

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odolnost Al slitin proti koroznímu napadení

Autor: Michal LUKSCH
Vedoucí práce: Ing. Ondřej CHOCHOLATÝ, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michal LUKSCH**
Osobní číslo: **S21B0410P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenské materiály a technologie**
Téma práce: **Odolnost Al slitin proti koroznímu napadení**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Al Slitiny
2. Koroze
3. Korozní odolnost Al slitin
4. Příprava vzorků
5. Korozní test – volba vhodného prostředí
6. Vyhodnocení výsledků
7. Diskuze
8. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Heat Treating as Volume 4 of the ASM Handbook, ASM International.

Michna, Štefan et al. Encyklopedie hliníku. [Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005]. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.

JONES, D.A. Principles and prevention of corrosion, Prentice Hall, New York 1996.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Kateřina Nová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Luksch	Jméno Michal	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Chocholatý, Ph.D.	Jméno Ondřej	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Odolnost Al slitin proti koroznímu napadení		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	54	TEXTOVÁ ČÁST	54	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zabývá korozní odolností hliníkových slitin. Experiment se zaměřil na vliv tepelného zpracování. Zvolila se slitina EN AW 6082 o třech různých stavech tepelného zpracování. Slitina byla pozorována na světelném a rastrovacím elektronovém mikroskopu. Byla podrobena koroznímu testu solnou mlhou a vyhodnocena podle korozního napadení a změny mechanických vlastností. Následně se experiment věnoval měření korozních rychlostí pomocí potenciostatu v kyselém a zásaditém prostředí.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	hliníkové slitiny, koroze, tepelné zpracování, mikrostruktura, korozní komora, mikrotvrdost, tahová zkouška, potenciostat

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Luksch	Name Michal	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Chocholatý, Ph.D.	Name Ondřej	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Corrosion resistance of Al alloys		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	54	TEXT PART	54	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This bachelor thesis pursues corrosion resistance of aluminium alloys. The experiment was headed to an influence of heat treatment. The EN AW 6082 alloy with three different conditions of heat treatment has been chosen. Sighting of the alloy was made by light microscope and electron rastring microscope. It was subjected into the salt mist corrosive test and evaluated by a corrosive attack and mechanical properties change. Consequentially, the experiment devoted oneself measuring of corrosive velocites in acidic an alkalic medium by a potenciostatic measuring instrument.</p>
KEY WORDS	aluminium alloys, corrosion, heat treatment, microstructure, corrosion test chamber, microhardness, tensile testing, potentiostat

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. za vedení, ochotu a rady. Dále bych chtěl poděkovat slečně Ing. Kateřině Nové, Ph.D. za velkou pomoc při provádění experimentální části práce.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům a přítelkyni za bezmeznou oporu po celá léta studia.

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	11
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	12
1 Úvod.....	14
2 Hliník	15
2.1 Vlastnosti hliníku.....	15
2.2 Fyzikální vlastnosti hliníku	15
2.2.1 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin	15
2.2.2 Chemické vlastnosti hliníku	16
2.3 Rozdělení hliníkových slitin.....	16
2.3.1 Slitiny hliníku pro tváření	17
2.3.2 Slévárenské hliníkové slitiny	19
2.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin.....	20
2.4.1 Žihání	20
2.4.2 Vytvrzování - precipitační zpevnění	21
3 Koroze.....	23
3.1 Koroze hliníku a jeho slitin	23
3.2 Vliv chemického složení na korozní vlastnosti	23
3.3 Druhy korozního napadení	24
3.3.1 Bodová koroze.....	24
3.3.2 Štěrbínová koroze.....	25
3.3.3 Mezikrystalová koroze	25
3.3.4 Koroze po vrstvách.....	26
3.3.5 Kontaktní koroze	26
3.3.6 Korozní praskání	27
3.3.7 Korozní únava	27
3.3.8 Vibrační koroze	28
3.3.9 Mikrobiologická (bakteriální) koroze	28
3.4 Vliv prostředí.....	28
3.4.1 Voda	28
3.4.2 Půda.....	28
3.4.3 Roztoky solí.....	28

3.4.4	Anorganické kyseliny	28
3.4.5	Organické kyseliny	28
3.4.6	Alkalická prostředí	29
3.5	Ochrana proti korozi	29
3.5.1	Oxidické povlaky	29
3.5.2	Fosfátování	29
3.5.3	Chromátování	29
4	Experimentální část	30
4.1	Použitý materiál	30
4.1.1	Zvolené stavy tepelného zpracování	30
4.1.2	Zkušební vzorky	31
4.2	Návrh experimentu	31
5	Vlastnosti základního materiálu	32
5.1	Mikrotvrdost	32
5.1.1	Tabulka naměřených hodnot	33
5.2	Mikrostruktura	33
5.2.1	Pozorování na světelném mikroskopu	33
5.2.2	Pozorování na ŘEM	36
5.2.3	Určení chemického složení pozorovaných částic	38
5.3	Statická zkouška tahem	38
6	Korozní test solnou mlhou	39
6.1	Průběh korozního testu	39
6.2	Hodnocení korozního napadení	40
6.2.1	Váhové rozdíly	40
6.2.2	Vizuální hodnocení	41
6.2.3	Tahové zkoušky po expozici v korozní komoře	42
6.2.4	Porovnání tahových zkoušek před a po expozici	43
6.2.5	Měření mikrotvrdosti po expozici	44
7	Potenciostatické měření	45
7.1	Průběh experimentu	45
7.1.1	Naměřené korozní rychlosti a polarizační odpory	48
8	Diskuze výsledků	49
8.1	EDX mikroanalýza a měření tvrdosti	49

8.2	Korozní test solnou mlhou.....	50
8.3	Potenciostatické měření	50
9	Závěr	51
10	Použité zdroje.....	52

Přehled použitých zkratk a symbolů

FCC	kubická plošně centrovaná krystalová mřížka
SCC	korozní praskání
IGC	mezikrystalová koroze
TZ	tepelné zpracování
SM	světelný mikroskop
REM	rastrovací elektronový mikroskop
EDX	energeticky disperzní spektroskopie
ČSN	česká státní norma
R _m	pevnost v tahu [MPa]
HV	tvrdost podle Vickerse
\bar{x}	aritmetický průměr

Seznam obrázků

Obr. 1: Obecný rovnovážný binární diagram slitin hliníku [14].....	17
Obr. 2: Schematické vyobrazení procesu precipitačního vytvrzení zpracování [35].....	22
Obr. 3: Příklad bodového korozního napadení [13].....	25
Obr. 4: Příklad mezikrystalové koroze [36].....	26
Obr. 5: Příklad kontaktní koroze [37].....	27
Obr. 6: Součást zničená v důsledku korozního praskání [13].....	27
Obr. 7: Doporučené režimy tepelného zpracování T6 a O [25].....	31
Obr. 8: Schematický výkres zkušebních vzorků.....	31
Obr. 9: Stav O, zvětšeno 500x.....	34
Obr. 10: Stav T6, zvětšeno 500x.....	35
Obr. 11: Stav T651, zvětšeno 500x.....	35
Obr. 12: Detail částice č.1 na REM.....	36
Obr. 13: Detail částice č. 2 na REM.....	37
Obr. 14: Detail částice č.3 na REM.....	37
Obr. 15: Detail částice č.4 na REM.....	38
Obr. 16: Vlastní uložení vzorků a schéma komory od výrobce.....	40
Obr. 17: Graf vývoje změny hmotnosti v závislosti na době korozního testu solnou mlhou ..	41
Obr. 18: Korozní napadení vzorků po 504 hodinách expozice, 1 kus od každého stavu TZ...	42
Obr. 19: Porovnání meze pevnosti před a po expozici.....	43
Obr. 20: Porovnání tažnosti před a po expozici.....	44
Obr. 21: Fotografie vlastního zapojení; schéma tříelektrodového zapojení [6].....	46
Obr. 22: Graf závislosti elektrochemického potenciálu vůči el. proudu pro vzorek 6082T6-2 v kyselém prostředí s vyznačenou extrapolací lineární částí křivky pro výpočet polarizačního odporu.....	47
Obr. 23: Graf závislosti logaritmu proudu na elektrochemickém potenciálu pro vzorek 6082T6-2 v kyselém prostředí s vyznačením táfelovských směrnic pro výpočet korozní rychlosti.....	47

Seznam tabulek

Tab. 1: Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [1].....	15
Tab. 2: Tvářené Al slitiny a jejich korozní vlastnosti [2].....	19
Tab. 3: Chemické složení slitiny EN AW 6082 udané v hmotnostních % [24].....	30

Tab. 4: Naměřené a vypočítané hodnoty HV 0,1 bez expozice	33
Tab. 5: Chemické složení zkoumaných částic	38
Tab. 6: Naměřené hodnoty při statické zkoušce tahem bez korozní expozice.....	39
Tab. 7: Parametry nastavení korozní komory při testu solnou mlhou	40
Tab. 8: Hmotnostní změny vzorků	41
Tab. 9: Vizuální hodnocení korozního napadení.....	42
Tab. 10: Výsledky tahových zkoušek po expozici	43
Tab. 11: Naměřené a vypočítané hodnoty HV 0,1 po expozici	45
Tab. 12: Chemické složení přípravků použitých k potenciostatickému měření.....	45
Tab. 13: Naměřené korozní rychlosti a polarizační odpory v zásaditém prostředí	48
Tab. 14: Naměřené korozní rychlosti a polarizační odpory v kyselém prostředí.....	49

1 Úvod

Hliník je nedílnou součástí moderní společnosti. Je používán prakticky v každém odvětví průmyslu. Jedná se o strojírenský a hutnický průmysl, energetiku a elektrotechniku, dopravu, stavebnictví, potravinářský a chemický průmysl, zdravotnictví, a mnohé další aplikace. Jeho využití stále roste. V roce 1900 se celosvětově vyrobilo přibližně 8 000 t hliníku; v roce 2000 se jej vyprodukovalo téměř 25 000 000 t. V současnosti je produkováno více než 50 000 000 t hliníku ročně. Stále existují nevyužité možnosti pro aplikaci hliníku a jeho slitin.

Hliník má vedle malé hustoty a dobré elektrické a tepelné vodivosti také vysokou odolnost proti korozi, zvláště pak v atmosférických podmínkách. Korozní odolnost hliníku má však řadu omezení, jež výrazně degradují hliník, dojde-li k jejich překročení. Každá konstrukční aplikace hliníku a jeho slitin vyžaduje zohlednění korozní odolnosti daného materiálu. [1, 5]

Odhaduje se, že v současné době dosahují ztráty způsobené korozi 4 až 6 % hrubého domácího produktu, což pro Českou republiku znamenalo v roce 2020 ztrátu více 260 miliard Kč. Vzhledem k tomu, že použití hliníku a jeho slitin je stále častější, odolnost hliníkových slitin proti koroznímu napadení je velmi aktuální téma. [6, 38]

2 Hliník

2.1 Vlastnosti hliníku

Hliník je pro níže uvedené příznivé vlastnosti stále víc využíván v celosvětovém měřítku.

- Odolnost proti korozi
- Nízká měrná hmotnost
- Nízká teplota tání
- Dobrá svařitelnost
- Výhodný poměr hmotnosti a pevnosti [8]

2.2 Fyzikální vlastnosti hliníku

Hliník krystalizuje v kubické mřížce plošně centrované, díky čemuž je dobře tvárný v široké škále teplot.

Vybrané fyzikální vlastnosti důležité pro různé vědní obory jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 1: Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [1]

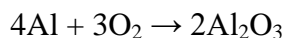
Vlastnosti	Hodnoty
Mřížka	FCC
Parametr mřížky	$a=0,404958$ [nm]
Hustota	$2,6989$ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] (při 20 [°C])
Teplota tavení	660,4 [°C]
Teplota varu	2494 [°C]
Tepelná vodivost	247 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$] (při 25 [°C])
Latentní teplo tavení	397 kJ·kg
Latentní teplo varu	10,78 [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]
Atomová hmotnost	26,98154
Objemová změna při krystalizaci	6,5 [%]
Spalné teplo	31,05 [MJ/kg]
Teplota supravodivosti	1,2 [K]

2.2.1 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin

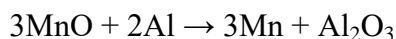
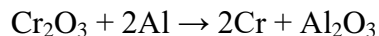
Nejčastější používanou zkouškou jsou zkouška tahem a zkouška tvrdosti. Pevnost v tahu je zásadní údaj pro konstrukční použití. Pro měření tvrdosti je často používána Brinellova zkouška. Tvrdost podle Brinella je v rozmezí 15 pro čistý hliník, až po 140 u vysokopevnostních slitin typu Al-Zn-Mg-Cu. Při zkouškách vrubové houževnatosti se dochází k poznatku, že hliníkové slitiny nevykazují při nízkých teplotách křehký lom. Při zvyšující se teplotě rychle klesá mez pevnosti i tvrdost. [5]

2.2.2 Chemické vlastnosti hliníku

Hliník je neušlechtilý kov, přesto je díky vzniku ochranné oxidické vrstvy na vzduchu poměrně stálý. Vrstva ochranného oxidu vzniká podle reakce:

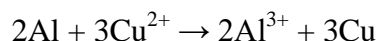


Tuto vrstvu lze dále zesílit eloxováním. Vysoké afinity ke kyslíku se využívá při výrobě některých kovů redukcí.

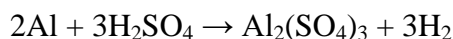


Hliník dále reaguje s mnohými nekovovými prvky a vznikají binární sloučeniny (nitridy, fosfidy, halogenidy, karbidy). Slitiny jsou z pravidla méně chemicky stáble, než hliník vysoké čistoty. Nejškodlivější legující prvky v tomto smyslu jsou měď a zinek. Jsou totiž ušlechtlejší, a tak mají vůči hliníku katodický charakter. [2, 5]

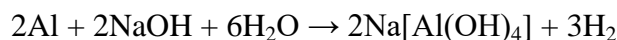
Za přítomnosti iontů těžkých ušlechtlejších kovů ve vodě je hliník značně rychleji rozpouštěn tzv. cementací.



Při působení neoxidujících kyselin se hliník vcelku lehce rozpouští při vzniku hlinitých solí za vývinu vodíku.



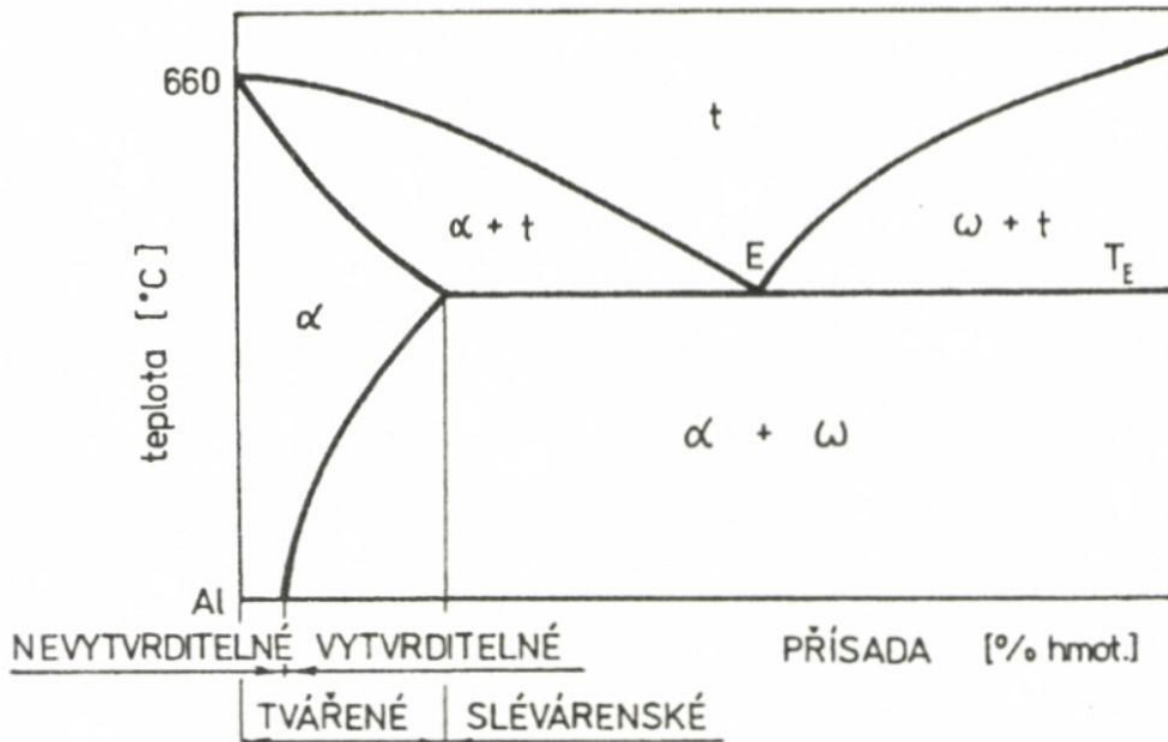
V zásadách se hliník rozpouští a vznikají hlinitany a vodík.



Důležité sloučeniny hliníku jsou oxidy a halogenidy. Al_2O_3 se vyskytuje ve více krystalických formách. Oxid hlinitý je výborný elektrický izolant, má vysokou mechanickou pevnost a tvrdost, a značnou odolnost proti opotřebení. Pro své výhodné vlastnosti se používá jako brusný materiál, jako žáruvzdorná keramika, pro výrobu samotného hliníku, nebo např. v zapalovacích svíčkách zážehových motorů. Obsahuje-li malá množství iontů jiných kovů, dochází k zbarvení a je používán ve šperkařství jako rubín. [5]

2.3 Rozdělení hliníkových slitin

Slitiny hliníku je možno rozdělit dle fázového diagramu na slitiny slévárenské a slitiny tvářené. U tvářených slitin je struktura tvořena převážně z primárního tuhého roztoku, zatímco u slévárenských slitin převážně z eutektika. Dále se mohou dělit dle hlediska tepelného zpracování na vytvrditelné a nevytvrditelné. Diagram takto rozděluje slitiny je zobrazen na obr. 5. Vytvrditelnost je podmíněna rozpustností přísady v hliníku v tuhé fázi a klesající rozpustností přísady v tuhém hliníku s klesající teplotou. [11]



Obr. 1: Obecný rovnovážný binární diagram slitin hliníku [14]

2.3.1 Slitiny hliníku pro tváření

Hliníkové slitiny pro tváření se dle EN 573-1 dělí do osmi skupin dle hlavního legujícího prvku [1]:

- **Série 1000 – Hliník čistoty minimálně 99,00%**

Jedná se o slitiny téměř čistého Al. Minimální množství nečistot i legujících prvků dávají těmto slitinám skvělé korozní vlastnosti včetně odolnosti proti koroznímu praskání (SCC). Nevýhodou je však nízká pevnost, což značně zužuje aplikovatelnost. Použití především tam, kde jsou vyžadovány fyzikálně chemické vlastnosti vysokých hodnot - elektrotechnika, energetika, potravinářský a chemický průmysl. [2, 15]

- **Série 2000 – Cu**

Slitiny obsahující měď jakožto primární legující prvek. Jedná se o nejpoužívanější konstrukční slitiny hliníku v automobilovém a leteckém průmyslu pro součásti pracující za běžných teplot s výhodnou kombinací mechanických vlastností při nízké měrné hmotnosti. Jsou to však nejméně korozně odolné slitiny. Přestárnutím může snadno docházet k SCC. Měď ve slitině může s hliníkem vytvořit galvanických článků a dojít k různým druhům korozního napadení. Jedná se především o duraly AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn. Hlavními výrobky ze slitin jsou výlisky a plechy. Většinou se plátují hliníkem vysoké čistoty, nebo některou slitinou série 6000, aby se předešlo korozi. [1, 2, 14, 15]

- **Série 3000 – Mn**

Tato řada slitin hliníku je legována malým množstvím především manganu a hořčíku. Tuhý roztok i precipitáty mají téměř totožný korozní potenciál jako hliníku; legury tak pouze minimálně snižují korozní odolnost. Tato slitina je vhodná k použití vyžadující vysokou korozní odolnost při nízkých nárocích na mechanické vlastnosti. Užívány jsou především v tepelných výměnících a v architektuře. Často se používají namísto čistého hliníku, jelikož jsou značně pevnější.[1, 2, 14]

- **Série 4000 – Si**

Slitiny legované především křemíkem. Silikonové precipitáty silně polarizují slitinu a zabraňují tak koroznímu napadení; jejich korozní odolnost dosahuje téměř úrovně čistého hliníku. Nedají se většinou tepelně zpracovat. Jsou známé též pod názvem siluminy. Slitiny s vysokým obsahem Si se používají jako svařecí dráty. [1, 2, 15]

- **Série 5000 – Mg**

Legovány především manganem, hořčíkem (o něco více než slitiny třídy 3XXX) a chromem; mají dobré korozní vlastnosti při výrazně vyšší pevnosti. Jsou vhodné pro použití v potravinářském a chemickém průmyslu, lodních konstrukcích, nebo v kryogenní technice. Slitiny kombinující příznivé mechanické vlastnosti a korozní odolnost. Dají se dobře tvářet i svařovat. Významná je také odolnost proti vibrační korozi a dostatečná lomová houževnatost. Obchodní název je hydronalium. Jestliže obsahují i Si, označují se pantal. [1, 2, 15]

- **Série 6000 – Mg + Si**

Jsou tepelně zpracovávány. Precipitáty tvoří Mg_2Si , které má velmi podobné elektrochemické vlastnosti jako tuhý roztok. Jedná se o jednu z nejvíce korozně odolných slitin s příznivými mechanickými vlastnostmi. Často se jimi nahrazují duraly. Jsou výborně tvářitelné i svařitelné. Typickým příkladem použití těchto slitin je rám jízdního kola. Dále se používají hojně v letecké a lodní dopravě, svařovaných konstrukcích, stavebnictví a potravinářském průmyslu. [1, 2, 15]

- **Série 7000 – Zn**

Legující prvky jsou především zinek, hořčík, mangan a v některých případech i měď. Podobně jako u slitin třídy 2XXX je slitina obsahující měď nejpevnější, avšak s nižší korozní odolností a náchylností k SCC. Slitiny bez mědi mají střední až velmi vysokou pevnost se zachováním dobré korozní odolnosti. Jedná se o nejpevnější hliníkové slitiny s širokým užitím v letectví i automobilovém průmyslu (pevnost v tahu až 600 MPa) pro náročné aplikace. Při nejlepších mechanických vlastnostech mají nižší korozní odolnost. [1, 2, 15]

- **Série 8000 – Jiné legující prvky**

Tabulka níže uvádí informace o sedmi třídách hliníkových slitin se souhrnným uvedením jejich vlastností. Stav T3, T4 a T6 jsou vystárnuté. Stav T8, T73 jsou přestárnuté.

Tab. 2: Tvářené Al slitiny a jejich korozní vlastnosti [2]

Vlastnosti slitiny			Odolnost proti koroznímu napadení			
Slitinová skupina	Používané způsoby tepelného zpracování	Prvky ve slitině	Celková	Bodová koroze	Koroze po vrstvách	Korozní praskání (SCC)
1XXX	Všechny	Nečistoty z výroby	Výtečná	Výtečná	Výtečná	Nevyskytuje se
2XXX	T3, T4	Cu	Střední	Nízká	Nízká	Velmi náchylné
	T8		Střední	Nízká	Střední	Resistentní
3XXX	Všechny	Mn, Mn + Mg	Výtečná	Výtečná	Výtečná	Nevyskytuje se
4XXX	Všechny	Si	Střední	Dobrá	Dobrá	Dobrá
5XXX	Většina	Mn, Mg, Cr	Výtečná	Dobrá	Dobrá	Imunní/Resistentní
6XXX	Všechny	Mg, Si	Výtečná	Dobrá	Výtečná	Nevyskytuje se
7XXX	T6	Zn, Mg, Mn, Cu	Střední	Střední	Střední/Nízká	Náchylné/Velmi náchylné
	T73		Střední	Střední	Dobrá	Resistentní

2.3.2 Slévárenské hliníkové slitiny

Rozdělní hliníkových slitin na odlitky dle ASM (ASM International – The Materials Information Society) podle legujícího prvku/prvků do šesti základních tříd. [1]

- **Al – Cu**

Obsah Cu se pohybuje v rozmezí 4 – 5 %. Pro slitiny se zvýšenou pevností, žarupevností a oteřuvzdorností je obsah Cu 9 – 11 %. Vlastnosti těchto slitin lze ještě zlepšit legováním Ni a Mg. Nevýhodná je u těchto materiálů horší slévatelnost (široký teplotní interval tuhnutí - horší zabíhavost, mirkopórovitost) a nízká korozní odolnost. Vyrábějí se z nich např. hlavy válců a písty. Příklad: ČSN 42 4315, slitina AlCu4Ni2Mg2 (3,75 – 4,5 % Cu, 1,75 – 2,25 % Ni, 1,25 – 1,75 % Mg). [1, 14]

- **Al – Cu – Si**

Hojně používané slitiny, které mají díky legování Si zlepšenou slévatelnost. Slitiny s obsahem Si nad 10 % mají nízký koeficient teplotní roztažnosti. Slitiny s vysokým obsahem Si (až 22 %) mají vysokou odolnost vůči oteřu. Příklad: ČSN 42 4386, slitina AlSi20Cu2NiMgMn (19,0 – 22,0 % Si, 1,5 – 2,0 % Cu, 0,5 – 1,0 % Ni, 0,8 – 1,2 % Mg, 0,1 – 0,4 % Mn). [1]

- **Al – Si**

Slitiny s dobrou slévateľnosťou a korozívnou odolnosťou. Používajú sa pre tvarovo zložitú a tenkostennú odlitky, ako napr. prevodovkové skříně, nebo disky kol. Obsah Si je v intervale 5 – 13 %. Dělí se podle obsahu Si na podeutektické (<11,7 hm. % Si), eutektické (cca 11,7 hm. % Si; nejlepší slévářenské vlastnosti) a nadeutektické (>11,7 hm. % Si). Příklad: ČSN 42 4330, slitina AlSi12Mn (11,0 – 13,0 % Si, 0,1 – 0,4 % Mn). [1, 14]

- **Al – Mg**

Velmi vhodné jsou tyto slitiny pro aplikaci v mořské vodě, neboť dobře odolávají korozi. Jsou dobře obrobitelné a svařitelné. Slitiny s vysokou pevností a houževnatostí. Jsou špatně slévateľné. Použití pro namáhané součásti za vyšších teplot (žebrované hlavy válců). Příklad: ČSN 42 4515, slitina AlMg5Si1Mn (4,4 – 5,5 % Mg, 0,6 – 1,5 % Si, 0,25 – 0,6 % Mn). [1, 14]

- **Al – Zn – Mg**

Dobrá pevnost v litém stavu a korozívnou odolnost je typická pro tyto slitiny. Mají dobrou svařitelnost, ale horší slévateľnosť a náchylnost k tvorbě trhlin za tepla. Problematická může být též náchylnost ke korozi pod napětím. Příklad: ČSN EN 1706, slitina EN AC AlZn5Mg (4,5 – 6,0 % Zn, 0,4 – 0,7 % Mg). [1, 14]

- **Al – Sn**

Slitiny speciálně určeny pro výrobu kluzných ložisek. Problematický je ze slévářenského hlediska velký interval krystalizace. Příklad: neamerické normy, slitina AA850,0 – 6,5Sn-1Cu-1Ni. [1]

Dále je nutno zmínit slitiny **Al – Li**, které se používají především jako tvářené polotovary. Mohou být též odlévány, avšak vysoká reaktivita lithia s kyslíkem jejich použití jakožto slévářenských slitin značně komplikuje. [14]

2.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Tepelné zpracování hliníkových slitin se bez ohledu na to, zda se jedná o slitiny pro tváření, nebo o slitiny pro odlévání dělí do dvou základních skupin, a to žíhání a vytvrzování.

2.4.1 Žíhání

- **Žíhání na odstranění vnitřních pnutí**

Použití pro tvarovo zložitú výrobky tvářené za tepla, u svařenců a odlitků do kovových forem. Pnutí v součásti vznikne nestejným ohřátím nebo ochlazením. Zpracování probíhá pod rekrytalizační teplotou. Sestává se z ohřevu, výdrži na teplotě a následného ochlazování. K poklesu pnutí dochází již při teplotě 200 °C. Teplota žíhání se volí v intervale 200 – 350 °C. Doba výdrže na teplotě se u odlitků prodlužuje až na 8 hodin. Teploty ohřevu nad 300 °C mohou způsobit dokonalé odstranění pnutí na úkor nežádoucího snížení pevnosti [1, 14, 16]

- **Žíhání rekrytalizační**

Často se zařazuje po tváření za studena. Dochází ke snížení pevnosti a zvýšení plasticity. Z původně deformované struktury vzniká nová rekrytalizovaná struktura. Výsledné

mechanické vlastnosti tvářené slitiny po rekrystalizačním žihání se odvíjí od velikosti zrna. Žihací teplota bývá v rozmezí 250 – 500 °C. [1, 14, 16]

- **Homogenizační žihání**

Tepelné zpracování provádějící se za účelem snížení chemické heterogenity, např. po primární krystalizaci. Provádí se nad teplotou změny rozpustnosti, tedy v oblasti tuhého roztoku. Provádí se buď jednostupňové, nebo dvoustupňové (dvě po sobě jdoucí ohřátí a ochlazení s různými teplotami). [1, 9]

- **Stabilizační žihání**

Tepelné zpracování používané pro stabilizaci tvaru, rozměrů nebo mechanických vlastností součástí. Aplikuje se především pro součásti pracující za zvýšených teplot. Žihací teplota je vyšší než maximální plánovaná provozní teplota. Teploty se pohybují v rozmezí od 250 do 350 °C. Doba žihání může být i několik desítek hodin. [1, 16]

- **Žihání s částečnou rekrystalizací (na zotavení)**

Účelem je snížení vnitřních pnutí u součástí tvářených za studen při zachování struktury a minimálním ovlivněním mechanických vlastností. Postup je podobný jako rekrystalizační žihání s tím rozdílem, že celý proces proběhne za kratší čas, aby nedošlo k úplné rekrystalizaci. [9]

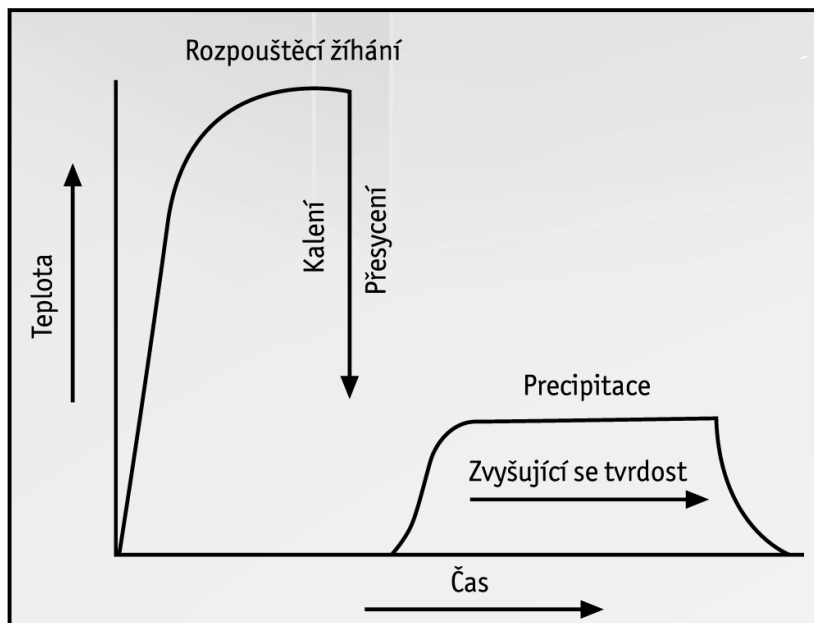
2.4.2 Vytvrzování - precipitační zpevnění

Vytvrzováním se mění mechanické a fyzikální vlastnosti slitin. Podmínkou vytvrditelnosti je výrazná změna rozpustnosti legujícího prvku v závislosti na teplotě dle příslušného rovnovážného diagramu. [1]

Nejprve se provede rozpouštěcí žihání s dostatečnou prodlevou, aby došlo k homogenizaci v celém objemu. Následně je součást ochlazená vhodnou rychlostí v závislosti na typu slitiny (ochlazení je nejčastější do vody). Výsledná tvrdost po rozpouštěcím žihání je více závislá na způsobu ochlazení, než na času homogenizace. Čím rychleji dojde k ochlazení, tím vyšší bude výsledná tvrdost. Ochlazením se vytvoří přesycený tuhý roztok, který se následně rozpadá. Tento proces se nazývá stárnutí. [21]

Přesycený tuhý roztok se rozpadá již za pokojové teploty (přirozené stárnutí). V místech s koncentračními rozdíly vznikají nové fáze, které obsahují více přísadového prvku, než základní tuhý roztok. Tyto fáze rostou a tvoří koherentní precipitáty. Za zvýšené teploty (umělé stárnutí) se tyto precipitáty dále rozrůstají a jejich počet se zmenšuje. Při dalším zvyšování teploty vznikají částečně koherentní a nekoherentní precipitáty.

Princip vytvrzení slitiny spočívá v tom, že vzniklé precipitáty brání pohybu dislokací. Zvyšuje se tvrdost a pevnost, na úkor snížení tvárnosti. Čím jemněji jsou precipitáty dispergované, tím vyšší je pevnost [3, 9, 14]



Obr. 2: Schematické vyobrazení procesu precipitačního vytvrzení zpracování [35]

3 Koroze

3.1 Koroze hliníku a jeho slitin

Koroze kovů, a tedy i hliníku a jeho slitin, je obecně definována jako samovolný proces postupného rozrušení kovů způsobené jejich chemickou nebo elektrochemickou reakcí s okolním prostředím. Atomy kovů v přírodě jsou přítomny v chemických sloučeninách (minerálech). Stejně množství energie potřebné k vytvoření kovů z jejich hornin je následně uvolněno při jejich korozi. Proces koroze v podstatě navrácí kov do jeho původního stavu chemické sloučeniny; někdy je tento stav dokonce identický s formou, z něhož byl kov vyroben. [2, 7]

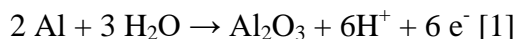
Základní rozdělení koroze kovů je chemická a elektrochemická koroze.

Chemická koroze se uskutečňuje v prostředí neschopném vést elektrický proud. Příčinou je termodynamická nestálost kovu v tomto prostředí. Korozí kov přechází do stabilnějšího stavu.

Elektrochemická koroze je proces probíhající ve vodách, taveninách hydroxidů a solí. První podmínkou vzniku je též termodynamická nestálost v konkrétním prostředí. Anodickou reakcí jsou z kovu uvolňovány jeho kationty, a tím dochází k jeho rozpouštění. [8]

Korozní odolnost hliníku a jeho slitin je v principu určena stabilitou ochranné oxidové vrstvy Al_2O_3 . Hliník je velmi reaktivní a snadno oxidovatelný prvek. Chová se jako korozně stálý kov v důsledku ochranné oxidové vrstvy, přestože má velkou chemickou reakční schopnost. Působením pouze suchého vzduchu se povrch hliníku pokryje během několika minut oxidovou vrstvou o tloušťce 10^{-10} m. V řádu dní se pak tloušťka vrstvy dále zvětší na 10^{-9} m. Poté se již tloušťka vrstvy mění pouze zanedbatelně. Ve vlhku se tvoří vrstvy podstatně silnější, zvětšují se s časem a dosahují tloušťky až 10^{-6} m. [12]

Vrstva Al_2O_3 se tvoří podle reakce:



Vzniklá vrstva může existovat jako korund; jako hydratovaná forma některých krystalografických modifikací, nebo jako amorfni $\text{Al}(\text{OH})_3$. [1]

Oxidová vrstva je stabilní při pH 4-9. [17]. Z toho plyne, že hliník lépe odolává kyselinám, než zásadám.

V prostředí vody a páry se navzájem vyváží dva opačné děje. Jedná se o agresivní působení prostředí a o tvorbu ochranné vrstvy. Výsledná tloušťka oxidové vrstvy se odvíjí od korozního prostředí, přítomnosti aniontů, kationtů a pH. Důležitým faktorem je také teplota. Vliv na stálost a růst ochranné vrstvy mají také legující prvky; některé působí pozitivně, zatímco jiné umožňují vznik poruch, viz níže. [12]

3.2 Vliv chemického složení na korozní vlastnosti

Obecně platí, že nejlepší korozní odolnost má čistý hliník. Příměsi se nedají seřadit podle své škodlivosti či prospěšnosti, jelikož záleží též na chemickém složení okolního prostředí. Z technického hlediska je však důležité rozdělení slitin na slitiny obsahující měď a slitiny neobsahující měď. [1]

a) Slitiny Al neobsahující Cu

Obecně mají tyto materiály podobnou korozní odolnost jako Al o čistotě 99,5%, ovšem s podstatně lepšími mechanickými vlastnostmi. Slitiny AlMn a AlMgMn jsou pro svou chemickou stálost a příznivé mechanické vlastnosti často užívány v potravinářském průmyslu pro výrobu různých nádob. Velmi vhodný je například tepelně zpracovaný materiál AlMgSi. Při nebezpečí vzniku bodové koroze se používají materiály plátované méně ušlechtilou slitinou, která chrání základní materiál před hloubkovou penetrací. Slitiny AlMn, AlMgMn se plátují AlZn1. [12]

b) Slitiny Al obsahující Cu

Do této kategorie spadá konstrukčně důležitá skupina materiálů duraly. Tyto slitiny mají obecně nízkou korozní odolnost. AlCuMg, AlZnMgCu jsou příkladem této skupiny. Při nárocích na korozní odolnost se plátují tyto materiály čistým hliníkem, nebo slitinou Al-Zn. [1, 12]

3.3 Druhy korozního napadení

Korozní prostředí působí na hliník nebo jeho slitinu jedním ze tří níže uvedených způsobů

- a) Napadení základního kovu není výrazné. Pasivní vrstva roste rovnoměrně a potlačuje vznik další koroze.
- b) Na místech, kde došlo k porušení pasivní vrstvy nebo na hranicích zrn vzniká lokální napadení. Toto napadení může dále postupovat do hloubky materiálu.
- c) Oxidová vrstva se rozpouští působením agresivního prostředí. [12]

V hydroxidu sodném a halogenových kyselinách probíhá rovnoměrné napadení, proto se používají jako mořidla. Při tvorbě oxidové vrstvy na povrchu se může postupem času napadení zcela zastavit. Rovnoměrně též koroduje hliník v atmosférických podmínkách. Po několika letech se vytvoří šedá oxidová vrstva značné tloušťky. V případě, že dojde k lokálnímu porušení oxidové vrstvy a materiál se kvůli vlivu prostředí nezacelí, vzniká bodová koroze. Porušení oxidové vrstvy může být zapříčiněno heterogenitou pasivní vrstvy, přítomností určitých aniontů v okolním prostředí, nebo vlivem napětí. Za předpokladu, že dojde k narušení celistvosti ochranné vrstvy, dochází k degradaci materiálu některým z níže uvedených specifických korozních forem. Mezi korozní formy hliníku způsobené anionty v elektrolytu nebo strukturou materiálu se řadí bodová koroze, koroze po vrstvách a mezikrystalická koroze. Statické mechanické napětí může způsobovat korozní praskání. Cyklické zatěžování může vést ke korozní únavě, nebo vibrační korozi. Specifickým druhem koroze, jež stojí za zmínku je kontaktní (galvanická) koroze. Ta vzniká při kontaktu s jiným kovem, případně s další odlišnou hliníkovou slitinou. [1, 12]

3.3.1 Bodová koroze

Bodová koroze je povrchová koroze charakteristická malými dírkami na povrchu. Jedná se o nejčastější typ lokální koroze hliníkových slitin s nepříznivými dopady na mechanické vlastnosti. Bodová koroze se většinou vyskytuje v případě, že je v korozním prostředí přítomna sůl, protože spouštěčem jsou chloridové anionty. Sulfátové soli mohou také do určité míry způsobit vznik bodové koroze. Nejhorší případy napadení bodovou korozí jsou způsobeny přítomností alkalických a kyselých solí. [13]

Mechanismus této koroze je vázán k lokálnímu porušení ochranné oxidové vrstvy. Odolnost hliníkových slitin vůči bodové korozi závisí na stabilitě pasivního stavu, což souvisí

s jejich složením a obsahem aniontů v elektrolytu, které tuto specifickou formu koroze vzbuzují. Mezi počtem pittingů (bodů) a jejich hloubkou existuje vztah; čím hlubší pittingy, tím menší je jejich koncentrace a naopak. [1]

Dále pak na hranicích zrn (a jiných heterogenitách povrchu) může být zvýšená koncentrace železa nebo zde může docházet ke vzniku vakancí, což dává vzniknout bodové korozi v daném místě. [1]



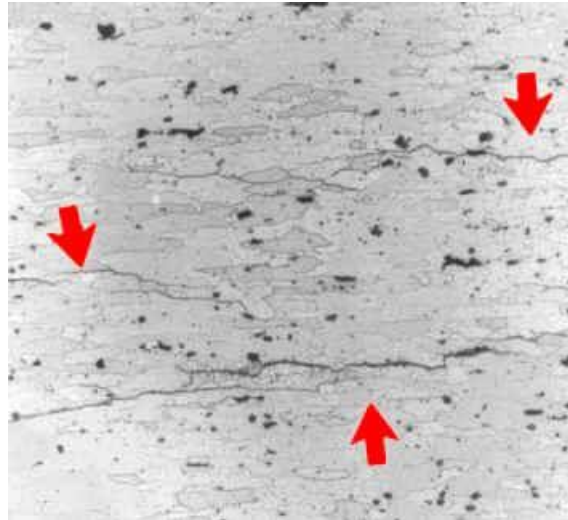
Obr. 3: Příklad bodového korozního napadení [13]

3.3.2 Štěrbinová koroze

K štěrbinové korozi dojde v místě, kde se elektrolytu oddělí od okolí. Ústí štěrbin je tak malé, že nemůže probíhat promíchávání (konvence). Typickým příkladem takového místa (štěrbiny) je například spojení dvou plechů nýtu, nebo šroubovým spojem. Elektrolyt je ve štěrbině ochuzován o kyslík a vnitřní povrch štěrbin začne vykazovat anodický charakter. Okolí ústí štěrbin se stane katodou. Agresivita roztoku uvnitř vzrůstá a vede ke vzniku článku. [4]

3.3.3 Mezikrystalová koroze

Mezikrystalová koroze (angl. IGC – intergranular corrosion) vzniká především jako důsledek toho, že se na hranicích zrn často vylučují nečistoty a daná oblast je zde méně korozně odolná. Hliníkové slitiny jsou k mezikrystalové korozi velmi náchylné, především díky precipitaci na hranicích zrn. Tím může dojít ke vzniku elektrochemického článku a vzniku lokální galvanické koroze. Nejvyšší pravděpodobnost vzniku mezikrystalové koroze je při souvislém vyloučení anodické sekundární fáze, např. $MgAl_3$. Existuje několik typů mezikrystalové koroze, odvíjející se od tepelného zpracování a materiálové struktury. Sklon k této korozi se liší pro různé typy slitin. Mechanismus této koroze může být spuštěn bodovou korozi. [1, 2, 13]



Obr. 4: Příklad mezikrystalové koroze [36]

3.3.4 Koroze po vrstvách

Jedná se o typ koroze specifický pro tvářené slitiny hliníku. Koroze probíhá rovnoběžně s deformovanou strukturou. Dochází k výrazné delaminaci a oslabení materiálu. Napadení koroze se na povrchu materiálu projeví důlky, odloupenými kousky a vyboulenými místy připomínající puchýře. Nejvýrazněji se projevuje u slitin, které prošly procesem válcování za tepla nebo za studena. Tato koroze je častá u vysoce pevných hliníkových slitin s vysokým obsahem legujících prvků. Je zde konstantní rychlost průběhu, která nezávisí na době expozice. Stejně jako u ostatních druhů koroze je vznik této spjat s lokálním porušením ochranné vrstvy. Náchylnost ke korozi po vrstvách lze snížit pomocí tepelného zpracování. [1, 13]

3.3.5 Kontaktní koroze

Kontaktní koroze (neboli galvanická) je druh korozního napadení vznikající při vzájemném působení dvou odlišných kovů (slitin), přičemž se více projeví na jedné z nich. Nejvýrazněji probíhá koroze na tom kovu, který ve vzniklém článku funguje jako anoda. Napadení je největší v místě dotyku, popř. místa, ve kterém jsou si oba materiály nejbližší. Hliník má značně záporný korozní potenciál, což ve většině elektrolytů vede k urychlení koroze, pakliže dojde ke styku s jiným, elektrochemicky ušlechtilejším kovem. Čím dále je od hliníku ušlechtilý kov dle Beketovy řady kovů, tím závažnější bude korozní napadení. Nejčastější jiný kov spojený s hliníkem je ocel. Tato kombinace není zcela bezpečná, přestože by nemělo docházet k intenzivní korozi (obvykle postačí ochrana nátěrem). Obzvláště nebezpečný je kontakt s mědí, nebo s jejími slitinami, které mohou způsobovat korozi i v případě, že nejsou s hliníkem v přímém kontaktu. Jedná se o velmi častý druh korozního napadení. [2, 12, 13]



Obr. 5: Příklad kontaktní koroze [37]

3.3.6 Korozní praskání

Korozní praskání (angl. SCC – stress corrosion cracking) je způsobeno souhrou více faktorů. Dochází k ní v důsledku synergického efektu při působení metalurgických, mechanických a chemických faktorů. U hliníkových slitin je SCC zvláště závislé na velikosti napětí, chemickém složení a tepelném zpracování. Mezi více odolné patří slitiny čistějšího Al a slitiny precipitačně vytvrzené na nižší než maximální pevnost. Např. u čistého Al ke koroznímu praskání nedochází, zatímco slitina AlCuMg je vysoce náchylná. Odolnost tvářených slitin je minimální v příčném směru, který je kolmý ke směru tváření plechu. SCC u Al slitin je téměř výhradně mezikrystalová (intergranulární). [1, 2, 13]



Obr. 6: Součást zničená v důsledku korozního praskání [13]

3.3.7 Korozní únava

Únava materiálu může způsobit úplnou destrukci konstrukčního komponentu. Tento typ koroze může vzniknout, jestliže je slitina vystavena střídavému namáhání a současně koroznímu prostředí. Rozdíl mezi korozním praskáním a korozní únavou je ten, že při korozní

únavě je namáhání střídavé a napětí nemá vliv na šíření trhlin. Ideálním prostředím pro vznik korozní únavy je např. mořská voda, nebo jiné solné roztoky. [12, 13]

3.3.8 Vibrační koroze

Jedná se o druh koroze způsobený vzájemným kmitavým pohybem dvou stýkajících se součástí. Hlavními činiteli je zde oxidace, adheze a abraze. Často se vyskytuje u šroubových, nýtovaných a čepových spojů z hliníkových slitin. [12, 1]

3.3.9 Mikrobiologická (bakteriální) koroze

Druh koroze způsobený mikroorganismy. Tento typ koroze se objevuje v palivových a olejových nádržích, pakliže je přítomna voda. Jisté typy mikroorganismů v podstatě spotřebovávají olej a produkují kyselinu. Tato kyselina způsobuje korozi, která může vést ke zničení skladovací nádoby. K zabránění vzniku této koroze je nutné odstranit z nádob co nejvíce vody. [13]

3.4 Vliv prostředí

3.4.1 Voda

Ve vodě je hliník a jeho slitiny odolný vůči korozi až do bodu varu. Vzniklá oxidová vrstva má krystalovou strukturu, a tak je odolnější, než vrstva vzniklá v atmosférických podmínkách. Intenzivně koroduje i hliník vysoké čistoty při teplotách nad 200 °C. V praxi závisí především na chemickém složení různých vod (mořská, dešťová,...). Dalšími faktory jsou např. rychlost proudění dané vody a teplota. [1, 12]

3.4.2 Půda

Vychází se ze složení půdního výluhu a platí v podstatě to samé, jako pro vodu. Záleží na pH a chemickém složení. Kyselé prostředí je například rašeliniště; zásaditým prostředím může být vápenitá půda. Bodová koroze je nejběžnějším korozním napadením hliníkového potrubí a jeho slitin. [12]

3.4.3 Roztoky solí

Korozní působení solných roztoků je závislé především na pH a charakterem přítomných aniontů a kationtů. Z aniontů jsou nejagresivnější chloridy, jelikož díky své malé molekule pronikají oxidovou vrstvou. Celkově jsou hliníkové slitiny poměrně dobře korozně odolné vůči solným roztokům. [12]

3.4.4 Anorganické kyseliny

V silně kyseleném prostředí dochází k rozpuštění oxidové vrstvy za vývinu vodíku. Má-li kyselina oxidační účinek, pasivuje povrch. Při působení HCl vykazuje hliník vysoké čistoty zvýšenou odolnost. Nejagresivnější jsou halogenvodíkové kyseliny. [12]

3.4.5 Organické kyseliny

Působení organických kyselin závisí na množství obsažených vodíkových iontů. Nejsilněji působí kyselina mravenčí, zatímco např. kyselina octová není agresivní i při 80% a 50 °C. [1, 12]

3.4.6 Alkalická prostředí

K výraznému koroznímu napadení dochází při působení hydroxidu sodného, draselného, amoniaku. Stejně napadení vzniká od uhličitánů. Míra korozního napadení je několikanásobně vyšší v porovnání s kyselinami o stejném disociačním stupni. [12]

3.5 Ochrana proti korozi

3.5.1 Oxidické povlaky

Jedním z nejpoužívanějších způsobů zlepšení korozní odolnosti je tzv. eloxování. Jedná se o proces vytvoření ochranné oxidické vrstvy elektrochemickým způsobem. Průchodem stejnosměrného elektrického proudu a ponořením do elektrolytu (nejčastěji kyselina sírová) je na povrchu hliníkové slitiny vytvořena rovnoměrná vrstva Al_2O_3 . Tyto vrstvy nejenže chrání materiál proti korozi, ale zároveň zlepšují otěruvzdornost a slouží jako elektrická izolace. Nejvíce se používá pro silně korozně namáhané výrobky v leteckém, lodním a stavebním průmyslu. [10]

3.5.2 Fosfátování

Fosfátování je chemická úprava povrchu zlepšující korozní odolnost a přilnavost nátěru organickou hmotou. Nejrozšířenější je u oceli, ovšem používá se i pro hliník a jeho slitiny. Na povrchu se vytvoří nerozpustná vrstva fosforečnanů. [10]

3.5.3 Chromátování

Podobně jako fosfátování slouží chromátování k zlepšení korozní odolnosti v málo agresivních prostředích a také k zlepšení přilnavosti nátěrů. Oproti eloxování má tu výhodu, že součást neztrácí schopnost vést elektrický proud, čehož se využívá v elektrotechnice. Chromátování je hojně využíváno v letectví, především v aplikacích, kde je na hliníkovou součást nanášen nátěr. [10, 20]

4 Experimentální část

Výzkumným problémem v experimentální části bylo zkoumání vlivu tepelného zpracování konkrétní hliníkové slitiny na její korozní odolnost. Byla zvolena slitina o třech různých tepelných zpracováních. Experiment byl zaměřen na zkoumání mechanických vlastností materiálu a mikrostruktury. Dále byl do experimentu zařazen korozní test solnou mlhou. Další částí bylo potenciostatické měření korozní rychlosti a polarizačního odporu. Předpoklad je takový, že rozdíly v mikrostrukturu způsobené různými režimy TZ by měly mít vliv na odolnost proti koroznímu napadení.

4.1 Použitý materiál

Jako zkoumaný materiál byla vybrána tvářená hliníková slitina EN AW 6082. Slitina je precipitačně vytvrditelná. Korozní odolnost je značná, při příznivých mechanických vlastnostech. Je výborně tvářitelná i svařitelná. Slitina se hojně používá v letecké a lodní dopravě, svařovaných konstrukcích, stavebnictví a potravinářském průmyslu. Tato konkrétní slitina má nejvyšší pevnost z celé řady 6000. Je velmi často dodávána ve formě plechů a následně obráběna; nehodí se pro komplikované, tenkostěnné součásti. Vykazuje též dobrou odolnost vůči dynamickému zatěžování. Slitina je certifikována pro použití v námořních aplikacích. [1, 2, 27]

Tab. 3: Chemické složení slitiny EN AW 6082 udané v hmotnostních % [24]

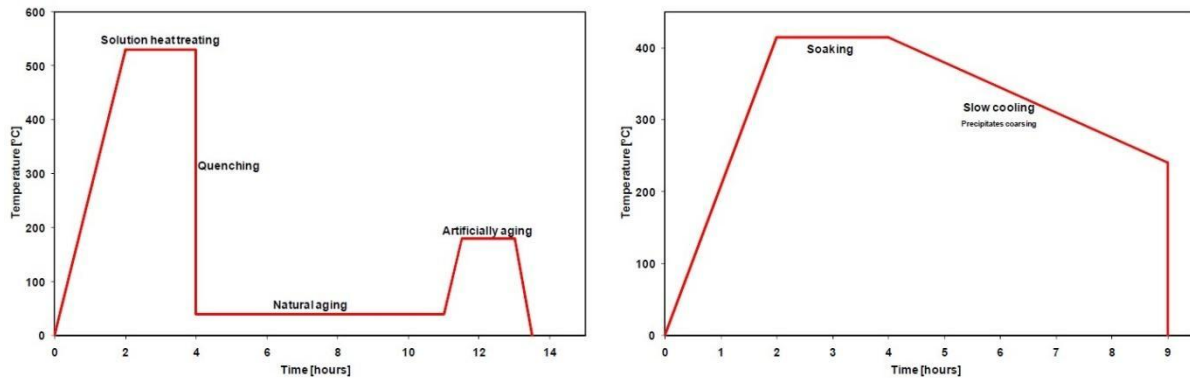
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní	Al
0,70- 1,30	max. 0,50	max. 0,10	0,40- 1,00	0,60- 1,20	max. 0,25	max. 0,20	max. 0,10	max. 0,15	zbytek

4.1.1 Zvolené stavy tepelného zpracování

O – žíháný: označení se používá u výrobků, které jsou žíhány k získání stavu s nejnižší pevností

T6 – stav po rozpouštěcím žíhání a následném umělém stárnutí

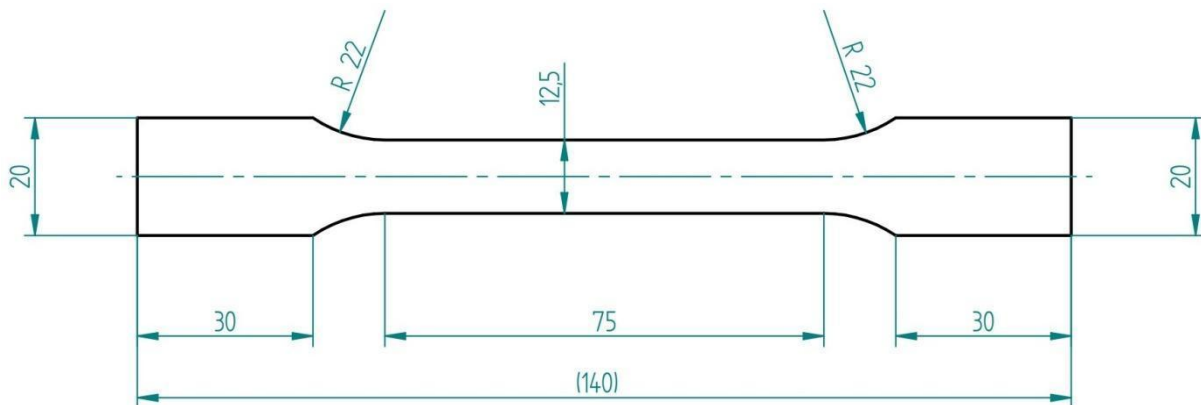
T651 – Po rozpouštěcím žíhání, snížení vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí trvalé deformace (0,5 – 3 % pro plechy) a umělém stárnutí. Po vypnutí se tyto výrobky dále nevyrovnávají. [22]



Obr. 7: Doporučené režimy tepelného zpracování T6 a O [25]

4.1.2 Zkušební vzorky

Od každého stav tepelného zpracování byly hodnoceny 3 vzorky. Polotovary byly plechy tloušťky 2 mm. Vzorky byly dle výkresu vyříznuty vodním paprskem



Obr. 8: Schematický výkres zkušebních vzorků

4.2 Návrh experimentu

Experimentální část této práce je rozdělena do 3 hlavních částí.

V první z nich se určily mechanické a mikrostrukturní vlastnosti vzorků všech stavů TZ. Bylo provedeno měření mikrotvrdomosti dle Vickerse a byla zkoumána mikrostruktura na SM a REM. Dále byly provedeny statické zkoušky tahem.

Ve druhé části se vzorky podrobily testu solnou mlhou v korozní komoře po dobu 504 hodin. Korozní odolnost byla hodnocena vizuálními a váhovými změnami, dále byly provedeny tahové zkoušky vzorků po expozici.

Ve třetí části experimentu byla měřena korozní rychlost a polarizační odpor v silně kyselém a silně zásaditém prostředí.

5 Vlastnosti základního materiálu

5.1 Mikrotvrdost

Bylo provedeno měření mikrotvrdosti dle Vickerse v příčném směru. Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Princip spočívá ve vtlačování diamantového jehlanu o vrcholovém úhlu 136° při definované zatěžující síle a následném měření délky úhlopříčky vtisku, který zůstane v tělese po odlehčení zkušebního zatížení. Před měřením byly vzorky v souladu s normou vyleštěny. Pro měření mikrotvrdosti HV 0,1 je zatěžující síla $F=0,9807$ [N]. Mezi vtisky byly dodrženy požadavky na minimální vzdálenost, tj. pro lehké kovy. [32]

$$HV\ 0,1 = 0,1891 * \frac{F}{u^2}$$

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky:

$$u_1 = 65,22\ \mu\text{m}$$

$$u_2 = 65,57\ \mu\text{m}$$

$$\bar{x} = \frac{u_1 + u_2}{2} = \frac{65,22 + 65,57}{2} = 65,40\ \mu\text{m} = 0,0654\ \text{mm}$$

$$HV\ 0,1 = 0,1891 * \frac{F}{u^2} = 0,1891 * \frac{0,9807}{0,0654^2} \doteq 43$$

F – zátěžná síla [N], u – průměrná hodnota úhlopříčky [mm]

5.1.1 Tabulka naměřených hodnot

Tab. 4: Naměřené a vypočítané hodnoty HV 0,1 bez expozice

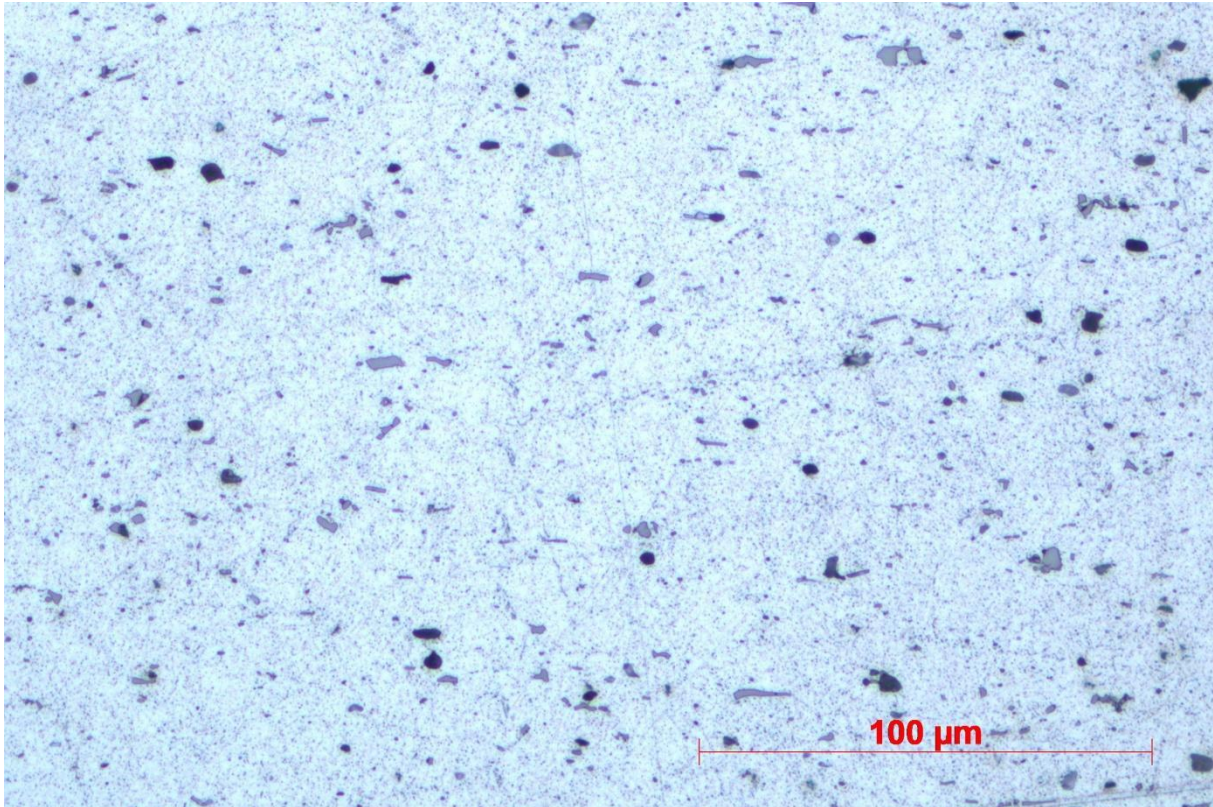
stav materiálu	úhlopříčka 1 [μm]	úhlopříčka 2 [μm]	\bar{x} úhlopříček [μm]	tvrdost HV 0,1
O	65,22	65,57	65,40	43
O	66,66	65,24	65,95	43
O	70,03	67,4	68,71	39
O	66,64	67,35	66,99	41
O	66,58	63,46	65,02	44
			průměr HV 0,1	42
stav materiálu	úhlopříčka 1 [μm]	úhlopříčka 2 [μm]	\bar{x} úhlopříček [μm]	tvrdost HV 0,1
T6	40,69	41,05	40,87	111
T6	39,86	40,37	40,12	115
T6	39,66	40,36	40,01	116
T6	41,05	41,76	41,41	108
T6	40,69	39,98	40,34	114
			průměr HV 0,1	113
stav materiálu	úhlopříčka 1 [μm]	úhlopříčka 2 [μm]	\bar{x} úhlopříček [μm]	tvrdost HV 0,1
T651	39,27	39,1	39,18	121
T651	38,71	40,38	39,54	119
T651	39,66	36,55	38,11	128
T651	39,27	40,26	39,77	117
T651	40,69	38,92	39,81	117
			průměr HV 0,1	120

5.2 Mikrostruktura

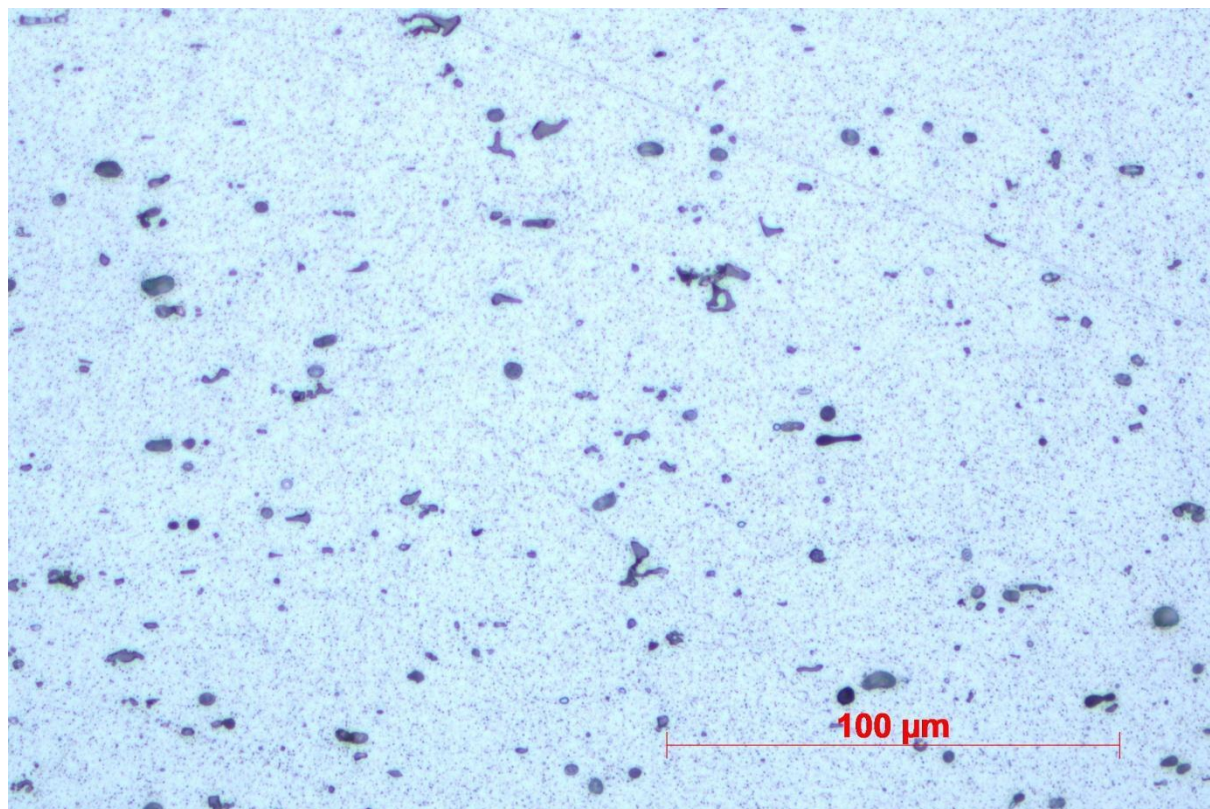
5.2.1 Pozorování na světelném mikroskopu

Nejprve byly připraveny metalografické výbrusy. Na kotoučové pile Struers – Discotom-6 s diamantovým řezným kotoučem byly odděleny vzorky v příčném směru. Dále byly zality do zalévací hmoty. Na sérii brusných kotoučů počínaje zrnitostí 400 a konče zrnitostí 2400 byl zhotoven metalografický výbrus, který byl následně leštěn do zrcadlového lesku. Poté byly vzorky naleptány leptadlem Keller o složení 0,5ml HF, 1,5ml HCl, 2,5ml HNO₃, 95,5ml

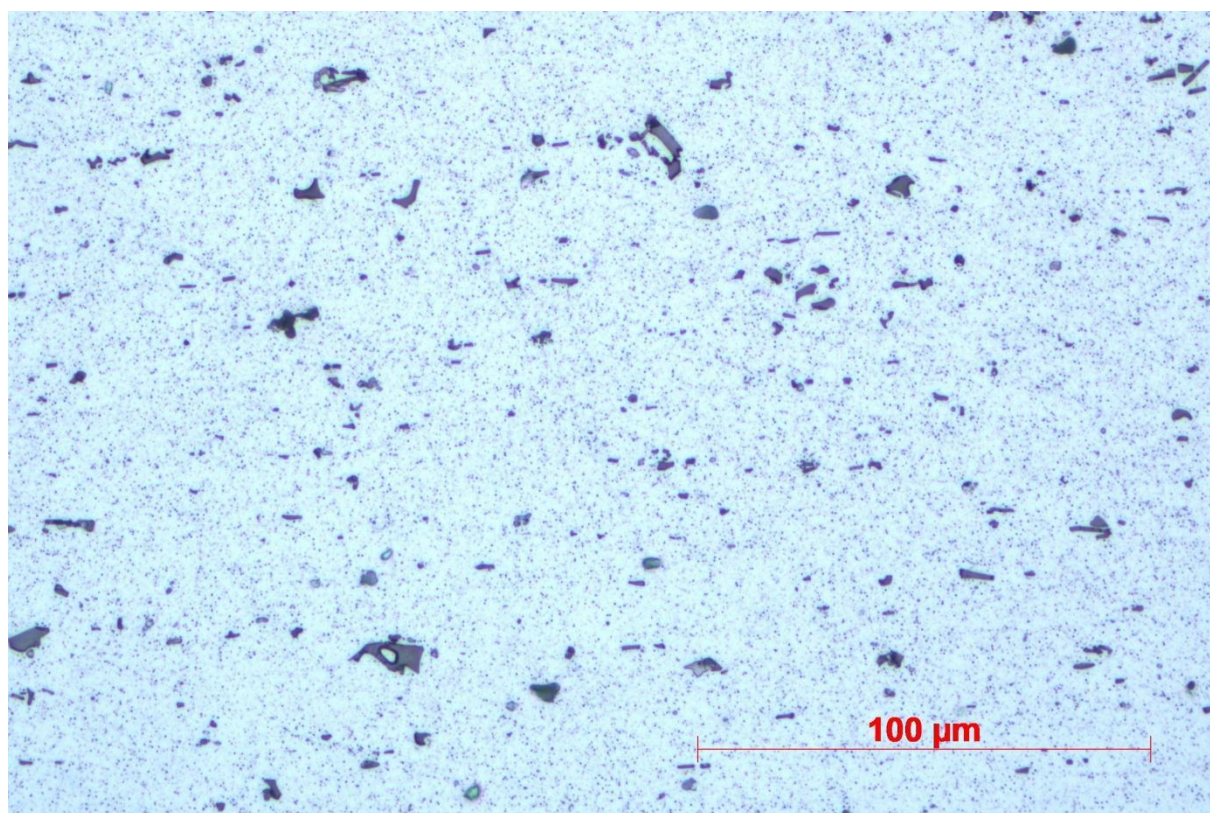
H₂O. Doba leptání byla postupně prodlužována, jelikož šly vzorky leptat velmi obtížně. Výsledná doba použití leptadla se pohybovala v rozmezí 4-6 minut, v závislosti na konkrétním vzorku. Takto připravené naleptané vzorky byly pozorovány na optickém mikroskopu značky Carl Zeiss. Byly pořízeny fotografie při 500 násobném zvětšení.



Obr. 9: Stav O, zvětšeno 500x



Obr. 10: Stav T6, zvětšeno 500x

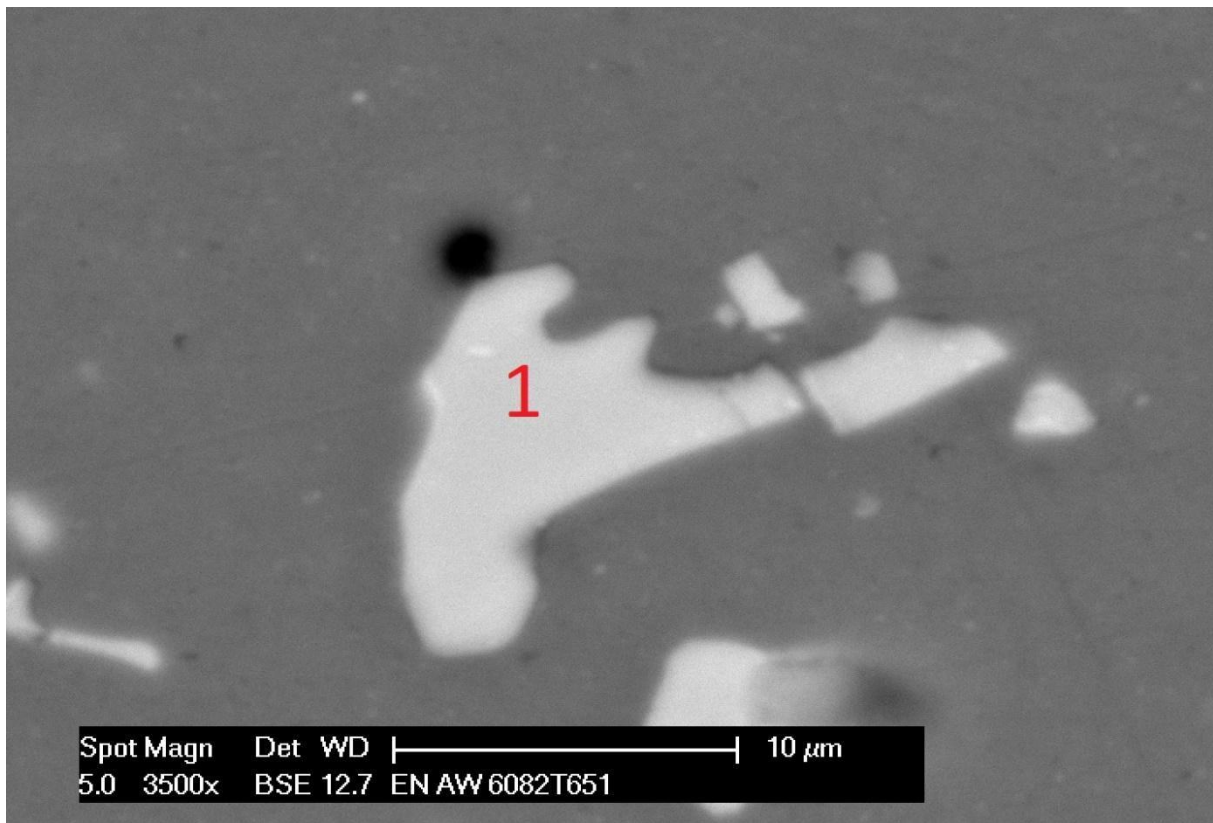


Obr. 11: Stav T651, zvětšeno 500x

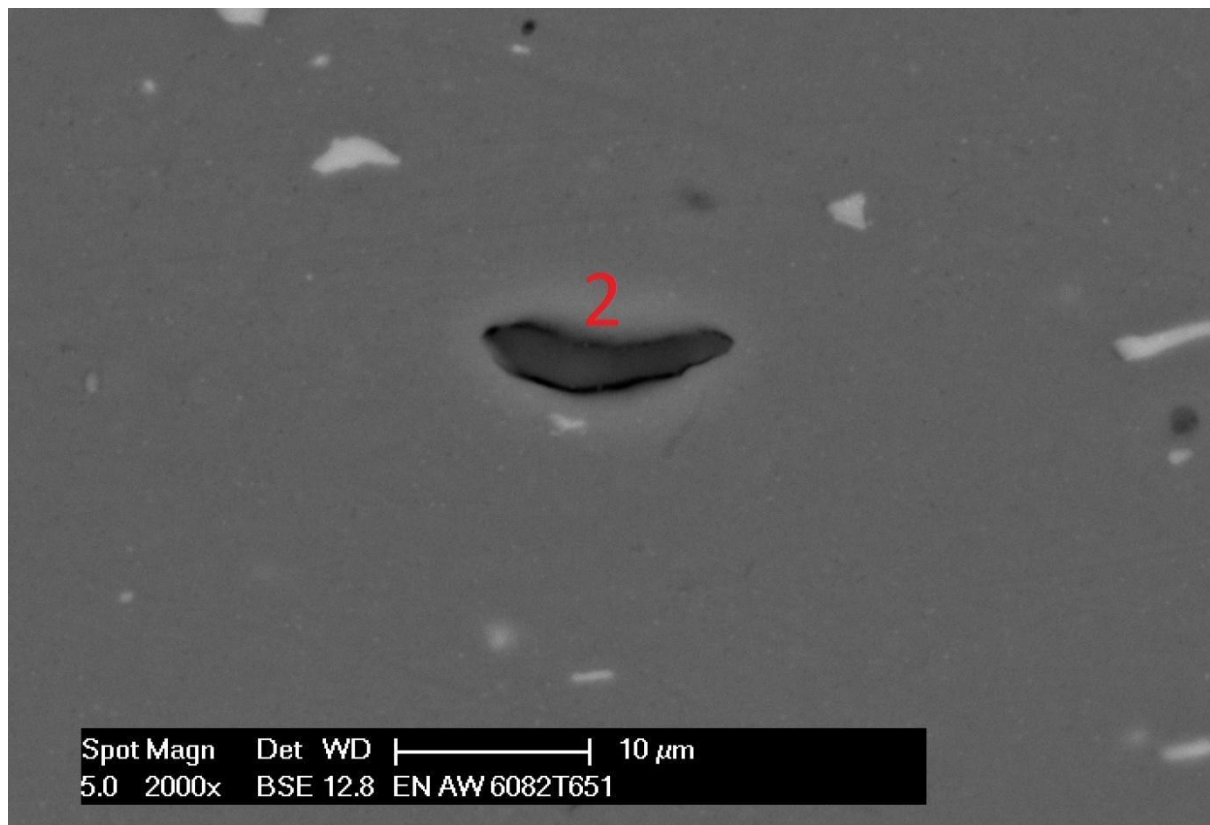
Matrici tvoří tuhý roztok α . Dále je zde možno pozorovat několik intermediálních fází. Pro tuto slitinu je nejpodstatnější β fáze Mg_2Si . Je dobře pozorovatelné, že ve vytvrzené struktuře je menší množství Mg_2Si . Je to způsobeno tím, že jsou precipitáty více rozptýleny v matrici, což vede k zvýšení pevnosti a tvrdosti při snížení tažnosti. Na snímcích se jedná o nejmenší homogenně dispergované částice. Dále jsou zde sekundární částice černé barvy, jedná se o Al-Mg-Si fáze. Světlejší (šedé) částice jsou Al(FeMnCr)Si fáze. [23, 25]

5.2.2 Pozorování na ŘEM

K přesnějšímu určení chemického složení konkrétních fází byl využit řádkovací elektronový mikroskop. Všechny fotografie byly pořízeny v režimu zpětně odražených elektronů. Na místech označených číslem byla provedena chemická analýza mikrostruktury. Pro test byl zvolen materiál ve stavu T651. Byl použit vzorek v naleptaném stavu. V mikrostruktuře byly k chemické analýze vybrány částice, které se zde homogenně vyskytovaly (obrázek 12, 13, 14) a jedna lokální heterogenita (obrázek 15).



Obr. 12: Detail částice č.1 na REM



Obr. 13: Detail částice č. 2 na REM



Obr. 14: Detail částice č.3 na REM



Obr. 15: Detail částice č.4 na REM

5.2.3 Určení chemického složení pozorovaných částic

Tab. 5: Chemické složení zkoumaných částic

oblast	množství [hm. %]					
	Al	Si	Mg	Mn	Cr	Fe
1	69,08	10,06	-	7,66	0,68	12,52
2	52,18	36,29	11,53	-	-	-
3	84,33	15,67	-	-	-	-
4	89,75	3,13	7,12	-	-	-

5.3 Statická zkouška tahem

Pro určení mechanických vlastností byla do experimentu zařazena zkouška tahem bez korozní expozice při pokojové teplotě dle ČSN EN ISO 6892-1. Při tahové zkoušce byla z univerzálního trhacího stroje odečtena hodnota meze pevnosti. Změřením délky zkušebního vzorku v zúžené (trhané) části po přetrhnutí byla spočtena tažnost podle vzorce. [33]

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Tab. 6: Naměřené hodnoty při statické zkoušce tahem bez korozní expozice

Bez expozice			
Stav materiálu	vzorek	Rm [MPa]	tažnost[%]
O	1	114	32,86
	2	113	35,71
	3	115	32,86
T6	1	325	7,14
	2	327	7,14
	3	319	5,71
T651	1	353	12,86
	2	352	14,29
	3	353	12,86

6 Korozní test solnou mlhou

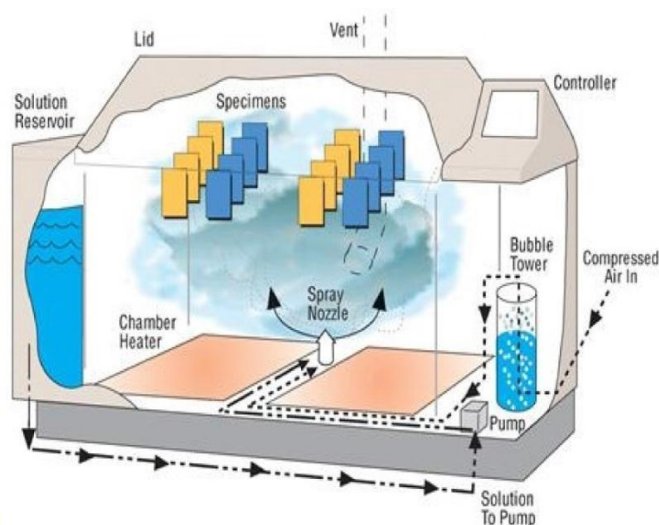
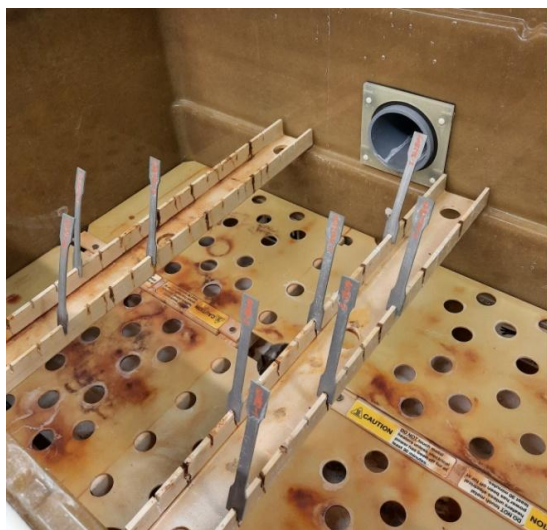
6.1 Průběh korozního testu

Pro stanovení korozní odolnosti byl zvolen test v solné mlze dle normy ČSN EN ISO 9227, konkrétně test v neutrální v solné mlze (NSS). Test probíhal v korozní komoře značky Q-LAB, model Q-FOG/CCT600. Zkouška neutrální solnou mlhou spočívá v rozprašování 5% roztoku chloridu sodného. Vzorky byly před vložením do korozní komory obroušeny brusným papírem o zrnitosti 800. Následně byly omyty lihem a vodou pro odstranění třísek a brusiva. Poté byly označeny lakovým popisovačem, pečlivě vysušeny a zváženy na váze značky RADWAG s přesností $1 \cdot 10^{-4}$ [g]. Uspořádání vzorků v komoře se řídilo normou. Vzorky byly rozmístěny tak, aby se vzájemně neovlivňovaly, resp. aby zkušební tekutina nescapávala z jednoho vzorku na druhý. Při kontrolách zkoušky po 168 hodinách se komora vždy otevřela jen na krátkou dobu. Po zhodnocení vzorků byly vždy vráceny na stejné místo v přípravku.

Tabulka níže uvádí parametry pro korozní test; opět v souladu s normou ČSN EN ISO 9227. [29]

Tab. 7: Parametry nastavení korozní komory při testu solnou mlhou

Koncentrace solného roztoku	5±1%
Hodnota pH solného roztoku	6,5 – 7,2
Teplota ve zkušební komoře	35±2°C
Spad roztoku (sběrač 80cm ²)	1,5 ml/h
Doba testu	504h (průběžné kontroly po 168 hodinách)



Obr. 16: Vlastní uložení vzorků a schéma komory od výrobce

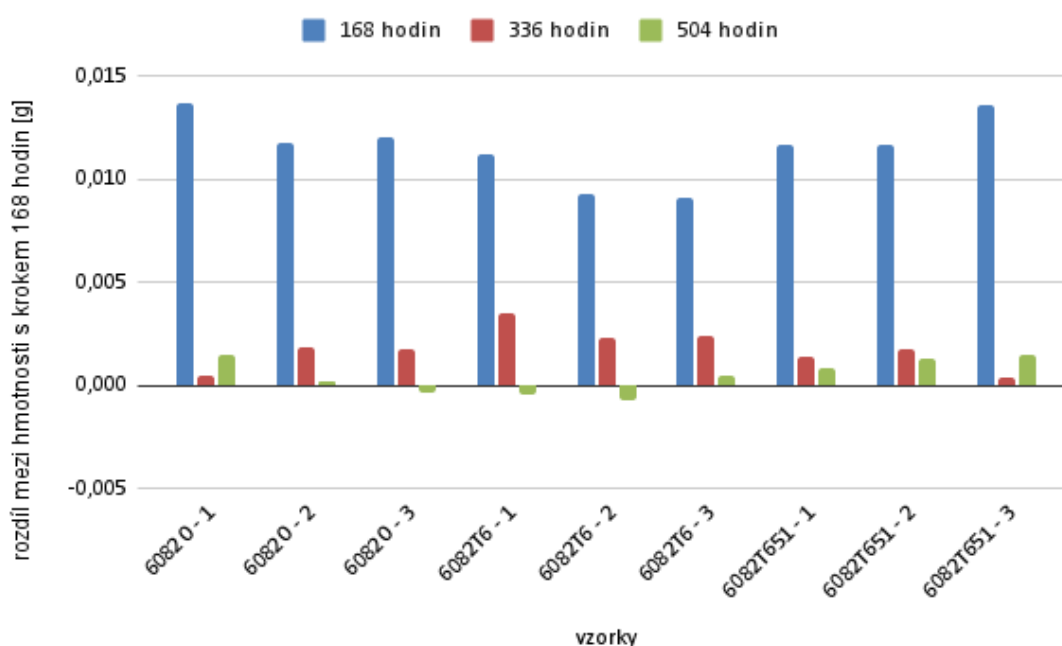
6.2 Hodnocení korozního napadení

6.2.1 Váhové rozdíly

Vzorky byly vždy po 168 hodinách vyjmuty z korozní komory, pečlivě očištěny slabým mýdlovým roztokem a opláchnuty vodou. Následně byly vzorky vysušeny papírovou utěrkou a zváženy.

Tab. 8: Hmotnostní změny vzorků

Stav materiálu	vzorek	hmotnost v závislosti na době expozice			
		0 hodin	168 hodin	336 hodin	504 hodin
O	1	13,1281	13,1418	13,1423	13,1438
	2	13,0654	13,0772	13,0791	13,0793
	3	13,137	13,1491	13,1509	13,1506
T6	1	13,4541	13,4653	13,4688	13,4684
	2	13,1488	13,1581	13,1604	13,1597
	3	13,4314	13,4405	13,4429	13,4434
T651	1	13,5382	13,5499	13,5513	13,5522
	2	13,5099	13,5216	13,5234	13,5247
	3	13,4777	13,4913	13,4917	13,4932



Obr. 17: Graf vývoje změny hmotnosti v závislosti na době korozního testu solnou mlhou

6.2.2 Vizualní hodnocení

Vizuální vyhodnocení korozního napadení bylo provedeno s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 10289 „Metody korozních zkoušek kovových a jiných anorganických povlaků na kovových podkladech – Hodnocení vzorků a výrobků podrobených korozním zkouškám.“ Vizuální hodnocení bylo provedeno prostým okem, neboť pouze o takových vadách norma pojednává. Hodnocení probíhalo přiřazením vzorků k odpovídajícím obrázkovým standardům

a barevným fotografiím v normě, čímž bylo stanoveno procento korozního napadení povrchu. [34]

Tab. 9: Vizuální hodnocení korozního napadení

Stav materiálu	vzorek	% napadení dle normy ČSN EN ISO 10289		
		168 hodin	336 hodin	504 hodin
O	1	7,5	7,5	7,5
	2	5	5	5
	3	7,5	7,5	7,5
T6	1	7,5	7,5	7,5
	2	10	10	10
	3	7,5	7,5	7,5
T651	1	25	25	25
	2	20	20	20
	3	25	25	25



Obr. 18: Korozní napadení vzorků po 504 hodinách expozice, 1 kus od každého stavu TZ

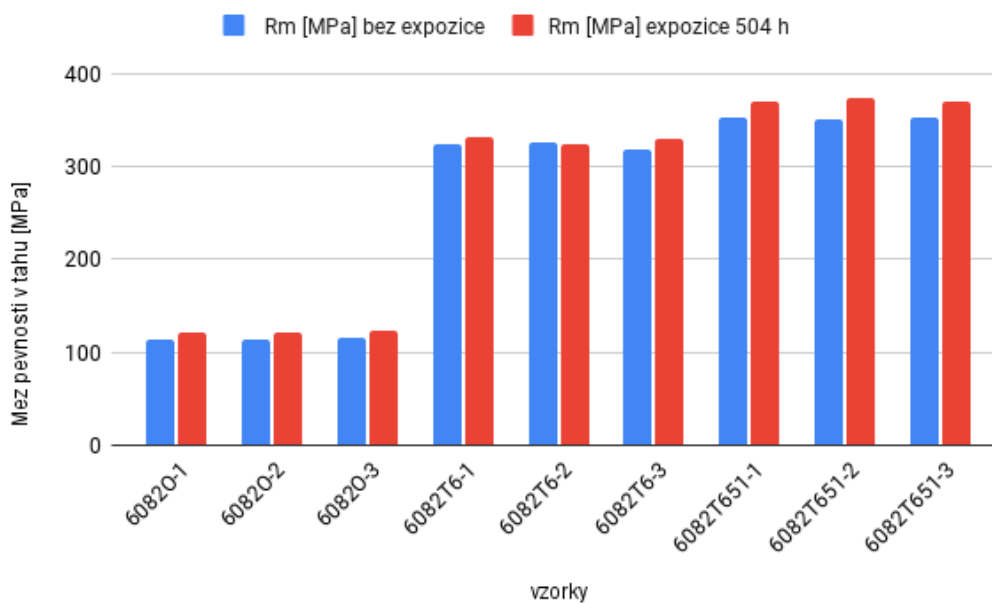
6.2.3 Tahové zkoušky po expozici v korozní komoře

Po 504 hodinách testu v korozní komoře se provedla statická zkouška tahem na všech vzorcích

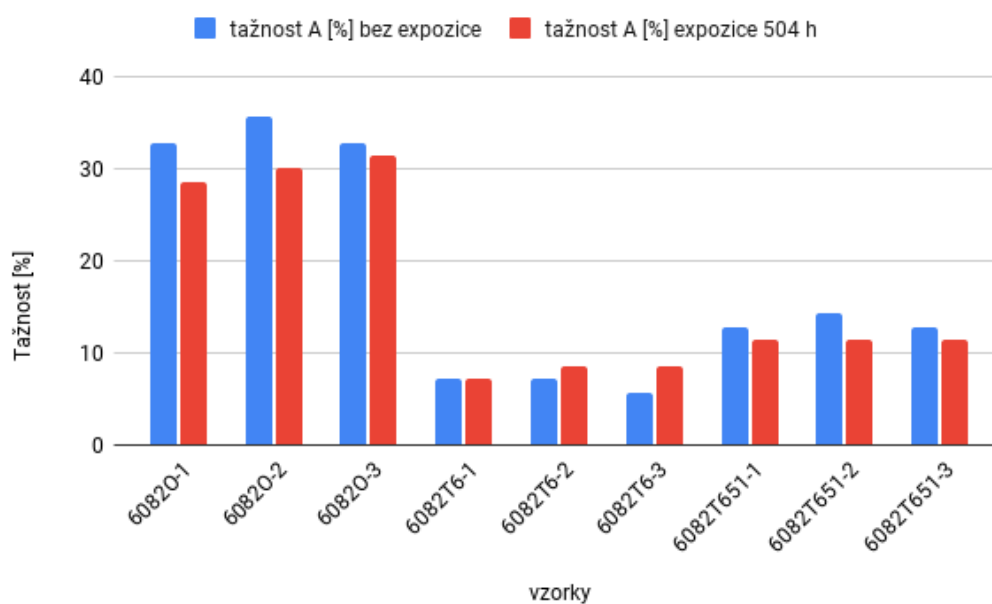
Tab. 10: Výsledky tahových zkoušek po expozici

Expozice 504 h v korozní komoře			
Stav materiálu	vzorek	Rm [MPa]	tažnost[%]
O	1	121	28,57
	2	121	30,00
	3	123	31,43
T6	1	332	7,14
	2	324	8,57
	3	330	8,57
T651	1	371	11,43
	2	374	11,43
	3	370	11,43

6.2.4 Porovnání tahových zkoušek před a po expozici



Obr. 19: Porovnání meze pevnosti před a po expozici



Obr. 20: Porovnání tažnosti před a po expozici

6.2.5 Měření mikrotvrdosti po expozici

Vzhledem k zvýšení pevnosti u všech vzorků po expozici se provedlo srovnávací měření mikrotvrdosti. Měření proběhlo stejně jako ve stavu bez expozice, tedy v příčném směru.

Tab. 11: Naměřené a vypočítané hodnoty HV 0,1 po expozici

stav materiálu	úhlopříčka 1 [μm]	úhlopříčka 2 [μm]	\bar{x} úhlopříček [μm]	tvrdost HV 0,1
O	64,68	66,82	65,75	43
O	64,51	67,53	66,02	43
O	64,12	64,51	64,32	45
O	66,46	66,98	66,72	42
O	65,37	66,72	66,05	43
			průměr HV 0,1	43

stav materiálu	úhlopříčka 1 [μm]	úhlopříčka 2 [μm]	\bar{x} úhlopříček [μm]	tvrdost HV 0,1
T6	39,81	39,27	39,54	119
T6	40,16	39,33	39,75	117
T6	40,49	39,27	39,88	117
T6	38,56	40,34	39,45	119
T6	39,81	39,27	39,54	119
			průměr HV 0,1	118

stav materiálu	úhlopříčka 1 [μm]	úhlopříčka 2 [μm]	\bar{x} úhlopříček [μm]	tvrdost HV 0,1
T651	38,74	39,27	39,01	122
T651	38,92	38,56	38,74	124
T651	39,27	37,85	38,56	125
T651	39,09	37,72	38,41	126
T651	38,43	38,74	38,59	125
			průměr HV 0,1	124

7 Potenciostatické měření

7.1 Průběh experimentu

Pro účely experimentu bylo provedeno měření rychlosti korozního napadení v silně zásaditém a silně kyselém prostředí. Byly vybrány 2 různé čisticí prostředky na bázi zásad a kyselin. Tento experiment demonstruje nevhodné použití přípravků na hliníkové slitiny a jejich korozivní účinky na materiál.

Tab. 12: Chemické složení přípravků použitých k potenciostatickému měření

Název	Účinné látky	Obsah % hm.
Cleamen 144	NaOH; NaClO	8; 2
Fixinela	H ₃ PO ₄	25

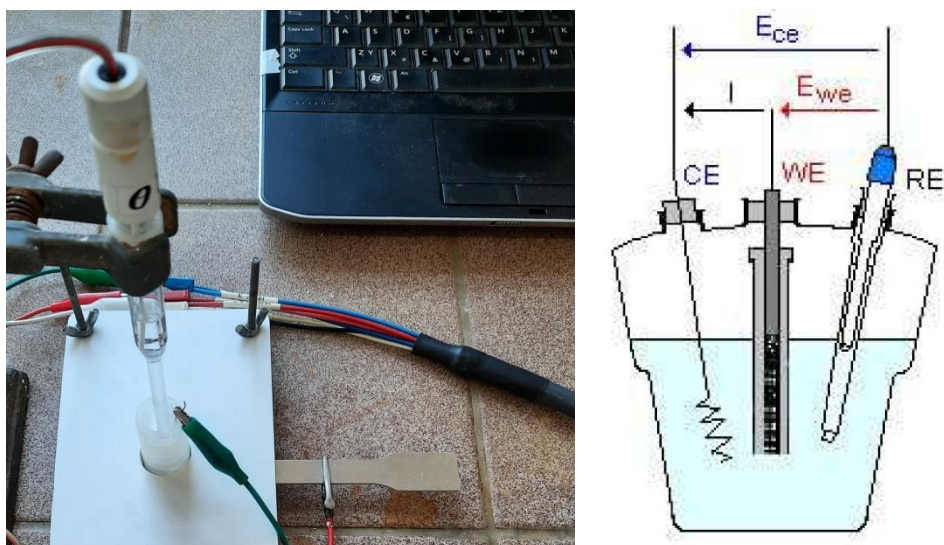
Měřicím přístrojem byl potenciostat SP – 150. Měření i vyhodnocení probíhalo v programu EClab. Bylo použito standardní tří elektrodové zapojení. Vzorek byl zapojen jako

pracovní elektroda WE. Jako referenční elektroda RE byla použita kalomelová elektroda. Jako protielektróda CE byl použit platinový drátek. Protielektródoou je do elektrolytu (v tomto případě kyselý nebo zásaditý čisticí prostředek) pouštěn proud způsobující změnu napětí mezi měřeným materiálem a referenční kalomelovou elektrodou.

Kalomelová elektroda je referenční elektroda realizovaná jako kov pokrytý tenkou vrstvou své málo rozpustné soli ponořený do roztoku aniontů této soli. Kov i roztok jsou uzavřeny ve skleněné trubici. [30]

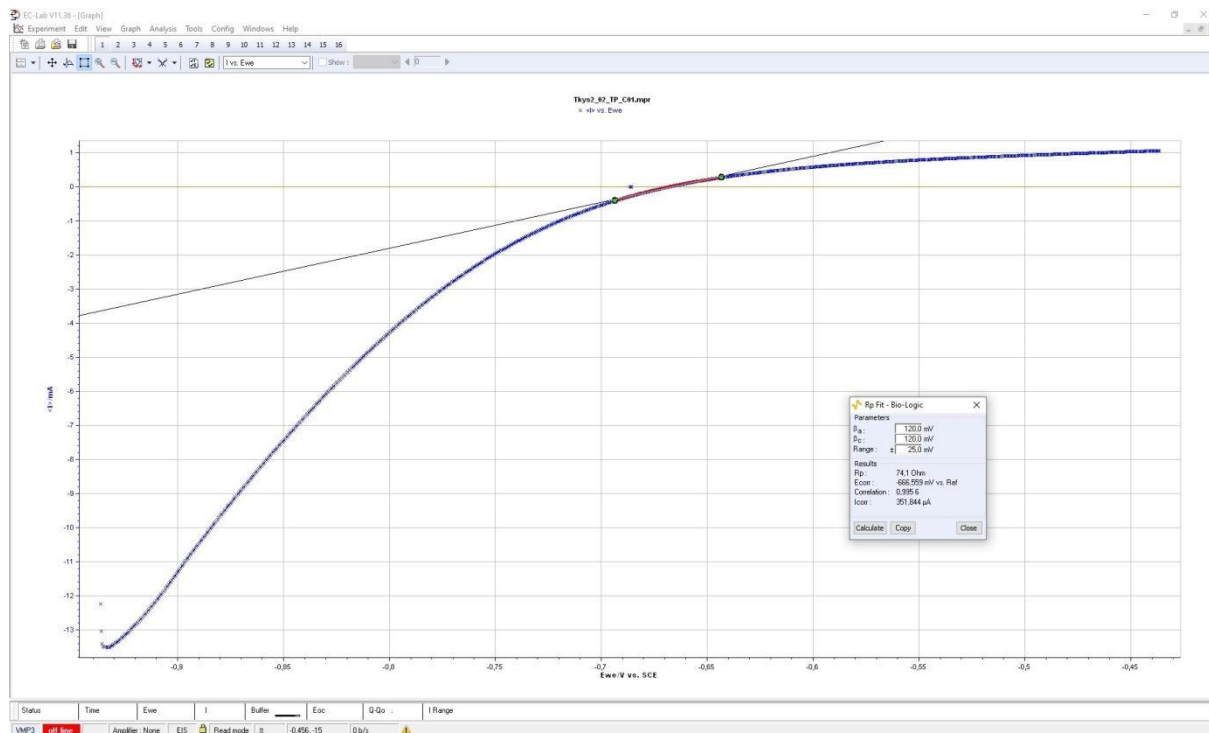
Nejprve se pro měření odečetla tabulková hodnota ekvivalentní hmotnosti hliníkové slitiny. Byla použita hodnota pro čistý hliník, tedy 9 g a hustota $2,7 \text{ g/cm}^3$. Dále se změřil průměr korozní cely v přípravku a vzorcem pro výpočet plochy kruhu byla určena plocha měření $1,770 \text{ cm}^2$.

Každý vzorek byl před měřením obroušen brusným papírem o zrnitosti 800. Broušení proběhlo vždy bezprostředně před měřením, aby se zabránilo tvorbě oxidační vrstvy na povrchu. Poté byl vzorek omyt pod tekoucí vodou k odstranění třísek a uvolněného brusiva a pečlivě vysušeno papírovou utěrkou. Následně se vzorek umístil do korozní cely, a do nálevky se nalil elektrolyt (kyselý, nebo zásaditý čisticí prostředek). Pak se do nálevky umístila kalomelová elektroda, platinový drátek a vzorek se zapojil do měřícího obvodu. Při dalším měření se vždy nálevky vymyla vodou a vysušila, přičemž měření na vzorku probíhalo vždy na jiném místě, než měření předchozí.



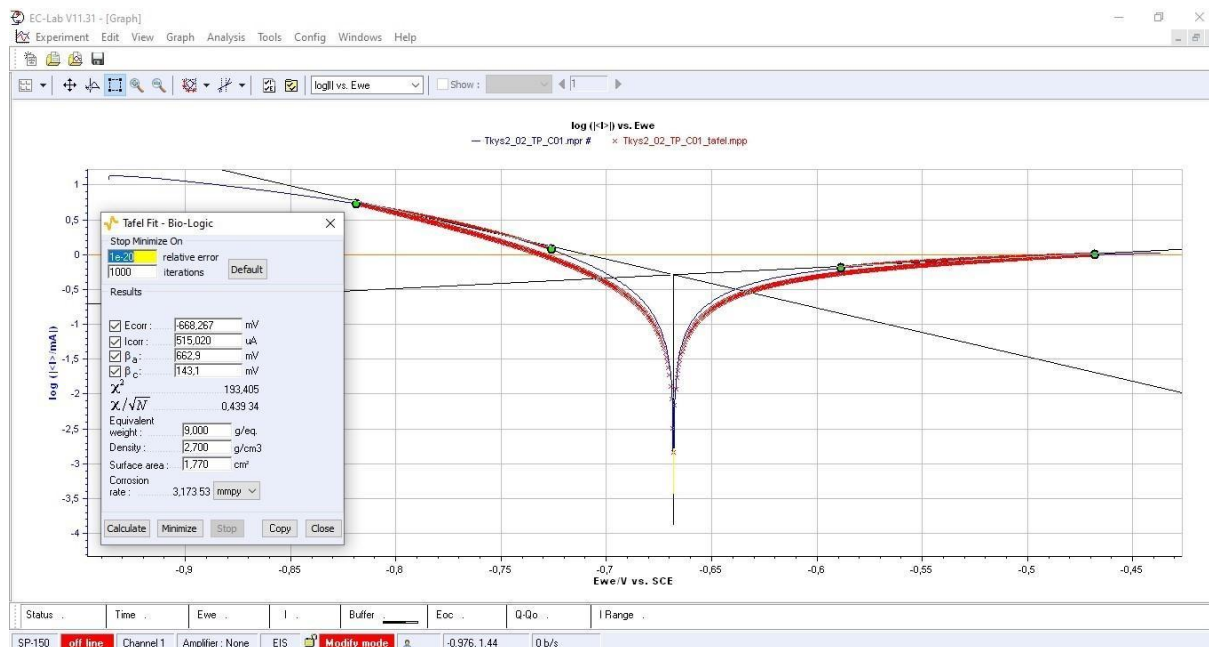
Obr. 21: Fotografie vlastního zapojení; schéma tříelektrodeového zapojení [6]

Při samotném měření se nejprve ustálil elektrochemický potenciál vůči referenční elektrodě. Doba ustálení byla zvolena 30 minut. Poté byla změřena závislost elektrochemického potenciálu na procházejícím proudu. Na obrázku 13 níže je zaznamenána tato křivka. Z ní byl vypočítán polarizační odpor. Určení polarizačního je založeno na předpokladu, že střední část polarizační křivky je v nejbližším okolí korozního potenciálu lineární a protíná pod určitým úhlem osu nulové proudové hustoty.



Obr. 22: Graf závislosti elektrochemického potenciálu vůči el. proudu pro vzorek 6082T6-2 v kyselém prostředí s vyznačenou extrapolací lineární části křivky pro výpočet polarizačního odporu

Na následujícím obrázku je zaznamenán graf závislosti elektrochemického potenciálu a proudu v logaritmických hodnotách. Z tohoto grafu je možné použitím táfelovských směrnic určit korozní rychlost. [26, 31]



Obr. 23: Graf závislosti logaritmu proudu na elektrochemickém potenciálu pro vzorek 6082T6-2 v kyselém prostředí s vyznačením táfelovských směrnic pro výpočet korozní rychlosti

7.1.1 Naměřené korozní rychlosti a polarizační odpory

Tab. 13: Naměřené korozní rychlosti a polarizační odpory v zásaditém prostředí

zásada (Cleamen 144)			
Stav materiálu	číslo měření	korozní rychlost [mm/rok]	polarizační odpor [Ω]
O	1	24,68	15,1
	2	25,36	16,3
	3	25,25	14,7
T6	1	54,02	6,9
	2	57,13	7,8
	3	54,48	6,6
T651	1	56,81	6,4
	2	59,41	7,3
	3	62,49	7,4

Tab. 14: Naměřené korozní rychlosti a polarizační odpory v kyselém prostředí

kyselina (Fixinela)			
Stav materiálu	číslo měření	korozní rychlost [mm/rok]	polarizační odpor [Ω]
O	1	11,06	27,4
	2	neplatné měření	neplatné měření
	3	6,02	50
	4	neplatné měření	neplatné měření
	5	8,38	32,8
	6	neplatné měření	neplatné měření
	7	11,34	27,1
	8	8,01	36,7
	9	6,35	44,7
	10	6,32	48,6
T6	1	3,12	80,4
	2	3,17	74,1
	3	3,36	82,1
T651	1	5,67	59,4
	2	6,45	45,3
	3	6,52	53,9

8 Diskuze výsledků

8.1 EDX mikroanalýza a měření tvrdosti

Průměrná hodnota tvrdosti HV 0,1 pro základní žíhaný stav O byla 42; pro stav T6 113; pro stav T651 119. Měření mikrotvrdosti bylo v souladu s teoretickými poznatky. Žíhaný stav vykazoval nejnižší tvrdost, naopak nejtvrdší stav TZ byl T651.

Při provedení EDX mikroanalýzy se složení fází shodovalo s odbornou literaturou a pozorováním na světelném mikroskopu. Při mikroanalýze se nepodařilo ve struktuře nalézt fázi, která by odpovídala svým chemickým složením Mg_2Si . Možný vysvětlením je to, že při naleptání leptadlem Keller se fáze přednostně rozpustila efektem obětované anody. Precipitát Mg_2Si má totiž oproti tuhému roztoku α zápornější elektrochemický potenciál, má tedy anodický charakter. [1]

8.2 Korozní test solnou mlhou

Při hodnocení hmotnostních změn došlo ke zdatelnému zvýšení hmotnosti po prvních 168 hodinách experimentu u všech vzorků (v rozmezí od 0,0091 g do 0,0137 g). Je to způsobeno pasivací povrchu vzorků. Při vážení po 336 a 504 hodinách byly rozdíly v hmotnosti řádově menší (v rádech tisícín až desetitisícín gramu, což už je na samotné úrovni přesnosti váhy).

Při vizuálním hodnocení s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 10289 bylo zřejmé, že k nejmýraznějšímu koroznímu napadení došlo v prvních 168 hodinách testu. Při další expozici v solné mlze se vzhled vzorků prakticky neměnil, což je v souladu váhovými změnami. Bylo pozorováno lokální korozní napadení (na snímkách vzorků světlá místa). Dále byly zdatelné tmavé tečky indikující bodovou korozi, které byly opět nejčastější u stavu T651. Při případném dalším rozšiřování experimentu by bylo vhodné prozkoumat bodové korozní napadení například na konfokálním laserovém mikroskopu, kde by mohla být změřena hloubka porušení materiálu.

Naměřené hodnoty meze pevnosti ukázaly zvýšení hodnot prakticky u všech vzorků po expozici. Je to pravděpodobně způsobeno stárnutím slitiny, jelikož v korozní komoře byly vzorky po dobu 3 týdnů při teplotě 35 °C. Podobně vyšly hodnoty tažnosti. Pro stav po expozici vyšla tažnost až na 2 výjimky u stavu T6 nižší, než pro stav bez expozice. Pro přesné potvrzení hypotézy se umístily další vzorky bez korozního napadení na dobu 504 hodin do prostředí, v němž je konstantní teplota 35 °C ovšem bez korozního prostředí. Následně se provedou tahové zkoušky a poznatky budou rozšířeny.

Pro potvrzení teorie o stárnutí slitiny v korozní komoře bylo provedeno opětovné měření mikrotvrlosti v příčném směru. Byly použity vzorky po tahové zkoušce. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 11. Průměrná hodnota tvrdosti se pro žíhaný stav zvýšila o 1, pro stav T6 o 5 a pro stav T651 o 4 HV 0,1, což podporuje předpoklad o stárnutí slitiny při 35 °C v korozní komoře.

8.3 Potenciostatické měření

Při měření korozní rychlosti a polarizačního odporu v zásaditém prostředí byl dobře pozorovatelný rozdíl mezi vzorky. Nejvyšší rychlost vykazovala slitina s nejvyšší pevností-T651. Byl zde mírný pokles korozní rychlosti pro stav T6. Pro základní žíhaný stav O byla korozní rychlost méně než poloviční ve srovnání s precipitačně vytvrzenými stavy. Rozptyl naměřených hodnot byl minimální a všechna měření se považují za platná.

Měření v kyselém prostředí přineslo nejasné výsledky. Při měření materiálů T6 a T651 se ukázal stejný trend jako v případě zásaditého prostředí, tedy že T651 korodovala rychleji než T6, tedy polarizační odpor byl pro T6 větší. Při měření stavu O však z nezjištěných důvodů měření č. 2, 4 a 6 program vyhodnotil jako neplatná. Dále pak mezi prvními třemi platnými měřeními byl výrazný rozptyl. Proto byla provedena další měření. Rozptyl mezi měřeními se nepodařilo snížit. Pro měření 9 a 10 nebyl měněn elektrolyt, ani umístění vzorku; pouze se po naměření č. 8 znovu spustil proces měření. Tento postup značně snížil rozptyl (č. 9 = 6,35 [mm/rok], 44,7 [Ω]; č. 10 = 6,32 [mm/rok], 48,6 [Ω]). Toto zjištění je významné pro případný další výzkum. Pokud se bude vycházet z dosud provedených platných měření, tak se stav O v kyselém prostředí jeví jako nejméně korozně odolný.

9 Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o odolnosti hliníkových slitin proti koroznímu napadení. Rešeršní část se nejprve věnovala vlastnostem hliníku a jeho slitin. Dále rozdělení hliníkových slitin se zaměřením na jejich korozních vlastnosti. Práce se též věnovala tepelnému zpracování. V další kapitole byla probrána koroze hliníku a jeho slitin podle chemického složení, druhů korozního napadení, vlivu prostředí a způsobů ochrany proti korozi.

Cílem experimentální části bylo posouzení vlivu tepelného zpracování na korozní vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 6082. Byly zvoleny 3 stavy tepelného zpracování; O, T6 a T651.

Nejprve byla změřena mikrotvrdość HV 0,1. Výsledky odpovídaly předpokládaným hodnotám; byl zde zřetelný rozdíl mezi všemi třemi stavy.

Pro určení rozdílů mezi mikrostrukturami materiálů bylo provedeno pozorování na světelném a poté i na řádkovacím elektronovém mikroskopu. Pozorovatelný rozdíl byl mezi žíhaným stavem a precipitačně vytvrzenými ve velikosti a disperzi intermetalických fází.

Byl proveden korozní test v solné mlze dle normy ČSN EN ISO 9227 s trváním 504 hodin, přičemž vzorky byly kontrolovány v intervalech po 168 hodinách. Vyhodnoceny byly váhové a vizuální změny s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 10289. Nejvíce napadené byly vzorky stavu T651 s průměrně 25% napadením povrchu; dále stav T6 s 8,3% napadením a stav O s 6,7% napadením povrchu po 504 hodinách experimentu. Procento napadení se po prvních 168 hodinách téměř nezměnilo.

Tahové zkoušky neukázaly snížení meze pevnosti u vzorků podrobených koroznímu testu v solné mlze ve srovnání se vzorky v základním stavu.

Potenciostatické měření při působení zásaditého prostředí ukázala jako korozně nejodolnější stav O s průměrnou rychlostí koroze 25,1 mm/rok, přičemž stavy T6 a T651 vykazovaly více než dvojnásobnou rychlost koroze (55,2 mm/rok a 59,6 mm/rok). Měření v kyselém prostředí ukázalo opět stav T6 více korozně odolný, než T651. Pro žíhaný stav bylo měření nejednoznačné, viz diskuze výsledků.

Při sumarizaci všech výsledků lze dojít k závěru, že žíhaný stav O je korozně nejvíce odolný. Nejméně odolný je naopak stav po tváření za studena a precipitačním vytvrzením T651. Experiment ukazuje, že čím větší jsou precipitáty Mg_2Si , tím lepší je korozní odolnost, na úkor zhoršení mechanických vlastností.

10 Použité zdroje

- [1] Michna Š., Lukáč I., Otčenášek V. a kol., *Encyklopedie hliníku*, Prešov, 2005, ISBN 80-89041-88-4
- [2] JONES, D.A. Principles and prevention of corrosion, Prentice Hall, New York 1996.
- [3] Heat Treating as Volume 4 of the ASM Handbook, ASM International.
- [4] NOVÁK. *Druhy koroze kovů. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha*, 2005
- [5] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [6] *Koroze a technologie povrchových úprav: Úvod do koroze* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT_KPU_PR_01_CZE_Nosek_Uvod_do_koroze.pdf
- [7] HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd.* Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
- [8] MICHNA, Štefan a Ivan LUKÁČ. *Barevný kontrast, struktury a vady u hliníku a jeho slitin*. Děčín: Delta Print, 2003. ISBN 80-239-1636-X
- [9] KRAUS, Václav. *Technologie tepelného zpracování*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1992
- [10] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-668-1.
- [11] Tepelné zpracování hliníkových slitin, In: ukmki.vscht.cz [online]. [cit. 2021-12-01] Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20hlin%C3%ADkov%C3%BDch%20slitin.pdf?redirected>
- [12] ČERNÝ, Miroslav. *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. Praha: SNTL, 1984.
- [13] Aluminium Corrosion, In: fractory.com. [online]. [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://fractory.com/aluminium-corrosion/>
- [14] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [15] Slitiny hliníku, In: proal.cz [online]. [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/>
- [16] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN isbn 978-80-261-0260-1.
- [17] Koroze hliníku, In: alumeco.cz [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/technick%C3%A9-informace/obecn%C4%9B/koroze-hlin%C3%ADku>
- [18] Hliníkové slitiny, In: alunet.cz [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/>

- [19] Aluminium alloy, In: *aalco.co.uk* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.aalco.co.uk/>
- [20] SKÝBA, Pavel a Bohumil PACAL. *Hodnocení koroze u vybraných typů hliníkových slitin pro letecký průmysl*. 2010.
- [21] *Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys*. Poland: Department of Materials Science, Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, Rzeszów University of Technology, 2005.
- [22] ČSN EN 515. *Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [23] *Study of microstructure and tensile properties of infrared-heat-treated cast-forged 6082 aluminum alloy*. National Cheng Kung University, Department of Materials Science and Engineering, Tainan, Taiwan, 2017.
- [24] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020
- [25] *Tensile Behaviour of 6082 Aluminium Alloy Sheet under Different Conditions of Heat Treatment, Temperature and Strain Rate*. Key Engineering Materials [online]., 2009 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.scientific.net/KEM.423.105>
- [26] NOVÁKOVÁ, Michaela. *Vliv deformace na korozní vlastnosti materiálu*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. ZČU, fakulta strojní.
- [27] *EN AW-6082 Data Sheet* [online]. In: . 2020 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO_Legierungen_EN-AW-6082_EN.pdf
- [28] Q-FOG SSP & CCT CYCLIC CORROSION TESTERS. *Q-lab* [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.q-lab.com/products/q-fog-cyclic-corrosion-chamber/q-fog-ssp-cct>
- [29] ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [30] *Referentní elektrody* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, Katedra analytické chemie, [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: https://ach.upol.cz/ucebnice2/ref_eldy.htm
- [31] Stanovení korozní rychlosti elektrochemickými metodami. *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Stanoven%C3%AD%20korozn%C3%AD%20rychlosti%20elektrochemick%C3%BDmi%20metodami.pdf?redirected>
- [32] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. 2018.
- [33] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2021.
- [34] ČSN EN ISO 10289. *Metody korozních zkoušek kovových a jiných anorganických povlaků na kovových podkladech - Hodnocení vzorků a výrobků podrobených korozním zkouškám*. 2001

[35] Tepelné zpracování hliníku, In: *alunet.cz*. [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>

[36] Intergranular Corrosion, In: *nace.org*. [online]. [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://www.nace.org/resources/general-resources/corrosion-basics/group-2/intergranular-corrosion>

[37] *Galvanic corrosion study of aluminium alloy plates mounted to stainless and mild steel bolts by accelerated exposure test*. 2016. Dostupné z: doi:DOI:10.11532/STRUCTCIVIL.62A.525

[38] Vývoj hdp v ČR. *Kurzycz* [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/makroekonomika/hdp/>