



Vliv teploty vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny AlMgSi

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **THAN VAN TRUYEN**
Vedoucí práce: doc. Ing Solfronk Pavel, Ph.D.

Effect of Hardening Temperature on Mechanical Properties of AlMgSi Alloy

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **THAN VAN TRUYEN**
Supervisor: doc. Ing Solfronk Pavel, Ph.D.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: **2017/2018**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **THAN VAN TRUYEN**

Osobní číslo: **S17000310**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Vliv teploty vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny AlMgSi**

Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Zásady pro vypracování

1

2

3

4

5

6

Rozsah grafických prací

Rozsah pracovní zprávy

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom to případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu své bakalářské práce, doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D., za jeho ochotu a trpělivost, odbornou pomoc, připomínky, poskytnuté odborné materiály a cenné rady při zpracování této práce. Děkuji pracovníkům strojírenské technologie za pomoc při realizaci experimentů.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem teploty vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny AlMgSi (AW 6082). Obecně jsou slitiny hliníku hned po slitinách železa nejpoužívanějšími konstrukčními materiály dneška. Hliníkové slitiny jsou všeobecně velmi často využívány jako konstrukční materiál. Hlavním důvodem je především jejich měrná hmotnost, dostupnost, dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči korozi.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány vlastnosti hliníku a jeho slitin, je zde podán přehled slitin hliníku rozdělených na vytvrditelné a nevytvrditelné a je zde také popsána fyzikálně-metalurgická podstata vytvrzování. Nechybí zde ani nejdůležitější technické informace o zkoumané slitině hliníku AW 6082.

Cílem experimentální části bylo nalezení vhodných teplot pro hliníkové slitiny AlMgSi (AW-6082) a následné zjištění vlivu teploty vytvrzování na mechanické vlastnosti slitin AlMgSi (AW-6082).

Klíčová slova

Měření tvrdosti, slitina AW 6082, vytvrzování, stárnutí, mechanické vlastnosti.

Abstract

The bachelor thesis deals with the influence of hardening temperature on the mechanical properties of alloy AlMgSi (AW 6082). Generally, aluminum alloys are the most commonly used structural materials after iron alloys right now. Aluminum alloys are generally very often used as a construction material. The main reason is mainly their specific weight, availability, good mechanical properties and corrosion resistance.

The thesis is divided into the theoretical and practical part. The theoretical part describes the properties of aluminum and its alloys. Moreover, there is given an overview of aluminum alloys classification into heat treatable and non-heat treatable and physical nature of age hardening as well. There are also mentioned the most important technical information about the tested aluminum alloy AW 6082.

The aim of the experimental part was to find a suitable temperatures for aluminum alloys AlMgSi (AW-6082) and then to determine the effect of hardening temperature on the mechanical properties of AlMgSi alloys (AW-6082).

Key words

Hardness Measurement, AW 6082 Alloy, Hardening, Ageing, Mechanical Properties.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Slitiny hliníku ve strojírenském průmyslu	2
2.1	Charakteristika slitin hliníku	2
2.2	Výroba a použití hliníku	2
2.2.1	Suroviny pro výrobu hliníku	2
2.2.2	Způsoby výroby hliníku	4
2.3	Čistý hliník	5
2.3.1	Použití čistého hliníku	6
2.4	Zkouška tvrdosti dle Brinella.....	7
2.4.1	Podstata zkoušky.....	7
2.4.2	Provedení zkoušky	9
2.4.3	Brinellův tvrdoměr	10
3	Slitiny hliníku.....	11
3.1	Rozdělení slitin hliníku.....	11
3.1.1	Slitiny hliníku pro tváření	12
3.1.2	Slitiny hliníku pro odlitky	16
4	Tepelné zpracování slitin hliníku	19
5	Experimentální část.....	26
5.1	Cíle řešení bakalářské práce	27
5.2	Charakteristika testovaného materiálu a Použité vzorky.....	27
5.2.1	Statická zkouška tahem.....	29
5.3	Ohřev materiálu	31
5.4	Měření tvrdosti dle Brinella.....	31
5.5	Vliv tepelného zpracování na časový průběh tvrdosti.....	33
5.5.1	Vliv teploty umělého stárnutí.....	33
5.5.2	Vliv počáteční teploty před ochlazením.....	36
5.5.3	Vliv doby rozpouštěcího žihání	39
6	Závěr	43
7	Seznam použité literatury.....	45
	Seznam tabulek.....	47
	Seznam obrázků	45

Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
Al ₂ O ₃	1	Oxid hlinitý
EN AW 6082	1	Vytvrditelná slitina hliníku
AlMgSi	1	Označení slitiny hliníku
ČSN	1	Česká státní norma
EN	1	Evropská norma
ISO	1	International Organization for standardization
RŽ	1	Rozpouštěcí žíhání
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	Smluvní mez pevnosti v tahu
AlSi1MgMn	1	Označení slitiny hliníku
Mg ₂ Si	1	Intermetalická fáze
KMP	1	Křivka mezních přetvoření
KSP	1	Katedra strojírenské technologie
TUL	1	Technická Univerzita v Liberci
Al	1	Hliník
α	1	Tuhý roztok
Mg	1	Hořčík
Cu	1	Meď
Si	1	Křemík
Zn	1	Zinek
Ni	1	Nikl
Cr	1	Chrom
Fe	1	Železo
Mn	1	Mangan
Ti	1	Titan
n	1	Počet měření
HB	1	Tvrдость podle Brinella
A(h)	[mm ²]	Plocha vtisku
D	[mm]	Průměr kuličky
d	[mm]	Průměr vtisku
F	[N]	Zkušební síla



1 ÚVOD

V současné době můžeme sledovat neustále se zvyšující poptávku na kvalitu výrobků při současném Z hlediska historického vývoje je patrná snaha o snižování hmotnosti všech typů konstrukcí používaných ve strojírenství. Tento fakt měl v průběhu 20. století za následek prudký nárůst spotřeby hliníku a hliníkových slitin. Hliník a jeho slitiny nabízejí nízkou hmotnost při zachování dobrých mechanických vlastností a jsou stále používanějším materiálem ve strojírenství. [2]

V rámci řešení bakalářské práce je používána slitina hliníku s označením EN AW 6082. Jedná se o vytvrditelnou slitinu, která se nejčastěji používá pro výrobky s vysokými nároky na mechanické vlastnosti v kombinaci s nízkou hmotností a dobrou odolností proti korozi. Výborné mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi umožňují široké využití tohoto materiálu v leteckém, automobilovém a námořním průmyslu. Komponenty vyrobené z materiálu EN AW 6082 se rovněž nacházejí ve stavebnictví, elektrotechnice a potravinářském průmyslu. Ve většině případů se materiál používá ve vytvrzeném stavu, kdy jsou jeho mechanické vlastnosti srovnatelné s konvenčními konstrukčními oceli. [2] [5]

2 SLITINY HLINÍKU VE STROJÍRENSKÉM PRŮMYSLU

2.1 CHARAKTERISTIKA SLITIN HLINÍKU

Hliník je nejrozšířenější kov v zemské kůře a svým využitím a spotřebou je druhým nejvýznamnějším kovem hned po železe. [11]. Hliník má stříbrobílou barvu, výbornou tepelnou a elektrickou vodivost a dobrou tvárnost.

Nízká měrná hmotnost ($2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) spolu s dobrými pevnostními charakteristikami ($R_m = 90$ až 765 MPa) umožňují vytvářet strojírenské sestavy srovnatelné s ocelovými konstrukcemi.[1]

Hliník je konstrukční materiál s dobrou tvárností, leštitelností, odolností proti korozi, kdy se neprojevuje sklon ke koroznímu praskání pod napětím. Většina slití hliníku je vhodná ke svařování. Slitiny hliníku vhodné pro tváření mají dobré plastické vlastnosti v žíhaném stavu a vyhovující plastické vlastnosti ve vytvrzeném stavu. Tvářitelnost při teplotách 450 - $500 \text{ }^\circ\text{C}$ je velmi dobrá a umožňuje vytvářet složité tvary technologiemi kování a protlačování. Obrobitelnost řeznými nástroji je nevyhovující v žíhaném stavu a vyhovující ve vytvrzeném stavu.[1]

K dalším přednostem hliníku patří přijatelná cena hutních výrobků i nákladů na jejich zpracování v konečný výrobek. K nevýhodám naopak patří poměrně nízká tvrdost většiny slitin hliníku a tedy sklon k snadnému poškození povrchu.[1]

Slitiny hliníku snadno podléhají elektrochemické korozi, jsou-li v konstrukci ve vodivém styku s ostatními kovy a slitinami.[1]

2.2 VÝROBA A POUŽITÍ HLINÍKU

2.2.1 Suroviny pro výrobu hliníku

Ačkoli hliník má největší procento zastoupení v zemské kůře, jeho výroba v průmyslovém měřítku začala teprve od roku 1859. V současnosti je známo přes 250 minerálů obsahujících hliník, z nichž se mezi nejvýznamnější řadí např. korund, diaspor, boehmit, spinel, gibbsit, kyanit, andaluzit, silimanit, kaolinit, alunit a nefelín.[2] Stručný přehled minerálů obsahujících hliník je uveden v tabulce Tab.1. Vlastnosti hlinitých minerálů jsou uvedeny v tabulce Tab.2.

Tab. 1 Přehled běžných minerálů hliníku [2]

Minerál	Chemický vzorec	Hmot. % Al ₂ O ₃
korund	Al ₂ O ₃	100
diaspor, boehmit	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	85
gibbsit (hydrargilit)	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	65.4
spinel	Al ₂ O ₃ ·MgO	71
kyanit, andaluzit, silamanit	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	63
kaolinit	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O	39.5
alunit	K ₂ SO ₄ ·Al ₂ (SiO ₄) ₃ ·4Al(OH) ₃	37
nefelín	(NaK) ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	32.3-35.9
leucit	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂	23.5
sericit	K ₂ O·3Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂ ·2H ₂ O	38.4

Hlavní surovinou pro průmyslovou výrobu hliníku je bauxit, jehož hlavní složkou je oxid hlinitý. Principiálně bauxit obsahuje základní minerály hliníku, minoritní složky a minerální nečistoty. Základní minerály tvořící bauxit jsou gibbsit, boehmit a diaspor. [2]

Tab. 2 Některé vlastnosti hlinitých minerálů bauxitu a korundu [2]

	Chemické složení	Krystalografický systém	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Obsah hliníku [%]	Mohsova tvrdost
Gibbsit	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	Monoklinický	2.41	34.6	2.5 – 3.5
Boehmit	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	Ortorombický	3.01	45	4 – 5
Diaspor	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	Ortorombický	3.44	45	6.5 – 7
Bayerit	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	Monoklinický	2.53	34.6	
Nordstrandit	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	Triklinický	2.436	34.6	3
Tohdit	5Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	Hexagonální	3.72	10.22	
Korund	Al ₂ O ₃	Hexagonální	3.98	53	9

Nejvíce se bauxit těží v zemích uvedených v tabulce Tab.3. Mezi nejvýznamnějších 5 zemí zabývajících se těžbou a zpracováním hliníku patří Austrálie, Guinea, Jamajka, Brazílie a Čína. Další země, ve kterých se bauxit těží ve významném množství, jsou Venezuela a Indie.[2]

Tab.3 Nejvýznamnější naleziště bauxitů ve světě a jejich složení [2]

Země	Složka			Nositel hliníku
	Al ₂ O	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	
Jamajka	47-52	0,3-0,9	19-22	gibbsit, boehmit
Guinea	40-55	1-5	6-20	gibbsit
Francie	56-60	2-5	20-35	boehmit
USA	40-52	10	6	gibbsit
Řecko	50-59	1-4	25-30	diaspor
Indie	36-60	1-10	6-39	gibbsit
Austrálie	35-55	4-10	6-17	gibbsit, boehmit
Brazílie	30-60	2,5-5,5	7-10	gibbsit
Rusko	42-60	5-15	12-22	gibbsit, boehmit

2.2.2 Způsoby výroby hliníku

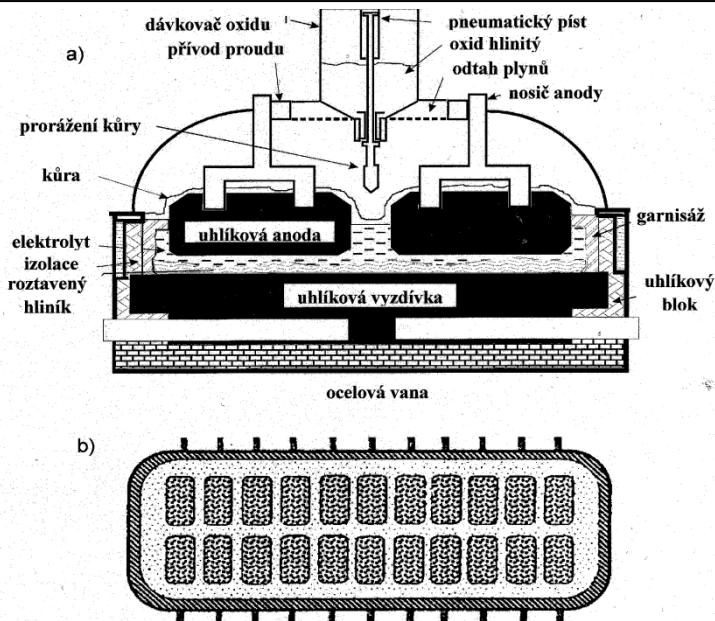
Výroba hliníku v průmyslovém měřítku započala teprve roku 1859. Nejpoužívanější způsob výroby hliníku je v dnešní době elektrolytická metoda. Poprvé byla výroba hliníku elektrolýzou oxidu hlinitého z roztaveného kryolitu sodného patentována nezávisle Francouzem Paulem Héroultem a Američanem Charlesem Hallem v roce 1886 a je pozoruhodné, že tento způsob se s malými obměnami používá až dosud. Proto se elektrolýze hliníku pomocí roztavených solí říká také Hall-Héroultova elektrolýza.[2]

- výroba Al₂O₃ z bauxitu.

V současné době se v průmyslové výrobě využívá zásaditých metod výroby oxidu hlinitého z bauxitu. Celý proces je poměrně složitý a skládá se z mletí, chemického zpracování hlinitanových rud loužením v NaOH, resp. Na₂CO₃ a z následného žihání při teplotách 1200-1300 °C.

- výroba hliníku elektrolýzou Al₂O₃.

Dnes nejpoužívanější metoda. Hlavní složkou elektrolytu je roztavený kryolit, Na₃AlF₆, ve kterém je rozpuštěný oxid hlinitý. Elektrolýza probíhá přibližně při 960 °C v elektrolýzních pecích (elektrolýzerech) – viz obr.1.[2]



Obr. 1 Schéma a detail elektrolyzéro a) průřez, b) půdorys.[2]

2.3 ČISTÝ HLINÍK

Hliník je nepolymorfní kov bílé barvy o měrné hmotnosti $2,69 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Krystalizuje v krychlové plošně středěné soustavě, teplota tání je $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Čistý hliník má velmi dobrou elektrickou vodivost – $(30 \text{ až } 36) \cdot 10^6 \text{ S/m}$ i tepelnou vodivost ($222,02 \text{ J/msK}$), také měrné teplo ($0,894 \cdot 10^{-3} \text{ J/kgK}$) je poměrně vysoké. Mechanické vlastnosti hliníku ovlivňuje stupeň čistoty a způsob zpracování. Ve vyžíhaném (měkkém) stavu má hliník pevnost v tahu 60 MPa a tažnost 25% . Tvářením za studena lze pevnost v tahu čistého hliníku zvýšit, účinky tváření se odstraňují rekrytalizačním žíháním při $350 \text{ až } 400 \text{ }^\circ\text{C}$ [12]. Nejdůležitější fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku jsou shrnuty v tabulce Tab.4.

Tab.4 Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Atomové číslo	13	-
Relativní atomová	26,982	-
Krystalová mřížka	FCC	-
Parametr mřížky	0,404958	nm
Hustota	2698 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$)	kg.m^{-3}
Teplota tavení	660,37 (Al 99,996 %)	$^\circ\text{C}$
Teplota varu	2494	$^\circ\text{C}$

Tepelná vodivost	2,37 (25 °C)	$\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Tepelná kapacita	0,90	$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Elektrický odpor	0,02655 (Al 99,99 %; 20	$\mu\Omega\cdot\text{m}$
Teplota supravodivosti	1,2	K
Modul pružnosti	70	GPa

Na vzduchu je hliník stálý, vrstvička Al_2O_3 , tvořící se na povrchu, jej chrání před další oxidací. Odolává také poměrně dobře mořské vodě a slabším kyselinám (i koncentrované kyselině dusičné). Koroduje však ve styku s louhy a čpavkem.

2.3.1 Použití čistého hliníku

Hliníkové lehké slitiny nachází uplatnění především v dopravním průmyslu (osobní automobily, letadla, nákladní vozidla, kolejová vozidla, lodě apod.). Použití čistého hliníku v různých průmyslových odvětvích je dáno především jeho velmi dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí, nízkou měrnou hmotností a možností rozmanité úpravy povrchu.

Čistý hliník nachází použití zejména jako elektrovodný materiál (na vodiče a součásti elektrických instalací v elektrotechnice), jako obalový materiál (hliníkové folie na balení potravin), slouží také k plátování slitin hliníku i ocelí jako ochrana proti korozi. Pro výrobu slitin a k dezoxidaci oceli se užívá tzv. hutního hliníku, jehož čistota se pohybuje mezi 99,7 a 98 %. Oba druhy se používají především k výrobě kondenzátorů (anodové folie) a pro chemický průmysl. Elektrovodný hliník se používá na vodiče a v elektrotechnice, v chemickém a potravinářském průmyslu (nádobí, lehké krytiny), hutnický hliník k odlévání odlitků, výrobě slitin a tvářených polotovarů.

Ultračistý hliník (SPA), který obsahuje 99,980 – 99,999% hliníku, se používá v elektronickém průmyslu a k výrobě CD. Vzhledem ke snadné výrobě a vysoké tepelné vodivosti se dnes z hliníku vyrábí i většina chladičů pro CPU moderních počítačů. Příklady využití slitin hliníku jsou vidět na obrázku Obr. 2.



Obr. 2 Výrobky z hliníku a jeho slitin [2]

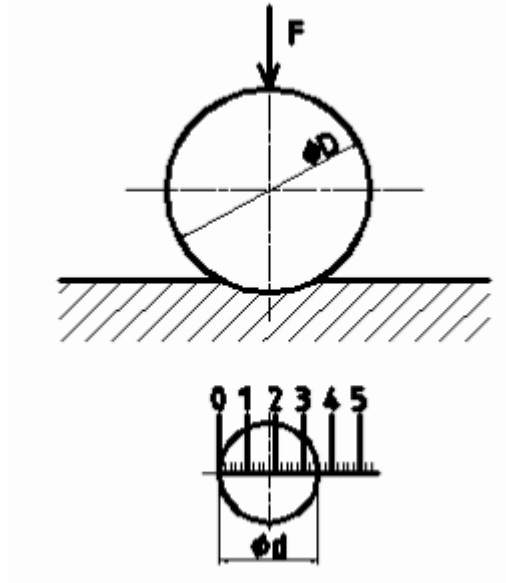
2.4 ZKOUŠKA TVRDOSTI DLE BRINELLA

Na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu v Paříži v roce 1900 předložil švédský inženýr Brinell svoji metodu určování tvrdosti, která se velmi rychle rozšířila a je dnes ve všech průmyslových státech normována (ČSN 42 0371).[13]

2.4.1 Podstata zkoušky

Tvrdot podle Brinella (ČSN 42 0371) se zjišťuje vtlačováním indentoru tvaru kuličky o průměru D do zkušebního tělesa silou F , která směřuje kolmo k povrchu tělesa po stanovenou dobu. Následně po odlehčení se změří průměr vtisku d .

Průměr D bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Průměr kuličky závisí na tloušťce t měřeného materiálu. Platí, že minimální tloušťka materiálu je desetinásobek hloubky vtisku. V opačném případě by se mohla projevit tvrdost podložky.[14]



Obr. 3 Zkouška dle Brinella [13].

Tvrдость podle Brinella HB je definována jako poměr působícího zatížení F k ploše povrchu kulového vtisku A dle vztahu:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

F zkušební síla [N]

d průměr vtisku v [mm]

D průměr kuličky [mm]

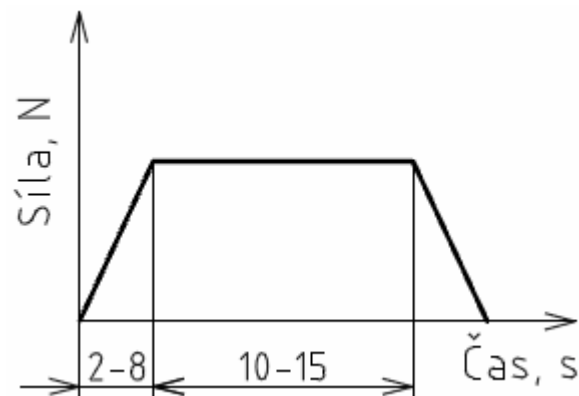
koeficient $0,102 = 1/9,80665$

Doba působení síly o dané velikosti závisí na struktuře materiálu. Měkčí materiály se zatěžují delší dobu. U slitin železa je zatížení od 10 do 15 s. U neželezných slitin od 10 do 180 s.

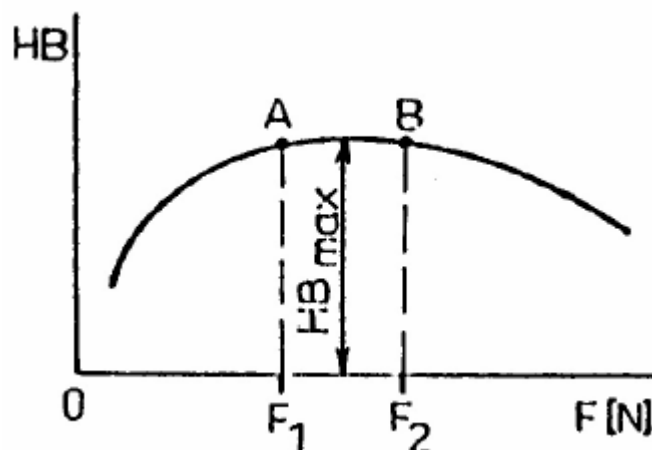
Přesnost měření závisí na správném proměření vtisku. Na průměr vtisku má velký vliv vtažení materiálu po kraji vtisku (u materiálu nezpevněného) nebo naopak vytlačení obvodového valu (u materiálu zpevněného). Příčinou další chyby může být deformace použité vtláčované kuličky (z kalené oceli). Pro materiály tvrdší než $HB=400$ není ocelová kulička vhodná a používají se kuličky ze slinutých karbidů.[14]

2.4.2 Provedení zkoušky

- Obvykle se zkouška provádí při teplotě 10 – 35 °C, v arbitrážních případech při teplotě 23 ± 5 °C.
- Při zkoušce musí být použito zkušební zatížení odpovídající zkoušenému materiálu a velikosti kuličky.
- Zkoušení zatížení musí být vybráno tak, aby průměr vtisku d byl v rozmezí hodnot od 0,24 D do 0,6 D .
- Vzorek musí být při zkoušce položen na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté a bez cizích tělísek. Je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul.
- Vnikací tělísko se zatlačuje do povrchu zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázů a chvění. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8 s.



Obr. 4 Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell [15]



Obr. 5 Závislost tvrdosti HB na velikosti zátěžné síly [16]

- Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15 s. Pro některé materiály mohou být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí ± 2 s.

- Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být minimálně 2,5násobek vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 3násobek průměru vtisku při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.
- Vzdálenost středů dvou sousedících vtisků musí být nejméně 4násobek průměru vtisku (platí pro ocel, litinu, měď a její slitiny) a minimálně 6násobek průměru vtisku při zkoušení lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.
- Po zkoušce se změří průměr každého vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech.
- Pro stanovení tvrdosti se vypočítá průměrná hodnota velikosti vtisku.[15]

2.4.3 Brinellův tvrdoměr

Pro zkoušku se používá Brinellův tvrdoměr. Brinellův tvrdoměr má různou velikost a provedení. V laboratořích existují velké stabilní přístroje (obr. 6). Pro malé dílny, sklady, montáže nebo pro zkušební účely na stavbách byly zkonstruovány malé jednoduché přístroje.[14]

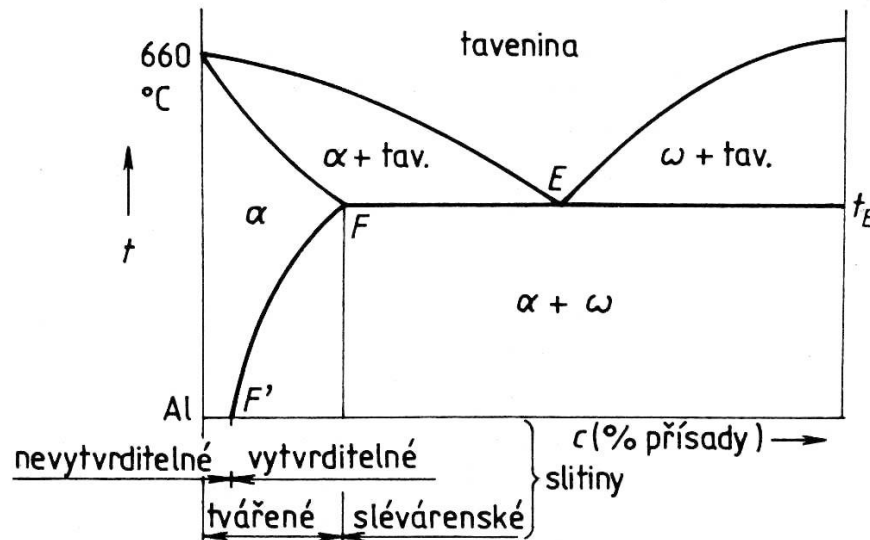


Obr. 6 Brinellův tvrdoměr v laboratoři KSP Technické Univerzity v Liberci.

3 SLITINY HLINÍKU

3.1 ROZDĚLENÍ SLITIN HLINÍKU

Slitiny hliníku lze dělit podle různých kritérií (obr. 7). Nejběžnějším způsobem je dělení podle zpracování dle ČSN. K 1. 1. 1995 bylo registrováno 18 slitin hliníku pro tváření a 16 slévárenských slitin hliníku.[3]



Obr. 7 Rozdělení slitin hliníku [3]

Podle způsobu zpracování mohou být rozděleny na:

- slitiny hliníku pro tváření,
- slévárenské slitiny hliníku.

Podle schopnosti zlepšit mechanické vlastnosti (zvýšit tvrdost a pevnost) po tepelném zpracování je možné slitiny hliníku rozdělit na:

- slitiny vytvrditelné,
- slitiny nevytvrditelné.

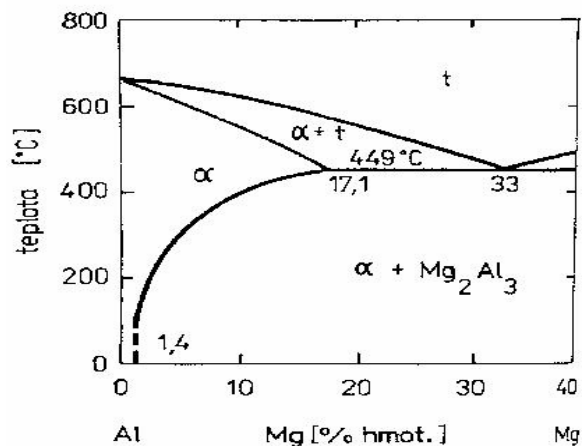
3.1.1 Slitiny hliníku pro tvářeni

- **Slitiny nízko pevnostní s dobrou odolností proti korozi**

V této podskupině jsou zařazeny slitiny soustav Al-Mg a Al-Mn. Tyto slitiny, protože neobsahují měď, se vyznačují velkou odolností proti korozi i bez použití povrchové ochrany, avšak na druhé straně je nelze tepelným zpracováním podstatně zpevnit (vytvrdit). Jejich předností je dobrá svařitelnost, tvářitelnost, odolnost proti vibračnímu zatížení a dobrá lomová houževnatost.[3]

Mezi slitiny Al-Mg patří AlMg₂, AlMg₃, AlMg₅ a AlMg₆. Slitiny s obsahem hořčíku větším než 6 hm. % však mají sklon ke korozi po hranicích zrn, zejména při mechanickém zatížení, proto se obvykle nepoužívají. Diagram rozpustnosti Al–Mg je vidět na obrázku Obr. 8.

Nízkou pevnost slitin Al-Mg (v žíhaném stavu $R_m = 140$ až 200 MPa) lze zvýšit deformačním zpevněním, tedy tvářením za studena (do R_m max. 420 MPa), které se používá především pro slitinu AlMg₅, a to se stupněm deformace 20 až 30 %. Při větších deformačních zpevněních značně klesá tvárnost slitin i jejich odolnost proti korozi. Slitina AlMg₅ se používá pro nýty k nýtování součástí ze slitin hořčíku, slitina AlMg_{2,5} je nejčastější materiál pro tzv. trnové nýty.[3]

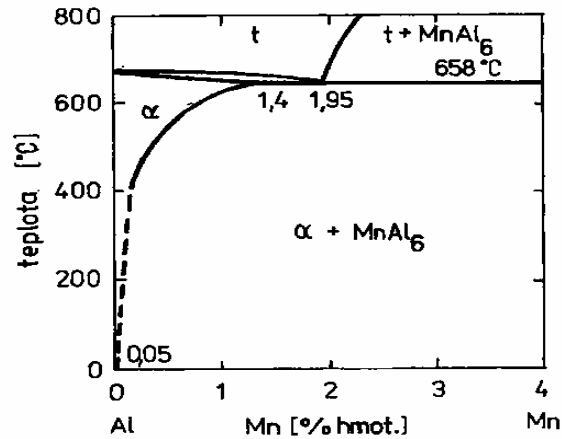


Obr. 8 Soustava Al- Mg [3]

Slitiny Al-Mg-Si lze na rozdíl od slitin Al-Mg vytvrdit, jsou dobře tvárné a svařitelné (R_m až 350 MPa) mají dobrou korozní odolnost a schopnost povrchových úprav, používají se zejména v letectví a stavebnictví.[3]

Slitiny Al-Mn se tepelně nevytvrdzují, neboť nevelké přesycení tuhého roztoku α umožňuje pouze nepodstatné zvýšení pevnosti (obr. 9). Jejich vlastnosti a použití jsou

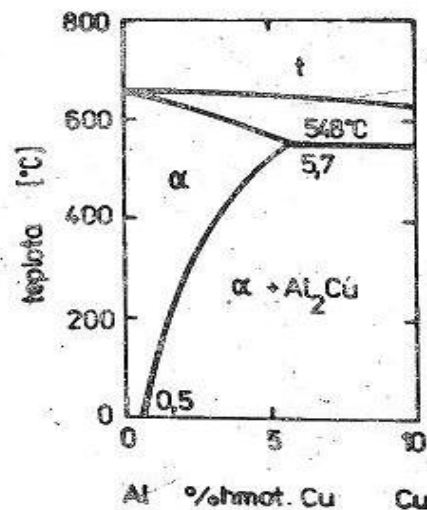
obdobné jako u slitin Al-Mg, ve stavu deformačně zpevněném 220 MPa. Tyto slitiny jsou často používány jako poněkud pevnější náhrada čistého hliníku.[3]



Obr. 9 Soustava Al- Mn [3]

- Slitiny s vyšší a vysokou pevností, avšak s nízkou odolností proti korozi

Slitiny Al-Cu-Mg představují nejvíce používané materiály této podskupiny. Jsou to zejména duraly AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn, dosahující značné pevnosti po vytvrzení tepelným zpracováním (R_m až 530 MPa). Část binárního diagramu soustavy Al-Cu (vliv Mg neuvažován) je na obr. 10.[3]



Obr. 10 Soustava Al-Cu [3]

Tyto materiály se používají pro výrobu výlisků z plechů a lze je i povrchově chránit proti korozi tenkou vrstvou čistého hliníku (plátované duraly). Maximální konstrukčně využitelná teplota těchto duralů závisí na způsobu a teplotě stárnutí, kdy musí být nižší než tato teplota. Duraly s obsahem hořčíku zvýšeným do 2 až 2,5 hm. % mohou být dlouhodobě

vystaveny teplotám až 200 °C (např. ruské D19, VAD1,VD17). V ČSN však zařazeny nejsou.[3]

Slitiny Al-Zn-Mg-Cu jsou nejpevnějšími slitinami hliníku. V ČR je normována pouze jedna slitina, a to AlZn6Mg2Cu. Po tepelném zpracování dosahuje pevnosti $R_m = 500$ až 580 MPa (jiná slitina tohoto typu, ruská V96, dosahuje R_m až 730 MPa).[3]

Slitiny Al-Li patří k vývojovým slitinám dosud nezařazeným v ČSN, protože v České republice nejsou vyráběny. Jejich potřeba je zajišťována dovozem. Lithium je vysoce reaktivní prvek, snadno oxidující na vzduchu. Proto jsou slitiny s lithiem taveny a odlévány v ochranné atmosféře argonu nebo ve vakuu, případně na vzduchu pod krycí struskou. Binární slitiny mají většinou nízkou tažnost a velkou křehkost. Hlavní směr vývoje proto představují komplexně legované slitiny, které mají tyto negativní vlastnosti potlačeny. Největší počet prvků zahrnují polykomponentní slitiny soustavy Al-Cu-Li-Mg-Zr-Mn. Kromě Li (max. 3 %) jsou v komerčních slitinách proto ještě přítomny přísady dalších prvků, zejména Cu (až 5 %), Mg (až 2 %), popř. Zr nebo Mn.

Z dalších méně typických tvářených slitin hliníku lze zmínit např. AlCu8FeSi, používanou pro kovaná pouzdra a pánve kluzných ložisek nebo AlSi12NiMg, což je tvářený silumin, používaný pro mechanicky a tepelně namáhané výlisky a výkovky, např. kované písty spalovacích motorů. [3] Pevnosti vybraných slitin hliníku jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.

Tab. 5 Pevnost vybraných slitin hliníku pro tvářeni [3]

Slitiny hliníku pro tvářeni		
Označení	ČSN	
	Číslo	R_m [MPa]
AlMg2	424412	140 - 255
AlMg3	424413	170 - 280
AlMg5	424415	200 - 420
AlMn1	424432	130 - 220
AlCu4Mg	424201	180 - 440
AlCu4Mg1	424203	210 - 530
AlCu8FeSi	424261	260 - 320
AlSi12Ni1Mg	424237	160 - 320

- **Slitiny hliníku určené k tvářeni**

Slitiny hliníku jsou označovány podle normy ČSN EN 573-1 až 3. Tyto normy slouží pro definování materiálů a polotovarů určených ke tvářeni a označují se písmeny EN AW (EN – Evropská norma, A – hliník, W – tvářený) a čtyřmi číslicemi. V čtyřmístném číselném

označení udává první ze čtyř číslic skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků, viz tabulka Tab. 6. [4]

Tab. 6 Slitiny hliníku určené k tváření [4]

Označení slitin hliníku určených k tváření podle ČSN EN 573-1 až 3		
Skupina	Hlavní slitinové prvky	Chemická značka
1000	Hliník min. 99% a více	Al
2000	Měď	Al – Cu
3000	Mangan	Al – Mn
4000	Křemík	Al – Si
5000	Hořčík	Al – Mg
6000	Hořčík a křemík	Al – Mg – Si
7000	Zinek	Al – Zn
8000	Ostatní prvky	Al s různými prvky

- **Hliníkové slitiny řady 6000**

U slitiny řady 6000 je důležitá intermetalická fáze Mg_2Si , která má význam z hlediska tepelného zpracování. Tyto slitiny se chovají podobně jako samokalitelné oceli a také tím nabývají vyšších pevnostních vlastností. Významnou vlastností této řady slitin hliníku s hořčíkem je jejich výborná schopnost plastické deformace. Nejpoužívanější slitiny hliníku řady 6000 jsou uvedeny v tab. 7. [4]

Tab. 7 Vybrané hliníkové slitiny řady 6000 [4]

Hliníkové slitiny řady 6000			
Označení slitin podle ČSN EN 573 - 3		Označení slitin dle ČSN	
Číselné označení	Chemické značení	Číselné označení	Chemické značení
EN AW – 6012	EN AW - AlMgSiPb	-	-
EN AW – 6056	EN AW – AlSi1MgCuMn	-	-
EN AW – 6060	EN AW – AlMgSi	ČSN 424401	AlMgSi
EN AW – 6061	EN AW – AlMg1SiCu	-	-
EN AW – 6063A	EN AW – AlMg0,7Si	ČSN 424401	AlMgSi
EN AW – 6082	EN AW – AlSi1MgMn	ČSN 424400	AlMg1Si1Mn
EN AW – 6101B	EN AW – AlMgSi(B)	-	-

Vzhledem k tomu, že v předkládané bakalářské práci byla k experimentům použita slitina hliníku EN AW 6082, budou v následujících odstavcích popsány její základní vlastnosti a možnosti jejího využití.

3.1.2 Slitiny hliníku pro odlitky

Slitiny hliníku pro odlitky jsou určeny k výrobě odlitků litím do písku, do kovových forem nebo tlakově. Mechanické hodnoty odlitků nedosahují hodnot výrobků tvářených a značně závisí na způsobu odlévání. Největší pevnost v tahu bývá asi 250 MPa. Hrubá struktura s nejnižšími pevnostními charakteristikami vzniká při lití do písku, jemná struktura s lepšími vlastnostmi se tvoří při lití do kovových forem nebo při lití tlakově.

Slitiny hliníku pro odlitky lze rozdělit podle slitinových bází na:

Binární siluminy. Slitiny soustavy Al-Si jsou nejrozšířenější slitiny na odlitky. Al-Si slitiny se dělí na:

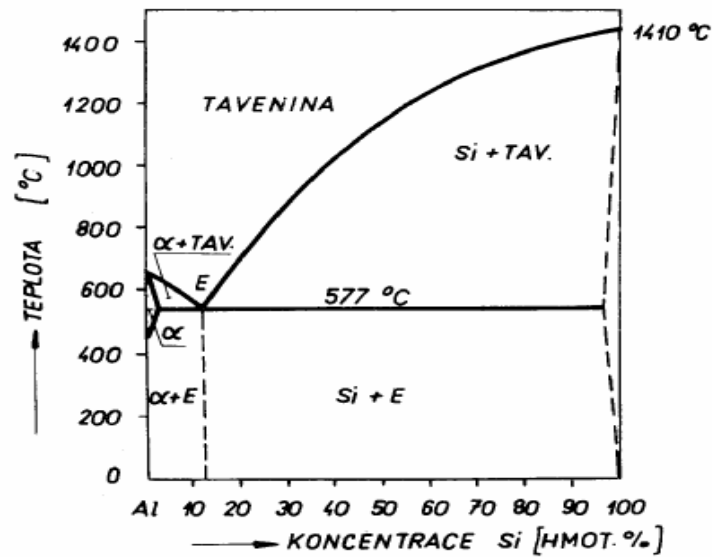
- Podeutektické (pod 11,7 % Si)
- Eutektické (kolem 11,7 % Si)
- Nadeutektické (od 11,7 do 24 % Si)

Nejlepší slévárenské vlastnosti mají eutektické siluminy. Eutektium v binárních siluminech představuje směs tuhého roztoku α a krystalů téměř čistého křemíku fáze β .

Eutektikum přítomné v poměrně velkém obsahu (40 až 75 hm.%) dává binárním siluminům nejen vysokou zabíhavost, ale také snižuje jejich lineární smrštění a sklon k tvorbě trhlin za tepla a sklon ke vzniku mikroporovitosti.

K přednostem binárních siluminů Al-Si patří dobrá odolnost proti korozi. Přesto se pro tvarové odlitky používají zřídka. Osvědčily se však jako hliníkové pájky (například siluminy AlSi5 a AlSi12). Většina siluminů používaných k odlévání tvarových odlitků jsou pevnější siluminy speciální.

Speciální siluminy. Největší vliv na zlepšení pevnostních charakteristik binárních siluminů mají přísady hořčíku a mědi, které umožňují tyto speciální siluminy Al-Si-Mg a Al-Si-Cu vytvrzovat. Slitiny lze pak dlouhodobě mechanicky zatěžovat za teplot do 250 až 275 °C. Slévárenské vlastnosti těchto speciálních siluminů jsou však horší než u siluminů binárních Al-Si. Přísadami dalších prvků (Mn, Ti, Zn, Ni) vznikají siluminy soustav Al-Si-Cu-Mn, Al-Si-Cu-Ni a Al-Si-Cu-Zn s cílem zlepšení užitečných vlastností.



Obr. 11 Binární rovnovážný diagram soustavy Al-Si [1]

Slitiny Al-Cu

Binární slitiny Al-Cu mají malé využití. Slitiny polykomponentní, odvozené ze základní báze Al-Cu, obvykle obsahují nikl a železo. Sloučený těchto kovů s hliníkem disperzně zpevňují tuhý matriční roztok, ve kterém jsou nerozpustné. Tyto slitiny jsou proto určeny pro dlouhodobou funkci za teploty 350 až 450 °C. Na rozdíl od siluminů však mají poměrně široký teplotní interval krystalizace (90 až 100 °C), což způsobuje horší slévárenské vlastnosti, zejména menší zabíhavost, větší sklon k tvorbě trhlin za tepla při tuhnutí odlitku a k mikropórovitosti. Hlavním sponečným nedostatkem všech slévárenských slitin hliníku obsahujících měď je jejich poměrně špatná odolnost proti korozi. Odlitky proto musí být povrchově chráněny. Jsou to zejména odlitky značně namáhané při vyšších teplotách, např. hlavy válců a písty větších rozměrů.

Slitiny Al-Mg

Mají nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost ze všech slévárenských slitin hliníku. Jsou vhodné pro rázově namáhané odlitky náhlými změnami průřezů a pro odlitky odolávající koroznímu prostředí. Jejich obrobiteľnosť je lepší než u slitin Al-Si. Značné naplynění a oxidace při tavení, lití a krystalizaci jsou však příčinou jejich horších slévárenských vlastností, větší pórovitosti a snížené těsnosti odlitků. Přísada křemíku zlepšuje zabíhavost, snižuje sklon k tvorbě trhlin za tepla a zvyšuje hustotu odlitků.

Slitiny Al-Zn-Mg

Mají slévárenské vlastnosti obvykle lepší než slitiny Al-Cu a Al-Mg. Ve srovnání se slitinami Al-Cu je lepší i jejich odolnost proti korozi, může se však projevovat vyšší sklon ke korozi pod napětím, který se potlačuje přísadou 0,8 až 1,2 hm.% Fe. Slitiny Al-Zn-Mg jsou méně citlivé na změnu tloušťky stěn odlitků než jiné slévárenské slitiny hliníku. Dobře se též svažují.

Slitiny Al-Mg-Si

V těchto slitinách má křemík za úkol zlepšit zabíhavost taveniny a snížit možnost vzniku trhlin. Někdy se v těchto materiálech vyskytuje v malé míře i měď a pak tyto slitiny AlMgSiCu mají horší odolnost proti korozi. Měď však působí kladně, a to na zvýšení pevnosti slitiny.

Slitiny typu AlMgSi se používají na více namáhané odlitky pracující při vyšších teplotách. Na automobilech je nalezneme na žebrované hlavě válců motorů nebo jako automobilové kování. Tyto slitiny ovšem zasahují i do ostatních oblastí, jako je vnější či vnitřní architektura, nádobí a fotografické přístroje.

Tab. 8 Pevnost vybraných slitin hliníku pro odlitky [4]

Slitiny hliníku pro odlitky			
Základní báze	ČSN		R_m [MPa]
	Označení	Číslo	
Al-Si-Mn	AlSi12Mn	424330	140 -180
Al-Si-Cu	AlSi6Cu2	424353	150 -160
	AlSi8Cu2Mn	424339	240
Al-Cu	AlCu4Ni2Mg	424315	160 -240
	AlCu8FeSi	424361	160 -200
Al-Mg-Si	AlMg5Si1Mn	424515	120 -170
	AlMg10SiCa	424519	240

4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

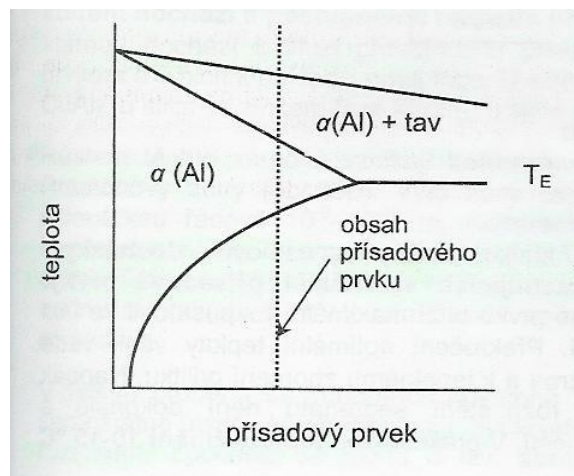
Nejčastější způsoby tepelného zpracování slitin hliníku jsou různé typy žíhání a vytvrzování.

Žíhání na odstranění pnutí se používá u tvarově složitých součástí tvářených za tepla, u odlitků litých zejména do kovové formy a po svařování. Pokles vnitřního napětí nastává již od teploty asi 200 °C. Účinněji probíhá za teplot 300 až 400 °C.

Žíhání rekrystalizační se nejčastěji zařazuje jako mezioperace po tváření za studena. Může být po tváření i operací konečnou, je-li spolu s dostatečnou pevností požadována i vysoká tvárnost materiálu. Teplota rekrystalizačního žíhání bývá 300 až 400 °C.

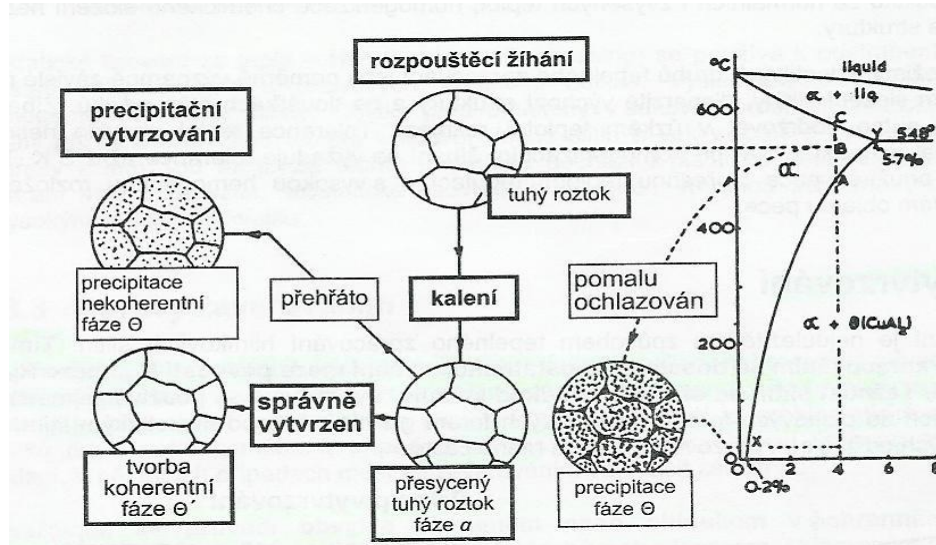
Homogenizační žíhání se používá před tvářením k odstranění dendritického odmíšení v hutním polotovaru.

Vytvrzování slouží ke zvýšení meze pevnosti R_m , meze $R_{p0,2}$ a tvrdosti. Tažnost slitin se obvykle snižuje. Principem je přítomnost přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Takovými prvky jsou především Cu a Mg. Jejich obsah ve slitině musí být vyšší než je jejich rozpustnost při normální teplotě, ale nižší než je maximální rozpustnost $\alpha(\text{Al})$ při eutektické teplotě.



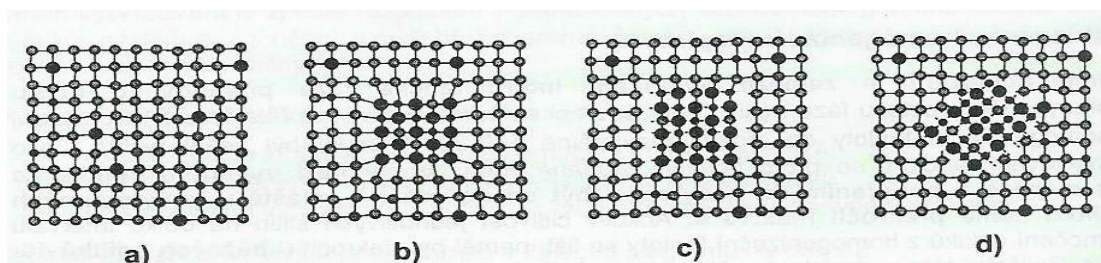
Obr. 12 Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [5]

Výchozím polotovarem je odlitek, který ve formě ztuhl běžným způsobem. Cílem je zpětné rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku $\alpha\text{-Al}$ a jejich následné vyloučení v podobě koherentních nebo semi-koherentních útvarů, které způsobují zpevnění slitiny. [5]



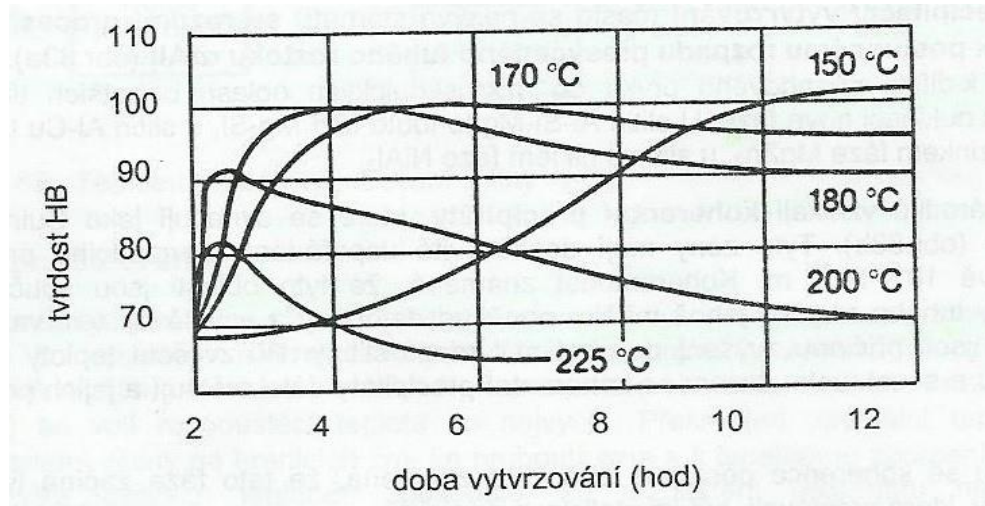
Obr. 13 Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [5]

- **rozpouštěcí žihání** – získává se homogenní tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. Provádí se při teplotách nad křivkou změny rozpustnosti a dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísadové prvky. V praxi volíme teploty žihání 10–15°C pod eutektickou teplotou. Homogenizační teplota by neměla být moc dlouhá, dochází pak k hrubnutí zrna. [5]
- **rychlé ochlazení** – vznikne přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. Cílem je zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku. Doba mezi vyjmutím odlitku ze žihací pece a ponořením do vody musí být co nejkratší, především u odlitků s tenkými stěnami (max. 10s). Důležité je také rovnoměrné ochlazování kvůli segregacím. [5]
- **precipitační vytvrzování (stárnutí)** – tvoří se precipitát a zpevní se struktura. Dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Při stárnutí dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších tímto prvkem a v nich k nukleaci nové fáze. [5]



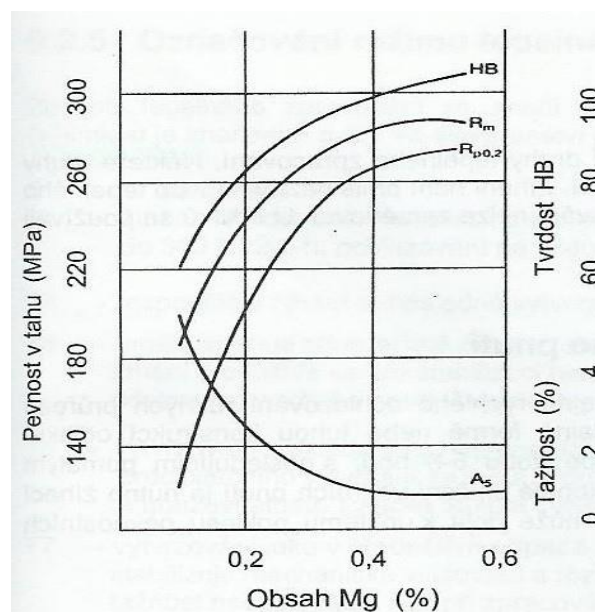
Obr. 14 Vyloučení precipitační fáze: a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) částečně koherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát [5]

- **Vytvrzování za tepla** – tímto způsobem vytvrzujeme slitiny Al-Si-Mg a Al-Mg. Teploty vytvrzování se volí podle druhu slitiny, většinou mezi 140–180°C, doba vytvrzování bývá okolo 3 až 8 hod. Při příliš vysokých teplotách se získávají horší mechanické vlastnosti než při teplotách optimálních. [5]

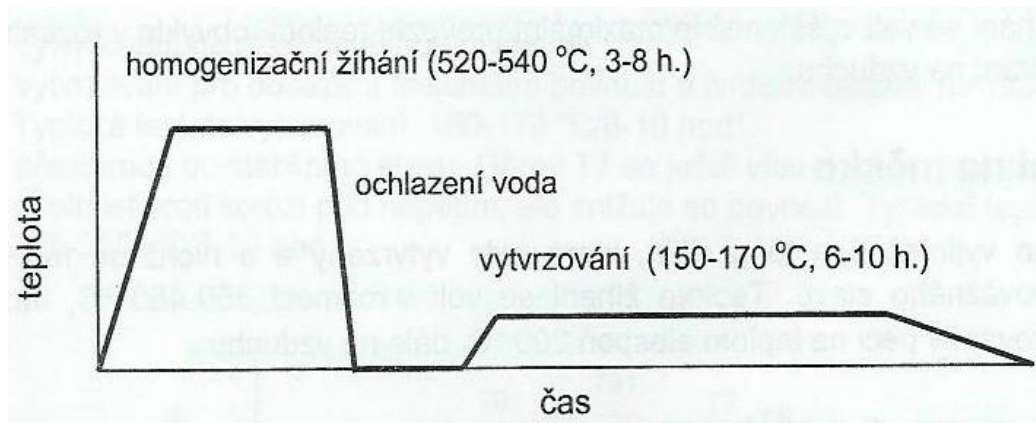


Obr. 15 Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [5]

Vlastnosti slitiny po ukončení vytvrzování jsou závislé také na obsahu vytvrzovacího prvku. Obsah hořčíku u běžných vytvrzitelných slitin Al-Si-Mg bývá okolo 0,3–0,45 % Mg, u vysokopevných slitin je to až 0,7 %. Čím více je zde hořčíku, tím lepší jsou pevnost a tvrdost, ale tažnost bude klesat.



Obr. 16 Vliv Mg na mechanické vlastnosti po vytvrzení [5]



Obr. 17 Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla [5]

- **Vytvrzování za studena**

Vytvrzujeme tak slitiny AlZnMg nebo slitiny AlCu4 a slitiny AlSiCu s vysokým obsahem mědi. Proces stárnutí probíhá pomalu, samovolně a finálních vlastností výrobek dosáhne za více než 100–150 hod.

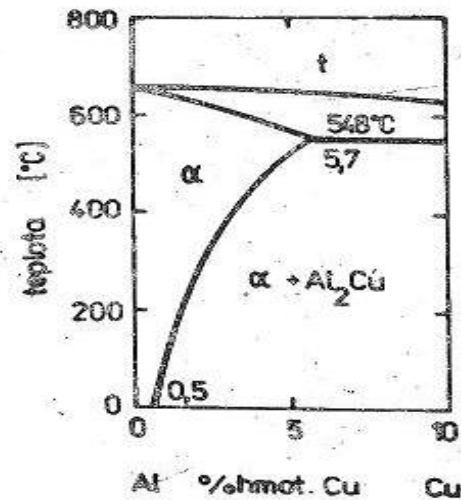
Rozpouštěcí ohřev

Cílem rozpouštěcího ohřevu je dosáhnout homogenní struktury tuhého roztoku α . To je možné jen u slitin s obsahem přísady do mezní rozpustnosti v tuhém stavu, v tomto případě mědi do 5,7 %. Vyžaduje to ohřev na teplotu vyšší než je teplota solidu a dostatečně dlouhou výdrž pro rozpuštění všech intermetalických fází. Při obsahu mědi nad 5,7 % není úplné rozpuštění možné a výsledná struktura není čistě homogenní. Teplota ohřevu je v tomto případě 5 až 15 °C pod teplotou počátku tavení 548 °C. Doba výdrže na teplotě rozpouštěcího ohřevu je u tvářených slitin s jemnozrnnou strukturou desítky minut, u odlitků s hrubými částicemi intermetalik i desítky hodin.[1]

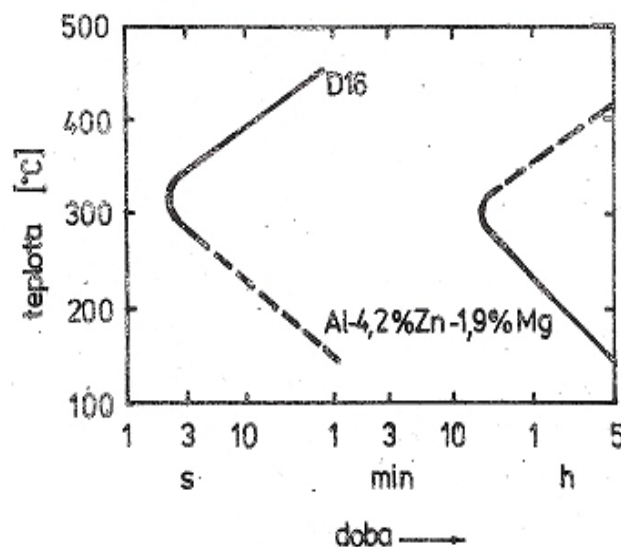
Kalení

Cílem kalení, tj. rychlého ochlazení, je zachování tuhého roztoku po rozpouštěcím ohřevu i při teplotě okolí. Rychlost ochlazování musí být nadkritická, tj. taková, aby nedošlo k vylučování prvku z tuhého roztoku ve formě intermetalické fáze. Kritická rychlost ochlazování je u různých slitin různá. Slitiny typu Al-Cu-Mg vyžadují vysokou rychlost kalení (slitina D16 v obr.19). Některé slitiny, např. Al-Zn-Mg (obr. 19), stačí ochlazovat volně na vzduchu. Zachovaný tuhý roztok je **přesycený** – obsahuje vyšší obsah rozpuštěného prvku než odpovídá rozpustnosti za dané teploty a je v tomto stavu **měkký a velmi dobře tvárný**. Přesycený tuhý roztok je nestabilní a jeho precipitační rozpad během následujícího

stárnutí vede k získání optimální kombinace vysoké pevnosti a dobré houževnatosti a tažnosti materiálu.[1]



Obr. 18 Část rovnovážného diagramu slitiny Al–Cu



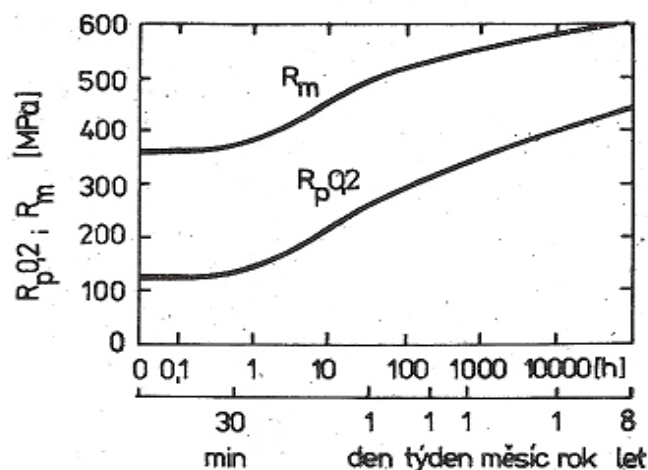
Obr. 19 Diagram anizotermického rozpadu tuhého roztoku slitiny AlCu4Mg1 (D16) a AlZn4Mg2.

Nejdůležitějším technologickým faktorem při kalení je rychlost ochlazování. Při vysoké rychlosti kalení se po následujícím stárnutí dosahuje **maximálních pevnostních hodnot, nejlepšího poměru pevnosti a houževnatosti a vysoké korozní odolnosti**. Střední rychlost ochlazování však klesá s rostoucí tloušťkou kaleného materiálu, což má vliv na **prokalitelnost** a na pokles mechanických vlastností v závislosti na tloušťce polotovaru. Nevýhodou vysoké rychlosti ochlazování je vznik vnitřního pnutí, které je důsledkem

nerovnoměrného smršťování povrchových a vnitřních vrstev tělesa. V povrchových částech vzniká tahové zbytkové napětí, ve vnitřních částech napětí tlakové. Vnitřní napětí může vyvolat nežádoucí deformace, zejména u tvarově složitých částí, tahové napětí podporuje také korozi pod napětím, případně únavové porušení. Běžným kalicím prostředím pro slitiny hliníku je voda, která má ochlazovací schopnost 600 až 800 °C/s. Tato rychlost je pro většinu slitin zbytečně vysoká, vznikající zbytková napětí jsou často velmi značná. Je možné je omezit použitím např. vody teplé 60 až 80 °C, případně je alespoň částečně odstranit následným mechanickým nebo tepelným zpracováním.[1]

Stárnutí

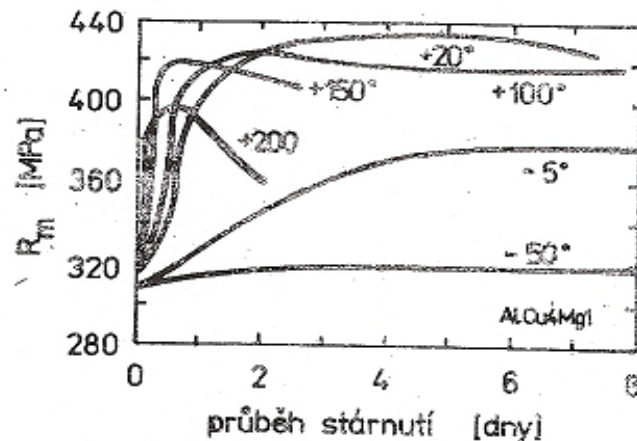
Jak bylo uvedeno výše, přesycený tuhý roztok je nestabilní, měkký a tvárný, ale s pevností vyšší než je jeho pevnost v rovnovážném stavu. Vysoké tvárnosti se často využívá pro zařazení tvářecích operací v této fázi výroby. Nestabilní tuhý roztok má tendenci se po určité inkubační době rozpadat za vzniku velmi jemných a rovnoměrně dispergovaných **precipitátů intermetalických fází**. Tyto precipitáty tvoří překážku pro pohyb dislokací a tím výrazně zvyšují pevnostní hodnoty slitiny. U některých slitin, např. Al-Cu-Mg, dochází k precipitaci již při teplotě okolí – **stárnutí přirozené**. U slitin se stabilnějším tuhým roztokem by došlo při teplotě okolí ke zvýšení pevnosti až po velmi dlouhé době (obr. 20), proto je nutný nový ohřev na teploty podle druhu slitiny v rozmezí 130 až 195 °C po dobu 4 až 16 hod. – **stárnutí umělé**. [1]



Obr. 20 Průběh přirozeného stárnutí u slitiny AlZnMgCu

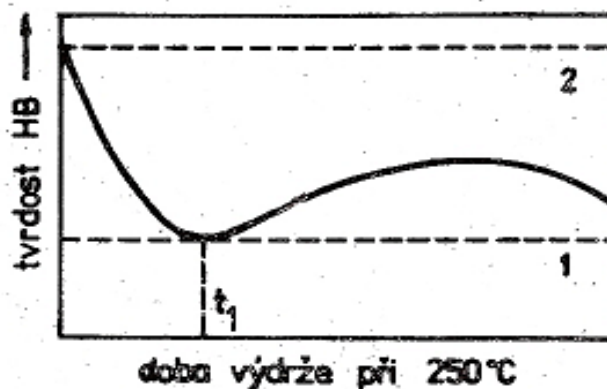
Nejdůležitějšími technologickými parametry stárnutí je teplota a čas. Vliv těchto parametrů na pevnost duralu je zřejmý z obr. 21. Při umělém stárnutí se obvykle volí doba

tak, aby se dosáhlo maximální pevnosti. V některých případech se záměrně volí doba delší, pak dochází k tzv. **přestárnutí**, kdy má slitina poněkud horší pevnost, ale lepší korozní odolnost.



Obr. 21 Vliv stárnutí na pevnost slitiny AlCu4Mg1

Obnovit tvárné vlastnosti přirozeně stárnuté slitiny je možné **zpětným rozpuštěním precipitátů** – tzv. **retrogresí**. Princip spočívá v rychlém ohřevu na 230 až 270 °C s výdrží 30 až 120 sekund a v rychlém ochlazení ve vodě. Struktura je ve stavu odpovídajícím přesycenému tuhému roztoku, materiál je tvárný a vhodný pro tváření za studena. Proces je rychlejší a méně energeticky náročný než rozpouštěcí ohřev a kalení, vznikají menší deformace a je snížena difúze u plátovaných materiálů. Problémem je nutnost velmi rychlého ohřevu a dodržení optimální doby výdrže. Pro rychlý ohřev jsou vhodné lázně roztavených solí, optimální výdrž se určuje experimentálně podle minimální tvrdosti slitiny po zakalení – obr. 22. Retrogrese je použitelná jen do tloušťky stěn 8 až 10 mm.[1]



Obr. 22 Určení optimální doby ohřevu při retrogresi

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tepelné zpracování slitin hliníku zásadním způsobem ovlivňuje jejich konečné mechanické vlastnosti. Průběh tepelného zpracování je však ovlivňován mnoha faktory a správná volba těchto technologických parametrů je nutným předpokladem pro dosažení jejich požadovaných vlastností u vyráběného dílu. Bakalářská práce byla řešena na základě požadavku firmy GPH, spol. s r.o. zabývající se výrobou kovaných dílů ze slitin hliníku pro elektrotechnický průmysl. Ve firmě GPH, spol. s r.o. byly opakovaně zjišťovány problémy s kvalitou výrobků po tepelném zpracování, zvláště pak stabilitou jejich mechanických hodnot. Pro experimenty byl firmou GPH, spol. s r.o. vybrán výrobek „šroubové kabelové spojky nízkého napětí“ (dále označován jen jako „kabelová spojka“), která je vyráběna z materiálu EN AW 6082 a spolu s polotovarem pro výrobu výkovku a samotným výkovkem je vidět na obrázku Obr. 23.



Obr. 23 Polotovar výkovku, výkovek a finální výrobek kabelové spojky

Výchozím bodem pro stanovení cílů bakalářské práce byl průběh tepelného zpracování výkovku „kabelové spojky“ prováděný ve s firmě GPH, spol. r.o.. Dlouhodobě používané parametry tepelného zpracování pro daný výrobek jsou ve firmě GPH, spol. s r.o. voleny takto:

- rozpouštěcí žíhání při teplotě 520°C s výdrží na této teplotě 2 hodiny
- prudké ochlazení ve vodě o teplotě max. 30°C
- umělé stárnutí při teplotě 165°C s dobou výdrže 14 hodin

5.1 CÍLE ŘEŠENÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem experimentální části řešení bakalářské práce bylo stanovení vlivu podmínek tepelného zpracování výkovků na časový průběh tvrdosti slitiny EN AW 6082 při umělém stárnutí. Tvrdost slitiny byla měřena metodou dle Brinella, která je nejčastěji používanou metodou pro měření tvrdosti odlitků a výkovků ze slitin hliníku. Po předchozí dohodě a v návaznosti na technologický proces výroby daného dílu ve firmě GPH, spol. s r.o. byly voleny různé podmínky tepelného zpracování, které simulují důsledky možného nedodržení předepsaných technologických postupů při výrobě a následně měřena časová závislost tvrdosti takto tepelně zpracovaného testovaného materiálu. Zvolené testované podmínky tepelného zpracování jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce Tab. 9.

Tab. 9 Přehled zvolených podmínek tepelného zpracování výkovků ze slitiny EN AW 6082

Proces		Podmínky rozpouštěcího žhání	Podmínky ochlazování	Podmínky umělého stárnutí
P1		Teplota 520°C, doba výdrže 2 hod.	Počáteční teplota 520°C, ochlazeno ve vodě	Teplota 150°C, 165°, 180°C
P2		Teplota 520°C, doba výdrže 2 hod.	Počáteční teplota 480°C, 500°C, 520°C, ochlazeno ve vodě	Teplota 165°
P3		Teplota 520°C, doba 1,5 hod., 2 hod., 2,5 hod.	Počáteční teplota 520°C, ochlazeno ve vodě	Teplota 165°

5.2 CHARAKTERISTIKA TESTOVANÉHO MATERIÁLU A POUŽITÉ VZORKY

Pro experimenty byla použita slitina hliníku s hlavními legujícími prvky křemíkem a hořčíkem. Tato slitina je označována dle normy EN AW 6082. Často lze v literatuře nalézt také označení dle normy US Aluminum Association, kde je tato slitina vedena pod označením A357. Slitina označená EN AW 6082 je precipitačně vytvrditelná slitina, která se nejčastěji používá pro výrobky s vysokou pevností v kombinaci s nízkou hmotností a dobrou odolností proti korozi. Výborné mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi umožňují široké využití tohoto materiálu v leteckém, automobilovém a námořním průmyslu. Materiál EN AW 6082 je certifikován pro použití v námořních aplikacích. Komponenty vyrobené ze slitiny EN AW 6082 se rovněž nacházejí ve stavebnictví, elektrotechnice a potravinářském průmyslu. Ve

většinou případů se materiál používá ve vytvrzeném stavu, kdy jsou jeho mechanické vlastnosti srovnatelné s konvenčními konstrukčními oceli. [5] [2]

Slitina EN AW 6082 se také často používá pro výrobu dílů pomocí technologie kování za tepla na bucharech a lisech. Tváření součástí v kombinaci s následným tepelným zpracováním vytváří produkty nejvyšší kvality s příznivým poměrem pevnosti a hmotnosti. Dobrá tvarovatelnost umožňuje jednoduchou mechanizaci a automatizaci tvářecích procesů. [7]. Výše uvedená slitina vykazuje dobrou odolnost vůči dynamickým zatěžovacím podmínkám. Kvůli prvkům jako je např. mangan, který je přidán ke zvýšení houževnatosti, je tato slitina méně vhodná pro dekorativní eloxování. Typické chemické složení uvedené slitiny je uvedeno v tabulce Tab. 10. [6]

Mechanické vlastnosti jednotlivých slitin se odvíjejí od jejich přesného chemického složení, technologických parametrů tváření a zejména od jejich tepelného zpracování. Typické mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 6082 jsou shrnuty v následující tabulce Tab. 11.

Tab. 10 Typické chemické složení slitiny EN AW - 6082 [6]

Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Cr	Zr	V	Al
1	0,2	0,55	0,8	0,042	0,02	0,181	0,005	0,013	97

Tab. 11 Typické mechanické vlastnosti EN AW 6082 [6]

Orientační mechanické vlastnosti materiálu EN AW – 6082				
Chemické složení	Stav materiálu	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
AlSi1MgMn	T4	min. 205	110	min. 14
	T6	min. 290	240	min. 8
	T65	min. 300	240	min. 4

Pro veškeré následné experimenty byly použity za tepla kované výkovky (viz Obr. 23.) poskytnuté firmou GPH, spol. s r.o. Výkovky byly vyrobeny technologií zápusťkového kování na klikovém lisu. Teplota tváření byla u všech dodaných výkovků 450°C s následným ochlazováním na vzduchu. Výkovky nebyly ve firmě GPH, spol. s r.o. po tváření za tepla podrobeny žádnému dalšímu tepelnému zpracování. Časový úsek mezi

výrobou výkovků ve firmě GPH, spol. s r.o. a provedením experimentu na TU v Liberci byl 12 dní.

5.2.1 Statická zkouška tahem

Pro stanovení základních materiálových charakteristik testovaného materiálu EN AW 6082 byla použita statická zkouška tahem. S ohledem na tvar dodaných výkovků byly pro zkoušku tahem použity zkušební vzorky kruhového tvaru zhotovené soustružením. Místo odebrání zkušební vzorku pro statickou zkoušku je patrné z obrázku Obr. 24. Z důvodu eliminace materiálových anomálií byly určované hodnoty materiálových charakteristik stanoveny vždy ze souboru 8 měřených vzorků. Tvar a rozměry zkušebních tyčí jsou v souladu s EN ISO 6892-1 (dříve EN 10002-1). Rovněž metodika provedení a vyhodnocení zkoušky byla v souladu s výše uvedenou normou EN ISO 6892-1. Pro porovnání vlivu precipitačního vytvrzování u dané slitiny byla statická zkouška tahem provedena na vzorcích odebraných z výkovků bez umělého stárnutí (vzorky byly označeny jako W) a po umělém stárnutí (vzorky označeny jako T6).

Zkouška tahem byla provedena na stroji TIRAtest 2300 s použitím vyhodnocení naměřených dat pomocí software Labtest, který vyhodnocuje všechny základní mechanické hodnoty testovaného materiálu ($R_{p0,2}$, R_m , A , A_g).



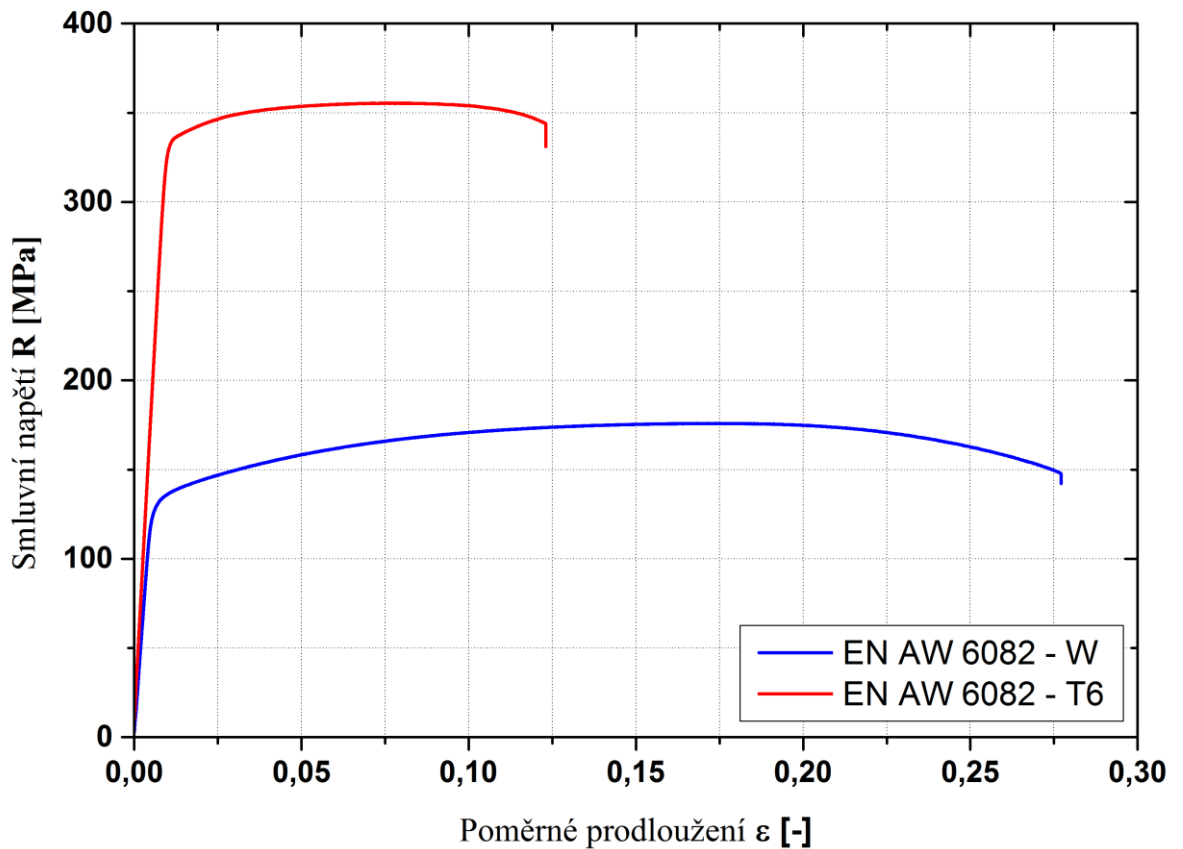
Obr. 24 Místo odebrání vzorku pro statickou zkoušku tahem

Zjištěné hodnoty základních mechanických charakteristik pro testovaný materiál EN AW 6082 získané výše popsaným způsobem jsou uvedeny v tabulce Tab. 12, kde jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné

odchyly výběru s. Příklady smluvních diagramů ze statické zkoušky tahem testovaného materiálu EN AW 6082 pro oba testované případy (bez umělého stárnutí –W a s umělým stárnutím –T6) jsou zachyceny na obrázku Obr. 25.

Tab.12 Naměřené mechanické vlastnosti slitiny EN AW-6082 bez stárnutí (W) a po umělém stárnutí (T6)

Slitina EN AW 6082	Pevnostní charakteristiky		Deformační charakteristiky	
	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A [%]
Po tváření (W)	136±1,11	177±0,89	18.1±0,27	27.9±0,19
Po umělém vytvrzení (T6)	335±1,98	356±1,74	8.2±0,16	12.1±0,21



Obr. 25 Statická zkouška tahem testovaného materiálu EN AW 6082

5.3 OHŘEV MATERIÁLU

Ohřev materiálu pro rozpouštěcí žíhání testovaného materiálu byl realizován v odporové peci CLASIC 11016S s regulací teploty umožňující dosažení požadované teploty s přesností $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Pec je umístěna v laboratoři KSP TU v Liberci v budově L. Ohřev materiálu pro realizaci umělého stárnutí byl realizován v laboratorní peci Venticell Standard 404 umožňující dosažení požadované teploty s přesností $\pm 3^{\circ}\text{C}$. V obou případech byly vzorky umísťovány do pece temperované na požadovanou teplotu. Použité zařízení pro ohřev materiálu je vidět na obrázku Obr. 26.



Obr. 26 Zařízení použité pro ohřev materiálu

5.4 MĚŘENÍ TVRDOSTI DLE BRINELLA

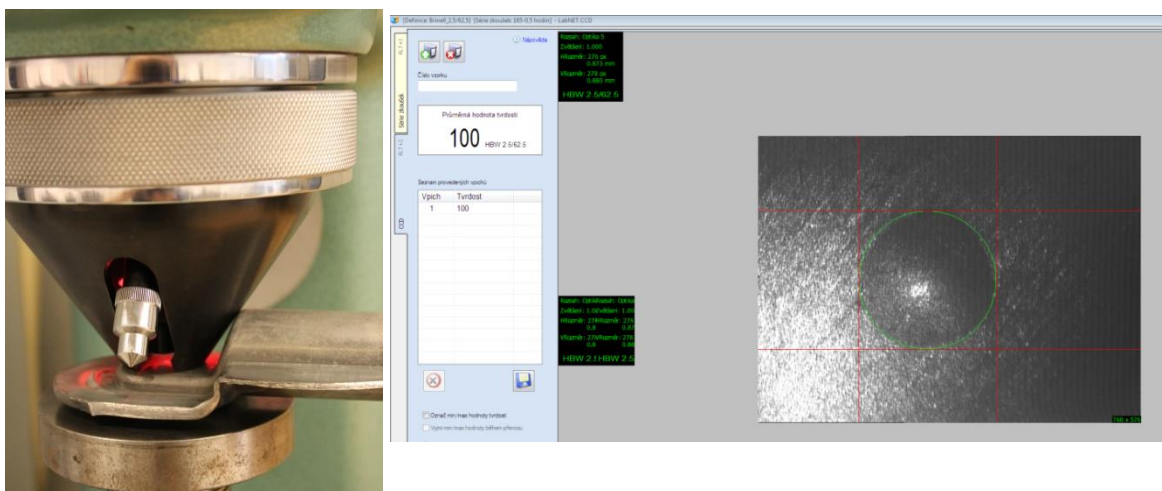
Časová změna mechanických vlastností slitiny EN AW 6082 byla hodnocena pomocí zkoušky tvrdosti dle Brinella, která se realizovala na modernizovaném tvrdoměru HPO 250 s vyhodnocovacím software LabControl CCD. Tvrdost byla měřena indentorem ze slinutého karbidu wolframu tvaru kuličky o průměru 2,5 mm při zatížení $F=612,9$ N. Metodika provedení a vyhodnocení zkoušky tvrdosti dle Brinella byla volena v souladu s normou ČSN EN ISO 6506. Vzhledem k nepravidelnému tvaru výkovku bylo měření tvrdosti realizováno v ploché části výkovku, tak jak je patrné z obrázku Obr. 27. Tloušťka výkovku v tomto místě (14 mm) s dostatečnou rezervou splňuje podmínku o požadované minimální tloušťce vzorku pro dané podmínky měření.

S ohledem na získání dostatečného počtu bodů v grafu závislosti tvrdosti na době umělého stárnutí byly časové intervaly měření tvrdosti voleny takto: 0,5 hod., 1 hod., 1,5 hod., 2 hod., 4 hod., 6 hod., 10 hod., 14 hod. a 24 hod.. Pro každý zvolený časový úsek

umělého stárnutí byly použity vždy 2 sledované vzorky, které byly po vyjmutí z pece Venticell Standard 404 ochlazeny ve vodě a bezprostředně poté na nich byla změřena tvrdost HBW 2,5/62,5. Hodnota tvrdosti pro danou podmínku byla stanovena jako průměrná hodnota z 8 opakovaných měření na dvou vzorcích (4+4 měření). Změřené vzorky již nebyly používány pro další měření. Níže prezentované závislosti průběhu tvrdosti na čase tak reprezentují vždy 18 samostatně měřených vzorků (9 časových intervalů) s 8 opakovanými měřeními tvrdosti pro každou podmínku, tj. 72 provedených měření tvrdosti. Ukázka měření tvrdosti HBW 2,5/62,5 na výkovku a příklad vyhodnocení výsledku měření pomocí software LabControl CCD je patrné z obrázku Obr.28.



Obr. 27 Oblast měření tvrdosti dle Brinella HBW2,5/62,5 na výkovku



Obr. 28 Ukázka měření tvrdosti na tvrdoměru HPO 250 a příklad vyhodnocení výsledku

5.5 VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA ČASOVÝ PRŮBĚH TVRDOSTI

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.1., hlavním cílem řešení bakalářské práce bylo stanovení vlivu podmínek tepelného zpracování výkovků na časový průběh tvrdosti slitiny EN AW 6082 při umělém stárnutí. V následujících kapitolách jsou tak prezentovány výsledky měření tvrdosti v návaznosti na různé tepelné zpracování, které simulují důsledky možného nedodržení předepsaných technologických postupů při výrobě ve firmě GPH, spol. s r.o.

5.5.1 Vliv teploty umělého stárnutí

Proces tepelného zpracování prováděného za účelem zjištění vlivu teploty umělého stárnutí na změnu mechanických vlastností je označen jako P1 a jeho průběh je uveden v kapitole 5.1. tabulce Tab.9. V reálném výrobním procesu ve firmě GPH, spol. s r.o. je po rozpouštěcím žíhání (teplota 520°C, doba výdrže 2 hodiny) pro umělé stárnutí (vytvrzování) vytvrzování výkovků používána teplota 165°C s dobou výdrže 14 hodin. Zvolený postup tepelného zpracování slitiny EN AW 6082 ve firmě GPH, spol. s r.o. je v souladu s dosavadními poznatky a publikovanými výsledky výzkumu v této oblasti [5]. S ohledem na požadavky firmy GPH, spol. s r.o. byly pro experiment prováděný na TU v Liberci zvoleny 3 teploty umělého vytvrzení výkovků 150°C, 165°C a 180°C. Zvolené teplotní rozmezí tak odpovídá současně používané teplotě vytvrzování (165°C) a teplotě o 15°C menší (150°C) resp. vyšší o 15°C (180°C). Postup měření změny tvrdosti v čase byl popsán v předchozí kapitole a uvedený postup je využíván pro získání všech závislostí tvrdosti na čase při zvolených podmínkách tepelného zpracování. Výsledky jednotlivých měření vlivu teploty vytvrzování na změnu tvrdosti HBW 2,5/62,5 pro zvolené časové úseky (0,5 – 24 hod.) jsou uvedeny v tabulce výsledných hodnot Tab. 13, až Tab. 15, kde jsou uvedeny všechny měřené hodnoty spolu s vypočítanou střední hodnotou sledovaných charakteristik (výběrovým průměrem) a směrodatnou odchylkou výběru s . Pro přehlednost jsou pak všechny vypočítané střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) seřazeny do srovnávací tabulky Tab. 16. Tyto hodnoty byly následně použity pro grafické vyjádření výsledků měření, jak je patrné z obrázku Obr. 29.

Tab.13 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 520°C, umělé stárnutí: teplota 150°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	62	58	58	58	60	59	59	58	59	1,414
1	64	62	64	63	60	61	62	63	62,4	1,408
1,5	65	66	67	67	69	66	67	66	66,6	1,188
2	74	71	73	76	72	73	73	74	73,3	1,488
4	87	86	92	95	90	89	90	91	90	2,828
6	104	103	104	100	104	104	103	104	103,3	1,389
10	103	106	103	104	104	103	105	106	104,3	1,282
14	105	106	105	106	104	104	106	106	105,3	0,886
24	105	103	103	106	105	104	103	103	104	1,195

Tab.14 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

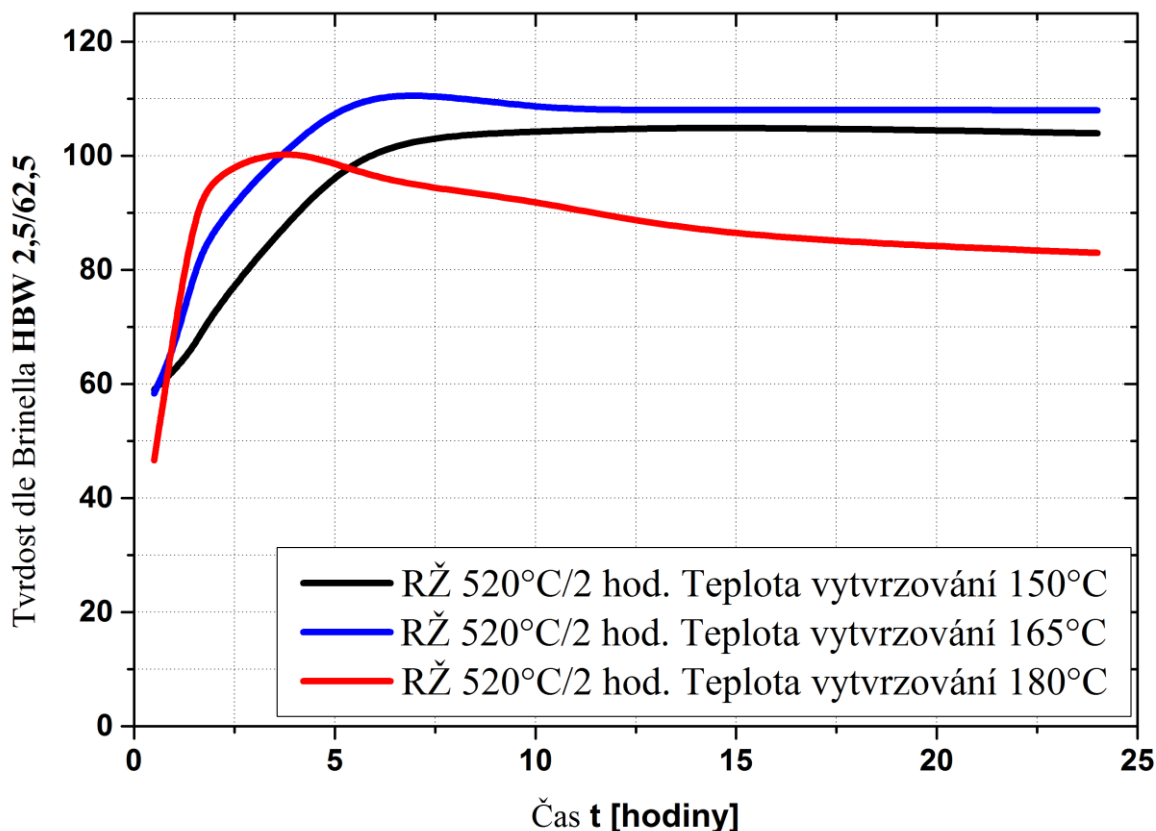
Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 520°C, umělé stárnutí: teplota 165°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	57	61	57	59	59	58	57	59	58,4	1,408
1	67	65	66	67	66	65	64	81	66	1,309
1,5	81	78	81	79	80	82	78	81	80	1,512
2	88	86	89	89	88	88	90	86	88	1,414
4	102	104	106	100	104	103	101	104	103	1,927
6	113	113	113	115	114	113	110	111	112,8	1,581
10	106	107	110	108	109	106	107	110	107,9	1,642
14	108	108	109	107	109	108	109	107	108,2	0,835
24	107	108	108	109	107	108	109	108	108	0,756

Tab.15 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 520°C, umělé stárnutí: teplota 180°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	47	46	47	48	47	46	45	47	46,6	0,916
1	68	70	70	69	70	68	69	71	69,4	1,061
1,5	88	90	92	91	89	88	91	90	89,9	1,458
2	98	95	98	97	99	99	96	97	97,4	1,408
4	106	100	101	102	102	103	102	101	102,2	1,808
6	97	96	95	94	94	96	95	95	95,3	1,035
10	90	95	92	93	93	90	93	94	92,5	1,773
14	85	86	87	85	86	85	86	87	85,9	0,835
24	83	82	80	84	85	82	84	84	83	1,604

Tab.16 Průměrné naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

HBW 2,5/62,5									
T [°C]	Čas [hod.]								
	0,5	1	1,5	2	4	6	10	14	24
150	59	62,4	66,6	73,3	90	103,3	104,3	105,3	104
165	58,4	66	80	88	103	112,8	107,9	108,2	108
180	46,6	69,4	89,9	97,4	102,2	95,3	92,5	85,9	83



Obr. 29 Graf vlivu teploty umělého stárnutí na časový průběh tvrdosti výkovků z materiálu EN AW 6082 (RŽ-rozpouštěcí žihání)

5.5.2 Vliv počáteční teploty před ochlazením

Proces tepelného zpracování prováděného za účelem zjištění vlivu počáteční teploty před ochlazením na změnu mechanických vlastností je označen jako P2 a jeho průběh je uveden v kapitole 5.1. v tabulce Tab.9. V reálném výrobním procesu ve firmě GPH, spol. s r.o. následuje ihned po rozpouštěcím žihání ochlazení výkovků ve vodě. Technologický předpis pro tento postup je definován tak, aby nedocházelo po vyjmutí z pece k časovým prodlevám. Testovaný proces P2 zjišťovaný na TU v Liberci simuluje stav, kdy po rozpouštěcím žihání dochází k delší manipulaci s výkovkem na vzduchu a nedojde tak ihned po rozpouštěcím žihání k prudkému ochlazení ve vodě. Výkovek snižuje svojí teplotu a výchozí teplota před ochlazením ve vodě je nižší než 520°C. S ohledem na požadavky firmy GPH, spol. s r.o. byly pro experiment prováděný na TU v Liberci zvoleny 3 počáteční teploty před prudkým ochlazením ve vodě a to 480°C, 500°C a 520°C. Zvolené teplotní rozmezí tak odpovídá současně používané počáteční teplotě před ochlazením (520°C) a teplotě o 20°C menší (500°C) resp. menší o 40°C (480°C). Takto ochlazené vzorky s různou počáteční teplotou před ochlazením byly následně vytvrzovány při teplotě 165°C. Výsledky

jednotlivých měření vlivu počáteční teploty před ochlazováním na změnu tvrdosti HBW 2,5/62,5 pro zvolené časové úseky (0,5 – 24 hod.) jsou uvedeny v tabulce výsledných hodnot Tab. 17 až Tab. 19, kde jsou uvedeny všechny měřené hodnoty spolu s vypočítanou střední hodnotou sledovaných charakteristik (výběrovým průměrem) a směrodatnou odchylkou výběru s . Pro přehlednost jsou pak všechny vypočítané střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) seřazeny do srovnávací tabulky Tab. 20. Tyto hodnoty byly následně použity pro grafické vyjádření výsledků měření, jak je patrné z obrázku Obr. 30.

Tab.17 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 480°C, umělé stárnutí: teplota 165°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	57	57	58	57	58	58	57	58	57,6	0,518
1	63	64	63	63	64	63	64	63	63,4	0,518
1,5	77	76	74	76	73	75	76	76	75,4	1,302
2	89	88	93	89	92	89	91	88	89,9	1,885
4	113	114	112	114	114	113	114	113	113,4	0,744
6	113	112	113	113	113	113	114	114	113,2	0,641
10	116	115	116	116	118	116	114	116	115,9	1,126
14	121	119	118	119	120	120	121	119	119,2	1,061
24	120	119	118	120	118	119	118	120	119	0,926

Tab.18 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

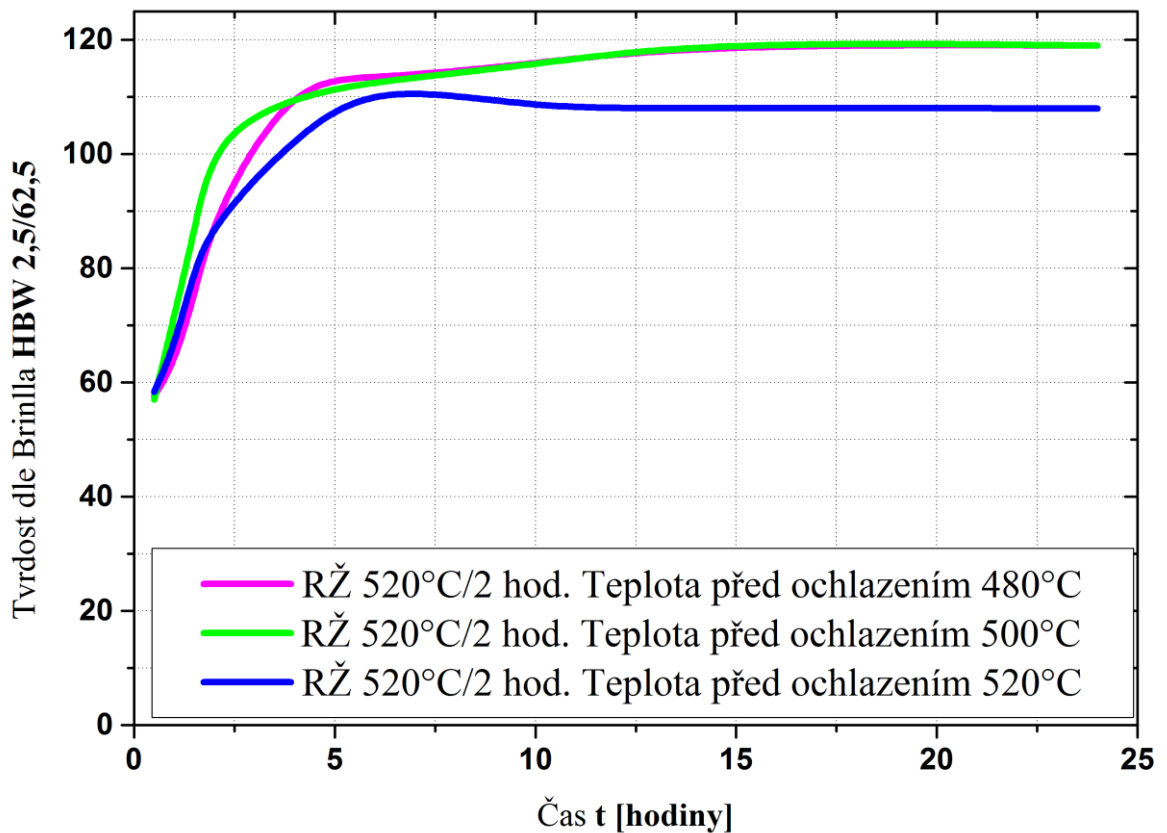
Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 500°C, umělé stárnutí: teplota 165°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	57	56	58	58	57	57	56	57	57	0,756
1	72	72	71	72	71	72	71	72	71,6	0,518
1,5	85	85	87	88	88	86	87	88	86,8	1,282
2	104	104	102	102	104	104	103	103	103,3	0,886
4	110	110	111	111	110	110	110	109	110,1	0,641
6	113	112	115	112	113	112	113	112	112,8	1,035
10	117	115	115	116	116	115	116	115	115,6	0,744
14	121	120	120	121	118	121	119	118	119,7	1,282
24	118	119	118	119	120	120	119	119	119	0,756

Tab.19 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 520°C, umělé stárnutí: teplota 165°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	57	61	57	59	59	57	58	59	58,4	1,408
1	67	65	66	66	66	67	65	67	66,1	0,835
1,5	81	78	81	79	80	81	81	79	80	1,195
2	88	86	89	89	88	89	88	88	88,1	0,991
4	102	104	106	100	104	102	102	104	103	1,852
6	112	111	112	113	113	113	114	114	112,8	1,035
10	107	108	107	108	109	107	109	108	107,9	0,835
14	106	108	110	108	109	107	109	108	108,2	1,246
24	107	108	108	109	107	108	109	108	108	0,756

Tab.20 Průměrné naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

HBW 2,5/62,5									
T [°C]	Čas [hod.]								
	0,5	1	1,5	2	4	6	10	14	24
480	57,6	63,4	75,4	89,9	113,4	113,2	115,9	119,2	119
500	57	71,6	86,8	103,3	110,1	112,8	115,6	119,7	119
520	58,4	66,1	80	88,1	103	112,8	107,9	108,2	108



Obr. 30 Graf vlivu teploty materiálu před ochlazením na časový průběh tvrdosti výkovků z materiálu EN AW 6082 (RŽ-rozpouštěcí žihání)

5.5.3 Vliv doby rozpouštěcího žihání

Proces tepelného zpracování prováděného za účelem zjištění vlivu doby rozpouštěcího žihání na změnu mechanických vlastností je označen jako P3 a jeho průběh je uveden v kapitole 5.1. v tabulce Tab.9. V reálném výrobním procesu ve firmě GPH, spol. s r.o. je doba rozpouštěcího žihání 2 hodiny. Proces P3 simuluje stav, kdy se doba rozpouštěcího žihání liší o 30 minut oproti standardnímu stavu 2 hodin. S ohledem na požadavky firmy

GPH, spol. s r.o. byly pro experiment prováděný na TU v Liberci zvoleny 3 doby výdrže na rozpouštěcí teplotě 520°C a to 1,5 hod., 2 hod. a 2,5 hodiny. Zvolené doby výdrže tak odpovídají současně používanému stavu 2 hodiny a době o 30 minut menší (1,5 hodiny) resp. větší o 30 minut (2,5 hodiny). Vzorčky byly následně ihned zchlazeny ve vodě a vytvrzovány při teplotě 165°C. Výsledky jednotlivých měření vlivu doby rozpouštěcího žíhání na změnu tvrdosti HBW 2,5/62,5 pro zvolené časové úseky (0,5 – 24 hod.) jsou uvedeny v tabulce výsledných hodnot Tab. 21 až Tab. 23, kde jsou uvedeny všechny měřené hodnoty spolu s vypočítanou střední hodnotou sledovaných charakteristik (výběrovým průměrem) a směrodatnou odchylkou výběru s. Pro přehlednost jsou pak všechny vypočítané střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) seřazeny do srovnávací tabulky Tab. 24. Tyto hodnoty byly následně použity pro grafické vyjádření výsledků měření, jak je patrné z obrázku Obr. 31.

Tab.21 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žíhání teplota 520°C – 1,5 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 520°C, umělé stárnutí: teplota 165°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	55	55	55	55	56	54	55	56	55,1	0,641
1	61	63	61	61	61	61	61	61	61,4	0,744
1,5	75	74	73	74	74	74	75	74	74,1	0,641
2	85	84	89	85	84	85	83	83	84,8	1,909
4	92	94	93	94	95	94	96	94	94	1,195
6	98	99	100	99	98	97	99	100	98,8	1,035
10	102	103	104	102	102	103	104	103	102,9	0,835
14	105	104	106	105	104	106	105	104	104,9	0,835
24	105	107	105	104	105	103	104	105	104,7	1,165

Tab.22 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

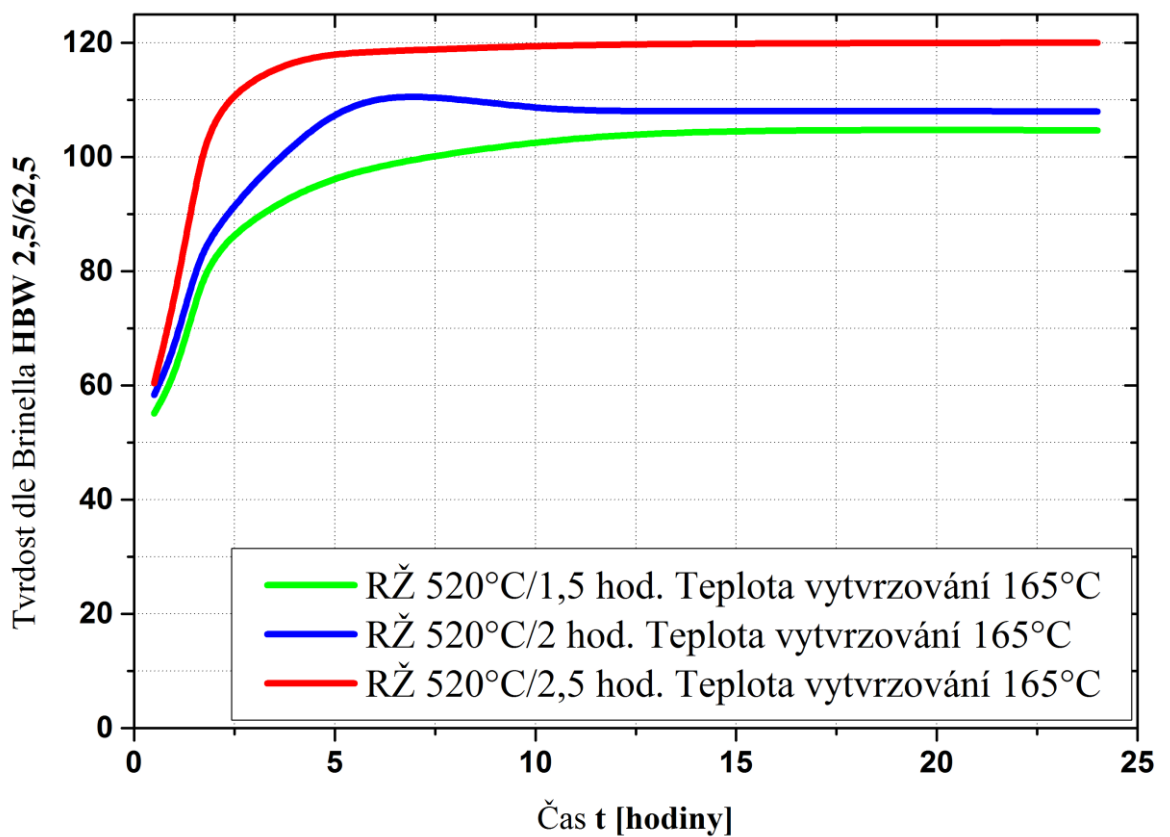
Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 520°C, umělé stárnutí: teplota 165°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	57	61	57	59	59	57	58	59	58,4	1,408
1	67	65	66	66	66	67	65	67	66,1	0,835
1,5	81	78	81	79	80	81	81	79	80	1,195
2	88	86	89	89	88	89	88	88	88,1	0,991
4	102	104	106	100	104	102	102	104	103	1,852
6	112	111	112	113	113	113	114	114	112,8	1,035
10	107	108	107	108	109	107	109	108	107,9	0,835
14	106	108	110	108	109	107	109	108	108,2	1,246
24	107	108	108	109	107	108	109	108	108	0,756

Tab.23 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

Metoda: HBW 2,5/62,5										
Rozpouštěcí žihání teplota 520°C – 2,5 hodiny										
Teplota materiálu před prudkým ochlazením 520°C, umělé stárnutí: teplota 165°C										
Čas [hod.]	Číslo měření								\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8		
0,5	60	60	60	61	60	60	61	61	60,4	0,518
1	73	75	74	75	75	74	75	75	74,5	0,756
1,5	92	95	96	93	95	94	95	95	94,4	1,302
2	108	109	113	112	109	110	108	111	110	1,852
4	116	117	118	120	119	116	117	119	117,8	1,488
6	119	118	120	118	118	119	118	118	118,5	0,756
10	120	120	119	120	119	120	119	119	119,5	0,535
14	120	119	120	120	120	120	121	119	119,9	0,641
24	121	121	122	118	119	120	119	120	120	1,309

Tab. 24 Průměrné naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase

HBW 2,5/62,5									
Doba RŽ [hod.]	Čas vytvrzování [hod.]								
	0,5	1	1,5	2	4	6	10	14	24
1,5	55,1	61,4	74,1	84,8	94	98,8	102,9	104,9	104,7
2	58,4	66,1	80	88,1	103	112,8	107,9	108,2	108
2,5	60,4	74,5	94,4	110	117,8	118,5	119,5	119,9	120



Obr. 31 Graf vlivu doby rozpouštěcího žhání na časový průběh tvrdosti výkovků z materiálu EN AW 6082 (RŽ-rozpouštěcí žhání)

6 ZÁVĚR

Z provedených experimentů v rámci řešení bakalářské práce vyplývá, že teplota umělého vytvrzování 165°C pro výkovky „šroubové kabelové spojky nízkého napětí“ je ve firmě GPH, spol. s r.o. zvolena správně. Experimenty prokázaly, že v případě volby nižší teploty umělého stárnutí 150°C jsou konečné hodnoty tvrdosti HBW o cca 4% nižší vzhledem k standardně volené teplotě 165°C. Při volbě vyšší teploty umělého stárnutí 180°C jsou konečné tvrdosti výkovků oproti standardnímu stavu nižší o cca 20%. S ohledem na ekonomické hledisko by bylo možné uvažovat oproti stávajícímu stavu o snížení teploty umělého stárnutí na 150°C. Pokles tvrdosti 4% u testovaných výkovků není nijak zásadní a v případě dodržení předepsaných hodnot tvrdosti pro daný výrobek by došlo k značným úsporám při ohřevu materiálu. Zvyšování teploty umělého stárnutí nepřináší žádný efekt ani z hlediska mechanických vlastností, ani z hlediska ekonomického. Z výsledků je dále patrné, že k dosažení maximálních hodnot tvrdosti při umělém stárnutí postačuje doba cca 10 hodin. V případě nepřekročení předepsané teploty umělého stárnutí 165°C se tvrdost HBW po 10 hodinách již zásadně nemění. Při vyšší teplotě umělého stárnutí 180°C dochází s rostoucím časem k nežádoucímu poklesu tvrdosti. S ohledem na zjištěné skutečnosti bylo firmě GPH, spol. s r.o. doporučeno snížit dobu umělého stárnutí výkovků na dobu 12 hodin, což představuje kompromis mezi současným předpisem 14 hodin a experimentálně zjištěnou dobou 10 hodin nutnou pro vytvrzení daných výkovků. Lze se oprávněně domnívat, že snížení teploty a doby umělého stárnutí pro dané výkovky přinese výrazný ekonomický efekt, který však nebyl v rámci řešení bakalářské práce vyčíslen.

V procesu označeném jako P2 byl testován vliv poklesu teploty výkovků po rozpouštěcím žihání důsledkem manipulace před prudkým ochlazením ve vodě. Z naměřených výsledků je patrné, že se pokles teploty před ochlazením nijak zásadně negativně neprojevil na časovém průběhu tvrdosti. Naopak se s delší prodlevou, a tím i nižší počáteční teplotě před samotným ochlazením, došlo ke zvýšení hodnot tvrdosti, což plně neodpovídá běžně přijatým teoriím. Z pohledu praktického využití výsledků řešení bakalářské práce je možno konstatovat, že nebyl prokázán zásadní vliv prodlevy před prudkým ochlazením na časový průběh tvrdosti sledovaných výkovků.

Při testování vlivu doby rozpouštěcího žihání na časový průběh tvrdosti byla potvrzena domněnka, že doba rozpouštěcího žihání příznivě ovlivňuje průběh tepelného zpracování u slitiny EN AW 6082. Dochází k rozpouštění segregovaných fází a homogenizaci struktury [1], což následně příznivě ovlivňuje mechanické hodnoty při umělém stárnutí



výkovků ze slitiny EN AW 6082. Výsledky měření prokázaly, že oproti standardní době rozpouštěcího žíhání 2 hodiny dojde při prodloužení doby rozpouštěcího žíhání na 2,5 hod u výkovků k nárůstu tvrdosti o cca 10%. Vzhledem k tomu, že hodnoty tvrdosti odpovídají danému předpisu i pro dobu rozpouštěcího žíhání 2 hodiny, není nutné tuto dobu prodlužovat. V případě zvýšení požadavků na mechanické hodnoty výkovků po umělém vytvrzování je možné o této variantě uvažovat.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] www.fsiforum.cz [online]. Dostupné z : www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/ORL/.../Slitiny%20Al.doc
- [2] MICHNA,Š., LUKÁČ, I. a OČENÁŠEK, V. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Prešov, 2005. ISBN 80-89041-88-4
- [3] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, ISBN 80-7204-248-3(2.OPR.A ROZŠ. VYD.).
- [4] TVAŘITELNOST SLITIN HLINÍKU, Pavel Solfronk, Iva Nová, Iva Nováková, Liberec 2012.
- [5] ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. 1. vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [6] Nedalextrusion: Nedalaluminium. [Http://www.nedal.nl/](http://www.nedal.nl/) [online]. Dostupné z: <https://www.nedal.com/wp.../Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-6082.pdf>
- [7] BIROL, Y., GOKCIL, E., ALI GUVENC, M., AKDI, S. (2016). Processing of high strength EN AW 6082 forgings without a solution heat treatment. In: *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 674, pp. 25-32. Elsevier. Turkey.
- [8] MRÓWKA-NOWOTNIK, G., SIENIAWSKI, J. (2005) Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162-163, pp. 367-372. Elsevier. Poland.
- [9] KOVALČÍK, T., STOULIL, J., SLÁMA, P., VOJTĚCH, D. (2015). The Influence of Heat Treatment on Mechanical and Corrosion Properties of Wrought Aluminium Alloys 2024 and 6064. In: *Manufacturing Technology*, Vol. 15, No.1, pp. 54-61. UJEP. Czech Republic
- [10] MARTINOVSKÝ, M., MÁDL, J. (2015). Effect of Different Modifiers and Heat Treatment on Structure, Hardness and Microhardness of AlSi7Mg0.3 Alloy. In: *Manufacturing Technology*, Vol. 15, No.4, pp. 604-610. UJEP. Czech Republic
- [11] www.fsiforum.cz [online] Dostupné z: www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/.../06A-3SV.ppt
- [12] NAUKA O MATERIÁLU, Doc.ing.Ján Alaxin, csc a kolektiv, Liberec 1989.
- [13] Zkoušky tvrdosti. ZČU - zkoušky tvrdosti [online]. 2012. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [14] Postup měření tvrdosti. Informace o měření tvrdosti [online].2011.



Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/tvrdost.html>

[15] Zkoušky tvrdosti. Metrotest - zkoušky tvrdosti [online]. 2010 .Dostupné z:
http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf.

[16] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R. a BENEDIKT, V. Základní zkoušky kovových materiálů. Plzeň: [s.n.], 2005. ISBN 80-7043-417-1.

Seznam tabulek

Tab. 1 Přehled běžných minerálů hliníku [2]	3
Tab. 2 Některé vlastnosti hlinitých minerálů bauxitu a korundu [2]	3
Tab. 3 Nejvýznamnější naleziště bauxitů ve světě a jejich složení [2]	4
Tab. 4 Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti hliníku	5
Tab. 5 Pevnost vybraných slitin hliníku pro tváření [3]	14
Tab. 6 Slitiny hliníku určené k tváření [4]	15
Tab. 7 Vybrané hliníkové slitiny řady 6000 [4]	15
Tab. 8 Pevnost vybraných slitin hliníku pro odlitky [4]	18
Tab. 9 Přehled zvolených podmínek tepelného zpracování výkovků ze slitiny EN AW 6082	27
Tab. 10 Typické chemické složení slitiny EN AW - 6082 [6]	28
Tab. 11 Typické mechanické vlastnosti EN AW 6082 [6]	28
Tab. 12 Naměřené mechanické vlastnosti slitiny EN AW-6082 bez stárnutí (W) a po umělém stárnutí (T6)	30
Tab. 13 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	34
Tab. 14 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	34
Tab. 15 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	35
Tab. 16 Průměrné naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	35
Tab. 17 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	37
Tab. 18 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	38
Tab. 19 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	38
Tab. 20 Průměrné naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	39
Tab. 21 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	40
Tab. 22 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	41
Tab. 23 Naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	41
Tab. 24 Průměrné naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW-6082 v čase	42

Seznam obrázků

<i>Obr. 1</i> Schéma a detail elektrolyzéry a) průřez, b) půdorys [2].....	5
<i>Obr. 2</i> Výrobky z hliníku a jeho slitin [2]	7
<i>Obr. 3</i> Zkouška dle Brinella [13]	8
<i>Obr. 4</i> Průběh zkušebního zatížení – metoda Brinell [15]	9
<i>Obr. 5</i> Závislost tvrdosti HB na velikosti zátěžné síly [16]	9
<i>Obr. 6</i> Brinellův tvrdoměr v laboratoři KSP Technické Univerzity v Liberci.....	10
<i>Obr. 7</i> Rozdělení slitin hliníku [3]	11
<i>Obr. 8</i> Soustava Al- Mg [3]	12
<i>Obr. 9</i> Soustava Al- Mn [3]	13
<i>Obr. 10</i> Soustava Al-Cu [3]	13
<i>Obr. 11</i> Binární rovnovážný diagram soustavy Al-Si [1]	17
<i>Obr. 12</i> Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [5]	19
<i>Obr. 13</i> Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [5]	20
<i>Obr. 14</i> Vyloučení precipitační fáze: a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) částečně koherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát [5]	20
<i>Obr. 15</i> Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [5]	21
<i>Obr. 16</i> Vliv Mg na mechanické vlastnosti po vytvrzení [5]	21
<i>Obr. 17</i> Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla [5]	22
<i>Obr. 18</i> Část rovnovážného diagramu slitiny Al-Cu.....	23
<i>Obr. 19</i> Diagram anizotermického rozpadu tuhého roztoku slitiny AlCu4Mg1 (D16) a AlZn4Mg2.....	23
<i>Obr. 20</i> Průběh přirozeného stárnutí u slitiny AlZnMgCu.....	24
<i>Obr. 21</i> Vliv stárnutí na pevnost slitiny AlCu4Mg1	25
<i>Obr. 22</i> Určení optimální doby ohřevu při retrogresi.....	25
<i>Obr. 23</i> Polotovary výkovku, výkovek a finální výrobek kabelové spojky.....	26
<i>Obr. 24</i> Místo odebrání vzorku pro statickou zkoušku tahem.....	29
<i>Obr. 25</i> Statická zkouška tahem testovaného materiálu EN AW 6082	30
<i>Obr. 26</i> Zařízení použité pro ohřev materiálu.....	31
<i>Obr. 27</i> Oblast měření tvrdosti dle Brinella HBW2,5/62,5 na výkovku.....	32
<i>Obr. 28</i> Ukázka měření tvrdosti na tvrdoměru HPO 250 a příklad vyhodnocení výsledku.....	32
<i>Obr. 29</i> Graf vlivu teploty umělého stárnutí na časový průběh tvrdosti výkovků z	



<i>materiálu EN AW 6082 (RŽ-rozpouštěcí žíhání).....</i>	36
Obr. 30 <i>Graf vlivu teploty materiálu před ochlazením na časový průběh tvrdosti výkovků z materiálu EN AW 6082 (RŽ-rozpouštěcí žíhání).....</i>	39
Obr. 31 <i>Graf vlivu doby rozpouštěcího žíhání na časový průběh tvrdosti výkovků z materiálu EN AW 6082 (RŽ-rozpouštěcí žíhání).....</i>	42