



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav materiálového inženýrství**

**Hodnocení vlivu zpracování na mikrostruktury vybraných Al slitin**

**Influence of treatment on microstructure of selected Al alloys**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jakub Horník, PhD.

**Radek Bednář**

**Praha 2017**



### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne: .....

Podpis .....

**Poděkování:**

Rád bych na tomto místě poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jakobovi Horníkovi, PhD. a to za celkové odborné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce a za trpělivost a čas, který byl ochoten věnovat konzultacím.

**Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se zabývá vyhodnocením velikosti zrna a rozložením minoritních fází po průřezu polotovarů vyrobených litím a tvářením ze slitin EN AW 6110 a EN AW 6082. Jedná se o slitiny ze skupiny Al-Mg-Si. K analýzám byla využita světelná a řádkovací elektronová mikroskopie. Pro vyvolání struktury materiálu byla použita leptadla Dix-Keller a Weck a jejich kombinace. K hodnocení velikosti zrna byl využit software NIS-Elements AR. Pro rozbor fází a určení procentuálního složení byl využit řádkovací elektronový mikroskop s detektorem EDS. Z výsledků je patrný mírný rozdíl ve velikosti a distribuci zrna mezi hodnocenými slitinami. Slitina EN AW 6110 má zrno vyjma povrchové vrstvy jemnější a rovnoměrnější. Složení minoritních fází se po průřezu polotovarů také mírně mění.

**Klíčová slova:**

Slitina hliníku, EN AW 6110, EN AW 6082, velikost zrna, precipitační fáze

**Abstract:**

This thesis deals with evaluation of grain size and distribution of minor phases after a cross section of semi-products, which were made by casting and forming of the alloys EN AW 6110 and EN AW 6082. These alloys belong to the Al-Mg-Si group. Light microscopy and scanning electron microscopy were used in analysis. Caustic liquids Dix-Keller, Weck and their combinations were used for elicitation of the material structure. NIS-Elements AR were used to evaluate the grain size. A scanning electron microscope with EDS detector was used for phase analysis and percent composition. As a result, there is a slight difference between the alloys in size and distribution. The EN AW 611 alloy grain is finer and steadier. The composition of minor phases after a cross section of semi-products varies as well.

**Key words:**

Aluminum alloy, EN AW 6110, EN AW 6082, grains size, precipitation phases

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>ZADAVATEL PRÁCE</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>HLINÍK</b> .....	<b>9</b>
3.1	SUROVINY PRO VÝROBU HLINÍKU .....	9
3.2	VÝROBA HLINÍKU .....	9
3.3	BAYEROVA METODA.....	10
3.4	SPÉKACÍ METODA .....	10
3.5	VÝROBA ELEKTROLÝZOU.....	10
3.6	VLASTNOSTI .....	11
3.7	VYUŽITÍ ČISTÉHO HLINÍKU .....	12
<b>4</b>	<b>SLITINY HLINÍKU</b> .....	<b>13</b>
4.1	VLIV PŘÍSADOVÝCH PRVKŮ.....	13
4.2	ROZDĚLENÍ SLITIN .....	14
4.2.1	SLITINY PRO TVÁŘENÍ .....	14
4.2.2	SLITINY PRO SLÉVÁNÍ.....	15
<b>5</b>	<b>VÝROBA POLOTOVARU</b> .....	<b>16</b>
5.1	LITÝ POLOTOVAR .....	16
5.1.1	PŘETLAKOVÉ LITÍ.....	16
5.2	TVÁŘENÝ POLOTOVAR .....	16
5.2.1	PRŮTLAČNÉ LISOVÁNÍ.....	16
<b>6</b>	<b>KOVÁNÍ MATERIÁLU</b> .....	<b>17</b>
6.1	VOLNÉ KOVÁNÍ .....	17
6.2	ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ .....	17
6.3	VÝLEDNÁ STRUKTURA .....	17
<b>7</b>	<b>TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HLINÍKU</b> .....	<b>18</b>
7.1	ŽÍHÁNÍ .....	18
7.2	PRECIPITAČNÍ VYTVRZOVÁNÍ .....	19
7.3	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN SÉRIE 6000 .....	21
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>23</b>
8.1	HCM POLOTOVARY .....	23
8.1.1	SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE .....	23
8.1.2	VELIKOST ZRNA.....	27
8.1.3	ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE.....	35
8.2	LISOVANÉ POLOTOVARY .....	39
8.2.1	SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE .....	39
8.2.2	VELIKOST ZRNA.....	42
8.2.3	ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE.....	42
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>43</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>44</b>

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce vznikla na podnět společnosti Strojmetal Aluminium Forging s.r.o., se kterou byla dohodnuta dlouhodobá spolupráce jedná se tedy o první práci pro tuto společnost na kterou se bude dále navazovat. Cíl této práce je stanovení a porovnání základních vlastností polotovarů z Al slitin EN AW 6082 a EN AW 6110 vyráběné horizontálním přetlakovým litím (HCM) a lisováním.

Jelikož se jedná o slitiny nově zaváděné do automobilového průmyslu, zejména EN AW 6110, byly stanoveny dva základní cíle, které by v této bakalářské práci měly být řešeny. První je rozbor velikosti zrna a následné porovnání, jak mezi slitinami, tak mezi technologiemi výroby a určit zda-li je konstantní v celém průřezu vzorku. Dále pomocí elektronové mikroskopie provést rozbor fází a ověření obsahu jednotlivých prvků v polotovaru.

## 2 Zadavatel práce

Tato bakalářská práce je tvořena pro firmu Strojmetal Aluminium Forging s.r.o. se sídlem a výrobou v Kamenici u Prahy. Historie této firmy sahá do roku 1822, kdy byla založena Josefem Ringhofferem. Z počátku se tato společnost věnovala výhradně zpracování mědi. Po vydání Benešových dekretů se zaměření změnilo na hliník a titan.

Po sametové revoluci tehdejší společnost odolávala privatizaci až do roku 1998, což mělo za následek změnu na akciovou společnost. Poté následovalo období vlastnění Strojmetalů zahraničním investorem. V dnešní době je ovšem v českém vlastnictví a pokračuje v trendu budování infrastruktury, který započal za zahraničních majitelů. Nachází se zde šest automatických linek, šedesát šest robotů. Velmi složité díly se díky tomu vyrábějí bez zásahu lidské ruky. Vzniká i vlastní podnikové učiliště, kde budou studenti připravováni na potřeby na ně kladené.

V současné době je zde zaměstnáno přibližně 350 zaměstnanců, kteří se téměř výhradně zaměřují na vývoj a výrobu hliníkových podvozkových bezpečnostních dílů pro automobilový průmysl. Konkrétně se jedná o podvozkové výkovky tvářené za tepla, které se v Kamenici též opracovávají, provádí se montáž a dodávají se výhradně zahraničním odběratelům. Mezi zákazníky patří všechny přední automobilky (Audi, Mercedes) a zejména jejich vozy vyšších tříd. Obrat této společnosti se pohybuje za posledních 5 let v průměru více než 900 mil. Kč ročně. Čehož je dosaženo díky produktivitě z přidané hodnoty, která představuje částku mezi 950 tis. a 1 mil. Kč na pracovníka. Celková prodej různých automobilových dílů za minulý rok byl 8,5 milionu kusů při zmetkovitosti 3 ppm. [1], [2]



# 3 Hliník

## 3.1 Suroviny pro výrobu hliníku

Hliník je třetí nejrozšířenější prvek v zemské kůře po kyslíku a křemíku, přesto se začal průmyslově využívat až v polovině devatenáctého století. V kovové formě se v přírodě nenachází, vždy pouze v kombinaci s dalšími prvky ve sloučeninách. Vyskytuje se v rozdílných chemických formách, můžeme jej najít v 250 různých minerálech, vegetaci, vodě i částicích prachu. Průmyslově nejvyužívanější ruda pro výrobu hliníku je bauxit.

Bauxit není minerál s pevným chemickým složením, ale hornina tvořena z určitých složek. Tudíž i samotná definice se liší napříč publikacemi. Bauxit je možno chápat jako horninu obsahující z hydroxidů hliníku zejména  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  a také příměsi ve formě silikátů, jílu, usazenin, hydroxidů železa a z hydroxidů hliníku. Vyskytuje se převážně v tropech a subtropích, tj. v oblastech s dobrým odvodněním. Jiná definice říká, že bauxit je hornina tvořená nerosty gibbsit, diaspor a boehmit. Dále obsahuje křemen, jíl, hematit a jiné oxidy železa. Vzniká tam, kde došlo k silnému zvětrání hliníkem bohatých hornin ve vlhkém tropickém prostředí.

Bauxity lze z hlediska jejich geologického původu rozdělit na lateritické, karstové nebo usazeninové. Nejpočetnější jsou lateritické, které zastupují přibližně 86 % z celkového počtu. Vznikly zvětráváním a nacházejí se blíže rovníku. Ve větší vzdálenosti od rovníku v Evropě, Číně a pacifické oblasti se nachází karstové bauxity, jež vznikly v krasových podložích a z celkového počtu zabírají 13 %. Usazeninové bauxity představují 1 %, nacházejí se v Evropské oblasti.

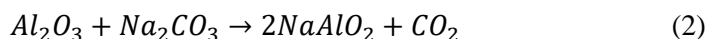
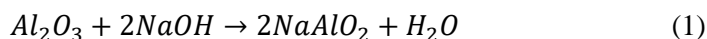
Následující tabulka (tab. 1) ukazuje státy, které vytěží nejvíce bauxitu a jeho zásoby pro další roky. Rezervy pro Austrálii a Indii byly revidovány na základě vládních zpráv. Velké zásoby bauxitu má Indonésie a Vietnam, zde ovšem ještě nezačala masivní těžba. [3-6]

Tab. 1 – Vytěžený hliník a jeho zásoby [6]

Stát	2014 [Mtun]	2015 [Mtun]	Zásoby [Mtun]
Austrálie	78 600	80 000	6 200 000
Brazílie	34 800	35 000	2 600 000
Čína	55 000	60 000	830 000
Guinea	17 300	17 700	7 400 000
Jamajka	9 680	10 700	2 000 000
Indie	16 500	19 200	590 000
Malajsie	3 260	21 200	40 000

## 3.2 Výroba hliníku

Existuje několik způsobů výroby čistého oxidu hlinitého z rud. Vzhledem k amfoternímu charakteru jej lze získat kyselými i zásaditými metodami. Navíc také existuje elektrotermický způsob výroby oxidu hlinitého. V současnosti jsou nejvyužívanější zásadité postupy výroby. Těmito metodami se působením NaOH ( $Na_2CO_3$ ) na rudu bauxitu váže oxid hlinitý na hlinitan sodný podle rovnic (1) a (2), který je rozpustný ve vodě:



Výsledný roztok hlinitanu sodného se musí oddělit od červeného kalu, který je tvořen hlavně oxidy a hydroxidy titanu, křemíku a železa. Při rozkladu roztoku hlinitanu sodného se vylučuje čistý hydroxid hlinitý. Po odfiltrování a úpravách se alkalický roztok vrací zpět do procesu. Hydroxid hlinitý se za účelem odstranění vody kalcinuje za vysokých teplot a vzniká

přeměna na suchý a čistý  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  vhodný k výrobě kovového hliníku. Oxid hlinitý obsažený v rudě přechází na hlinitan sodný různými způsoby, a to buď mokrou cestou (Bayerův způsob), nebo se ruda nejprve spéká se solemi alkalických kovů v rotačních pecích (Müller-Jarkovinův způsob), anebo se z rud tavením v elektrických pecích, případně v šachtových pecích, získává hlinitan v tuhé formě. Získaný pevný hlinitan sodný se pak louží ve vodě anebo roztoku hydroxidu sodného a získá se vodní roztok hlinitanu sodného. Ten se potom rozkládá za vzniku hydroxidu hlinitého. [3], [7]

### 3.3 Bayerova metoda

Tento proces byl vynalezen Karlem Josefem Bayerem v devadesátých letech 19. stol. pro získávání oxidu hlinitého z bauxitu pro textilní průmysl. Tento postup si vyžadoval dvou objevů. Samovolný rozklad roztoků hlinitanu sodného a vylučování hydroxidu hlinitého za přítomnosti katalyzátoru. Druhý objev spočíval v tom, že oxid hlinitý, obsažený v bauxitech, je možné tlakově loužit působením hydroxidu sodného za vzniku hlinitanu sodného. Bayerův postup je založen na chemické reakci popsanou rovnicí (1).

#### Technologie Bayerovy metody

- Úprava bauxitu
- Desilikace
- Loužení
- Oddělování hlinitanového roztoku od červeného kalu
- Rozklad hlinitanového roztoku
- Srážení
- Kalcinace hydroxidu hlinitého

Pro rozdílné typy bauxitů se liší chemická reakce, ale i teploty při kterých probíhají jednotlivé kroky výroby. [3], [7]

### 3.4 Spékací metoda

Spékací metoda výroby  $\text{Al}_2\text{O}_3$  patří k termickým zásaditým způsobům výroby a používá se na zpracování chudších bauxitů s vyšším obsahem  $\text{SiO}_2$ . Metoda spočívá ve spékání bauxitů se sodou a vápencem, díky čemuž vzniká spečenec, který je dobře rozpustný ve vodě. Louhováním spečence ve vodě vzniká hlinitanový roztok, obdobně jako při Bayerově metodě. Při procesu vzniká nerozpustný zbytek – hnědý kal (rozdílné chemické i mineralogické složení oproti červenému kalu.) Po oddělení kalu se roztok rozkládá karbonizací pomocí  $\text{CO}_2$ , čímž vzniká hydroxid hlinitý a mateční roztok. Mateční roztok (karbonát sodný) se recykluje na začátek procesu do větve mokrého mletí a na spékání. Vyroběný hydroxid hlinitý se po odfiltrování a promytí kalcinuje podobně jako při Bayerově metodě. [3]

#### Technologie spékací metody:

- Příprava vsázky
- Spékání
- Drcení spečence
- Loužení spečence
- Desilikace
- Karbonizace

### 3.5 Výroba elektrolýzou

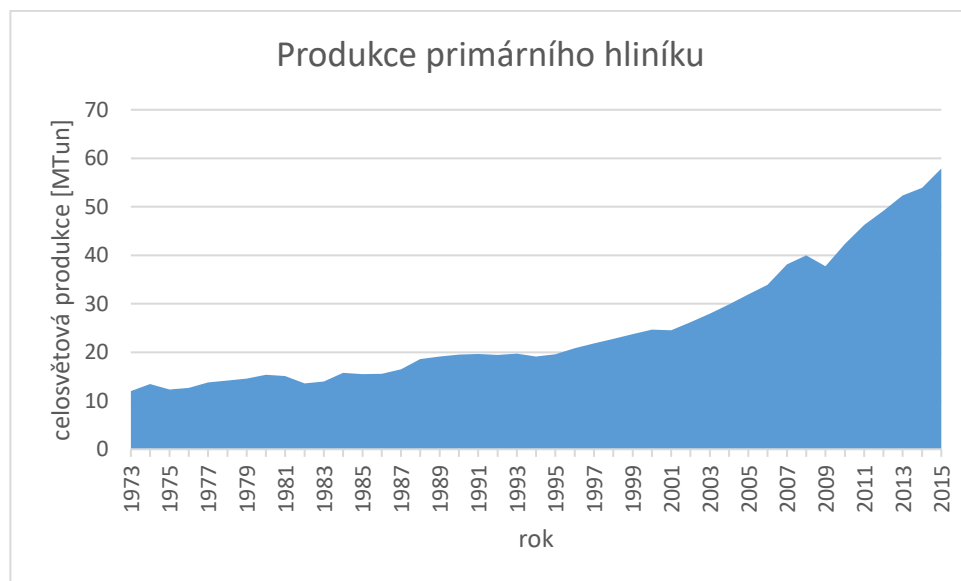
Nejmodernější způsob výroby hliníku tvoří dva nezávislé procesy. První je příprava čistého oxidu hlinitého a druhý proces je elektrolytická výroba hliníku. Existuje mnoho dalších způsobů výroby, ale nejsou ve velké míře průmyslově využívány.

Hliník je výrazně neušlechtilý lehký kov, proto ho nelze vyrobit elektrolýzou vodních roztoků. Pro tento kov se používá elektrolýza z roztavených solí. Nejvýhodnější pro výrobu je

roztavená sůl kryolit,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , do které se vsází oxid hlinitý a přísady na modifikaci vlastností elektrolytu.

Základem moderního elektrolyzátoru je ocelová vana, která je zevnitř izolována žáruvzdorným izolačním materiálem a uhlíkovou vyzdívkou. Elektrický proud se přivádí pomocí předem vypálených uhlíkových anod. Nad elektrolytem se nachází kůra z podchlazeného elektrolytu a oxidu hlinitého. Oxid hlinitý se musí přidávat v malých množstvích v krátkých časových intervalech. Hliník se poté elektrochemicky vylučuje do roztavené hliníkové katody.

Problém pro životní prostředí tvoří odpadní materiál z elektrolyzátoru. Při primární výrobě hliníku vzniká 50 kg/tunu odpadu. V roce 2015 bylo vyrobeno 57 890 000 tun primárního hliníku, což znamená přibližně 2,9 miliónu tun odpadu. Nárůst produkce primárního hliníku může být ekologický problém do budoucna, jelikož výroba primárního hliníku dynamicky roste (obr. 1). [3], [8]



Obr 1 – Graf produkce primárního hliníku v čase

### 3.6 Vlastnosti

Hliník (chemická značka Al, latinsky Aluminium) je nepolymorfní, neušlechtilý stříbrný kov s atomovým číslem 13, který krystalizuje v kubické plošně středěné soustavě – K12. Díky tomu má hliník i jeho slitiny dobré plastické vlastnosti za tepla i studena. Skluzové roviny jsou  $\{111\}_\alpha$  a skluzové směry  $\langle 110 \rangle_\alpha$ . Je velmi dobře kujný, má vynikající elektrickou a tepelnou vodivost.

Mechanické vlastnosti hliníku jsou silně závislé na obsahu nečistot a také na tepelném zpracování. Pro hliník o čistotě 99,7 % ve vyžíhaném stavu je  $R_{p0,2} = 20-30$  MPa,  $R_m = 60-70$  MPa a tažnost  $A_{10} = 30-45$  %. Pevnostní charakteristiky lze zvýšit tvářením za studena. Nejdůležitější fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku jsou shrnuty v tab. 2, pro konstrukční účely jsou velmi důležité koeficienty teplotní roztažnosti (tab. 3). [3], [9]

Tab. 2 – Fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku [3]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Atomové číslo	13	-
Relativní atomová hmotnost	26,982	-
Krystalová mřížka	FCC	-
Parametr mřížky	0,404958	nm
Hustota	2,699 (20 °C)	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Teplota tavení	660,37 (Al 99,996%)	°C
Teplota varu	2494	°C
Tepelná vodivost	247 (25 °C)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Tepelná kapacita	0,9	$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Objemová změna při krystalizaci	6,5	%
Elektrický odpor	26,2 (Al 99,99% ; 20 °C)	$\mu\Omega\text{m}$
Teplota supravodivosti	1,2	K
Modul pružnosti	70	Gpa

Tab. 3– Koeficienty teplotní roztažnosti [3]

Teplotní interval [°C]	Průměrný koeficient [ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
-200 až 20	18,0
-150 až 20	19,9
-50 až 20	21,8
20 až 100	23,6
20 až 200	24,5
20 až 300	25,5
20 až 400	26,4
20 až 500	27,4

### 3.7 Využití čistého hliníku

Technicky čistý hliník našel největší uplatnění jako elektrovedný materiál. Vzhledem k dobré tepelné vodivosti a chemické odolnosti je používán i v chemickém a potravinářském průmyslu. V potravinářském průmyslu jsou hlavně využívány hliníkové fólie, plechovky, nádoby a tuby. Významné využití nalézá chemicky čistý hliník při plátování ocelových plechů a při výrobě alitovaných povrchových vrstev, jež zabraňují okujím, korozi a pro dezoxidaci ocelí. [9]

## 4 Slitiny hliníku

Nalegovaním jedním nebo více prvky se mění původní vlastnosti čistého hliníku. Rozdělení hliníkových slitin dle legovaných prvků je uvedeno v tab. 4.

Tab. 4 - Rozdělení hliníkových slitin podle EN 573-1 [3]

Hlavní legující prvek	Označení série
Hliník čistoty minimálně 99,00%	1000
Měď	2000
Mangan	3000
Křemík	4000
Hořčík	5000
Hořčík a křemík	6000
Zinek	7000
Jiné prvky	8000

### 4.1 Vliv přísadových prvků

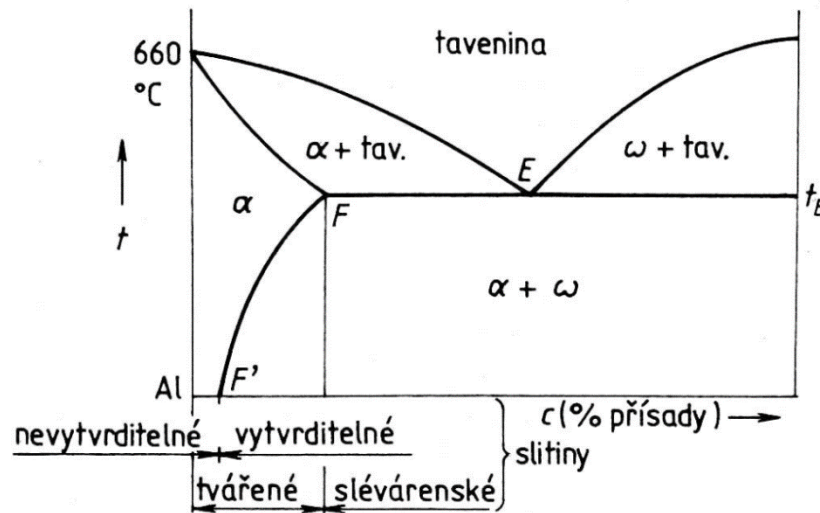
Významný podíl na výsledných vlastnostech hliníkových slitin mají přísadové prvky. Nejvyužívanější z nich jsou Cu, Mg, Mn, Si, Fe a Zn. Jednotlivé prvky mají na výslednou slitinu následující účinek:

- Měď ve slitinách hliníku zvyšuje pevnost a tvrdost, ale zhoršuje tvárnost a odolnost proti korozi. Obsah v tvářených slitinách bývá max. 6 %, ve slévárenských do 12 %.
- Hořčík zvyšuje pevnost korozivzdornost a vytvrditelnost slitin. Obsah v tvářených slitinách bývá max. 8 %, ve slévárenských do 11 %.
- Mangan zvyšuje pevnost, odolnost proti korozi a tvárnost. Obsah obvykle nepřekročí 2 %.
- Křemík zvyšuje pevnost tuhého roztoku a mírně také koroziodolnost. Při větším obsahu je přítomen jako čistý Si, čímž se zvyšuje křehkost. Obsah v tvářených slitinách bývá 1 % Si, oproti tomu slitiny slévárenské obsahují až 25 % Si.
- Zinek zvyšuje pevnost, ale zhoršuje houževnatost a korozivzdornost. Obsah v tvářených slitinách bývá max. 8 %, ve slévárenských do 6 %.
- Železo zvyšuje pevnost a zlepšuje tvárnost, ale zhoršuje houževnatost a koroziodolnost. Ve slitinách pro tváření bývá jeho obsah do 0,5 %, výjimečně až do 1,6 %, ve slévárenských slitinách do 1 %.
- Nikl zvyšuje pevnost i houževnatost za normální i zvýšené teploty. Obsah ve slévárenských i tvářených slitinách do 2 %. U slitin s Cu zlepšuje rovněž korozivzdornost.

Existují i doplňkové prvky, které se přidávají pouze v malých koncentracích například: titan, chrom, molybden vanad a olovo.

## 4.2 Rozdělení slitin

Rozdělení slitin hliníku dle jejich vhodnosti ke slévání, tváření, a tepelnému zpracování vytvrzováním znázorňuje rovnovážný diagram na obr. 2.



Obr.2 – Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku [10]

Slitiny s nižšími obsahy přísadových prvků jsou vhodné pro tváření až do koncentrace, která odpovídá bodu F. Slitiny s vyšším obsahem, v jejichž struktuře se vyskytuje eutektikum, jsou hůře tvárné za tepla, mají ale velmi dobré slévárenské vlastnosti. Eutektické slitiny jsou nejlépe slévateľné. Vytvrzováním se zlepšují mechanické vlastnosti především u slitin v rozmezí koncentrací F' a F. Z tohoto důvodu jsou ze slévárenských slitin vhodné k vytvrzování pouze ty, kde je menší množství eutektika ve struktuře. [9], [10]

### 4.2.1 Slitiny pro tváření

#### Nízkopevnostní slitiny s dobrou korozní odolností

Pokud slitiny hliníku neobsahují měď, odolávají velmi dobře atmosférické korozi a látkám kyselé povahy. Do této skupiny patří slitiny soustav Al-Mg a Al-Mn a z tohoto důvodu není nutné použití povrchové ochrany. Další výhody jsou dobrá svařitelnost a tvářitelnost, dobrá lomová houževnatost a odolnost proti vibračnímu zatížení. Nevýhodou těchto slitin je nemožnost tepelného zpracování za účelem zpevnění materiálu.

#### Slitiny Al-Mg

Využívají se pouze slitiny s obsahem hořčíku do 6 %, protože při větším množství mají při mechanickém zatížení sklon ke korozi po hranicích zrn. Pevnost těchto slitin je relativně nízká (140–200 MPa). Zvýšení pevnosti až na  $R_m = 420$  MPa lze dosáhnout deformačním zpevněním. Vzhledem k dobré korozní odolnosti se využívají hlavně v lodním, automobilovém a potravinářském průmyslu.

#### Slitiny Al-Mn

U těchto slitin nelze docílit zvýšení pevnosti, jelikož lze vyvolat jen malé přesycení tuhého roztoku  $\alpha$ . Z tohoto důvodu se tepelně nevytvřují. Vlastnosti i použití těchto slitin je velmi podobné jako u slitin Al-Mn. V průmyslu se využívá pouze slitina AlMn1.

## Slitiny Al-Mg-Si

Pro tyto slitiny jsou typické nízké obsahy přísadových prvků, které nepřekračují 1,5 %. Díky schopnosti být vytvrzeny tepelným zpracováním lze dosáhnout až  $R_m = 350$  MPa. Jsou dobře tvárné a svařitelné. Využívají se v letectví stavebnictví a automobilovém průmyslu.

Ternární systém Al-Mg-Si patří mezi jednodušší typy diagramů. V rovnováze s tuhým roztokem se nachází sloučenina  $Mg_2Si$ . Křemík je v ternárních rovnováhách přítomen v elementární formě. Stabilní fáze jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 - Tuhé fáze v systému Al-Mg-Si [3]

Označení	$\beta$	E	$\zeta$		
Fáze	$Al_3Mg_2$	$Al_{30}Mg_{23}$	$Al_{12}Mg_{17}$	$Al_5Mg_4$	$Mg_2Si$
T [°C]	< 450	450÷370	<460		<1085

Atomy Mg a Si v Al mají snahu tvořit precipitáty fáze  $Mg_2Si$ . Rozpustnost  $Mg_2Si$  v tuhém roztoku se zmenšuje, když obsah Si převyšuje poměr koncentrací  $Mg:Si = 1,73$ . Za nerovnovážných podmínek krystalizace (velká rychlost ochlazování) dochází k lokální likvidaci. V důsledku likvidace mohou fáze  $Mg_2Si$  nebo  $Al_3Mg_2$  existovat ve slitinách, které jsou za rovnovážných podmínek jednofázové. Tyto slitiny jsou vhodné i pro slévání.

## Slitiny s vyšší pevností, ale nízkou korozní odolností

### Slitiny Al-Cu-Mg

Z přidavných prvků má zde největší zastoupení měď (až 4,8 %). Mechanické vlastnosti ale velmi závisí i na obsazích hořčíku (0,4-1,8 %) a manganu (1 %). Po vytvrzení tyto slitiny dosahují až  $R_m = 530$  MPa. Slitiny jsou vytvrzovány převážně přirozeným stárnutím, které následuje po rozpouštěcím žihání. Využití převážně v automobilovém průmyslu.

### Slitiny Al-Zn-Mg

Jedná se o slitiny dosahující až  $R_m = 600$  MPa. Mohou obsahovat i měď, ale pouze v malém množství. Při větším obsahu Cu vzniká náchylnost ke koroznímu praskání. Využívá se pro vysoce namáhané součástky v leteckém a automobilovém průmyslu.

## 4.2.2 Slitiny pro slévání

Odlitky dosahují výrazně nižších mechanických vlastností oproti tvářeným výrobkům  $R_m = 250$  MPa. Všechny tyto slitiny mají vyšší počet přísad a proto vytváří eutektické až nadeutektické slitiny. V současnosti jsou nejvyužívanější slitiny hliníku s křemíkem – siluminy.

### Slitiny Al-Si

Maximální rozpustnost křemíku je 1,65 % a pokud není legována dalšími prvky, označují se tyto slitiny jako binární či jednoduché. Vyznačují se vysokou zabíhavostí, malým koeficientem lineární smrštivosti a dobrou korozní odolností. Pro zlepšení mechanických vlastností se přidává Na nebo Sr ve velmi malém množství (0,01 hm.%). Binární slitiny se ovšem téměř nepoužívají, hlavní uplatnění našly v pájení.

Pro zlepšení pevnostních charakteristik se přidává měď a hořčík. Takto modifikované siluminy se označují jako speciální. Lze je vytvrzovat a dosáhnout hodnoty pevnosti až 300 MPa. Mohou se přidávat i další prvky, podle vlastností, kterou potřebujeme vylepšit (Mn, Ti, Zn). Využití v automobilovém průmyslu a u součástí namáhaných na otěr.

## Slitiny Al-Cu

Jsou to binární slitiny, které mohou být používány až do teplot kolem 450 °C. Měď zhoršuje korozní odolnost, proto je nutná povrchová ochrana. Díky širokému intervalu krystalizace se zhoršují slévárenské vlastnosti. Využití v automobilovém průmyslu.

## Slitiny Al-Mg

Mají vysokou odolnost vůči korozi, měrnou pevnost, rázovou houževnatost, tažnost a nízkou hustotu. Mají horší slévárenské vlastnosti (pórovitost) a nižší těsnost odlitků. Využití v automobilovém průmyslu. [3], [9], [11]

# 5 Výroba polotovaru

Polotovar lze vyrobit rozličnými technologiemi, jenž vyplývají z rozdělení slitiny na tváření a slévání. V této práci se budu věnovat pouze těm, které se využívají ve firmě Strojmetal aluminium forging.

## 5.1 Litý polotovar

Hlavním parametrem pro odlévání hliníku je lící teplota. Je závislá na chemickém složení a konstrukci odlitku. Při přehřátí taveniny vznikají oxidy, zvětšuje se zrno a stoupá spotřeba energie. Z tohoto důvodu se lící teplota volí 50 až 100 °C nad teplotou tavení, případně nad teplotou likvidu.

### 5.1.1 Přetlakové lití

Tato technologie je využívána pouze pro výrobu ve velkých sériích, kdy jsou produkovány hmotnostně i rozměrově menší, tenkostěnné a konstrukčně složité odlitky s přesnými rozměry a výbornou kvalitou povrchu. Využívá se hlavně pro slitiny neželezných kovů se střední výškou lících teplot (hliník, zinek, hořčík). Využívá se převážně v automobilovém a leteckém průmyslu.

Charakteristické pro tento postup výroby je plnění dutiny formy, taveninou o teplotě nižší než teplota likvidu, vtokovou soustavou s velmi malými průřezy za vysoké rychlosti. Aby tento proces mohl probíhat je nutné dokonalé sevření fixní a pohyblivé části slévárenské formy, jenž zajišťuje tlakový lící stroj. Pro odlitky ze slitin hliníku se využívají tlakové stroje se studenou komorou. [3], [11]

## 5.2 Tvářený polotovar

Při tváření vznikají velké plastické deformace, které vznikají působením vnější síly, prostřednictvím pracovních nástrojů. Dochází k trvalé změně tvaru a rozměrů, která je doprovázena i různými chemickými a fyzikálními ději. Velmi důležitý parametr pro tváření je přetvárný odpor, který vyjadřuje odpor kovů proti plastické deformaci.

### 5.2.1 Průtlačné lisování

Společně s válcováním se jedná o nejvyužívanější metodu tváření hliníkových slitin. Mezi výhody průtlačného lisování patří výroba různých typů výlisků při malém počtu operací s jednoduchým nebo složitým průřezem. Dále se dosahuje vysoké přesnosti, kvalitního povrchu a je možná rychlá změna sortimentu. Nevýhody této technologie jsou nemožnost vylišovat celý objem materiálu a krátká životnost lisovacích nástrojů. Slitiny hliníku jsou velmi rozdílné v deformačním chování za tepla, a z toho důvodu nelze využívat jednu univerzální metodu.

Lisování probíhá na polokontinuálně odlitých kruhových čepech, které byly ohřáty na požadovanou teplotu, při které ještě nevznikají trhliny, z důvodu co nejmenšího přetvárného odporu. Poté je čep vkládán do recipientu lisu, který byl také ohřát na předurčenou teplotu. Následně razník protlačí čep přes lisovací matici. [3], [11]



## 6 Kování materiálu

Kování lze z hlediska působení rozdělit na dva druhy. Zápustkové kování, kdy se působí jedním nebo více údery téměř na celý povrch materiálu a volné kování při kterém se působí více údery pouze na část povrchu.

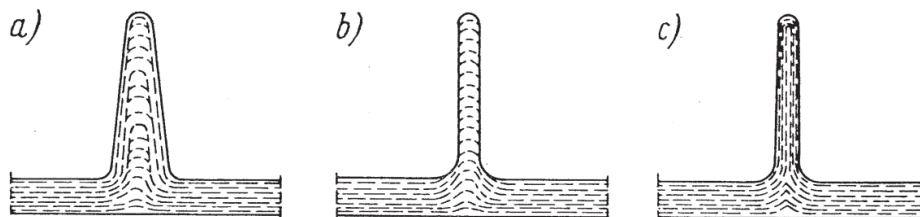
### 6.1 Volné kování

Opakované tváření jednoduchým kovádlem, při kterém přichází ke styku s kováčím nástrojem vždy jen určitá plocha materiálu. Náklady na nástroje jsou výrazně menší než u kování zápustkového, ale větší náklady vznikají při obrábění výkovku. Výkovky jsou většinou jednoduchých tvarů a tolerance jsou závislé na schopnostech obsluhy (neplatí v případě počítačem řízených postupů). Nejčastější operace volného kování jsou pýchování, prodlužování, prorážení a ohýbání. Vhodné zejména pro výrobu velkých výkovků v malé sérii.

### 6.2 Zápustkové kování

Zápustkové kování spočívá ve tváření materiálu, dokud zcela nevyplní zápustku. Výkovky lze dělit podle rozměrových tolerancí a dosažitelných tloušťek stěn. Čím přesnější požadavky na tolerance a tloušťky stěn, tím dražší a náročnější výroba. Nejlepší kvality povrchu a tvarové přesnosti dosáhneme použitím přesného kování.

Přesné výkovky jsou charakterizovány tím, že kromě vrtání již nepotřebují jiné obráběcí operace. Lze docílit nulového sklonu u vnějších povrchů a sklonu  $1^\circ$  u povrchů vnitřních, je možno vykovat vysoká žebra a stěny o tloušťce až 2 mm. Dosažitelná drsnost povrchu je  $R_a=3,2$ . Díky výsledné přesnosti nedochází k přerušení deformačních vláken (Obr. 3) následným obráběním a tím ve vztahu k zatěžování součásti k nevhodným strukturám vrubům.



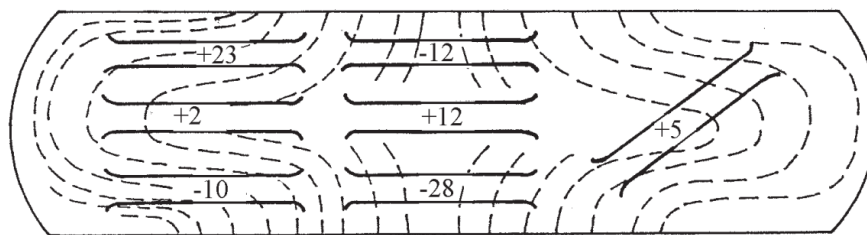
Obr. 3 - Průběh vláken: v běžném výkovku (a), v běžném výkovku po obrobení (b), v přesném výkovku (c) [3]

### 6.3 Výsledná struktura

Výsledná struktura je ovlivněna všemi operacemi, které byly provedeny na základním materiálu. Výchozím materiálem pro kování může být litý materiál, volným kovááním částečně protvářený litý materiál anebo výlisek. U vytvrzovatelných slitin je nutné počítat s velkou nehomogenitou a anizotropií struktury i vlastností. Jelikož je tok materiálu rozdílný v různých částech výkovku, je nutné definovat přesná místa pro odběr vzorků.

Při pýchování mezi rovnými kovádky, kdy se jedním úderem zmenší výška a zvětší průřez je nutné počítat s nerovnoměrnými a anizotropními vlastnostmi.

Vstupní materiál lisované tyče má usměrněnou vláknitou strukturu. Tlaková deformace při kování způsobuje zdeformování těchto vláken a nerovnoměrné protváření v objemu výkovku. V rámci výkovku jsou možné rozdíly až 50 MPa (Obr. 4). V místech styku čela výkovku s rovnými kovádky vznikají kritická místa, ve kterých nedochází k protváření materiálu. V těchto místech dosahuje v polotovaru nejmenších pevnostních hodnot. V praxi to může vést k lokální koncentraci napětí a vzniku trhliny.



Obr. 4 - Odchyly meze pevnosti  $R_m$  v pýchovaném výkovku [3]

U výkovků z litého materiálu je nejdůležitější odstranění lící struktury protvářením při volném kování a následném zápusťkovém kování, kdy nehrozí nedostatečné protváření. V případě volného kování je nutné, zmenšit průřez daného polotovaru poměrem  $k = S_0/S$ ,  $k > 3$  pro získání homogenních mechanických vlastností a  $k \approx 6$  pro dosažení homogenních únavových vlastností. Při volném kování se musí mezioperačně žíhat, pro obnovení deformační schopnosti.

U Zápusťkových výkovků je nutné počítat s nerovnoměrnou a nehomogenní strukturou, vzhledem k nehomogennímu toku materiálu a nestejnému protváření. Častá komplikace u zápusťkových výkovků je hrubozrnná vrstva, která se obvykle nachází na povrchu a je tvořena dlouhými protaženými zrny. Tato vrstva má horší mechanické vlastnosti i korozní odolnost. Hrubozrnné vrstvy mohou mít původ ve výchozím materiálu nebo vzniknout až při následném tepelném zpracování. [3], [11]

## 7 Tepelné zpracování hliníku

ČSN 42 0056 definuje tepelné zpracování hliníku a jeho slitin jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury/substruktury a vlastností. [12]

### 7.1 Žíhání

#### Žíhací cyklus:

- Ohřev – zvyšování teploty výrobku na hodnotu potřebnou pro výdrž.
- Rychlost ohřevu – vzrůst teploty ohřívaného výrobku za jednotku času.
- Výdrž – udržení výrobku na konstantní teplotě potřebnou pro dané tepelné zpracování.
- Ochlazování – ochlazování výrobku na požadovanou teplotu.
- Rychlost ochlazování – pokles teploty za jednotku času.
- Kritická rychlost ochlazování – nejmenší možná rychlost ochlazování, při které po rozpouštěcím žíhání nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.

#### Žíhání ke snížení pnutí

Pohybuje se pod rekrystalizační teplotou při teplotách 300–400 °C. K poklesu vnitřního pnutí dochází již při teplotách 200-300 °C (prodleva až 8 h), účinnější je však žíhání za teplot 300-400 °C s pomalým ochlazováním, může však dojít k poklesu hodnot pevnosti. Z tohoto důvodu se většinou volí řízené ochlazování. Používá se u složitých výrobků tvářených za tepla nebo po svařování.

#### Rekrystalizační žíhání

Následuje po tváření za studena, přičemž dochází ke vzniku nové rekrystalizované struktury, z původně struktury deformované. Dochází ke snížení pevnosti a zvyšují se plastické vlastnosti původně deformovaného materiálu. Teplota se nejčastěji pohybuje v intervalu 250–500 °C. Použitá teplota závisí na chemickém složení slitiny a na velikosti deformace

za studena. Vytvrditelné slitiny je nutno ochlazovat pozvolna, protože při ochlazování na vzduchu by mohlo dojít k částečnému přesycení tuhého roztoku. Nevytvrditelné slitiny se mohou ochlazovat přímo na vzduchu. Během rekrystalizačního žíhání dochází ke třem dějům: zotavení, rekrystalizaci a růstu zrna.

### **Stabilizační žíhání**

Tepelné zpracování, které se provádí za účelem stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a rozměrů výrobku. Provádí se u výrobků, jenž budou pracovat za zvýšené teploty, nebo když bude docházet k ohřevům, například třením. Z tohoto důvodu musí být teplota žíhání vyšší než předpokládaná teplota provozu součásti. Obvykle žíhací teplota nabývá hodnot 240–350 °C.

### **Žíhání s částečnou rekrystalizací**

Tepelné zpracování za studena tvářených výrobků vedoucí ke vzniku částečně rekrystalizované struktury, kde se také nachází určitý podíl tvářené struktury. Aplikují se stejné teploty jako u rekrystalizačního žíhání 250–500 °C, ale kratší doba výdrže.

### **Žíhání homogenizační**

Spočívá v ohřevu na poměrně vysoké teploty, tato teplota není přesně stanovena a určuje se podle dané slitiny, které se mohou blížit až k teplotě solidu. Jeho cílem je odstranit nebo zmenšit difuzními procesy chemickou heterogenitu. Existuje i dvojstupňová homogenizace, což je způsob, při kterém po sobě následují dvě různé teploty výdrže. Délka žíhání záleží především na chemickém složení slitiny a její struktuře.

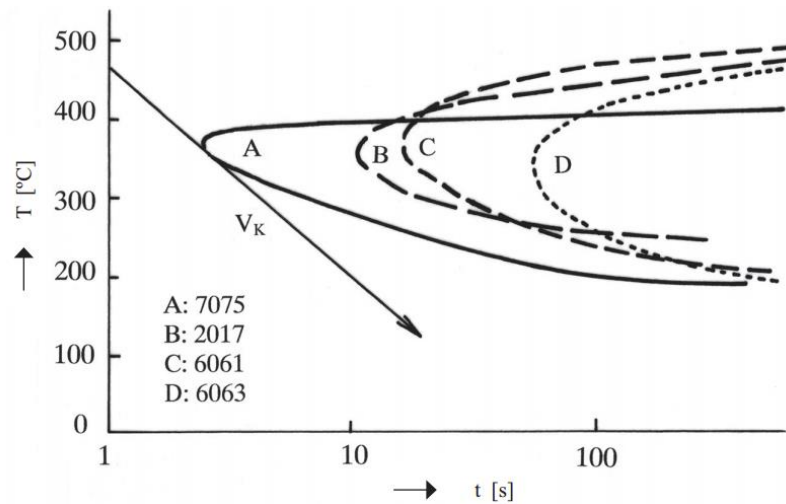
### **Žíhání vytvrzených slitin**

Dochází při něm k odpevnění materiálu. Používá se u materiálu, který je určen k dalšímu tváření. Žíhací teploty se obvykle pohybují v rozmezí 350–450 °C. [3], [9], [13]

## **7.2 Precipitační vytvrzování**

Vytvrzováním lze měnit mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitin. Teploty precipitačního vytvrzování se stanoví podle příslušné slitiny. Slitiny musí mít výraznou změnu rozpustnosti legujících prvků na teplotě, dle příslušného diagramu. Vytvrzování se skládá ze dvou částí, které se navzájem ovlivňují.

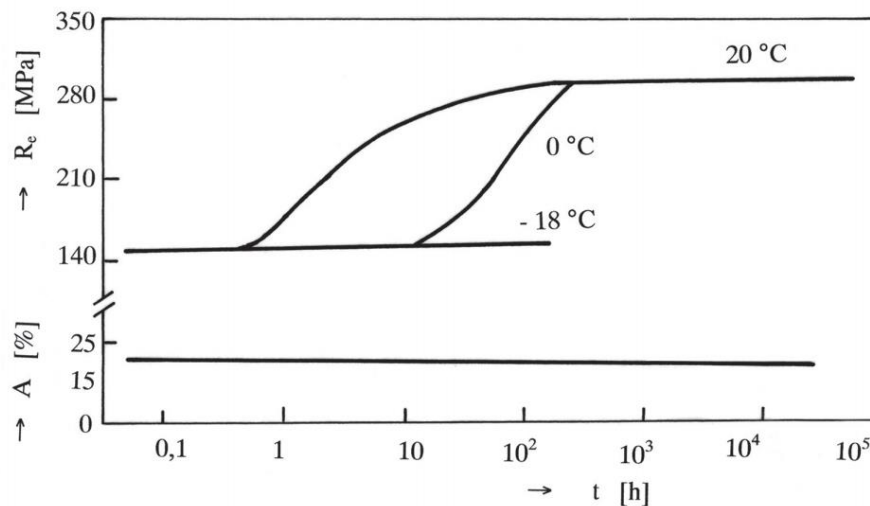
Proces precipitačního vytvrzování se skládá z ohřevu na rozpouštěcí teplotu, výdrže po dobu potřebnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku a následného ochlazení kritickou nebo nadkritickou teplotou k získání přesyceného tuhého roztoku. Tento proces probíhá stejně jako kalení u ocelí. Kritická rychlost ochlazování ( $v_k$ ) se určí pomocí „C“ křivky, která je jiná pro každou slitinu. Na obr. 5 jsou uvedeny C křivky pro čtyři slitiny a kritická rychlost pro slitinu EN AW 7075. Touto rychlostí ochlazování lze dosáhnout 95 % z maximálně možné hodnoty  $R_m$ .



Obr. 5 – C křivky precipitace pro vybrané slitiny Al [3]

Rychlost ochlazování z teploty rozpouštěcího žhání má negativní vliv na zůstatkové pnutí v materiálu a na korozní vlastnosti. Korozní vlastnosti závisí na tom dojde-li při ochlazování k vyloučení precipitátu na hranicích nebo vně zrn.

Stárnutí je proces, při kterém dochází ke změně substruktury a v důsledku toho i ke změně mechanických, fyzikálních a technologických vlastností. Přírodní stárnutí se realizuje za pokojové teploty, oproti tomu umělé stárnutí se odehrává za teplot vyšších. Může se realizovat i stárnutí stupňové, což je proces tepelného zpracování po rozpouštěcím žhání uskutečněný při dvou nebo více teplotách, které se během cyklu zvyšují. Doba stárnutí závisí na chemickém složení, proto je tato doba unikátní pro každou slitinu. Pro určení doby a teploty stárnutí musíme znát křivky kinetiky rozpadu pro konkrétní slitinu. Pro příklad je zde uvedena kinetika rozpadu slitiny EN AW 2024 (obr.6).



Obr. 6 – Kinetika rozpadu přesyceného tuhého roztoku slitiny EN AW 2024 [3]

Z uvedeného obrázku se dají vyčíst čtyři důležité informace

- Rozpad přesyceného tuhého roztoku se při záporných teplotách neuskuteční.
- Nukleace rozpadu přesyceného roztoku při 0 °C je opožděná.
- Rozpad přesyceného tuhého roztoku je z technického hlediska ukončena cca po 3 dnech.
- Plastické vlastnosti – tažnost se podstatně nemění.

Pro umělé stárnutí platí 3 základní pravidla:

- Čím vyšší teplota umělého stárnutí, tím dříve se dosáhnou maximální pevnostní vlastnosti při této konstantní teplotě.
- Čím nižší teplota umělého stárnutí, tím později se dosáhnou maximální pevnostní vlastnosti při této konstantní teplotě.
- Čím je teplota umělého stárnutí vyšší, tím jsou maximálně dosažitelné vlastnosti nižší. [3], [9], [13]

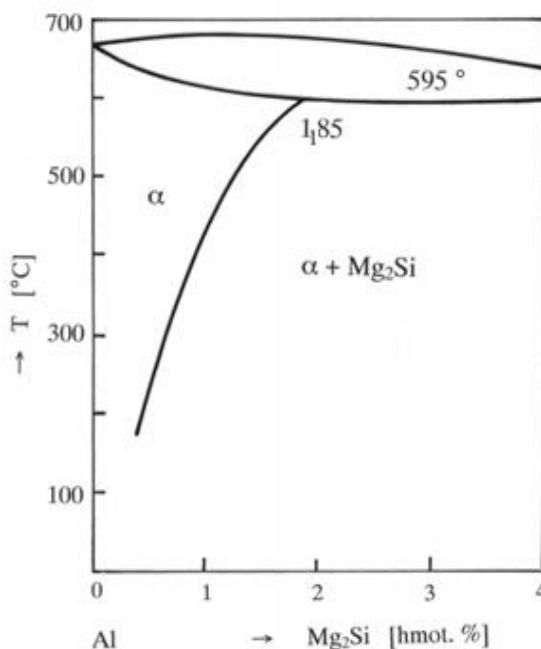
### 7.3 Tepelné zpracování slitin série 6000

Obsah legujících prvků nesmí překročit dovolený obsah (tab. 6).

Tab. 6 – Obsah legujících prvků [3]

Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Zn	B, Ti, Zr	Pb, Bi, Sn
0,2-1,5 %	0,2-2,0 %	0-1,5 %	0-0,5 %	0-2,0 %	0-2,5 %	0-0,3 %	0-1,0 %

Slitiny jsou schopny vytvrzování v důsledku změny rozpustnosti intermetalické fáze  $Mg_2Si$  v hliníku v závislosti na teplotě (Obr. 7).



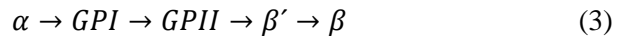
Obr. 7 - Diagram Al –  $Mg_2$  – Si [3]

Z uvedeného diagramu se dají vyčíst podmínky rozpouštěcího žíhání všech slitin tohoto typu. Slitiny série 6000 se ale dají dále dělit na dvě skupiny, podle přebývajícího množství Mg či Si v intermetalické fázi  $Mg_2Si$ :

- Slitiny s přebytkem Mg mají zvýšenou odolnost vůči korozi, zhoršenou tvářitelnost v porovnání se slitinami s přebytkem Si.
- Slitiny s přebytkem Si. Mají vyšší pevnostní vlastnosti vůči slitinám s přebytkem Mg a zhoršenou svařitelnost.

Teplota rozpouštěcího žíhání je 500–540  $^{\circ}C$ . Vzhledem k vysoké stabilitě tuhého roztoku (zvláště u slitin s přebytkem Mg) jsou slitiny samokalitelné. Což znamená, že přesycený tuhý roztok lze získat i při ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání na vzduchu. U slitiny s vyšším přebytkem Si se musí ochlazovat ve vodě.

V technických slitinách se rozpad přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$  až na rovnovážný stav realizuje pouze umělým stárnutím podle (3).



Kde: GPI – jsou neuspořádané zóny jehlicového tvaru  
GPII – uspořádané zóny jehlicového tvaru  
 $\beta'$  - částečně koherentní intermetalická fáze  
 $\beta$  – nekoherentní intermetalická fáze  $Mg_2Si$

Umělé stárnutí se uskutečňuje při teplotách 160–180 °C. Prodleva na uvedených teplotách bývá v intervalu 8–12 hodin. Doporučuje se umělé stárnutí realizovat okamžitě po ochlazení z teploty rozpouštěcího žíhání, nebo až po delší době. Slitiny při krátké prodlevě nezískávají chtěné vlastnosti. Příčina tohoto jevu nebyla doposud teoreticky vysvětlena.

Homogenizace se může realizovat v intervalu teplot 460–540 °C a jeho volba je závislá na chemickém složení. Většinou se ale neprovádí. Teplota rekrystalizačního žíhání je obvykle volena v rozmezí 330–430 °C. [3]

## 8 Experimentální část

Na dodaných vzorcích hliníkových slitin EN AW 6082 a EN AW 6110 byla provedena světelná mikroskopie, elektronová mikroskopie, změřena velikost zrna a bylo provedeno vyhodnocení. Každá slitina byla zkoumána v příčném a podélném řezu.

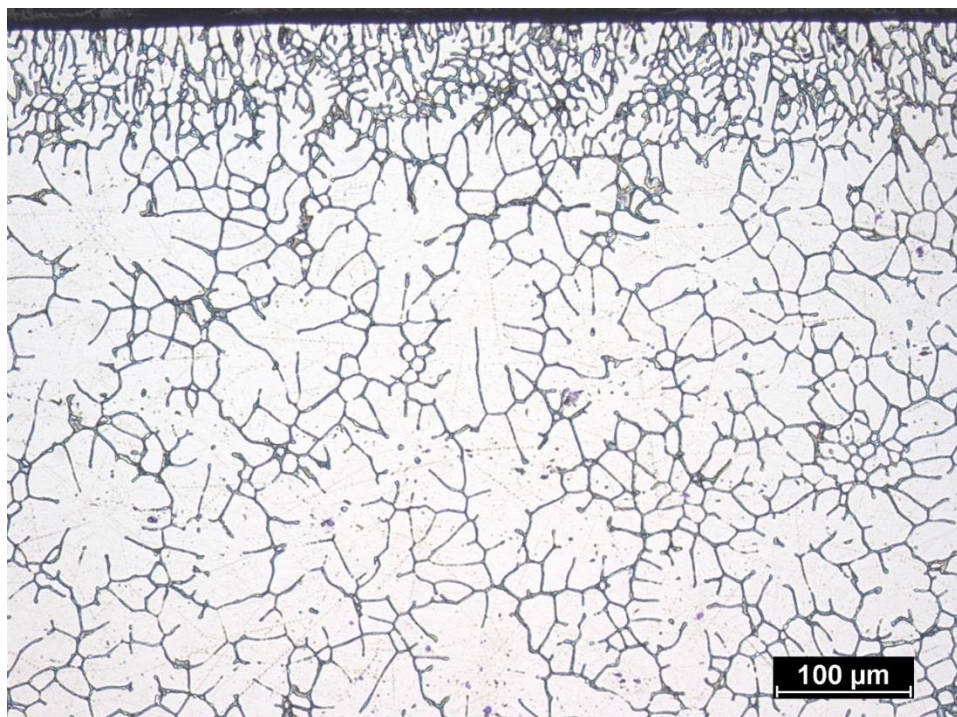
### 8.1 HCM polotovary

Dodané polotovary byly po dodání nafoceny a označeny. Poté byly nařezány a zality do bakelitu. Následně byl proveden výbrus, leštění a vyvolání struktury. Vyvolání struktury bylo dosaženo pomocí leptadel Dix-Keller a Weck. [14]

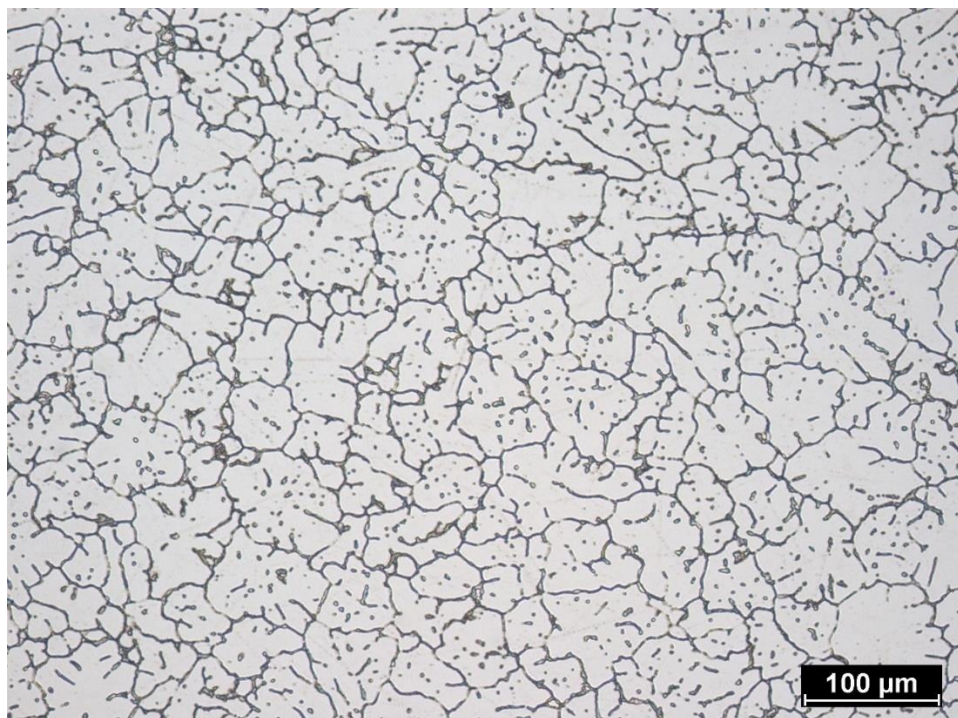
#### 8.1.1 Světelná mikroskopie

Z fotografií struktur (obr. 9, 10, 12, 13), je patrné, že velikost zrna u obou slitin je ve většině průřezu neměnná. Neplatí to ovšem u struktury na povrchu polotovaru (obr. 8, 11), kde je patrná výrazně jemnozrná struktura na povrchu polotovaru. Na tuto jemnozrnou strukturu navazuje vrstva se specifickým zastoupením jemných i hrubých zrn, která přechází do velikosti, jež je typická pro zbytek polotovaru. Uvnitř zrn jsou viditelné vyloučené precipitáty, které se dále analyzovaly pomocí řádkovací elektronové mikroskopie.

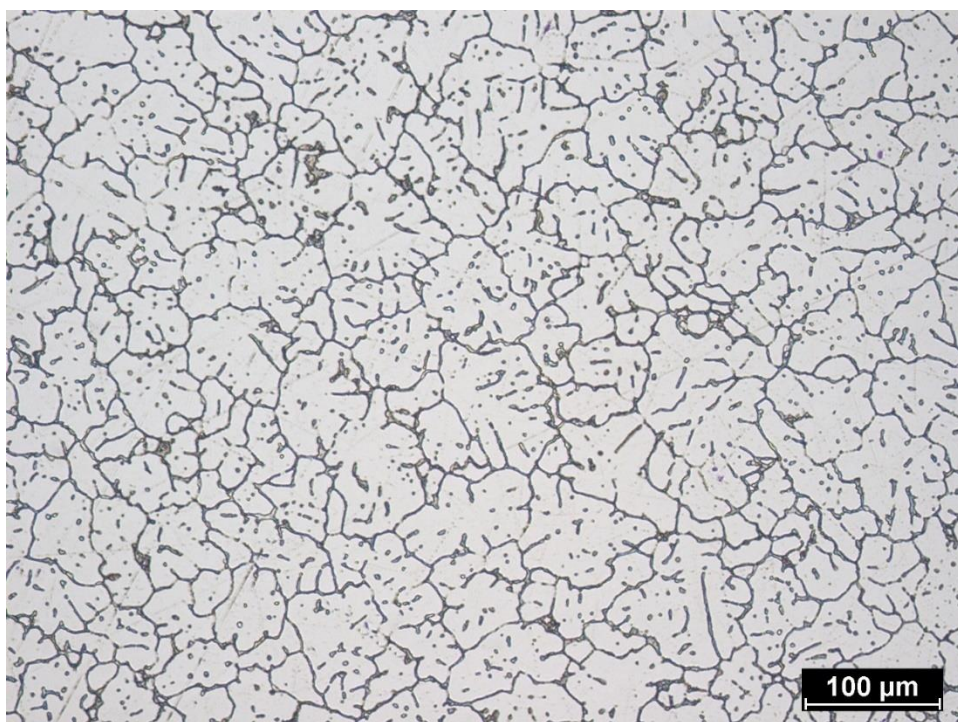
K pořízení fotografií struktur a vyhodnocení velikosti zrna byl použit software NIS – Elements AR.



Obr. 8 – Naleptaná struktura HCM slitiny EN AW 6110 na povrchu polotovaru

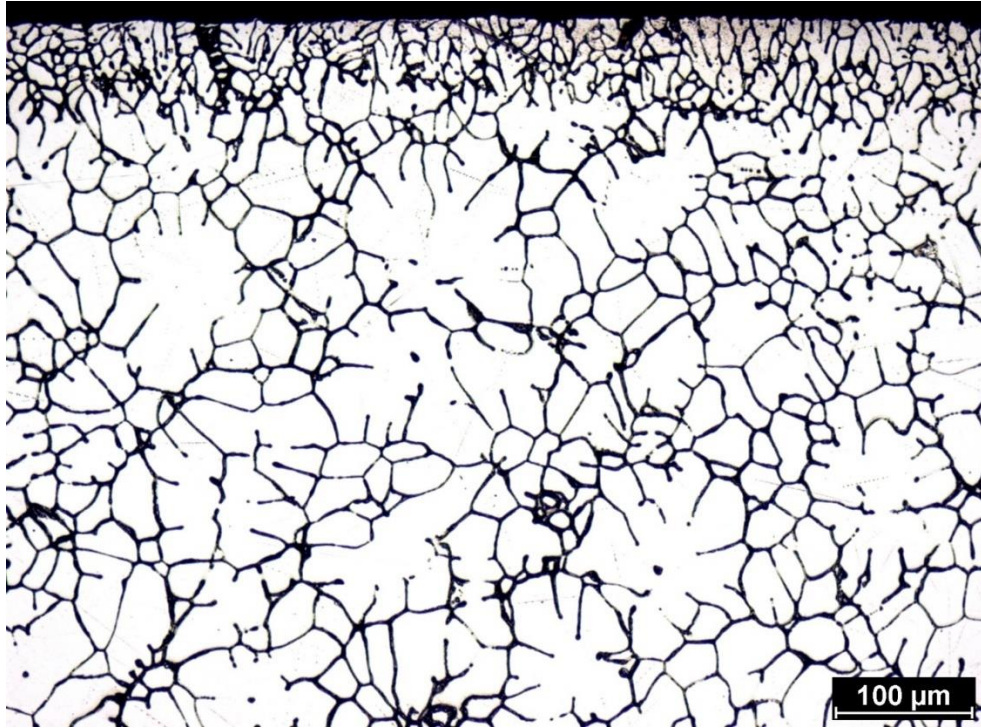


Obr. 9 – Naleptaná struktura HCM slitiny EN AW 6110 v mezilehlé oblasti polotovaru

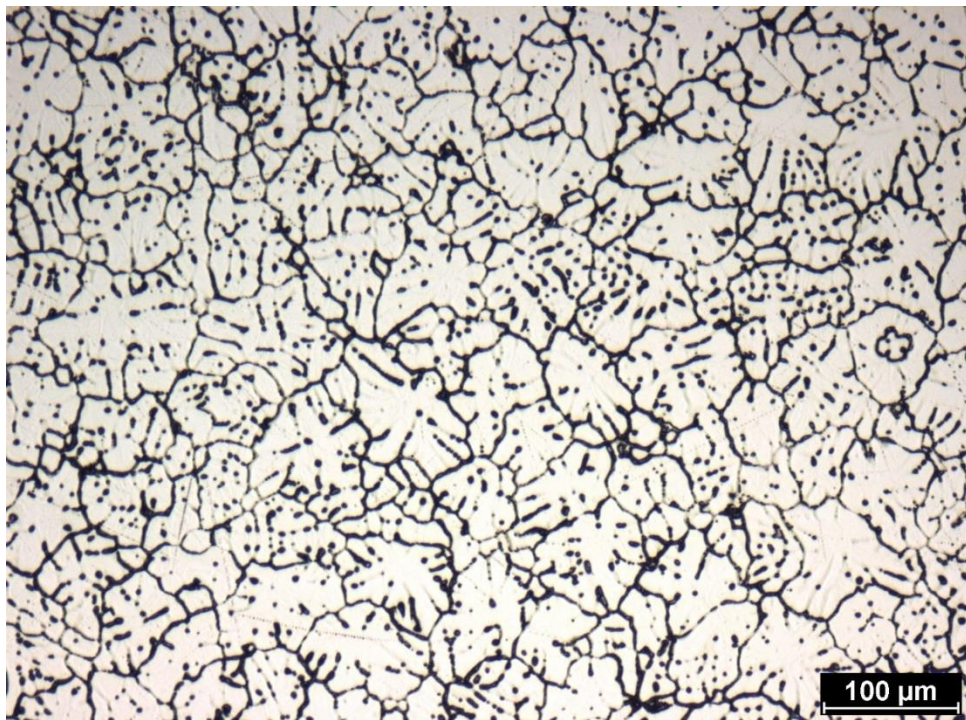


Obr. 10 – Naleptaná struktura HCM slitiny EN AW 6110 v jádře polotovaru

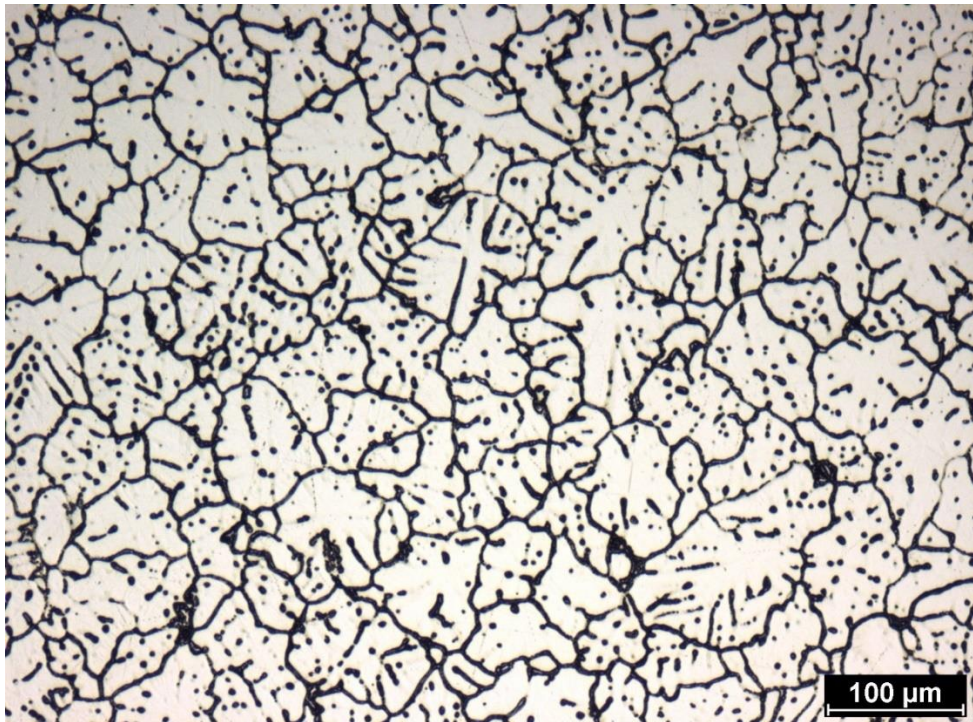




Obr. 11 – Naleptaná struktura HCM slitiny EN AW 6082 na povrchu polotovaru



Obr. 12 – Naleptaná struktura HCM slitiny EN AW 6082 na mezilehlé oblasti polotovaru



Obr. 13 – Naleptaná struktura HCM slitiny EN AW 6082 v jádře polotovaru

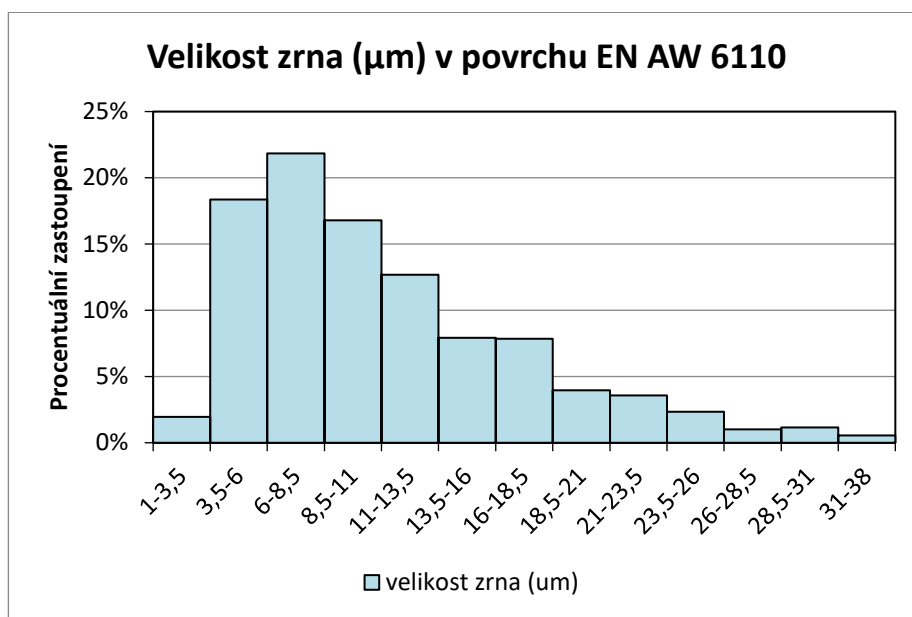
## 8.1.2 Velikost zrna

Velikost zrna výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti, čím je docíleno jemnější struktury, tím jsou lepší mechanické vlastnosti. Měření byla provedena vždy na pěti vzorcích z každé oblasti, jádro, mezilehlá oblast a povrch polotovaru. Výsledky byly zpracovány ve formě histogramu velikosti zrna a četnosti velikosti zrn. (obr 14-29).

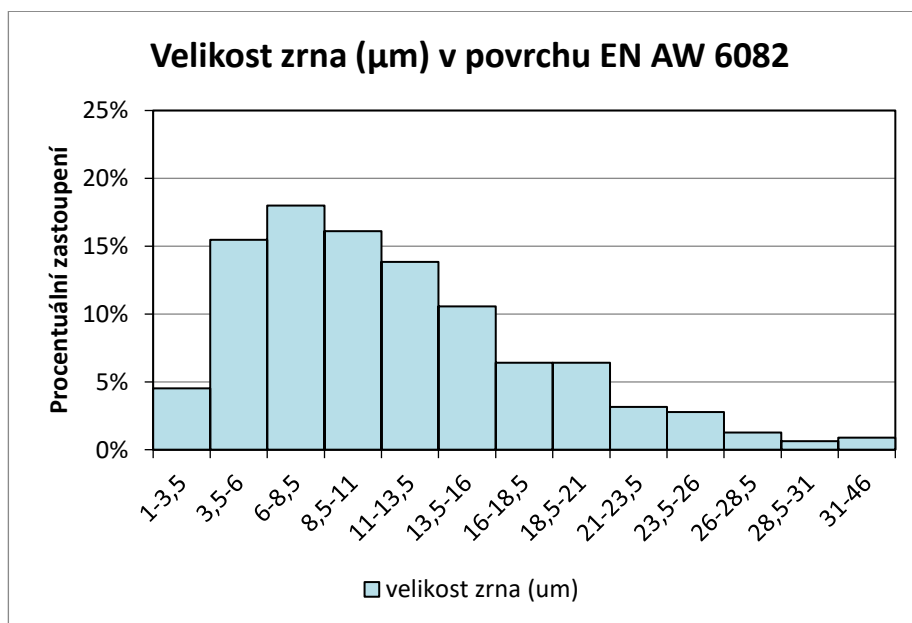
### Povrchová oblast

Z důvodu velkých rozdílů ve velikost zrn, bylo vyhodnocení provedeno na dvě části. První část je vyhodnocení pro výrazně jemnozrnnou povrchovou vrstvu. V druhé části byla vyhodnocena navazující hrubozrnná vrstva.

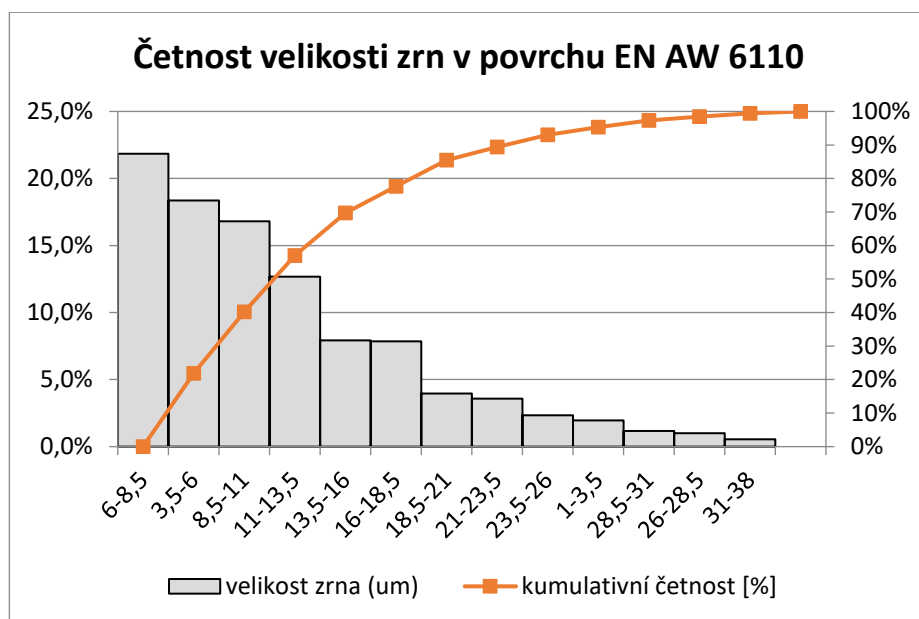
### Jemnozrnná vrstva



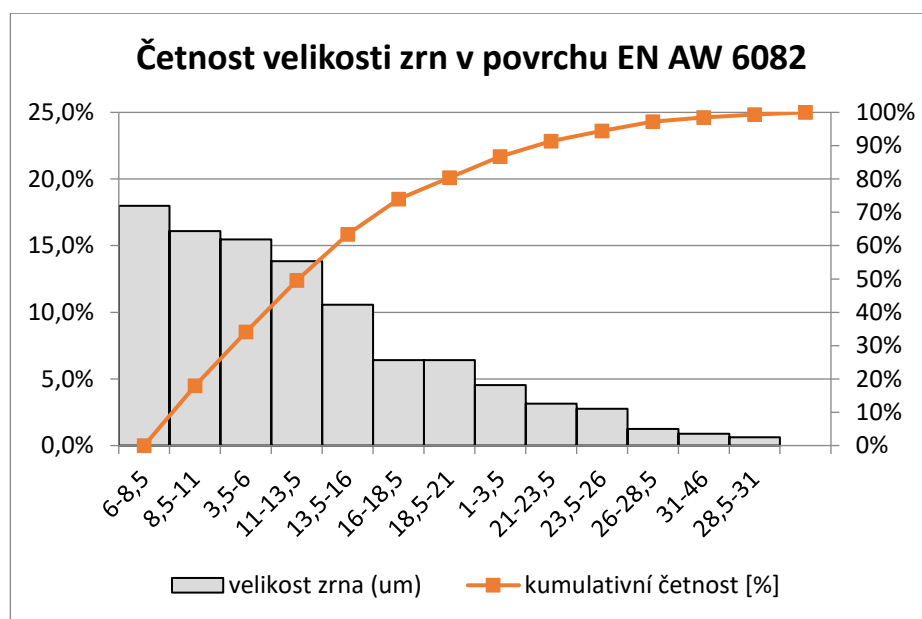
Obr. 14 – Histogram velikosti zrna v povrchu EN AW 6110



Obr. 15 – Histogram velikosti zrna v povrchu EN AW 6082



Obr. 16 – Graf četnosti velikosti zrna v povrchu EN AW 6110



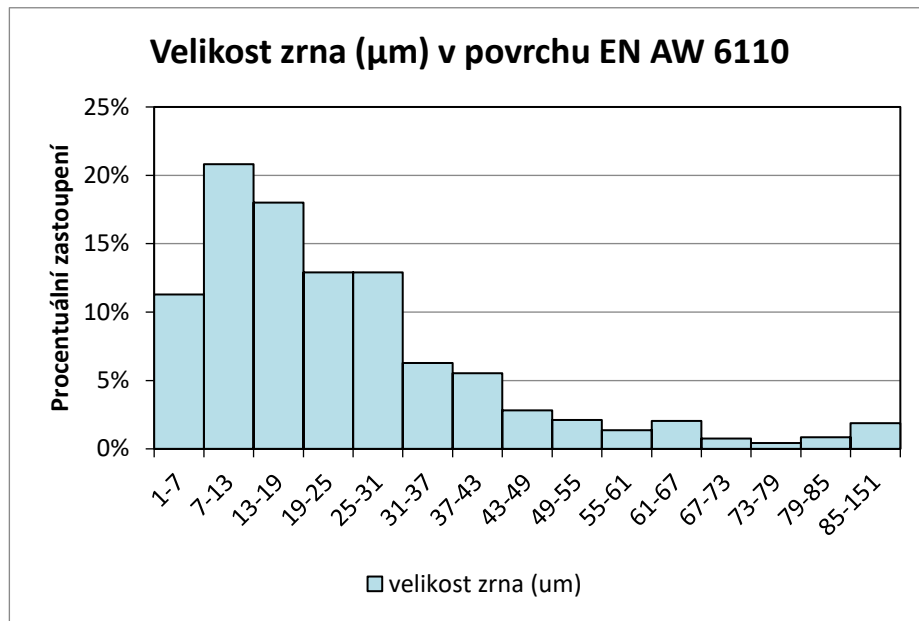
Obr. 17 – Graf četnosti velikosti zrna v povrchu EN AW 6082

Z uvedených histogramů (obr 14–17) je patrné, že zrna slitiny EN AW 6110 jsou jemnější, než je tomu u slitiny EN AW 6082, která je ovšem více stabilní.

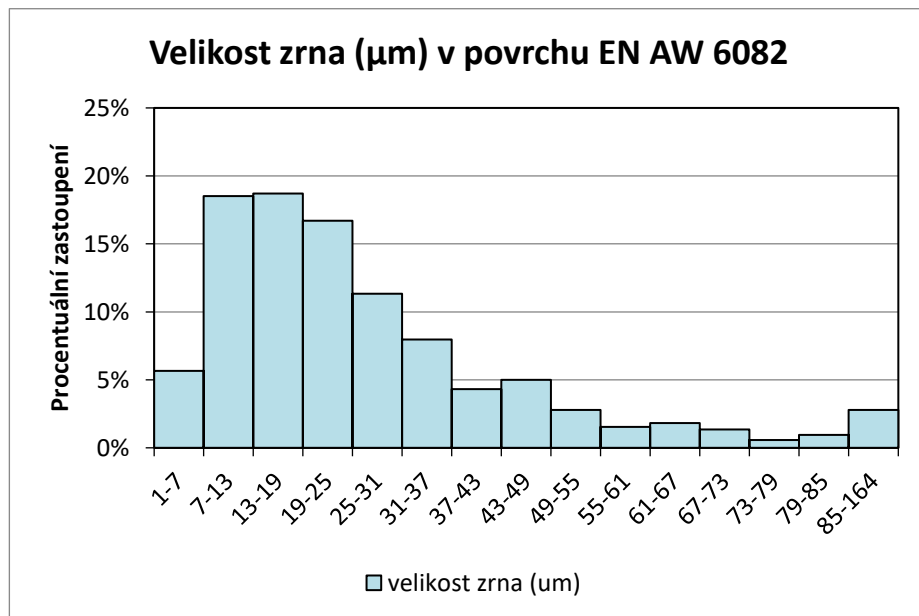
Průměrná šířka pásu jemnozrné struktury na povrchu polotovaru u EN AW 6110 je 106  $\mu\text{m}$ .

Průměrná šířka pásu jemnozrné struktury na povrchu polotovaru u EN AW 6082 je 75  $\mu\text{m}$ .

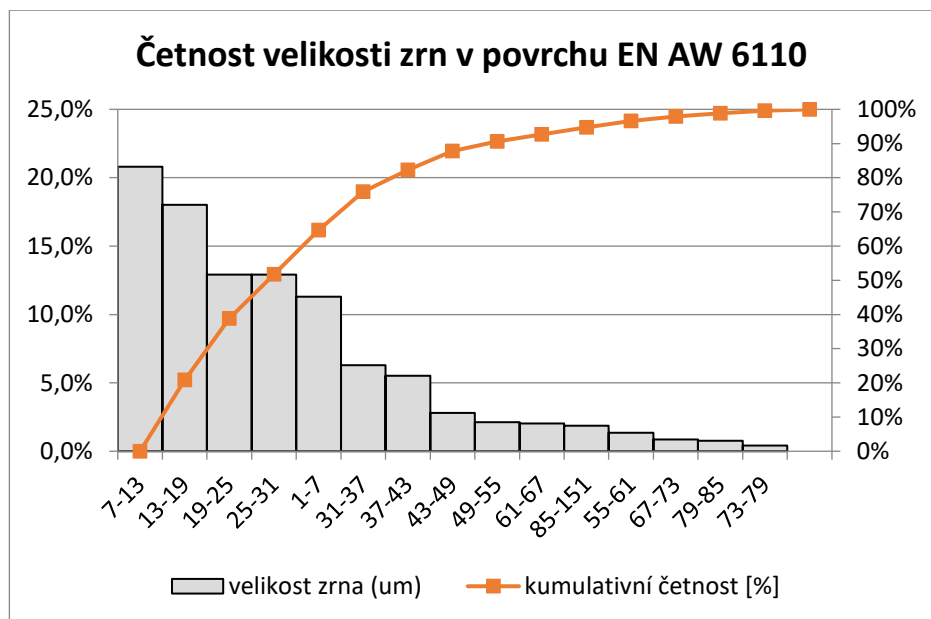
## Hrubozrná vrstva



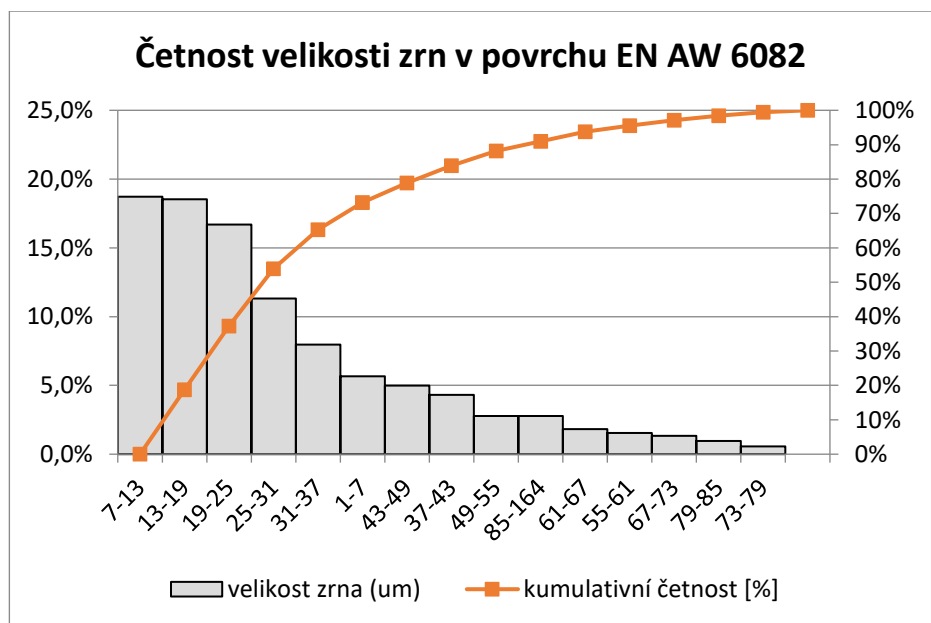
Obr. 18 – Histogram velikosti zrna v povrchu EN AW 6110



Obr. 19 – Histogram velikosti zrna v povrchu EN AW 6082



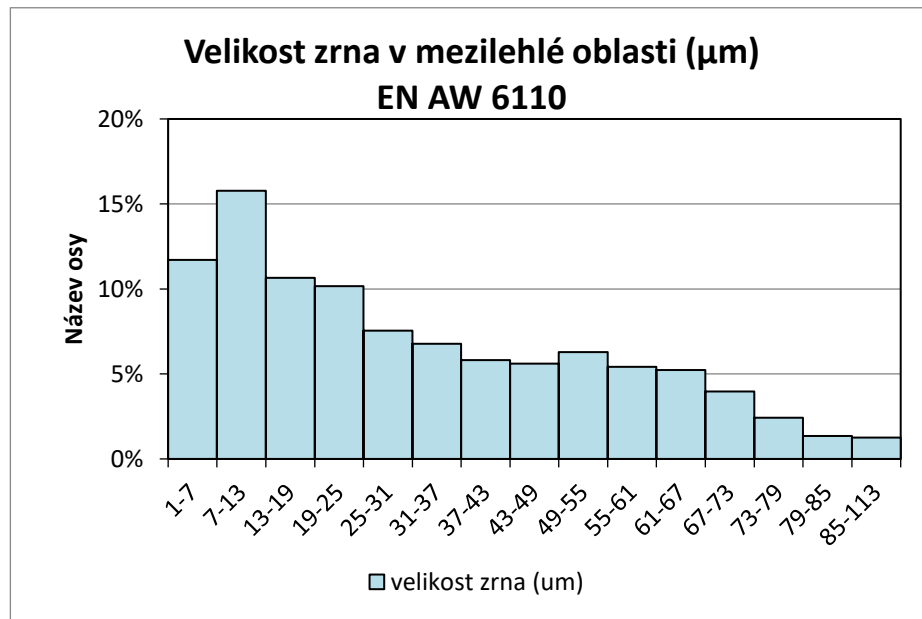
Obr. 20 – Graf četnosti velikosti zrna v povrchu EN AW 6110



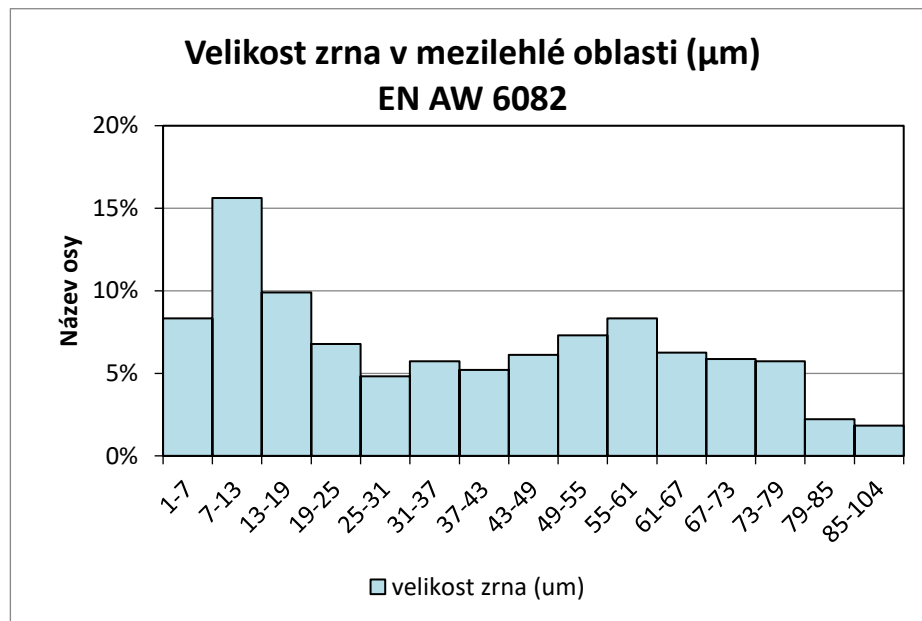
Obr. 21 – Graf četnosti velikosti zrna v povrchu EN AW 6082

Z uvedených histogramů (obr 18–21) je patrný velmi podobný průběh velikosti zrn u obou slitin. Slitina EN AW 6110 však v pozorované struktuře vykazuje více jemných zrn.

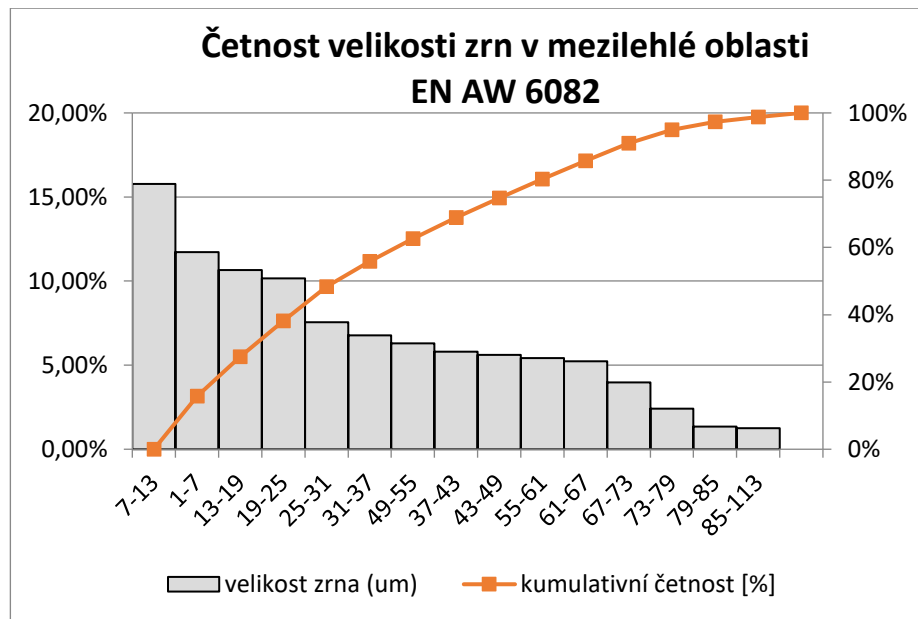
## Mezilehlá oblast



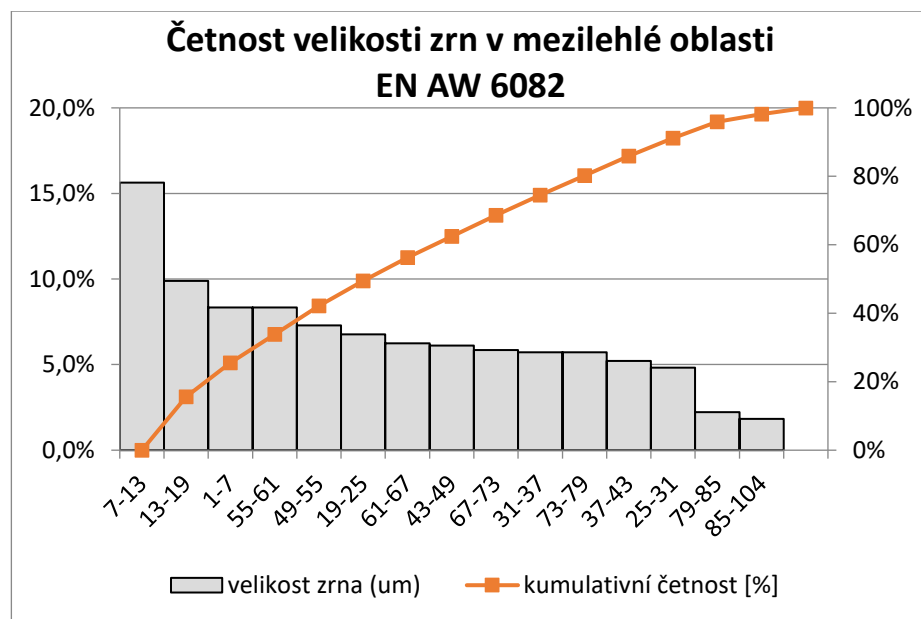
Obr. 22 – Histogram velikosti zrna v mezilehlé oblasti EN AW 6110



Obr. 23 – Histogram velikosti zrna v mezilehlé oblasti EN AW 6082



Obr. 24 – Graf četnosti velikosti zrna v mezilehlé oblasti EN AW 6110

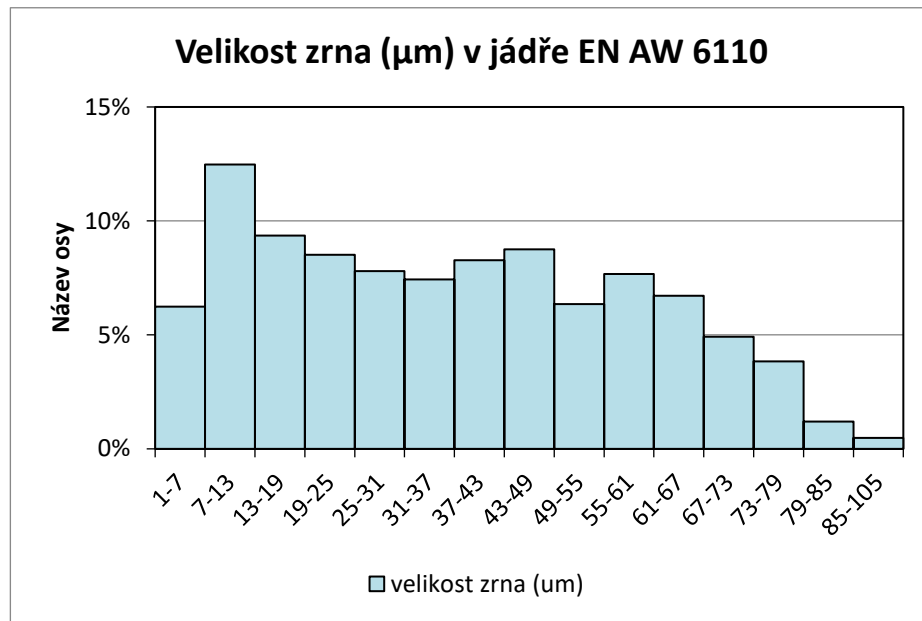


Obr. 25 – Graf četnosti velikosti zrna v mezilehlé oblasti EN AW 6082

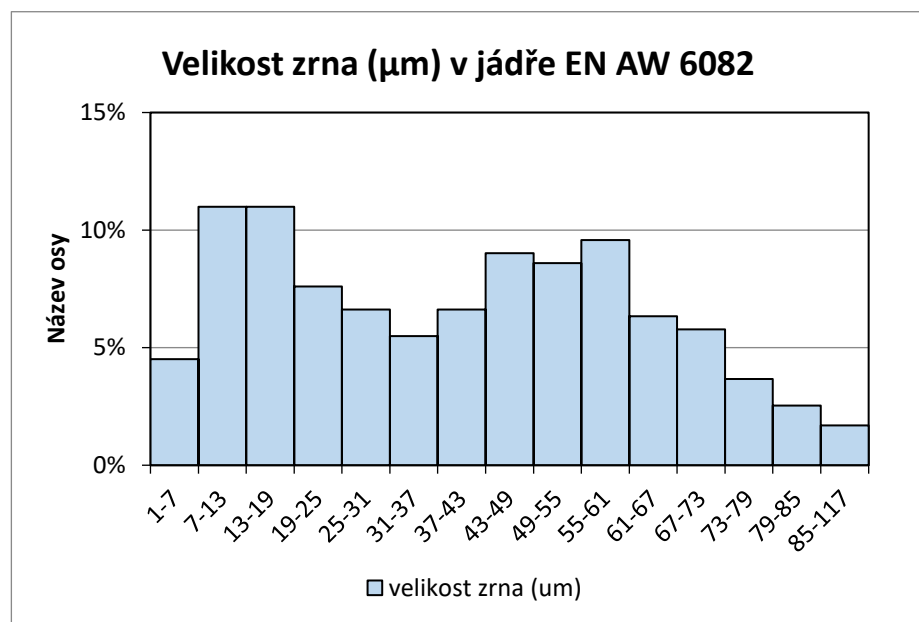
Z uvedených histogramů (obr 22–25) je zřejmé zastoupení jemných i hrubých zrn, kdy na histogramu vznikají dvě maxima. Je patrné, že struktura EN AW 6082 je v mezilehlé oblasti více hrubozrnná, než u slitiny EN AW 6110.



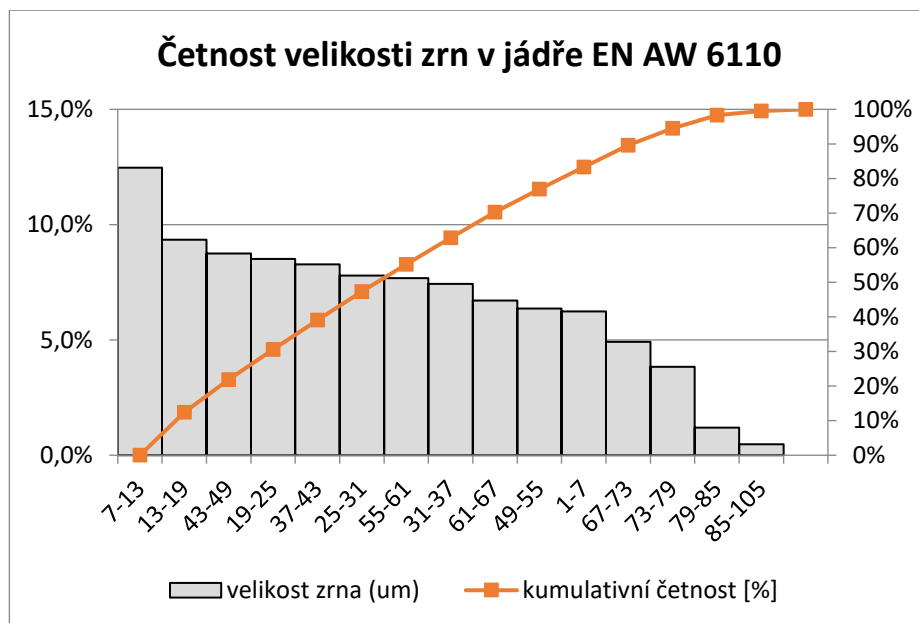
## Oblast jádra



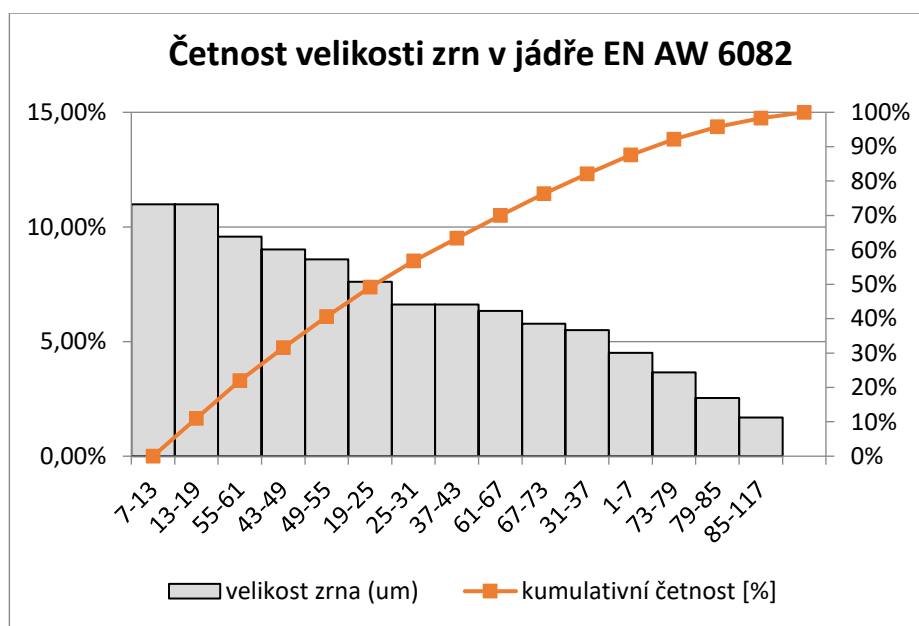
Obr. 26 – Histogram velikosti zrna v jádře EN AW 6110



Obr. 27 – Histogram velikosti zrna v jádře EN AW 6082



Obr. 28 – Graf četnosti velikosti zrna v jádře EN AW 6110



Obr. 29 – Graf četnosti velikosti zrna v jádře EN AW 6082

Z uvedených histogramů (obr 26–29) je patrné zastoupení jemných i hrubých zrn, kdy na histogramu vznikají dva vrcholy. Je zřejmé, že struktura slitiny EN AW 6082 je v jádře více hrubozrná, než u slitiny EN AW 6110.

## Hodnocení

Z výsledků měření velikosti zrna obou slitin je zřejmé, že povrchová vrstva slitiny EN AW 6082 je užší, stabilnější a hrubozrnější ( $t \approx 65 \mu\text{m}$ ,  $d_m \approx 11 \mu\text{m}$ ) oproti slitině EN AW 6110 ( $t \approx 106 \mu\text{m}$ ,  $d_m \approx 10 \mu\text{m}$ ). Ve zbývajících částech průřezu je zrno slitiny EN AW 6110 ( $d_{mp} \approx 19 \mu\text{m}$ ,  $d_{mm} \approx 26 \mu\text{m}$ ,  $d_{mj} \approx 35 \mu\text{m}$ ) jemnější a stejnoměrnější než slitina EN AW 6082 ( $d_{mp} \approx 21 \mu\text{m}$ ,  $d_{mm} \approx 36 \mu\text{m}$ ,  $d_{mj} \approx 41 \mu\text{m}$ ).

### 8.1.3 Elektronová mikroskopie

Pro analýzu fázového složení byly použity naleptané vzorky. Měření probíhalo na řádkovacím elektronovém mikroskopu. Byla provedena tři měření na povrchu, mezilehlé oblasti a v jádře. Měření byly jednotlivé fáze a kompletní mapa hodnocené oblasti.

#### EN AW 6110

Směrné chemické složení této slitiny je uvedeno v tab 7.

Tab. 7 – Obsah prvků ve slitině EN AW 6110 [15]

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]	Residuals [%]
Min	0,5	94,4	0,7	0,04	0,2	0	0,2	0	0
Max	1,1	98,4	1,5	0,25	0,7	0,8	0,7	0,3	0,15

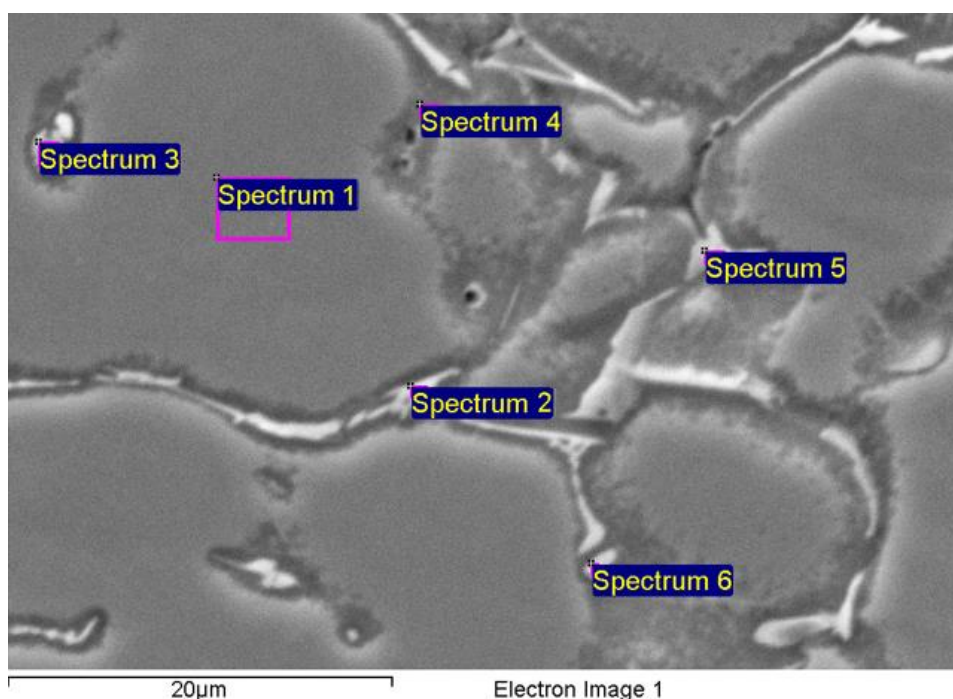
Celkový obsah prvků zjištěný z fázových map ve slitině není po průřezu vzorku homogenní. Hodnoty pro jednotlivé pozorované oblasti jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 – Naměřený obsah prvků ve slitině EN AW 6110 metodou EDS

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	1,4	92,49	2,67	0,06	0,54	0,4	2,36	0,08
Mezilehlá oblast	0,87	95,52	1,4	0,09	0,47	0,2	1,37	0,08
Jádro	0,69	95,61	1,54	0,1	0,41	0,17	1,41	0,06

Z těchto výsledků je patrné, že povrchová vrstva vykazuje rozdílné složení oproti mezilehlé vrstvě a jádru. Na rozdíl od výsledků v tab.7 se naměřené hodnoty výrazně liší v obsahu Cu a to ve všech vyhodnocovaných oblastech. Obsah křemíku a hořčíku je značně zvýšený pouze v povrchu polotovaru, dále je jeho obsah v souladu s hodnotami z tab. 7.

Pro každou oblast byla provedena tři měření, kdy Spectrum 1 představuje matici (tuhý roztok  $\alpha$ ) a následující pozice reprezentují měření minoritních fází (obr. 30).



Obr. 30 – Vybraná spektra pro měření

Naměřená data byla roztržena podle chemického složení do pěti kategorií, dle obr. 30 (tab.9). Tabulka uvádí průměrné hodnoty těchto fází. Detailnější rozpis obsahu prvků v závislosti na poloze od povrchu vzorku je uveden v tab. 10-14.

Tab. 9 – Průměrný obsah prvků ve fázích měřený metodou EDS (%hm)

Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Matrice	0,65	97,42	0,59	0,06	0,38	0,03	0,86	0,03
Spectrum 2, 5	2,32	73,44	11,16	0,17	2,56	4,47	5,32	0,19
Spectrum 3	7,69	69,25	12,09	0,04	0,30	0,35	10,09	0,19
Spectrum 4	1,46	68,00	19,97	0,07	0,50	0,32	9,46	0,21
Spectrum 6	1,26	87,40	3,65	0,16	0,40	0,27	6,74	0,20

Tab. 10 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Matrice (1)	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	0,72	97,46	0,55	0,03	0,40	0,00	0,96	0,04
Mezilehlá oblast	0,63	97,30	0,64	0,08	0,38	0,06	0,85	0,05
Jádro	0,61	97,50	0,58	0,07	0,36	0,03	0,80	0,02

Tab. 11 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 2, 5 Al-Si-Cu-Fe	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	1,63	71,83	11,74	0,16	2,82	5,27	4,86	0,26
Mezilehlá oblast	1,98	73,30	11,27	0,25	3,02	4,49	5,54	0,14
Jádro	3,26	74,70	10,50	0,11	1,98	3,66	5,62	0,16

Tab. 12 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 3 Al-Si-Cu-Mg	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	6,78	71,05	11,11	0,02	0,17	0,07	10,57	0,22
Mezilehlá oblast	6,92	73,69	10,43	0,04	0,30	0,37	8,09	0,18
Jádro	9,82	62,12	15,22	0,07	0,49	0,77	11,38	0,16

Tab. 13 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 4 Al-Si-Cu(Mg)	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	1,08	69,53	19,72	0,00	0,10	0,08	9,28	0,19
Mezilehlá oblast	2,70	55,69	26,54	0,09	0,34	0,18	14,15	0,31
Jádro	3,03	52,32	25,32	0,13	1,07	0,70	17,05	0,13

Tab. 14 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 6 Al-Cu-Si(Mg)	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	1,11	83,75	5,05	0,05	0,90	0,58	8,57	0,31
Mezilehlá oblast	1,44	91,00	3,47	0,19	0,36	0,16	3,42	0,09
Jádro	1,35	91,62	3,16	0,06	0,34	0,37	3,02	0,09

Největší rozdíly v obsahu prvků ve fázích byly zaznamenány u křemíku, hořčíku, mědi a železa.

## EN AW 6082

Směrné chemické složení této slitiny je uvedeno v tab 15.

Tab. 15 – Obsah prvků ve slitině EN AW 6082[15]

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]	Residuals [%]
Min	0,6	95,2	0,7	0	0,4	0	0	0	0
Max	1,2	98,3	1,3	0,25	1	0,5	0,1	0,2	0,15

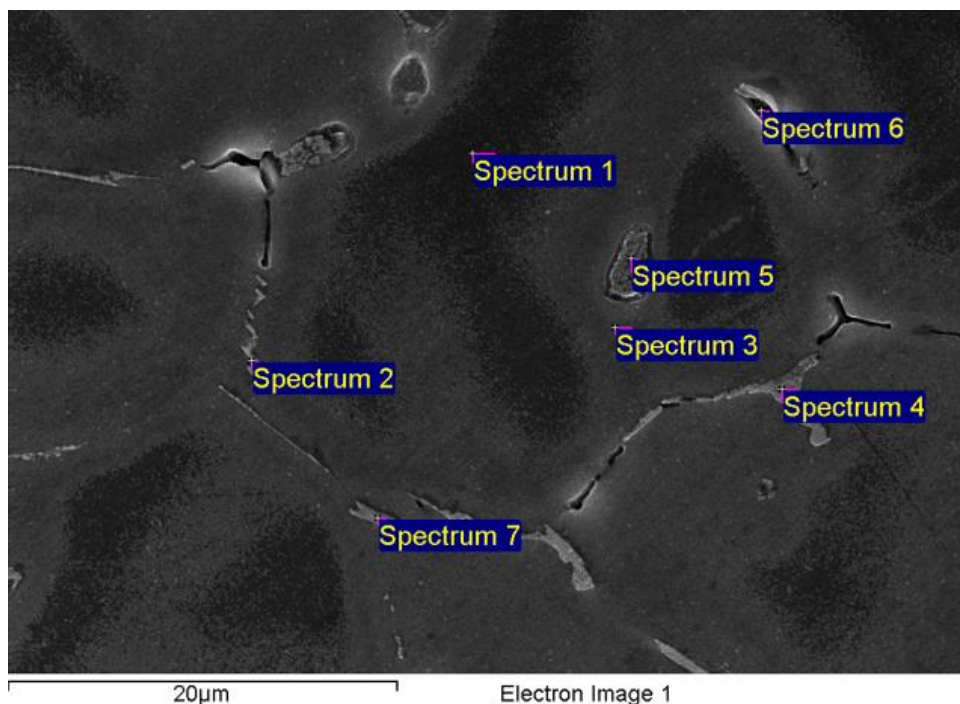
Celkový obsah prvků, zjištěný z fázových map ve slitině není homogenní po průřezu obdobně jako u předchozího vzorku. Hodnoty pro jednotlivé analyzované oblasti jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 – Změřený obsah prvků ve slitině EN AW 6082 metodou EDS

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	0,68	95,18	2,15	0,18	1,23	0,2	0,25	0,13
Mezilehlá oblast	0,59	97,01	0,97	0,16	0,9	0,07	0,16	0,11
Jádro	0,61	96,45	1,36	0,13	0,92	0,19	0,23	0,11

Z těchto výsledků je patrné, že povrchová vrstva vykazuje mírně rozdílné složení oproti mezilehlé vrstvě a jádru. Oproti hodnotám v tab.15 se naměřené hodnoty liší v obsahu Cu a to ve všech vyhodnocovaných oblastech. Obsah křemíku je výrazně zvýšený pouze v povrchu polotovaru, dále je jeho obsah v souladu s hodnotami z tab. 15.

Pro každou oblast byla provedena tři měření, kdy Spectrum 1, 3 je měření matrice a každé následující měření představuje analýzu minoritních fází (obr. 31).



Obr. 31 – Vybraná spektra pro měření pro měření slitiny EN AW 6082

Naměřená data byla roztržena podle chemického složení do pěti kategorií, dle obr. 31 (tab.17). Tabulka uvádí průměrné hodnoty těchto fází. Detailnější rozpis obsahu prvků v závislosti na poloze od povrchu je uveden v tab. 18-22.

Tab. 17 – Průměrný obsah prvků ve fázi měřený metodou EDS

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Spectrum 1	0,56	96,86	1,04	0,13	1,08	0,02	0,18	0,11
Spectrum 2	2,05	71,71	15,64	0,43	5,00	3,91	1,02	0,23
Spectrum 4	1,89	75,90	17,92	0,08	2,14	0,07	1,65	0,25
Spectrum 5	1,14	87,96	6,17	0,10	3,00	0,42	0,89	0,31
Spectrum 7	0,50	83,28	3,97	0,37	6,61	3,18	1,25	0,81

Tab. 18 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Matrice (1, 3)	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	0,52	96,58	1,17	0,14	1,19	0,01	0,21	0,12
Mezilehlá oblast	0,64	96,90	1,10	0,13	0,94	0,04	0,13	0,10
Jádro	0,52	97,08	0,85	0,12	1,11	0,02	0,18	0,11

Tab. 19 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 2 Al-Si-Mn-Fe(Mg)	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	2,74	71,18	15,85	0,42	4,62	3,73	1,25	0,18
Mezilehlá oblast	2,84	71,20	15,45	0,45	4,53	4,44	0,71	0,40
Jádro	2,31	70,73	17,14	0,42	4,43	3,74	1,07	0,16

Tab. 20 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 4 Al-Si	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	1,89	75,90	17,92	0,08	2,14	0,07	1,65	0,25
Mezilehlá oblast	-	-	-	-	-	-	-	-
Jádro	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 21 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 5, 6 Al-Si-Mn	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	1,28	89,11	6,00	0,06	2,58	0,08	0,84	0,06
Mezilehlá oblast	1,17	87,50	6,14	0,12	3,41	0,33	1,05	0,27
Jádro	1,06	86,36	6,25	0,10	4,39	0,62	0,75	0,44

Tab. 22 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Spectrum 7 Al-Mn-Si-Fe	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	-	-	-	-	-	-	-	-
Mezilehlá oblast	0,46	83,22	4,77	0,36	6,43	2,56	1,45	0,68
Jádro	0,54	83,34	3,16	0,37	6,78	3,80	1,05	0,93

Největší rozdíly v obsahu prvků ve fázích byly zaznamenány u křemíku, manganu a železa.

## **Hodnocení**

Z výsledků měření obsahu prvků ve fází a zpracování neměřených hodnot byly shodně u obou slitin určeny 4 minoritní fáze.

Pro slitinu EN AW 6110 byly určeny 4 fáze, které byly rovnoměrně zastoupeny v celém průřezu polotovaru.

Al-Si-Cu-Fe, kde obsah Cu a Mg roste se vzdáleností od povrchu a obsah Si, Fe a Mn klesá. Ostatní prvky nejsou závislé na vzdálenosti měření od povrchu.

Al-Si-Cu-Mg, kde obsah Si, Mg a Fe roste se vzdáleností od povrchu. Ostatní prvky nejsou závislé na vzdálenosti měření od povrchu.

Al-Si-Cu(Mg), kde se vzdáleností od povrchu roste obsah všech legujících a doprovodných prvků kromě Zn.

Al-Cu-Si(Mg), kde obsah Cu, Si a Mn klesá se vzdáleností od povrchu. Ostatní prvky nejsou závislé na vzdálenosti měření od povrchu.

Pro slitinu EN AW 6082 byly určeny 4 fáze, kdy Al-Si-Mn-Fe a Al-Si-Mn jsou rovnoměrně zastoupeny ve všech vyhodnocovaných částech. Fáze Al-Si se nachází pouze v povrchové vrstvě polotovaru a fáze Al-Mn-Si-Fe pouze v mezilehlé oblasti a jádře polotovaru.

Al-Si-Mn-Fe, kde obsah Si roste se vzdáleností od povrchu. Ostatní prvky nejsou závislé na vzdálenosti měření od povrchu.

Al-Si, která je zastoupena pouze v povrchu polotovaru a nelze u ní vyhodnotit závislost na vzdálenosti měření od povrchu.

Al-Si-Mn, kde obsah Mn, Fe a Zn roste se vzdáleností od povrchu. Ostatní prvky nejsou závislé na vzdálenosti měření od povrchu.

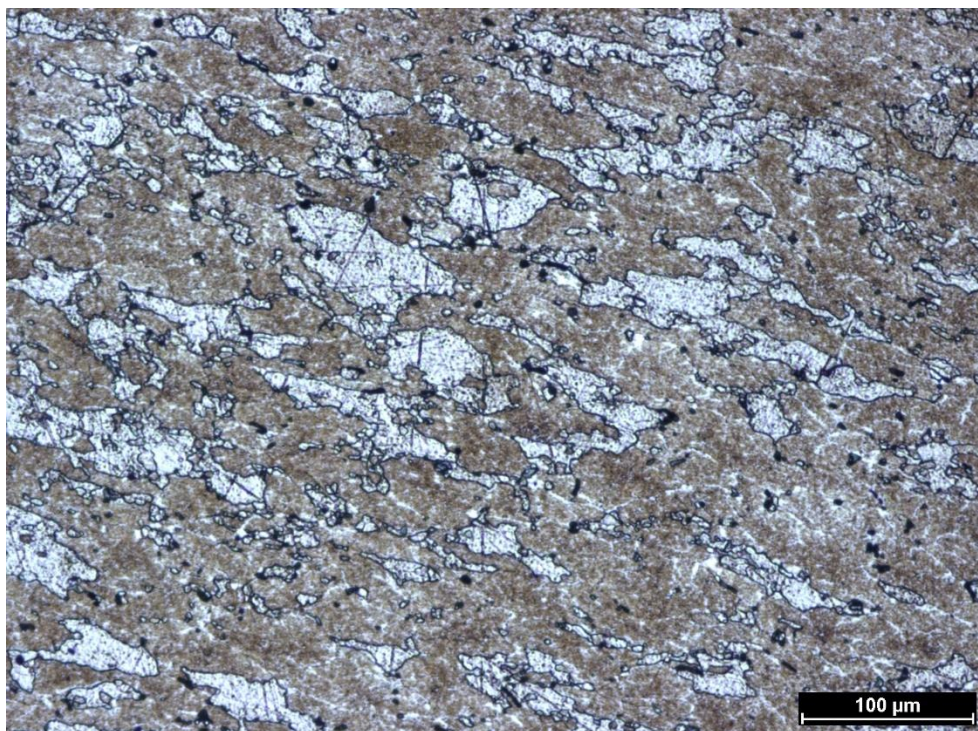
Al-Mn-Si-Fe, která je zastoupena pouze v mezilehlé oblasti a jádře polotovaru. Proto nelze rozhodnout o závislosti obsahu prvků na vzdálenosti měření od povrchu.

## **8.2 Lisované polotovary**

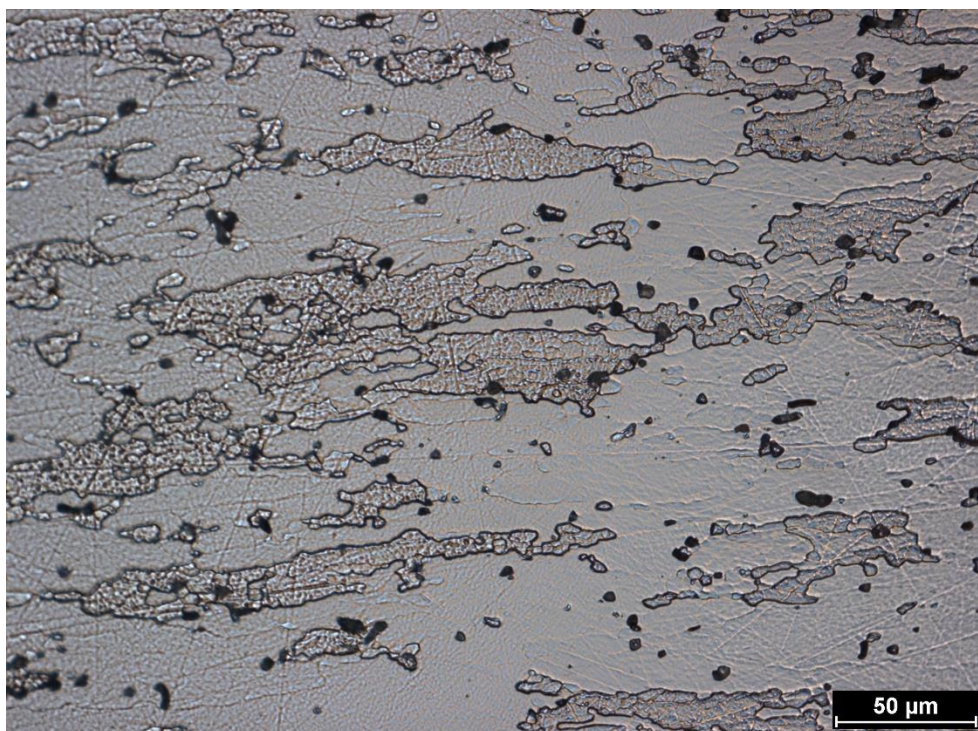
Dodané polotovary byly zdokumentovány a označeny. Poté byly nařezány a vzorky zafixovány do bakelitu. Následně byl proveden výbrus, leštění a vyvolání struktury. K vyvolání struktury byla použita leptadla Dix-Keller a Weck

### **8.2.1 Světelná mikroskopie**

Při leptání vzorků bylo postupováno stejným způsobem, jako při vzorcích vyrobených metodou HCM. Tento postup se ukázal jako neúčinný a bylo přistoupeno k jiným způsobům naleptání primární a sekundární struktury. Na fotografiích (obr. 32–36) jsou ukázky doposud nejlépe naleptaných struktur.

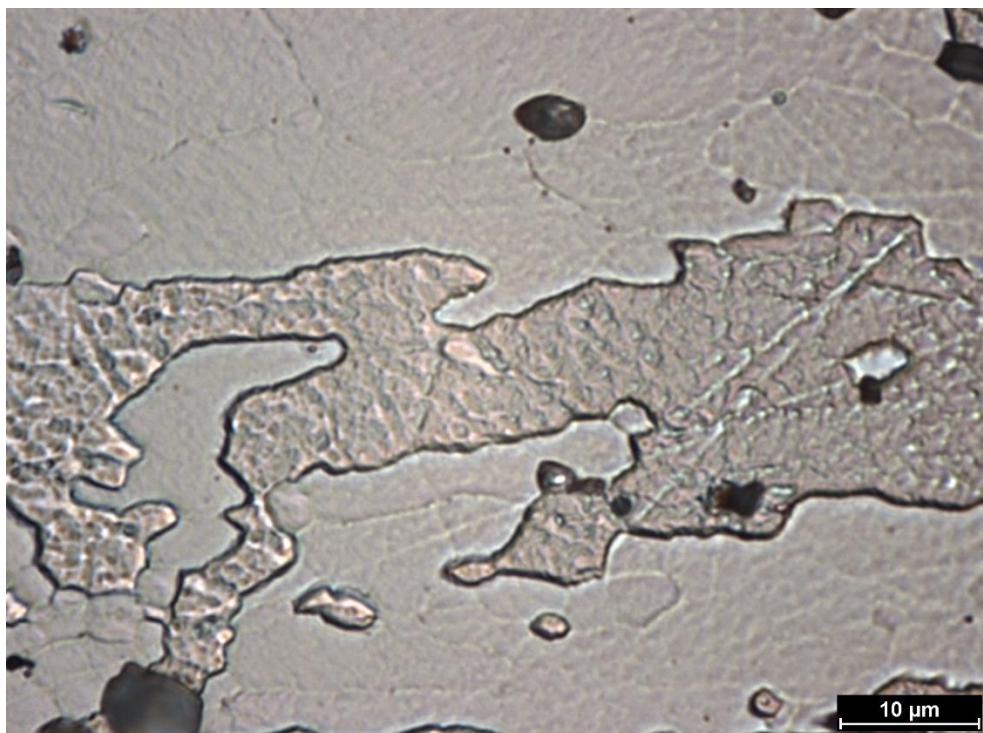


Obr. 32 – Naleptaná struktura protlačované slitiny EN AW 6110



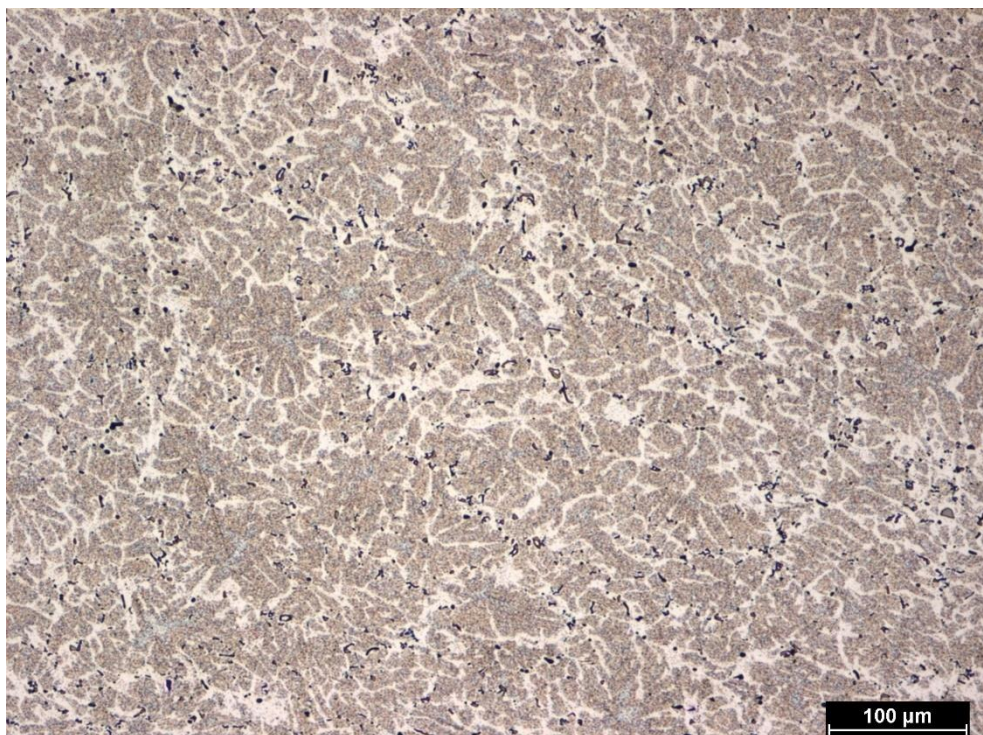
Obr. 33 – Naleptaná struktura protlačované slitiny EN AW 6110



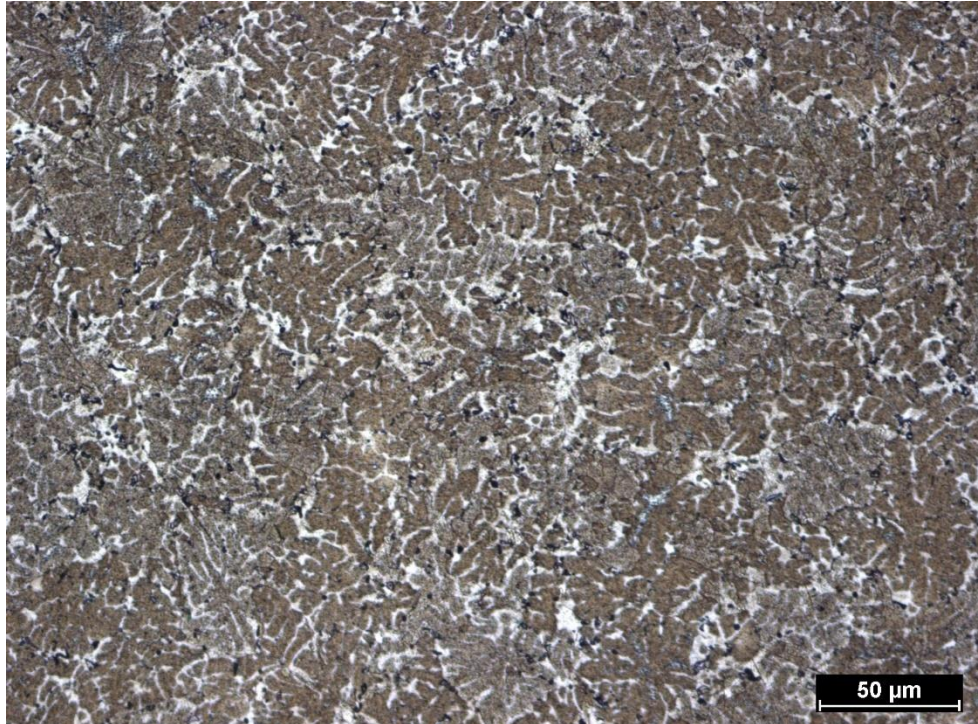


Obr. 34 – Naleptaná struktura protlačované slitiny EN AW 6110

Na snímcích (obr. 32, 33) lze vidět, že i různými způsoby leptání byla výsledná struktura, až na barvu naleptání, prakticky totožná. Na obr. 34 je patrná naleptaná struktura při zvětšení (1000x). Na tomto snímku jsou místy zřejmé náznaky hranic zrn, ale pro objektivní stanovení velikosti zrna je jejich zvýraznění nedostatečné.



Obr. 35 – Naleptaná struktura protlačované slitiny EN AW 6082



Obr. 36 – Naleptaná struktura protlačované slitiny EN AW 6082

Na snímcích (obr. 35, 36) jsou patrné náznaky hranic primárních zrn. Vzhledem k tomu, že jsou nevýrazné a neúplné a pro stanovení velikosti zrna je leptání nevyhovující. Je však zřejmé, že tato struktura bude více jemnozrná než u HCM polotovarů.

### **8.2.2 Velikost zrna**

Na dodaných slitinách vyrobených metodou průtlačného lisování nebylo z důvodů neuspokojivých výsledků zviditelnění hranic zrn stanovení velikosti zrna provedeno.

### **8.2.3 Elektronová mikroskopie**

Z důvodů poruchy řádkovacího elektronového mikroskopu a časové náročnosti analýz nebylo možné vyhodnocení minoritních fází realizovat.

## 9 Závěr

Z hodnot velikosti zrna je patrné, že při výrobě polotovaru metodou HCM má slitina EN AW 6110 mírně jemnozrnnější strukturu. U obou slitin byla zjištěna nerovnoměrná velikost primárních zrn, kdy v jádře jsou zrna větší velikosti. Obě slitiny mají na povrchu polotovaru tenkou vrstvu s výrazně jemnozrnnou strukturou. Tato vrstva má průměrnou tloušťku 106  $\mu\text{m}$  pro EN AW 6110 a 75  $\mu\text{m}$  pro EN AW 6082. I přes neprovedené měření u lisovaných polotovarů je zřejmé, že jejich struktura bude výrazně jemnozrnnější než u litých polotovarů

. Na rádkovacím elektronovém mikroskopu byl ověřen obsah legujících a doprovodných prvků ve slitinách a analyzována nehomogenita chemického složení napříč průřezem. Bylo provedeno měření minoritních fází a jejich rozřídění do kategorií dle stejného obsahu prvků. Pro slitinu EN AW 6110 byly určeny fáze: Al-Si-Cu-Fe, Al-Si-Cu-Mg, Al-Si-Cu(Mg) a Al-Cu-Si(Mg). Pro slitinu EN AW 6082 byly stanoveny fáze: Al-Si-Mn-Fe, Al-Si, Al-Si-Mn a Al-Mn-Si-Fe. U obou slitin se vyskytuje nehomogenní rozložení chemického složení jak v tuhém roztoku tak v minoritních fázích v závislosti na vzdálenosti od povrchu polotovaru. Obě slitiny shodně obsahují více mědi, než je uvedeno v předpisu chemického složení. Vzhledem k použité metodě analýzy a velikosti oblasti měření lze předpokládat vyšší podíl složení minoritních fází na celkovou naměřenou hodnotu.

Vzhledem k tomu, že se jedná o vstupní studii k dané problematice, vzniká prostor pro navázání řešení bakalářskou nebo diplomovou prací.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] *Strojmetal: 3 zmetky na 1 000 000 výrobků* [online]. Czech Trade [vid. 3. 4. 2017]  
Dostupné z:  
<http://www.businessinfo.cz/cs/clanky/strojmetal-3-zmetky-na-1-000-000-vyrobku-87143.html>
- [2] *O nás* [online]. Strojmetal Aluminum Forging s.r.o. [vid. 3. 4. 2017]  
Dostupné z:  
<http://www.strojmetal.cz/o-nas>
- [3] MICHNA, Š.: Encyklopedie hliníku. Děčín, Alcan Děčín Extrusions, 2005.  
ISBN 8089041884.
- [4] PRICE, Monica a Kevin WALSH. *Horniny a minerály: nový kapesní atlas*. 2. vyd. Přeložil Patricie FRECEROVÁ. V Praze: Slovart, 2013. Nový kapesní atlas. ISBN 9788073917609.
- [5] THRUSH, Paul W. *A dictionary of mining, mineral, and related terms*. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1968.
- [6] *Bauxite and alumina* [online] U. S. Geological Survey [vid. 5. 5. 2017]  
Dostupné z:  
<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/mcs-2016-bauxi.pdf>
- [7] *Alumina refining* [online] The Aluminum Association [vid. 5. 5. 2017]  
Dostupné z:  
<http://www.aluminum.org/industries/production/alumina-refining>
- [8] *Primary aluminum production* [online] The International Aluminum Institute [vid. 5. 5. 2017]  
Dostupné z:  
<http://www.world-aluminium.org/statistics/#data>
- [9] PTÁČEK, L.: *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd., Brno, CERM, 2002.  
ISBN 8072042483.
- [10] KŘÍŽ, R.; VÁVRA, P. *Strojírenská příručka-3.svazek*. Praha: Scientia, 1993.  
ISBN 8085827239.
- [11] Sedláček, V.: *Neželezné kovy a slitiny*. 1.vyd., Praha, SNTL, 1979.
- [12] ČSN 42 0056, *Tepelné zpracování neželezných kovů a jejich slitin. Rozdělení, názvosloví a definice*.
- [13] HATCH, John E. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, c1984. ISBN 9780871701763.
- [14] *ASM handbook*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2004. ISBN 9780871707062.
- [15] *International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys* [online] The International Aluminum Institute [vid. 27. 5. 2017]  
Dostupné z:  
[http://www.aluminum.org/sites/default/files/TEAL\\_1\\_OL\\_2015.pdf](http://www.aluminum.org/sites/default/files/TEAL_1_OL_2015.pdf)