

Posouzení vlivu přirozeného a umělého stárnutí na mechanické vlastnosti vytvrditelné slitiny AW 6005

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Daniel Vojtíšek

Vedoucí práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

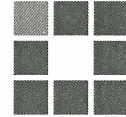
Posouzení vlivu přirozeného a umělého stárnutí na mechanické vlastnosti vytvrditelné slitiny AW 6005

Jméno a příjmení: **Daniel Vojtíšek**
Osobní číslo: S18000371
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s výrobou hliníku, rozdělením slitin hliníku a jejich využitím v průmyslové praxi.
2. Prostudujte možnosti tepelného zpracování slitin hliníku za účelem zvýšení jejich mechanických vlastností.
3. Navrhněte a proveďte experimenty pro zjištění vlivu podmínek vytvrzování na mechanické vlastnosti slitiny AW 6005.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných kovů* [skripta]. Akademické nakladatelství Cerm, Brno, 2004.
- [2] MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd., Prešov 2005.
- [3] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [4] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. s. 350. ISBN 80-7204-130-4.
- [5] ASM HANDBOOK. Volume 8 – *Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [6] Mezinárodní normy.

Vedoucí práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

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 nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS/STAG se shodují.

23. prosince 2019

Daniel Vojtíšek

Anotace

Předmětem této bakalářské práce je sledování vlivu technologických podmínek tepelného zpracování, tzv. vytvrzování, na mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6005 (AlMgSi). Konstrukční polotovary z této slitiny jsou ve většině případů dodávány ve vytvrzeném stavu (ve stavu T6). V případě, že jsou tyto polotovary při dalším technologickém zpracování vystaveny teplotním cyklům, dochází k poklesu jejich mechanických vlastností. Cílem práce je nalézt technologické parametry vytvrzování, které povedou k obnově mechanických vlastností na původní hodnoty, nebo alespoň k jejich zvýšení.

Práce je rozdělena do dvou částí na teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou popsány způsoby výroby hliníku, slitiny hliníku a jejich rozdělení. V samostatné kapitole jsou dále uvedeny způsoby tepelného zpracování slitin hliníku.

V rámci experimentální části práce je sledován vliv teploty rozpouštěcího žíhání a doby setrvání na této teplotě na mechanické vlastnosti a dále vliv přirozeného a umělého stárnutí na změnu mechanických vlastností. Vyhodnocení mechanických vlastností je provedeno pomocí měření tvrdosti dle Brinella a pomocí statické zkoušky tahem.

Klíčová slova

Slitina EN AW 6005, vytvrzování, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti, měření tvrdosti, Brinell, statická zkouška tahem.

Annotation

The aim of this bachelor thesis is to monitor the influence of technological conditions of heat treatment, so called hardening, on mechanical properties of alloy EN AW 6005 (AlMgSi). Semi-finished casting products of this alloy are in most cases delivered in a hardened state (T6 Hardness). When these semi-finished products are exposed to thermal cycles during further technological processing, their mechanical properties deteriorate. The aim of this thesis is to find technological parameters of heat treatment process, which would lead to restoration of mechanical properties to original values or at least to their increase.

The thesis is divided into two parts - theoretical and experimental. The theoretical part describes methods of aluminum production, aluminum alloy and their classification. There is also a separate chapter that describes the methods of heat treatment of aluminum alloys.

Experimental part of the thesis studies the influence of solution annealing temperature and time duration at this temperature on the mechanical properties and the influence of natural and artificial aging on mechanical properties. Mechanical properties are evaluated by Brinell hardness measurement method and static tensile testing.

Key Words

Alloy EN AW 6005, hardening, heat treatment, mechanical properties, hardness measurement, Brinell, static tensile test.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Ivě Novákové, Ph.D., za její odbornou pomoc, věcné připomínky, ochotu, trpělivost a poskytnuté materiály ke zpracování této bakalářské práce. Dále bych jí chtěl poděkovat za její volný čas věnovaný konzultacím ohledně mé bakalářské práce.

Obsah

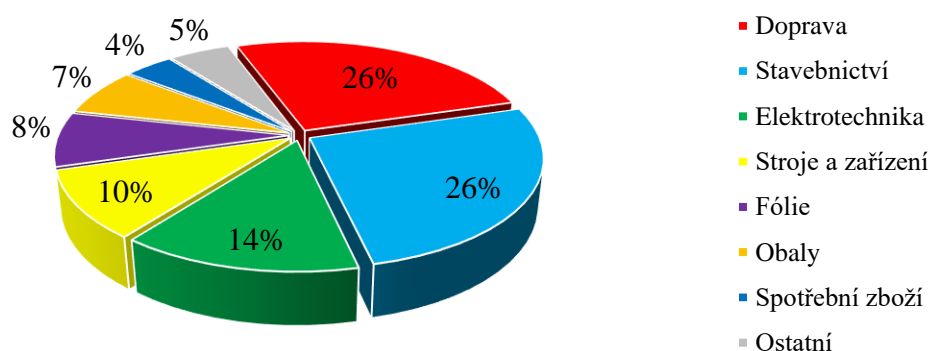
Seznam zkratek	9
1 Úvod	10
2 Teoretická část	12
2.1 Hliník a jeho výroba.....	12
2.2 Slitiny hliníku	16
2.2.1 Slitiny hliníku k tváření	18
2.2.2 Slitiny hliníku na odlitky	21
2.3 Tepelné zpracování slitin hliníku.....	23
2.3.1 Žihání	24
2.3.2 Vytvrzování	26
3 Experimentální část	29
3.1 Charakteristika materiálu.....	29
3.2 Tepelné zpracování	30
3.3 Měření tvrdosti.....	31
3.3.1 Tvrdost základního materiálu	32
3.3.2 Tvrdost po tepelném zpracování	33
3.4 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti	37
3.5 Statická zkouška tahem	40
3.5.1 Naměřené hodnoty statické zkoušky tahem	41
3.6 Vyhodnocení statické zkoušky tahem.....	42
4 Diskuze výsledků.....	44
5 Závěr	47
Seznam použité literatury	48

Seznam zkratek

$A_{30\text{mm}}$	Celková tažnost v procentech měřené délky 30 mm	[%]
A_g	Homogenní tažnost	[%]
α	Tuhý roztok	
ČSN	Česká státní norma	
d_0	Počáteční průměr zkušebního vzorku	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
EN	Evropská norma	
G	Elektrická vodivost	[S/m]
γ	Koeficient tepelné roztažnosti	[$10^{-6}/\text{K}$]
HB	Tvrдость podle Brinella	
ISO	International Organization for standardization	
L_0	Počáteční měřená délka zkušebního vzorku	[mm]
L_c	Zkoušená délka	[mm]
L_t	Celková délka zkušebního vzorku	[mm]
λ	Tepelná vodivost	[W/m.K]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
RŽ	Rozpouštěcí žihání	
ρ	Hustota	[kg/m ³]
s	Směrodatná odchylka	
S_0	Počáteční průřezová plocha zkušebního vzorku	[mm ²]
\bar{x}	Aritmetický průměr	
TZ	Tepelné zpracování	

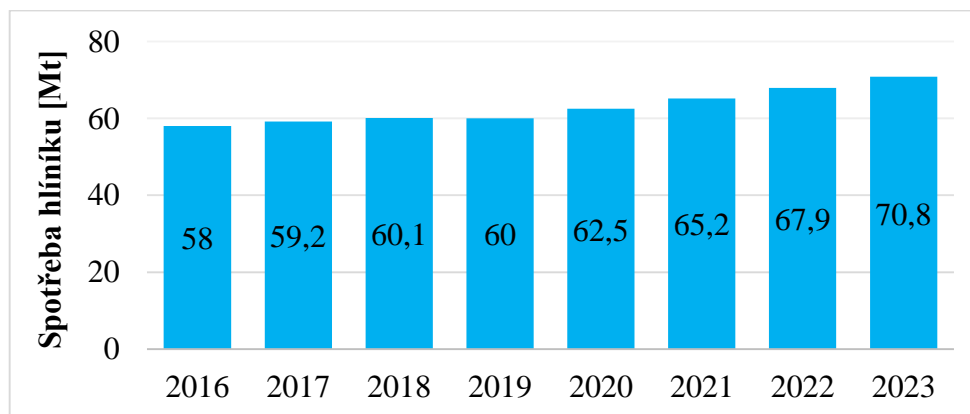
1 Úvod

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem na zemi, tvoří 8 % zemské kůry. Jeho slitiny se vyskytují všude v našem okolí u výrobků používaných v každodenním životě. Slitiny hliníku jsou po slitinách železa druhým nejpoužívanějším konstrukčním materiálem dnešní doby. Největší využití hliníku a jeho slitin se nalézá v oblasti dopravního průmyslu a stavebnictví, kde slitiny hliníku vynikají zejména malou hmotností a dobrými mechanickými vlastnostmi. [1] Podle statistiky světové produkce polotovarů ze slitin hliníku z roku 2017 bylo v odvětví dopravy a stavebnictví dohromady spotřebováno 52 % z celosvětové produkce. Dále bylo 14 % spotřebováno v oblasti elektrotechniky a 10 % na stroje a zařízení, viz obr. 1.1. [2]



Obr.1.1 Světová produkce polotovarů ze slitin hliníku v roce 2017 podle odvětví [2]

Podle statistiky světové spotřeby hliníku bylo v roce 2018 spotřebováno cca 60,1 Mt hliníku a i v následujících letech se očekává meziroční růst spotřeby, viz obr. 1.2. [3]



Obr.1.2 Předpokládaná světová spotřeba hliníku [3]

Konstrukční polotovary ze slitin hliníku jsou dodávány převážně ve vytvrzeném stavu. Pokud jsou během jejich sestavování do konstrukčních celků vystaveny teplotním cyklům, dochází k poklesu jejich mechanických vlastností.

Předložená bakalářská práce byla řešena v rámci spolupráce s firmou VÚKV a.s. Při aplikaci svařování na materiál EN AW 6005 T6, dochází k výraznému poklesu mechanických vlastností zejména v tepelně ovlivněné oblasti. Cílem této práce bylo najít optimální parametry tepelného zpracování, kterým by bylo možné mechanické vlastnosti obnovit, nebo se alespoň co nejvíce přiblížit hodnotám výchozího materiálu. Navržené parametry tepelného zpracování budou následně ve firmě aplikovány na svarové spoje.

2 Teoretická část

V teoretické části jsou s ohledem na téma práce popsány základní vlastnosti hliníku a jeho výroba. Dále jsou zde popsány slitiny hliníku, jejich rozdělení a využití v průmyslové praxi. Teoretická část práce se dále věnuje tepelnému zpracování, jež má vliv na mechanické vlastnosti výrobků.

2.1 Hliník a jeho výroba

Hliník (chemická značka Al) je stříbrolesklý, lehký a na vzduchu stálý kov, jehož hustota je $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a teplota tání $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Slitiny hliníku se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi. Krystalická mřížka hliníku je kubická plošně centrovaná.

Hliník má velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. U čistého hliníku je při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahována tepelná vodivost $235 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a jeho součinitel tepelné roztažnosti se při normální teplotě pohybuje kolem $23\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Hliník s čistotou 99,99 % má při normální teplotě součinitel elektrické vodivosti $2,6\cdot 10^{-8} \text{ }\Omega\cdot\text{m}$, což je přibližně 60 % elektrické vodivosti mědi. Součinitel elektrické vodivosti je ovlivněný přísadovými prvky, které jeho vodivost snižují.

Odolnost proti korozi je dána jeho chemickými vlastnostmi. Hliník s kyslíkem tvoří stabilní oxid Al_2O_3 a tloušťka oxidické vrstvy se při normální teplotě tvoří na povrchu součásti přibližně do hloubky 10 nm. Oxidická vrstva také zabraňuje hloubkové oxidaci a zajišťuje odolnost proti povětrnostním vlivům. Ve vodných roztocích je chemická odolnost závislá na vodíkovém exponentu elektrolytu, odolnost hliníku je v rozmezí od 4,5 do 8,5 pH dobrá a v zásaditém prostředí částečná.

Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou nevyhovující. Pevnost v tahu u čistého hliníku se pohybuje pod 100 MPa a tvrdost je 20 až 30 HB. Ačkoli jsou jeho mechanické vlastnosti špatné (vlastnosti pro tváření jsou však dobré), dosahuje tažnost nad 20 %. Čistý hliník se nedá použít jako konstrukční materiál a v praxi se používá jen díky dobrým fyzikálním vlastnostem [4, 5].

Ačkoli se hliník v zemské kůře vyskytuje procentuálně nejvíce, v přírodě zhruba ve 250 různých minerálech, teprve v roce 1825 se chemikovi Christianovi Oerstedovi podařilo získat malé množství redukci chloridu hliníku amalgámem draslíku. V roce 1886 byl

objeven nový způsob výroby hliníku elektrolýzou nezávisle na sobě Paulem Heroultem ve Francii a Charlesem Hallem v USA, což stálo za zrodem průmyslové výroby hliníku, která se používá i dnes. [1, 4]

Výroba hliníku z primárních surovin je energeticky velmi náročná. Na výrobu 1 tuny hliníku se spotřebovávají přibližně 4 tuny bauxitu, cca 20 GJ tepelné energie a 14 MWh elektrické energie. Získaný hliník má čistotu až 99,9 %. [4]

Výroba hliníku je tvořena dvěma nezávislými procesy. Prvním procesem je příprava čistého Al_2O_3 z bauxitu. Jedná se o hydratovaný oxid hlinitý, ve kterém je obsah Al_2O_3 kolem 50 %. [4] Získání čistého oxidu hlinitého z rud je možné provést několika způsoby, ale průmyslově se používá jen několik metod. Čistý oxid hlinitý se dá z rud získat buď zásaditými, kyselými, nebo elektrotermickými metodami. V dnešní době se nejvíce používají zásadité metody výroby hliníku. Mezi metody k získání Al_2O_3 patří např.: [1]

- Bayerova metoda,
- spékací metoda.

Bayerova metoda byla vynalezena rakouským chemikem Karlem Josefem Bayerem v 19. století v Rusku. Výchozí surovinou pro tento proces je kvalitní bauxit, který obsahuje malé množství oxidu křemičitého v rozsahu 2 až 5 %. Jedná se o velmi hospodárnou a jednoduchou metodu, kterou lze získat velmi kvalitní oxid hlinitý. [1]

Bayerova metoda je uzavřený cyklus loužení oxidu hlinitého vázaného v bauxitu loužicími roztoky, při kterém se tvoří hlinitanový roztok. Loužicím roztokem je hydroxid sodný a loužení probíhá za teplot vyšších než 240 °C. Po loužení se oddělí od hlinitanového roztoku usazováním, zahušťováním, nebo filtrací červený kal, který obsahuje nerozpustitelné složky bauxitu. Dalším krokem je krystalizace $\text{Al}(\text{OH})_3$ z hlinitanového roztoku při stálém míchání v přítomnosti očkovačla, kterým je čerstvě vyloučený hydroxid hlinitý. Očkováním se zjemňují primární krystaly záměrným vnášením zárodků krystalů, což má za následek zjemnění struktury. Po skončení precipitace se $\text{Al}(\text{OH})_3$ se sníženým obsahem Al_2O_3 odfiltruje z přesyceného hlinitanového roztoku. Matečný roztok se většinou po odstranění nečistot zahustí odpařováním a po vyrovnání ztrát kaustického Na_2O přísádkem NaOH se opět vrátí na začátek cyklu do procesu rozkladu bauxitu loužením a tvorbě hlinitanového roztoku. [1]

Výroba Al_2O_3 spékací metodou je termický zásaditý způsob výroby, který se využívá při zpracování chudších bauxitů s vyšším obsahem SiO_2 . Při této metodě se spéká bauxit se sodou a vápencem, ze kterého se získává spečenec, který je dobře rozpustný ve vodě. [1]

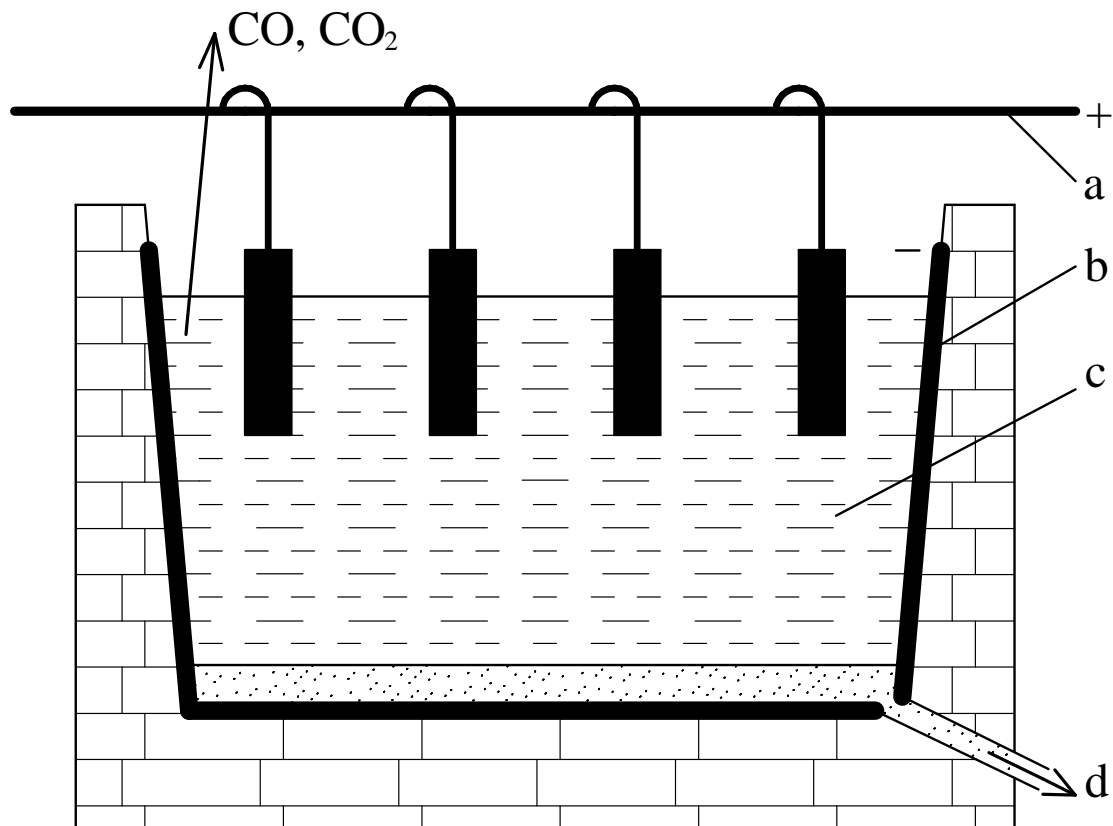
Spečenec se ve vodě vylouží a vznikne z něj hlinitanový roztok s nerozpustným zbytkem nazývaným hnědý kal, který se od červeného kalu odlišuje nejen barvou, ale také nižším obsahem Fe_2O_3 a Na_2O . [6] Hnědý kal se od hlinitanového roztoku oddělí, dále se hlinitanový roztok rozkládá karbonizací za pomoci CO_2 ze spalin spékací pece, čímž vzniká hydroxid hlinitý a mateční roztok (karbonát sodný). Hydroxid hlinitý se po odfiltrování a promytí kalcinuje. Karbonát sodný se recykluje na začátek procesu do větve mokrého mletí a na spékání. Přidává se do procesu kvůli reakci s Al_2O_3 a k vytvoření pevného hlinitanu sodného. Vápenec se do procesu přidává kvůli reakci s křemíkem obsaženém v bauxitu. Touto reakcí se oddělí SiO_2 , jelikož křemičitan nereaguje s loužicím roztokem a zůstává v hnědém kalu. [1]

Druhým stupněm výroby je elektrolytická výroba hliníku z Al_2O_3 . Výroba hliníku elektrolyzou je dosud nejpoužívanější metodou. Na výrobu se používají dva druhy elektrolyzérů, Söderbergovy horizontální nebo vertikální anody s předem vypálenými anodami, které se v současnosti používají více díky své proudové účinnosti a kontrole emisí. [1]

Jelikož je hliník neušlechtilý lehký kov, není ho možné vyrobit elektrolyzou vodních roztoků, ale elektrolyzou z roztavených solí. Nejvýhodnější roztavenou solí pro výrobu je kryolit Na_3AlF_6 , do které se přidává oxid hlinitý a přísady na zlepšení vlastností elektrolytu, nejčastěji na bázi fluoridů a chloridu sodíku, hořčíku, vápníku, lithia atd. Elektrolyza se provádí v elektrolyzérech, kde se nachází roztavený kryolit při teplotě přibližně $960\text{ }^\circ\text{C}$. Elektrolyzér je vytvářen uzavřeným systémem uhlíkové katody, která tvoří dno elektrolyzéry a uhlíkové anody ponořené do roztavené koupele. Oxid hlinitý je periodicky přidáván do koupele, ve které se rozpouští v kryolitu a vlivem napětí na elektrolyzéry se rozkládá na kovový hliník usazující se na dně u katody a kyslík oxidující na anodě, viz obr. 2.1. [1]

Při elektrolyze v elektrolyzních pecích dochází ke spotřebě anody. Elektrolyt se během procesu nespotebovává a pouze se doplňují jeho modifikátory, jako jsou fluorid hlinitý a další přísady. Vany elektrolyzéry se po určité době ve výrobním procesu vybourávají

a opět kompletují v pravidelných intervalech. Ve výrobě se používají většinou série elektrolyzních pecí. [1]



Obr. 2.1 Schéma elektrolyzáru pro výrobu hliníku [1]

a) uhlíková anoda, b) uhlíková katoda, c) tavenina oxidu hlinitého, d) kapalný hliník

Pro zvýšení kvality a čistoty je tavenina hliníku z elektrolyzy před odléváním přímo zpracovávána. Tento proces se nazývá rafinace hliníku.

Hliníkárný produkují primární hliník s čistotou 99,7 až 99,9 %. V roztaveném hliníku se mohou nalézat nečistoty způsobené výskytem rozpuštěných plynů, kovů nebo endogenních a exogenních nekovových vměstků, často také oxidů a dalších sloučenin, jako jsou nitridy, karbidy, sulfidy, fosfidy, boridy a halogenidy. [1]

Exogenní vměstky se do taveniny dostávají zvenčí během tavení a odlévání, jedná se například o částice žáruvzdorných materiálů ze zdí tavících pecí nebo licích pánví. Endogenní vměstky vznikají oxidací hliníku a dalších prvků vzájemnými chemickými reakcemi mezi jednotlivými prvky v samotné tavenině, mohou to být například zbytky solí. Nejčastějším typem vměstků v tavenině jsou oxidy hliníku. [4]

Čistění a úprava taveniny hliníku je velmi důležitá například u výrobků komplikovaných tvarů, fólií a drátů, u nichž prvky a sloučeniny nečistot mohou mít zásadní vliv na kvalitu.

Nečistoty z tavenin hliníku se odstraňují rozličnými metodami. Pro nerozpustné vměstky se používá usazování, vyplavení nebo filtrace. Tavenina hliníku v peci se rafinuje probubláváním chemicky inertním nebo reaktivním plynem, reaktivními solemi či aplikací vakua a dále se filtruje. [1]

Mezinárodní standardy rozlišují nelegovaný hliník podle čistoty. Čistý hliník má čistotu 99,0 až 99,9 % a vysoko čistý hliník získaný další rafinací má čistotu 99,97 %. Vysoko čistý hliník se používá pro výrobu reflektorů nebo elektrolytických kondenzátorů. V elektronickém a optoelektronickém průmyslu je pro výrobu kondenzátorů, paměťových čipů a polovodičů vyžadována vyšší čistota, až 99,9999 % Al. Tato čistota se dosahuje dalším čištěním hliníku a rafinováním jinými metodami. Při rafinování frakční krystalizací se dosahuje čistoty 99,96 – 99,99 %, třívrstvou elektrorafinací 99,99 – 99,998 %, elektrolýzou v organických médiích 99,999 % a zonální rafinací 99,999 až 99,9999 %. [1]

2.2 Slitiny hliníku

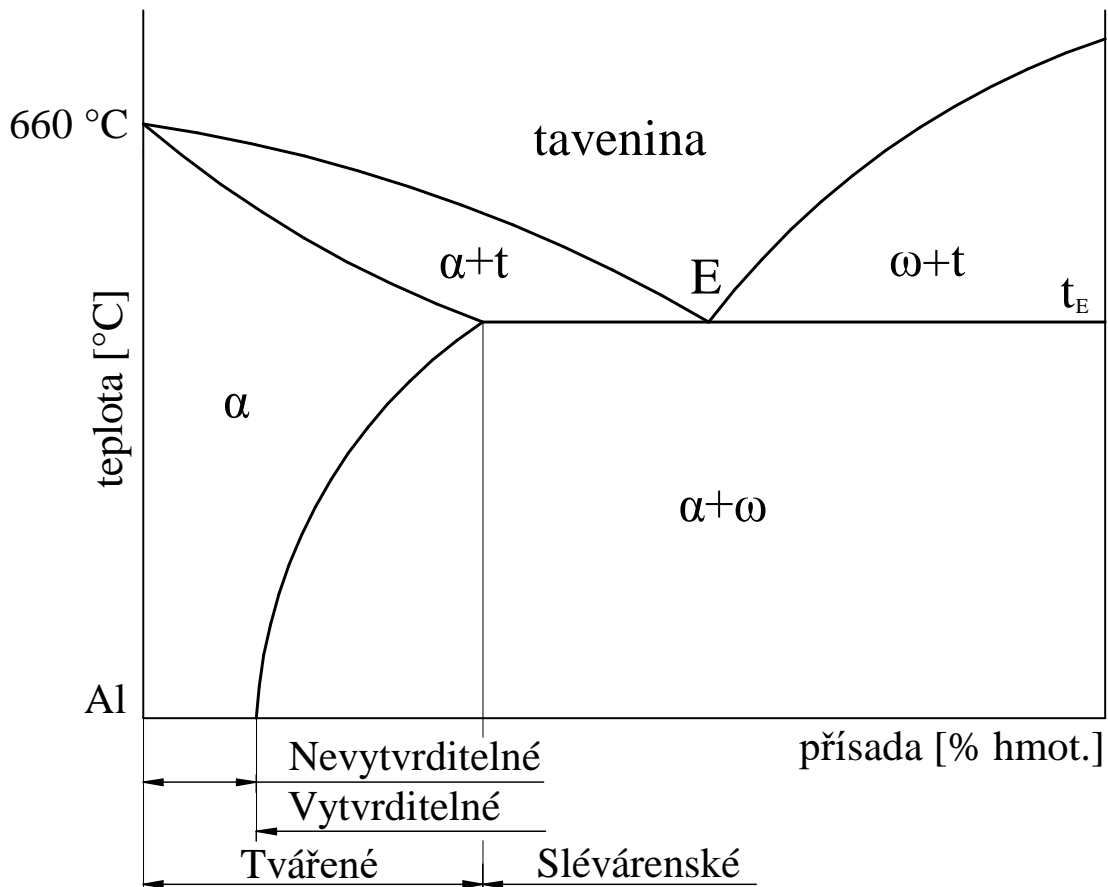
Slitiny hliníku mají oproti čistému hliníku lepší mechanické vlastnosti, a proto mají také větší technické uplatnění. [5]

Slitiny hliníku se rozdělují podle způsobu zpracování na dvě skupiny – na slitiny určené k tváření a k odlévání. Slitiny určené k tváření mají většinou menší výskyt přísadových prvků ve slitině a jsou tvořeny homogenním tuhým roztokem nebo homogenním tuhým roztokem za vyšších teplot. [4, 5]

Ve druhé skupině jsou slitiny hliníku slévárenské. Slitiny na odlévání mají vyšší obsah přísadových prvků a jejich schopnost plastické deformace je nižší než u slitin k tváření. U těchto slitin jsou důležité jejich slévárenské vlastnosti. Některé slitiny hliníku jsou umístěny na rozhraní obou skupin a mohou se používat ke tváření i k odlévání. [5]

Dále se také slitiny hliníku rozdělují na slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné, přičemž vytvrzováním se zlepšuje jejich tvrdost a pevnost. Vytvrzování souvisí s chemickým složením slitin, tedy jejich polohou v rovnovážném diagramu odpovídající soustavy. Tato schopnost je také podmíněna dostatečným přesycením tuhého roztoku na bázi hliníku

přísadovými prvky dosahováním při rychlém ochlazení slitiny z oblasti výskytu tuhého roztoku α . Pro binární slitiny lze použít diagram binárních slitin hliníku, viz obr. 2.2. [7]



Obr. 2.2 Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku [5]

Vlastnosti slitin hliníku jsou ovlivněny přísadovými prvky:

Měď – zvyšuje pevnost a tvrdost slitiny hliníku, ale zhoršuje její tvárnost a odolnost vůči korozi. Obsah mědi ve slitinách určených k tváření je 6 % a ve slitinách na odlévání 12 %. [5]

Hořčík – jeho malé množství se nachází téměř ve všech slitinách hliníku. Výskyt hořčíku ve slitině zlepšuje podmínky pro tepelné zpracování a zvyšuje odolnost vůči korozi. Obsah hořčíku ve slitinách pro tváření je až 6 % a ve slitinách pro odlévání 11 %. [5]

Mangan – přítomností manganu ve slitině se zlepšuje její pevnost, tvárnost a odolnost vůči korozi. U slitin určených k vytvrzování zjemňuje zrna a zabraňuje jeho růstu při ohřevu. Avšak při vyšší koncentraci zvyšuje křehkost a zhoršuje slévateľnost slitin. [5]

Zinek – u tepelně zpracovávaných slitin se jedná o hlavní legující prvek. Přítomností zinku ve slitině se zvyšuje její pevnost, ale zhoršuje se houževnatost a odolnost vůči korozi. Společně s hořčíkem vytváří intermetalickou fázi $MgZn_2$. Tvářitelnost těchto slitin je obtížnější. [5, 8]

Křemík – zvyšuje pevnost tuhého roztoku a zlepšuje odolnost proti korozi. Křemík ve větším obsahu ve slitině zvyšuje její křehkost. Obsah křemíku ve slitině hliníku přispívá k dobré slévatelnosti, jeho ideální obsah je 11 až 13 % Si. Slitiny určené k tváření obsahují malé množství křemíku a to do 1 %. [5, 8]

Železo – zvyšuje pevnost a zlepšuje tvárnost, ale zhoršuje houževnatost a odolnost vůči korozi. U slitin určených k tváření je obsah železa minimální. U slitin k odlévání je jeho obsah do 1 %. [5, 8]

Nikl – u některých slitin zvyšuje mechanické vlastnosti, přispívá k tepelné stabilitě a podporuje odolnost vůči korozi. [5]

Hliník a jeho slitiny se mohou označovat podle norem ČSN nebo evropskými normami ČSN EN. Při označování hliníku a jeho slitin mají však evropské normy vždy přednost. [1]

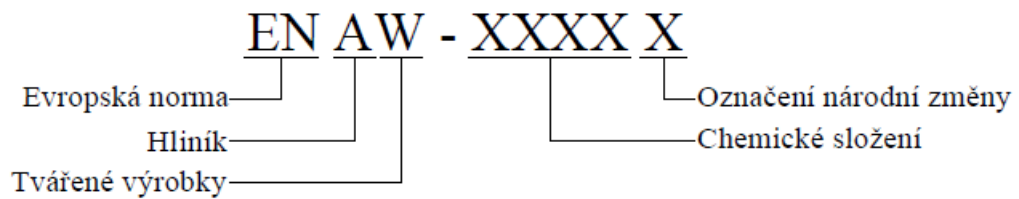
2.2.1 Slitiny hliníku k tváření

Slitiny hliníku určené k tváření se označují podle ČSN EN 573. Podle této normy jsou rozděleny do osmi skupin podle hlavního přísadového prvku, viz tab. 2.1.

Tab. 2.1 Skupiny slitin hliníku pro tváření dle ČSN EN 573-1-2-3 [9]

Skupina slitin	Hlavní skupinové prvky
1XXX	Hliník minimálně 99,00 % a více
2XXX	Měď
3XXX	Mangan
4XXX	Křemík
5XXX	Hořčík
6XXX	Hořčík a křemík
7XXX	Zinek
8XXX	Ostatní prvky

Označení začíná předponou EN a za mezerou následují písmeny AW a další čtyři číslice, které jsou odděleny od písmen pomlčkou, viz obr. 2.4. Toto označení se může ještě doplnit chemickým označením. [1]



Obr. 2.3 Označování slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1-2-3 [9]

U tohoto označování slitin hliníku pro tváření udává první ze čtyř číslic skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků, viz tab. 1. Ve skupině slitin 1XXX vyjadřují dvě poslední číslice v procentech minimální obsah hliníku ve slitině a jsou shodné se dvěma číslicemi za desetinnou čárkou minimálního procentního obsahu. Druhá číslice vyjadřuje změnu v mezním obsahu doprovodných nebo slitinových prvků. U slitin 2XXX a 8XXX určují dvě poslední číslice pouze různé hliníkové slitiny ve skupině. Druhá číslice označuje modifikaci slitiny. [9]

Slitiny pro tváření se podle chemického složení značí předponou EN a za mezerou následují písmena AW, za nimiž jsou odděleny pomlčkou čtyři číslice, za které se udávají přísadové prvky seřazené sestupně podle jejich obsahu ve slitině za mezerou v hranaté závorce. Značka Al v hranaté závorce je od ostatních chemických značek slitinového prvku oddělena mezerou. [10] Za příslušný přísadový prvek se udává jeho procentuální množství, jestliže je jeho obsah prvku ve slitině větší jak 1 %. Pokud je menší jak 1 %, za příslušný prvek se číslo neuvádí. [1]

Slitiny hliníku pro tváření se dělí na dvě podskupiny. Mezi první podskupinu slitin hliníku k tváření patří slitiny s nízkou pevností a dobrou odolností proti korozi, které neobsahují měď a z tohoto důvodu mají vynikající odolnost vůči korozi i bez povrchové ochrany. Tyto slitiny se nedají výrazně zpevnit tepelným zpracováním. Vynikají dobrou svařitelností a jsou odolné vůči vibračním zatížením. Patří mezi ně dvousložkové slitiny Al-Mg a Al-Mn. [7]

Slitiny Al-Mg – nemají velkou pevnost v tahu, která je v žíhaném stavu 140 až 200 MPa, kterou lze zvýšit tvářením za studena až na 420 MPa. U těchto slitin se vytvrzování nepoužívá, jelikož i malé zvýšení pevnosti je doprovázeno poklesem tvárnosti i jejich odolností proti korozi. Používají se slitiny s obsahem hořčíku do 6 %. Slitiny, které mají

vyšší obsah hliníku nad 6 %, mají větší sklon ke korozi po hranicích zrn, zejména při mechanickém zatěžování a z toho důvodu se obvykle nepoužívají. [7]

Slitiny Al-Mn – se tepelně nevytvrzují, jelikož velké přesycení tuhého roztoku α umožňuje pouze nepodstatné zvýšení pevnosti. Vlastnosti těchto slitin jsou podobné jako u slitin Al-Mg. Průmyslově se vyrábí pouze slitina AlMn1, které má v měkkém stavu pevnost v tahu 130 MPa a ve stavu deformačně zpevněném až 200 MPa. Často se tato slitina používá jako pevnější náhrada čistého hliníku. [7]

Druhou podskupinu slitin hliníku k tváření tvoří slitiny s vyšší a vysokou pevností, ale s nízkou odolností vůči korozi. Nízká odolnost proti korozi je dána výskytem mědi ve slitině. Mezi tuto podskupinu patří vícesložkové vytvrditelné slitiny: [7]

Slitiny Al-Cu-Mg – jsou nejvíce používanými materiály této podskupiny slitin hliníku. Tyto slitiny se označují jako duraly (AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn), které dosahují po vytvrzení tepelným zpracováním pevnosti v tahu až 530 MPa. Z těchto materiálů se vyrábí hlavně výlisky a plechy. Jelikož jejich odolnost vůči korozi je minimální, chrání se proti korozi tenkou vrstvou hliníku (plátované duraly). [7]

Slitiny Al-Cu-Mg-Ni – tvořené přísadovým prvkem niklu do duralové báze. Používají se pro výrobky dlouhodobě vystavované teplotám až 300 °C, jako jsou například součásti motorů. [7]

Slitiny Al-Zn-Mg-Cu – jsou nejpevnější slitiny hliníku. U těchto slitin je po tepelném zpracování dosahována pevnost v tahu 500 až 580 MPa. Nevýhodou těchto slitin je jejich sklon ke korozi pod napětím, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost než u duralů. [7]

Slitiny Al-Mg-Si – lze vytvrdit až na pevnost v tahu 350 MPa. Využívají se zejména v letectví, stavebnictví a v bytové architektuře. [7]

V následujících odstavcích jsou uvedeny podrobnější informace o slitině **EN AW 6005** (AlSiMg), která byla použita v rámci experimentu. Její chemické složení dle normy je uvedeno v tab. 2.2 a fyzikální vlastnosti v tab. 2.3. Slitina patří do třídy slitin 6XXX, jejichž hlavními přísadovými prvky jsou hořčík a křemík. Významnou vlastností slitin této řady je jejich výborná schopnost plastické deformace. [5]

Tab. 2.2 Chemické složení slitiny EN AW 6005 v hm. [%] podle ČSN 573-3 [11]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní	
								Jednotlivě	Celkem
0,6-0,9	0,35	0,10	0,10	0,4-0,6	0,10	0,10	0,10	0,05	0,15

Tab. 2.3 Fyzikální vlastnosti slitiny EN AW 6005 (referenční hodnoty) [12]

Hustota ρ [kg/m ³]	2700
Modul pružnosti v tahu E [MPa]	~ 70 000
Elektrická vodivost (20 °C) G [MS/m]	26 - 32
Teplota tání [°C]	585 - 650
Koeficient tepelné roztažnosti γ [10 ⁻⁶ /K]	23
Tepelná vodivost λ [W/m.K]	180 - 220

Tvárnost této slitiny je dobrá, ale po tepelném zpracování, při němž se zvýší pevnost, se snižuje. Odolnost proti korozi této slitiny je velmi dobrá. Obrobitelnost slitiny EN AW 6005 je dostatečná a vytvrzená slitina je vhodná ke svařování. Z této slitiny se vyrábějí lisované tyče, trubky a profily. [13, 12]

Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6005 jsou podmíněné způsobem a druhem tepelného zpracování, viz tab. 2.4.

Tab. 2.4 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6005 podle EN 755-2 [12]

Stav	Tloušťka stěny t [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrдость HB
T4	≤ 25	90	180	15	50
T6	≤ 5	225	270	8	90
	$5 < t \leq 10$	215	260	8	85
	$10 < t \leq 25$	200	250	8	85

2.2.2 Slitiny hliníku na odlitky

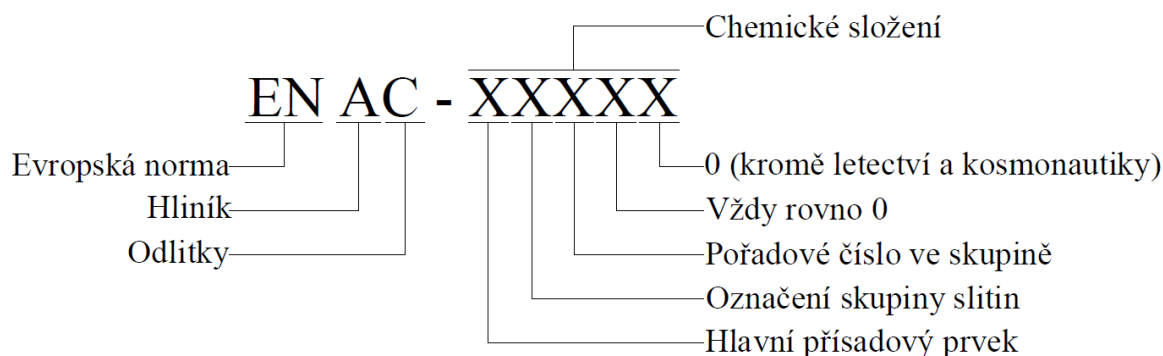
Tvarové odlitky ze slitin hliníku jsou odlévány gravitačně do pískových, skořepinových a kovových forem nebo tlakovým litím. Slitiny hliníku určené k odlévání se dle normy ČSN EN 1780 rozdělují podle hlavního přísadového prvku do několika skupin, viz tab. 2.5.

Tab. 2.5 Skupiny slitin hliníku na odlitky dle ČSN EN 1780-1-2-3 [9]

Skupina slitin	Hlavní skupinové prvky
2XXX	Měď
4XXX	Křemík
5XXX	Hořčík
7XXX	Zinek

Na rozdíl od tvářených výrobků mají odlitky menší mechanické vlastnosti, které jsou ovlivněny druhem lití. U odlitků je pevnost v tahu dosahována až 250 MPa. Nejmenší pevnost v tahu vzniká při lití do pískových forem, kde se vytváří hrubá struktura. Jemnější struktury s lepšími vlastnostmi se dosahuje u lití do kovových forem nebo tlakovým litím. [7]

Podle normy ČSN EN 1780 používané k označování odlitků a slitin hliníku je značení tvořeno předponou EN a za mezerou písmeny AC a pěti číslicemi, které jsou od písmen odděleny pomlčkou, viz obr. 2.5. Za číslicemi se může označení doplnit ještě chemickým označením. [14]



Obr. 2.4 Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1780-1-2-3 [14]

Podle chemického značení se za EN AC a pětimístným číselným označením udává chemické složení v hranaté závorce. Označení v hranaté závorce se musí skládat ze značky Al, která se píše před značkami hlavního slitinového prvku nebo prvků oddělena mezerou. [14] Přísadové prvky jsou seřazeny od hlavního přísadového prvku k vedlejším prvkům, které jsou seřazeny podle obsahu ve slitině v sestupném pořadí. [4]

Slitiny hliníku pro odlitky se rozdělují podle typu hlavního legujícího prvku:

Slitiny Al-Si – jsou označovány jako binární siluminy a dělí se na podeutektické, které mají obsah křemíku menší než 11,7 %, eutektické s obsahem okolo 11,7 % a nadeutektické

s obsahem křemíku větším jak 11,7 až do 24 %. Eutektické siluminy mají nejlepší slévárenské vlastnosti. [7]

Slitiny Al-Cu – jako binární slitiny nemají velké využití. Většinou tyto slitiny obsahují nikl a železo a jsou určeny k dlouhodobému použití za teplot 340 až 450 °C. Slitiny mají širší interval krystalizace 90 až 100 °C, což má za následek horší slévárenské vlastnosti, menší zabíhavost, větší sklon ke vzniku trhlin za tepla při tuhnutí a vznik mikropórovitosti. Největším nedostatkem slitin hliníku obsahujících měď je jejich špatná odolnost proti korozi. Odlitky vyrobené z těchto slitin musí být povrchově chráněny. Z těchto slitin se vyrábějí hlavy válců a písty větších rozměrů. [7]

Slitiny Al-Mg – ze všech slévárenských slitin hliníku dosahují nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost. Používají se pro odlitky s náhlými změnami průřezu namáhanými rázem a odlitky odolné vůči koroznímu prostředí. Jsou lépe obrobitelné než slitiny Al-Si. Při tavení, lití a krystalizaci, ale dochází ke vzniku naplynění a oxidace, jenž má za následek horší slévárenské vlastnosti, větší pórovitost a snížení těsnosti odlitků. Pro zlepšení zabíhavosti, snížení sklonu k tvorbě trhlin za tepla a zvýšení hustoty odlitků se do slitiny přidává přísada křemíku. Z těchto slitin se vyrábějí odlitky namáhané mechanicky za vyšších teplot, žebrované hlavy válců, odlitky vystavené povětrnostním vlivům, součásti vnitřní a vnější architektury, fotopřístroje a nádobí. [7]

Slitiny Al-Zn – obsahují obvykle 5 až 7 % Zn a do 1 % Mg. Patří mezi samovytvrditelné slitiny, dosahující po 20 až 30 dnech pevnosti 250 MPa při tažnosti 5 % a tvrdosti cca 70 HB. Odlitky vykazují vysokou rozměrovou stabilitu, dobrou odolnost vůči korozi a dobrou obrobitelnost. Slévárenské vlastnosti této slitiny jsou střední až špatné. Slitiny jsou náchylné ke vzniku staženin a mají velký sklon k praskání za tepla. Také těsnost odlitků není příliš dobrá. [4] V současné době se odlévají pod označením Unifont hlavně vysokotlakým litím. [15]

2.3 Tepelné zpracování slitin hliníku

Cílem tepelného zpracování slitin hliníku je dosažení požadované struktury a mechanických vlastností při procesu, kdy je výrobek podroben ohřevu a následnému ochlazení. Tepelné zpracování se také využívá na snížení vnitřního pnutí. Tepelné

zpracování slitin na odlitky a pro tváření se od sebe až na výjimky příliš neliší. Hlavními procesy tepelného zpracování výrobků ze slitin hliníku jsou žíhání a vytvrzování. [1, 4, 7]

Základní stavy zpracování hliníku a jeho slitin se v Evropské unii označují podle normy ČSN EN 515. Označení stavu zpracování se dává odděleno pomlčkou za označení slitiny a je složeno z velkého písmena a číslic, viz tab. 2.6. Tepelné zpracování se značí písmenem T a jednou nebo dvěma číslicemi, viz tab. 2.7. [1, 4]

Tab. 2.6 Označování stavu tepelného zpracování podle ČSN EN 515 [9]

Stav	Význam
F	Z výroby, meze mechanických vlastností se nespécifikují
O	Žíhaný
H	Deformační zpevnění
W	Po rozpouštěcím žíhání
T	Tepelné zpracování

Tab. 2.7 Význam první číslice za písmenem T podle ČSN EN 515 [9]

Označení stavu	Význam
T1	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a přirozeném stárnutí
T2	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření, tváření zastudena a přirozeném stárnutí
T3	Po rozpouštěcím žíhání, tváření za studena a přirozeném stárnutí
T4	Po rozpouštěcím žíhání a přirozeném stárnutí
T5	Po ochlazení ze zvýšené teploty tváření a umělém stárnutí
T6	Po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí
T7	Po rozpouštěcím žíhání a umělém přestárnutí
T8	Po rozpouštěcím žíhání, tváření zastudena a umělém stárnutí
T9	Po rozpouštěcím žíhání, umělém stárnutí a tváření zastudena

2.3.1 Žíhání

Žíhání není častým způsobem tepelného zpracování slitin hliníku. [4] Účelem žíhání je dosáhnout struktury tvořené rovnovážnými fázemi. Proces žíhání spočívá v pomalém ohřevu na teplotu žíhání, výdrži na této teplotě a relativně malé ochlazovací rychlosti, která je menší než doba ochlazování na klidném vzduchu. Cílem žíhání je vytvoření homogenní a jemnozrnné struktury o dobré tvárnosti, houževnatosti, obrobiteľnosti nebo snížení vnitřního pnutí odlitků. U výrobků z hliníku a jeho slitin se provádějí tyto druhy žíhání:

- rekrytalizační žíhání,

- stabilizační žihání,
- žihání na snížení vnitřního pnutí,
- žihání s částečnou rekrystalizací,
- homogenizační žihání. [16]

Rekrystalizační žihání – se nejčastěji řadí jako mezioperace po tváření za studena. Může být po tváření i konečným procesem, jestliže je společně s dostatečnou pevností vyžadována i vysoká tvárnost materiálu. [7]

Jedná se o druh tepelného zpracování, při kterém se tvářený kov zpracovává za teplot (250 až 500 °C) a z jeho deformované struktury se vytvoří nová rekrystalizovaná struktura. Se změnou struktury dojde také ke změně vlastností kovu, sníží se pevnost a zvýší se plastické vlastnosti deformovaného materiálu. Teplota rekrystalizačního žihání závisí také na velikosti předchozí deformace, jelikož s rostoucí deformací dochází k poklesu teploty a zmenšení velikosti zrn. Tento proces závisí také na chemickém složení hliníku. Nevytvrditelné slitiny se mohou po ukončení rekrystalizace ochlazovat na vzduchu a vytvrditelné slitiny se musí ochlazovat pomaleji. Kdyby se vytvrditelné slitiny neochlazovali pomalu, mohlo by dojít k částečnému přesycení tuhého roztoku, což by vedlo k zvýšení pevnostních vlastností materiálu. [1]

Stabilizační žihání – je proces tepelného zpracování, který stabilizuje strukturu, mechanické, fyzické a chemické vlastnosti materiálu a rozměry výrobku. Nejčastěji se tento proces tepelného zpracování používá pro slitiny, které budou použity v provozu při zvýšené teplotě, nebo bude během provozu docházet ke zvýšení teploty. Z tohoto důvodu je teplota stabilizačního žihání větší než teplota dosažená v provozních podmínkách materiálu výrobku. Teplota stabilizačního žihání se pohybuje v rozmezí 240 až 350 °C a ochlazuje se na vzduchu. Tento druh žihání se nejčastěji používá u odlitků. [1, 4]

Žihání na snížení vnitřního pnutí – vnitřní pnutí vzniká u odlitků následkem rozdílné rychlosti ochlazování různých průřezů nebo vlivem brzděného smršťování v nepoddajné formě či tuhou konstrukcí odlitku. Tepelné zpracování probíhá při teplotě nižší, než je rekrystalizační teplota. [1] Nejčastěji se používá u tvarově složitých součástí tvářených za tepla, u odlitků litých hlavně do kovových forem a po svařování. Pokles vnitřního pnutí nastává přibližně od teploty 200 °C, avšak účinněji probíhá za teplot 300 až 400 °C. [15]

Žihání se provádí po dobu 6 až 8 hodin s následným pomalým ochlazováním v peci nebo na vzduchu. [4]

Žihání s částečnou rekrystalizací – je druh tepelného zpracování, při kterém se dosahuje teploty 250 až 500 °C stejně jako u rekrystalizačního žihání, ale používá se kratší čas než u rekrystalizačního žihání, aby nedošlo k plné rekrystalizaci. U výrobku žihaného s částečnou rekrystalizací vzniká částečně rekrystalizovaná struktura materiálu, ve kterém je vedle rekrystalizovaných zrn určitý podíl tvářené struktury. [1]

Homogenizační žihání – je tepelné zpracování, které se děje při vysoké teplotě s cílem odstranit nebo snížit chemické heterogenity difúzními procesy. Homogenizační žihání může být jednostupňové nebo dvoustupňové, při kterém se používají dvě po sobě jdoucí různé teploty s cílem odstranit nebo snížit chemické heterogenity difúzními procesy. Čas žihání je závislý na chemickém složení slitiny a její struktury, obvykle probíhá v rozmezí 3 až 15 hodin. Toto tepelné zpracování je časově nejnáročnější fází v celém výrobním procesu. [1, 4]

2.3.2 Vytvrzování

Spočívá v rozpouštěcím ohřevu, následném ochlazení s vytvořením metastabilního přesyceného tuhého roztoku a jeho následného stárnutí. V praxi se pro všechny slitiny hliníku používá jako ochlazovací prostředí voda o teplotě 20 až 40 °C. [7]

Vytvrzování je nejdůležitější proces tepelného zpracování slitin hliníku. Cílem tepelného zpracování vytvrzováním je dosažení zvýšené meze pevnosti v tahu, smluvní meze kluzu a dosažení tvrdosti slitiny. Při vytvrzování dochází ke zvýšení pevnosti, tvrdosti a snížení tažnosti, což má za následek stárnutí. [7] Vytvrzování je podmíněno přítomností přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku α (Al). Nejčastěji jsou to prvky Cu a Mg, případně Ni nebo Zn. Slitina musí obsahovat vyšší množství těchto prvků, než je jejich rozpustnost za normální teploty, ale menší, než je maximální rozpustnost v tuhém roztoku α (Al) při eutektické teplotě. [4]

Vytvrzují se buď binární slitiny hliníku s vytvrzujícím prvkem, nebo vícesložkové slitiny hliníku, ve kterých je vytvrzující prvek dalším přísadovým prvkem. Vytvrzováním se dosahuje zpětného rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku a jejich

následující vyloučení v podobě koherentních či semi-koherentních útvarů, které zpevňují slitiny. Vytvrzování se skládá z následujících etap:

- rozpouštěcí žihání,
- ochlazení z homogenizační teploty,
- precipitační vytvrzování. [4]

Rozpouštěcí žihání – je prováděno při teplotách ležících nad křivkou změny rozpustnosti a dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahující vytvrzující přísadové prvky. U slitin hliníku, u kterých se množství přísadového prvku přibližuje k maximální rozpustnosti ve fázi tuhého roztoku α (Al), se rozpouštěcí teplota nastavuje co nejvyšší. [4]

Dojde-li k překročení optimální teploty, dochází k natavení slitiny na hranicích zrn, k hrubnutí zrna a k tepelnému zborcení odlitku. Jestliže je teplota nižší než optimální, tak rozpuštění segregátu není dokonalé a vytvrzováním se nezískají očekávané vlastnosti. [4]

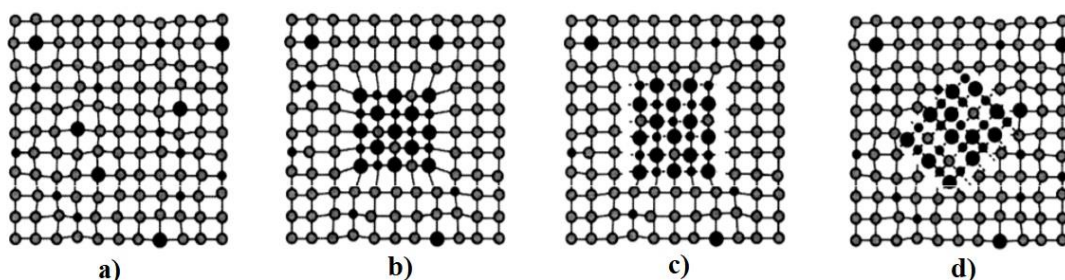
V praxi se používají teploty rozpouštěcího žihání 10 až 15 °C pod eutektickou teplotou. Doba rozpouštěcího žihání musí být dostatečně dlouhá, aby došlo k dokonalému rozpuštění segregovaných fází vytvrzujícího prvku, ale neměla by být příliš dlouhá, aby nedošlo ke zhrubnutí zrna. U slitin tvářených se většinou tato doba pohybuje v intervalu od 1 do 3 hodin, u odlitků od 3 do 6 hodin. [4]

Ochlazení z homogenizační teploty – účelem ochlazení je zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku z přesyceného roztoku fáze α (Al). Ochlazování z homogenizační teploty na teploty 150 až 200 °C musí probíhat co nejrychleji, a proto se k ochlazování používá studená voda. Zároveň vyjmutý výrobek z žihací pece musí být ponořen do chladicího média co nejrychleji. V praxi se používají speciální žihací pece, které mají otevíratelné dno, kterým výrobky padají rovnou do chladicí kapaliny, aby se zajistila co nejkratší doba. Pokud není ochlazení po vyjmutí ze žihací pece dostatečně rychlé, dochází k částečnému vyloučení fází přísadového prvku na hranicích zrn a k zhoršení konečných vlastností. U větších výrobků dochází po jejich umístění do chladicí vody k varu vody, vznikající bubliny mívají izolační vlastnosti a snižují intenzitu chlazení. Pro eliminaci těchto účinků u větších výrobků se doporučuje používat proudění vody v chladicí nádrži, nebo pohyb košů s výrobky v nádrži. [4]

Precipitační vytvrzování – se často označuje jako stárnutí. Při procesu precipitačního vytvrzování dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku α (Al). Dochází také k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí s větším výskytem tohoto prvku a v nich k nukleaci nové fáze. [4]

Při růstu těchto zárodků se vytvářejí koherentní precipitáty, označovány jako Guinier-Prestonovy zóny. Zóny mají destičkovité uspořádání vytvrzujícího prvku s tloušťkou 10^{-9} až 10^{-10} m. Tyto oblasti jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku, jeho mřížku deformují a vytvářejí v ní vnitřní pnutí, které způsobuje zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Když se teplota zvýší nad optimální hodnotu s rostoucím časem, tak se koherentní precipitáty dále zvětšují, ale jejich počet se snižuje. [4]

V další části se koherence postupně vytrácí a fáze začne vytvářet samostatné útvary, které se dále přestávají krystalicky propojovat s původním přesyceným tuhým roztokem. Ze začátku jde o semikoherentní částice, které jsou částečně propojeny s tuhým roztokem. Tento proces doprovází zvýšení pevnosti a tvrdosti. Slitiny často po vytvrzení obsahují ještě koherentně nebo semikoherentně vyloučenou vytvrzující fázi. V dalším stádiu vytvrzování nastává postupná ztráta koherence, což je označováno jako přestárnutí slitiny. Nekoherentní vytvrzující fáze nemá krystalickou vazbu na tuhý roztok α (Al), při níž dojde ke snížení pevnosti a tvrdosti. Přestárnutí nastane v případě příliš vysoké teploty, nebo dlouhé doby vytvrzování. Při dalším průběhu by došlo k totální ztrátě koherence, zbavení rovnovážných fází přísadového prvku a snížení pevnosti a tvrdosti na počáteční hodnoty před tepelným zpracováním. Občas se používají mírně přestárlé slitiny, které mají nižší pevnost a tvrdost než maximum, ale mají vyšší tažnost. [4]



Obr. 2.5 Vyloučení precipitační fáze [4]

a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) semikoherentní částice, d) nekoherentní precipitát

3 Experimentální část

Jak již bylo zmíněno v úvodu, experimentální část této práce byla řešena ve spolupráce s firmou VÚKV a.s., která se zabývá vývojem a zkušebnictvím kolejových vozidel. Konstrukční polotovary ze slitiny AW 6005 jsou ve většině případů dodávány ve stavu T6. Ve společnosti VÚKV a.s., jejich následným svařováním dochází vlivem teplotních cyklů k výraznému poklesu mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti.

Cílem této práce bylo najít optimální parametry tepelného zpracování, kterým by bylo možné mechanické vlastnosti obnovit nebo se alespoň co nejvíce přiblížit hodnotám výchozího materiálu. Navržené parametry tepelného zpracování budou následně ve firmě aplikovány na svarové spoje.

V úvodu experimentální části jsou uvedeny základní vlastnosti použitého materiálu, specifikace zkušebních vzorků a zařízení, která byla použita pro realizaci tepelného zpracování. Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti byl hodnocen pomocí měření tvrdosti a u vybraných parametrů byla provedena zkouška tahem. V poslední části experimentu jsou vyhodnoceny naměřené hodnoty a stanoveny optimální podmínky procesu tepelného zpracování.

3.1 Charakteristika materiálu

V rámci experimentu byla použita slitina EN AW 6005, která byla poskytnuta společností VÚKV a.s. v podobě protlačovaných L-profilů o tloušťce 10 mm po tepelném zpracování ve stavu T6. Mechanické vlastnosti dané atestem výrobce jsou uvedené v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6005 z atestu výrobce

Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A_{50mm} [%]
329	290	15

Hodnoty uvedené v atestu výrobce splňují požadavky normy EN 755-2, která uvádí minimální mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6005, viz tab. 3.2.

Tab. 3.2 Minimální mechanické a technologické vlastnosti slitiny EN AW 6005 dle normy EN 755-2

Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A_{50mm} [%]
260	215	8

Chemické složení této slitiny bylo pro kontrolu analyzováno pomocí stolního jiskrového optického emisního spektrometru Bruker Q4 Tasman a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.3. Naměřené hodnoty chemického složení jsou v souladu s normou ČSN 573-3, viz tab. 2.2.

Tab. 3.3 Chemické složení slitiny EN AW 6005 naměřené na spektrometru v hm. [%]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
0,705	0,182	0,098	0,22	0,415	0,074	0,003	0,015	0,033	98,16

3.2 Tepelné zpracování

Jak již bylo uvedeno v kap. 2.3.2, vytvrzování slitin hliníku je složeno z rozpouštěcího žíhání, výdrži na teplotě, prudkého ochlazení a přirozeného nebo umělého vytvrzování. Experiment byl navržen na základě doporučení literatury [1], která pro vytvrzování této slitiny doporučuje teplotu rozpouštěcího žíhání 545 °C, dobu setrvání na této teplotě 1 hod., následné ochlazení do vody o teplotě 20 °C až 40 °C a umělé stárnutí při teplotě 175 °C po dobu 8 hod. s následným ochlazením na vzduchu.

Experiment byl rozdělen do několika etap. Nejprve byl sledován vliv teploty rozpouštěcího žíhání a doby výdrže na této teplotě na výsledné mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu bylo u zkušebních vzorků provedeno rozpouštěcí žíhání při teplotě 530 °C, 545 °C a 560 °C vždy po dobu 1 hod., vzorky byly následně ochlazeny ve vodě o teplotě 25 °C a poté u nich proběhlo umělé vytvrzování při teplotě 175 °C.

Dále byl sledován vliv doby výdrže na teplotě rozpouštěcího žíhání. V tomto případě byly zkušební vzorky žíhány při teplotě 545 °C po dobu 1 a 2 hod., následně ochlazeny a opět podrobeny umělému stárnutí při teplotě 175 °C, stejně jako v předchozím případě.

V poslední etapě byl sledován vliv teploty umělého stárnutí a doby výdrže na této teplotě na výsledné mechanické vlastnosti. V této etapě bylo rozpouštěcí žíhání prováděno vždy při teplotě 545 °C po dobu 1 hod., následně byly vzorky ochlazeny ve vodě při teplotě 25 °C a u vzorků proběhlo přirozené stárnutí, nebo bylo provedeno umělé stárnutí

při teplotě 160 °C, 175 °C po dobu 0,5 hod., 1 hod., 2 hod., 4 hod., 8 hod., 12 hod., 24 hod. Vzorek vystavený umělému stárnutí při teplotě ohřevu 190 °C byl navíc měřen po 3 hod. z důvodu sledování předpokládaného rychlého náběhu tvrdosti. Měření vlivu přirozeného stárnutí bylo provedeno i po 72 hod.

Rozpouštěcí žíhání zkušebních vzorků ze slitiny hliníku EN AW 6005 bylo prováděno v elektrické odporové peci 11016S Clasic s teplotní tolerancí ± 10 °C, která je vidět na obr. 3.2. Umělé vytvrzování probíhalo v laboratorní peci Venticell Standart 404 s teplotní tolerancí ± 3 °C viz obr. 3.3.



Obr. 3.2 Elektrická odporová pec 11016S Clasic



Obr. 3.3 Pec Venticell Standart 404

3.3 Měření tvrdosti

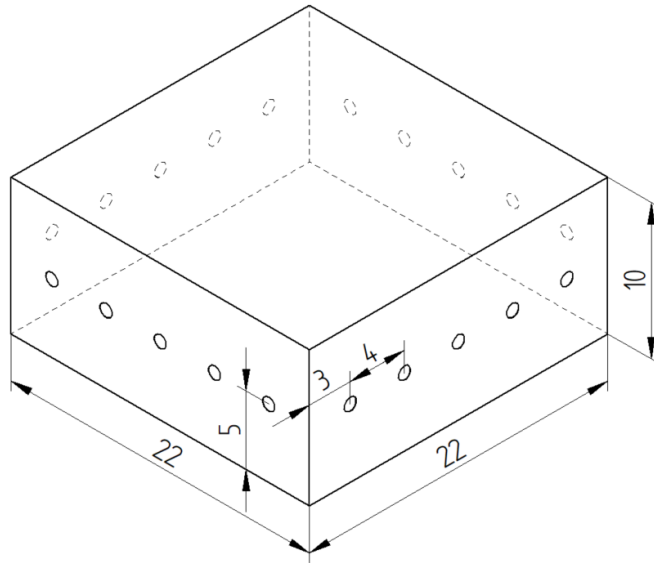
Vliv parametrů tepelného zpracování na mechanické vlastnosti zkušebních vzorků byl hodnocen pomocí měření tvrdosti.

Pro měření tvrdosti byly zkušební vzorky nařezány z výchozího profilu na pásové pile a dále obrobena na rozměry 22 x 22 x 10 mm.

Tvrdost zkušebních vzorků byla hodnocena metodou podle Brinella. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 6506-1. K měření tvrdosti byl použit tvrdoměr HPO 250 s vyhodnocovacím softwarem LabControl CCD. Vnikacím tělesem pro měření tvrdosti byla vyleštěná kulička ze slinutého karbidu wolframu o průměru 2,5 mm, index zatížení

k průměru byl 10 a zkušební zatížení 62,5 kp, což je 612,9 N. [17] Doba působení zkušebního zatížení byla zvolena 10 s.

Tvrdot vzorků byla měřena na obrobených plochách s ohledem na požadavky normy ČSN EN ISO 6506-1, tj. tak aby vzdálenost středu každého vtisku od okraje zkušebního tělesa byla nejméně 2,5násobek středního průměru vtisku a vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků byla nejméně trojnásobek středního průměru vtisku, viz obr. 3.4. [17]



Obr. 3.4 Prostorové zobrazení vzorku pro měření tvrdosti s označením míst měření

3.3.1 Tvrdot základního materiálu

Aby bylo možné hodnotit vliv tepelného zpracování, byla nejprve změřena tvrdost výchozího materiálu. Tvrdot se měřila na obrobené ploše tří vzorků a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Tvrdost podle Brinella základního materiálu

Tvrdost podle Brinella HBW 2,5/62,5/10			
Číslo měření	Zkušební vzorek		
	1	2	3
1	107	102	106
2	110	104	106
3	107	100	107
4	106	106	109
5	104	106	106
6	103	106	107
7	104	106	107
8	104	104	108
9	106	101	103
10	105	106	107
\bar{x}	106	104	107
s	2	2	2

3.3.2 Tvrdost po tepelném zpracování

Jak již bylo uvedeno v kap. 3.2, experiment byl rozdělen na několik etap. Nejprve byl hodnocen vliv teploty rozpouštěcího žíhání a doby výdrže na této teplotě na výslednou tvrdost vzorků.

Tvrdost byla nejprve měřena na vzorcích, u nichž bylo provedeno rozpouštěcí žíhání s danými parametry a rychlé ochlazení ve vodě o teplotě 25 °C. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tab. 3.5 a je z nich patrné, že po rozpouštěcím žíhání došlo k předpokládanému poklesu hodnot tvrdosti a parametry rozpouštěcího žíhání nemají významný vliv na tvrdost přesyceného tuhého roztoku.

Tab. 3.5 Tvrdost podle Brinella po rozpouštěcím žíhání

Tvrdost podle Brinella HBW 2,5/62,5/10												
Teplota RŽ a čas	Číslo měření										\bar{x}	s
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
RŽ 545 °C - 1 hod	43	45	46	45	46	45	46	46	45	45	45	1
RŽ 545 °C - 2 hod	44	45	43	44	44	46	44	43	44	45	44	1
RŽ 560 °C - 1 hod	42	44	44	44	44	44	44	46	46	44	44	1
RŽ 530 °C - 1 hod	44	45	45	44	45	43	44	43	45	44	44	1

Zkušební vzorky zpracované dle parametrů uvedených v tab. 3.5 (různé teploty a doby rozpouštěcího žíhání) byly dále vytvrzovány při teplotě 175 °C po různou dobu a následně ochlazeny na vzduchu. Naměřené hodnoty tvrdosti takto zpracovaných vzorků jsou uvedeny v tab. 3.6, 3.7, 3.8 a 3.9.

Tab. 3.6 Tvrdost slitiny EN AW 6005 po umělem stárnutí při teplotě 175 °C v závislosti na čase

Rozpouštěcí žíhání: teplota 545 °C - 1 hodina Umělé stárnutí: teplota 175 °C							
Číslo měření	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase						
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
1	54	67	80	90	88	88	84
2	54	67	80	84	89	87	83
3	53	66	79	86	89	86	85
4	54	68	80	88	86	86	85
5	56	65	80	84	85	89	83
6	55	67	80	90	85	89	83
7	54	68	79	89	86	85	85
8	56	68	81	89	92	85	82
9	55	68	81	88	89	87	82
10	53	67	82	90	88	84	81
\bar{x}	54	67	80	88	88	87	83
s	1	1	1	2	2	2	1

Tab. 3.7 Tvrdost slitiny EN AW 6005 po umělem stárnutí při teplotě 175 °C v závislosti na čase

Rozpouštěcí žíhání: teplota 545 °C - 2 hodiny Umělé stárnutí: teplota 175 °C							
Číslo měření	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase						
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
1	54	72	76	82	83	85	79
2	54	69	79	84	85	83	85
3	59	70	78	84	84	85	89
4	58	68	78	85	85	81	87
5	56	67	79	85	83	81	89
6	60	63	79	85	88	81	88
7	58	66	78	85	82	83	80
8	59	64	76	86	84	86	83
9	58	64	78	85	86	88	84
10	60	70	79	86	85	81	90
\bar{x}	58	67	78	85	85	83	85
s	2	3	1	1	2	3	4

Tab. 3.8 Tvrdost slitiny EN AW 6005 po umělém stárnutí při teplotě 175 °C v závislosti na čase

Rozpouštěcí žíhání: teplota 560 °C - 1 hodina Umělé stárnutí: teplota 175 °C							
Číslo měření	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase						
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
1	55	69	79	90	92	92	84
2	58	70	76	85	90	90	86
3	57	70	75	89	89	91	83
4	55	70	78	88	91	90	87
5	54	68	79	90	92	89	83
6	55	66	84	88	90	91	82
7	53	74	78	88	89	90	82
8	54	75	80	91	90	89	83
9	56	72	80	91	90	91	84
10	55	71	77	94	91	90	87
\bar{x}	55	71	79	89	90	90	84
s	1	3	3	2	1	1	2

Tab. 3.9 Tvrdost slitiny EN AW 6005 po umělém stárnutí při teplotě 175 °C v závislosti na čase

Rozpouštěcí žíhání: teplota 530 °C - 1 hodina Umělé stárnutí: teplota 175 °C							
Číslo měření	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase						
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
1	52	69	76	84	86	86	88
2	53	69	71	81	85	86	87
3	53	70	80	82	87	88	85
4	52	69	80	85	82	91	85
5	52	70	78	86	83	91	84
6	51	68	75	86	87	92	82
7	51	68	75	85	86	87	84
8	51	68	75	84	87	85	84
9	50	70	73	81	82	83	84
10	52	68	72	87	84	85	85
\bar{x}	52	69	76	84	85	87	85
s	1	1	3	2	2	3	2

Poslední fáze experimentu byla zaměřena na sledování vlivu přirozeného a umělého stárnutí na výslednou tvrdost. Vzorky byly zpracovány při stejné teplotě rozpouštěcího žíhání 545 °C a době výdrže na této teplotě 1 hod., po zchlazení do vody o teplotě 25 °C byly dále vystaveny jednak přirozenému stárnutí a jednak umělému stárnutí při teplotě 175 °C, 190 °C a 160 °C s různou dobou výdrže na této teplotě. Tvrdost byla u vzorků vystavených přirozenému a umělému stárnutí při teplotě 175 °C a 160 °C měřena

ve stejném časovém intervalu. Pouze u vzorku vystaveného umělému stárnutí při teplotě 190 °C došlo ke zvolení jiného časového interval z důvodu sledování předpokládaného rychlého náběhu tvrdosti a u přirozeného stárnutí docházelo k měření tvrdosti i po 72 hod. Naměřené hodnoty tvrdosti takto zpracovaných vzorků jsou uvedeny v tab. 3.6, 3.10, 3.11 a 3.12.

Tab. 3.10 Tvrdost slitiny EN AW 6005 po přirozeném stárnutí v závislosti na čase

Rozpuštěcí žíhání: teplota 545 °C - 1 hodina Přirozené stárnutí								
Číslo měření	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase							
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]	72 [hod]
1	45	49	52	54	56	57	58	62
2	49	48	53	52	57	55	60	61
3	50	49	52	52	57	58	59	62
4	47	49	53	53	56	56	60	60
5	48	50	51	52	57	56	58	60
6	47	48	51	53	55	55	58	59
7	46	47	52	52	53	56	57	61
8	48	48	51	52	51	58	58	61
9	46	49	51	49	52	58	57	60
10	47	50	52	51	53	56	58	60
\bar{x}	47	49	52	52	55	57	58	61
s	1	1	1	1	2	1	1	1

Tab. 3.11 Tvrdost slitiny EN AW 6005 po umělém stárnutí při teplotě 190 °C v závislosti na čase

Rozpuštěcí žíhání: teplota 545 °C - 1 hodina Umělé stárnutí: teplota 190 °C								
Číslo měření	Hodnoty tvrdosti dle Brinella podle času [HB]							
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	3 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
1	67	79	82	82	81	76	76	80
2	69	80	82	81	78	74	78	78
3	66	79	79	81	79	74	75	76
4	66	81	82	82	82	74	79	76
5	70	80	85	82	83	78	75	78
6	66	79	82	79	84	80	78	82
7	66	80	83	79	80	82	79	83
8	65	81	81	79	80	81	81	80
9	65	80	80	79	81	81	78	81
10	65	78	80	77	80	79	81	79
\bar{x}	67	80	82	80	81	78	78	79
s	2	1	2	2	2	3	2	2

Tab. 3.12 Tvrdost slitiny EN AW 6005 po umělém stárnutí při teplotě 160 °C v závislosti na čase

Rozpouštěcí žíhání: teplota 545 °C - 1 hodina							
Umělé stárnutí: teplota 160 °C							
Číslo měření	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase						
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
1	49	56	76	92	95	94	96
2	50	58	76	95	97	98	96
3	49	59	79	94	93	95	98
4	50	60	77	94	95	89	97
5	48	60	81	91	95	93	97
6	48	60	79	94	94	95	98
7	46	61	76	95	101	96	97
8	47	61	77	96	97	101	98
9	48	58	78	93	97	97	94
10	48	60	80	91	95	95	93
\bar{x}	48	59	78	94	96	95	96
s	1	2	2	2	2	3	2

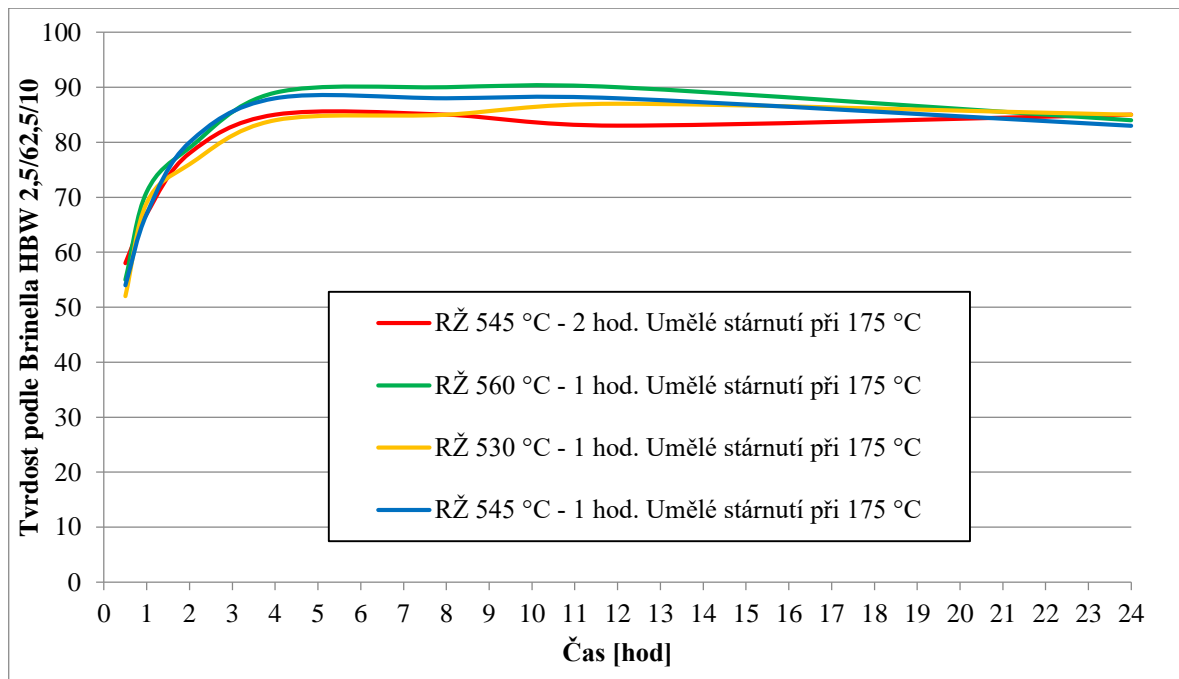
Naměřené hodnoty tvrdosti ukazují, že u vzorků po přirozeném stárnutí došlo ve srovnání se vzorky, u kterých bylo provedeno umělé stárnutí, pouze k mírnému zvýšení tvrdosti.

3.4 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

Naměřené hodnoty tvrdostí byly statisticky zpracovány. V tab. 3.13 jsou pro přehlednost uvedeny aritmetické průměry hodnot naměřených u vzorků s různými parametry rozpouštěcího žíhání a umělým stárnutím při teplotě 175 °C (tab. 3.6, 3.7, 3.8 a 3.9). Grafické zpracování těchto hodnot je uvedeno na obr. 3.5.

Tab. 3.13 Průměrné naměřené hodnoty změny tvrdosti slitiny EN AW 6005 v závislosti na čase

Umělé stárnutí při teplotě ohřevu 175 °C							
Teplota RŽ a čas	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase						
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
RŽ 530 °C - 1 hod	52	69	76	84	85	87	85
RŽ 545 °C - 1 hod	54	67	80	88	88	87	83
RŽ 530 °C - 2 hod	58	67	78	85	85	83	85
RŽ 560 °C - 1 hod	55	71	79	89	90	90	84



Obr. 3.5 Závislost tvrdosti slitiny EN AW 6005 na čase umělého stárnutí

Z obr. 3.5 je patrné, že nejvyšších hodnot tvrdosti je dosaženo po rozpouštěcím žhání při teplotě 560 °C a době ohřevu 1 hod., po kterém následovalo umělé stárnutí při teplotě 175 °C. Z grafických závislostí vlivu teploty rozpouštěcího žhání a doby setrvání na této teplotě je však patrné, že rozdíl v tvrdostech získaných po rozpouštěcím žhání při teplotě 560 °C a 545 °C při době ohřevu 1 hod. není významný. Z technického a ekonomického hlediska proto nemá význam volit vyšší teplotu rozpouštěcího žhání.

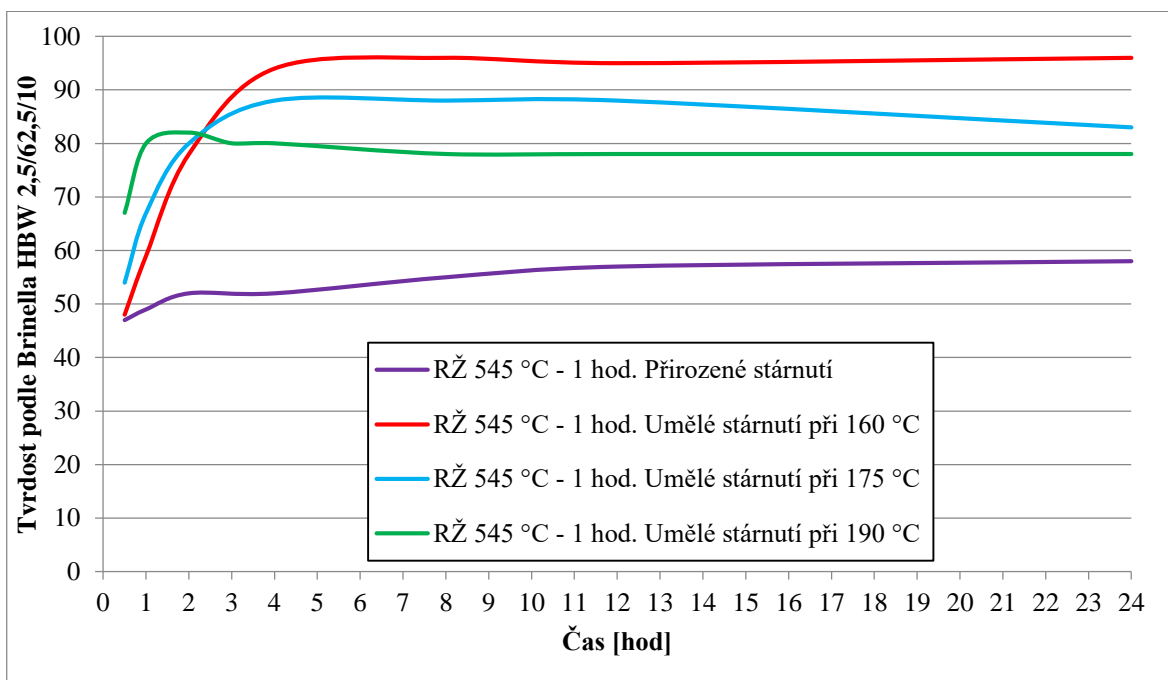
Výsledky experimentů zaměřených na sledování vlivu doby setrvání na teplotě rozpouštěcího žhání ukazují, že s rostoucí dobou mechanické vlastnosti klesají.

Proto ve fázi experimentu, ve které probíhalo sledování vlivu přirozeného a umělého stárnutí na mechanické vlastnosti, bylo aplikováno rozpouštěcí žhání při teplotě 545 °C po dobu 1 hodiny.

V tab. 3.14 jsou opět pro přehlednost uvedeny průměrné hodnoty tvrdostí uvedených v tab. 3.6, 3.10, 3.11 a 3.12. Tyto hodnoty byly graficky zpracovány a jsou uvedeny na obr. 3.6.

Tab. 3.14 Průměrné hodnoty tvrdosti slitiny EN AW 6005 v závislosti na čase

Rozpouštěcí žíhání při teplotě ohřevu 545 °C a době ohřevu 1 hod.								
Druh stárnutí	Hodnoty tvrdosti dle Brinella HBW 2,5/62,5/10 v závislosti na čase							
	0,5 [hod]	1 [hod]	2 [hod]	3 [hod]	4 [hod]	8 [hod]	12 [hod]	24 [hod]
Přirozené stárnutí	47	49	52	-	52	55	57	58
Umělé stárnutí - 160 °C	48	59	78	-	94	96	95	96
Umělé stárnutí - 175 °C	54	67	80	-	88	88	87	83
Umělé stárnutí - 190 °C	67	80	82	80	81	78	78	79



Obr. 3.6 Závislost tvrdosti slitiny EN AW 6005 na čase přirozeného a umělého stárnutí

Z obrázku je patrné, že přirozené stárnutí vede pouze k mírnému zvýšení tvrdosti, ani po 72 hod. nedošlo k žádné výrazné změně tvrdosti. Hodnoty tvrdosti se pohybují přibližně v polovině hodnot tvrdosti původního materiálu.

Nejrychlejšího náběhu tvrdosti bylo dosaženo u umělého stárnutí při teplotě 190 °C, kdy bylo maximální hodnoty dosaženo už po cca 2 hodinách. Při delším čase umělého stárnutí však došlo k poklesu tvrdosti.

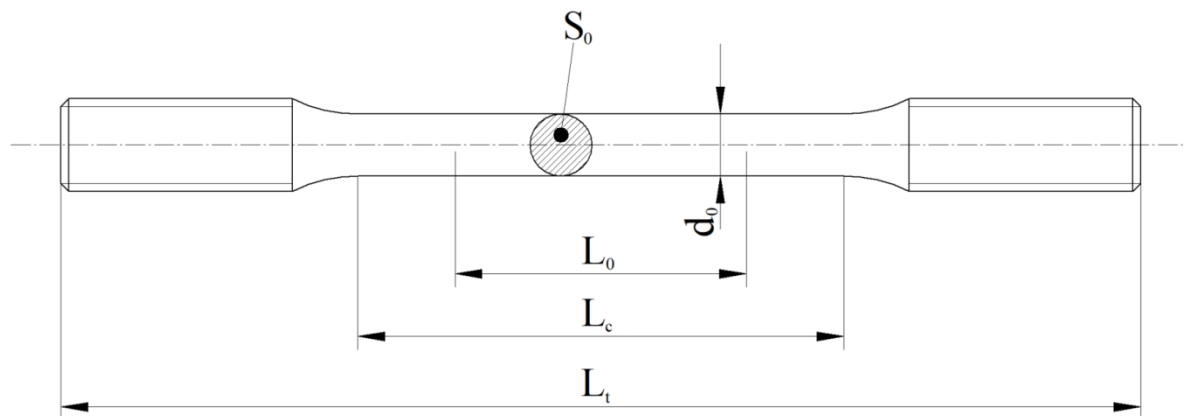
Nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo po aplikaci umělého stárnutí při teplotě 160 °C. Po 8 hod. umělého stárnutí bylo dosaženo tvrdosti 96 HBW, což činí cca 91 % z původní hodnoty tvrdosti výchozího materiálu.

Na základě výsledků měření tvrdosti lze konstatovat, že nejvyšších tvrdostí bylo dosaženo po rozpouštěcím žíhání při teplotě 545 °C po dobu 1 hod., zchlazení do vody o teplotě 25 °C a následném umělém stárnutí při teplotě 190 °C po dobu 2 hod., 175 °C po dobu 4 hod. nebo 160 °C po dobu 8 hod. Tyto vybrané parametry tepelného zpracování byly dále aplikovány na zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem.

3.5 Statická zkouška tahem

Jak již bylo uvedeno v kap. 3.4, u vybraných parametrů tepelného zpracování byly dále hodnoceny mechanické vlastnosti statickou zkouškou tahem.

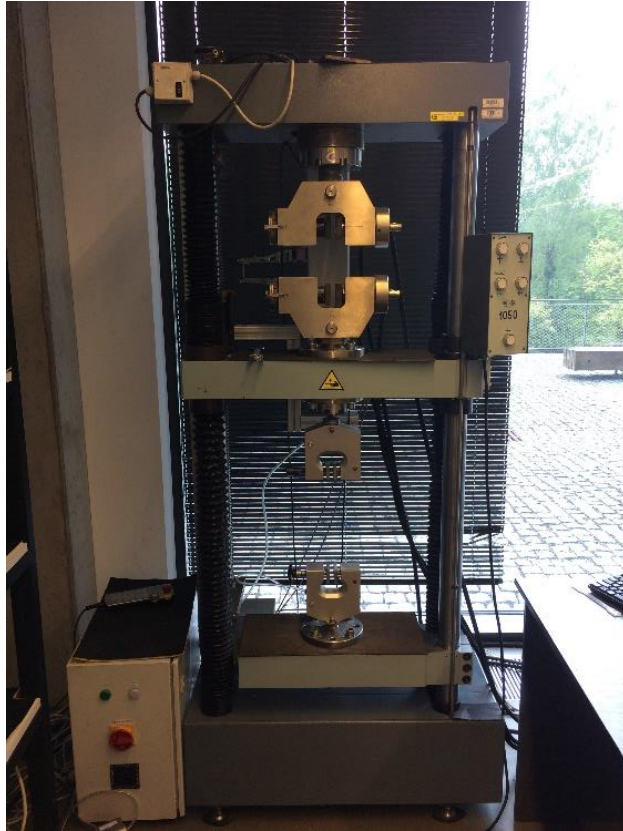
Zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem byly zhotoveny v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 [18], viz obr 3.7 a opatřeny závitem M10 pro upnutí do čelistí.



Obr. 3.7 Zkušební vzorek ze slitiny EN AW 6005 pro tahovou zkoušku [18]

$$S_0 = 5,18 \text{ mm}^2, d_0 = 6,60 \text{ mm}, L_0 = 30 \text{ mm}, L_c = 50 \text{ mm}, L_t = 100 \text{ mm}$$

Statická zkouška tahem probíhala na trhacím zařízení TIRA test 2300 s rychlostí zatěžování $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, viz obr 3.8. Vyhodnocení naměřených dat probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 pro statickou zkoušku tahem za pokojové teploty pomocí softwaru Labtest. Byla vyhodnocována smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , homogenní tažnost A_g a celková tažnost $A_{30\text{mm}}$.



Obr. 3.8 Trhací zařízení TIRA test 2300

Pro porovnání byla nejprve provedena statická zkouška u základního materiálu. Následně byla provedena statická zkouška tahem u tří vzorků vystavených rozpouštěcímu žíhání při teplotě 545 °C po dobu 1 hod. a s následným ochlazením ve vodě o teplotě 25 °C. V poslední etapě byla zkouška provedena u vzorků po rozpouštěcím žíhání 545 °C po dobu 1 hod., zachlazení do vody a následném umělém stárnutí při teplotě 190 °C po dobu 2 hod., 175 °C po dobu 4 hod. a 160 °C po dobu 8 hod.

3.5.1 Naměřené hodnoty statické zkoušky tahem

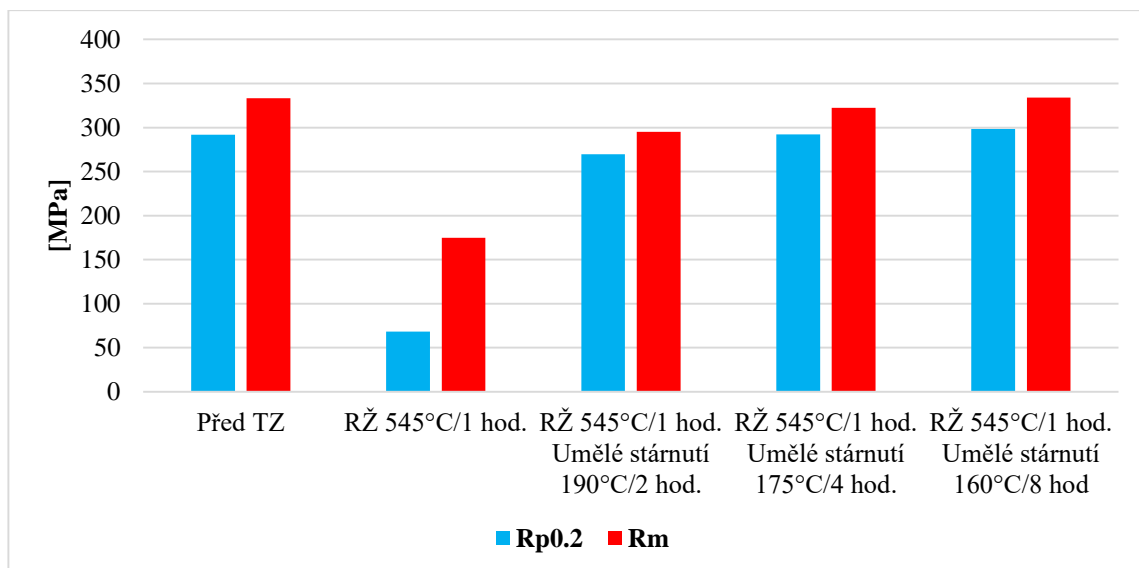
Naměřené hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti v tahu R_m , homogenní tažnosti A_g a celkové tažnosti A_{30mm} jsou uvedené v tab. 3.15.

Tab. 3.15 Mechanické vlastnosti naměřené pomocí tahové zkoušky

Způsob tepelného zpracování	Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{30mm} [%]
Před tepelným zpracováním	1	299,2	343,9	8,07	11,24
	2	296,2	341,1	6,97	10,66
	3	280,3	315,1	7,10	13,07
	\bar{x}	291,9	333,4	7,38	11,66
	s	10,2	15,9	0,60	1,26
RŽ 545 °C / 1 hod.	1	67,9	173,0	18,21	23,91
	2	70,1	177,5	23,04	27,14
	3	66,6	174,3	23,91	28,38
	\bar{x}	68,2	174,9	21,72	26,48
	s	1,8	2,3	3,07	2,31
RŽ 545 °C / 1 hod. Umělé stárnutí 190 °C / 2 hod.	1	265,5	291,4	5,41	10,44
	2	274,1	299,3	5,48	10,05
	3	269,5	295,1	5,50	10,67
	\bar{x}	269,7	295,3	5,46	10,39
	s	4,3	3,4	0,05	0,31
RŽ 545 °C / 1 hod. Umělé stárnutí 175 °C / 4 hod.	1	295,5	324,9	7,60	13,04
	2	291,5	322,4	7,57	12,02
	3	289,6	319,5	6,81	11,41
	\bar{x}	292,2	322,3	7,33	12,16
	s	3,0	2,7	0,45	0,82
RŽ 545 °C / 1 hod. Umělé stárnutí 160 °C / 8 hod	1	299,2	334,9	7,69	12,13
	2	297,5	334,3	7,40	11,56
	3	297,9	332,9	6,74	10,90
	\bar{x}	298,2	334,0	7,28	11,53
	s	0,9	1,0	0,49	0,62

3.6 Vyhodnocení statické zkoušky tahem

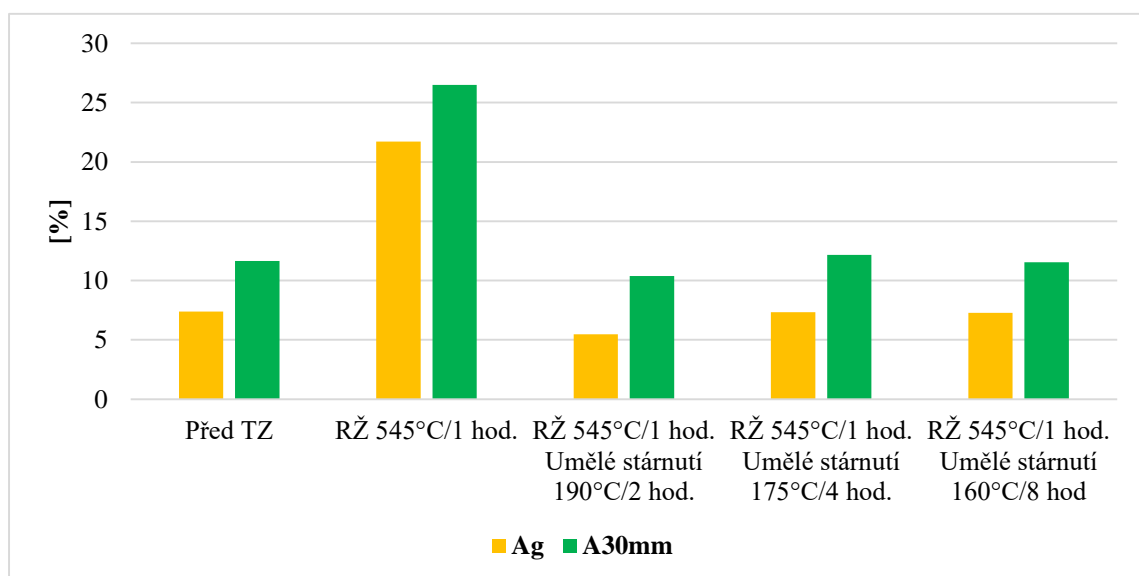
Průměrné hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti v tahu R_m , homogenní tažnosti A_g a celkové tažnosti A_{30mm} , viz tab. 3.15, byly graficky zpracovány. Na obr. 3.9 je zobrazen vliv tepelného zpracování na smluvní mez kluzu a mez pevnosti v tahu.



Obr. 3.9 Závislost $R_{p0.2}$ a R_m na druhu tepelného zpracování (průměrné hodnoty)

Z grafu je patrné, že k největšímu zvýšení, a tedy přiblížení se k hodnotám mechanických vlastností $R_{p0.2}$ a R_m před tepelným zpracováním dochází po rozpouštěcím žíhání při teplotě ohřevu 545 °C po dobu 1 hod. s následujícím ochlazením a umělým stárnutím při teplotě ohřevu 160 °C po 8 hod. Nejmenší hodnoty $R_{p0.2}$ a R_m byly naměřeny u vzorků měřených hned po rozpouštěcím žíhání a zchlazení do vody.

Na obr. 3.10 jsou zobrazeny výsledky měření homogenní A_g a celkové tažnosti A_{30mm} . Ve srovnání s hodnotami výchozího materiálu nedochází po tepelném zpracování téměř k žádné změně.



Obr. 3.10 Závislost A_g a A_{30mm} na druhu tepelného zpracování (průměrné hodnoty)

4 Diskuze výsledků

V průmyslové praxi se pro zvýšení mechanických vlastností velmi často používá tepelné zpracování. Konstrukční polotovary ze slitiny AW 6005 jsou ve většině případů dodávány ve vytvrzeném stavu. Při svařování těchto polotovarů potom dochází v oblastech svarových spojů vlivem teplotních cyklů k poklesu mechanických vlastností. Cílem experimentů bylo nalézt optimální technologické parametry tepelného zpracování, po jehož aplikaci dojde k obnově mechanických vlastností.

Posuzování vlivu parametrů tepelného zpracování na mechanické vlastnosti probíhalo zkouškou tvrdosti podle Brinella a u vybraných parametrů i statickou zkouškou v tahu.

Při návrhu experimentu se vycházelo z informací uvedených v literatuře [1], která pro slitinu AW 6005 doporučuje rozpouštěcí žíhání při teplotě 545 °C po dobu 1 hod., následné ochlazení do vody a umělé stárnutí při teplotě 175 °C po dobu 8 hod.

Proto byl v rámci experimentu nejprve sledován vliv teploty rozpouštěcího žíhání (530 °C, 545 °C a 560 °C) a doby setrvání na této teplotě (1 hod. a 2 hod.) na výsledné mechanické vlastnosti u vzorků, na které bylo po zachlazení aplikováno umělé vytvrzování při teplotě 175 °C.

Dle očekávání experimenty potvrdily, že po rozpouštěcím žíhání dochází vždy k poklesu mechanických vlastností. Hodnoty tvrdosti po rozpouštěcím žíhání při teplotě ohřevu (530 °C, 545 °C a 560 °C) a době ohřevu (1 hod. a 2 hod.) byly podobné a pohybovaly se kolem 42 % tvrdosti základního materiálu (tvrdost výchozího materiálu byla přibližně 105 HBW).

Na tyto vzorky bylo aplikováno umělé vytvrzování při teplotě ohřevu 175 °C. Výsledné tvrdosti naměřené po tepelném zpracování ukazují, že teplota 530 °C je nedostatečná. Dále lze konstatovat, že rozdíl v tvrdostech získaných po rozpouštěcím žíhání při teplotě 560 °C a 545 °C při době ohřevu 1 hod. není významný. Rozdíl se pohyboval kolem 3 HBW, což přibližně odpovídá velikosti směrodatné odchylky. Hodnoty tvrdosti u těchto vzorků se po tomto procesu pohybovali kolem 85 % původních hodnot tvrdosti základního materiálu, která činila cca 105 HBW. Z technického a ekonomického hlediska proto nemá význam volit vyšší teplotu rozpouštěcího žíhání.

Výsledky experimentů zaměřených na sledování vlivu doby setrvání na teplotě rozpouštěcího žíhání ukazují, že s rostoucí dobou setrvání na teplotě mechanické vlastnosti klesají.

V další fázi experimentu byl potom sledován vliv parametrů umělého stárnutí. Na vzorky, u kterých bylo provedeno rozpouštěcí žíhání při teplotě 545 °C po dobu 1 hod., následné ochlazení do vody, bylo aplikováno jednak přirozené stárnutí a jednak umělé vytvrzování při různé teplotě (175 °C, 190 °C a 160 °C).

Výsledky experimentů ukázaly, že přirozené stárnutí vede pouze k mírnému zvýšení tvrdosti, ani po 72 hod. nedošlo k žádnému výraznému zvýšení tvrdosti. Nejvyšší hodnoty tvrdosti po přirozeném stárnutí se pohybovali kolem 55 % původních hodnot tvrdosti základního materiálu. Proto není přirozené stárnutí u slitiny EN AW 6005 pro obnovu mechanických vlastností vhodné.

Na základě výsledků experimentů zaměřených na hodnocení vlivu umělého vytvrzování lze konstatovat, že po aplikaci teploty 175 °C, 190 °C a 160 °C dochází k poměrně rychlému nárůstu hodnot tvrdosti. K nejrychlejšímu náběhu tvrdosti došlo při teplotě 190 °C, kdy maximální hodnoty tvrdosti bylo dosaženo již po 2 hod. Výsledná tvrdost se pohybovala kolem 80 HBW, tj. 76 % tvrdosti výchozího materiálu. Při aplikaci teploty 175 °C bylo maximum dosaženo po 4 hodinách. Tvrdost činila přibližně 88 HBW, tedy cca 84 % z tvrdosti výchozího materiálu. Nejvyšší tvrdosti byla získána umělým stárnutím při teplotě 160 °C po dobu 8 hodin. Bylo dosaženo tvrdosti cca 96 HBW, tj. cca 91 % z původní hodnoty tvrdosti výchozího materiálu.

Parametry tepelného zpracování, u kterých bylo dosaženo maximálních hodnot tvrdosti, tj. teplota rozpouštěcí žíhání 545 °C po dobu 1 hod., zachlazení do vody a následné umělé vytvrzování při teplotě 190 °C po dobu 2 hod., 175 °C po dobu 4 hod. a 160 °C po dobu 8 hod., byly aplikovány na vzorky pro statickou zkoušku v tahu.

U vzorků vystavených pouze rozpouštěcímu žíhání došlo k poklesu meze pevnosti v tahu přibližně o 47 % a smluvní meze kluzu až o 77 % z původních hodnot výchozího materiálu. Hodnoty pevnosti v tahu výchozího materiálu se přibližně pohybovaly kolem 333,4 MPa a smluvní meze kluzu kolem 291,9 MPa. Mez pevnosti v tahu po rozpouštěcím žíhání byla naměřena 68,2 MPa a mez pevnosti v kluzu 174,9 MPa.

Naopak po tomto procesu došlo k výraznému zvýšení homogenní tažnosti a celkové tažnosti oproti hodnotám výchozího materiálu. Homogenní tažnost výchozí materiálu byla 7,38 % a celková tažnost 11,66 %. Po rozpouštěcím žíhání se homogenní tažnost zvýšila na 21,72 % a celková tažnost na 26,48 %.

Výsledky experimentu ukázaly, že nejvyšších hodnot meze pevnosti v tahu a smluvní meze kluzu, je dosaženo při teplotě umělého stárnutí 160 °C po dobu 8 hod. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu činila cca 334,0 MPa a hodnota smluvní meze kluzu cca 298,2 MPa, což přibližně odpovídá hodnotám výchozího materiálu. Po tomto umělém stárnutí byla dosažena hodnota homogenní tažnosti 7,28 % a celkové tažnosti 11,53 %, tj. naměřené hodnoty homogenní a celkové tažnosti odpovídají také hodnotám výchozího materiálu.

Při teplotě umělého stárnutí 190 °C po dobu 2 hod. byla naměřena mez pevnosti v tahu 269,7 MPa, tedy 92 % pevnosti v tahu výchozího materiálu a smluvní mez kluzu 295,3 MPa, tj. cca 87 % hodnoty výchozího materiálu. Nižší hodnoty byly naměřeny také u homogenní a celkové tažnosti. U homogenní tažnosti bylo naměřeno 5,46 % a u celkové tažnosti 10,39 %, tj. o 26 %, resp. o 13 % nižší než u výchozího materiálu.

Po umělém stárnutí při teplotě 175 °C po dobu 4 hodin dosáhly hodnoty smluvní meze kluzu, homogenní tažnosti a celkové tažnosti přibližně stejných hodnot jako měl výchozí materiál. Pouze u meze pevnosti v tahu byla naměřena hodnota 322,3 MPa, tj. o cca 3 % nižší v porovnání s výchozím materiálem.

Na základě výsledků provedených experimentů lze firmě VÚKV a.s. doporučit další experimenty, při kterých budou tyto parametry tepelného zpracování aplikovány přímo na svarové spoje.

5 Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývá sledováním změny mechanických vlastností materiálu EN AW 6005 (AlMgSi) v závislosti na technologických parametrech následného tepelného zpracování. Konstrukční polotovary ze slitiny EN AW 6005 jsou ve většině případů dodávány ve vytvrzeném stavu. Pokud jsou při dalším zpracování na polotovary aplikovány teplotní cykly, dojde k výraznému poklesu jejich mechanických vlastností. Cílem práce bylo stanovit optimální podmínky tepelného zpracování, které by vedly k obnovení nebo přiblížení se na původní hodnoty mechanických vlastností.

Teoretická část práce se věnuje hliníku a jeho slitinám. Samostatná kapitola je věnována tepelnému zpracování, přičemž hlavní pozornost je věnována vytvrzování slitin hliníku.

Experimentální část této práce byla rozdělena na několik částí. Nejprve bylo stanoveno chemické složení a mechanické vlastnosti dodané slitiny EN AW 6005. Následně bylo prováděno tepelné zpracování za různých technologických parametrů a byl sledován jejich vliv na výsledné mechanické vlastnosti slitiny. Vliv tepelného zpracování byl hodnocen pomocí měření tvrdosti HBW podle ČSN EN ISO 6506 a u vybraných parametrů tepelného zpracování i statickou zkouškou v tahu v souladu s normou ČSN EN ISO 6892.

Výsledky experimentu potvrdily, že po aplikaci rozpouštěcího žihání dochází k výraznému poklesu pevnosti a tvrdosti, tažnost naopak vzroste. Výsledky experimentů ukazují, že pro slitinu EN AW 6005 je vhodné aplikovat rozpouštěcí žihání při teplotě 545 °C po dobu 1 hod.

Výsledky experimentů sledujících vliv parametrů vytvrzování na změnu mechanických vlastností ukázaly, že po přirozeném stárnutí nebylo dosaženo dostatečného zvýšení mechanických vlastností, a tedy že přirozené stárnutí není vhodné pro zásadnější obnovu mechanických vlastností slitiny EN AW 6005. Nejvyšších hodnot tvrdosti bylo dosaženo po aplikaci umělého stárnutí při teplotě 190 °C po dobu 2 hod., 175 °C po dobu 4 hod. a 160 °C po dobu 8 hod. Z hlediska pevnosti v tahu, smluvní meze kluzu a tažnosti se jako nejvýhodnější jeví umělé stárnutí při teplotě 160 °C po dobu 8 hodin.

Na závěr lze firmě doporučit provést další experimenty, u kterých by byly doporučené parametry tepelného zpracování aplikovány přímo na svarové spoje.

Seznam použité literatury

- [1] MICHNA, Š. a kol. *Encyklopedie hliníku*. Přešov: Adin s.r.o., 2005. ISBN: 80-89041-88-4
- [2] Global demand for semi-finished aluminium products in 2017, by sector. In: *Statista* [online]. 2. 9. 2019. [cit. 2019-10-5] Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/280983/share-of-aluminum-consumption-by-sector/>
- [3] Global aluminium consumption from 2016 to 2023. In: *Statista* [online]. 2. 9. 2019. [cit. 2019-10-5] Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/863681/global-aluminum-consumption/>
- [4] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [5] SOLFRONK, Pavel, Iva NOVÁ a Iva NOVÁKOVÁ. *Tvařitelnost slitin hliníku*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-825-0.
- [6] SCHWARZ, Marián. Odpady. In: *Odpady-online* [online]. 14. 10. 2014 [cit. 2019-04-14] Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/vyuziti-odpadnich-kalu-z-vyroby-hliniku-brani-ekonomicke-duvody/>
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [8] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK, Přemysl RYŠ a Antonín HRBEK. *Nauka o materiálu: nauka o kovech*. I., Neželezné kovy. 2. zcela přepr. a rozš. vyd. Praha: Academia, 1973.
- [9] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. Vyd. Úvaly: Albra, 2008 ISBN 978-80-7361
- [10] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 2: Označování chemickými značkami*. Praha: Český normalizační institut, 1994. Třídící znak 41101

- [11] 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, 2009. Třídící znak 421401
- [12] Legierung EN AW-6005. In: *MetallJosten* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.mejo.de/datenblaetter-legierungen/category/13-datenblaetter-legierungen.html>
- [13] SILBERNAGEL, Arnošt, Miroslav GREGER a Arnošt SILBERNAGEL. *Kovové materiály normované v České republice*. Ostrava: Kovosil, 2005. ISBN 80-901572-
- [14] ČSN EN 1780-2. *Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitin a odlitků – Část 2: Označování chemickými značkami*. Praha: Český normalizační institut, 2003. Třídící znak 421402
- [15] Unifont. In: *RHEINFELDEN ALLOYS Primary aluminium casting alloys* [online]. 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <http://rheinfelden-alloys.eu/en/alloys/unifont/>
- [16] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [17] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 20 s. Třídící znak 420359
- [18] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. Třídící znak 420310