

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv mikrostruktury polotovaru na mechanické vlastnosti slitin Al-Mg-Si
pro automobilový průmysl**

**Influence of semiproduct microstructure on mechanical properties
of Al-Mg-Si alloys used in automotive**

AUTOR: Bc. Jan Kružík

STUDIJNÍ PROGRAM: Strojní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kružík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **398114**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv mikrostruktury polotovaru na mechanické vlastnosti slitin Al-Mg-Si pro automobilový průmysl

Název diplomové práce anglicky:

Influence of semiproduct microstructure on mechanical properties of Al-Mg-Si alloys used in automotive

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretická příprava a studium odborné literatury.
2. Vlastnosti, zpracování a mikrostruktura Al-Mg-Si slitin.
3. Návrh a provedení experimentu na dodaných vzorcích.
4. Vyhodnocení experimentu, diskuse a závěry

Rozsah průvodní zprávy: 40 až 60 stran

Rozsah grafických prací a příloh dle potřeby

Seznam doporučené literatury:

- [1] ASM Speciality Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys, Editor: Joseph R. Davis, ISBN 978-0-87170-496-2
- [2] Michna, Š., et. al. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89401-88-4
- [3] Sedláček, V.: Neželezné kovy a slitiny. 1. vyd., Praha, SNTL, 1979

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jakub Horník Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

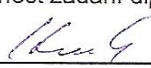
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


prof. Ing. Petr Zuna CSc. D.Eng. h. c., ústav materiálového inženýrství FS


Datum zadání diplomové práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

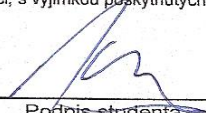

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

25.4.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Diplomová práce se zabývá vlivem mikrostruktury polotovaru na mechanické vlastnosti slitin Al-Mg-Si používaných v automobilovém průmyslu. Obsah práce je rozdělen do dvou částí. Teoretická část se zabývá výrobou hliníku a popisuje mechanické, technologické a fyzikální vlastnosti. Uvádí porovnání hliníkových slitin EN AW 6082 a EN AW 6110 včetně jejich následného zpracování. Praktická část se zabývá hodnocením polotovarů z obou slitin vyrobených metodou horizontálního lití a protlačováním. V této části je popsána příprava metalografických výbrusů a jejich leptání pro vyvolání struktury a stanovení velikosti zrna. Navazuje rozbor přítomných fází a jejich chemického složení pomocí skenovacího elektronového mikroskopu metou mikroanalýzy EDS. Z pohledu mechanických vlastností byl měřen průběh mikrotvrlosti průřezem polotovaru.

Klíčová slova

slitina hliníku, EN AW 6110, EN AW 6082, HCM (horizontální přetlakové lití), protlačování, mikrostruktura, chemické složení, mikrotvrдость

Annotation

This thesis deals with influence of semiproduct microstructure on mechanical properties of Al Mg-Si alloys used in automotive. The thesis content is divided into two parts. The first part is focused on aluminium production and describes mechanical, technological and physical properties. It provides a comparison of the aluminium alloys EN AW 6082 and EN AW 6110, including their subsequent processing. The second part – experimental part deals with evaluation of semiproduct from both alloys produced by the method of horizontal overpressure casting and extrusion. This part describes the preparation of metallographic cuttings and their etching for the formation of the structure and determination of grain size. It follows the analysis of the contain phases and their chemical composition by scanning electron microscopy by EDS microanalysis.

Keywords

aluminium alloy, EN AW 6110, EN AW 6082, horizontal overpressure casting, extrusion, microstructure, chemical composition, microhardness

Poděkování

Tímto děkuji mému vedoucímu práce Ing. Jakubovi Horníkovi, Ph.D za cenné připomínky, rady a odborné vedení při vypracování diplomové práce, konzultantovi Ing. Janu Adámkovi za věnovaný čas a konzultantce Ing. Zuzaně Říhové.

Obsah

Úvod	9
1. Přehled o výrobě hliníku	10
1.1. Bauxit	10
1.2. Přehled světové výroby hliníku	10
1.3. Faktory ovlivňující růst výroby hliníku	11
1.4. Oblasti použití hliníku a jeho slitin	12
1.5. Metody výroby oxidu hlinitého	15
1.6. Rafinace hliníku	18
2. Vlastnosti hliníku a jeho slitin	22
2.1. Fyzikálně metalurgická podstata	22
2.2. Aplikace fyzikální metalurgie u hliníku a jeho slitin	25
2.3. Mechanické, únavové a lomové vlastnosti hliníku a jeho slitin	26
2.4. Technologické vlastnosti hliníku a jeho slitin	34
3. Technicky čistý hliník	37
4. Slitiny hliníku	37
4.1. Vliv legujících prvků	37
4.2. Rozdělení slitin	38
5. Tváření slitin hliníku kovááním	44
5.1. Vliv teploty a rychlosti deformace	44
5.2. Způsoby kováání	46
5.3. Homogenita struktury a vlastností	48
6. Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin	49
6.1. Žihání	49
6.2. Precipitační zpevnění – vytvrzování	52
6.3. Tepelné zpracování slitin typu Al-Mg-Si (série 6000)	54
7. Metalografická příprava hliníkových slitin	56
7.1. Odebírání vzorků	56
7.2. Preparace vzorků	56
7.3. Broušení vzorků	58
7.4. Leštění vzorků	58
Experimentální část	60
8. Metalografická příprava dodaných vzorků	60
8.1. Rozřez vzorků	60
8.2. Preparace vzorku	60
8.3. Broušení	61

8.4.	Leštění.....	61
8.5.	Leptání.....	61
9.	Světelná mikroskopie.....	64
9.1.	Polotovar HCM EN AW 6082.....	64
9.2.	Polotovar HCM EN AW 6110.....	65
9.3.	Lisovaný polotovar EN AW 6082.....	66
9.4.	Lisovaný polotovar EN AW 6110.....	70
10.	Velikost zrna.....	73
10.1.	Velikost zrna HCM slitiny EN AW 6082.....	73
10.2.	Velikost zrna HCM slitiny EN AW 6110.....	75
10.3.	Velikost zrna lisované slitiny EN AW 6082.....	76
10.4.	Velikost zrna lisované slitiny EN AW 6110.....	77
10.5.	Vyhodnocení velikosti zrna.....	77
11.	Elektronová mikroskopie.....	78
11.1.	Slitina HCM EN AW 6082.....	78
11.2.	Slitina HCM EN AW 6110.....	79
11.3.	Vyhodnocení HCM polotovarů.....	81
11.4.	Lisovaná slitina EN AW 6082.....	82
11.5.	Lisovaná slitina EN AW 6110.....	85
11.6.	Vyhodnocení lisovaných polotovarů.....	89
12.	Průběh mikrotvrdosti.....	90
12.1.	Slitina HCM EN AW 6082.....	90
12.2.	Slitina HCM EN AW 6110.....	91
12.3.	Tvrdost fáze a tuhého roztoku.....	92
12.4.	Lisovaná slitina EN AW 6082.....	93
12.5.	Lisovaná slitina EN AW 6110.....	94
12.6.	Vyhodnocení mikrotvrdosti.....	94
13.	Závěr.....	96
14.	Použitá literatura.....	97

Úvod

Diplomová práce se zabývá vlivem mikrostruktury polotovaru na mechanické vlastnosti slitin Al-Mg-Si v automobilovém průmyslu. Práce vznikla z podnětu společnosti Strojmetal Aluminium Forging s.r.o. Tato práce navazuje na bakalářskou práci s názvem Hodnocení vlivu zpracování na mikrostruktury vybraných Al slitin vypracovanou Bc. Radkem Bednářem. Práce zahrnuje přehled o výrobě hliníku, vlastnosti hliníku a jeho slitin, jejich zpracování, rozdělení hliníku a jeho slitin. Účelem provedených experimentů je stanovení vlivu mikrostruktury polotovaru na výsledné mechanické vlastnosti hliníkových slitin EN AW 6082 a EN AW 6110 vyráběných horizontálním přetlakovým litím (HCM) a průtlačným lisováním. Vyhodnocení vlastností polotovaru je důležité vzhledem k následnému tepelnému a mechanickému zpracování slitin do podoby finálního kusu s požadovanými vlastnostmi.

Výše zmíněné slitiny jsou poměrně nově zaváděné do automobilového průmyslu – zejména EN AW 6110. Z toho důvodu bylo stanoveno několik základních cílů. Prvním cílem je stanovení velikosti zrna v průřezu materiálu, dále bude provedena analýza chemického složení po průřezu polotovaru pomocí skenovacího elektronového mikroskopu a mikroanalýzy EDS. Dalším cílem bylo vyhodnocení průběhu mikrotvrdosti u polotovarů.

1. Přehled o výrobě hliníku

Hliník je nejrozšířenější kov a třetí nejrozšířenější prvek zemské kůry (po kyslíku a křemíku). V přírodě se hliník vyskytuje v minerálech, kterých je v přírodě až 250, a jsou rozptýleny v zemské kůře. Mezi nejdůležitější minerály patří korund, diaspor, boehmit, spinel, gibbsit a další. Nejvýznamnější rudou pro výrobu hliníku je bauxit a to z toho důvodu, že ze čtyř až šesti tun bauxitu je možné vyrobít jednu tunu čistého hliníku.

1.1. Bauxit

Popis bauxitu se v literatuře může lišit, nicméně je to hornina, která se skládá z hydratovaných oxidů hliníku (minerály), dalších minoritních fází ve formě silikátů a jílu a minerální nečistoty. V tabulce 1 je uveden přehled běžných minerálů hliníku. Základní minerály, které bauxit obsahuje, jsou gibbsit, boehmit a diaspor.[1]

Tabulka 1 – Přehled běžných minerálů hliníku

Minerál	Chemický vzorec	Hmot. % Al_2O_3
korund	Al_2O_3	100
diaspor, boehmit	$Al_2O_3 \cdot H_2O$	85
gibbsit (hydrargilit)	$Al_2O_3 \cdot 3 H_2O$	65.4
spinel	$Al_2O_3 \cdot MgO$	71
kyanit, andaluzit, silamanit	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	63
kaolinit	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2 H_2O$	39.5
alunit	$K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 4Al(OH)_3$	37
nefelín	$(Na, K)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	32.3-35.9
leucit	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$	23.5
sericit	$K_2O \cdot 3 Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	38.4

Rozdělení bauxitů je možné provést dle místa výskytu – rozděluje se na lateritické, karstové a usazeninové. Největší zastoupení má lateritický bauxit, přibližně 86 % z celkového množství bauxitu v zemské kůře, který se vyskytuje blízko rovníku a vznikly zvětráváním. Karstové bauxity mají zastoupení 13 % a nachází se v krasových podložích (dále od rovníku v Evropě, Číně a pacifické oblasti). [1][4]

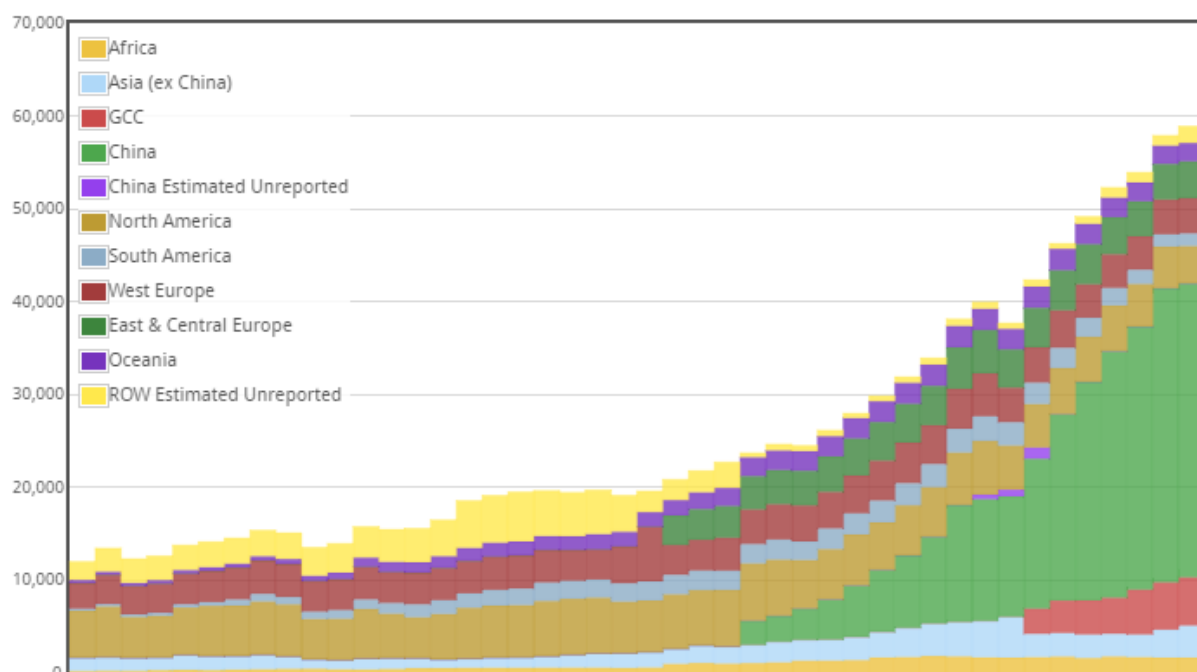
V těžbě bauxitu dominuje několik zemí: Austrálie, Guinea, Čína, Jamajka a Brazílie (vysoký výskyt lateritického bauxitu).

1.2. Přehled světové výroby hliníku

Výroba hliníku v průmyslovém měřítku začala před druhou světovou válkou, a to převážně v oblasti vojenské techniky. Po konci druhé světové války ekonomická situace nedovolila nárůst výroby, tak nastal několika roční pokles. Znovuvytvoření silné ekonomiky v padesátých letech, především ve Francii a Německu, vedlo k exponenciálnímu růstu výroby.

Od roku 1999, kdy bylo vyprodukováno téměř 7 milionů tun (25 % celkové výroby v roce 1999) recyklovaného hliníku z druhotných surovin, začíná být významná samotná recyklace hliníku ve světové výrobě hliníku. Hliník se na skládkách nerozkládá, protože při ponechání na vzduchu se vytváří povrchová vrstva, který zabraňuje korozi. Nehledě na to, že výroba primárního hliníku s sebou nese velmi vysokou spotřebu vody a na výrobu jedné tuny hliníku připadá půl tuny odpadu. Dále vznikají emise fluoru, které způsobují dýchací potíže a alergie. [1][11]

Z údajů, které jsou dostupné v International Aluminium Institute (IAI), se od roku 2003 se Čína stává největším výrobcem v případě hliníků, a to s celkovým podílem 53 %. Do té doby byla světovou výrobní jedničkou Severní Amerika. Na obrázku 1 lze vidět světovou produkci primárního hliníku. Osa x zobrazuje časový úsek a osa y výrobu v tunách. Dále nám histogram ukazuje to, že v roce 2016 byla výroba v Číně větší, než ve zbytku světa dohromady. [8][9]



Obrázek 1 - Světová produkce primárního hliníku od roku 1973 do roku 2016

1.3. Faktory ovlivňující růst výroby hliníku

Hliník je v současnosti, z neželezných kovů, nejprodukovanějším kovem. Hodnota produkce je několika násobně vyšší než výroba mědi, olova nebo cínu. Kvůli tomu zde existuje několik faktorů, které mohou ovlivnit růst výroby hliníku.

- **Spotřeba elektrické energie** – Průmyslová výroba hliníku s sebou nese enormní spotřebu elektrické energie a také negativní důsledky pro životní prostředí. Hodnoty z roku 2001 (Tabulka 2) dokazují, že při výrobě jedné tuny primárního hliníku se mohou lišit o několik desetin MWh. V dnešní době, při výrobě elektrolýzou (Kapitola 1.5.2), se používá lepších technologií a uhlíkových anod, které tyto hodnoty dále snižují.

Ke snížení spotřeby elektrické energie se opět dbá na recyklaci hliníkových částí, a to z toho důvodu, že spotřeba při recyklaci je až o 90 – 95 % nižší, než při výrobě primárního hliníku. [1][10][11]

Tabulka 2 – Spotřeba elektrické energie z roku 2001

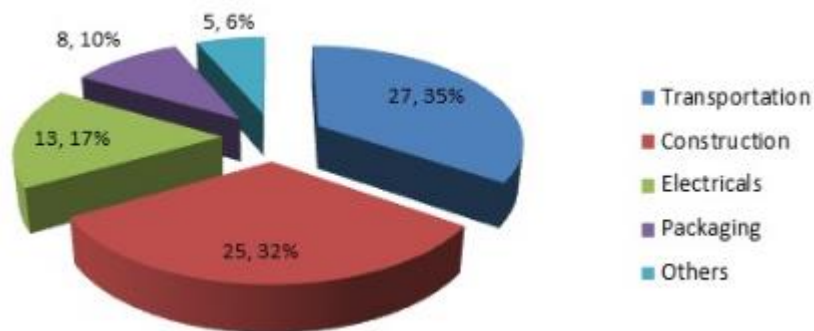
Geografická oblast	Spotřeba el.energie na 1 tunu průmárního hliníku [MWh/tuna]
Asie	15,39
Evropa	15,26
Severní Amerika	15,2
Afrika	14,92
Austrálie, Nový Zéland	14,79

- **Zvýšení nároků průmyslové výroby** – Hlavním odvětví průmyslu, který v současnosti a blízké budoucnosti výrazně ovlivňuje hospodářský a technologický rozvoj, je dopravní průmysl, zejména pak automobilový, letecký a kosmický průmysl. Ve všech třech případech je základní požadavek snížení spotřeby paliva, který nastává v případě, že se především snižuje hmotnosti konstrukce automobilů, letadel a kosmických lodí. Se snížením spotřeby paliva také hodně souvisí snižování vyprodukovaných emisí a tím ke zlepšování životního prostředí. Tudíž přední výrobci vyvíjí tlak na aplikaci hliníku a jeho slitin z důvodů ekonomických, technologických, konstrukčních a ekologických.
- **Očekávaný ekonomický rozvoj** – jak už bylo řečeno v kapitole 1.2 (Přehled světové výroby hliníku), tak se Čína velice rychle dostala na pozici číslo 1 ve světové výrobě hliníku, který nastal díky rychlému ekonomickému rozvoji této země. Od roku 2003 byl u dalších světových výrobců (Mozambik, Indie, Jižní Afrika a další) velmi rychlý růst výrobních kapacit.

1.4.Oblasti použití hliníku a jeho slitin

Průmyslové využití hliníku a jeho komerční využití začalo přibližně před 100 lety a z tohoto důvodu je možné označit hliník za „mladý kov“ (v porovnání s dalšími materiály – ocel, stříbro, zlato, ...). Díky jeho vlastnostem si tento materiál našel uplatnění ve všech oblastech lidského života. Prakticky není oblasti průmyslu a každodenního života, kde bychom se nesečkali s výrobky z hliníku a jeho slitin. [1]

AlCircle Blog, který se zabývá výrobou, trendy a technologiemi zpracování hliníku, v roce 2014 uvedli oblasti použití hliníku (Obrázek 2). V posledních letech neustále vzrůstá i význam slitin hliníku jako konstrukčního materiálu. Je to dáno velmi výhodnou kombinací fyzikálních, mechanických a technologických vlastností těchto slitin. Jak bylo řečeno (1.3 – zvýšení nároků průmyslové výroby), tak s největším podílem se jedná o dopravní průmysl, který velmi úzce souvisí s konstrukcí. Dále jsou uvedeny elektrické součásti, balící prostředky a ostatní. [12]



Obrázek 2 - Celosvětové použití hliníku

Jak již bylo uvedeno, největším spotřebitelem hliníku je oblast dopravy, kterou můžeme rozdělit na několik oblastí – letecký průmysl, automobilový průmysl, kolejová doprava, konstrukce lodí a kosmonautika. Blíže se budu rozepisovat pouze u leteckého a automobilového průmyslu.

1.4.1. Letecký průmysl

Současný letecký průmysl má na své dodavatele v podstatě dva základní požadavky. První požadavek jsou nová materiálová řešení, která vedou k velkým finančním úsporám při konstrukci současných letounů. Druhý požadavek je takový, aby materiály byly schopny čelit všem požadavkům, které budou kladeny v letecké dopravě po celé 21. století – nízká hmotnost, dobré mechanické vlastnosti zejména při nízkých teplotách pod bodem mrazu. [1]

Hlavním směrem snížení výrobních nákladů je nahrazení montovaných konstrukčních celků celistvými nebo také monolitními konstrukcemi. Montované konstrukce se skládají z velkého množství částí, které jsou snýtovány nebo lepeny. Naproti tomu monolitní konstrukce nahrazují funkci všech těchto částí v jednom celku s výhodou, že se sníží hmotnost a sníží se i výrobní náklady, a to díky nižšímu počtu spojovacích dílů a součástí. [13]

Pro představu letadlo A340 (Obr. 3) váží cca 90 000 kilogramů a téměř 2/3 použitých materiálů patří do kategorie slitin hliníku. [1]

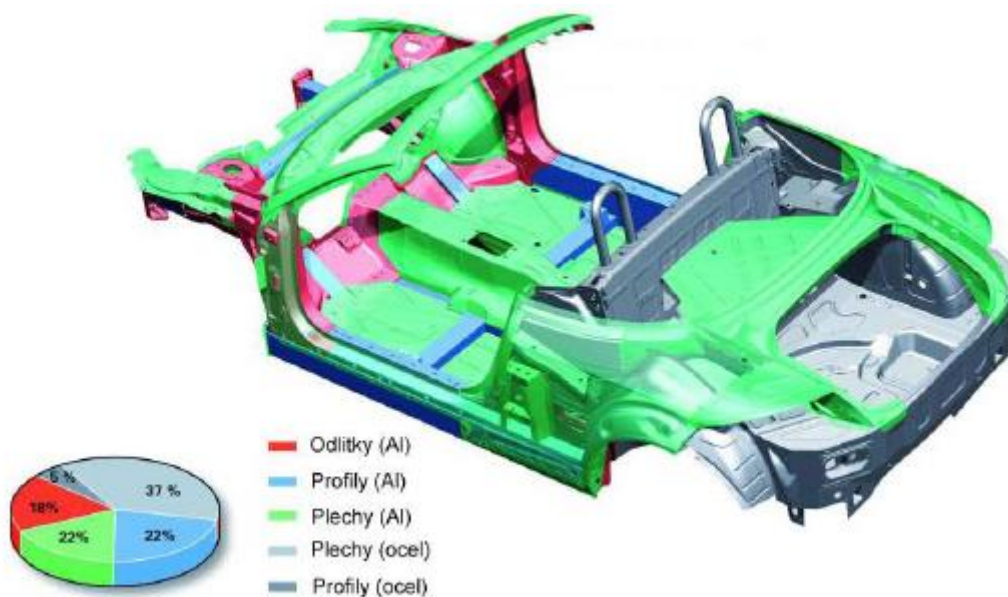


Obrázek 3 - Letadlo A340

1.4.2. Automobilový průmysl

Stejně jako ve všech oblastech dopravy je zde hlavní důvod pro aplikaci těchto materiálů jejich nízká hmotnost, která se výrazně odráží ve zlepšení využití paliva a snížení celkových emisí produkovaný automobilovým průmyslem. Hliníkových součástí v automobilu je hned několik:

- **Karoserie a kostra automobilu** – je potřeba si uvědomit, že hliník a jeho slitiny nesnižují pouze hmotnost celého vozidla, ale také zajišťují výbornou korozní odolnost, snadné opravy, dobrou kombinaci s jinými materiály, lehkou separaci a recyklaci odpadů a také vynikající deformační schopnosti plechů a profilů z hliníku, které pohlcují energii při nárazu. Na obrázku 4 je viděl kostra vozu Audi TT Roadster, na kterém je viděl podíl hliníkových plechů, profilů a odlitků. [14][15]



Obrázek 4 - Kostra vozu Audi TT

- **Blok motoru** – Blok motoru vytváří základní nosný systém sloužící k vyrovnávání vnitřních sil a momentů vycházejících z procesu spalování a určených konstrukci klikového mechanismu. Úkolem bloku motoru je vytvoření potřebných vazeb a propojení systému mazání a chlazení motoru, uložení náhonů rozvodných mechanismů a pomocných agregátů motoru. Základní požadavek na konstrukci bloku motoru vychází z tuhosti uložení klikového mechanismu a co největšího tlumení vnitřního hluku a vibrací motoru. Dříve se bloky motorů vyráběly z litiny s lupínkovým grafitem, ale hliníkový blok motoru má hned několik lepších vlastností – nižší hmotnost, vysoká zatížitelnost daná dobrou tepelnou vodivostí materiálu a tribologicky příznivý povrch válce. [16]
- **Vložky a hlava válců, písty** – vnitřní stěny válců musí vydržet vysoké tlaky a velké pracovní rychlosti pístů – z toho důvodu musí být vložky, hlava a písty velice tvarově

přesné, musí být odolné proti otěru, vydržet vysoké teploty a mít dobré únavové vlastnosti. [16]

- **Převodovka** – nejdůležitější použití hliníku a jeho slitin v převodovkách je převodovková skříň. Rozdíl nastává mezi automatickou a manuální převodovkou – u automatických převodovek se nachází mnohem více součástí, které jsou z hliníku a jeho slitin.
- **Podvozek** – podvozky a tlumiče vozů, které byly vyrobeny v Evropě, obsahují přibližně 45 kilogramů hliníku v největší míře ve formě odlitků. Důvodem použití hliníku je snaha o snížení neodpružené váhy a tím zlepšení jízdních vlastností.
- **Náprava** – náprava v automobilu rozkládá váhu vozidla a její přenesení na kola, přenáší hnací, brzdné a boční síly mezi kolem a rámem, odpružuje vozidla pomocí pružin uložených mezi nápravami a vozidlem.
- **Zavěšení** – zavěšení by v automobilu mělo plnit několik funkcí – podpírání váhy automobilu a chránit ho před poškozením a opotřebením. Zajistit komfort cestujících tím, že izoluje kabinu od nerovností vozovky, izoluje vibrace a nežádoucí zvuky. Na obrázku 5 jsou kované podvozkové díly s nejvyššími nároky na pevnost a životnost ze společnosti Strojmetal aluminium forging s.r.o.. [15][17]



Obrázek 5 - Kované podvozkové díly společnosti Strojmetal

1.5. Metody výroby oxidu hlinitého

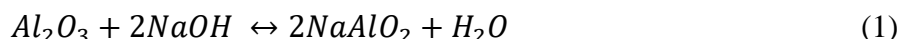
Výroba čistého oxidu hlinitého z rud lze provést hned několika způsoby. Na základě amfoterního charakteru oxidu hlinitého je možné ho získávat jak zásaditými, tak kyselými metodami. V dnešní době se vyrábí oxid hlinitý výlučně zásaditými metodami.

1.5.1. Bayerova metoda

V celosvětovém měřítku je Bayerova metoda nejrozšířenější hydrometalurgickou výrobou oxidu hlinitého. Pro tento účel je výchozí surovina kvalitní bauxit, který obsahuje malé množství oxidu křemičitého v rozmezí 2-5%. Pro takové bauxity je Bayerova metoda nejhospodárnější, je jednoduchý a pomocí něho je možné vyrobit velmi čistý oxid hlinitý.

Karl Josef Bayer, rakouský chemik, který využil samovolného rozkladu roztoků hlinitanu sodného a vylučování hydroxidu hlinitého za přítomnosti katalyzátoru čerstvě vysráženého $\text{Al}(\text{OH})_3$ a dal základ Bayerově metodě.

Bayerův postup je uzavřený cyklus založený na chemické reakci:



Z Bayerovy metody výroby oxidu hlinitého je zřejmé, proč je důležité poznat mineralogické, či chemické složení bauxitu – dle druhu bauxitu se nepatrně mění postup výroby a je to dáno chemickým složením a počtu molekul NaOH. Posloupnost, jak snadno se zpracuje daný typ bauxitu je: gibbsit – boehmit – doaspor - korund. [1][18][19]

Technologie rozkladu bauxitu je založena na loužení bauxitu v recyklovaném alkalickém roztoku o dané koncentraci, tlaku a teplotě. Hlavní operační kroky Bayerova procesu tvoří:

- Rozklad – loužení oxidu hlinitého vázaného v bauxitu (tvorba hlinitanového roztoku)
- Oddělování červeného kalu
- Srážení hydroxidu hlinitého z hlinitanového roztoku
- Odstraňování $\text{Al}(\text{OH})_3$ z ochlazujícího se přesyceného hlinitanového roztoku
- Odpařování matečného roztoku

1.5.2. Spékací metoda

Spékací metoda výroby oxidu hlinitého patří k termickým zásaditým způsobům výroby a používá se na zpracování chudších bauxitů s vyšším obsahem SiO_2 . Podstatou metody je spékání bauxitů se sodou a vápencem, čímž vzniká spečenec, který je dobře rozpustný ve vodě. Po vyloužení spečenice ve vodě vznikne hlinitanový roztok – jako při Bayerově metodě. Při této metodě nevzniká červený kal, ale kal hnědý. Odlišuje se od červeného kalu jiným chemickým složením. V průběhu spékání vzniká několik chemických reakcí, které se rozlišují dle teploty. Při teplotách 600 – 900 °C dochází k termickému rozkladu vápence. [1][18]

1.5.3. Kombinované metody

Suroviny, které nemají takovou kvalitu na zpracování Bayerovým procesem, se zpracovávají spékacími a kombinovanými metodami. Kombinované metody (Bayerův proces – spékání) se v sériovém nebo paralelním procesu objevil v bývalém Sovětském svazu. Bylo to z toho důvodu, že v bývalém Sovětském svazu nebyly bauxity s velkou kvalitou. Sovětský svaz těžil z velkého množství nefelínu.

Podstatou kombinované metody je přidání další výrobní – spékací, větve do Bayerova procesu. Následně se smíchávají hlinitanové roztoky, tvořené v obou větvích ještě před srážením. Aby tato metoda byla stále ekonomicky výhodná, neměla by kapacita spékací větve být větší než 15%. Využívá se červený kal, který vznikne Bayerovou metodou, který se spéká s přísadou vápence. I přes to, že aplikací kombinovaných metod výroby je možnost dosáhnout vyšší výtěžnosti oxidu hlinitého a snížit spotřebu surovin a paliva, tak se obtížně používají v praxi. Rozhodujícím faktorem je objem a složení červeného kalu z Bayerovy větve.

V dnešní době je trend rozšiřovat sortiment produktů, který se získá z výroby oxidu hlinitého. Jedná se především o takové závody, které využívají nefelíny. Je to z toho důvodu, že proces výroby oxidu hlinitého z nefelínu nemá žádné odpadní produkty. Tyto závody se zaměřují na výrobu oxidu hlinitého, sody, potaše a cementu. [1] [18]

1.5.4. Výroba elektrolýzou

V současnosti je výroba hliníku tvořena dvěma nezávislými procesy. Prvním procesem je příprava čistého oxidu hlinitého, zejména z bauxitu – tyto technologie byly popsány v předcházejících kapitolách. Druhým procesem je elektrolytická výroba hliníku. Roku 1845 německý chemik Fridrich Wöhler vyrobil malé množství hliníku redukcí pomocí alkalických kovů a popsal jeho vlastnosti. Díky tomu se považuje za objevitele tohoto způsobu výroby hliníku. O 40 let později byla výroba hliníku pomocí elektrolýzou patentována, nezávisle na sobě, Francouzem Paulem Héroultem a Američanem Charlesem Hallem a je pozoruhodné, že se tento způsob používá i dnes. V moderní době však došlo ke změně výroby především díky progresivnímu vývoje informačních technologií, které umožňují jednoduchou automatizaci řízení procesu. Moderní systémy již dokáží pracovat s elektrolýzery s předem vypálenými anodami, automaticky upravují regulační procedury pro nastavení operačních parametrů pecí – vzdálenost katoda – anoda, koncentrace oxidu hlinitého a obsah fluoridu hlinitého v koupeli.

Hliník je neušlechtilý kov, proto ho není možné vyrobit elektrolýzou z vodních roztoků. Pro tento kov se výhodně používá elektrolýza z roztavených solí – nejvhodnější sůl je kryolit (Na_3AlF_6), do které se vsází oxid hlinitý a přísady na modifikaci vlastností elektrolytu,

nejčastěji na bázi fluoridů a chloridů sodíku, hořčíku, vápníku, litia apod. Elektrolyza hliníku se realizuje v elektrolyzních pecích, elektrolyzérech, u kterých se nachází roztavený kryolit při teplotě přibližně 960 °C. Elektrolyzér tvoří uzavřený systém, do kterého je vložena uhlíková katoda, která tvoří dno elektrolyzéro a uhlíková anoda, která je ponořena do roztavené koupele. Do koupele se pravidelně přidává oxid hlinitý, který se za daných podmínek v kryolitu rozpouští a následkem nastaveného napětí na elektrolyzéro se rozkládá kovový hliník putující na dno k uhlíkové katodě a kyslík, který oxiduje uhlíkovou anodu. Po určité době provozu elektrolyzéro se v pravidelných intervalech vybourají vany elektrolyzéro a opět vyzdí – spotřebovávání uhlíkových katod. Provoz elektrolyzy se skládá většinou ze série elektrolyzních pecí.

1.6. Rafinace hliníku

Samotná výroba hliníku není dostačující k následnému odlévání, proto se mezi tyto dvě operace musí vložit další – rafinace. Aby byla zajištěna kvalita produkce hliníku, musí mít hliník adekvátní čistotu. Čištění a úprava taveniny hliníku jsou kvůli výsledné kvalitě zvláště důležité úkony, protože prvky a sloučeniny, které tvoří nečistoty, mají podstatný vliv na kvalitu výsledného produktu. Tyto nečistoty se odstraňují několika způsoby – kromě rafinace v pecích a pánvích se používají i vysoce účinné kontinuální rafinační procesy. [20]

V roztaveném hliníku se mohou nacházet rozpuštěné plyny a kovy nebo endogenní a exogenní inkluze, často oxidy a další sloučeniny, jako nitridy, karbidy, sulfidy, fosfidy, boridy a halogenidy. V hliníku se z plynů rozpouští pouze vodík, zatímco ostatní plyny jsou ve styku s kovem inertní nebo tvoří nerozpustné sloučeniny. Kyslík tvoří oxidy – Al_2O_3 , SiO_2 , dusík je inertní, nebo tvoří malé množství nitridů – AlN . Většina nečistot v primárním hliníku přichází ze surovin elektrolytu a z uhlíkových anod. Z oxidu hlinitého jako vsázky pro elektrolyzu hliníku pochází: Na, V, Ti, Zn. Z kryolitu pochází: Na, Li, Ca, Mg. Z uhlíkatých materiálů pochází: Si, Fe, V, Mn, Cu. [1] [20] [21]

Při tavení sekundárního hliníku je výskyt nečistot větší a zároveň se ve vyšší míře vyskytují legury nebo oxidy.

Jak již bylo zmíněno – jediným plynem, který se rozpouští v hliníku, je vodík. Vodík je nečistota, která se vyskytuje s reálném provozu a má výrazný vliv na vlastnosti kovu. Primární hliník z elektrolyzy obvykle obsahuje 0,25 – 0,35 cm^3 vodíku na 100 g Al, zatímco sekundární hliník obsahuje 0,45 – 0,5 cm^3 vodíky na 100 g Al. Rozpustnost vodíku v roztaveném hliníku závisí na teplotě a parciálním tlaku vodíku. [1]

Charakteristickou poruchou výrobků z hliníku vlivem rozpouštěného vodíku je perezita zapříčiněná bublinami plynu, které vznikají ochlazováním a vylučováním vodíku vlivem snižující se rozpustnosti v závislosti na teplotě.

Významnou skupinou rozpuštěných nečistot tvoří alkálie Na, Li, Mg, Ca, atd. Tyto alkalické kovy pocházejí hlavně z elektrolytu a kovy alkalických zemin pocházejí zejména z tavení šrotu. Přítomnost dalších kovových nečistot Fe, Si, Cu, Mn, Cr, V, Zn, Ti v běžných slitinách neznehodnocují průmyslové slitiny. V tabulce 3 jsou uvedeny typické obsahy nečistot v primárním hliníku. [1] [21] [22]

Tab. 3 – Obsah nečistot v primárním hliníku

Prvek	H	Na	Li	Mg	Ca	Fe
koncentrace [ppm]	0,3-1	50-200	0-30	10-130	V.20	300-1000
Prvek	Si	Ti	Cu	Zn	V	Ga
koncentrace [ppm]	200-1000	20-30	V.50	10-200	30-50	60-80

Nejškodlivější sloučeniny v roztaveném hliníku jsou:

- Oxidy – Al_2O_3 , MgO
- Spinely – Mg_2AlO_4
- Karbidy – Al_3C_4 , TiC , SiC , CaC_2
- Nitridy – AlN , Mg_3N_2
- Sulfidy – Al_2S_3
- Fosfidy – AlP
- Exogenní inkluze – oxidy a karbidy Fe, Si a Al
- Soli – chloridy, dluoridy
- Boridy – TiB_2 , VB_2 , ZrB_2

Nečistoty se z taveniny hliníku mohou účinně odstranit různými metodami na základě rozdílných fyzikálních vlastností. V případě nerozpustných inkluzí se aplikuje přímo usazování, vyplavení nebo filtrace. Rozpustné nečistoty se musí přemístit nebo transformovat do samostatné fáze, která má značně odlišné fyzikální vlastnosti od základní taveniny. Rztavený hliník se v peci rafinuje probubláváním chemicky inertním nebo reaktivním plynem, dále reaktivními solemi.

1.6.1. Ustálení (odstátí) taveniny hliníku

Při ustálení klesá teplota taveniny, a to snižuje obsah vodíku v hliníku. Celkově na povrchu taveniny probíhá oxidace některých rozpuštěných kovů (Na, Li, Mg, Ca), následkem čehož se snižuje jejich obsah v tavenině. Částice, která mají vyšší hustoty než hliník, se naopak usazují na dně ustalovací pece. Tento proces je relativně krátký – cca 30 min – za předpokladu, že velikost částic nečistot je relativně velká (větší než 100 μm). Při menší velikosti částic se tento způsob rafinace zdá nevhodným.

1.6.2. Vakuová rafinace

Při vakuové rafinaci, kdy dochází k celkovému snižování tlaku, je možné očekávat tyto procesy – odstranění rozpuštěných plynů a prchavých složek vlivem snížení parciálního tlaku nad taveninou, chemické reakce v závislosti na tlaku, vyplavení tuhých nečistot účinkem vznikajících bublin.

1.6.3. Rafinace hliníku probubláváním plyny

Opět je kladen důraz hlavně na odstranění vodíku a jeho odplynění je možné intenzifikovat probubláváním roztaveného kovu plynem. Role tohoto plynu spočívá v těchto vlivech na taveninu – mezifázové rozhraní kov – plyn se zvětší, urychlí se míchání taveniny a čistící plyn intenzifikuje odstraňování vodíku. Mechanismus odstraňování vodíku se skládá z jeho difuze k probublávajícímu plynem. Pro tento proces se používá konvenčních inertních plynů, jako Ar nebo N_2 . Obsah vodíku dosáhne svou rovnovážnou hodnotu opět za 2 – 4 hodiny a proto je důležité odplyňovat těsně před odléváním.

1.6.4. Odstraňování rozpuštěných kovových nečistot

Po ustalovací části procesu se odstraňování rozpuštěných kovových nečistot urychluje účinnějšími metodami zahrnujícími rafinační plyn. Bublinky tvořené při dmýchání plynu zabezpečují promíchání taveniny – to podpoří pohyb materiálu k povrch, kde může probíhat oxidace a tím se umožní odpaření nečistot z taveniny.

1.6.5. Odstraňování inkluzí

Inkluze vzniklého Al_2O_3 , MgO a AlN mohou být v pórovitém stavu a je možné je odstranit z taveniny probubláváním inertním plynem v ustalovací peci. Většinou o velikosti 100 μm . Inkluze, které jsou menší, lze vyplavit v peci jen jemně rozptýleným plynem přes fritu.

1.6.6. Odstraňování nečistot solnými přísadami

Pro odstraňování nečistot solnými přísadami se skládají z různých anorganických sloučenin, které se přidávají do taveniny ve formě prášku, granulí nebo tabletách. Složky solí mají za úkol tvořit nízkotavitelné vysokotekuté složky (NaCl – KCl) a rozkládat se při provozní teplotě

za tvorby aniontů (nitráty, karbonáty a sulfáty), které reagují s nečistotami. Vlivem rozdílné hustoty umožňuje oddělení nečistot od taveniny.

Solné přísady poskytují několik druhů svého využití. Zejména se jedná o:

- Krycí soli
- Čistící přídavky
- Struskotvorné přídavky
- Rafinační strusky
- Odplyňovací přísady
- Tavidla

1.6.7. Odstraňování inkluzí filtrací

Částice inkluzí se mohou usazovat nebo filtrovat na základě své hustoty a velikosti. Větší částice než 100 μm a s vyšší hustoty než hliník se dobře usazují, ale částice menšího průměru, 30 – 40 μm lze odstranit pouze filtračním systémem. Hlavní typy filtračních jednotek jsou korundové koule, keramické pěny, filtrační koláč a flotace. Jejich použití je dle hustoty a rozsahu velikosti odstraňovaných částic. [1][21]

1.6.8. Speciální metody rafinace hliníku

Trh nutí výrobce vyrábět materiál vyšší kvality s vysokou čistotou a chemickým složením. Zároveň se tím zvyšuje množství vyrobeného kovu, což mívá za následek zkracování doby rafinace. Díky těmto dvěma faktorům je motivace k rozvoji kontinuálních rafinačních technologií. [1][21]

Výrobní závody produkují primární hliník s čistotou běžně 99,7 – 99,9 %. Mezi hlavní nečistoty patří železo a křemík, zinek, hořčík, mangan a titan. Dále také stopy mědi, chromu, galia, sodíku, lithia, vápníku, vanadu a bóru. Metoda jako rafinace solemi, vakuová rafinace odstraňují stopy sodíku, lithia, vápníku a hořčíku. Filtrace dokáže odstranit z taveniny pevné částice oxidů a karbidů, resp. jiných inkluzí. Vodík se dá odstranit chlórem, dusíkem nebo argonem.

Kvůli mezinárodním standardům je potřeba rozlišovat nelegovaný hliník (tzv. čistý hliník) o čistotě 99 – 99,9% a tzv. „vysokočistý hliník“ o čistotě minimálně 99,97%. Pro většinu aplikací stačí čistota vyrobeného hliníku za pomoci elektrolýzy. Pro některé aplikace se ovšem musí použít speciální metody rafinace hliníku. Jedná se o aplikace, které vyžadují čistotu kovu na úrovni až >99,9999% Al. Speciální metody jsou:

- Frakční krystalizace (99,96 – 99,99%)

- Třivrstvá elektrorefinace (99,99 – 99,998%)
- Elektrolýzou v organických médiích (99,999%)
- Zonální rafinace (99,999 – 99,9999%)

Druhy očkovaadel jsou uvedeny v kapitole 2.2.1 - Metalurgické procesy.

2. Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník a jeho slitiny zažívají v posledních letech rychlý růst výroby a spotřeby. Je to především ve vlastnostech nejen hliníku a jeho slitin, ale i nekonvenčně vyrobených materiálů na bázi hliníku. V aplikaci hliníkových materiálů je výhodou především příznivá kombinace fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností. Tyto vlastnosti budou podrobně popsány dále.

2.1. Fyzikálně metalurgická podstata

2.1.1. Elektronová a atomová struktura

Atom hliníku obsahuje ve vnějším elektronovém obalu dva elektrony na orbitalu s ($3s^2$) a jeden elektron na orbitalu p ($3p^1$). Zachováním jednoho elektronu na orbitalu 3s má vnější obal hliníkového iontu sférickou souměrnost, která charakterizuje s-orbitaly, a která je příčinou k.p.l.s. (kubicky plošně středěná mřížka K12) krystalové mřížky. Nízké pevnostní charakteristiky hliníku se projevují nízkou energií vazby mezi atomy hliníku, která je posuzovaná podle nízké teploty tavení a podle vysokého teplotního součinitele délkové roztažnosti. Teplota tavení hliníku T_t je 933 K (660 °C) a teplotní součinitel délkové roztažnosti α je $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (pro porovnání ocel má $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Vzhledem k velké koncentraci volných elektronů (atom hliníku má tři elektrony, přičemž jeden z nich je volný) v hliníku, je ve srovnání s železem podíl elektronového tepla na měrné tepelné kapacitě značný, což se projevuje i její větší teplotní závislostí. Dále je velký počet volných elektronů příčinou velké elektrické a tepelné vodivosti. Teplotní závislost je v rozmezí 300 až 900 K. Elektrická vodivost je $\lambda_e = 38 \text{ S}^{-1}$ a tepelná vodivost je $\lambda_t = 209 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$.

Atomy jiných prvků, které se nacházejí v krystalové mřížce hliníku, přivádějí jeho elektrony do vzbuzeého stavu. Tím nastává přeskupení elektronů tak, aby přeskupené elektrony stínilly doplňující elektrický náboj cizího iontu. Při přeskupování elektronů dochází ke kolísání hustoty, to může dojít k nepřímému vzájemnému působení mezi rozpuštěnými atomy vedoucímu případně k jejich shlukování do Guinierových-Prestonových zón (GPZ).

Atomy jiných prvků, které tvoří s hliníkem substituční tuhý roztok, působí jako zdroje napěťových polí. Napěťová pole mohou být tahová nebo tlaková, závisí na velikosti poloměru

atomu hliníku r_{Al} a poloměru atomu daného prvku r_x . Tahová napětí vznikají při podmínce: $r_{Al} < r_x$ - při velikost poloměru atomu hliníku $r_{Al} = 0,143$ nm, vyvolává tahové napětí například hořčík ($r_{Mg} = 0,16$ nm). Tlaková napětí vznikají při podmínce: $r_{Al} > r_x$ - při velikost poloměru atomu hliníku $r_{Al} = 0,143$ nm, vyvolává tahové napětí například zinek ($r_{Zn} = 0,137$ nm).

Vzájemné působení napěťových polí cizích atomů s pohybujícími se dislokacemi vede k růstu skluzového napětí, a tedy i ke zvýšení pevnostních charakteristik – zpevnění legováním. [1][5][7]

2.1.2. Fázové složení

Ve většině slitin hliníku vznikají eutektika a při eutektické teplotě je rozpustnost přísad maximální. S klesající teplotou rozpustnost přísad klesá ve fázi α klesá. tato rozpustnost je u obvyklých legujících prvků vyskytujících se ve slitinách hliníku značně rozdílná – v tabulce 4 jsou uvedeny maximální rozpustnosti c_{max}^{α} při eutektické teplotě T_{eut} . Legující prvku je možné podle maximální rozpustnosti rozdělit do několika skupin:

- s velkou rozpustností – Zn, Mg
- se střední rozpustností – Cu, Mn, Si
- s malou rozpustností – Ti, Zr
- s velmi malou rozpustností – Be, Fe, Ni

Prvky posledních dvou skupin se při 20 °C prakticky ve fázi α nerozpouštějí, ale také u ostatních prvků je tato rozpustnost malá. Proto jsou slitiny hliníku při teplotě okolí zpravidla heterogenní a jejich strukturu tvoří fáze α a další minoritní fáze, které vznikají precipitačním rozpadem tuhého roztoku. [5][7]

Tab. 4 – Rozpustnost legujících prvků – změnit tabulku

Prvek	Max c_{\max}^{α} [% hm]	T_{eut} [°C]	c_{α}^{β} (20 °C) [% hm.]
Zn	82	382	4
Mg	17	450	1,9
Cu	5,7	548	0,1
Mn	1,8	658	0,3
Si	1,7	577	0,2
Ti	0,28	665	0
Zr	0,28	660	0
Be	0,05	645	0,005
Fe	0,05	640	0,003
Ni	0,05	655	0

Rozpustnost ve fázi α při teplotě okolí c_{α}^{β} (20 °C) závisí na rychlosti ochlazování z vyšších teplot. Hodnoty uvedené v tabulce 4 odpovídají termodynamické rovnováze, tedy stavu dosaženému velmi pomalým ochlazováním - °C.min⁻¹.

2.1.3. Fyzikální vlastnosti hliníku

V tabulce 5 jsou uvedeny některé fyzikální vlastnosti hliníku. Jak už bylo řečeno, tak hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku K12, kvůli které má hliník i jeho slitiny dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak za studena. Skluzové roviny jsou $\{111\}_a$, skluzové směry $\langle 110 \rangle_a$.

Tab. 5 – Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Mřížka	-	K12
Parametr mřížky a	[nm]	0,404958
Hustota při 20 °C	[g.cm ⁻³]	2,6989
Teplota tavení	[°C]	660,4
Teplota varu	[°C]	2494
Elektrická vodivost, Al 99,99	[%]	66
Elektrická vodivost, Al 99,8	[%]	62
Tepelná vodivost	[W.m ⁻¹]	247
Objemová změna při krystalizaci	[%]	6,5
Elektrický odpor	n'Ω.m	26,55
Atomová hmotnost	-	26,98154

V tabulce 6 jsou hodnoty teplotní roztažnosti hliníku v různých teplotních intervalech. Tyto hodnoty jsou důležité pro konstrukční účely hliníku.

Tab. 6 – Hodnoty teplotní roztažnosti hliníku

Teplotní interval [°C]	Průměrný koeficient [$\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
-200 až 20	18
-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

2.2. Aplikace fyzikální metalurgie u hliníku a jeho slitin

Fyzikální metalurgie u hliníku a jeho slitin spočívá ve znalosti a možnosti využití vlivu chemického složení, tváření a tepelného zpracování na mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti.

Možnost změny chemického složení dosáhneme pomocí legování jednoho či více prvků. Legováním měníme původní vlastnosti čistého hliníku a dochází k jejich možnému zlepšení. Mezi hlavní vlastnost, kterou chceme zlepšit, je pevnost. Je to kvůli nízkým pevnostním vlastnostem samotného hliníku, které značně omezují jeho použití.

Z pohledu fyzikální metalurgie máme několik možností ke zvýšení pevnostních vlastností:

- precipitační zpevnění – Guiner-Prestonovy zóny, koherentní precipitáty
- disperzní zpevnění – nekoherentní precipitáty
- substituční zpevnění mřížky Al vytvořením tuhého roztoku α

Značný praktický význam má precipitační zpevnění. Princip precipitačního zpevnění (vytvrzování) je popsán v kapitole 7 – Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin. [5]

2.2.1. Metalurgické procesy

Při odlévání se hliník a jeho slitiny očkují kvůli tomu, aby se zjemnily primární krystaly i eutektika. Očkovadla lze rozdělit do dvou skupin:

- První skupina – do této skupiny patří očkovadla, jejichž tuhé částice tvoří v tavenině tak disperzní tuhou fázi, že jsou krystalizačními zárodky. Tato fáze musí mít dostatečně

vysokou teplotu tavení a musí být izomorfní se základní fází krystalizujícího kovu nebo slitiny. Očkovadlo musí plnit i další požadavky:

- Vytvářet chemickou sloučeninu alespoň s jednou komponentou slitiny
 - Částice vzniklé chemické sloučeniny musí krystalizovat dříve než krystaly základní fáze
 - Aby nedošlo k nežádoucí změně chemického složení slitiny, musí být přísada očkovadla malá
- Druhá skupina – do této skupiny řadíme očkovadla, která mají na taveniny povrchově aktivující účinky. Atomy očkovadla jsou adsorbovány na vnější plochách krystalu a snižují jeho rychlost růstu, aniž by výrazně ovlivňovaly rychlost nukleace, což vede k jemnější krystalové struktuře. Adsorpce není rovnoměrná, tudíž dochází nejen ke změně velikosti, ale i tvaru krystalů.

Při očkování dochází k takové výměně elektronů mezi atomy očkovadla a atomy kovu nebo komponent slitiny, která vede k určitým energeticky stabilním stavům nutným pro vznik zárodků. Při tom je možné, aby některé komponenty slitin byly donory a atomy očkovadla byly akceptory a naopak. [1][5]

2.2.2. Plyny a kovové vměstky

Při tavení a odlévání hliníku a jeho slitin dochází k aktivní reakci s plyny v okolné atmosféře. Plyny, které se nacházejí v kovech, vytváří chemické sloučeniny nebo tuhé roztoky. Vzhledem k tomu, že se plyny koncentrují především na hranicích zrn, narušují jejich soudržnost a to se projevuje snižováním mechanických vlastností kovových materiálů.

V hliníku a jeho slitinách jsou obsaženy H, O, N a uhlovodíky. Jejich celkový obsah se pohybuje asi od 0,2 do 3 cm³/100 g kovu. Běžné přísady ve slitinách hliníku, např. Cu, Zn a Si, málo ovlivňují stupeň nasycení plyny. Křemík však zmenšuje rozpustnost vodíku v tuhoucích odlitcích, což vede ke vzniku pórovitosti výrobků ze siluminu (Kapitola 5 – Slévárenské slitiny hliníku).

2.3. Mechanické, únavové a lomové vlastnosti hliníku a jeho slitin

Aby bylo možné vybrat materiál pro konstrukční účely, je nutné znát jeho technologické, fyzikální, chemické, mechanické, únavové a lomové vlastnosti. Výběr z tohoto širokého spektra charakteristik, kterými vlastnosti materiálu popisujeme, je dán účelem použití. Při obyčejných konstrukčních aplikacích hliníku a jeho slitin si vystačíme se základními mechanickými vlastnostmi určenými zkouškou tahem. V některých se neobejdeme bez celkového spektra vlastností. Je to dáno snižováním hmotností konstrukcí a zvyšováním jejich spolehlivosti (Kapitola

1.4. Oblasti použití hliníku a jeho slitin) – tam, kde se dříve vystačilo s hodnotou tvrdosti nebo pevnosti, je teď nutné znát také únavové a korozní vlastnosti.

2.3.1. Mechanické vlastnosti

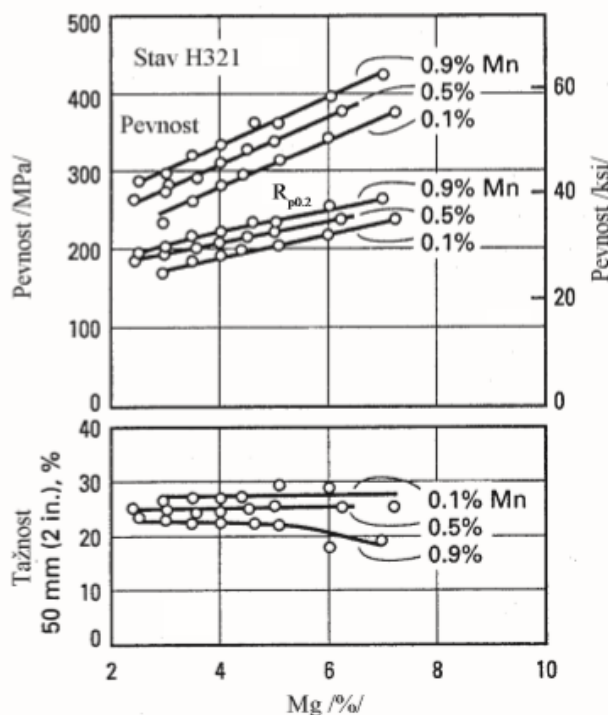
Mechanické vlastnosti jsou nejčastějším kritériem, podle kterého se rozhoduje o vhodnosti určitého materiálu a jeho předpokládaného použití. V řadě případů jsou samozřejmě považovány znalosti o dalších vlastnostech, ať už fyzikálních nebo únavových, nicméně se nepotkáme s případem, kdy by mechanické vlastnosti nehrály žádnou roli. Mezi základní mechanické vlastnosti lze zařadit zkoušky tahem, tlakem, zkoušky tvrdosti a zkoušky rázem v ohybu.

Nejrychlejší zjištění mechanických charakteristik jsou pomocí zkoušek tvrdosti, které jsou jednoduché, a není nutné odebírat speciální vzorek spojený s výrobou zkušebního tělesa, jak je tomu u zkoušky tahem nebo u vrubové houževnatosti. U hliníku a jeho slitin se nejčastěji používá měření tvrdosti podle Brinella. Tvrdost podle Brinella se pohybuje od hodnoty 15 v případě čistého hliníku až po 140 u vysokopevné vytvrzovatelné slitiny typu Al-Zn-Mg-Cu. V oblasti výzkumu se častěji používá měření podle Vickerse, a to ať už se jedná o běžná měření při větších zatíženích, nebo její varianty v oblasti mikrotvrdosti pro studium vlivu strukturních parametrů na mechanické vlastnosti.

Zkouška tahem je nejpoužívanější zkouškou pro zjištění mechanických charakteristik. Při této zkoušce se obvykle určují meze pevnosti R_m , meze $R_{p0,2}$ a tažnosti A , případně kontrakce Z . Mechanické vlastnosti výrobků z hliníkových slitin závisí na řadě parametrů:

- Typ hliníkové slitiny
- Typ výrobku
- Stav tepelného zpracování
- Tloušťka výrobku
- Směr odběru zkušebního tělesa

Obecně lze říci, že pevnosti s rostoucím obsahem legujících prvků rostou. Nicméně i přes to jsou zásadní rozdíly mezi tvářenými a slévárenskými slitinami. Slévárenské slitiny mají většinou větší celkový obsah prvků a nižší mez pevnosti, což je způsobeno tím, že litá struktura je na rozdíl od struktury protvářené hrubozrná, nehomogenní z hlediska chemického složení (makro a mikro odmíšení) a je pórovitá. Výrazné rozdíly mezi jednotlivými slitinami v úrovni a velikosti rozptylu pevností jsou dány různou povahou zpevnění. Z pohledu fyzikální



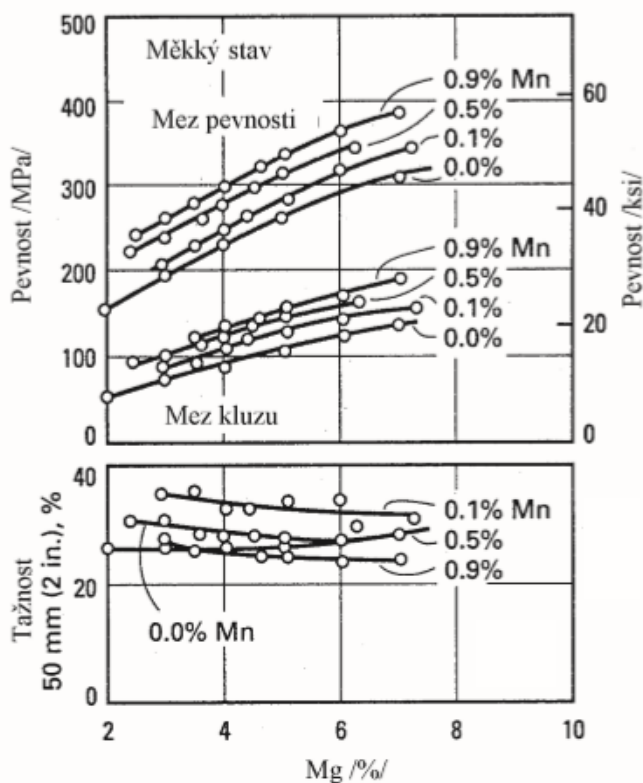
Obrázek 6 - Vliv obsahu Mg a Mn na pevnost a tažnost slitin typu Al-Mg-Mn v měkkém stavu

metalurgie to jsou precipitační, disperzní a substituční zpevnění. Dále ke zpevnění dochází tvářením. Zpevnění legujícím prvky rozpuštěnými v tuhém roztoku (u slitin Al-Mg a Al-Mn), nebo precipitací u vytvrzovatelných slitin (např. slitiny typu Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu) – zejména se jedná o kombinovaný vliv prvků Mn a Mg a tváření za studena na zvyšování mechanických vlastností. Představu o kombinovaném vlivu na zpevnění si lze udělat z obrázků 6 a 7, kde jsou pro slitiny typu Al-Mg-Mn vyneseny meze pevnosti a tažnosti pro různé obsahy těchto prvků. Z porovnání vzájemného posunutí rovin křivek na obrázcích vyplývá vliv válcování za studena na zvýšení pevnosti a pokles tažnosti. Na obrázku 6 lze vidět vliv obsahu Mg a Mn na pevnost a tažnost slitin typu Al-Mg-Mn v měkkém stavu. Na druhém obrázku je zachycen vliv obsahu Mg a Mn na pevnost a tažnost slitin typu Al-Mg-Mn ve válcovaném stavu (H321). [1][20][30]

Precipitační zpevnění (Kapitola 7 – Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin) je nejúčinnější u hliníkových slitin. Jedná se o tepelné zpracování, které se skládá z rozpouštěcího žíhání, ochlazení a přirozeného stárnutí nebo umělého stárnutí. K tomuto způsobu zpevnění jsou

vhodné základní slitiny Al-Mg-Si (slitiny řady 6000), Al-Cu-Mg (slitiny řady 2000) a Al Zn Mg-Cu (slitiny řady 7000). U slévárenských slitin jsou to opět slitiny s hlavním legujícím prvkem Cu, ke kterým se legují další prvky. Díky tomu může slitiny hliníku zlepšit své pevnostní charakteristiky, ale také své únavové, lomové, korozní a technologické vlastnosti.

Změny pevnostních vlastností v průběhu přirozeného a umělého stárnutí jsou blíže zpracovány v kapitole 7 – Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin.



Obrázek 7 - Vliv obsahu Mg a Mn na pevnost a tažnost slitin typu Al-Mg-Mn ve válcovaném stavu H321

- **Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot**

Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin se mění v závislosti na řadě parametrů. Nejdůležitějším parametrem je teplota. U hliníkových slitin se při zvyšující teplotě rychle klesá mez pevnosti R_m , mez $R_{p0,2}$ a tvrdost, zatímco se tažnost A a kontrakce Z většinou zvyšují. Na rozdíl od podmínek při zkoušení slitin za pokojové teploty, je důležitým faktorem při stanovování pevnostních hodnot slitin určených pro použití za zvýšených teplot čas.

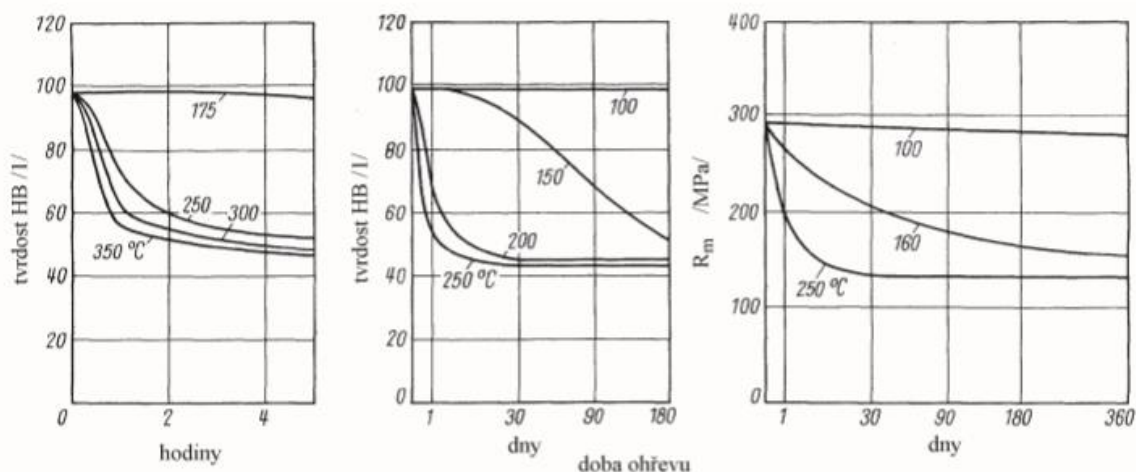
U slitin, které jsou zpevněné tvářením a tepelněmechanickým zpracováním, může dojít od určitých teplot k trvalé změně struktury, které jsou již nevratné. Tj. při ochlazení na pokojovou teplotu jsou vlastnosti jiné než před tepelným zatížením. V takovém případě jsou mechanické vlastnosti závislé na době, po kterou jsou na zvýšené teplotě. Z toho důvodu je důležité zjistit, jak se změny struktury ovlivněné teplotou a výdrží na teplotě promítnou do mechanických vlastností. V případě, kdy je materiál při zvýšených teplotách pod stálým

zatížením, dochází k jeho deformaci, přičemž při zvyšující se teplotě a rostoucím napětí se zvyšuje rychlost deformace. Z toho důvodu i při napětí nižším, než je mez $R_{p0,2}$, dochází, po určité době, k přetvoření vedoucí k lomu. Přípustná napětí jsou v těchto případech závislá na výši teploty a době zatížení. [1][5][20][30]

K výše popsaných mechanickým vlastnostem při zvýšených teplotách se pro popis chování materiálu používají čtyři typy zkoušek, které slouží k zachycení vlivu všech parametrů – teplota, čas, zatížení – na mechanické vlastnosti. Jedná se o:

- Zkoušky prováděné při pokojové teplotě na materiálu, který byl předtím dlouhodobě exponován na určité teplotě

Typickým příkladem zkoušky je sledování vlivu odpěňovacích dějů na vlastnosti (rekrytalizační křivky) nebo vliv teploty na změny vlastností precipitačně zpevněných materiálů. Vliv předchozího ohřevu na tvrdost podle Brinella a pevnost stanovenou při pokojové teplotě (20°C) u slévárenské slitiny G-AlSi10Mg, která byla před ohřevem ve stavu umělého stárnutí je na obrázku 8.



Obrázek 8 - Vliv předchozího ohřevu na tvrdost a pevnost stanovenou při 20°C u slévárenské slitiny G AlSi10Mg, která byla před ohřevem ve stavu po umělém stárnutí

- Zkoušky při určité teplotě, přičemž materiál, který je na této teplotě pouze v průběhu zkoušky a na jejím konci

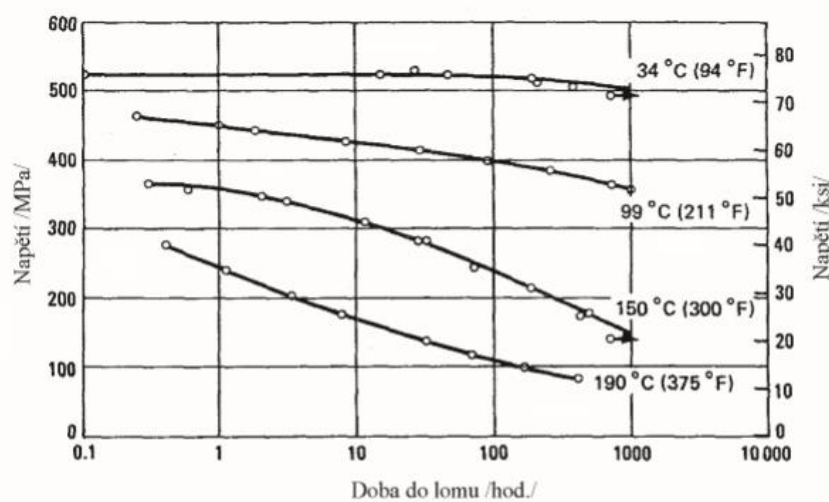
Tyto zkoušky slouží především tam, kde je nutné získat představu o vlivu krátkodobého přetížení při určité teplotě, tj. tam, kde se nepočítá s časovým účinkem na možné strukturální změny, a tím i na vlastnosti. Nejedná se ani o podmínky, při kterých by došlo k výrazným časově závislým plastickým deformacím (creep).

- Zkoušky prováděné při určité teplotě na materiálu, který byl na této teplotě dlouhodobě exponován (bez zatížení) řadu hodin (1000 nebo obvykle 10000 hodin)

- Dlouhodobě deformační zkoušky, při kterých je materiál na určité teplotě staticky zatěžován – zkoušky tečení, creep

Při těchto zkouškách se provádí zkoušky tahem provedené při teplotě, při kterých byl předtím materiál dlouhodobě žihán po dobu 10 000 hodin. Dlouhodobý pobyt na teplotách nižších, než je teplota umělého stárnutí, výrazně degradují pevnostní hodnoty a při 150 °C se pevnosti pohybují již jen kolem 200 MPa (slitina AlZn6MgCu – 7075) – zatímco při teplotě 50 °C se pevnosti pohybují okolo 500 MPa. [1][7][30]

Deformační procesy závislé na čase začínají hrát roli až u dlouhodobého namáhání slitin hliníku při teplotách vyšších, než je 100 °C. Časově závislé změny deformace zatíženého tělesa se sledují za pomoci zkoušek tečení – creep. Během creepové zkoušky se pro dané podmínky zatěžování zaznamenává závislost deformace na čase (křivka tečení). Tento typ zkoušky musí být vyhotovený pro jednotlivé případy slitiny a to z toho důvodu, že na křivku tečení má vliv chemické složení, způsobu a úrovně zpevnění. Z creepových deformačních zkoušek lze získat údaje o napěťových charakteristik – nejčastěji se stanovuje mez pevnosti při tečení, což je napětí, které za danou dobu při teplotě zkoušky vede k dané velikosti deformace. Na obrázku 9 je zaznamenán graf, ve kterém jsou vyneseny křivky tečení na teplotě a dobu lomu.



Obrázek 9 - Pevnost při tečení v závislosti na čase do lomu pro různé teploty zatěžování – plech ze slitiny AlZn6MgCu (7075-T6) po umělém stárnutí

- **Mechanické vlastnosti za nízkých teplot**

Vzhledem k tomu, že hliníkové slitiny, stejně jako většina slitin neželezných kovů, mají vlastnosti v některých případech lepší při nízkých teplotách než při teplotě okolí, tak je nutné znát tyto vlastnosti. Změny mechanických vlastností mají s klesající teplotou u nevytvrzovatelných i vytvrzovatelných slitin velmi podobný průběh. Uvádí se, že od pokojové teploty až zhruba do -100 °C pevnostní hodnoty mírně stoupají, ale při

dalším poklesu teploty je však růst pevnosti daleko rychlejší. Tato schopnost je spojena s kubickou plošně středěnou mřížkou.

2.3.2. Únavové vlastnosti

Při únavovém cyklickém namáhání charakterizujeme odolnost proti únavovým lomům a porušení spojeným s výskytem trhlin v závislosti amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f . Tato závislost vynesena do křivky se nazývá Wöhlerova křivka, která je experimentálně stanovena při zatěžování s konstantní amplitudou síly – tato závislost je vhodná zejména pro vysokocyklové únavy. Křivka se zkoumá kvůli tomu, že v provozních podmínkách může dojít k porušení konstrukce i v případech, kdy napětí vyvolané provozním zatížením je mnohem nižší, než jsou pevnostní charakteristiky zjištěné zkouškou tahem. V oblasti nízkocyklové únavy s cykly N_f pod 10^4 cyklů je vhodnější popisovat únavové životy závislostí mezi amplitudou plastické deformace ε_{ap} a N_f . Křivka únavové životnosti u hliníkových slitin $\sigma_a - N_f$ má jiný tvar, než je tomu u ocelí. U ocelí lze únavové životy v oblasti počtu cyklů do lomu nad 10^7 cyklů charakterizovat jako mezí únavy σ_c , tj. napětím, pod kterým již k porušení nedochází. U většiny hliníkových slitin tomu tak není, protože křivka životnosti s klesajícím napětím stále klesá. Proto se hliníkové slitiny charakterizují časovou mezí únavy pro určitý počet cyklů. Horní hranice bývá 10^8 cyklů. [1]

Únavové vlastnosti u hliníkových slitin závisí hned na řadě parametrů:

- Vliv chemického složení
- Stav tepelného zpracování
- Způsob výroby
- Charakter namáhání
- Kvalita povrchu
- Přítomnost vrubů
- Frekvence zatěžování
- Způsob zatěžování a prostředí

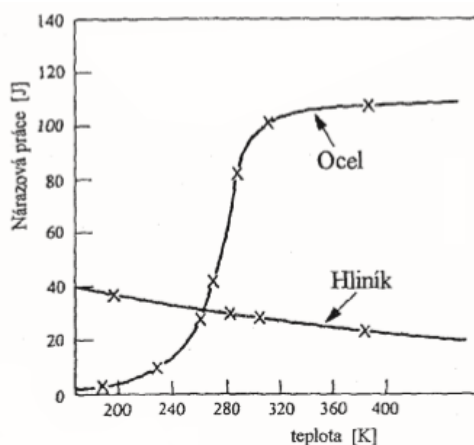
Mezi základní faktory z pohledu zkoušení, které charakterizují vliv různých provozních podmínek namáhání na únavové vlastnosti, patří tvar cyklického zatížení popsany parametrem $R=(\sigma_{\min} / \sigma_{\max})$ a vliv vrubového účinku popsany faktorem K_t . Faktor K_t je faktor vrubovitosti, který je definován jako poměr maximálního napětí v okolí vrubu a nominální hodnoty napětí v objemu vzorku vyvolaném konstantním zatížením. Tyto únavové křivky se tvoří pro střídavý ohyb, ohyb za rotace, vliv asymetrie cyklu zatěžování, vliv teploty zkoušení a vliv vrubového účinku, vliv obsahu Fe a Si, vliv vnitřních pnutí a také vliv technologie odlévání pro slévárenské

slitiny. Dále jsou předmětem intenzivního zájmu únavové zkoušky svarových spojů jak v automobilovém, tak leteckém průmyslu (Kapitola 1.4 – Oblast použití hliníku a jeho slitin) a to z toho důvodu, že únavové vlastnosti svarových spojů budou vždy podstatně nižší, než únavové vlastnosti základního materiálu. [1]

2.3.3. Lomové vlastnosti

Ve strojírenské praxi neexistuje dokonalý materiál, ve kterém nejsou vady nebo trhliny, které ovlivňují odolnost konstrukce proti statickému nebo únavovému namáhání. U některých typů konstrukcí se při snaze zvýšit její životnost předpokládá přítomnost těchto vad a jejich rozvoj do podkritických rozměrů. Při dosažení tzv. kritické délky defektu dochází k porušení konstrukce. Proto je nutné konstrukční materiály určené pro tyto aplikace charakterizovat z hlediska odolnosti proti vzniku a šíření těchto trhlin a definovat kritické rozměry trhlin pro dané podmínky zatěžování. Vztahem mezi velikostí trhlin a podmínkami zatěžování se zabývá lomová mechanika. [1][5]

Lomová mechanika zavádí do výpočtu velikost defektu a , která definuje veličinu nazvanou koeficient intenzity napětí K , který v sobě váže nominální napětí v konstrukci σ a velikost defektu a – vzorec je uveden níže. Za předpokladu, že koeficient intenzity napětí K dosáhne kritické hodnoty, tak dochází k porušení konstrukce. Oproti oceli, kde jsou lomové vlastnosti výrazně závislé na teplotě, jsou lomové vlastnosti u hliníkových slitin s klesající teplotou v řadě případů lepší. Na obrázku 10 je dobře patrný vliv teploty na absorbovanou energii (nárazovou práci) u oceli a hliníku.



Obrázek 10 - Porovnání vlivu teploty na lomové chování oceli a hliníku

$$K = \sigma \cdot \sqrt{(\pi a)}$$

- **Lomová houževnatost**

Pro porušení při statickém zatížení, kdy působící napětí je kolmé na otvírající se trhlínu, je definována kritická hodnota faktoru napětí K_{IC} , při které dojde k lomu. Hodnota K_{IC}

se nazývá lomová houževnatost a charakterizuje odolnost materiálu proti křehkému porušení. Čím vyšší jsou hodnoty lomové houževnatosti, tím je samotná hodnota houževnatosti materiálu vyšší. I přes to, že pro konstrukční aplikace je příznivé, pokud jsou společně s vysokými hodnotami K_{IC} také vysoké hodnoty zjištěné tahovou zkouškou (R_m , $R_{p0,2}$, A), tak mezi pevností, tvrdostí a lomovou houževnatostí neexistuje žádná typická závislost nebo korelace. Z kvalitativního hlediska lomová houževnatost klesá s rostoucí pevností.

Lomovou houževnatost ovlivňují další faktory. Těmito faktory je velikost a hustota intermetalické fáze a stav odpevnění matrice (zotavení, rekrytalizace). U vytvrzovatelných slitin hliníku vykazují hodnoty lomové houževnatosti výraznou anizotropii, která je dána usměrněním struktury při tváření (deformační síly působí stále stejným směrem – lisování, válcování, kování).

Jedním z faktorů, který má na lomovou houževnatost velmi výrazný vliv, je tepelně-mechanické zpracování. Zejména změnou parametrů umělého stárnutí lze měnit a optimalizovat vztah mezi statickými a lomovými vlastnostmi. [5]

- **Šíření únavové trhliny**

Vznik únavové trhliny lze rozdělit do dvou etap. První etapa je obdobím vzniku růstuschopné trhliny (nukleace mikrotrhlin a jejich spojování), která obvykle vzniká na povrchu tělesa a druhá etapa končí lomem – tj. porušení. Současný stav dovoluje přítomnost trhlin v konstrukci, ale je nutné o jejich existenci vědět a mít je pod kontrolou. Rychlost šíření únavové trhliny opět závisí na několika parametrech, např. typ slitiny, čistotě materiálu, směr odběru zkušebního tělesa (anizotropie), parametrů tepelného zpracování a také na prostředí, kde je daný vzorek zkoušen. Jako u lomové houževnatosti, tak i u rychlosti šíření trhliny má vliv obsah intermetalických fází. [5]

2.4. Technologické vlastnosti hliníku a jeho slitin

Soubor fyzikálních a mechanických vlastností materiálu, které umožňují vyrobít definovaným způsobem zpracování výrobek, nazýváme technologickými vlastnostmi materiálu. Mezi tyto vlastnosti patří tvárnost, slévatelnost, svařitelnost a obrobitelnost. Vhodnost určitého materiálu ke zvolenému způsobu technologického zpracování nebo účelu použití daného výrobku se hodnotí speciálními zkouškami, které tuto vhodnost musí potvrdit.

2.4.1. Tvárnost

Při působení vnějších sil tvárnost umožňuje přetvořit materiál do požadovaného tvaru a rozměrů, bez porušení celistvosti materiálu. Tvárnost materiálu je ovlivněna zejména typem

mřížky, chemickým složením, teplotou tváření, druhem napjatosti a stavem tepelného zpracování tvářeného materiálu.

Základem technologických tvářecích pochodů jsou velké plastické deformace, při kterých se trvale mění tvar a rozměry tělesa. Tvářecí metody, jako jsou průtláčné lisování, válcování, kování, tažení a tvarování, jsou realizovány změnou tvaru a rozměrů za pomoci vnějších sil, které působí na materiál prostřednictvím pracovních nástrojů (matrice, válce, kovádla, zápustky). Různé tvářecí pochody si liší různým stavem napjatosti, a tím i velikostí přetvoření, které lze za daných deformačních podmínek. Největších přetvoření lze dosáhnout při převládajících tlakových deformacích. Jak již bylo zmíněno, tak se stav napjatosti nesmí překročit – hrozilo by porušení soudržnosti materiálu.

Odpor kovů proti plastické deformaci je charakterizován přetvárným odporem, který závisí na řadě parametrů. Jedná se především o vliv teploty a rychlosti deformace a dále o stavu napjatosti, chemickém složení materiálu, stupni deformace. Pro hodnocení přetvárného odporu mohou být např. hodnoty z tahové zkoušky, nicméně pro hodnocení v průmyslových podmínkách jsou však vhodnější modelové pěchovací zkoušky nebo zkouška krutem. Z těchto zkoušek, které jsou prováděny při různých teplotách a rychlostech deformace, získáváme deformační křivky, které jsou zdrojem informací pro modelování deformačních procesů. V dnešní době se na základě získaných informací provádí modelové zkoušky pomocí MKP (Metoda konečných prvků). Tyto modelové simulace šetří čas a finance při návrhu nástrojů, nových tvářecích postupů a optimalizaci stávajících technologických postupů. [1] [40] [41]

Hodnocení tvárnosti materiálu nám určují normalizované zkoušky:

- ČSN ISO 7438: Kovové materiály: Zkouška lámavosti
- ČSN ISO 7799: Kovové materiály: Zkouška plechů a pásů (tloušťky 3 mm a méně) střídavým ohybem
- ČSN ISO 1669: Hliník a slitiny hliníku: Zkušební metody – zkouška anizotropie plechů a pásů (kalíškovací)
- ČSN ISO 10275: Kovové materiály: Zkouška prstence vnitřním přetlakem
- ČSN ISO 9649: Kovové materiály: zkouška drátu střídavým krutem
- ČSN ISO 7800: Kovové materiály: Dráty. Zkouška jednoduchým krutem
- ČSN ISO 7801: Kovové materiály: Zkouška drátu střídavým ohýbáním
- ČSN 42 0426: Zkoušení kovů: zkouška pěchování
- ČSN ISO 10113: Kovové materiály: Stanovení součinitele plastické anizotropie plechů a pásů

- ČSN ISO 10275: Kovové materiály: Stanovení exponentu deformačního zpevnění plechů a pásů

2.4.2. Slévatelnost

Slévatelnost je označení pro soubor vlastností nutných k vytvoření dobrého odlitku. Na slévatelnost má vliv tepelná vodivost, délková a objemová roztažnost, teplota tání a tuhnutí, viskozita, průběh tuhnutí. K vytvoření jakostního odlitku především závisí na zabíhavosti a smrštění materiálu.

Zabíhavost je schopnost materiálu dokonale vyplňovat formu. Při zkouškách zabíhavosti se vyhotoví odlitky určitých tvarů za konstantních podmínek lití. Zkušební odlitky mají tvar tyčí, spirál nebo desek. U odlitku tvaru tyče a spirál je mírou zabíhavosti jejich délka. Odlitky tvaru tyče se odlévají ve svislém směru a lze posoudit vliv metalostatického tlaku.

Důsledek smrštění při tuhnutí odlitku je vznik staženin, tvarové zborcení, vznik vnitřních napětí a vznik trhlin. Odlévají se pouze zkušební tyče, které se po zchladnutí porovnávají s modelem.
[1] [40] [41]

2.4.3. Svařitelnost

Strukturní odlišnosti svarového spoje od struktury základního materiálu ovlivňuje nejen mechanické a únavové vlastnosti, ale i jeho korozní odolnost. Změnu vlastností a změnu struktury u svarového spoje především závisí na metodě svařování a typu svařovaných materiálů. Mezi základní metody svařování hliníku patří metoda MIG (Metal Inert gas) a TIG (Tungsten Inert Gas). V poslední době se osvědčují výhody třetího svařování FSW (Friction Stir Welding).

2.4.4. Obrobitelnost

Obrobitelnost je pojem, který zahrnuje jak fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti obráběného materiálu, tak stav techniky obrábění. Pod ten to pojem lze zahrnout několik vlastností a parametrů – požadavky na přesnost, životnost nástrojů, rezné síly, kvalita povrchu. Oproti ostatním kovovým materiálům lze označit hliník za lépe obrobitelný. Obrobitelnost čistého hliníku je velice špatná, zatímco obrobitelnost hliníkových slitin je velmi dobrá. Rozdíl je ve struktuře – vliv precipitátů, konstitučních fází, měkkých částic a v neposlední řadě o stupně deformačního zpevnění působí na obrobitelnost hliníkových slitin velmi příznivě.

3. Technicky čistý hliník

Rozdělení technicky čistého hliníku je uvedeno v tabulce 7. Tyto druhy hliníku se liší čistotou, která se vyjadřuje číselně minimálním obsahem daného kovu v hmotnostních procentech.

Tabulka 7 – Technicky čistý hliník – řada 1000

Technicky čistý hliník – řada 1000					
Označení slitin podle ČSN EN 573-3		Označení slitin podle ČSN		Označení slitin podle DIN 1725-1	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AW-1050A	EN AW-Al 99.5(A)	ČSN 42 4004 ČSN 42 4005	Al 99.5 E Al 99.5	3.0255	Al 99.5
EN AW-1070A	EN AW-Al 99.7(A)	ČSN 42 4003	Al 99.7	3.0275	Al 99.7
EN AW-1080A	EN AW-Al 99.8(A)	ČSN 42 4002	Al 99.8	3.0285	Al 99.8
EN AW-1200	EN AW-Al 99.0	ČSN 42 4009	Al 99	3.0205	Al 99
EN AW-1350	EN AW-EAl 99.5	ČSN 42 4004	Al 99.5 E	-	-
EN AW-1350A	EN AW-EAl 99.5(A)	-	-	3.0257	E-Al

Nejčastější nečistoty v hliníku jsou železo a křemík, které jsou obsaženy již ve výchozích surovinách. Od 0,05 % železa se na hranicích zrn hliníku objevuje eutektikum ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$), které zhoršuje tvárnost a odolnost proti korozi.

Výchozím materiálem pro výrobu tvářených hliníkových polotovarů jsou polokontinuálně odlévané čepy nebo desky. Dráty většího průměru se vyrábějí plynulým odléváním, na které navazuje válcování. Válcování a průtláčné lisování jsou nejčastějšími způsoby tváření hliníku a jeho slitin za tepla, které probíhá v teplotním rozmezí 250 až 350 °C.

4. Slitiny hliníku

Vlastnosti hliníkových slitin se velice mění nalegováním jednoho nebo více prvků do taveniny. Dle legujícího prvku jsou rozděleny slitiny hliníku pro tváření o slévání.

4.1. Vliv legujících prvků prvky

Obsahy legujících prvků se mění v závislosti na budoucí použití slitiny. Nejčastější jsou měď (Cu), hořčík (Mg), mangan (Mn), křemík (Si), železo (Fe) a zinek (Zn).

- Měď – zvyšuje tvrdost a pevnost, zhoršuje tvárnost a odolnost proti korozi
- Hořčík – zvyšuje pevnost, korozivzdornost a vytvrditelnost slitin
- Mangan – zvyšuje pevnost, odolnost proti korozi a tvárnost
- Křemík – zvyšuje pevnost tuhého roztoku, mírně korozivzdornost
- Zinek – zvyšuje pevnost, zhoršuje houževnatost a korozivzdornost
- Nikl – zvyšuje pevnost i houževnatost

- Železo – zvyšuje pevnost a tvárnost, zhoršuje korozivzdornost a houževnatost

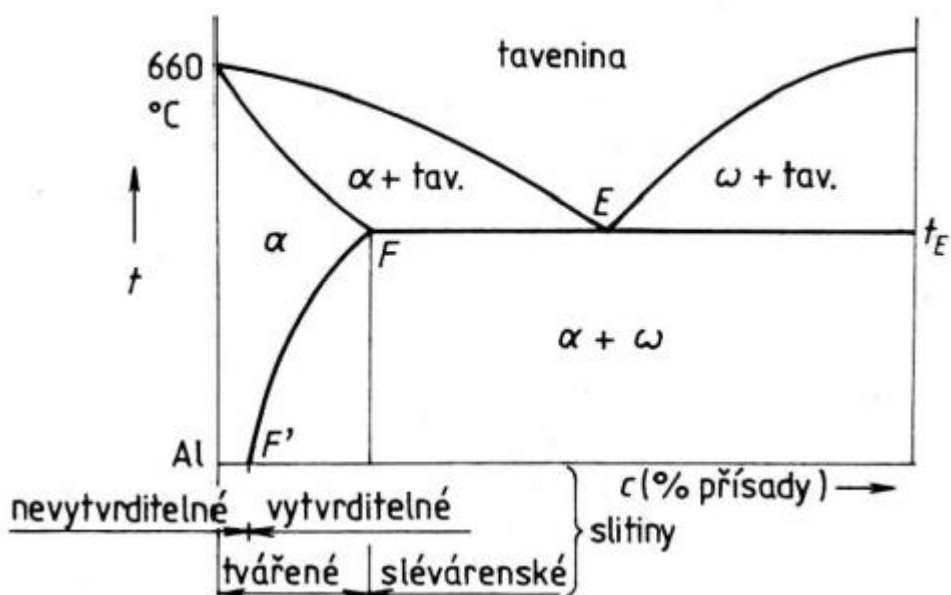
Obsahy legujících prvků rozděleny dle tvářecích a slévárenských slitin jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 – Maximální obsahy legujících prvků

Legující prvek	Tvářené slitiny [%]	Slévárenské slitiny [%]
Cu	>6	>12
Mg	>8	>11
Mn	>2	>2
Si	>1	>25
Zn	>8	>6
Fe	>0,5	>1,6
Ni	>2	>2

4.2. Rozdělení slitin

Slitiny hliníku lze rozdělit dle několika hledisek. Na obrázku 11 je uvedeno schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku, které nám určuje vhodnost slitin hliníku ke slévání, tváření a tepelnému zpracování. Je patrné, že nižší koncentrace legujících prvků jsou vhodné pro tváření až do koncentrace, určující bod F. Od bodu F jsou se zvyšující se koncentrací vhodné pro slévání – objevují se eutektické slitiny, které jsou nejlépe slévatelné. [29]



Obrázek 11 - Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku

Dle vhodnosti způsobu výroby se slitiny hliníku dělí na:

- Tvářené slitiny hliníku
- Slévárenské slitiny hliníku

Dle možnosti precipitačního vytvrzování se slitiny hliníku dělí na:

- Slitiny vytvrditelné
- Slitiny nevytvrditelné

4.2.1. Tvářené slitiny hliníku

Slitiny hliníku, které lze homogenizovat ohřevem do oblasti tuhého roztoku α jsou vhodné ke tváření. Slitiny, které při teplotě okolí obsahují ve struktuře precipitát, jsou vytvrditelné. Nejčastější přísady ve tvářených slitinách hliníku jsou Mg, Mn, Cu, Zn a Ni. Obsahy prvků u tvářených slitin hliníku jsou uvedeny v tabulce 8. Je nutno zdůraznit, že u všech slitin jednotlivých řad lze měnit široké spektrum mechanických, fyzikálních i chemických vlastností přesným chemickým složením, technologickými parametry tváření a tepelným zpracováním.

4.2.2. Označování slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1-3

Tyto normy platí pro tvářené výrobky a ingotu určené ke tváření a stanoví označování písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením, např. EN AW -5052 [AlMg2.5]. [23][24][25]

Jednotlivé části označení následují v pořadí:

- předpona EN následována mezerou,
- písmeno A určuje hliník,
- písmeno W určuje tvářené výrobky,
- spojovací čárka,
- čtyři číslice označují chemické složení.

Seznam všech platných typů hliníku a slitin hliníku pro tváření je obsažen v normě:

ČSN EN 573-3 – Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – část 3

- **Nevytvrzované slitiny**

Hliníkové slitiny řady 3000 a 4000 nelze precipitačně vytvrzovat. Řada 5000 je principiálně možná, ale klesá jejich odolnost proti korozi.

- **Řada 3000 – Al-Mn**

Slitiny Al-Mn se vzhledem k malé rozpustnosti manganu ve fázi α (Tab. 12 – Rozpustnost legujících prvků) nevytvrzují – jsou nevytvrditelné. Slitiny se legují jen do 1,5 Mn, neboť při vyšší koncentraci vznikají fáze Al_6Mn , které zhoršují mechanické vlastnosti. Tyto slitiny lze zpevnit tvářením za studena na $R_m = 200$ MPa při snížení tažnosti $A_5 < 3\%$.

- **Řada 4000 – Al-Si**

Vzhledem k tomu, že křemík má téměř totožnou rozpustnost ve fázi α jako mangan (Si – 1,7 % hm, Mn – 1,8 % hm), tak se také tyto slitiny nevytvrzují – jsou nevytvrditelné.

- **Řada 5000 – Al-Mg**

Rozpustnost hořčíku ve fázi α je značná (Tab. 12 – Rozpustnost legujících prvků), avšak slitiny Al-Mg se nevytvrzují, protože malé zvýšení pevnosti je provázeno velkým snížením tažnosti. Používají se slitiny obsahující do 7 % Mg, protože s rostoucím obsahem hořčíku roste i podíl fáze β (Al_3Mg_2), která zhoršuje tvařitelnost a odolnost proti korozi. Pevnost těchto slitin je do 200 MPa. Deformačním zpevněním je možné zvýšit pevnost na 420 MPa.

- **Vytvrzované slitiny**

Tvářené vytvrzované slitiny hliníku jsou více složkové a tvoří tři hlavní skupiny – Al-Cu-Mg (Ni), Al-Mg-Si a Al-Zn-Mg-(Cu).

- **Al-Cu-Mg**

Tento typ slitin se nazývá dural, resp. superdural při zvýšeném obsahu hořčíku. Tyto slitiny jsou dobře tvařitelné za tepla (380 až 430 °C) i za studena. Po vytvrzení s přirozeným stárnutím se dosahuje pevnosti 370 až 440 MPa, kterou lze dále zvýšit tvářením za studena. Maximálního zvýšení meze kluzu lze dosáhnout pouze umělým stárnutím, která však vede k rychlému poklesu tažnosti i odolnosti proti korozi.

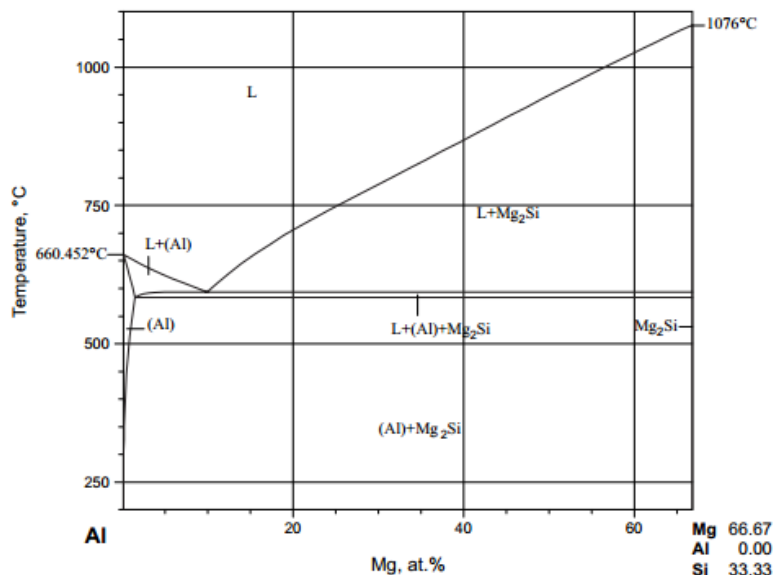
- **Al-Mg-Si**

Tyto slitiny jsou stále častěji používány v automobilovém a leteckém průmyslu, díky výborným vlastnostem tváření, dobré statické i dynamické odolnosti vůči zátěži, dobré korozní odolnosti, dobré svařitelnosti a vhodnosti na obrábění. Obsah legujících prvků většinou nepřekročí hranici 1,5 %. Slitiny 60xx – 62xx jsou označovány jako avialy nebo pantaly. Jsou tvárnější, odolnější proti korozi, lépe se svařují a jejich tepelné zpracování je méně náročné na přesné dodržení teplot. Při vyšším obsahu legujících prvků jsou tyto slitiny také slévateľné.

V systému Al-Mg-Si nebyly zjištěny žádné ternární fáze – křemík je v ternárních rovnováhách přítomen v elementární formě. Tuhé stabilní fáze vyskytující se v systému Al-Mg-Si jsou v tabulce 9.

Tabulka 9 – Tuhé fáze vyskytující se v systému Al-Mg-Si

Označení	β	ε	ζ		β'
Fáze	Al_3Mg_2	$\text{Al}_{30}\text{Mg}_{23}$	$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$	Al_5Mg_4	Mg_2Si
T [°C]	<450	450÷370	<460		<1085



Obrázek 12 - Kvazibinární řez systémem Al-Mg-Si k Mg_2Si

Atomy Mg a Si mají snahu tvořit precipitáty fáze Mg_2Si , kde rozpustnost této fáze klesá dle poměru koncentrace těchto atomů. Stane se tak při poměru koncentrace $\text{Mg}:\text{Si} = 1,73$. Kvazibinární systém řez systémem Al-Mg-Si k Mg_2Si je uveden na obrázku 12. Vykazuje rozšířenou třífázovou oblast L (Tavenina) + (Al) + Mg_2Si a je z něj zřejmá změna rozpustnosti fáze Mg_2Si v tuhém roztoku, a tedy možnost vytvrzování vznikem precipitátů GP a β' , které tvoří přechod k fázi Mg_2Si . [1][7]

Hodnocené vzorky jsou odlévané a lisované polotovary slitin EN AW 6082 a EN AW 6110A.

- EN AW 6082: V tabulce 10 je uvedené chemické složení a minimální hodnoty mechanických vlastností (parametry paralelně ve směru průběhu vláken).

Tabulka 10 - Obsah prvků ve slitině EN AW 6082 a její mechanické parametry

Obsah prvků ve slitině EN AW 6082										
	Al	Mg	Si	Mn	Cr	Fe	Cu	Zn	Ti	Reziduals
Min [%]	95,2	0,6	0,7	0,4	0	0	0	0	0	0
Max [%]	98,3	1,2	1,3	1	0,25	0,5	0,1	0,2	0,1	0,15
Minimální staticko-mechanické parametry										
Rm [MPa]							340			
Rp0,2[MPa]							300			
A5 [%]							10			
HBW 2,5/62,5							100			

- EN AW 6110A: V tabulce 11 je uvedené chemické složení a minimální hodnoty mechanických vlastností (parametry paralelně ve směru průběhu vláken).

Tabulka 11 - Obsah prvků ve slitině EN AW 6110A a její mechanické parametry

Obsah prvků ve slitině EN AW 6110A										
	Al	Mg	Si	Mn	Cr	Fe	Cu	Zn	Ti	Reziduals
Min [%]	94,4	0,5	0,7	0,2	0,04	0	0,2	0	0	0
Max [%]	98,4	1,1	1,5	0,7	0,25	0,8	0,7	0,3	0,15	0,15
Minimální staticko-mechanické parametry										
Rm [MPa]							400			
Rp0,2[MPa]							380			
A5 [%]							10			
HBW 2,5/62,5							115			

▪ Al-Zn-Mg

Ve třetí základní skupině jsou slitiny Al-Zn-Mg s velkým teplotním rozmezím homogenní fáze α , která navíc při ochlazování má velkou termodynamickou stabilitu, což umožňuje snížit ochlazovací rychlost pro vznik přesyceného tuhého roztoku.

▪ Al-Pxxxx

Tyto tvářené vytvrzované slitiny hliníku tvoří materiály určené pro letectví a kosmonautiku. Svým chemickým složením se ani tak neliší od klasických slitin EN AW pro všeobecné využití. Rozdíl je však ve špičkové jakosti vstupních surovin. Do této skupiny se dá zařadit slitina hliníku legovaná lithiem, která se používá ke stavbě letadel.

4.2.3. Slévárenské slitiny hliníku

Ve slévárenských slitinách je hlavní legující prvek Si, dále Cu a Mg. Přítomností Si dochází k výraznému zlepšení slévárenských a technologických vlastností. Měď tvoří vícesložková eutektika, která umožňují tepelné zpracování – zvyšuje pevnost a tvrdost, zlepšuje obrobiteľnosť, zhoršuje tažnosť a korozní odolnosť. Hořčík vytváří intermetalickou sloučeninu, která umožňuje zvýšení pevnostních charakteristik, ale zhoršuje se zabíhavost slitiny. Obecně lze říci, že dobře slévateľné slitiny jsou takové slitiny, které mají co nejmenší interval tuhnutí, nejlépe pak ty s jednou teplotou tuhnutí – eutektické slitiny. [1][7]

4.2.4. Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706

Tato norma platí pro odlitky a stanoví označování písmeny EN AC a pěti číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým složením, např. EN AC-21000 [AlCu4MgTi]. [23][24][25]

Jednotlivé části označení následující pořadí:

- předpona EN následována mezerou,
- písmeno A určuje hliník,
- písmeno C určuje odlitky,
- spojovací čárka,
- čtyři číslice označují chemické složení.

První z pěti číslic v pětimístném označení udává skupinu slitin stejně jako u slitin pro tváření podle hlavních slitinových prvků:

- řada 10000 – Al minimálně 99,00 % a více
- řada 20000 – slitina AlCu
- řada 30000 – slitina AlMn
- řada 40000 – slitina AlSi
- řada 50000 – slitina AlMg
- řada 60000 – slitina AlMgSi
- řada 70000 – slitina AlZn
- řada 80000 – slitina Al s různými prvky

Seznam všech platných typů hliníku a slitin hliníku na odlitky je obsažen v normě:

ČSN EN 1706 – Hliník a slitiny hliníku – odlitky – chemické složení a mechanické vlastnosti:1999.

- **Al-Si**

Slévárenská slitina obsahující křemík jako hlavní legující prvek, je obvykle nazývána silumin. Jsou to nejdůležitější slévárenské slitiny, které mají unikátní kombinace slévateľnosti a dobrých mechanických vlastností spolu s dobrou korozivzdorností. Slitiny mají dobrou svařitelnost. Podle obsahu Si je možné tyto slitiny rozdělit na:

- Pódeutektické – méně než 12 % Si, menší zabíhavost než eutektické, odolné proti korozi, svařitelné
- Eutektické – kolem 12 % Si, vynikající zabíhavost

- Nadeutektické – více než 12 % Si, do 25 %, hlavní předností je velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti a abrazivzodrnosti

- **Al-Cu-Si**

Legováním Si se zlepšují slévárenské vlastnosti. U těchto slitin je v převazu Cu nebo Si. Slitiny s obsahem Cu nad 3% se tepelně zpracovávají. Slitiny s obsahem vyšším než 10 % Si mají nízký koeficient teplotní roztažnosti.

- **Al-Cu**

Obsah Cu je obvykle v rozmezí 4 – 5 %. Tepelným zpracováním lze zvýšit jejich pevnostní vlastnosti vůči litému stavu. Vyrábí se slitiny také s obsahem 9 – 11 % Cu. Ty mají dobré pevnostní vlastnosti za vyšších teplot a také odolnost vůči otěru. Přidáním Ni a Mg lze zlepšit pevnostní charakteristiky. Nevýhodou těchto slitin je horší slévateľnost a korozní odolnost.

- **Al-Mg**

Ze všech slévárenských slitin mají nejnižší mez kluzu. Obsahují 3 - 9 % Mg a jako vedlejší prvek se používá Si ke zlepšení slévateľnosti. Mají výbornou korozní odolnost v mořské vodě, obrobiteľnost, dobrou svařitelnost a zabíhavost. Na druhou stranu mají nízkou odolnost proti trhlinám za tepla.

- **Al-Zn-Mg**

Tyto slitiny již mají dobré pevnostní charakteristiky již v litém stavu. Maximálních pevnostních charakteristik lze dosáhnout po 20 až 30 dnech přirozeného stárnutí.

5. Tváření slitin hliníku kováním

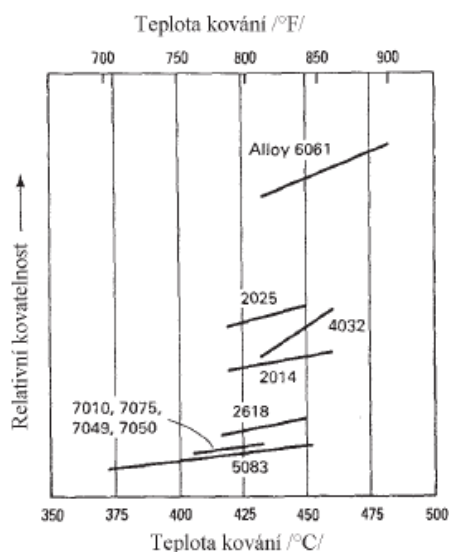
Kování hliníkových slitin je možné realizovat metodou volného kování a metodou zápusťkového kování. Tyto metody se liší hned v několika ohledech, které budou rozebrány v této kapitole.

5.1. Vliv teploty a rychlosti deformace

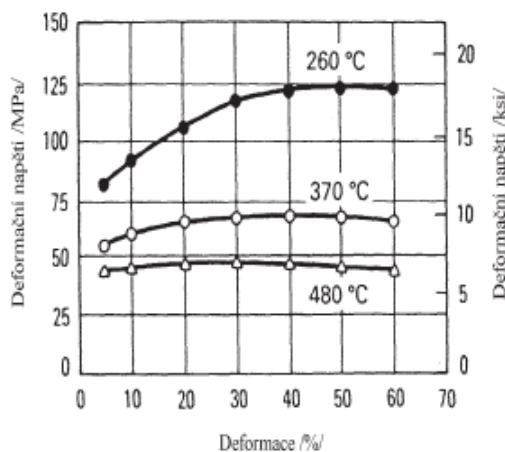
Slitiny hliníku mohou být velice dobře kovány, tudíž lze výkovky dobře tvarově přizpůsobit jejich budoucímu účelu (s porovnáním s ocelovými výkovky). Podmínky samotné kovací operace se mění v poměrně širokém rozmezí v závislosti na chemickém složení slitiny, způsobu kování, tvaru výkovku, typu kovacího stroje a teplotě výkovku a nástroje.

Nejzásadnější parametry, které ovlivňují průběh kování, jsou teplota a rychlost deformace. Dle přiloženého obrázku 13 lze s jistotou určit, že s rostoucí teplotou kování roste relativní kovateľnost. Na dalším obrázku (14) je vynesena závislost deformačního zpevnění na velikosti

deformace pro slitiny 6061 (velmi dobře tvářitelná slitina) při různých teplotách a při rychlosti deformace 10 s^{-1} .



Obrázek 13 - Relativní kovatelnost vybraných slitin hliníku



Obrázek 134 - Závislost def. napětí na velikostech deformace pro slitinu 6061

Rychlost deformace, vedle vlivu teploty, je to parametr, který rozhoduje o průběhu deformace, a tím i o konečných vlastnostech výrobku a ekonomii výroby. Rychlost deformace se při kování mění v širokém rozmezí od větších rychlostí než 10 s^{-1} (dosahovaných na bucharech a mechanických lisech), po menší rychlosti deformace než $0,1 \text{ s}^{-1}$. Nejnižších rychlostí deformace se dosahuje při přesném kování a superplastickém tváření – dosahuje se rychlost až $0,001 \text{ s}^{-1}$. S rostoucí rychlostí deformace se zvyšuje přetvárný odpor.

Teplota kovacího nástroje velice ovlivňuje kovací proces. Optimalizace teploty nástroje společně s teplotou vstupního materiálu a typem kovacího zařízení jsou důležitým faktorem

při přípravě technologického postupu kování. Obvyklá teplota, na kterou jsou nástroje při volném a běžném zápustkovém kování ohřívány, se pro hliníkové slitiny pohybuje v intervalu od 100 do 200 °C (150 – 300 °C). [1][7]

5.2. Způsoby kování

V praxi kování znamená, že se pro složitější výkovky ve výsledném procesu kombinují různé způsoby kování. Kombinují se pro optimální homogenitu tvářené struktury a pro dostatečné protváření, které zajišťuje výsledné vlastnosti. Volné kování může být také předřazeno zápustkovému kvůli úpravě tvaru tvářence – aby jeho tvar byl optimální pro kování v zápustce. Při rozhodování mezi technologiemi kování většinou rozhoduje ekonomické zhodnocení.

Pro kování se používá řada typů bucharů a lisů od mechanických až po hydraulické. Výběr optimálního kovacího stroje závisí na zvoleném způsobu kování, velikosti výkovku a požadovaných tolerancích výkovků.

5.2.1. Volné kování

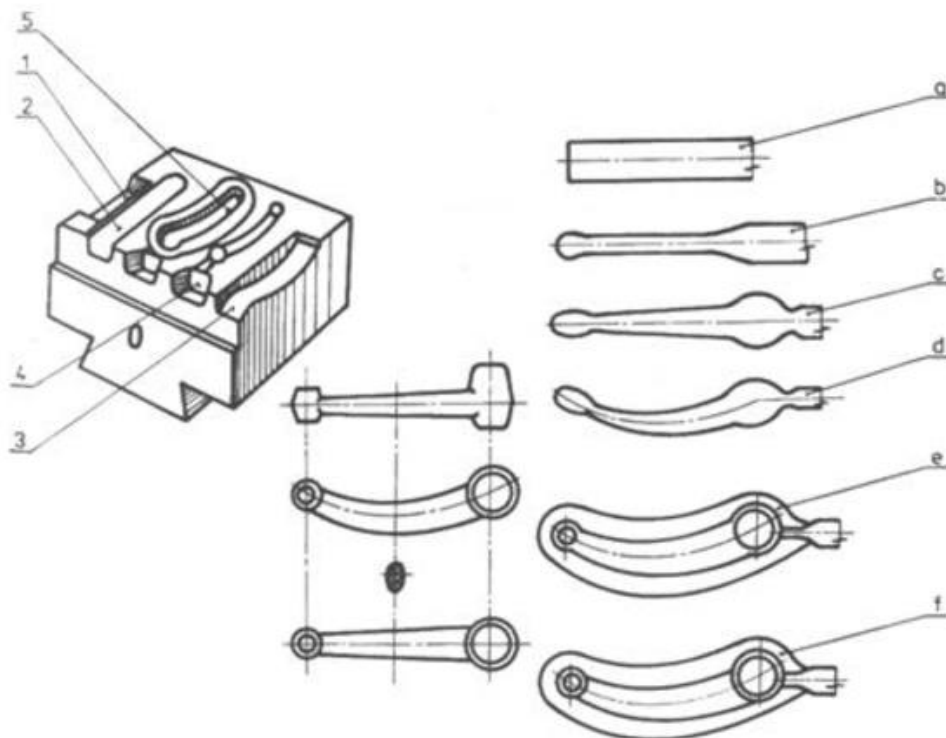
Volné kování je jednoduchou operací, při které je materiál opakovaně tvářen rázy kovádky. Obecně lze říci, že rázy kovádky prokovou materiál jen do určité hloubky, proto buchar působí více rázy. Náklady na kování jsou velmi malé, nicméně vzrostou dokončovací operací – obráběním. Je to z toho důvodu, že při volném kování jsou technologické přídatky velké kvůli limitům této operace. Tím pádem se musí obrobit velký objem materiálu. a to prodražuje celý postup výroby. Proto je tato technologie doporučována pro výrobu v menších sériích a větších výrobcích, popř. pro vývojové práce. Operace volného kování jsou: pěchování, prodlužování, prorážení a ohýbání. [1][33]

5.2.2. Zápustkové kování

Zápustkové kování slouží k výrobě velkého počtu tvarově stejných součástí. Většina hliníkových výkovků je vyrobena kováním v zápustkách. Ohřátý materiál je deformován ve dvoudílné zápustce tak dlouho, dokud nevyplní zápustku a výronkovou drážku (výronková drážka může být uzavřená nebo otevřená). Ekonomický faktor je ovlivňován přesností výroby – čím přesnější výroba, tím dražší zápustka (přísnější rozměrové tolerance, náklady na kvalitu povrchu). Z toho vznikla technologie přesného kování, která využívá uzavřenou zápustku.

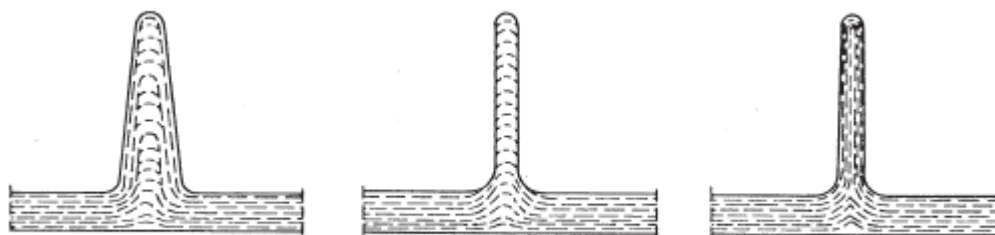
K zápustkovému kování se používají buchary pro kování úderem a lisy pro kování klidným tlakem. U bucharu se dutina zápustky vyplňuje postupně během několika úderů dutiny, při kování na lisech je výkovek zhotoven pouze z jednoho zdvihu, nebo několika zdvihů u postupové zápustky (pro předkování tvarově složitěho výkovku). [1][33][34]

Na obrázku 15 je postupová zápustka pro buchar předního závěsu pro auta (1 – prodlužování, 2 – rozdělování, 3 – předkování, 4 – kování, 5 – dokončovací dutina, a – polotovár). Operace kování s postupovou zápustkou se dělí na rozdělování, předkování, kování a odštíření výrobku. [34]



Obrázek 14 - Postupová zápustka

Přesným kováním vznikají výkovky, které již nepotřebují žádné další obrábění. Dosažitelná drsnost povrchu je $R_a = 3,2$. U přesného výkovku nedochází k k přerušení deformačních vláken a tím uchování mechanických vlastností. Schématické porovnání průběhu vláken v případě běžného výkovku před obrobením a po něm a přesného výkovku jsou na obrázku 16. Na prvním obrázku je výkovek s přídávky na obrábění. Prostřední obrázek znázorňuje výkovek po obrobení a poslední obrázek ukazuje průběh vláken po přesném kování. [1][33][34]

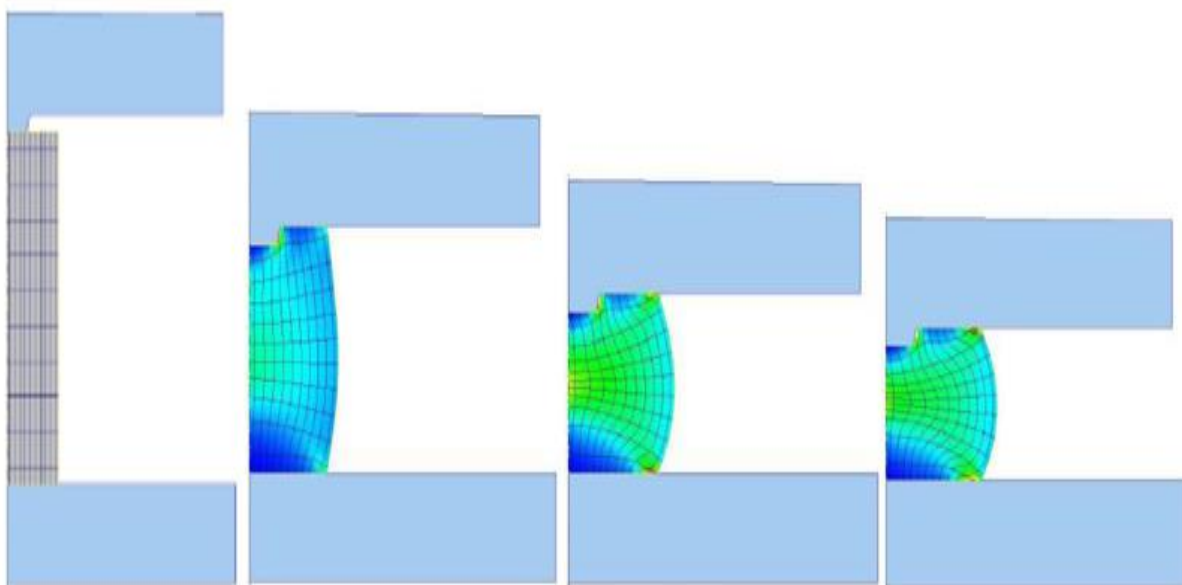


Obrázek 15 - Porovnání průběhu vláken podle způsobu kování

5.3. Homogenita struktury a vlastností

Vlastnosti konečného výrobku jsou ovlivněny všemi technologickými operacemi v průběhu výroby polotovaru i výrobku. Polotovar pro kování může být v lité formě nebo volně kovaný materiál – částečně protvářený lité materiál. U zápusťkových výrobků se používá výlisek, u kterého se operace lití, volné kování a lisování výrazně podepisuje pod výslednou strukturou a mechanickými vlastnostmi. Zejména u vytvrzovatelných slitin je nutné stejně jako u výlisků počítat s výraznou nehomogenitou a anizotropií struktury. Kvůli této nehomogenitě je nutné definovat přesně místa odběrů vzorků pro zkoušku tahem a hodnocení struktury. [1]

Pěchování mezi rovnými kovádky je častá mezioperace mezi polotovarem a výsledným výrobkem. Při pěchování lisované tyče se z kruhového průřezu úderem zmenší jeho výška a zvětší příčný průřez. Tlakovou deformací dojde k zdeformování usměrněné lisované struktury. Na obrázku 17 je znázorněna postupná změna deformace vláken po pěchování válcového polotovaru ze slitiny AA 6101, která byla zaznamenána v programu QForm. [35]



Obrázek 16 - Deformace vláken po pěchování polotovaru

Při volném kování je nutné pro obnovení deformační schopnosti zařazovat mezioperační žíhání. V těchto případech je nutné volit tvářecí postup tak, aby ve výrobku nevznikaly zóny s kritickou velikostí deformace, která vede k lokálnímu zhrubnutí struktury.

Při nestejném protváření v jednotlivých částech výrobku a nehomogenní tok materiálu nastává při zápusťkovém kování nerovnoměrná a nehomogenní struktura. Také mohou vznikat hrubozrnné rekrytalizované vrstvy, které jsou obvykle na povrchu výrobku a jsou tvořeny dlouhými, ve směru toku protaženými zrny. Tyto oblasti hrubozrnné struktury mají nejen nižší mechanické a únavové vlastnosti, ale také zhoršují kvalitu povrchu výrobku. Tvarově složitější

výkovek má vždy místa, která jsou náchylná k tvorbě hrubozrnné struktury. Úkolem technologií je tyto místa minimalizovat. Tyto hrubozrnné vrstvy mohou vznikat již při kování, častěji vznikají až při závěrečném tepelném zpracování při ohřevu na teplotu rozpouštěcího žíhání.

6. Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

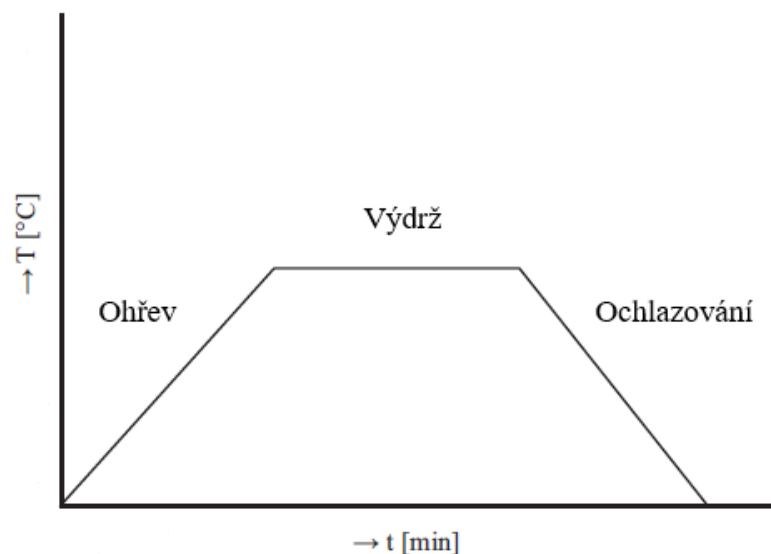
Mezi tepelným zpracováním slitin pro tváření a slitin pro odlévání není zásadní rozdíl. V ČSN 42 0056: Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin je definováno jako pochod, při kterém je výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury/substruktury a vlastností.

Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin můžeme rozdělit do dvou skupin:

- žíhání,
- vytvrzování

6.1. Žíhání

Žíhání se skládá z žíhacího cyklu (Obr. 18), který zahrnuje ohřev, výdrž na teplotě a ochlazování. Žíhací cyklus je definován jako změna teploty výrobku v určitém rozmezí v závislosti na čase.



Obrázek 17 - Žíhací cyklus

- Ohřev – zvyšování teploty výrobku na požadovanou teplotu dle druhu žíhání
- Výdrž – výdrž na konstantní teplotě k provedení žíhání
- Ochlazování – snižování teploty výrobku na požadovanou teplotu

Žíhací cyklus určuje dva parametry:

- Rychlost ohřevu – nárůst teploty ohřívaného výrobku za jednotku času

- Kritická rychlost ochlazování – nejmenší rychlost ochlazování, při které po rozpouštěcím žíhání nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku

6.1.1. Rekrystalizační žíhání

Rekrystalizační žíhání je způsob tepelného zpracování za studena tvářeného kovu, při kterém dochází k vzniku nové rekrystalizované struktury. Tímto žíháním se také mění vlastnosti. Snižují se pevnostní vlastnosti a zvyšují se plastické vlastnosti původně deformovaného materiálu. Teplota závisí na velikosti deformace za studena – s rostoucí deformací klesá teplota rekrystalizace a velikost zrn, a na čistotě hliníku. Se snižující se čistotou hliníku, se teploty začátku rekrystalizačních procesů zvyšují. Teploty pro rekrystalizační žíhání jsou v rozmezí 250–500 °C. Slitiny hliníku, které nejsou schopny vytvrzování, mohou být po skončení rekrystalizace ochlazovány na vzduchu. Vytvrditelné slitiny je nutno ochlazovat pomalu, aby bylo zabráněno částečnému přesycení tuhého roztoku. To by mělo za následek nerovnovážný stav a zvýšení pevnostních vlastností. [1][16][27]

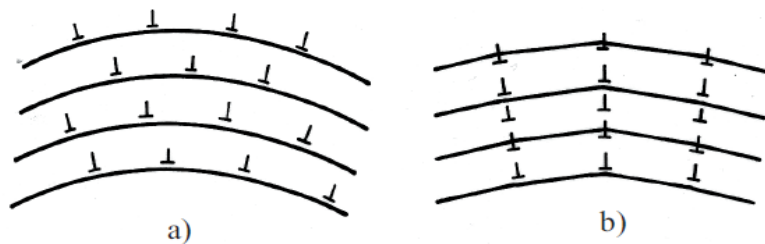
Je možné zhotovit diagramy, ve kterých jsou graficky znázorněny vztahy mezi teplotou rekrystalizačního žíhání, velikostí předcházející deformace za studena a velikostí zrna. Tyto diagramy jsou zhotoveny pro budoucího zákazníka, protože požadují u polotovaru, ve stavu po rekrystalizačním žíhání, určitou velikost zrna.

Fyzikální metalurgie říká, že v silně deformovaném kovu je vysoká hustota dislokací (10^{11} - 10^{12} cm⁻²). Tolik nahromaděných dislokací akumuluje v materiálu deformační energii – kov je v termodynamicky nestabilním stavu. Nestabilní stav má tendenci se dostat do stavu stabilního, což znamená do stavu s nižší entalpií. K dosažení stabilního stavu lze pouze při vyšších teplotách. Za vyšších teplot může dojít k teplotně aktivovaným dějům jako je difuze, příčný skluz a šplhání. Odstranění stavu vzniklého deformací, z hlediska substrukturních a strukturních změn, probíhá třemi pochody:

- Zotavením

Zotavení je charakterizováno odstraňováním nadbytečných bodových poruch a částečným snižováním hustoty dislokací. Především se mění uspořádání dislokací. Nejvyšší stupeň uspořádání dislokací se nazývá polygonizace – při polygonizaci dochází k seskupování dislokací na hranic zrn a subzrn. Velikost odpevnění závislé především na typu materiálu – energii vrstvené chyby. Odpevnění polygonizací představuje u hliníku, hliník má vysokou hodnotu energie vrstvené chyby, až 40 %. Na obrázku 19 je schématické znázornění polygonizace. Na obrázku a) je deformovaný stav s náhodným uspořádáním hranových

dislokací a na obrázku b) je již zotavení substruktura tvořená subzrny oddělenými malouhlovými hranicemi tvořenými uspořádáním hranových dislokací do řad nad sebou.



Obrázek 18 - Schématické znázornění polygonizace

- Rekrystalizací

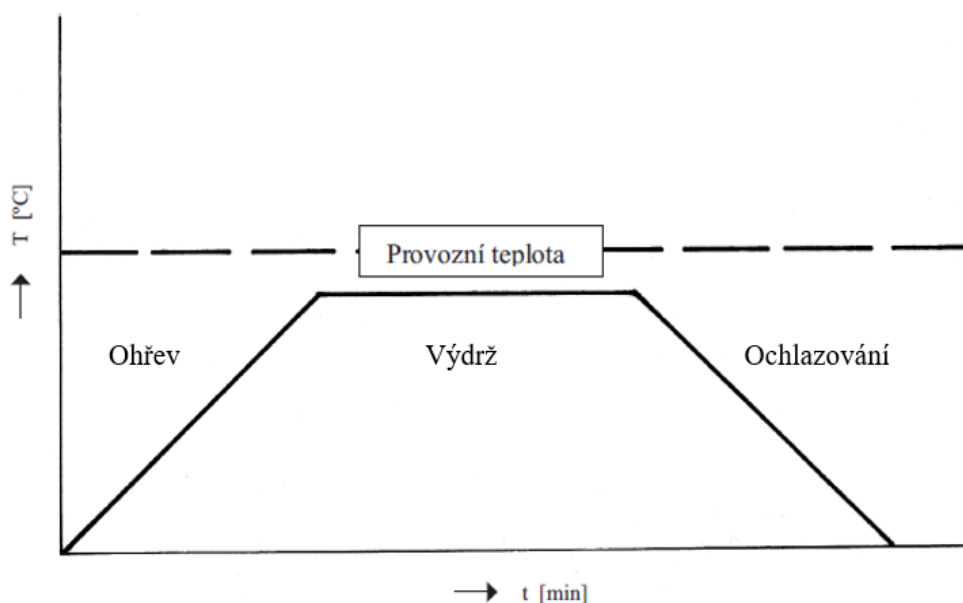
Rekrystalizace nastává při dalším žhání, dochází k uvolnění zbytku uložené energie. Nastává pohyb velkouhlových hranic zrn, které migrují z míst s nižší dislokační hustotou do míst, kde je hustota dislokací vyšší. Hustota dislokací se rekrystalizací postupně snižuje na hodnotu, která byla v kovu před plastickou deformací. Rekrystalizace je doprovázena výrazným poklesem pevnosti a tvrdosti, růstem tažnosti a houževnatosti – kov získává vlastnosti před plastickou deformací. [1][16][30]

- Růstem zrna

Po rekrystalizaci, když rostoucí zrna spotřebovala deformovaný materiál, může dojít k dalšímu snížení energie kovu snížením úhrnné plochy povrchu zrn. Hlavním faktorem růstu zrn je povrchové napětí hranic zrn. Růst zrna nastává při sekundární rekrystalizaci.

6.1.2. Stabilizační žhání

K dosažení stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních, chemických vlastností a rozměrů výrobků se používá stabilizační žhání. U hliníkových slitin se pracuje při teplotách 240–350 °C



Obrázek 19 - Teplotní cyklus stabilizačního žhání

nebo při teplotách nižších, než bude jejich provozní teplota. Tento typ tepelného zpracování je využívám pro výrobky, které budou pracovat za zvýšených teplot. Obrázek 20 znázorňuje teplotní cyklus stabilizačního žihání. [1][16][30]

6.1.3. Žihání ke snížení pnutí

K žihání ke snížení pnutí dochází pod rekrytalizační teplotou (300 - 400 °C) hliníkových slitin, výdrž na této teplotě s následným řízeným ochlazováním – do 200 °C.

6.1.4. Žihání s částečnou rekrytalizací

Vznik rekrytalizované struktury vznikne rekrytalizačním žiháním. Pro částečnou rekrytalizaci se používá teplotní cyklus se stejnými teplotami, ale kratší dobou ohřevu (aby nedošlo k plné rekrytalizaci).

6.1.5. Homogenizační žihání

Vyrovňávají se difuzní rozdíly v chemickém složení vzniklé po odlití a dosáhne se homogenních vlastností pro další tepelné zpracování.

6.1.6. Rozpouštěcí žihání

Popsáno v následující kapitole.

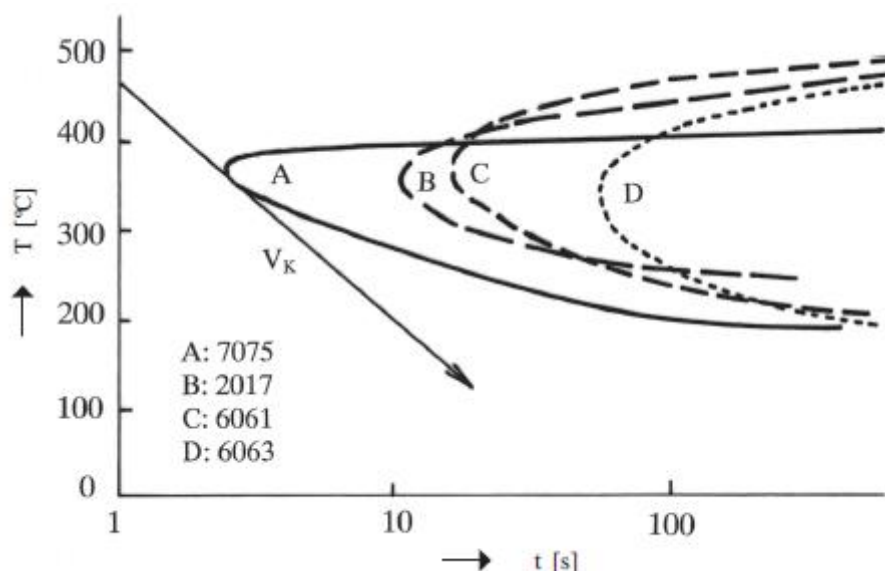
6.2. Precipitační zpevnění – vytvrzování

Při precipitačním vytvrzování dochází k rozpadu termodynamicky nestabilního přesyceného tuhého roztoku α a vzniku jemných precipitátů. Základní podmínkou vytvrzování je výrazná změna rozpustnosti legujícího prvku na teplotě dle rovnovážného diagramu dané hliníkové slitiny. Jak je uvedeno v kapitole 2.3.1 Mechanické vlastnosti, vytvrzování se skládá z rozpouštěcího žihání a stárnutí. Tyto dvě operace na sebe navzájem navazují a v konečném výsledku ovlivňují mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti slitin. [1][27]

6.2.1. Rozpouštěcí žihání

Rozpouštěcím žiháním se rozumí ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, výdrž na této teplotě po dobu nutnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku (u slitin řady 6000 se jedná o fázi Mg_2Si) a následující rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání přesyceného tuhého roztoku α . Kritická rychlost ochlazování je nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.

V souvislosti s kritickou rychlostí ochlazování je – v_k – je nutno se zmínit o „C“ křivkách, které se uplatňují jak v technologii tepelného zpracování hliníkových slitin, ale také u tepelného zpracování ocelí – kalení. Na obrázku 21 jsou vyneseny čtyři „C“ křivky hliníkových slitin a pro slitinu EN AW7075 také kritická rychlost ochlazování. Touto rychlostí lze dosáhnout 95% z maximálně možné hodnoty R_m . [1][27]



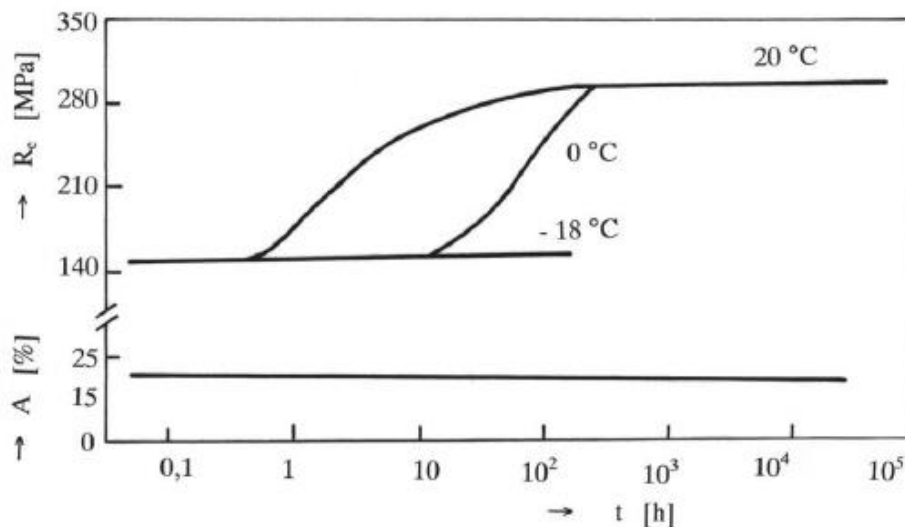
Obrázek 20 - "C" křivky pro vybrané slitiny hliníku

6.2.2. Stárnutí

Stárnutí je proces, při kterém dochází ke změně substruktury a v důsledku toho i ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností – to se nazývá kinetika rozpadu (Obr. 22). Je realizováno buď za pokojové teploty (přirozené stárnutí), nebo za zvýšených teplot (umělé stárnutí). Někdy se z technologických důvodů realizuje stupňovité stárnutí, což je proces tepelného zpracování po rozpouštěcím žíhání uskutečněný při dvou nebo více teplotách, která se zvyšují během tohoto žíhacího cyklu. Z již vytvořených křivek umělého stárnutí lze určit zákonitosti, které platí pro všechny hliníkové slitiny:

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

Stárnutím lze získat maximální možné pevnostní charakteristiky, které jsou specifické pro každou slitinu. Čas stárnutí (rozpadu přesyceného tuhého roztoku) závisí především na chemickém složení slitiny. [1][27]



Obrázek 21 - Kinetika rozpadu přesyceného tuhého roztoku slitiny EN AW 2024

Z kinetiky rozpadu slitiny Al-Cu-Mg vyplývají důležité informace, které obecně popisují chování všech hliníkových slitin řady 2000.

- Při záporných teplotách nedochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku
- Při 0 °C je kinetika rozpadu opožděná
- Kinetika rozpadu se nemění po 10² hodin
- Plastické vlastnosti (tažnost) se v podstatě nemění

6.3. Tepelné zpracování slitin typu Al-Mg-Si (série 6000)

Intervaly legujících prvků, které nesmí překročit dovolený obsah, jsou v tabulce 12.

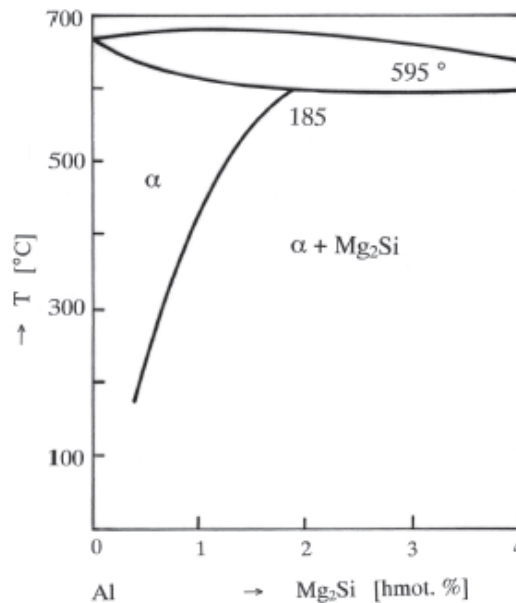
Tabulka 12 – Interval legujících prvků pro slitiny série 6000

Intervaly legujících prvků slitin pro tváření								
	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Zn	B, Ti, Zr	Pb, Bi, Sn
Min [%]	0,2	0,2	0	0	0	0	2	0
Max [%]	1,5	2	1,5	0,5	2	2,5	0,3	1

Z kapitoly 6.2 Precipitační vytvrzování jsou slitiny schopné vytvrzování v důsledku změny rozpustnosti intermetalické fáze Mg₂Si v hliníku v závislosti na teplotě. Diagram pro slitiny typu Al-Mg-Si je na obrázku 23. Z tohoto diagramu se odvozují podmínky rozpouštěcího žhánání všech slitin, které z hlediska přebývajícího množství Mg nebo Si, které zbyde po vytvoření intermetalika Mg₂Si, lze rozdělit do dvou skupin:

- Slitiny s přebytkem Mg – mají zvýšenou korozní odolnost, zhoršenou tvařitelnost (v porovnání se slitinami s přebytkem Si)

- Slitiny s přebytkem Si – mají vyšší pevnostní vlastnosti a zhoršenou svařitelnost (v porovnání se slitinami s přebytkem Mg)



Obrázek 22 – Rovnovážný diagram Al-Mg-Si

6.3.1. Rozpouštěcí žíhání

Teplota rozpouštěcího žíhání se pohybuje v rozmezí 500 - 540 °C. Vzhledem k vysoké stabilitě tuhého roztoku α (zejména slitiny s přebytkem Mg) jsou slitiny „samokalitelné“ – tzn., že přesycený tuhý roztok lze získat i při ochlazování z teploty rozpouštěcího žíhání na vzduchu. U slitin s přebytkem Si je nutno ochlazovat ve vodě.

6.3.2. Umělé stárnutí

Umělé stárnutí se realizuje při teplotách 160 – 180 °C. V rozmezí těchto teplot je volba prodlevy obvykle v rozmezí 8 – 12 hodin. Tyto slitiny jsou citlivé na pauzu mezi ochlazením z teplot rozpouštěcího žíhání a začátkem umělého stárnutí. Doporučuje se začít s umělým stárnutím okamžitě po ochlazení z teploty rozpouštěcího žíhání. Nebo tuto prodlevu prodloužit na několik hodin (až 10). Je to z toho důvodu, aby bylo možné získat maximální pevnostní vlastnosti.

Rozpad přesyceného tuhého roztoku α až na rovnovážný stav se realizuje následně:



- GPI – neuspořádané zóny jehlicového tvaru
- GPII – uspořádané zóny jehlicového tvaru
- β' - částečně koherentní intermetalická fáze blízká chemickému složení Mg_2Si
- β – nekoherentní intermetalická fáze Mg_2Si

7. Metalografická příprava hliníkových slitin

7.1. Odebírání vzorků

Odebíraný vzorek musí plně charakterizovat studovaný materiál. V případě, že k plné charakterizaci původního materiálu nestačí jeden vzorek, musí se odebrat vzorků několik. To je nezbytné v případě vzorků s nehomogenní strukturou, například u litých struktur se vyskytuje odměšení či nestejnoroďnost struktury způsobená rozdílnou rychlostí ochlazování v okrajových a středových částech odlitku, což se navenek projeví rozdílnou velikostí zrna. Podobná situace nastává u materiálů tvářených, kdy vzorek má jinou strukturu ve směru tváření a jinou ve směru kolmém, například při válcování ingotů dochází k protažení zrn uvnitř materiálu v jednom směru.

Techniky odběru vzorku jsou různé (řezání, vrtání, frézování, rozbrušování atd.). Ve většině případů mají uvedené techniky společný jeden rys a tím je intenzivní vznik tepla při dělení materiálu. Uvolněné teplo může vést ke změně struktury, u některých kovů může dojít ke vzniku jiné modifikace, či dokonce k lokálnímu natavení materiálu. Tyto jevy jsou vysoce nežádoucí, a proto se uvolněné teplo většinou odvádí použitím různých chladicích kapalin při dělení. Proto je nutné způsob dělení materiálu při odběru vzorku dokonale uvážit, zvláště u vzorků s nízkou teplotou tání.

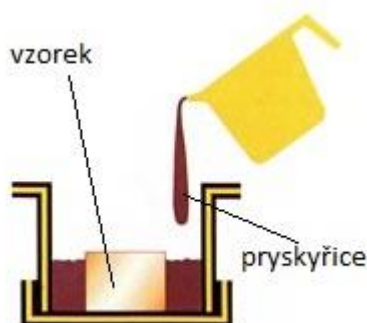
K odebírání vzorků se nejčastěji používají přesné rozbrušovací pily, popř. elektrojiskrové řezačky. Přesná pila zaručuje přesný odběr vzorku z malých a tvarově složitých výrobků. Rozbrušovací pily se používají pro abrazivní rozbrušování za tepla. Elektrojiskrové řezačky jsou stroje s drátem, který má funkci elektrody a odebírá materiál sérií výbojů, vznikající interakcí mezi obrobkem a elektrodou za přítomnosti dielektrika. [1][41][42]

7.2. Preparace vzorků

Pokud jsou odebrané části materiálu malé, je nutná preparace v umělé hmotě. Zvětší se tak plocha metalografického výbrusu a usnadní se manipulaci při následném broušení a leštění. V praxi se používají dva základní typy preparace: za studena nebo za tepla.

7.2.1. Zalévání za studena

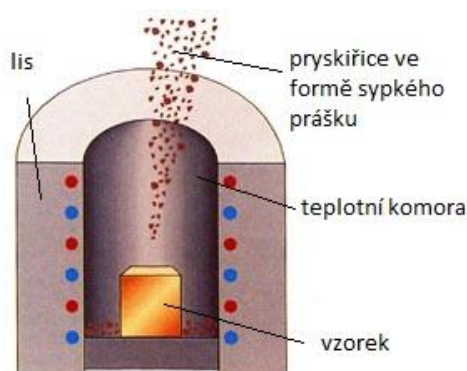
Preparace za studena se používá u vzorků náchylným ke změnám struktury při zvýšených teplotách a provádí se tak, že studovaný vzorek umístěný do speciální nádoby zalijeme kapalinou, která po určité době ztuhne (například Dentakryl) – Obrázek 24. Pro elektronovou mikroskopii se používá zalévací hmota VersoCit-2.



Obrázek 23 - Zalévání vzorku za studena

7.2.2. Zalévání za tepla a tlaku

Preparace za tepla se používá u vzorků, u kterých nehrozí ovlivnění struktury teplem a provádí se tak, že se vzorek umístěný do vyhřívané "tlakové nádoby" zasype práškem ze speciální umělé hmoty. Tato hmota se při současném působení zvýšené teploty a tlaku roztaví a dokonale obklopí studovaný vzorek, viz obrázek 25. Po vychladnutí je vzorek připraven k další proceduře - broušení. Jako lisovací hmota pro vzorky na SEM se používá Duroplast (černá, elektricky vodivá dialyftalátová pryskyřice s obsahem grafitu). [1][41][42]



Obrázek 24 - Zalévání vzorku za tepla

7.2.3. Lisovací a zalévací hmoty pro světelnou mikroskopii:

- **Bakelit** - fenolová pryskyřice, nejčastěji černé barvy
- **Akrylová termoplastická pryskyřice**
- **EPO** – epoxidová pryskyřice minerálním a skelným pojivem
- **Dentakryl** – bezbarvý prášek mísící se s kapalinou

7.3. Broušení vzorků

Broušení je operace, při které dochází k intenzivnímu odebrání hmoty z povrchu materiálu. Cílem je dosáhnout rovinného povrchu vzorku s minimálním poškozením, které se snadno odstraní při leštění. Podle techniky provádění se dělí na ruční a mechanické broušení. [1][41][42]

7.3.1. Ruční broušení

Při ručním broušení pomocí brusného papíru pohybujeme vzorkem stále jedním směrem. Při přechodu na brusný papír s menší drsností vzorek opláchneme vodou a brousíme jej ve směru kolmém k předcházejícímu směru. Důkladné oplachování vzorku je nezbytné, aby nedošlo k znehodnocení jemnějšího papíru uvolněnými zrnky hrubšího brusiva z předchozího papíru. Brousí se tak dlouho, dokud nezmizí drážky z předchozího směru broušení. Poté se vzorek opět opláchně a přejde se na jemnější papír s vyšší zrnitostí. Proces se opakuje, dokud se nevyčerpá nejjemnější brusivo. K broušení se obvykle používají SiC nebo Al_2O_3 brusné papíry s dostupnou zrnitostí 60 až 2400 dle normy FEPA.

7.3.2. Mechanické broušení

Mechanické broušení se provádí na metalografických bruskách a vzorek je při něm přitlačován na brusný papír uchycený na rotujícím vodorovném kotouči brusky. Běžné rychlosti otáčení jsou 30 až 150 otáček za minutu.

Vysoká rychlost pohybu brusného papíru vyžaduje chlazení vzorku vodou nebo jiným chladicím médiem. Brusivo se volí podle materiálu připravovaného vzorku. Obvykle se používá SiC, Al_2O_3 , ZrO_2 nebo diamant.

7.4. Leštění vzorků

Leštění je dalším krokem při přípravě kvalitního výbrusu. Na rozdíl od broušení materiál z povrchu vzorku neubývá, ale dochází pouze k deformaci vrcholů drsnosti. Leštění se provádí mechanickým nebo elektrolytickým způsobem.

7.4.1. Mechanické leštění

Mechanické leštění je obdobnou operaci broušení. Provádí se přitlakem leštěné plochy na leštící kotouč za přítomnosti leštícího média. Materiál leštícího kotouče může být samet, satén, flanel a další textilie. Brusivo může být v podobě prášku, pasty nebo suspenze. Nejčastěji se používá MgO, Al_2O_3 a diamantová pasta.

7.4.2. Elektrolytické leštění

Princip elektrolytického leštění je založen na připojení vzorku jako anody a katodou je nerezavějící ocel. Na anodě se vytvoří tenká povrchová vrstva, která je nejslabší v místech výstupků. Zde je největší proudová hustota, a proto se tyto výstupky rozpouštějí.

Elektrolytické leštění je ovlivněno vzdáleností elektrod, složením elektrolytu, teplotou elektrolytu, plochou leštěného vzorku a proudovými podmínkami. Elektrolytickým leštěním nedochází k mechanickému namáhání vzorku. [1][41][42]

Experimentální část

Ze společnosti Strojmetal aluminium forging s.r.o. byly dodány vzorky slévaných a tvářených polotovarů slitin hliníku EN AW 6082 a EN AW 6110. Slévané polotovary o průměru 400 mm byly vyrobeny metodou HCM (horizontální přetlakové lití). Tvářené polotovary o průměru 300 mm byly vyrobeny průtlačným lisováním za tepla.

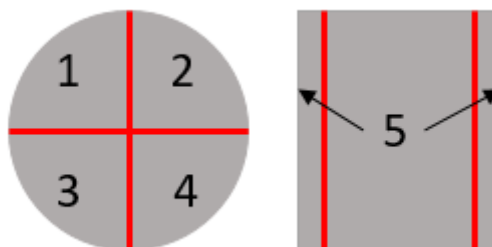
Cílem experimentu je analyzovat strukturu polotovarů v průřezu a vyhodnotit velikosti zrna, případnou heterogenitu chemického a fázového složení pro oba polotovary i oba materiály. Pro posouzení vlivu mikrostruktury na mechanické vlastnosti byly měřeny průběhy mikrotvrdomosti.

8. Metalografická příprava dodaných vzorků

Z obou typů polotovaru a z obou materiálů byly připraveny metalografické výbrusy pro světelnou mikroskopii, elektronovou mikroskopii (Skenovací elektronový mikroskop – SEM) a pro průběh mikrotvrdomosti.

8.1. Rozřez vzorků

Před odběrem vzorku bylo nejprve potřeba určit místo přerážnutí vzorku. Na obrázku 26 jsou schematicky vyznačena místa, kde byl proveden rozřez vzorků. Z každého polotovaru bylo zhotoveno několik vzorků. K odběru vzorku byla použita technologie řezání na pile LECO MSX255 pomocí kotouče pro neželezné kovy s označením 811-077-010 a chladicí kapaliny.



Obrázek 25 - Místa pro odběr vzorků

8.2. Preparace vzorku

Po rozřezání vzorků byla použita fixace za tepla a tlaku, z důvodu zvětšení plochy metalografického výbrusu a snadnější manipulaci. Pro zalisování byl použit přístroj LECO PR 4X.

8.2.1. Parametry lisování

- Prášek – Black Bakelit Powder
- Teplota, tlak a doba lisování – 160 °C, 20 MPa, 3,5 min

- Ochlazovací kapalina – voda, 65 °C

8.3. Broušení

Po zalisování byly vzorky opracované na metalografické brusce LECO GPX 300. Bylo použito několik drsností brusných kotoučů (Tabulka 13) při otáčkách 150 ot/min a chlazení kapalinou. Od nejhrubšího brusného kotouče se začaly připravovat vzorky na leštění. Mezi každou výměnou kotouče byl vzorek očištěn acetonem z důvodu vizuální kontroly broušeného povrchu.

Tabulka 13 – Zrnitosti použitých kotoučů

Brusné kotouče	Zrnitost P
1.	P120
2.	P320
3.	P800
4.	P2500
5.	P4000

8.4. Leštění

Při leštění materiál z povrchu vzorku neubývá (tak jako u broušení), ale dochází pouze k deformaci vrcholů drsnosti. Leštění probíhalo na stejné brusce jako broušení, pouze se vyměnil brusný kotouč za kotouč leštící. K usnadnění leštění byla použita Silice.

8.5. Leptání

Pro leptání byl použit dokument ASTM Designation E407 – 07 – Standart Practice for Microetching Metals and Alloys. Pro hliníkové slitiny řady 6000 je uváděno několik doporučených způsobů, kterými je možné leptat.

8.5.1. Leptání HCM polotovarů

Leptání HCM polotovarů bylo provedeno pomocí leptadel Dix-Keller a Weck. Leptání probíhalo ponorem do směsi destilované vody a kyseliny fluorovodíkové (200 ml destilované vody a 1 ml kyseliny fluorovodíkové o koncentraci 50 %).

Postup leptání HCM polotovarů

- Potěr leštěných vzorků po dobu 10 sekund připraveným leptadlem
- Oplach proudem studené vody
- Oplach acetonem
- Vysušení
- Kontrola vzorku pod světelným mikroskopem

Tento postup je možné několikrát opakovat do té doby, než pod světelným mikroskopem bude vidět výsledná struktura.

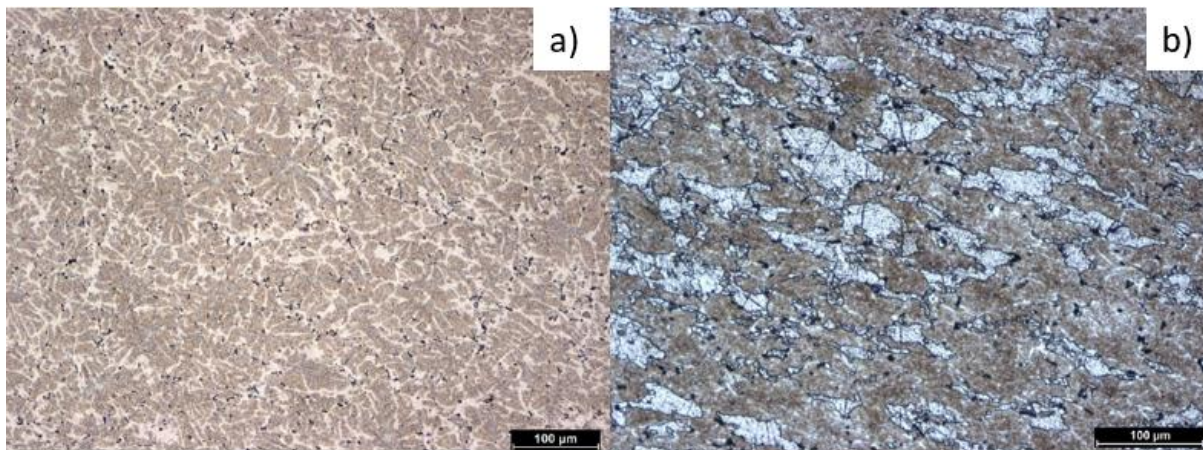
8.5.2. Leptání lisovaných polotovarů

Jako první způsob leptání lisovaných polotovarů byl vyzkoušen stejný postup jako při leptání HCM polotovarů. Nicméně tento způsob byl neefektivní, z toho důvodu bylo vyzkoušeno hned několik dalších postupů dle ASTM E407 – 07, ale také zkoušení vlastních poměrů a koncentrací kyselin.

Použité metody leptání lisovaných polotovarů

- Modifikace Dix-Kellerova leptadla

Složení bylo stejné jako pro HCM polotovary (200 ml destilované vody a 1 ml 50% HF), ale postup leptání se lišil. Leptání potěrem bylo neefektivní, tak se použila metoda leptání ponorem, kde se vzorek ponořil do leptadla a ponechal se tam po dobu 3-5 sekund – opět bez výraznějšího efektu. I při delší době ponoru nebylo možné na světelném mikroskopu rozpoznat hranice zrn, pro úspěšné zjištění velikosti zrn. Obrázek 26 dokumentuje naleptané vzorky lisovaných polotovarů a) EN AW 6082 a b) EN AW 6110.



Obrázek 26 - Naleptaná struktura a) EN AW 6082, b) EN AW 6110

Výsledek všech modifikací byl prakticky stejný nebo velice podobný jako na obrázku 27. Další modifikace Dix-Kellerovy metody, které byly použity:

Složení: 100 ml destilované vody + 3 ml 50% HF, doba ponoru 5 s

Složení: 100 ml destilované vody + 1 ml 75% HF, doba ponoru 10 s

Složení: 100 ml destilované vody + 1 ml 40% HF, doba ponoru 10 s

Složení: 100 ml destilované vody + 0,5 ml 48% HF, doba ponoru 15 min

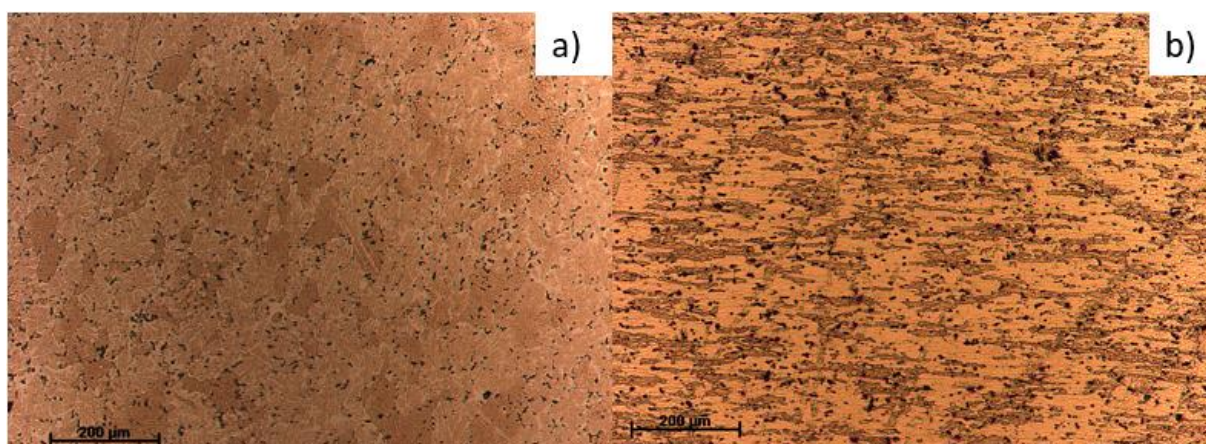
- Použití jiného leptadla – varianta 1

Složení: 190 ml destilované vody + 2 ml HF + 3 ml kyseliny chlorovodíkové (HCl) + 5 ml kyseliny dusičné (HNO₃). Postup leptání tímto leptadlem je téměř obdobný. Leptání probíhalo

ponorem po dobu 10 – 20 sekund a následným oplachem teplou vodou (70 °C). Ani při několikanásobném opakování celé procedury nebylo možné rozpoznat hranice zrn. Leptadlo v tomto případě vyvolalo pouze strukturu, která je opět velice podobná obrázku 27.

- Použití jiného leptadla – varianta 2

Složení: 75 ml destilované vody + 25 ml HNO₃. Postup leptání je v tomto případě jiný – leptadlo se zahřálo na teplotu 70 °C a vzorek byl ponořen do leptadla po dobu 40 sekund s následným oplachem pod proudem studené vody. U této varianty (Obrázek 28) došlo k mírnému zlepšení v porovnání s obrázkem 27.



Obrázek 27 - Naleptaná struktura: a) EN AW 6082, b) EN AW 6110

- Elektrolytické leptání

Pro zviditelnění hranic zrn bylo použito také elektrolytické leptání. Pro oba materiály byly použity dvě modifikace tohoto způsobu leptání. Složení tohoto leptadla je: 90 ml destilované vody + 10 ml 85% kyseliny fosforečné (H₃PO₄) s katodou z korozivzdorné oceli.

Proud: 7 V, DC – doba ponoru 30 s

Proud: 8 V, DC – doba ponoru 45 s

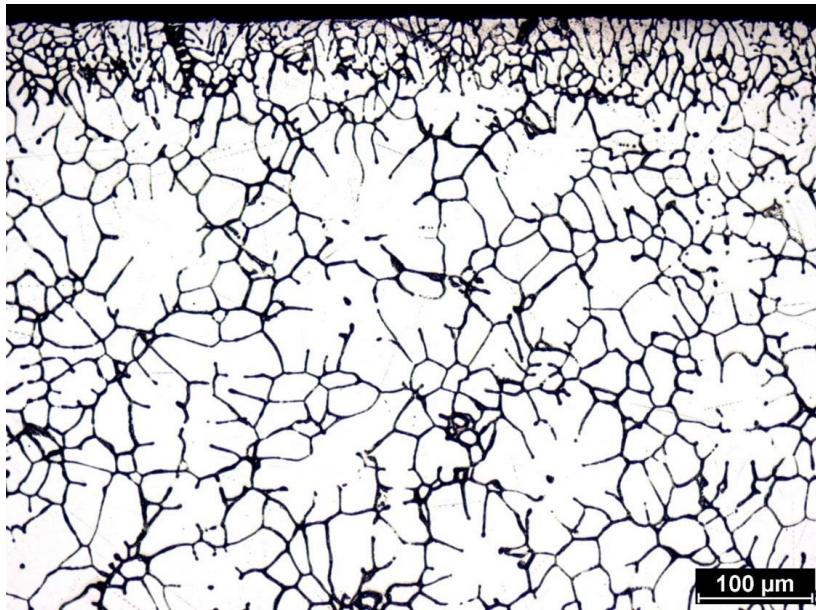
Ani v jednom případě slitiny EN AW 6082 a EN AW 6110 nezačaly v daných podmínkách reagovat a nenastala žádná změna od leštěného stavu.

9. Světelná mikroskopie

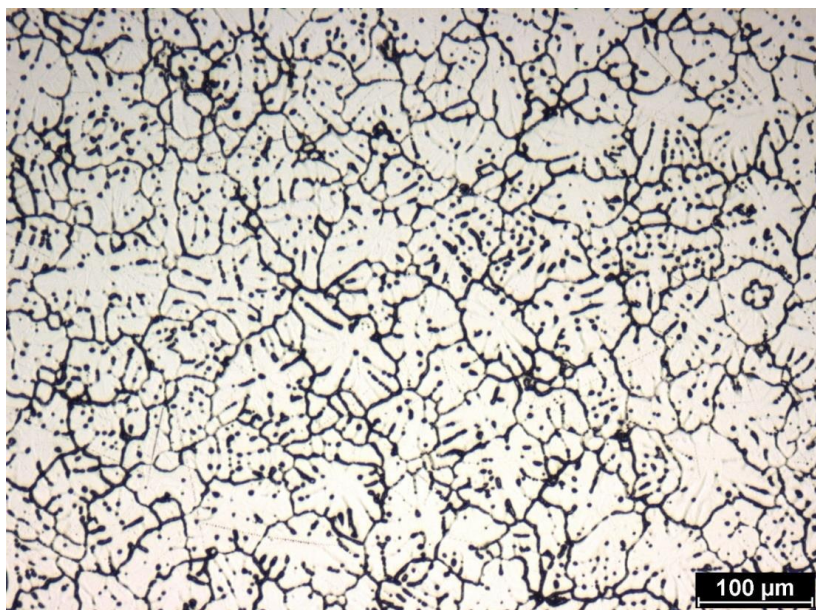
K určení velikosti zrna a struktury materiálu byl použit světelný mikroskop s programem NIS – Elements AR. Na každém vzorku byly zhotoveny snímky na povrchu materiálu, v mezilehlé oblasti a v jádře polotovaru.

9.1. Polotovar HCM EN AW 6082

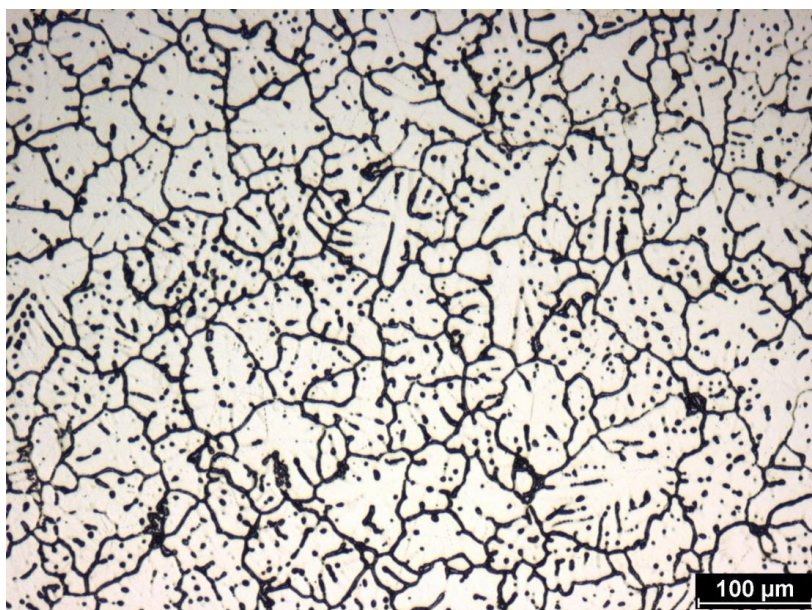
Na snímcích (Obrázek 29, 30, 31) je patrné, že zrna mají dendritický charakter a velikost zrna se v průřezu materiálu mění. Na povrchu materiálu lze vidět jemnozrnnou strukturu a v mezilehlé oblasti a v jádře materiálu na jemnozrnnou strukturu navazuje struktura hrubozrnná. Hrubozrnná struktura se dále výrazně nemění.



Obrázek 28 - Struktura HCM slitiny EN AW 6082 na povrchu – příčný řez



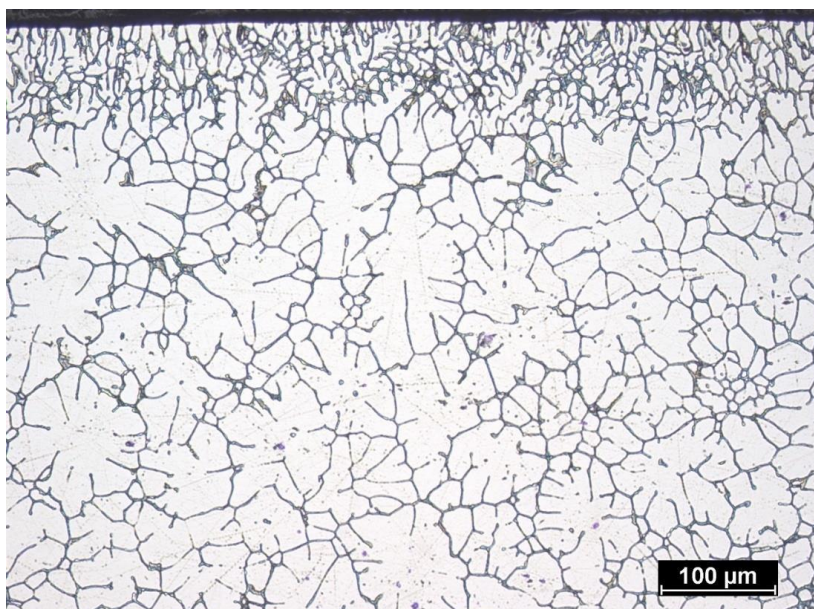
Obrázek 29 - Struktura HCM slitiny EN AW 6082 v mezilehlé oblasti – příčný řez



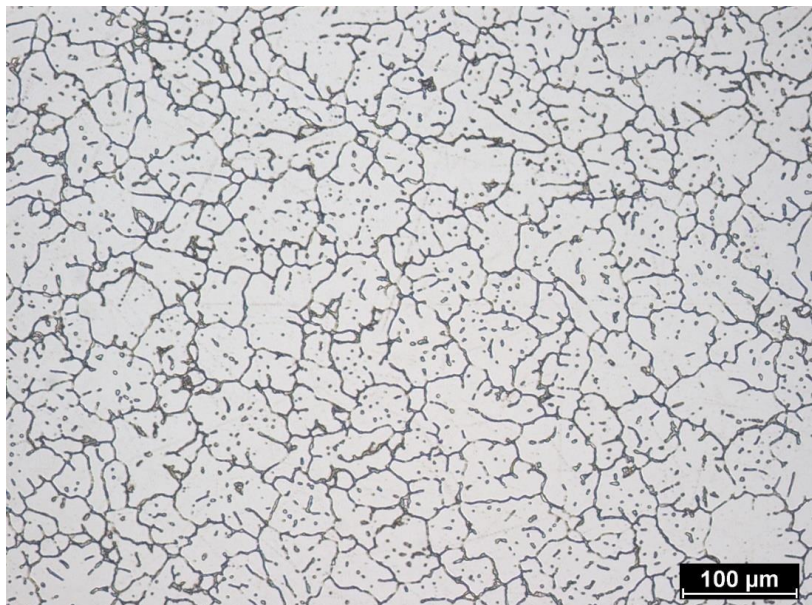
Obrázek 30 - Struktura HCM slitiny EN AW 6082 v jádře – příčný řez

9.2. Polotovar HCM EN AW 6110

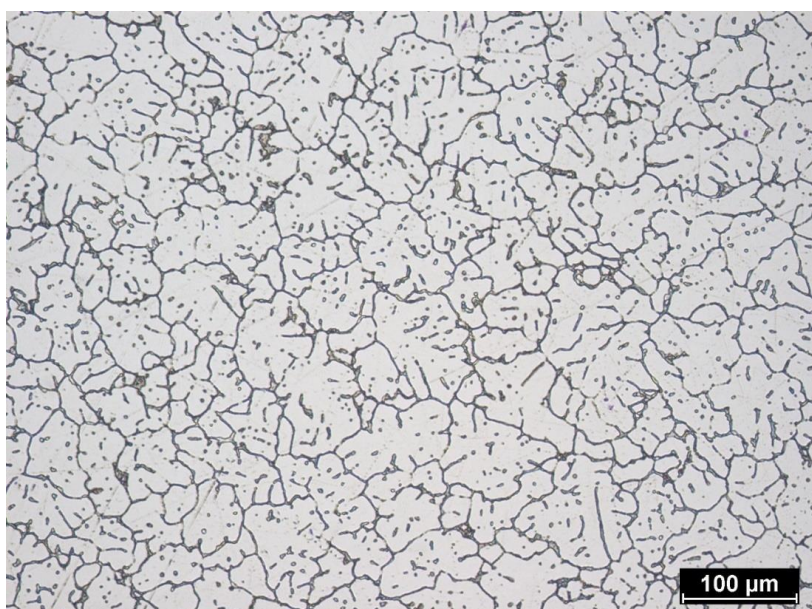
Na těchto snímcích (Obrázek 32, 33, 34) je možné si všimnout podobnosti u polotovaru HCM EN AW 6082. Opět se jedná o přechod jemnozrné struktury na povrchu do struktury hrubozrné, která je v dalším průřezu mezilehlé oblasti a jádra téměř neměnná.



Obrázek 31 - Struktura slitiny HCM EN AW 6110 na povrchu – příčný řez



*Obrázek 33 - Struktura HCM slitiny EN AW 6110 v mezilehlé oblasti –
příčný řez*



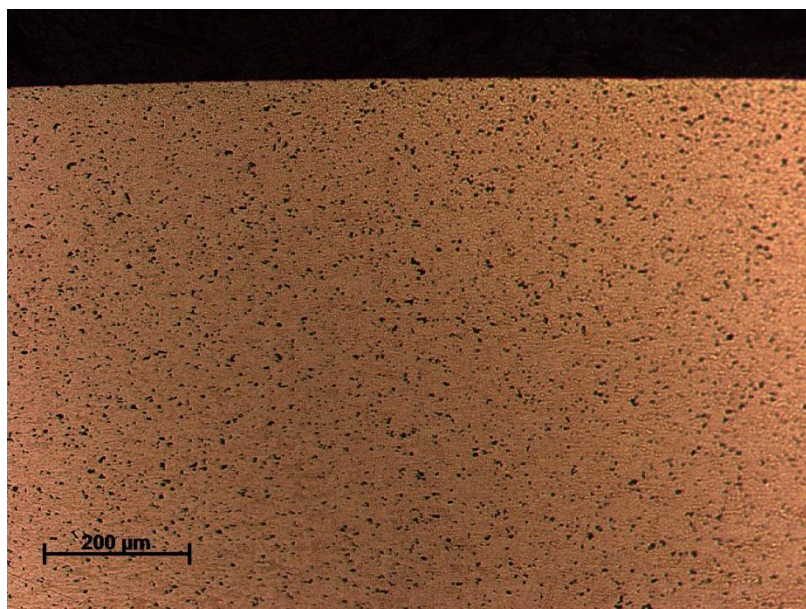
Obrázek 32 - Struktura HCM slitiny EN AW 6110 v jádře – příčný řez

9.3. Lisovaný polotovar EN AW 6082

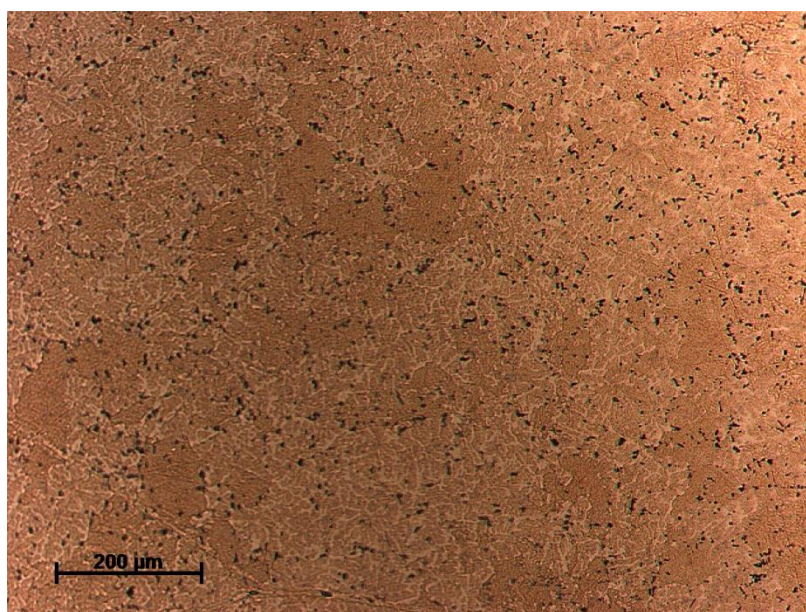
Pro hodnocení struktury lisovaných polotovarů byl použit program Axio Vision a mikroskop Carl Zeiss. U lisovaných polotovarů byl analyzován jak podélný, tak příčný směr řezu polotovaru.

9.3.1. Příčný řez

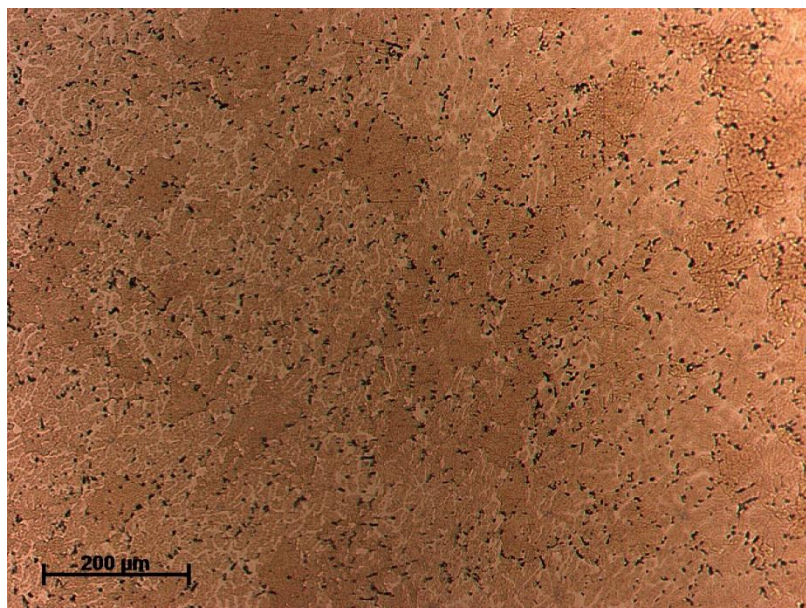
U lisovaného polotovaru slitiny EN AW 6082 v příčném směru je patrný směr válcování. Na obrázku 35 je jemnozrnná struktura způsobena tvářecími pochody. Tato struktura se mění ve směru k ose v hrubozrnnou. Mezi jádrem (Obrázek 37) a mezilehlou oblastí (Obrázek 36) je patrný rozdíl ve struktuře, kdy je zrno v ose polotovaru mírně hrubší.



Obrázek 33 - Struktura lisované slitiny EN AW 6082 na povrchu - příčný řez



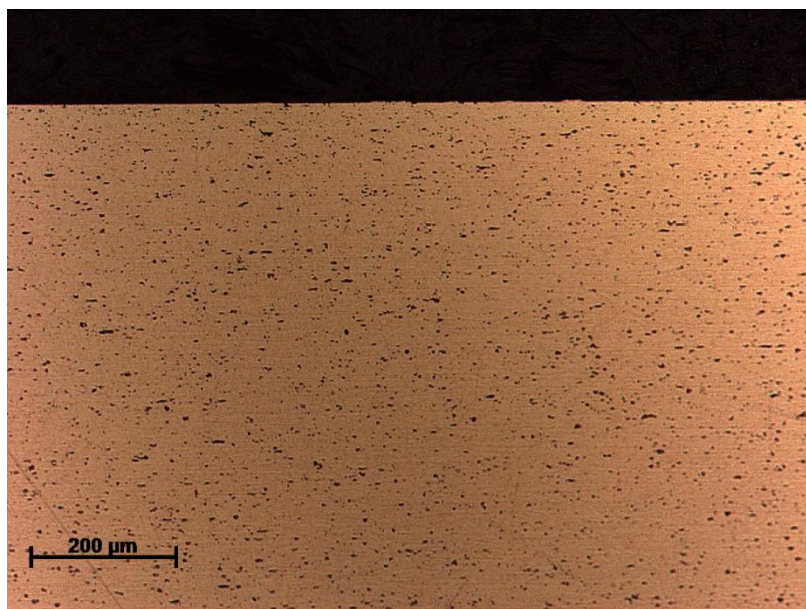
Obrázek 34 - Struktura lisované slitiny EN AW 6082 v mezilehlé oblasti - příčný řez



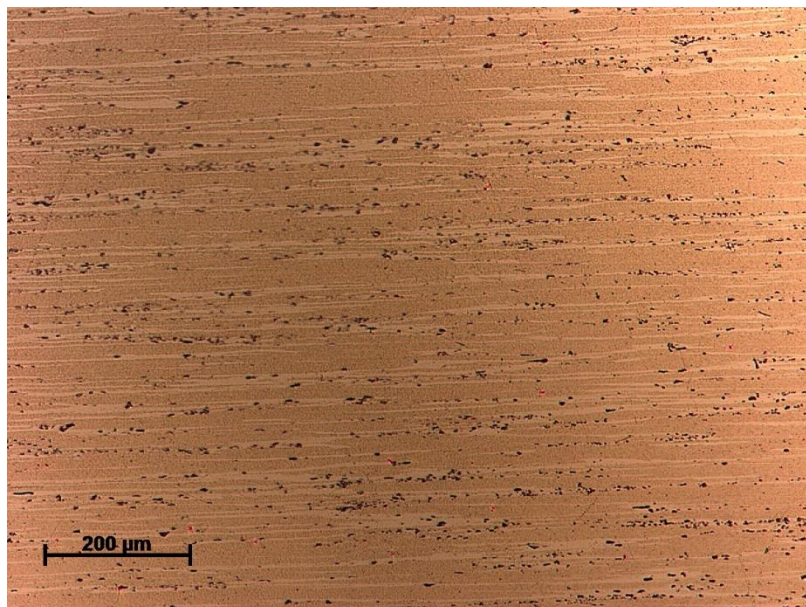
Obrázek 35 - Struktura lisované slitiny EN AW 6082 v jádře - příčný řez

9.3.2. Podélný řez

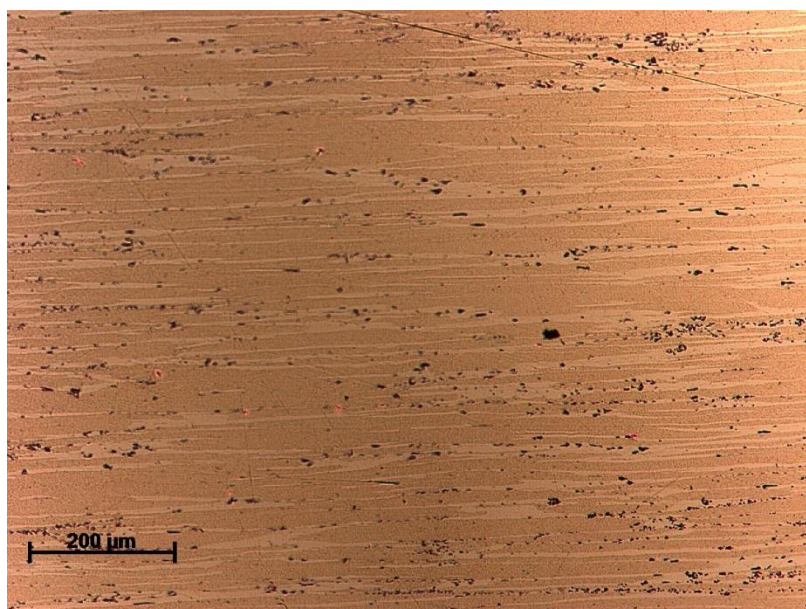
U lisovaného polotovaru slitiny EN AW 6082 v podélném směru (Obrázek 38, 39, 40) je patrné, že jsou zrna deformovaná ve směru tváření. Jemnozrnná struktura povrchové vrstvy opět přechází do hrubozrnné struktury. Rozdíl ve struktuře mezi jádrem a mezilehlou oblastí (Obrázek 39, 40) je zřetelnější než u příčného směru. Zrno směrem k ose polotovaru mírně hrubne a ubývá i minoritních fází.



Obrázek 36 - Struktura lisované slitiny EN AW 6082 na povrchu - podélný řez



*Obrázek 39 - Struktura lisované slitiny EN AW 6082 v mezilehlé oblasti -
podélný řez*

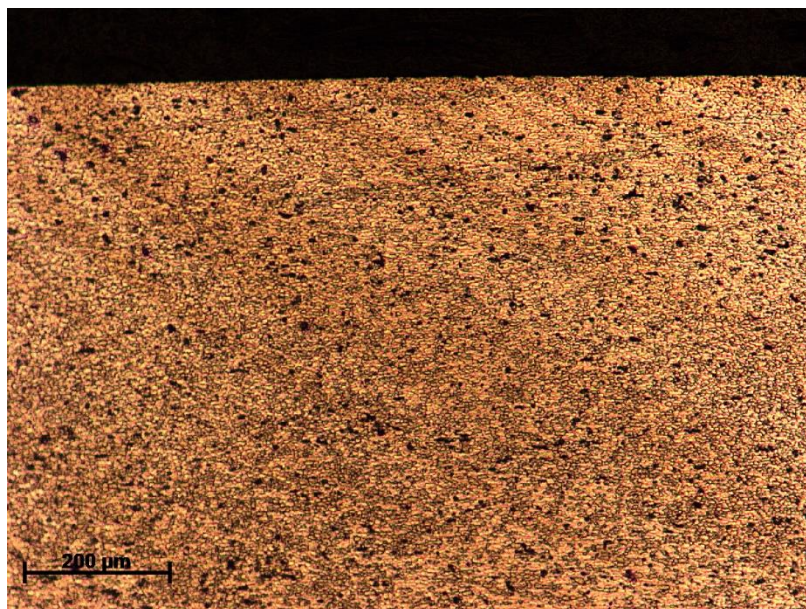


Obrázek 40 - Struktura lisované slitiny EN AW 6082 v jádře - podélný řez

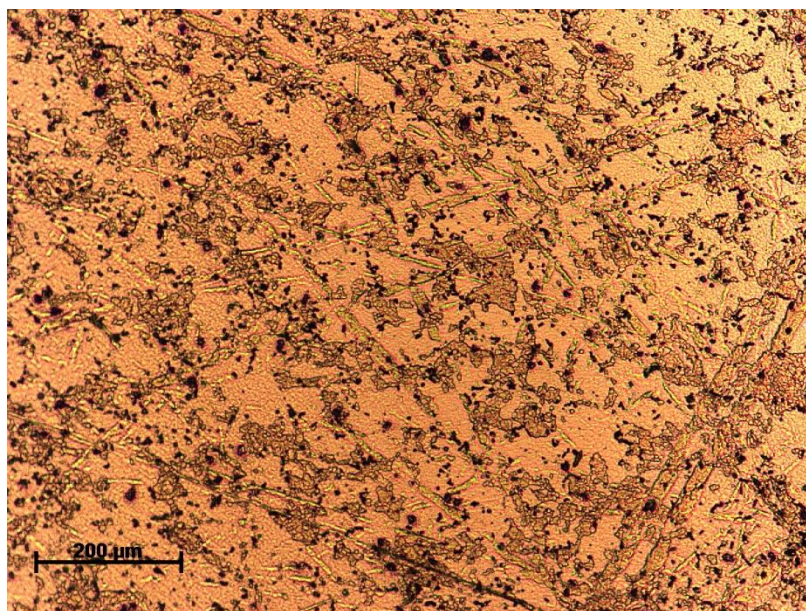
9.4. Lisovaný polotovar EN AW 6110

9.4.1. Příčný řez

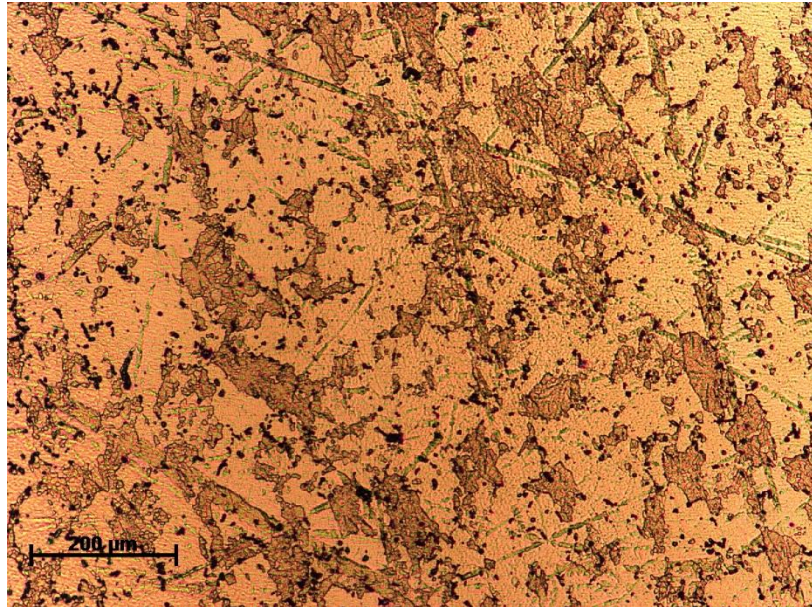
U lisovaného polotovaru slitiny EN AW 6110 v příčném směru (Obrázek 41, 42, 43) není patrný vliv deformace na tvar zrna. Na obrázku 41 je jemnozrnná struktura způsobena tvářecími pochody. Tato struktura se mění ve směru k ose v hrubozrnnou (Obrázek 41,42). Mezi jádrem a mezilehlou oblastí ubývá podíl minoritních fází a zvyšuje se podíl matrice α .



Obrázek 37 - Struktura lisované slitiny EN AW 6110 na povrchu - příčný řez



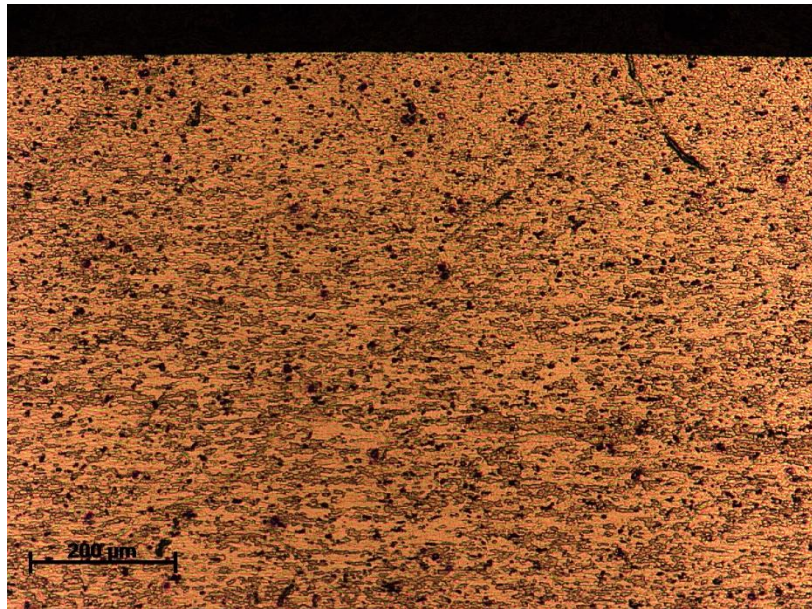
Obrázek 38 - Struktura lisované slitiny EN AW 6110 mezilehlé oblasti - příčný řez



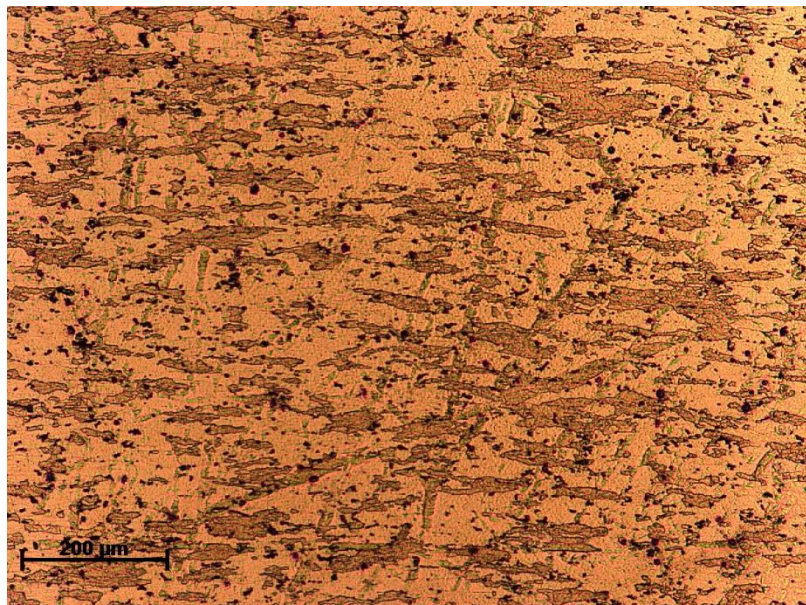
Obrázek 39 - Struktura lisované slitiny EN AW 6110 v jádře - příčný řez

9.4.2. Podélný řez

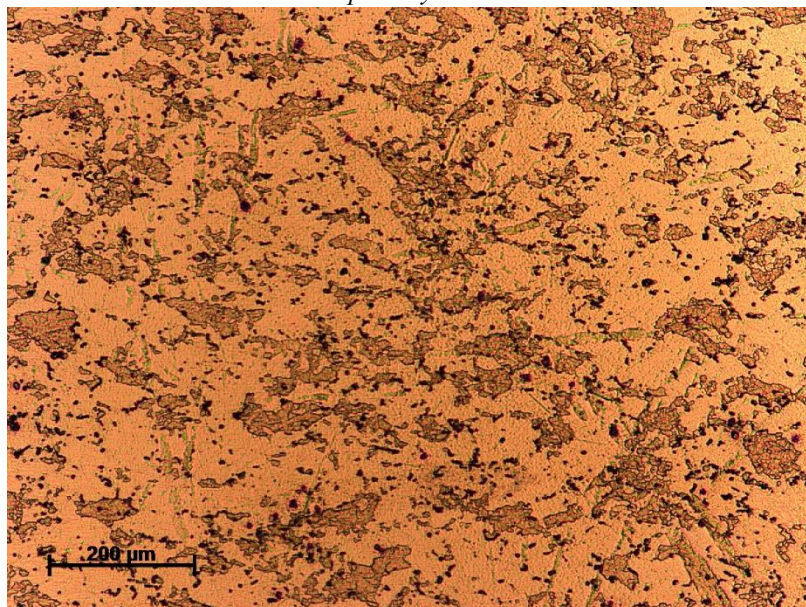
U lisovaného polotovaru slitiny EN AW 6110 v podélném směru (Obrázek 44, 45, 46) je patrné, že jsou zrna deformovaná ve směru tváření. Jemnozrnná struktura povrchové vrstvy opět přechází do hrubozrnné struktury. Je patrný rozdíl mezi podílem matrice a minoritních fází v průřezu materiálu ve směru k ose. V porovnání mezilehlé oblasti a jádra je zřejmé, že v jádře jsou zrna téměř nenatvářená.



Obrázek 40 - Struktura lisované slitiny EN AW 6110 na povrchu - podélný řez



Obrázek 42 - Struktura lisované slitiny EN AW 6110 v mezilehlé oblasti - podélný řez



Obrázek 416 - Struktura lisované slitiny EN AW 6110 v jádře - podélný řez

9.4.3. Vyhodnocení světelné mikroskopie

Velikost zrna u HCM slitin je ve většině průřezu hrubozrnná. Mění se pouze v povrchové vrstvě materiálu. Z velmi jemnozrnné struktury navazuje vrstva se specifickým zastoupením jemných a hrubých zrn, která přechází do velikosti, která je typická pro zbytek průřezu polotovaru. Nárůst velikosti zrna směrem k ose polotovaru je mírný.

Lisované polotovary vykazují rostoucí velikost zrna ve směru do osy materiálu. V povrchové vrstvě se vyskytuje jemnozrnná řádkovitá struktura, která přechází do struktury hrubozrnné s typickými zrnky protaženými ve směru tváření. Vliv tváření na tvar zrn klesá směrem k ose polotovaru.

10. Velikost zrna

Velikost zrna výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Čím jemnější struktura, tím jsou lepší mechanické vlastnosti – pro dislokace jsou hranice zrn neprostupnou překážkou. Měření byla provedena na několika vzorcích z každé oblasti (povrch, mezilehlá oblast, jádro). Výsledky pro HCM polotovary pro obě slitiny jsou ve formě histogramů velikosti zrna. Z důvodů velkých rozdílů ve velikosti zrn bylo vyhodnocení provedeno na dvě části. První vyhodnocení bylo v povrchové vrstvě, kde je jemnozrnná struktura a její přechod do hrubozrnné struktury. Dále byla zanalyzována mezilehlá oblast a jádro.

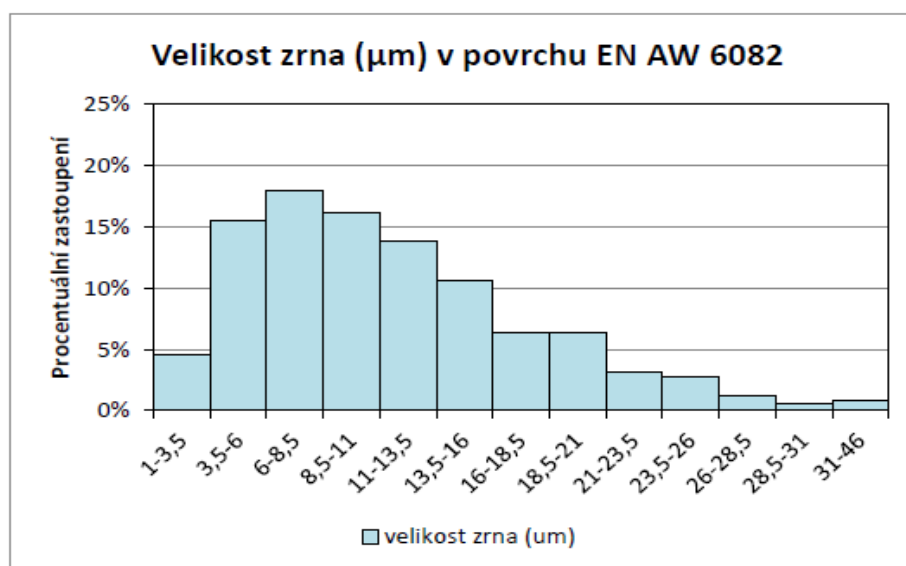
U lisovaných polotovarů byla použita srovnávací metoda podle normy ČSN 42 0462. Velikost hodnoceného zrna je určena srovnáním metalografického snímku při sto násobném zvětšení s referenčními obrazy struktur. Tato metoda byla použita z důvodu nedostatečně zvýrazněných hranic zrn leptáním pro metodu planimetrickou nebo průsečíkovou. Vzhledem k tomu je třeba výsledky považovat za informativní.

Na obrázcích 47 – 50 je histogram velikosti zrna v hodnocených oblastech HCM slitiny EN AW 6082.

Na obrázcích 51 – 54 je histogram velikosti zrna v hodnocených oblastech HCM slitiny EN AW 6110.

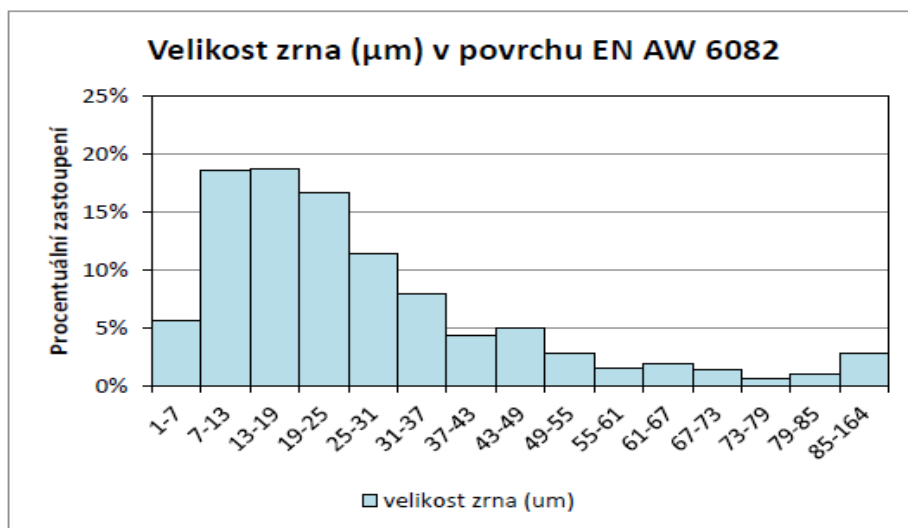
10.1. Velikost zrna HCM slitiny EN AW 6082

10.1.1. Jemnozrnná struktura v povrchu



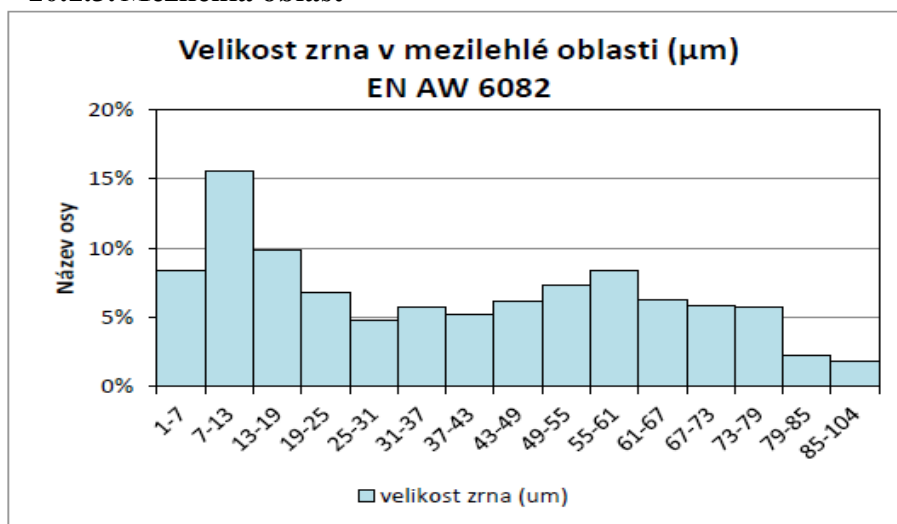
Obrázek 43 - Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě EN AW 6082

10.1.2. Hrubozrnná struktura u povrchu



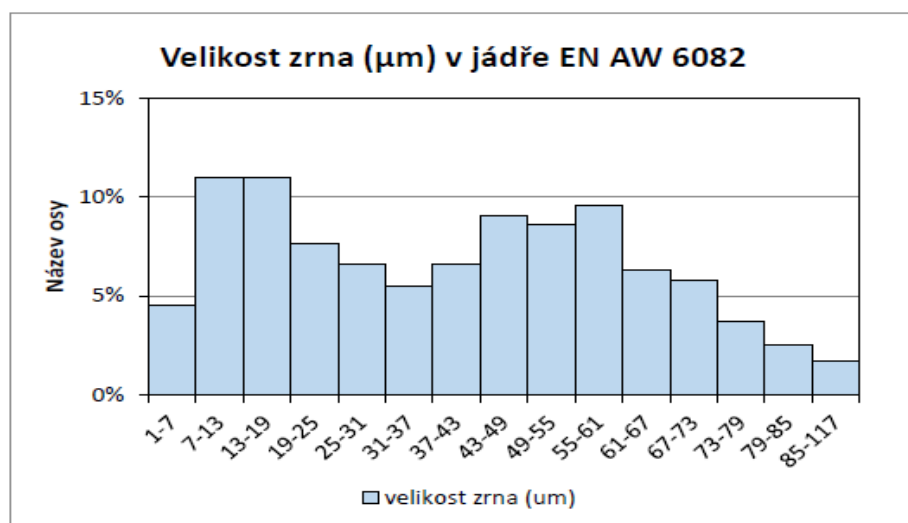
Obrázek 44 - Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě EN AW 6082

10.1.3. Mezilehlá oblast



Obrázek 45 - Histogram velikosti zrna v mezilehlé oblasti EN AW 6082

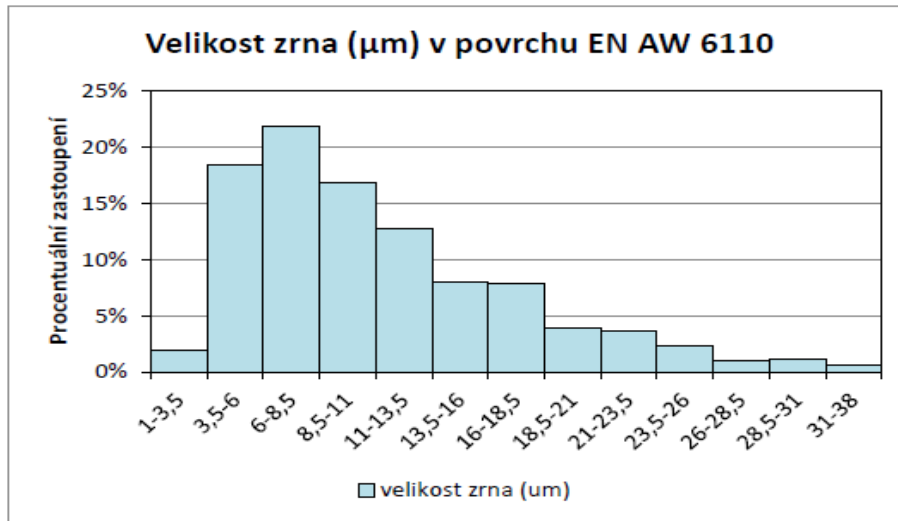
10.1.4. Oblast jádra



Obrázek 46 - Histogram velikosti zrna v oblasti jádra EN AW 6082

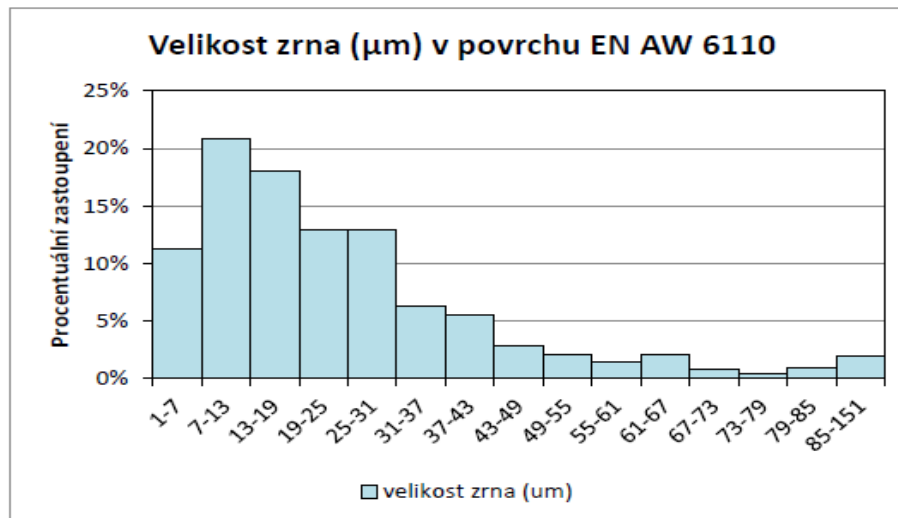
10.2. Velikost zrna HCM slitiny EN AW 6110

10.2.1. Jemnozrnná struktura v povrchu



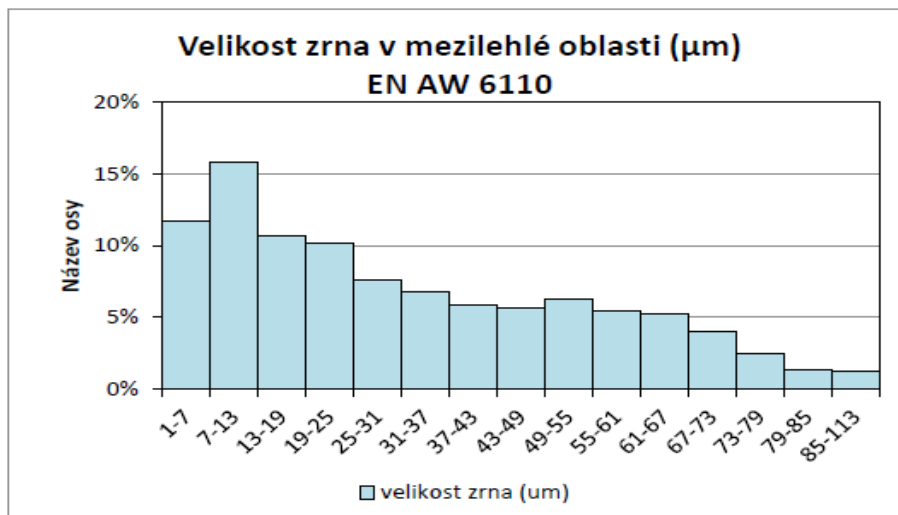
Obrázek 47 - Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě EN AW 6110

10.2.2. Hruboizrnná struktura u povrchu



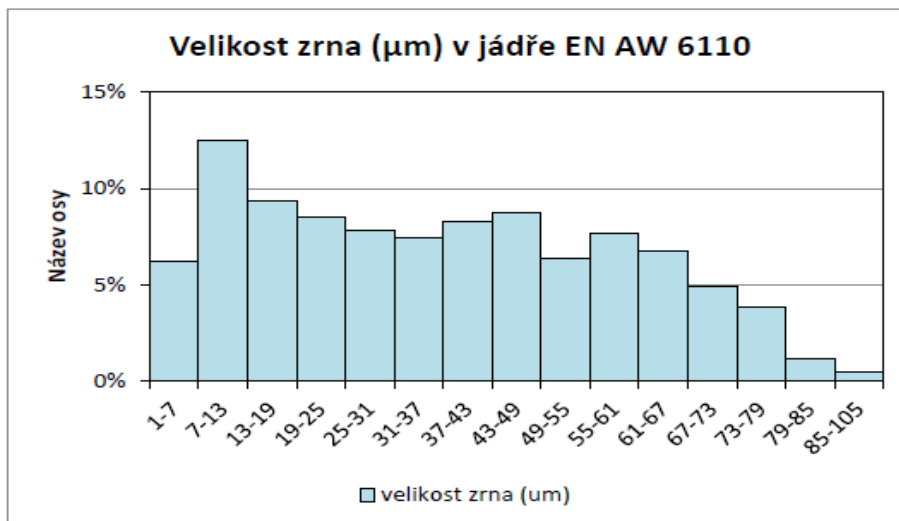
Obrázek 48 - Histogram velikosti zrna v povrchové vrstvě EN AW 6110

10.2.3. Mezilehlá oblast



Obrázek 49 - Histogram velikosti zrna v mezilehlé oblasti EN AW 6110

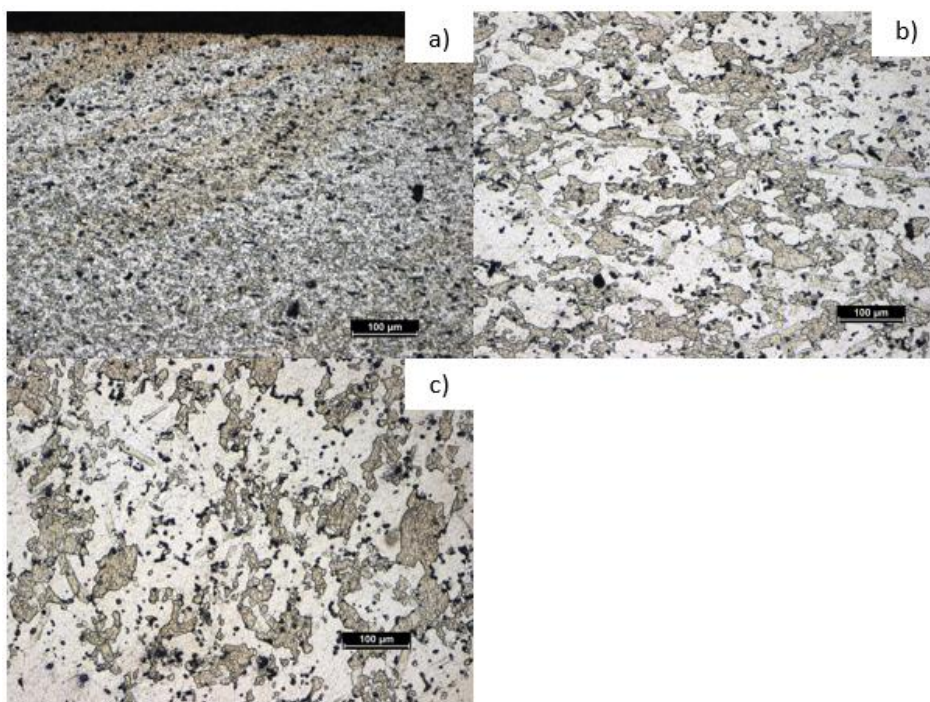
10.2.4. Oblast jádra



Obrázek 50 - Histogram velikosti zrna v oblasti jádra EN AW 6110

10.3. Velikost zrna lisované slitiny EN AW 6082

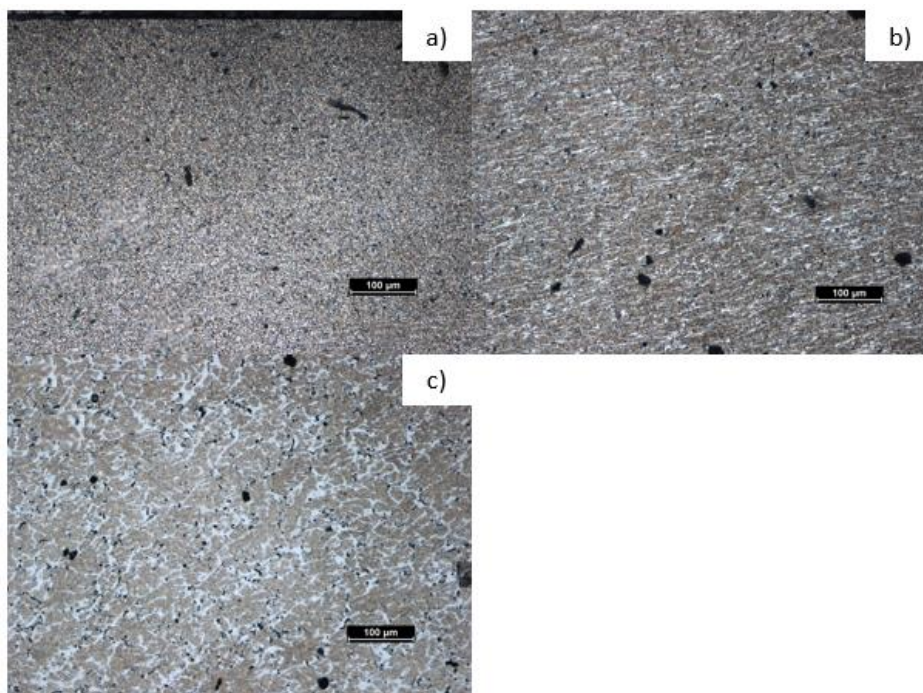
Velikost zrna pro lisovanou slitinu EN AW 6082 byla určena srovnávací metodou z důvodu nedostatečného naleptání hranic zrn pro analytické metody. Na obrázku 55 jsou tři oblasti, ze kterých se porovnávala velikost zrna ((a) Povrch, (b) Mezilehlá oblast, (c) Jádro).



Obrázek 51 - Slitina EN AW6082

10.4. Velikost zrna lisované slitiny EN AW 6110

Velikost zrna pro lisovanou slitinu EN AW 6110 byla určena srovnávací metodou z důvodu nedostatečného naleptání hranice zrn pro analytické metody. Na obrázku 56 jsou tři oblasti, ze kterých se porovnávala velikost zrna ((a) Povrch, (b) Mezilehlá oblast, (c) Jádro).



Obrázek 52 - Slitina EN AW 6110

10.5. Vyhodnocení velikosti zrna

Z histogramů pro HCM polotovary a z velikosti zrna zjištěnou srovnávací metodou pro lisované polotovary je v tabulce 14 uveden střední průměr zrna d_m pro obě slitiny v jednotlivých hodnocených oblastech.

Tabulka 14 – Střední průměr zrna d_m dle polotovaru a materiálu

HCM EN AW 6082		HCM EN AW 6110	
Oblast	d_m [μm]	Oblast	d_m [μm]
Povrch	21	Povrch	19
Mezilehlá oblast	36	Mezilehlá oblast	26
Jádro	41	Jádro	35
EN AW 6082		EN AW 6110	
Oblast	d_m [μm]	Oblast	d_m [μm]
Povrch	4,7	Povrch	4,4
Mezilehlá oblast	7,8	Mezilehlá oblast	6,7
Jádro	26,7	Jádro	11

Z tabulky je patrné, že HCM a lisované polotovary mají stejný charakter, kdy v povrchové vrstvě je zrno jemnější než v ostatních částech polotovaru. Zrno směrem k ose hrubne. Materiál EN AW 6082 vykazuje celkově větší střední průměr zrna než slitina EN AW 6110 ve všech

hodnocených oblastech u obou typů polotovarů. HCM polotovary mají větší průměr zrna než polotovary lisované a jejich střední průměr zrna v povrchové vrstvě je v případě slitiny 6082 cca 5x vyšší.

Průměrná šířka pásu jemnozrné struktury HCM polotovaru EN AW 6082 je 75 μm .

Průměrná šířka pásu jemnozrné struktury HCM polotovaru EN AW 6110 je 106 μm .

Průměrná šířka pásu jemnozrné struktury lisovaného polotovaru EN AW 6082 je 100 μm .

Průměrná šířka pásu jemnozrné struktury lisovaného polotovaru EN AW 6110 je 175 μm .

11. Elektronová mikroskopie

Naleptané HCM vzorky se použily pro analýzu fázového složení metodou EDS. Měření probíhalo na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) JSM 7600F. Měření byly jednotlivé fáze a kompletní mapa hodnocené oblasti. Nenaleptané lisované vzorky se použily na analýzu fázového složení. Měření probíhalo na SEM JSM 5510LV na katedře materiálů FJFI ČVUT v Praze.

11.1. Slitina HCM EN AW 6082

Obsah prvků ve slitině EN AW 6082 je uveden v tabulce 14.

Tabulka 14 – Směrné chemické složení slitiny 6082

Obsah prvků ve slitině EN AW 6082										
	Al	Mg	Si	Mn	Cr	Fe	Cu	Zn	Ti	Reziduals
Min [%]	95,2	0,6	0,7	0,4	0	0	0	0	0	0
Max [%]	98,3	1,2	1,3	1	0,25	0,5	0,1	0,2	0,1	0,15

Tabulka 15 – Naměřený obsah prvků ve slitině EN AW 6082

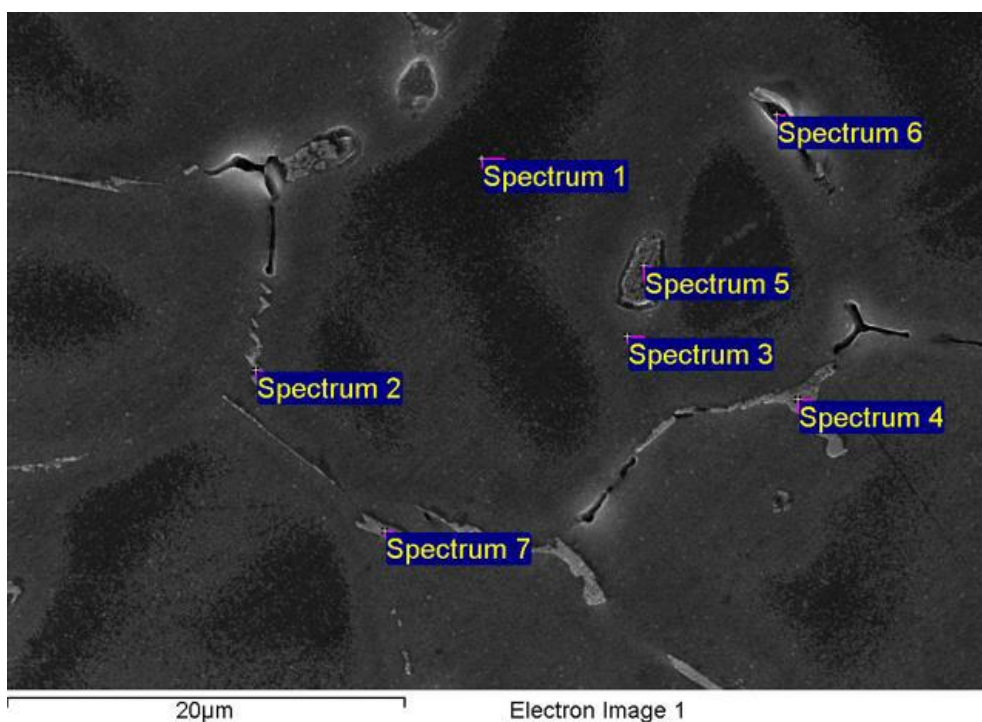
	Al [%]	Mg [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Povrch	95,18	0,68	2,15	1,23	0,18	0,2	0,25	0,13
Mezilehlá oblast	97,01	0,59	0,97	0,9	0,16	0,07	0,16	0,11
Jádro	96,45	0,61	1,36	0,92	0,13	0,19	0,23	0,11

Obsahy prvků ve slitině pro jednotlivé analyzované oblasti jsou uvedeny v tabulce 15. Hodnoty byly zjištěny metodou EDS – energiově disperzní RTG spektroskopie. Z této metody je výsledkem spektrum rozdělené dle četnosti RTG fotonů na pozadí a tzv. píky. Poloha píků je charakteristická pro jednotlivé prvky a odpovídá určité energii RTG fotonů, výška píků pak dává informaci o jejich zastoupení v analyzovaném vzorku.

Měření bylo provedeno bez standartovou metodou, jejíž přesnost je oproti metodě standartové mírně snížena. Z toho důvodu hodnoty chemického složení nemusí být zcela přesné.

Hodnoty z tabulky 15 ukazují, že v průřezu materiálu se mění chemické složení. Hlavní rozdíly jsou mezi povrchovou vrstvou a zbytkem průřezu, kde se složení jádra a mezilehlé oblasti výrazně nemění. Hlavní rozdíly v chemickém složení po průřezu polotovaru (Tabulka 15) jsou v obsahu křemíku a manganu. Ve všech oblastech byl zjištěn zvýšený obsah mědi. Ostatní hodnoty jsou v souladu se směrným složením (Tabulka 14).

Za pomoci bodové analýzy byla provedena analýza matrice (Spectrum 1 a 3) a analýza minoritních fází (Spectrum 2, 4, 5, 7). Tyto body jsou zobrazeny na obrázku 57.



Obrázek 53 - Označení vybraných míst

Naměřená data byla roztríděna dle chemického složení do tabulky 16, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty složení těchto fází.

Tabulka 16 – Průměrný obsah chemického složení měřený metodou EDS

	Al [%]	Mg [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
Matrice	96,86	0,56	1,04	1,08	0,13	0,02	0,18	0,11
Al-Si-Mn-Fe(Mg)	71,71	2,05	15,64	5	0,43	3,91	1,02	0,23
Al-Si-Mn	87,96	1,14	6,17	3	0,1	0,42	0,89	0,31
Al-Mn-Si-Fe	83,28	0,5	3,97	6,61	0,37	3,18	1,25	0,81

11.2. Slitina HCM EN AW 6110

Obsah prvků ve slitině EN AW 6110 je uveden v tabulce 17.

Tabulka 17 – Směrné chemické složení slitiny 6110

Obsah prvků ve slitině EN AW 6110										
	Al	Mg	Si	Mn	Cr	Fe	Cu	Zn	Ti	Reziduals
Min [%]	94,4	0,5	0,7	0,2	0,04	0	0,2	0	0	0
Max [%]	98,4	1,1	1,5	0,7	0,25	0,8	0,7	0,3	0,15	0,15

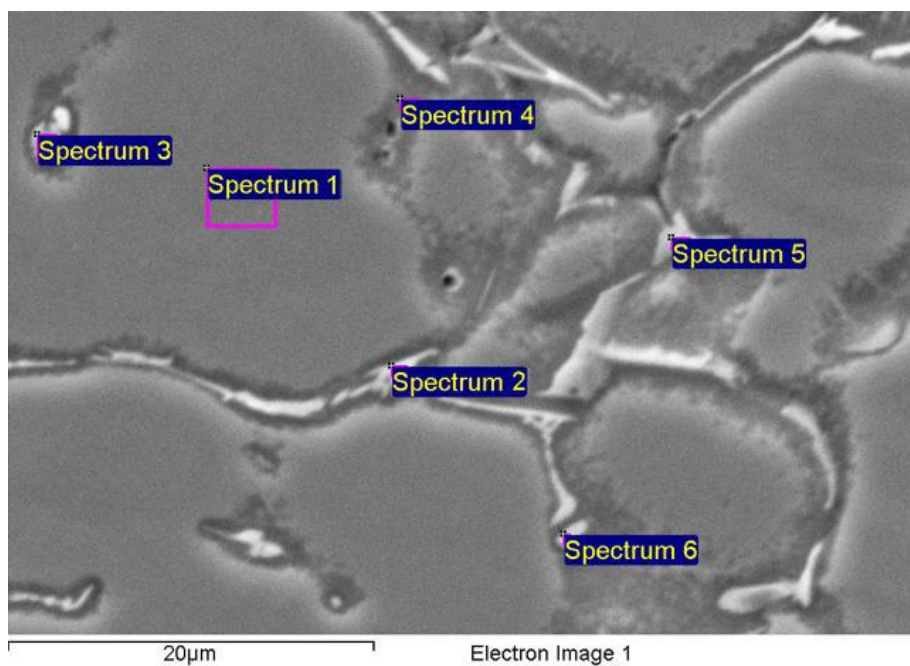
Celkový obsah prvků, zjištěný z fázových map ve slitině není homogenní po průřezu obdobně jako u předchozího vzorku. Hodnoty pro jednotlivé analyzované oblasti jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18 – Naměřený obsah prvků ve slitině EN AW 6110

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

Obdobně jako u předchozího vzorku jsou změny obsahu chemického složení mezi povrchovou vrstvou a mezilehlou oblastí a jádrem. Hodnoty hořčíku, křemíku a mědi jsou v povrchové vrstvě vyšší, než hodnoty směrného složení a jejich obsah klesá průřezem materiálu směrem k ose polotovaru.

Za pomoci bodové analýzy byla provedena analýza matrice (Spectrum 1) a analýza minoritních fází (Spectrum 2, 3, 4, 5, 6). Body měření jsou dokumentovány na obrázku 58.



Obrázek 54 - Označení vybraných míst

Naměřená data byla roztríděna dle chemického složení do tabulky 19, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty chemického složení těchto fází.

Tabulka 19 – Průměrný obsah chemického složení měřený metodou EDS

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

11.3. Vyhodnocení HCM polotovarů

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

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

Al-Si-Mn-Fe, kde obsah Si roste se vzdáleností od povrchu. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Al-Si je zastoupena pouze v povrchové vrstvě polotovaru.

Al-Si-Mn, kde obsah Mn, Fe a Zn roste se vzdáleností od povrchu. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Al-Mn-Si-Fe je zastoupena pouze v mezilehlé oblasti a jádře polotovaru.

Minoritní fáze byla určena podle podobnosti s mikrostrukturami v ASM Speciality Handbook Aluminium and Aluminium alloys. Fáze Al-Si-Mg je pravděpodobně Mg_2Si . Fáze Al-Si-Mn-Fe a Al-Mn-Si-Fe jsou pravděpodobně $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$.

Pro slitinu EN AW 6110 byly určeny 4 fáze, které byly poměrně 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. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Al-Si-Cu-Mg, kde obsah Si, Mg a Fe roste se vzdáleností od povrchu. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

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. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Minoritní fáze Al-Si-Cu-Mg je pravděpodobně kombinace Mg_2Si a Al_2Cu nebo fáze $Al_3Cu_2Mg_9Si_7$. Ostatní fáze se nepodařilo určit.

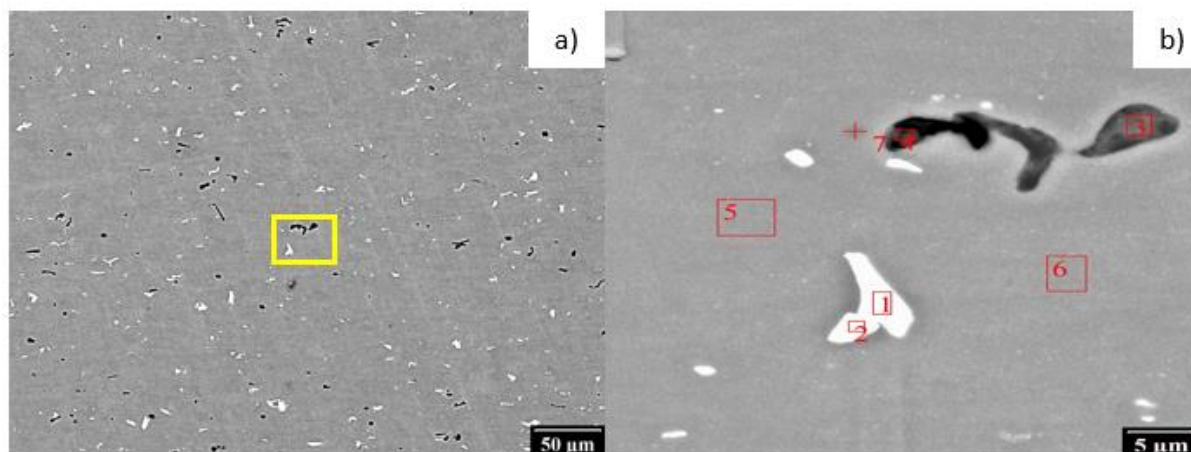
11.4. Lisovaná slitina EN AW 6082

Chemické složení slitiny EN AW 6082 je uvedeno v Tabulce 14. Obsahy prvků stanovených metodou EDS uvedené v Tabulce 20 jsou naměřeny po průřezu vzorku. Jednotlivé oblasti měření jsou uvedeny na obrázcích 59a – 62a. Z tabulky 20 je patrné, že ve slitině je ve všech oblastech nízký obsah křemíku. Dále byl zjištěný zvýšený obsah mědi ve všech oblastech se vzrůstající tendencí obsahu průřezem materiálu směrem do osy.

Tabulka 20 – Naměřený obsah prvků ve slitině EN AW 6082

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	1,09	96,33	0,23	0,19	0,68	0,4	1,08
Mezilehlá oblast	1,06	96,24	0,15	0,12	0,75	0,45	1,24
Jádro	1,01	96,02	0,23	0,33	0,54	0,33	1,54

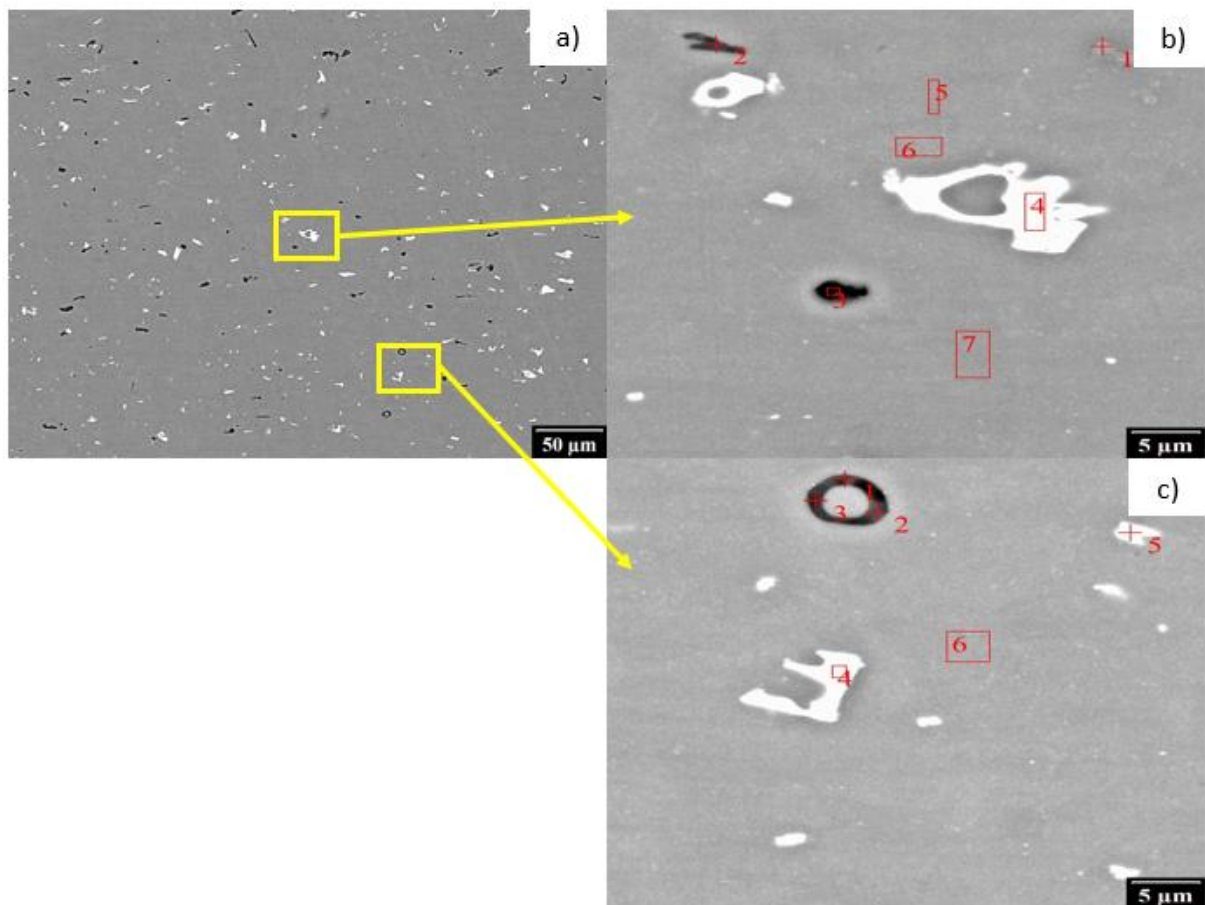
Na následujících obrázcích a v tabulkách (Obrázek 59 – Obrázek 62, Tabulka 21 – 25) jsou naměřené obsahy prvků matrice a minoritních fází v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Obrázek a) je měřená plocha pro celkové chemické složení v tabulce 20. Žlutý obdélník je detail obrázku b), kde jsou vybraná spektra pro měření minoritních fází.



Obrázek 55 - Povrchová vrstva: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter

Tabulka 21 – Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v povrchové vrstvě I

Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	0,41	59,96	6,3	2,3	11,84	17,29	1,9
Spectrum 2	0,42	63,39	6,07	2,06	10,72	15,46	1,88
Spectrum 3	27,98	37,5	33,75	0,07	0,10	0,14	0,48
Spectrum 4	6,7	69,14	22,7	0,05	0,26	0,25	0,91
Matrice 5	0,98	96,76	0,01	0,27	0,51	0,31	1,17
Matrice 6	1,02	97,02	x	0,22	0,65	0,1	1,01
Spectrum 7	4,41	90,94	2,34	0,18	0,23	0,31	1,59



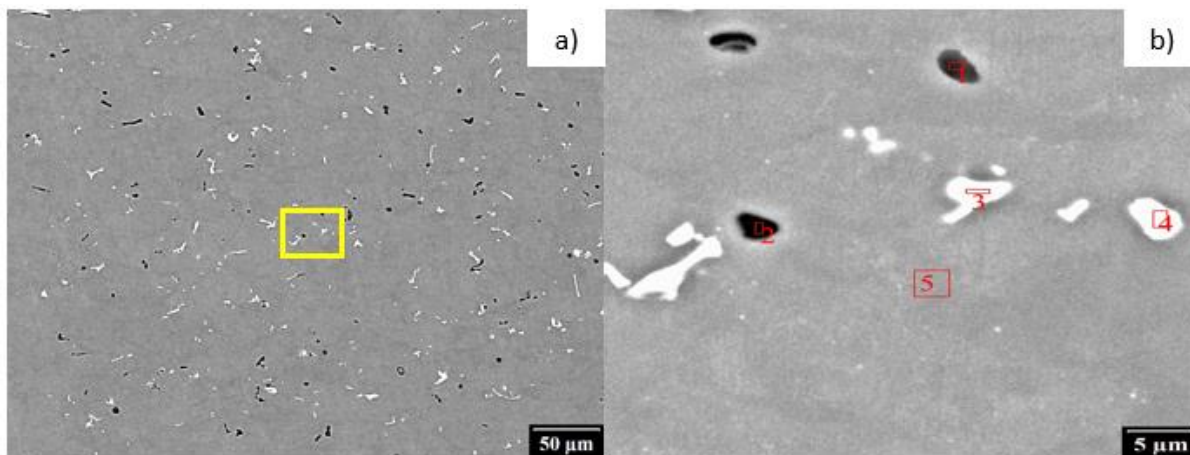
Obrázek 56 - Povrchová vrstva: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter 2

Tabulka 22 – Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v povrchové vrstvě 2

Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	1,11	94,95	1,7	0,38	0,38	0,17	1,32
Spectrum 2	16,45	66,05	16,5	0,18	0,23	0,13	0,46
Spectrum 3	1,65	92,79	3,41	0,26	0,47	0,27	1,16
Spectrum 4	0,31	57,08	6,91	1,59	13,23	18,23	2,65
Matrice 5	0,98	97,09	0,03	0,21	0,54	0,01	1,15
Matrice 6	0,93	96,48	0,06	0,23	0,61	0,23	1,47
Matrice 7	1,01	96,65	0,04	0,17	0,67	0,13	1,34

Tabulka 23 – Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v povrchové vrstvě 2

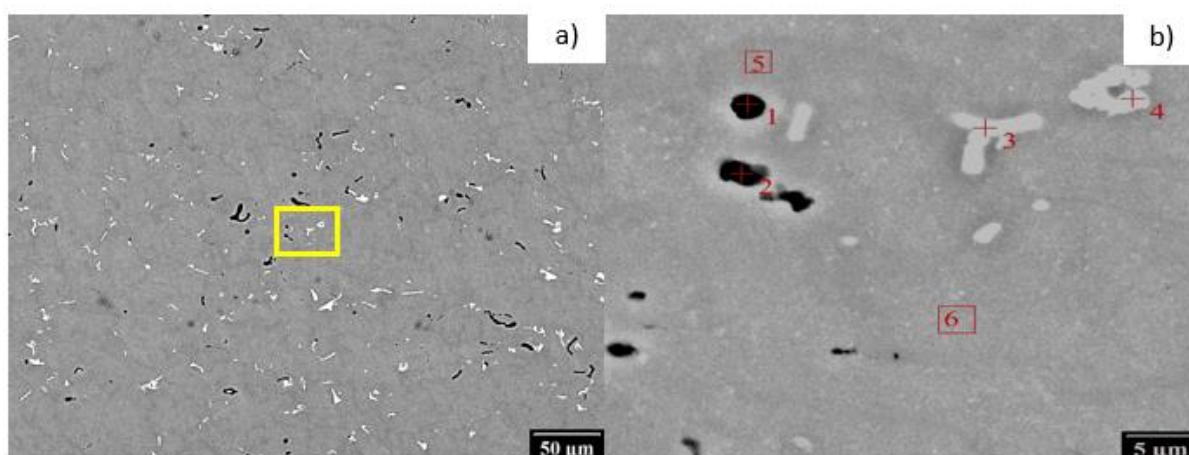
Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	18,11	61,19	19,17	0,23	0,45	0,26	0,6
Spectrum 2	20,65	56,34	22,11	0,15	0,23	0,11	0,42
Spectrum 3	18,88	59,23	20,9	0,03	0,28	0,17	0,52
Spectrum 4	0,48	66,55	5,42	1,3	9,67	14,2	2,39
Spectrum 5	1,0	79,15	2,96	1,33	6,54	7,63	1,4
Matrice 6	0,98	97,2	x	0,17	0,61	0,27	0,78



Obrázek 61 - Mezilehlá oblast: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter

Tabulka 24 – Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v mezilehlé oblasti

Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	10,80	71,33	16,76	0,18	0,27	0,20	0,46
Spectrum 2	17,47	55,83	25,23	0,17	0,33	0,29	0,69
Spectrum 3	0,36	61,21	5,91	1,38	11,44	17,55	2,17
Spectrum 4	0,48	62,93	5,82	1,24	10,96	16,14	2,43
Matrice 5	1,03	97,07	x	0,17	0,36	0,13	1,26



Obrázek 572 - Jádro: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter

Tabulka 25 – Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v jádře

Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	0,64	78,54	18,83	0,22	0,68	0,25	0,85
Spectrum 2	0,74	76,37	21,57	0,28	0,42	0,05	0,58
Spectrum 3	0,45	69,16	4,82	1,48	9,39	13,16	1,55
Spectrum 4	0,95	80,21	3,01	0,49	6,02	7,88	1,45
Matrice 5	1,08	97,24	0,00	0,14	0,30	0,07	1,17
Matrice 6	0,89	96,69	0,09	0,24	0,82	0,21	1,07

Naměřená data byla roztríděna dle chemického složení do tří kategorií – matrice, Al-Si-Mg (černé částice) a Al-Fe-Mn-Si (bílé částice). Dále byla rozdělena dle průměrného obsahu prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu (Tabulka 26 – Tabulka 28).

Tabulka 26 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu

Matrice	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	0,98	96,80	0,03	0,22	0,59	0,16	1,23
Povrch 2	0,98	97,2		0,17	0,61	0,27	0,78
Mezilehlá oblast	1,03	97,07		0,17	0,36	0,13	1,26
Jádro	0,98	96,97	0,04	0,19	0,56	0,14	1,12

Tabulka 27 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu

Al-Fe-Mn-Si	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	0,38	60,14	6,43	1,98	11,93	16,99	2,14
Povrch 2	0,74	72,85	4,19	1,31	8,11	10,91	1,89
Mezilehlá oblast	0,42	62,07	5,86	1,31	11,20	16,85	2,30
Jádro	0,70	74,69	3,91	0,98	7,70	10,52	1,50

Tabulka 28 – Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu

Al-Si-Mg	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	17,04	57,56	24,31	0,10	0,20	0,17	0,62
Povrch 2	19,21	58,92	20,72	0,14	0,32	0,18	0,51
Mezilehlá oblast	14,13	63,58	20,99	0,17	0,30	0,25	0,57
Jádro	0,69	77,45	20,20	0,25	0,55	0,15	0,71

Průměrná chemická složení matrice a fází Al-fe-Mn-Si a Al-Si-Mg jsou uvedena v tabulce 29.

Tabulka 29 - Průměrný obsah chemického složení měřený metodou EDS

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Matrice	0,99	97,01	0,04	0,19	0,53	0,17	1,09
Al-Si-Mg	16,80	60,02	22,01	0,14	0,27	0,20	0,57
Al-Mn-Fe-Si	0,56	67,44	5,10	1,40	9,74	13,82	1,96

11.5. Lisovaná slitina EN AW 6110

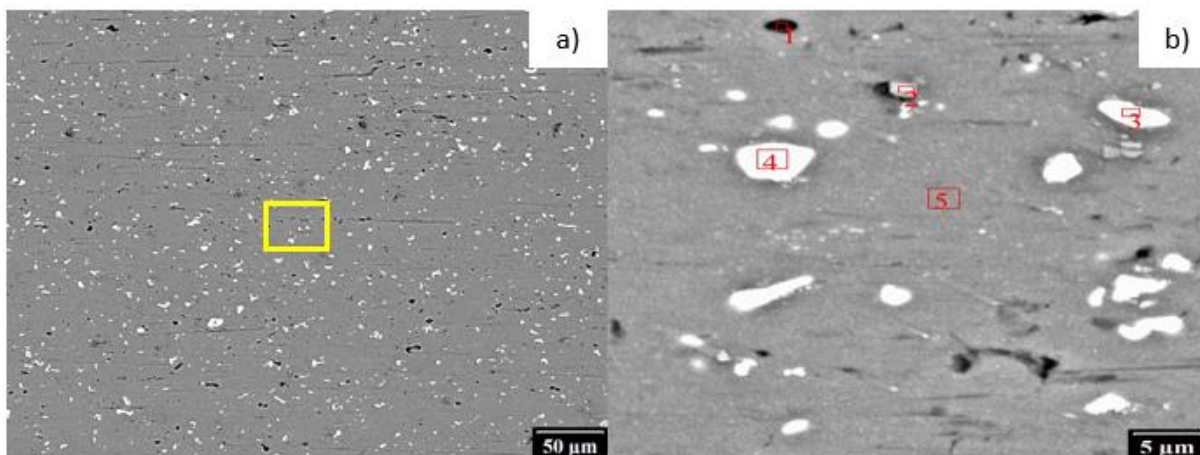
Obsah prvků slitiny EN AW 6110 je uveden v Tabulce 17. V Tabulce 30 jsou naměřeny obsahy prvků průřezem vzorku, na obrázcích (Obrázek 63a – Obrázek 66a) jsou zobrazené oblasti měření. Z tabulky je patrné, že ve slitině je ve všech oblastech málo křemíku.

Tabulka 30 – Naměřený obsah prvků ve slitině EN AW 6110

	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	1,01	96,25	0,56		1,24	0,61	0,33
Mezilehlá oblast	0,97	96,79	0,47	0,27	0,66	0,41	0,43
Jádro	0,98	96,82	0,34	0,31	0,82	0,23	0,51

Na následujících obrázcích a v tabulkách (Obrázek 62 – Obrázek 66, Tabulka 31 – 34) jsou naměřené obsahy prvků matrice a minoritních fází v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

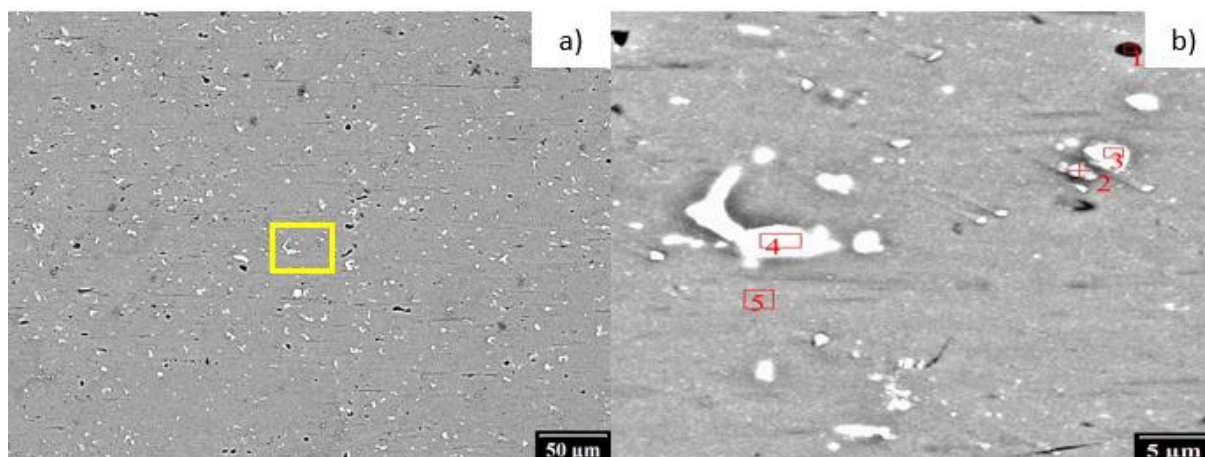
Obrázek a) je měřená plocha pro celkové chemické složení v tabulce 30. Žlutý obdélník je detail obrázku b), kde jsou vybraná spektra pro měření minoritních fází.



Obrázek 58 - Povrchová vrstva: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter

Tabulka 31 - Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v povrchové vrstvě

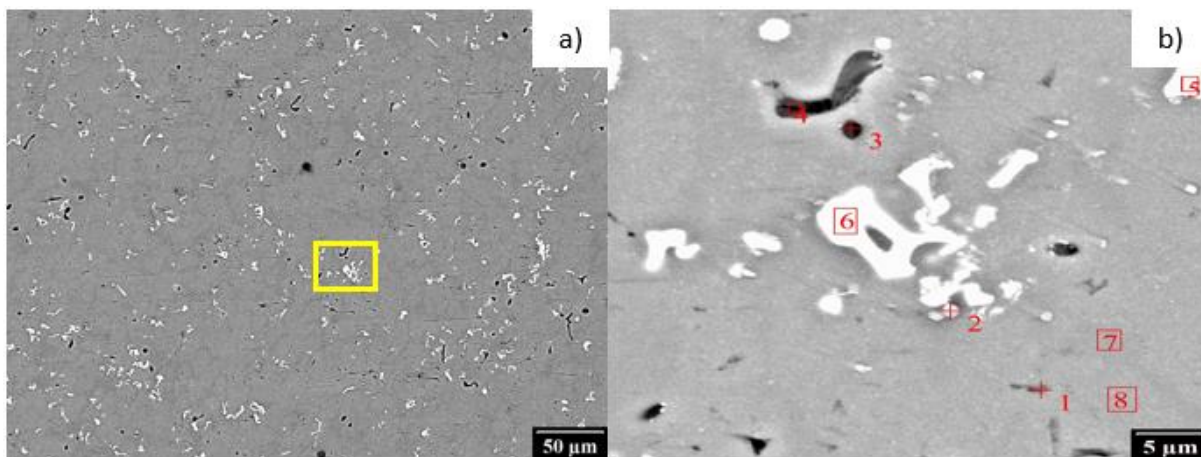
Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	10,36	75,85	12,64	0,55	0,1	0,51
Spectrum 2	0,95	85,30	12,6	0,54	0,12	0,49
Spectrum 3	0,93	79,47	4,48	6,93	7,64	0,56
Spectrum 4	0,68	68,98	6,89	13,6	9,86	
Matrice 5	0,98	97,96	0,15	0,85	0,06	



Obrázek 59 - Povrchová vrstva: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter

Tabulka 32 - Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v povrchové vrstvě 2

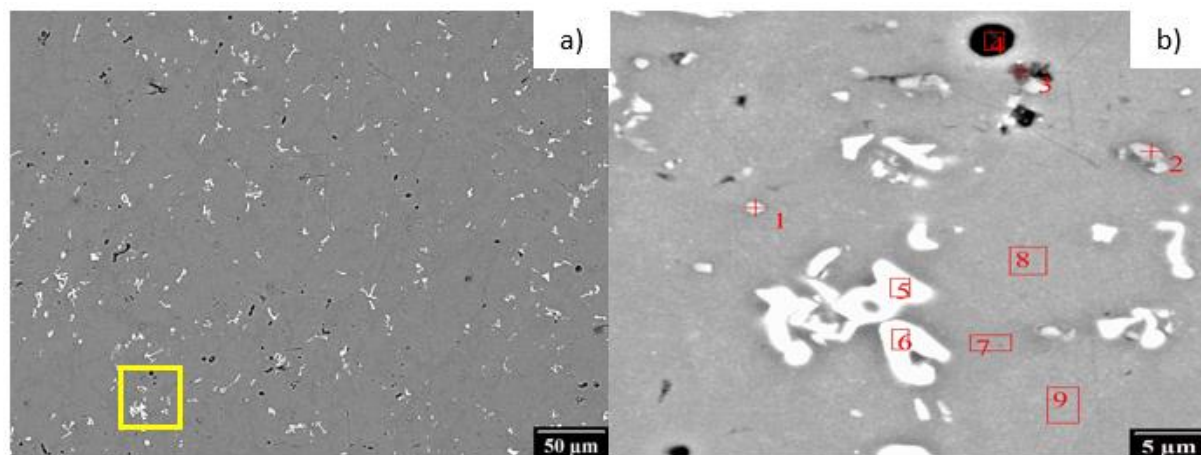
Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	8,43	75,19	15,44	0,20	0,35	0,1	0,29
Spectrum 2	0,56	53,98	43,88	0,23	0,61	0,4	0,34
Spectrum 3	0,49	71,55	6,94	3,75	11,7	5,15	0,41
Spectrum 4	0,59	69,23	6,5	1,61	9,47	11,98	0,62
Matrice 5	0,93	97,59	0,2	0,16	0,45	0,26	0,43



Obrázek 65 - Mezilehlá vrstva: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter

Tabulka 33 - Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v mezilehlé oblasti

Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	0,96	97,33	0,07	0,26	0,70	0,12	0,57
Spectrum 2	0,47	55,45	41,98	0,20	0,59	0,9	0,43
Spectrum 3	15,94	64,49	19	0,21	0,16	0,07	0,14
Spectrum 4	18,33	55,24	25,1	0,2	0,31	0,32	0,5
Spectrum 5	0,74	76,31	5,75	1,11	6,92	8,78	0,39
Spectrum 6	0,37	61,76	6,85	2,66	12,3	15,17	0,88
Matrice 7	1,05	98,12	0,01	0,27	0,18	0,14	0,24
Matrice 8	0,98	96,76	0,22	0,46	0,85	0,26	0,49



Obrázek 66 - Jádru: a) plocha pro celkové chemické složení, b) detail vybraných spekter

Tabulka 34 – Naměřený obsah prvků matrice a minoritních fází v jádře

Fáze	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Spectrum 1	0,45	75,56	23,11	0,08	0,25	0,25	0,3
Spectrum 2	0,47	54,21	44,57	0,11	0,29	0,08	0,28
Spectrum 3	1,22	94,65	2,85	0,23	0,57	0,36	0,13
Spectrum 4	16,71	52,66	29,82	0,17	0,17	0,23	0,24
Spectrum 5	0,38	60,34	7,09	3,35	13,98	14,34	0,52
Spectrum 6	0,34	64,50	6,17	1,94	11,42	15,16	0,48
Matrice 7	0,91	97,73	0,05	0,29	0,27	0,34	0,41
Matrice 8	0,89	97,46	0,2	0,4	0,61	0,05	0,39
Matrice 9	0,89	97,28	0,09	0,26	0,87	0,23	0,38

Naměřená data byla roztríděna dle chemického složení do čtyř kategorií – matrice, Al-Si-Mg (černé částice), Al-Si-Mn-Cu (šedé částice) a Al-Mn-Fe-Si (bílé částice). Dále byla rozdělena dle průměrného obsahu prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu (Tabulka 35 – Tabulka 38).

Tabulka 35 - Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu

Matrice	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	0,98	97,96	0,15	/	0,85	0,06	/
Povrch 2	0,93	97,59	0,2	0,16	0,45	0,26	0,43
Mezilehlá oblast	0,98	96,76	0,22	0,46	0,85	0,26	0,49
Jádro	0,89	97,37	0,14	0,33	0,74	0,14	0,38

Tabulka 36 - Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu

Al-Mn-Fe-Si	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	0,81	74,22	5,68	/	10,26	8,75	0,56
Povrch 2	0,54	70,39	6,72	2,68	10,59	8,57	0,51
Mezilehlá oblast	0,56	69,04	6,30	1,89	9,61	11,98	0,64
Jádro	0,36	62,42	6,63	2,64	12,70	14,75	0,50

Tabulka 37 - Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu

Al-Si-Mn-Cu	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	0,95	85,30	12,6	/	0,54	0,12	0,49
Povrch 2	0,56	53,98	43,88	0,23	0,61	0,4	0,34
Mezilehlá oblast	0,47	55,45	41,98	0,20	0,59	0,9	0,43
Jádro	0,47	54,21	44,57	0,11	0,29	0,08	0,28

Tabulka 38 - Průměrný obsah prvků ve fázi v závislosti na vzdálenosti povrchu

Al-Si-Mg	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Povrch	10,36	75,85	12,64	/	0,55	0,1	0,51
Povrch 2	8,43	75,19	15,44	0,20	0,35	0,1	0,29
Mezilehlá oblast	15,94	64,49	19	0,21	0,16	0,07	0,14
Jádro	16,71	52,66	29,82	0,17	0,17	0,23	0,24

Průměrné chemické složení matrice a fází Al-Mn-Fe-Si, Al-Si-Mn-Cu a Al-Si-Mg jsou uvedeny v tabulce 39.

Tabulka 39 - Průměrný obsah chemického složení měřený metodou EDS

/	Mg [%]	Al [%]	Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]
Matrice	0,94	97,42	0,18	0,31	0,72	0,18	0,43
Al-Si-Mg	14,28	64,65	20,17	0,20	0,28	0,15	0,30
Al-Si-Mn-Cu	0,61	62,23	35,76	0,18	0,51	0,37	0,39
Al-Mn-Fe-Si	0,57	69,02	6,33	2,40	10,79	11,01	0,55

11.6. Vyhodnocení lisovaných polotovarů

Pro slitinu EN AW 6082 byly určeny dvě fáze, které byly nerovnoměrně zastoupeny v celém průřezu materiálu. Na povrchu polotovaru byly častější a rovnoměrné tvary, které v průřezu materiálu směrem k ose měnily svůj tvar a zastoupení.

Chemické složení matrice se pro průřezu materiálu nemění.

Al-Si-Mg, kde se vzdáleností od povrchu klesá obsah hořčíku. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Al-Mn-Fe-Si, kde se vzdáleností od povrchu klesá obsah křemíku, chromu a železa. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Minoritní fáze byla určena podle podobnosti s mikrostrukturami v ASM Speciality Handbook Aluminium and Aluminium alloys. Fáze Al-Si-Mg je pravděpodobně Mg_2Si . Fáze Al-Mn-Fe Si je pravděpodobně Fe_3SiAl_{12} .

Pro slitinu EN AW 6110 byly určeny tři fáze, které byly nerovnoměrně zastoupeny v celém průřezu materiálu. Na povrchu polotovaru byly častější a rovnoměrné tvary, které v průřezu materiálu směrem k ose měnily svůj tvar a zastoupení.

Chemické složení matrice se po průřezu materiálu nemění.

Al-Si-Mg, kde se vzdáleností od povrchu roste obsah hořčíku a křemíku a klesá mangan a měď. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Al-Si-Mn-Cu, kde se vzdáleností od povrchu klesá hořčík. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

Al-Mn-Fe-Si, kde se vzdáleností od povrchu roste obsah křemíku a železa, klesá hořčík. Rozložení ostatních prvků se po průřezu nemění.

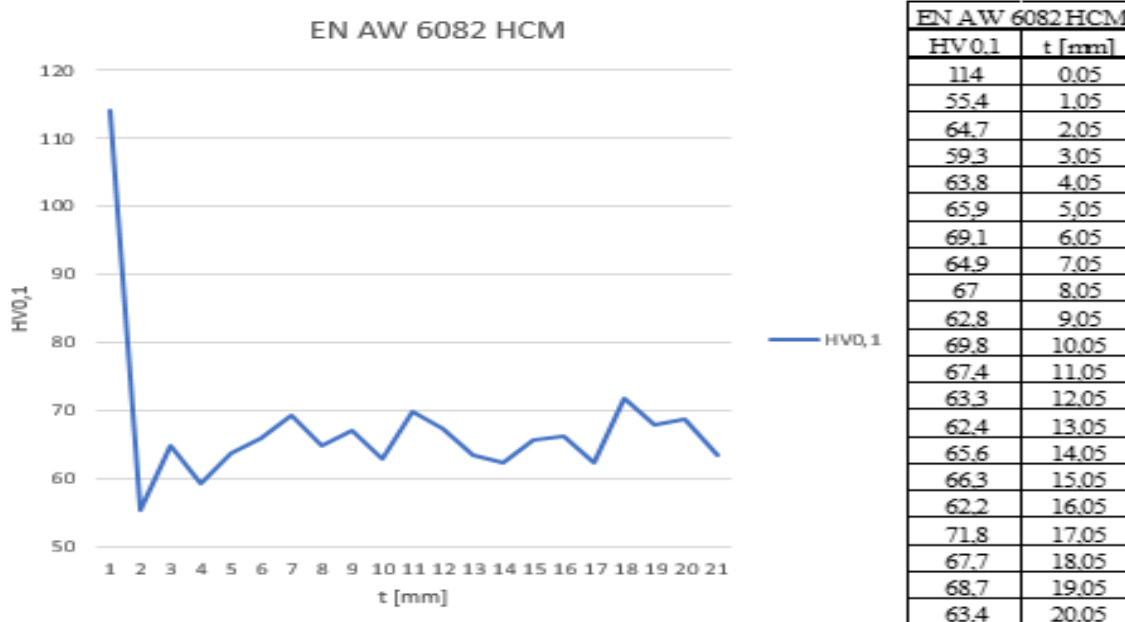
Minoritní fáze Al-Si-Mg je pravděpodobně Mg_2Si . Fáze Al-Si-Mn-Cu je pravděpodobně Si + nasycené okolí nebo Mn_3SiAl_{12} v kombinaci s Al_2Cu . Fáze Al-Mn-Fe-Si je pravděpodobně $Al_{12}(FeMn)_3 Si$.

12. Průběh mikrotvrlosti

Pro měření průběhu mikrotvrlosti byl použit mikrotvrdoměr LECO M-400-G1 s Vickersovým indentorem při několika zatíženích. Velikost zatížení byla volena s ohledem na rozměry vtisku a vzdálenosti od povrchu. Součástí mikrotvrdoměru je mikroskop a obrazovka na vyhodnocení úhlopříček vtisku. Pro průběh mikrotvrlosti bylo použito zatížení 100 g. Pro přechod mezi jemnozrnnou a hrubozrnnou strukturou bylo použito zatížení 10 g a pro určení tvrdosti fáze a matrice bylo použito zatížení 25 g. Rozdílné zatížení bylo voleno s ohledem na co nejpřesnější výsledky v jednotlivých oblastech měření.

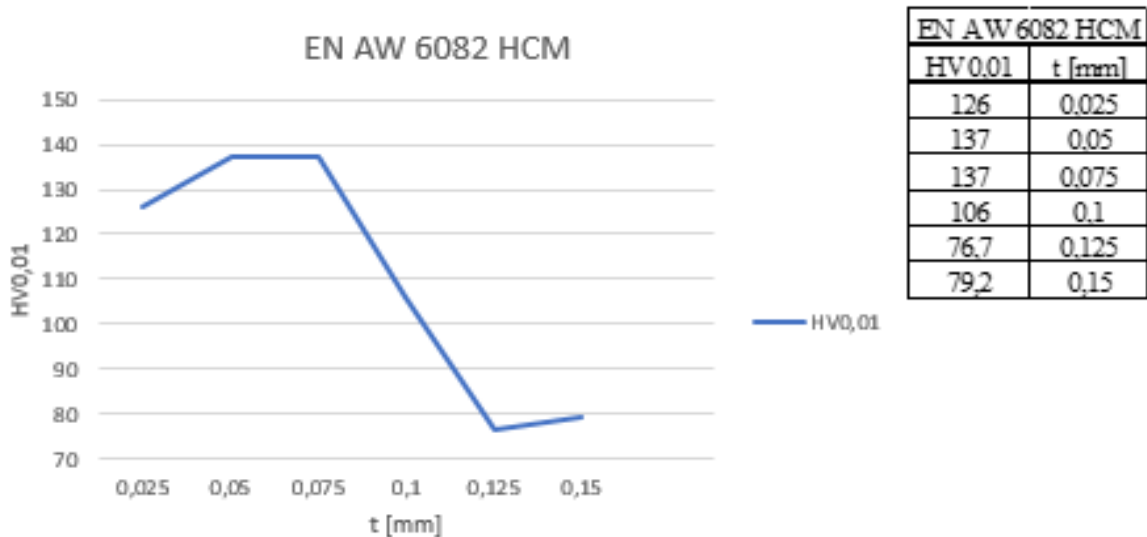
12.1. Slitina HCM EN AW 6082

Pro slitinu HCM EN AW 6082 bylo pro průběh mikrotvrlosti použito zatížení 100 g s celkovým rozestupem vtisků 1 mm. Na obrázku 67 je vidět průběh mikrotvrlosti a v tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty. Z obrázku 68 je patrné, že jemnozrnná struktura, která byla hned na povrchu, má větší hodnotu mikrotvrlosti než její následné hodnoty ve struktuře hrubozrnné.



Obrázek 60 - Průběh mikrotvrlosti slitiny HCM EN AW 6082

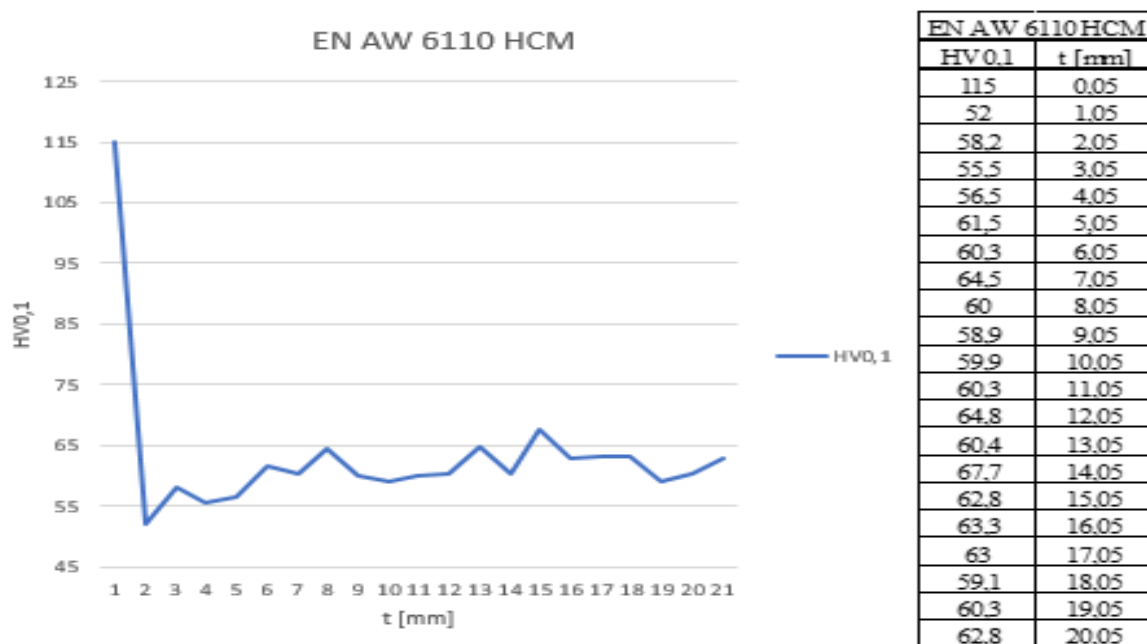
Pro možnost zjištění tloušťky vrstvy jemnozrnné struktury byl vyhodnocen průběh mikrotvrlosti HV0,01. Hodnoty mikrotvrlosti jsou mírně vyšší, a to z důvodu vyššího podílu elastické deformace při zatížení malými silami. Na obrázku 68 je uveden graf této závislosti, ze kterého je možné určit, že hloubka vrstvy jemnozrnné struktury je $\approx 0,1$ mm pod povrchem.



Obrázek 61 - Průběh mikrotvrdosti jemnozrné vrstvy slitiny HCM EN AW 6082

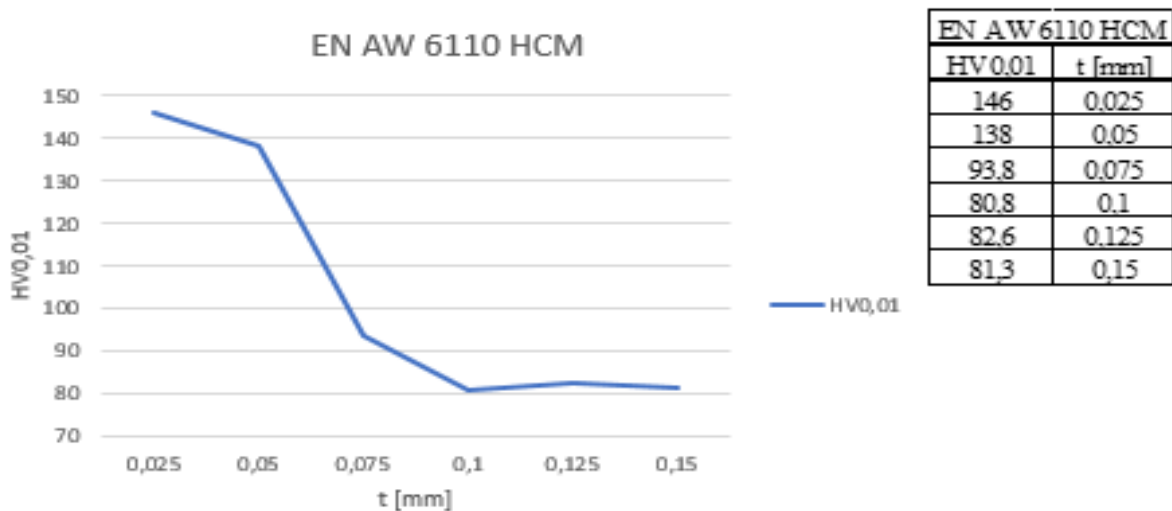
12.2. Slitina HCM EN AW 6110

Pro slitinu HCM EN AW 6110 bylo pro průběh mikrotvrdosti (Obrázek 69) použito stejné nastavení jako pro slitinu EN AW 6082. Na obrázku je patrné, že nastává obdobný průběh, jako v případě předešlé slitiny. Jemnozrná struktura z povrchu materiálu přechází do hrubozrné.



Obrázek 62 - Průběh mikrotvrdosti slitiny HCM EN AW 6110

Pro zjištění tloušťky jemnozrné vrstvy byl použit stejný způsob, jako u předešlé slitiny. Na obrázku 70 je graf této závislosti, ze které je možné určit hloubku jemnozrné vrstvy $\approx 0,05$ mm.



Obrázek 63 - Průběh mikrotvrdosti jemnozrné vrstvy slitiny HCM EN AW 6110

12.3. Tvrđost fáze a tuhého roztoku

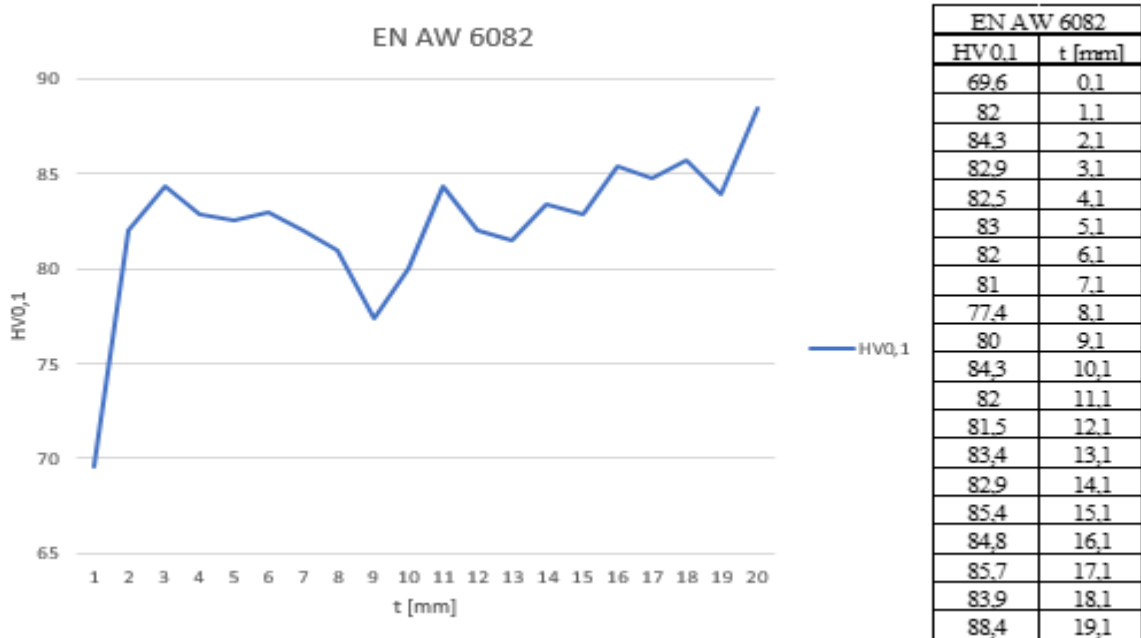
Aby bylo možno měřit tvrdosti minoritní fáze a samotné matrice, bylo použito zatížení 25 g. V tabulce 20 jsou hodnoty z měření a jejich průměrná hodnota obou slitin – EN AW 6082 a EN AW 6110.

Tabulka 20 – Tvrđost minoritní fáze a matrice slitiny EN AW 6082 a EN AW 6110

EN AW 6082 HCM		EN AW 6110 HCM	
HV0,025		HV0,025	
Fáze	Matrice	Fáze	Matrice
126	45,5	109	55,7
119	46,4	110	52,3
131	43,6	95,8	51,8
106	42,6	119	49,5
128	49,7	128	48,5
122	46	112	52
Směrodatná odchylka σ			
9,73	2,76	11,90	1,64

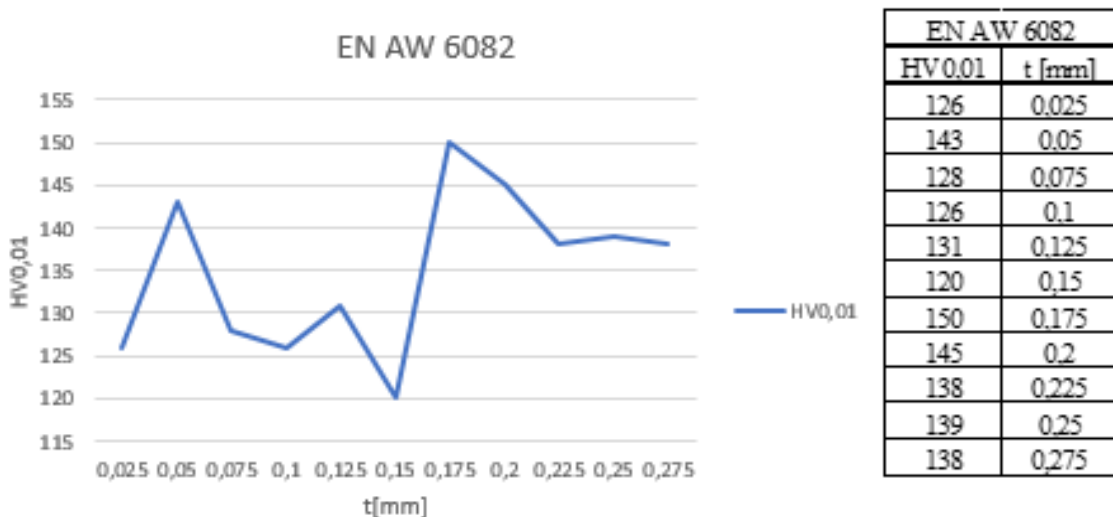
12.4. Lisovaná slitina EN AW 6082

U protlačovaných polotovarů zůstává stejný smysl měření mikrotvrdosti. Z obrázku 71 je patrné, že má jinou závislost než HCM polotovary. Z nejnižší hodnoty mikrotvrdosti na povrchu pak mikrotvrdost po průřezu polotovaru roste.



Obrázek 64 - Průběh mikrotvrdosti slitiny EN AW 6082

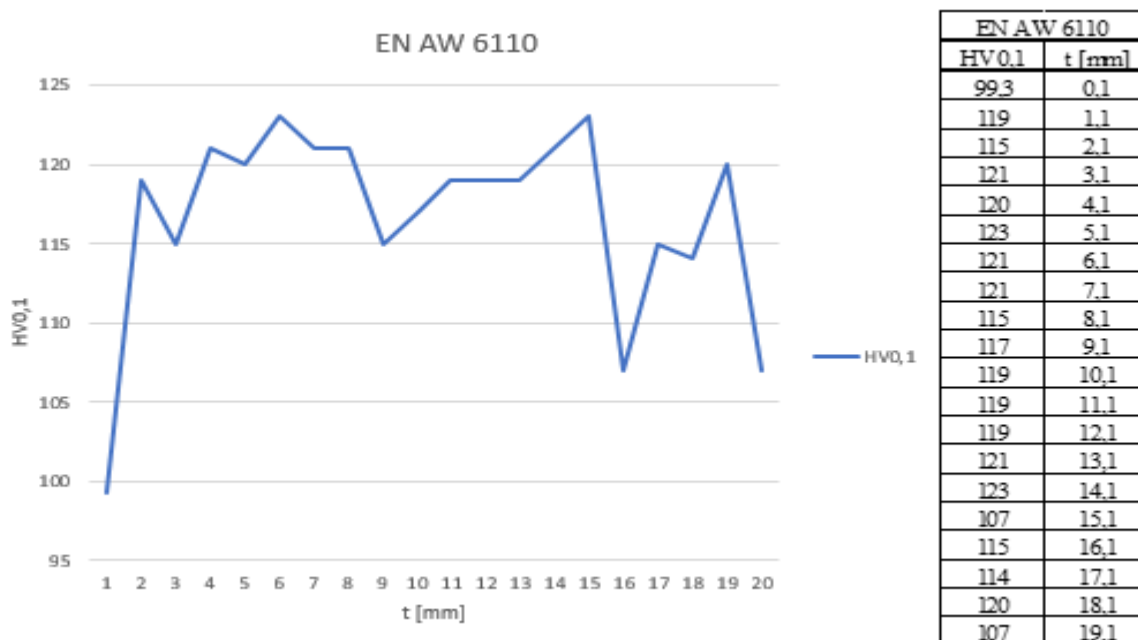
Pro stanovení vzdálenosti (Obrázek 72), kde nastává nárůst mikrotvrdosti bylo opět použito zatížení 10 g.



Obrázek 65 - Průběh mikrotvrdosti povrchové vrstvy slitiny EN AW 6082

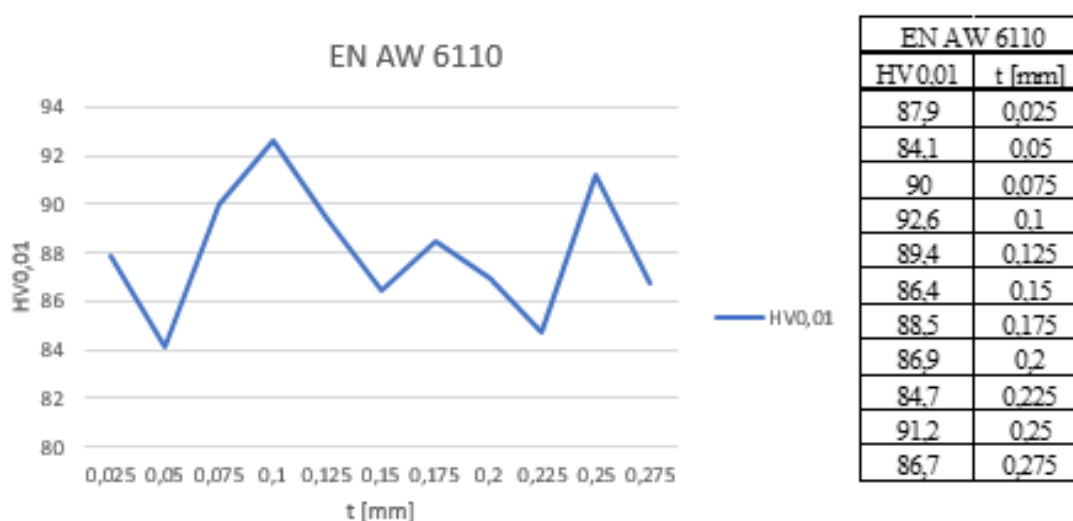
12.5. Lisovaná slitina EN AW 6110

Na obrázku 73 je závislost průběhu mikrotvrlosti lisované slitiny EN AW 6110. Nastává obdobný případ, jako u lisované slitiny EN AW 6082 – z nižší hodnoty mikrotvrlosti tato hodnota roste průřezem materiálu.



Obrázek 66 - Průběh mikrotvrlosti slitiny EN AW 6110

Na obrázku 74 je průběh mikrotvrlosti povrchové vrstvy.



Obrázek 67 - Průběh mikrotvrlosti povrchové vrstvy slitiny EN AW 6110

12.6. Vyhodnocení mikrotvrlosti

Z výsledků je patrné, že pro výsledné mechanické vlastnosti polotovaru, má vliv zpracování polotovaru. U HCM polotovarů je nejtvrdší povrchová, jemnozrná vrstva, která se průřezem materiálu ztrácí a přechází do hrubozrné vrstvy. Hodnota tvrdosti jemnozrné struktury je u materiálu HCM EN AW 6082 114 HV0,1 a u materiálu HCM EN AW 6110 je 115 HV0,1.

Hloubka této vrstvy je zaznamenána v grafech. U hrubozrnné struktury se hodnoty mikortvrlosti pohybují v průměru kolem 63 HV_{0,1}. Minoritní fáze vyloučené po hranicích zrn u HCM EN AW 6082 mají tvrdost 122 HV_{0,025} a u HCM EN AW 6110 pak 112 HV_{0,025}.

U lisovaných polotovarů je oproti HCM celková hodnota tvrdosti dle očekávání vyšší. Průměrná hodnota tvrdosti slitiny EN AW 6082 se v celém průřezu pohybuje kolem 82 HV_{0,1}. U slitiny EN AW 6110 je tato hodnota ještě vyšší – 116 HV_{0,1}. Tvrdosti minoritní fáze a matrice není vyhodnocena z důvodu nedostatečného naleptání lisovaných polotovarů a tím pádem obtížné orientace ve struktuře polotovarů.

13. Závěr

Z výsledků provedených analýz a měření na tyčových polotovarech slitin EN AW 6110 a EN AW 6082 vyrobených metodou HCM a průtlačným lisováním za tepla je zřejmé, že způsob výroby polotovaru ovlivňuje jeho mikrostrukturu a vlastnosti.

V případě výroby polotovaru metodou HCM byla u obou slitin zjištěna nerovnoměrná velikost středního průměru zrna. Poměrně tenká jemnozrná vrstva přechází do hrubozrné a směrem k ose odlitku zrno mírně hrubne. Slitina EN AW 6110 má ve všech hodnocených oblastech průřezu mírně jemnozrnější strukturu.

Lisované polotovary mají v porovnání s polotovary HCM jemnější zrno ve všech sledovaných oblastech. Rozdíl mezi povrchovou vrstvou a hrubší mezilehlou oblastí a jádrem je u lisovaných polotovarů výraznější. Tloušťka jemnozrné vrstvy je v případě tvářených polotovarů větší.

V případě lisovaných polotovarů má slitina EN AW 6110 celkově jemnozrnější strukturu než slitina EN AW 6082.

Na skenovacím elektronovém mikroskopu byl ověřen obsah legujících prvků ve slitinách a provedeno měření hrubších minoritních fází u všech hodnocených typů polotovarů a materiálů.

Minoritní fáze u slitiny HCM EN AW 6082 jsou převážně typu Mg_2Si a $(Fe,Mn)_3SiAl_{12}$.

Minoritní fáze u slitiny HCM EN AW 6110 mají převládající podíl Mg_2Si .

Minoritní fáze u slitin EN AW 6082 jsou především typu Mg_2Si , Fe_3SiAl_{12} .

Minoritní fáze u slitiny EN AW 6110 byly vyhodnoceny jako Mg_2Si , Fe_3SiAl_{12} a Mn_3SiAl_{12} .

Měření průběhu mikortvrlosti po průřezu vzorku prokázalo, že polotovary vyrobené metodou HCM vykazují zpevnění v povrchové vrstvě. U protlačovaných polotovarů tento jev nebyl prokázán.

Průměrná tvrdost obou slitin je u HCM polotovarů srovnatelná. V případě protlačování je tvrdost slitiny EN AW 6110 vyšší cca o cca 35 HV_{0,1}.

Vzhledem ke skutečnosti, že strukturní heterogenita v polotovaru bude mít vliv na další technologické postupy a finální vlastnosti výrobku, bylo by vhodné pokračovat v analýzách po jednotlivých etapách tepelného zpracování a následně i tváření. Výsledkem by pak měla být optimalizace technologických postupů pro snížení nežádoucích efektů heterogenity vstupního polotovaru.

14. Použitá literatura

- [1] *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 8089041884.
- [2] HATCH, John E. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Metals Park, OH: American Society for Metals, c1984.
- [3] ŠVEŘEPA, Otakar a Zdeněk SVOBODNÝ. *Koroze hliníku a jeho slitin: určeno pro inženýry, technology, konstruktéry a střední technické kádry všech oborů*. Praha: Práce, 1959.
- [4] BUTTNER, A. a F. FEEZ. *Hliník: stoletý boj o zázračný kov z hlíny*. Praha: Česká grafická unie, 1941.
- [5] JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001029352.
- [6] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 9788001041673.
- [7] MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Peter JURČI a Petr ZUNA. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 8001035131.
- [8] TYLEČEK, Jiří. Graf dne: Čína vyrábí více než polovinu světové produkce hliníku, svůj podíl navyšuje v období poklesu cen. *XPuls* [online]. 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://xpuls.cz/graf-dne-cina-vyrabi-vice-nez-polovinu-svetove-produkce-hliniku-svuj-podil-navysuje-v-obdobi-poklesu-cen/>
- [9] PRIMARY ALUMINIUM PRODUCTION. *World Aluminium* [online]. 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.world-aluminium.org/statistics/#histogram>
- [10] *Elektrolýza* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: www.zslodenice.cz/materialy/CH_8_9/Ch-9-Elektrolýza.pptx
- [11] KEJŘ, Libor a Aleš SVÁTEK. Co možná nevíte. *BrikLis* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.briklis.cz/wp-content/uploads/2013/02/hlinik_co_mozna_nevite.pdf
- [12] GUPTA, Dipanwita. Not all sheen is robbed off: Aluminium demand fundamentals stay strong!. *AlCircle Blog* [online]. 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://blog.alcircle.com/2015/11/06/sheen-robbed-aluminium-demand-fundamentals-stay-strong/>
- [13] PRZECZEK, Jan. *Nové slitiny hliníku v konstrukci letadel* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6517. Vysoké učení technické v Brně.

- [14] Lightweight Design - It's an Art: The Audi ASF Design Principle. *The Auto Channel* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.theautochannel.com/news/2008/12/01/273579.html>
- [15] LAŠTOVICA, Petr. *POUŽITÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN VE SLÉVÁRENSTVÍ* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54581. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] KRUŽÍK, Jan. *Vliv tepelného zpracování na pevnost a tvrdost odlitku bloku motoru ze slitiny hliníku*. Praha, 2016. České vysoké učení technické.
- [17] *Podvozkové díly* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.strojmetal.cz/podvozkove-dily>
- [18] Surovinové zdroje pro výrobu hliníku. *Osud*[online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: http://www.osud.biz/wp-content/uploads/vyroba_hliniku.pdf
- [19] SCHWARZ, Marián, Vladimír LALÍK a Miroslav VANEK. Využití odpadních kalů z výroby hliníku brání ekonomické důvody. *Odpady* [online]. 2014 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/vyuziti-odpadnich-kalu-z-vyroby-hliniku-brani-ekonomicke-duvody/>
- [20] MEDUNA, Radek. *VÝROBA ROZLEHLÝCH TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ Z HLINÍKOVÝCH SLITIN* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5994. Vysoké učení technické v Brně.
- [21] PTÁČEK, Jiří, Miloslav MAREK a Ivan BERÁNEK. Způsob rafinace hliníku a jeho slitin. In: *Databáza patentov Slovenska* [online]. 1984 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://skpatents.com/5-215208-zpusob-rafinace-hliniku-a-jeho-slitin.html>
- [22] LOSERTOVÁ, Monika. *TECHNOLOGIE SPECIÁLNÍCH SLITIN* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2017-05-28]. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [23] Číselné označování hliníku a jeho slitin dle ČSN EN 5731:2005 (42 1401). *Bolzano* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/Hlinikove_slitiny.pdf
- [24] ZNAČENÍ HLINÍKU A JEHO SLITIN. *BE Group*[online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.begroup.com/cz/BE-Group-Czech-Republic/Produkty/Hlinik-1/znaeni-hlinik-a-jeho-slitin-v-stav/>
- [25] Označování hliníku a slitiny hliníku podle ČSN EN. *Raketaci* [online]. [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: https://www.raketaci.cz/media/kunena/attachments/43/oznacovani_hliniku.pdf

- [26] *Hliník Al* [online]. Brno: Masarykova univerzita [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/podzim2013/CH2BP_3P1P/um/Hlinik.pdf
- [27] DAŘOUREK, Karel. *Precipitační vytvrzování* [online]. Liberec, 2007 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: *Hliník Al* [online]. Brno: Masarykova univerzita [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/podzim2013/CH2BP_3P1P/um/Hlinik.pdf. Technická univerzita Liberec.
- [28] *Precipitace* [online]. Plzeň [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Precipitace09_10.pdf. Západočeská univerzita.
- [29] SLAVÍČEK, Jiří. *HLINÍK A JEHO SLITINY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38353. Vysoké učení technické v Brně.
- [30] ROLEČEK, Jakub. *MECHANICKÉ VLASTNOSTI A STRUKTURA SLITINY HLINÍKU PO TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53419. Vysoké učení technické v Brně.
- [31] HARI KUMAR, K.C., Nirupan CHAKRABORTI, Hans-Leo LUKAS, Oksana BODAK a Lazar ROKHLIN. Aluminium – Magnesium – Silicon. *Light Metal Systems. Part 3* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005 [cit. 2017-07-28]. DOI: 10.1007/b96194. ISBN 3-540-25013-1. Dostupné z: http://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-31694-7_18
- [32] Compare 6110 Aluminum to 6082 Aluminum. In: *MakeItFrom* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/compare/6110-6110-T9-A96110-Aluminum/6082-AISi1MgMn-3.2315-H30-A96082-Aluminum>
- [33] FABÍK, Richard. *TVÁŘENÍ KOVŮ* [online]. 2012 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [34] *Technologie objemového tváření – kování* [online]. Liberec [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm#033. Technická univerzita Liberec.
- [35] KRUŽÍK, Jan. *Projekt 2*. Praha, 2016. České vysoké učení technické v Praze.
- [36] *HLINÍK A JEHO SLITINY* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.bikebase.cz/attachments/276.pdf?PHPSESSID=dedb44a51fe98c8a7460c812e0421d8e>
- [37] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 8070806001.
- [38] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 9788001055502.

[39] MACEK, Karel. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení* [online]. V Praze: České vysoké učení technické, 2014 [cit. 2017-05-18]. ISBN 978-80-01-05550-2. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-5_technologicke-vlastnosti.pdf

[40] Technologické vlastnosti technických materiálů. *Odmaturuj* [online]. 2012 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.odmaturuj.cz/technika/technologicke-vlastnosti-technicky-ch-materialu/>

[41] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. [cit. 2017-06-20]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>. Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky.

[42] HRUBÝ, Vojtěch, Petr JONŠTA a Arnošt SILBERNAGEL. *Navrhování kovových materiálů pro různé výrobky*. Ostrava: Kovosil, 2008. ISBN 9788090369429.