



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU

HEAT TREATMENT OF ALUMINUM CASTING ALLOYS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Holátko

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Petr Holátko**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Tepelné zpracování slévárenských slitin hliníku

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Tepelné zpracování umožňuje řízeně měnit mechanické i fyzikální vlastnosti materiálů. Některé typy odlitků tepelné zpracování nevyžadují, pro jiné je však naprostou nezbytností pro dosažení špičkových parametrů požadovaných zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Je tedy důležité mít přehled o druzích a možnostech tepelného zpracování různých slitin.

### **Cíle bakalářské práce:**

Napsat literární rešerši shrnující používané druhy tepelného zpracování slévárenských slitin hliníku a dále provést a vyhodnotit experiment, kdy bude provedeno vytvrzení dvou typů Al slitin a měřena změna jejich tvrdosti.

### **Seznam literatury:**

Roučka, J. (2004): Metalurgie neželezných slitin. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 148 s. ISBN 80-214-2790-6

Sjölander, E. a Seifeddine, S. (2011): Artificial ageing of Al–Si–Cu–Mg casting alloys. Materials Science and Engineering, 528(24), 7402-7409.

Encyklopedie hliníku (2005): Děčín, Alcan Děčín Extrusions, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá popisem tepelných zpracování slévárenských slitin hliníku a je především zaměřena na nejčastější tepelná zpracování, tím je vytvrzování. V první části práce jsou popsány vlastnosti hliníku, jeho slitin a dále jsou vysvětleny jednotlivé druhy tepelných zpracování. Druhá část práce popisuje experiment, kdy byly vytvrzovány dvě různé hliníkové slitiny. Zde se práce zaměřuje na změnu tvrdosti před a po vytvrzení.

### **Klíčová slova**

Slévárenství, hliník, hliníkové slitiny, tepelné zpracování, tvrdost

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the description of the heat treatment of aluminium casting alloys and is particularly focused on the frequent heat treatment, which is hardening. The first part describes the properties of aluminium alloys and are further explained the different kinds of heat treatment. The second part describes the experiment, which were cured, two different aluminium alloys. Here, the work focuses on change in hardness before and after hardening.

### **Key Word**

Foundry, aluminium, aluminium alloy, heat treatment, hardness

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLÁTKO, P. *Tepelné zpracování slévárenských slitin hliníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Tepelné zpracování slévárenských slitin hliníku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny a citovány v seznamu použité literatury této práce.

V Brně dne 27. 5. 2016

-----  
Petr Holátko

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mně pomáhali s tvorbou bakalářské práce, především Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za věnovaný čas, odbornou pomoc a cenné rady a připomínky.

Také velice děkuji celé mé rodině za povzbuzování a podporu, kterou mně moji blízcí poskytovali po celé studium.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD .....	9
1 HLINÍK .....	10
1.1 Výroba hliníku .....	10
1.2 Vlastnosti hliníku .....	11
1.3 Použití čistého hliníku .....	12
2 SLITINY HLINÍKU .....	13
2.1 Slévárenské slitiny hliníku .....	13
2.2 Vybrané typy hliníkových slitin .....	14
2.2.1 Slitiny typu Al-Cu .....	14
2.2.2 Slitiny typu Al-Mg .....	15
2.2.3 Slitiny typu Al-Si .....	17
2.2.4 Slitiny typu Al-Si-Mg .....	17
2.2.5 Slitiny typu Al-Si-Cu .....	18
3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU .....	20
3.1 Vytvrzování .....	21
3.1.1 Rozpouštěcí žíhání .....	22
3.1.2 Prudké ochlazení .....	23
3.1.3 Precipitační vytvrzování .....	25
3.2 Žíhání .....	28
3.2.1 Žíhání na odstranění vnitřního pnutí .....	29
3.2.2 Stabilizační žíhání .....	29
3.2.3 Žíhání na měkko .....	30
3.2.4 Homogenizační žíhání .....	30
3.3 Značení režimu tepelného zpracování .....	31
4 EXPERIMENT .....	32
4.1 Zkoušky tvrdosti .....	33
4.2 Vytvrzování za tepla .....	33

4.3 Vytvrzování za studena.....	34
4.4 Hodnocení mikrostruktury pomocí světelné mikroskopie.....	36
ZÁVĚRY .....	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	45
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	46
SEZNAM TABULEK .....	48

## ÚVOD

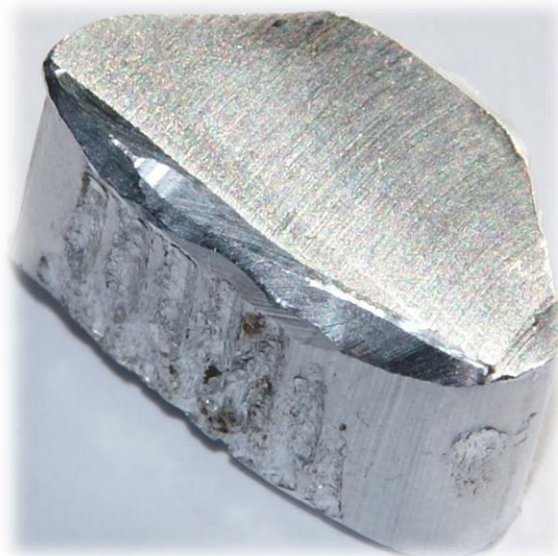
Hliník (**obr. 1**) je třetím nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře, je vázán ve sloučeninách s jinými prvky, např. křemíkem, sodíkem, železem, titanem atd., v přírodě se hliník nachází ve více než 250 různých minerálech, mezi nejdůležitější patří korund, diaspor, kyanit, kaolinit nebo nefelín.

Poprvé se podařilo extrahovat čistý hliník v Dánsku teprve v roce 1825. Hliník však byl pro svoji náročnost výroby dražší než zlato, a proto se využíval jen pro specifické účely ve zlatnictví. Od této doby však uběhla dlouhá desetiletí a byly nalezeny nové technologie výroby, které snížily cenu hliníku na pouhý zlomek. Hliník postupně našel cestu do mnoha sfér lidských činností – v dopravě, potravinářství, stavebnictví, strojírenství, chemickém a energetickém průmyslu a mnoha dalších.

Samotný hliník však nemá takové možnosti využití, především pro svoji malou pevnost a proto se tedy leguje dalšími prvky a tvoří s nimi slitiny.

Mezi nejvýznamnější legující prvky patří měď, hořčík, zinek, mangan a křemík.

Hlavní hybnou silou pro zvyšující se produkci hliníku je letecký a automobilový průmysl (**obr. 2**), kde je kromě zvýšení bezpečnosti snaha snížit spotřebu paliva, a tím zmenšit vypouštěné emise, čehož se dá dosáhnout především snížením hmotnosti. Dále se hliník využívá v potravinářství, např. jako obalové folie nebo k výrobě plechovek pro nápoje.



**Obr. 1** Vzorek hliníku [5]



**Obr. 2** Využití hliníku – automobilový průmysl [20]

## 1 HLINÍK [1,6,10]

Za rychlý vývoj produkce a spotřeby, který nemá u jiných kovů obdoby, až na výjimku – titanové slitiny, vděčí hliník svým fyzikálním, mechanickým a chemickým vlastnostem, díky kterým vyniká např. vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí, odolností vůči korozi nebo dobrou svařitelností.

### 1.1 Výroba hliníku [1, 6, 10, 26, 30]

Nejdůležitější ruda pro výrobu hliníku je bauxit. Pro získání jedné tuny hliníku je potřeba zpracovat, v závislosti na bohatosti, čtyři až šest tun této horniny. V současné době je ročně vytěženo přes 130 milionů tun bauxitu, z toho je téměř 95 % využito pro výrobu hliníku. Bauxit je bohatý na hydratovaný oxid hlinitý, jako gibbsit, boehmit nebo diaspor. Dále obsahuje přísady ve formě jílu, silikátů a hydroxidů železa, díky kterým získává



**Obr. 1.1** Hnědočervený bauxit [3]

typickou hnědočervenou barvu. Podoba bauxitu je na **obr. 1.1**.

První těžba byla zahájena ve Francii a od té doby bylo po celém světě objeveno mnoho dalších nalezišť. Naleziště bauxitu se vyvíjejí několik miliónů let a mohou dosahovat mocnosti až několika desítek metrů. Téměř třetina světové produkce bauxitu pochází z Austrálie, kde se nacházejí také největší doly na hliník [30].

Výrobní proces oxidu hlinitého z hlinitanových rud začíná mletím, loužením a žiháním při teplotě 1300 °C, poté se elektrolyticky redukuje oxidy v elektrolytu, kterým je roztavený kryolit  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Během elektrolýzy se na katodě vylučuje elementární hliník a na grafitové anodě vzniká kyslík, ten reaguje s materiálem elektrody.

Průmyslová výroba hliníku obnáší velkou spotřebu energie s nepříznivými důsledky pro životní prostředí, přičemž pro výrobu jedné tuny hliníku je spotřeba 14 MWh elektrické energie a 20 GJ tepelné energie. Avšak s postupným vývojem technologií se energetické nároky snižují.

## 1.2 Vlastnosti hliníku [1, 3, 4, 6, 17, 21]

Hliník je lehký, nestálý, neušlechtilý, kujný kov, stříbřitě šedé barvy a díky jeho kubicky plošně centrované krystalické mřížce má výborné plastické vlastnosti za tepla i za studena. Nejdůležitější vlastnosti čistého hliníku jsou shrnuty v **tab. 1.1**.

- Chemické vlastnosti – hliník má schopnost tzv. pasivace, která zajišťuje velmi dobrou odolnost proti korozi, kdy se do hloubky cca 10 nm vytvoří zoxidovaná vrstva  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tzv. korund. Tato vrstva vzniká už za pokojové teploty, běžně do jedné vteřiny a brání dalšímu oxidování materiálu.
- Mechanické vlastnosti – čistý hliník má nízkou pevnost v tahu, pod 100 MPa a tvrdost se pohybuje mezi 20 až 30 HB. Díky krystalické mřížce má hliník tažnost přes 20 %.

Pro slévárství je důležitá hodnota teploty tavení  $660\text{ }^\circ\text{C}$ , měrná tepelná kapacita  $896\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a vysoké skupenské teplo tavení  $397\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Tyto vlastnosti vysvětlují vysokou energetickou náročnost při tavení hliníkových slitin.

**Tab. 1.1** Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [26].

Veličina	Hodnota
Krystalická mřížka	Kubická plošně centrovaná
Parametr mřížky	$a = 0,404958\text{ nm}$
Tepelná vodivost	$247\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$
Elektrická vodivost	62 % IACS (Al 99,8)
Hustota	$2699\text{ kg}/\text{m}^3$
Teplota tavení	$660,4\text{ }^\circ\text{C}$
Teplota vypařování	$2519\text{ }^\circ\text{C}$
Atomové číslo	13
Atomová hmotnost	26,98
Mohsova stupnice tvrdosti	2,5
Pevnost v tahu	70 MPa
Tažnost	30 %

### 1.3 Použití čistého hliníku [11, 12, 26]

Technický hliník je využíván pro svoji chemickou odolnost a nízkou hmotnost. Našel uplatnění v mnoha odvětvích, především v dopravě, potravinářství, energetice a například i v kosmetice jako obalový materiál. Každý obor vyžaduje jiné procento čistoty hliníku, např. pro konstrukční účely je určeno minimálně 99% Al, pro elektrovodný hliník 99,85% Al a pro speciální účely se používá čistota až 99,999% Al. Pro hliník běžné jakosti je udávaná hodnota 99,5% Al. **Tab. 1.2** uvádí podíl využití čistého hliníku pro různá průmyslová odvětví.

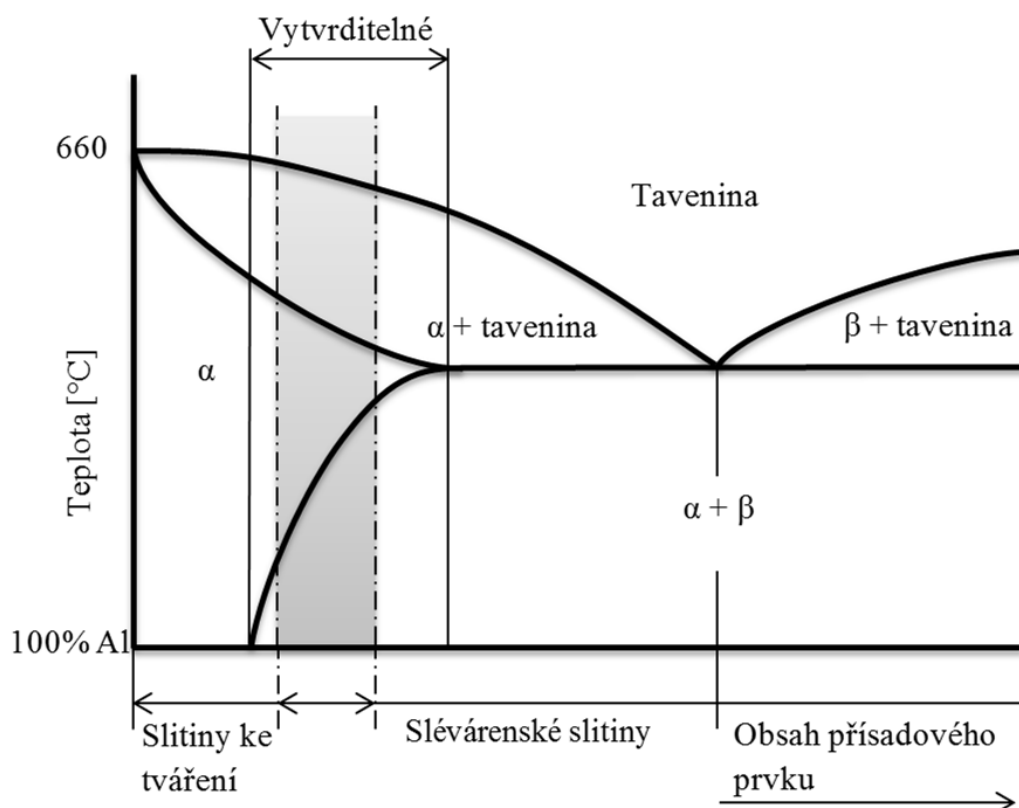
**Tab. 1.2** Podíl spotřebovaného hliníku pro jednotlivá odvětví v roce 2002 [12].

Odvětví	Podíl [%]
Doprava (letecká, automobilová, lodní, železniční, atd.)	59,1
Stavebnictví	18,4
Strojírenství	10,3
Elektrotechnický průmysl	7,2
Potravinářský průmysl	4,3
Ostatní	0,7

## 2 SLITINY HLINÍKU [5, 6, 9]

Hliník není vhodný pro konstrukční účely z důvodu nízké pevnosti, proto se používá převážně ve formě slitin s dalšími legujícími prvky, které zvyšují mechanické i technologické vlastnosti. Hlavními přísadovými prvky, které ovlivňují výsledné vlastnosti hliníkové slitiny, jsou křemík, hořčík, měď a dále zinek nebo mangan.

Hliníkové slitiny rozdělujeme na slévárenské slitiny a slitiny ke tváření, podle diagramu na **obr. 2.1**.



**Obr. 2.1** Rozdělení slitin hliníku v závislosti s binárním diagramem hliník-přísadový prvek [9]

### 2.1 Slévárenské slitiny hliníku [6, 9, 13]

Na rozdíl od slitin ke tváření, slévárenské slitiny obsahují více přísad pro lepší slévárenské vlastnosti. Větší obsah intermetalických fází ve struktuře zhoršuje plasticitu slitin, tomuto jevu lze zabránit zjemněním struktury buď rychlejším tuhnutím, nebo očkovaním přísadami do taveniny před litím, které způsobují přechlazení taveniny.

Určující vlastnosti hliníkovým slitinám dodávají hlavní přísadové prvky, jejichž obsah bývá druhý nejvyšší ve slitině hned po hliníku. Podle hlavního přísadového prvku dělíme slitiny hliníku do třech hlavních skupin. Pokud je hlavní legující prvek křemík, jedná se o siluminy, jestliže měď, mluvíme o duraluminu a slitina hliníku s hořčíkem se nazývá hydronalium.

Další prvky, které byly cíleně přidány do slitiny, se nazývají vedlejší přísadové prvky. Jejich obsah ve slitině je obvykle nižší než obsah hlavních přísadových prvků a mají za úkol zlepšit konkrétní vlastnosti slitiny a kompenzovat vedlejší účinky doprovodných prvků. Např. pro možnost vytvářet odlitky se do siluminů přidává měď nebo hořčík.

Ve většině případů jsou doprovodné prvky obsaženy ve slitinách neúmyslně. Většinou však negativně ovlivňují mechanické, chemické a jiné slévárenské vlastnosti. Proto mají slitiny předepsané maximální dovolené množství doprovodných prvků. Při překročení limitů, jsou považovány za nečistoty. Zdrojem doprovodných prvků bývá vsázka nebo prvky uvolněné z vyzdívky během tavení.

## 2.2 Vybrané typy hliníkových slitin [6, 27]

Přidáním různých prvků k čistému hliníku, vznikají slitiny, které mohou mít vlastnosti velmi odlišné od čistého hliníku. Změny způsobené legováním se nejvíce projevují zlepšením – především pevnosti i tvrdosti a mění se jak fyzikální tak chemické vlastnosti. Výsledných vlastností slitin se dosahuje kombinací přísadových prvků a také tepelným zpracováním.

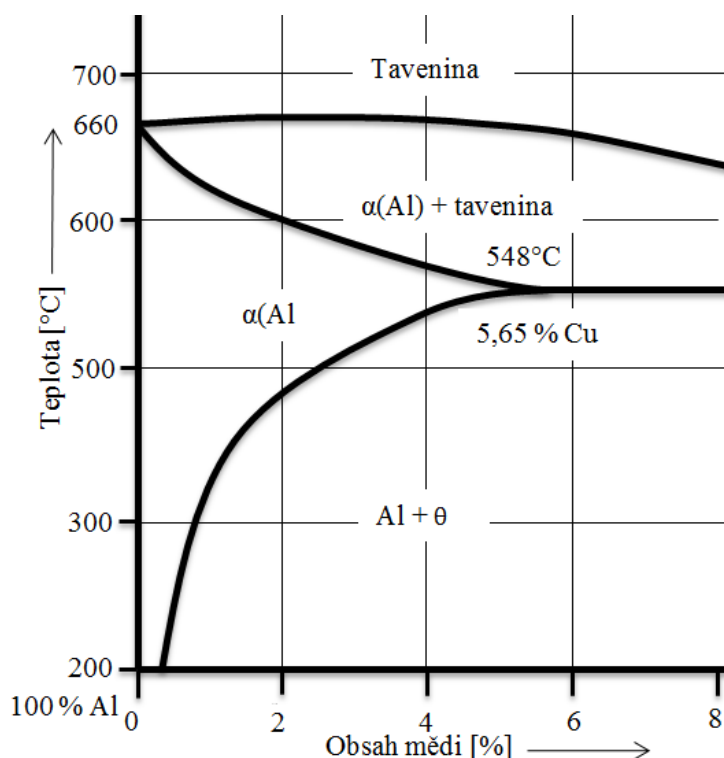
### 2.2.1 Slitiny typu Al-Cu [1, 6, 9, 14]

Obsah mědi může být až 12 %, avšak nejčastěji se pohybuje mezi 4 až 5 %. Na obr 2.3 je rovnovážný diagram pro slitiny, které mají reálný význam pro konstrukční účely. Samotná měď zvyšuje tvrdost i pevnost na úkor korozivzdornosti a tvárnosti. Za normální teploty se tyto výborně obrobitelné slitiny vyznačují vysokou pevností, tažností i houževnatostí a za zvýšených teplot mají dobrou pevnost. Mezi negativní vlastnosti se řadí zejména špatná odolnost proti korozi a omezená svařitelnost. Vyšších pevnostních vlastností za zvýšených teplot dosáhneme přidáním niklu nebo hořčíku.

Slitiny jsou vhodné pro odlévání nepříliš rozměrných součástí jednodušších tvarů s provozní teplotou do 300 °C. Slitiny se používají v leteckém průmyslu nebo např. pro písty spalovacích motorů.

Slitiny Al-Cu patří k tzv. vysokopevným slitinám hliníku. Vyznačují se vysokou pevností až nad 400 MPa. Tažnost a lomová houževnatost jsou až dvojnásobné oproti slitinám Al-Si. Odlitky z těchto slitin jsou vhodné pro použití za zvýšených teplot [6].

Slitiny se odlévají gravitačně do kovových, pískových i skořepinových forem. Ve slitinách často vznikají rozptýlené staženiny a jsou náchylné k praskání. Tyto velmi špatné slévárenské vlastnosti se mohou částečně vykompenzovat zjemněním zrna při očkování.



Obr. 2.3 Rovnovážný diagram Al-Cu [6, 9]

Měď tvoří s hliníkem slitiny s omezenou rozpustností v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$  a s eutektikem, které je tvořeno fázemi  $\alpha(\text{Al})$  a intermetalickou fází  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , označenou jako fáze  $\theta$ . Eutektická teplota je  $548\text{ }^\circ\text{C}$ , eutektická koncentrace  $33,2\text{ }\%$  Cu. Rozpustnost mědi v hliníku při eutektické teplotě je maximálně  $5,7\text{ }\%$  a ochlazováním se snižuje (při  $300\text{ }^\circ\text{C}$  je již rozpustnost pouze  $0,45\text{ }\%$  Cu a při nižších teplotách dále klesá). Snižující se rozpustnost Cu umožňuje provádět vytvrzování. Vytvrzování se provádí za tepla i za studena. [6]

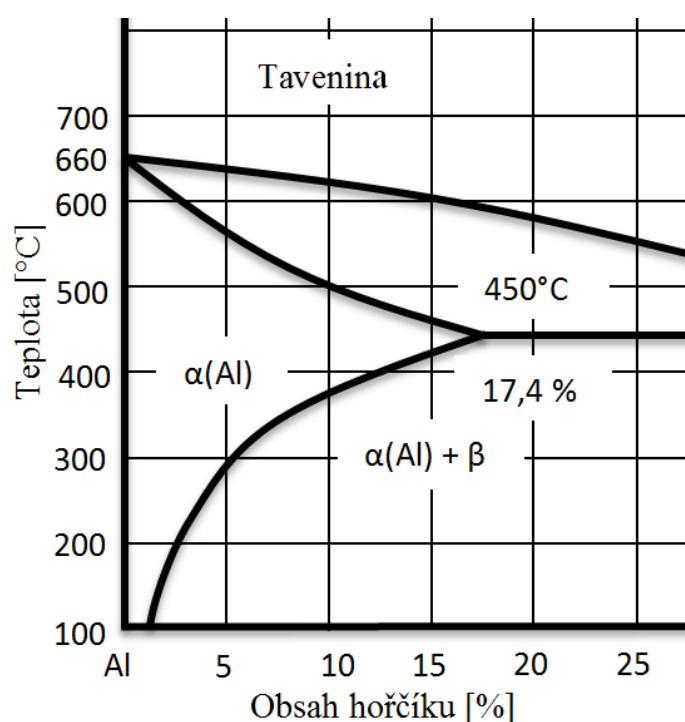
### 2.2.2 Slitiny typu Al-Mg [1, 6, 7, 9, 15]

Hořčík tvoří s hliníkem slitiny s maximální rozpustností  $17,4\text{ }\%$  Mg při eutektické teplotě  $450\text{ }^\circ\text{C}$ . S poklesem teploty a vlivem přísadových prvků se rozpustnost rychle snižuje. Eutektikum je tvořeno fázemi  $\alpha(\text{Al})$  a  $\beta(\text{Al}_8\text{Mg}_5)$ . Pokud je ve slitině obsažen křemík v množství cca  $1\text{ }\%$ , váže se hořčík především do sloučeniny  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Ta se vylučuje jako intermetalická fáze, která umožňuje provádět vytvrzování. Vytvrzování umožňuje rovněž měď a zinek, obvykle se však odlitky používají ve stavu tepelně nezpracovaném [6].

Slévarenské slitiny typu Al-Mg jsou děleny podle podílu hořčíku do tří skupin, s obsahem  $3\text{ a }5\text{ }\%$  Mg, které se lijí gravitačně nebo  $9\text{ }\%$  Mg, které se lijí tlakově. Čím vyšší je procento hořčíku ve slitině, tím jsou horší slévarenské vlastnosti, jako zabíhavost, sklon ke vzniku rozptýlených staženin a trhlin nebo možnosti nálitkování. Tyto negativní

vlastnosti je možné ovlivnit přidáním křemíku. S přibývajícím množstvím křemíku se ale naopak snižuje tažnost odlitku a proto se jej snažíme přidávat co nejméně.

Tavenina této slitiny má sklon k naplynění a při tuhnutí vznikají v odlitcích bubliny a staženiny, jejich četnost se zvyšuje s rostoucí teplotou taveniny, jako kritická teplota se udává 750 °C. Pokud při vyšší teplotě hrubne zrno, je možné přidat do taveniny cca 30 ppm beryllia, které kompenzuje hrubé zrno a zároveň snižuje oxidaci, přičemž se zlepšuje zabíhavost a tekutost taveniny při odlévání.



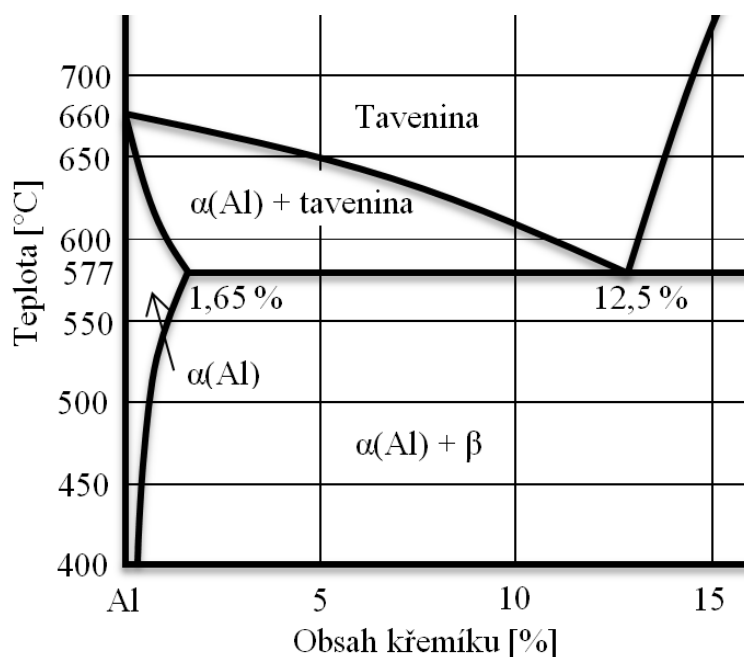
**Obr. 2.4** Rovnovážný diagram Al-Mg [6]

Nejčastěji se odlévá gravitačně do pískových nebo kovových forem, při nejnižší možné lící teplotě, která se pohybuje mezi 680 až 730 °C. Při liti do písku, je potřeba aby formovací směs obsahovala příměsí kyseliny borité, jinak by docházelo k reakci mezi formovací směsí a taveninou. Hořčík ve slitině rozšiřuje pásmo tuhnutí, čím je pásmo širší, tím jsou horší slévárenské vlastnosti. Proto se slitiny s 9 % hořčíku doporučuje odlévat pouze tlakově.

Slitiny Al-Mg mají všeobecně špatné mechanické vlastnosti, avšak se zvyšujícím se hořčíkem mírně roste pevnost, přesto jsou pod hodnotami běžných slitin siluminů a při teplotách nad 100 °C se dále zhoršují. Mezi pozitivní vlastnosti této slitiny se řadí velmi dobrá korozní odolnost, především v mořské vodě i v mírně alkalickém prostředí, dále výborná lešitelnost a obrobitelnost. Slitina Al-Mg našla uplatnění především v potravinářském a chemickém průmyslu, a pro dekorativní účely se používá také v automobilním a lodním průmyslu.

### 2.2.3 Slitiny typu Al-Si [1, 6, 27]

Typ Al-Si má dobré slévárenské vlastnosti, např. zabíhavost a nízký sklon ke tvorbě staženin, odlitky z těchto slitin mají dobrou těsnost vůči plynům i kapalinám. Dále se vyznačují dobrou svařitelností i odolností proti korozi. Tuhé částice křemíku zvyšují odolnost proti oděru. U této slitiny se běžně provádí tepelné zpracování, avšak samotný křemík neumožňuje vytvrzování. Pro možnost vytvrzování se musí slitina legovat hořčíkem, popř. mědí.



**Obr. 2.5** Rovnovážný diagram Al-Si [6]

Křemík má v hliníku jen velmi omezenou rozpustnost. Při eutektické teplotě je rozpustnost pouze 1,65 % Si a při poklesu teploty se dále snižuje – např. při teplotě 300 °C je rozpustnost jenom kolem 0,22 %. Ve slévárenských slitinách je obsah křemíku vždy vyšší, než je maximální rozpustnost v tuhém stavu roztoku  $\alpha(\text{Al})$ , proto vždy obsahují eutektikum  $\alpha(\text{Al})$ -Si. Eutektická koncentrace křemíku je 12,5 % Si (podle některých pramenů jen 11,7 %), eutektická teplota je 577 °C [6]. Rovnovážný diagram Al-Si je uveden na **obr 2.5**.

### 2.2.4 Slitiny typu Al-Si-Mg [1, 6, 27]

Tyto slitiny jsou momentálně nejčastěji používané hliníkové slitiny. Typ Al-Si-Mg je velmi univerzální, vyznačuje se velmi dobrou slévárenskostí a odolností proti korozi. **Tab. 2.1** ukazuje výčet použití a charakteristických vlastností u vybraných slitin Al-Si-Mg.

**Tab. 2.1** Charakteristika a oblasti použití některých slitin Al-Si-Mg [6]

Slitina	Charakteristika	Použití
<b>AlSi7Mg0,3</b>	Vysokopevnostní slitina s dobrou tažností a houževnatostí. Minimální příměsi a nečistoty. Velmi dobré slévárenské vlastnosti, odolnost vůči korozi. Dobrá obrobiteľnosť i svařitelnost.	Pro odlitky vyžadující vysokou pevnost a houževnatost. Letecký a raketový průmysl. Motorové díly, součástky podvozků, rámy.
<b>AlSi7Mg0,6</b>	Nejvyšší mechanické vlastnosti ze slitin Al-Si. Odolnost vůči vzniku trhlin, nepropustnost. Špatná obrobiteľnosť.	Pro odlitky vyžadující vysokou pevnost a houževnatost. Letecký průmysl, vysoce namáhané letecké součástky, vysokorychlostní dmychadla, ventilátory.
<b>AlSi10Mg</b>	Mírně podeutektické slitiny s nízkým obsahem doprovodných prvků a nečistot. Výborné slévárenské, technologické vlastnosti i obrobiteľnosť.	Tenkostěnné, tvarově složité odlitky s vysokými nároky na pevnost a houževnatost, např. vysoce namáhané strojní součástky, díly motorů, klikové skříně a brzdové čelisti.

Tyto slitiny jsou charakteristické obsahem Mg v množství 0,25-0,45 % (u některých slitin až 0,7 %), který umožňuje provádět vytvrzování za tepla. V litém stavu mají tyto slitiny pouze průměrné vlastnosti, vysoké mechanické vlastnosti dosahují až díky vytvrzování. Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické a podle obsahu křemíku se dělí na dvě skupiny, a to jsou AlSi7Mg a AlSi10Mg. Slitiny s vyšším obsahem křemíku mají lepší slévárenské vlastnosti a rovněž lepší svařitelnost. Obsah dalších prvků je limitován na velmi nízké hodnoty podobně jako u skupin Al-Si. Odlévají se jak do pískových, tak do kovových forem gravitačně i pod tlakem. [6]

Odlitky ze slitin Al-Mg-Si nacházejí uplatnění u vysoce namáhaných konstrukcí, nejčastěji tedy automobilový a letecký průmysl. Slitiny získají po vytvrzení vysoké mechanické vlastnosti jako pevnost a tvrdost. Dále má hořčík v matici odlitku pozitivní vliv na zlepšení obrobiteľnosti.

Slitiny tohoto typu mohou dosahovat po tepelném zpracování pevnost až 260 MPa a tvrdosti 90 HB [6].

### 2.2.5 Slitiny typu Al-Si-Cu [1, 6, 22, 23]

Siluminy s přísadou mědi Al-Si-Cu jsou slitiny se sníženým obsahem křemíku. Jsou vhodné pro výrobu nepropustných odlitků, jako jsou armatury benzinových motorů, karburátory, ucpávky apod. Jsou to slitiny s dobrými slévárenskými vlastnosti, nemají sklon k tvorbě trhlin za tepla, netvoří soustředěné staženiny a jsou dobře obrobiteľné.

Výhodou je, že jen málo pohlcují plyny. Přítomná měď zlepšuje jejich vlastnosti za zvýšených teplot, avšak působí na zhoršení jejich odolnosti proti korozi [1].

Mezi nejvýznamnější představitele slitin typu Al-Si-Cu patří podeutektická slitina AlSi9Cu3(Fe), která má největší zastoupení ze slévárenských slitin hliníku v automobilovém průmyslu. Z této slitiny jsou pod tlakem odlévány, např. ve Škoda Auto, a. s., všechny bloky motorů, skříně převodovek aj.

Díky téměř dvěma procentům mědi má slitina dobrou obrobiteľnost a možnost samovolného vytvrzování po rychlém ochlazení odlitku vodou, kdy se vytvoří přesycený tuhý roztok  $\alpha(\text{Al})$  po jehož rozpadu vzniknou precipitáty a tím se zpevní struktura odlitku.

Pokud jsou odlitky z těchto slitin tlakově lity jejich pevnost je až 240 MPa a tvrdost 80 HB [6].

**Tab. 2.2** Charakteristika a oblasti použití některých slitin Al-Si-Cu [6].

Slitina	Charakteristika	Použití
<b>AlSi5Cu</b>	Univerzální slitina s velmi dobrou obrobiteľností a pevností za zvýšených teplot. Za normální teploty je pevnost střední. Špatná odolnost proti korozi. Vhodné pro použití v suchém nebo mastném prostředí.	Strojní díly. Motorové odlitky pro osobní automobily, např. hlavy válců. Odlitky pro elektrotechniku a pro součástky pracující za vyšších teplot.
<b>AlSi9Cu</b>	Jedna z nejpoužívanějších slitin. Velmi univerzální slitina, vhodná především pro talkové lití. Střední mechanické vlastnosti, dobrou pevnost za vyšších teplot. Dobře obrobiteľná. Střední odolnost proti korozi Menší skol ke vzniku trhlin oproti AlSi5Cu	Typická slitina pro automobilové odlitky – skříně, bloky, víka, hlavy válců. Díly pro domácí spotřebiče. Vhodné pro tenkostěnné a tvarově komplikované odlitky.

### 3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU

[1, 6, 16, 17, 18, 29]

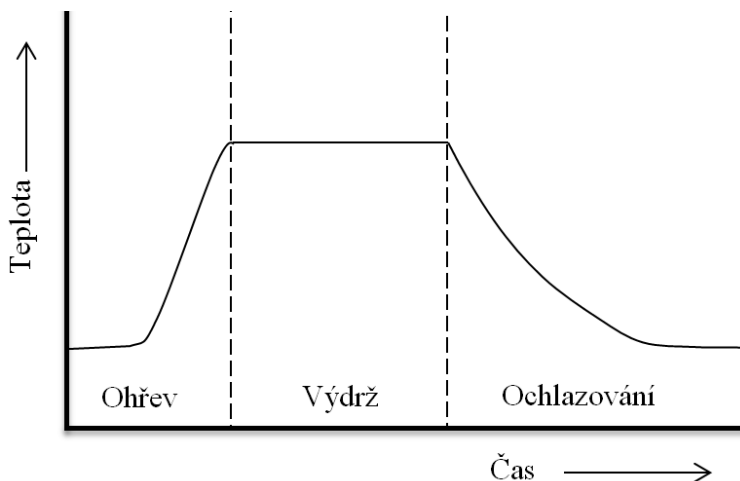
Norma ČSN 42 0056 popisuje tepelné zpracování neželezných kovů a jejich slitin jako operaci pro dosažení požadovaných struktur a vlastností pomocí jednoho nebo více žihacích cyklů odlitku. **Tab. 3.1** uvádí základní pojmy tepelného zpracování.

**Tab. 3.1** Základní pojmy tepelného zpracování [1].

Pojem	Definice
Žihací cyklus	Teplotní změna součásti v závislosti na čase a teplotě. Základní průběh závislosti je na <b>obr. 3.1</b> .
Ohřev	Proces zvyšování teploty výrobku na teplotu potřebnou pro další zpracování.
Rychlost ohřevu	Vzrůst teploty součásti za jednotku času.
Ochlazování	Proces snižování teploty výrobku na žádanou teplotu.
Rychlost ochlazování	Pokles teploty výrobku za jednotku času.
Kritická rychlost ochlazování	Nejmenší možná rychlost ochlazování, při které nenastane rozpad přesyceného tuhého roztoku po rozpouštěcím žihání.
Výdrž, prodleva	Udržení teploty výrobku v určitém teplotním pásmu, na dobu nutnou k provedení určitého tepelného zpracování.

Tepelné zpracování hliníkových slitin je určeno především pro odlitky lité gravitačně do pískových a kovových forem. V těchto odlitcích během tuhnutí segregují přísadové i doprovodné prvky a struktura je po zchladnutí hrubá, nehomogenní a vyskytují se vnitřní pnutí. Úkolem tepelného zpracování je tedy především ovlivnit rozložení prvků ve struktuře odlitku, dalším cílem je zlepšit mechanické vlastnosti, jako obrobiteľnosť nebo korozivzdornost a výjimečně se provádí pro stabilizaci rozměrů odlitku.

U tlakově odlévaných odlitků litých do kovových forem, kdy se tavenina velmi rychle ochlazuje a struktura odlitku je více homogenní, je efekt tepelného zpracování velmi malý, proto se provádí jenom ve výjimečných případech.

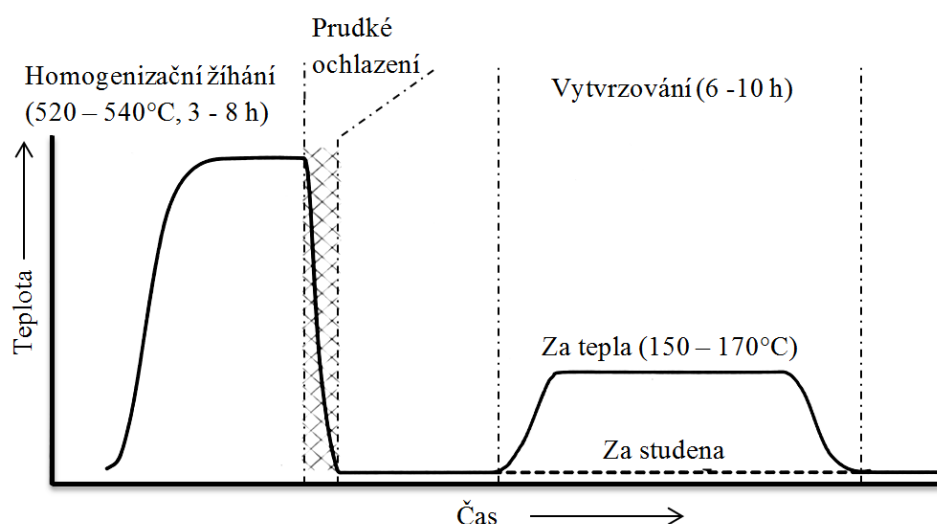


**Obr. 3.1** Časový průběh teploty při obecném režimu tepelného zpracování, příklad normalizačního žihání [1, 17]

Průběh teplotního cyklu je velice závislý na vlastnostech odlitku, jeho chemickém složení, struktuře kovu nebo tloušťce stěn. Pro správné tepelné zpracování jsou potřeba vhodné podmínky, především pec musí mít přesnou regulaci teploty a rovnoměrné rozložení přenosu tepelné energie do odlitku. Pec musí dokonale splňovat požadavky na teplotu, jako např. přesnost teploty v úzkém rozmezí  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a při homogenizačním žíhání je vyžadován teplotní rozptyl nanejvýš  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1 Vytvrzování [1, 6, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 27, 29]

Jedná se o nejčastější tepelné zpracování, které ve značném rozsahu mění mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti, konkrétně např. tvrdost, mez pevnosti  $R_m$  nebo mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Naopak se po vytvrzování snižuje tažnost. Průběh teploty je na **obr. 3.2**.



**Obr. 3.2** Závislost teploty na čase během vytvrzování za tepla a za studena (orientační hodnoty) [6]

Tento druh tepelného zpracování je podmíněn výraznou změnou rozpustnosti legujícího prvku v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$ , mezi tyto prvky se řadí především měď, hořčík a dále zinek nebo nikl. Je nutné, aby obsah těchto prvků byl větší než jejich rozpustnost při normální teplotě, ale zároveň nižší než je maximální rozpustnost v  $\alpha(\text{Al})$  při eutektické teplotě. Mezi vytvrditelné slitiny se tedy řadí dvou a více složkové slitiny hliníku, které obsahují výše zmíněné prvky, např. Al-Cu, Al-Si-Mg nebo Al-Mg-Zn.

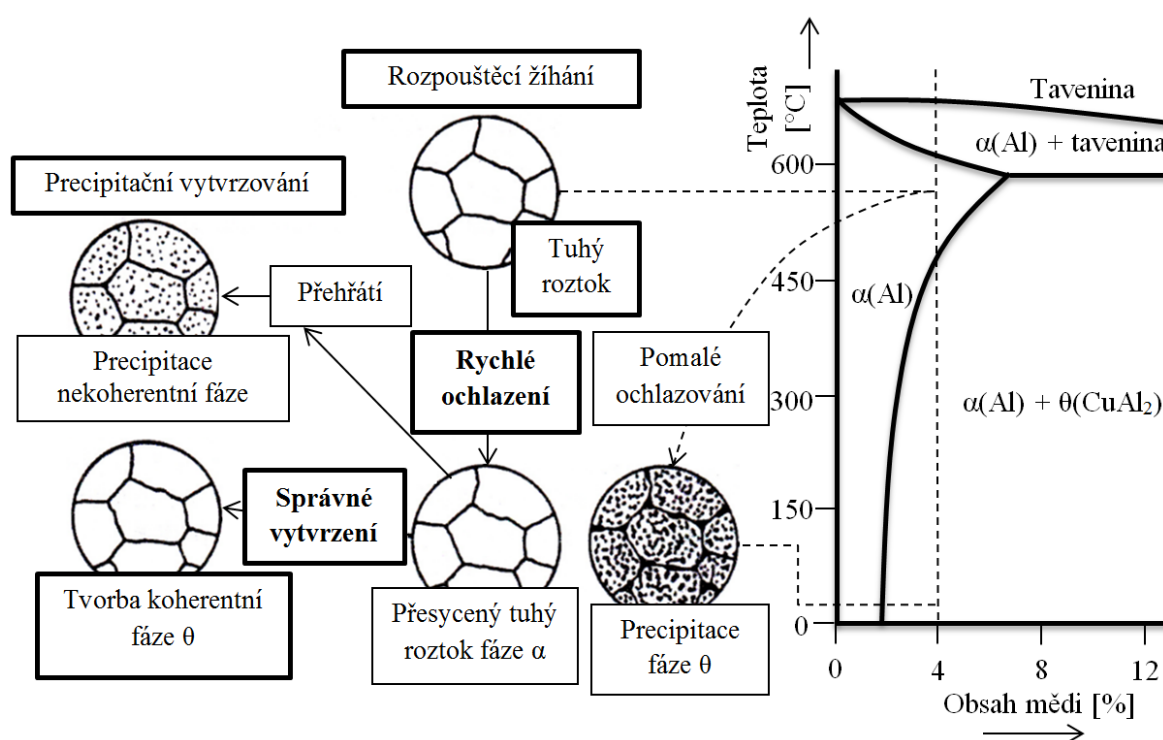
Při běžném ochlazování odlitku se začnou ve struktuře slitin vylučovat přísadové prvky jako rovnovážné intermetalické fáze, např.  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  a další podle přísadových prvků ve slitině, **tab. 3.2** ukazuje příklady vyloučených fází z konkrétních slitin. Tyto nově vzniklé fáze jsou hrubé a mají negativní vliv na mechanické vlastnosti slitin. Vytvrzování se provádí za účelem zpětného rozpuštění vzniklých

intermetalických fází do homogenního roztoku  $\alpha(\text{Al})$ , aby se následně vyloučily jako koherentní nebo semi-koherentní útvary, díky kterým jsou slitiny zpevněny.

Ve slitině Al-Si-Mg se teplota rozpouštěcího ohřevu, s ohledem na přítomnost ternárního eutektika ( $\alpha + \text{Si} + \text{Mg}_2\text{Si}$  s teplotou tavení  $558\text{ }^\circ\text{C}$ ), volí při teplotě  $535 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ . Následujícím prudkým ochlazením se získá metastabilní tuhý roztok  $\alpha$  [19].

**Tab. 3.2** Příklady vyloučené intermetalické fáze ze slitin Al [6].

Slitina Al	Al-Cu	Al-Ni	Al-Si-Mg	Al-Mg-Zn
Vyloučená intermetalická fáze	$\text{CuAl}_2$	$\text{Ni}_3\text{Al}$	$\text{Mg}_2\text{Si}$	$\text{MgZn}_2$



**Obr. 3.3** Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [6]

Vytvrzování je sled operací, kdy jednotlivé technologické úkony navazují v daném pořadí a každý z nich značně ovlivňuje vlastnosti výsledného materiálu. Teplotní průběh je na **obr. 3.3**. Operace následují v pořadí:

1. Rozpouštěcí žihání
2. Prudké ochlazení
3. Precipitační vytvrzování

### 3.1.1 Rozpouštěcí žihání [1, 6, 16, 17, 18, 29]

Tímto pojmem se rozumí ohřev odlitku nad křivku změny rozpustnosti a výdrž na této teplotě. Při výdrži dochází k rozpouštění intermetalických fází, které obsahují vytvrzující přísadové prvky. Pokud se množství přísadového prvku ve slitině blíží

k hranici maximální rozpustnosti ve fázi  $\alpha(\text{Al})$ , je snaha použít nejvyšší možnou rozpouštěcí teplotu.

Při homogenizačním žhání nesmí teplota překročit teplotu solidu. V takovém případě by došlo k natavení slitiny na hranicích zrn, to má za následek hrubnutí zrna a degradaci mechanických vlastností odlitku. V opačném případě, kdy je teplota nižší než optimální, nedosáhne se vytvrzováním požadovaných vlastností.

Zpravidla by měla být žhací teplota blízká teplotě tavení eutektika, nejlépe 10 až 15 °C pod eutektickou teplotou, poté je nutné dosaženou teplotu udržovat v rozmezí  $\pm 5$  °C, ve výjimečných případech pouze  $\pm 3$  °C.

Ohřívání odlitku na homogenizační teplotu by mělo být co možná nejrychlejší, aby nedošlo ke zhrubnutí zrna. Proto jsou odlitky vkládány do pecí, které už jsou předehřáté na pracovní teplotu a rychle se zahřejí na homogenizační teplotu. Avšak každá slitina má jinou eutektickou teplotu a pro každou slitinu se zvlášť určuje teplota výdrže pomocí termické analýzy.

### 3.1.2 Prudké ochlazení [1, 6, 16, 17, 18]

Pokud by byly odlitky po rozpouštěcím žhání ponechány např. při pokojové teplotě, začaly by se v kovu rychle vylučovat intermetalické fáze přísadových prvků z přesyceného roztoku fáze  $\alpha(\text{Al})$ . Způsob a rychlost ochlazování jsou závislé podle typu odlitku, tedy jeho chemickém složení, velikosti a tvaru. Ochlazování se velkou měrou podílí na vlastnostech konečného výrobku, neboť mění mikrostrukturu, což má vliv nejen na mechanické vlastnosti, ale také např. na odolnost proti korozi nebo elektrickou vodivost.

Doba mezi vyjmutím odlitku ze žhací pece a ponořením do vody, musí být co možná nejkratší, zvláště u tenkostěnných odlitků nemá překročit 10 s. Ačkoliv citlivost jednotlivých slitin na délku intervalu zamočení odlitků z homogenizační teploty se liší, neměl by interval zamočení překročit u běžných odlitků 10 až 20 s [6]. V případě kdy ochlazení odlitku trvá příliš dlouho, dojde k segregaci fází přísadového prvku na hranicích zrn, a tedy ke zhoršení mechanických vlastností odlitku.

Rychlost ochlazování odlitku z teploty rozpouštěcího žhání je závislá na ochlazovacím médiu. Ochlazování je možné provádět různými médii, např. studenou nebo teplou vodou, vodní mlhou, oleji a pro konkrétní případy solnými roztoky. **Tab. 3.3** ukazuje ochlazovací rychlost pro různá média při nulové rychlosti proudění.

**Tab. 3.3** Ochlazovací rychlost médií [1].

Ochlazovací médium	Rychlost ochlazování v intervalu 300-200 °C
Voda 18 °C	600
Voda 26 °C	500
Voda 50 °C	100
10% vodní roztok NaOH	1 200
10% vodní roztok NaCl	1 100
Olej 18 °C	100

V případě ochlazování odlitku ve vodě, kdy odlitek má mnohem vyšší teplotu než je bod varu vody, voda kolem odlitku začne vřít. Vzniklé plynné bubliny mají izolační účinek a prodlužuje se celková doba ochlazování odlitku. Tento problém vzniká především u masivnějších odlitků. Ve většině případů se tedy odlitek ochlazuje v proudícím médiu, popřípadě se odlitek v nádrži s médiem pohybuje a vždy je potřeba, aby se odlitek chladil rovnoměrně. **Tab. 3.4** uvádí rozdíl v rychlosti ochlazování mezi stojícím a cirkulujícím médiem.

**Tab. 3.4** Rychlost ochlazování v závislosti na rychlosti proudění médií [1].

Ochlazující médium	Nulová rychlost proudění média	Rychlost proudění média 0.5 [m.s <sup>-1</sup> ]
Voda 18 °C	600	2 400
10% vodní roztok NaCl	1 200	6 000
Olej 18 °C	100	110
Vzduch 18 °C	20	50

### 3.1.3 Precipitační vytvrzování [1, 6, 16, 17, 18, 25, 28, 29, 32]

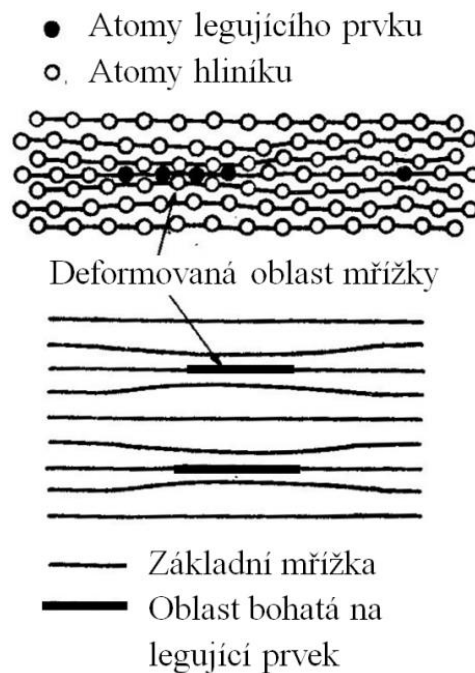
Je jinak známé jako stárnutí. V průběhu tohoto procesu dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$  a přísadové prvky difundují do mikroskopických oblastí, kde je zvýšený obsah těchto prvků. Toto slučování se projevuje vznikem nových fází, např.  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Z těchto fází postupně rostou koherentní precipitáty, nazývané jako Guiner-Prestonovy zóny.

K rozpadu přesyceného tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$  dochází ve většině případů samovolně při pokojové teplotě okamžitě po zchlazení. K velmi intenzivnímu rozpadu dochází u ternárních slitin Al-Cu-Ni, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si nebo u kvaternární Al-Zn-Mg-Cu. U dalších slitin je možné urychlit rozpad zvýšením teploty.

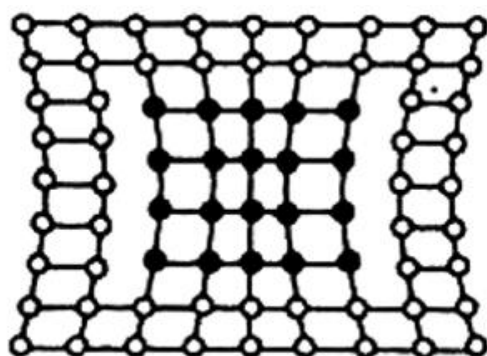
Guiner-Prestonovy zóny mají destičkové uspořádání vytvrzujícího prvku o tloušťce řádově  $10^{-9}$  až  $10^{-10}$  m, jsou to oblasti bohaté na přísadové prvky, avšak s jiným uspořádáním atomů. Atomy legujících prvků mají jiné mřížkové parametry než atomy hliníku v základní mřížce. Dochází tedy k vnitřnímu pnutí a deformaci krystalické mřížky (**obr. 3.4**), což se projevuje vyšší pevností a tvrdostí slitiny. Jestliže teplota překročí určitou hodnotu, postupně se koherentní precipitáty začnou slučovat a růst.

Pokud se bude počet precipitátů snižovat, koherence se začne vytrácet a propojení krystalických mřížek precipitátů s mřížkou přesyceného tuhého roztoku se začne postupně rozpadat.

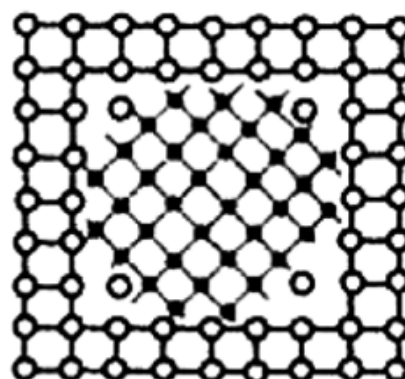
V prvním stádiu rozpadu se jedná o tzv. semikoherentní fáze, neboli částečně koherentní (**obr. 3.5**). Ty se v určité míře běžně vyskytují ve vytvrzovaných slitinách. Jejich mřížka je stále částečně propojena s tuhým roztokem a rozdíly v mřížkových parametrech jsou kompenzovány tvorbou dislokací, díky kterým dále roste pevnost i tvrdost.



**Obr. 3.4** Schéma vzniku pásem s vyšším obsahem legujících prvků [27]



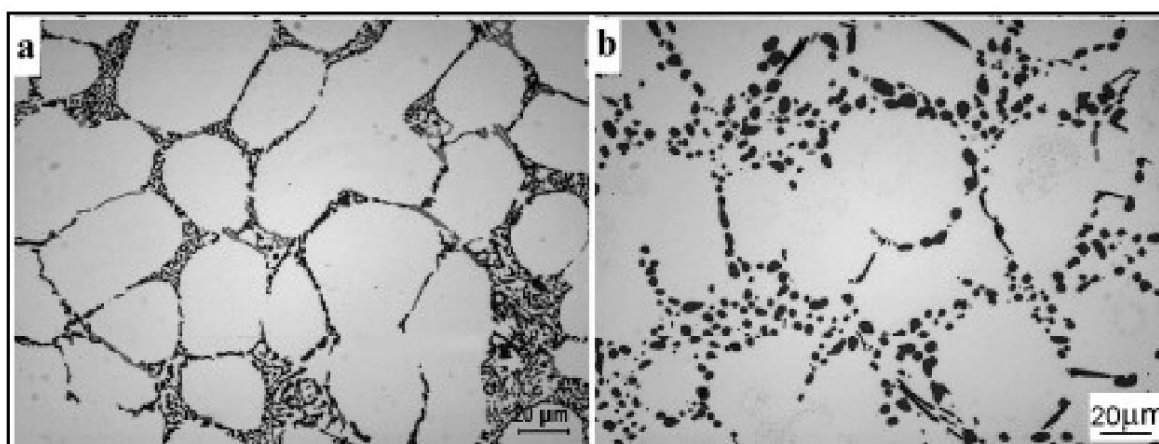
Obr. 3.5 Částečně koherentní precipitát [25]



Obr. 3.6 Nekoherentní precipitát [25]

V případě, že je slitina vytvrzována příliš dlouho, anebo při vyšších teplotách než je optimální rozmezí, dojde k přestárnutí slitiny. Tedy z částečně koherentní se stane nekoherentní fáze (**obr. 3.6**). Ta již nemá s krystalickou mřížkou tuhého roztoku  $\alpha(\text{Al})$  žádné vazby. Ztrátou vazeb zaniknou vnitřní napětí v krystalické mřížce a hodnoty tvrdosti a pevnosti se postupně vracejí na původní hodnoty před tepelným zpracováním.

Je možné provést tepelné zpracování slitiny T64 – pro maximální houževnatost, čímž slitina méně přestárne. Oproti maximu má tedy nižší pevnost i tvrdost, naopak se zvýší tažnost.



Obr. 3.7 Morfologie eutektického křemíku ve slitině  $\text{AlSi7Mg}_{0,6}$  modifikované stronciem, a) v litém stavu, b) po tepelném zpracování [28]

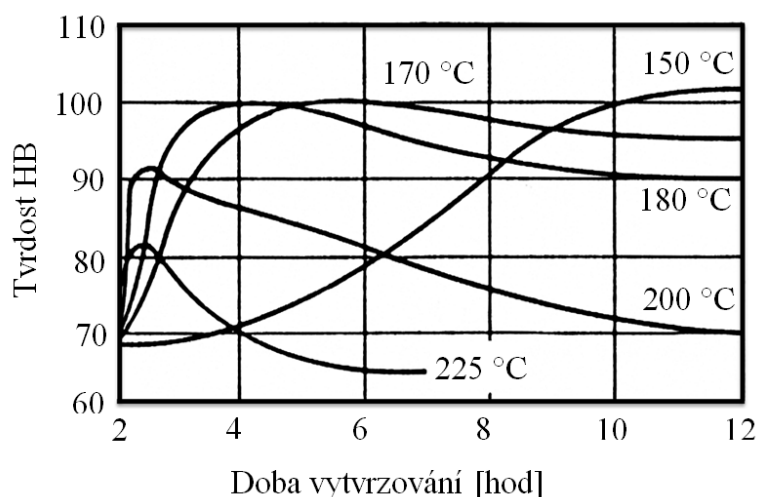
Tepelným zpracováním se mění morfologie eutektického křemíku a dochází ke sferoidizaci. Pokud je vytvrzována modifikovaná slitina, měl eutektický křemík tvar tyčinek. Tyčinky snadněji sferoidizují než destičky v nemoifikované slitině. Modifikace se tedy řadí mezi faktory ovlivňující výsledné vlastnosti slitiny. Porovnání struktur je vidět na **obr. 3.7**.

Podle teploty při které stárnutí probíhá, se rozlišuje stárnutí za normální teploty, tzv. přirozené a za zvýšené teploty, tzv. umělé stárnutí.

### a) Vytvrzování zvýšené teploty

Difúze precipitačních prvků probíhá při pokojové teplotě velmi pomalu. Pro urychlení těchto procesů se provádí umělé stárnutí při vyšších teplotách a odlitky jsou žihány v závislosti na velikosti 3 až 8 hodin. Různé literatury uvádějí rozdílné teploty vytvrzování, např. 150 až 170 °C [19], 140 až 180 °C [6] nebo 100 až 200 °C [27], vždy tedy záleží na druhu konkrétní slitiny.

Každá teplota stárnutí potřebuje určitou dobu výdrže pro dosažení nejvyšších hodnot. Při vyšší teplotě stárnutí je nutné zkrátit dobu ohřevu, pokud však bude překročena určitá hranice, dojde ke zhoršení mechanických vlastností. Kompenzace doby vytvrzování zvýšením teploty je možné jen do určitých mezí. **Obr. 3.8** názorně ukazuje závislosti mezi dobou a teplotou vytvrzování na výslednou tvrdost slitiny. Průběhy ukazují, že vyšší než optimální teploty zhoršují mechanické vlastnosti.



**Obr. 3.8** Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [6]

Vlastnosti slitiny po vytvrzení jsou závislé rovněž na obsahu vytvrzujícího prvku. Obsah hořčíku u běžných vytvrditelných slitin Al-Si-Mg bývá v mezích 0,3 až 0,45 % Mg, ve vysoko pevných slitinách až kolem 0,7 %. S rostoucím obsahem Mg se zvyšuje pevnost a tvrdost, avšak klesá tažnost, viz obr. 3.9 [6].

U slitin, u nichž se dosahuje nejlepších mechanických vlastností stárnutím za vyšších teplot, záleží také na intervalu mezi okamžikem ochlazení a počátkem ohřevu na teplotu stárnutí. Tato doba je u různých slitin různá.

### b) Vytvrzování normální teploty

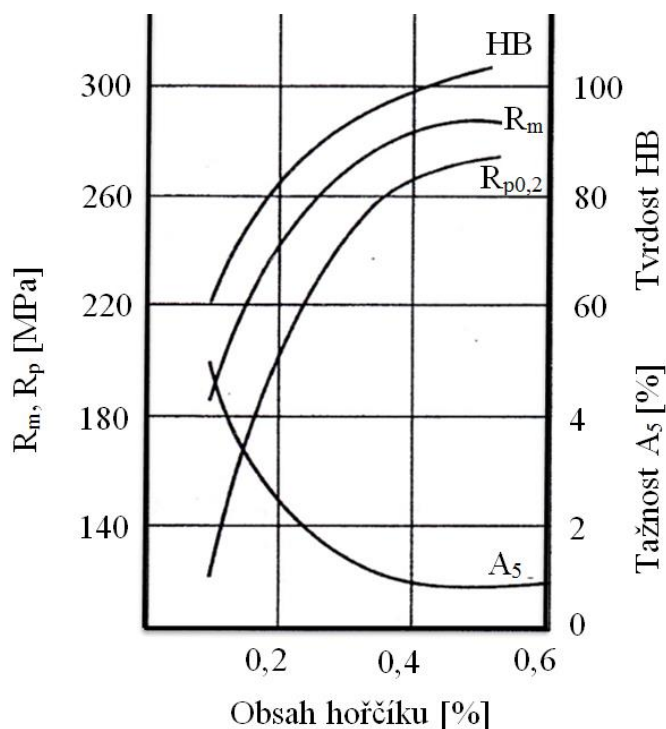
Proces vytvrzování za normální teploty je možný díky velké pohyblivosti atomů. Při rychlém tuhnutí, např. v kovových formách nebo po rozpouštěcím žihání, vzniká v přirozeně stárnocích slitinách částečně přesycená fáze  $\alpha(\text{Al})$ . Při běžné teplotě se slitina začne vytvrzovat, a tím se zvýší její pevnost i tvrdost.

Za studena se vytvrzují slitiny typu Al-Zn-Mg, rovněž slitiny AlCu4 a také slitiny typu Al-Si-Cu s vysokým obsahem mědi (např. AlSi6Cu4 nebo AlSi8Cu3) se částečně vytvrzují za studena. Proces stárnutí probíhá pomalu, samovolně a konečných vlastností výrobek dosáhne za více než 100 až 150 hodin. Z toho důvodu u těchto odlitků normy předepisují provádět měření mechanických vlastností až za 8 dní po odlití. Rovněž obrábění se má provádět nejdříve po uplynutí této doby [6].

Pokud je během stárnutí výrazně snížena teplota pod pokojovou teplotu, dojde ke zpomalení průběhu stárnutí, proces se může i úplně zastavit. Této vlastnosti se využívá pro prodloužení doby, kdy je možné odlitek jako polotovár zpracovat, např. hlubokým tažením, nýtováním apod.

### 3.2 Žihání [1, 6, 27, 29]

Druhou skupinou tepelného zpracování je žihání. Řadí se sem všechny ostatní druhy tepelného zpracování a nelze je zaměňovat s vytvrzováním. Žihání není příliš běžný způsob tepelného zpracování a některé druhy žihání jsou pouze samostatnou částí vytvrzování.



Obr. 3.9 Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti po vytvrzení [6]

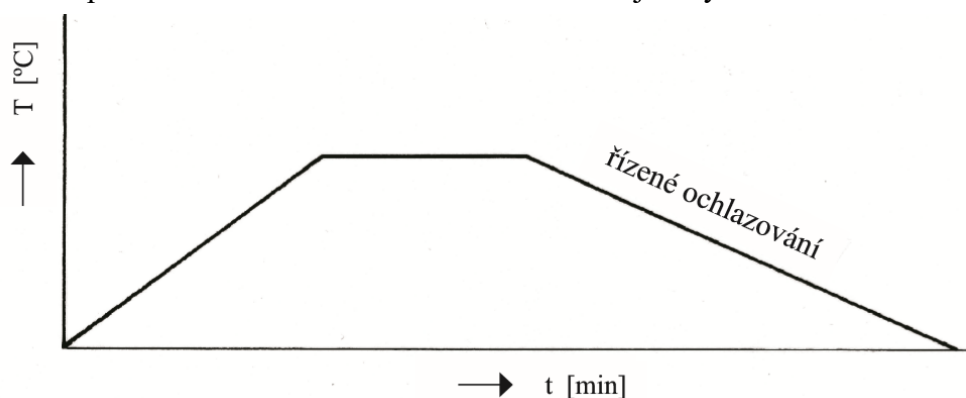
U hliníku a hliníkových slitin se aplikují tyto hlavní druhy žihání:

- Žihání na odstranění vnitřního pnutí
- Stabilizační žihání
- Žihání na měkko
- Homogenizační žihání

### 3.2.1 Žihání na odstranění vnitřního pnutí [1, 6, 27, 29]

Toto tepelné zpracování probíhá pod rekrystalizační teplotou. Skládá se z ohřevu, výdrže na teplotě a následným řízeným ochlazením, schéma průběhu teploty je na **obr. 3.10**.

Vnitřní pnutí u odlitků vzniká následkem nestejně rychlého ochlazení různých



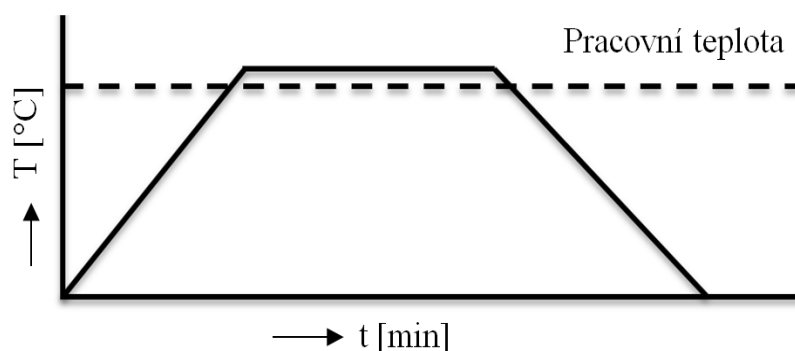
**Obr. 3.10** Průběh teploty při žihání na odstranění vnitřního pnutí [1]

průřezů nebo vlivem bržděného smršťování v nepoddajné formě, anebo tuhou konstrukcí odlitku. Žihání se provádí při teplotách 200 až 250 °C po dobu 6 až 8 hod. s následným pomalým ochlazením v peci nebo na vzduchu. Pro dokonalé snížení vnitřních pnutí je nutno žihací teploty zvýšit až na 250 až 350 °C, přitom však může dojít k určitému poklesu pevnostních charakteristik [6].

### 3.2.2 Stabilizační žihání [1, 6, 27, 29]

Provádí se za účelem stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních a chemických vlastností a rozměrů konečného výrobku. Používá se především na odlitky, které se jsou určeny k provozu za zvýšených teplot, nebo např. kdy vlivem opakujícího se tření dochází ke kolísání teplot.

Teplota stabilizačního žihání proto leží výše, než je maximální předpokládaná teplota dosažená při provozních podmínkách materiálu a bývá obvykle v rozsahu 240 až 350 °C [1]. Schéma průběhu teploty je na **obr. 3.11**.



Obr. 3.11 Průběh teploty při stabilizačním žihání [1]

### 3.2.3 Žihání na měkko [1, 6, 27, 29]

Žihání na měkko je druh tepelného zpracování, kdy se vytvrzenému odlitku vrací jeho vlastnosti před vytvrzením, snižuje se tedy pevnost i tvrdost pro získání tažnosti.

Provádí se jen výjimečně a to u slitin, které byly vytvrzeny a u nichž se má zpětně dosáhnout rovnovážného stavu. Teplota žihání se volí v rozmezí 350 až 450 °C, následuje pozvolné ochlazení v peci na teplotu alespoň 200 °C a dále na vzduchu [6].

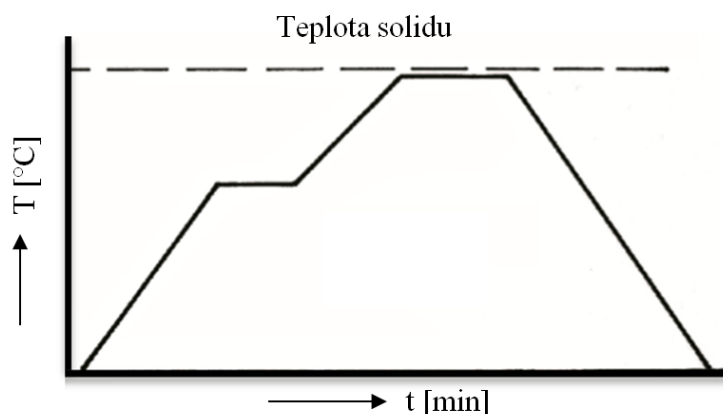
### 3.2.4 Homogenizační žihání [1, 6, 27, 29]

Tímto tepelným zpracováním se má vyrovnat chemické složení ve struktuře, popř. dosáhnout stejnorodé struktury, která bývá v odlitcích po ztuhnutí heterogenní. Teplota homogenizačního žihání se pohybuje nad křivkou rozpustnosti přísadového prvku v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$ . Doba žihání je závislá na stupni heterogenity složení a disperzi struktury.

Nejčastěji se však pohybuje mezi 3 až 15 hod. a jde o nejdélší tepelné zpracování.

Tímto dlouhým tepelným zpracováním se podporuje difuze strukturálních složek, které se vyloučily během tuhnutí.

Je možné provést tzv. dvoustupňovou homogenizaci, to je způsob homogenizace spočívající v aplikaci dvou po sobě následujících různých teplot za účelem odstranění nebo snížení chemické heterogenity difúzními procesy [1], teplotní průběh je znázorněn na obr. 3.12.



Obr. 3.12 Průběh teploty při dvoustupňovém homogenizačním žihání [1]

### 3.3 Značení režimu tepelného zpracování [1, 6, 29]

Označování stavu tepelného zpracování hliníku a jeho slitin bylo převzato z ASTM norem s platností pro státy USA a Kanadu, které je jako první zavedly, a je v souladu s normou ČSN EN 515. Označování je platné pro celou Evropskou unii [1].

Tepelné zpracování se značí písmenem T a až dvěma číslicemi. Výjimkou je pouze označení F. Nejčastěji používaná tepelná zpracování ve slévárenství jsou popsány v **tab. 3.5**.

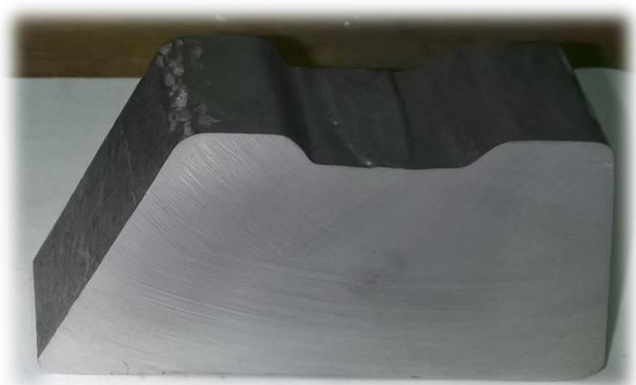
**Tab. 3.5** Značení vybraných teplotních režimů [6].

Označení	Popis tepelného zpracování	Typická doba teplota žihání
<b>F</b>	V litém stavu	
<b>O</b>	Žihání na odstranění vnitřních pnutí, nebo stabilizační žihání.	340 °C po 2 až 3 hod Ochlazováno na vzduchu
<b>T4</b>	Rozpouštěcí žihání a následné vytvrzení za studena	
<b>T5</b>	Umělé stárnutí při relativně nízkých teplotách bez předchozího homogenizačního žihání. Používá se pro dosažení vysoké pevnosti a houževnatosti.	205 až 260 °C po 7 až 10 hod
<b>T6</b>	Vytvrzování – skládá se z homogenizačního žihání, rychlého ochlazení a precipitačního vytvrzení za tepla. Používá se pro dosažení vysoké pevnosti a houževnatosti.	145 až 160 °C po 3 až 5 hod
<b>T64</b>	Vytvrzování na maximální houževnatost	
<b>T61</b>	Vytvrzování pro dosažení maximální pevnosti a tvrdosti. Avšak snižuje se houževnatost	150 až 170 °C po 6 až 7 hod
<b>T7</b>	Stejně jako T6, navíc s přestárnutím. Stabilizuje mechanické vlastnosti a rozměry odlitku, pevnost je menší, tažnost se zvýší oproti T6.	190 až 225 °C po 4 až 6 hod
<b>T71</b>	Přestárnutí do stabilního stavu. Oproti T7 se ještě více zvýší teplotní stabilita a odolnost proti korozi pod napětím, ale snižuje se pevnost.	225 až 260 °C po 6 až 10 hod

#### 4 EXPERIMENT [31, 32]

Cílem praktické části bakalářské práce bylo provést vytvrzení dvou typů slévarenských hliníkových slitin a změřit změny jejich tvrdosti. Pro experiment byly vybrány dvě různé hliníkové slitiny, a to pro umělé vytvrzování slitina AlSi7Mg a pro přirozené vytvrzování slitina AlSi9Cu3. Tyto slitiny splňují předpoklad pro vytvrzování, tedy že slitina AlSi7Mg obsahuje hořčík a slitina AlSi9Cu3 obsahuje měď. Rozměry vzorků byly cca 70x50x20 mm, podoba vzorků je na obr. 4.1.

Předepsané chemické složení dle norem ČSN 42 4332 pro slitinu AlSi7Mg a ČSN EN 1706 pro slitinu AlSi9Cu3 je spolu se zjištěným složením uvedeno v tab. 4.1 a tab. 4.2. Úplné chemické složení obou odlitků bylo změřeno pomocí optického emisního spektrometru Q4 Tasman.



Obr. 4.1. Podoba vzorku slitiny AlSi9Cu3

Tab. 4.1 Chemické složení slitiny AlSi7Mg [32].

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Na	Sr
<b>Předepsaný obsah [hm. %]</b>	max 7,5	max 0,45	max 0,15	max 0,35	0,25-0,65	max 0,05	max 0,05	max 0,05	max 0,05
<b>Naměřený obsah [hm. %]</b>	6,89	0,11	<0,01	0,02	0,32	<0,01	<0,01	<0,001	<0,001

Tab. 4.2 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 [32].

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Na	Sr
<b>Předepsaný obsah [hm. %]</b>	8,0-11,0	0,6-1,1	2,0-4,0	max 0,55	0,15-0,55	max 0,15	max 1,2	max 0,05	max 0,05
<b>Naměřený obsah [hm. %]</b>	10,03	1,01	3,01	0,24	0,29	0,04	0,85	<0,001	<0,001

Vzorky obou slitin byly žihány a následně vytvrzovány. U slitiny AlSi7Mg proběhlo umělé stárnutí v peci za zvýšené teploty, po jeho ochlazení se změřila tvrdost a byla porovnána s původní tvrdostí v litém stavu.

Druhá slitina AlSi9Cu3 byla po žihání a ochlazení ponechána při pokojové teplotě a po dobu 35 dní byla měřena změna tvrdosti.

U obou slitin byly provedeny metalografické výbrusy a pomocí mikroskopu se sledovaly změny vnitřní struktury ve slitinách, kdy byly porovnány stavy před a po vytvrzení.

## 4.1 Zkoušky tvrdosti

Během experimentu se prováděly zkoušky tvrdosti podle Brinella. Jako měřidlo sloužil automatický tvrdoměr Leco HPO 3000. Jako indentor sloužila kulička z karbidu wolframu o průměru 10 mm, byla zatížena 1000 kg po dobu 10 s.

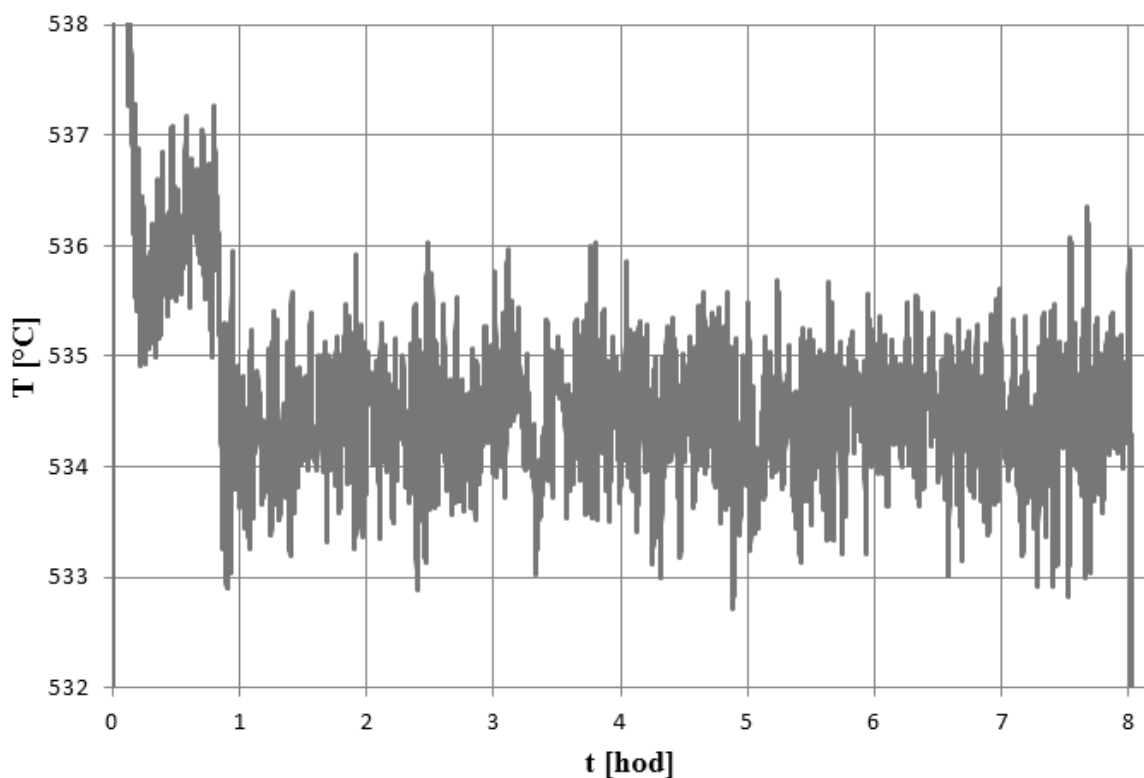
Při pravidelném měření přirozeně se vytvrzující slitiny bylo měření vždy 3x opakováno a výsledná tvrdost se spočítala jako aritmetický průměr. Všechna ostatní samostatná měření byla 5x opakována a výsledná hodnota vznikla jako aritmetický průměr.

Vtisky byly po odlehčení vyfotografovány pomocí stereomikroskopu Olympus SZ61 a fotografie byly vyhodnoceny v počítačovém programu QuickPHOTO Industrial 2.3.

## 4.2 Vytvrzování za tepla

K umělému stárnutí byla zvolena slitina AlSi7Mg.

Rozpouštěcí žíhání bylo provedeno v laboratorní odporové peci LAC L15T a teplota byla měřena pomocí termočlánku typu K umístěného těsně u zkušební vzorku. Žíhání probíhalo při teplotě 534 °C po dobu 8 hodin a teplotní rozptyl byl +2 °C až -1 °C, závislost teploty na čase během rozpouštěcího žíhání je v grafu na **obr 4.1**. Teplotní odchylka +3 °C během první hodiny měření nemá žádný vliv na výsledné mechanické vlastnosti odlitku.

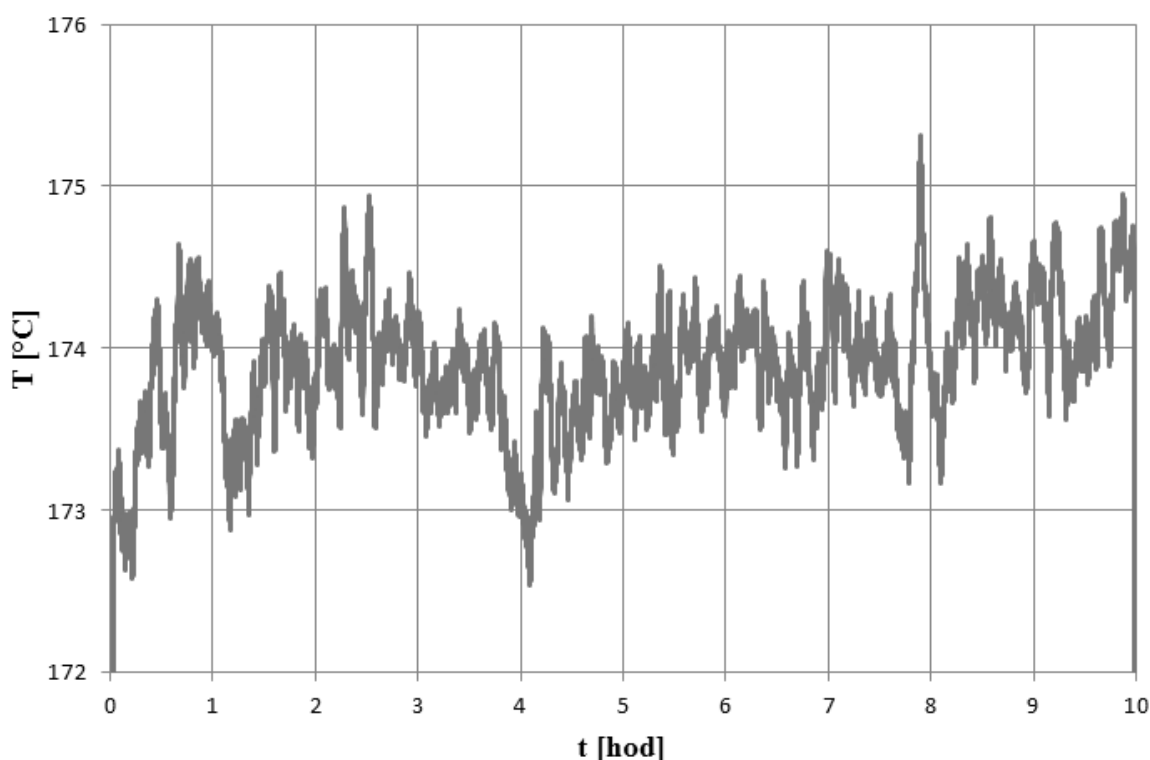


**Obr. 4.1** Průběh teploty během rozpouštěcího žíhání

Ochlazení z žíhací teploty bylo provedeno do vody o teplotě cca 20 °C a doba mezi vyjmutím odlitku z pece a ponořením nepřekročila 5 s.

Po zchlazení odlitku bylo provedeno umělé stárnutí vytvrzovacím žíháním v elektrické odporové peci LAC L15T. Odlitek byl uměle vytvrzován na teplotě 174 °C po dobu 10 hodin, při kterém byl teplotní rozptyl během výdrže -1,5 °C až +1 °C, závislost teploty na čase během vytvrzování je v grafu na **obr 4.2**.

Po ukončení ohřevu byl odlitek ochlazován na vzduchu při pokojové teplotě.



**Obr. 4.2** Průběh teploty během vytvrzovacího žíhání

Původní tvrdost slitiny AlSi7Mg před tepelným zpracováním byla 72 HB a ihned po rozpouštěcím žíhání odlitek mírně změkkl a tvrdost klesla na 71 HB. Po vytvrzovací žíhání a po ochlazení tvrdost vzrostla na 95 HB.

Celkově se tvrdost zvýšila o 23 HB oproti litému stavu, tedy o 32 %.

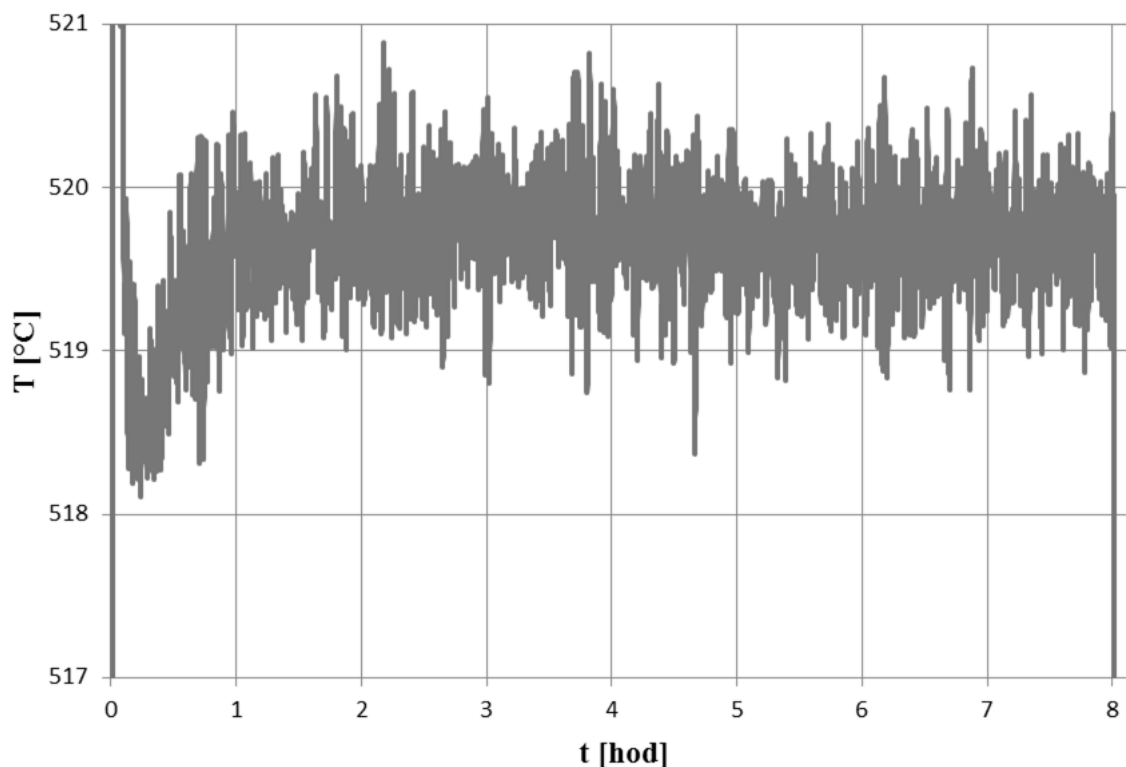
Po 6 a 14 dnech po vytvrzení se znovu změřila tvrdost odlitku, který byl uložen za pokojové teploty. V obou případech bylo znovu naměřeno 95 HB, tvrdost se už tedy nezměnila.

### 4.3 Vytvrzování za studena

Přirozené stárnutí bylo provedeno na slitině AlSi9Cu3, v elektrické odporové peci LAC L15T. Odlitek byl žíhán po dobu 8 hodin při teplotě 520 °C. Teplotní odchylka se během měření pohybovala v rozmezí -1,5 °C až +1 °C, závislost teploty

na čase během rozpouštěcího žíhání je v grafu na **obr 4.3**. Teplotní odchylka přibližně 2 °C během první půl hodiny nemá vliv na výsledné mechanické vlastnosti.

Ochlazení ze žíhací teploty bylo provedeno do vody o teplotě 20 °C a doba mezi vyjmutím odlitku z pece a ponořením nepřekročila 5 s.



**Obr. 4.3** Průběh teploty během rozpouštěcího žíhání

Po ochlazení byl odlitek uložen při pokojové teplotě a po dobu 35 dní se měřila změna jeho tvrdosti.

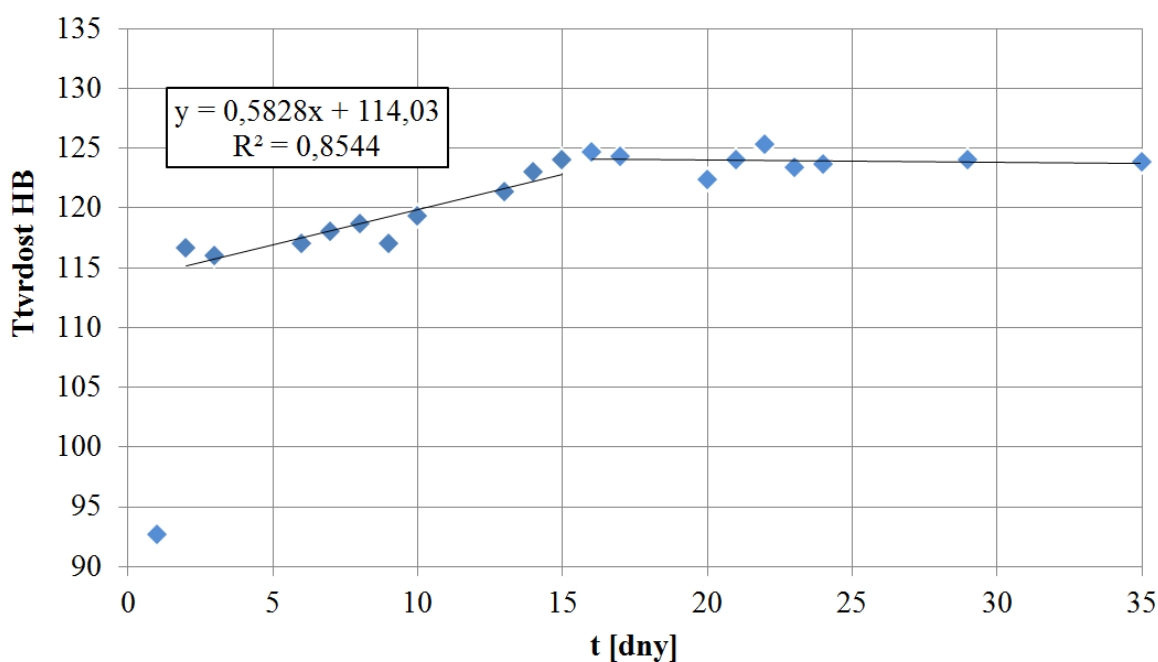
Před tepelným zpracováním měl odlitek tvrdost 106 HB. Ihned po tepelném zpracování odlitek změkkl a byla naměřena tvrdost 93 HB.

Ve druhém dni vytvrzování nastal největší růst tvrdosti vzorku na 117 HB, tedy zvýšení o 26 % hodnoty tvrdosti ihned po vytvrzení.

Postupně během 35 dní tvrdost vzrostla na 124 HB a výsledně tedy tvrdost vzrostla o 17 % původní tvrdosti slitiny v litém stavu. Růst hodnot tvrdosti je znázorněn v grafu na **obr. 4.4**.

Růst tvrdosti vzorku se ustálil asi po 15 dnech od vytvrzování na 124 HB.

V programu Excel byly body grafu od 2. do 15. dne proloženy přímkou a byla vypsána rovnice přímky, ze které vyplývá, že po počátečním prudkém nárůstu tvrdosti během prvního dne, se zvyšování tvrdosti zpomalilo a během následujících 14 dnů tvrdost každý den vzrostla cca o 0,6 HB. Dále až do 35. dne měření se již tvrdost v podstatě neměnila.



**Obr. 4.4** Závislost tvrdosti na čase během přirozeného vytvrzování slitiny AlSi9Cu3

#### 4.4 Hodnocení mikrostruktury pomocí světelné mikroskopie

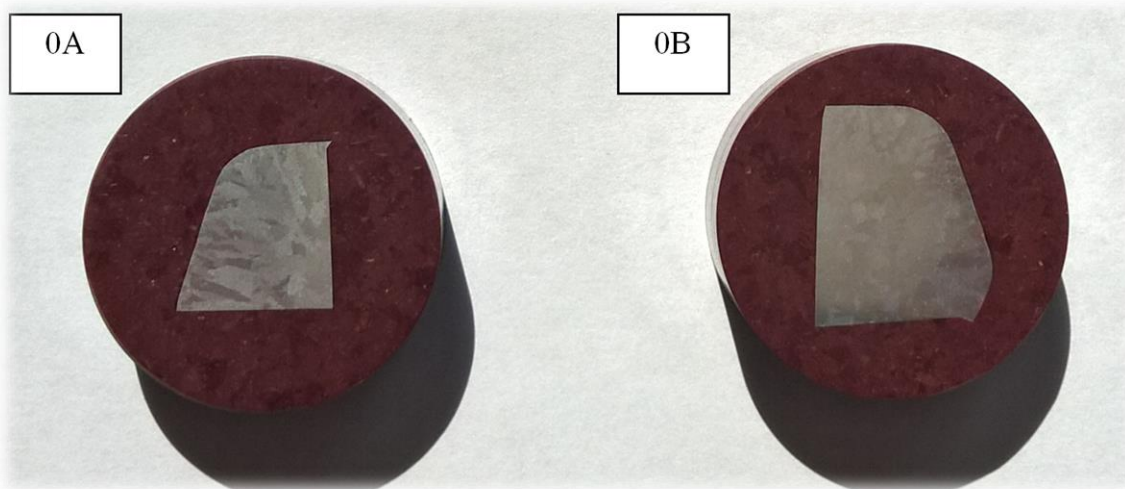
Z obou slitin byly odebrány vzorky pomocí metalografické rozbrušovací pily Struers Labotom-3. Vzorky byly z obou slitin odřezány před a po tepelném zpracování. Všechny 4 vzorky byly zalisovány do lisovací hmoty Metkon BAK-R a lisování probíhalo v lisu na přípravu vzorků Metkon Ecopress 100.

Broušení vzorků bylo provedeno podle standardních metalografických postupů na brusce a leštičce Struers LaboPol-5 s pomocí automatického dávkovacího zařízení leštící emulze Struers LaboDoser. K leštění vzorku byly použity leštící diamantové roztoky Struers o zrnitosti 9 a následně 3  $\mu\text{m}$ .

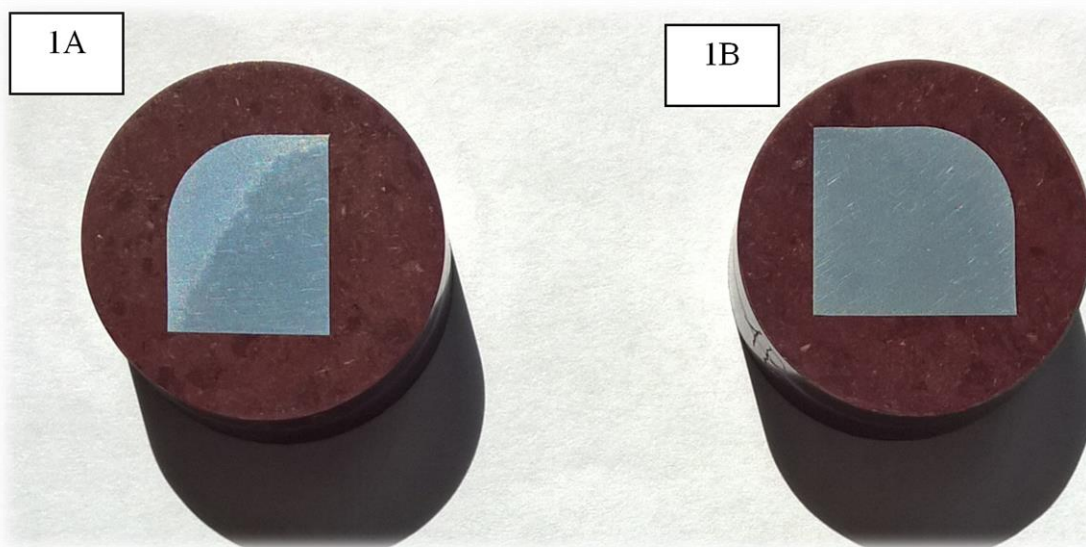
Připravené vzorky byly označeny podle **tab. 4.1** a jsou zobrazeny na **obr. 4.5** a **obr. 4.6**.

**Tab. 4.1** Značení měřených vzorků.

Vytvrzování	Značení	Tepelné zpracování	Značení
Přirozené - AlSi9Cu3	0	Před	A
Umělé - AlSi7Mg	1	Po	B



**Obr. 4.5** Zalisované vzorky – přirozeně vytvrzující AlSi9Cu3

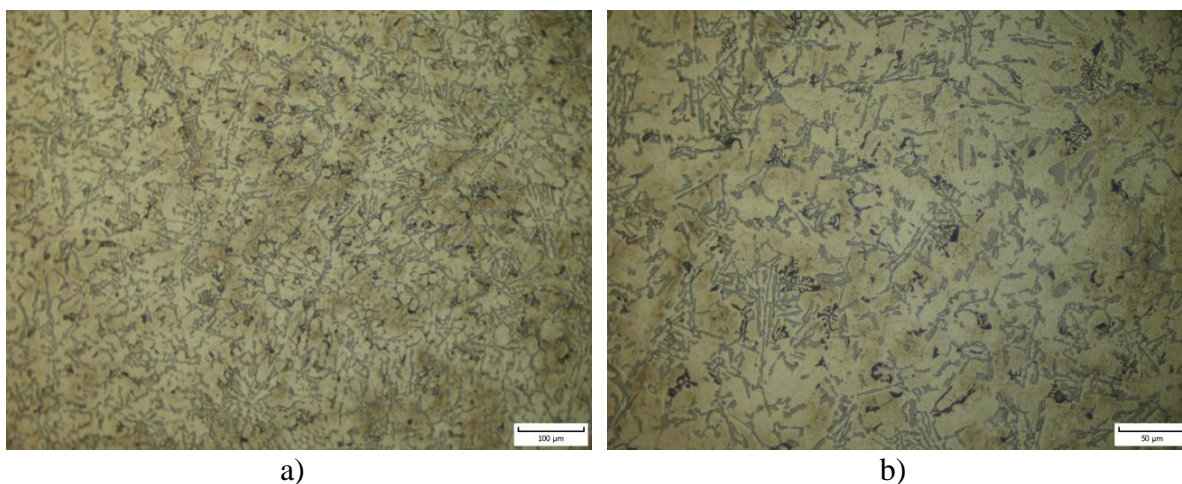


**Obr. 4.6** Zalisované vzorky – uměle vytvrzovaná AlSi7Mg

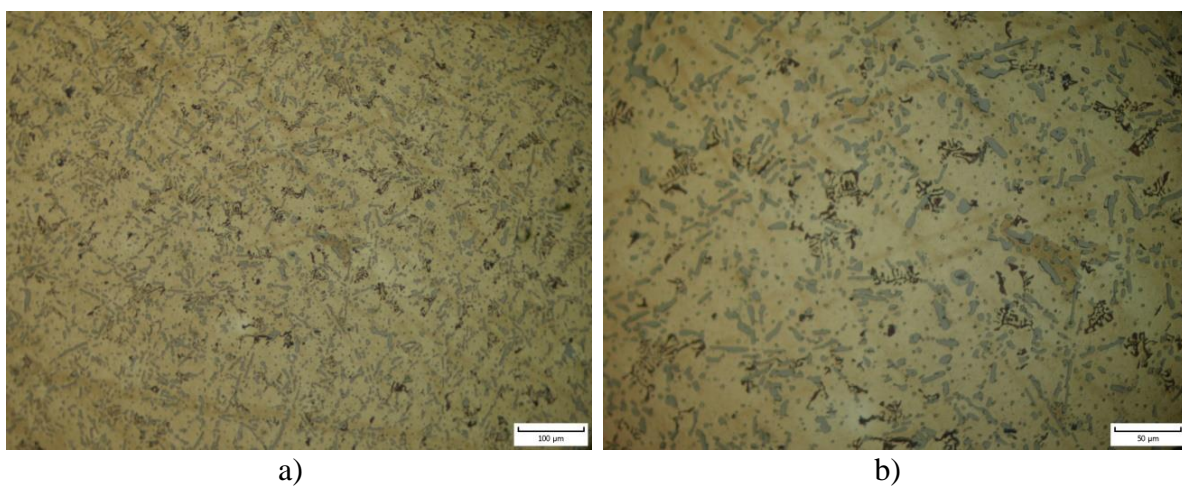
Vzorky byly vyfotografovány pomocí optického světelného mikroskopu MTM 406 a zpracovány v programu QuickPHOTO Industrial 2.2. Fotografie byly pořízeny při zvětšení 200x a 400x a každý vzorek byl fotografován na dvou různých místech.

Po sérii 16 fotografií byly vzorky leptány v leptacím roztoku Fuss a byla provedena další série 16 fotografií.

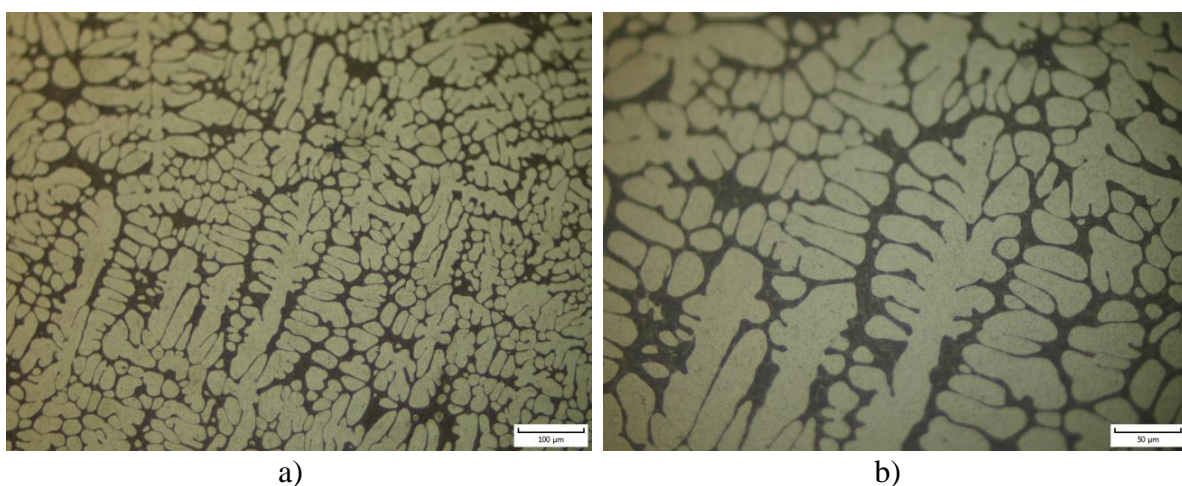
K vyhodnocení struktury byly vybrány fotografie leptaných vzorků, které nejlépe odpovídaly průměrné struktuře slitin.



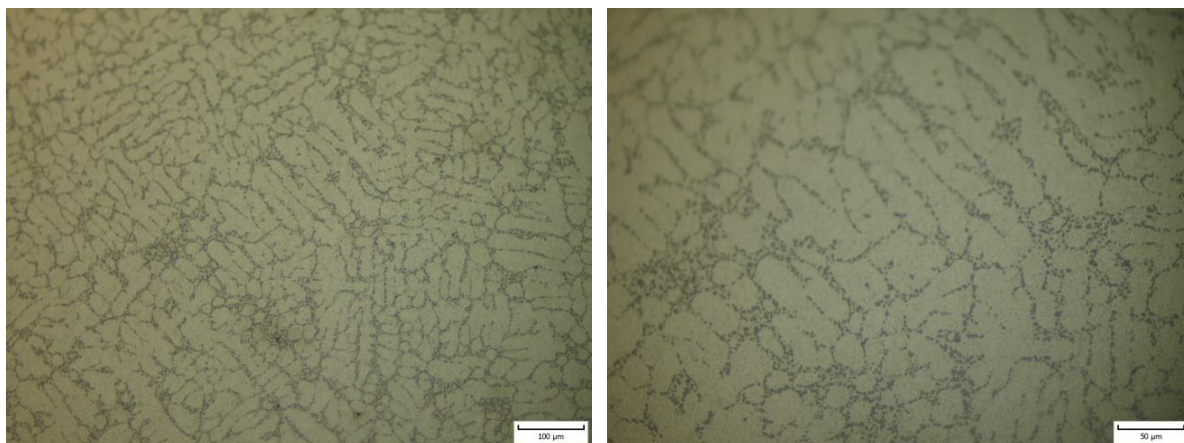
**Obr. 4.7** Mikrostruktura zkušební vzorku 0A; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x



**Obr. 4.8** Mikrostruktura zkušební vzorku 0B; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x



**Obr. 4.9** Mikrostruktura zkušební vzorku 1A; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x



a)

b)

**Obr. 4.10** Mikrostruktura zkušebního vzorku 1B; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x

## ZÁVĚRY

Cílem této bakalářské práce bylo napsat literární rešerši shrnující tepelné zpracování hliníkových slitin a provést a vyhodnotit experiment, kdy byly vytvrzeny dva typy hliníkových slitin a změřeny změny jejich tvrdostí.

První část práce je rešerše z odborné literatury. Jsou zde popsány vlastnosti čistého hliníku a jeho použití, je vysvětlen rozdíl mezi slitinami slévárenskými a určenými ke tváření a jsou popsány základní slévárenské slitiny.

Dále se práce věnuje tepelnému zpracování slévárenských slitin hliníku. Je zde podrobně popsáno vytvrzování, podmínky nutné pro vytvrzování a jeho postup. Jsou objasněny rozdíly mezi umělým a přirozeným vytvrzováním. Dále jsou vysvětleny druhy žihání. V neposlední řadě je shrnuto značení režimů tepelného zpracování hliníku a jeho slitin.

Druhá část bakalářské práce popisuje experiment, kdy byla uměle vytvrzována slitina AlSi7Mg a pro přirozené vytvrzování byla vybrána slitina AlSi9Cu3. Obě slitiny splňují předpoklady pro schopnost vytvrzování – obsahují legující prvek buď měď, nebo hořčík, které mají výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku  $\alpha(\text{Al})$ .

U obou slitin bylo provedeno rozpouštěcí žihání a pro zamezení vyloučení intermetalických fází byly odlitky rychle ochlazeny ve vodě.

Práce obsahuje grafy s průběhy teplot během všech žihání, ze kterých je patrné, že se žihací teplota během experimentu pohybovala v nižších teplotních tolerancích, než určují normy, tedy do  $\pm 5$  °C.

Slitina AlSi7Mg prošla vytvrzovacím žiháním, kdy vznikly koherentní precipitáty, díky kterým se zvýšila měřená tvrdost odlitku. Tvrdost v litém stavu před tepelným zpracováním byla 72 HB a po vytvrzování bylo neměřeno 95 HB. Tvrdost tedy vzrostla o 32 %.

Pohyblivost atomů ve slitině AlSi9Cu3 je dostatečná i za pokojové teploty, proto byl odlitek po ochlazení z rozpouštěcího žihání vytvrzován za studena. Tvrdost této slitiny byla měřena po dobu 35 dní, vzrostla z původních 106 HB v litém stavu až na 124 HB a zvýšila se tedy o 17 %. Z průběhu měření na **Obr. 4.4** je vidět, že vytvrzování probíhalo asi 15 dní, kdy denně vzrostla tvrdost asi o 0,6 HB. Během dalších dvaceti dní se už tvrdost téměř neměnila.

Dále byly odebrány z odlitků vzorky pro hodnocení mikrostruktury pomocí světelného mikroskopu. Bylo provedeno pozorování na obou slitinách a to před i po vytvrzení. Fotografie byly pořízeny ve zvětšení 200x a pro lepší viditelnost změn struktury i ve zvětšení 400x. Celkem bylo pořízeno 32 fotografií, ze kterých byly vybrány fotografie nejlépe odpovídající průměrné struktuře.

Při porovnání vnitřních struktur vzorků 0A a 0B, je možné vidět změnu morfologie křemíku, kdy došlo ke sferoidizaci. Lamely křemíku, jejichž hrany fungovaly jako koncentrátoři napětí, se zabalily. Tím došlo ke zlepšení mechanických vlastností, především tažnosti. Změny precipitátů nebylo možné sledovat pomocí světelné mikroskopie.

U struktur vzorků 1A a 1B nastal rozdíl u morfologie křemíku, který se rozpadl na jemné částice. Tím se zlepšily mechanické vlastnosti, především tažnost.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [2] *Citace.com* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/dokument/g5SOOVBQwQ0JVsa7>
- [3] *Česká geologická služba* [online]. [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>
- [4] *AL INVEST Břidličná, a.s.* [online]. 2012 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://www.alinvest.cz/index.php>
- [5] Aluminium. *Wikipedia* [online]. 2016 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>
- [6] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [7] Metalurgie slitin hliníku. *Strojnické tabulky online* [online]. 2014 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.strojnicketabulkyonline.cz/odlevani/metalurgie-slitin-hliniku/>
- [8] MRÁČEK, Jan. *Vlastnosti hliníkových slitin při teplotách mezi solidem a likvidem*. Panenské Břežany: Výzkumný ústav kovů, 1987, 78 s. Novinky v kovohutnictví.
- [9] SILBERNAGEL, Arnošt. *Nauka o materiálu: struktura a vlastnosti kovových materiálů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1991, 150 s. ISBN 80-707-8116-5.
- [10] PUCHNAR, Bedřich. *Hliník a hliníkové slitiny*. Praha: Ministerstvo hutního průmyslu a rudných dolů, 1957, 508 s.
- [11] LAŠTOVICA, Petr. *Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. s. 45. Vedoucí práce Ing. Markéta Říhová
- [12] Hliník. *Prvky.com* [online]. 2015 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/13.html>
- [13] DOLEŽAL, Jaroslav, Barbora STUNOVÁ a Vojtěch KUČERA. 2015. Současné poznatky o vlivu doprovodných prvků ve slitinách Al-Si. *Slévárenství* [online]. **2015**(10), 345 - 348 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/284189204\\_Soucasne\\_poznatky\\_o\\_vlivu\\_doprovodnych\\_prvku\\_ve\\_slitinach\\_Al-Si](https://www.researchgate.net/publication/284189204_Soucasne_poznatky_o_vlivu_doprovodnych_prvku_ve_slitinach_Al-Si)

[14] Slitiny hliníku. 2015. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Slitiny\\_hlin%C3%ADku](https://cs.wikipedia.org/wiki/Slitiny_hlin%C3%ADku)

[15] Aluminum-Magnesium (5000) Alloys. 2003. *Total Materia* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.totalmateria.com/Article75.htm>

[16] ROLEČEK, J. *Mechanické vlastnosti a struktura slitiny hliníku po tepelném zpracování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.

[17] Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2001. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.

[18] IRRETIER, Olaf. 2001. Tepelné zpracování hliníkových součástí - plně automatizovaná koncepce zařízení snižuje náklady na tepelné zpracování. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, **48**(7-8), 418-420. ISSN 0037-6825.

[19] BOLIBRUCHOVÁ, Dana, Eva TILLOVÁ a Mária CHALUPOVÁ. 2002. Skúmanie vplyvu doby tepelného spracovania na mechanické vlastnosti a štruktúru odliatku na hlavy valcou. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, **50**(4), 135-138. ISSN 0037-6825.

[20] SUPER GT GT300. 2014. *Logsoku.com* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.logsoku.com/r/2ch.net/f1/1412939358/>

[21] What is the quality of aluminum products. 2015. JONES, Richard. *Destination doowop* [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.destinationdoowop.com/>

[22] Vytvrzování hliníkové slitiny AlSi9Cu (Fe). 2008. KVAPIL, David a Vladěna RYLICHOVÁ. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, **LVI**(7-8). ISSN 0037-6825.

[23] DONG, Xixi, Liangju HE a Peijie LI. 2014. Gradient microstructure and multiple mechanical properties of AlSi9Cu alloy ribbon produced by melt spinning. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. **612**(5), 20-25 [cit. 2016-04-06]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.05.194. ISSN 09258388. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838814013012>

[24] RYLICHOVÁ, V. 2007. *Vytvrzování Al slitin*. Liberec. Diplomová práce. TU KMT.

[25] KARABAY, Sedat. 2008. Influence of AlB<sub>2</sub> compound on elimination of incoherent precipitation in artificial aging of wires drawn from redraw rod extruded from billets cast of alloy AA-6101 by vertical direct chill casting [online]. 7. Elsevier: Materials & Design [cit. 2016-04-12]. ISBN 0261-3069. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306907001677>

[26] Hliník. 2016. *Wikipedia* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>

[27] CHVOJKA, Jiří a Miroslav BRZOBOHATÝ. 1961. *Zpracování a použití hliníku a jeho slitin*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. Řada hutnické literatury.

[28] BIROL, Y. Response to artificial ageing of dendritic and globular Al–7Si–Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, roč. 484, s. 164-167. ISSN 0925-8388. Dostupné z: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

[29] Heat treating of aluminum and aluminum alloys. 2001. *Total materia* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=7>

[30] Bauxit. 2014. *Wikipedie* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bauxit>

[31] SJOLANDER, E. a S. SEIFEDDINE. Artificial ageing of Al-Si-Cu-Mg casting alloy. *Materials and manufacturing - Casting* [online]. **2011**, 7402-7409 [cit. 2016-05-26]. DOI: 74027409. Dostupné z: <http://www.journals.elsevier.com/materials-science-and-engineering-a>

[32] *Trimet Prag s.r.o* [online]. 2011. Dobříš [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.trimet.cz/cz>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Označení	Jednotka	Legenda
A <sub>5</sub>	%	Tažnost
a	nm	Parametr mřížky
A <sub>r</sub>	-	Relativní atomová hmotnost
c	kJ.kg.K <sup>-1</sup>	Měrná tepelná kapacita
E	Wh	Elektrická energie
G	Ω.m	Elektrická vodivost
H	HB	Tvrдость
hm. %	%	hmotnostní procenta
L <sub>t</sub>	kJ.kg <sup>-1</sup>	Skupenské teplo tání
ppm	10 <sup>-4</sup>	Part Per Milion
Q	W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Tepelná vodivost
Q	J	Tepelná energie
R	Ω	Elektrický odpor
R <sub>m</sub>	MPa	Mez pevnosti v tahu
R <sub>p0,2</sub>	MPa	Smluvní mez kluzu
T	°C	Teplota
Z	%	Kontrakce
α(Al)		Tuhý roztok křemíku v hliníku
β		Koherentí precipitát ve slitinách hliníku
ρ	g.cm <sup>-3</sup>	Hustota

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1</b> Vzorek hliníku .....	9
<b>Obr. 2</b> Využití hliníku – automobilový průmysl.....	9
<b>Obr. 1.1</b> Hnědočervený bauxit .....	10
<b>Obr. 2.1</b> Rozdělení slitin hliníku v závislosti s binárním diagramem hliník-přísadový prvek .....	13
<b>Obr. 2.3</b> Rovnovážný diagram Al-Cu .....	15
<b>Obr. 2.4</b> Rovnovážný diagram Al-Mg .....	16
<b>Obr. 2.5</b> Rovnovážný diagram Al-Si .....	17
<b>Obr. 3.1</b> Časový průběh teploty při obecném režimu tepelného zpracování, příklad normalizačního žihání.....	20
<b>Obr. 3.2</b> Závislost teploty na čase během vytvrzování za tepla a za studena (orientační hodnoty) .....	21
<b>Obr. 3.3</b> Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu.....	22
<b>Obr. 3.4</b> Schéma vzniku pásem s vyšším obsahem legujících prvků .....	25
<b>Obr. 3.7</b> Morfologie eutektického křemíku ve slitině AlSi7Mg0,6 modifikované stronciem, a) v litém stavu, b) po tepelném zpracování .....	26
<b>Obr. 3.5</b> Částečně koherentní precipitát.....	26
<b>Obr. 3.6</b> Nekoherentní precipitát .....	26
<b>Obr. 3.8</b> Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování .....	27
<b>Obr. 3.9</b> Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti po vytvrzení.....	28
<b>Obr. 3.10</b> Průběh teploty při žihání na odstranění vnitřního pnutí .....	29
<b>Obr. 3.11</b> Průběh teploty při stabilizačním žihání .....	30
<b>Obr. 3.12</b> Průběh teploty při dvoustupňovém homogenizačním žihání.....	30
<b>Obr. 4.1.</b> Podoba vzorku slitiny AlSi9Cu3 .....	32
<b>Obr. 4.1</b> Průběh teploty během rozpouštěcího žihání .....	33
<b>Obr. 4.2</b> Průběh teploty během vytvrzovacího žihání.....	34

<b>Obr. 4.3</b> Průběh teploty během rozpouštěcího žhání .....	35
<b>Obr. 4.4</b> Závislost tvrdosti na čase během přirozeného vytvrzování slitiny AlSi9Cu3 .....	36
<b>Obr. 4.5</b> Zalisované vzorky – přirozeně vytvrzující AlSi9Cu3 .....	37
<b>Obr. 4.6</b> Zalisované vzorky – uměle vytvrzovaná AlSi7Mg .....	37
<b>Obr. 4.7</b> Mikrostruktura zkušební vzorku 0A; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x .....	38
<b>Obr. 4.8</b> Mikrostruktura zkušební vzorku 0B; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x .....	38
<b>Obr. 4.9</b> Mikrostruktura zkušební vzorku 1A; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x .....	38
<b>Obr. 4.10</b> Mikrostruktura zkušební vzorku 1B; a) zvětšení 200x, b) zvětšení 400x .....	39

**SEZNAM TABULEK**

<b>Tab. 1.1</b> Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku.....	11
<b>Tab. 1.2</b> Podíl spotřebovaného hliníku pro jednotlivá odvětví v roce 2002 .....	12
<b>Tab. 2.1</b> Charakteristika a oblasti použití některých slitin Al-Si-Mg .....	18
<b>Tab. 2.2</b> Charakteristika a oblasti použití některých slitin Al-Si-Cu .....	19
<b>Tab. 3.1</b> Základní pojmy tepelného zpracování .....	20
<b>Tab. 3.2</b> Příklady vyloučené intermetalické fáze ze slitin Al .....	22
<b>Tab. 3.3</b> Ochlazovací rychlost médií.....	24
<b>Tab. 3.4</b> Rychlost ochlazování v závislosti na rychlosti proudění médií.....	24
<b>Tab. 4.1</b> Chemické složení slitiny AlSi7Mg .....	32
<b>Tab. 4.2</b> Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 .....	32
<b>Tab. 4.1</b> Značení vzorků.....	36

