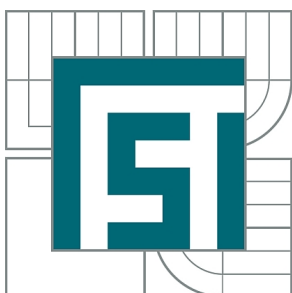




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# STUDIUM VLIVU METALURGICKÝCH A TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU

STUDY OF THE EFFECT OF METALLURGICAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON  
MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAKUB PEŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. LADISLAV ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/13

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Pešek

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Studium vlivu metalurgických a technologických parametrů na mechanické vlastnosti slitin hliníku**

v anglickém jazyce:

### **Study of the effect of metallurgical and technological parameters on mechanical properties of aluminium alloys**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mechanické vlastnosti odlitků ze slitin hliníku typu Al-Si-Mg jsou závislé na chemickém složení taveniny, metalurgickém zpracování taveniny před litím, kterým se ovlivňuje naplynění, velikost zrna a morfologie eutektika, na podmínkách ochlazování odlitku a na jeho tepelném zpracování. Nalezení parametrů, které jsou z hlediska mechanických vlastností nejvýznamnější, vyžaduje statistické zpracování velkých souborů dat, které jsou zčásti k dispozici (chemické složení taveb, mechanické vlastnosti), zčásti musí být shromážděny metodami kvantitativní metalografie.

Cíle diplomové práce:

Nalézt metalurgické a technologické parametry, které mají na mechanické vlastnosti slitin Al-Si-Mg největší vliv.

Seznam odborné literatury:


1. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth Heinemann, 1997. 289 p.
2. MICHNA, S., aj. Encyklopedie hliníku. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
3. DJURDJEVIĆ, M.-B., ODANOVIĆ, Z., PAVLOVIĆ-KRSTIĆ, J. Melt quality control at aluminum casting plants. Metalurgija-Journal of Metallurgy. 2010, vol. 16 (1), p. 63-76.
4. CAMPBELL, J., HARDING, R.-A. The Liquid Metal. In TALAT Lecture 3202, Brussels: European Aluminium Association, 1994.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Ladislav Zemčík, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 29.10.2012



  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## ABSTRAKT

Diplomová práce byla vypracována se záměrem vysledovat a popsat délku modifikačního účinku třech různých typů modifikátorů a jejich působení na mechanické vlastnosti hliníkové slitiny. Dále bylo úkolem zpracovat a vyhodnotit vazby mezi mechanickými hodnotami a chemickým složením. Za tímto účelem byl získán chemický rozbor odlitých vzorků, jejich mechanické hodnoty, a byla aplikována metoda metalografického zpracování. Zde byla pozorována a hodnocena velikost zrna před a po tepelném zpracování, bylo provedeno měření sekundárních větví dendritů a hodnocena morfologie eutektika. Dále byla měřena tvrdost u vybraných vzorků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

modifikace, chemické složení, očkování, mechanické vlastnosti

## ABSTRACT

Suggested thesis has been made with the intent to observe and describe the length of the modifying effect of three different types of modifiers and their effect on the mechanical properties of aluminium alloy. Next step was to process and evaluate links between mechanical properties and chemical composition. Chemical analysis and mechanical properties of cast samples were obtained. For this purpose and a method of metallographic processing was applied afterwards. The grain size was evaluated before and after the heat treatment. Measurements of the secondary dendrite branches and evaluation of the eutectic morphology were made. The hardness was measured on selected samples.

## KEY WORDS

modification, chemical composition, inoculation, mechanical properties

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE:

PEŠEK, J. *Studium vlivu metalurgických a technologických parametrů na mechanické vlastnosti slitin hliníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 65 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ladislav Zemčík, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Studium vlivu metalurgických a technologických parametrů na mechanické vlastnosti slitin hliníku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

datum

---

Bc. Jakub Pešek

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velmi rád poděkoval panu prof. Ing. Ladislavu Zemčíkovi, CSc. za cenné rady a komentáře, které mi byly zasílány při řešení a zpracování diplomové práce a panu doc. RNDr. Bohumilu Marošovi, CSc. bez něhož by nemohly být statisticky zpracovány a vyhodnoceny cenné údaje.

**OBSAH**

Abstrakt

Prohlášení

Poděkování

Obsah

1	Teoretická část.....	8
1.1	Úvod.....	8
1.2	Historie používání hliníkových slitin .....	9
1.3	Slévárenské slitiny hliníku .....	9
1.4	Mechanické vlastnosti hliníkových slitin.....	10
1.5	Slitiny Al-Si.....	11
1.5.1	Chemické složení slitin Al-Si .....	12
1.5.2	Krystalizace slitin Al-Si .....	16
1.5.3	Hall-Petchův vztah .....	20
1.5.4	Očkování slitin Al-Si.....	21
1.5.5	Modifikace eutektika ve slitinách AlSi .....	22
1.6	Plyny ve slitinách hliníku.....	24
1.6.1	Rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku.....	24
1.6.2	Vznik plynových dutin v odlitcích .....	25
1.6.3	Mechanismy vzniku porezity .....	27
1.6.4	Odplyňování hliníkových slitin .....	28
1.6.5	Způsoby odplyňování .....	30
1.6.6	Rafinace a filtrace hliníkových slitin .....	32
1.7	Kontrolní metody.....	34
1.7.1	Měření naplynění.....	34
1.7.2	Termická analýza .....	36
1.7.3	Spektrometrie.....	38
1.7.4	Měření čistoty taveniny.....	39
1.7.5	Měření DAS.....	40
1.7.6	Kontrola struktury mikroskopem .....	41
1.7.7	Vizuální kontrola odlitků .....	41

2 Praktická část.....	42
2.1 Představení slévárny.....	42
2.2 Odlévaná slitina .....	42
2.3 Modifikátory .....	43
2.4 Očkovadlo .....	44
2.5 Formy.....	44
2.6 Pec.....	45
2.7 Zkouška modifikace.....	46
2.7.1 Cíl zkoušky .....	46
2.7.2 Třídění vzorků a použité vybavení .....	47
2.7.3 Průběh zkoušky .....	47
2.7.4 Zpracování vzorků.....	48
2.7.5 Metalografický rozbor vzorků v litém stavu .....	49
2.7.6 Statistický rozbor mechanických hodnot po tepelném zpracování .....	52
2.7.7 Metalografický rozbor vzorků po tepelném zpracování.....	53
2.8 Diskuse získaných hodnot ze zkoušky modifikace .....	56
2.9 Měření vlivu chemického složení na mechanické vlastnosti .....	60
2.9.1 Cíl měření .....	60
2.9.2 Odstranění defektních vzorků .....	61
2.10 Diskuse měření vlivu chemického složení na mechanické hodnoty .....	62
3 Závěr.....	64
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk a symbolů	
Seznam příloh	

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Úvod

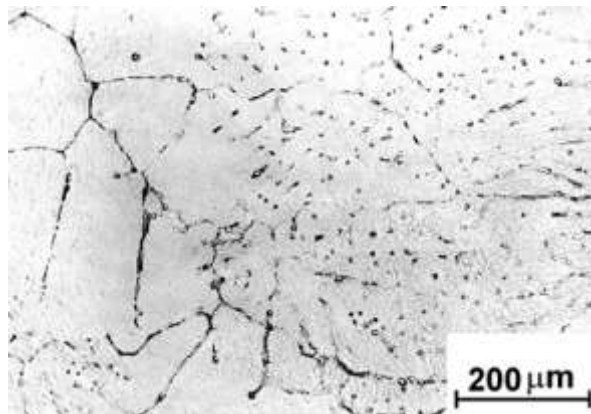
Hliník je velmi lehký, bílo šedý kov. Z hlediska moderních technologií je využíván hlavně pro svou nízkou hustotu a to převážně v letectví, automobilovém průmyslu a všude tam, kde je zapotřebí nízká hmotnost.

Mezi technickými kovy je používán velmi krátkou dobu, protože jeho první významnější využití přišlo až začátkem první světové války. Jako průmyslový kov se začal poprvé využívat ve 20. století jako jedna z komponent slavného auta „volkswagen brouk“. Od té chvíle se výroba hliníku rapidně zvýšila. Letecký průmysl si uvědomil, že čím lehčí jeho stroje budou, tím ekonomičtěji budou létat a začal jeho výrobu intenzivně podporovat. Nakonec takto hliník pronikl i do automobilového průmyslu.

Jak je všeobecně známo, nejdůležitější jsou slitiny hliníku, ne samotný rafinovaný prvek. Jeho vlastnosti jsou nízké a jako takový je v praxi v mechanicky namáhaných součástech nepoužitelný. Proto se používá jako matečný kov, do kterého se přidávají legury na zlepšení jeho vlastností. Tyto legury nejen že ovlivňují mechanické vlastnosti, ale i odolnosti vůči prostředí ve kterých se daná konstrukce nachází.

Další věcí, která ovlivňuje mechanické vlastnosti slitiny je technologický proces výroby. To zahrnuje tepelné zpracování, tváření, obrábění a jiné technologické postupy. Přesněji řečeno je takto ovlivněna krystalická struktura materiálu, která má samozřejmě vazbu na makroskopické vlastnosti.

Proto je na studium obsahů legur a vývoj správně ovlivňujícího technologického postupu brán velký zřetel. Při správné kombinaci můžeme docílit požadovaných výsledků, což je především velikost pevnosti, houževnatosti a mnoho dalších.



Obr. 1 Struktura 99,6 % Al, [3]

## 1.2 Historie používání hliníkových slitin

Objev prvku se datuje do počátku 19. století. [1] V té době byla jeho výroba natolik drahá, že na výstavě v Paříži roku 1855 byl vystaven hned vedle korunovačních klenotů a císař Ludvík Napoleon III. jej používal při státních návštěvách jako příbor. [1] První kdo dokázal hliník průmyslově extrahovat, byl v roce 1886 Američan Charles Martin Hall.[1] Za jeho objevem stojí jev elektrolýza, který se používá dodnes, samozřejmě ve značně pokročilejší formě. [1]

K rychlému rozšíření hliníkových slitin došlo během propuknutí obou světových válek, za kterých se využíval především v letecké technice. Po konci 2. světové války produkce hliníku klesla, protože se přestaly vyrábět letecké bojové stroje. První stroj, který opět obsahoval hliníkové komponenty, byl Volkswagen Brouk a tím byla odstartována produkce v průmyslu.

V Česku se setkáme se slitinami hliníku ve slévárnách využívajících tlakové lití do kokil, skořepinové přesné lití, ale i lití do písku a gravitační lití. Můžeme zaznamenat pokrok v technologiích i v přesnosti odlévání a zamezení vzniku mnoha vad. V budoucnosti se tak můžeme setkat s odlitky, které budou jak dostatečně pevné a tuhé, ale i dostatečně lehké s minimem vad.

## 1.3 Slévárenské slitiny hliníku

Jak už bylo řečeno, využívat čistý hliník v mechanicky namáhaných součástech nelze, z hlediska nízkých mechanických vlastností. S dokladovanou čistotou ho lze například využívat v metalurgických pochodech při výrobě železných slitin v podobě housek nebo jako plněný profil.

Pro využití v mechanicky namáhaných součástech se využívají slitiny hliníku často legovaných křemíkem, hořčíkem nebo mědí. Nejčastěji používané, až v **90%**, [2] jsou slitiny využívající křemík takzvané – **siluminy**. Slitiny legované hořčíkem jsou – **hydronálie** a slitiny legované mědí jsou **dural alumina** nebo také často **duraly**. Těmto legury se nazývají hlavní přísadové prvky. Dále se používají ještě vedlejší přísadové prvky jako titan, železo, chrom, mangan atd.

## 1.4 Mechanické vlastnosti hliníkových slitin

Mechanické vlastnosti u hliníkových slitin jsou ovlivněny celou řadou aspektů, z nichž je asi nejpodstatnější vlastní kovová hmota. Záleží tedy na rozložení a velikosti zrn (jejich disperzitě), na homogenitě materiálu, na tom jaké intermetalické fáze se v něm nacházejí, na tepelném zpracování, na velikosti a orientaci dendritů atd. Zjistíme, že nejlepší mechanické hodnoty se dosahují vyšší homogenitou materiálu, zmenšením kovových zrn a správné morfologii eutektika, což zlepšuje i slévárenské vlastnosti. Toho lze dosáhnout zrychlením tuhnutí ve formě nebo dobrým očkováním. Z technologického hlediska je proto nutné vědět do jakého typu forem se daná součást odlévá. U odlitků litých technologií tlakového lití do kovových forem je specifická jejich zvýšená tvrdost a pevnost oproti lití do písku až o 20%, někdy i více. [2]

Velikost zrn je velmi citlivá na rychlost chladnutí a neproběhne-li v dostatečném časovém horizontu, získáváme nemnoho usměrněných krystalů, které jsou po vybroušení a naleptání dokonce viditelné pouhým okem. To značně narušuje stabilitu odlitku a vede nás ke snaze odlévat velmi tenkostěnné odlitky, u nichž se mechanická tuhost zajišťuje velkým počtem žeber.

Důležité kontrolované hodnoty:

- Mez pevnosti ...  $R_m$  [Mpa]
- Mezkluзу ...  $R_{p02}$  [Mpa]
- Tažnost ...  $A_{50}$
- Tvrdost

- Mez pevnosti:

U běžných hliníkových slitin se dostáváme do rozpětí hodnot mezi 150 – 250 Mpa. [2] Postup, kterým dokážeme zvýšit tyto hodnoty, se jmenuje **vytvrzování**. Z tohoto hlediska pozitivním vedlejším efektem je také zvýšení tvrdosti a meze kluzu. Mez pevnosti  $R_m$  a tvrdost se zvýší o 30 – 50% a mez kluzu  $R_{p02}$  až o 80%. [2] U slitin Al-Si-Mg pak můžeme sledovat nárůst pevnosti k 330 Mpa. [2] U vysokopevných slitin na bázi Al-Cu je tato hodnota až 400 Mpa. [2]

- Tažnost:

U hliníkových slitin se tažnost pohybuje v rozmezí 1 – 4%. [2] Je-li ji nutné z technického nebo z technologického hlediska zvýšit, můžeme toho dosáhnout modifikací. Touto metodou lze razantně navýšit tažnost až o 200%. [2] Jiné mechanické hodnoty se bohužel touto metodou nezvyšují tak razantně. Mez pevnosti do 50%. [2] Po modifikaci získáváme hodnoty tažnosti  $A_{50}$  kolem 10%.

- Tvrдость:

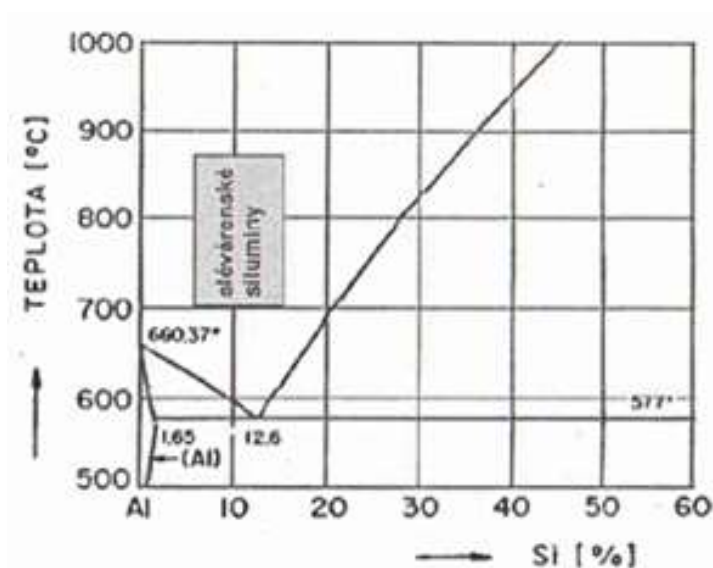
U hliníkových slitin typu Al-Si a Al-Cu můžeme očekávat tvrdosti v rozmezí hodnot od 60 – 80 HB. Díky technologickému postupu **vytvrzování**, můžeme dosáhnout až hodnot 100 HB. U slitin na bázi hořčíku naměříme převážně nižší hodnoty a to 50 – 60 HB. Měření dle Brinella se využívá nejčastěji, protože není ovlivněno mikronehomogenitou materiálu a tudíž jsou hodnoty dostatečně relevantní.

## 1.5 Slitiny Al-Si

Slitiny na bázi křemíku jsou nejpoužívanější slévárenské slitiny, a to díky jejich nejlepším slévárenským vlastnostem. Slévárenské siluminy většinou obsahují 5-13 %Si, s eutektickou koncentrací na koncentraci 12,5 %Si. Někteří autoři udávají i hodnotu 11,7 %Si. [3] V rovnovážném diagramu na obr. 2 je znázorněna eutektická teplota na 577°C. Koncentrace křemíku u nejčastěji používaných slévárenských slitin je vyznačena šedým obdélníkem.

Podle obsahu křemíku se siluminy dělí na:

- Podeutektické
- Eutektické
- Nadeutektické



Obr. 2 Rovnovázný diagram Al-Si, [2]

**Podeutektické siluminy** mají strukturu složenou z eutektika a sítě primárních dendritů fáze  $\alpha(\text{Al})$ . [2] Přidáme-li více křemíku, tak se vytvoří i více eutektika. Podeutektické slitiny obsahují od 7% do 11 %Si. [2]

**Eutektické slitiny** obsahují 11,5 – 13% Si a tak jako u většiny slitin i zde obsahuje matrice pouze eutektikum.

Struktura **nadeutektických slitin** je tvořena primární fází křemíku a hliníkovou maticí. Čím více je křemíku tím se zlepšují vlastnosti od pevnosti až přes oteřuvzdornost. Koncentrace bývá od kolem 14 – 17 %Si. [2] Výjimečně až 20 %Si. [2]

### 1.5.1 Chemické složení slitin Al-Si

Protože nemůžeme používat čistého kovu k mechanicky a ani jinak namáhaným součástem, přidáváme do kovu další prvky. Některé jsou významnější, jiné méně významné. Ať už ale chceme nebo ne, nacházíme v tavenině i prvky, které snižují vlastnosti a tak je jejich obsah nepřipustný. Vynakládáme snahu na jeho co nejnižší koncentrace. Je paradoxem, že koncentrace pozitivně působících prvků je většinou mnohonásobně vyšší než prvků, které vlastnosti degradují. Složení slitin hliníku bývá rozdělováno do čtyř základních složek: [2]

- základní prvek
- hlavní přísadový prvek
- vedlejší přísadový prvek (legura)
- doprovodné prvky (nečistota)

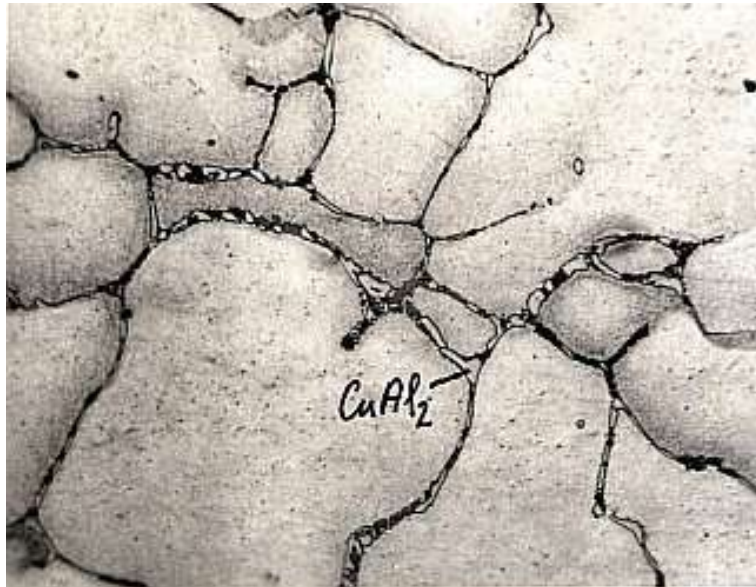
Základní prvek je matrice kovu a tedy ten prvek, kterého je ve slitině nejvíce. Podle hlavních přísadových prvků pak rozeznáváme poddruhy slitiny, například siluminy nebo duraly. Legující prvky jsou takové prvky, které záměrně přidáváme do taveniny za účelem zlepšení technologických nebo mechanických vlastností. To musíme brát zvlášť v úvahu při působení různých prostředí. Doprovodné prvky jsou takové prvky, které nepřidáváme záměrně do taveniny. Jejich zdrojem může být vsázka nebo technologická zařízení.

**Křemík** je základním přísadovým prvkem ve slitinách Al-Si. Zlepšuje téměř všechny slévárenské vlastnosti, a proto se při odlévání náročných odlitků doporučuje zvýšení koncentrace křemíku. Snižuje stahování slitiny a tvorbu staženin. Zvyšuje zabíhavost

a snižuje nebezpečí vzniku trhlin nebo prasklin. Zvyšuje se odolnost proti korozi a oteřuvzdornost. Zvyšuje také kluzné vlastnosti.

**Měď** se ze všech legur ve slitinách hliníku používá nejdéle. Zvyšuje pevnost a tvrdost a snižuje tažnost. Korozivzdornost se také zhoršuje. Výrazně se zlepšuje

obrobitelnost. Koncentrace se pohybuje v rozmezí od 0 do 5 %Cu. [2] Na dolegování se používá jako předslitina AlCu. Překročí-li její koncentrace 1%, můžeme na metalurgickém výbrusu sledovat síťkovitý charakteristický tvar precipitátů  $\text{CuAl}_2$ . Eutektikum Al-Si- $\text{CuAl}_2$  pak můžeme sledovat na obrázku 3. [2]



Obr. 3 Slitina AlCu4Mg1, [7]

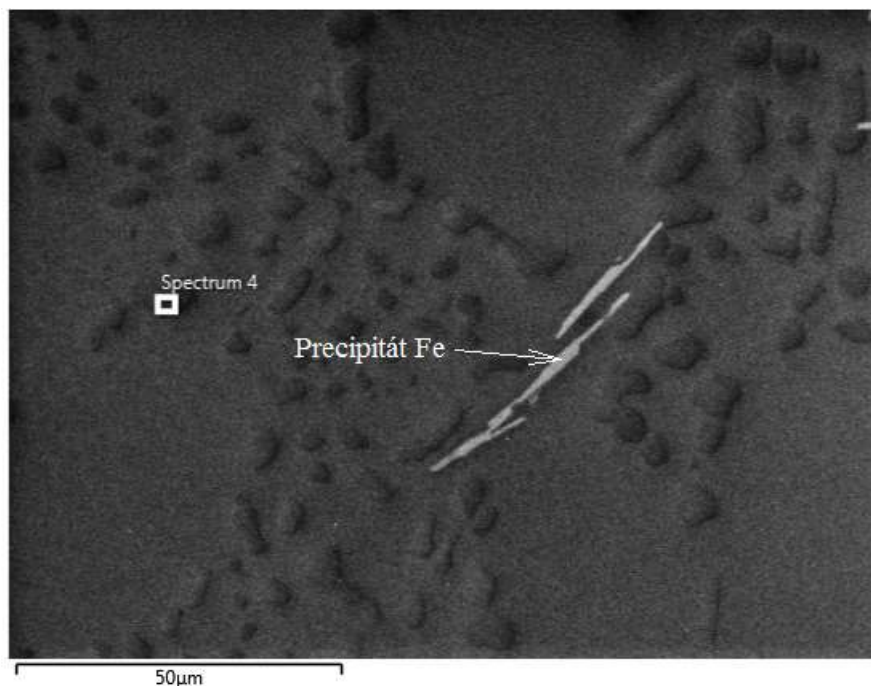
**Hořčík** se ve slitinách hliníku používá kvůli technologii vytvrzování. Přidáním hořčíku vzniká v kovu intermetalická fáze. Předpokladem k vytvrzování je legování prvkem s výraznou změnou rozpustnosti v daném rovnovážném diagramu. Změna rozpustnosti tedy vede k možnosti výroby přesyceného tuhého roztoku, což zvýší mechanické vlastnosti slitiny. Legujeme do koncentrací od 0,3 do 0,7 %Mg. [2] V těchto koncentracích nepozorujeme žádné výrazné negativní vlivy jak slévarenských vlastností tak ani korozivzdorných vlastností. Bez tepelného zpracování má jako legura jen malý vliv na mechanické vlastnosti, mírně zvyšuje tvrdost a snižuje tažnost. S jeho zvyšujícím se obsahem se zvyšuje i tvrdost slitiny.

**Železo** bývá velmi často bráno jako nečistota. Do taveniny se většinou dostává během výrobního procesu slitiny a to díky špatnému ošetření manipulujících nástrojů, naběraček atd. Díky vysoké rychlosti rozpustnosti je pak tato provozní nedbalost původcem zvýšení nákladů, v horším případě i úrazů.

Při tuhnutí slitiny železo prostupuje maticí v podobě dlouhých jehlic jako fáze  $\text{Al}_3\text{FeSi}$ , které významně narušují mechanické hodnoty odlitků. [2] Toto negativní působení železa rychle narůstá při překročení koncentrace 0,4 %Fe. Pro odstranění těchto nežádoucích vlastností se proto slitina leguje manganem a to až do ½ obsahu železa. [2] Takto vzniká nová, již méně škodlivá fáze  $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ , která se nazývá „čínské písmo“ nebo také „rybí kost“. [2]

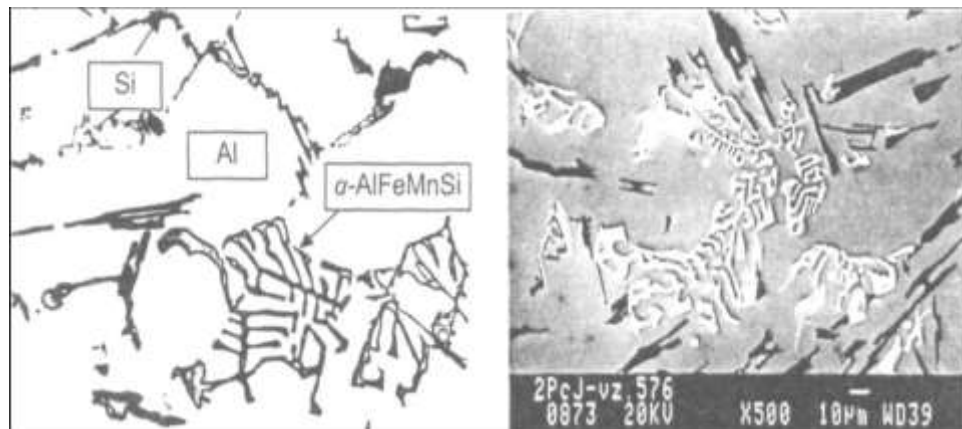
K navýšení snížených vlastností kovu přispívá též rychlost chladnutí. Při rychlejším chladnutí jehlicovitá fáze nemá dostatek času na růst, a proto neprostupuje tolik materiálem. Z tohoto důvodu se jeví jako nejlepší variantou lití do kovových forem. Zde na rozdíl od lití do písku je kov vychladlý téměř okamžitě a lze tak snížit legování manganem a šetřit provozní výdaje. V tomto případě se ale projevuje i malá pozitivní vlastnost příměsí železa. Po odlití se s koncentracemi do 1 %Fe odlitek snáze vyjímá z formy, nelepí se na ni a navyšuje její provozní čas. [2] Proto se u odlitků odlévaných tlakovým litím volí mírné legování železem.

U odlitků pracujících za ztížených mechanických podmínek, vysokopevné a dynamicky namáhané nesmí být koncentrace železa vyšší než 0,15 %Fe. [2] U běžných odlitků je hranice stanovena od 0,3 do 0,6 %Fe. [2] Na slévárenské vlastnosti nemá při těchto nízkých obsazích železo téměř žádný vliv. Jakmile se přesáhne obsah Fe, začne se projevovat problém při tuhnutí. Díky velkým plochám jehlic nebude moci tavenina dosazovat a začnou vznikat vady jako je pomezita a řediny.



Obr. 4 Slitina AlSi7Mg0,6, jehlicová fáze železa, zdroj - LyraTescan el. mikroskop s dovolením Ing Karla Krahuly

**Manganse** využívá hlavně pro snížení špatného vlivu železa. Jeho koncentrace jinak nemá pro slitiny hliníku větší význam. Leguje se kolem ½ obsahu železa, tedy bývá kolem 0,6 %Mn. [2] Vzniká fáze  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$  díky jejíž morfologii se rapidně zvyšují mechanické hodnoty odlitků. [2]



Obr. 5 Výrazná fáze  $\alpha$ -AlFeMnSi, čínské písmo, [11]

**Titanem** legujeme, protože vytváří zárodky tuhého roztoku. Tímto způsobem zajišťujeme dostatečný počet zrn, jejich zjemnění a vhodnou disperzitu, homogenizaci mechanických vlastností, zlepšení korozivzdornosti, zlepšení obrobitelnosti a menší energetické nároky na povrchovou úpravu. [2] Očkovací účinek titanu umocňuje koncentrace bóru. Koncentrace titanu by měla být kolem 0,2 %Ti. [2]

**Zinek** zvyšuje zabíhavost slitiny a zlepšuje obrobitelnost. U tlakově litých odlitků usnadňuje jejich vyjímání z formy. V některých slitinách typu Al-Si-Cu se leguje 1-3 %Zn. [2] U lití do písku se pohybujeme pod jedno procento. [2] Není významným legurem. V případě vyššího legování hrozí nebezpečí lokální porezity v mezidendritických prostorech. Viz. obr. 6.

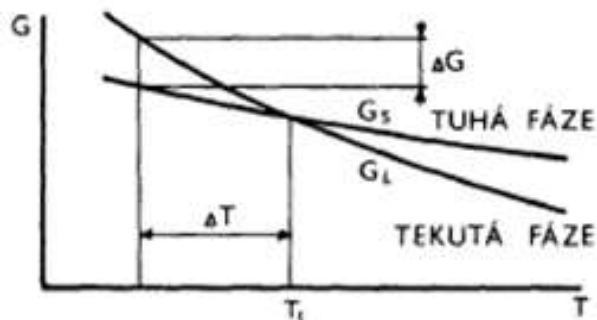


Obr. 6 Slitina AlZn6MgCu, na výbrusu v litém stavu patrná mezidendritická porezita, [7]

**Nikl** se používá jako legura o koncentraci 1-2 %Ni ve slitinách, které mají pracovat v prostředích se zvýšenou teplotou. [2] Snižuje koeficient tepelné roztažnosti.

### 1.5.2 Krystalizace slitin Al-Si

Při odlití nataveného kovu začne unikat jeho tepelná energie skrz formu, která ji dále předává svému okolí, čímž se tekutý kov začne ochlazovat. Tento proces pokračuje do té doby, než se energie obsažená v odlitku nezačne blížit tepelné energii ve svém blízkém okolí. Během této výměně energie v odlitku proběhne děj, kterému říkáme tuhnutí. Tuhnutí začíná krystalizací primárních fází a končí úplným ztuhnutím odlitku. Pak probíhá ochlazování.



Obr. 7 Graf volných entalpií fází za daných teplot, [5]

Objasnění začátku krystalizace vysvětluje následující citace „Podmínkou krystalizačního procesu uvnitř soustavy je termodynamická stabilita vznikající fáze. Vznikající fáze musí mít menší volnou entalpii než fáze původní. Při teplotách krystalizace se tekutá a tuhá fáze nachází v termodynamické rovnováze, viz. obr. 7. Při teplotách nižších má menší hodnotu volné entalpie tuhá fáze, proto je termodynamicky stabilnější. Snížení volné entalpie při přechodu z tekutého do tuhého skupenství může nastat jen za určitého podchlazení. To znamená, že síla krystalizačního procesu je úměrná stupni podchlazení taveniny a podle Gibbsa je zárodek tuhé fáze stabilní jen při určitém kritickém rozměru.“ [6] Počátek krystalizace tedy závisí na velikosti podchlazení. Toto podchlazení není neměnné a lze jej ovlivnit, např. velikostí tepelného gradientu nebo zvětšením koncentrace prvků působících jako zárodky krystalů. To ovlivní počet krystalů, homogenitu a disperzitu materiálu.

#### Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$

V technických slitinách Al-Si dochází ke krystalizaci na vhodných krystalizačních zárodcích. Tyto zárodky mají různý původ, jako jsou vměstky uvolněné z vyzdívek pecí nebo pánví a jsou v tavenině přirozeně, nebo takové zárodky, které do taveniny přidáváme úmyslně. Zvyšování počtu zárodků nazýváme očkování.

Při lití do pískových forem je krystalová struktura značně nehomogenní bez dostatečného očkování. Kov zde chladne pomalu a přirozených zárodků se aktivuje málo. U lití do kovových forem se aktivuje o značný počet více krystalových zárodků a to díky velkému tepelnému gradientu, vytvořeném prostřednictvím formy. Tato struktura je proto

jemnější a má podstatně lepší mechanické vlastnosti.

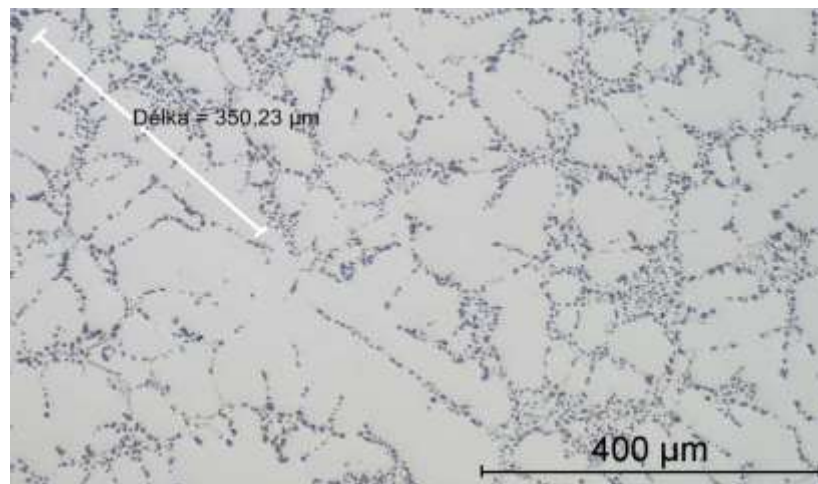
Jakmile vznikne krystalizační embryo o stabilní velikosti, začne z něj vyrůstat krystal v podobě takzvaného dendritu. Dendrit je stromečku podobný útvar s hlavními a vedlejšími, sekundárními větvemi. Je tvořen z primárního hliníku. Popis dendritické struktury je založen na vzdálenosti sekundárních ramen od sebe samých. Metoda měření se nazývá DAS (dendrit armspacing).[2] Měření probíhá v laboratoři, kde je oko mikroskopu zaměřeno na již vybroušený, vyleštěný a mírně naleptaný povrch vzorku. Na výbrusu se pak změří vzdálenost os sekundárních větví dendritu a to přes více než dvě větve. Tuto hodnotu pak zaneseme do vzorce (1):

$$DAS = \frac{L}{n - 1} \quad (1)$$

L...vzdálenost os sekundárních větví dendritů

n...počet větví

Hodnoty DAS se pohybují od 10 do 150  $\mu\text{m}$ , v provozu častěji 20 – 60  $\mu\text{m}$ . [2] Tyto hodnoty významně závisí na rychlosti ochlazování. Čím větší je rychlost ochlazování tím je hodnota DAS menší a tím více se zmenšívzdálenost jednotlivých ramen od sebe. Lze pak předpokládat lepší mechanické vlastnosti, viz obr. 8.



Obr. 8 Měření vzdálenosti mezi sekundárními dendritickými rameny, výbrus

### Krystalizace eutektika

Eutektikum je u slitin Al-Si složeno ze dvou fází, z tuhého roztoku AlSi a čistého křemíku. Jeho krystalizace nastává v okamžiku, kdy teplota klesne těsně pod eutektickou teplotu. Přeměňuje se tak zbytek tekuté fáze, který do té doby nestihl ztuhnout.

Křemík se v eutektiku vylučuje téměř čistý. Má minimum příměsí a velikost jeho zrn se pohybuje v rozmezí mikrometrů až do několika milimetrů. [2] V eutektiku se může vyloučit ve třech základních morfologiích:

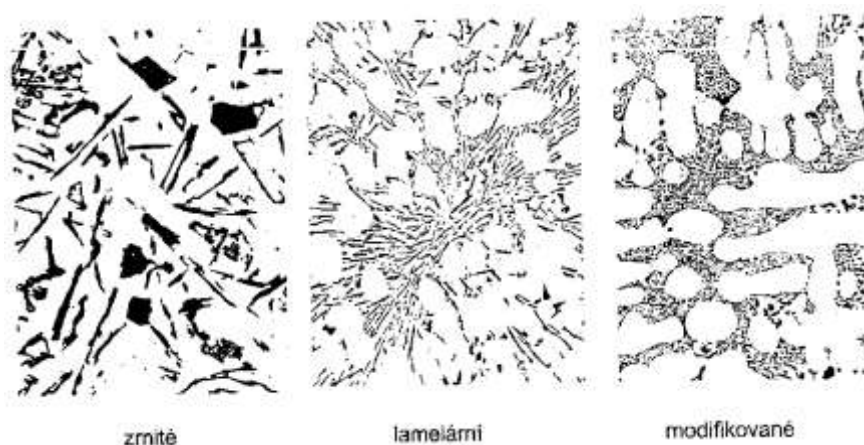
- Zrnité
- Lamelární
- modifikované

Křemík krystalizuje na zárodcích založených na bázi fosforu, fosfidu hlinitého. Fosfor není třeba legovat, neboť se dostane do taveniny hliníku ze surovin, z vyzdívek, metalurgických přípravků a solí a to v dostatečném množství, řádově jednotkách ppm.[2]

**Zrnité eutektikum**(obr. 9) vzniká při koncentracích 5-10 ppm P. Morfologie tohoto typu eutektika na výbrusu vypadá jako větší ostrohranná lamelární zrna. Pro klasickou technickou čistotu slitiny je to dostačující tvar. Krystalizace je málo energeticky náročná a není třeba velkého přechlazení, 1 - 2 °K. [2]

Krystalizace **lamelárního eutektika**(obr. 9) je podnícena velkou čistotou slitiny. Obsah fosforu by neměl přesahovat 1 – 2 ppm P. [2] Vzhledem k uspořádanější morfologii je nutné většího podchlazení. Na výbrusu jej lze rozeznat jako lamely se snahou krystalizace v rovnoběžných rovinách vůči sobě. Je také markantní jejich menší velikost oproti zrnitému eutektiku. Antimon podporuje vznik lamelárního eutektika.

**Modifikované eutektikum**(obr. 9) vzniká ve slitině za pomoci modifikátorů, hlavně sodíku a stroncia. Sodík má největší modifikační účinek. Na vybroušeném vzorku je rozpoznatelné jako seskupení teček v mezidendritických prostorách. Morfologie tohoto eutektika vypadá jako jemné vlákno. Díky modifikaci se rapidně zvyšují mechanické hodnoty odlitků.



Obr. 9 Morfologie eutektika,[2]

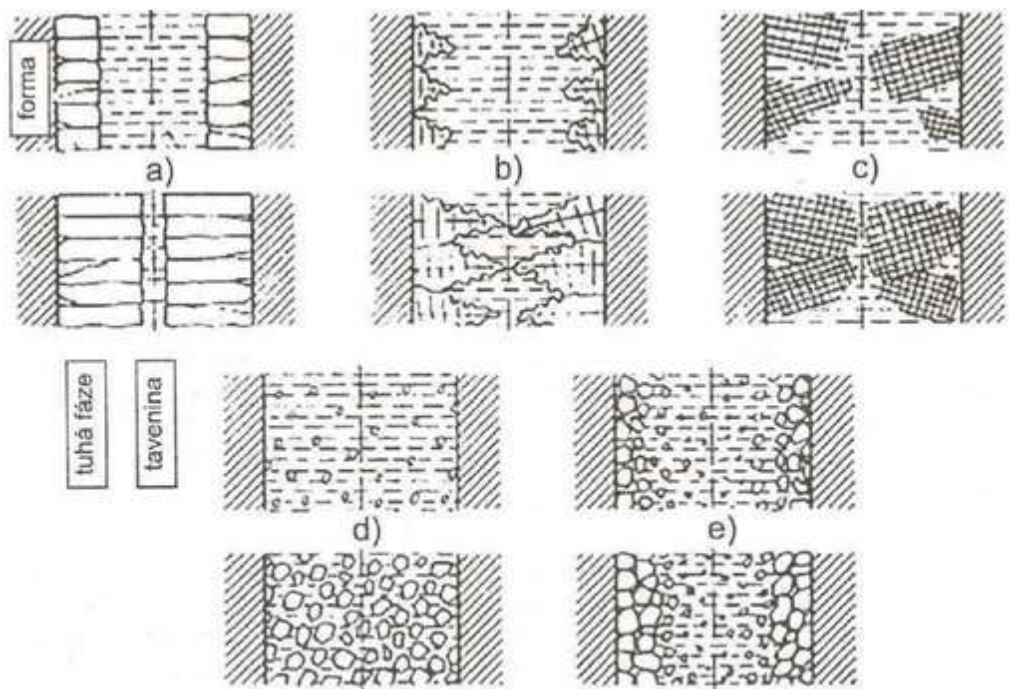
Jemnozrnost struktury je i nadále závislá na rychlosti tuhnutí. Za stejných podmínek bude modifikovaný materiál jemnozrnější. Vzhledem k různým technologiím není nutné v případě lití pod tlakem do kovových forem téměř vůbec modifikovat. Kvalita struktury

je zajištěna velkým teplotním gradientem.

### Tuhnutí a vliv na krystalovou strukturu

Vnitřní strukturu materiálu, morfologii krystalů, ovlivňuje teplotní gradient, kvalita očkování a schopnost očkovačla tvořit zárodky pro krystaly, interval tuhnutí a další. Za různých podmínek tak můžeme pozorovat různé druhy krystalů. V zásadě rozdělujeme tuhnutí na dva druhy:

- **exogenní** ... materiál tuhne směrem od povrchu proti vektoru teplotního gradientu směrem k tepelné ose
- **endogenní** ... materiál tuhne kašovitě, krystaly vznikají i před tuhnoucí frontou



Tuhnutí exogenní: a) s rovinným fázovým rozhraním, b) dendritické, c) buněčné

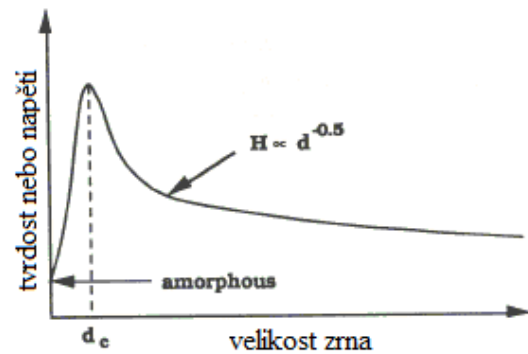
Tuhnutí endogenní: d) objemové, e) vrstevné

Obr. 10 Typy tuhnutí, [3]

Materiály, které mají krátký interval tuhnutí, tuhnou spíše exogenně od stěn odlitku. Tento proces je s ohledem na technologii prospěšný, protože vzniklé krystaly nebrání dosazování kovu z nálitků. V takto ztuhlých odlitcích nacházíme převážně velké staženiny koncentrované v tepelných osách. [3] Materiály s širokým intervalem tuhnutí naopak tuhnou spíše endogenně a vytváří tak mechanickou zábranu mezi krčkem nálitku a odlitkem. Dosazování kovu je tak značně omezeno a v materiálu zůstávají buňky s ještě neztuhlým kovem, který je využit k dosazení do kovu již ztuhlého. Vzniká tak mnoho mikrostaženin, ředin, které snižují těsnost odlitků. [3] Viz obr. 10.

### 1.5.3 Hall-Petchův vztah

Pevnost materiálu je odvozena od velikosti vazebních sil mezi atomy. Tyto atomy se v kovech shlukují do zrn, které mají velmi pravidelnou strukturu. Lze říci, že při zachování menšího chaosu v polohách molekul mezi sebou se dosahuje vyšších mechanických hodnot s ohledem na stejné chemické složení. Tato struktura je však rušena hranicemi zrn, které jsou koncentrátoři vad krystalových mřížek. Velikost maximálních mechanických vlastností pak závisí hlavně na těchto nejslabších vazbách.



Obr. 11 Závislost tvrdosti nebo pevnosti na velikosti zrn, [27]

Hall-Petchova rovnice popisuje vztah mezi mechanickými hodnotami a velikostí zrn. Opírá se o jednoduchou teorii, založenou na principu rozsahu plochy, která je součtem všech ploch s vadami mřížky mezi zrna. Čím více zrn potom máme, tím je tato plocha větší a je vyšší i počet vazeb mezi atomy v mezikrystalovém prostoru. Rovnice je odvozena z průměrného poloměru zrn v materiálu a velikosti vnějšího napětí:

$$\sigma_K = \sigma_0 + K_y \cdot d^{-0.5} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = M \cdot \tau_0 \quad (3)$$

$$K_y = M \cdot k_y \quad (4)$$

$\sigma_K$  ... výsledné napětí [MPa]

$M$  ... Taylorův orientační faktor

$\tau_0$  ... napětí brzdící pohyb nezakotvených dislokací

$k_y$  ... konstanta zahrnující vliv hranic

$d$  ... průměr zrna

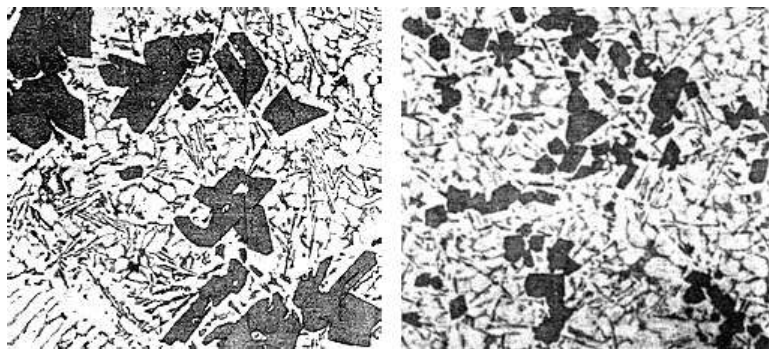
#### 1.5.4 Očkování slitin Al-Si

Očkování je technologický postup, při kterém přidáváme do slitiny materiál za účelem zvýšení počtu zárodků. To má za následek zvýšení počtu zrn což zvýší homogenitu, disperzitu, mechanické vlastnosti a zjemní strukturu.

Očkování probíhá přidáním prvků Ti a B do natavené slitiny. Vysoké účinnosti se dosahuje u podeutektických slitin s vysokým obsahem fáze  $\alpha$ , což je koncentrace křemíku 5 – 7 %Si. [7] Očkovací prvky se přidávají ve slitinách na bázi TiAl (např. AlTi6), které obsahují intermetalickou sloučeninu  $TiAl_3$  a AlB (např. AlB4) s obsahem intermetalické sloučeniny  $AlB_2$ . Přidáním samotného titanu nepřináší dostatečný efekt. [7] Je vhodné za pomoci sloučenin boru tento efekt násobit.

Nejstabilnější očkovací účinek je zaručen přidáním samotné slitiny na bázi bóru. Jako krystalizační zárodky pak působí slitina  $AlB_2$ . Dosazení této sloučeniny do taveniny je však obtížné. Díky velkým krystalům  $AlB_2$  se slitina jen velmi pomalu rozpouští a hrozí tak segregace. [7] U slévárenských slitin se proto častěji využívá slitina na bázi SiB. Zde segregace nehrozí.[7]

Účinek očkování teoreticky závisí na teplotě a času do ztuhnutí. Dle Michny [7] je důležité, aby se přidané slitiny nerozpustily v množství, které je kritické. Zůstane-li tavenina na teplotě očkování delší dobu nebo se nepatřičně zvýší teplota, očkovací účinek rychle vymizí rozpuštěním očkovadel.[7] Očkovací účinek se dostavuje velmi rychle v řádu minut. [6] Optimální doba výdrže je od 5 do 10 minut za stabilní teploty maximálně do 750°. [7] Konkrétní teplotu si stanovují výrobci odzkoušením.



Obr. 12 Vliv očkování na strukturu, vlevo neočkováno, vpravo očkováno [12]

Vnášení slitin můžeme provádět následujícími způsoby:

- **Očkovací soli**, která se přidá na hladinu a ponorným zvonem se ponoří do taveniny a promíchá se. Zbytky soli vyplavou na hladinu a stáhnou se z kelímku.
- **Předslitinami**, které se ve slévárnách používají jako tyče (většinou o průměru 10 mm a délce asi 500 mm), přičemž se taviči zadá kolik tyčí vhodit do kelímku. [6] Po naočkování je nutné taveninu promíchat.

### 1.5.5 Modifikace eutektika ve slitinách AlSi

Zjemňování struktur slévárenských slitin hliníku za pomoci modifikace je jednou z hlavních technologií, které přináší výborné výsledky v oblasti zvyšování mechanických vlastností. Modifikace je proces, při kterém vnášíme do taveniny prvky ovlivňující morfologii zrn. Prakticky modifikujeme zrna eutektického křemíku tak, aby jejich tvar působil pozitivně na mechanické hodnoty.

Morfologie nemodifikovaného eutektického křemíku je založena na tvorbě hexagonálních těles. [7]Vzhledem k tomu, že eutektikum je anomální, roste křemík velmi rychle. [7]Tvar, který pak na výbrusu vypadá jako dlouhé jehlice probíhající do značné vzdálenosti hliníkové  $\alpha$  fáze má velký a hlavně negativní vliv na mechanické hodnoty slitiny. Hlavní prvky, které ovlivňují morfologii křemičité fáze, jsou sodík, stroncium a antimon.[6]

- **Modifikace sodíkem:**Díky bouřlivé reakci při rozpouštění sodíku v tavenině nabíhá modifikační účinek velmi rychle.Modifikační přípravky obsahující sodík jsou různých druhů. Můžeme používat čistý sodík ve formě patron (FOSECO, doba účinnosti 30 minut,[7]) nebo ve formě solí (T3, doba účinnosti 10 – 15 minut,[7]). Použití sodíku je velmi běžné, ale nese sebou i negativní vlivy na technologii.

- Zvyšuje se stupeň naplynění.
- Po modifikaci není možné odplyňovat ani filtrovat taveninu. Ztrácí se efekt modifikace.
- Zvyšuje se koeficient objemové smrštivosti což má za následek zvyšování objemu staženin a ředin.
- Velmi rychle se vypařuje z taveniny, což znamená, že se musí v pravidelných intervalech znovu dosazovat.

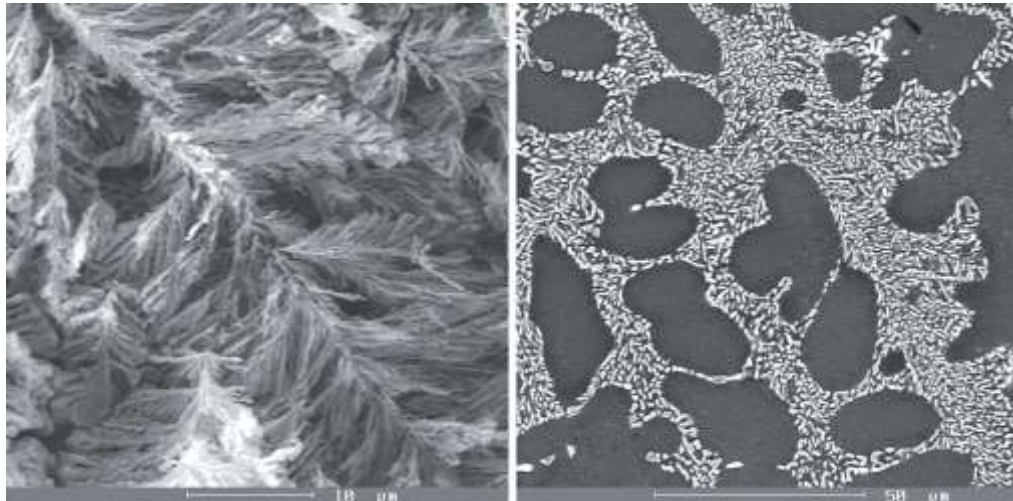
-**Modifikace stronciem (obr. 13):** Vzhledem k existujícím negativním vlivům použití sodíku jako modifikátoru byly tendence nalézt jiný, jenž tyto vlivy nemá. Stroncium má v tomto směru velké předpoklady, a proto je jeho použití čím dál častější. [7] Modifikační účinek trvá od 1 – 2 hodin. [7]Pokud je do taveniny přidáno beryllium v obsahu od 0,05 do 0,2 % Be, tak se tento účinek prodlouží až na 10 hodin. [7]Do taveniny se přidává ve formě předslitiny a to většinou typu AlSiSr.[7] I v případě použití stroncia existují negativa.

- Díky značné atomové hmotnosti je třeba často míchat taveninu.
- Optimální modifikační účinek se dostavuje později než u sodíku.

-**Modifikace Antimonem:** Antimon je dalším modifikátorem. Jeho modifikační účinek je trvalý. Přidává se již v hutích. Nevýhodou použití antimonu je tlumení vlivu stroncia a sodíku na strukturu.

Dále se k modifikaci používají telur, síra, fosfor a vápník. Fosfor má podobný vliv na strukturu jako antimon, ale používá se jen u nadeutektických slitin a taktéž výrazně tlumí

modifikační účinek sodíku a stroncia. Dle Kořeného [7] je kombinování prvků za účelem modifikace nedostatečně prozkoumáno.



Obr. 13 Modifikovaná strukturalitiny AlSi10MgMn 0,04 %Sr, vlevo detailní pohled REM, tyčinky až vlákna eutektického křemíku, vpravo struktura v menším zvětšení, výbrus, REM, [7]

## 1.6 Plyny ve slitinách hliníku

Každý roztavený kov je schopen v sobě rozpustit určité množství různých plynů. Tyto se do slitin dostávají z okolní atmosféry, z vyzdívek kelímků, pánví, forem, formovacích směsí atd. U slitin hliníku je v tomto směru nejdůležitějším plynem **vodík**, jehož vliv na strukturu je největší.

### 1.6.1 Rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku

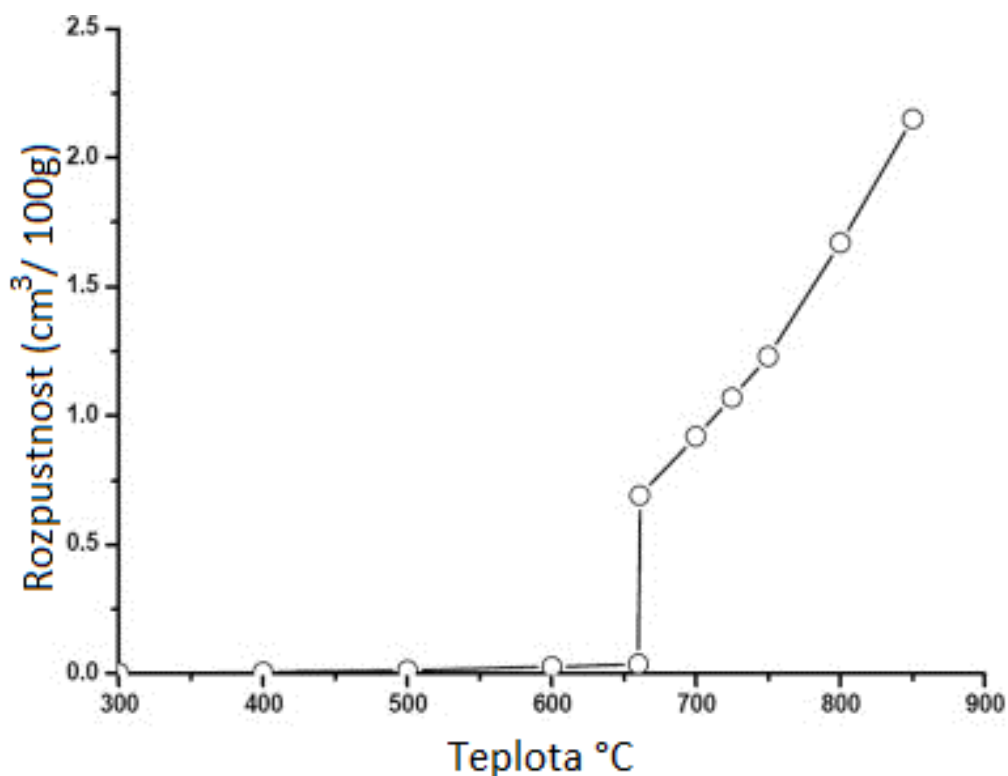
Vodík slitiny hliníku absorbují velmi intenzivně. Zdrojem vodíku jsou dnes buďto atmosférická vlhkost nebo přímo voda v pojivovém systému forem. Dalším zdrojem vodíku mohou být rafinační soli. Rozpustnost vodíku je odvozena od rovnovážného stavu soustavy, ve které probíhá tento děj. Záleží tedy na teplotě kovu, parciálním tlaku vodíku v atmosféře a na jednotlivých konstantách pro každý kov, v tomto případě hliník.

$$\log S = \frac{1}{2} \cdot \log P_{H_2} - \frac{A}{T} + B \quad (5)$$

de:      S      ...      rozpustnost vodíku v tavenině [ $\text{cm}^3 \cdot 100\text{g}^{-1}$ ]  
            $P_{H_2}$     ...      parciální tlak vodíku v atmosféře[kPa]  
           A,B    ...      konstanty pro daný kov[3]

Problém v případě rozpuštění vodíku v hliníku shledáváme v tom, že se razantně mění rozpustnost vodíku v tekutém a tuhém stavu, vizobr.14. Při tuhnutí se rozpustnost snižuje, což způsobuje uvolňování plynu do právě tuhnoucího kovu. Uvolněný plyn pak vytváří bubliny, které dále ovlivňují mechanické hodnoty kovu. To je nepřijatelné.

Množství které je rozpuštěno, může být menší než rovnovážné. K tomu je zapotřebí dobré odplynění nebo separace taveniny od jakékoliv vlhkosti, od jakéhokoliv zdroje vody. Může být vyšší než rovnovážné, ale v důsledku nerovnovážných pochodů (vysoká rychlost ochlazování) kov zatuhne a plyn se nedostatečně vyloučí a zůstane rozpuštěn v matici. Takový stav je nazýván přesycený tuhý roztok.[3]



Obr. 14 Závislost rozpustnosti H<sub>2</sub> v Al v závislosti na teplotě, [8]

V praxi je nejdůležitější veličina teplota v závislosti na rozpustnosti vodíku v Al. Díky zvyšování teploty se zvyšuje i rozpustnost vodíku a je tedy čím dál obtížnější dodržet správné koncentrace vodíku. Svůj vliv také má délka setrvání na dané teplotě. Tato rozpustnost je závislá na parciálním tlaku H<sub>2</sub> v atmosféře. Vyjádřena je Sievertsovým zákonem (3):

$$S = K \cdot \sqrt{P_{H_2}} \quad (6)$$

K ... konstanta

### 1.6.2 Vznik plynových dutin v odlitcích

Dutiny v odlitcích vznikají díky snižující se rozpustnosti vodíku v matici kovu. Děje se to za pomoci difuze nebo tvorby plynových bublin. Za předpokladu neměnného parciálního tlaku vodíku v atmosféře je významným vlivem pouze snižování teploty.

Bubliny se v matici tvoří za pomoci heterogenní nukleace, kdy se zárodek tvoří na cizích tuhých částicích. [3] Heterogenní nukleace je méně energeticky náročná než

homogenní nukleace. Podmínky pro vznik bubliny na cizím zárodku jsou dány úhly smáčení, tedy vlivem povrchového napětí mezi látkami. Výsledný úhel smáčení je dán vztahem (4). Znázorněno viz. obr. č. 15.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p}}{\sigma_{p-t}} \quad (7)$$

Kde je:

- $\sigma_{z-t}$  ... povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou
- $\sigma_{z-p}$  ... povrchové napětí mezi zárodkem a plynem
- $\sigma_{p-t}$  ... povrchové napětí mezi plynem a taveninou



Obr. 15 Schéma heterogenní nukleace bubliny na cizím zárodku, [3]

Vhodné tuhé částice pro nukleaci bublin jsou zejména oxidy obsažené v tavenině. Z rovnice vyplývá, že se bubliny tvoří na částicích, které mají nízkou smáčivost vůči tavenině. Což splňují ve větší míře právě oxidy.

### 1.6.3 Mechanizmy vzniku porezity

Kvalitní odlitky jsou takové, které se vyznačují nízkou porezitou. Porezita je vada uvnitř odlitku, která může vznikat třemi způsoby. Buďto čistě nukleací bublinnebodíky zmenšování objemu kovunebo kombinací těchto dvou procesů, což je nejčastější případ. [3]

Z výzkumů vyplývá, že pro vznik vodíkové porezity musí být splněny následující podmínky:[3]

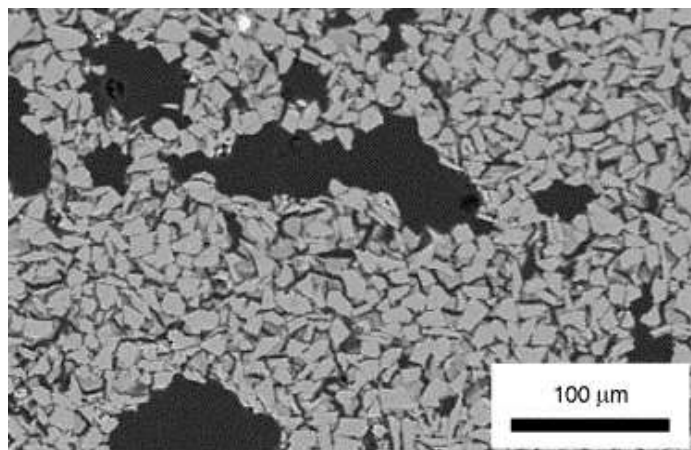
- S ohledem na okolní podmínky musí být překročena rovnovážná koncentrace vodíku v tavenině.[3]
- Ke každé rychlosti chladnutí lze přiřadit koncentraci vodíku jenž nezpůsobí porezitu. [3]
- Každé snížení koncentrace vodíku sniží objem a povrch porezity v závislosti na rychlosti tuhnutí. [3]
- Pro každou slitinu a koncentraci vodíku platí, že při zvýšení rychlosti chladnutí se zmenší objem a plocha porezity. [3]

O velikosti porezity také rozhoduje celkový atmosférický tlak plynů působících na odlitek, nejčastěji atmosférický tlak. Při snížení tlaku například vývěvou se objem porezity zvýší a naopak. To má vliv na mechanické hodnoty. Homogenita rozdělení porezity také lokálně ovlivňuje mechanické hodnoty odlitků.

Při tuhnutí odlitku vznikají zárodky dendritů kovové matrice a dále rostou. Tyto dendrity mohou přehradit přísun taveniny k tuhnoucí matici a díky zmenšování objemu pak vzniká lokální mikrostaženina. Viz. obr. 17. Díky tomu v tomto místě prudce klesá tlak. Do míst s nižším tlakem pak může difundovat vodík. Díky tomuto mechanismu jsou staženiny dobrým místem pro tvorbu plynových dutin. [3]

Naprostá většina dutin ve slitinách hliníku je tvořena kombinací výše zmíněných mechanismů. Samostatné bubliny nebo staženiny jsou ojedinělé. Na výbrusu je lze poznat typickým tvarem.

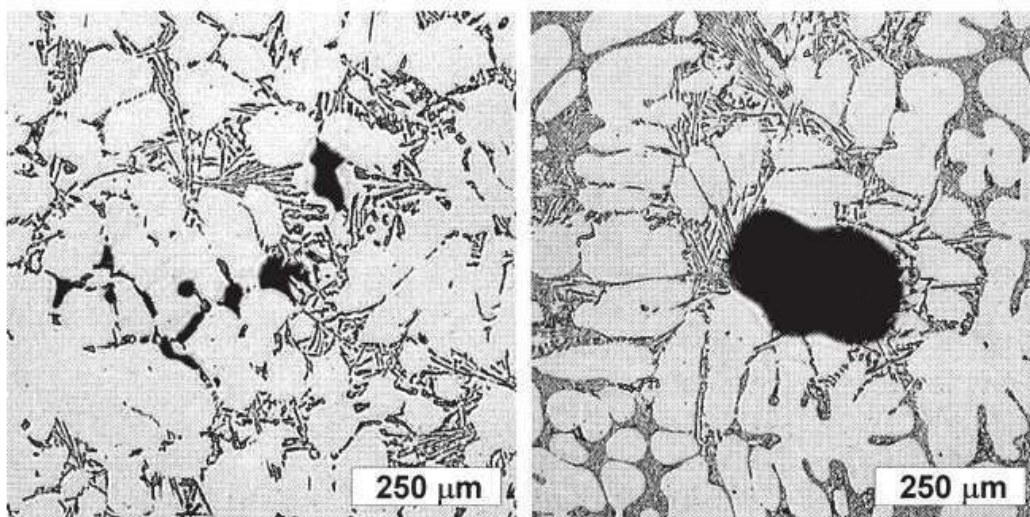
Plynové bubliny jsou oválné až kulaté a nekopírují svým tvarem kov. Mikrostaženiny naopak kov přímo kopírují. Běžné dutiny tedy z části kopírují členitou strukturu dendritů, ale jsou i částečně zakulacené, zaoblené. Typy dutin jsou znázorněné na obr. č. 17.



Obr. 16 Vodíková porozita, [13]

Rozložení porezity v odlitku není vždy homogenní. Záleží samozřejmě na rychlosti tuhnutí, atmosférickém tlaku (parciálním tlaku) a obsahu vodíku. Dále je však také důležitá orientace odlitku vůči gravitaci, jestli tuhne exogenně nebo endogenně a na tloušťce a tvaru odlitku.

Z hlediska mechanických vlastností je vhodnější při daném stejném stupni naplynění homogenita rozložení dutin, ne koncentrované staženiny. Lepší rozptýl staženin, dutin, vzniká při tuhnutí velmi rychlém a endogenním. Kašovitě tuhnutí zaručí rovnoměrné rozptýlení staženin. Bude-li odlitek tuhnout exogenně, zvýší se pravděpodobnost vzniku velkých staženin v tepelných osách odlitků. Takto kov tuhne při dlouhém ochlazování a vodík tak má čas na difundování do děr a zvyšuje tak v nich svůj tlak.



Obr. 17 Detail mikrostaženiny (vlevo) a vodíkové bubliny, [3]

#### 1.6.4 Odplyňování hliníkových slitin

Odplyňování je technologický postup, při kterém se v tavenině snižuje obsah plynů, které jsou v ní rozpuštěné. Potenciální vznik vnitřních vad způsobených vodíkem je pak snížen na minimum a zvyšuje se tak předpoklad výroby zdravých odlitků. Odplynění nemusí být dokonalé. Nutné je snížit objem plynu pod rovnovážnou koncentraci, u které již nehrozí vady. Tato kritická koncentrace je 0,2, někdy až 0,1 cm<sup>3</sup>/100g Al.[2] Obecně platí, že při odlévání tlustostěnných odlitků nebo lití do písku, kdy je doba chladnutí delší je nutné odplyňovat na nižší koncentrace.

Nejčastější způsob odplyňování je profukování taveniny inertním plynem. Odstátí taveniny je naprosto neúčinné. [2] Dříve se používal převážně chlór nebo fluor. [2] To dnes již není možné z hlediska ekologie, hygieny a platných provozních norem. Proto se hojně využívají plyny argon nebo dusík o čistotách až 99,995%. [2]



Obr. 18 Pohled do právéodplyňovaného kovu v pánvi, [14]

Proces odplynění probíhá vháněním inertního plynu do taveniny, dnes nejčastěji rotačními trubicemi s porézní hlavici. Rotace a malý průřez otvorů v porézní hlavici vytvoří bublinky o malém poloměru a značné ploše. Tyto pak vycházejí z taveniny velmi pomalu, což usnadňuje odplynění. Díky prakticky nulovému parciálnímu tlaku v bublinkách plynu se rozpuštěný vodík snaží difundovat do těchto bublinek a je tak vynášen na povrch, kde taveninu opouští. [2] Proces rafinace se provádí před modifikací a to z toho důvodu, aby se nesnižovala zbytečně koncentrace sodíku v tavenině. Je tendence odplyňovat v pánvích, které jsou vysoké s malým průměrem. To zaručí dostatečný čas k difuzi vodíku do bublinek. Rychlost vyplouvání bublinek na povrch je dána Stokesovým zákonem:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot (\rho_{\text{kovu}} - \rho_{\text{plynu}})}{\eta} \cdot r^2 \quad (8)$$

Kde je:  $\rho$  ... hustota kovu nebo plynu [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\eta$  ... dynamická viskozita [ $\text{kg/s} \cdot \text{m}$ ]  
 $r$  ... poloměr bubliny [ $\text{m}$ ]

Vznikající vodíkové bubliny nemusí však vždy působit negativně v procesu výroby. Vzhledem k tomu, že během chladnutí odlitku jejich objem roste, tak de facto působí proti objemovému stahování. Je-li možné mít pak určitou koncentraci vodíku, která vyhovuje požadavkům výrobku, můžeme tímto méně nálitkovat. Problémové partie, jako jsou změny průřezu z širšího na tenčí profil, pak nemusí dělat takové potíže.[2]

### 1.6.5 Způsoby odplyňování

Odplyňování je tedy proces, při kterém jsou do taveniny vháněny plyny, do nichž difunduje vodík. Tyto plyny do taveniny dostáváme následujícími způsoby:

- Rozkladem odplyňovacích solí
- Dmýcháním v plynné formě

#### Odplyňovací soli

Jsou to směsi sloučenin solí, které obsahují dusík. V podobě prášku nebo tablet se aplikují tak, že se za pomoci ponorného zvonu ponoří až ke dnu pánve. Dalším způsobem je dmýchání do pánve směs dusíku se solným práškem. [2] Podmínkou je nižší bod tání než je bod tání slitiny.

Po ponoření zvonu se počká než reakce dozní a vyplavou všechny zplodiny a nečistoty na hladinu. Pak se vzniklá struska z hladiny stáhne mimo kelímek. Druh soli se vybírá podle dané slitiny, která se právě taví. [2]

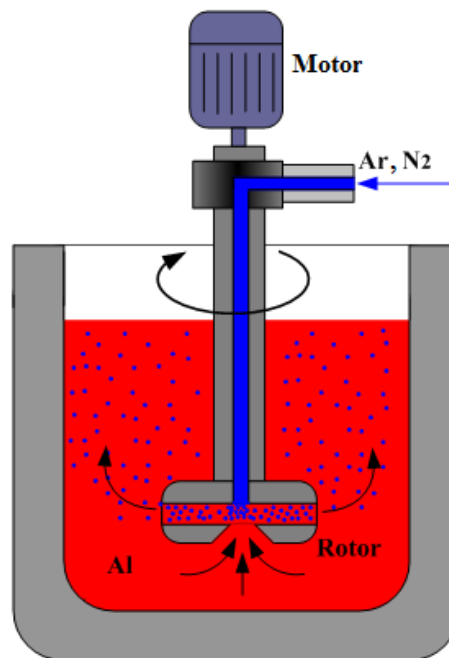
#### Odplyňování dmýcháním plynů

Má být prováděno tak, aby bublinky měly co nejmenší průměr a tedy velkou plochu. [2] Plyn se do taveniny vhání za pomoci trubic s porézní zátkou, porézních tvárnice nebo pomocí rotačních impellerů. Trubice jsou vyráběny z grafitu nebo z keramiky a na konci jsou opatřené danou hlavicí. Zátka, hlavice, se vyrábí ze speciální porézní keramiky nebo taktéž z grafitu.

**Trubice** se ponoří do kelímku co nejhlouběji, ale ne tak, aby bránila průniku plynu. Z druhé strany je napojena na hadici s plynem. Důležitá je dostatečná dráha plynu skrz kelímek. Rafinace trvá od 5 – 10 minut, ale v případech, kdy nejsou ideální podmínky i déle. [2] Jsou vhodné pro malé až střední slévárny, kde se používá malý kelímek.

**Porézní tvárnice** jsou natrvalo integrované do vyzdívky rafinačních kelímků. Princip procesu je totožný jako u trubic. Podmínkou u obou metod je neustálá potřeba míchat taveninou, aby odplynění proběhlo rovnoměrně v celém průřezu taveniny.

**Rotorová zařízení** dodává například firma Foseco pod názvem FDU (Foundry Degassing Unit) nebo firma StrikoWestofen jako DC 2. [2] Jsou to komplexní zařízení sloužící k rafinaci kovu. Sestávají z ponorné grafitové trubice, hlavice o tvaru lopatkového kola, která je vyměnitelná, hradítka zamezující turbulence kovu, motoru, náhonu a stojanu s bombou inertního plynu. Zjednodušené schéma viz obr. 19. Rotor se otáčí rychlostí od 300 do 500 ot/min. Díky tomu jsou z hlavice uvolňovány bublinky o průměru 1 – 3 mm. Nejčastěji se používá dusík. Doba odplynění je 3 – 5 minut.



Obr. 19 Schéma rotorového zařízení k rafinaci slitin Al, (upraveno) [9]

### 1.6.6 Rafinace a filtrace hliníkových slitin

Rafinace je proces, při kterém se kov zbavuje nečistot, exogenních i endogenních vměstků přičemž se čistí. Je to základní technologie pro výrobu kvalitních odlitků. Vměstky vnikají do taveniny během tavení, při manipulaci s tekutým kovem v pánvích a při povrchové oxidaci.

Hliník velmi intenzivně oxiduje. Po natavení se téměř okamžitě vytvoří na hladině vrstva oxidů hliníku  $Al_2O_3$ . Při převážení kovu a jeho manipulaci se často stane, že se tato vrstva naruší a rozptýlí v tavenině. Po zatuhnutí má však takováto oxidická blána velmi negativní vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Proto je rafinace oxidů velmi důležitá. Používají se tyto základní metody: [2]

- Odstátí taveniny
- Vynášení vměstků plynovými bublinami
- Použití krycích a rafinačních solí
- Filtrace taveniny

Jestliže necháme taveninu odstát, tak se zvyšuje možnost vyplavání vměstků na hladinu. Vzhledem k téměř stejné hustotě vměstků jako je hustota taveniny nemá tato metoda praktický význam.

Při procesu odplyňování je tavenina také rafinována. Bublínky inertního plynu pomáhají vynášet vměstky a urychlují jejich vyplavání na hladinu.

Použití solí má dva významy. První je, že se zabrání reakci mezi atmosférickým kyslíkem a hladinou kovu díky rozpuštění soli jenž pokryje celou hladinu – krycí soli. Druhý je ten, že rozpuštěná sůl se naváže na aktivní látky vměstky plovoucí v tavenině a vynese je na hladinu do strusky. Zde dále pomáhá v krytí hladiny proti slučování s kyslíkem. Před odlitím je pak nutné strusku z hladiny stáhnout.

Další možností odstranění vměstků je filtrovat tekoucí kov přes různé druhy filtrů. V tomto případě se jedná o jedinou možnost jak zabránit zatečení oxidu hliníku do odlitku. Vzhledem k tomu, že oxidická blána je víceméně konzistentní ve dvou směrech, tak se snadno zachytává v těchto filtrech. Filtr však dokáže zachytit i exogenní vměstky.

Proces filtrace probíhá třemi způsoby:

- Cezením
- Vznikem filtračního koláče
- Hloubková filtrace

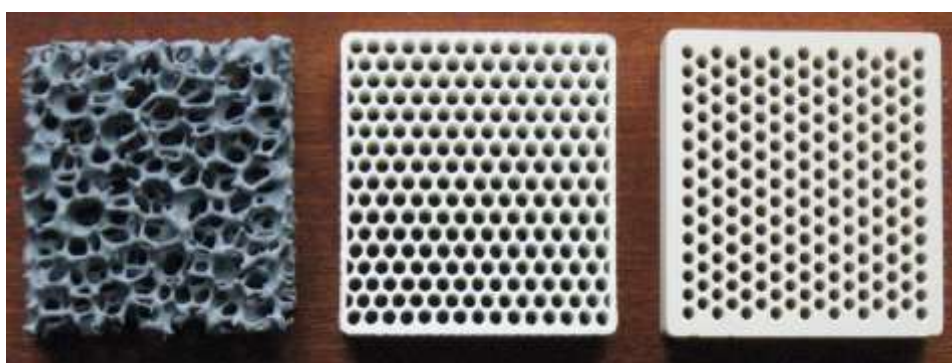
**Cezení** znamená zachytávání vměstků jenž jsou větší než průměr daného otvoru filtru. Případ oxidických blan.

**Filtrační koláč** vzniká postupně a pomalu narůstá díky zachytávání čím dál většího

množství vměstků. Za určitý čas pak dokáže zachytávat i vměstky menší než průměr otvoru ve filtru.

**Filtrace hloubková** je založena na přilnavosti a adhezi mezi materiálem filtru a vměstkem. Díky tomu lze zachytávat nečistoty v celém průřezu filtru a ne jen na jeho vstupu.

Typy filtrů viz obr. 20.



Obr. 20 Pěnovýfiltr (vlevo) a dva filtry s definovaným hydraulickým profilem – extrudovaný a lisovaný, [10]

## 1.7 Kontrolní metody

Důležitým aspektem výroby kvalitních odlitků je jejich kontrola. Nejefektivnější je ovšem kontrola celého výrobního procesu, kdy existuje snaha hodnotit kvalitu vstupních materiálů, kvalitu jejich zpracování, kontrolu samotných procesů a nakonec kontrolu zchladlého odlitku.

V konkrétním případě provozní kontroly odlitků můžeme mluvit o kontrole před litím a po zchladnutí. Do kontroly před litím lze zařadit:

- Měření DI (dichte index – měření naplynění)
- Termická analýza
- Spektrometrie
- Měření čistoty (vměstky)

Do kontroly po zchladnutí lze zařadit:

- Měření DAS
- Mechanické zkoušky
- Kontrola struktury optickým nebo elektronovým mikroskopem
- Vizuální kontrola

### 1.7.1 Měření naplynění

Nejpoužívanější kontrolní metodou v provozech sléváren je měření naplynění. Toto měření musí být provozně dostatečně rychlé a přesné.

Nejjednodušší takové provozní měření je založeno na principu pozorování hladiny kovu při ztuhnutí. Jestliže existuje pozorovatelné naplynění, pak po ztuhnutí nebude hladina vzorku propadlá následky objemové změny. Jednoduše se pak např. podle etalonu zjistí přibližné naplynění. Viz obr. 22.

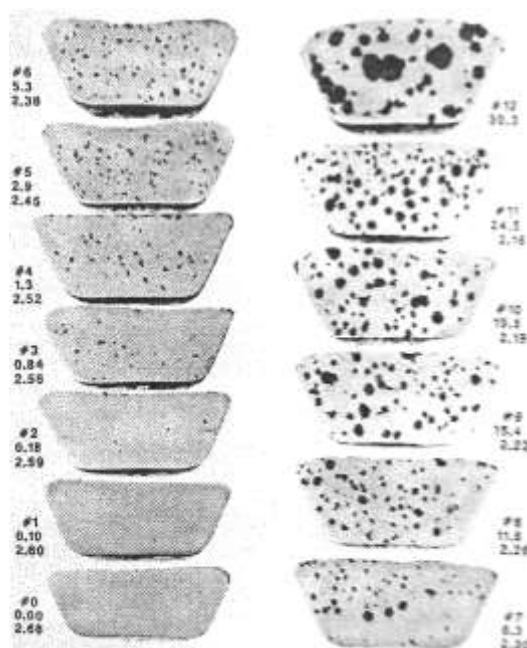
Vzorek se odebírá těsně před litím aniž by se nějakým způsobem znečistil a nalije se do kontrolního kelímku. Dále existují dvě



Obr. 21 Měřicí váhy k měření DI, [17]

možnosti. Vzorek se nechá zchladnout za působení atmosférického tlaku nebo se vloží do vakuové komory a nechá se zchladnout za sníženého tlaku. Indikace naplynění je u druhé možnosti snazší.

Při sníženém tlaku se tlak plynu difundujícího do již vzniklých bublin mnohem více projeví na deformaci hladiny vzorku.



Obr. 22 Vzorkovník velikostinaplynění, [2]

Přesnější metoda měření naplynění je takzvaná metoda dvojího vážení. [2] Princip této metody je založen na srovnání vzorku jenž ztuhnul pod atmosférickým tlakem a vzorku jenž ztuhnul za podtlaku. [2]

Z tavícího kelímku se odebere do pánve vzorek a nalije se do dvou kelímků o objemu 40 – 80 ml. [2] Jeden vzorek se nechá ztuhnout při atmosférickém tlaku a druhý pod definovaným podtlakem ve vakuové komoře. Po ztuhnutí se zjistí hustoty obou vzorků. Hustota jednoho vzorku se změří tak, že se zavěsí na váhu, kde se zváží a pak se ponoří do vody, kde se zváží znovu. Rozdíl těchto dvou měření je objem vzorku. Jelikož byl změřen jak objem tak hmotnost, lze již vypočítat hustota. Dichte index je roven rozdílu hustot podělených hustotou vzorku ztuhlého pod atmosférickým tlakem vynásobeném jedním stem. Viz vzorec (9). Dichte index v německém jazyce znamená index hustoty.

$$DI = \frac{\rho_{atmosf} - \rho_{vakuum}}{\rho_{atmosf}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Dnešní moderní přístroje jsou schopné tyto výpočty spočítat sami. Je nutné jen zvážit vzorky na vzduchu a ve vodě. Měřicí zařízení se skládá z těchto komponent:

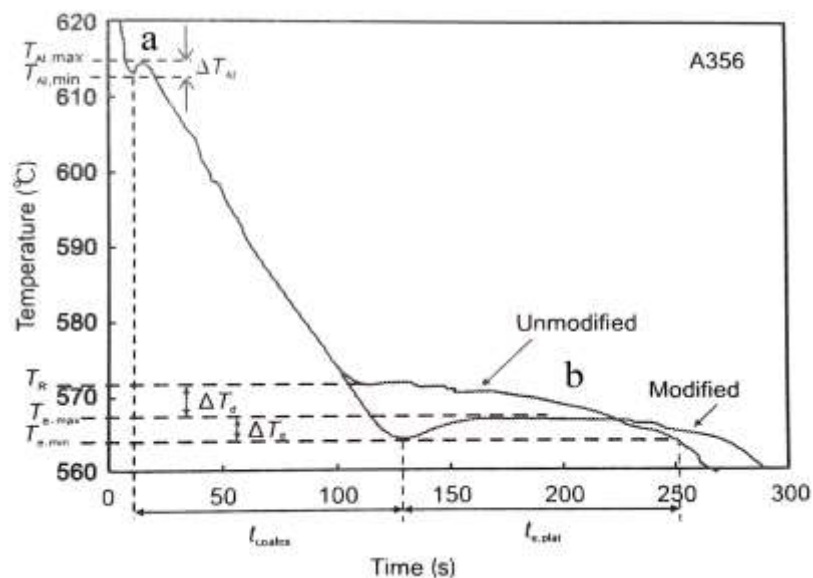
- Přesně pracující vakuová komora (8 kPa)[2]
- Přesné váhy (přesnost do 0,01 g) s nádobou na vodu se závěsem pro vzorek

Hodnota indexu se po natavení pohybuje v rozmezí 2 – 10%. [2]Dichte index velmi dobře odplyněné taveniny se pohybuje kolem 1%, kdežto velmi silně naplyněná tavenina má až 25%. Vzhledem k tomu, že vznik bublin souvisí s výskytem rozptýlených vměstků v tavenině je index hustoty reálným obrazem schopnosti kovu tvořit bubliny.

### 1.7.2 Termická analýza

Dalším velmi rozšířeným provozním kontrolním měřením je takzvaná termická analýza. Princip termické analýzy je založen na teplotních prodlevách v čase při tuhnutí materiálů. U slitin hliníku se provádí hlavně proto, aby se zjistila disperzita struktury po očkování a stupeň modifikace po modifikaci stronciem nebo sodíkem.

Po natavení kovu, jeho naočkování a modifikaci se odebere vzorek, jenž se nalije do kelímku. Tento se následně vloží do lože přístroje a do neztuhlé taveniny se zavede teploměr. Viz obr. 24. V tento moment začíná termická analýza. Vzorek se nechá ztuhnout a přístroj tak může provést měření, při kterém získává údaje o teplotě z kalorimetru v závislosti na čase. Tyto data jsou pak digitálně zpracována a promítnuta do grafu. Tento výstup je většinou doprovázen i derivací vzniklé křivky, kde jsou viditelnější nejdůležitější okamžiky chladnutí. Viz obr. 23.



Obr. 23 Graf termické analýzy slitiny AlSi7Mg0,3, [16]

Začátek měření je provázen strmým spádem teplot do doby, než klesnou na teplotu krystalizace, resp. počátku tuhnutí. V tento moment se rychlost chladnutí začíná zpomalovat, až se úplně zastaví. Toto zakřivení indikuje velikost přechlazení, které je projevem množství aktivovaných a aktivujících se zárodků zrn. Po tomto procesu se začne uvolňovat latentní teplo z fázové přeměny taveniny na tuhý kov, což se projeví ve chvilkové absenci jakéhokoliv chladnutí. Viz bod „a“ obr. 23. Po určité době teplota začne opět klesat téměř po přímce, ale díky stále uvolňovanému latentnímu teplu je tato přímka méně strmá. V další fázi měření nastává obdobný děj jako je tomu u počátku krystalizace. Jedná se však o krystalizaci křemičitého eutektika. Opět je zde určité přechlazení k aktivaci zárodků zrn eutektika s následnou absencí poklesu teploty.

Kvalita očkování je indikována v místě „a“ obr. 23. Jestliže slitinu nenaočkujeme, tak křivka bude vykazovat vyšší přechlazení z důvodu zvýšení energetické náročnosti vzniku zárodků krystalů. Krystaly začnou růst na zárodcích méně energeticky výhodných. Díky tomu se aktivuje méně zárodků, které delší dobu rostou. Výsledná struktura je pak hrubozrnná. Následuje zvýšení teploty, které se pak téměř okamžitě převrátí do opětovného ochlazování. To značí potenciální špatnou krystalovou disperzitu a nehomogenitu mechanických vlastností.

V místě krystalizace eutektika se jedná opět o podobný případ. Bude-li slitina správně modifikována, tak se zvětší podchlazení. To zde však neindikuje jen náročnost aktivace zárodků ale i energetický výdej na růst určitého druhu eutektika. Vzhledem k následnému ohřátí a výdrži na eutektické teplotě lze předpokládat dobrou disperzitu eutektika a rovnoměrný růst krystalů.



Obr. 24 Stojanproměření termické analýzy, [18]

### 1.7.3 Spektrometrie

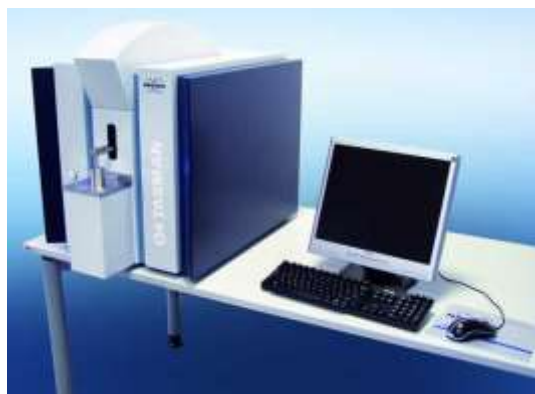
Spektrometr je takový přístroj, který dokáže za pomoci elektromagnetického záření určit koncentrace prvků ve vzorku. Spektrometrickými metodami získáváme informaceo jednotlivých kvantových stavech a přechodech elektronů mezi hladinami. Spektrum je soubor plynule se měnících vlnových délek elektromagnetického záření. Díky spektrometrům tak dokážeme velmi rychle kvantitativně zjistit chemické složení taveniny. To je v provozních podmínkách neocenitelné a dnes je již pronájem nebo vlastnictví takového přístroje v podnicích nezbytností.

Spektrometry rozdělujeme podle využívání:

- Emise záření
- Absorbce záření
- Optického spektra
- Rentgenového spektra

Nejčastějším spektrometrem používaným v provozu je spektrometr optický, využívající emisní atomovou spektrometrii. Vzorky se odebírají po roztavení kovu a po očkování s modifikací. Odlijí se do kokilky kde zuhnou a odnesou se do spektrometru. Zde se takzvaně „vyjiskří“. Vzniklé spojité spektrum se rozloží na hranolu na samostatné frekvence a přes optickou soustavu čoček se zaměří do detektoru. Pak probíhá vyhodnocení naměřených dat v přístroji s výstupem do počítače.

Analýza spektra se zakládá na autenticitě spektra každého prvku. Každý prvek má za daných podmínek stejné spektrální čáry, čáry na stejném místě. Takto se kvalitativně rozpozná prvek. Kvantitativní vyhodnocení lze změřit intenzitou daného spektra, dané spektrální čáry. Po vyhodnocení lze pak jednoduše na obrazovce počítače zjistit chemické složení z předdefinované tabulky.



Obr. 25. Jiskrový optický emisní spektrometr Q4 TASMAN, [19]

### 1.7.4 Měření čistoty taveniny

Zákazníci dnes slévárny tlačí k výrobě čím dál kvalitnějších odlitků, s čímž souvisí i zvyšování kvality kovu. Každý natavený kov obsahuje určitý podíl vměstků, exogenních i endogenních. V tomto případě se jedná o měření čistoty taveniny, tedy obsahu všech vměstků.

Metody, které vyhodnocují čistotu kovu, jsou velmi zdoluhavé. Například metoda vyhodnocení optickým mikroskopem, kdy se jednoduše vyhodnotí vybroušená struktura pozorovaného vzorku. To lze ovšem jen tehdy, kdy se odebere vzorek přímo z odlitku nebo se vyhodnotí vzorek odlitý mimo odlitek, nechá se zchladnout a vybrousit a pak lze vyhodnocovat. Výhodou je vyhodnocení přímé koncentrace vměstků v materiálu odlitku. Nevýhodou je neschopnost této metody reagovat v provozním čase na danou slitinu.

Byla však vyvinuta metoda, která je schopna vyhodnotit koncentraci vměstků téměř v reálném čase, přímo u roztaveného kovu. Metoda ALSPEK\* MQ. Viz obr. 26. Výhodou je získání informací o koncentraci vměstků před rafinačními a odplyňovacími úpravami kovu. Nevýhodou může být fakt, že tuto kontrolu nelze provádět přímo ve formě, tedy nelze zjistit obsah vměstků, které se dostaly do odlitku po odlití.

Měření je zahájeno v momentě, kdy se zařízení ponoří do taveniny v pánvi. Tavenina začne procházet filtrem (obr. 26), který zachytává nečistoty, přičemž se měří průtok kovu. Nečistoty zároveň snižují tento průtok taveniny do přístroje. Měření využívá závislosti snižování průtoku kovu na čase z čehož lze určit znečištění taveniny. Celý proces trvá méně než jednu minutu. [20] Hmotnost vzorku je v průměru kolem 1,5 kg. [20]



Obr. 26 Příklad přístroje na měření čistoty taveniny ALSPEK\* MQ a foto z probíhajícího měření, [20]

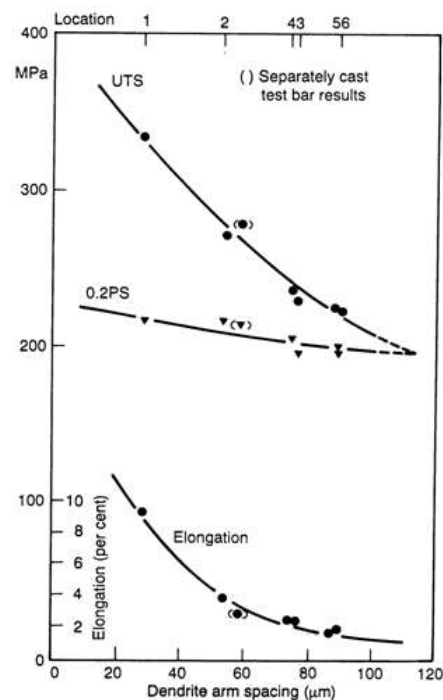
### 1.7.5 Měření DAS

Měření DAS je měření, které vyhodnocuje mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na vzdálenosti sekundárních dendritických ramen. Viz. obr. 27. Princip je popsán v kapitole 1.5.2.

Měření se provádí na již zchlazeném vzorku a to buďto vyřezaném přímo z odlitku nebo na zkušební tyči. Zkušební tyče mohou být přilité k odlitku nebo samostatně odlité. U tohoto měření velmi záleží na rychlosti chladnutí odlitku. Je proto žádoucí nastolit podobné podmínky chladnutí vzorku jako jsou v odlitku. Na těchto tyčích se nejprve provádí měření mechanických vlastností, nejčastěji na trhacích přístrojích. Následně z nich lze uříznout kus pro zalití vzorku.

Po ztuhnutí následuje postupné broušení a konečné leštění. Vzorek pak vložíme do optického mikroskopu s výstupem na obrazovku. Podle zvětšení pak měříme vzdálenost pomocí pravítka nebo za pomoci programu. Měření je prováděno několik a to na různých místech jednoho vzorku, 20 – 30. Z této hodnoty se vypočte průměr a porovná s mechanickými vlastnostmi.

Toto měření je vhodné například pro odhad mechanických vlastností odlitků v určitém místě, kde nelze vyřezat vzorek na trhací zkoušku. Nebo v místech, kde se mění disperzita materiálu v závislosti na tloušťce odlitku.



Obr. 27 Graf závislosti mechanických hodnot na vzdálenosti sekundárních ramenních dendritů.

### 1.7.6 Kontrola struktury mikroskopem

Každý druh materiálu má svojí vlastní krystalovou strukturu. Díky mikroskopům lze tuto strukturu přímo studovat. Vyrábí se mnoho druhů mikroskopů. Lze je rozdělit na:

- Optické
- Elektronové

Optické mikroskopy jsou nejrozšířenější. Přes soustavu čoček a dostatečný zdroj světla lze pozorovat strukturu až do rozlišení 0,2  $\mu\text{m}$ . V případě zkoumání a kontrolování krystalových struktur je to dostačující zvětšení. Lze rozpoznávat dendrity, i disperzitu a tvar eutektika. Na pozorování zárodků krystalů, například oxidů, sulfidů, nitridů atd., už optický mikroskop nestačí.



Obr. 28 Fotografie dendritické struktury kovu rastrovacím elektronovým mikroskopem, [21]

Díky zvědavosti vědců byl vyvinut elektronový mikroskop. Elektrony mají menší vlnovou délku než elektromagnetické záření v oboru viditelného světla a lze s nimi pozorovat mnohem menší předměty. Elektronový paprsek se zaostřuje magnetickými poli. Informace o obrazu se přenáší z mikroskopu do stolního počítače, kde se zpracují a zobrazí na monitoru. (obr. 28)

### 1.7.7 Vizuální kontrola odlitků

Nejjednodušší a nejrychlejší kontrolou odlitků je jeho prohlédnutí a zkontrolování povrchu, nejsou-li zde vady. Kontrola začíná ihned potéco je vytlučen z formy. Nezatečený kov a velké vady jako přesazení jsou patrné i přes ještě neodstraněný hrubý povrch v případě lití do písku. V případě tlakového lití jsou rozpoznatelné i menší vady. Po úpravě povrchu odlitků pak hledáme detailněji. Zapečeniny, připečeniny, zálupy, přesazení, studené spoje atd. jsou pro expedici výrobku nepřijatelné.

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Představení slévárny

Vzorky se odlévaly ve firmě FIMES a.s. v Uherském Hradišti. Tato slévárna odlévá slitiny mědi, hliníku a železa gravitačně metodou přesného lití do předeřtých keramických skořepin, kokilového lití nebo lití pod tlakem. Vyrábějí se zde i formy pro výrobu voskových modelů. Slévárna disponuje elektrickými odporovými pecemi, v nichž taví všechny druhy slitin.



Obr. 29 Odlévání hliníku, foto FIMES a.s., [22]

### 2.2 Odlévaná slitina

Zkoumané vzorky jsou odlité ze slitiny EN AC-42200 (číselné označení), EN AC- $\text{AlSi7Mg0,6}$  (chemické označení), ČSN 42 4334 (česká norma). Je to klasická slévárenská slitina s hořčíkem jako legujícím prvkem, dobrou zabíhavostí a jinými slévárenskými vlastnostmi. Slitina dosahuje vysokých mechanických pevností, velmi dobré korozivzdornosti a je odolná proti vzniku trhlin. Obsahuje minimum nečistot a je velmi dobře svařitelná. Tato lze následně podrobit tepelnému zpracování, které vede k vytvrzení odlitku.

Normované chemické složení slitiny a její minimální tabelované mechanické hodnoty jsou v tabulce níže. Tab. 1.

EN AC-Al Si7Mg0,6								
Chemické složení v % hmotnosti								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Jiné	Al
6,5-7,5	0,15	0,05	0,1	0,45-0,7	0,07	0,08-0,25	0,1	zbytek
EN AC-Al Si7Mg0,6								
Pevnost v tahu $R_m$ , [MPa], min.	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ , [MPa], min.		Tažnost $A_{50mm}$ , %, min.		Tvrдость podle Brinella HBS, min.			
290	240		2		85			

Tab. 1 Chemické složení a vlastnosti EN AC-Al Si7Mg0,6, [24]

### 2.3 Modifikátory

Ke zkoušce modifikace byly použity tyto modifikátory:

- Simodal 77 - Vzorky 613
- Simodal 97 - Vzorky 614
- Eutektal T 201 - Vzorky 615

Tyto modifikátory jsou distribuovány v podobě tablet, které při ponoření zvonem ke dnu a počínající exotermické reakci začnou uvolňovat sodík. Jsou vhodné pro očkování slitin AlSi obsahem křemíku od 5 do 13 % Si a slitin AlSiMg. [23] Použití dle technického listu začíná po rafinaci a případně odplynění vhozením na hladinu kovu, kde se očištěným děrovaným zvonem zachytí a ponoří pod hladinu. Po skončení reakce musí být struska a zbytky reakce vyplavené na hladinu staženy. Modifikátory se používají za teplot kolem 700°C. [23] Výrobce doporučené dávkování závisí na obsahu křemíku, technologickém postupu a tloušťce stěn odlitku. U tohoto je velmi důležité se vyvarovat předávkování, které vede k jiné morfologii eutektika. Dávkuje se: [23]

- Při lití do pískových forem - 0,2 až 0,3 hm%
- Při lití gravitačním a tlakovém - 0,1 až 0,2 hm%

## 2.4 Očkovadlo

Firma FIMES a.s. používá očkovadlo v podobě tyčí o složení AlTi5B1. Tyto tyče jsou vhodné pro očkování hliníkových slitin AlSi i AlSiMg. Poměr obsahu titanu a boru v tyčích by měl být konstantní, aby byla zaručena kvalita očkování. Očkování by mělo být prováděno až po rafinaci a případném odplynění.

Pro určité množství taveniny je tavičovi zadáno, kolik tyčí má do taveniny vhodit. Objem tyčí se řídí dle obsahu křemíku. Čím více ho tavenina obsahuje, tím více je třeba dodat očkovadla.

Očkovadlo viz obr. 30.



Obr. 30 Očkovadlo AlTi5B1 použité u zkoušky.

## 2.5 Formy

Vzorky byly odlévány do keramických forem. Formy jsou vyrobeny metodou vytavitelného vosku. Tato metoda výroby formy začíná výrobou voskového modelu. Firma Fimes a.s. používá moderní vstříkovací stroje s použitím tvrdých vosků. Pro tento účel je třeba vyrobit mateční formu. V naprosté většině z neželezných kovů, jenž lze rozebrat tak aby se voskový model nezdeformoval. Tato forma musí být dimenzována na správnou velikost s ohledem na smrštění vstříknutého vosku a způsob vstříkování. Po vstříknutí vosku do matečné formy na vstříkovacím stroji (viz obr. 31) se tato rozebere a ztuhlý voskový model se vyjme. Model musí získat ve formě manipulační pevnost. Pracovníci jej pak odloží do regálu, kde zchladne na pokojovou teplotu.



Obr. 31 Vlevo: moderní vstřikovací lis, [22]

Obr. 32 Vpravo: automatická manipulační ruka, výroba keramické formy, [22]

V dalším úseku výroby pracovníci model přitaví na voskový stromeček. Ten je vyroben zpravidla z již jednou přetaveného vosku nebo vosku méně kvalitního. Jakmile je stromeček hotový, obsluha jej zavěsí na závěsný krokový dopravník, který je nastaven ve stejném taktu, jako je rychlost manipulace automatické robotické ruky. Viz obr. 32. Ta tyto stromečky odebírá z dopravníku.

Jakmile je stromeček uchycen v automatické ruce, namočí se v břečce a následuje posyp ostřivem o velikostizávisejícína počtu vrstev, které již jsou na stromečku nanesené. Pak se zavěsí zpět na dopravník a vrstva se nechá zaschnout. Tento proces se opakujedokud není celá forma dostatečně mohutná, aby vydržela odlítí kovu. Po konečném vysušení forma pokračuje do boilerklávu, kde je za působení tepelného šoku a extrémního tlakového gradientu vytaven voskový model. Po odstranění voskového modelu forma pokračuje do žihačky, kde se předeheřeje na teplotu 750°. Následné lití proběhne do předeheřáté formy o teplotě 650°.

## 2.6 Pec

Ve firmě jsou instalované elektrické odporové pece pro tavení hliníku. Jsou to pece využívající sálání a vedení tepla, jenž je absorbováno kovem přes stěnu kelímku.

Základem je tavící kelímek, který je vydusán žárovzdorninou. V tomto případě na bázi křemíku. Dále topné spirály a elektrický obvod. Využívá se přívodu všech tří fází. Systém může být vestavěn do země (bezpečnější), nebo postaven na podlaze slévárny. Plášť je vyroben z ocelových plátů. V jednom spodním rohu pece se nachází

bezpečnostní tepelně izolovaný uzávěr, který má zabránit kolizi a znehodnocení obvodů pece při prasknutí kelímku.

Technické parametry pece:[25]

- Kapacita 185 kg Al
- Max. teplota 1100 °C
- Typ kelímku BU 200
- Objem kelímku 70 l
- Tavicí výkon 130 kg Al / h
- Příkon 53 kW
- Hmotnost 1400 kg
- Jištění pece 100/3 A
- Napětí 400 V



Obr. 33 Elektrická odporová pec PT 210/11

## 2.7 Zkouška modifikace

### 2.7.1 Cíl zkoušky

Cílem této zkoušky bylo ověření modifikace slitiny AlSi7Mg0,6 a vliv konkrétního modifikátoru na strukturu a mechanické hodnoty. Výsledkem by tedy mělo být jednoznačné dokázání lepších výsledků jednoho z modifikátorů a jeho následné doporučení.

Dále bylo ke zkoušce provedeno měření Dichte Indexu. Toto měření se opakovalo u každého typu modifikátoru obdobně. Měření bylo provedeno před i v průběhu odlévání.

### 2.7.2 Třídění vzorků a použité vybavení

Pec natavila třítavby slitiny AlSi7Mg0,6, které byly složeny z 60% nového materiálu a 40% vratu. Bylo použito následující vybavení:

- kelímek Noltina BNS 200 PT, ještě nepoužitý
- odplyňovací rotor FDU zakoupený u firmy Foseco - nový
- odplyňovací zařízení Foseco XSR 190.70
- rafinační sůl FosecoCovernal 2410
- očkovaadlo v podobě tyče AlTi5B1
- modifikátory:
  - Simodal 77      tavba č. 613
  - Simodal 97      tavba č. 614
  - Eutektal 201    tavba č. 615
- přístrojové vybavení:
  - Dichte index 3 VT + MK 2200

### 2.7.3 Průběh zkoušky

Průběh zkoušky probíhal obdobně ve všech třech případech vzorků. Po natavení proběhla rafinace a měření Dichte Indexu. Postup rafinace, očkování, modifikace a odplynění je předepsán interním pracovním předpisem firmy FIMES a.s. PP 132502. V případě rafinace se musí na vyčištěnou hladinu kovu nasypat příslušná čistící sůl. Sůl je třeba nechat krátce vysušit a pomocí děrovaného zvonu ponořit pod hladinu na dno kelímku. Sůl pak začne ihned reagovat s taveninou, což poznáme dle intenzivního víření hladiny a vzniku žlutých plamínek nad hladinou. Sůl je nutné intenzivně promíchat. Po skončení reakce je třeba ihned vyjmout a očistit zvon a stáhnout nečistoty vyplavené na hladinu.

Dále následovalo očkování očkovacími tyčemi a modifikace taveniny. Očkování se provádí pomocí drátu AlTi5B1, jenž se přidává do taveniny. Množství závisí na druhu slitiny a je nutné vnést do taveniny 0,02 – 0,1% TiB. Očkovací účinek trvá od 30 do 45 minut. Modifikace se provádí tak, že se na vyčištěnou hladinu kovu položí tableta modifikátoru. Na hladině se nechá krátce vysušit a za pomoci zvonu se ponoří ke dnu kelímku. Tableta začne s taveninou ihned reagovat. Po skončení reakce je opět nutné zvon neprodleně vyjmout z taveniny a řádně očistit. Nečistoty, jenž vyplavou na hladinu ihned stáhnout děrovanou naběračkou. Pracovní předpis uvádí, že účinek modifikace odeznívá po 45 minutách. Plně modifikovaná struktura musí obsahovat 0,005 – 0,01 %Na, což koresponduje i s doporučením následujícího odkazu. [26]

Po stažení strusky následoval odplyňovací proces a znovu měření Dichte Indexu. Tavenina se vždy odplyňuje za pomoci přístroje OZAL 001, dle PP 132502,2. K odplynění se musí použít vysoce čistý dusík 5,0. Měření Dichte Indexu probíhalo klasicky odlitím malého vzorku a použitím metody dvojího vážení.

Po kompletní úpravě kovu se začalo odlévat do předeřtých keramických forem. Viz obr. 34. Odlévalo se celkem třikrát po přibližně 25 minutách. Ke každé řadě vzorků bylo opět prováděno měření Dichte Indexu. Celé měření trvalo přibližně 1,5 hodiny. (V případě měření vzorků 615 –1,75 hodiny.) Tabulky skompletními operacemi v zaznamenaném čase jsou v příloze 1 tab. 1, 2, 3.



Obr. 34 Odlité vzorky do předeřtých keramických forem.

#### 2.7.4 Zpracování vzorků

Po zchladnutí byly vzorky vytlučeny z forem a očištěny. Následně byly vzorky roztrženy a zbytek byl tepelně zpracován. Ze všech tří řad vzorků se vybralo po dvou tyčích, jedny odlité ihned a druhé odlité jako poslední, které se tepelně nezpracovávaly a byly podrobeny metalografickému rozboru v litém stavu. Tepelné zpracování bylo rozděleno klasicky na dvě fáze. Nejprve proběhlo rozpouštěcí žihání pak po rychlém ochlazení umělé stárnutí.

Rozpouštěcí žihání slouží k maximálnímu možnému rozpuštění přísady hořčíku zpět do matrice kovu. Je velmi důležité dodržovat přesnou teplotu a úzké rozmezí teplotního pole, které zajišťují teploměry pece a dostatečná izolace stěn. Ta zabraňuje nepříznivému teplotnímu gradientu. Při nedodržení homogenity teploty v peci mohou vznikat rozdíly parametrů ve vzorcích blíže stěnám než u těch vprostřed pece. Po zapnutí pece probíhá pomalý nájezd na předepsanou teplotu 542 °C. Vzorky jsou pak ponechány v těchto podmínkách 10 hodin. Jakmile čas doběhne, vzorky se zchladí ve vodě. Toto je nutné k dosažení přesyceného tuhého roztoku. Manipulace se vzorky musí probíhat velmi rychle, aby nedocházelo k jeho rozpadu. Vzhledem k tomu, že materiál je termodynamicky nestabilní, dochází k tomuto samovolně. Při nižších teplotách však vzniku koherentních precipitátů brání krystalová mřížka a zvyšuje se tak vnitřní napětí.

To je spojováno se zvyšující se tvrdostí. Proto pak byly vzorky zpracovány technologií umělého stárnutí. Vložily se do pece a při teplotě 165 °C byly ponechány 5 hodin. Po uplynutí předepsaného času se vzorky nechaly zchladnout na vzduchu.

Po tepelném zpracování byly vzorky odvezeny k trhacímu stroji ke zjištění mechanických hodnot, meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v příloze 2 tab. 4, 5, 6. Chemické složení bylo zjištěno na optickém spektrometru. Hodnoty viz. příloha 3 tab. 7.

### 2.7.5 Metalografický rozbor vzorků v litém stavu

Metalografie vzorků byla provedena na Ústavu fyziky materiálů AV Žižkova 22, Brno. Bylo zde provedeno měření SDAS, změřena průměrná velikost zrn a vizuálně vyhodnocena morfologie eutektika.

Vzorky bylo ze začátku nutné upravit tak, aby na nich mohly být provedeny metody metalografického rozboru. Z dodaných tyčí byl vyříznut vzorek o průměru přibližně 5-6 mm a délce necelých 10 mm. Ten byl pak vložen do okruží a zalit dentakrylem v odvětrávaném prostoru, viz. obr. 35. Po zatvrdnutí byl vzorek vyjmut a nožem mu byl oříznut okraj. Následně proběhlo broušení vzorků na rotačních bruskách Saphir 330, viz. obr. 36. K vybroušení bylo použito brusných papírů o zrnitosti od 360 – 1200. Po vybroušení byly vzorky leštěny na leštícím kotouči za použití koloidního silikátového leštidla OPS. Kontrola kvality povrchu byla prováděna na malém laboratorním mikroskopu. Metalografické vyhodnocování bylo prováděno na optickém mikroskopu NEOPHOT 32, jenž má instalovaný digitální snímač Nikondigitalsight. (Viz obr. 37, 38) Digitální výstup je propojen s PC, kde je nainstalovaný vyhodnocovací program NIS – Elements D.



Obr. 35 Vlevo, odsávaný prostor sloužící k vytvrzení dentakrylu

Obr. 36 Vpravo, rotační bruska Saphir 330



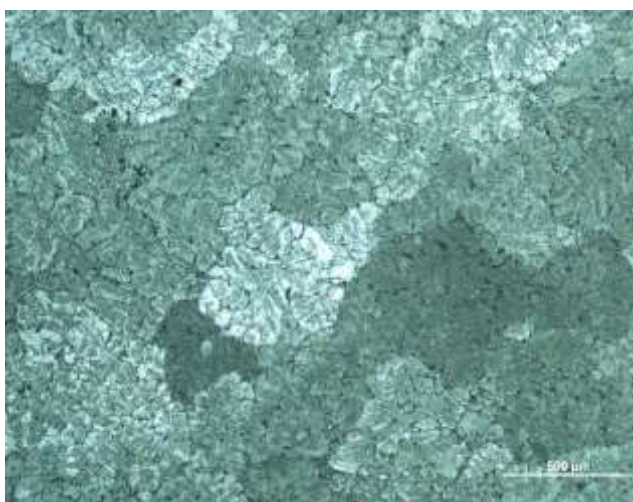
Obr. 37 Mikroskop Neophot, vlevo

Obr. 38 Digitální snímač obrazu Nikon, vpravo

### Měření velikosti zrna:

K měření velikosti zrna bylo potřeba vzorky naleptat kyselinou fluoroboritou  $\text{HBF}_4$ . Vyleštěný vzorek byl 1 minutu elektrolyticky leptán 5% roztokem kyseliny fluoroborité s vodou. Po naleptání byl vzorek osušen a přes mikroskop Neophot 32 byla vyhodnocena velikost zrna. Díky digitálnímu propojení snímače a PC lze vyhodnocovat přímo na obrazovce v daném zvětšení. Do mikroskopu bylo nutné vložit polarizační stínítko, díky kterému bylo světlo polarizováno a mohla tak být zviditelněna jednotlivá zrna.

Velikost zrn je vypočtena zprůměrujednotlivých proložených průměrů v různých směrech od kraje zrna k protějšímu kraji. Takto je vyhodnoceno několik zrn na jednom vzorku a je z nich vypočtena celková průměrná velikost zrna pro daný vzorek. Viz obr. 38. Průměrná velikost zrna u vzorku obr. 39 v litém stavu je  $590\mu\text{m}$ .

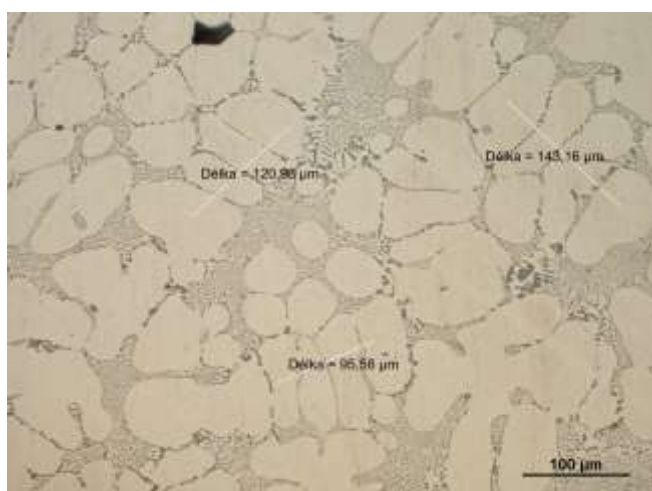


Obr. 39 Měření velikosti zrn z naleptané struktury slitiny, zvětšení 50x

**Měření SDAS:**

Měření SDAS proběhlo na vzorcích ve vyleštěném stavu. Jednotlivé vzorky byly pokládány na mikroskop Neophot32 a vyhodnoceny přes program NIS – Elements D. Vzorky byly 200 x zvětšeny a v programu byla jejich jednotlivá sekundární dendritická ramena prokládána úsečkami. Viz obr 40.

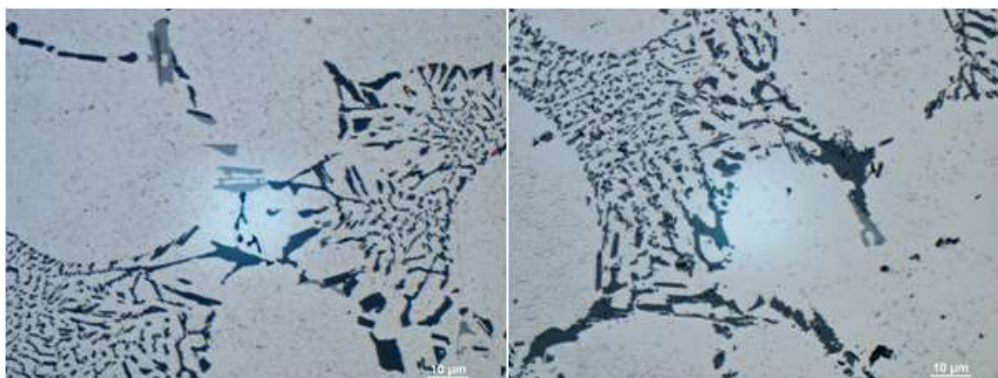
Měření proběhlo na šesti tyčích v litém stavu. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce č. 8, 9, 10 v příloze 4.



Obr. 40 Měření SDAS

**Hodnocení morfologie eutektika v litém stavu:**

Vznikající eutektikum je ovlivňováno modifikátorem a mění tak tvar a svou disperzitu. Hodnocení morfologie eutektika probíhalo na mikroskopu Neophot 32. Ve vybroušeném stavu bylo šest vzorků postupně pokládáno na mikroskop a hodnoceno mezi sebou. Každé dva vzorky reprezentovali jednu řadu odlitých tyčí 613, 614 a 615. Vybrány byly tyče lité na začátku a na konci. Hodnocena byla velikost eutektických zrn, jejich disperzita a homogenita mezi sebou navzájem. Fotografie vzorků 613-1-1 a 613-1-3 viz obr. 41. Všechny snímky k hodnocení v příloze 5 obr. 1 - 3.



Obr. 41 Fotografie morfologie eutektika, vlevo vzorek 613-1-1, vpravo vzorek 613-1-3

### 2.7.6 Statistický rozbor mechanických hodnot po tepelném zpracování

Vzhledem k faktu, že dokonalejší modifikace je teoreticky doprovázena zvýšením mechanických vlastností materiálu způsobené lepší disperzitou eutektika se přistoupilo ke statistickému rozboru dat, která byla získána na trhacím stroji. K tomuto účelu byl použit výpočetní systém Minitab.

Díky programu byla data roztríděna a zpracována. Složky, které byly klasifikovány jako hrubé chyby, se z testu vyřadily. Každá řada vzorků 613, 614, 615 byla rozdělena dle času lití. Na těchto množinách se pak provedly parciální výpočty odlehlých hodnot. Po odstranění těchto hodnot jako hrubých chyb byl proveden výpočet rozptylu a výpočet středních hodnot neboli mediánů. Pro kvalitativní rozbor účinku modifikátoru pak byly tyto mediány vzájemně porovnány. Viz. následující:

#### Test shodnosti středních hodnot, resp. test shodnosti mediánů, jestliže soubor nemá normální rozdělení:

Soubory, jež nemají normální rozdělení (po vyloučení odlehlých hodnot):

- 614-2-1 Rm, 614-2-3 Rm, 614-2-3 Rp

#### Závěr 1:

soubory	p-hodnoty		
	Rm	Rp	A
613-1-1	0,178	0,151	0,946
613-1-3			
614-2-1	0,079	0,010	0,251
614-2-3			
615-3-1	0,129	0,496	0,580
615-3-3			

Tab. 2

V tabulce 2 jsou vypsány jednotlivé řady vzorků a jejich vzájemné porovnání. Test shodnosti mediánů byl proveden na vzorcích se stejným modifikátorem. Výstup programu je p – hodnota, která udává, s jakou spolehlivostí lze zamítnout nulovou hypotézu o rovnosti dvou nebo tří charakteristik. V tabulce 2 je pouze jedna hodnota, která je významně rozdílná a to s 99% pravděpodobností. Ve sloupci Rp pro řady vzorků 614-2-1 a 614-2-3, přičemž je vyšší hodnota z řady 614-2-1.

**Závěr 2:**

	p-hodnoty		
soubory	Rm	Rp	A
613-1-1	0,025	0,367	0,581
614-2-1			
615-3-1			
613-1-3	0,001	0,022	0,576
614-2-3			
615-3-3			

Tab. 3

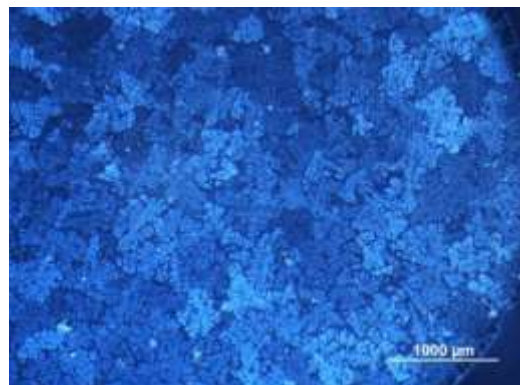
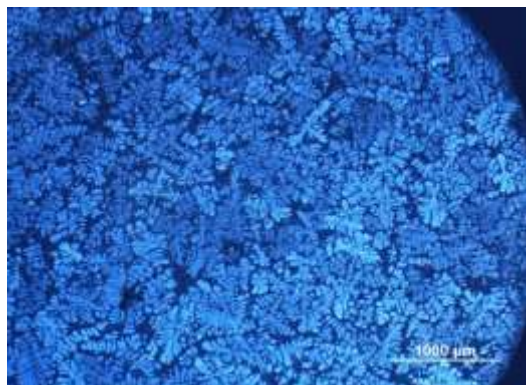
Z tabulky 3 vyplývá, že hodnoty  $R_m$  pro trojici 613-1-1, 614-2-1 a 615-3-1 nejsou stejné se spolehlivostí 97,5%. Z vypočteného mediánu hodnot řady 613-1-1 vyplývá, že je tato hodnota významně vyšší než u zbylých dvou řad. Dále z tabulky vyplývá, že pro trojici 613-1-3, 614-2-3 a 615-3-3 v oboru  $R_m$  je významný rozdíl a to s 99,9% pravděpodobností. Opět jako tomu bylo u hodnoty 613-1-1, tak i zde u řady 613-1-3 je hodnota mediánu významně vyšší než u zbylých dvou. Ve sloupci  $R_p$  je pak zřejmé, že řady 613-1-3, 614-2-3 a 615-3-3 nejsou stejné a to se spolehlivostí 97,8%. Hodnota  $R_p$  z řady 614-2-3 je významně vyšší než zbylé hodnoty.

**2.7.7 Metalografický rozbor vzorků po tepelném zpracování**

Důvody provedení metalografického rozboru po tepelném zpracování vycházejí z výsledků zpracovaných mechanických hodnot. Je snaha nalézt příčiny statisticky významných rozdílů hodnot  $R_m$ . Postupy pro získání výsledků jsou totožné s postupy metalografického rozboru vzorků v litém stavu z 2.7.6. Pro vyhodnocení byl použit soubor vybraných tyčí po tepelném zpracování, který sloužil ke zjištění mechanických hodnot.

**Měření velikosti zrna:**

Měření velikosti zrna po tepelném zpracování opět probíhalo za pomoci mikroskopu Neophot 32. Vzorky byly vybroušeny na brusných papírech a vyleštěny. Poté naleptány 5% roztokem kyseliny fluoroborité a osušeny. Byly vybrány vždy dva vzorky z každé řady reprezentující první a poslední lití. Vybrané naměřené hodnoty viz. obr. 42. Všechny fotografie v příloze 6.



613-1-1 508 μm 613-1-3 514 μm

Obr. 42 Fotografie z optického mikroskopu k měření velikosti zrn

### Měření SDAS po tepelném zpracování:

Měření proběhlo obdobně jako v případě zpracování vzorků v litém stavu. Připravené vzorky se vybrousily, vyleštily a postupně se zpracovávaly za pomoci mikroskopu Neophot 32 a programu NIS – Elements D. Výsledky jsou zobrazeny v příloze 7.

### Hodnocení morfologie eutektika po tepelném zpracování:

Morfologie eutektika byla vyfotografována za použití mikroskopu Neophoto 32 a digitálního výstupu do PC s programem NIS – Elements D. Fotografie v 1000 násobném zvětšení jsou zobrazeny v příloze 8.

### Měření tvrdosti:

Měření tvrdosti probíhalo na náhodně vybraných vzorcích ze všech tří řad 613, 614 a 615. Bylo provedeno 8 měření na přístroji ZwickRoell ZHV, viz. obr. 43. Vybroušené a vyleštěné vzorky se položily na pracovní plochu a nechal se do nich díky stroji zabodnout pracovní jehlan. Jehlan má definovanou geometrii a působí vždy stejnou silou. Po odlehčení lze přes systém čoček nahlédnout na do vzorku vytlačenou prohlubeň ve tvaru kosočtverce. Z této deformace lze díky instalovanému měřidlu odečíst úhlopříčky,  $d_1$  a  $d_2$ . Dle průměru úhlopříček lze pak z tabulek vyhledat danou tvrdost materiálu.

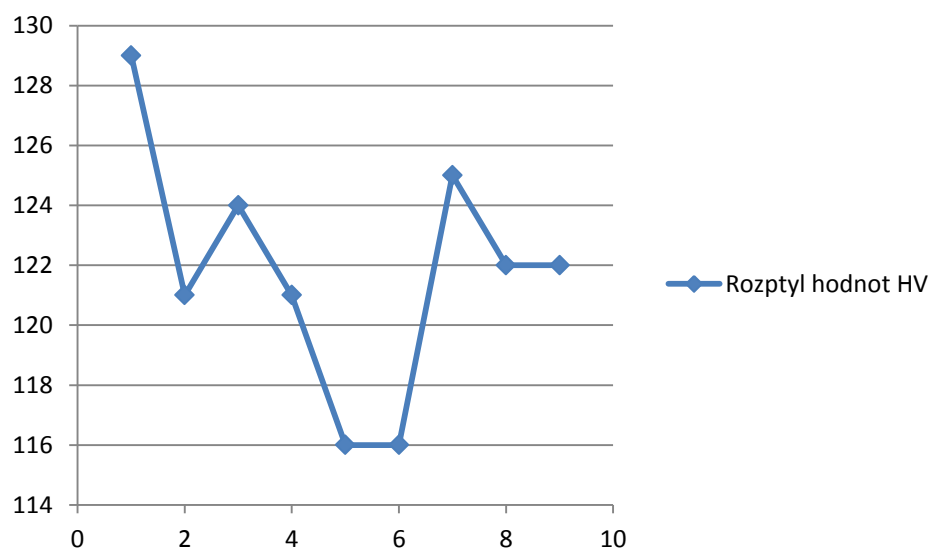


Obr. 43 Přístroj na měření tvrdosti dle Vickerse, ZwickRoell ZHV

Zaznamenané průměry naměřených hodnot jsou v tabulce č. 3. Přiložený graf (obr. 44) ukazuje rozptyl těchto hodnot. Z naměřených údajů vyplývá, že tvrdost vzorků je stabilní a pohybuje se kolem hodnoty 122 HV s rozptylem 4 HV. Norma udává minimální možnou hodnotu HV 85.

n	d <sub>1</sub> [μm]	d <sub>2</sub> [μm]	d [μm]	HV
1	122,2	117,5	119,85	129
2	122,5	125,4	123,95	121
3	122,9	121,8	122,35	124
4	125,3	122,5	123,9	121
5	126,2	126,2	126,2	116
6	126,1	126,4	126,25	116
7	121,1	122,1	121,6	125
8	125,4	121,2	123,3	122
Celková tvrdost	991,7	983,1	123,425	122

Tabulka č. 3

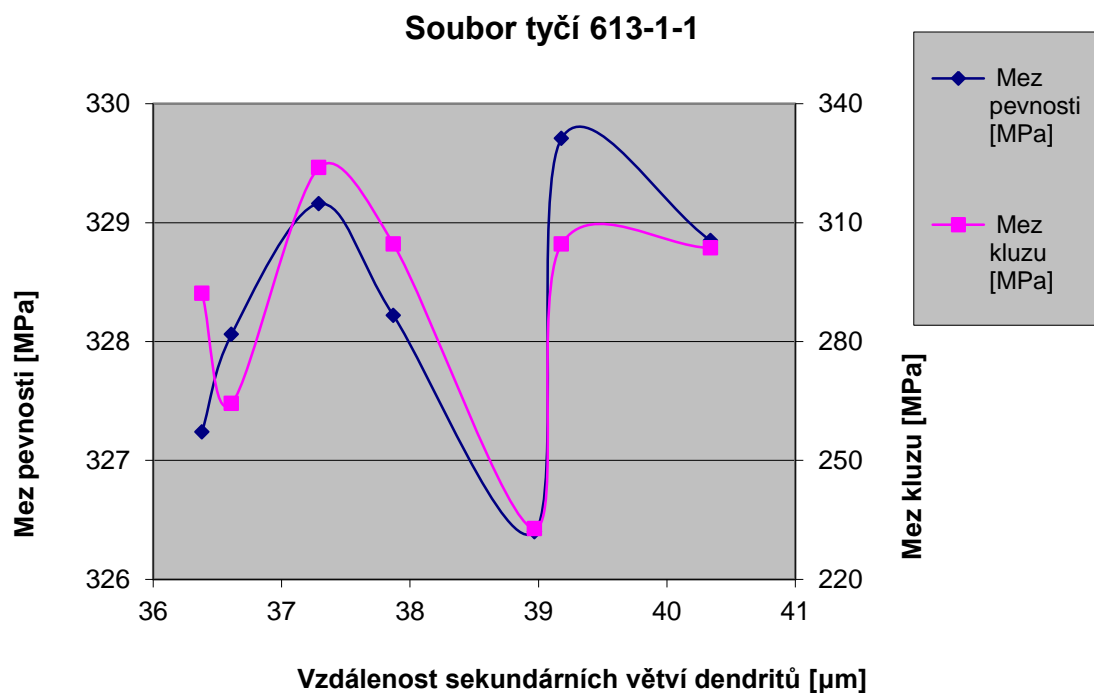


Obr. 44 Graf rozptylu HV

## 2.8 Diskuse získaných hodnot ze zkoušky modifikace

V tomto experimentu bylo za úkol zjistit, který modifikátor zadáný firmou Foseco a. s. působí nejlépe na mechanické hodnoty a za jak dlouhou dobu jeho modifikační účinek poklesne. Mechanické hodnoty byly statisticky zpracovány a vyhodnoceny v podobě p-hodnot. (viz kap. 2.7.6) Vzhledem ke zjištěným výsledkům během měření bylo upuštěno od zpracování vzorků odlévaných mezi prvním a posledním litím, 613-1-2, 614-2-2 a 615-3-2. Zpracování těchto vzorků bylo navrženo v tom případě, že by se mezi prvním a posledním litím nacházely ve všech vypočtených hodnotách statisticky významné rozdíly, a tudíž by jejich zpracování bylo nezbytné k celkovému vyhodnocení práce.

Výpočet p-hodnot byl zaznamenán do tabulek. Z těchto tabulek vyplývá, že dohromady u čtyř hodnot existuje vysoká míra pravděpodobnosti (nad 95%), která indikuje významný rozdíl mezi měřeními a do řad rozdělenými daty. V závislosti na typu modifikátoru bylo vyhodnoceno, že významně vyšší mechanické hodnoty v oboru  $R_m$  mají vzorky, u nichž byl použit modifikátor Simodal 77, tavba 613, a to jak v případě vzorků odlitých jako první, tak i u vzorků odlitých jako poslední. U 7 tyčí z této tavby bylo provedeno proměření vzdáleností sekundárních větví 20 dendritů ze vzorků po tepelném zpracování - tab14 v příloze 9. Z naměřených hodnot mechanických vlastností a SDAS byl sestaven graf - obr. 45. Je patrné, že hodnoty meze pevnosti a meze kluzu mají shodný průběh, ten však neodpovídá publikovaným tendencím.



Obr. 45 Graf závislosti mechanických hodnot na vzdálenosti větví dendritů

Porovnání hodnot meze pevnosti vzorků jednotlivých řad v závislosti na čase odlití je

zaznamenáno v tab. 2. (viz kap. 2.7.6) Z výsledků vyplývá, že mezi naměřenými hodnotami nejsou významné rozdíly.

V oboru  $R_p$  dominuje řada vzorků 614, jenž byla modifikována modifikátorem Simodal 97. Z výsledků je zřejmé, že tato hodnota  $R_p$  u řady 614 je významně vyšší než u zbylých dvou řad, ale jen v případě vzorků litých jako první. Výsledky porovnání vzorků uvnitř řady 614 ukazují na to, že i mezi vzorky prvně odlitými a vzorky odlitými naposledy jsou významné rozdíly. Vzorky lité jako první z řady 614 mají významně vyšší hodnoty  $R_p$  než všechny ostatní vzorky.

Díky tomu, že naměřené výsledky jsou v rozporu sočekávanými závěry, byly tyto výsledky konfrontovány s následujícími měřeními. V prvé řadě bylo provedeno měření velikosti zrna před a po tepelném zpracování. Průměrná velikost zrna před tepelným zpracováním byla  $590\mu\text{m}$ . Vypočtená průměrná hodnota velikosti zrna po tepelném zpracování je  $506,3\mu\text{m}$ , viz tabulka č. 4. Z výsledků je evidentní, že za působení tepelného zpracování bylo zjemněno zrno, což potvrzují mnohé studie.

Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ]	n	$\Sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]
508	1	
514	2	
505	3	
520	4	
490	5	
501	6	
<b>3038</b>	<b>6</b>	<b>506,3</b>

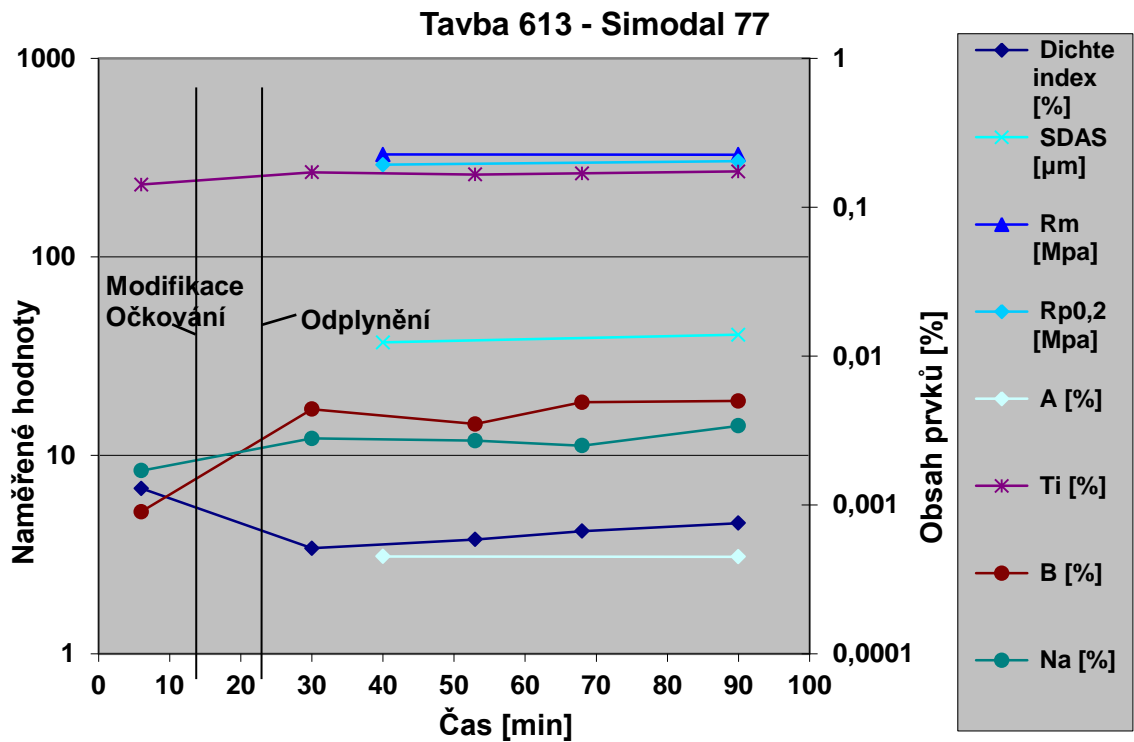
Tabulka č. 4

Jako další byly vybroušeny vzorky k vizuálnímu zhodnocení morfologie eutektika. (Viz příloha 5 a příloha 8) Po vybroušení a vyleštění vzorků byly pořízeny reprezentativní fotografie v 1000x zvětšení. S ohledem na subjektivní hodnocení zde byla shoda v názorech v případě změny morfologie před a po tepelném zpracování. Morfologie po tepelném zpracování se zdá být kvalitnější s jemnozrnnou strukturou, dobrou disperzitou a tvarem eutektika. Toto tvrzení je v souladu se zavedenými teoriemi.

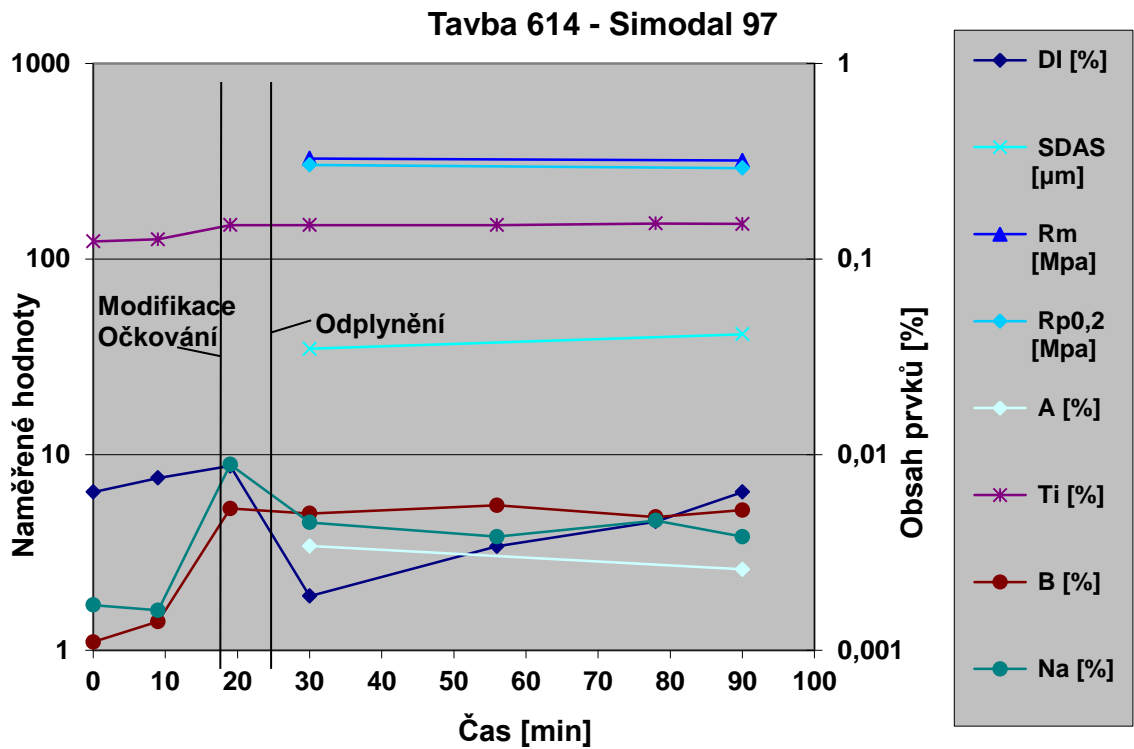
Dále tu byla snaha zhodnotit morfologii mezi vzorky, u nichž byl použit jiný modifikátor. Soubor vzorků modifikovaný Simodalem 77 má místy výrazně hrubozrnnější eutektikum a horší disperzitu. V případě použití Simodalu 97 je struktura dobře disperzní a jemnozrnná. Eutektikum je homogenně rozprostřeno. U vzorků modifikovaných Eutektalem 201 je velký rozdíl mezi vzorky 615-3-1 a 615-3-3. Zdá se, že struktura je kvalitnější v případě 615-3-3. Má dobrou disperzitu tvar i jemnozrnnější strukturu. U vzorků po tepelném zpracování nelze rozpoznat velké rozdíly v morfologii mezi vzorky litými jako první nebo jako poslední. Lze jen konstatovat, že je patrná tendence mírně zhoršující se morfologie u vzorků litých naposledy.

Další měření bylo měření SDAS indexů jak u vzorků v litém stavu, tak po tepelném zpracování. (viz přílohy 4 a 7)

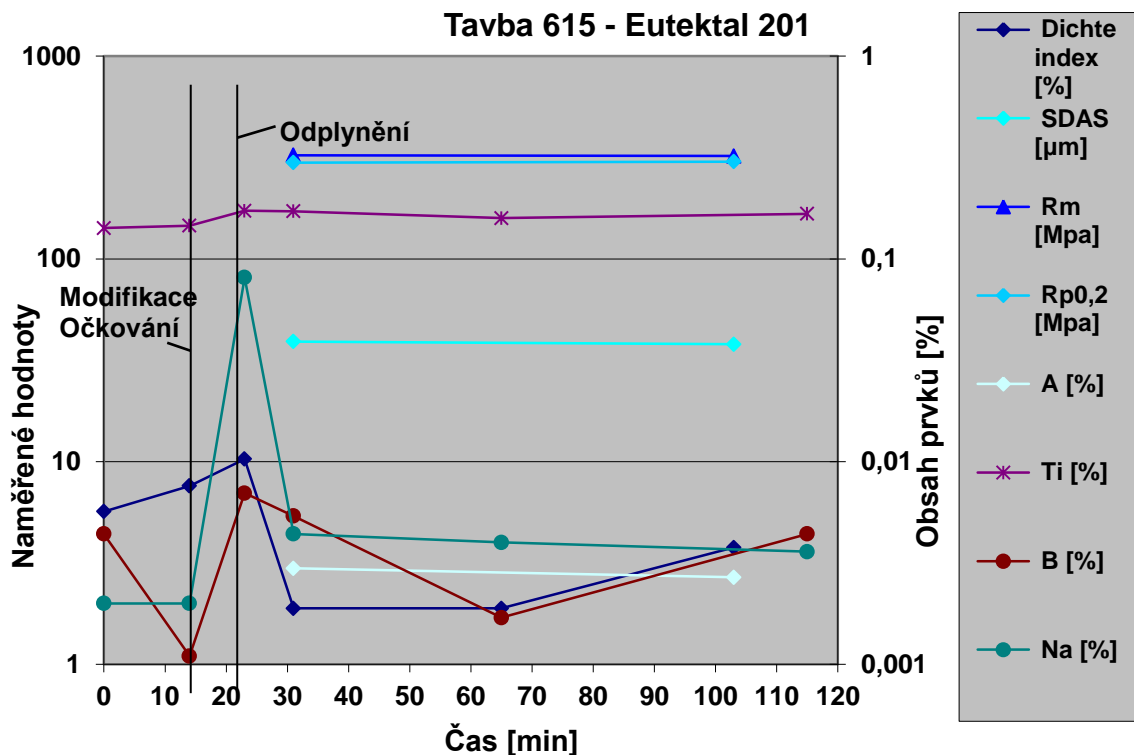
Z hlediska doby odeznění modifikačního účinku byly pro lepší přehled výše uvedené důležité hodnoty zaneseny do následujících grafů: (obr. 46, 47, 48)



Obr. 46 Graf závislosti měřených hodnot na čase, Simodal 77



Obr. 47 Graf závislosti měřených hodnot na čase, Simodal 97



Obr. 48 Graf závislosti měřených hodnot na čase, Eutektal 201

Z výše uvedených grafů lze kvalitativně zhodnotit modifikační účinek a jeho odeznívání. Lze také určit kvalitu očkování, naplynění a sledovat změnu SDAS indexu a koncentrace prvků Ti, B a Na.

Z grafů 46 – 48 vyplývá, že delší doba čekání do odlití téměř neměla vliv na mechanické vlastnosti slitin, což souvisí i s jen mírnými změnami v hodnocení SDAS. Vertikálně orientované čáry vyznačují dobu modifikace a očkování a technologii odplynění. Vliv očkování je patrný z náhlého nárůstu prvků Ti a B za čarou očkování. Křivka Dichte indexu značí kvalitní odplynění, které následně pomalu s časem narůstá. To je prokázáno. Vzhledem k vysoké rozpustnosti vodíku ve slitině a její velké teplotě tomuto nelze zabránit, pokud slévárna nevlastní vakuovou pec. A ani v tomto případě se však úplnému zastavení naplyňování zabránit nedá.

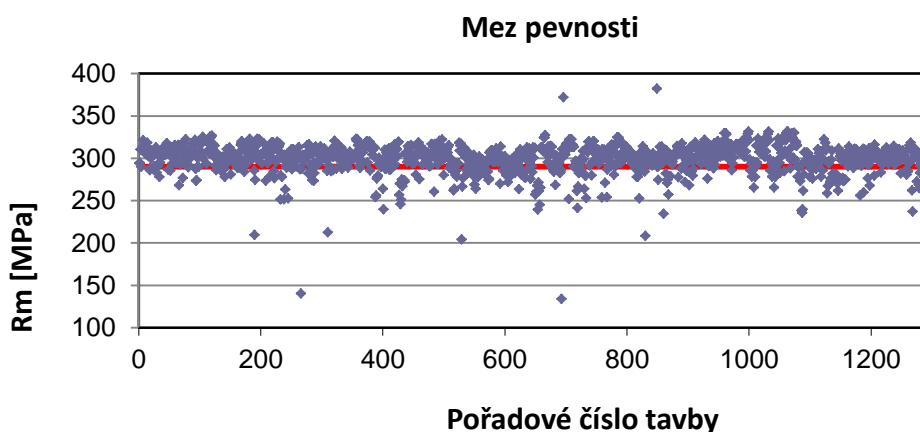
Odezívání modifikačního účinku lze sledovat na koncentracích sodíku Na. Výrobce v prospektu pro použití modifikátorů neudává délku modifikačního účinku. V praxi se však setkáváme s všeobecným tvrzením, kde se počítá u modifikačních solí na bázi sodíku s 10 – 15 minutami, u tablet maximálně s 30 minutami. (viz kapitola 1.5.5) Zde je ve všech třech grafech zřejmé, že sodík nemá tendence tak rychle opouštět taveninu. Ačkoliv sodík z taveniny v případě tavby 615 mírně vyprchává, například v tavbě 613 dokonce svou koncentraci zvyšuje. Tento trend je v rozporu s teorií.

## 2.9 Měření vlivu chemického složení na mechanické vlastnosti

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje mechanické hodnoty slitiny je chemické složení. Chemickým složením lze slitinu ladit tak, aby dosahovala optimálních parametrů. Jsou-li splněny technologické podmínky jako je odplynění, rafinace, očkování a modifikace, můžeme díky zkušenostem v praxi dosáhnout normovaných hodnot nejprve vypočtením vsázky a pak odzkoušením. V provozu je nutné počítat s neodhadnutelnými vlivy, které provázejí praxi každé slévárny a optimální legování vysledovat. Ve slévárnách, které nemohou řídit většinu parametrů během výrobního procesu je tato zkušenost ještě důležitější.

### 2.9.1 Cíl měření

Pro zjištění významnosti vlivu jednotlivých prvků na mechanické vlastnosti slitiny  $AlSi7Mg0,6$  pomocí regresní analýzy byl ze slévárny FIMES získán soubor výsledků zkoušky tahem na 1285 tyčích z 228 taveb materiálu 42 200 společně s chemickým složením těchto taveb. Příklad výsledku zkoušky tahem je uveden na obr. 49. Všechny výsledky tahových zkoušek se nacházejí v příloze 12. Je patrné, že v řadě případů není dosaženo hodnot předepsaných normou. Z protokolů o zkoušce tahem získaných z firmy FIMES bylo zjištěno, že získaný datový soubor obsahuje i výsledky zkoušek, které měly být dle normy ČSN EN 1559-1 [29] vyřazeny pro neplatnost neboť nevyhovující výsledky byly ovlivněny vadami (oxidické pleny, mezidendritické staženiny – viz. kap. 2.9.2), případně došlo k lomu mimo označenou část tělesa pro zkoušku tahem – obr. 52, kap. 2.9.2. Datový soubor výsledků zkoušky tahem musel být proto manuálně opraven vyřazením neplatných hodnot. Vícenásobná regrese závislosti mechanických vlastností na chemickém složení slitiny nebyla proto k datu odevzdání práce provedena.

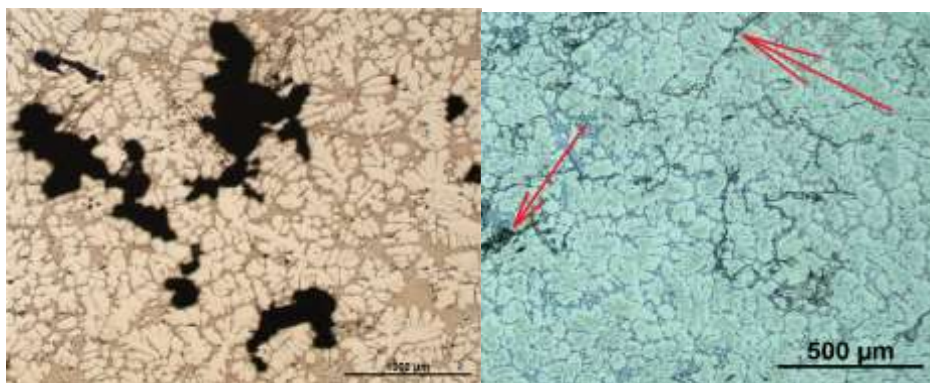


Obr. 49 Výsledky zkoušky tahem, Rm

## 2.9.2 Odstranění defektních vzorků

Mnohé z těchto zkušebních tyčí byly tedy nevhodné pro získání kvalitních údajů z důvodů nalezení vady. Dle normy [29] je neplatná zkouška ta, kde se u vzorků objeví vada v místě přetržení nebo nastane-li přetržení mimo vyznačené rysky. V případě trhání 1285 zkušebních vzorků došlo k oběma případům.

V první řadě byly přezkoumány vzorky, u nichž byly velmi nízké hodnoty tažnosti nebo pevnosti. V naprosté většině případů zjišťujeme, že jsou vzorky znehodnoceny buďto větším množstvím oxidů nebo staženinami. Viz. obr. 49, 50. Princip vzniku staženin je vysvětlen v kapitole 1.6.3. V tomto případě se jedná o staženiny kombinovaného typu. Mikrostaženina nasává rozpuštěný vodík do svého objemu díky tomu, že aktivita H v dutině se blíží nule. Tvar staženiny tomuto tvrzení odpovídá. Z grafů taveb z kapitoly 2.8 je patrné, že naplynění, ačkoliv velmi malé, existuje a lokálně tak hrozí místní zvýšení koncentrace. Oxidické pleny jsou většinou oxidy hliníku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , které vznikají při kontaktu hladiny roztaveného kovu s jakoukoliv vlhkostí. Vysvětlení problematiky oxidických plen viz. kapitola 1.6.6. K zabránění vniknutí a vzniku oxidů ve formách je vhodná změna geometrie formy, použití cedítek či filtrů nebo zabránit kontaktu taveniny s atmosférou, kde je obsažena voda. K tomuto účelu se používají buďto speciální soli nebo inertní atmosféra. (N, Ar) Kompletní fotografická dokumentace staženin nalezených ve vybraných vzorcích viz. příloha 11.



Obr. 50 Vlevo fotografie staženiny, Neophot 32, 100x zvětšeno

Obr. 51 Vpravo fotografie oxidické pleny,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Naophot 32, 50x zvětšeno

Dále byly z měření vyřazeny vzorky, které nebyly správně přetržené mezi ryskami. (viz. obr. 52) Toto může být způsobeno špatnou nebo poškozenou geometrií vzorku. Místo přetržení by nemělo být ovlivněno změnou průřezu materiálu. Je nutné zajistit dobrý povrch vzorku před trhací zkouškou. Další možný důvod je existence vad uvnitř materiálu, např. řediny nebo zadrobeniny.

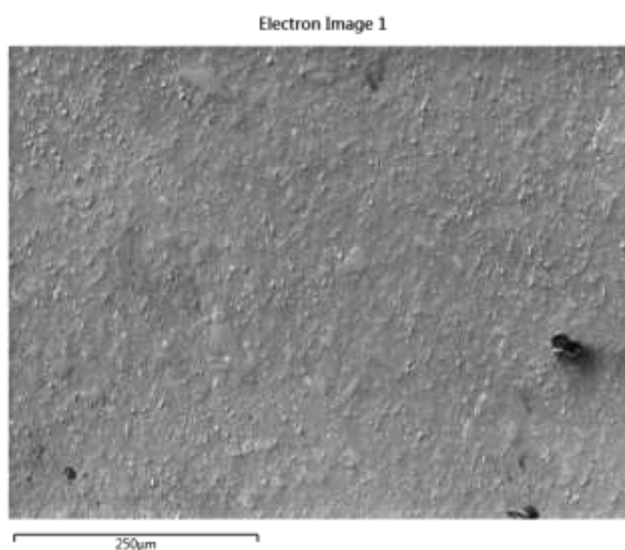


Obr. 52 Špatně přetržená trhací tyč, odlitove firmě Fimes a.s.

## 2.10 Diskuse měření vlivu chemického složení na mechanické hodnoty

Chemické složení, které udává norma (viz. kap. 2.2 tab. 1) je u lití této slitiny u naprosté většiny vzorků dodrženo. Vezmeme-li však v potaz doporučenou koncentraci sodíku 0,005 – 0,01 %Na [26], jakožto prvku, který zaručuje dobrou modifikaci slitiny, tak je z grafu jasné (viz. příloha 10), že až na ojedinělé případy se koncentrace jen mírně blíží minimální doporučené hodnotě. Tento fakt může mít vliv na nedostatečné mechanické hodnoty sledované u grafů z přílohy 12.

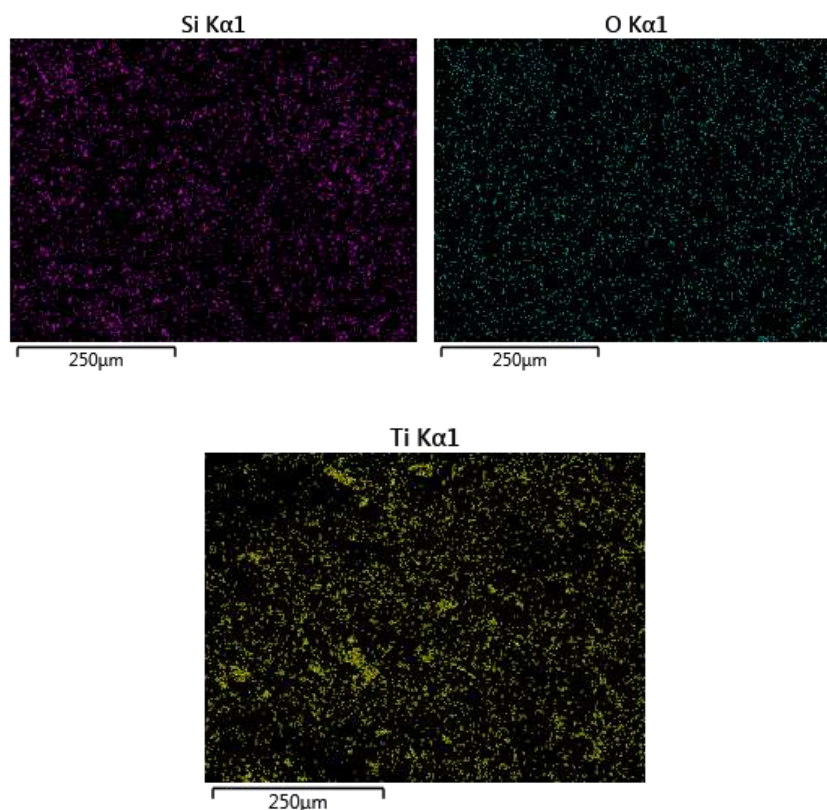
Další rozpor byl nalezen v grafu rozložení koncentrací bóru (viz. příloha 10). Zde je evidentní, že se koncentrace pohybuje kolem mediánu hodnot, ale bohužel se značnými výkyvy. Kvůli tomuto zjištění byla provedena analýza očkovačla AlTi5B1 na elektronovém rastrovacím mikroskopu Lyra Tescan v UFM v Brně. Byly pořízeny fotografie a chemické složení z konců a středu očkovací tyče. Viz. obr. 53, tabulka č. 5. Dále byla provedena kontrola homogenity chemického složení v řezech vzorků. Viz. obr.54.



Obr. 53 Snímek vzorku očkovačla, LyraTescan, UFM Brno

n	O	Al	Si	Ti
1	3,43	88,81	3,59	4,17
2	1,22	92,85	1,25	4,68
3	1,41	91,9	1,26	5,42
<b>Σ/n</b>	<b>2,02</b>	<b>91,19</b>	<b>2,03</b>	<b>4,76</b>

Tab. č. 5 Chemické složení očkovačla AlTi5B1



Obr. 54 Kontrola homogenity materiálu v řezu vzorku očkovadla, LyraTescan, UFM Brno

Jak je vidět z přiložených fotografií materiálu, je dosaženo velmi dobré homogenity prvků, které byly zjištěny na mikroskopu. Z chemického složení vyplývá, že koncentrace hlavního očkovacího prvku titanu se pohybuje kolem 5 %Ti, jak je deklarováno chemickým složením od dodavatele. Koncentrace bóru bohužel nebylo možné zjistit. Operátor mikroskopu neměl požadovaný kalibr, aby mohl nastavit parametry snímání elektronů a s dostatečnou přesností tak mohl určit obsah prvku.

Kvalitní očkování slitiny je teoreticky zajištěno také stejným poměrem mezi očkovacími prvky. Poměr mezi bórem a titanem by tedy měl být konstantní. Jak je vidět z grafu Ti/B v příloze 10 osciluje tato koncentrace stejně intenzivně jako samotná koncentrace bóru.

Další postup ve vyhodnocování experimentu tedy vede přes vypočtení vícenásobné regresní analýzy, která nebude zatížena chybným měřením, způsobeným vadami zkušebních tyčí a jejich špatným přetržením.

### 3 ZÁVĚR

Zadáním této práce bylo zjištění délky účinku tří modifikátorů na slitinu AlSi7Mg0,6 a porovnání jejich účinku mezi sebou. Dále pak byl měřen vliv chemického složení na tuto slitinu.

Během prvního experimentu, který měl určit dobu odeznívání modifikace, bylo zjištěno, že účinek modifikace ani po 1,5 hodině téměř neklesá. Lze tak soudit z grafů (viz. kap. 2.8), kde jsou zobrazeny v závislosti na čase mechanické hodnoty, Dichte indexy, SDAS a vřdčí prvky titan, bór a sodík. Tento fakt může pozitivně ovlivnit dobu odlévání, kterou takto lze rapidně prodloužit. Z hlediska ekonomického to jistě povede k šetření modifikátoru a tím pádem snížení nákladů. Ke zjištění důvodu proč se tak děje je však nutné provést další experimenty, například vliv různého tepelného zpracování.

Kvalitativní zhodnocení modifikátorů lze vyčíst z kapitoly 2.7.6. Statistické šetření ukázalo, že s pravděpodobností vyšší než 95% modifikátor Simodal 77 působí na mechanické hodnoty v oblasti meze pevnosti pozitivněji než ostatní modifikátory. Ukázalo se, že starší verze modifikátoru Simodal77 má lepší účinky než novější verze Simodal 97. V případě modifikátoru Simodal 97 se ukazuje, že mechanické hodnoty mají významně vyšší medián v oblasti Rppři lití ihned po připravení taveniny k lití. Tento závěr není překvapující a potvrzuje mnohé teorie.

Velmi zajímavým výsledkem je však konfrontace výsledků mechanických hodnot s hodnocením morfologie eutektika. Nejlepší hodnocení co se týče disperzity, velikosti zrna a tvaru eutektika má Simodal 97. Vzhledem k tomu, že je modernější verzí Simodalu 77 bylo by tedy logické předpokládat, že bude mít statisticky významnější pozitivní vliv na mechanické hodnoty slitiny. Morfologie eutektika by to jen potvrzovala. Bohužel výsledky jsou jasné. Chceme-li materiál, který má vysoké mechanické hodnoty, použijme v tomto případě Simodal 77.

Z druhého experimentu vyplývá, že je slitina odlévána přesně dle normovaných hodnot. Bohužel jak je vidět na mechanických vlastnostech, někde je chyba. Rozptyl mechanických hodnot je natolik velký, že od svého mediánu pokračuje až pod minimální normovanou mez. Je možné, že zjištěné mechanické vlastnosti, které nedosahují těchto hodnot, souvisejí s nízkou hladinou sodíku. Ta byla potvrzena a její záznam je v příloze 10. Dalším problémem je oscilace mechanických hodnot, která může souviset s kvalitou očkovačla. Očkovačlo by mělo obsahovat ideálně stejný poměr mezi titanem a bórem. Jak jsme se ale dozvěděli z přílohy 10, koncentrace bóru značně kolísá. Díky grafu Ti/B, jsme zjistili, že značně kolísá i tento poměr. Vzhledem k těmto výsledkům byly vyrobeny tři vzorky zočkovací tyče a byly prověřeny elektronovým rastrovacím mikroskopem. Struktura se zdála být v pořádku a homogenita také. Bohužel nebylo možné zjistit koncentrace ani rozložení bóru kvůli absenci kalibru pro mikroskop. Řešením ustálení mechanických hodnot slitiny by mohla být změna očkovačla.

Celkově bylo zjištěno, že daná slitina ve většině případů vyhovuje technickým požadavkům, které přikazuje norma. S jistotou můžeme však konstatovat, že ještě existují místa, kde lze tuto praxi vylepšit. V případech, kdy nepadl jasný výsledek se bude muset pokračovat dál v experimentech, které jak doufám jistě zaručí zodpovězení otázek. Celé měření je však ztíženo tím, že jsou odlévány vzorky v provozních podmínkách. Musíme tedy zajistit mnoho vzorků, aby byla vyvážena absence aplikace klasického experimentu, kde jsou jednotlivé hodnoty a koncentrace postupně měněny a výsledky jsou tak transparentnější a hlavně je lze udělat v poměrně krátkém čase. K prozkoumání celé této problematiky tak bude potřeba mnoho trpělivosti a precizní práce.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Historie chemie: Hliník. PEDAGOGICKÁ FAKULTA MASARYKOVY UNIVERSITY. *Http://www.ped.muni.cz* [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hist/chemlat/hlinik.html>
2. ROUČKA, CSC, Doc.Ing.Jaromír. Odlévání neželezných kovů: Profesní vzdělávání pracovníků ve slévárenství II. Brno, 2006, 81 s.
3. MEDUNA, Bc. Radek. *Výroba rozlehlých tenkostěnných odlitků z hliníkových slitin*. Brno, 2008. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5994](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5994). Diplomová práce. VUT Brno FSI. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
4. Atlas struktur: Struktura hliníku. VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *Atlas struktur: Struktura hliníku* [online]. 2009, [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/struktur/hlinik/s01a.htm>
5. PLACHÝ, CSC, Doc. Ing. Jan, Doc. Ing. Milan NĚMEC, CSC a Ing. Bohumír BEDNÁŘ, CSC. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Teorie slévání*. druhé. Olomouc: Moravské tiskařské závody, 1990. Dostupné z: [http://www.strojar.com/upload/skripta/teorie\\_slevani.pdf](http://www.strojar.com/upload/skripta/teorie_slevani.pdf)
6. GRÍGEROVÁ,CSC, Ing. Tatiana, Doc. Ing. Ivan LUKÁŠ, CSC a Ing. Rudolf KOŘENÝ. *Zlívárenstvo neželezných kovov*. 1. vyd. Bratislava, Hurbanovo nám. 3: Západoslóvenské tlačiarne, 1988. ISBN 063-566-88.
7. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005,700 s. ISBN 80-890-4188-4.
8. Internalstructureof Al hollownanoparticlesgenerated by laser ablation in liquidethanol. *ChemicalPhysicsLetters* [online]. 2011, s. 4, 7. ledna [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009261410014983>
9. SUBSTECH. *Degassingtreatmentofmoltenaluminumalloys: Rotarydegasser* [online]. 2012, 28.07.2012 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=degassing\\_treatment\\_of\\_molten\\_aluminum\\_alloys](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=degassing_treatment_of_molten_aluminum_alloys)
10. PROFOUND. *KERAMICKÉ FILTRY* [online]. 2011 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.profound.cz/cs/produkty/penokeramicke-filtry>
11. HOTAŘ, J. *Vliv řízeného naplynění hliníkových slitin na strukturu a vlastnosti odlitků*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
12. Slévárenství - teorie: Tavení slitin hliníku. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. 2009, 18. 4. 2013 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm\\_slevarenstvi/teorie.htm](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_slevarenstvi/teorie.htm)
13. Fabricationof polymer derivedceramicparts by selective laser curing. *Sciencedirect* [online]. 2005, č. 25 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221904003292>
14. Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356. *Sciencedirect* [online]. 2010, č. 527 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509310001346>
15. Investigation of Inner Vacuum Sucking method for degassing of molten aluminum. *ScienceDirect* [online]. 19, č. 177 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510712000876>
  16. Thermal analysis as a microstructure prediction tool for A356 aluminium part solidified under various cooling conditions. *The 69th WFC Paper*. 2011, č. 69, s. 7.
  17. *Density determination according to Archimedes principle*. Stahlhofen, 2009. Dostupné z: [www.mk-gmbh.de](http://www.mk-gmbh.de)
  18. *Stativ zum Thermoanalyse-System*. Stahlhofen, 2009. Dostupné z: [www.mk-gmbh.de](http://www.mk-gmbh.de)
  19. JISKROVÝ SPEKTROMETR Q4 TASMAN. *Spektrometry* [online]. 2010 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: [http://www.spektrometry.cz/spektrometry/spektrometr\\_q4\\_tasman.php](http://www.spektrometry.cz/spektrometry/spektrometr_q4_tasman.php)
  20. firmy Foseco, ALSPEK\* MQ - the development of a device to indicate the cleanliness of a liquid aluminium melt. *Foseco*. Dostupné z: <http://www.foseco.com.tr/tr/downloads/FoundryPractice/251-01.pdf>
  21. Fraktografické hodnocení. FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERSITY. *Ateam* [online]. 2005 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/fraktografie.html>
  22. FIMES A.S. *Fimes.Mesit* [online]. 2008 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.fimes.mesit.cz/>
  23. SIMODAL 77,97, technický list firmy FOSECO, vydání 06/03
  24. ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku - Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti*. 1999.
  25. LAC. *LAC* [online]. 2000 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.lac.cz>
  26. Typical addition levels. *Modification of foundry Al-Si alloys: Technical report No. 4*. 1997, č. 4.
  27. ARGONNE - NATIONAL LABORATORI. *Materials Science Division: Microstructural Effects on the Mechanics of Materials* [online]. 1. vyd. Los Alamos, 1999 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.msd.anl.gov/groups/im/cmsn/proposal.html>
  28. STAVINOHA, J. Mikrostruktura a mechanické vlastnosti ocelí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP.
  29. ČSN EN 1559-1. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: Slévárenství – Technické dodací podmínky – Část 1: Všeobecně*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 1999. Dostupné z: [http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html\\_nahledy/42/54333/54333\\_nahled.htm](http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/42/54333/54333_nahled.htm)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

R <sub>m</sub>	[MPa]	mez pevnosti
R <sub>p</sub>	[MPa]	mez kluzu
A <sub>50</sub>	[%]	tažnost
HB, HV	[-]	tvrdost dle Brinella, Vickerse
G	[J]	Gibbsova energie
DAS, SDAS	[-]	dendrit armspacing, secondari dendrit arm sparing
σ <sub>k</sub>	[MPa]	výsledné napětí (Hall-Patchův vztah)
M	[-]	Taylorův orientační faktor
τ <sub>0</sub>	[MPa]	napětí brzdící pohyb nezakotvených dislokací
k <sub>y</sub>	[-]	konstanta zahrnující vliv hranic zrn
d	[μm]	průměr zrna
S	[-]	rozpustnost H v tavenině
P <sub>H2</sub>	[MPa]	parciální tlak vodíku v atmosféře
σ <sub>z-t</sub>	[MPa]	napětí mezi zárodkem a taveninou
σ <sub>z-p</sub>	[MPa]	napětí mezi zárodkem a plynem
σ <sub>p-t</sub>	[MPa]	napětí mezi plynem a taveninou
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
η	[Ns/m <sup>2</sup> ]	dynamická viskozita
r	[mm]	poloměr bubliny
DI	[-]	Dichte Index
PP	[-]	pracovní předpis

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Průběh taveb
Příloha 2	Výsledky tahových zkoušek
Příloha 3	Chemické složení
Příloha 4	Měření SDAS indexu v litém stavu
Příloha 5	Dokumentace hodnocení morfologie eutektika v litém stavu
Příloha 6	Dokumentace hodnocení velikosti zrna po tepelném zpracování
Příloha 7	Měření SDAS indexů po tepelném zpracování
Příloha 8	Dokumentace hodnocení morfologie eutektika po tepelném zpracování
Příloha 9	Tabulka závislosti SDAS na mechanických hodnotách (613-1-1)
Příloha 10	Koncentrace prvků
Příloha 11	Foto dokumentace vad
Příloha 12	Grafy výsledků hodnocení dodržení normovaných tahových hodnot

### Příloha 1 – průběh taveb:

Průběh tavby č. 613: Atmosférický tlak: 983 mBar  
Teplota kovu: 726 – 732 °C  
Teplota skořepiny: 635 – 650 °C

Tabulka č. 1

Činnost	Čas [h]	Přípravek	Množství [kg]	DI [%]	Poznámka
Rafinace	0:00	Coveral GR2410	0,4		
Měření Dichte Indexu	0:06			6,82	Vzorek č. 11F
Očkování	0:14	AlTi5B1	1		
Modifikace	0:14	Simodal 77	0,2		
Odplynění	0:22	Dusík, Coveral Gr2410	8 m3/h 0,15		
Měření Dichte Indexu	0:30			3,4	Vzorek č. 11FFF
Odlévání trhacích tyčí	0:40				označení tyčí 613-1-1
Měření Dichte Indexu	0:53			3,77	Vzorek č. 11
Odlévání trhacích tyčí	1:08				označení tyčí 613-1-2
Měření Dichte Indexu	1:08			4,15	Vzorek č. 12
Odlévání trhacích tyčí	1:30				označení tyčí 613-1-3
Měření Dichte Indexu	1:30			4,55	Vzorek č. 13
Konec odlévání	1:31				

Průběh tavby č. 614: Atmosférický tlak: 983 mBar  
 Teplota kovu: 725 – 731 °C  
 Teplota skořepiny: 635 – 650 °C

Tabulka č. 2

Činnost	Čas [h]	Přípravek	Množství [kg]	DI [%]	Poznámka
Měření Dichte Indexu	0:00			6,44	Vzorek č. 21F
Rafinace	0:04	Coveral GR2410	0,4		
Měření Dichte Indexu	0:09			7,6	Vzorek č. 21FF
Očkování	0:16	AlTi5B1	1		
Modifikace	0:16	Simodal 97	0,2		
Měření Dichte Indexu	0:19			8,75	Vzorek č. 21FFF
Odplynění	0:22	Dusík, Coveral Gr2410	8 m3/h 0,15		
Odlévání trhacích tyčí	0:30				označení tyčí 614-2-1
Měření Dichte Indexu	0:30			1,89	Vzorek č. 21FFFF
Odlévání trhacích tyčí	0:56				označení tyčí 614-2-2
Měření Dichte Indexu	0:56			3,4	Vzorek č. 21
Měření Dichte Indexu	1:18			4,55	Vzorek č. 22
Odlévání trhacích tyčí	1:30				označení tyčí 614-2-3
Měření Dichte Indexu	1:30			6,44	Vzorek č. 23
Konec odlévání	1:31				

Průběh tavby č. 615: Atmosférický tlak: 983 mBar  
 Teplota kovu: 730 – 739 °C  
 Teplota skořepiny: 635 – 650 °C

Tabulka č. 3

Činnost	Čas [h]	Přípravek	Množství [kg]	DI [%]	Poznámka
Měření Dichte Indexu	0:00			5,68	Vzorek č. 31F
Rafinace	0:07	Coveral GR2410	0,4		
Měření Dichte Indexu	0:14			7,6	Vzorek č. 31FF
Očkování	0:17	AlTi5B1	1		
Modifikace	0:17	Eutektal 201	0,2		
Měření Dichte Indexu	0:23			10,3	Vzorek č. 31FFF
Odplynění	0:24	Dusík, Coveral Gr2410	8 m3/h 0,15		
Odlévání trhacích tyčí	0:31				označení tyčí 615-3-1
Měření Dichte Indexu	0:31			1,89	Vzorek č. 31FFFF
Odlévání trhacích tyčí	1:05				označení tyčí 615-3-2
Měření Dichte Indexu	1:05			1,89	Vzorek č. 31
Odlévání trhacích tyčí	1:43				označení tyčí 615-3-3
Měření Dichte Indexu	1:43			3,77	Vzorek č. 33
Konec odlévání	1:45				

## Příloha 2 – výsledky tahových zkoušek:

Testované střední hodnoty (mediány) jsou uvedeny v posledním řádku tabulek a jsou zvýrazněny.

Tabulka č. 4

613-1-1			613-1-3		
Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A %	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A %
328,06	264,38	3,36	330,27	311,93	3,24
329,16	323,89	3,04	327,27	325,27	3,16
329,67	274,2	3,34	280,97	280,97	0,84
328,22	304,6	3,22	328,67	307,41	3,02
327,45	310,6	2,82	325,5	308,73	2,8
329,36	297,14	3,04	325,37	303,8	2,86
328,85	303,6	3,7	328,77	297,36	3,16
326,4	232,78	2,52	327,47	303,15	2,82
329,71	304,63	3,14	326,66	302,46	3,04
329,65	299,47	3,2	330,01	301,03	3,18
327,24	292,2	2,64	326,36	298,17	3,56
<b>328,52</b>	<b>291,6</b>	<b>3,093</b>	<b>327,63</b>	<b>303,78</b>	<b>3,084</b>

Tabulka č. 5

614-2-1			614-2-3		
Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A %	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A %
313,35	302,76	1,88	314,19	301,28	2,14
326,8	322,67	3,08	323,08	291,45	3,06
329,67	303,83	3,38	258,05	197,82	0,18
330,45	302,77	4,42	318,62	281,23	3,44
324,56	319,12	4,24	325,68	298,22	4,12
325,14	297,29	3,92			
327,34	300,71	4,68			
316,72	301,93	1,8			
326,69	300,92	4,88			
316,24	241,58	1,82			
329,68	325,96	3,4			
<b>326,7</b>	<b>302,8</b>	<b>3,41</b>	<b>318,6</b>	<b>291,4</b>	<b>2,59</b>

Tabulka č. 6

615-3-1			615-3-3		
Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A %	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A %
323,01	301,47	1,94	326,33	301,98	3,56
326,49	303,24	4,14	325,68	266,49	2,92
327,88	300,46	4,22	319,07	305,36	1,48
327,31	321,4	3,18	320,7	310,68	2,62
329,19	215,68	3,52	321,08	298,28	2,7
327,06	218,97	4,16	314,84	303,91	1,76
316,93	304,46	1,36	324,33	304,81	2,06
321,94	295,71	3,66	326,28	291,36	3,76
321,45	283,87	2,4	319,79	301,89	1,94
275,96	275,96	0,54	312,24	302,06	1,4
325,65	303,72	3,62	327,4	300,46	5,34
<b>324,69</b>	<b>298,9</b>	<b>2,98</b>	<b>321,61</b>	<b>302,18</b>	<b>2,69</b>

### Příloha 3 – chemické složení:

Tabulka č. 7

Tavba	Vzorek	Čas [h]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ti [%]	Na [%]	B [%]	
613	11F	0:06	2:24	0,115	0,0018	0,0032	0,52	0,142	0,0017	0,0009	
		0:14	Modifikace a očkování								
613	11FFF	0:30	7,04	0,12	0,0019	0,0032	0,51	0,172	0,0028	0,0044	
613	11	0:53	7,07	0,114	0,0016	0,003	0,53	0,166	0,0027	0,0035	
613	12	1:08	6,99	0,126	0,0021	0,0033	0,57	0,169	0,0025	0,0049	
613	13	1:30	7,2	0,129	0,0019	0,0034	0,56	0,174	0,0034	0,005	
614	21F	0:00	6,9	0,128	0,0011	0,003	0,51	0,123	0,0017	0,0011	
614	21FF	0:09	6,59	0,145	0,0014	0,0034	0,58	0,126	0,0016	0,0014	
		0:16	Modifikace a očkování								
614	21FFF	0:19	6,76	0,123	0,0013	0,0028	0,51	0,149	0,0089	0,0053	
614	21FFFF	0:30	7,12	0,129	0,0013	0,0031	0,55	0,149	0,0045	0,005	
614	21	0:56	6,81	0,138	0,0014	0,0033	0,56	0,149	0,0038	0,0055	
614	22	1:18	6,91	0,122	0,0022	0,0026	0,52	0,152	0,0046	0,0048	
614	23	1:30	7,35	0,127	0,0013	0,003	0,54	0,151	0,0038	0,0052	
615	31F	0:00	7,05	0,132	0,0018	0,0032	0,53	0,142	0,002	0,0044	
615	31FF	0:14	6,96	0,14	0,0019	0,0035	0,58	0,146	0,002	0,0011	
		0:17	Modifikace a očkování								
615	31FFF	0:23	7,05	0,13	0,0017	0,0031	0,54	0,173	0,0081	0,007	
615	31FFFF	0:31	6,85	0,119	0,0015	0,0028	0,474	0,172	0,0044	0,0054	
615	31	1:05	6,9	0,12	0,0016	0,0028	0,5	0,159	0,004	0,0017	
615	32	1:55	7,01	0,134	0,0018	0,0033	0,57	0,167	0,0036	0,0044	

**Příloha 4 – měření SDAS indexů v litém stavu:**

Tabulka č. 8

613-1-1				613-1-3			
Číslo měření	n	$\mu$	DAS	Číslo měření	n	$\mu$	DAS
1	4	120,98	40,32666667	1	4	96,32	32,10667
2	4	143,16	47,72	2	5	158,19	39,5475
3	3	81,33	40,665	3	3	91,79	45,895
4	4	110,53	36,84333333	4	4	123,89	41,29667
5	3	76,03	38,015	5	3	83,11	41,555
6	4	110,27	36,75666667	6	3	85,24	42,62
7	4	112,94	37,64666667	7	4	116,76	38,92
8	3	78,54	39,27	8	4	130,65	43,55
9	8	202,14	28,87714286	9	3	97,08	48,54
10	3	79,71	39,855	10	5	144,4	36,1
11	3	61,03	30,515	11	3	87,35	43,675
12	3	84,7	42,35	12	3	63,67	31,835
13	4	129,26	43,08666667	13	5	172,09	43,0225
14	4	107,56	35,85333333	14	3	89,23	44,615
15	4	95,58	31,86	15	3	81,01	40,505
DAS součet			37,97603175	DAS součet			40,91889

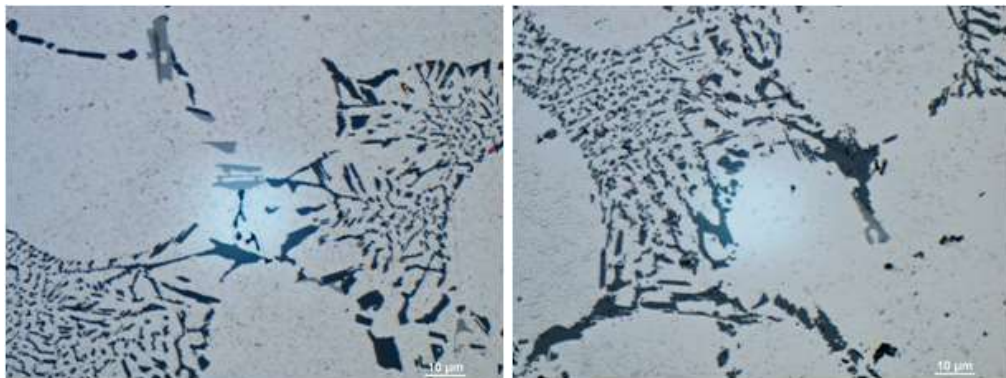
Tabulka č. 9

614-2-1				614-2-3			
Číslo měření	n	$\mu$	DAS	Číslo měření	n	$\mu$	DAS
1	4	94,36	31,45333333	1	3	104,89	52,445
2	5	133,73	33,4325	2	4	122,29	40,76333
3	4	99,5	33,16666667	3	3	84,93	42,465
4	4	97,31	32,43666667	4	5	115,44	28,86
5	3	64,05	32,025	5	3	81,41	40,705
6	3	87,86	43,93	6	3	98,05	49,025
7	3	70,57	35,285	7	3	98,68	49,34
8	4	102,91	34,30333333	8	6	190,79	38,158
9	3	78,81	39,405	9	4	128,61	42,87
10	4	121,4	40,46666667	10	3	75,07	37,535
11	3	60,69	30,345	11	4	128,61	42,87
12	3	58,37	29,185	12	3	79,27	39,635
13	4	98,86	32,95333333	13	3	86,33	43,165
14	3	60,69	30,345	14	4	127,15	42,38333
15	4	125,84	41,94666667	15	3	88,56	44,28
DAS součet			34,71194444	DAS součet			42,29998

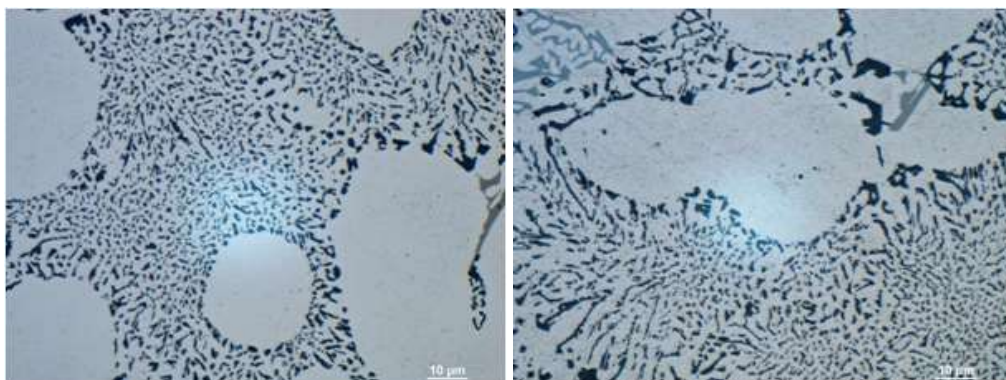
Tabulka č. 10

615-3-1				615-3-3			
Číslo měření	n	$\mu$	DAS	Číslo měření	n	$\mu$	DAS
1	3	88,32	44,16	1	4	85,18	28,39333
2	3	68,81	34,405	2	3	54,82	27,41
3	3	60,08	30,04	3	5	162,77	40,6925
4	3	83,75	41,875	4	3	66,66	33,33
5	4	102,15	34,05	5	3	77,02	38,51
6	4	85,47	28,49	6	4	103,73	34,57667
7	3	85,17	42,585	7	3	58,06	29,03
8	3	90,82	45,41	8	3	75,24	37,62
9	3	92,7	46,35	9	4	144,09	48,03
10	3	83,75	41,875	10	3	101,79	50,895
11	4	102,15	34,05	11	3	94,93	47,465
12	3	88,32	44,16	12	5	139,13	34,7825
13	4	118,01	39,33666667	13	3	77,74	38,87
14	3	85,17	42,585	14	4	119,17	39,72333
15	3	94,97	47,485	15	4	118,75	39,58333
DAS			39,79044444	DAS			37,92744

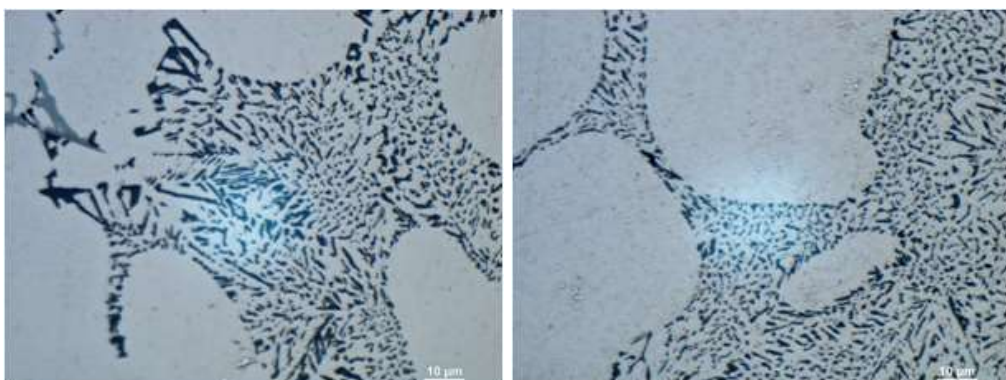
**Příloha 5 - dokumentace hodnocení morfologie eutektika v litém stavu:**



Obr. 1 Vlevo vzorek 613-1-1, vpravo vzorek 613-1-3



Obr. 2 Vlevo vzorek 614-2-1, vpravo vzorek 614-2-3



Obr. 3 Vlevo vzorek 615-3-1, vpravo vzorek 615-3-3

**Příloha 6 - dokumentace hodnocení velikosti zrna po tepelném zpracování:**

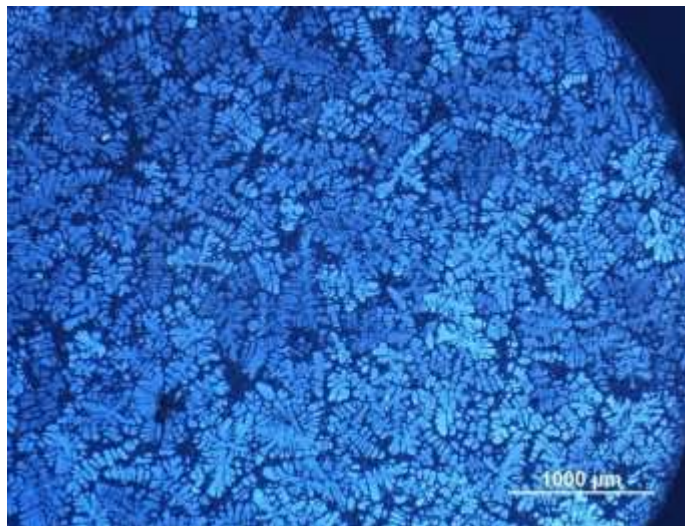


Foto vzorku 613-1-1 - 508 μm

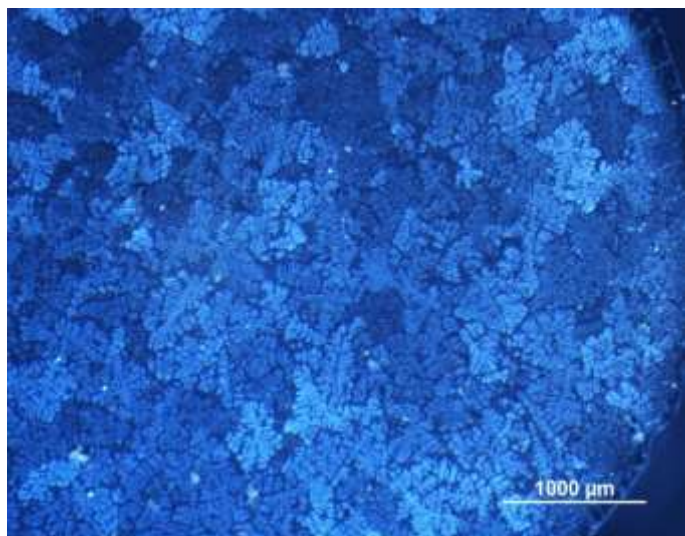


Foto vzorku 613-1-3 - 514 μm

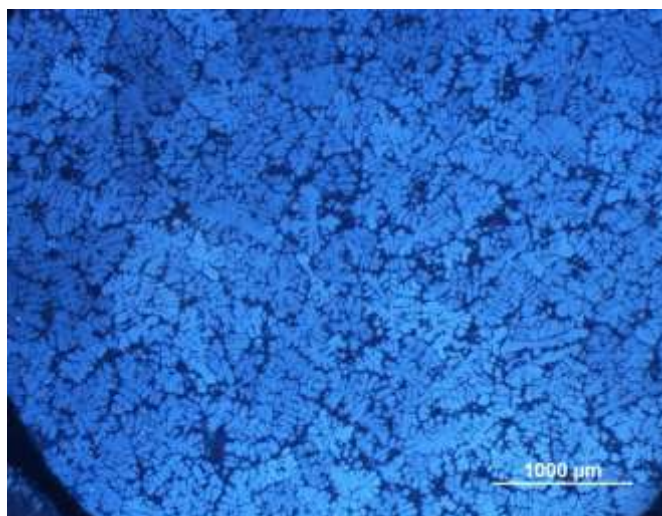


Foto vzorku 614-2-1 - 505μm

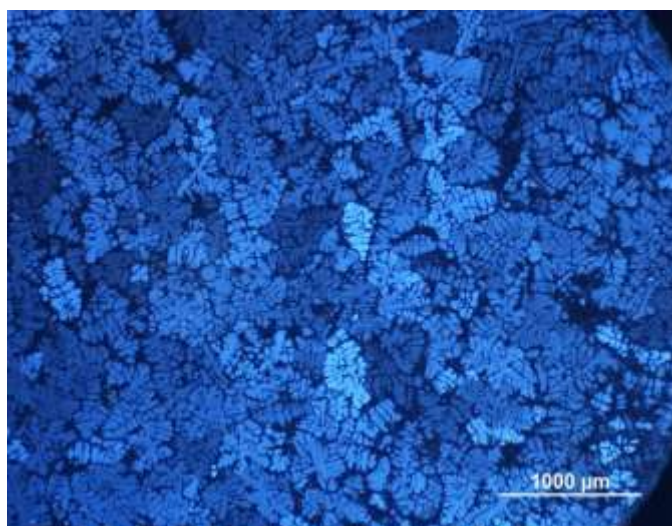


Foto vzorku 614-2-3 - 520μm

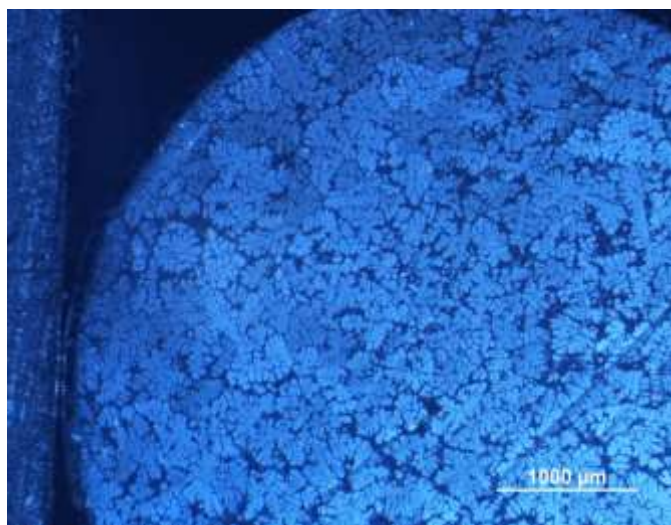


Foto vzorku 615-3-1 - 490μm

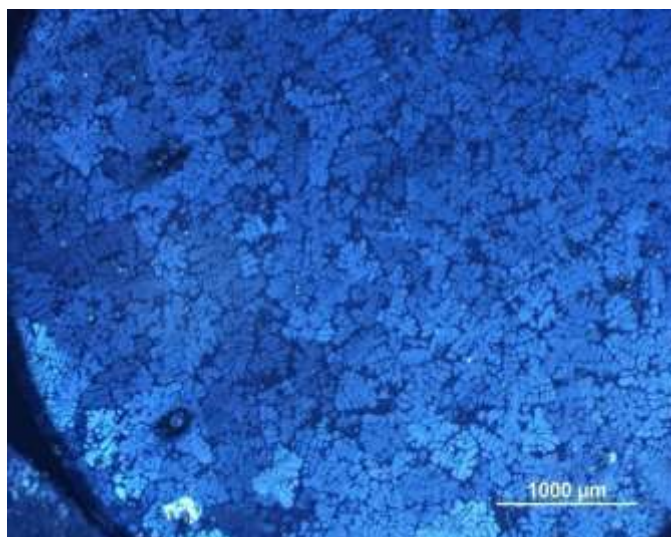


Foto vzorku 615-3-3 - 501μm

**Příloha 7 - měření SDAS indexů po tepelném zpracování:**

Tabulka č. 11

613-1-1 B				613-1-1 H			
1	19	672,61	37,36722	1	12	408,29	37,11727
2	12	366,5	33,31818	2	11	374,43	37,443
3	9	365,65	45,70625	3	16	511,98	34,132
4	11	335,83	33,583	4	8	313,55	44,79286
5	11	435,33	43,533	5	9	323,98	40,4975
6	10	334,42	37,15778	6	15	621,77	44,41214
7	11	225,62	22,562	7	12	377,71	34,33727
8	10	304,97	33,88556	8	9	252,42	31,5525
9	10	297,43	33,04778	9	15	485,1	34,65
10	12	421,71	38,33727	10	9	217	27,125
11	14	528,43	40,64846	11	19	801,39	44,52167
12	10	315,67	35,07444	12	8	292,89	41,84143
13	10	312,95	34,77222	13	9	271,61	33,95125
14	15	546,74	39,05286	14	12	503,42	45,76545
15	13	457,57	38,13083	15	15	564,87	40,34786
16	13	543,63	45,3025	16	11	399,54	39,954
17	9	333,58	41,6975	17	12	459,84	41,80364
18	12	354,77	32,25	18	13	460,79	38,39917
19	9	276,36	34,545	19	11	429,47	42,947
20	10	400,4	44,48889	20	13	465,41	38,78417
<b>Celkové SDAS</b>	<b>230</b>	<b>7830,17</b>	<b>37,28652</b>	<b>Celkové SDAS</b>	<b>239</b>	<b>8535,46</b>	<b>38,9747</b>
613-1-3 E				613-1-3 K			
1	5	176,44	44,11	1	13	439,24	36,60333
2	5	173,96	43,49	2	5	103,65	25,9125
3	3	95,12	47,56	3	7	202,02	33,67
4	5	133,73	33,4325	4	5	166,04	41,51
5	5	164,85	41,2125	5	4	120,35	40,11667
6	5	131,23	32,8075	6	4	96,43	32,14333
7	4	121,7	40,56667	7	4	104,07	34,69
8	6	184,54	36,908	8	4	111,58	37,19333
9	5	169,16	42,29	9	4	129,02	43,00667
10	5	157,25	39,3125	10	7	198,73	33,12167
11	5	149,39	37,3475	11	4	116,45	38,81667
12	8	237,45	33,92143	12	5	121,21	30,3025
13	7	202,01	33,66833	13	3	86,79	43,395
14	4	111,32	37,10667	14	5	124,34	31,085
15	5	145,22	36,305	15	4	116,93	38,97667
16	5	133,46	33,365	16	3	114,05	57,025
17	6	144,27	28,854	17	6	173,28	34,656
18	6	223,8	44,76	18	7	268,23	44,705
19	4	133,3	44,43333	19	4	128,55	42,85
20	9	229,05	28,63125	20	3	91,57	45,785
<b>Celkové SDAS</b>	<b>107</b>	<b>3217,25</b>	<b>36,97989</b>	<b>Celkové SDAS</b>	<b>101</b>	<b>3012,53</b>	<b>37,19173</b>

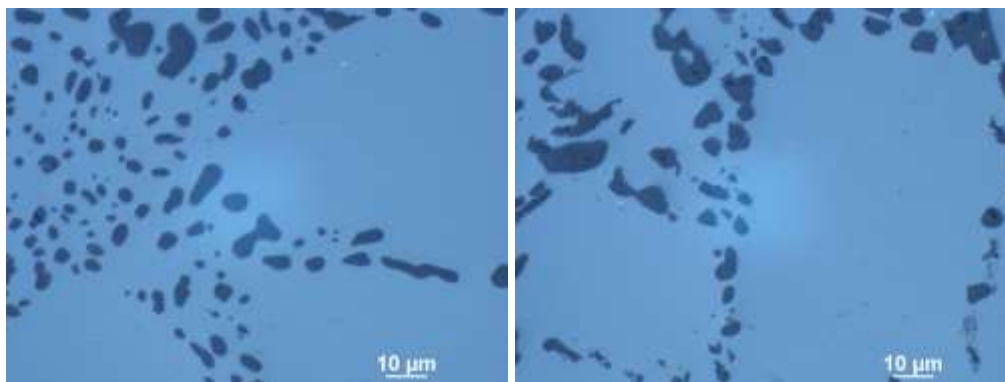
Tabulka č. 12

614-2-1 C				614-2-1 E			
1	12	403,81	36,71	1	18	481,34	28,31412
2	10	279,67	31,07444	2	9	276,95	34,61875
3	10	280,31	31,14556	3	11	379,59	37,959
4	21	578,01	28,9005	4	10	363,18	40,35333
5	14	584,89	44,99154	5	8	238,69	34,09857
6	12	425,17	38,65182	6	9	243,45	30,43125
7	11	421,63	42,163	7	12	427,7	38,88182
8	14	495,78	38,13692	8	14	376,59	28,96846
9	12	545,62	49,60182	9	9	252,18	31,5225
10	12	571,54	51,95818	10	13	375,42	31,285
11	8	350,11	50,01571	11	18	605,13	35,59588
12	8	342,33	48,90429	12	15	349,88	24,99143
13	22	909,63	43,31571	13	7	232,92	38,82
14	20	778,72	40,98526	14	13	395,05	32,92083
15	17	560,24	35,015	15	7	308,34	51,39
16	9	344,52	43,065	16	8	221,32	31,61714
17	15	491,4	35,1	17	14	531,2	40,86154
18	16	560,02	37,33467	18	9	417,82	52,2275
19	11	465,67	46,567	19	14	343,33	26,41
				20	8	215,15	30,73571
<b>Celkové SDAS</b>	<b>254</b>	<b>9389,07</b>	<b>39,95349</b>	<b>Celkové SDAS</b>	<b>226</b>	<b>7035,23</b>	<b>34,1516</b>
614-2-3 B				614-2-3 E			
1	8	254,18	36,31143	1	15	397,98	28,42714
2	9	226,55	28,31875	2	12	442,3	40,20909
3	15	521,33	37,23786	3	11	383,45	38,345
4	15	463,11	33,07929	4	20	689,26	36,27684
5	14	421,29	32,40692	5	10	327,73	36,41444
6	12	339,95	30,90455	6	13	512,55	42,7125
7	11	381,53	38,153	7	17	563,15	35,19688
8	15	417,79	29,84214	8	13	505,47	42,1225
9	12	368,42	33,49273	9	7	326,76	54,46
10	11	352,86	35,286	10	13	423,13	35,26083
11	10	318,58	35,39778	11	20	645,1	33,95263
12	11	365,94	36,594	12	14	509,19	39,16846
13	14	433,1	33,31538	13	11	343,27	34,327
14	9	401,68	50,21	14	12	394,38	35,85273
15	11	501,31	50,131	15	12	361,66	32,87818
16	10	444,23	49,35889	16	14	582,2	44,78462
17	16	485,13	32,342	17	13	410,81	34,23417
18	10	326,76	36,30667	18	8	284,81	40,68714
19	10	463,93	51,54778	19	12	419,15	38,10455
20	14	556,23	42,78692	20	10	351,01	39,00111
<b>Celkové SDAS</b>	<b>237</b>	<b>8043,9</b>	<b>37,06866</b>	<b>Celkové SDAS</b>	<b>257</b>	<b>8873,36</b>	<b>37,44034</b>

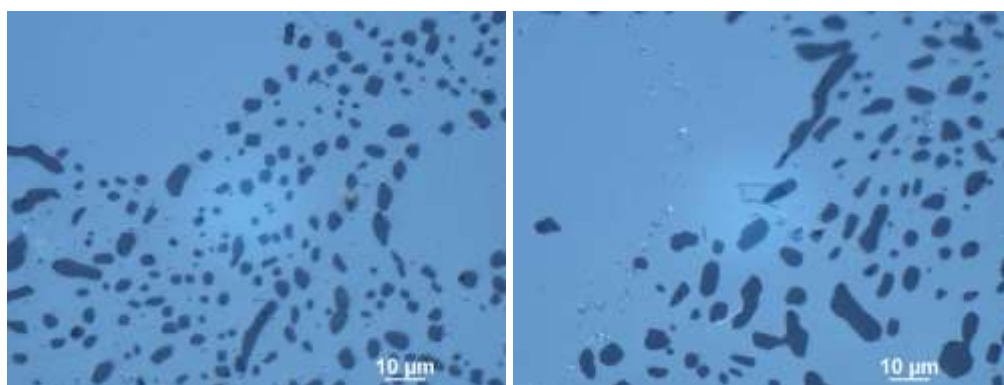
Tabulka č. 13

615-3-1 A				615-3-1 Y			
1	10	272,63	30,29222	1	6	180,78	36,156
2	9	270,64	33,83	2	4	100,24	33,41333
3	7	207,76	34,62667	3	4	161,15	53,71667
4	7	209,63	34,93833	4	6	200,23	40,046
5	7	186,97	31,16167	5	6	189,91	37,982
6	17	434,56	27,16	6	10	334,53	37,17
7	11	457,35	45,735	7	6	210,09	42,018
8	9	293,93	36,74125	8	4	115,91	38,63667
9	13	397,57	33,13083	9	5	138,14	34,535
10	9	288,62	36,0775	10	4	150,41	50,13667
11	8	222,45	31,77857	11	4	146,19	48,73
12	20	825,41	43,44263	12	6	234,6	46,92
13	20	685,95	36,10263	13	5	164,07	41,0175
14	13	497,56	41,46333	14	5	148,47	37,1175
15	14	581,94	44,76462	15	5	153,27	38,3175
16	13	523,31	43,60917	16	6	228,03	45,606
17	12	516,89	46,99	17	4	122,53	40,84333
18	17	568,37	35,52313	18	6	208,81	41,762
19	6	192,34	38,468	19	6	209,23	41,846
20	7	204,99	34,165	20	6	207,06	41,412
<b>Celkové SDAS</b>	<b>229</b>	<b>7838,87</b>	<b>37,50656</b>	<b>Celkové SDAS</b>	<b>108</b>	<b>3603,65</b>	<b>40,95057</b>
615-3-3 F				615-3-3 G			
1	8	360,57	51,51	1	12	477,38	43,39818
2	15	453,16	32,36857	2	8	262,07	37,43857
3	11	356,06	35,606	3	6	240,25	48,05
4	11	328,63	32,863	4	10	363,46	40,38444
5	8	359,54	51,36286	5	9	381,62	47,7025
6	11	437,32	43,732	6	9	275,98	34,4975
7	10	379,65	42,18333	7	12	442,74	40,24909
8	8	274,37	39,19571	8	8	274,86	39,26571
9	11	418,31	41,831	9	7	239,33	39,88833
10	11	359,68	35,968	10	18	719,11	42,30059
11	12	417,19	37,92636	11	11	388,07	38,807
12	11	415,74	41,574	12	16	535,36	35,69067
13	8	307,29	43,89857	13	11	379,14	37,914
14	5	148,72	37,18	14	12	439,88	39,98909
15	11	410,95	41,095	15	16	586,26	39,084
16	9	339,84	42,48	16	14	421,36	32,41231
17	13	410,95	34,24583	17	10	440,6	48,95556
18	10	358,99	39,88778	18	11	387,57	38,757
19	11	408,06	40,806	19	12	474,9	43,17273
20	11	441,22	44,122	20	8	280,96	40,13714
<b>Celkové SDAS</b>	<b>205</b>	<b>7386,24</b>	<b>39,92562</b>	<b>Celkové SDAS</b>	<b>220</b>	<b>8010,9</b>	<b>40,0545</b>

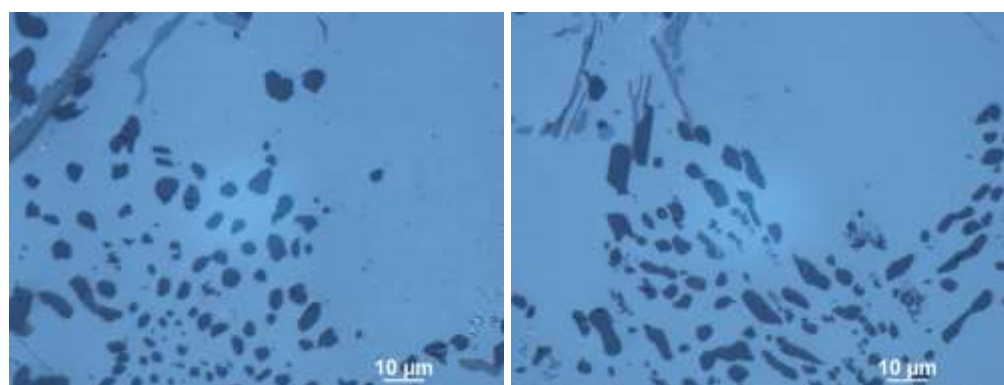
**Příloha 8 – dokumentace hodnocení morfologie eutektika po tepelném zpracování:**



Obr. 4 Vlevo vzorek 613-1-1, vpravo vzorek 613-1-3



Obr. 5 Vlevo vzorek 614-2-1, vpravo vzorek 614-2-3



Obr. 6 Vlevo vzorek 615-3-1, vpravo vzorek 615-3-3

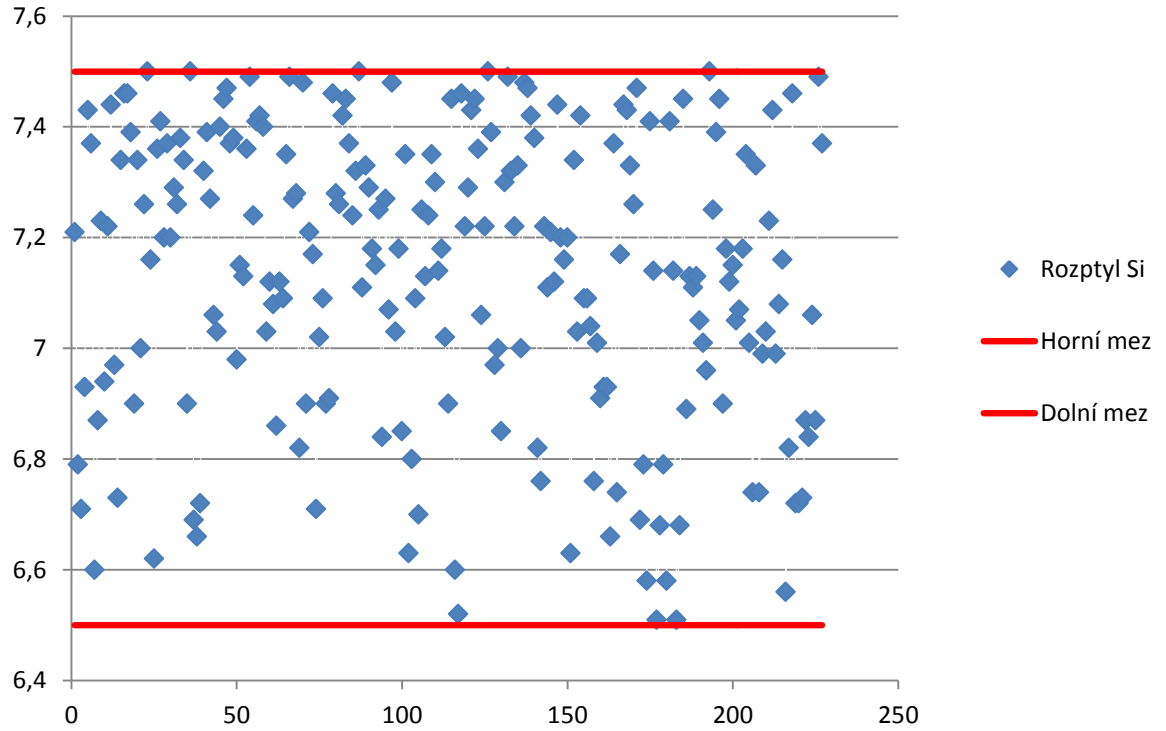
**Příloha 9 – tabulka závislosti SDAS na mechanických hodnotách (613-1-1)**

Tabulka č. 14

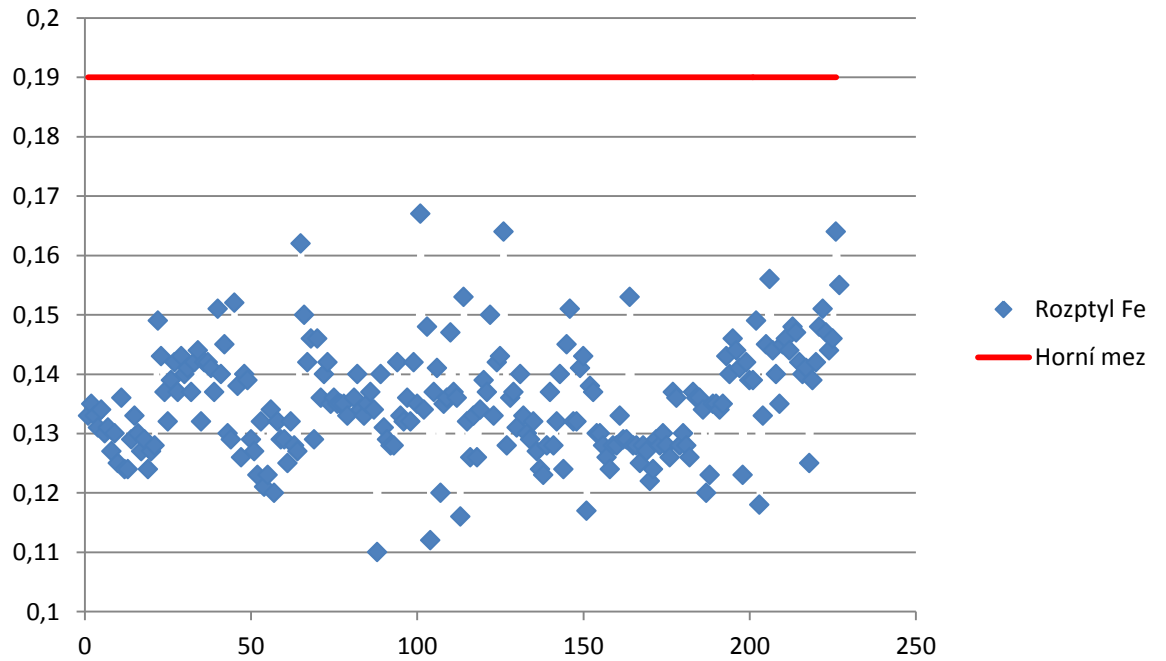
SDAS	Rm [MPa]	Rp [MPa]
36,38	327,24	292,2
36,61	328,06	264,38
37,29	329,16	323,89
37,87	328,22	304,6
38,97	326,4	232,78
39,18	329,71	304,63
40,34	328,85	303,6

## Příloha 10 – koncentrace prvků:

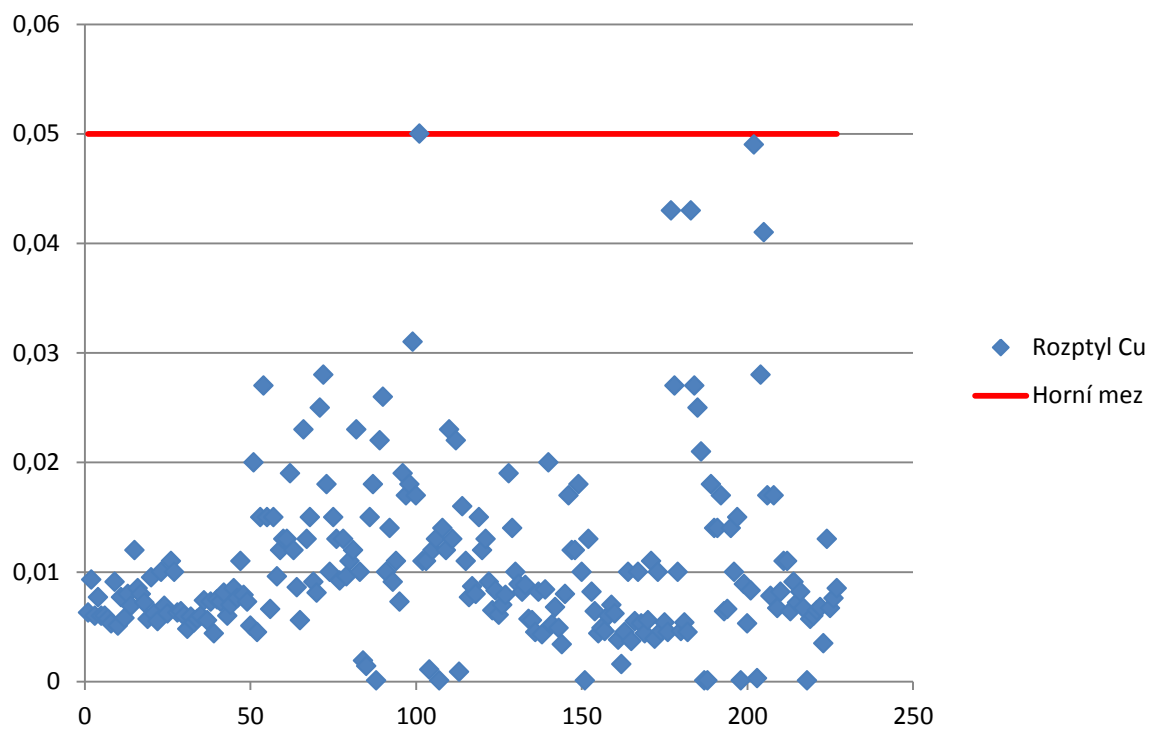
### Rozptyl koncentrací Si



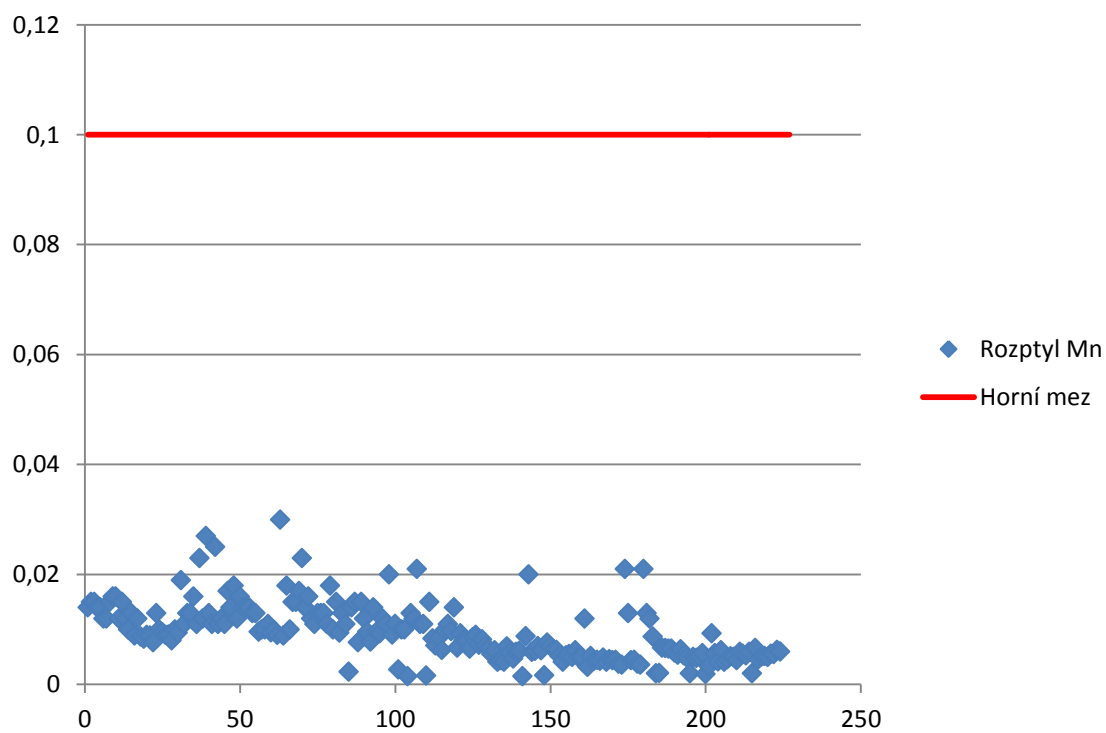
### Rozptyl koncentrace Fe



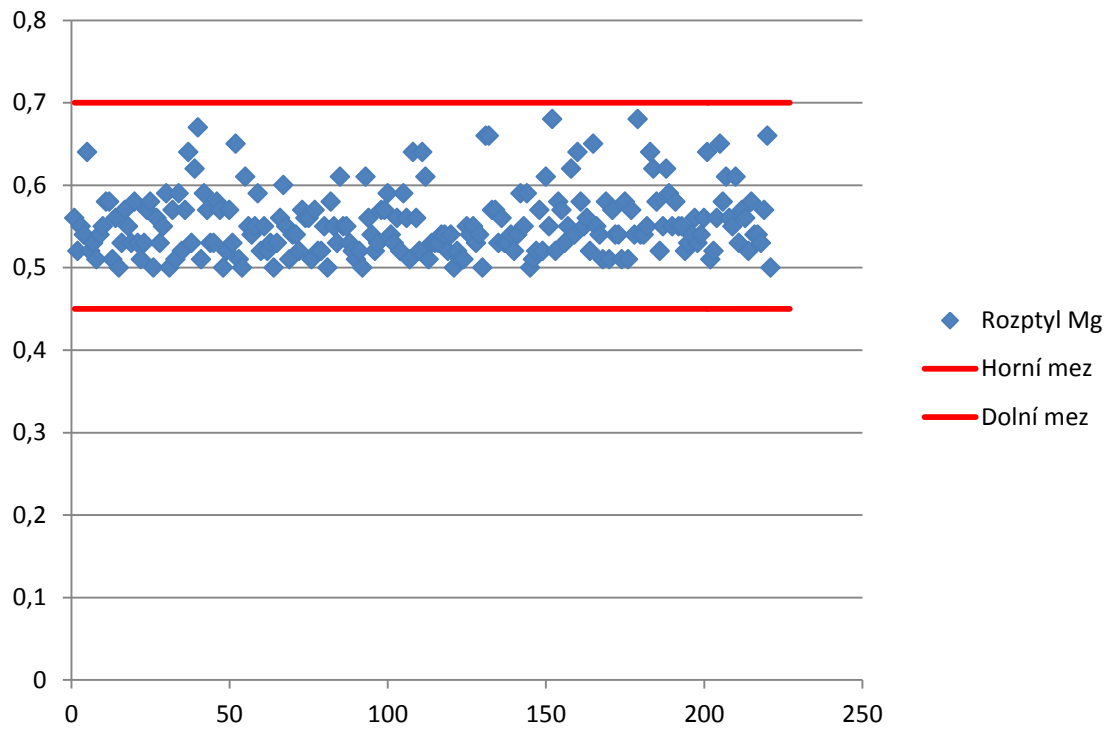
Rozptyl koncentrací Cu:



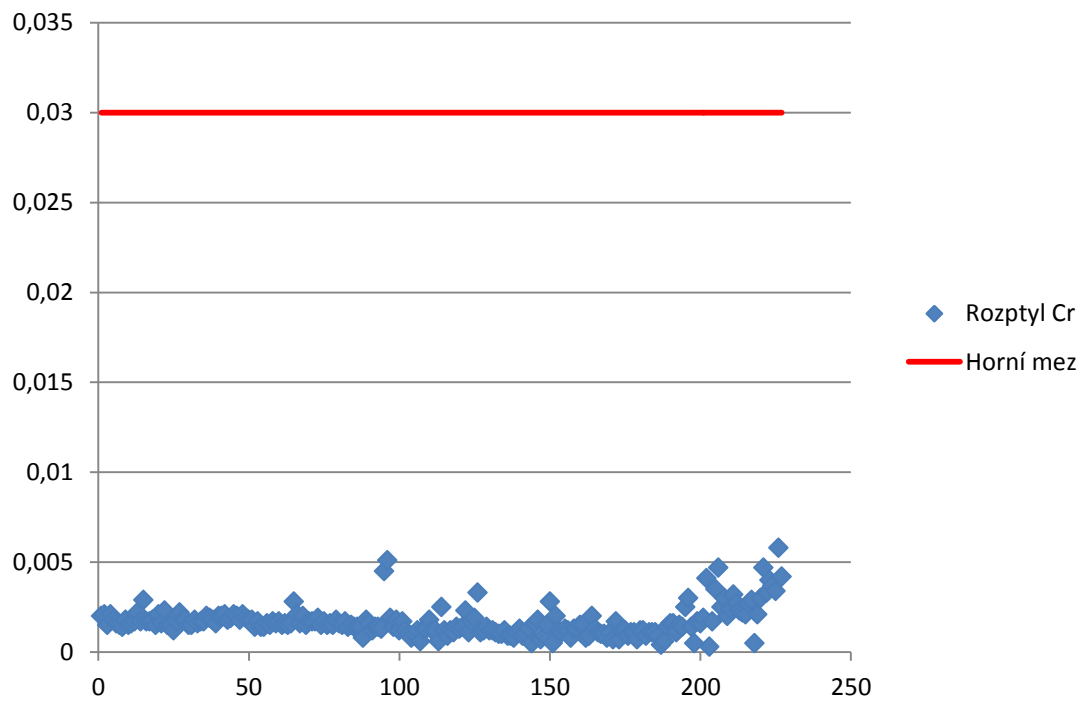
Rozptyl koncentrací Mn



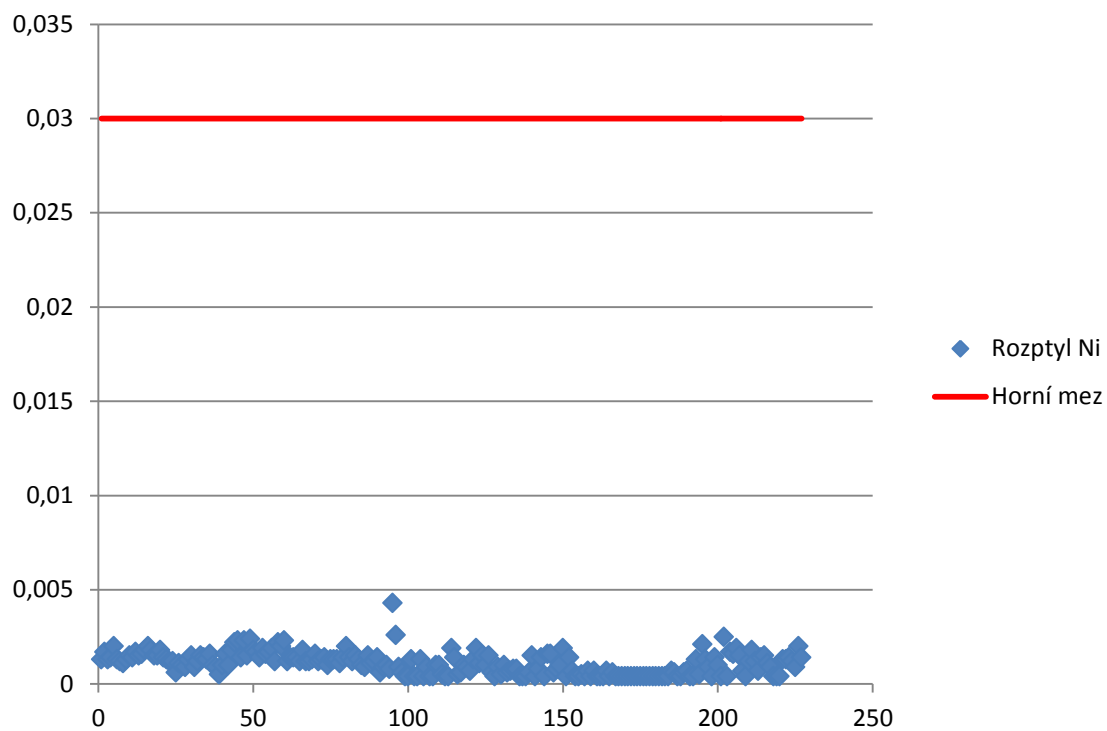
### Rozptyl koncentrací Mg



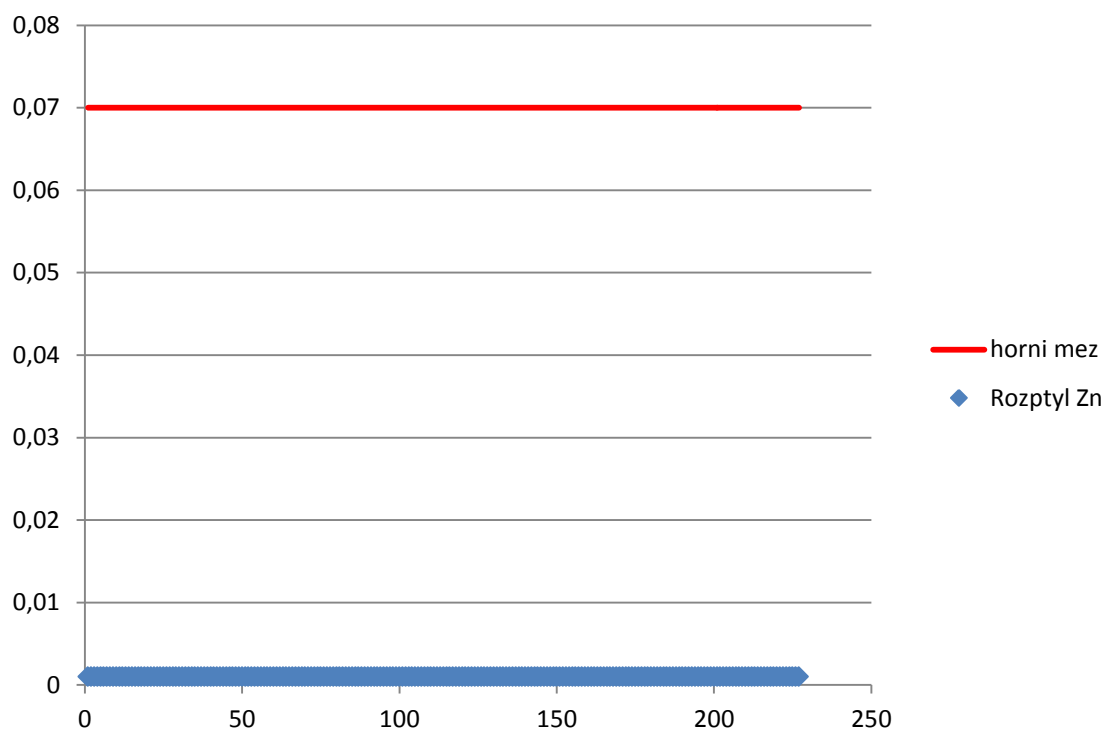
### Rozptyl koncentrací Cr



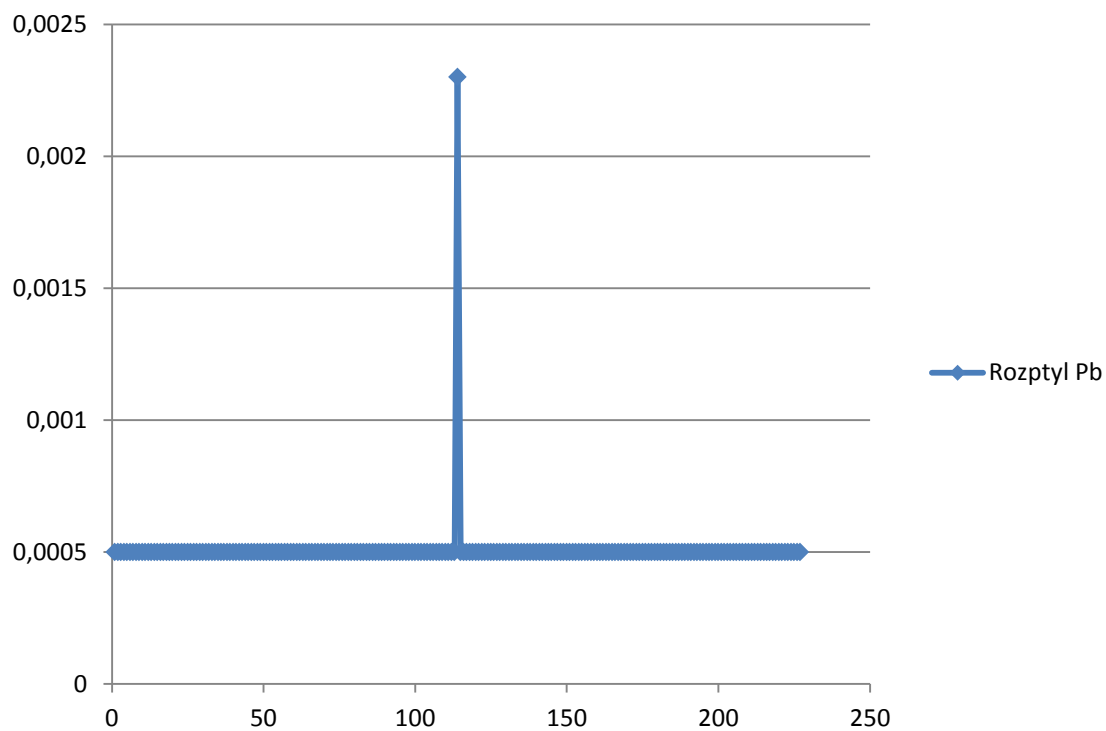
### Rozptyl koncentrací Ni



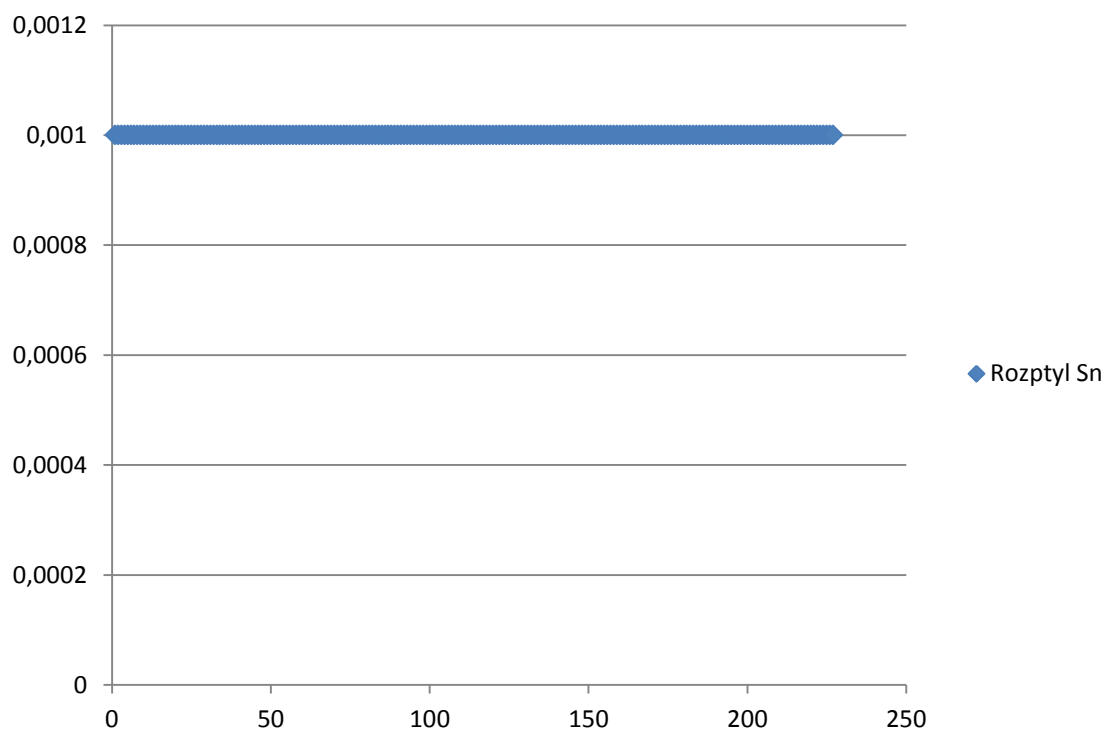
### Rozptyl koncentrací Zn



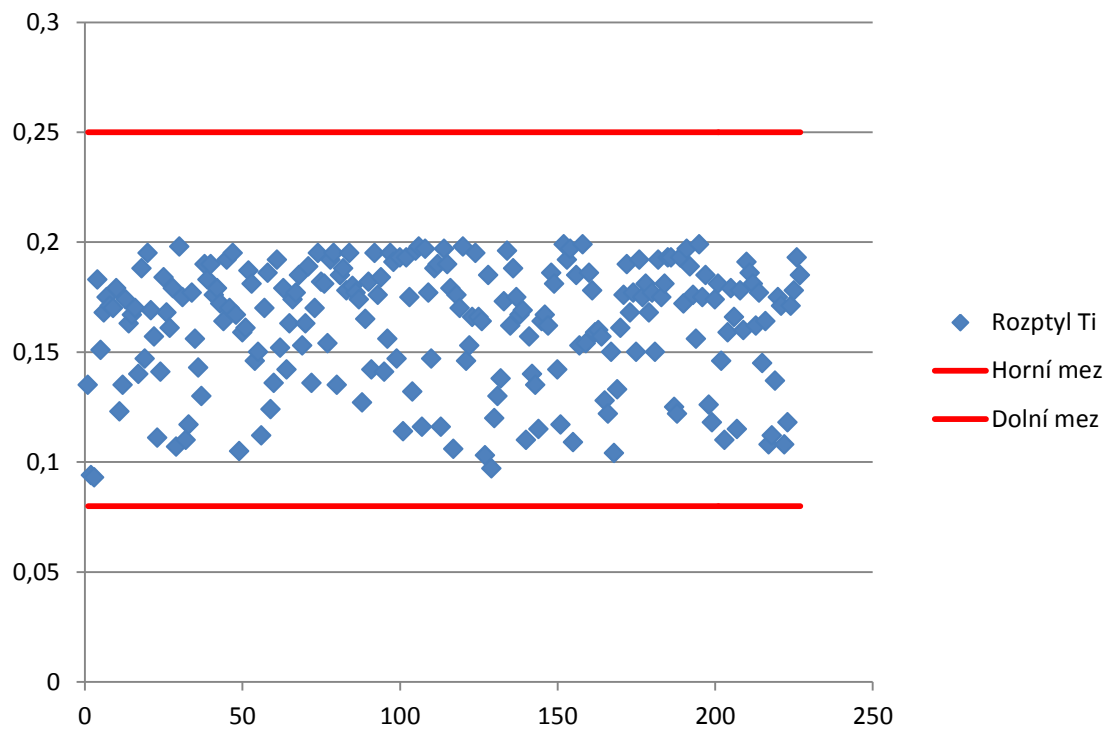
Rozptyl koncentrací Pb



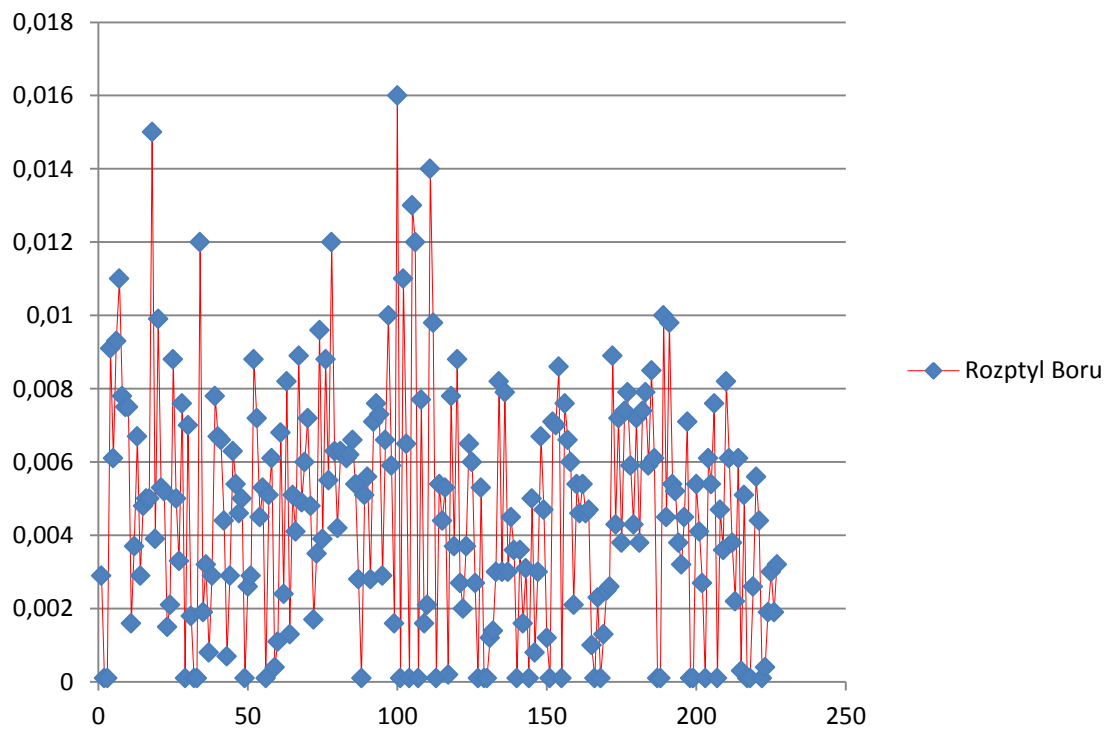
Rozptyl koncentrací Sn



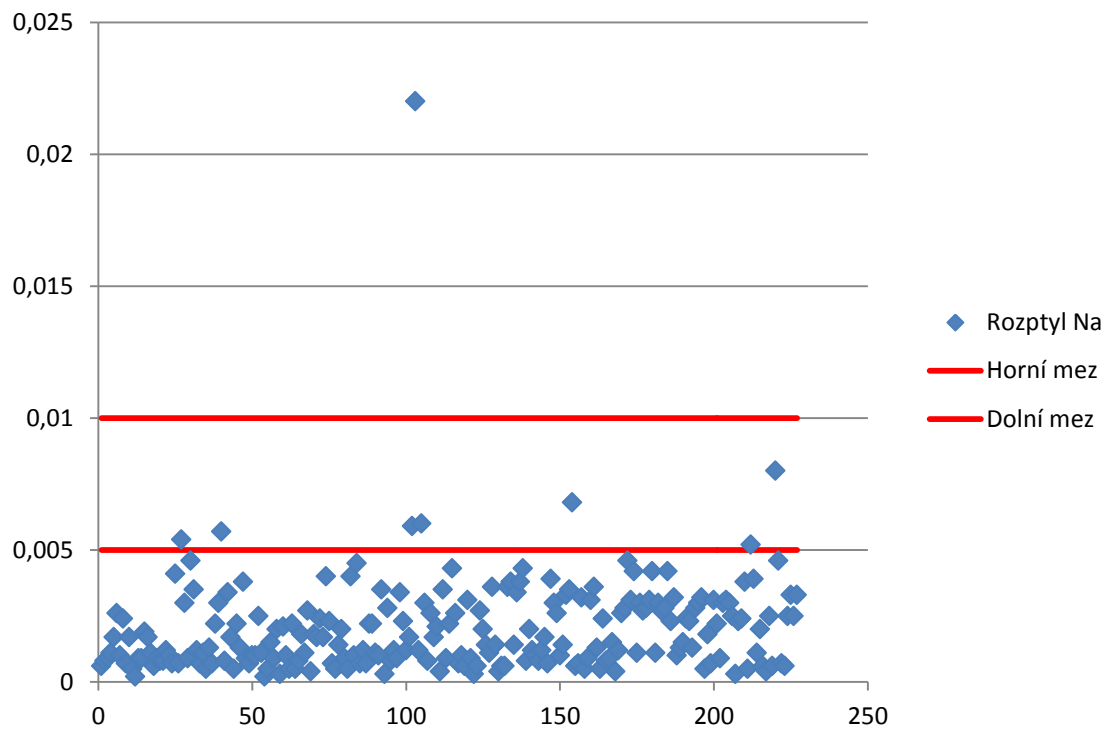
Rozptyl koncentrací Ti



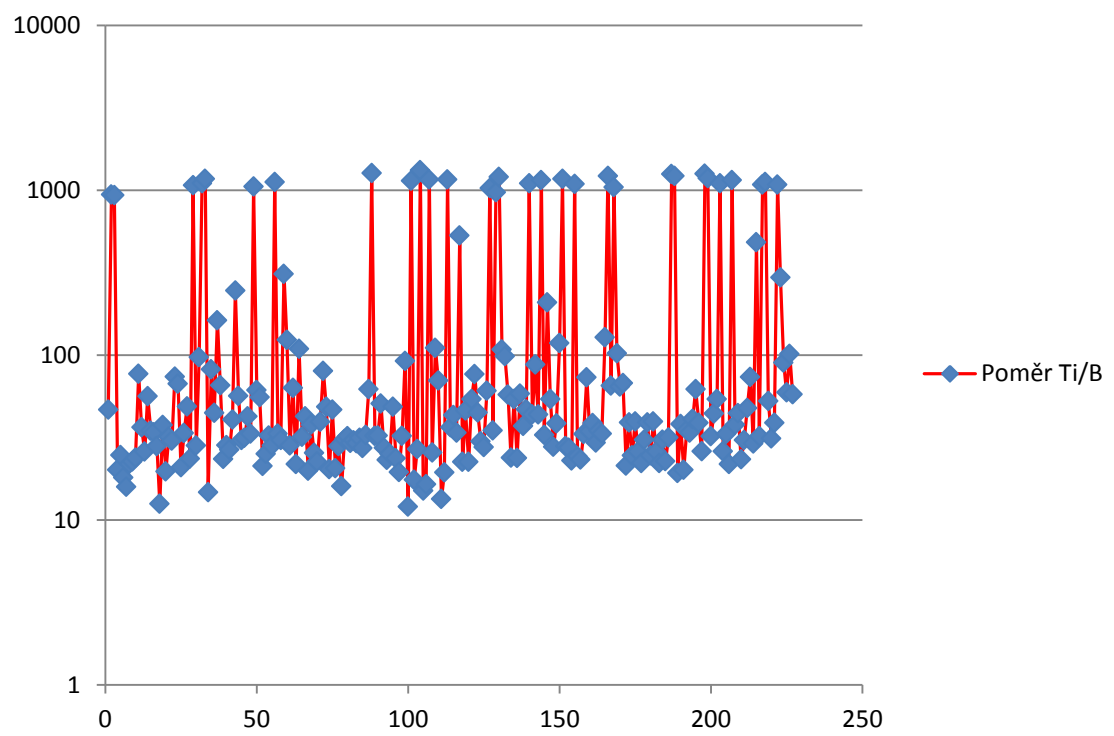
Rozptyl koncentrací B



### Rozptyl koncentrací Na

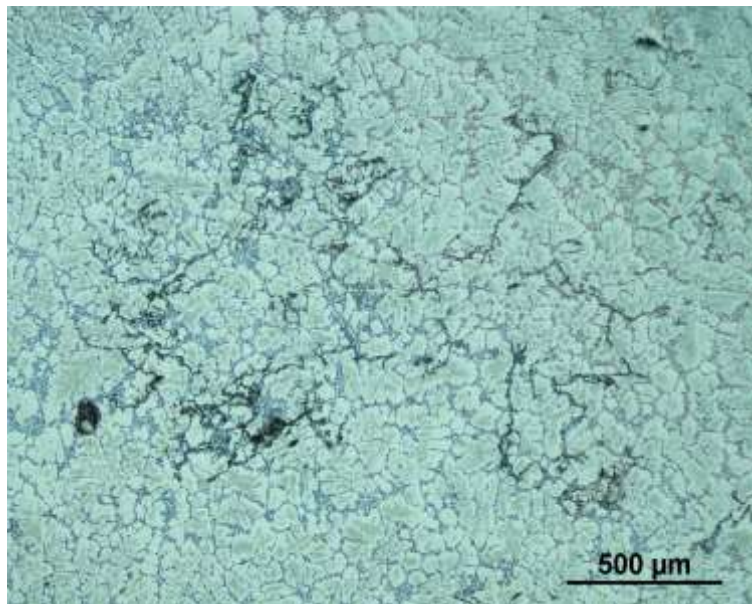


### Poměr koncentrací Ti/B

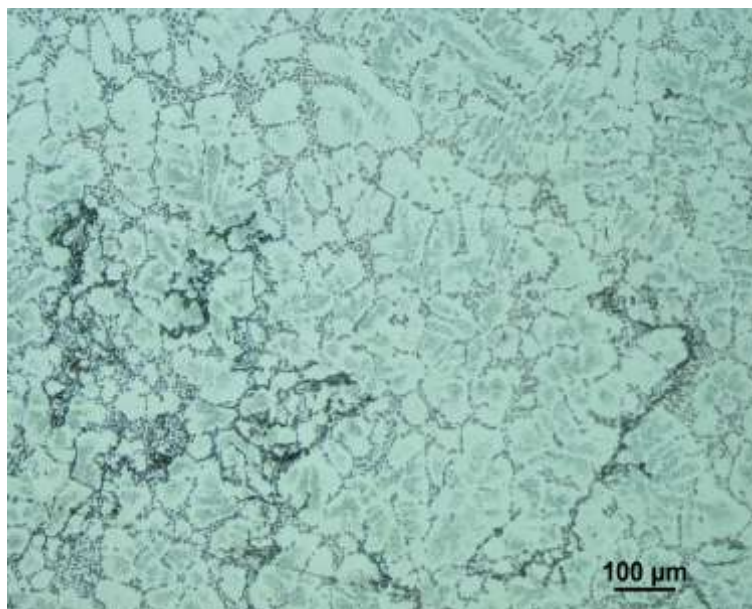


## Příloha 11 – Foto dokumentace vad

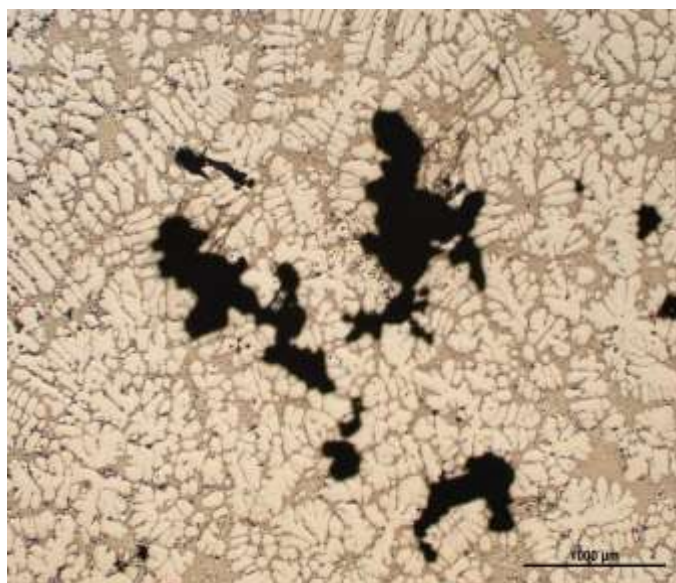
Staženiny:



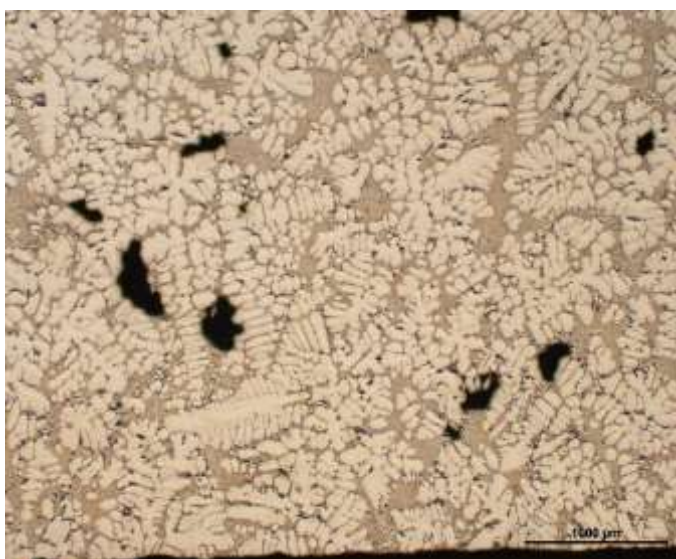
Obr. 7 Foto oxidických blan, Neophot, 50x zvětšeno



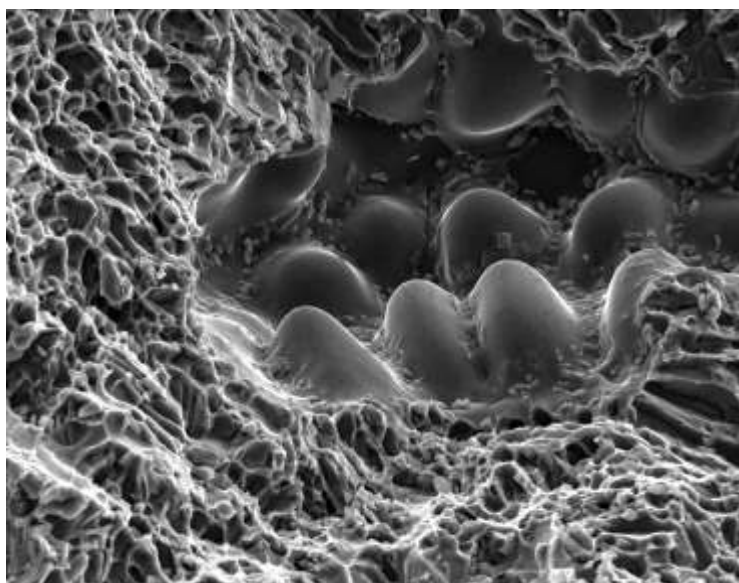
Obr. 8 Detail obr. 58, 100x zvětšeno



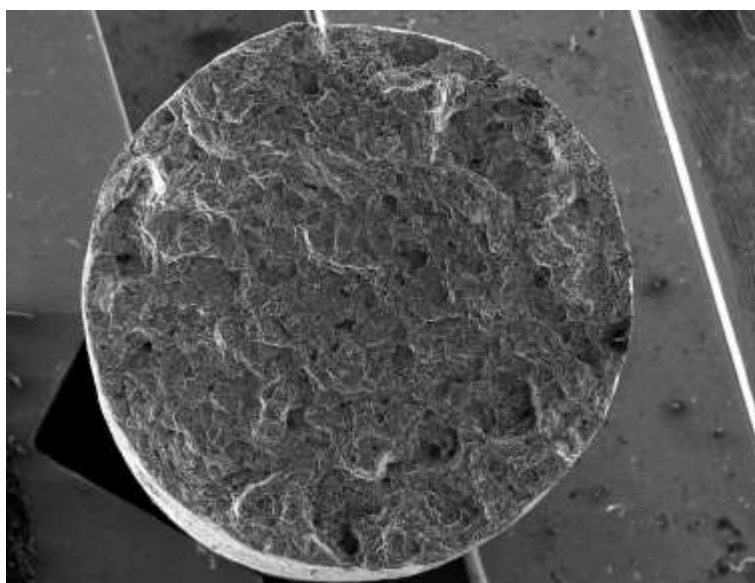
Obr. 9 Řediny



Obr. 10 Mikrořediny

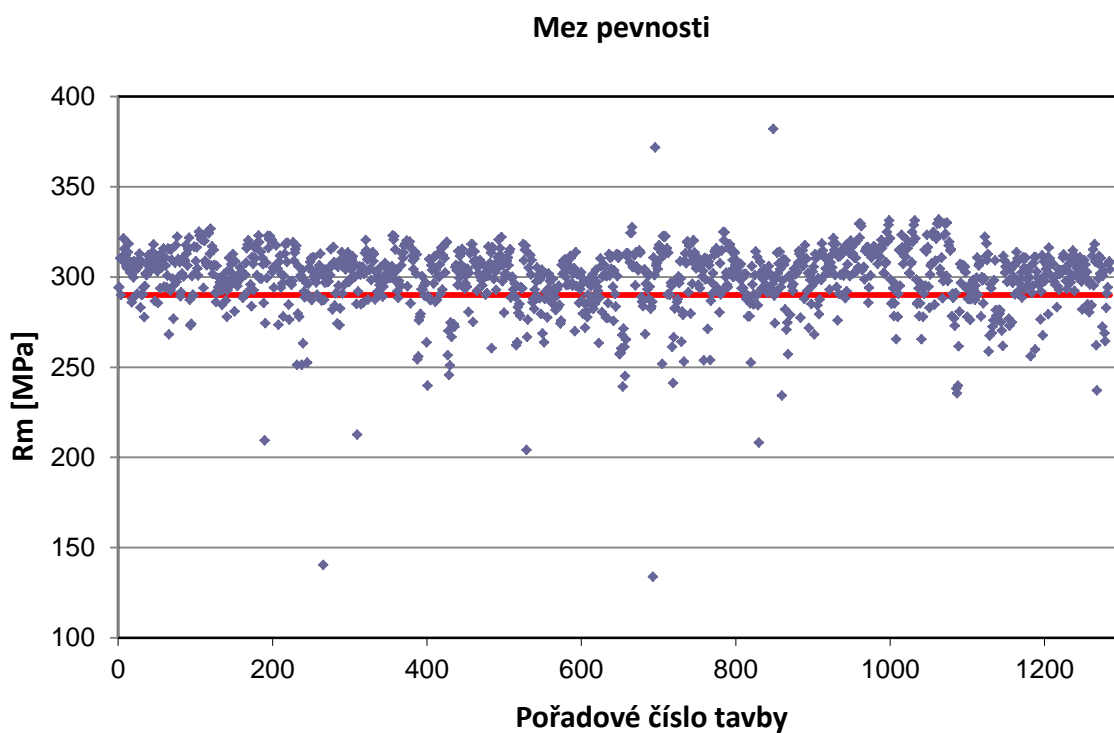


Obr. 11 Detail staženiny, Lyra Tescan, UFM Brno

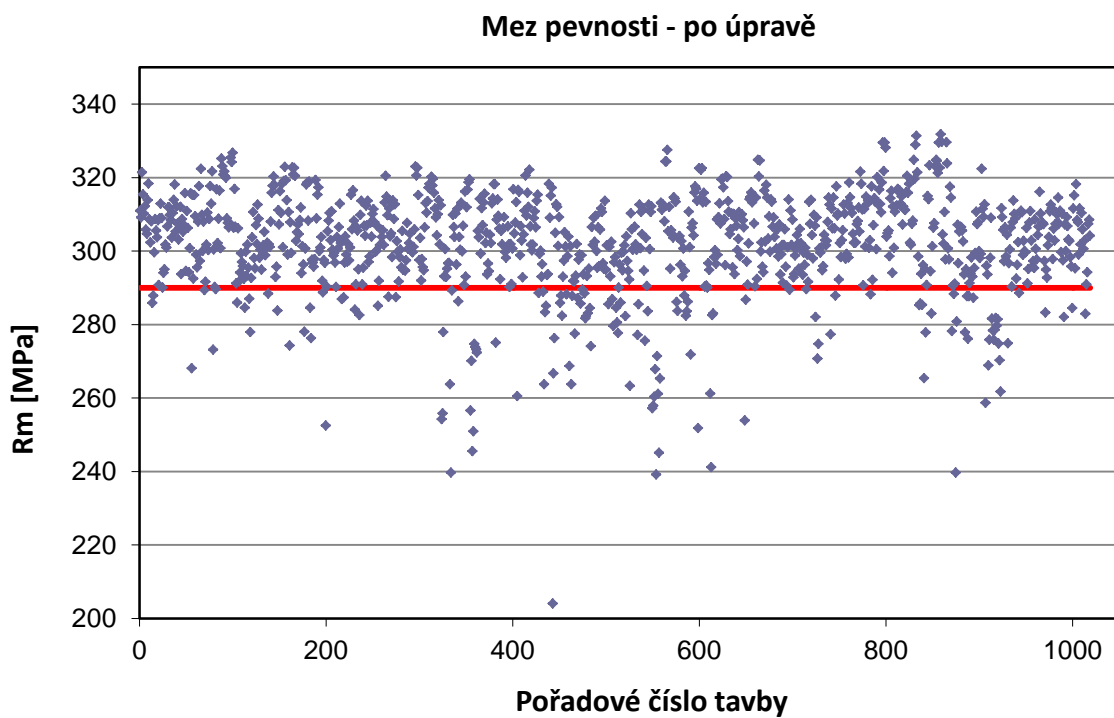


Obr. 12 Pohled na lomovou plochu, Lyra Tescan, UFM Brno

**Příloha 12 – Grafy výsledků hodnocení dodržení normovaných tahových hodnot**

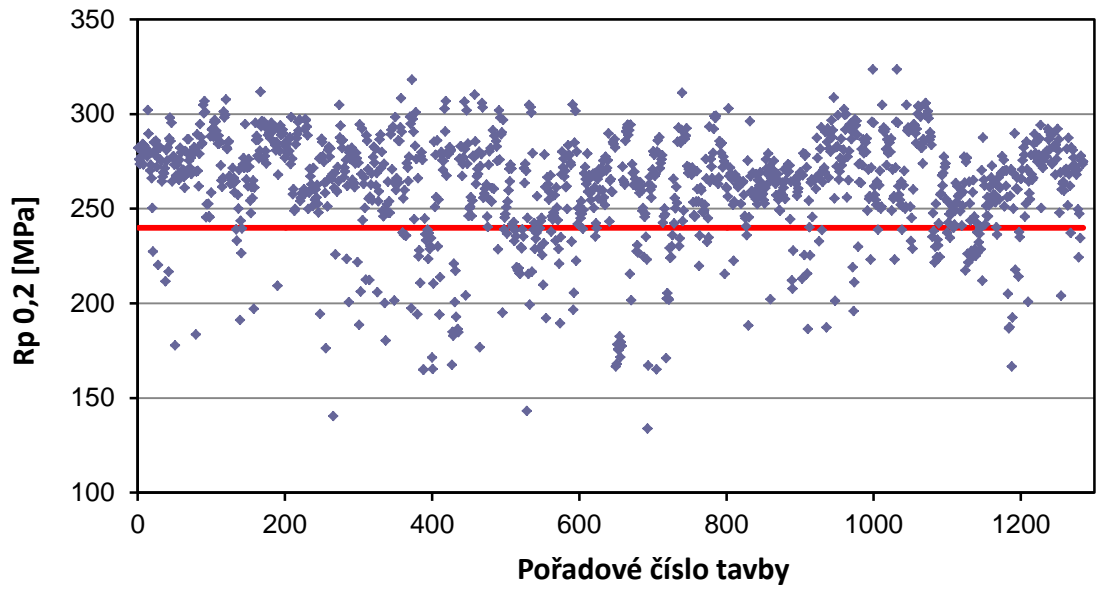


Obr. 13 Graf Rm s vadnými tyčemi



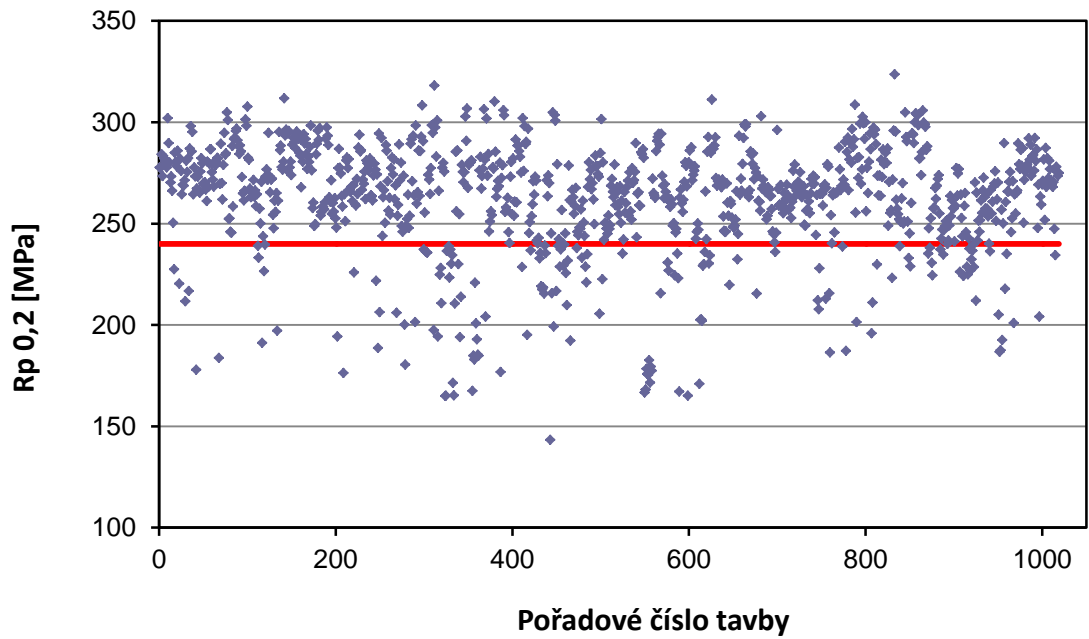
Obr. 14 Graf mezí pevnosti upravený

### Mez kluzu

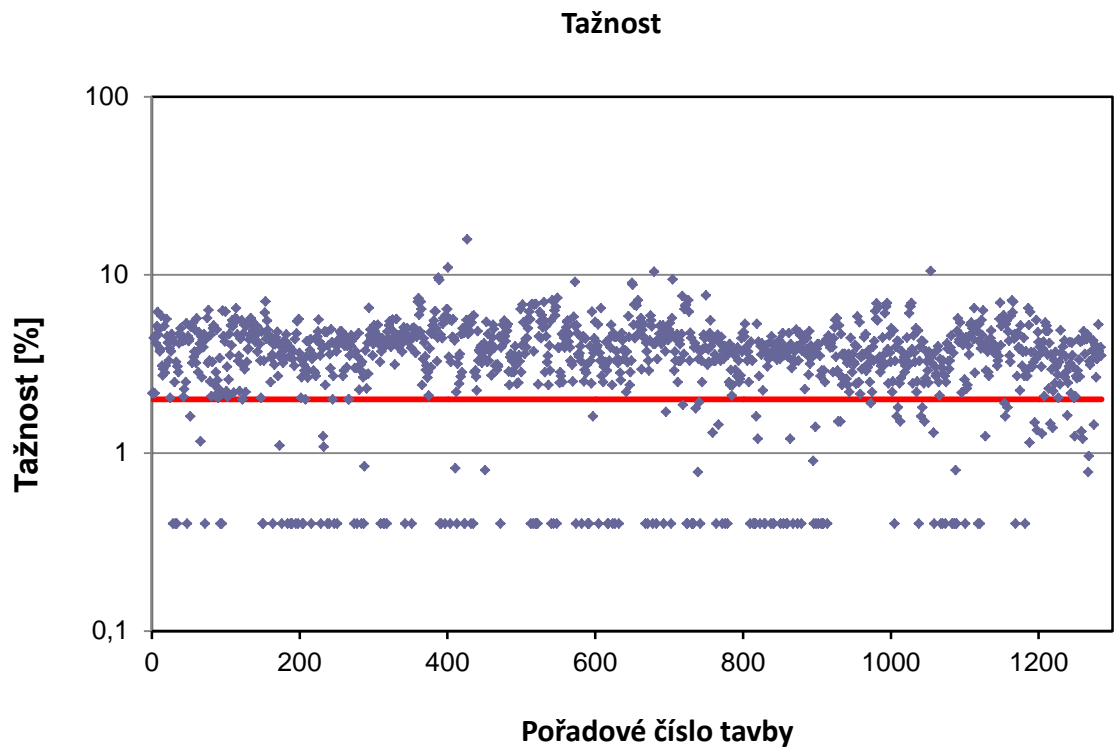


Obr. 15 Graf  $R_p$  s vadnými tyčemi

### Mez kluzu - po úpravě

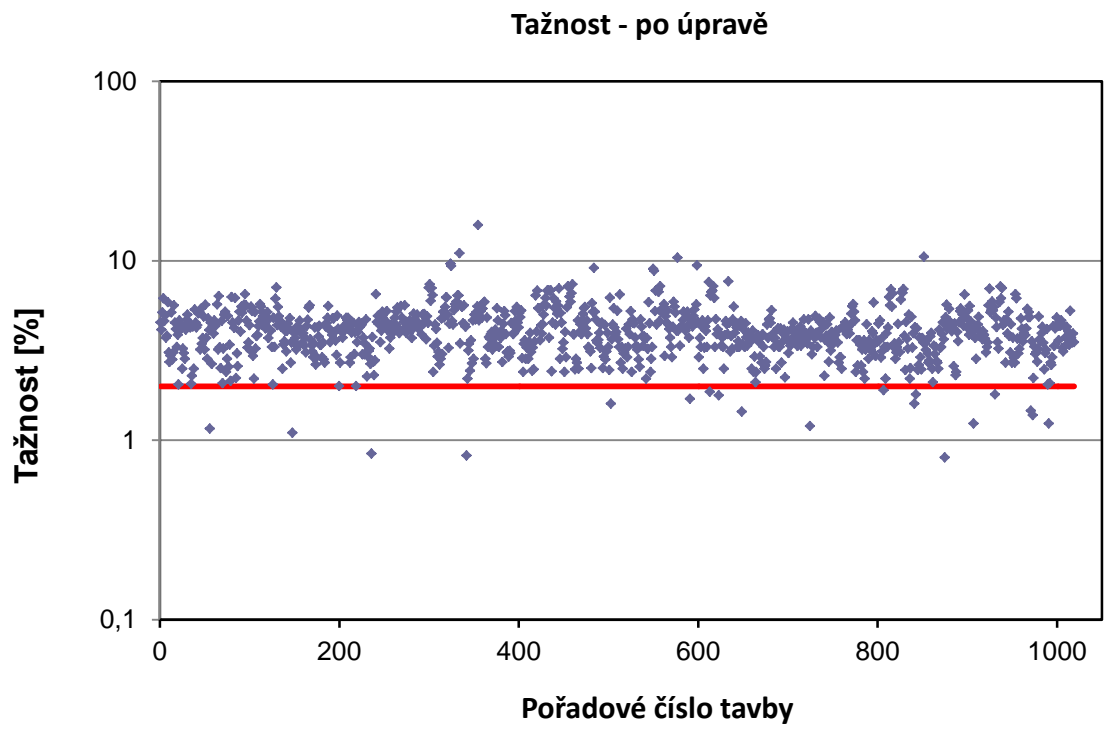


Obr. 16 Graf  $R_p$  upravený



Obr. 17

Graf A s vadnými tyčemi



Obr. 18

Graf A upravený

