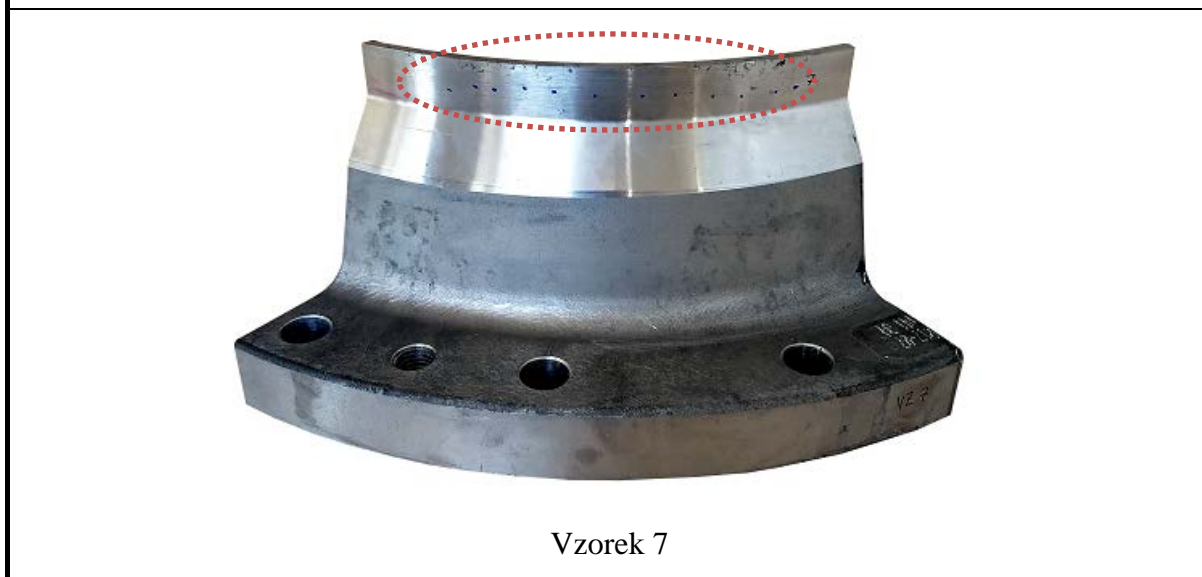
Tab. 3.1 Fotodokumentace vzorků – pokračování



Vzorek 5










Vzorek 6



Vzorek 7

Pro snadnější manipulaci byly tyto vzorky dále nařezány na menší části v laboratořích katedry strojírenské technologie na pásové pile a později na stolní metalografické rozbrušovací pile *Delta Abrasimet*. Odříznuta byla vždy vrchní část vzorku obsahující vady, viz vyznačené oblasti na fotografiích v tab. 3.1. V následující tabulce 3.2 jsou vyfoceny oddělené vzorky a popis příslušných vad, které byly zhodnoceny prostým okem.

Tab. 3.2 Fotodokumentace nařezaných vzorků

Fotografie výřezů vzorků	Vizuální posouzení, přibližné rozměry
	Shluky malých dutiny (do 1 mm), blány
	Jemné blány, okem špatně viditelné (tento vzorek byl vyřazen , řez vedl vadou a byla tak kompletně ztracena)
	Dutiny v kombinaci s vměstky (oblast o velikosti cca 1 cm ²)
	Velké dutiny (rozměry dutin až jednotky mm)
	Shluky dutin, vměstky (oblast přibližně 1 cm ²)
	Velké dutiny a blány (rozměry řádově jednotky mm, místy až 1 cm)
	Rozsáhlé shluky malých dutin (velikosti kolem 1 mm)

3.1.1 Spektrální analýza chemického složení

Ze zbylých částí jednotlivých vzorků bylo vybráno několik vhodných kusů pro měření chemického složení zdravých oblastí. Vybrané vzorky musely disponovat dostatečnou plochou pro měření a tyto plochy byly následně nabroušeny na kotoučovém brusném papíře *STARCKE-ERSTA P60*. Měření probíhalo na optickém emisním spektrometru *Bruker Q4 TASMAN*. Před samotným měřením proběhla kalibrace přístroje pro hliníkové slitiny prostřednictvím měření několika etalonů s garantovaným chemickým složením. Následně proběhlo 10 měření při použití kalibračního programu *Al 120*, který vyhodnocuje složení siluminů. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 3.3 a protokol z měření je v příloze č. 1.

Tab. 3.3 Výsledky spektrální analýzy

Měření chemického složení vzorků ze slitiny EN AC-42100 [%]			
Prvek	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Dle normy ČSN EN 1706
Si	7,003	0,207	6,5 – 7,5
Fe	0,113	0,016	max. 0,19
Cu	0,0050	0,0019	max. 0,05
Mn	0,0052	0,0012	max. 0,10
Mg	0,329	0,016	0,25 – 0,45
Cr	0,0024	0,0007	-
Ni	0,0044	0,0021	-
Zn	<0,0020	-	max. 0,07
Ti	0,133	0,014	max. 0,25
Be	<0,0003	-	-
Bi	<0,0020	-	-
Ca	0,0005	0,0001	max. 0,03
Co	<0,0010	-	-
Ga	0,0037	0,0019	-
Na	<0,0005	-	-
P	<0,0010	-	-
Pb	<0,0030	-	-
Sn	0,0083	0,0095	-
Sr	0,023	0,004	-
V	0,010	0,001	-
Zr	<0,0020	-	max. 0,03
Sb	<0,0070	-	-

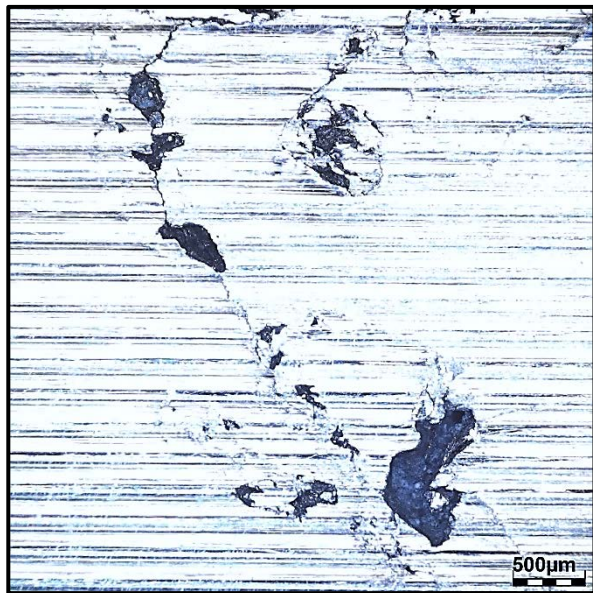
Hodnoty zapsané se znaménkem „<“ znamenají, že daného prvku se zde naměřilo méně než minimální měřitelné množství. U některých prvků jsou přípustné obsahy vymezeny normou ČSN EN 1706 (slitina EN AC-42100). U těchto prvků nebyly v žádném z deseti měření zaznamenány koncentrace překračující limity.

Z měření chemického složení vyplývá, že materiál jako celek nevykazuje nesprávné chemické složení. Relativně vyšší obsahy titanu (Ti ~ 0,13 %) a stroncia (Sr ~ 0,023 %) souvisí se záměrným zaváděním těchto prvků do slitiny pro očkovací a modifikační účely.

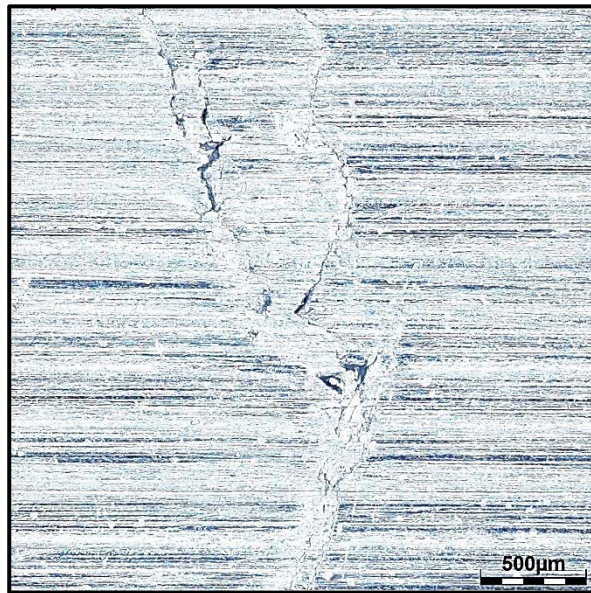
3.1.2 Digitální optický mikroskop

Nařezané vzorky z tab. 3.2 byly dále přeneseny na pracoviště vybavené digitálním optickým mikroskopem *Olympus DSX510* v metalografické laboratoři katedry strojírenské technologie. Mikroskop mimo jiné umožňuje snímkování několika zaostřených vrstev za sebou, které složí do jednoho obrázku, případně převede do trojrozměrného zobrazení povrchu.

Na obrázcích 3.2 a 3.3 jsou zachyceny blány procházející přes vzorky v rozsahu přibližně 1 až 4 cm, kolem nichž se vyskytují nepravidelné dutiny. Tento charakter vady byl zaznamenán zejména u vzorků 4, 6 a 7.

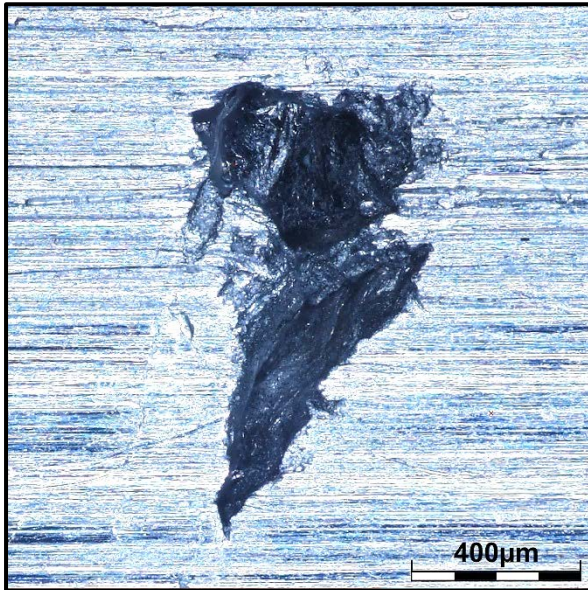


Obr. 3.2 Vady vzorku 4

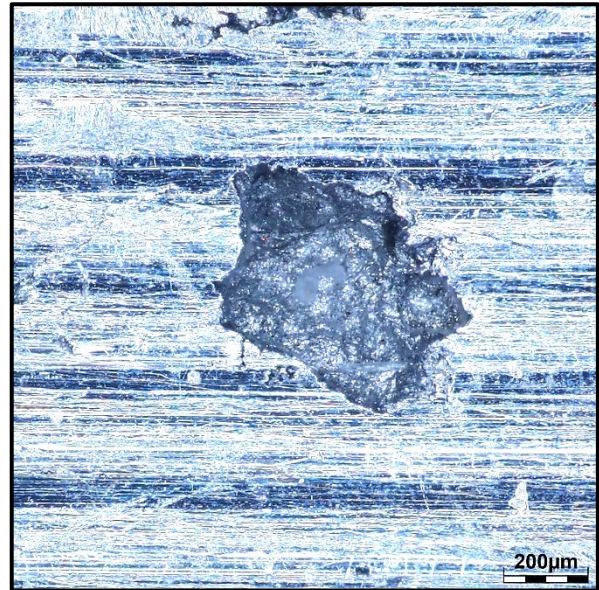


Obr. 3.3 Vady vzorku 6

Dutiny, které se vyskytují u všech zkoumaných vzorků, byly nepravidelného tvaru a místy ostře zakončené. Nejčastěji se vyskytovaly ve shlucích a některé byly mezi sebou propojené. Rozsáhlé dutiny u vzorku 6 dosahovaly velikosti přibližně 1 cm. Na obrázku 3.4 je zachycena dutina s ostrým tvarem, na vedlejším obrázku 3.5 dutina s tvarem oblejším.

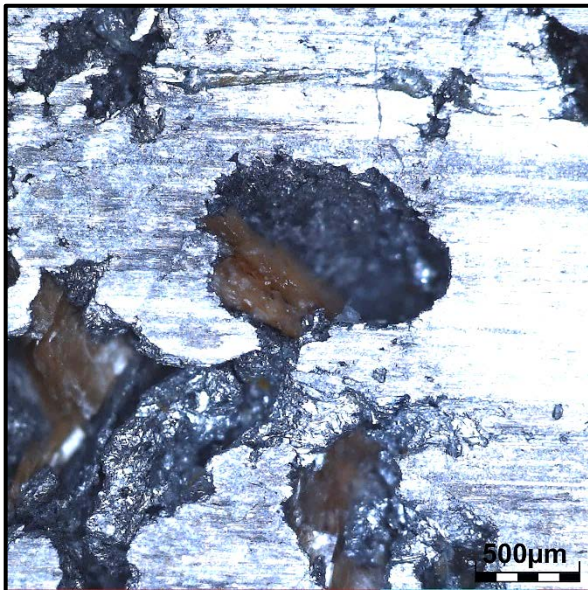


Obr. 3.4 Vady vzorku 1

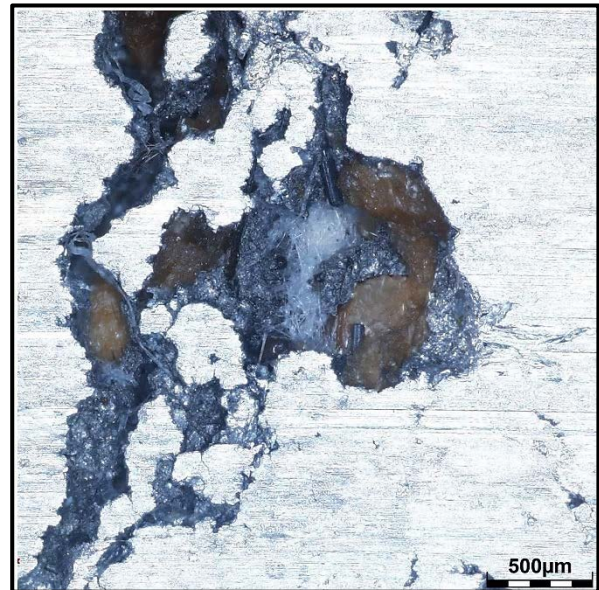


Obr. 3.5 Vady vzorku 7

U vzorku 3 byly uvnitř dutin nalezeny vměstky zahlcené v kovovém materiálu. Jsou tvarově hrubé, podobné zrnům písku, s oranžovo-hnědým zabarvením. Tyto nečistoty jsou dobře patrné na obrázcích 3.6 a 3.7.

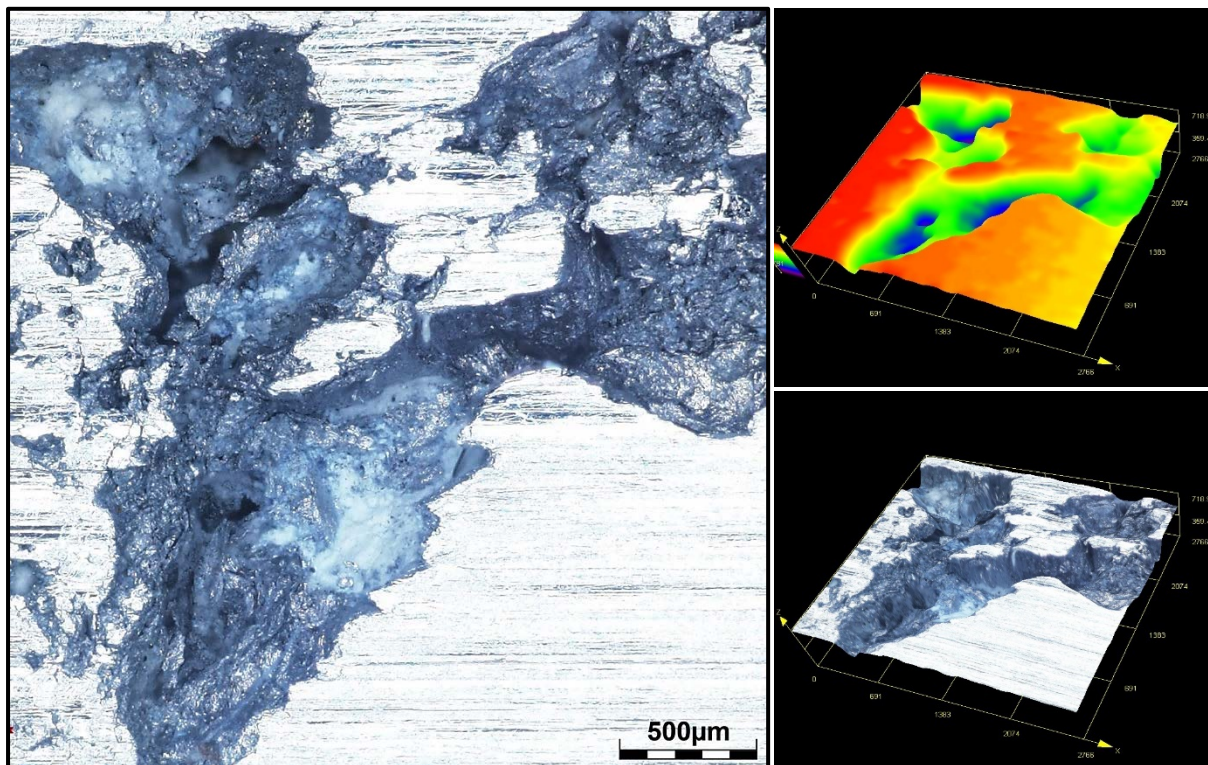


Obr. 3.6 Vady vzorku 3

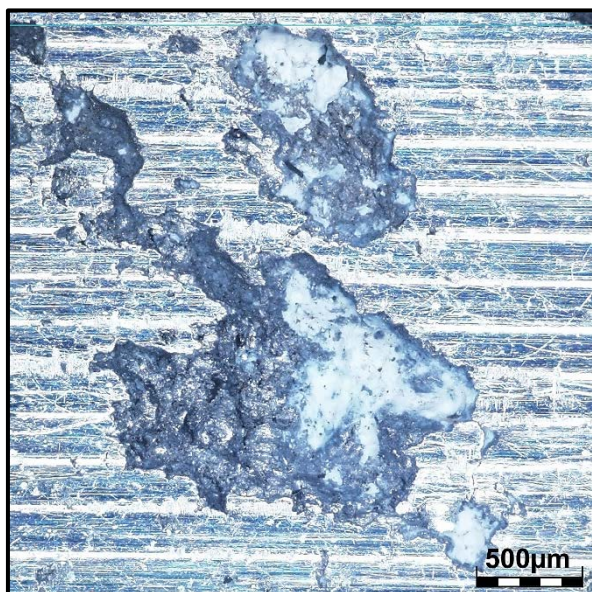


Obr. 3.7 Vady vzorku 3

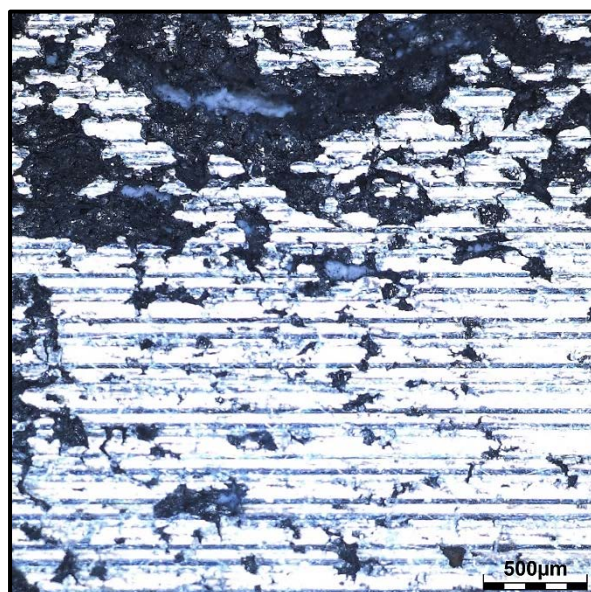
Na vzorku 6 byly mimo jiné uvnitř některých dutin zaznamenány oblasti se světlými vměstky, jevící se jako „povlaky“ s oblejšími tvary, jak je možné pozorovat na obr. 3.8. Podobné útvary byly nalezeny také na vzorcích 3 a 4, viz obrázky 3.9 a 3.10.



Obr. 3.8 Vady vzorku 6 s trojrozměrným zobrazením povrchu

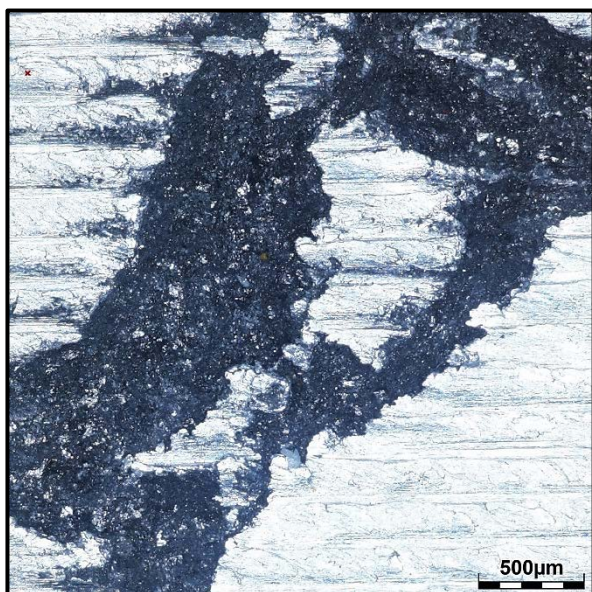


Obr. 3.9 Vady vzorku 3

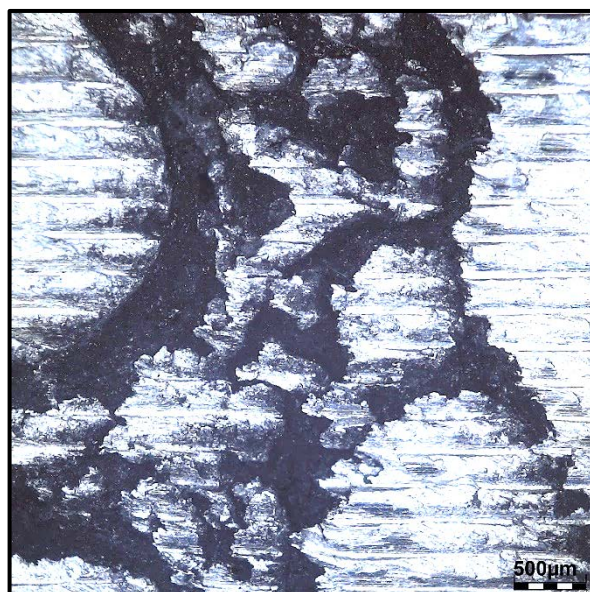


Obr. 3.10 Vady vzorku 4

Dalším typem vady, která se vyskytla u vzorku 5, je rozsáhlá, černě zabarvená oblast bez přítomnosti dutin. Viz obr. 3.11 a 3.12, ze kterých je patrný i směr obrábění, který „vnáší“ nečistoty z oblasti vady do zbytku obráběného materiálu (na obrázku směrem doleva).



Obr. 3.11 Vady vzorku 5



Obr. 3.12 Vady vzorku 5

3.1.3 Rastrovací elektronový mikroskop

Vady byly podrobeny dalšímu zkoumání na katedře materiálu v laboratoři analytických metod, která je vybavena rastrovacím elektronovým mikroskopem *Carl Zeiss ULTRA Plus*. Mikroskop disponuje mikroanalytickým systémem *OXFORD Instruments*, který umožňuje sledovat chemické složení včetně distribuce jednotlivých prvků ve vybrané oblasti.

U čtyřech vzorků (3, 4, 6 a 7) byl na mikroskopu nejprve sledován povrch bez jakéhokoliv předchozího broušení nebo úprav. Později byly veškeré vzorky zpracovány v metalografické laboratoři na přístrojích firmy *Struers* do podoby výbrusů.

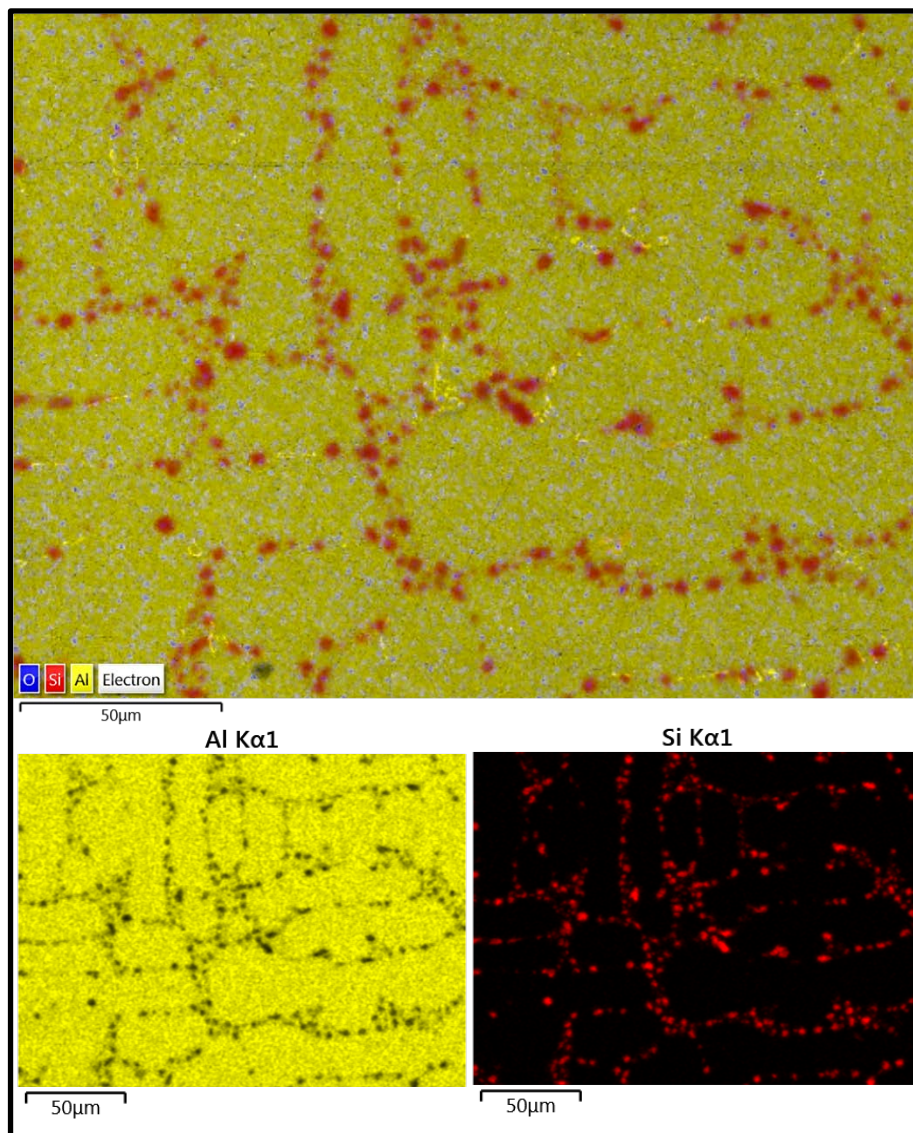
Na stolní rozbrušovací pile *Secotom-50* byly zhotoveny odřezky vad, které byly následně zalisovány na automatickém metalografickém lisu *CitoPress-1* do grafitového fenolického reaktoplastu. Posledním přípravným krokem bylo broušení a leštění na přístroji *Tegramin-25* v předdefinovaném režimu pro standardní výbrusy slitin hliníku. Jednotlivé kroky režimu jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Postup zhotovení výbrusu

Krok	Označení kotouče	Médium / suspenze	Doba [min]
1.	Piano 220	voda	3
2.	Piano 1200	voda	3
3.	Largo	DiaDuo 9 μm	5
4.	Dac	DiaDuo 3 μm	4
5.	Mol	DiaDuo 1 μm	3,5

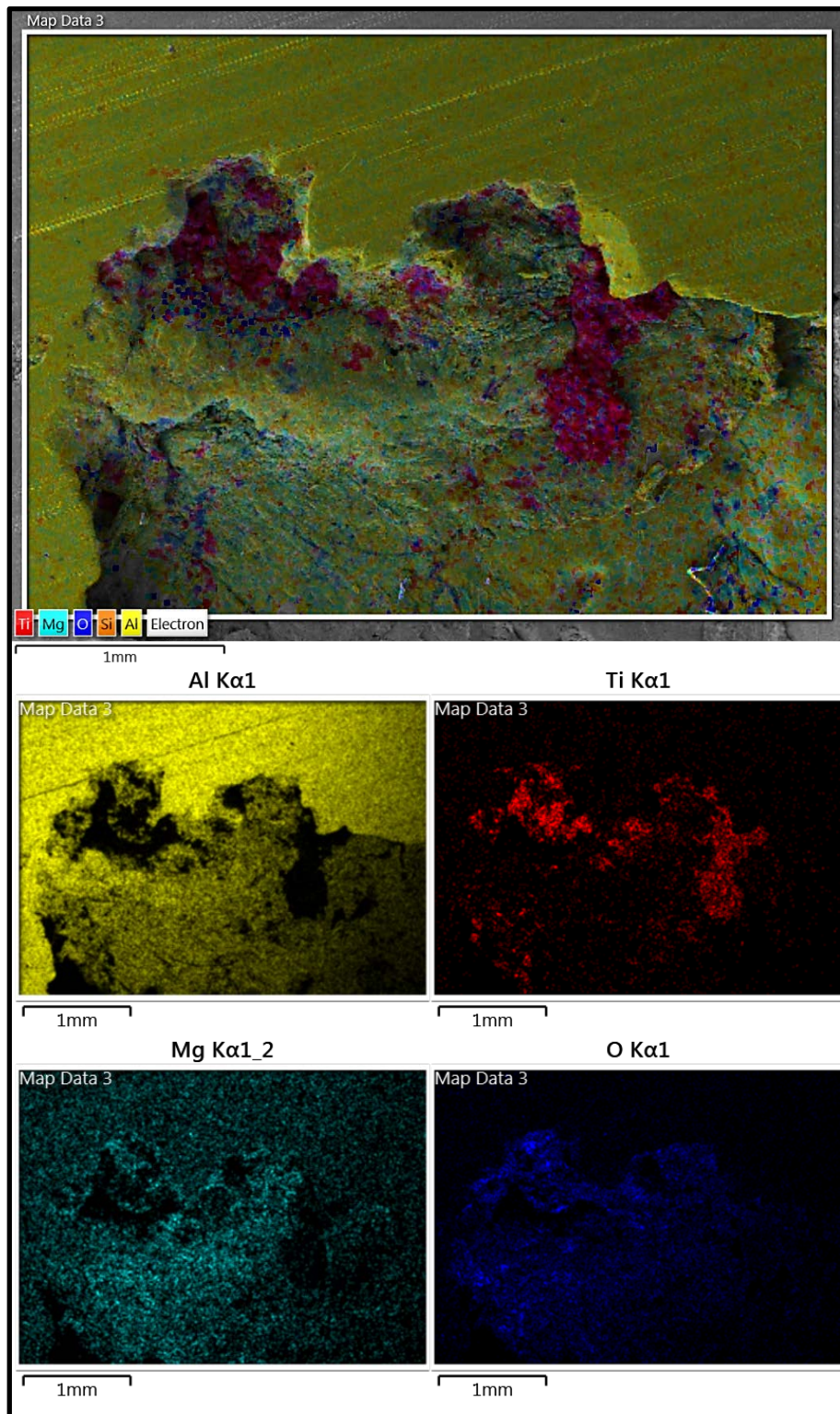
Při pořizování snímků byl využit software pro mikroanalýzu chemického složení, prostřednictvím něhož lze získat barevné mapy zobrazující distribuci jednotlivých prvků. Sledováno bylo celkově cca 30 defektních míst napříč všemi vzorky. Ve většině vad se objevily abnormality v podobě zvýšené koncentrace hořčíku, titanu a kyslíku. V některých vadách byly zaznamenány malé oblasti se zvýšeným výskytem dalších prvků – stroncium, sodík, železo, vápník. V následujících odstavcích jsou uvedeny nejdůležitější nálezy doplněné obrazovým materiálem.

Úvodem je vhodné ilustrovat stav slitiny, který nevykazuje žádnou vadu. Na obr. 3.13 je výbrus zdravé části vzorku 4, kde jsou dominujícími prvky hliník (žlutě) a křemík (červeně). Z obrázku je patrná homogenita materiálu bez vměstků a dutin.



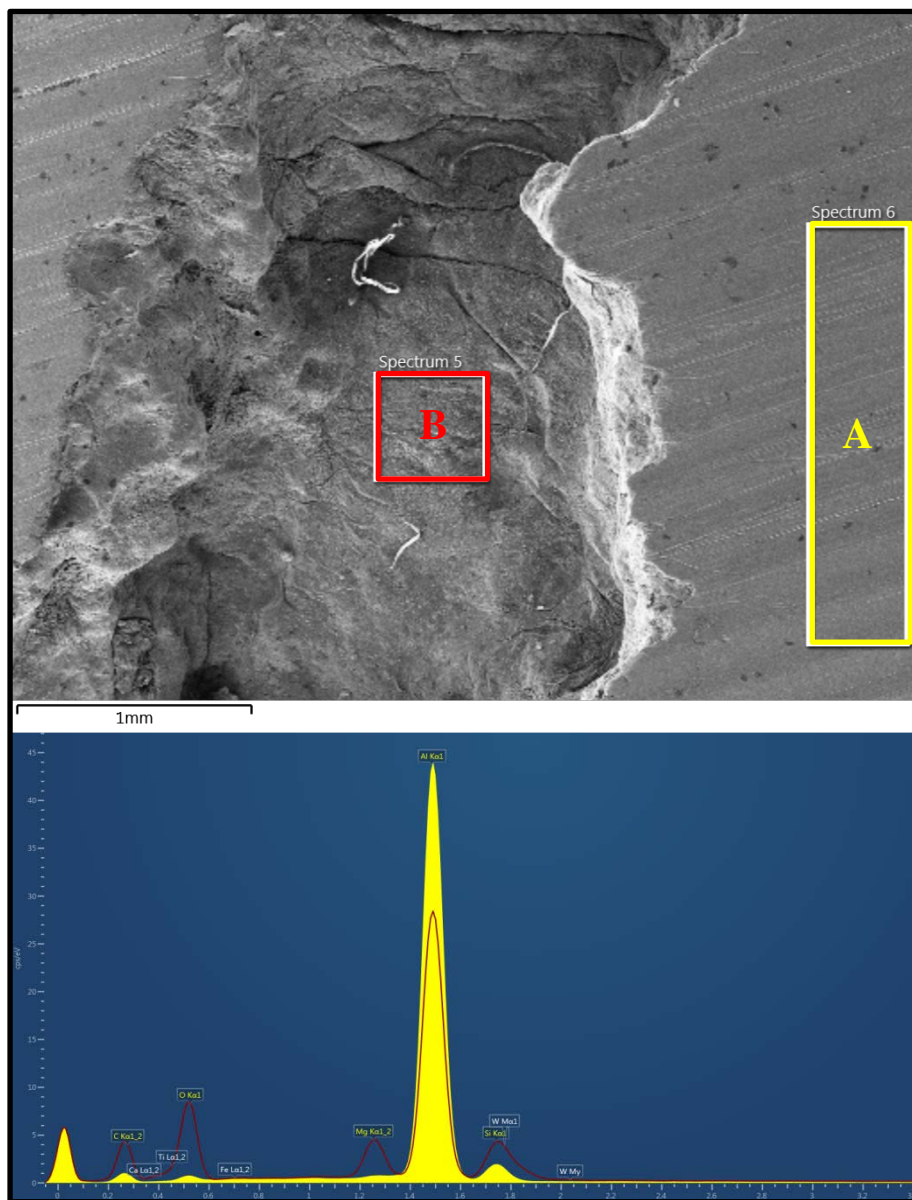
Obr. 3.13 Distribuce prvků – zdravá oblast vzorku 4 (výbrus)

Světlé „povlaky“ na snímcích z optického mikroskopu (viz obr. 3.8 a 3.9) z předchozí kapitoly obsahují zvýšené množství titanu. Tyto oblasti jsou dobře patrné na obr. 3.14, kde jsou zobrazeny červeně. Na povrchu dutiny je možné pozorovat zvýšenou koncentraci hořčíku a oxidů (na snímku jsou zobrazeny tyrkysově, respektive modře).



Obr. 3.14 Distribuce prvků – vada vzorku 4 (nebroušeno)

Program umožňuje porovnat chemické složení z různých oblastí na jednom vzorku. Na snímku v obr. 3.15 je zobrazena část zdravého materiálu (A) a část dutiny (B) vzorku 6. Pod snímek jsou zachycena příslušná emisní spektra, která odpovídají barevně vyznačeným oblastem. Přibližné obsahy jednotlivých prvků v oblastech jsou uvedeny v tabulce 3.5. Je patrné, že ve vadě se koncentrují oxidy, hořčík, titan, a dále nečistoty jako vápník a železo.

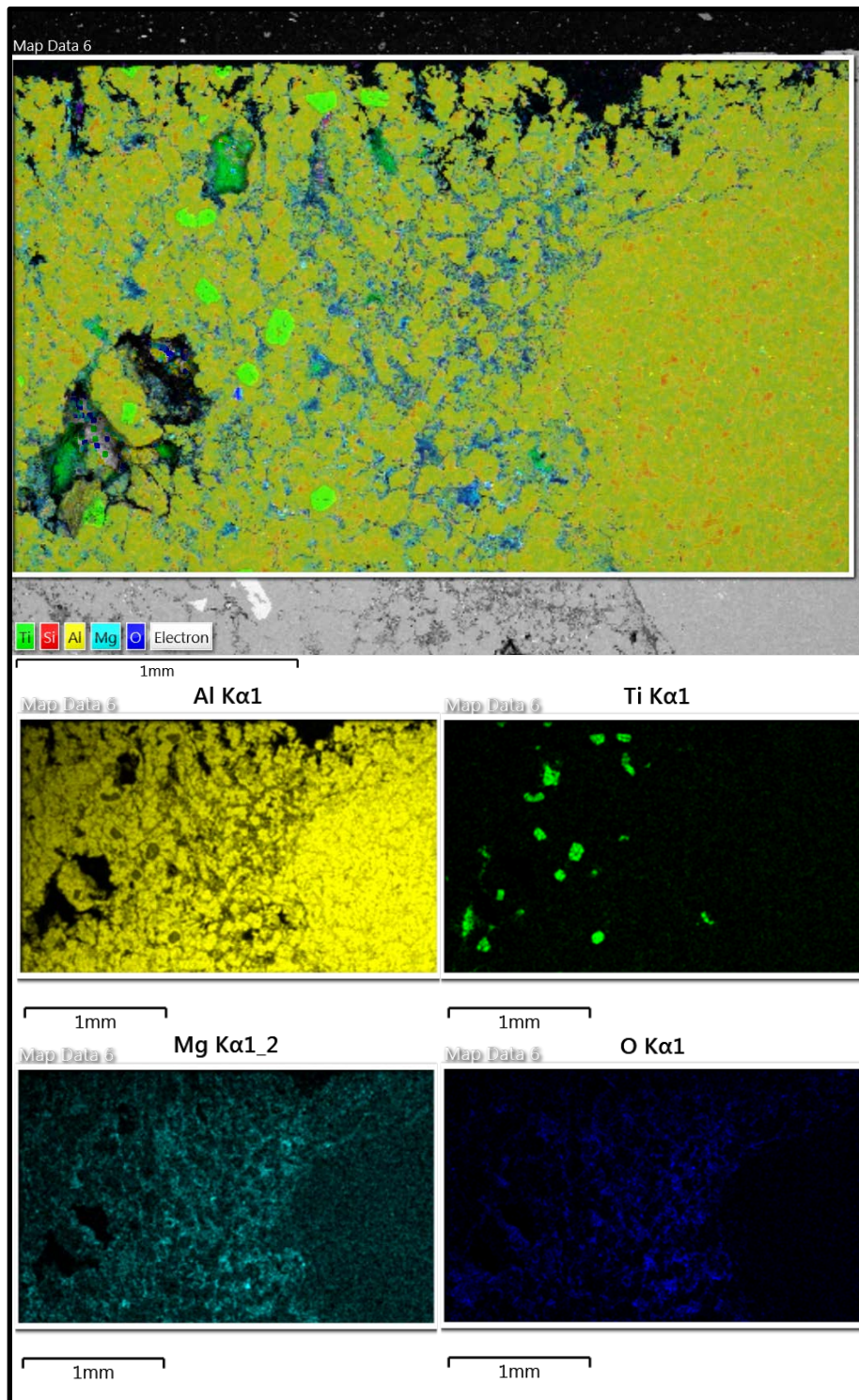


Obr. 3.15 Porovnání emisních spekter – vada vzorku 6 (nebroušeno)

Tab. 3.5 Chemické složení na povrchu vzorku 6

Prvek [%]	Al	Si	O	Mg	Ti	Ca	Fe
Oblast A	90,8	6,1	2,8	0,3	-	-	-
Oblast B	45,5	6,6	33,9	6,1	6,4	0,4	0,2

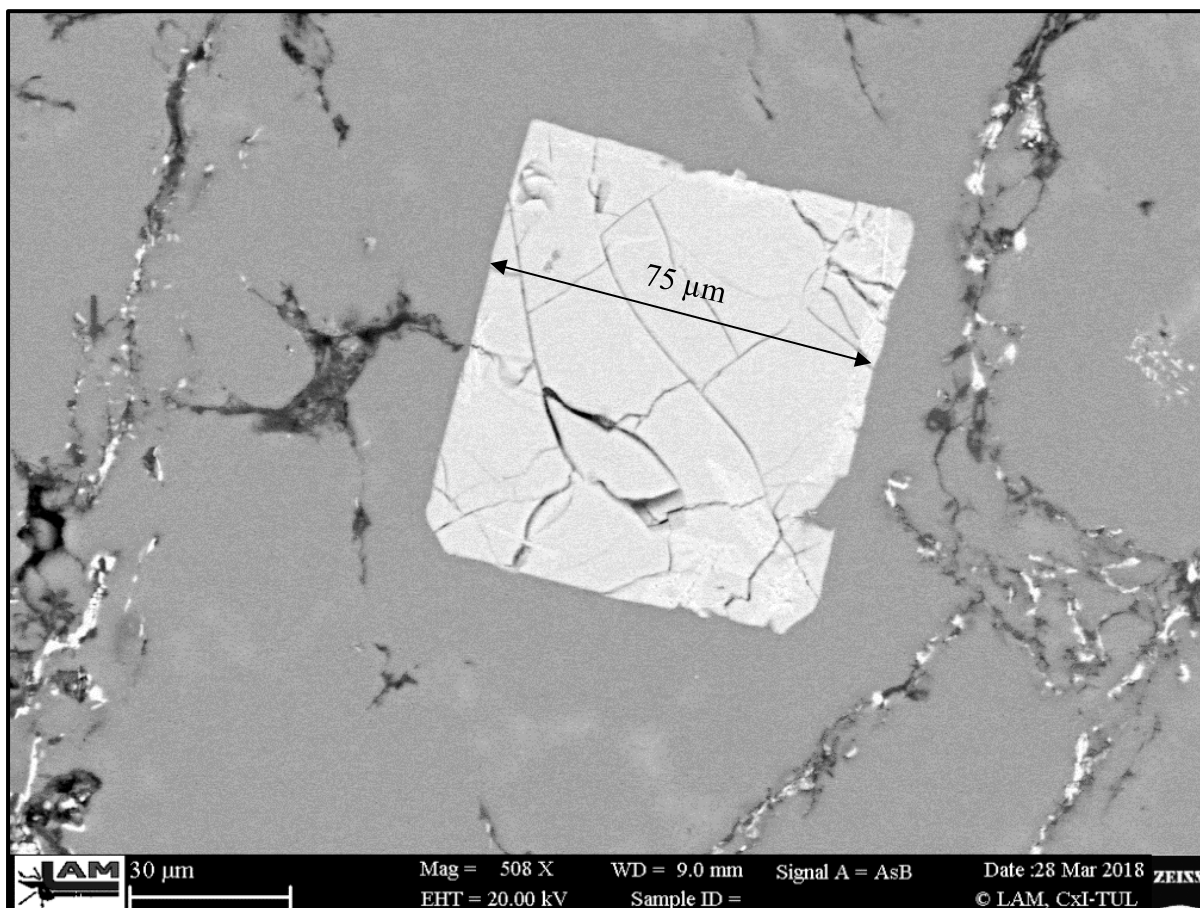
Analýza výbrusů poukázala nejen na zvýšený obsah hořčíku a titanu přímo v místech dutinových vad, ale i v jejich blízkém okolí. Tuto skutečnost dokládá obrázek 3.16, kde je dobře patrná chemická nehomogenita oblasti – na pravé straně zdravá oblast, na levé straně místo defektů (oxidy modře, hořčík tyrkysově, titan v tomto snímku zeleně).



Obr. 3.16 Distribuce prvků – vada vzorku 3 (výbrus)

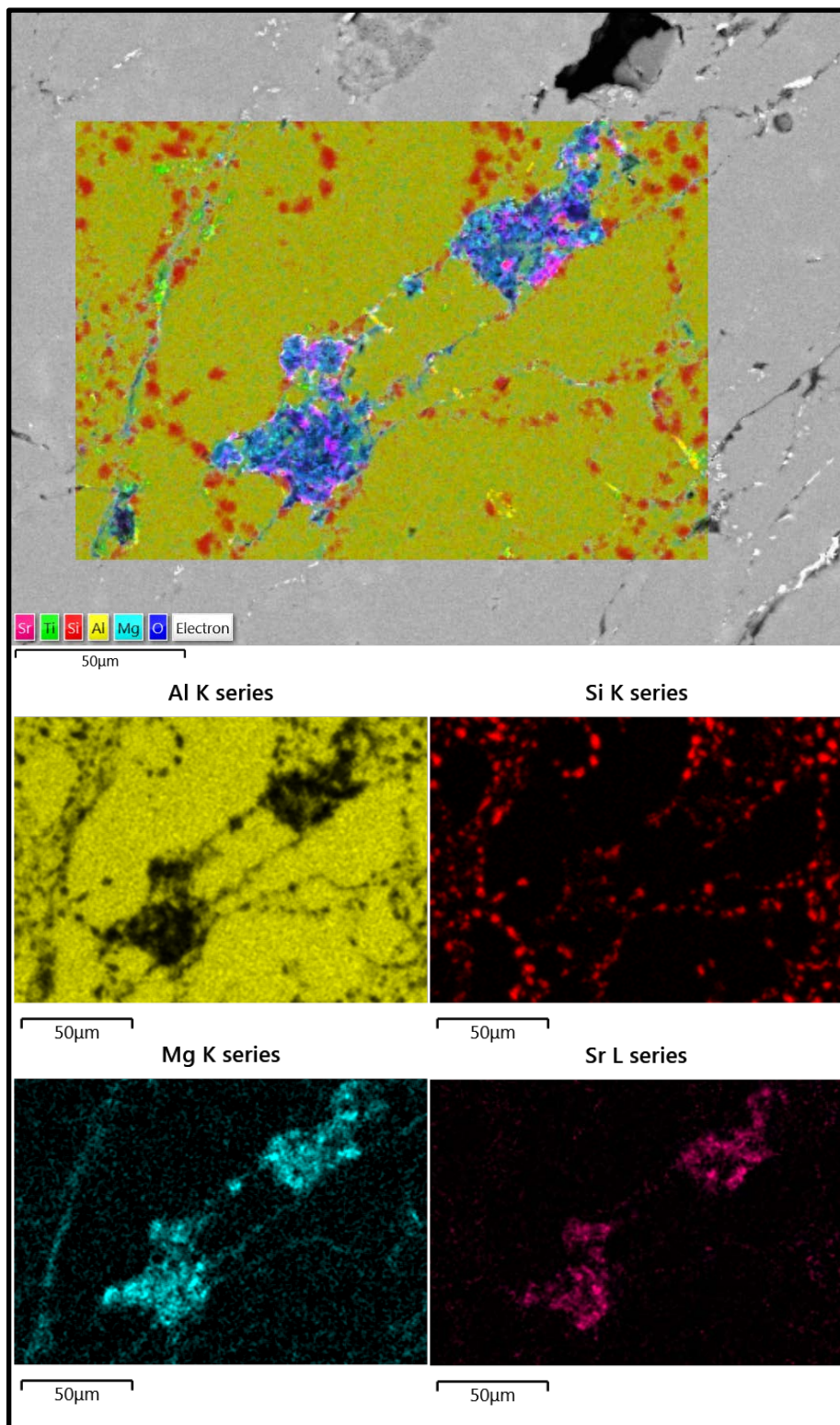
Při chemické mikroanalýze „zelených částic“ z obrázku 3.16 bylo zjištěno, že obsahují přibližně 63 % hliníku, 26 % titanu a 11,5 % křemíku. Jejich průměrná velikost se pohybuje mezi 50 až 150 μm . Jedna takováto částice je zachycena na obr. 3.17.

Jak je uvedeno v kapitole 2.2.2, titan je obsažen v předslitinách Al-Ti, které se používají jako očkovadlo. Může se tedy jednat o nerozpuštěné zárodečné částice TiAl_3 , které mívají velikost kolem 100 μm .



Obr. 3.17 Detail povrchu vzorku 3 (výbrus)

V některých oblastech bylo spolu s hořčíkem nalezeno také stroncium. To je v případě této slitiny používáno jako modifikátor. Dle měření chemického složení z kapitoly 3.1.1 by jeho průměrná koncentrace napříč materiálem měla být 0,02 %. Na obr. 3.18 je vidět, že se spolu s hořčíkem lokalizovalo do míst s koncentrací několikanásobně převyšující průměrnou hodnotu zbytku materiálu. Tyto abnormality se opět vyskytovaly v blízkosti dutinových vad.



Obr. 3.18 Distribuce prvků – vada vzorku 6 (výbrus)

3.2 Simulační výpočet odlitku příruby

Simulační programy umožňují za pomoci numerických metod (metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí) nasimulovat reálný lící proces. Základem jsou vstupní data, jejichž kvalita určuje míru přesnosti výsledku.

Programy nachází uplatnění zejména před samotným uvedením simulovaného odlitku do výroby, případně při optimalizaci procesu stávajícího. Výsledkem může být snížení výrobních nákladů na základě změny lících parametrů, úpravou geometrie vtokové soustavy nebo formy apod. Výpočty jsou schopny odhalit celou řadu problémů. Jako příklad lze uvést víření kovu při plnění dutiny formy, nehomogenitu teplotního pole, tepelné uzly, případně potenciální skryté vady typu porozity. Simulace jsou schopné vypočítat napěťové stavy uvnitř odlitku a mohou také sloužit ke zjištění deformací.

Součástí experimentální části byla práce se simulačním softwarem *MAGMA*, který obsahuje modul pro nízkotlaké lití, a provedení simulačního výpočtu plnění, tuhnutí a chlazení zkoumaného odlitku příruby.

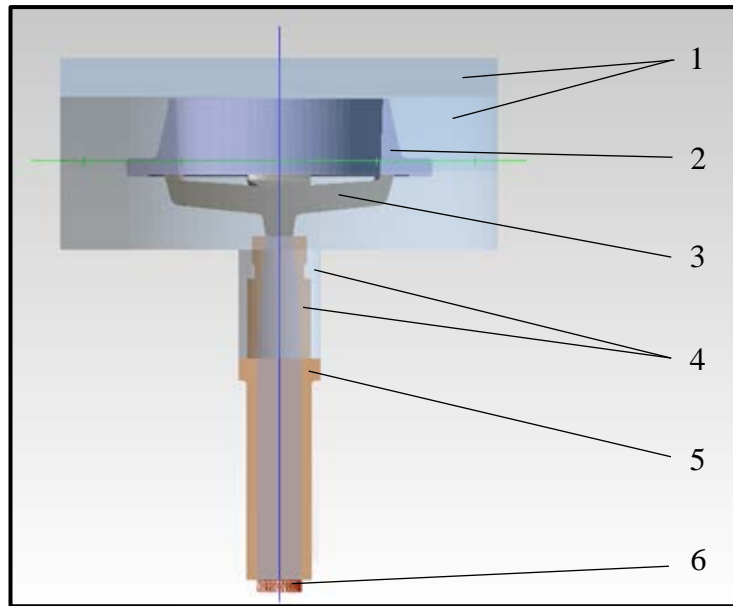
3.2.1 Příprava podkladů a vstupních parametrů

Základními vstupními informacemi jsou samotná 3D data, tedy modely jednotlivých dílů formy, izolačních vložek, odlitku, vtoků apod. Pro výpočet postačuje zjednodušená geometrie sestavy, není třeba uvažovat např. jednotlivé šrouby, matice a další části, které nemají přímý vliv na teplotní pole formy.

Celkový model sestavy poskytla po konzultaci firma Unitherm s.r.o. V programu *CATIA* byla následně sestava zjednodušena, upravena a rozdělena na komponenty. Jednotlivé části byly uloženy v optimálním formátu „.stl“, tak, aby bylo možné ke každému z nich přiřadit příslušnou materiálovou skupinu a definovat další parametry.

Na obr. 3.19 je vyznačena ocelová vícedílná forma (1), odlitek (2), vtoková soustava (3), soubor ocelových a keramických vložek (4) a keramická stoupací trubice (5), jejíž geometrie je ukončena v místě permanentně udržované hladiny roztaveného kovu. Toto místo můžeme označit jako *Inlet*, tedy počáteční bod plnění dutiny formy (6). Jedná se o označení okrajové podmínky, kterou software používá pro přívod kovu.

Do modelu byly navíc přidány geometrické prvky, které simulují odvzdušnění. Program pro ně používá označení *Vents*. V reálném odlitku odchází vzduch mezerami v dělicích rovinách, přes vzdušníky a skrze vůle mezi formou a vyhazovači.



Obr. 3.19 Zobrazená sestava v programu *MAGMA*

Ke každému dílu je v programu nutné přiřadit příslušnou materiálovou skupinu. Skupiny *Top Core* a *Bottom Core* slouží pro vrchní, respektive spodní část kovové formy. *Casting* označuje samotný odlitek, *Runner* se používá pro vtokovou soustavu a *Stalk* je plnění stoupací trubcí. Pro keramické díly a trubici je použita skupina *Insulation*. Kompletní seznam jednotlivých dílů je uveden v tabulce 3.6.

Tab. 3.6 Seznam 3D modelů sestavy

Název dílu	Materiál dílu	Materiálová skupina	ID
Vrchní pohyblivá část formy	Ocel 11 523	<i>Top Core</i>	1
Vrchní pohyblivá část formy – jádro		<i>Top Core</i>	1
Vrchní pohyblivá část formy – deska		<i>Top Core</i>	1
Spodní část formy		<i>Bottom Core</i>	1
Ocelová vložka 1		<i>Bottom Core</i>	2
Ocelová vložka 2		<i>Bottom Core</i>	2
Ocelová vložka 3		<i>Bottom Core</i>	2
Odlitek	Litá slitina AlSi7Mg0,3	<i>Casting</i>	1
Vtoková soustava		<i>Runner</i>	1
Plnění stoupací trubcí		<i>Stalk</i>	1
Keramická stoupací trubice	Izolační keramika	<i>Insulation</i>	1
Keramická vložka 1		<i>Insulation</i>	2
Keramická vložka 2		<i>Insulation</i>	2

Pro každou materiálovou skupinu je potřeba vybrat z databáze příslušný materiál a definovat počáteční teplotu. Jednotlivá ID materiálových skupin umožňují nastavit odlišné hodnoty pro více částí z jedné materiálové skupiny.

Skupinám charakterizující veškeré ocelové části formy, tedy *Top Core* a *Bottom Core*, byl z databáze přiřazen materiál *STEEL*, jelikož je forma vyrobena z konstrukční oceli 11 523. Teplota vrchní poloviny formy, tedy *Top Core ID 1*, byla nastavena na 380 °C a teplota spodní části *Bottom Core ID 1* na 400 °C. Jelikož je přechod mezi stoupací trubicí a ústím vtokové soustavy před prvním cyklem dohříván plynovým hořákem, byla pro ocelové vložky *Bottom Core ID 2* zadána teplota 600 °C. Příslušné teploty jsou převzaty z firemních podkladů z měření formy pyrometrem.

Pro odlévanou slitinu byl zvolen materiál *AlSi7Mg-Perm*, který byl v materiálové databázi ještě dodatečně upraven tak, aby jeho chemické složení odpovídalo hodnotám naměřených v tab. 3.3 z kapitoly 3.1.1. Počáteční teplota roztaveného kovu je 700 °C. Hodnota dosazovací schopnosti *Feeding Effectivity* byla stanovena na 30 %. Ta určuje schopnost tekutého materiálu zaplňovat objem v závislosti na tom, kolik procent tuhé fáze se v něm nachází. U slitiny byl změněn parametr *Short Freezing Range* na *Long Freezing Range*, který více odpovídá slitině s větším rozdílem mezi teplotami likvidu a solidu.

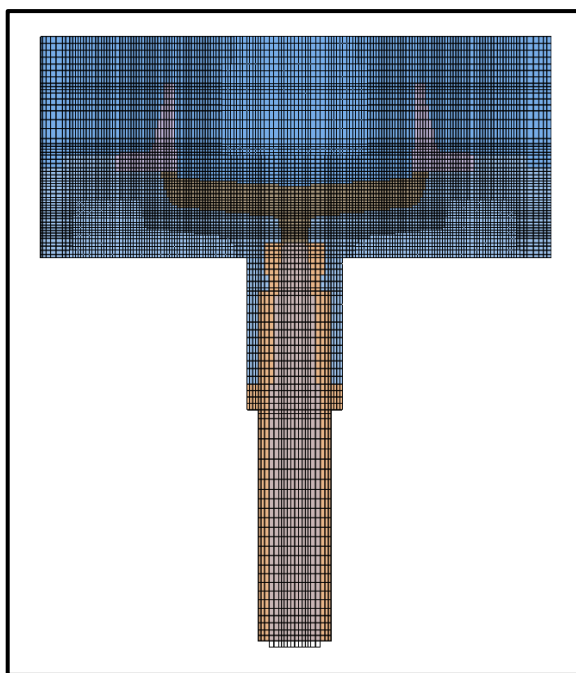
Poslední skupinou jsou keramické izolační vložky a keramická trubice, zde je název vybraného materiálu z databáze shodný s označením materiálové skupiny, tedy *Insulation*. Jelikož je spodní část keramické trubice *Insulation ID 1* obklopena taveninou, její teplota byla nastavena na 700 °C. Pro izolační keramické vložky *Insulation ID 2* byla zvolena teplota 400 °C.

Program také potřebuje znát koeficienty přestupu tepla mezi jednotlivými skupinami materiálů. Koeficienty mohou být závislé na teplotě – v případě přestupu tepla mezi slitinou a formou, anebo konstanty – pro přestup tepla mezi jednotlivými díly formy. Jelikož je forma v provozu opatřena postříky, je nutné tuto skutečnost v simulaci zohlednit. Mezi odlitkem a formou jsou postříky *CILLOLIN AL 160* a *SOLITEC AD 901*, jejichž hodnota přestupu tepla odpovídá středně izolačním nástřikům. Koeficienty použité z databáze programu jsou uvedeny v tabulce 3.7.

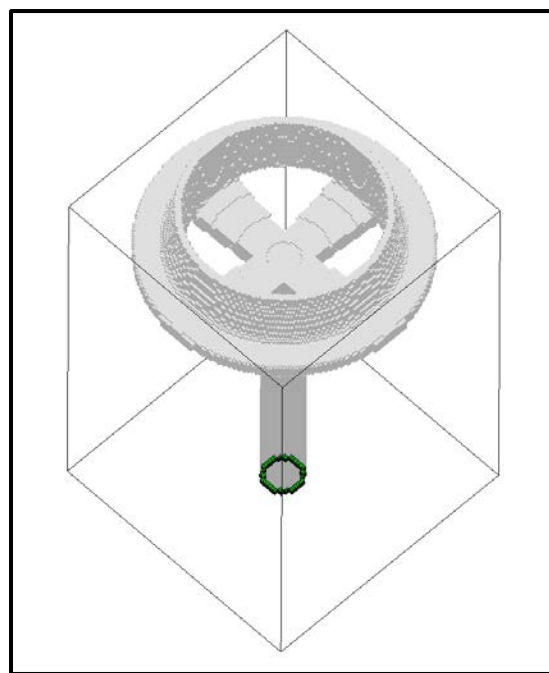
Tab. 3.7 Koeficienty přestupu tepla

Rozhraní		Koeficient	Označení v databázi
Casting	Top Core Bottom Core	závislý na teplotě	AlSi7Mg-Perm-core
Runner	Top Core Bottom Core	závislý na teplotě	AlSi7Mg-coat
Stalk	Insulation	konstanta	C600.0
Top Core Bottom Core	Top Core Bottom Core	konstanta	C1500.0
Bottom Core	Insulation	konstanta	C800.0
Insulation	Insulation	konstanta	C400.0

Generování výpočetní sítě slouží k rozdělení celého objemu sestavy na konečný počet elementů, přes které je možné provést výpočet. Jelikož se v našem případě nejedná o tenkostěnné těleso, a navíc odlitek neobsahuje žádná žebra, můžeme zvolit jemnost sítě pro veškerou geometrii stejnou. Při generování sítě byla použita funkce *Solver 5*, která díky matematickému algoritmu síť zpřesní a věrohodněji vygeneruje. Výsledná síť obsahuje přibližně 3 000 000 elementů. Ověření kvality sítě je možné pomocí zobrazení *Mesh Quality*, které zvýrazní nesprávně nasítované části, tedy např. elementy, které se nedotýkají dostatečného počtu sousedních, nebo je některá ze stěn odlitku tvořena méně než třemi elementy vedle sebe. Snímky sítě jsou zobrazeny na obr. 3.20 a 3.21.



Obr. 3.20 Řez výpočetní sítí

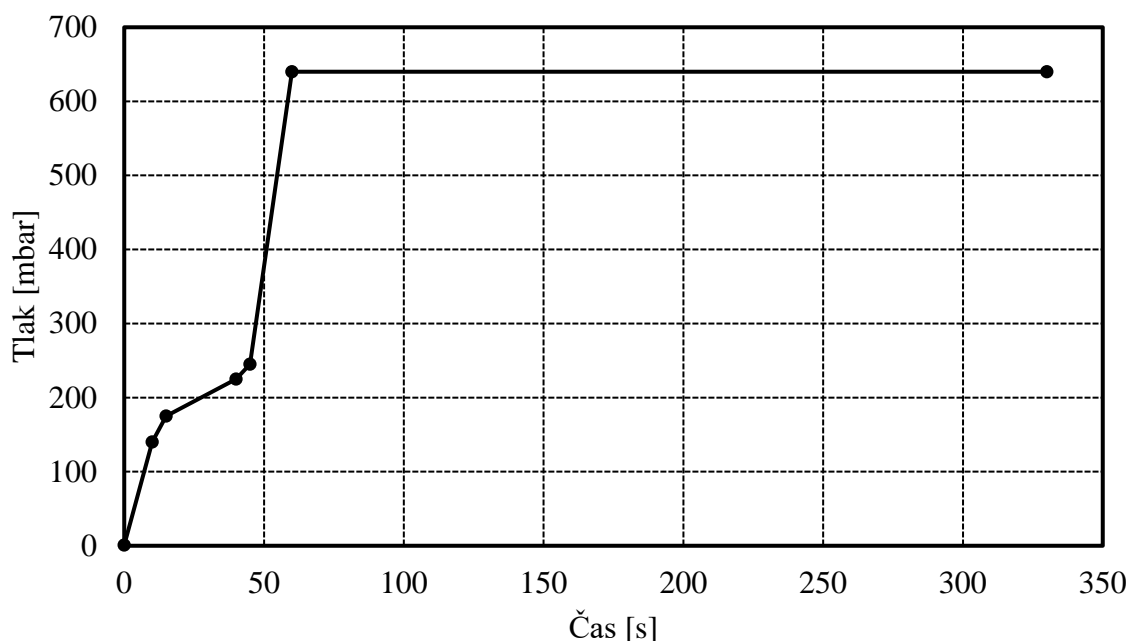


Obr. 3.21 Kontrola kvality sítě odlitku

Dalšími vstupními parametry jsou časy jednotlivých operací v jednom cyklu. Tedy informace o tom, jak dlouho je forma otevřená, kdy probíhá její zavření, kdy začíná plnění, jak dlouho odlitek chladne apod. Kompletní časové údaje potřebné pro simulaci jednoho cyklu jsou uvedeny v tab. 3.8. S časem jsou úzce spojena také data o provozním tlaku, kterým probíhá samotné plnění dutiny formy. Tlakovou křivku je nutné v programu definovat přímo jednotlivými body, její průběh je zobrazen na obr. 3.22. Výpočet byl nastaven pro celkový počet 8 cyklů.

Tab. 3.8 Časové údaje procesu lití

Operace procesu lití	Čas od začátku plnění [s]	Definované body tlakové křivky	
		Čas [s]	Tlak [mbar]
Přechod na dotlak	40	10	140
Konec dotlaku	330	15	175
Otevření formy	687	40	225
Vyhození odlitku	706	45	245
Zavření formy	765	60	640
Celková doba cyklu	780	330	640



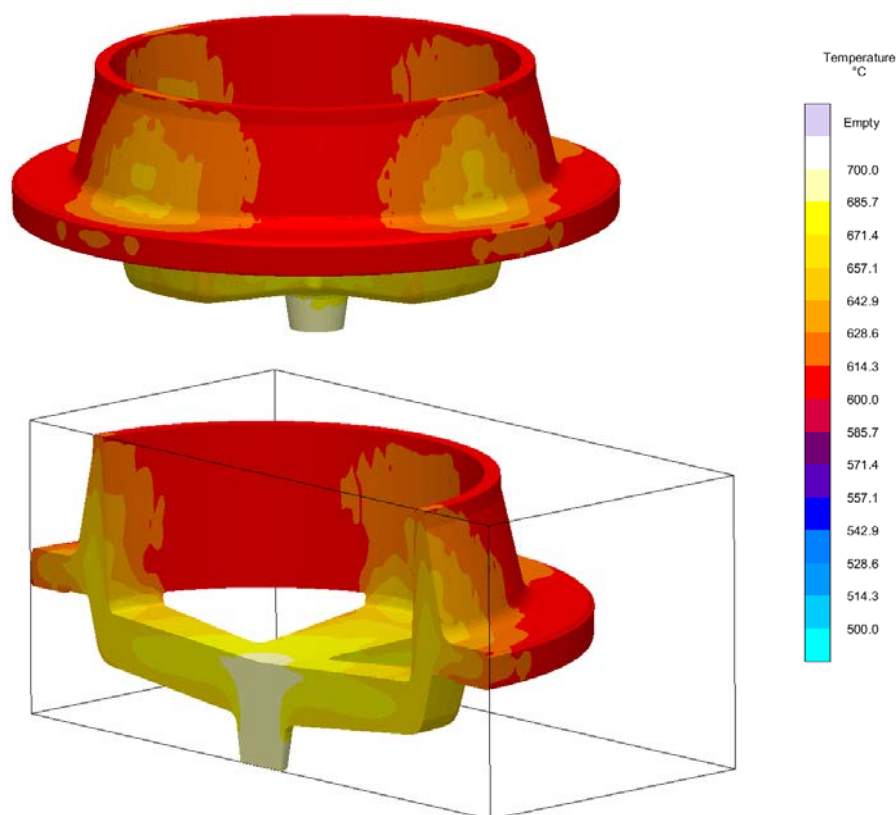
Obr. 3.22 Křivka závislosti provozního tlaku na čase

3.2.2 Výsledky výpočtu

Vyhodnocení simulací lze rozdělit do dvou hlavních skupin. V té první najdeme data o průběhu plnění. Patří sem např. rychlost plnění, teplota a stáří taveniny, uzavřený vzduch. Dále to jsou data o průběhu tuhnutí a chladnutí. Zde najdeme informace o podílu tekuté a tuhé fáze, o teplotním poli, staženinách, tepelných uzlech apod.

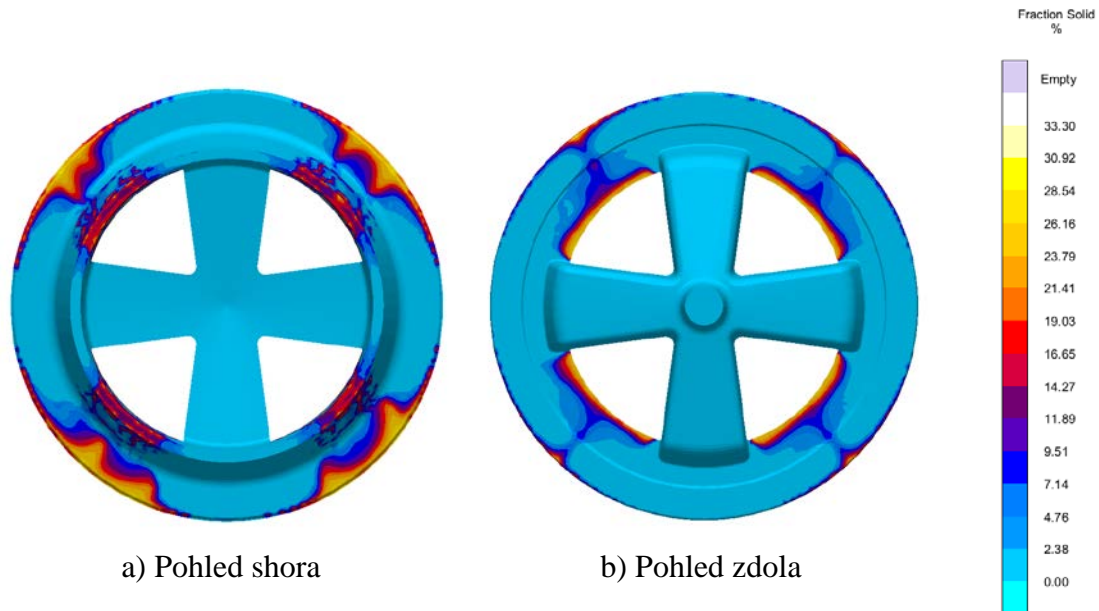
Vyhodnocován byl zejména první cyklus z celkových osmi. Důvodem je vyvrácení možnosti, že nadměrný výskyt vad u prvního cyklu, které jsou popsány v kapitole 3.1, je způsoben nesprávnými procesními parametry.

Výsledky simulace plnění dutiny formy poukázaly na plynulý a klidný průběh celého procesu. Plnění bylo bez turbulencí a nebylo zaznamenáno zahlcení vzduchu nebo rozstřík. Tavenina skrze stoupačící trubici dosáhla úrovně vtokové soustavy po přibližně 10 s a samotná dutina formy budoucího odlitku se začala vyplňovat po dalších 8 s. Celkově plnění trvalo 36 s. Na konci procesu začala tavenina částečně tuhnout, jelikož se její teplota pohybovala okolo úrovně teploty likvidu (cca 613 °C). Na obr. 3.23 je zobrazena teplota kovu na konci plnění.



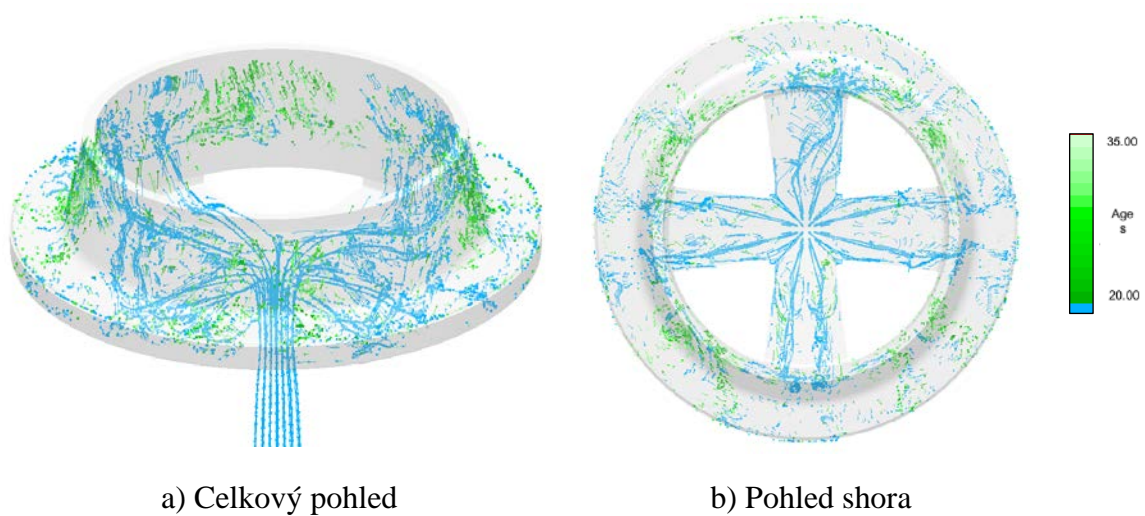
Obr. 3.23 Teplotní pole na konci plnění

Při pohledu na kritérium *Fraction Solid* můžeme pozorovat, že v některých místech odlitku se na konci plnění vyskytlo až cca 30 % pevné fáze. Oblasti jsou nejvíce vzdálené od ústí vtokové soustavy. Odpovídají místům, kam kov během plnění dorazil již chladnější, viz obr. 3.24.



Obr. 3.24 Podíl pevné fáze na konci plnění

V zobrazení *Flow Tracer* byla sledována cesta virtuálních částic vycházejících z *Inletu* a unášených proudem stoupající taveniny do dutiny formy. Na obr. 3.25 jsou zeleně zobrazeny nakupené částice v oblastech, kam dorazily nejdříve. Jsou to tedy oblasti s nevyšším stářím materiálu (od 20 do 35 s od začátku plnění).



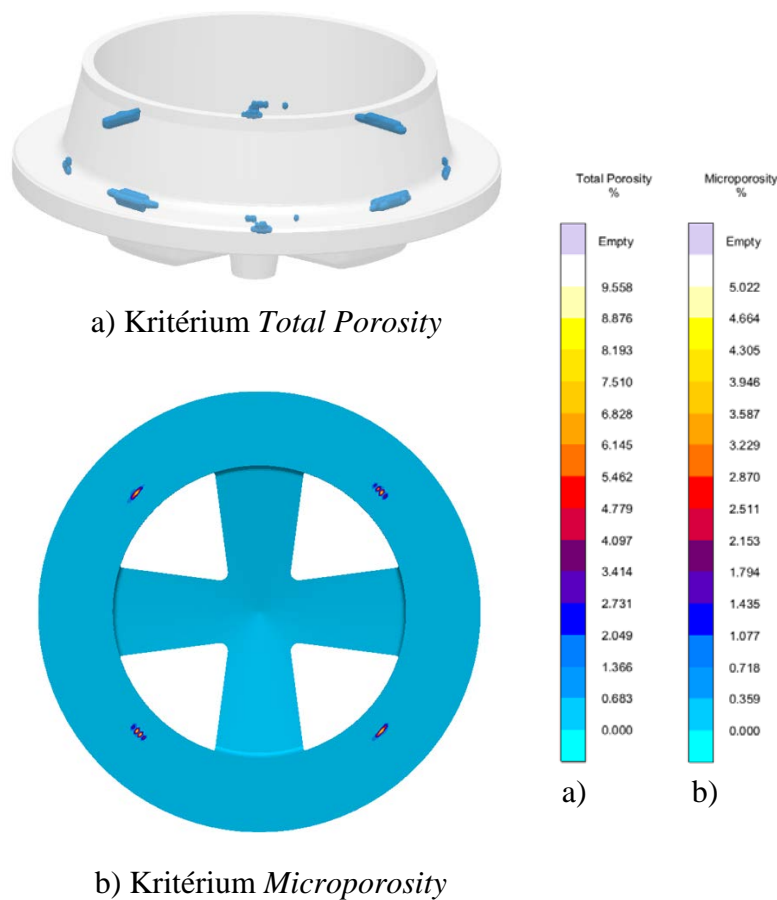
Obr. 3.25 Sledování stopovacích částic

Výsledky simulace tuhnutí a chladnutí byly zaměřeny zejména na posouzení zdravoti odlitku a lokalizaci oblastí s rizikem vzniku staženin.

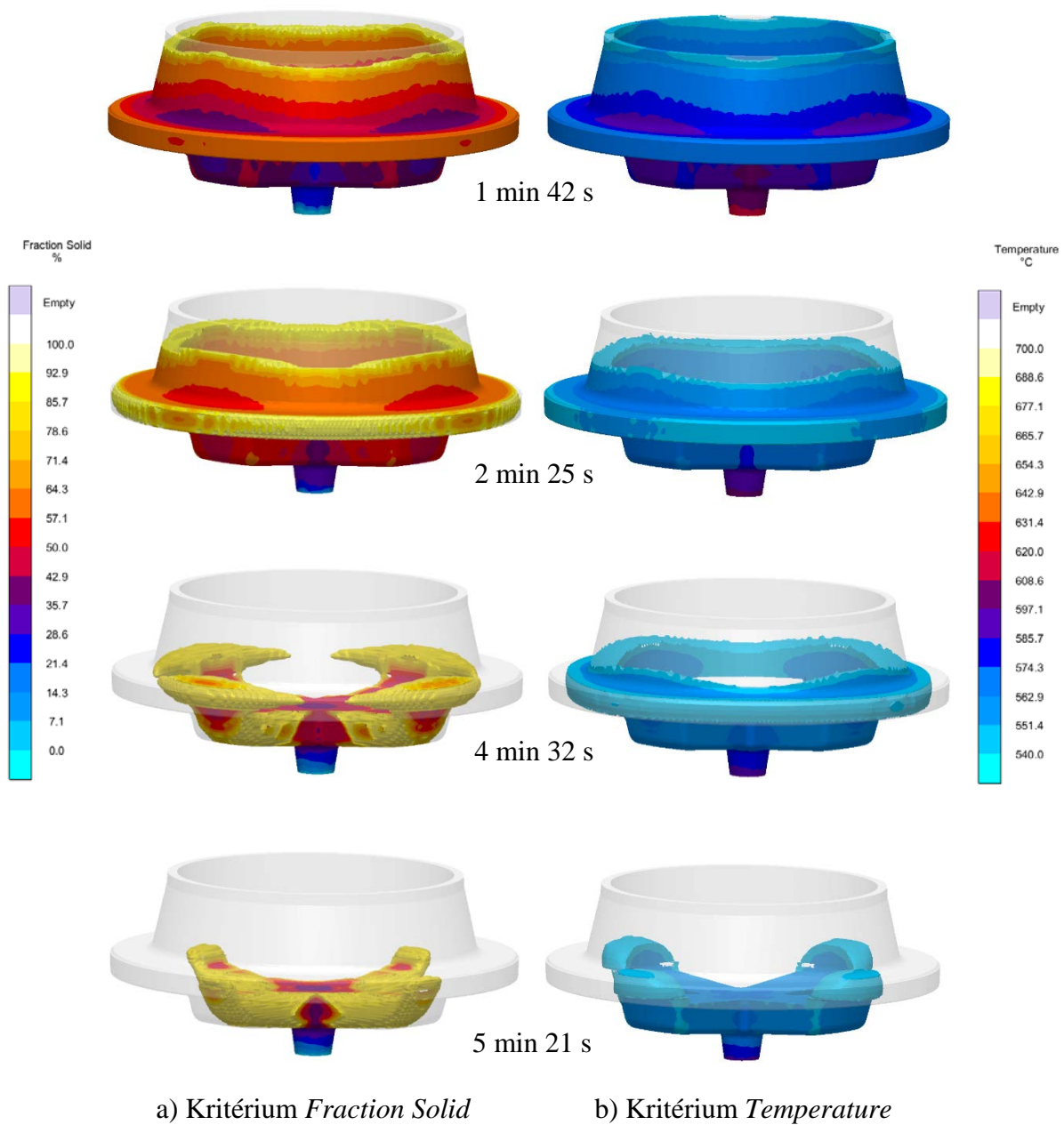
V zobrazeném kritériu *Soundness*, které udává zdravotost odlitku, nebyla nalezena žádná kritická místa. Bezproblémové bylo také tuhnutí odlitku, které probíhalo usměrněně odshora směrem k ústí vtokové soustavy. To potvrdilo i zobrazení kritéria *Hot Spot*, ve kterém nebyly nalezeny žádné tepelné uzly. Průběh tuhnutí je zobrazen na obr. 3.27. V levém sloupci a) jsou zobrazeny hodnoty podílu pevné fáze – tedy kritérium *Fraction Solid*. V pravé části b) nalezneme teplotní mapu kovu s omezením dolní hranice škály teplotou solidu – kritérium *Temperature*.

Porozita byla nalezena pouze ve spodní části odlitku, kde je tloušťka materiálu nejmasivnější. Kritérium *Total Porosity* na obr. 3.26 a) ukazuje několik rizikových oblastí, kde se hodnota porozity pohybuje kolem 1 %.

Na obr. 3.26 b) jsou dále zřetelné čtyři oblasti, u nichž se kritérium *Microporosity* dostalo až na hodnotu 5 %. V těchto místech existuje potenciální riziko vzniku malých objemových staženin. V horní oblasti odlitku, kde byly nalezeny reálné vady, se žádná lokální riziková místa neobjevila.



Obr. 3.26 Porozita uvnitř odlitku



Obr. 3.27 Podíl pevné fáze a teploty během tuhnutí

4 Diskuse

Výsledky této diplomové práce poskytují představu o charakteru a příčinách vzniku vad v odlitcích příruby ze slitiny $AlSi7Mg0,3$, které jsou vyráběny ve slévárně Unitherm s.r.o. v Jablonci nad Nisou. Samotný odlitek patří díky svým rozměrům (vnější průměr přibližně 55 cm) a celkové hmotnosti (25 kg) mezi mohutnější. Z tohoto důvodu je na jednu dvousetkilovou dávku kovu lito pouze 8 odlitků. Vady se objevují pouze v počáteční fázi lití, a proto jsou první kusy z dávky kvůli vysoké zmetkovitosti preventivně vyřazovány. Nalezené vady jsou rozsahem relativně závažné z hlediska rozměrů i celkového množství, jak je možné pozorovat na snímcích vzorků v kapitole 3.1. Tyto skutečnosti představují vysoké ekonomické ztráty, které je potřeba snížit na minimum. K tomu má dopomoci svými výsledky i tato diplomová práce.

Množství faktorů, jež kromě procesních parametrů ovlivňují kvalitu odlitků, je v reálném provozu vysoké. Např. chemické složení vstupního materiálu a čistota vratu, dodržení přesného dávkování přísad u prováděných metalurgických procesů, víření a rozstřík taveniny při přelévání do kelímku a do udržovací pece pod nízkotlakým strojem, čistota používaného náradí a celá řada dalších. Veškeré proměnné experiment zahrnout nemůže, soustředí se zejména na schopnosti chemické analýzy, mikroskopie a simulačních výpočtů.

Prostřednictvím simulačního programu *MAGMA* byla potvrzena prvotní domněnka, že příčinou těchto vad nejsou nevhodně zvolené procesní parametry (tedy teplota formy a taveniny, plnicí tlak apod.). Nebyla totiž prokázána „nezdravost“ vrchní části příruby, kde se na obrobených plochách vady reálně vyskytují. V těchto oblastech nebyla zaznamenána žádná porozita ani tepelné uzly. Potenciálně problémová místa s rizikem vzniku porozity byla objevena jinde, jak dokládají výsledky simulace na obr. 3.26 a) a 3.26 b) z kapitoly 3.2.2. Z těchto míst nebyly k dispozici žádné vzorky, tudíž nemohla být experimentálně ověřena reálná přítomnost porozity. Nejedná se však z hlediska celkové funkčnosti dílu o oblasti příliš významné.

Příčinou vzniku vad je patrně nehomogenita taveniny a vysoký obsah vměstků a fází bohatých zejména na prvky jako jsou kyslík, hořčík, stroncium a titan. Dokládají to snímky z elektronového mikroskopu s mikroanalýzou chemického složení. Tyto oblasti jsou dobře patrné zejména na obr. 3.16 a 3.18 v kapitole 3.1.3. Charakter vad se podobá spíše oxidickým vměstkům, které mohou být díky své nižší hustotě vyplavovány do vrchní části odlitku. Je pravděpodobné, že se ve slitině objevují oxidy Al_2O_3 , SiO_2 , MgO a spinely $MgAl_2O_4$. Fáze

obsahující stroncium mohou mít svůj původ v nedokonalém natavení a promíšení modifikačních složek v celém objemu taveniny.

Významným nálezem jsou také částice obsahující titan, jedna taková je v kapitole 3.1.3 na obr. 3.17. Tyto částice jsou zřejmě nerozpuštěné nukleační zárodky $TiAl_3$ vnesené do taveniny z očkovacích předslitin, viz kapitola 2.2.2. Celkové chemické složení zkoumaných vzorků je však z měření uvedeného v kapitole 3.1.1 vyhovující a splňuje požadavky dané interními firemními předpisy a normou ČSN EN 1706.

Problematika tohoto odlitku byla již v minulosti zkoumána na katedře strojírenské technologie doc. Ing. Machutou, Ph.D., který pro firmu Unitherm s.r.o. vypracoval technickou zprávu obsahující analýzy podobných vad [19] v jiném období výroby. Jeho zpráva svými nálezy (oxidické vměstky a vady se zvýšenou koncentrací hořčíku, titanu, stroncia a dalších prvků) podporuje hypotézu o vzniku vad popsaných v této práci.

S odkazem na výše uvedené nálezy je pro minimalizaci výskytu vad doporučeno zajistit delší časovou prodlevu mezi očkováním s modifikací a samotným odléváním prvního kusu. Dále je vhodné důsledně provádět stěry po každém přelití taveniny do kelímku a případně zavést do procesu lití filtraci taveniny.

Do reálného procesu lití vstupuje mnoho proměnných. Zajištění optimálních podmínek pro výrobu odlitku této příruby je relativně komplexní úkol. Výsledná kvalita odlitku je úzce spojena s čistotou vstupního materiálu, dodržáním všech metalurgických postupů a nastavením optimálních procesních parametrů. Výsledky práce byly poskytnuty zaměstnancům firmy Unitherm s.r.o. a na základě těchto výsledků budou ve výrobě provedeny kroky, které by měly vést k minimalizaci zmetkovitosti.

5 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce byla identifikace vad na odlitcích příruby ze slitiny $AlSi7Mg0,3$ prostřednictvím experimentálního měření chemického složení a provedením simulačního výpočtu v programu *MAGMA*. Součástí cíle bylo také vyhodnocení potenciálních příčin vzniku těchto vad a doporučení pro jejich eliminaci. Práce obsahuje dvě hlavní kapitoly – teoretickou a experimentální část.

Ve své teoretické části se práce zabývá zejména slitinami hliníku s křemíkem. Samostatná kapitola je věnována slitinám hliníku, křemíku a hořčíku. Konkrétně je zde uvedena i charakteristika slitiny $AlSi7Mg0,3$. V dalších kapitolách je popsána technologie nízkotlakého lití a nezbytné metalurgické procesy prováděné před samotným odléváním. V závěru teoretické části je uveden přehled nejčastějších slévárenských vad vyskytujících se u slitin hliníku litých nízkotlakou technologií.

Stěžejní část experimentu zahrnovala simulační výpočet odlitku příruby a zkoumání obsahu jednotlivých prvků ve slitině pomocí emisní spektrometrie. Součástí experimentální části byla také analýza vad optickým a elektronovým mikroskopem. Závěry experimentu lze shrnout do těchto bodů:

1. Z měření emisní spektrometrií vyplynulo, že slitina jako celek vykazovala správné chemické složení udávané normou ČSN EN 1706. Nejčastější prvky ve slitině hned po hliníku byly: křemík (7,003 %), hořčík (0,329 %), titan (0,133 %), železo (0,113 %) a stroncium (0,023 %).
2. S pomocí optického mikroskopu bylo nalezeno několik druhů vad – zejména vměstky spolu s makroskopickými dutinami. Velikost vad se nejčastěji pohybovala v řádech jednotek milimetrů. Nebyly nalezeny žádné kulovité dutiny, které by poukazovaly na příliš vysoké naplynění taveniny.
3. Mikroanalýza oblastí na elektronovém mikroskopu objevila nehomogenitu chemického složení. Oblasti defektů vykazovaly zvýšený obsah těchto prvků – kyslík, hořčík, titan, stroncium. Lokálně byly nalezeny i zvýšené koncentrace železa a vápníku.
4. Vznik defektů nemá příčinu ve špatném nastavení procesních parametrů. Simulační výpočty neprokázaly sklon ke vzniku tepelných uzlů zapříčiněný neusměrněným tuhnutím. Simulace ale poukázaly na nízké riziko vzniku porozity ve spodní části odlitku.

Seznam použité literatury

- [1] TYLECOTE, R. F. *Historie metalurgie*. Londýn: Maney Publishing, 2002. ISBN 1-902653-79-3
- [2] BINGHAM, Jane. *Encyklopedie starověkého světa*. Bratislava: Perfekt, 2004. ISBN 80-8046-269-0.
- [3] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [4] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OTČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s. r. o., 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [5] MURGAŠ, Marián. *Teória zlievarenstva*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2002. Edícia skript. ISBN 80-227-1684-7.
- [6] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [7] JANOVEC, Jiří, Karel MACEK a Petr ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-80-01-02935-0
- [8] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku: Chemické složení a druhy výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [9] ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku - Odličky: Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [10] HAMPL, Jiří. *Metalurgie slévárenských slitin: studijní opora*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3585-3.
- [11] ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků: studijní opora*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3584-6.
- [12] GRUZLESKI, John E. *The treatment of liquid aluminum-silicon alloys*. Des Plaines: American Foundrymen's Society, 1999. ISBN 0-87433-121-8.
- [13] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [14] Alloy Standards. *European Steel and Alloy Grades* [online]. National Technical University KhPI [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/standard_nonferrous_eu.php
- [15] Casting filter. In: *Kinfilter* [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://kinfilter.wordpress.com/tag/casting-filter/>

- [16] Rotary degasser for molten aluminum. In: *SubsTech* [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=degassing_treatment_of_molten_aluminum_alloys
- [17] OTÁHAL, Vlastislav. *Vady odlitků: Atlas Vad* [online]. Brno [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vady_odlitku_vytah.pdf
- [18] Low Pressure Die Casting. *JC&A* [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/low-pressure-gravity-die-casting-process-3228/>
- [19] MACHUTA, Jiří. *Komplexní analýza vad odlitků (4 ks vzorků Al odlitků)*. Technická zpráva pro firmu Unitherm s.r.o., TU v Liberec, 2017.

Příloha č. 1 – měření obsahu chemických prvků

Obsah prvku [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
1.	7.123	0.120	0.0066	0.0071	0.330	0.0024	0.0067	<0.0020
2.	6.694	0.152	0.0091	0.0075	0.337	0.0038	0.0079	<0.0020
3.	6.872	0.103	0.0072	0.0058	0.297	0.0020	0.0040	<0.0020
4.	7.346	0.099	0.0035	0.0041	0.345	<0.0020	0.0034	<0.0020
5.	7.302	0.114	0.0037	0.0046	0.340	<0.0020	0.0022	<0.0020
6.	6.812	0.095	0.0037	0.0038	0.336	<0.0020	0.0032	<0.0020
7.	7.004	0.110	0.0035	0.0043	0.346	<0.0020	0.0029	<0.0020
8.	7.346	0.152	0.0037	0.0075	0.312	<0.0020	0.0022	<0.0020
9.	6.988	0.110	0.0041	0.0052	0.317	0.0037	0.0073	<0.0020
10.	6.882	0.120	0.0039	0.0047	0.312	0.0021	<0.0020	<0.0020
Prům. hodnota	7.003	0.113	0.0050	0.0052	0.329	0.0024	0.0044	<0.0020
Sm. odchylka	0.207	0.016	0.0019	0.0012	0.016	0.0007	0.0021	-

Obsah prvku [%]	Ti	Be	Bi	Ca	Co	Ga	Na
1.	0.125	<0.00030	<0.0020	0.00032	<0.0010	0.0051	<0.00050
2.	0.138	<0.00030	<0.0020	0.00063	<0.0010	0.0053	<0.00050
3.	0.140	<0.00030	<0.0020	0.00062	<0.0010	0.0026	<0.00050
4.	0.122	<0.00030	<0.0020	0.00051	<0.0010	0.0019	<0.00050
5.	0.143	<0.00030	<0.0020	0.00070	<0.0010	0.0049	<0.00050
6.	0.145	<0.00030	<0.0020	0.00055	<0.0010	<0.0010	<0.00050
7.	0.135	<0.00030	<0.0020	0.00040	<0.0010	0.0021	<0.00050
8.	0.140	<0.00030	<0.0020	0.00062	<0.0010	0.0019	<0.00050
9.	0.101	<0.00030	0.0021	0.00047	<0.0010	0.0073	<0.00050
10.	0.145	<0.00030	<0.0020	0.00041	<0.0010	0.0034	<0.00050
Prům. hodnota	0.133	<0.00030	<0.0020	0.0005	<0.0010	0.0037	<0.00050
Sm. odchylka	0.014	-	-	0.0001	-	0.0019	-

Obsah prvku [%]	P	Pb	Sn	Sr	V	Zr	Sb	Al
1.	<0.0010	<0.0030	0.0064	0.020	0.0090	<0.0020	<0.0070	92.22
2.	<0.0010	<0.0030	0.0048	0.018	0.0089	<0.0020	<0.0070	92.59
3.	<0.0010	<0.0030	0.0046	0.019	0.0083	<0.0020	<0.0070	92.52
4.	<0.0010	<0.0030	0.0043	0.024	0.0087	<0.0020	<0.0070	92.02
5.	<0.0010	<0.0030	0.0042	0.023	0.0110	<0.0020	<0.0070	92.03
6.	<0.0010	<0.0030	0.0040	0.022	0.0092	<0.0020	<0.0070	92.54
7.	<0.0010	<0.0030	0.0051	0.024	0.0100	<0.0020	<0.0070	92.33
8.	<0.0010	<0.0030	0.0040	0.020	0.0088	<0.0020	<0.0070	92.50
9.	<0.0010	<0.0030	0.035	0.031	0.012	<0.0020	<0.0070	92.30
10.	<0.0010	<0.0030	0.0061	0.027	0.010	<0.0020	<0.0070	92.46
Prům. hodnota	<0.0010	<0.0030	0.0083	0.023	0.010	<0.0020	<0.0070	92.25
Sm. odchylka	-	-	0.0095	0.004	0.001	-	-	-