

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301

Strojní inženýrství

Studijní obor: 3911T016

Materiálové inženýrství a strojírenská  
metalurgie

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Termická analýza a velikost zrna primárního křemíku v hliníkové eutektické slitině KS 1275 v závislosti na změně poměru vratného materiálu v tavně

Autor: **Bc. Ladislav Navrátil**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Hála, CSc.**

Akademický rok 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav NAVRÁTIL**  
Osobní číslo: **S14N0091P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**  
Název tématu: **Termická analýza a velikost zrna primárního křemiku v hliníkové eutektické slitině KS 1275 v závislosti na změně poměru vratného materiálu v tavně**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

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

1. Úvod
2. Slitiny hliníku a jejich odlévání
3. Termická analýza Al slitin a její důvody
4. Využití software Magma pro řešení
5. Experimentální určení maximálního množství vratu
6. Vyhodnocení získaných výsledků
7. Srovnání výsledků s praxí
8. Doporučení pro výrobu
9. Závěr

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **50-60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- **Roučka, J.:** Metalurgie neželezných slitin. CERM Brno, 2004, 148 s., ISBN: 80-214-2790-6
- **Michna, Š. a kol.:** Encyklopedie hliníku. Prešov 2005, 700 s., ISBN: 80-89041-88-4
- **Mazanec, K.:** Fyzikální metalurgie neželezných kovů a složených materiálů. 2. vydání, 148 s., Ostrava 1987

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Miroslav Hála, CSc.**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Martin Valík**

Slévárna Ústí n. L. - Trmice

Datum zadání diplomové práce:

**21. září 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**20. května 2016**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž  
vedoucí katedry

V Plzni dne 22. září 2014

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

|                      |  |                              |                                 |
|----------------------|--|------------------------------|---------------------------------|
| <b>AUTOR</b>         | Příjmení<br>Navrátil   | Jméno<br>Ladislav            |                                 |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b> | 3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“   |                              |                                 |
| <b>VEDOUcí PRÁCE</b> | Příjmení (včetně titulů)<br>Ing. Hála, CSc.  | Jméno<br>Miroslav            |                                 |
| <b>PRACOVISŤE</b>    | ZČU - FST - KMM  |                              |                                 |
| <b>DRUH PRÁCE</b>    | <b>DIPLOMOVÁ</b>   | <del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del> | <b>Nehodící se<br/>škrtněte</b> |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>   | Termická analýza a velikost zrna primárního křemíku v hliníkové eutektické slitině KS 1275 v závislosti na změně poměru vratného materiálu v tavně |                              |                                 |

|                |         |                |     |                        |      |
|----------------|---------|----------------|-----|------------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KMM | <b>ROK<br/>ODEVZD.</b> | 2016 |
|----------------|---------|----------------|-----|------------------------|------|

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|               |    |                     |    |                          |    |
|---------------|----|---------------------|----|--------------------------|----|
| <b>CELKEM</b> | 84 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 64 | <b>GRAFICKÁ<br/>ČÁST</b> | 13 |
|---------------|----|---------------------|----|--------------------------|----|

|   |  |
|---|--|
| <p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS<br/>(MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL<br/>POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>   | <p>Diplomová práce se zabývá velikostí primárního křemíku v závislosti na poměru vratného materiálu v tavně pomocí termické analýzy a obrazové analýzy. Termická analýza je dále využita pro porovnání reálných křivek chladnutí s teoretickou křivkou chladnutí získanou ze softwaru Magma.</p> |
| <p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA<br/>JEDNOSLOVNÉ<br/>POJMY,<br/>KTERÉ VYSTIHUJÍ<br/>PODSTATU PRÁCE</b></p> | <p style="text-align: center;">Termická analýza, KS 1275, Magma soft, obrazová analýza, velikost zrna, siluminy</p>  |



## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

|                          |   |                  |                                   |
|--------------------------|---|------------------|-----------------------------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname<br>Navrátil   | Name<br>Ladislav |                                   |
| <b>FIELD OF STUDY</b>    | 3911T016 “ Materials Engineering and Engineering Metallurgy“  |                  |                                   |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Ing. Hála,CSc.  | Name<br>Miroslav |                                   |
| <b>INSTITUTION</b>       | ZČU - FST - KMM   |                  |                                   |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | <b>DIPLOMA</b>  | <b>BACHELOR</b>  | <b>Delete when not applicable</b> |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Thermal Analysis and Primary Silicon Grains Size in KS 1275 Eutectic Aluminium Alloy Depending on Changing Ratio of Recyclable Material in the Melt |                  |                                   |

|                |                        |                   |     |                     |      |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical Engineering | <b>DEPARTMENT</b> | KMM | <b>SUBMITTED IN</b> | 2016 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|                |    |                  |    |                       |    |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| <b>TOTALLY</b> | 84 | <b>TEXT PART</b> | 64 | <b>GRAPHICAL PART</b> | 13 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

|   |   |
|---|---|
| <b>BRIEF DESCRIPTION</b><br><br><b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b> | The thesis deals with the size of primary silicon grains depending on the proportion of recyclable material (scrap) in the melt using thermal analysis, and image analysis. Thermal analysis is also used to compare the actual cooling curves with the theoretical cooling curve obtained from Magma soft. |
| <b>KEY WORDS</b>  | Thermal analysis, KS 1275, Magma soft,image analysis , grain size, silumin  |

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

**V Plzni dne:** .....

.....

**podpis autora**

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Hálovi, CSc. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji konzultantovi ze společnosti Kolbenschmidt Czech Republic a.s. Ing. Martinu Valíkovi za poskytnuté informace, ochotu a věnovaný čas.

Tato diplomová práce a provedené analýzy byly realizovány na základě řešení studenstkého projektu SGS-2016-036 „Analýza, vývoj a modifikace strojírenské technologie v oblasti objemového zpracování moderních materiálů, využívaných v oblasti energetických strojů, dopravních prostředků a souvisejících strojírenských aplikací“.

## Seznam symbolů a zkratk

|                  |       |  |
|------------------|-------|--|
| $\Delta G$       | ..... | změna Gibbsovy volné energie [J]                           |
| $\Delta H$       | ..... | změna entalpie [J]   |
| $T$              | ..... | absolutní teplota [K]                                      |
| $\Delta S$       | ..... | změna entropie [J.K <sup>-1</sup> ]                        |
| $l$              | ..... | specifické skupenské teplo tání [J.Kg <sup>-1</sup> ]      |
| $m$              | ..... | hmotnost [Kg]  |
| $Q$              | ..... | latentní teplo [J]   |
| $\Delta T_{R-U}$ | ..... | rozdíl teplot rekalescence a maximálního přechlazení [°C]  |
| $T_R$            | ..... | teplota rekalescence [°C]                                  |
| $T_U$            | ..... | teplota maximálního přechlazení [°C]                       |
| <b>CNC</b>       | ..... | Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem      |
| <b>FDU</b>       | ..... | Foundry Degassing Unit – rotorové odplyňovací zařízení     |
| <b>CAD</b>       | ..... | Computer-Aided design – počítačem podporované projektování |
| <b>KS 1275</b>   | ..... | interní norma společnosti Kolbenschmidt a.s.               |

## Obsah

|   |    |
|---|----|
| Seznam symbolů a zkratk   | 1  |
| Obsah   | 2  |
| Úvod  | 4  |
| 1 Slitiny hliníku a jeho odlévání                                 | 5  |
| 1.1 Legující prvky Al slitin                                      | 5  |
| 1.2 Technologické vlastnosti Al slitin                            | 6  |
| 1.3 Slévárenské slitiny Al-Si                                     | 7  |
| 1.4 Krystalizace slitin hliníku                                   | 8  |
| 1.4.1 Nukleace krystalů   | 9  |
| 1.4.2 Růst krystalů   | 9  |
| 1.4.3 Morfologie eutektika ve slitinách Al-Si                     | 10 |
| 1.5 Výroba pístů  | 11 |
| 1.6 Odlévání hliníku a jeho slitin                                | 13 |
| 2 Termická analýza  | 17 |
| 3 Software Magma  | 20 |
| 4 Experimentální část   | 22 |
| 5 Experimentální určení maximálního množství vratu                | 22 |
| 5.1 Zařízení pro termickou analýzu                                | 22 |
| 5.2 Simulace procesu v softwaru Magma                             | 23 |
| 5.3 Popis experimentu   | 26 |
| 5.4 Termická analýza – křivky chladnutí                           | 28 |
| 5.4.1 První tavba slitiny KS 1275 – 100% blok                     | 28 |
| 5.4.2 Druhá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok, 50% zmetky          | 30 |
| 5.4.3 Třetí tavba slitiny KS 1275 – 50% blok, 50% ořez            | 32 |
| 5.4.4 Čtvrtá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 25% zmetky 25% ořez | 34 |
| 5.4.5 Pátá tavba slitiny KS 1275 – 70% blok 30% ořez              | 36 |
| 5.4.6 Zhodnocení výsledků termické analýzy                        | 38 |
| 5.5 Metalografické zhodnocení velikosti zrna                      | 39 |
| 5.5.1 Příprava vzorků   | 40 |
| 5.5.2 První tavba slitiny KS 1275 – 100% blok                     | 40 |
| 5.5.3 Druhá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 50% zmetky           | 45 |
| 5.5.4 Třetí tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 50% ořez             | 47 |
| 5.5.5 Čtvrtá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 25% zmetky 25% ořez | 50 |
| 5.5.5 Pátá tavba slitiny KS 1275 – 70% blok 30% ořez              | 53 |
| 5.5.7 Výsledky obrazové analýzy                                   | 56 |
| 5.6 Ekonomické hodnocení  | 58 |
| 6 Diskuse výsledků  | 59 |
| 7 Závěr   | 60 |
| Seznam obrázků  | 61 |
| Seznam grafů  | 62 |
| Seznam tabulek  | 63 |
| Literatura  | 64 |

Seznam příloh.....I

## Úvod

Hliníkové slitiny, především pak silumini jsou důležitou skupinou materiálů využívaných ve slévárenství. Díky svým vlastnostem si tyto slitiny našly své uplatnění v automobilovém průmyslu. Mechanické vlastnosti závisí na lici struktuře, kde nejvýznamněji je ovlivňuje eutektický křemík. Ze siluminů se vyrábějí písty, bloky motorů, karoserie a podobně.

Diplomová práce se zabývá termickou analýzou a zjištěním velikosti zrna primárního křemíku ve slitině KS 1275 v závislosti na změně poměru vratného materiálu v tavenině pro firmu KS Kolbenschmidt Czech Republic, a.s. Tato firma se zabývá výrobou automobilových součástí a to konkrétně výrobou pístů. V tomto směru má firma KS Kolbenschmidt bohaté zkušenosti. Zde probíhá úplná výroba pístů, kdy se píst nejdříve odlíje, obrobí a tepelně zpracuje. [1]

Tato práce se v teoretické části zabývá legujícími prvky hliníkových slitin a jejich krystalizací. Následně se zabývá výrobou pístů a jejich odlévání. Další část teoretické části diplomové práce se věnuje termické analýze a zjištěním velikosti zrna pomocí křivky chladnutí. Poslední kapitola teoretické části je zaměřena na software Magma.

Cílem diplomové práce je získat údaje o slitině pomocí termické analýzy v závislosti na změně poměru vratného materiálu slitiny KS 1275. Na základě získaných křivek chladnutí vyhodnotit velikost zrna primárního křemíku. Velikost primárního křemíku je dále potřeba ověřit pomocí obrazové analýzy. Současně je cílem práce získat teoretickou křivku chladnutí ze softwaru Magma a porovnat ji s reálnými křivkami chladnutí.

# 1 Slitiny hliníku a jeho odlévání

Hliník a jeho slitiny jsou v současné době nejvíce používány jako konstrukční materiál pro stavbu letadel a automobilů. Druhý největší odběratel hliníku je stavební průmysl. V roce 2010 se celosvětová výroba primárního hliníku pohybovala okolo 24,290 milionů tun. Dnešní trendy vedou k recyklaci hliníku. Podíl recyklovaného hliníku vzrostl z 26,1% v roce 2000 na 40,6% v roce 2008. Pro získávání levnějšího hliníku je nutné, aby se stále zvyšoval podíl recyklovaného hliníku a to z důvodu energetické úspory. Pro výrobu jedné tuny hliníku pomocí elektrolýzy je spotřeba energie cca 15 MWh. Otázkou je, jak se bude vyvíjet spotřeba a tím i výroba hliníku v blízké budoucnosti. Předpokládá se, že v roce 2020 bude nárůst poptávky po hliníku cca o 12% v porovnání s rokem 2010. [2]

## 1.1 Legující prvky Al slitin

Níže je uveden výčet některých legujících prvků, které zlepšují či zhoršují vlastnosti hliníkových slitin.

**Křemík** – jedná se o hlavní legující prvek pro slévárenské slitiny (siluminy). Zvýšení obsahu křemíku ve slitině zvyšuje zabíhavost a otěruvzdornost. Se stoupajícím množstvím eutektika rostou i obě vlastnosti. Slitiny s označením 6xxx obsahují malé množství Mg ( $Mg_2Si$ ) a jsou vytvrditelné.

**Bór** - zjemňuje strukturu, zlepšuje elektrickou vodivost. U siluminů zjemňuje zrno a tím zvyšuje mechanické vlastnosti. Dále bór zvyšuje schopnost absorbovat neutrony.

**Bismut** – přidává se do slitiny kvůli zvýšení mechanické obrobiteľnosti.

**Antimon** – v agresivním prostředí mořské vody zvyšuje odolnost vůči korozi. Dále zamezuje vzniku trhlin za tepla u slitin hliníku s hořčíkem. U slitin pro ložiska je antimon legován v rozmezí 4 – 6%.

**Měď** – umožňuje vytvrzování hliníkových slitin a tím i zvyšuje jejich pevnost. Měď dále ve slitině zvyšuje tvrdost, obrobiteľnost a odolnost vůči korozi. Nejčastěji se leguje spolu s hořčíkem.

**Železo** – ve slitinách hliníku se jedná o nečistotu a nežádoucí prvek. Železo má nízkou rozpustnost v tuhém stavu, a proto je ve struktuře přítomen jako intermetalická sloučenina společně s hliníkem. Ve slitinách hliník – měď vytváří intermetalické fáze  $Al_7FeCu_2$  a ochuzuje tak tuhý roztok  $\alpha$  o měď. To má za následek snížení pevnosti slitiny.

**Titan** – používá se společně s bórem a slouží ke zjemnění struktury.

**Mangan** – jeho přítomnost v hliníkových slitinách zvyšuje pevnostní vlastnosti, teplotu rekrytalizace, zjemňuje zrno, zvyšuje citlivost ke kalení a potlačuje vliv železa na vytvoření destičkovité struktury.

**Stříbro** – zvyšuje výrazně odolnost proti korozi a podporuje stárnutí hliníkových slitin. Jedná se ovšem o velmi drahý kov a proto se nevyužívá příliš často.

**Stroncium** – v siluminech je stroncium přidáváno za účelem modifikace eutektika.



**Fosfor** – někteří autoři (zdroj [3]) hovoří o fosforu jako o modifikátoru nadeutektických slitin hliníku. Jiní (zdroj [4]) o něm diskutují jako o očkovaadle. Z důvodů vytváření nukleačních zárodků AlP (viz. kapitola 1.4.1) se přikláním k tvrzení, že se jedná o očkovaadlo. [3], [4]

## 1.2 Technologické vlastnosti Al slitin

Technologické vlastnosti hliníku a jeho slitin je soubor fyzikálních a mechanických vlastností materiálu, které umožňují vyrobit definovaným způsobem zpracovaný výrobek. Mezi hlavní vlastnosti patří slévárenské, technologické a mechanické.

**Slévárenské vlastnosti:** jedná se o technologické vlastnosti, které významně ovlivňují proces odlévání. Slévárenské vlastnosti souvisí se šířkou pásma tuhnutí. To je určeno rozdílem teplot počátku tuhnutí a koncem tuhnutí. Je-li šířka pásma minimální (jedná se o slitiny blízké se k eutektickému složení) slitiny vykazují velmi dobré slévárenské vlastnosti. Naopak je to u slitin, kde šířka pásma dosahuje maxima. Slévárenské vlastnosti jsou především:[4]

- a) **Zabíhavost slitiny:** je schopnost kovu dokonale zaplnit formu. Výsledky zkoušky zabíhavosti dávají představu o tom, jak tenkostěnné odlitky je možno odlévat a jak složitý tvar může dutina formy mít, aby byla celá zaplněná.
- b) **Sklon ke vzniku staženin:** poukazuje na velikost staženin a ředin. Slitiny, které mají sklon ke vzniku soustředěných staženin, se mohou nálitkovat. Slitiny, které mají sklon k rozptýleným staženinám se nálitkují obtížně.
- c) **Sklon k naplynění taveniny:** závisí na rozpustnosti plynů v tekutém stavu. Množství plynů v tavenině rozhoduje o vzniku plynových bublin v odlitku.
- d) **Sklon ke vzniku trhlin:** je schopnost odolávat napětí, které vzniká při tuhnutí a smršťování odlitku. Odolnost proti trhlinám je velmi důležitou vlastností při zhotovování tvarově složitějších odlitků. [4]

**Technologické vlastnosti:** jsou to vlastnosti, které ovlivňují další průběh zpracování výrobku. Je to především:

- a) **Obrobitelnost:** je schopnost materiálu být obroben třískovým obráběním. Na tomto závisí rezné síly, lámavost třísky, životnost ostří nástroje apod. Obrobitelnost u hliníkových slitin zvyšuje měď a tvrdé fáze jí naopak zhoršují.
- b) **Svařitelnost:** je schopnost spojování dvou materiálů různými technologiemi pro dosažení spoje požadovaných vlastností.
- c) **Nepropustnost:** je schopnost bránit unikání tlakového média. [4]

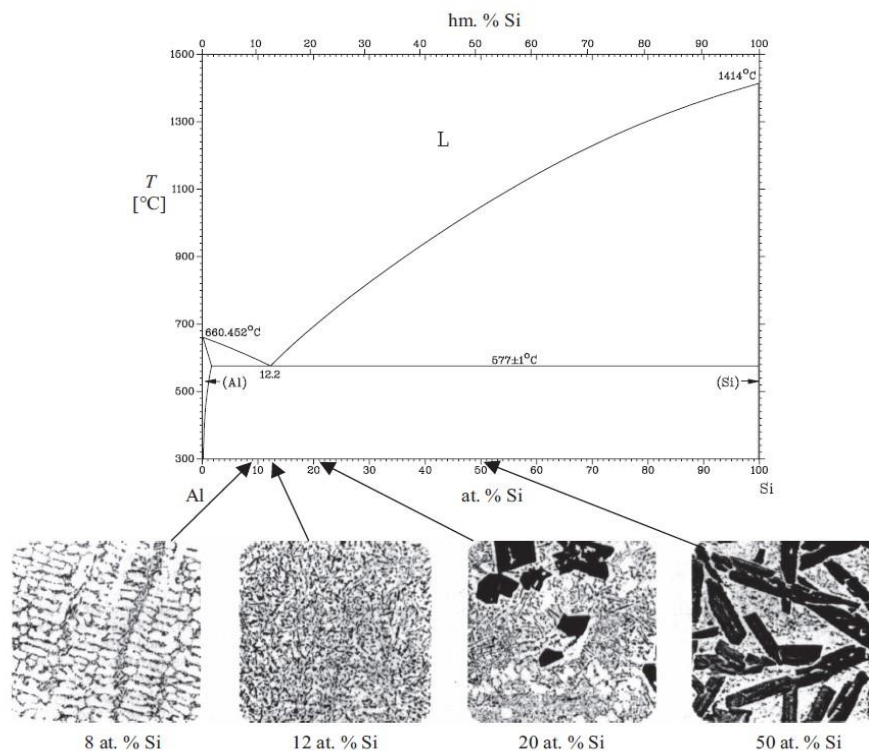
**Mechanické vlastnosti:** závisí především na vlastnostech základního kovu, na velikosti zrn, na přítomnosti intermetalických fází a na tepelném zpracování. Obecně platí, že jemnozrná struktura zlepšuje jak mechanické vlastnosti, tak i vlastnosti technologické. Důležité mechanické vlastnosti jsou:

- a) **Mez pevnosti v tahu (RM):** hliníkové slitiny v litém stavu dosahují hodnot 150-250 MPa. Tyto hodnoty lze zvýšit následným vytvrzováním, oproti litému stavu zhruba o 30-50%.
- b) **Tažnost:** dosahuje hodnot u běžných litých slitin hliníku 1-4%. Tažnost lze zvýšit u siluminů vhodnou modifikací.
- c) **Tvrdoost:** je odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa přesně definovaných rozměrů. U hliníkových slitin se hodnota pohybuje od 60-80 HB. Vytvrzováním lze dosáhnout větších hodnot tvrdosti a to až na 100 HB. [4]

### 1.3 Slévárenské slitiny Al-Si

Slitiny Al-Si neboli siluminy se vyznačují velmi dobrou zabíhavostí, nízkým sklonem k tvorbě staženin a možností svařování a pájení. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají eutektické slitiny. Siluminy jsou odolné proti otěru. Siluminy se mohou modifikovat. Důvodem je změna struktury eutektika a tedy i zlepšení mechanických vlastností. Jako modifikátor se v malém množství používá Na anebo Sr. Siluminy se dále legují Cu a Mg za účelem vytvrzování.[4]

Binární diagram slitiny Al-Si je znázorněn na Obr. 1. Na tomto obrázku je možno pozorovat změnu složení struktury s měnícím se obsahem křemíku. Eutektoidní teplota je cca 577°C.



Obr. 1 Binární diagram Al-Si, mikrostruktura jednotlivých slitin [3]

Tento diagram lze rozdělit podle obsahu křemíku na slitiny:

- a) **Podeutektické:** (slitiny s obsahem Si do 12,5 hm. %) Využívají se na středně namáhané a dekorativní odlitky. Díky nižšímu obsahu Si mají trochu horší zabíhavost a jsou vhodné i pro odlévání do pískových forem. Mikrostruktura je tvořena převážně sítí primárních dendritů hliníku. U těchto slitin lze krystalizaci ovlivňovat především očkováním (přednostně kombinací titanu a bóru).
- b) **Eutektické:** (slitiny s obsahem Si 12,5 hm. %), jak už bylo výše zmíněno, eutektické slitiny mají nejlepší slévárenské vlastnosti (mají nejnižší teplotu tuhnutí). Pro svojí vynikající zabíhavost se používají na tenkostěnné a komplikované odlitky (především pak v automobilovém a leteckém průmyslu). Mikrostruktura u těchto slitin je tvořena eutektikem a  $\alpha$ -fází. Tyto slitiny je vhodné, pro zajištění dobré morfologie eutektika, modifikovat. Proces modifikace je možné provést pomocí kovu, solemi nebo kombinací předešlých způsobů. Při modifikaci je důležité, aby byl brán zřetel na ekologii celého procesu.
- c) **Nadutektické:**(slitiny s obsahem nad 12,5 hm. %). Jedná se o slitiny obsahující částice primárního křemíku. Tyto slitiny mají velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti a vysokou odolnost proti ořezu. Proto jsou vhodné pro výrobky, které pracují i za vyšších teplot (především pak písty). Struktura je tvořena eutektickou maticí a krystaly primárního křemíku. [4]

#### 1.4 Krystalizace slitin hliníku

Krystalizace je přechod z tekutého stavu do pevného, kdy se začnou vytvářet krystaly s geometrickým pravidelným uspořádáním atomů. Tento děj je způsoben snahou kovu dosáhnout stabilního stavu, tedy dosáhnout nejnižší hodnoty volné energie. Krystalizace je umožněna změnou vnějších podmínek a to konkrétně změnou teploty. Kov krystalizuje difúzní fázovou přeměnou, která probíhá tvorbou zárodků krystalické fáze. Zárodky rostou do té doby, než dojde k úplné spotřebě taveniny. [4], [5]

Výsledná struktura slitin je dána tvarem rovnovážných diagramů hliníku s příslušnými legujícími prvky. Hliníkové slitiny pro slévání tvoří eutektikum a  $\alpha$ -fáze. Ve slitinách vznikají následující strukturní složky:

- 1) **Homogenní tuhý roztok:** je označován jako  $\alpha(\text{Al})$  a jedná se o substituční tuhý roztok, ve kterém jsou atomy hliníku v kubické plošně centrované mřížce nahrazovány atomy přísadových prvků. Vlivem rozdílné velikosti atomů hliníku a přísadových prvků dochází k deformaci mřížky. To má za následek zvýšení pevnosti, ovšem dochází ke snížení plastických vlastností.
- 2) **Eutektikum:** je tvořeno fází  $\alpha(\text{Al})$  a přísadovým prvkem nebo jeho sloučeninou. Vytváří se u slitin, kde množství přísadových prvků je vyšší, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti v  $\alpha(\text{Al})$  při teplotě tuhnutí. Veškeré slévárenské slitiny Al-Si tuto podmínku splňují (obsah Si je u nich vždy vyšší než maximální rozpustnost). Množství eutektika a jeho morfologie rozhoduje o mechanických i slévárenských vlastnostech slitiny.

- 3) **Primární fáze přísadového prvku:** je-li přítomen vyšší obsah přísadového prvku, než odpovídá eutektickému složení, začíná tuhnutí vylučováním primární fáze přísadového prvku. Tato fáze se objevuje pouze u nadeutektických slitin Al-Si.
- 4) **Intermetalická fáze:** jedná se o strukturní složky s vlastní krystalickou strukturou. Jsou to sloučeniny, které vznikají přítomností jednotlivých přísadových prvků. [4]

#### 1.4.1 Nukleace krystalů

Existují dva mechanismy, podle kterých rozlišujeme vznik krystalů. Jedná se o homogenní a heterogenní nukleaci. Tyto mechanismy jsou popsány níže.

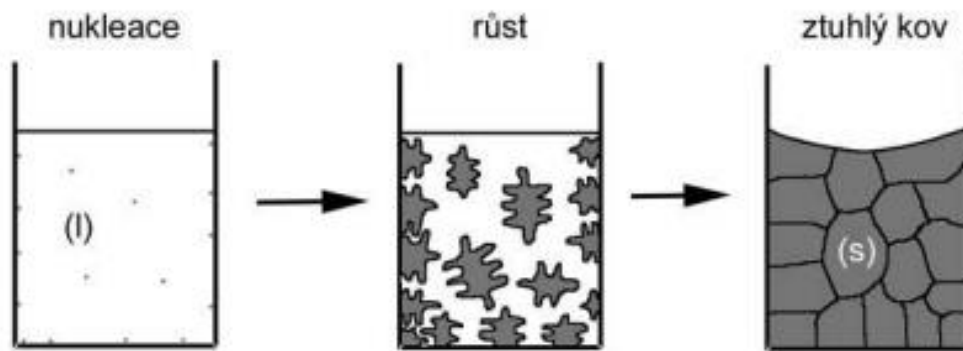
Při homogenní nukleaci se samovolně vytváří fáze bez potřeby cizích zárodků v celém objemu kovu. U tohoto mechanismu se především uplatňuje koncentrační a teplotní nehomogenita taveniny. V tavenině se pak nachází místa, kde je geometrické uspořádání atomů přibližující se uspořádání nové fáze.

Ke krystalizaci primární fáze  $\alpha(\text{Al})$  v technických slitinách dochází především vlivem mechanismu heterogenní nukleace na cizích zárodcích. Tyto zárodky mohou být oxidy či jiné částice běžně se vyskytující v tavenině. Nukleace může též probíhat na stěně formy, nebo jsou krystalizační zárodky úmyslně přidány do taveniny – krystalizační zárodky pro hliníkové slitiny jsou často částice fosfidu hlinitého AlP. Zvýšení počtu vhodných krystalizačních zárodků je možno provést očkovaním. K této nukleaci dochází, když je hodnota Gibsovy volné energie co nejnižší. Gibsova volná energie pro vznik zárodků je přímo úměrná podchlazení pod rovnovážnou teplotu tuhnutí. Z tohoto důvodu se při větším přechlazení zvyšuje i množství aktivačních zárodků. Při nukleaci na cizích zárodcích je důležité, aby zárodek byl s tuhnoucí fází smáčivý. Jsou-li obě složky krystalograficky podobné, dochází k dobré smáčivosti. [4]

Krystaly primárního hliníku vzniklé ze zárodků se nazývají dendrity. Dendrit je tvořený hlavní osou. Na tuto osu v kolmém směru pak rostou sekundární osy. [4]

#### 1.4.2 Růst krystalů

Dosáhne-li zárodek své nadkritické velikosti, může pokračovat v růstu difúzním přechodem atomů z taveniny. Další krystalizace je doprovázena exotermickou reakcí. Důvodem tohoto jevu je vysoké latentní teplo, kterého se krystaly vzdávají při změně skupenství. Tohle teplo je předáváno tavenině a tím se zvyšuje její teplota na rozhraní tavenina - krystal. Z tohoto důvodu je možný další růst krystalu, až tehdy, je-li teplo odvedeno ze soustavy. Jestliže je přechlazení dostatečně velké, tak latentní teplo pohltí jak tavenina, tak krystaly a krystalizace může probíhat rychleji. Proces nukleace a růst krystalů je zobrazen na Obr. 2. [4], [5]



Obr. 2 Nukleace a růst krystalů [6]

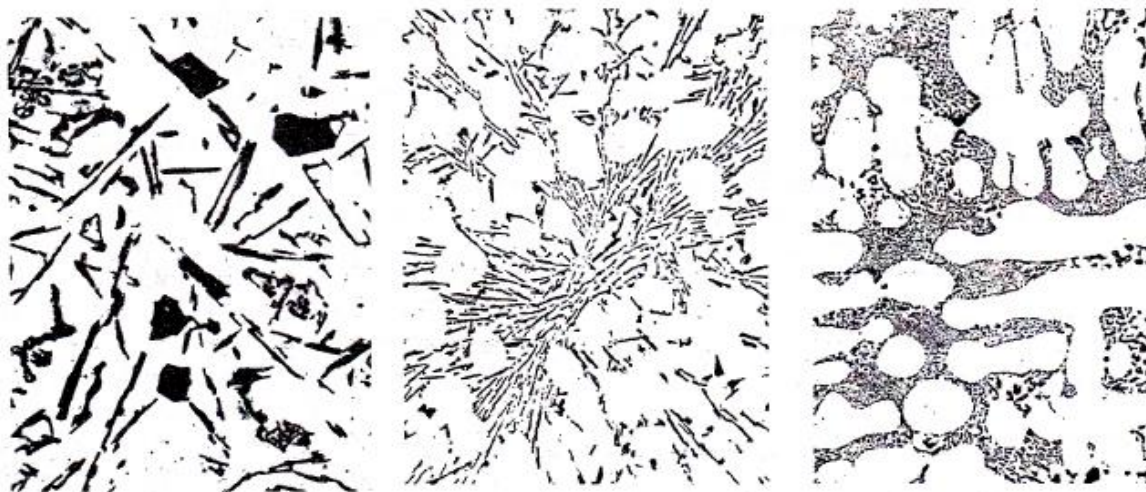
### 1.4.3 Morfologie eutektika ve slitinách Al-Si

V kapitole 1.4.2 byl vysvětlen charakteristický příklad krystalizace slitin a to krystalizace primární fáze  $\alpha(\text{Al})$ . Tato kapitola se zabývá krystalizací eutektika.

Křemík se v siluminech vylučuje výhradně jako čistý prvek s minimálním obsahem jiných příměsí. Velikostně se částice eutektického hliníku pohybují od  $1\mu\text{m}$  až po  $2\text{ mm}$ . Typ eutektika je úzce spojen s mechanismem krystalizace eutektického křemíku. Ten využívá jako krystalizační zárodky fosfid hlinitý. Existují tři typy křemíku v soustavě Al-Si, které jsou nazvány dle tvaru částic:

- Zrnité eutektikum:** toto eutektikum má tvar polyedrických zrn nebo hrubých lamel. Zrnité eutektikum vzniká, je-li v tavenině 5-10 ppm fosforu.
- Lamelární eutektikum:** růst částic křemíku je založen na podobném principu jako u zrnitého eutektika. Vzhledem k tomu, že podmínky pro růst lamelárního křemíku jsou méně příznivé (díky nízkému obsahu fosforu, který se pohybuje cca 1-2 ppm, je v tavenině menší počet vhodných nukleačních zárodků), krystalizuje při vyšším přechlazení. Lamely eutektika jsou drobné a mnohem menší než u zrnitého eutektika.
- Modifikované eutektikum:** jeho vznik je podpořen přítomností modifikačních prvků především sodíku a stroncia. Existují i další modifikátory jako např. Ba, Ca. Nejlepší modifikační účinky má sodík. [4]

Výše uvedené tvary částic eutektika jsou zobrazeny na Obr. 3. Mikrostruktura vlevo je tvořena částicemi zrnitého eutektika. Uprostřed je zobrazena mikrostruktura, kde se vyskytuje lamelární eutektikum. Vpravo je mikrostruktura modifikovaného eutektika.



Obr. 3 Mikrostruktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si [4]

## 1.5 Výroba pístů

Píst je součást, která je uložena v motoru. Koná přímočarý vratný pohyb a jedná se o velmi namáhanou součást (zachycuje, přenáší, mění tlaky spálených plynů na dno pístu, je tepelně a vysokým tlakem namáhaný). Píst je spojen přes ojnici ke klikovému hřídeli. Výbuchem plynů ve spalovací komoře dojde ke vzrůstu tlaku a píst se pohybuje směrem dolů a přenáší tak tlak na klikovou hřídel, kterou tím rozpohybuje a ta pak vrací píst zpět do původní polohy. Dalším úkolem pístu je zajistit, aby spalovací komora byla utěsněná a nemohly tak zplodiny uniknout ven. To zajišťují pístní kroužky, které jsou umístěny v drážkách na pístu (viz. Obr.4) [7]



Obr. 4 Píst

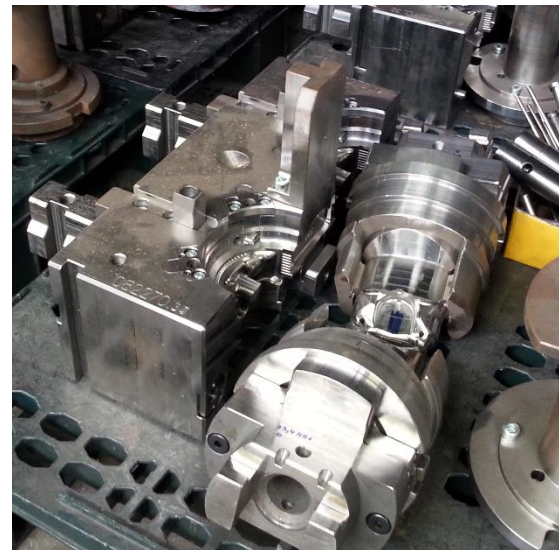
Písty se mohou vyrábět gravitačním odléváním do kovových forem na licích strojích (další možností je nízkotlaké lití). Licí stroj je možno vidět na Obr. 5. Jedná se zpravidla o ocelové formy s nitrídaným povrchem (viz Obr. 6 **Error! Reference source not found.**).



Tyto formy mají životnost cca 200 000 odlitek. Slitiny, které se používají při odlévání pístů, jsou především siluminy s obsahem křemíku od 12 do 18% s dalšími doprovodnými prvky, např. měď, nikl apod. Vzhledem k velké rozmanitosti pístů je chemické složení velmi proměnlivé. Slitina hliníku se může dále modifikovat, očkovat a především musí být odplyněna. Po odlití se musí odstranit vtoková soustava. Následně se písty tepelně zpracovávají ke zvýšení užitečných vlastností. Odlitky nedosahují požadovanou přesnost. Proto je nutné další mechanické opracování. To se ve velkosériové výrobě provádí na CNC strojích za optimálních řezných podmínek. Dále je možnost písty nechat povrchově upravit. Povrch může být například eloxován, natřen lakem nebo opatřen kluzným grafitovým nátěrem. Je nutné, aby celý proces byl kontrolován. Ta se provádí v průběhu celého toku výroby. (Kontrola teploty v pecích, teplota lití, chemického složení, rentgenem apod.) [3]

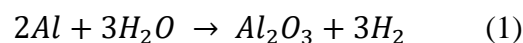


Obr. 5 Lící stroj

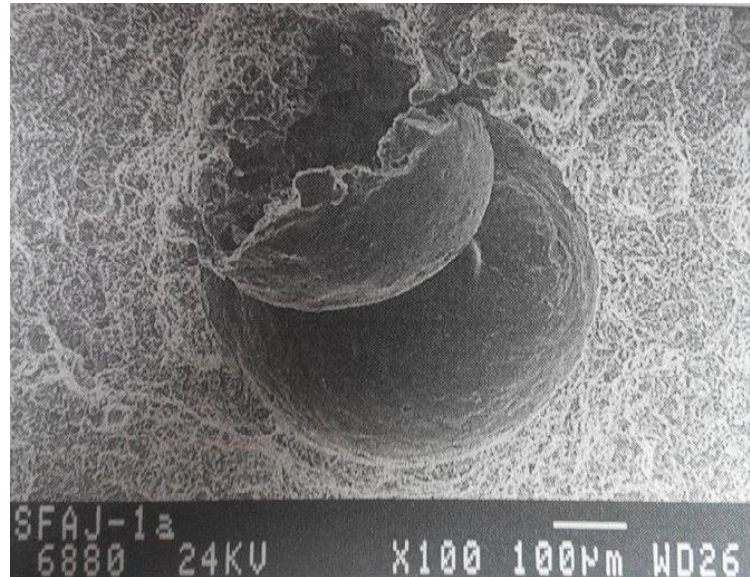


Obr. 6 Kovová kokila

U pístů z hliníkových slitin je velmi častý výskyt bublin. Tyto vady jsou označeny číslem 410. Nejškodlivější plyny pro hliníkové slitiny jsou kyslík a vodík. Vodík v tekutém kovu zvyšuje svou rozpustnost se zvyšováním teploty. V tuhém stavu je rozpustnost vodíku výrazně nižší. Tento plyn se v průběhu krystalizace vylučuje ve formě bublin a pórů. Vodík se do tekutého kovu dostane z vodní páry, která se dle rovnice (1) rozkládá na molekulární vodík:



Vznikají vodíkové bubliny, které jsou pokryty vrstvou  $Al_2O_3$ . Vodíku v tekutém kovu ve své podstatě nelze zabránit. Vodní pára je v atmosféře vždy přítomná. Snížením obsahu vodíku v tekutině je možné dosáhnout správnou volbou vhodné lící teploty (nižší rozpustnost vodíku), vakuování taveniny nebo probubláváním inertního plynu (popřípadě aktivních plynů jako jsou chlór a fluor) taveninou. Vodíkovou bublinu pokrytou vrstvou  $Al_2O_3$  je možno vidět na Obr. 5 [8]



Obr. 5 Vodíková bublina pokrytá vrstvou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[8]

Na závěr této kapitoly je vhodné se zmínit, že s problematikou odlévání pístů z hliníkových slitin se potýkali již před válkou. Ve 30. až 40. letech se začali využívat a vyvíjet hliníkové slitiny s mědí, niklem, hořčíkem a křemíkem pro letecké motory. Již tenkrát byl zjištěn kladný vliv niklu na pevnostní vlastnosti za vyšších teplot. Hliníkových slitin s hlavní legurou křemíkem se využívá dodnes a vývoj bude jistě i nadále pokračovat. [9]

## 1.6 Odlévání hliníku a jeho slitin

Proto, aby se dal hliník a jeho slitiny odlévat, je nutné převést kov z pevného stavu do kapalného a dále tak udržovat do té doby, než se kov odlíje do formy. K tomuto účelu slouží pecní zařízení. Tyto zařízení lze dělit podle druhu topiva na palivové a elektrické, popřípadě na zařízení používající jiný druh energie.

**Plynová kelímková pec:** jedná se o zařízení, které se používá pro tavení kovu i pro udržování objemu taveniny na požadované teplotě. Plynové kelímkové pece jsou součástí sléváren pro gravitační lití do kovových forem, nízkotlakého lití, vysokotlakého lití a přesného lití. Vyzdívky kelímků jsou grafito-šamotové či materiály na bázi SiC. Dále mohou být kelímky na bázi Fe, ty ovšem musí mít vnitřní povrch opatřen keramikou, aby nedošlo ke kontaminaci taveniny s železem. Pecní zařízení je zobrazeno na Obr. 8.[3]





Obr. 6 Plynová kelímková pec

Dalším důležitým procesem před vlastním odléváním je rafinace a ošetření taveniny. Pod těmito výrazy si lze představit sled technologických operací, které zajišťují kvalitu taveniny.

Hliník má velkou afinitu ke kyslíku, proto téměř okamžitě, dojde-li ke styku taveniny s okolní atmosférou, se na povrchu taveniny vytvoří oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Při zvyšování teploty se mění modifikace  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (spinel) na modifikaci  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (korund). V době změny modifikace dochází ke snížení pevnosti a ochranné oxidické vrstvy. To může mít za následek zvýšení oxidačního účinku a navýšení obsahu plynu v tavenině. Ke stejnému (ne tak intenzivnímu) efektu může dojít i při mechanickém porušení této vrstvy. Oxidické vměstky se mohou vyskytovat jako disperzní částice nebo jako oxidické blány (více nebezpečné). [3]

Mezi procesy patřící k čištění taveniny je i odplyňování. Jedná se především o vodík, který má v hliníku největší rozpustnost. Vodík způsobuje pórovitost a vznik bublin v odlitku. Obsah vodíku v tavenině závisí především na použití vsázkových surovin, vlhkosti použitých solí apod. Pro zamezení pórovitosti a vzniku bublin je nutné udržovat obsah vodíku v tavenině pod  $0,2 - 0,1 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$  hliníku. Tolerované množství vodíku závisí na technologii odlévání, na tloušťce stěny a především na použití odlitku. Snížení vad v odlitku z důvodu pórovitosti lze zajistit nálitkováním. Nejpoužívanější způsob odstranění vodíku z taveniny je proces zvaný probublávání. Taveninou probublávají drobné bublinky inertního plynu. Bublinky (čím menší bublinky jsou, tím jsou účinnější) stoupají ode dna pánve vzhůru a do nich difunduje rozpuštěný vodík. Jako rafinační plyny se používají argon a především dusík. Méně pak chlór a fluor (i přes svou vysokou účinnost jsou ekologicky závadné, proto se omezuje jejich užívání). Odplyňovat lze několika způsoby, a to za pomoci soli, dmýcháním plynů a rotorovými zařízeními (FDU). Rotorová zařízení jsou využívána při rafinaci i ve společnosti Kolbenschmidt a.s. Užívané zařízení FDU je zobrazeno na Obr. 9. [4]

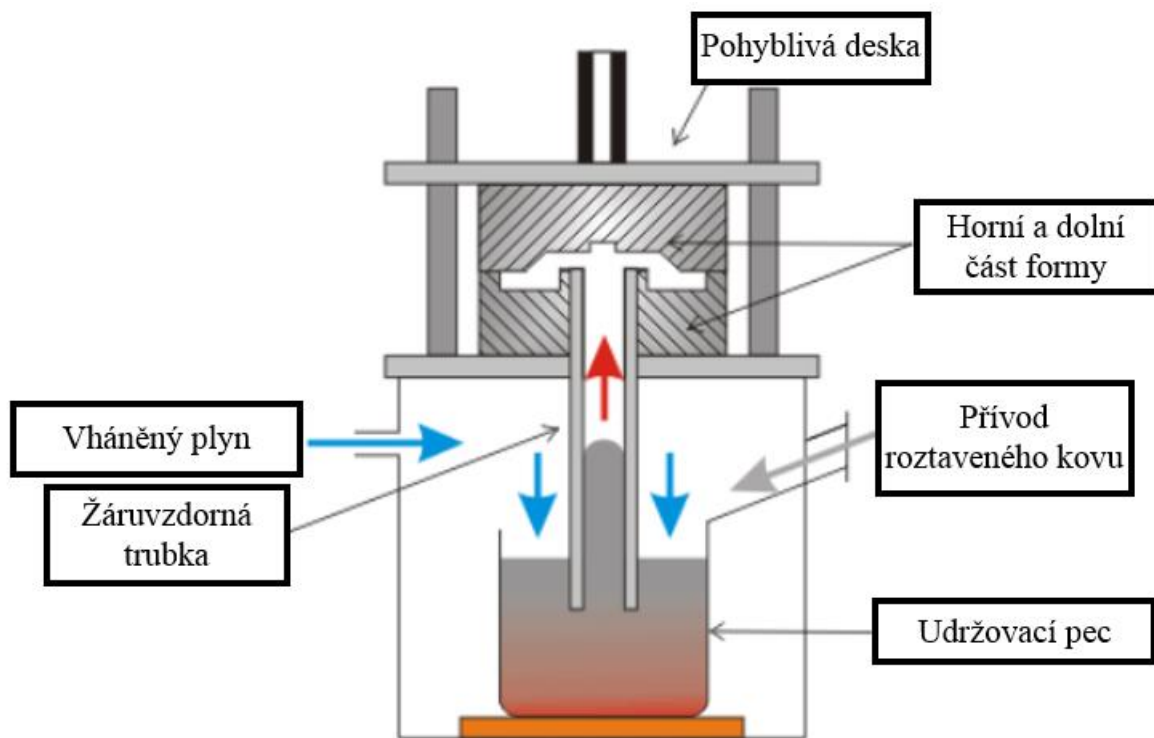


Obr. 7 Hlava rotoru zařízení FDU

Odlévání hliníkových pístů se načastěji provádí dvěma způsoby:

**Lití do kovových forem (kokil):** díky rychlému ochlazení taveniny vzniká jemnozrnná struktura. To má za příčinu zlepšení mechanických vlastností odlitku. Forma je vhodná pro velkosériovou výrobu (pro kusovou či malosériovou výrobu by byla forma příliš nákladná) a snižuje náklady na obrábění, díky vysoké jakosti povrchu. Dají se používat kovová jádra, ale i jádra z formovacích směsí (vyrobené například metodou Hot box, Cold box, nověji i ze solných jader apod.). Mezi další výhody bezesporu patří i možnost automatizace výroby pomocí licích strojů. Jako materiály pro výrobu kokil se používá i šedá litina, která je dostupná a levná. Další materiál používaný pro její výrobu je nízko legovaná uhlíková ocel, která je sice dražší a výroba kokily z tohoto materiálu je náročnější, ale má oproti šedé litině větší životnost. Mezi hlavní nevýhody využívání této formy patří vysoké náklady na zařízení, klade větší odpor při smršťování odlitku a je neprodyšná. Formu lze rozdělit podle dělicí roviny na horizontální a vertikální. Tuto metodu odlévání používá firma Kolbenschmidt a.s. pro výrobu pístů. Kokilu a licí stroj této společnosti je možno vidět na obrázku 6 a 7. [3],[10]

**Nízkotlaké lití:** využívá se pro odlitky z lehkých neželezných kovů. Nejčastěji se vyrábějí rotační předměty s osou rotace v jejich středu. Princip této metody je na Obr. 10. Ve spodní části je udržovací pec s roztaveným kovem. Ta je přímo spojená trubkou s horní částí a je ponořena do roztavené lázně. Tato trubka je vyrobena ze žáruvzdorného materiálu. V horní části je kovová forma rozdělena horizontální dělicí rovinou. Horní část této formy je pohyblivá a umožňuje tak odlitek vyjmout z formy. Udržovací pec je umístěna v uzavřené, neprodyšné nádobě. Přes ventil je vháněn plyn do nádoby, který zvýší tlak nad hladinou udržovací pece. Důležité je, aby tlačný plyn nebyl vlhký. Běžně se užívá vymražený vzduch. Tím je kov vtlačěn do trubky a hnán do formy. Díky tomu, že je trubka umístěna pod hladinou (pod vrstvou oxidů), je do formy přiveden pouze čistý kov bez vměstků. Rychlost, kterou stoupá kov trubkou, je regulována pomocí tlaku vháněného plynu, tak aby do formy neproudil rozvřený kov. Do formy je stále vytlačován tekutý kov (do doby jeho ztuhnutí), takže trubka působí jako nálipek. Po ztuhnutí odlitku se přetlak v nádobě uvolní a zbylý roztavený kov vteče zpátky do udržovací pece. To je příčinou vysokého využití (90-95%). Po rozevření formy je odlitek vytlačen vyhazovači. Tato metoda se používá také pro odlévání pístů z hliníkových slitin.[4],[10]



Obr. 10 Princip nízkotlakého odlévání [10]

## 2 Termická analýza

Termická analýza slouží ke sledování změny některých fyzikálních a chemických vlastností látky (hmotnost, rozměr, magnetičnost, krystalizace, vodivost apod.) jako dynamickou funkci teploty či času. Metody termické analýzy využívají změnu entalpie  $\Delta H$ . Fyzikální a chemické změny lze popsat změnou Gibbsovy energie  $\Delta G$ , ta je dána vztahem (2). [11]

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

kde  $\Delta H$  – změna entalpie,  $T$  – absolutní teplota,  $\Delta S$  – změna entropie.

Každý systém se snaží dostat do stavu, ve kterém je hodnota Gibbsovy energie co možná nejnižší.

Termickou analýzu využívají slévárny zejména proto, aby zjistili kvalitu taveniny a jak se projevuje modifikace a očkování.

Některé metody termické analýzy jsou uvedeny níže:

- a) **Termogravimetrická analýza (TG):** tato metoda se zabývá měřením hmotnosti, kdy se měří hmotnost v závislosti na teplotě vzorku. Měření může probíhat při stálé změně teploty (dynamicky), anebo při izotermickém režimu (staticky). Výsledkem je termogravimetrická křivka, která ukazuje závislost hmotnosti na teplotě (popř. čase).
- b) **Termomechanická analýza (TMA):** je metoda, jejímž hlavním cílem je zjistit rozměrové a mechanické vlastnosti v závislosti na teplotě.
- c) **Klasická termická analýza (TA):** jedná se o nejstarší a nejjednodušší metodu vhodnou pro zjištění teploty tání a tuhnutí u čistých kovů (popřípadě určení teplot likvidu a solidu u slitin). Tato metoda funguje na principu uvolňování či pohlcování tepla při fázové přeměně. Klasická termální analýza není vhodná k měření teploty fázových přeměn v tuhém stavu.
- d) **Diferenční termická analýza (DTA):** metoda je založena na měření teploty mezi vzorkem a standardem při ochlazování či ohřevu. Standard by měl být velmi stabilní (v daném intervalu teplot) a měl by mít podobnou tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost jako zkoumaný vzorek. Tato metoda umožňuje zaznamenat jakoukoli entalpickou změnu, exotermní i endotermní způsobenou změnou struktury nebo složení. [11]

Obecně platí, že fázové přeměny, redukce, dehydratace a některé reakce rozkladné vykazují endotermní efekty. Naopak exotermní efekty jsou doprovázeny oxidací a krystalizací. Při zjišťování teplotní efektů není důležité uvolněné nebo pohlcené teplo, ale to množství tepla, které se uvolní za jednotku času  $dQ/dt$ . [11]

Každý prvek během krystalizace či fázových přeměn uvolňuje do svého okolí specifické latentní teplo (skupenské teplo). Toto teplo lze vypočítat dle vztahu (3):

$$Q = l \cdot m \quad (3)$$

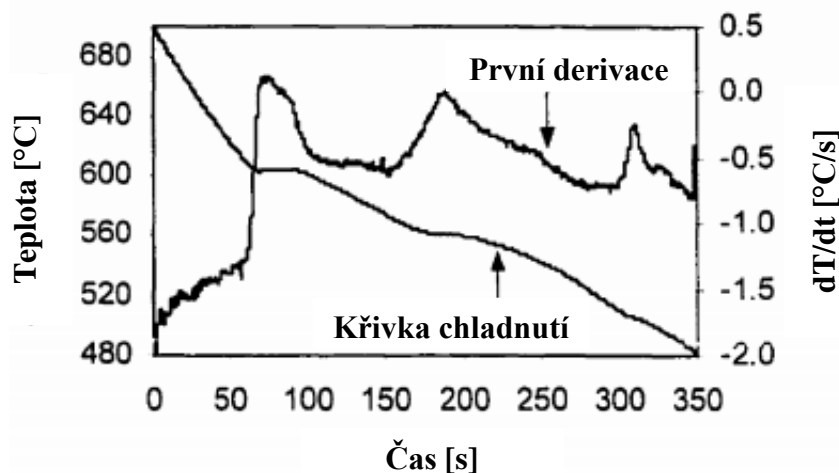
kde  $l$  – specifické skupenské teplo tání,  $m$  – hmotnost vsázky

V Tabulka 1 je vybráno několik kovových prvků a jejich specifické skupenské teplo:

| Kov    | $l$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] |
|--------|---------------------------------------|
| Olovo  | 23                                    |
| Vismut | 42                                    |
| Cín    | 59                                    |
| Měď    | 204                                   |
| Železo | 289                                   |
| Hořčík | 380                                   |
| Hliník | 399                                   |
| Křemík | 1800                                  |

Tabulka 1 Specifické skupenské měrné teplo [12]

Každý přístroj na termickou analýzu je vybaven termočlánkem, počítačem a softwarem pro analýzu. Pokud dojde v okolí termočlánku ke krystalizaci nebo k fázové přeměně, dochází k tepelnému ovlivnění. Tuto změnu termočlánek zaznamená a díky tomu lze z křivky ochlazování určit teploty, při kterých dochází k nukleaci a růstu fáze. Dá se zjistit i doba trvání přeměny fáze. Křivka ochlazování je na Obr. 11. Na tomto obrázku je znázorněna prodleva, kdy se jednostrukturní fáze vyloučí za konstantní teploty. [11], [13]



Obr. 8 Příklad křivky chladnutí teploty na čase a její první derivace [14]

Provede-li se derivace této křivky, je možné získat přesnější informace o průběhu tuhnutí. V každém bodě křivky je derivace rovna sklonu křivky ochlazování a představuje rychlost ochlazování kovu. Pokud křivka po první derivaci roste, znamená to, že se rychlost ochlazování zpomaluje (výskyt nové fáze s uvolňujícím latentním teplem). Na Obr. 11 je první derivace křivky chladnutí. [11], [13]

### Zjištění velikosti zrna pomocí termické analýzy:

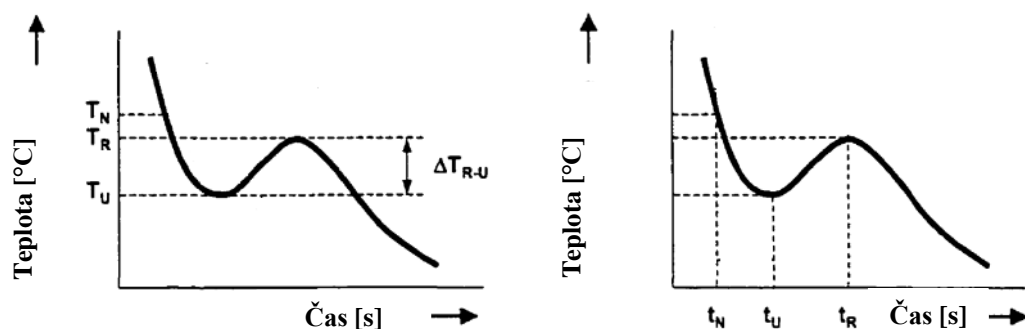
Při zjišťování velikosti zrna pomocí termické analýzy je nejprve nutné si nadefinovat, které poukazují na růst zrna. Tyto parametry jsou:

- Nukleační teplota ( $T_N$ ):** při této teplotě začínají nukleovat zárodky. Ty pak dále mohou růst. Na křivce chladnutí se tato teplota nemusí vůbec projevit. Dá se ovšem získat z první derivace křivky chladnutí. Je-li nukleační teplota výrazná, pak se projeví jako první nárůst teploty (oblouček) na křivce chladnutí.
- Teplota maximálního přechlazení ( $T_U$ ):** je to teplota, kdy krystaly ke svému růstu nepotřebují teplo, naopak ho začínají vylučovat.
- Teplota maximální rekalescence ( $T_R$ ):** jedná o teplotu, při které je vyloučeno nejvíce latentního tepla vzniklého při krystalizaci. Na křivce chladnutí se projeví jako výrazné zvýšení teploty při ochlazování.
- $\Delta T_{R-U}$ :** je rozdíl teplot rekalescence a teploty maximálního přechlazení dle vzorce:

$$\Delta T_{R-U} = T_R - T_U \quad (4)$$

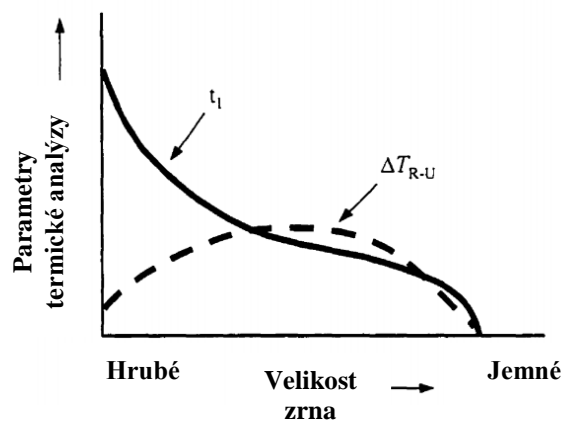
- Čas nukleace ( $t_N$ ):** čas od počátku nukleace.
- Čas trvání rekalescence ( $t_r$ ):** doba při které probíhá rekalescence.
- Čas začátku rekalescence ( $t_u$ ):** v tomto okamžiku se začíná při velkém přechlazení vylučovat teplo. [14]

Tyto parametry jsou znázorněny na Obr.12 Na levém grafu jsou zobrazeny teplotní parametry a na pravém jsou časy.



Obr. 12 Graf termické analýzy ukazující faktory ovlivňující velikost zrna [14]

Pouze z výsledků termické analýzy nelze přesně kvantifikovat velikost zrna. Je nutné podložit tyto výsledky i metalografií. Obecně lze říci, že čím je čas mezi  $t_u$  a  $t_r$  (doba rekalescence) delší, tím je zrno hrubší a naopak s krátkým časem se získá jemnější zrno. Dále lze na základě parametru  $\Delta T_{R-U}$  predikovat velikost zrna. Ovšem, jak vyplývá z Obr. 13, při jedné teplotě struktura může být hrubozrná či jemnozrná. Z tohoto důvodu nelze určit jemnozrnost či hrubozrnost pouze pomocí času či teploty, ale jejich vzájemnou závislostí. [14]



Obr.13 Závislost doby rekalence a teploty  $\Delta T_{R-U}$  na velikost zrna [14]

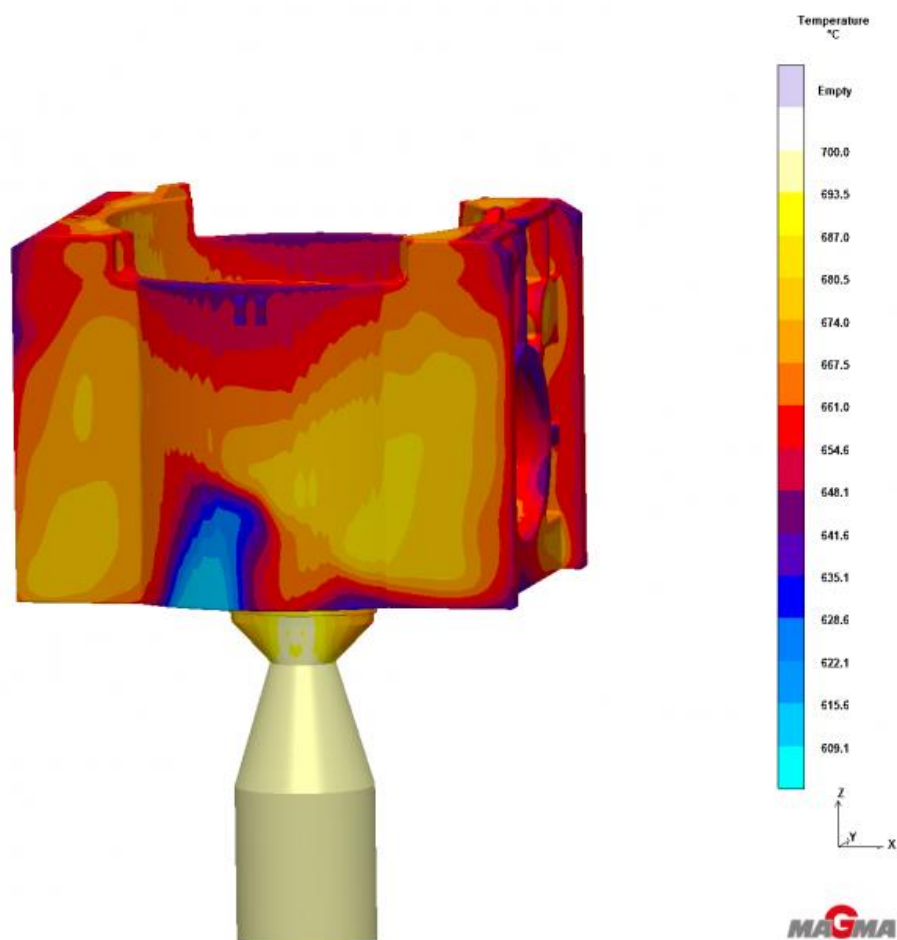
### 3 Software Magma

Tento software slouží k simulaci procesu odlévání všech litin, oceli a i hliníkových slitin. Využívají ho slévárny po celém světě pro umožnění optimalizovat proces lití. S tímto softwarem jsou slévárny schopny vyzkoušet například změnu tvaru nálitky, ještě dříve, než je vůbec provedena. To umožňuje snížit plýtvání energií a materiálu a to vede ke snížení celkových nákladů na výrobu. [3]

Při zavádění nové technologie do procesu je simulační program velmi užitečný pomocník, kdy pomocí simulací lze potlačit výskyt staženin, pórízit a lze zvýšit i využití tekutého kovu díky optimalizace tvaru forem. [3]

Každá simulace musí začít tím, že je vytvořen CAD model odlévané součásti. K němu jsou dále přiřazeny technologické součásti, jako je vtoková soustava, nálitky, zářezy a podobně. Technologické části odlitku si musí modelář buď sám vymodelovat, anebo využít databáze, které v programu jsou přednastaveny. [3]

Před zahájením samotné simulace je nutné, aby model včetně lící soustavy (popřípadě jádra), byl nasítován. To znamená, že se rozdělí na malé části, ve kterých je pak možno provádět výpočet v relativně rychlém čase. Dále je nutné, jako jeden z hlavních parametrů, zadat materiál, který je odléván, teploty lití a podobné okrajové podmínky. [3]



Obr. 9 Příklad tuhnutí v programu [15]

Na Obr. 14 je příklad simulace v programu magma. Jedná se o rozložení teploty během tuhnutí.



## 4 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá zjištěním maximálního množství vratného materiálu v tavenině slitiny KS 1275 v závislosti na velikosti zrna primárního eutektického křemíku pomocí termické analýzy a metalografie. Experiment byl proveden ve společnosti KS Kolbenschmidt Czech Republic, a.s. Zde bylo provedeno celkem pět taveb s různým poměrem vratného materiálu v tavenině. Z každé taveby byly odlity tři vzorky, na kterých byla provedena termická analýza, a získala se křivka chladnutí. Následně se tyto vzorky podrobily metalografické expertize, ze které se zjistila skutečná velikost křemíkového zrna.

Současně byla provedena simulace procesu v softwaru MAGMA, ze které se získala teoretická křivka chladnutí. Tato křivka chladnutí se dále porovnávala se skutečnými křivkami chladnutí, které se získaly z termické analýzy. Ze simulace lze dále zjistit průběh ochlazování experimentálního vzorku.

## 5 Experimentální určení maximálního množství vratu

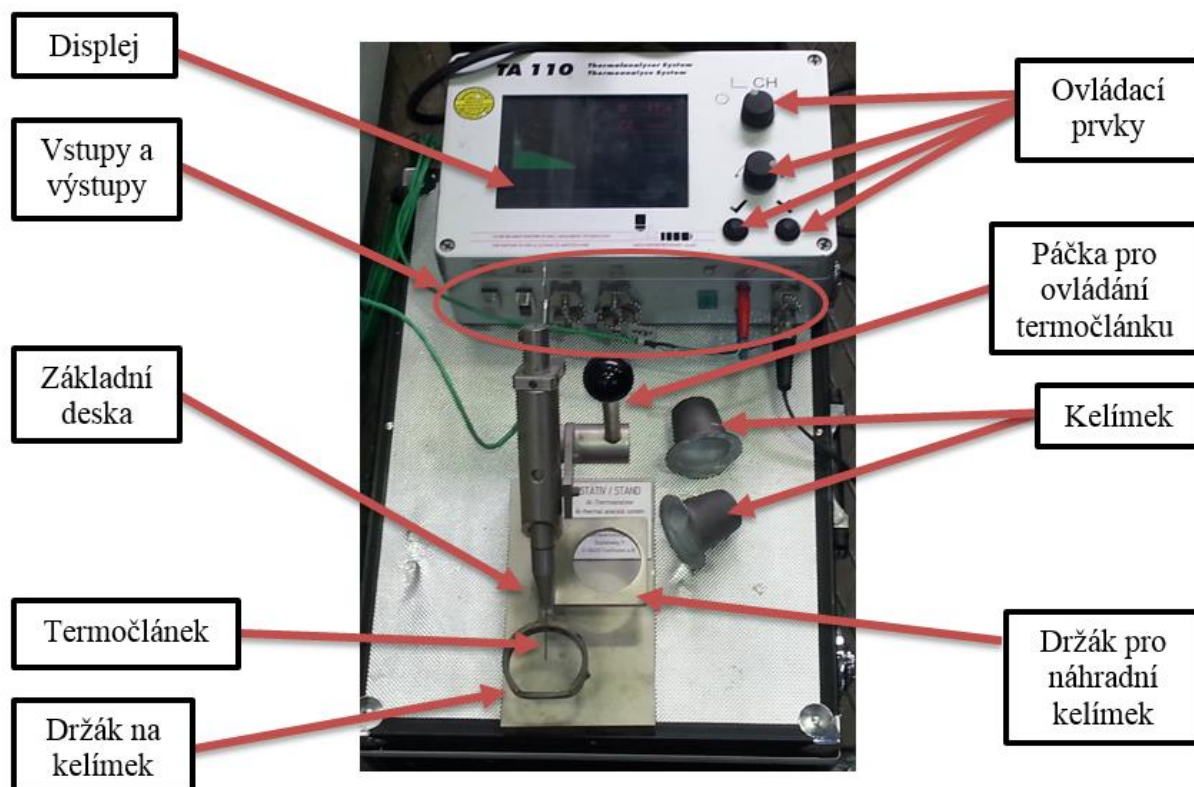
Jak již bylo výše zmíněno, maximální množství vratného materiálu se určí na základě velikosti zrna eutektického primárního křemíku, a to za pomoci termické analýzy a metalografie. K experimentu se použilo zařízení pro termickou analýzu, které bylo zapůjčeno od společnosti Šebesta-slужby slévárnám s.r.o. Toto zařízení je popsáno níže.

### 5.1 Zařízení pro termickou analýzu

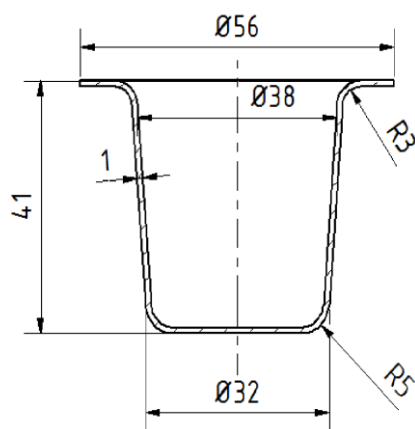
Pro zjištění křivek chladnutí hliníkové slitiny je zde využito zařízení TA 110. Jedná se o stacionární zařízení, které umožňuje sledovat jakost taveniny systému Al-Si pomocí termické analýzy. Veškerá teplotní data krystalizace, určení stupně modifikace a zjemnění zrna je možné získat ve velmi krátkém čase.

Zařízení TA 110 se skládá z (vizuální popis zařízení je na Obr. 15):

- a) **Počítačová jednotka:** jedná se o nejdůležitější část celého zařízení, neboť do jeho paměti jsou ukládány získané hodnoty, které lze dále analyzovat. Počítač se skládá z displeje, ovládacích prvků a z různých vstupů (výstupů). Je zde možnost i připojit počítačovou jednotku k PC. Výhodou je automatický start po nalití tekutého kovu do kelímku.
- b) **Stativ pro termickou analýzu:** tento přípravek je opatřen termočlánkem (pro jeho ochranu a prodloužení jeho životnosti je nutné opatřit ho pouzdrmem), páčkou pro ovládání termočlánku, držákem pro kelímek, držákem pro náhradní kelímek a základní deskou.
- c) **Kelímek:** slouží k odlití vzorku pro termickou analýzu. Je vyroben z oceli, díky tomu dochází k standardní rychlosti ochlazování. Kelímek se vkládá do držáku. Detailněji je kelímek zobrazen na Obr. 16.



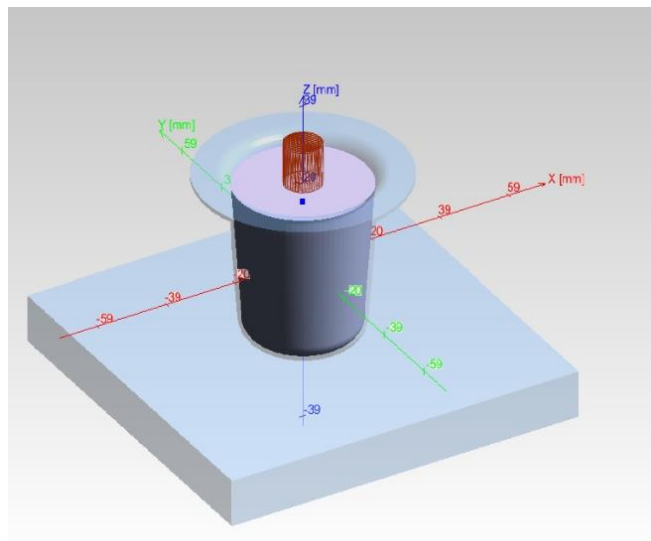
Obr. 10 Popis zařízení TA 110



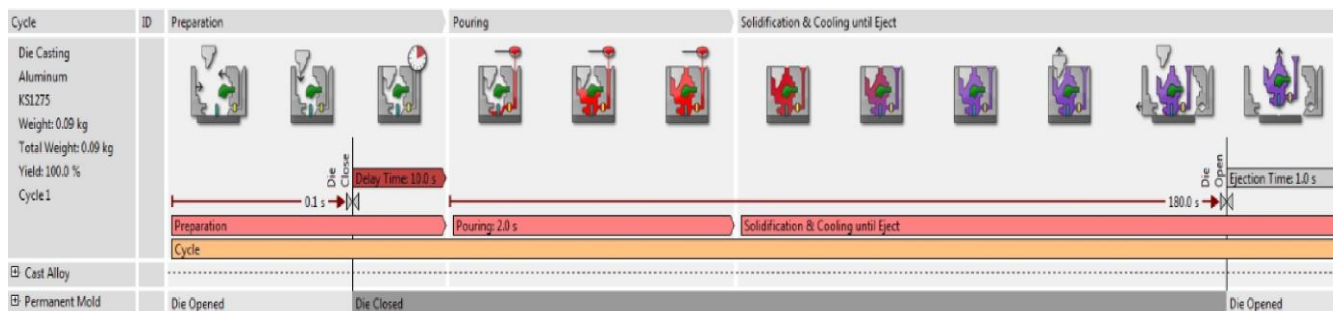
Obr. 11 Kelímek pro termickou analýzu

## 5.2 Simulace procesu v softwaru Magma

Pomocí softwaru magma se provedla simulace procesu ochlazování taveniny. Simulace byla provedena tak, aby odpovídala skutečnému procesu termické analýzy. Pro tento účel se vymodeluje kelímek (viz Obr. 16). Ten se v programu umístí na kovovou desku kvůli odvodu tepla (viz Obr. 17). Dále je vložen odpovídající objem taveniny (0,09 kg). Následně se na soustavě kelímek - kovová deska - tavenina vytvoří tzv. „mesh“, neboli využívání metody konečných prvků. Princip této metody spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do konečného počtu prvků. Teplota okolí kelímku se nastaví na pokojovou teplotu (20 °C). Teplota taveniny se nastaví na teplotu 700 °C. Popis průběhu simulace je zobrazen na Obr. 18.



Obr. 12 Soustava kelímek-kovová deska-tavenina

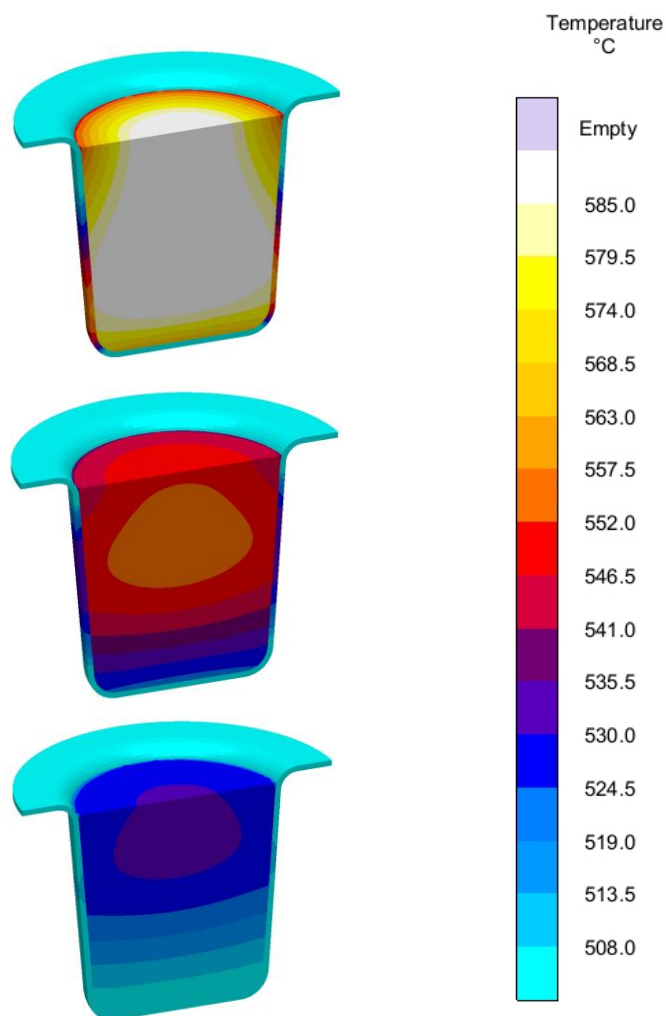


Obr. 13 Proces simulace lití testovacího odlitku

Proces simulace lití lze rozdělit do tří hlavních částí, které jsou popsány následovně:

- Přípravná část:** v této části se uzavře kovová forma na dobu 0,1 vteřiny, (jedná se pouze o krok nutný k simulaci). Dále je zde čas pro přenos taveniny z pecního zařízení do kelímku (formy).
- Odlévání:** v této fázi procesu se odlije tavenina do kelímku. Čas na naplnění kelímku činí 2 vteřiny.
- Tuhnutí a ochlazování:** zde je již forma naplněna taveninou a dochází k jejímu tuhnutí. Po ztuhnutí taveniny dále probíhá ochlazování. Tato část trvá 178 vteřin. Dále je zde započtena 1 vteřina na výjmutí odlitku z formy.

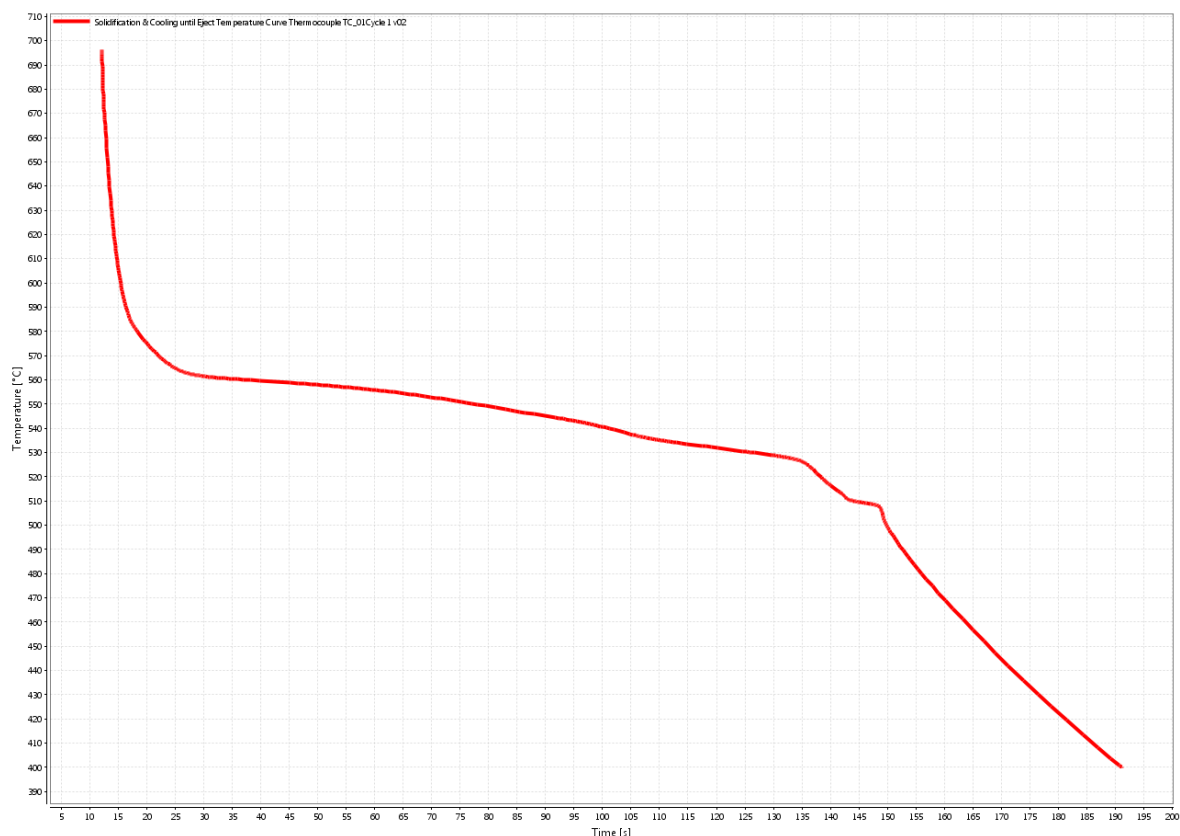
Ze simulace procesu v softwaru Magma se získaly informace o průběhu chladnutí, které se porovnají se skutečnými křivkami chladnutí získané z termické analýzy. Dále simulace procesu může poukázat, jaký je teplotní průběh v celém průřezu zkušební odlitku.



Obr. 14 Teplotní průběh procesu odlévání testovacího odlitku – shora při 10%, při 50% a při 90% doby chladnutí

Na Obr. 19 lze pozorovat, jaký je průběh teploty taveniny v kelímku pro termickou analýzu. V 10 % času po odlití je teplota uprostřed kelímku více než 585°C a na rozhraní kelímek – tavenina je nejnižší teplota cca 546°C a již se zde může vyskytovat tuhá fáze. Při 50% je teplota jádra zhruba 552°C. Nejnižší teplota je na dně kelímku, kde dosahuje hodnot 513°C. V této fázi procesu chladnutí by zde měla být převážně tuhá fáze. Ke konci procesu (90% doby tuhnutí) je v celém objemu tuhá fáze. Nejnižší teplota je opět u dna kelímku cca 508°C a nejvyšší teplota je v horní části odlitku zhruba 524 °C. Podle výsledků ze simulace lze předpokládat, že nukleace zárodků probíhala od stěny kelímku. Zde začala probíhat i krystalizace. Dále lze předpokládat výskyt staženiny v horní části odlitku.

Ze získaných výsledků simulace je sestavena teoretická křivka chladnutí. Tato křivka je dále porovnána se skutečnými křivkami chladnutí. Tato křivka je znázorněna na Obr. 15.



Obr. 15 Teoretická křivka chladnutí slitiny KS 1275

Z grafu teoretické křivky chladnutí je patrná pouze teplota nukleace a i ta se dá určit jen v rozmezí teplot 570 – 580 °C. Čas nukleace je u reálných křivek chladnutí brán od referenčního bodu, kdy teplota klesne na 580°C. Ovšem u teoretické křivky chladnutí je teplota nukleace mezích od 570°C do 580°C. Proto je zde časové rozmezí nukleace od 0 do 5 vteřin. Teplota maximálního přechlazení a teplota maximální rekalescence z grafu nelze přesně určit. Proto se dále bude porovnávat pouze teoretická teplota nukleace a čas, kdy nastala s reálnými hodnotami.

### 5.3 Popis experimentu

Termická analýza je prováděna na hliníkové slitině KS 1275. Tavba se provedla v pecním zařízení společnosti KS Kolbenschmidt Czech Republic a.s. Jako zařízení pro tavbu se využila plynová pec. Jednotlivé tavby se provedly s různým poměrem vratného materiálu. Maximální poměr vratného materiálu je 50%. Poměr vratného materiálu v tavbě je uveden v Tabulce 2.

| Tavba | Poměr vratného materiálu               |
|-------|--|
| 1     | KS 1275 – 100% blok                    |
| 2     | KS 1275 – 50% blok 50% zmetky          |
| 3     | KS 1275 – 50% blok 50% ořez            |
| 4     | KS 1275 – 50% blok 25% zmetky 25% ořez |
| 5     | KS 1275 – 70% blok 30% ořez            |

Tabulka 2 Poměr vratného materiálu

Kde;

**Blok** – tzv. houska, která odpovídá chemickému složení slitiny KS 1275 dle interních norem.(viz Obr. 21)

**Zmetek** – je vyrobená součást, ve které se nachází neopravitelná vada. Jedná se o zmetky vzniklé při slévárenském pochodu či o zmetky, které vznikly při obrábění. (viz Obr. 21)

**Ořez** – jsou části v tokové soustavě, které se odstraňují. (viz Obr. 21)



Obr. 16 zleva Blok, Zmetek, Ořez

Tavenina je z pecního zařízení (ještě před vlastní rafinací) přemístěna k přístroji termické analýzy, pomocí slévárenské lžice, kde je umístěn termočlánek. Ve všech případech měření byla teplota okolí přibližně stejná. Teplota byla snímána přístrojem každou 1,5 vteřiny. Data získaná z přístroje TA 110 jsou dále kvůli přehlednosti převedena do formátu xcl.

#### Chemické složení slitiny KS 1275:

| Si        | Fe       | Cu      | Mn      | Mg      | Zn       | Ni      | Na        |
|-----------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|-----------|
| 12,5-13,3 | max 0,65 | 0,9-1,4 | 0,1-0,5 | 0,8-1,1 | max 0,25 | 0,7-1,2 | max 5 ppm |

| Pb       | Ti        | Cr       | V        | P          | Sn          | Sr        |
|----------|-----------|----------|----------|------------|-------------|-----------|
| max 0,05 | 0,02-0,15 | max 0,05 | max 0,05 | 40-120 ppm | max 500 ppm | max 5 ppm |

Tabulka 3 chemické složení slitiny KS 1275

Fosfor je ve slitině využit jako očkovač. Při obsahu fosforu 40-120 ppm je předpoklad, že eutektické zrno bude mít morfologii zrnitého eutektika. Při nižším obsahu fosforu v tavenině je pravděpodobné, že zrno bude jemnější, než-li při vyšším obsahu. Obecně platí, že fosfor podporuje nukleaci zárodků. Naopak stroncium potlačuje vznik nukleačních zárodků, a proto se zde jeho obsah udržuje do 5 ppm. Měď a hořčík jsou do slitiny přidány za účelem jejího vytvrzení.

Základní legující prvky jako jsou křemík, měď, mangan, hořčík nikl a fosfor jsou u všech taveb (viz chemické složení níže nebo v přílohách 1 – 5) plně v rozptylu požadovaným dle normy. Tento rozptyl je velmi úzký. Dalším prvkem, který má předepsanou horní i dolní mez je titan, především v souvislosti s očkováním. Další prvky, které jsou ve slitině KS 1275 uvedeny s maximální horní hranicí obsahu jsou železo, zinek, sodík, olovo, chróm, vanad, cín a stroncium. Tyto prvky negativně ovlivňují některé materiálové či technologické vlastnosti.



## 5.4 Termická analýza – křivky chladnutí

Tato kapitola je věnována výsledkům termické analýzy slitiny KS 1275 s rozdílným poměrem vratu v tavenině. Z jednotlivých křivek chladnutí se získají hodnoty teplot  $T_R$  a  $T_U$ . Pomocí těchto teplot lze vypočítat pomocí rovnice (4)  $\Delta T_{R-U}$ . Dále se odečte čas trvání rekalescence. Jako referenční bod pro odečítání času (čas je v tomto okamžiku roven nule) je čas, kdy teplota dosáhla 580°C. Teplota likvidu (červená horizontální čára) byla zjištěna pomocí zařízení TA 110.

### 5.4.1 První tavba slitiny KS 1275 – 100% blok

Teplota taveniny před odlitím je 804°C.

#### Chemické složení:

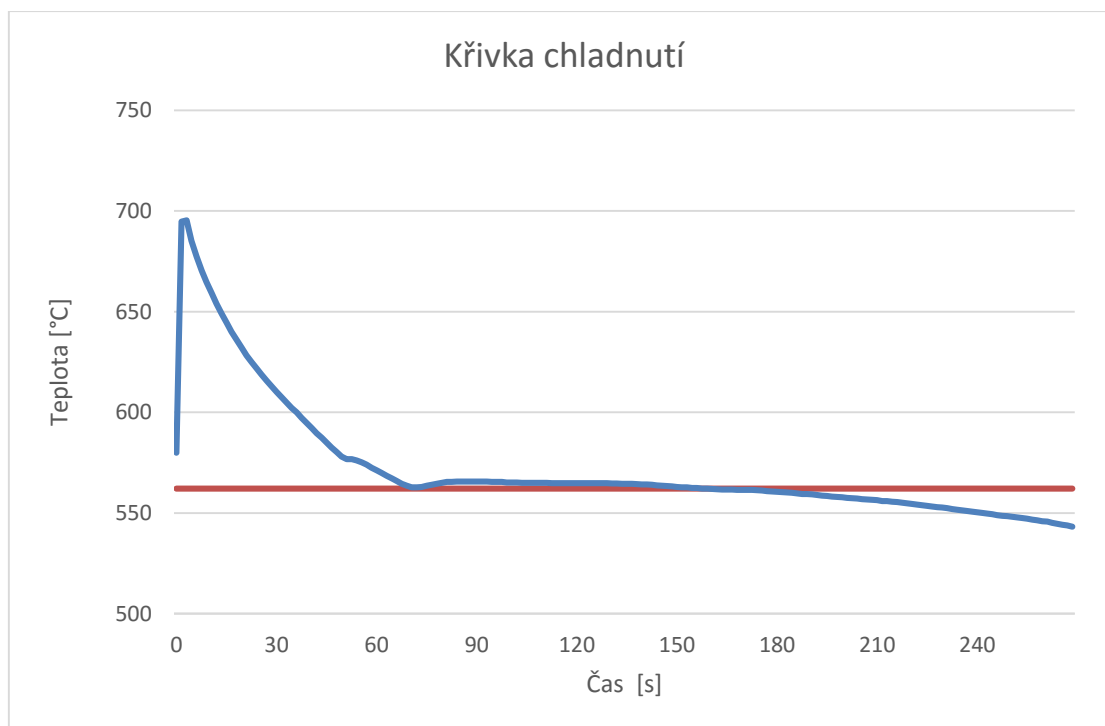
Chemické složení měřeného vzorku [%]:

|           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Al</b> | <b>Fe</b> | <b>Cu</b> | <b>Mn</b> | <b>Mg</b> | <b>Zn</b> | <b>Ni</b> | <b>Si</b> |
| <82,82    | 0,52      | 1,23      | 0,175     | 0,88      | 0,123     | 0,97      | 13,12     |
| <b>Pb</b> | <b>Ti</b> | <b>Cr</b> | <b>Sn</b> | <b>V</b>  | <b>P</b>  | <b>Sr</b> | <b>Na</b> |
| 0,009     | 0,064     | 0,0193    | 0,006     | 0,016     | 50,9 ppm  | < 1 ppm   | 2 ppm     |

Tabulka 4 Chemické složení slitiny KS 1275 – první tavba

Chemické složení odpovídá jakosti KS 1275.

#### První vzorek: číslo vzorku 1



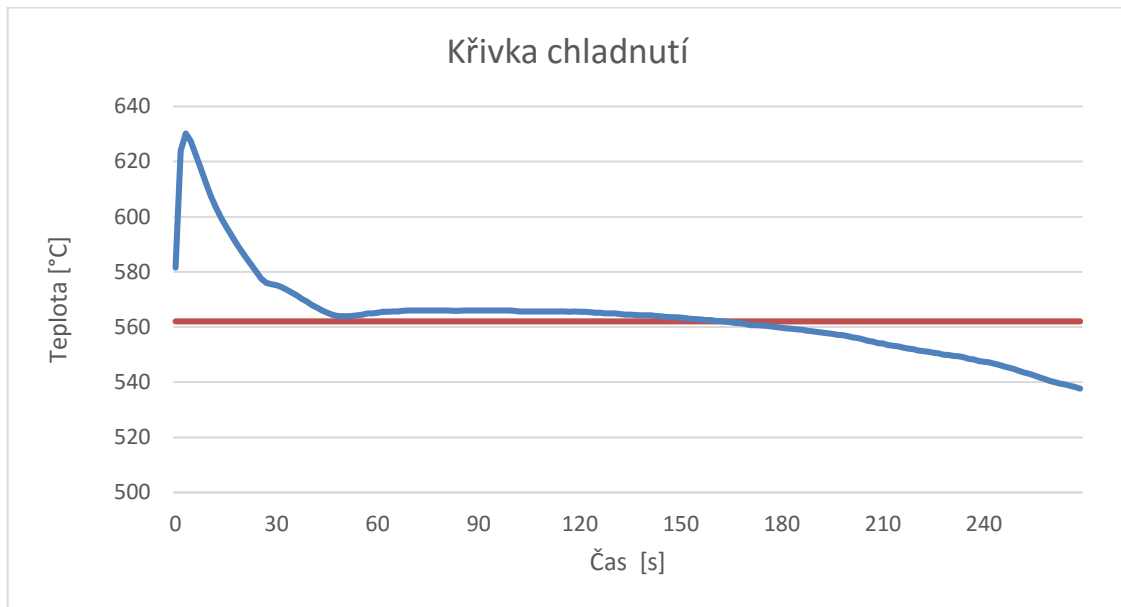
Graf 1 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 1

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 575,2      | 562,7      | 564,9      | 2,2                   | 7,5       | 24        | 72        | 48             |

Tabulka 5 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 1

**Druhý vzorek: číslo vzorku 2**



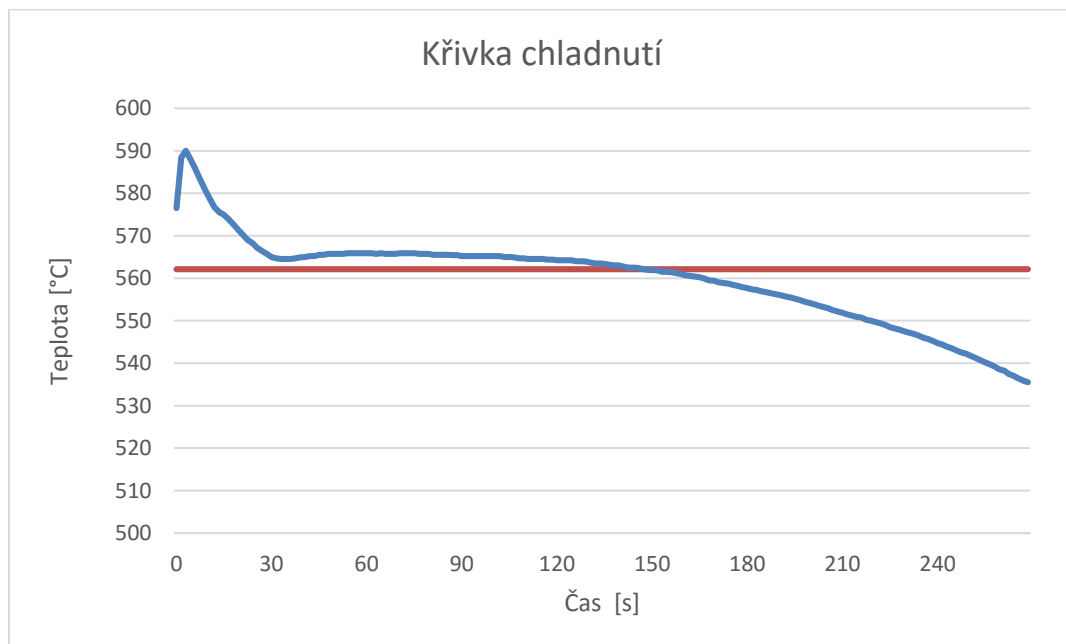
**Graf 2 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 2**

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 573,5      | 563,9      | 566,1      | 2,2                   | 10,5      | 26,5      | 52,5      | 26             |

**Tabulka 6 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 2**

**Třetí vzorek: číslo vzorku 3**



**Graf 3 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 3**



Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 574,9      | 564,5      | 565,9      | 1,4                   | 6         | 25,5      | 49,5      | 24             |

Tabulka 7 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 3

#### 5.4.2 Druhá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok, 50% zmetky

Teplota taveniny před odlitím je 808°C

**Chemické složení:**

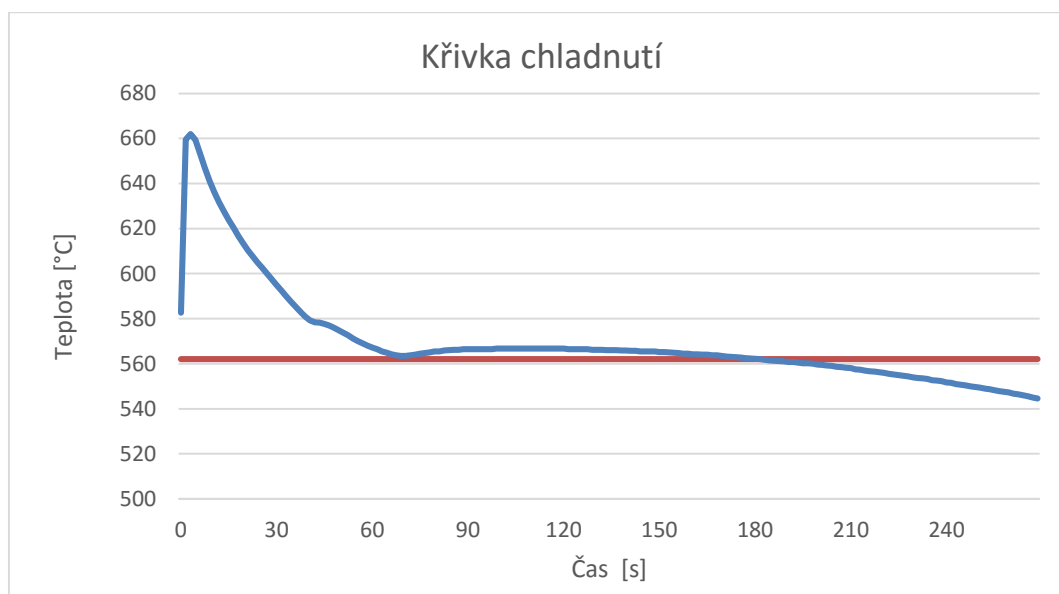
Chemické složení měřeného vzorku [%]:

| Al     | Fe   | Cu     | Mn    | Mg    | Zn       | Ni     | Si    |
|--------|------|--------|-------|-------|----------|--------|-------|
| <82,86 | 0,56 | 1,190  | 0,188 | 0,92  | 0,142    | 0,92   | 13,06 |
| Pb     | Ti   | Cr     | Sn    | V     | P        | Sr     | Na    |
| 0,0119 | 0,06 | 0,0229 | 0,006 | 0,019 | 47,6 ppm | <1 ppm | 3 ppm |

Tabulka 8 Chemické složení slitiny KS1275 – druhá tavba

Chemické složení odpovídá jakosti KS 1275.

**První vzorek: číslo vzorku 4**



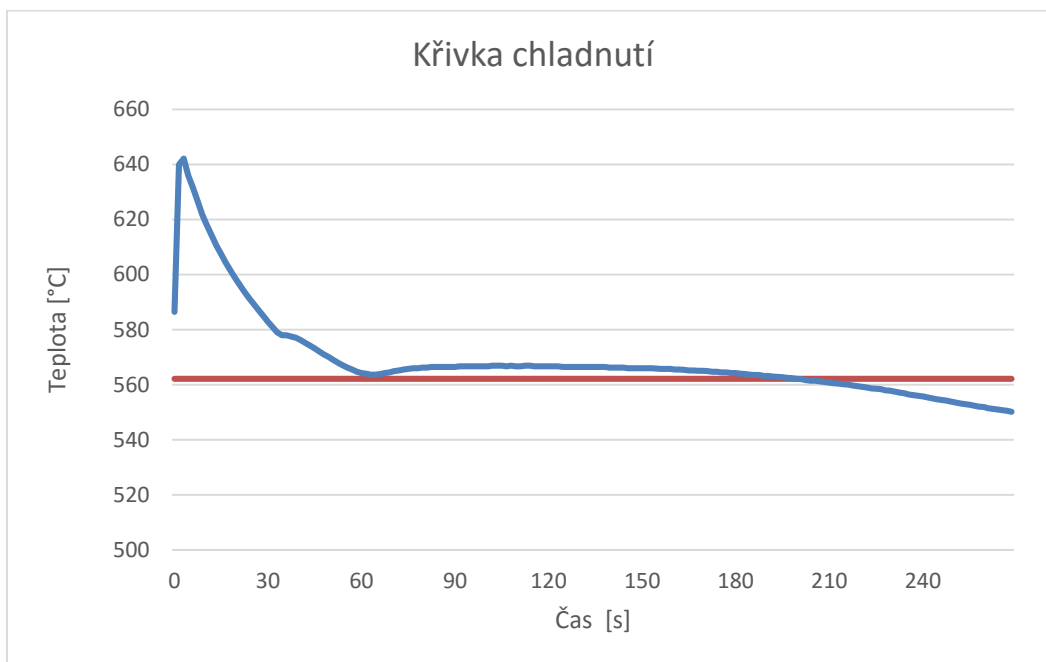
Graf 4 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 4

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 577        | 563,6      | 566,8      | 3,2                   | 7,5       | 30        | 70,5      | 40,5           |

Tabulka 9 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 4

### Druhý vzorek: číslo vzorku 5



Graf 5 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 5

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 577        | 563,7      | 566,8      | 3,1                   | 7,5       | 31,5      | 75        | 43,5           |

Tabulka 10 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 5

### Třetí vzorek: číslo vzorku 6

Při měření tohoto vzorku došlo k přerušení měření. Ovšem i přesto lze získat z tohoto měření důležitá data pro určení velikosti zrna a tak se dá považovat měření za platné.



Graf 6 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 6

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 577,2      | 564,1      | 566,9      | 2,8                   | 6         | 28,5      | 64,5      | 36             |

Tabulka 11 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 6

### 5.4.3 Třetí tavba slitiny KS 1275 – 50% blok, 50% ořez

Teplota teveniny před odlitím byla 804°C.

**Chemické složení:**

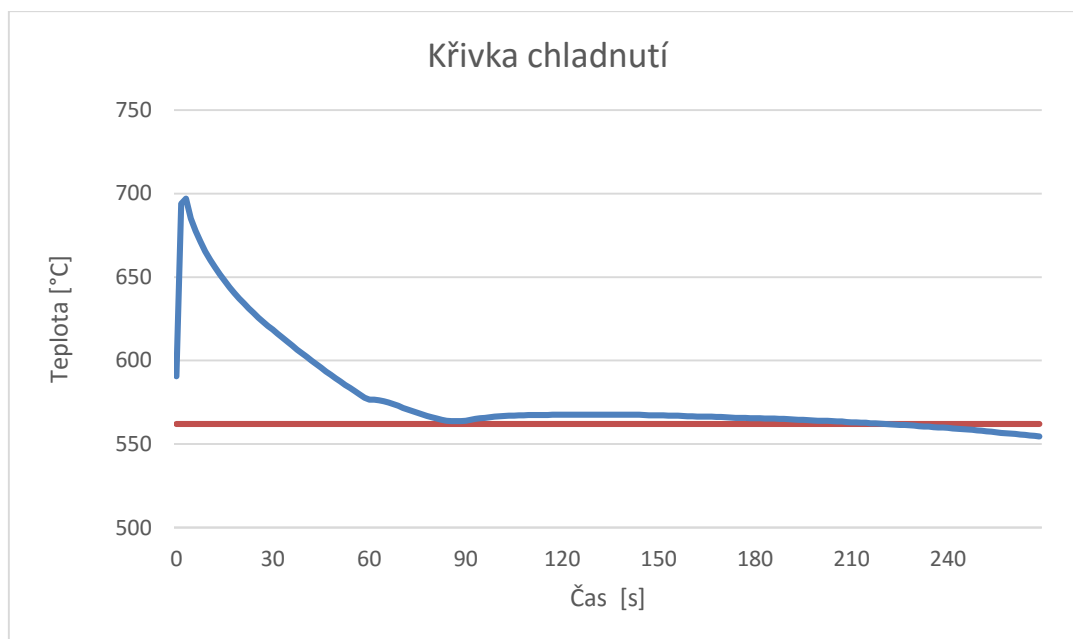
Chemické složení měřeného vzorku [%]:

| Al     | Fe    | Cu     | Mn    | Mg    | Zn       | Ni     | Si    |
|--------|-------|--------|-------|-------|----------|--------|-------|
| <83,26 | 0,47  | 1,16   | 0,159 | 0,89  | 0,161    | 0,9    | 12,85 |
| Pb     | Ti    | Cr     | Sn    | V     | P        | Sr     | Na    |
| 0,0116 | 0,059 | 0,0205 | 0,007 | 0,018 | 44,5 ppm | <1 ppm | 1 ppm |

Tabulka 12 Chemické složení slitiny KS 1275 – třetí tavba

Chemické složení odpovídá jakosti KS 1275.

**První vzorek: číslo vzorku 7**



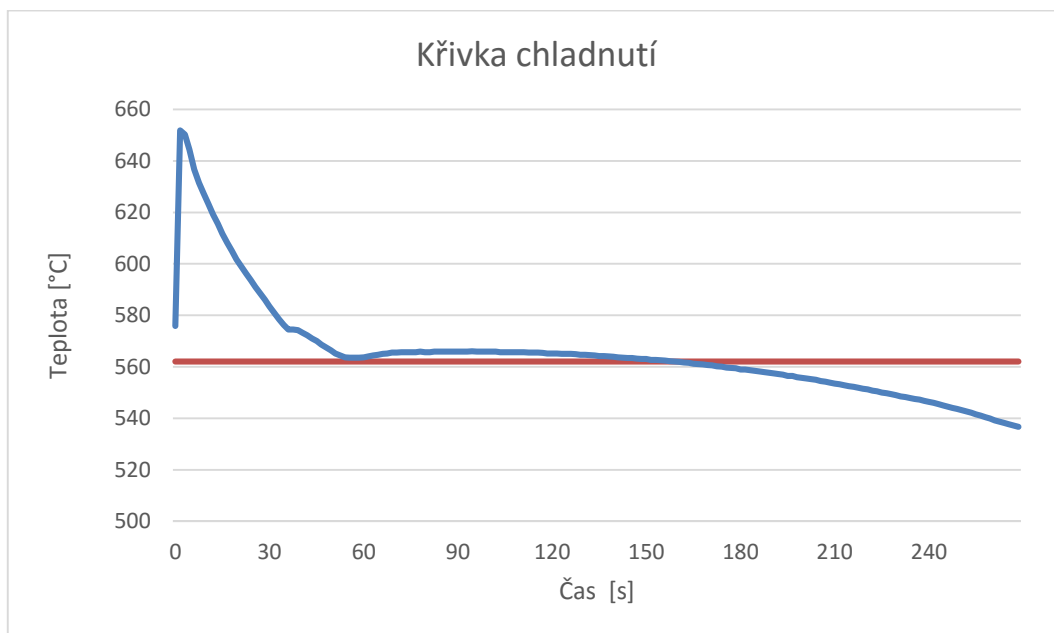
Graf 7 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 7

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 575,8      | 563,9      | 567,5      | 3,6                   | 9         | 27        | 60        | 33             |

Tabulka 13 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 7

**Druhý vzorek: číslo vzorku 8**



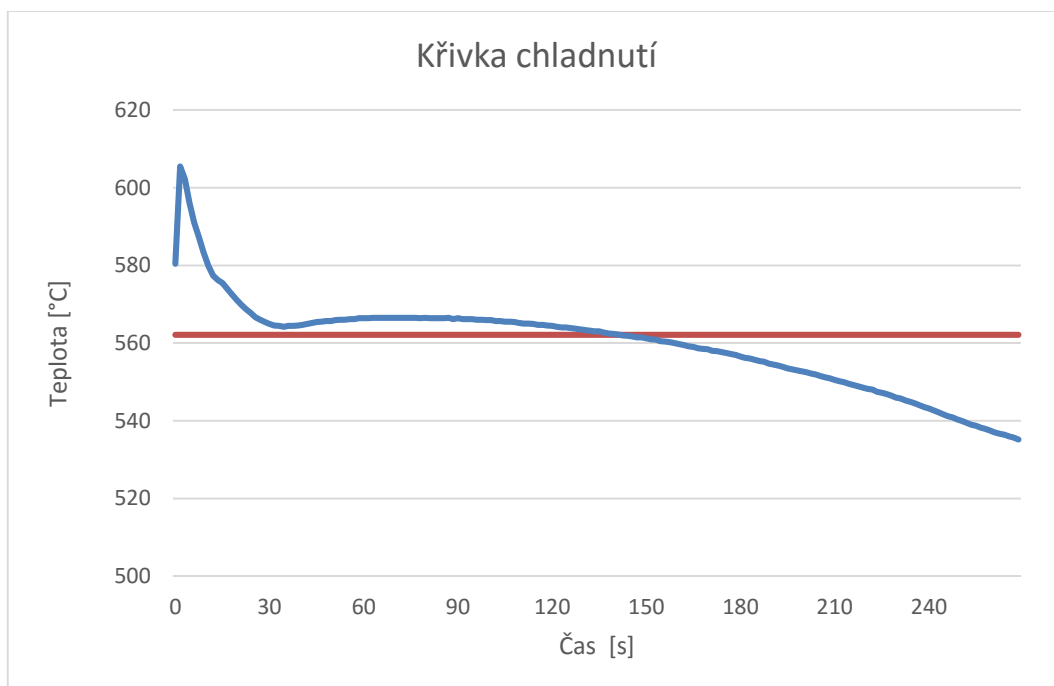
**Graf 8 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 8**

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 573,3      | 563,5      | 566        | 2,5                   | 9         | 24        | 63        | 39             |

**Tabulka 14 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 8**

**Třetí vzorek: číslo vzorku 9**



**Graf 9 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 9**

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 575,5      | 564,2      | 566,4      | 2,2                   | 4,5       | 33        | 60        | 27             |

Tabulka 15 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 9

#### 5.4.4 Čtvrtá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 25% zmetky 25% ořez

Teplota teveniny před odlitím byla 810°C.

**Chemické složení:**

Chemické složení měřeného vzorku [%]:

| Al     | Fe    | Cu     | Mn    | Mg    | Zn       | Ni     | Si    |
|--------|-------|--------|-------|-------|----------|--------|-------|
| <83,2  | 0,43  | 1,15   | 0,154 | 0,9   | 0,137    | 0,86   | 13,02 |
| Pb     | Ti    | Cr     | Sn    | V     | P        | Sr     | Na    |
| 0,0113 | 0,057 | 0,0226 | 0,006 | 0,018 | 46,9 ppm | <1 ppm | 2 ppm |

Tabulka 16 Chemické složení slitiny KS 1275 – čtvrtá tavba

Chemické složení odpovídá jakosti KS 1275.

**První vzorek: číslo vzorku 10**



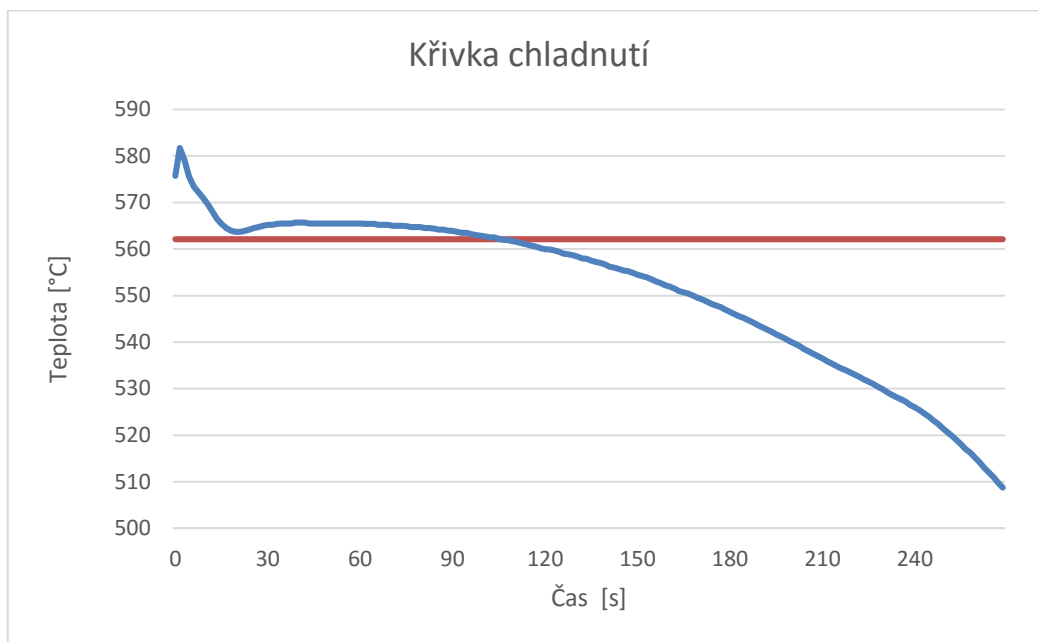
Graf 10 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 10

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 575        | 562,5      | 564,2      | 1,7                   | 6         | 33        | 72        | 39             |

Tabulka 17 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 10

**Druhý vzorek: číslo vzorku 11**



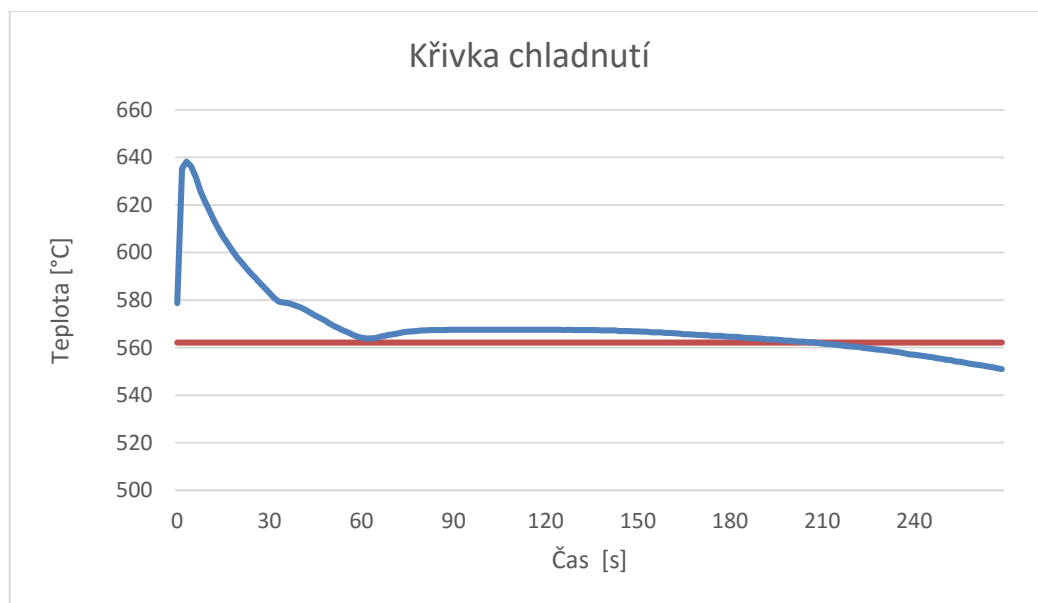
**Graf 11 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 11**

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 572,2      | 563,7      | 565,7      | 2                     | 4,5       | 16,5      | 39        | 22,5           |

**Tabulka 17 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 11**

**Třetí vzorek: číslo vzorku 12**



**Graf 12 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 12**

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 577,5      | 563,9      | 567,5      | 3,6                   | 7,5       | 30        | 66        | 33             |

Tabulka 18 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 12

#### 5.4.5 Pátá tavba slitiny KS 1275 – 70% blok 30% ořez

Teplota teveniny před odlitím byla 810°C.

**Chemické složení:**

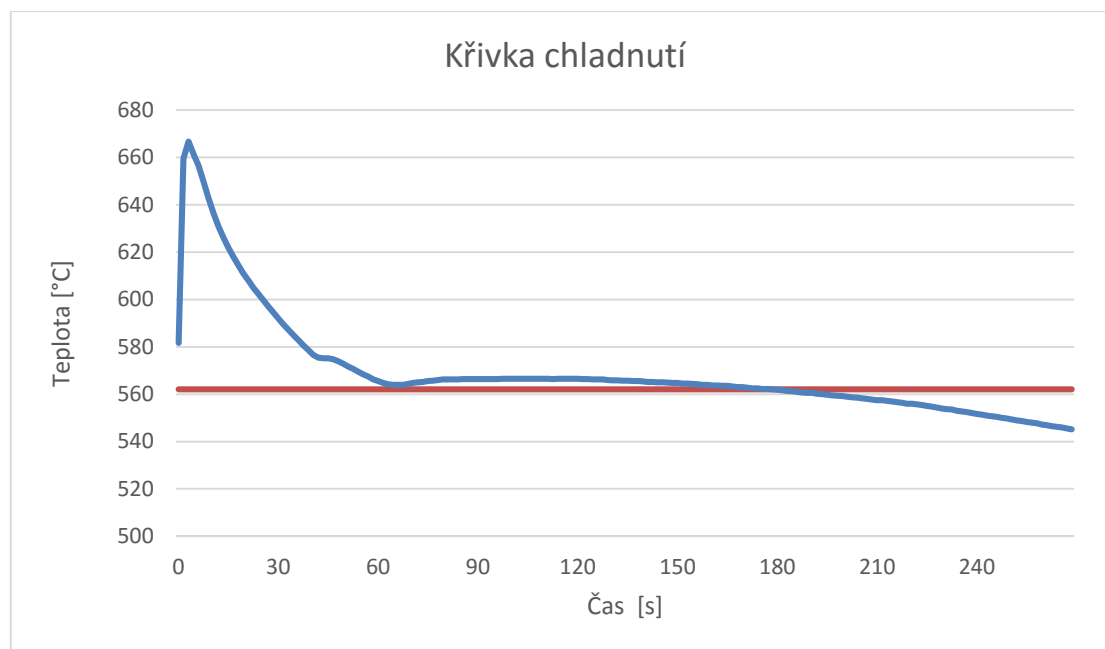
Chemické složení měřeného vzorku [%]:

| Al     | Fe   | Cu    | Mn    | Mg    | Zn       | Ni      | Si      |
|--------|------|-------|-------|-------|----------|---------|---------|
| <82,88 | 0,44 | 1,23  | 0,174 | 0,87  | 0,134    | 0,91    | 13,2    |
| Pb     | Ti   | Cr    | Sn    | V     | P        | Sr      | Na      |
| 0,0109 | 0,02 | 0,017 | 0,005 | 0,017 | 47,5 ppm | < 1 ppm | < 1 ppm |

Tabulka 19 Chemické složení slitiny KS 1275 – pátá tavba

Chemické složení odpovídá jakosti KS 1275.

**První vzorek: čísl ovzorku 13**



Graf 13 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 13

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 574,7      | 563,9      | 566,5      | 2,5                   | 9         | 27        | 73,5      | 46,5           |

Tabulka 20 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 13

**Druhý vzorek: číslo vzorku 14**



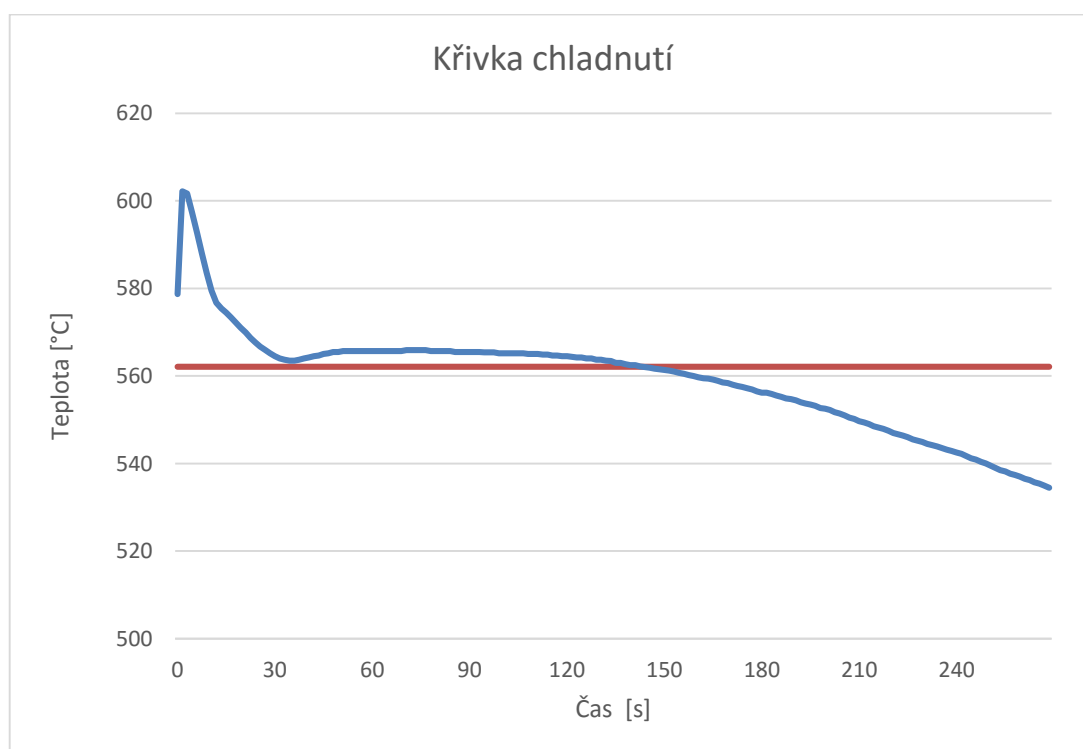
**Graf 14 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 14**

Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 574        | 563,7      | 565,5      | 2,5                   | 6         | 36        | 51        | 15             |

**Tabulka 21 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 14**

**Třetí vzorek: číslo vzorku 15**



**Graf 15 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 15**



Výsledky termické analýzy:

| $T_N$ [°C] | $T_U$ [°C] | $T_R$ [°C] | $\Delta T_{R-U}$ [°C] | $t_N$ [s] | $t_U$ [s] | $t_R$ [s] | $\Delta t$ [s] |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 574,5      | 563,5      | 565,7      | 2,5                   | 4,5       | 24        | 60        | 36             |

Tabulka 22 Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 15

#### 5.4.6 Zhodnocení výsledků termické analýzy

Výše uvedené záznamy termické analýzy jsou v této kapitole analyzovány na základě teploty  $\Delta T_{R-U}$  a doby trvání rekaescence  $\Delta t$ . Tyto hodnoty jsou v následující tabulce bodově ohodnoceny a následně zprůměrovány. Hodnocení bude prováděno dle autora disertační práce Davida Gloria Ibarra (viz. Obr. 13) podle něhož je při nízké teplotě  $\Delta T_{R-U}$  a při krátké době trvání rekaescence zrno nejjemnější. Na základě těchto dat lze predikovat, při jaké tavbě bude zrno nejjemnější a při jaké naopak bude zrno hrubé. Je vhodné podotknout, že rychlost ochlazování byla u všech vzorků stejná (stejně počáteční podmínky). Toto tvrzení je však nutné podložit metalografií. Touto problematikou se diplomová práce zabývá v dalších kapitolách.

Bodování je provedeno od nejmenšího čísla k nejvyššímu, kde nejmenší číslo znamená vzorek s nejjemnějším zrnem.

| Tavba                              | Číslo vzorku | Bodové hodnocení teploty | Bodové hodnocení času | Bodový součet | Pořadí dle jemnosti zrna |
|------------------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------|---------------|--------------------------|
| 100% blok                          | 1            | 4                        | 12                    | 16            | 11-12                    |
|                                    | 2            | 4                        | 4                     | 8             | 4                        |
|                                    | 3            | 1                        | 3                     | 4             | 1                        |
| 50% blok<br>50% zmetky             | 4            | 8                        | 9                     | 17            | 13-14                    |
|                                    | 5            | 7                        | 10                    | 17            | 13-14                    |
|                                    | 6            | 6                        | 6                     | 12            | 8-9                      |
| 50% blok<br>50% ořez               | 7            | 9                        | 12                    | 21            | 15                       |
|                                    | 8            | 5                        | 7                     | 12            | 8-9                      |
|                                    | 9            | 4                        | 5                     | 9             | 5-6                      |
| 50% blok<br>25% ořez<br>25% zmetky | 10           | 2                        | 7                     | 9             | 5-6                      |
|                                    | 11           | 3                        | 2                     | 5             | 2                        |
|                                    | 12           | 9                        | 6                     | 15            | 10                       |
| 70% blok<br>30% ořez               | 13           | 5                        | 11                    | 16            | 11-12                    |
|                                    | 14           | 5                        | 1                     | 6             | 3                        |
|                                    | 15           | 5                        | 6                     | 11            | 7                        |

Tabulka 23 Hodnocení výsledků termické analýzy

Podle tabulky 23 lze ze získaných hodnot předpovídat, že nejjemnější zrno bude u třetího vzorku (tavba 100% blok). Naopak nejhrubší zrno lze předpokládat u sedmého vzorku (tavba 50% blok, 50% ořez). Provede-li se aritmetický průměr součtu bodů, pak na základě těchto hodnot lze určit, která tavba by měla mít nejjemnější zrno. Toto vyhodnocení je provedeno v tabulce 24. Z této tabulky vyplývá, která tavba má nejjemnější zrno a která naopak má zrno hrubé.

| Tavba                                       | Bodový součet | Aritmetický průměr | Pořadí dle jemnosti zrna |
|---|---------------|--------------------|--------------------------|
| <b>100% blok</b>                            | 16            | 9,33               | 1                        |
|   | 8             |                    |                          |
|   | 4             |                    |                          |
| <b>50% blok<br/>50% zmetky</b>              | 17            | 15,3               | 5                        |
|   | 17            |                    |                          |
|   | 12            |                    |                          |
| <b>50% blok<br/>50% ořez</b>                | 21            | 14                 | 4                        |
|   | 12            |                    |                          |
|   | 9             |                    |                          |
| <b>50% blok<br/>25% ořez<br/>25% zmetky</b> | 9             | 9,66               | 2                        |
|   | 5             |                    |                          |
|   | 15            |                    |                          |
| <b>70% blok<br/>30% ořez</b>                | 16            | 11                 | 3                        |
|   | 6             |                    |                          |
|   | 11            |                    |                          |

Tabulka 24 Hodnocení tavby pomocí termické analýzy

Výsledky termické analýzy se dále porovnají s výsledky získané ze softwaru Magma. Z teoretické křivky chladnutí byla zjištěna pouze nukleační teplota a její čas začátku. Nukleační teplota se zde pohybuje v rozmezí 570 – 580°C. Průměrná teplota nukleace, získaná z reálných křivek chladnutí je 575,2 °C. Teplota reálných křivek a teplota teoretické křivky se shoduje. Čas počátku nukleace teoretické křivky chladnutí je v rozmezí 0 - 5 vteřiny. U reálných křivek je naměřená průměrná hodnota 6,3 vteřiny. Zde se čas nukleace neshoduje o 1,3 vteřiny. Při tak nízké odchylce reality od teorie se dá teoretická křivka v tomto směru použít.

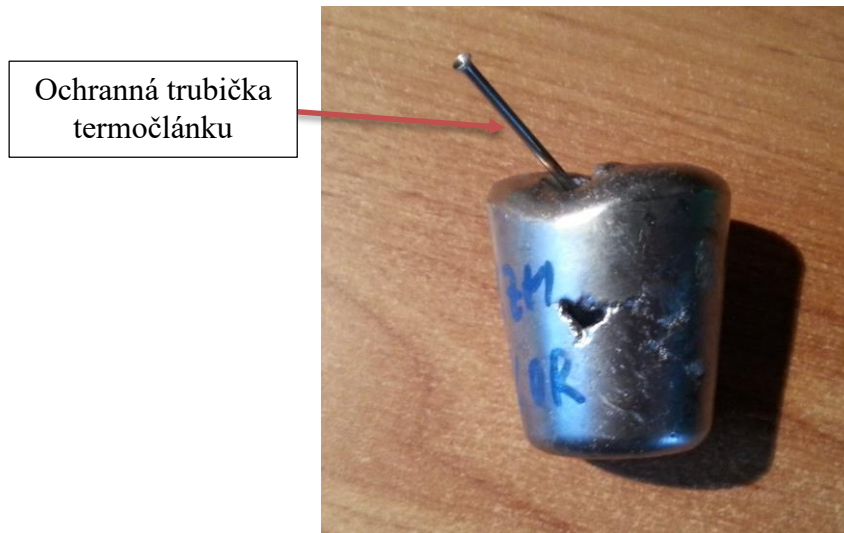
## 5.5 Metalografické zhodnocení velikosti zrna

Na každém vzorku termické analýzy se provedl metalografický výbrus. Metalografie zde byla prováděna za účelem zjištění velikosti zrna. Tímto způsobem se dá jednoznačně potvrdit výše získané výsledky termické analýzy.

Následně byla na vzorcích nafocena, pomocí mikroskopu NIKON, mikrostruktura. Bylo pořízeno pět fotografií, které byly zvětšeny 100x. Tyto fotografie se vyhodnocovaly pomocí obrazové analýzy. Ta se provedla v softwaru NIS-Elements. Nejprve se změřila velikost zrna primárního křemíku, kde byly ručně označeny částice odpovídající tvaru vyloučeného křemíku. Následně byly pomocí automatického prahování označeny a změřeny částice všech zrn. Z výsledků obrazové analýzy se získala průměrná hodnota velikosti částice. Pro ilustraci je v práci použito jedno měření u první tavby. Dále se v práci budou vyskytovat fotografie mikrostruktury a získané výsledky. Zbývá metalografie je v příloze.

### 5.5.1 Příprava vzorků

Po odlití taveniny do kelímku a následném ztuhnutí ztuhnutí se z kelímku výjme kov (viz. Obr. 22). V odlitém kovu se nachází ochranná trubička termočlánku. Ta se ovšem při další operaci odstraní. Na obrázku jsou vidět staženiny a je zde i velice pórovitá struktura. To je zapříčiněno tím, že tavenina před odlitím nebyla rafinována.



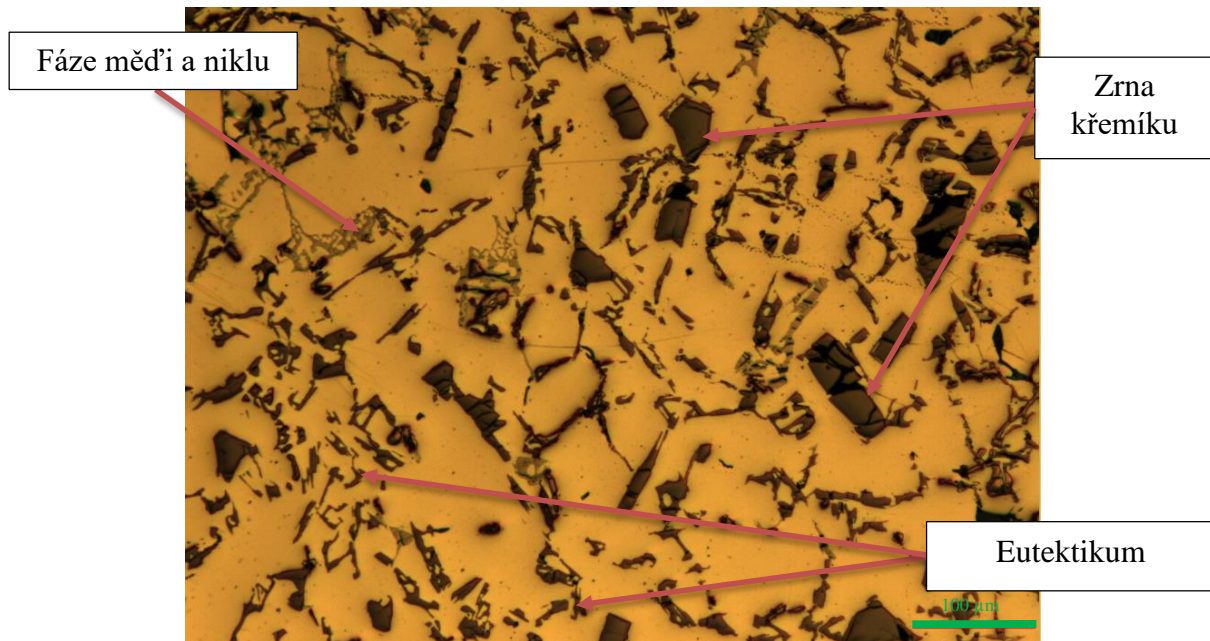
Obr. 17 Vzorek výjmutý z kelímku

Tento vzorek je dále nutné upravit na požadované rozměry. Z toho důvodu je na soustruhu pod stálým přívodem chladicí kapaliny, obroben průměr na 15 mm a ve spodní části (na protější straně od ochranné trubičky) je proveden zápich o 10 mm. Takto upravený vzorek je možné zalít do pryskyřice a provést na něm metalografický výbrus. Ten se provede na brusných papírech o zrnitosti nejprve 400, 800, 1000 a 1200 a následně se provede leštění na 6, 3 a 1  $\mu\text{m}$ . Dále se vzorek naleptá, aby se dosáhlo zvýraznění eutektika a zrn primárně vyloučeného křemíku.

### 5.5.2 První tavba slitiny KS 1275 – 100% blok

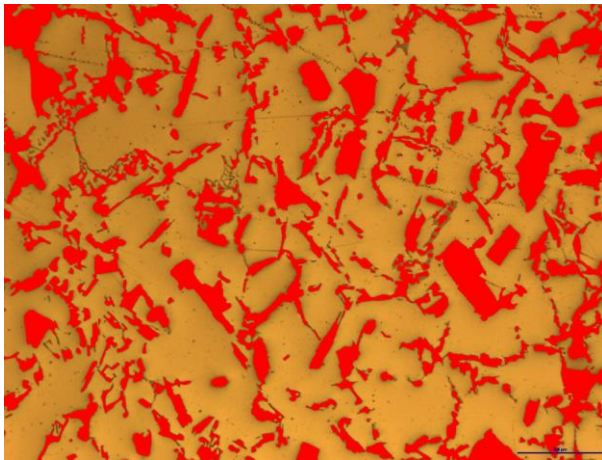
#### První vzorek: číslo vzorku 1

Na Obr. 23 je fotografie mikrostruktury zvětšena 100x. Je možno zde pozorovat primární zrna křemíku, eutektikum a intermetalickou fázi tvořenou měďí a niklem.

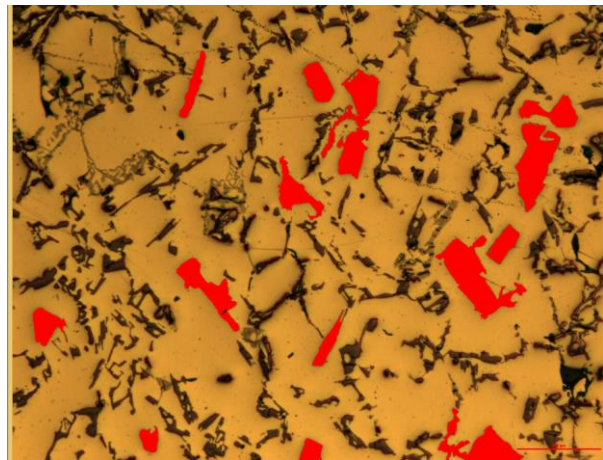


Obr. 23 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo1

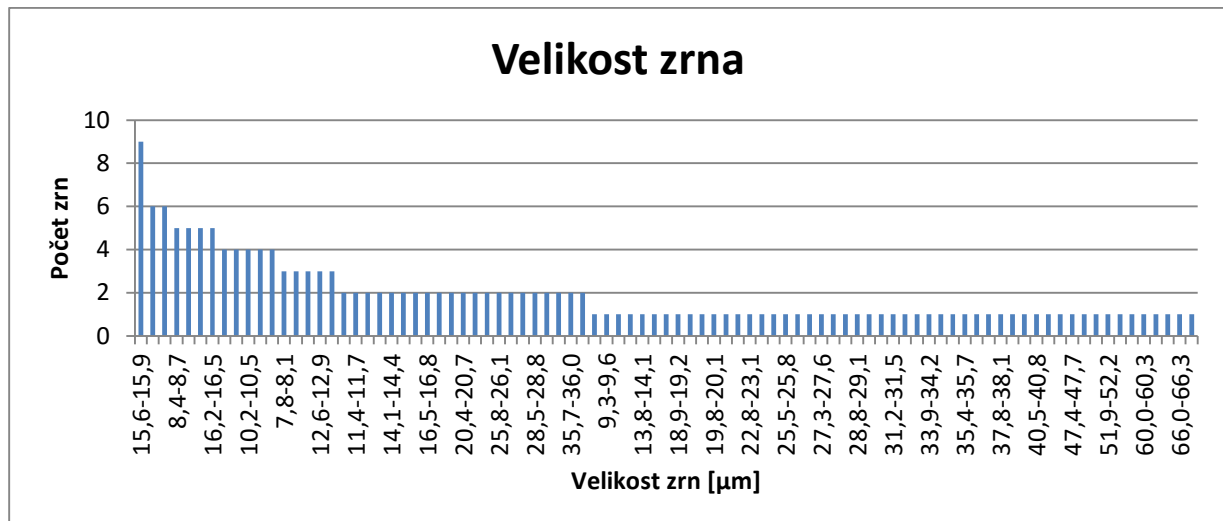
Na Obr. 24 je vidět prahování zrn eutektika a zrn křemíku. Na Obr. 25 jsou naprahovány zrna křemíku. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v grafech 16 a 17. Průměrná hodnota velikosti částic je v tabulce 25.



Obr. 24 Fotografie prahování zrn zvětšeno 100x – vzorek číslo 1



Obr. 25 Fotografie prahování zrn Si zvětšeno 100x – vzorek číslo1



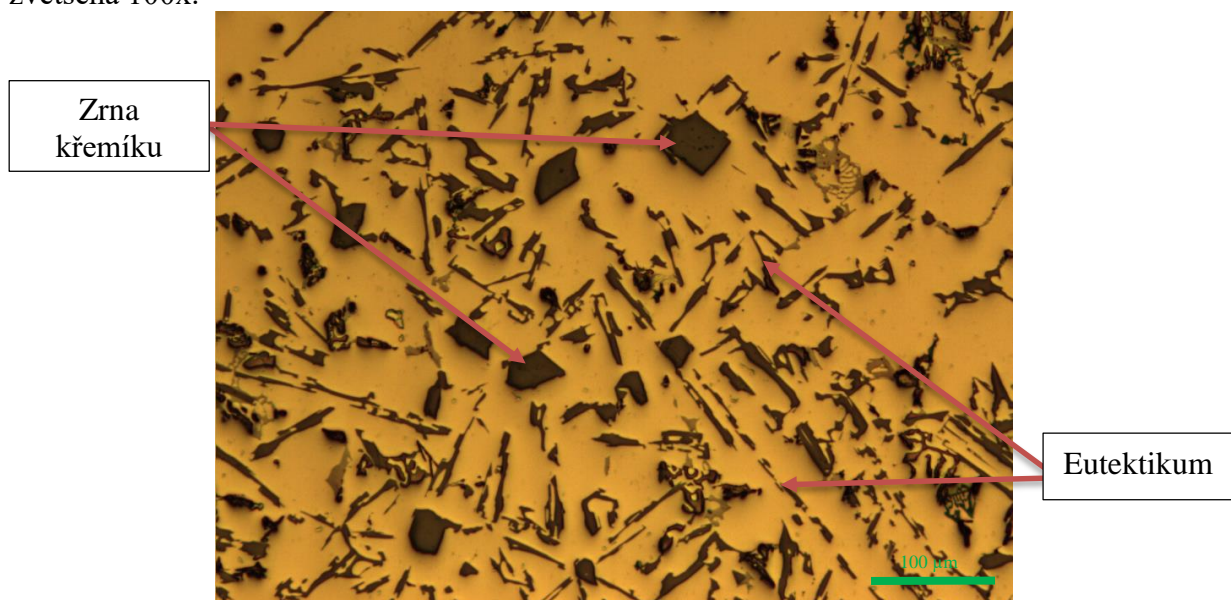
Graf 16 histogram velikosti zrna – vzorek číslo1

| Číslo měření            | Velikost zrna [μm] | Velikost zrna Si [μm] |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| 1                       | 39,9 - 40,2        | 40,2 - 40,5           |
| 2                       | 31,3 - 31,6        | 40,1 - 40,4           |
| 3                       | 43,7 - 44          | 43,1 - 43,4           |
| 4                       | 42,5 - 42,8        | 40,9 - 41,2           |
| 5                       | 43 - 43,3          | 45,9 - 46,2           |
| <b>Průměrná hodnota</b> | <b>40,1 - 40,4</b> | <b>42 - 42,3</b>      |

Tabulka 25 Průměrná velikost částic – vzorek 1

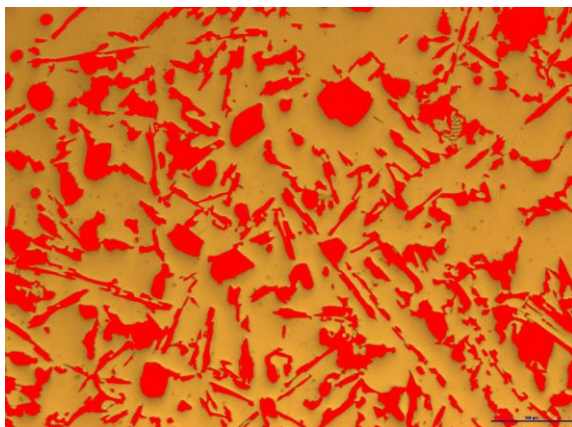
### Druhý vzorek: číslo vzorku 2

Na tomto snímku (Obr. 26) lze pozorovat eutektikum, zrna křemíku. Fotografie je zvětšena 100x.

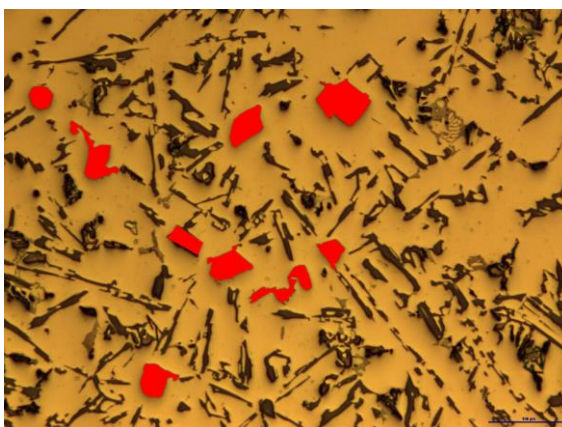


Obr. 26 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 2



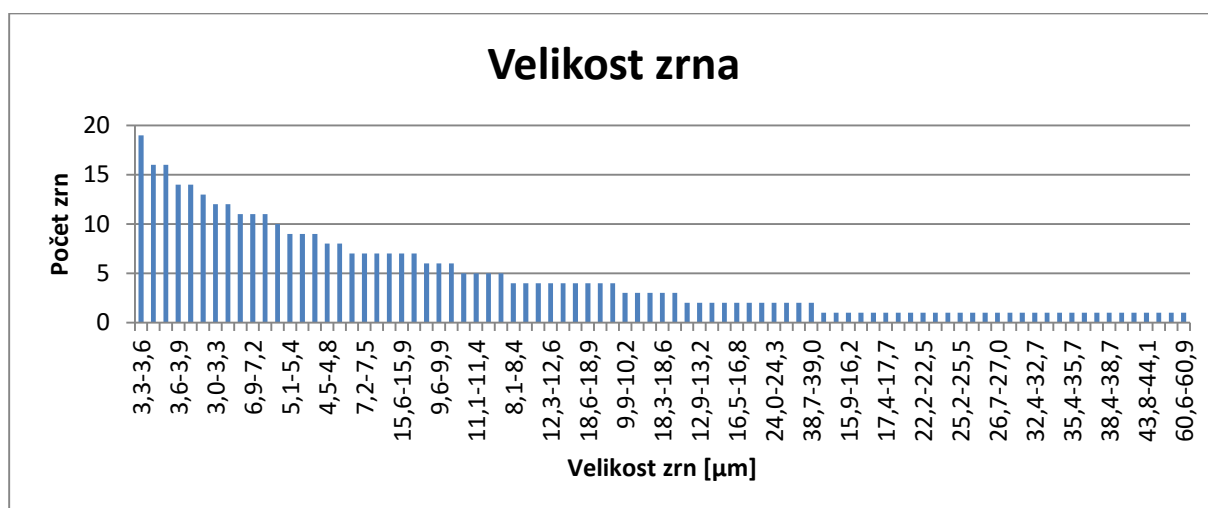


Obr. 27 Fotografie prahování zrn zvětšeno 100x – vzorek číslo 2



Obr. 28 Fotografie prahování zrn Si zvětšeno 100x – vzorek číslo 2

Na Obr. 27 je fotografie naprahoovaných částic křemíku a eutektika. Fotografie je zvětšena 100x. Na fotografii v pravo (Obr. 28) jsou naprahoovány částice křemíku. Výsledky jsou uvedeny v grafu níže (viz graf 18 a 19) průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 26.



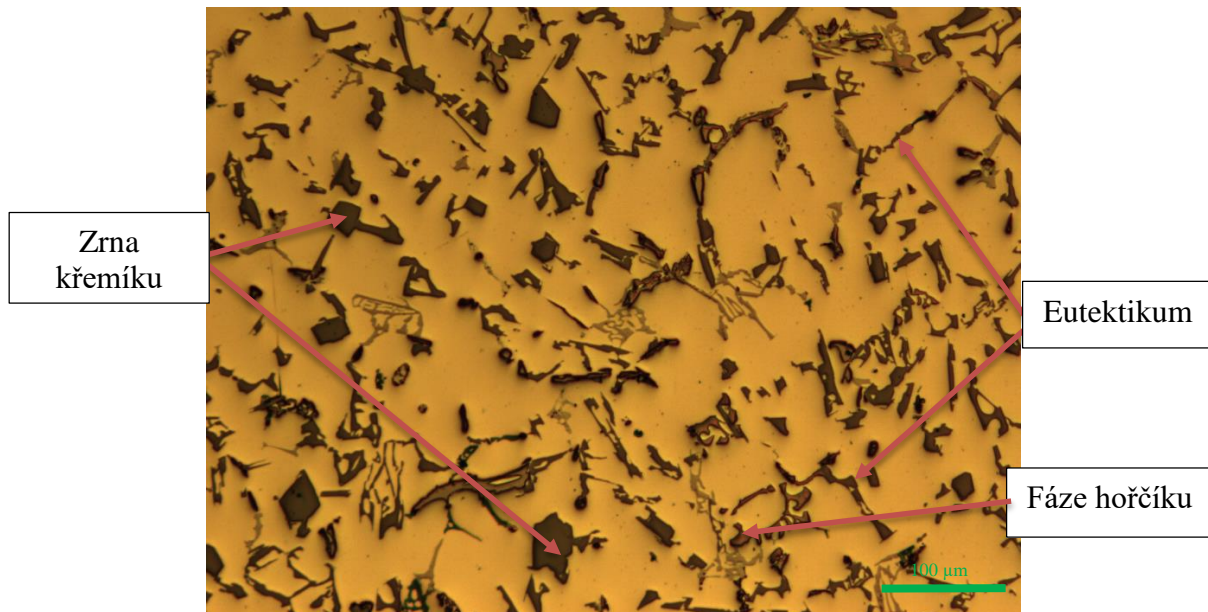
Graf 17 histogram velikosti zrna – vzorek číslo 2

| Číslo měření            | Velikost zrna [μm] | Velikost zrna Si [μm] |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| 1                       | 44,5 – 44,8        | 39,8 – 40,1           |
| 2                       | 44,8 – 45,1        | 33,9 – 34,1           |
| 3                       | 39,7 - 40          | 35,3 – 35,6           |
| 4                       | 49,2 – 49,5        | 40,3 – 40,6           |
| 5                       | 39,1 – 39,4        | 49,9 – 50,1           |
| <b>Průměrná hodnota</b> | <b>43,5 – 43,8</b> | <b>39,8 – 40,1</b>    |

Tabulka 26 Průměrná velikost částic – vzorek 2

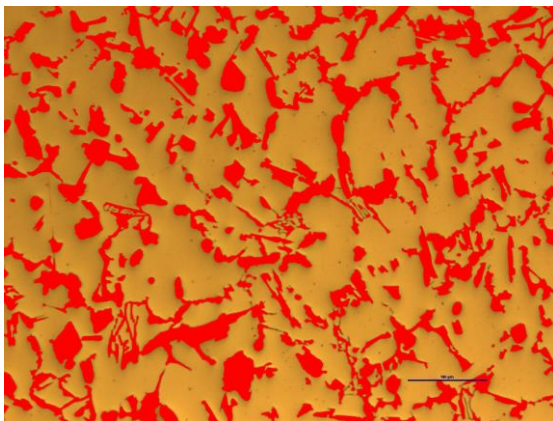
### Třetí vzorek: číslo vzorku 3

Fotografie mikrostruktury třetího vzorku tavby se 100 % blokem je na Obr. 29. Zde se vyskytují zrna křemíku a eutektika. Dále je zde možno pozorovat intermetalickou fázi hořčíku.

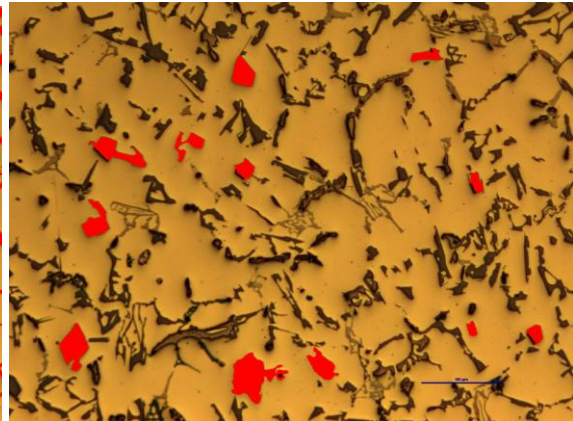


Obr. 29 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 3

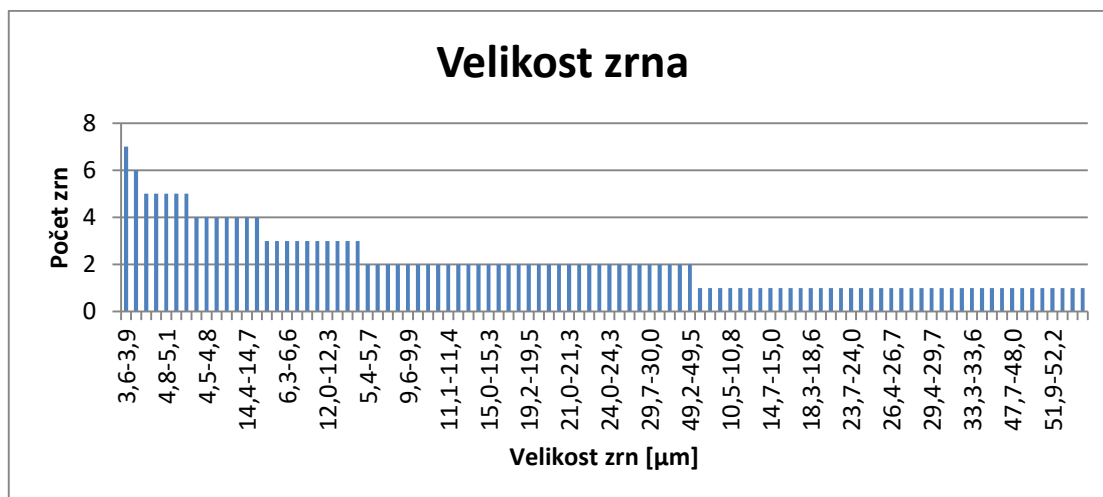
Obrázky 30 a 31 zachycují fotografie naprahovaných částic eutektika a křemíkových zrn. Velikost těchto zrn je uvedena v následujících grafech a to 20 a 21. Průměrné hodnoty velikosti částic jsou uvedeny v tabulce 27.



Obr. 30 Fotografie prahování zvětšeno 100x – vzorek číslo 3



Obr. 31 Fotografie prahování zrn Si zvětšeno 100x – vzorek číslo 3



Graf 18 histogram velikosti zrna – vzorek číslo 3

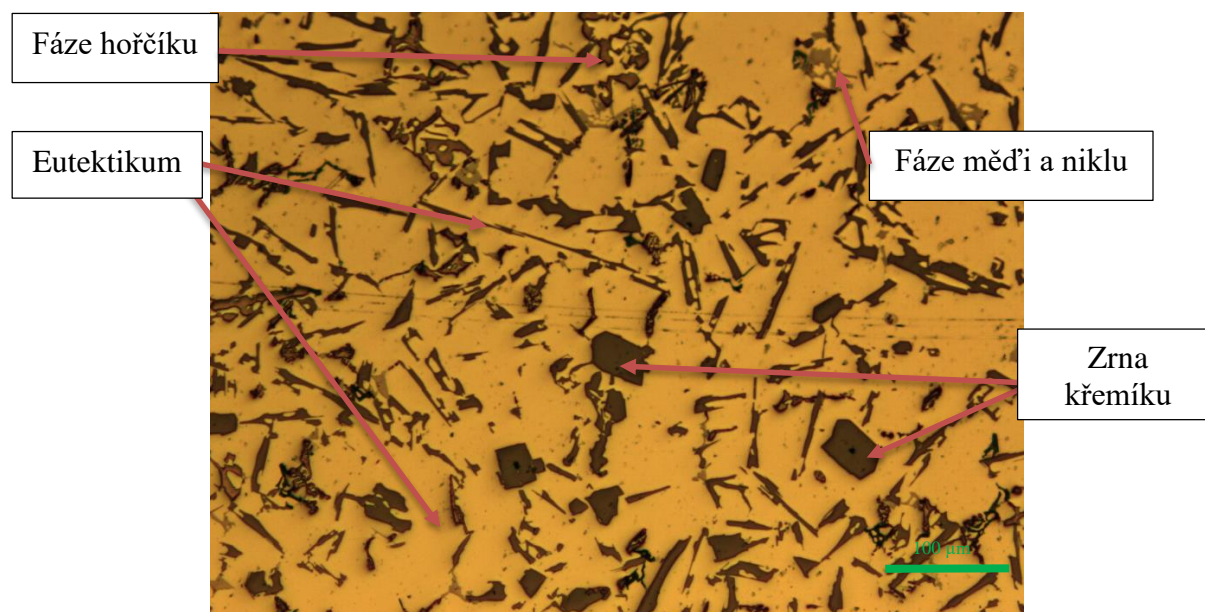
| Číslo měření            | Velikost zrna [µm] | Velikost zrna Si [µm] |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| 1                       | 35,2 – 35,5        | 25,9 – 26,2           |
| 2                       | 40,1 – 40,4        | 30,1 – 30,4           |
| 3                       | 42,5 – 42,8        | 27,4 – 27,7           |
| 4                       | 35,8 – 36,1        | 35,4 – 35,7           |
| 5                       | 38 – 38,3          | 33,5 – 33,8           |
| <b>Průměrná hodnota</b> | <b>38,2 – 38,5</b> | <b>30,5 – 30,8</b>    |

Tabulka 27 Průměrná velikost částic – vzorek 3

### 5.5.3 Druhá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 50% zmetky

#### První vzorek: číslo vzorku 4

Na obr. 32 je fotografie, na které je možno pozorovat mikrostrukturu slitiny KS 1275. Fotografie je zvětšena 100x. Výsledky získané měřením jsou uvedeny v tabulce 28.



Obr. 32 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 4

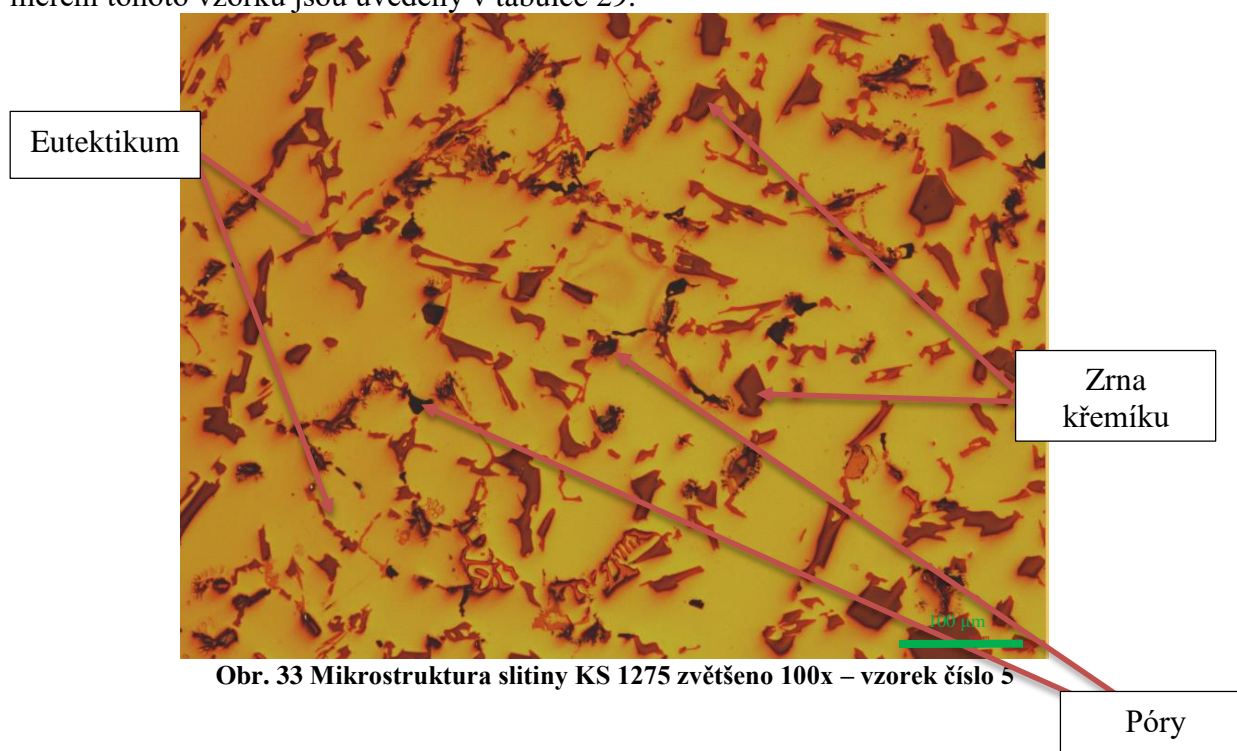


| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 44,9 – 45,2                     | 31,7 - 32                          |
| 2                       | 41,3 – 41,6                     | 36,2 – 36,5                        |
| 3                       | 39,8 – 40,1                     | 32,7 - 33                          |
| 4                       | 35 – 35,3                       | 32,8 – 33,1                        |
| 5                       | 38,4 – 38,7                     | 33 - 33,3                          |
| <b>Průměrná hodnota</b> | 39,9 – 40,2                     | 33,3 – 33,6                        |

Tabulka 28 Průměrná velikost částic – vzorek 4

### Druhý vzorek: číslo vzorku 5

Z fotografie (obr. 33) je vidět struktura tvořená eutektikem a zrny křemíku. Dále je zde možnost pozorovat vysokou pórovitost vzorku. Tato fotografie je zvětšena 100x. Výsledky měření tohoto vzorku jsou uvedeny v tabulce 29.



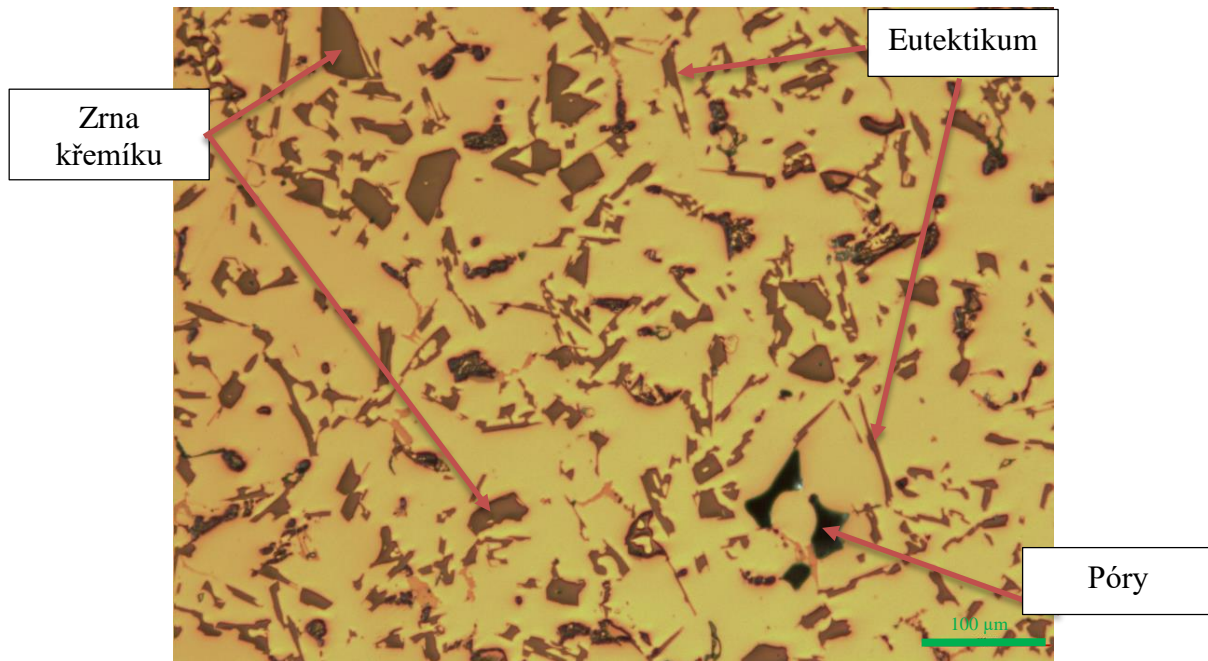
Obr. 33 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 5

| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 36,2 – 36,5                     | 34,7 - 35                          |
| 2                       | 37,4 – 37,7                     | 39,3 – 39,6                        |
| 3                       | 40,4 – 40,7                     | 33,8 – 34,1                        |
| 4                       | 45,2 – 45,5                     | 28,8 – 29,1                        |
| 5                       | 38,1 – 38,4                     | 43,9 – 44,2                        |
| <b>Průměrná hodnota</b> | 39,5 – 49,8                     | 36,1 – 36,4                        |

Tabulka 29 Průměrná velikost částic – vzorek 5

### Třetí vzorek: číslo vzorku 6

Na obr. 34 je fotografie mikrostruktury, jež je tvořena eutektikem a zrny křemíku. Fotografie je zvětšena 100x. Průměrná velikost zrna je v tabulce 30.



Obr. 34 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 6

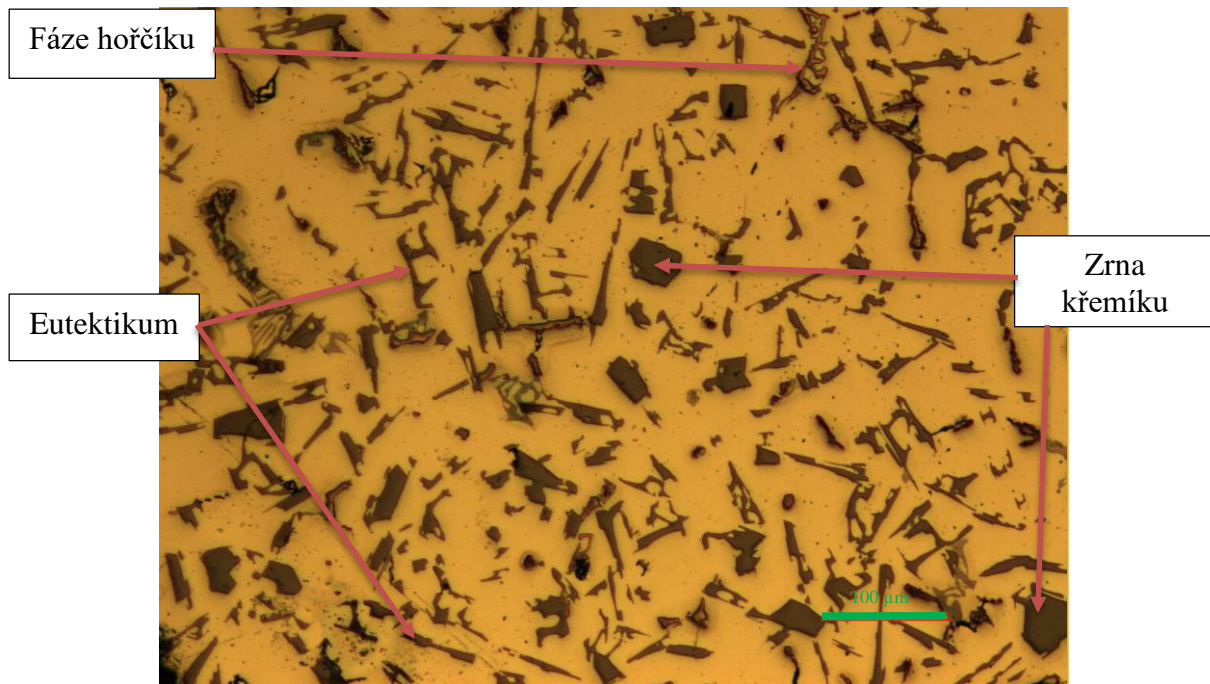
| Číslo měření            | Velikost zrna [μm] | Velikost zrna Si [μm] |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| 1                       | 54,5 – 54,8        | 30,9 – 31,2           |
| 2                       | 39,4 – 39,7        | 38,6 – 38,9           |
| 3                       | 40 – 40,3          | 28,2 – 28,5           |
| 4                       | 41,7 - 42          | 32,2 – 32,5           |
| 5                       | 41,4 – 41,7        | 34,3 – 34,7           |
| <b>Průměrná hodnota</b> | 43,4 – 44,7        | 32,8 – 33,1           |

Tabulka 30 Průměrná velikost částic – vzorek 6

#### 5.5.4 Třetí tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 50% ořez

##### První vzorek: číslo vzorku 7

Zde (obr. 35) je fotografie mikrostruktury, na níž se nachází zrna křemíku, eutektika a fáze hořčíku. Fotografie je zvětšena 100x. Získané výsledky jsou uvedeny v tabulce 31.



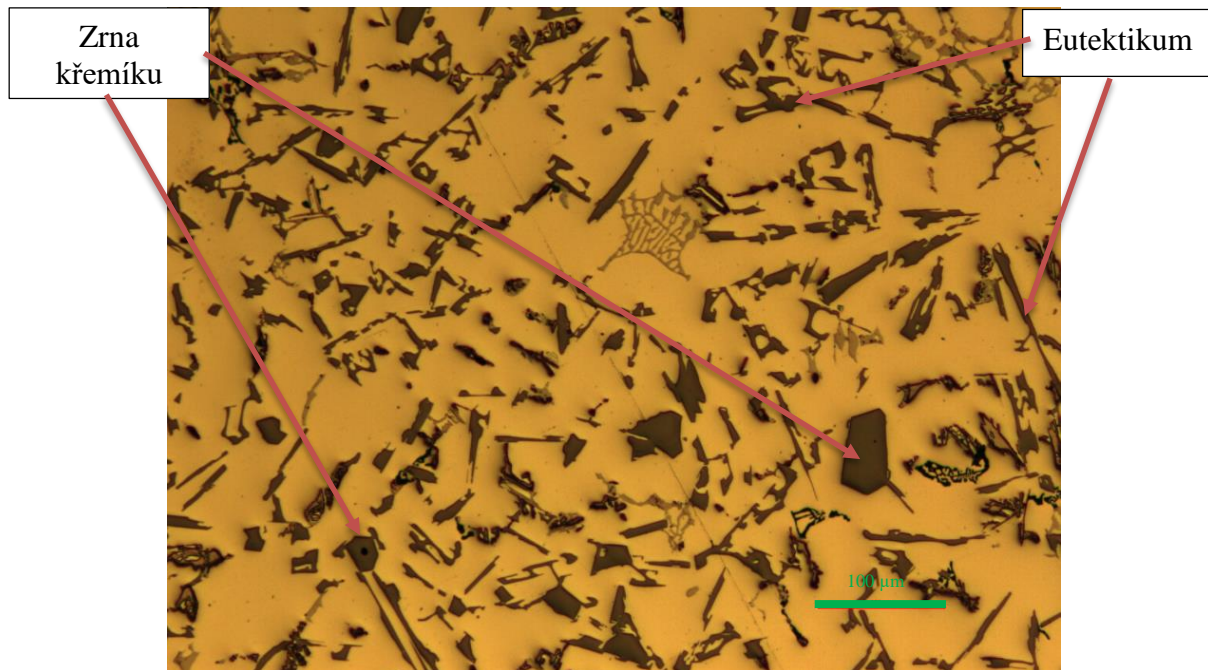
Obr. 35 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 7

| Číslo měření            | Velikost zrna [μm] | Velikost zrna Si [μm] |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| 1                       | 40,1 – 40,4        | 32,7 - 33             |
| 2                       | 39,7 - 40          | 27,6 – 27,9           |
| 3                       | 46 – 46,3          | 27 – 27,3             |
| 4                       | 42,4 – 42,7        | 48,2 – 48,5           |
| 5                       | 38,8 – 39,1        | 42,3 – 42,6           |
| <b>Přůměrná hodnota</b> | 41,4 – 41,7        | 35,5 – 35,8           |

Tabulka 31 Průměrná velikost částic – vzorek 7

### Druhý vzorek: číslo vzorku 8

Mikrostruktura druhého vzorku této tavby je možno vidět na fotografii níže (obr. 36) při zvětšení 100x. Tato mikrostruktura se skládá z eutektických částic a z částic křemíku. Průměrná velikost těchto částic je uvedena v tabulce 32.



Obr. 36 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 8

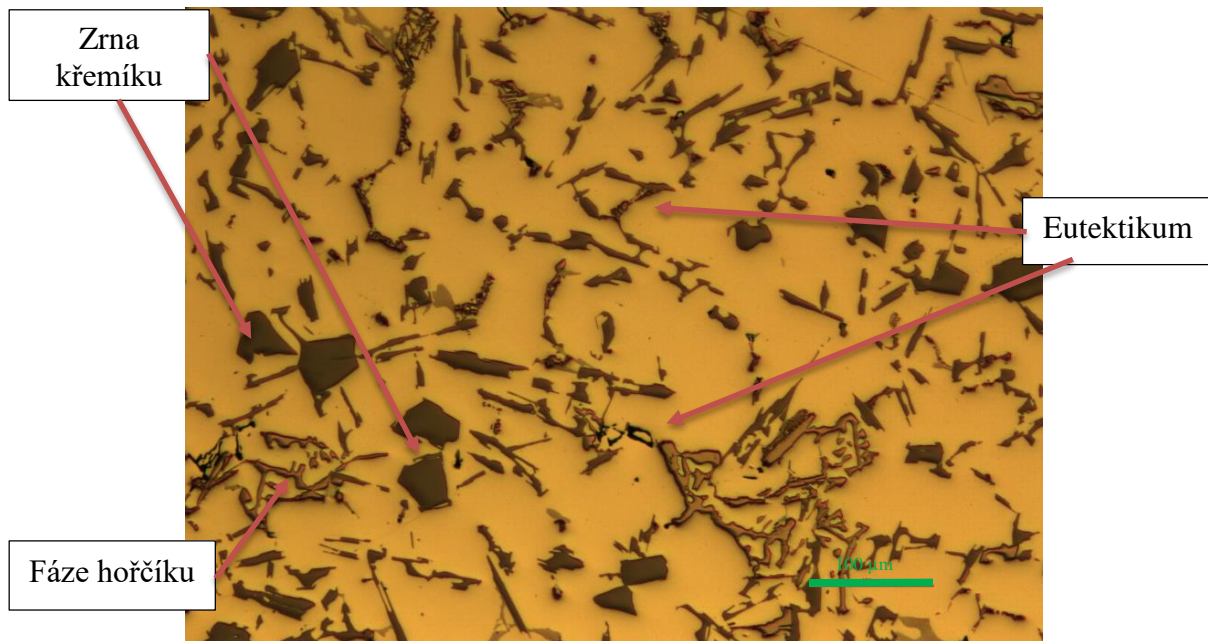
| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 42,9 – 43,2                     | 41,4 – 41,7                        |
| 2                       | 44,6 – 44,9                     | 37,4 – 37,7                        |
| 3                       | 40,6 – 40,9                     | 28,3 – 28,6                        |
| 4                       | 42,8 – 43,1                     | 31,8 – 32,1                        |
| 5                       | 46,2 – 46,5                     | 33,6 – 33,9                        |
| <b>Přůměrná hodnota</b> | 43,4 – 4,7                      | 34,5 – 34,8                        |

Tabulka 32 Průměrná velikost částic – vzorek 8

### Třetí vzorek: číslo vzorku 9

Na této fotografii (Obr. 37) je mikrostruktura tvořena euektikem, zrna křemíku a intermetalickou fází hořčíku. Fotografie je zvětšena 100x. Získané výsledky měření jsou v následující tabulce (tabulka 33).





Obr. 37 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 9

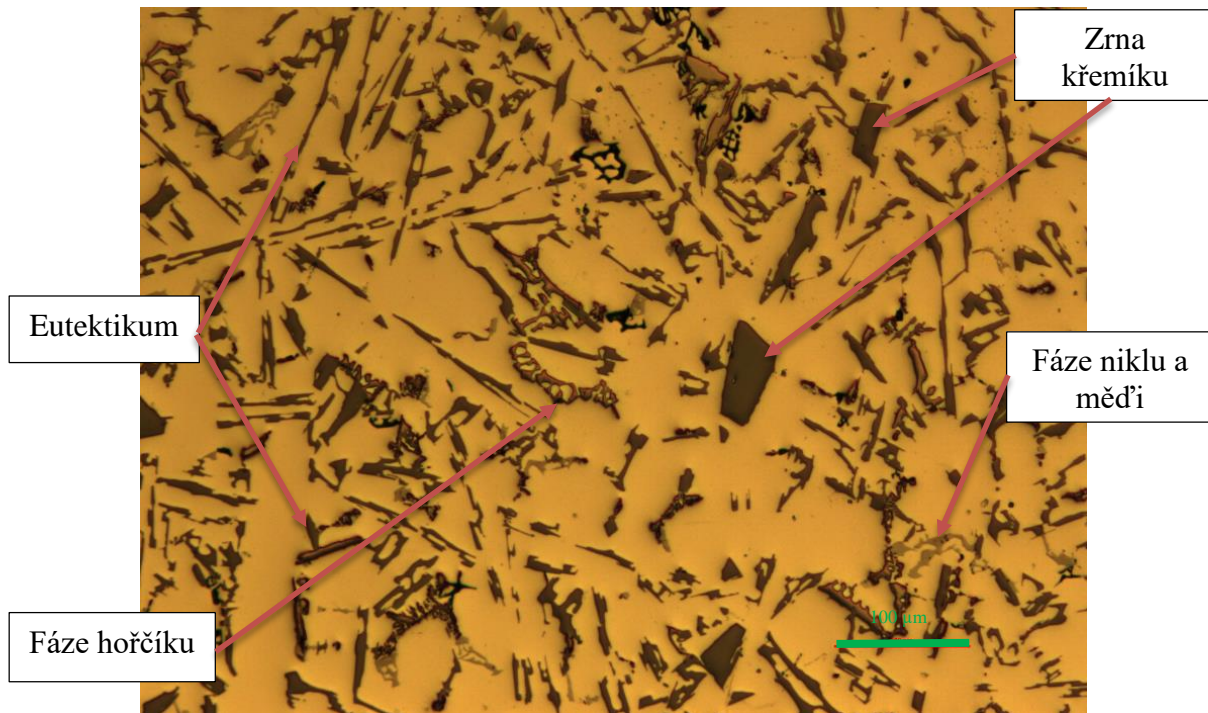
| Číslo měření            | Velikost zrna [μm] | Velikost zrna Si [μm] |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| 1                       | 37,6 – 37,9        | 40,5 – 40,8           |
| 2                       | 46 – 46,3          | 31,9 – 32,2           |
| 3                       | 37,9 – 38,2        | 35,4 – 35,7           |
| 4                       | 43,8 – 44,1        | 35,7 - 36             |
| 5                       | 41,4 – 41,7        | 45,8 – 46,1           |
| <b>Průměrná hodnota</b> | 41,3 – 41,6        | 37,9 – 38,2           |

Tabulka 33 Průměrná velikost částic – vzorek 9

### 5.5.5 Čtvrtá tavba slitiny KS 1275 – 50% blok 25% zmetky 25% ořez

#### První vzorek: číslo vzorku 10

Metalografie vzorku číslo 10 je uvedena na Obr. 38. Mikrostruktura je tvořená eutektikem, fází hořčíku, fází niklu a mědi a primárním křemíkem. Fotografie mikrostruktury je zvětšena 100x. Záznamy o velikosti zrna jsou uvedeny v tabulce 33.



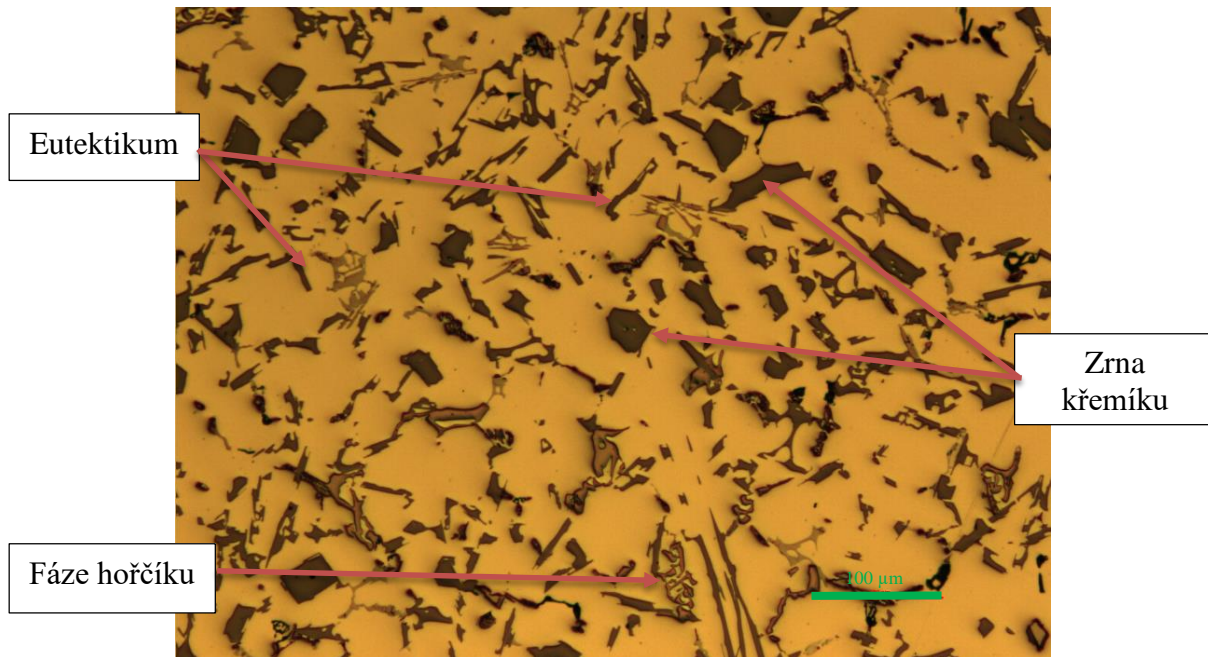
Obr. 38 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 10

| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 49,8 – 50,1                     | 26,1 – 26,4                        |
| 2                       | 46,2 – 46,5                     | 35,4 – 35,7                        |
| 3                       | 46,9 – 47,2                     | 42,3 – 42,6                        |
| 4                       | 46,1 – 46,4                     | 30,1 – 30,4                        |
| 5                       | 42 - 42,3                       | 34,6 – 34,9                        |
| <b>Přůměrná hodnota</b> | 46,2 - 46,5                     | 33,7 - 34                          |

Tabulka 34 Průměrná velikost částic – vzorek 10

### Druhý vzorek: číslo vzorku 11

Fotografie (Obr. 39) zachycuje mikrostrukturu siluminu. Zde se nachází eutektikum společně s křemíkem a fází hořčíku. Výsledky měření zrna jsou uvedeny v tabulce 35.



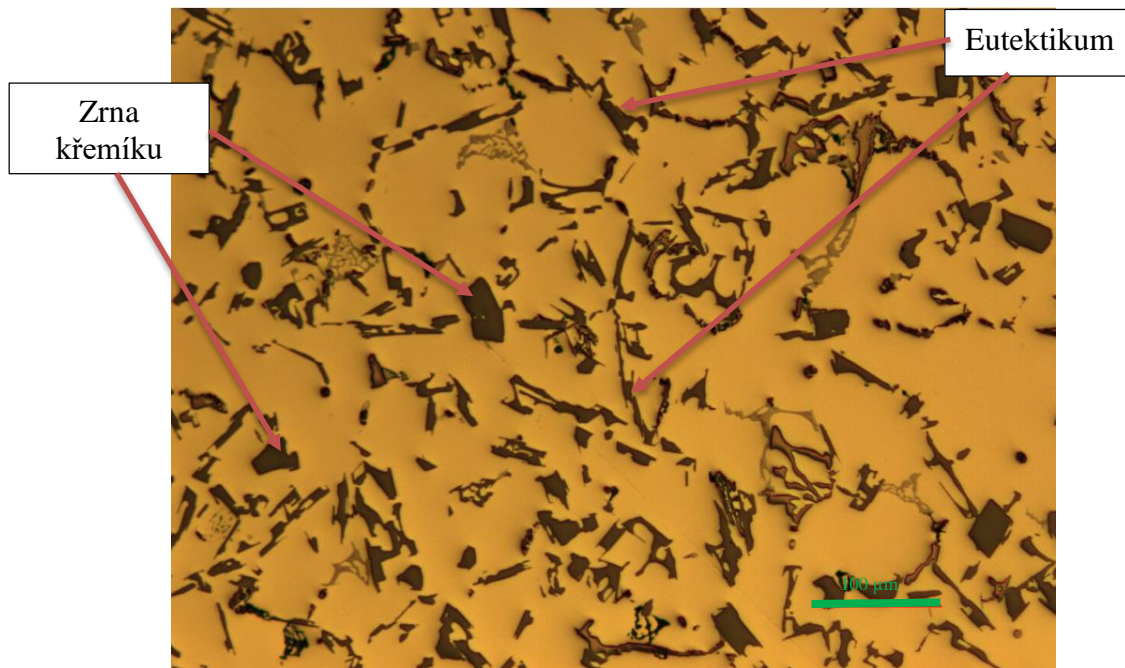
Obr. 39 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 11

| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 48,2 - 48,5                     | 27,1 – 27,4                        |
| 2                       | 46,5 – 46,8                     | 27 – 27,3                          |
| 3                       | 44,7 - 45                       | 33,3 – 33,6                        |
| 4                       | 40 – 40,3                       | 32 – 32,3                          |
| 5                       | 40,9 – 41,2                     | 25,9 - 26,2                        |
| <b>Průměrná hodnota</b> | 44,6- 44,9                      | 29,1 – 29,4                        |

Tabulka 35 Průměrná velikost částic – vzorek 11

### Třetí vzorek: číslo vzorku 12

Na Obr. 40 je fotografie mikrostruktury zvětšená 100x. Tato mikrostruktura je tvořena eutektikem a zrny křemíku.



Obr. 40 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 12

| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 39,7 - 40                       | 34,8 – 35,1                        |
| 2                       | 39,5 – 39,8                     | 28 – 28,3                          |
| 3                       | 38 – 38,3                       | 41,9 – 42,2                        |
| 4                       | 40,3 – 40,6                     | 39,8 – 40,1                        |
| 5                       | 40,8 – 41,1                     | 38,1 – 38,4                        |
| <b>Přůměrná hodnota</b> | 39,7 - 40                       | 36,5 – 36,8                        |

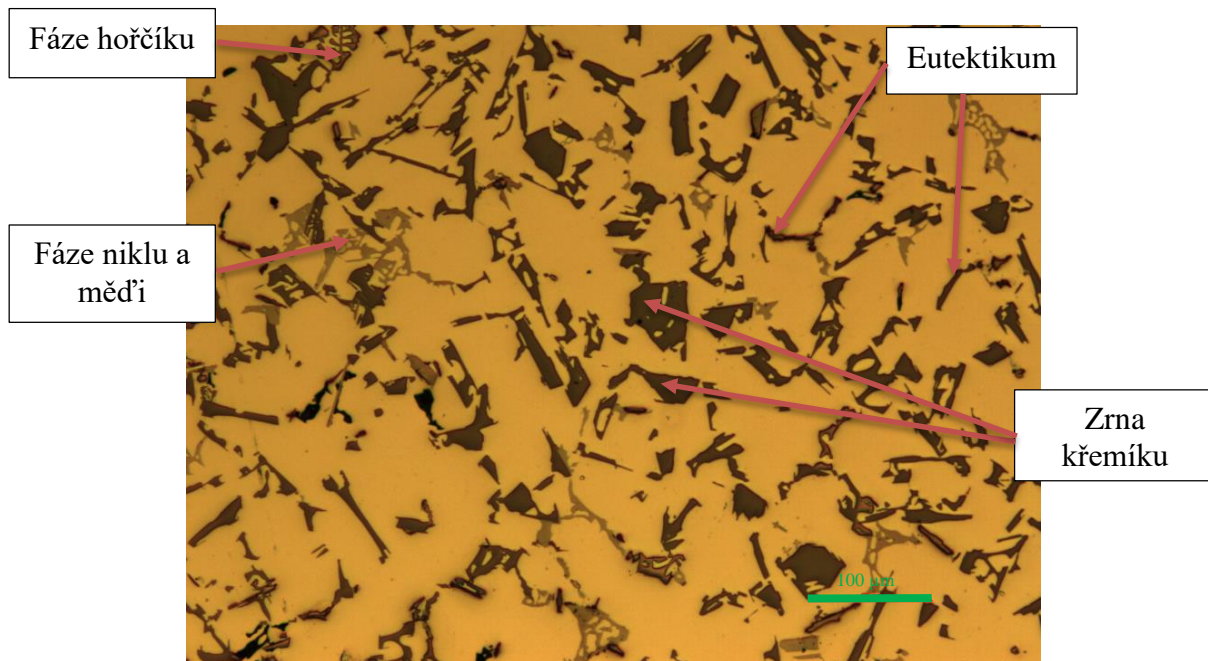
Tabulka 36 Průměrná velikost částic – vzorek 12

### 5.5.5 Patá tavba slitiny KS 1275 – 70% blok 30% ořez

#### První vzorek: číslo vzorku 13

Na obrázku 41 se nachází fotografie se mikrostrukturou odpovídající eutektiku, zrnům křemíku, fázi hořčíku a fázi mědi a niklu. Fotografie je zvětšena 100x. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 37.





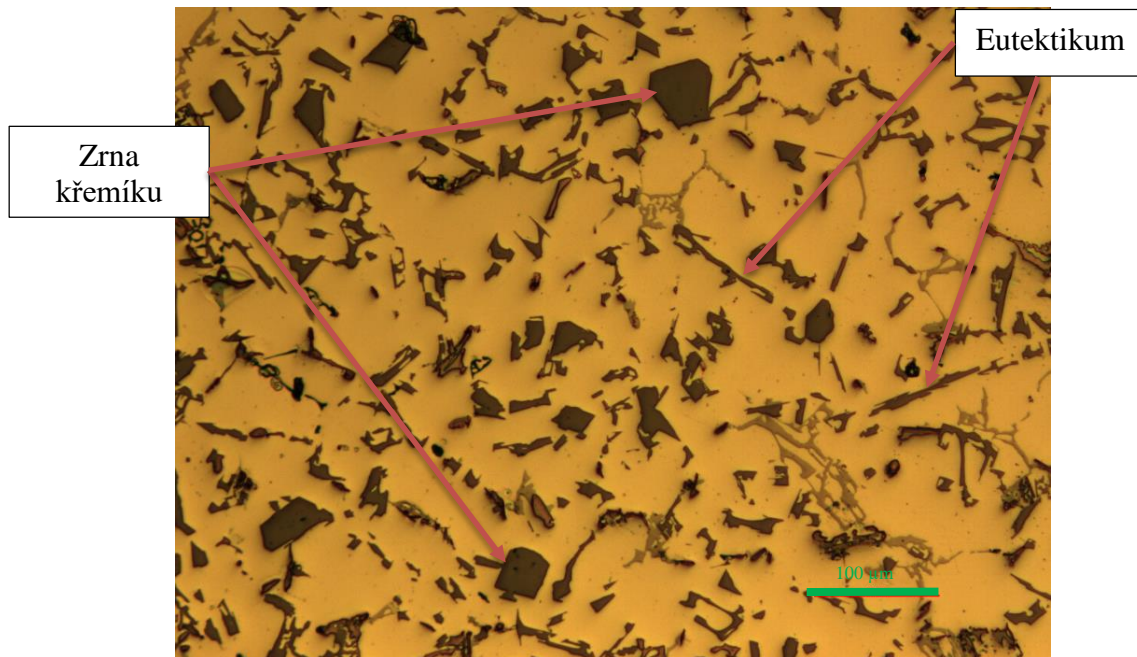
Obr. 41 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 13

| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 47,9 – 48,2                     | 36,5 – 36,8                        |
| 2                       | 42,4 – 42,7                     | 32,6 – 32,9                        |
| 3                       | 39 – 39,3                       | 31,8 – 32,1                        |
| 4                       | 41,9 – 42,2                     | 35,1 – 35,4                        |
| 5                       | 38,2 – 38,5                     | 39,7 - 40                          |
| <b>Přůměrná hodnota</b> | 41,9 – 42,2                     | 35,1 – 35,4                        |

Tabulka 37 Průměrná velikost částic – vzorek 13

#### Druhý vzorek: číslo vzorku 14

Na obrázku 42 je vyfocená mikrostruktura slitiny KS1275 a zvětšena 100x. Ta se skládá z eutektika a zrna křemíku. Výsledky získané z měření jsou uvedeny v tabulce 38.



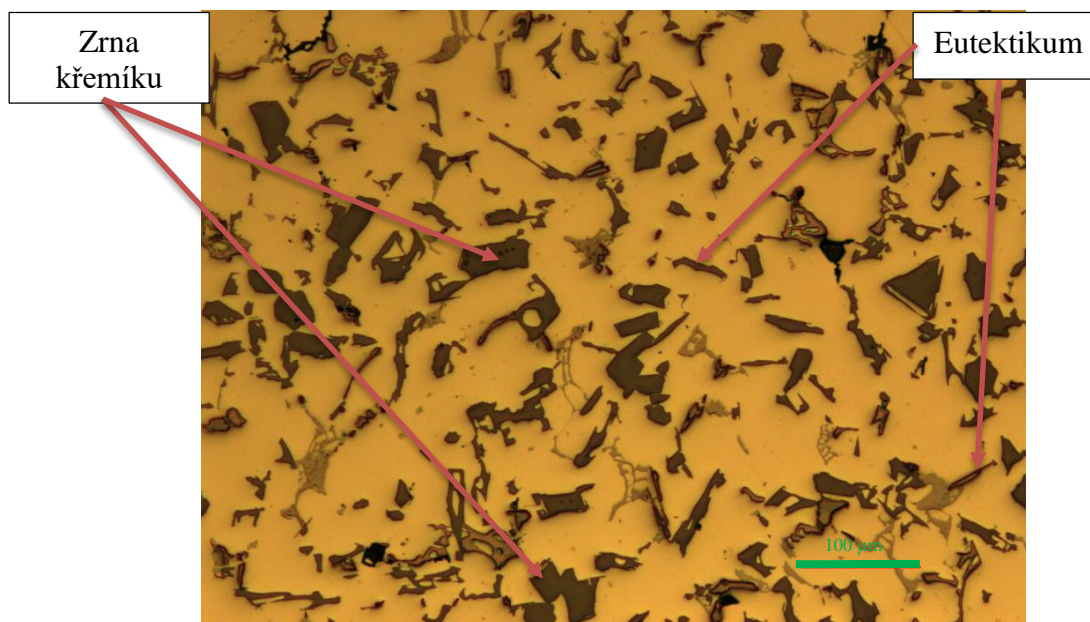
Obr. 42 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 14

| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 46,2 – 46,5                     | 33,7 - 34                          |
| 2                       | 45,3 – 45,6                     | 31,9 – 32,2                        |
| 3                       | 41,8 – 42,1                     | 36,5 - 36,8                        |
| 4                       | 46,3 – 46,6                     | 33,2 – 33,5                        |
| 5                       | 46,7 - 47                       | 30,3 – 30,6                        |
| <b>Přůměrná hodnota</b> | 45,3 – 45,6                     | 33,1 – 33,4                        |

Tabulka 38 Průměrná velikost částic – vzorek 14

### Třetí vzorek: číslo vzorku 15

Na vzorku číslo 15 je možno vidět eutektikum a zrna křemíku. Tato fotografie je zvětšena 100x.



Obr. 43 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 15

| Číslo měření            | Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ] | Velikost zrna Si [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 39,6 – 39,9                     | 31,2 – 31,5                        |
| 2                       | 35,5 – 35,8                     | 25,9 – 26,2                        |
| 3                       | 38,9 – 39,2                     | 31,7 - 32                          |
| 4                       | 38,7 - 39                       | 26,6 – 26,9                        |
| 5                       | 37,4 – 37,7                     | 41,4 – 41,7                        |
| <b>Průměrná hodnota</b> | <b>38 – 38,3</b>                | <b>31,4 – 31,7</b>                 |

Tabulka 39 Průměrná velikost částic – vzorek 15

### 5.5.7 Výsledky obrazové analýzy

V tabulce 40 je uveden přehled získaných výsledků obrazové analýzy velikosti zrna primárně vyloučeného křemíku a velikosti zrna eutektika. Pro tuto práci je důležitější velikost primárního křemíku. V této tabulce je znázorněna průměrná hodnota z pěti měření.

Nejmenší průměrná velikost zrna křemíku je v páté tabbě u vzorku číslo 11 (50% blok 25% ořez 25% zmetky). Tato hodnota se pohybuje v rozmezí 29,1 - 29,4  $\mu\text{m}$ . Naopak největší velikost zrna křemíku je v první tabbě u vzorku číslo 1 (100% blok). Zde se velikost pohybuje od 42 – 42,3  $\mu\text{m}$ .

Nejmenší průměrná velikost zrna byla v páté tabbě u vzorku číslo 15 (70% blok 30% ořez). V tomto případě se velikost zrna pohybovala od 38 – 38,3  $\mu\text{m}$ . Největší velikost zrna byla naměřena v čtvrté tabbě na vzorku číslo 10 (50% blok 25% ořez 25% zmetky). Velikost zrna zde byla naměřena v rozmezí od 46,2 do 46,5  $\mu\text{m}$ .

| Tavba                                       | Číslo vzorku | Průměrná velikost zrna [μm] | Průměrná velikost zrna SI [μm] |
|---|--------------|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>100% blok</b>                            | 1            | 40,1 – 40,4                 | 42 – 42,3                      |
|   | 2            | 43,5 – 43,8                 | 39,8 – 40,1                    |
|   | 3            | 38,2 – 38,5                 | 30,5 – 30,8                    |
| <b>50% blok<br/>50% zmetky</b>              | 4            | 39,9 – 40,2                 | 33,3 – 33,6                    |
|   | 5            | 39,5 – 49,8                 | 36,1 – 36,4                    |
|   | 6            | 43,4 – 44,7                 | 32,8 – 33,1                    |
| <b>50% blok<br/>50% ořez</b>                | 7            | 41,4 – 41,7                 | 35,5 – 35,8                    |
|   | 8            | 43,4 – 4,7                  | 34,5 – 34,8                    |
|   | 9            | 41,3 – 41,6                 | 37,9 – 38,2                    |
| <b>50% blok<br/>25% ořez<br/>25% zmetky</b> | 10           | 46,2 - 46,5                 | 33,7 - 34                      |
|   | 11           | 44,6- 44,9                  | 29,1 – 29,4                    |
|   | 12           | 39,7 - 40                   | 36,5 – 36,8                    |
| <b>70% blok<br/>30% ořez</b>                | 13           | 41,9 – 42,2                 | 35,1 – 35,4                    |
|   | 14           | 45,3 – 45,6                 | 33,1 – 33,4                    |
|   | 15           | 38 – 38,3                   | 31,4 – 31,7                    |

Tabulka 40 Výsledky obrazové analýzy

Dále je vhodné zjistit, která z taveb má nejjemnější strukturu – nejmenší zrno. Proto v tabulce 41 je proveden aritmetický průměr jednotlivých taveb. Tento průměr byl proveden součtem minimální a maximální velikosti zrna jednotlivých vzorků. Ty se dále podělily počtem vzorků v jednotlivých tavných.

| Tavba                                       | Aritmetický průměr zrna [μm] | Aritmetický průměr SI [μm] |
|---|------------------------------|----------------------------|
| <b>100% blok</b>                            | 40,6 – 40,9                  | 37,4 – 37,7                |
| <b>50% blok<br/>50% zmetky</b>              | 40,9 – 41,2                  | 34 – 34,3                  |
| <b>50% blok<br/>50% ořez</b>                | 42 – 42,3                    | 36 – 36,3                  |
| <b>50% blok<br/>25% ořez<br/>25% zmetky</b> | 43,5 – 43,8                  | 32,6 – 32,9                |
| <b>70% blok<br/>30% ořez</b>                | 41,7 - 42                    | 33,2 – 33,5                |

Tabulka 41 Průměrované výsledky obrazové analýzy

Na základě takto získaných výsledků obrazové analýzy lze určit, že nejjemnější zrno primárně vyloučeného křemíku se nachází ve čtvrté tavbě (50% blok 25% ořez 5% zmetky) naopak nejhrubší zrno křemíku je u první tavby (100% blok).

Dále je možno konstatovat, že celkově jsou zrna nejjemnější v první tavbě (100% blok) a nejhrubší zrno se nachází ve čtvrté tavbě (50% blok 25% ořez 25% zmetky).

## 5.6 Ekonomické hodnocení

Při výrobě jakékoliv součásti či zařízení je nutné brát zřetel na ekonomičnost výroby. Cílem podniku je získat co nejvyšší zisky při co možná nejnižších nákladech, ale přitom aby se zachovala kvalita výrobku. Cílem této práce je zjistit jak ovlivní různý poměr vratného materiálu v tavbě velikost primárního křemíku. A tím i zjistit, zda-li je možnost použití vratného materiálu.

Společnost Kolbenschmidt Czech Republic a.s. odebírá certifikovanou slitinu KS 1275 za 65 Kč/Kg. Hodnota vratného materiálu je 22 Kč/Kg. V následující tabulce jsou vypočteny náklady na jednu tunu tavby s různým poměrem vratného materiálu.

| Tavba                               | Cena [Kč/t] |
|-------------------------------------|-------------|
| <b>100% blok</b>                    | 65 000      |
| <b>50% blok 50% zmetky</b>          | 43 500      |
| <b>50% blok 50% ořez</b>            | 43 500      |
| <b>50% blok 25% ořez 25% zmetky</b> | 43 500      |
| <b>70% blok % ořez</b>              | 52 100      |

Tabulka 42 Cena tavby v závislosti na poměru vratného materiálu

Z tabulky 42 je patrné, že nejdražší tavba je z certifikované slitiny. Nejlevnější tavby jsou pak ty, které obsahují 50% certifikované slitiny.

Touto diplomovou prací bylo zjištěno, že velikost zrna se v závislosti na poměru vratného materiálu příliš neliší (liší se zanedbatelně). Proto vhodnou kombinací čisté slitiny a vratného materiálu se dá ušetřit až 21 500 Kč/t.

## 6 Diskuse výsledků

Tato práce se zabývá vlivem poměru vratného materiálu na velikosti primárního křemíku v eutektické slitině KS 1275. To se provedlo pomocí termické analýzy a obrazové analýzy. Dále se tato práce zabývá simulací procesu chladnutí v softwaru Magma a ověření, zda-li křivka chladnutí vytvořená v softwaru Magma odpovídá skutečně naměřeným křivkám chladnutí.

Z naměřených hodnot tedy vyplývá:

- 1) Z teoretické křivky chladnutí je patrná pouze teplota nukleace zárodků a čas jejího počátku. Teoretická nukleační teplota se shoduje s průměrnou teplotou nukleace. V čase počátku nukleace se teoretická křivka chladnutí nepatrně liší od skutečnosti o 1,3 vteřiny. Tento rozíl je ovšem tak malý, že je možné ho zanedbat a považovat teoretickou křivku chladnutí v tomto směru za správnou.
- 2) Z výsledků termické analýzy nelze kvantifikovaně určit velikost zrna. Proto v této práci bylo využito bodování na základě teploty rekalescence a doby jejího trvání. Dle tohoto bodování vyšlo, že nejjemnější struktura by měla být v první tavbě (100% blok). Nejhrubší struktura podle výsledků termické analýzy by pak měla být v tavbě číslo dvě (50% blok 50% zmetky).
- 3) Obrazová analýza byla provedena z každého odebraného vzorku. Zde bylo zvoleno pět náhodně určených míst, kde proběhlo měření pomocí prahování. Cílem tohoto měření bylo zjištění skutečné velikosti primárně vyloučeného křemíku a následně i všech zrn. Nejprve se naprahovaly a změřily zrna křemíku. Z výsledků tohoto měření je zřejmé, že nejmenší zrno primárně vyloučeného křemíku je ve čtvrté tavbě (50% blok 25% ořez 25% zmetky). Nejhrubší křemík je vyloučen v první tavbě (100% blok). Rozdíl mezi nejmenší a největší průměrnou velikostí zrna křemíku je 4,8  $\mu\text{m}$ . Dalším úkolem obrazové analýzy bylo naprahovat veškerá zrna. Při tomto měření vyšlo jako nejjemnější zrno u první tavby (100% blok). Naopak nejhrubší struktura je pozorována ve čtvrté tavbě (50% blok 25% ořez 25% zmetky). Rozdíl mezi nejmenší a největší průměrnou velikostí zrna je 2,9  $\mu\text{m}$ .

## 7 Závěr

Tato práce se zabývá v teoretické části hliníkovými slitinami, kde se věnuje pozornost především legujícím prvkům, krystalizaci a nukleaci. Zejména se zabývá systémem Al-Si neboli siluminy. Dále se teoretická část věnuje termické analýze, která je použita pro praktickou část. Zde se vysvětlují principy a využití termické analýzy a zjištění velikosti zrn pomocí křivky chladnutí. Posledním bodem teoretické části je modelování pomocí softwaru Magma.

Praktická část diplomové práce se zabývá vlivem vratného materiálu na velikost primárního eutektického křemíku. Materiál, který byl zvolen pro tuto práci je pístová slitina s označením KS 1275. Bylo provedeno celkem pět taveb s různým poměrem vratného materiálu. Z každé tavyby se odebraly tři vzorky, na kterých se provedla termická analýza, a tím se získaly křivky chladnutí. Na základě získaných informací z křivek chladnutí se predikovala velikost zrna jednotlivých měření a pak i celých taveb. Z výsledků termické analýzy vyplynulo, že nejjemnější zrno by mělo být u první tavyby (100% blok). Naopak nejhrubší zrno by se mělo vyskytovat v tavybě číslo dvě (50% blok 50% zmetky).

Současně s termickou analýzou proběhla simulace procesu odlévání testovacího odlitku v softwaru Magma. Z této simulace se pak získala teoretická křivka chladnutí. Tato simulace byla provedena za účelem porovnání teoretické křivky chladnutí s reálnými křivkami chladnutí. Křivka ze softwaru Magma však měla nevýraznou teplotu rekalescence a teplotu maximálního přechlazení. Proto se zde porovnávala pouze teplota nukleace a čas jejího počátku. Teplota nukleace teoretické křivky chladnutí se shodovala s průměrnou teplotou nukleace reálných křivek. Čas počátku nukleace se lišil pouze nepatrně, a proto se o tomto výsledku dá hovořit jako o vyhovujícím.

Na závěr se praktická část zabývá obrazovou analýzou. Cílem této analýzy bylo potvrdit či naopak vyvrátit výsledky o velikosti zrna získané termické analýzy. Na každém vzorku byla provedena metalografie. Z každého vzorku se následně pořídilo pět fotografií mikrostruktury. Mikrostruktura je ve všech případech podobná a z  $\alpha$ -fáze, primárně vyloučeného křemíku, eutektika a z intermetalických fází hořčíku, niklu, mědi. Nejprve proběhlo měření všech zrn primárně vyloučeného křemíku. Z výsledků tohoto měření je patrné, že nejjemnější zrno křemíku má čtvrtá tavyba (50% blok 25% ořez 25% zmetky). Nejhrubší zrno křemíku má první tavyba (100% blok). Další měření bylo zaměřeno na velikost všech zrn, včetně zrn křemíku. Dle tohoto měření má nejjemnější zrna první tavyba (100% blok) a nejhrubší zrno má čtvrtá tavyba (50% blok 25% ořez 25% zmetky). Ovšem rozdíly ve velikosti zrna jsou zcela zanedbatelné.

Závěrem lze říci, že výsledky získané z termické analýzy se neshodují s výsledky získané pomocí obrazové analýzy. Proto metoda na určování velikosti zrna na základě rozdílu teploty rekalescence a maximálního přechlazení a doby trvání rekalescence není příliš vhodná. Dále lze říci, že software Magma je schopen celkem přesně určit teplotu a čas počátku nukleace.

Doporučení pro výrobu firmy Kolbenschmidt Czech Republic a.s. vyplývající z výsledků je, že poměr vratného materiálu v tavybě nemá zásadní vliv na velikost zrna primárního křemíku, a proto je možné aplikovat vratný materiál v tavybách.



## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1 Binární diagram Al-Si, mikrostruktura jednotlivých slitin [3] .....  | 7  |
| Obr. 2 Nukleace a růst krystalů [6] .....   | 10 |
| Obr. 3 Mikrostruktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si [4] .....   | 11 |
| Obr. 4 Pist.....  | 11 |
| Obr. 5 Licí stroj ... ..  | 11 |
| Obr. 6 Kovová kokila .....  | 12 |
| Obr. 7 Vodíková bublina pokrytá vrstvou Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [8] .....                                    | 13 |
| Obr. 8 Plynová kelímková pec .....  | 14 |
| Obr. 9 Hlava rotoru zařízení FDU .....  | 15 |
| Obr. 11 Příklad křivky chladnutí teploty na čase a její první derivace [14] .....                                   | 18 |
| Obr. 12 Graf termické analýzy ukazující faktory ovlivňující velikost zrna [14] .....                                | 19 |
| Obr.13 Závislost doby rekalescence a teploty $\Delta T_{R-U}$ na velikost zrna [14] .....                           | 20 |
| Obr. 14 Příklad tuhnutí v programu [15] .....   | 21 |
| Obr. 15 Popis zařízení TA 110 .....   | 23 |
| Obr. 16 Kelímek pro termickou analýzu .....   | 23 |
| Obr. 17 Soustava kelímek-kovová deska-tavenina .....  | 24 |
| Obr. 18 Proces simulace lití testovacího odlitku.....   | 24 |
| Obr. 19 Teplotní průběh procesu odlévání testovacího odlitku – shora při 10%, při 50% a při 90% doby chladnutí..... | 25 |
| Obr. 20 Teoretická křivka chladnutí slitiny KS 1275 .....   | 26 |
| Obr. 21 zleva Blok, Zmetek, Ořez .....  | 27 |
| Obr. 22 Vzorek výjmutý z kelímku.....   | 40 |
| Obr. 23 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo1 .....  | 41 |
| Obr. 24 Fotografie prahování zrn zvětšeno zvětšeno 100x – vzorek číslo1 .....                                       | 40 |
| Obr. 25 Fotografie prahování zrn Si 100x – vzorek číslo 1 .....   | 41 |
| Obr. 26 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 2.....  | 42 |
| Obr. 27 Fotografie prahování zrn zvětšeno zvětšeno 100x – vzorek číslo 2 .....                                      | 42 |
| Obr. 28 Fotografie prahování zrn Si 100x – vzorek číslo 2 .....   | 43 |
| Obr. 30 Fotografie prahování zvětšeno zvětšeno 100x – vzorek číslo 3 .....  | 43 |
| Obr. 31 Fotografie prahování zrn Si100x – vzorek číslo 3 .....  | 44 |
| Obr. 33 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 5 .....   | 46 |
| Obr. 35 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 7 .....   | 48 |
| Obr. 36 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 8 .....   | 49 |
| Obr. 37 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 9 .....   | 50 |
| Obr. 38 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 10 .....  | 51 |
| Obr. 39 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 11 .....  | 52 |
| Obr. 40 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 12 .....  | 53 |
| Obr. 41 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 13 .....  | 54 |
| Obr. 42 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 14 .....  | 55 |
| Obr. 43 Mikrostruktura slitiny KS 1275 zvětšeno 100x – vzorek číslo 15 .....  | 56 |



## Seznam grafů

|  |    |
|--|----|
| Graf 1 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 1 .....   | 28 |
| Graf 2 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 2 .....   | 29 |
| Graf 3 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 3 .....   | 29 |
| Graf 4 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 4 .....   | 30 |
| Graf 5 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 5 .....   | 31 |
| Graf 6 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 6 .....   | 31 |
| Graf 7 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 7 .....   | 32 |
| Graf 8 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 8 .....   | 33 |
| Graf 9 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 9 .....   | 33 |
| Graf 10 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 10 ..... | 34 |
| Graf 11 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 11 ..... | 35 |
| Graf 12 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 12 ..... | 35 |
| Graf 13 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 13 ..... | 36 |
| Graf 14 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 14 ..... | 37 |
| Graf 15 Křivka chladnutí slitiny KS 1275 – vzorek číslo 15 ..... | 37 |
| Graf 16 histogram velikosti zrna – vzorek číslo 1 .....          | 42 |
| Graf 17 histogram velikosti zrna – vzorek číslo 2 .....          | 43 |
| Graf 18 histogram velikosti zrna – vzorek číslo 3 .....          | 45 |

## Seznam tabulek

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabulka 1  | Specifické skupenské měrné teplo [12]                | 18 |
| Tabulka 2  | Poměr vratného materiálu                             | 26 |
| Tabulka 3  | chemické složení slitiny KS 1275                     | 27 |
| Tabulka 4  | Chemické složení slitiny KS 1275 – první tavba       | 28 |
| Tabulka 5  | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 1           | 28 |
| Tabulka 6  | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 2           | 29 |
| Tabulka 7  | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 3           | 30 |
| Tabulka 8  | Chemické složení slitiny KS1275 – druhá tavba        | 30 |
| Tabulka 9  | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 4           | 30 |
| Tabulka 10 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 5           | 31 |
| Tabulka 11 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 6           | 32 |
| Tabulka 12 | Chemické složení slitiny KS 1275 – třetí tavba       | 32 |
| Tabulka 13 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 7           | 32 |
| Tabulka 14 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 8           | 33 |
| Tabulka 15 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 9           | 34 |
| Tabulka 16 | Chemické složení slitiny KS 1275 – čtvrtá tavba      | 34 |
| Tabulka 17 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 10          | 34 |
| Tabulka 17 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 11          | 35 |
| Tabulka 18 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 12          | 36 |
| Tabulka 19 | Chemické složení slitiny KS 1275 – pátá tavba        | 36 |
| Tabulka 20 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 13          | 36 |
| Tabulka 21 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 14          | 37 |
| Tabulka 22 | Výsledky termické analýzy – vzorek číslo 15          | 38 |
| Tabulka 23 | Hodnocení výsledků termické analýzy                  | 38 |
| Tabulka 24 | Hodnocení tavby pomocí termické analýzy              | 39 |
| Tabulka 25 | Průměrná velikost částic – vzorek 1                  | 42 |
| Tabulka 26 | Průměrná velikost částic – vzorek 2                  | 43 |
| Tabulka 27 | Průměrná velikost částic – vzorek 3                  | 45 |
| Tabulka 28 | Průměrná velikost částic – vzorek 4                  | 46 |
| Tabulka 29 | Průměrná velikost částic – vzorek 5                  | 46 |
| Tabulka 30 | Průměrná velikost částic – vzorek 6                  | 47 |
| Tabulka 31 | Průměrná velikost částic – vzorek 7                  | 48 |
| Tabulka 32 | Průměrná velikost částic – vzorek 8                  | 49 |
| Tabulka 33 | Průměrná velikost částic – vzorek 9                  | 50 |
| Tabulka 34 | Průměrná velikost částic – vzorek 10                 | 51 |
| Tabulka 35 | Průměrná velikost částic – vzorek 11                 | 52 |
| Tabulka 36 | Průměrná velikost částic – vzorek 12                 | 53 |
| Tabulka 37 | Průměrná velikost částic – vzorek 13                 | 54 |
| Tabulka 38 | Průměrná velikost částic – vzorek 14                 | 55 |
| Tabulka 39 | Průměrná velikost částic – vzorek 15                 | 56 |
| Tabulka 40 | Výsledky obrazové analýzy                            | 57 |
| Tabulka 41 | Průměrované výsledky obrazové analýzy                | 57 |
| Tabulka 42 | Cena tavby v závislosti na poměru vratného materiálu | 58 |

## Literatura

- [1] KS Kolbenschmidt Czech Republic, a.s.: *Company profile 2015*
- [2] Michna Š., *Současnost a budoucí trendy ve využití hliníkových materiálů*
- [3] Michna Š., Lukáč I., Očenášek V., Kořený R., Drápala J., Shneider H., Miškufová A. a kol. *Encyklopedie hliníku* 1. vydání Prešov, 2005
- [4] ROUČKA J., *Odlévání neželezných kovů* Brno 2006
- [5] MOHYLA, Miroslav. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*. 1. vyd. Ostrava: Vys. škola báňská, 1992, 265 s
- [6] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006, 185 s. ISBN 80-7080-600-1
- [7] Votápek, P. *Přednáška, Spalovací motory*
- [8] PTÁČEK. L.: Vady odlitků ze slitin hliníku. *Slévarenství*. 1998, (9)
- [9] Hála M. *Přednáška, Vybrané kapitoly ze slévání*
- [10] Přednášky z Technické university Liberec : [datum citace 26.8. 2015] dostupné z [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv\\_3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf)
- [11] BLAŽEK Antonín. *Termická analýza*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1972. 294 s.
- [12] Tepelné konstanty látek, změny skupenství: [datum citace 28.11. 2015] dostupné z [http://www.gymkvary.cz/sites/default/files/field\\_education\\_file/tep\\_konst\\_latek-zmeny\\_skupenstvi.pdf](http://www.gymkvary.cz/sites/default/files/field_education_file/tep_konst_latek-zmeny_skupenstvi.pdf)
- [13] BROWN M. E. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*. Elsevier B.V.1998
- [14] Ibarra, David Gloria. *Control of grain refinement of Al-Si-alloys by thermal analysis*. PhD thesis (Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University of Montreal, Canada,)
- [15] Talum grup: Simulation of casting and solidification, Magmasoft. [datum citace 28.11. 2015] dostupné z [http://talum-castings.com/development/casting\\_simulation\\_magmasoft/](http://talum-castings.com/development/casting_simulation_magmasoft/)

## Seznam příloh

Chemické složení:

|           | <b>Si</b><br>%   | <b>Fe</b><br>%   | <b>Cu</b><br>%   | <b>Mn</b><br>%   | <b>Mg</b><br>%   | <b>Zn</b><br>%   | <b>Ni</b><br>%   | <b>Pb</b><br>%   |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 13,30            | 0,65             | 1,40             | 0,350            | 1,10             | 0,25             | 1,2              | 0,05             |
| Hodnota   | 13,12            | 0,520            | 1,230            | 0,175            | 0,880            | 0,123            | 0,970            | 0,0090           |
| MinIntern | 12,50            |                  | 0,90             | 0,10             | 0,80             |                  | 0,7              |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|           | <b>Ti</b><br>%   | <b>B</b><br>ppm  | <b>Be</b><br>ppm | <b>Ca</b><br>ppm | <b>Na</b><br>ppm | <b>P</b><br>ppm  | <b>Sr</b><br>ppm | <b>Sn</b><br>%   |
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 0,15             | 20               | 500              | 5                | 5                | 120              | 5                | 0,05             |
| Hodnota   | 0,064            | <1,0             | 2                | 4                | 2,0              | 50,9             | <1,0             | 0,0060           |
| MinIntern | 0,02             |                  |                  |                  |                  | 40               |                  |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|           | <b>Cr</b><br>%   | <b>Sb</b><br>ppm | <b>Cd</b><br>ppm | <b>Bi</b><br>ppm | <b>Li</b><br>ppm | <b>V</b><br>%    | <b>Zr</b><br>ppm | <b>Ag</b><br>ppm |
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 0,05             | 500              | 500              | 500              | 500              | 0,05             | 500              | 500              |
| Hodnota   | 0,0193           | 35               | <1               | 16               | <1               | 0,016            | 199              | 1                |
| MinIntern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|           | <b>Ce</b><br>ppm | <b>Co</b><br>ppm | <b>Ga</b><br>ppm | <b>In</b><br>ppm | <b>Ba</b><br>ppm | <b>Hg</b><br>ppm | <b>Al</b><br>%   |                  |
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 500              | 500              | 500              | 500              | 500              | 500              |                  |                  |
| Hodnota   | <15              | <5               | 116              | <3               | <1               | <20              | <82,82           |                  |
| MinIntern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |

### Příloha 1 Chemické složení první tavby – 100% blok

|           | <b>Si</b><br>%   | <b>Fe</b><br>%   | <b>Cu</b><br>%   | <b>Mn</b><br>%   | <b>Mg</b><br>%   | <b>Zn</b><br>%   | <b>Ni</b><br>%   | <b>Pb</b><br>%   |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 13,30            | 0,65             | 1,40             | 0,350            | 1,10             | 0,25             | 1,2              | 0,05             |
| Hodnota   | 13,06            | 0,560            | 1,190            | 0,188            | 0,920            | 0,142            | 0,920            | 0,0119           |
| MinIntern | 12,50            |                  | 0,90             | 0,10             | 0,80             |                  | 0,7              |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|           | <b>Ti</b><br>%   | <b>B</b><br>ppm  | <b>Be</b><br>ppm | <b>Ca</b><br>ppm | <b>Na</b><br>ppm | <b>P</b><br>ppm  | <b>Sr</b><br>ppm | <b>Sn</b><br>%   |
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 0,15             | 20               | 500              | 5                | 5                | 120              | 5                | 0,05             |
| Hodnota   | 0,060            | <1,0             | 2                | <1               | 3,0              | 47,6             | <1,0             | 0,0060           |
| MinIntern | 0,02             |                  |                  |                  |                  | 40               |                  |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|           | <b>Cr</b><br>%   | <b>Sb</b><br>ppm | <b>Cd</b><br>ppm | <b>Bi</b><br>ppm | <b>Li</b><br>ppm | <b>V</b><br>%    | <b>Zr</b><br>ppm | <b>Ag</b><br>ppm |
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 0,05             | 500              | 500              | 500              | 500              | 0,05             | 500              | 500              |
| Hodnota   | 0,0229           | 41               | <1               | 13               | <1               | 0,019            | 207              | 3                |
| MinIntern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|           | <b>Ce</b><br>ppm | <b>Co</b><br>ppm | <b>Ga</b><br>ppm | <b>In</b><br>ppm | <b>Ba</b><br>ppm | <b>Hg</b><br>ppm | <b>Al</b><br>%   |                  |
| MaxExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MaxIntern | 500              | 500              | 500              | 500              | 500              | 500              |                  |                  |
| Hodnota   | <15              | <5               | 113              | <3               | <1               | <20              | <82,86           |                  |
| MinIntern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
| MinExtern |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |

### Příloha 2 Chemické složení druhé tavby – 50% blok 50% zmetky

|           | Si<br>%   | Fe<br>%   | Cu<br>%   | Mn<br>%   | Mg<br>%   | Zn<br>%   | Ni<br>%   | Pb<br>%   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 13,30     | 0,65      | 1,40      | 0,350     | 1,10      | 0,25      | 1,2       | 0,05      |
| Hodnota   | 12,85     | 0,470     | 1,160     | 0,159     | 0,890     | 0,161     | 0,900     | 0,0116    |
| MinIntern | 12,50     |           | 0,90      | 0,10      | 0,80      |           | 0,7       |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Ti<br>%   | B<br>ppm  | Be<br>ppm | Ca<br>ppm | Na<br>ppm | P<br>ppm  | Sr<br>ppm | Sn<br>%   |
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 0,15      | 20        | 500       | 5         | 5         | 120       | 5         | 0,05      |
| Hodnota   | 0,059     | <1,0      | 2         | <1        | 1,0       | 44,5      | <1,0      | 0,0070    |
| MinIntern | 0,02      |           |           |           |           | 40        |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Cr<br>%   | Sb<br>ppm | Cd<br>ppm | Bi<br>ppm | Li<br>ppm | V<br>%    | Zr<br>ppm | Ag<br>ppm |
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 0,05      | 500       | 500       | 500       | 500       | 0,05      | 500       | 500       |
| Hodnota   | 0,0205    | 34        | 4         | 14        | <1        | 0,018     | 210       | 2         |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Ce<br>ppm | Co<br>ppm | Ga<br>ppm | In<br>ppm | Ba<br>ppm | Hg<br>ppm | Al<br>%   |           |
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 500       | 500       | 500       | 500       | 500       | 500       |           |           |
| Hodnota   | <15       | <5        | 111       | <3        | <1        | <20       | <83,26    |           |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |

**Příloha 3 Chemické složení třetí tavby – 50% blok 50% ořez**

|           | Si<br>%   | Fe<br>%   | Cu<br>%   | Mn<br>%   | Mg<br>%   | Zn<br>%   | Ni<br>%   | Pb<br>%   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 13,30     | 0,65      | 1,40      | 0,350     | 1,10      | 0,25      | 1,2       | 0,05      |
| Hodnota   | 13,02     | 0,430     | 1,150     | 0,154     | 0,900     | 0,137     | 0,860     | 0,0113    |
| MinIntern | 12,50     |           | 0,90      | 0,10      | 0,80      |           | 0,7       |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Ti<br>%   | B<br>ppm  | Be<br>ppm | Ca<br>ppm | Na<br>ppm | P<br>ppm  | Sr<br>ppm | Sn<br>%   |
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 0,15      | 20        | 500       | 5         | 5         | 120       | 5         | 0,05      |
| Hodnota   | 0,057     | <1,0      | 1         | <1        | 2,0       | 46,9      | <1,0      | 0,0060    |
| MinIntern | 0,02      |           |           |           |           | 40        |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Cr<br>%   | Sb<br>ppm | Cd<br>ppm | Bi<br>ppm | Li<br>ppm | V<br>%    | Zr<br>ppm | Ag<br>ppm |
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 0,05      | 500       | 500       | 500       | 500       | 0,05      | 500       | 500       |
| Hodnota   | 0,0226    | 34        | 8         | <10       | <1        | 0,018     | 212       | 2         |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Ce<br>ppm | Co<br>ppm | Ga<br>ppm | In<br>ppm | Ba<br>ppm | Hg<br>ppm | Al<br>%   |           |
| MaxExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MaxIntern | 500       | 500       | 500       | 500       | 500       | 500       |           |           |
| Hodnota   | <15       | <5        | 108       | <3        | <1        | <20       | <83,20    |           |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |

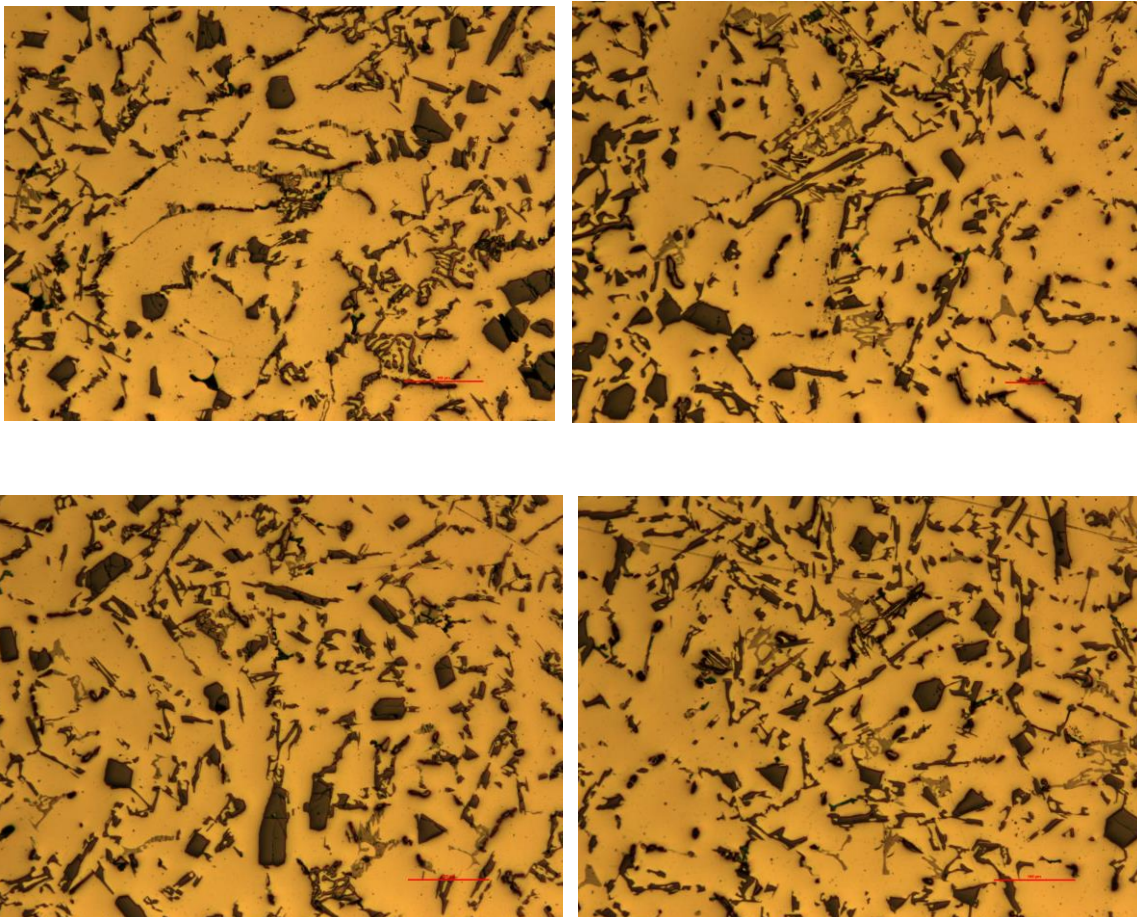
**Příloha 4 Chemické složení čtvrté tavby – 50% blok 25% zmetky 25% ořez**



|           | Si<br>%   | Fe<br>%   | Cu<br>%   | Mn<br>%   | Mg<br>%   | Zn<br>%   | Ni<br>%   | Pb<br>%   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| MaxExtern | 13,30     | 0,65      | 1,40      | 0,350     | 1,10      | 0,25      | 1,2       | 0,05      |
| MaxIntern | 13,20     | 0,440     | 1,230     | 0,174     | 0,870     | 0,134     | 0,910     | 0,0109    |
| Hodnota   | 12,50     |           | 0,90      | 0,10      | 0,80      |           | 0,7       |           |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Ti<br>%   | B<br>ppm  | Be<br>ppm | Ca<br>ppm | Na<br>ppm | P<br>ppm  | Sr<br>ppm | Sn<br>%   |
| MaxExtern | 0,15      | 20        | 500       | 5         | 5         | 120       | 5         | 0,05      |
| MaxIntern | 0,063     | <1,0      | 2         | <1        | <1,0      | 47,5      | <1,0      | 0,0050    |
| Hodnota   | 0,02      |           |           |           |           | 40        |           |           |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Cr<br>%   | Sb<br>ppm | Cd<br>ppm | Bi<br>ppm | Li<br>ppm | V<br>%    | Zr<br>ppm | Ag<br>ppm |
| MaxExtern | 0,05      | 500       | 500       | 500       | 500       | 0,05      | 500       | 500       |
| MaxIntern | 0,0170    | 53        | 5         | 13        | <1        | 0,017     | 147       | 2         |
| Hodnota   |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |
|           | Ce<br>ppm | Co<br>ppm | Ga<br>ppm | In<br>ppm | Ba<br>ppm | Hg<br>ppm | Al<br>%   |           |
| MaxExtern | 500       | 500       | 500       | 500       | 500       | 500       |           |           |
| MaxIntern | <15       | <5        | 121       | <3        | <1        | <20       | <82,88    |           |
| Hodnota   |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinIntern |           |           |           |           |           |           |           |           |
| MinExtern |           |           |           |           |           |           |           |           |

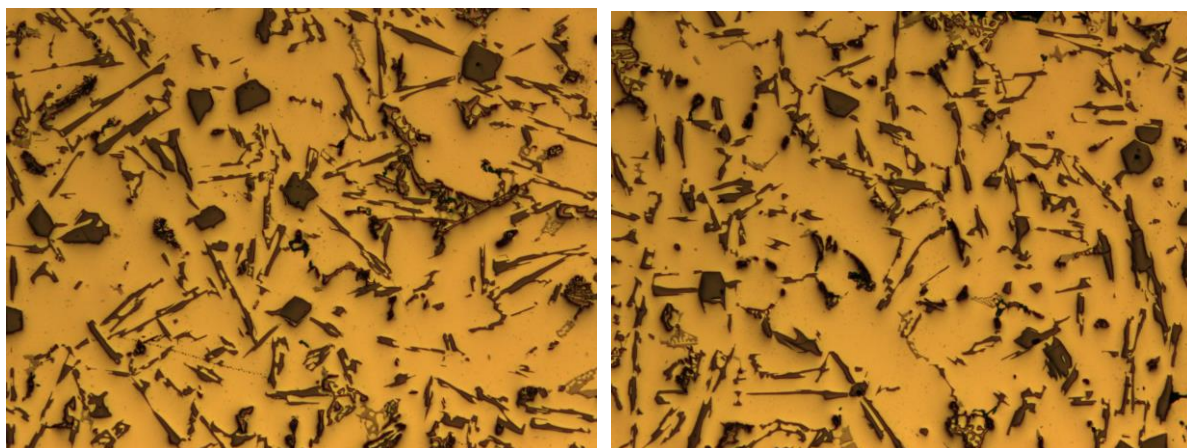
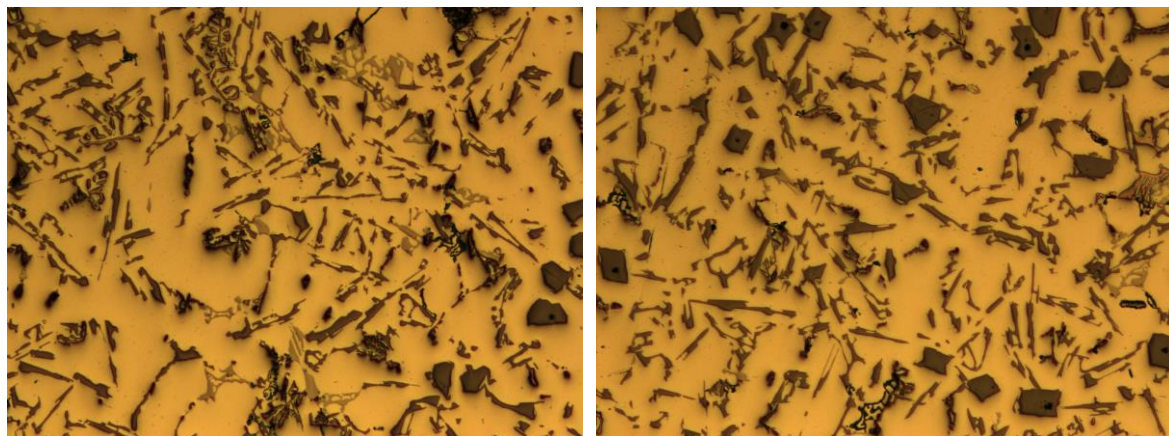
Příloha 5 Chemické složení páte tavby – 70% blok 30% ořez

### Metalografie:

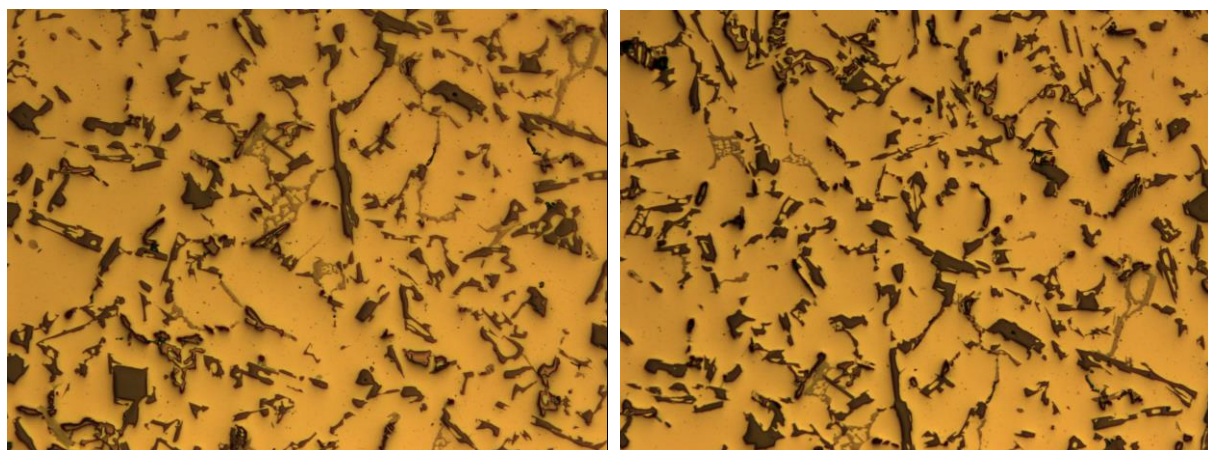


Příloha 6 metalografie vzorku číslo 1 – zvětšeno 100x

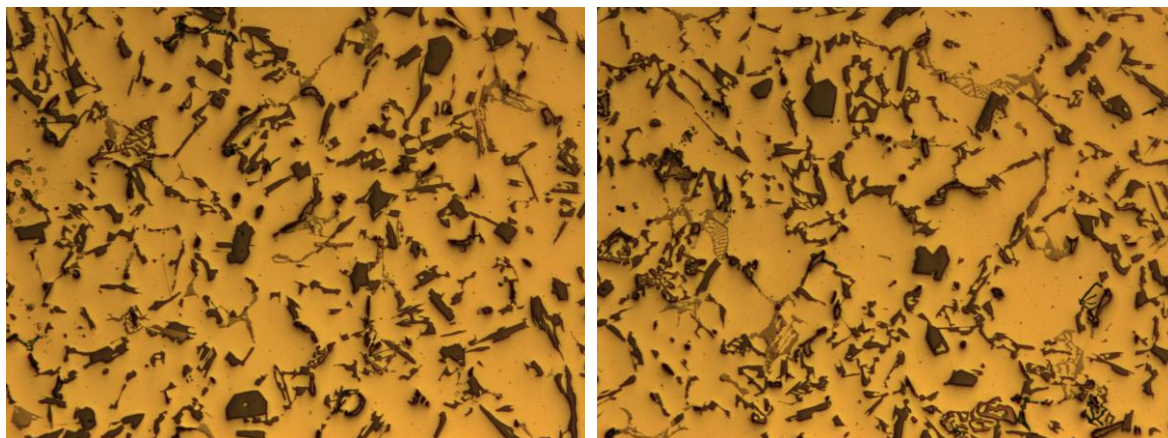




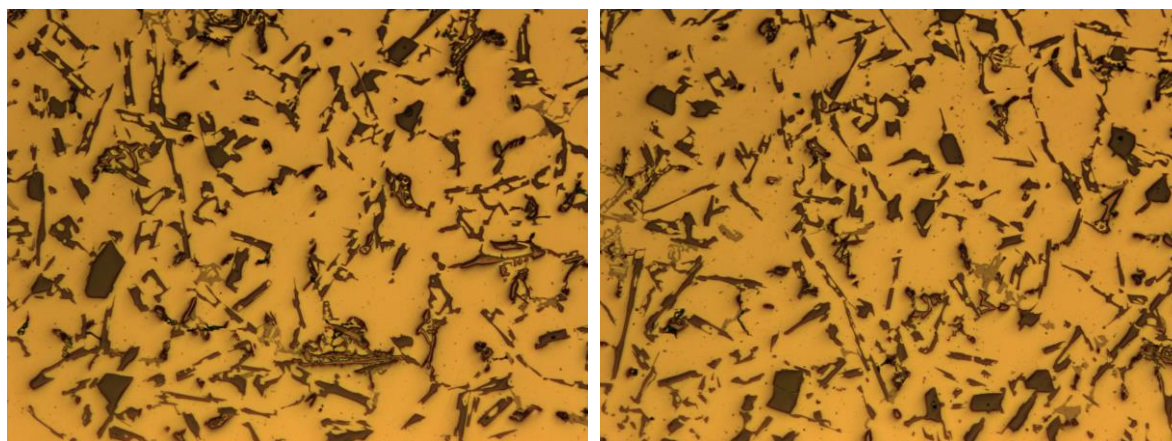
**Příloha 7 metalografie vzorku číslo 2 – zvětšeno 100x**





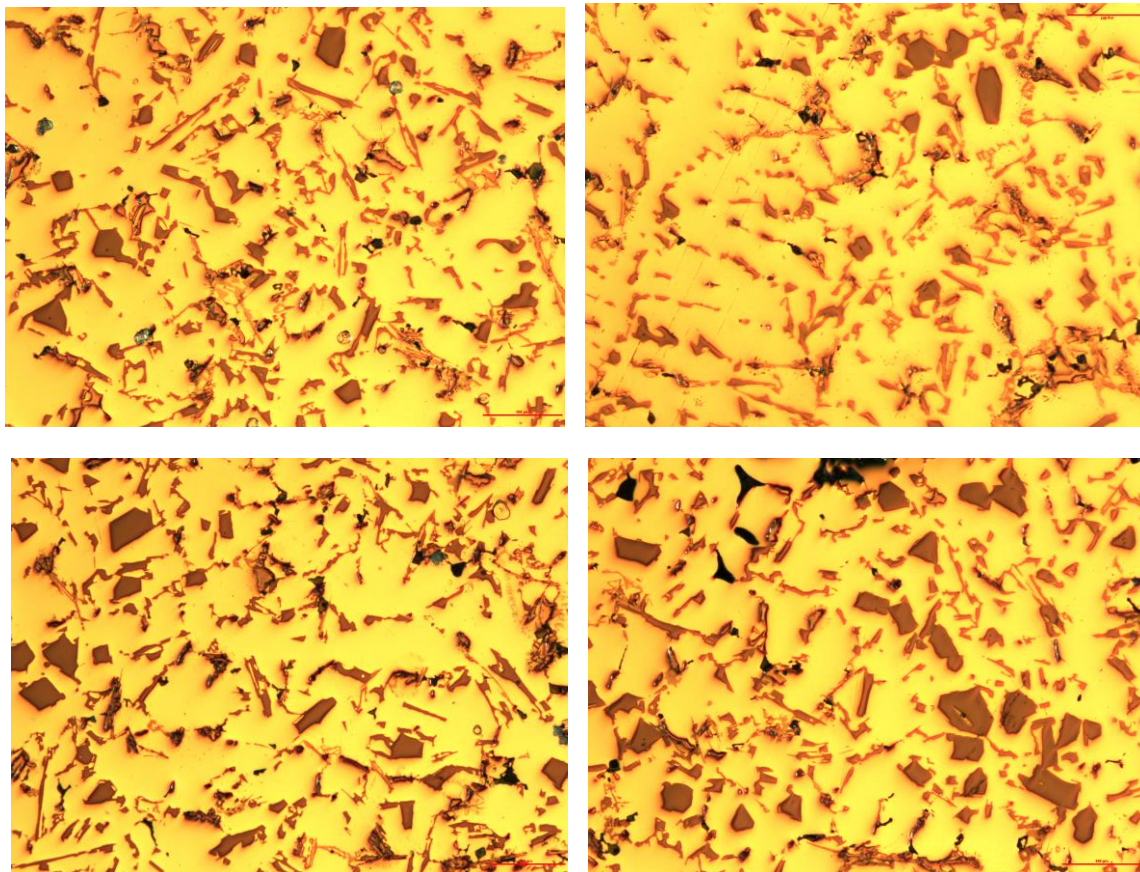


Příloha 8 metalografie vzorku číslo 3 – zvětšeno 100x

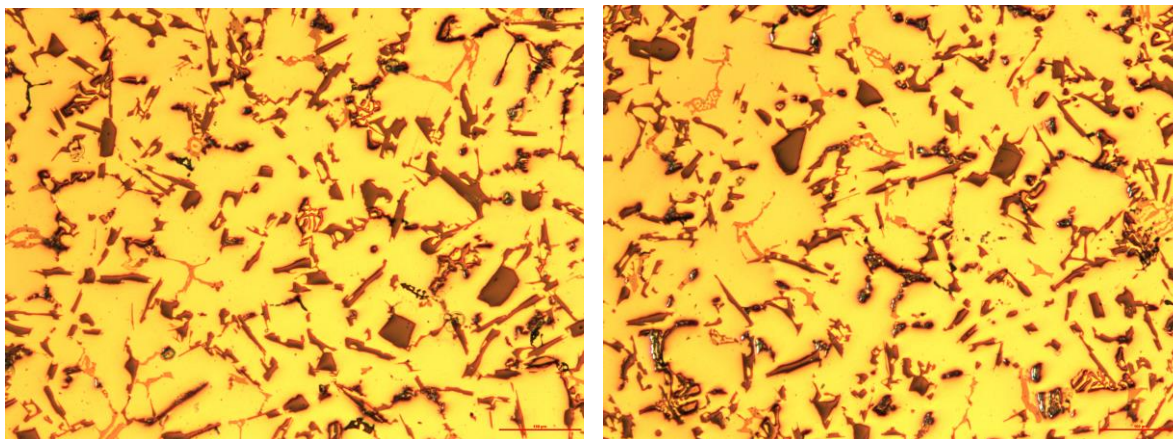


Příloha 9 metalografie vzorku číslo 4 – zvětšeno 100x

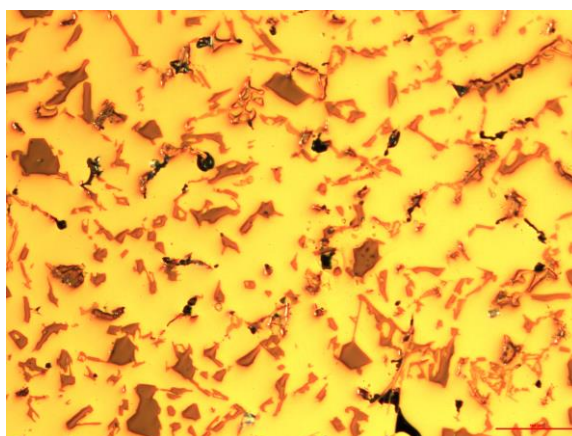
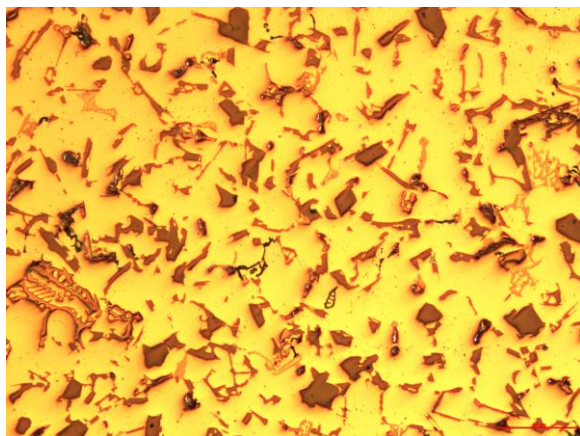




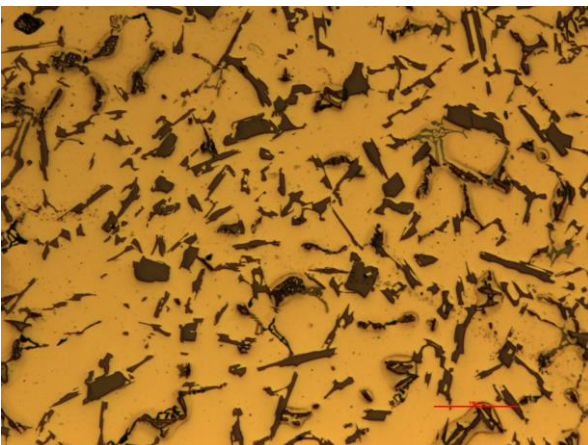
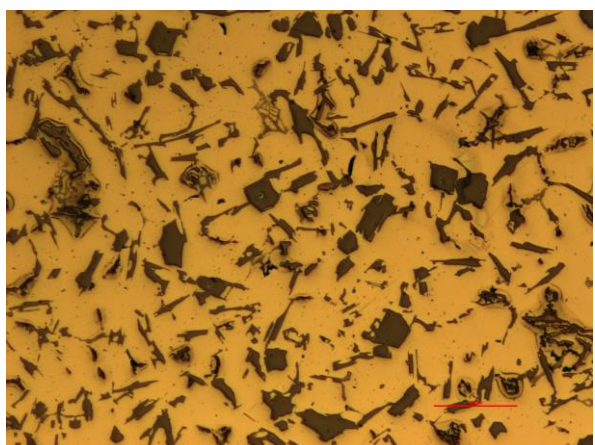
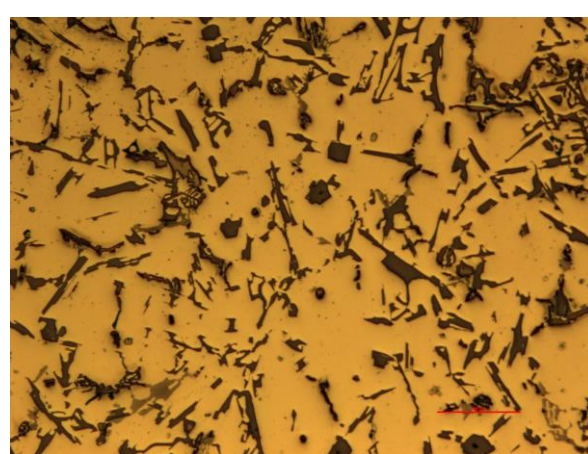
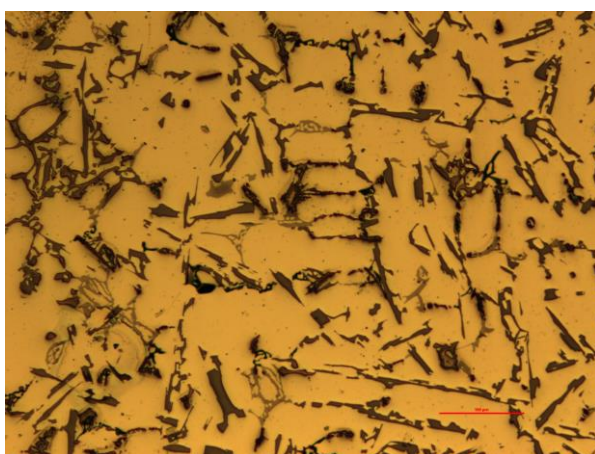
**Příloha 10 metalografie vzorku číslo 5 – zvětšeno 100x**





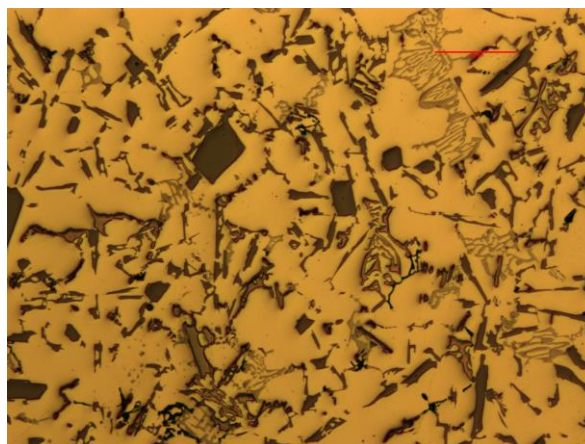
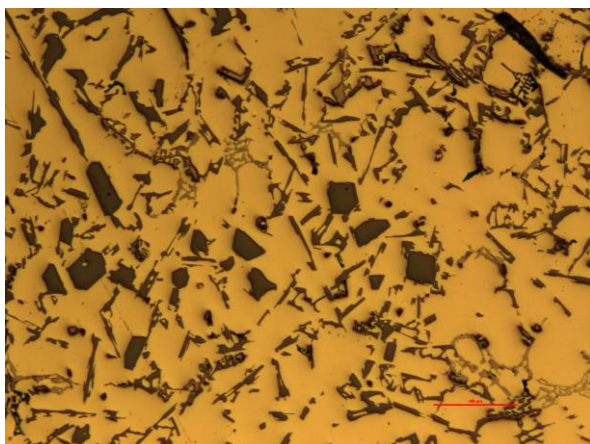
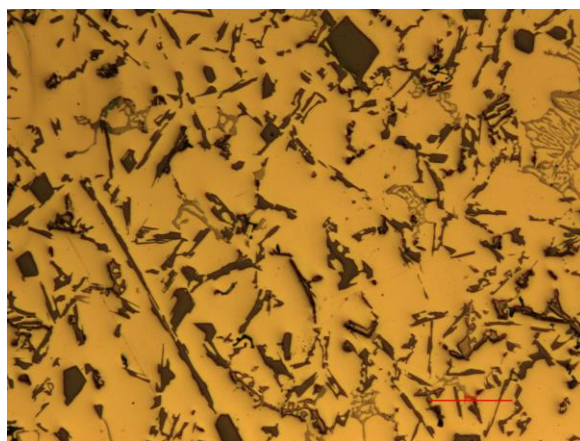
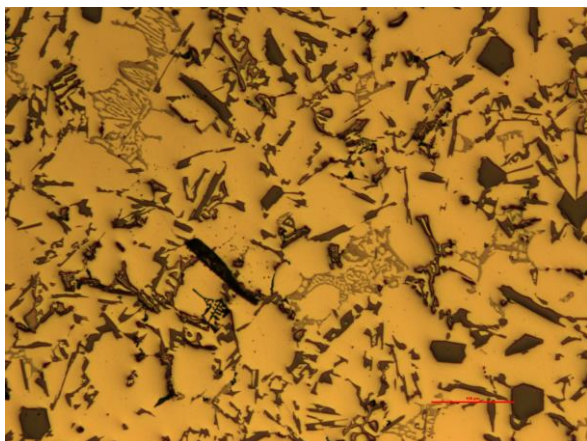


**Příloha 11 metalografie vzorku číslo 6 – zvětšeno 100x**

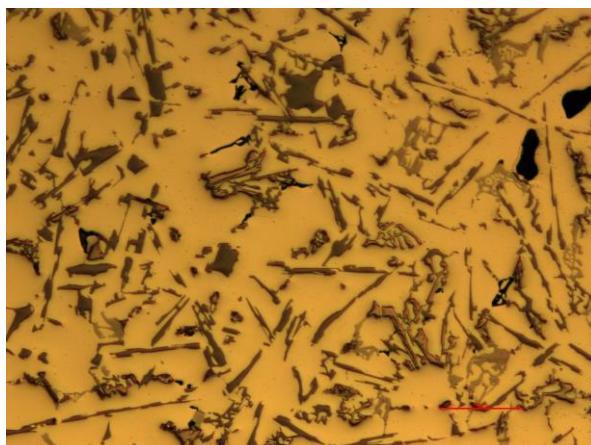
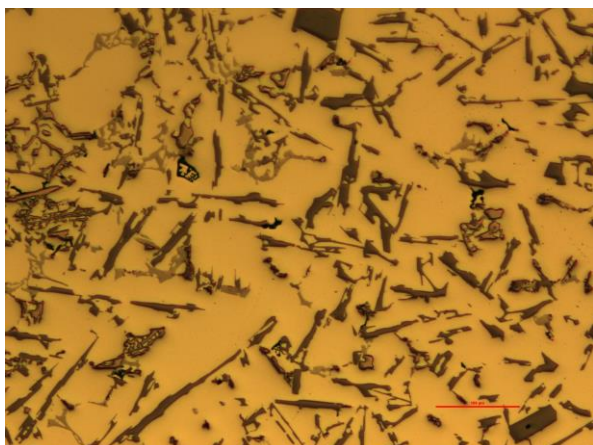


**Příloha 12 metalografie vzorku číslo 7 – zvětšeno 100x**

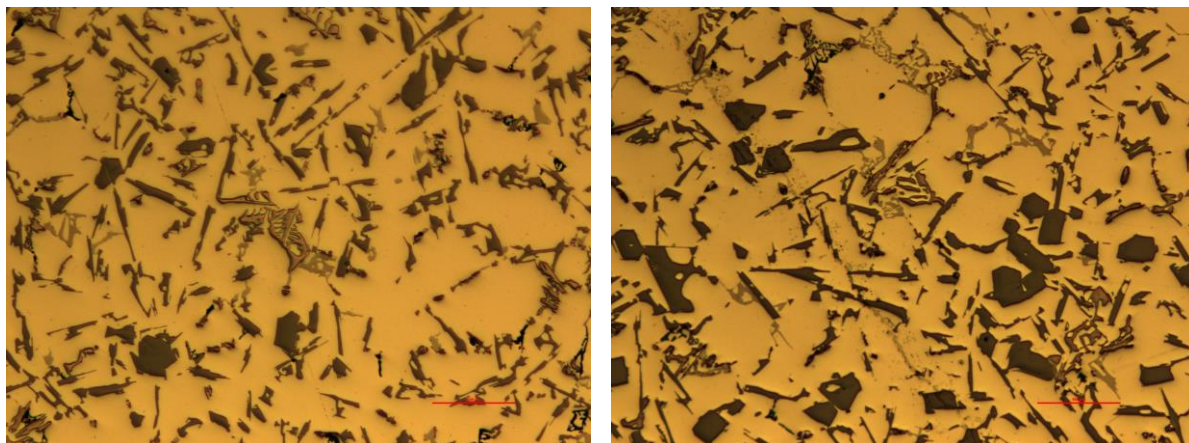




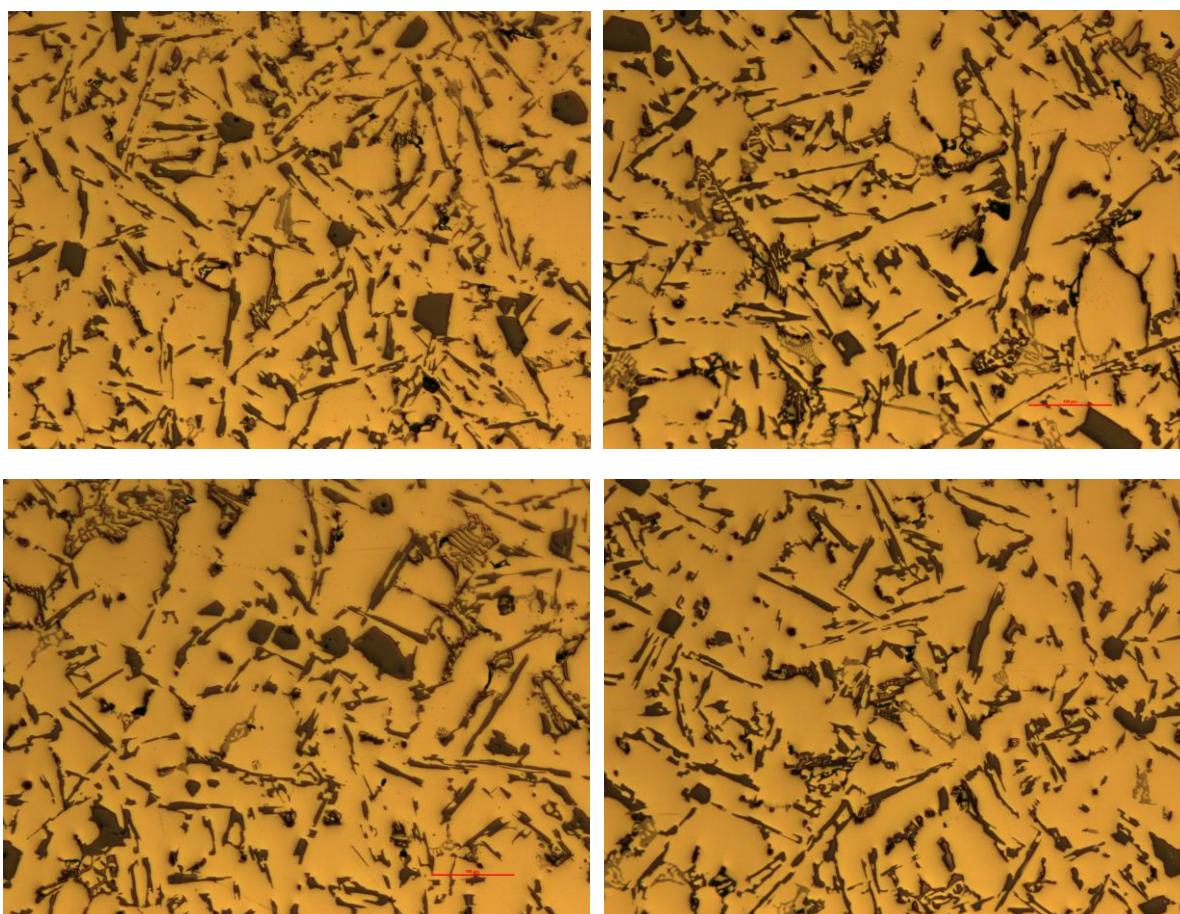
Příloha 13 metalografie vzorku číslo 8 – zvětšeno 100x





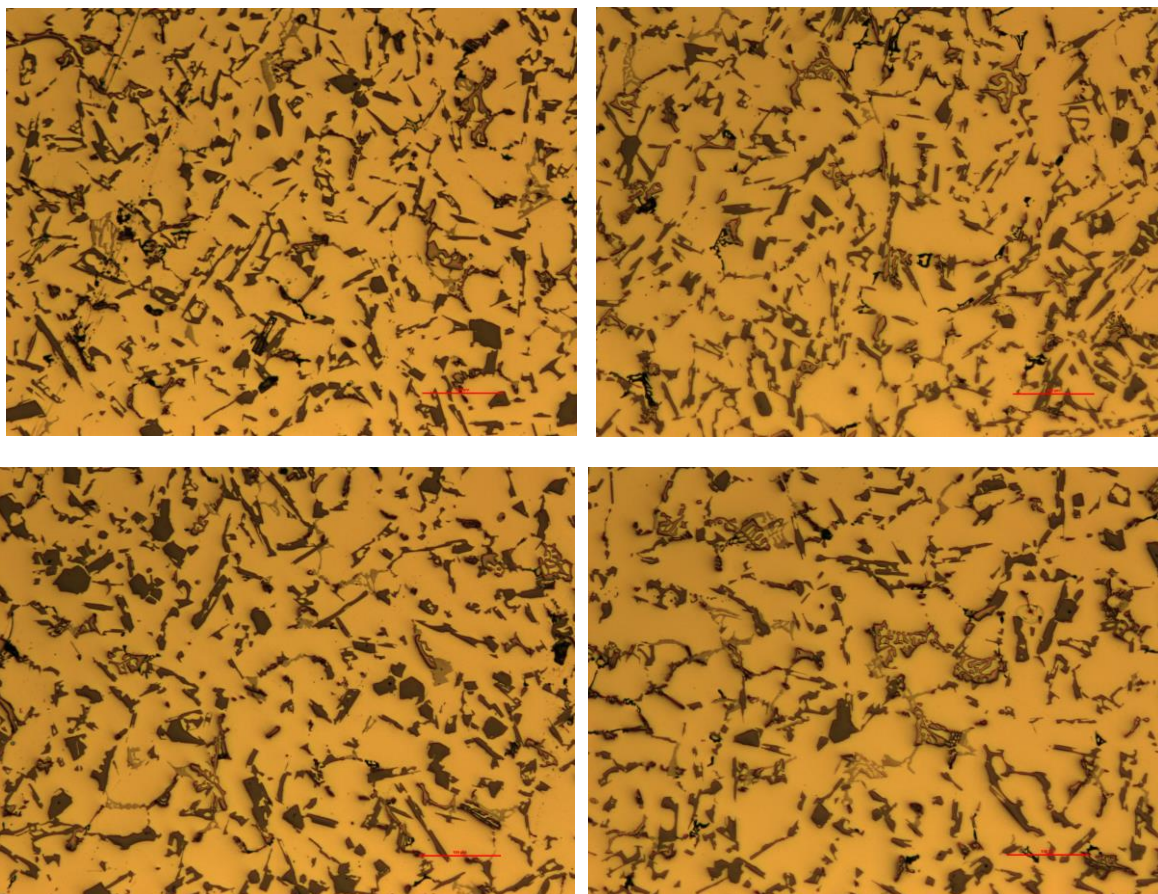


**Příloha 14 metalografie vzorku číslo 9 – zvětšeno 100x**

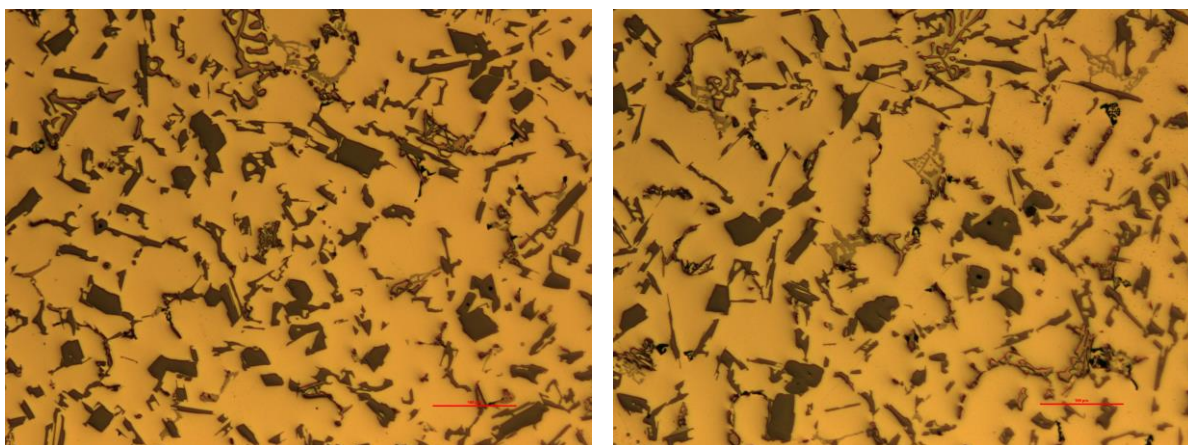


**Příloha 15 metalografie vzorku číslo 10 – zvětšeno 100x**

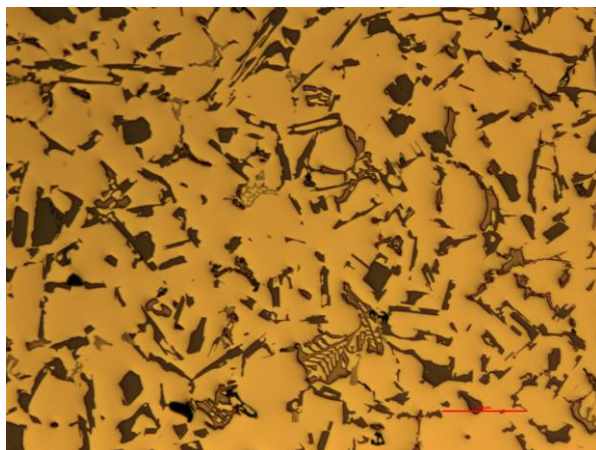
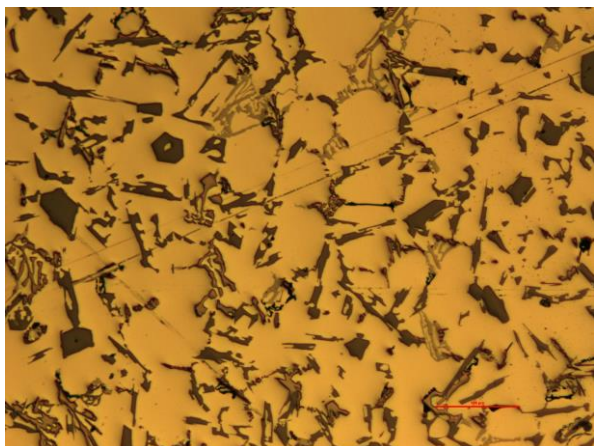




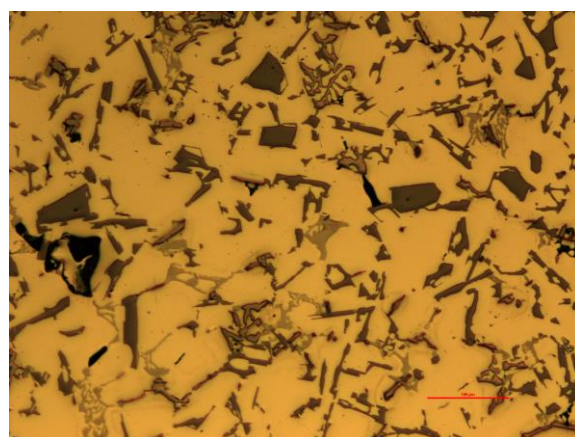
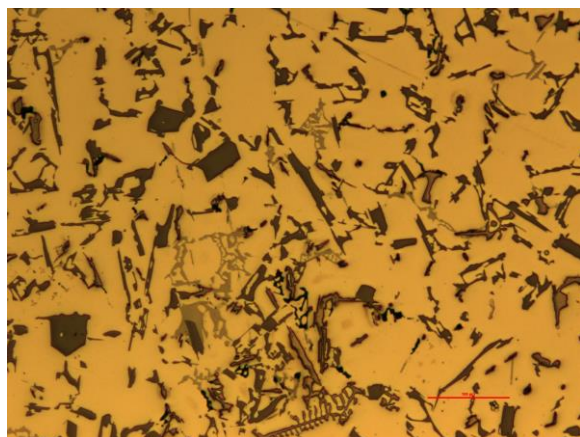
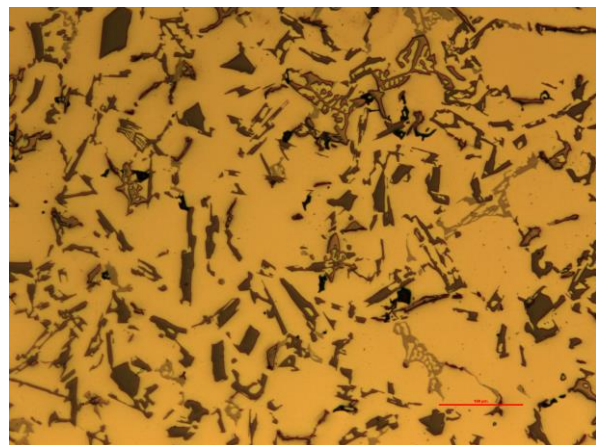
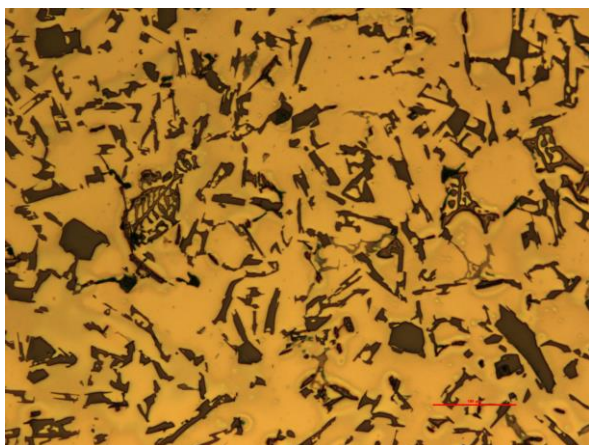
Příloha 16 metalografie vzorku číslo 11 – zvětšeno 100x





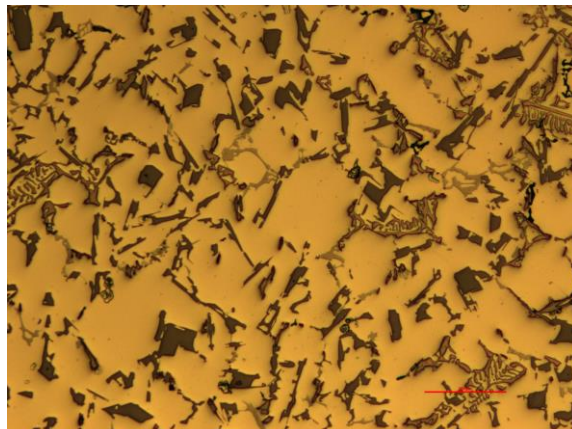
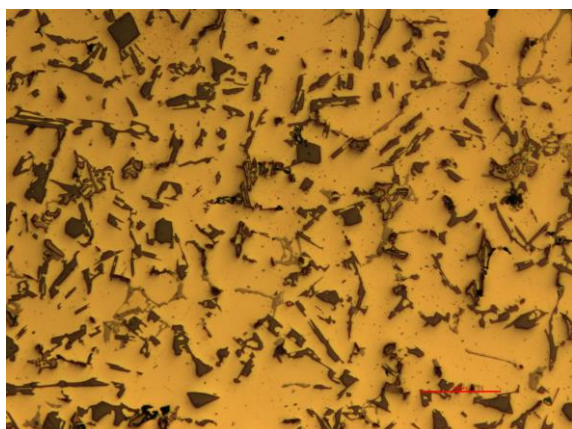
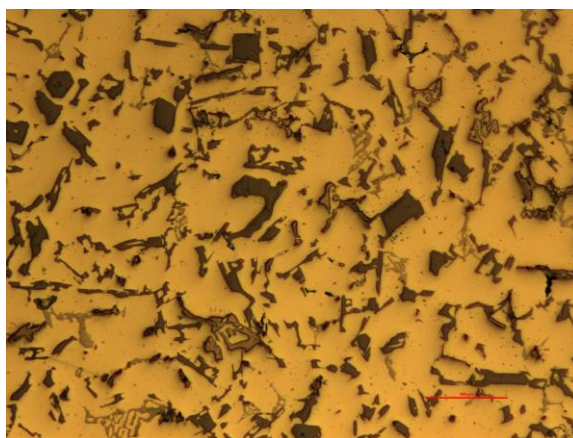
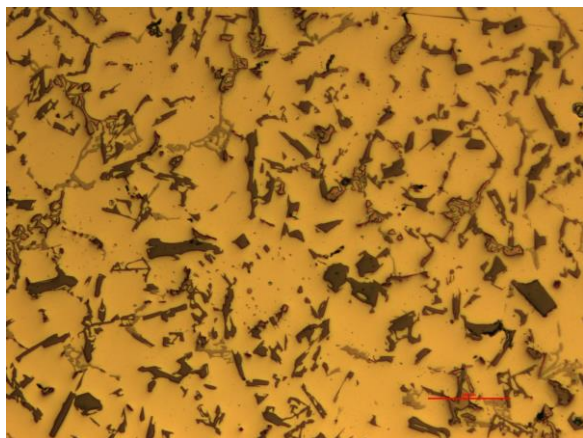


Příloha 17 metalografie vzorku číslo 12 – zvětšeno 100x

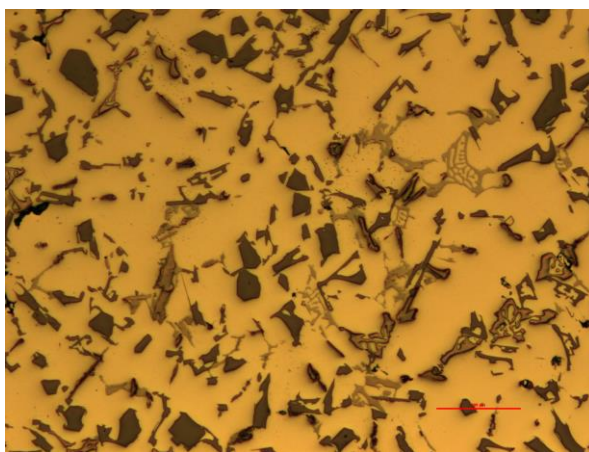
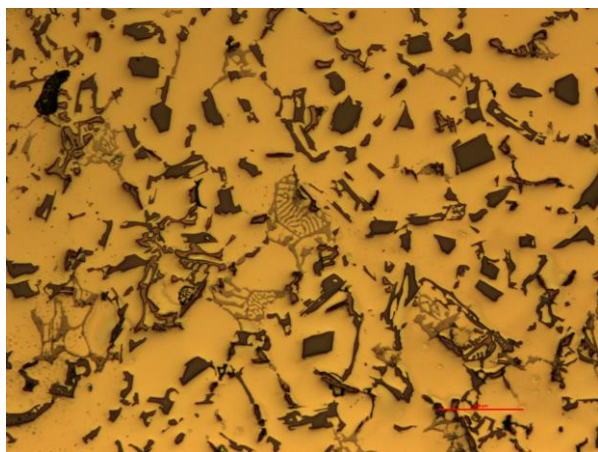


Příloha 18 metalografie vzorku číslo 13 – zvětšeno 100x

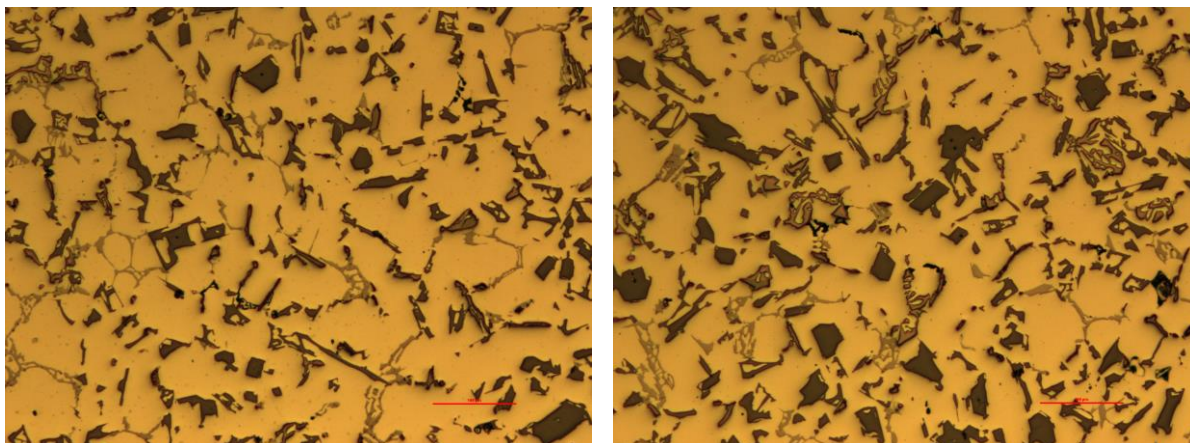




Příloha 19 metalografie vzorku číslo 14 – zvětšeno 100x







**Příloha 20 metalografie vzorku číslo 15 – zvětšeno 100x**