

Optimalizace tepelného zpracování hliníkových slitin

Adam Úředníček

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Adam ÚŘEDNÍČEK

Osobní číslo: T09488

Studijní program: B3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Optimalizace tepelného zpracování hliníkových slitin

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši v dané oblasti
2. Připravte zkušební tělesa pro mechanické zkoušky
3. Proveďte experimentální zkoušky
4. Získané výsledky vyhodnoťte z hlediska praktických aplikací

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Úředníček Adam

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 16.5.2013

1) zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob

- zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.*
- (2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*
 - (3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*
- 2) *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*
- (3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*
- 3) *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*
- (1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*
 - (2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*
 - (3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

V této bakalářské práci na téma Optimalizace tepelného zpracování hliníkových slitin jsem měl za úkol prozkoumat možnosti tepelného zpracování odlitků ze slitin hliníku, popsat jednotlivé metody odlévání a také popsat jednotlivé metody tepelného zpracování. V této práci jsem se zaměřil na tepelné zpracování odlitku vyrobených odléváním do skořepinových forem vyrobených vytavyitelnými voskovými modely. Byly provedeny tahové zkoušky a také zkoušky tvrdosti podle brinella.

Klíčová slova: Tepelné zpracování hliníkových slitin, odlévání hliníkových slitin, zkoušky tvrdosti, tahové zkoušky.

ABSTRACT

In this bachelor thesis on Optimization of heat treatment of aluminum alloys I had a duty to explore the possibilities of heat treatment of aluminum alloy castings, describe various methods of casting and also describe the various methods of heat treatment. In this work, I focused on the heat treatment of the casting produced by pouring into shell molds made fusioner wax models. Tensile tests were carried out and the Brinell hardness test.

Keywords: Heat treatment of aluminum alloys, aluminum casting alloys, hardness testing, tensile testing

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Milanu Žaludkovi za odbornou pomoc při tvorbě mé bakalářské práce, za poskytnutí studijních materiálů a za cenné rady. Také děkuji firmě Alucast, s.r.o. za možnost realizace této práce a děkuji za jejich odborné rady v oblasti odlévání hliníkových slitin.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 16. 05. 2013

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 HLINÍK A SLITINY HLINÍKU.....	13
1.1 VLASTNOSTI HLINÍKU.....	13
1.1.1 Fyzikální vlastnosti hliníku.....	13
1.1.2 Chemické vlastnosti.....	14
1.1.3 Mechanické vlastnosti.....	14
1.2 SLITINY HLINÍKU.....	14
1.2.1 Slitiny hliníku pro tváření.....	14
1.2.2 Slitiny pro odlitky.....	15
1.2.3 Rozdělení podle označení, přísad a tepelného zpracování.....	15
1.3 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU.....	16
1.3.1 Slévárenské vlastnosti.....	16
1.3.2 Technologické vlastnosti.....	16
1.3.3 Mechanické vlastnosti.....	17
1.3.4 Index kvality.....	17
1.4 PŘEHLED SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU.....	18
1.4.1 Číselné značení slitin.....	18
1.4.2 Označení slitin chemickými značkami.....	18
1.4.3 Příklady použití vybraných slitin na odlévání.....	19
2 TAVENÍ SLITIN HLINÍKU.....	20
2.1 ENERGETICKÁ NÁROČNOST TAVENÍ.....	21
2.2 TAVÍCÍ A UDRŽOVACÍ PECE.....	22
2.2.1 Tavící pece.....	22
2.2.2 Udržovací pece.....	22
2.2.3 Požadavky na pece.....	22
2.2.4 Vytápění pecí.....	22
2.2.5 Druhy pecí.....	23
2.3 ÚPRAVA CHEMICKÉHO SLOŽENÍ TAVENINY.....	26
3 KONTROLA KVALITY.....	27
3.1 PROVOZNÍ KONTROLA.....	27
3.1.1 Kontrola chemického složení.....	27
3.1.2 Měření teploty.....	27
3.1.3 Technologické zkoušky.....	27
3.1.4 Termická analýza.....	27
3.2 LABORATORNÍ A PŘEJÍMACÍ ZKOUŠKY.....	28
3.2.1 Mechanické zkoušky.....	28
3.2.2 Metalografie.....	29
4 TECHNOLOGIE ODLÉVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN.....	30

4.1	ODLÉVÁNÍ DO NETRVALÝCH FOREM.....	30
4.1.1	Lití do pískových forem.....	30
4.1.2	V – Proces.....	30
4.1.3	Lití do skořepinových forem.....	30
4.2	ODLÉVÁNÍ DO KOVOVÝCH FOREM.....	31
4.2.1	Gravitační lití do kovových forem.....	31
4.2.2	Tlakové lití.....	33
4.2.3	Nízkotlaké lití.....	33
4.2.4	Lití s krystalizací pod tlakem – Squeeze casting.....	34
4.3	KONTROLA ODLITKŮ A OPRAVY VAD.....	34
4.3.1	Impregnace odlitků.....	34
4.3.2	Izostatické lisování.....	35
4.3.3	Opravy zavařováním.....	35
5	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU.....	36
5.1	VYTVRZOVÁNÍ.....	36
5.2	ŽIHÁNÍ.....	40
5.2.1	Žihání na odstranění vnitřního pnutí.....	40
5.2.2	Stabilizační žihání.....	40
5.2.3	Žihání na měkko.....	40
5.2.4	Homogenizační žihání.....	40
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	41
6	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	42
6.1	ZKUŠEBNÍ VZORKY.....	42
6.2	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	43
6.3	MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	45
6.3.1	Tahová zkouška.....	45
6.3.2	Zkouška tvrdosti	49
7	ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU.....	52
7.1	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	52
7.1.1	1. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 3,5 h).....	52
7.1.2	2. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 5 h).....	54
7.1.3	3. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 6 h).....	55
7.2	VÝSLEDKY ZKOUŠEK TVRDOSTI.....	56
7.2.1	1. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 3,5 h)	56
7.2.2	2. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 5 h)	57
7.2.3	3. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 6 h)	58
7.3	GRAFICKÉ ZNÁZORĚNÍ A VYHODNOCENÍ.....	59
7.3.1	Vyhodnocení.....	61
	ZÁVĚR.....	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	66
SEZNAM TABULEK.....	68

ÚVOD

V této bakalářské práci bylo hlavním cílem zjistit jaký typ tepelného zpracování je optimální pro slitinu hliníku.

V našem případě byla použita slitina AlSi7Mg0,3 a byla tepelně zpracována metodami jako jsou rozpouštěcí žihání a následně umělé stárnutí v pecích. Optimalizaci tepelného zpracování této hliníkové slitiny jsem zjišťoval pomocí tahové zkoušky na přístroji ZWICK BETA 50 a zkoušek tvrdosti podle Brinella. Všechny zkoušky a měření byly prováděny a zabezpečeny firmou Alucast, s.r.o. Tato firma se zabývá výrobou vysoce přesných odlitků z hliníkových slitin vyráběných metodou vytavitelného modelu. Jedná se o firmu, která patří mezi špičku v tomto oboru v rámci EU. Vyrábí se zde dílce nejen pro letecký a automobilový průmysl, ale také pro lékařství, optiku, železniční dopravu, telekomunikace, radiokomunikace atd.

Zvolil jsem si toto téma protože v této metodě výroby vidím velký potenciál, je to metoda, která usnadňuje spoustu dříve obtížných operací v průmyslu, díky této metodě je ušetřena práce, energie a také množství nákladů na materiál. Hliník je všeobecně lehčí než ostatní kovy a přidáváním různých materiálů do roztaveného hliníku vznikají slitiny s velmi zajímavými mechanickými vlastnostmi, které mají široké využití.

V teoretické části jsem se zabýval obecným seznámením s problematikou odlévání neželezných slitin, tepelným zpracováním materiálů, jednotlivými druhy a způsoby odlévání, typy pecí a kontrolou výsledných odlitků.

V praktické části jsem experimentálním způsobem zjišťoval jaké optimální tepelné zpracování je vhodné pro náš materiál daných rozměrů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HLINÍK A SLITINY HLINÍKU

Hliník je v přírodě jeden s nejčastěji se vyskytujícími kovy. V zemské kůře je ho okolo 8%.

V přírodě je vázán ve sloučeninách jako jsou bauxit, korund, spinely, kaolin, kryolit atd.

Historie využití hliníku v praxi je narozdíl od ostatních neželezných kovů velmi krátká.

V roce 1825 hliník poprvé získal v laboratoři Dán Christian Oersted chemickou redukcí draslíkem.[1]



Obr. 1 Příklad čistého hliníku [5]

1.1 Vlastnosti hliníku

1.1.1 Fyzikální vlastnosti hliníku

- hustota – $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$
- teplota tání – 660°C
- teplota vypařování – 2520°C
- krystalická mřížka – kubická plošně středěná
- mřížková konstanta – $a = 4,05 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- atomové číslo – 13
- atomová hmotnost – 26,98

Významné vlastnosti jsou také tepelná a elektrická vodivost.

Tepelná vodivost při 20°C u hliníku je $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a součinitel elektrické vodivosti je při normální teplotě $2,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, to se rovná 60% elektrické vodivosti mědi.[1]

1.1.2 Chemické vlastnosti

Hliník spolu s kyslíkem tvoří stabilní oxid Al_2O_3 . Na povrchu je oxidická vrstva která má za normální teploty tloušťku okolo 10 nm, ta brání hloubkové oxidaci a zaručuje odolnost proti povětrnostním vlivům.

Chemická odolnost závisí hlavně na pH daného elektrolytu. Když je pH mezi 4,5 až 8,5, tak je chemická odolnost vynikající, v prostředí zásaditém je však jen omezená.

Je-li ve slitině již několik setin procenta hořčíku, je oxidická vrstva tvořena spinely $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ a ochranný účinek vrstvy se sníží.[1]

1.1.3 Mechanické vlastnosti

Hliník v čistém stavu má špatné vlastnosti. Pevnost v tahu je pod 100MPa, tvrdost je 20-30HB. Plastické vlastnosti jsou velmi dobré (u všech kovů s kubickou plošně středěnou mřížkou), s tažností 20%. Při konstrukcích je čistý hliník téměř nepoužitelný.

Legováním se tyto vlastnosti zlepšují.

Z hlediska slévárenství je důležitá vysoká měrná tepelná kapacita hliníku, která je $0,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a vysoké skupenské teplo tání $396 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Díky těmto vlastnostem je vysoká energetická náročnost na roztavení hliníkových slitin.[1]

1.2 Slitiny hliníku

Slitiny se dají dělit různými způsoby. Nejběžnějším způsobem je dělení podle zpracování dle ČSN. 1. 1. 1995 bylo registrováno 18 slitin pro tváření a 16 slitin pro odlévání.

1.2.1 Slitiny hliníku pro tváření

- **Slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi**

Zde patří slitiny soustavy Al-Mg a Al-Mn. Jsou nevytvrditelné, jejich pevnost lze zvýšit deformačním zpevněním (tvářením za studena), ale jsou dobře svařitelné, odolné proti vibračním zatížením a mají dobrou lomovou houževnatost.

Patří sem také slitiny Al-Mg-Si, které se dají vytvrzovat tepelným zpracováním, jsou dobře tvárné a svařitelné. Používají se v letectví a ve stavebnictví (např. Avial)

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

Nejvíce používané jsou Al-Cu-Mg. Např.: duraly AlCu4Mg, AlCu4MgI a AlCu4MgIMn, dosahující pevnosti až $R_m = 530\text{Mpa}$ po vytvrzení. Používají se na výlisky a plechy.

1.2.2 Slitiny pro odlitky

Al-Si (siluminy), jsou to nejrozšířenější slitiny na odlitky. Al-Si slitiny se dělí na :

- podeutektické 4,5 – 10 % Si
- eutektické 10 – 13 % Si
- nadeutektické > 13 % Si

Ještě sem můžeme zařadit slitiny Al-Mg-Si, Al-Si-Cu, Al-Cu, Al-Mg.

[2]

1.2.3 Rozdělení podle označení, přísad a tepelného zpracování

Máme 8 řad, které určují dodatečný slitinový prvek a slouží k rychlé orientaci

Podle označení:

- řada 1000 – hliník min. 99 % a více
- řada 2000 – slitina Al-Cu
- řada 3000 – slitina Al-Mn
- řada 4000 – slitina Al-Si
- řada 5000 – slitina Al-Mg
- řada 6000 – slitina Al-Mg-Si
- řada 7000 – slitina Al-Zn
- řada 8000 – slitina Al s různými prvky

Podle hlavních přísad:

- siluminy (Al-Si)
- duralaluminium (Al-Cu)

- hydronalium (Al-Mg)

Podle tepelného zpracování:

- vytvrditelné
- nevytvrditelné

[3]

1.3 Slévárenské slitiny hliníku

Siluminy, duralaluminium, hydronalium

1.3.1 Slévárenské vlastnosti

- **Zabíhavost**

Jedná se o technologickou vlastnost, která udává schopnost tekutého kovu zaplňovat dutinu formy.

- **Sklon ke vzniku staženin**

charakterizuje objemový úbytek kovu během tuhnutí a tendenci ke vzniku staženin (vnitřních nebo vnějších).

- **Sklon k naplynění**

Charakterizován rozpustností plynů v tekutém stavu. Úroveň naplynění rozhoduje o vytvoření bublin v odlitku.

- **Odolnost proti vzniku trhlin**

Schopnost odolávat napětí, které vzniká vlivem smršťování v oblasti teplot tuhnutí a během ochlazování.

1.3.2 Technologické vlastnosti

- **Obrobitelnost** – je dána kombinací velikosti obráběcích sil, charakterem třísek, kvality obrobeneho povrchu a životností ostří obráběcích nástrojů.
- **odolnost proti korozi** – schopnost odolávat chemickému působení plynných nebo kapalných prostředí.

- svařitelnost
- leštitelnost
- nepropustnost

1.3.3 Mechanické vlastnosti

- Pevnost, tažnost
- pevnost za zvýšených teplot
- tvrdost

[1]

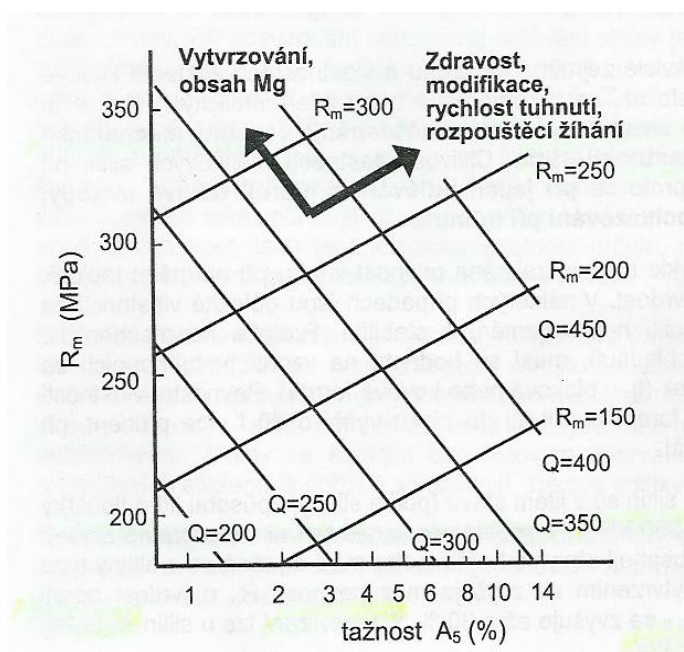
1.3.4 Index kvality

Mechanické kvality se komplexně hodnotí pomocí tzv. Indexu kvality.

Určuje se z pevnosti v tahu a tažnosti slitiny a je definován vztahem:

$$Q = R_m + k \cdot \log A_5 \quad (\text{MPa})$$

Kde: k je koeficient platný pro danou slitinu, např. pro vysokopevnostní slitinu AlSi7Mg se používá hodnota $k = 150$.



Obr. 2 Index kvality pro slitinu AlSi7Mg [1]

1.4 Přehled slévarenských slitin hliníku

Podle ČSN EN 1706 se slitiny značí buď číselně nebo, chemickými značkami

1.4.1 Číselné značení slitin

Číselně se slitina označuje písmeny EN AC a pětimístným číslem ve tvaru

EN AC – XXXXX

První číslice udává hlavní přísadový prvek a to:

2 – slitiny Al – Cu

4 – slitiny Al – Si

5 – slitiny Al – Mg

7 – slitiny Al – Zn

Druhá číslice je zde pro určení skupiny slitin a prakticky se využívá jen u slitin Al – Si.

Třetí číslice je pořadové číslo ve skupině.

Čtvrté a páté číslice jsou 0.

1.4.2 Označení slitin chemickými značkami

Za EN AC-Al se uvádí další přísadové prvky a to v pořadí od hlavního přísadového prvku k vedlejším prvkům. Ty řadíme sestupně podle obsahu.

Tab. 1. Způsob značení slitin hliníku dle ČSN EN 1706 [1]

Skupina slitiny	Označení slitiny	
	číselné	Chemickými značkami
AlCu	EN AC-21XXX	EN AC-Al Cu4
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC- Al Si2MgTi
AlSi7Mg	EN AC-42XXX	EN AC- Al Si7Mg 0,3(0,6)
AlSi10Mg	EN AC-43XXX	EN AC- Al Si10(9)Mg
AlSi	EN AC-44XXX	EN AC- Al Si12(11)

1.4.3 Příklady použití vybraných slitin na odlévání

- **AlSi7Mg0,3** – Pro letecký a raketový průmysl, motory, podvozky, rámy a jiné odlitky, které vyžadují vysokou pevnost a houževnatost.
- **AlSi5Cu** – Strojní díly a motorové odlitky pro osobní automobily (např. hlavy válců), odlitky pro elektrotechniku a pro součásti pracující za zvýšených teplot.
- **Al-Cu** – Odlitky s vysokými požadavky na pevnost, převodové skříně, turbíny, součásti přehřívačů. Díky špatným slévárenským vlastnostem se často převádí na slitiny typu Al-Si.
- **Al-Mg** – Dekorativní předměty pro interiéry i exteriéry, lodní kování, ozdobné díly automobilů, optické přístroje.

Podle způsobu použití se slitiny hliníku dělí na :

- pro všeobecné použití
- pro lití pod tlakem
- s vysokými mechanickými vlastnostmi
- pro speciální použití

2 TAVENÍ SLITIN HLINÍKU

Kvalita odlitku musí být vždy na stejné úrovni jako byla kvalita roztaveného kovu. Účelem tavení tedy je nastavení slitiny s požadovanou kvalitou, tak aby náklady byly co nejmenší.

Kvalitní tavenina musí mít hlavně požadované chemické složení s co nejmenším množstvím oxidických i neoxidických vměstků (cizých částic).[1]

Kvalitu kovu určují:

- vsázkové suroviny
- typ a konstrukce tavících a udržovacích pecí
- způsob vedení metalurgického procesu
- metalurgické zpracování taveniny a způsob lití

Housky slitin – jsou nejkvalitnějším vsázkovým materiálem, je tam pevně určené chemické složení, nízký obsah nečistot a plynů. Cenově jsou nejdražší.



Obr. 3 Housky slitin hliníku [4]

Rozdělujeme je na dvě skupiny:

- primární slitiny – vyrobené hutnickým způsobem z rud.
- Sekundární slitiny – přetavením hliníkového šrotu.

Vratný materiál – Je důležitou složkou vsázky. Jsou to vtoky, nálitky a zmetky.

Není tak kvalitní, je zde mnoho vměstků, chemické nečistoty atd.

Pro odlitky z nejvyššími nároky používáme housky. Pro méně náročné lze použít i 100% vratu.[1]

hliníkový šrot – jedná se o vyřazené součástky a třísky. Je to nejméně spolehlivá skupina vsázkového materiálu

Rizika :

- neznámé a nejisté chemické složení
- možné znečištění organickými látkami (olej, barvy)
- velké množství oxidických vměstků
- vnáší do vsázky vodu vázanou jako hydroxid na povrchu nebo kapilárními silami v prasklinách a pórech.

Do kvalitnějších odlitků by se neměl šrot vůbec přidávat.

2.1 Energetická náročnost tavení

Celková tepelná energie, která je nutná na výrobu tekutého kovu s potřebnou lící teplotou se skládá z tepla ohřevu vsázky v tuhém stavu, skupenského tepla a tepla přehřátí.

Pro hliník platí velká energetická náročnost tavení protože je tepelný obsah roztavených slitin velmi vysoký.[1]

Tab. 2 Tepelně-fyzikální vl. některých nželezných kovů [1]

<i>prvky</i>	<i>Teplota tavení (°C)</i>	<i>Sřední měrné teplo (kJ/kg.K)</i>		<i>Skup. teplo (kJ/kg)</i>
		tuhý stav	tekutý stav	
Hliník	660	1,05	1,09	396
hořčík	650	1,17	1,32	372
křemík	1410	0,84	2,1	1411
olovo	327	0,12	0,15	25
Zinek	420	0,38	0,46	100
cín	232	0,21	0,25	61

Skutečná spotřeba energie na roztavní a přehřátí kovů závisí na tepelné účinnosti pece. Ta je okolo 15 až 20% u plynových nebo olejových pecí bez regenerace tepla spalin a zhruba 65 až 80% u elektrických pecí.

2.2 Tavicí a udržovací pece

2.2.1 Tavicí pece

Kov se zde ohřívá zhruba na technologickou lici teplotu, provede se úprava chemického složení, rafinace a odplynění. Při přelévání z tavicí pece do transportních pánví se často tavenina filtruje keramickými nebo tkanými filtry.[1]

2.2.2 Udržovací pece

Slouží k udržování teploty taveniny v blízkosti jednotlivých pracovišť nebo licích agregátů. Obvykle se zde neprovádí zásadní úprava chemického složení ani větší metalurgické zásahy. Taveninu je možné očkovat nebo modifikovat.

Ve velkých slévárnách se používají velkoobjemové udržovací pece, které slouží jako zásobník kovu, ze kterého se tavenina převáží podle potřeby k jednotlivým strojům.[1]

2.2.3 Požadavky na pece

- Malá oxidace a naplynění kovu
- oddělení tekutého kovu od pevné vsázky
- zamezení místního přehřívání taveniny

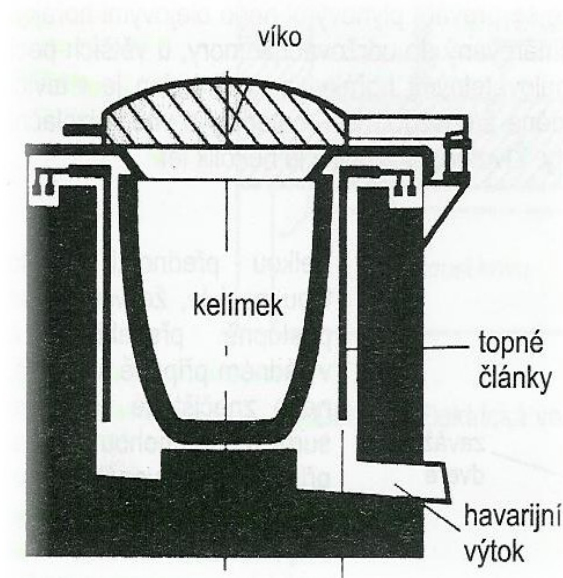
2.2.4 Vytápění pecí

Máme dva druhy, plamenné a elektrické

- **Plamenné** – palivem je zemní plyn, na přehřátí 100kg hliníku na teplotu 750°C se spotřebuje okolo 3,6 Nm³ zemního plynu.
- **Elektrické** – jsou *odporové* a *indukční*, odporové mají malý tavicí výkon a málo intenzivní tepelnou a chemickou homogenizaci taveniny, která se téměř nemíchá. To je zároveň výhoda protože dochází jen k minimálnímu propalu a naplynění. V indukčních dochází k intenzivnímu míchání, výhodou je dobrá tepelná i chemická homogenizace, intenzivní pohyb taveniny však může být z metalurgického hlediska na závadu.[1]

2.2.5 Druhy pecí

- **Kelímkové** – Obvykle se používají jílografitové nebo SiC kelímky.

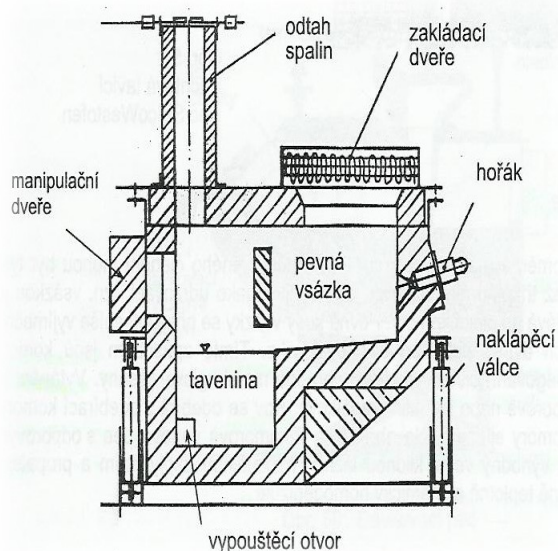


Obr. 4: Elektrická odporová kelímková pec[1]

Musí se dodržovat tyto zásady:

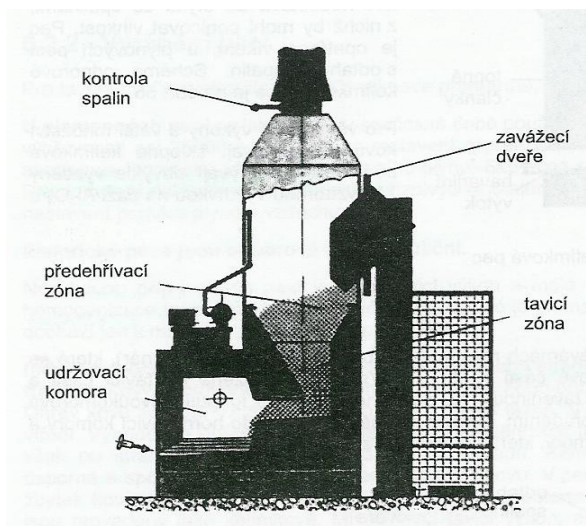
- nový kelímek má být dobře vysušen
- kelímek se nesmí ohřívat tepelným šokem, a také ochlazování by mělo být pozvolné
- není dobré tavit kov, který už dřív v kelímku ztuhnul, ztuhlý kov se při ohřevu rozpíná a může zapříčinit prasknutí kelímku
- kelímek po dokončení tavby dobře vyčistit u uložit na suché místo
- při plnění vsázkou by zde neměli působit prudké nárazy
- po každé tavbě kontrola kelímku
- v plamenných pecích je nutností dbat na správné nastavení hořáku.

- **Komorové** – osvědčený typ pecí, vsázka je dána do tavicí části a nepřijde do přímého kontaktu s taveninou (např. systém Sklenár), na stejném principu pracují i dvoukomorové vanové pece s vertikálním uspořádáním, u nichž se vsázka dáva do horní tavicí komory, která je zde jako zásobník kovu.



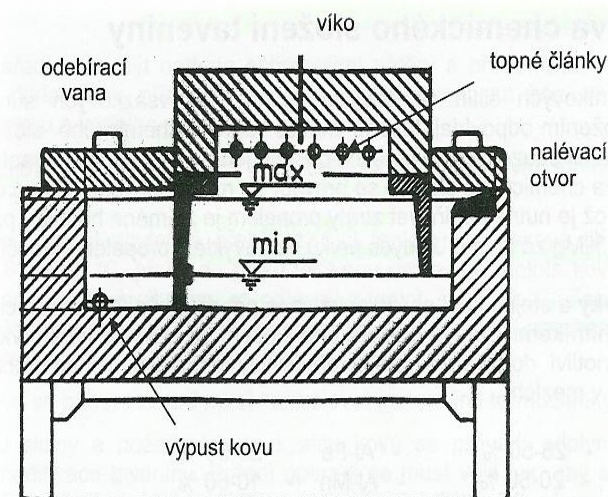
Obr. 5: Dvoukomorová plynová pec [1]

- **Šachtové** - Pracují na principu protiproudého výměníku tepla. Pec je vyhřívána plynovými nebo olejovými hořáky, u větších to bývají dva samostatně regulovatelné hořáky, jeden je v tavicí zóně, druhý je v udržovací komoře. Pec je vyzděna žáruvzdornými materiály a vnější izolační vrstvou díky které sou tepelné ztráty minimální.



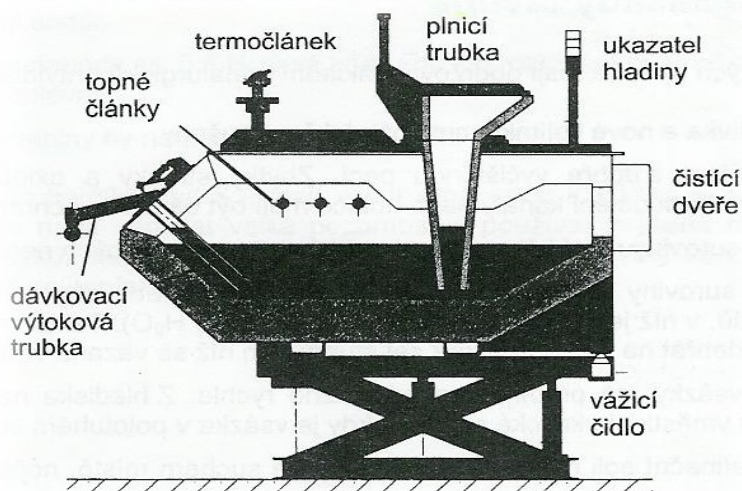
Obr. 6: Šachtová tavicí pec StricoWestofen [1]

- **Vanové** – pec má tvar vany s poměrně malou hloubkou. Mohou být jednokomorové až tříkomorové. Obykve se používají jako udržovací pece. Tříkomorové jsou výhodné velmi klidné lázně s minimálním naplyněním a propalem, tavenina je však špatně teplotně i chemicky homogenizována.



Obr. 7: Elektrická vanová pec (tříkomorová) [1]

- **Dávkovací** – k automatickému dávkování tekutého kovu, hlavně při odlévání do kovových forem pod tlakem.



Obr. 8: Dávkovací pec [1]

2.3 Úprava chemického složení taveniny

Cílem je pouze drobná úprava obsahu jednotlivých prvků, případně kompenzace propalu. Úprava chemického složení se provádí po roztavení vsázky a po chemické analýze. Prvkem, u kterého je nutné doplňovat ztráty propalem je hlavně hořčík – přibližně se jedná o ztrátu asi 0,05% za tavbu. U jiných prvků se s propalem nepočítá.

Přísadové prvky a prvky používané pro očkování a modifikaci, se dodávají jako předslitiny s hliníkem. Úprava chemického složení se většinou týká prvků Si, Cu, Mg, Fe, Mn a Ti. Každý dodavatel nabízí předslitiny s různými koncentracemi přísadových prvků, obvykle v mezích :

- Al-Si - 25-50%
- Al-Cu - 20-50%
- Al-Mg - 25-50%
- Al-Fe - 20-50%
- Al-Mn - 10-60%
- Al-Ti - 5-10%

Množství předslitiny so vsázky se určí takto :

$$\text{předslitina} = \left(\frac{\Delta X}{X_{\text{předslitiny}}} \right) \cdot 100 \quad (\text{kg předslitiny}/100\text{kg taveniny})$$

ΔX – rozdíl mezi požadovaným a aktuálním obsahem prvku X ve slitině (%)

$X_{\text{předslitiny}}$ – koncentrace přísadového prvku v předslitině (%)

Když je potřeba obsah některého prvku snížit, tak taveninu zředíme surovinou s nízkým obsahem příslušného prvku. Vyjimka je hořčík, který jde selektivně odstranit pomocí chlorových přípravků.[1]

3 KONTROLA KVALITY

3.1 Provozní kontrola

3.1.1 Kontrola chemického složení

Vzorky se odlévají do kovových forem. Musí mít homogenní jemnozrnou strukturu bez vnitřních vad a segregací. Bývají válcové o průměru 35 až 50 mm s výškou 10 mm.

3.1.2 Měření teploty

Teplota by měla být kontrolována ve všech tavicích a udržovacích pecích, ale i u všech metalurgických procesech (rafinace, odplyňování a lití). Teplota se měří pomocí termočlánků z NiCr-Ni. Dlouhodobé měření v pecích se provádí termočlánky s ochrannými keramickými trubicemi.

3.1.3 Technologické zkoušky

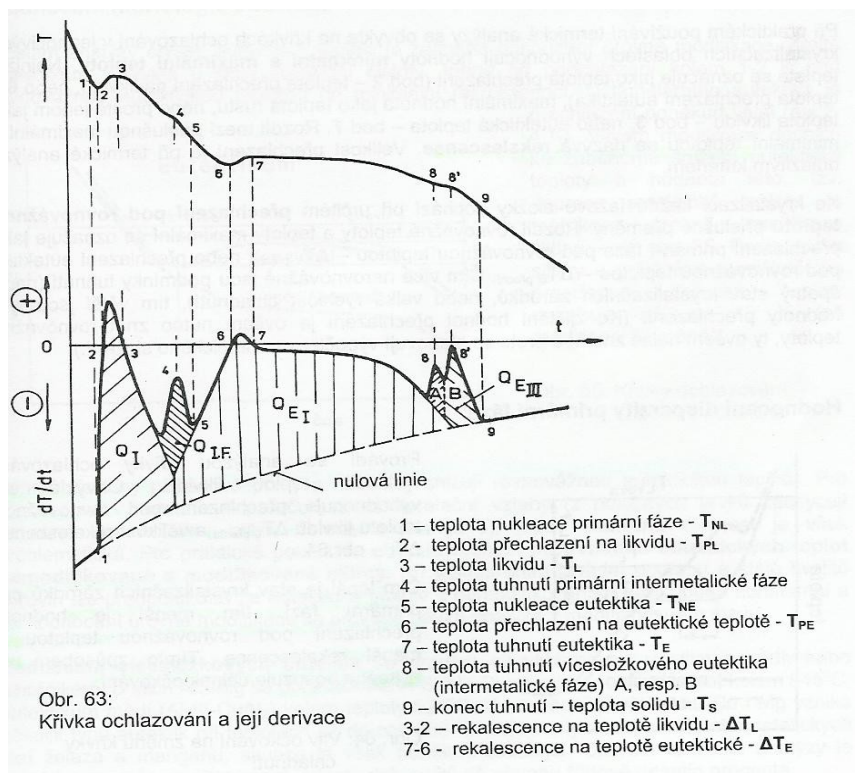
- Zkouška zabíhavosti
- zkouška lomu
- zkouška ke zjištění vměstků
- stanovení sklonu k praskání za tepla
- zkouška velikosti primárního zrna
- zkouška stahování

3.1.4 Termická analýza

Jde o vyhodnocování křivky chládnutí v intervalu krystalizace.

U slitin hliníku se používá hlavně k hodnocení :

- velikosti zrna primární fáze a posouzení očkovacího účinku
- morfologie eutektické fáze a zjištění stupně modifikace eutektika
- vzniku intermetalických fází a vícesložkových eutektik



Obr. 9: křivka ochlazování [1]

3.2 Laboratorní a přijímací zkoušky

3.2.1 Mechanické zkoušky

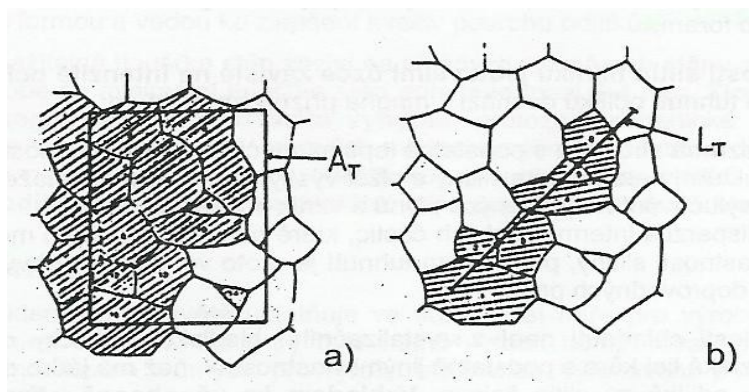
- Tahová zkouška za normálních teplot – na obrobených nebo neobrobených tyčinkách, tažnost „A“, se zjišťuje podle normy ČSN EN 1706 na měřené délce 50mm.
- zkouška tvrdosti – tvrdost hliníkových slitin se zkouší podle Brinella. Zátěžná síla je $F=9,81 \cdot 10 \cdot D^2$ (N), zatížení po dobu 30 s.

Výjmečně se provádí i tahová zkouška za zvýšených teplot, zkoušky rázem a únavové zkoušky.

Zkušební tyčinky se vyrábí stejným procesem jako dané odlitky. [1]

3.2.2 Metalografie

- **Makroskopické hodnocení** – vzorky se pozorují nezvětšené nebo zvětšené maximálně 10 krát. Používá se pro zkoumání primárního zrna, vměstků, lomů nebo porezity. Výbrusy stačí když jsou vybroušeny papírem o hrubosti 400. Hodnocení disperzity primárních zrn se dělá zjištěním počtu zrn na předem určené ploše výbrusu – obr. 10a, nebo počtu zrn, které protne úsečka stanovené délky – obr. 10b.



Obr. 10: Určení velikosti primárních zrn metalografickým způsobem [1]

- **Mikroskopické hodnocení** – Hlavním úkolem je zjištění stupně modifikace eutektika Al-Si. Vzorky jsou broušeny jemněji a poté jsou také leštěny diamantovými pastami o zrnitosti až 1 μm . Mažou se petrolejem nebo propylenem, nakonec se musí vzorky odmastit, očistit a osušit.[1]

4 TECHNOLOGIE ODLÉVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

Pro odlévání hliníkových slitin se používají téměř všechny slévárenské metody. Struktura a vlastnosti slitin hliníku jsou závislé hlavně na intenzitě ochlazování při tuhnutí. Odlitky by měly být konstruovány jako tenkostěnné z důvodu příznivého rychlého ochlazení. Je nutné zde respektovat velkou pravděpodobnost oxidace tekutého kovu. Hliníkové slitiny se během tuhnutí stahují a mají sklon k tvorbě soustředěných nebo rozptýlených staženin. Míra smrštění je zde v rozmezí 1,2 – 1,5 %. [1]

4.1 Odlévání do netrvalých forem

4.1.1 Lití do pískových forem

Je to metoda vhodná pro všechny hmotnostní kategorie odlitků.



Obr. 11: ukázka lití do pískových forem [6]

4.1.2 V – Proces

Tato metoda se používá u tvarově složitějších výrobků s vnitřními dutinami. Např. Hlavy válců, výfukové

4.1.3 Lití do skořepinových forem

Odlévá se do skořepinových forem vyrobených metodou vytavytelných modelů (např. z vosku). Tato metoda se používá zejména pro menší a tvarově náročnější odlitky. Materiálem

skořepinových forem většinou bývá křemenná keramika. Formy se před litím vyhřívají na teplotu 200 – 300°C. Lze dosáhnout minimální tloušťky stěn okolo 0,5 mm, otvory bývají nejmíň 1,5 mm. Většinou volíme však o něco větší, okolo 2 – 3 mm. Odlitky jsou velice přesné.



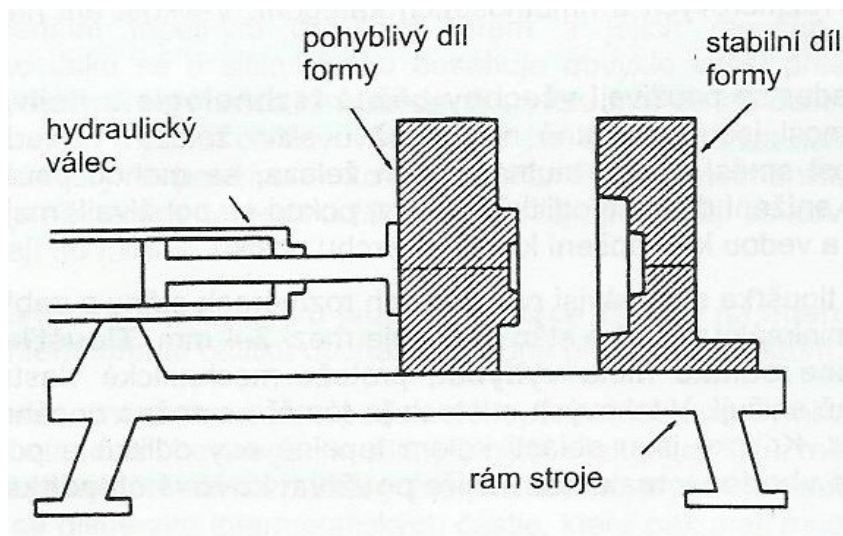
Obr. 12: Lití hliníkových slitin do skořepinových forem

4.2 Odlévání do kovových forem

Používá se ve vysokých sériových výroбах hlavně pro menší a střední odlitky. Nevýhodou jsou náklady na výrobu kovových forem.

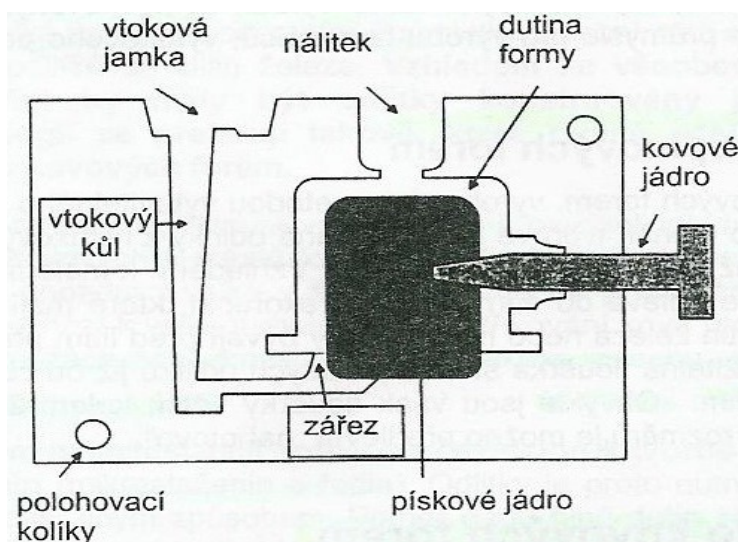
4.2.1 Gravitační lití do kovových forem

Formy se odlévají z litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem. Dělicí rovina, upínací výstupky a vyhazovací otvory bývají obrobeny, funkční plocha dutiny formy je v litém stavu. Formy máme dvoudílné nebo vícedílné. Jádra jsou kovová nebo písková. Písková jádra použijeme tehdy když by se kovové jádro nedalo vytáhnout z dutiny odlitku. Formy bývají nainstalovány na kokilových strojích, díky kterým se mohou skládat, rozkládat a umožňují vyhazování odlitků z formy. Dělicí rovina bývá většinou svislá. [1]



Obr. 13: kokilový stroj s dvoudílnou formou [1]

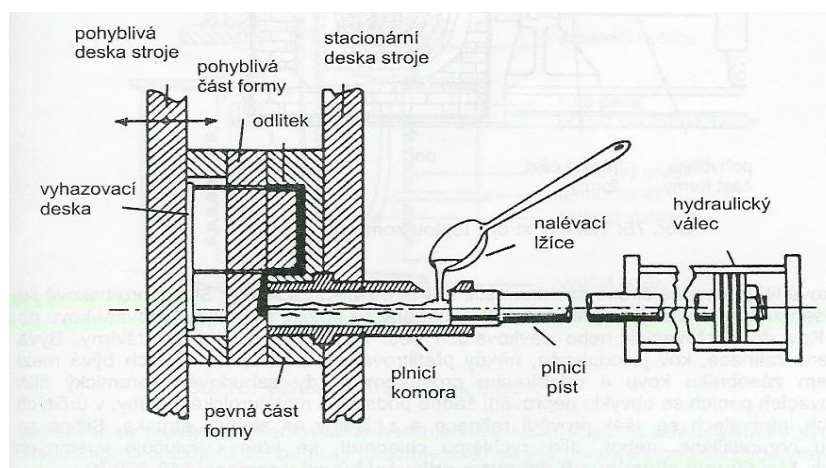
Minimální tloušťka stěn odlitků bývá okolo 4 – 5 mm, otvory se předlévají od průměru zhruba 10 mm. Na odlitcích musí být úkosy alespoň 2 – 3°. Kovové formy se musí předeheat na 200 – 500°C. Chlazení bývá vodní. Povrch forem se pravidelně ošetřuje nátěry.



Obr. 14: kovová forma s jádrem - pohled do dělicí roviny [1]

4.2.2 Tlakové lití

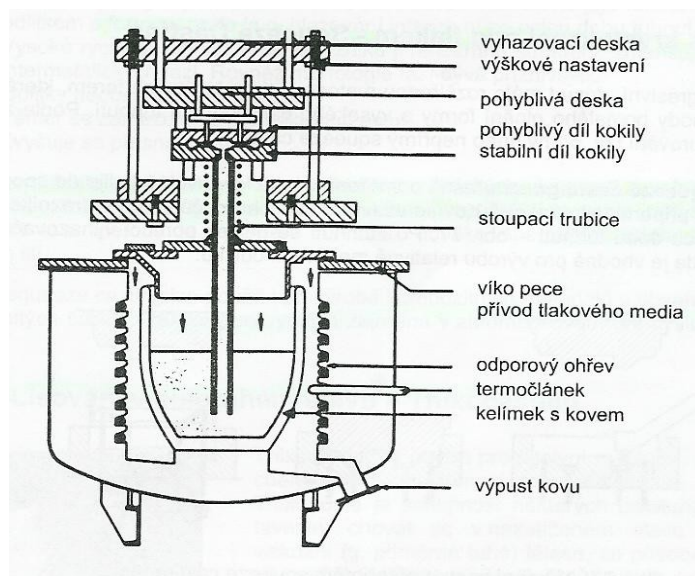
Nejdůležitější technologie výroby hliníkových odlitků. Principem je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem (až 250 Mpa). Je možné vyrábět velice tvarově komplikované odlitky s tloušťkou stěn okolo 1 – 2 mm. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebrání formy a vytažení volných částí a jader. Jsou dva základní typy podle konstrukce a to se studenou a s teplou komorou. Slitiny hliníku jsou v současnosti odlévány hlavně ve strojích se studenou horizontální komorou.[1]



Obr. 15: Horizontální tlakový stroj se studenou komorou [1]

4.2.3 Nízkotlaké lití

Zvýšíme tlak nad hladinou kovu, díky čemuž bude kov z kelímku vytlačován stoupací trubicí vzhůru do formy. Protože je ústí stoupací trubice ponořeno pod vrstvu oxidů a nečistot na hladině pece, bude do formy vstupovat pouze čistý kov.[1]



Obr. 16: stroj pro nízkotlaké lití [1]

4.2.4 Lití s krystalizací pod tlakem – Squeeze casting

Málo rozšířená metoda lití do kovových forem, kde se kombinují výhody pomalého plnění formy a vysokého tlaku během tuhnutí.

- **Přímý squeeze casting** – přesně odměřená dávka kovu se volně nalije do spodní části formy, připomínající raznici, kov se uzavře a stlačí se horní částí formy. Tlak působí po celou dobu tuhnutí.
- **Nepřímý squeeze casting** – Podobný jako tlakové lití se studenou komorou.

4.3 Kontrola odlitků a opravy vad

- Rozměrová kontrola
- zkoušky struktury, mechanických a fyzikálních vlastností
- nedestruktivní kontrola odlitků prozařováním a ultrazvukem
- penetrační zkoušky
- zkoušky těsnosti

4.3.1 Impregnace odlitků

Účelem je zaplnění pórů a mikrodutí materiálem, který bude vyhovovat účelu a pracovním podmínkám odlitku.[1]

4.3.2 Izostatické lisování

Používá se k odstranění dutin a zvýšení mechanických a únavových vlastností odlitku.

4.3.3 Opravy zavařováním

Obvykle plamenem nebo obloukem v ochranném plynu metodami MIG, WIG, plasmou, proudem elektronů nebo laserem. Ochranným plynem je argon nebo helium (nebo jejich směs). [1]

- Vada musí být dokonale odstraněna do čistého kovu
- povrch drážky musí být čistý
- v místě svaru nemají být ostré rohy
- hloubka drážky nemá být větší než její šířka

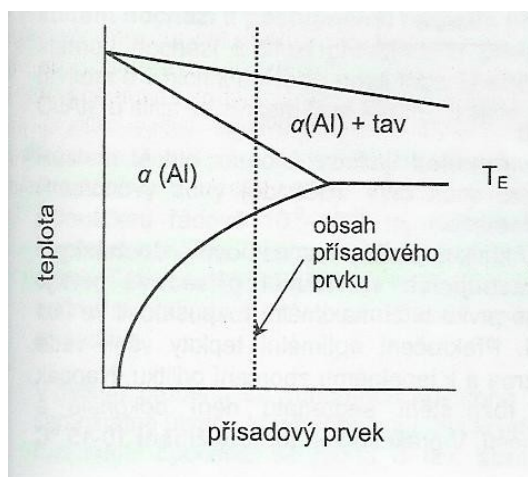
5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU

Hlavním účelem tepelného zpracování je zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřního pnutí v odlitcích nebo ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře. Také se dá zlepšit obrobiteľnosť, odolnosť proti korozi nebo změna jiných technologických vlastností.

5.1 Vytvrzování

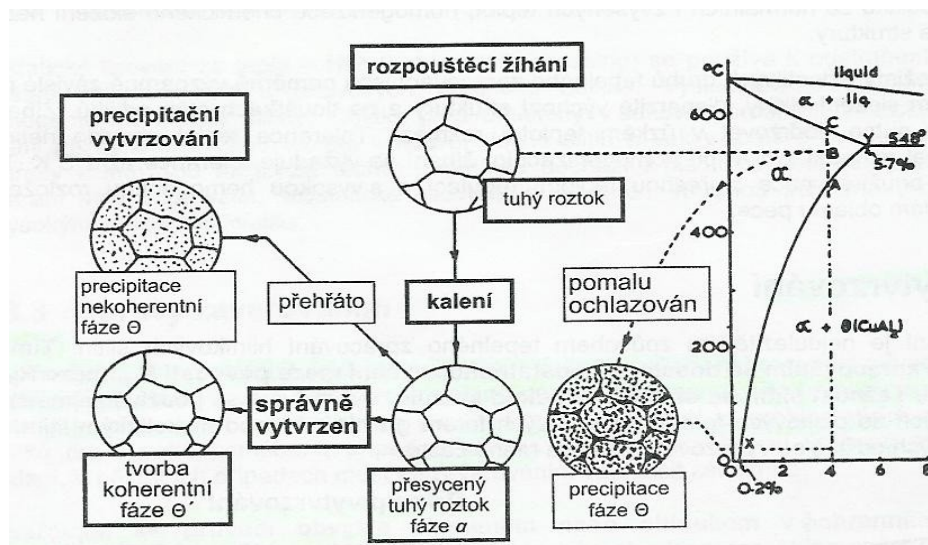
Vytvrzováním zvyšujeme mez pevnosti R_m , mez $R_{p0,2}$ a tvrdost. Tažnosť slitin se obvykle snižuje.

Principem je přítomnost přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Takovými prvky jsou především Cu a Mg. Jejich obsah ve slitině musí být vyšší než je jejich rozpustnost při normální teplotě, ale nižší než je maximální rozpustnost $\alpha(\text{Al})$ při eutektické teplotě.



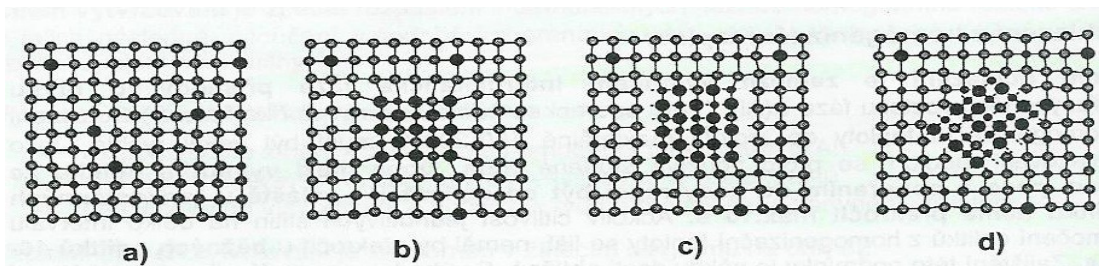
Obr. 17: Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [1]

Výchozí polotovár je odlitek, který ve formě ztuhl běžným způsobem. Cílem je zpětné rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku $\alpha\text{-Al}$ a jejich následné vyloučení v podobě koherentních nebo semi – koherentních útvarů, které způsobují zpevnění slitiny. [1]



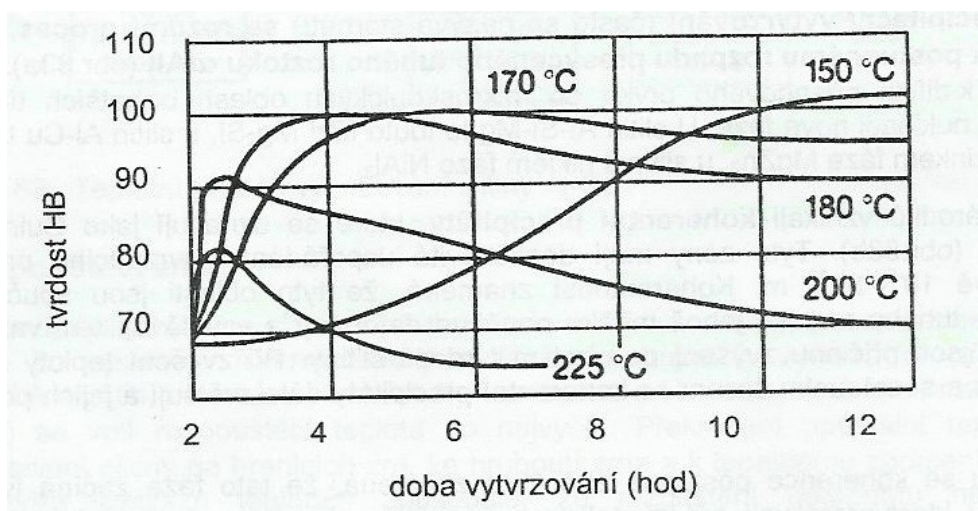
Obr. 18: Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [1]

- **rozpouštěcí žihání** – získává se homogenní tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. Provádí se při teplotách nad křivkou změny rozpustnosti a dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísadové prvky. V praxi volíme teploty žihání 10 – 15°C pod eutektickou teplotou. Homogenizační teplota by neměla být moc dlouhá, dochází pak k hrubnutí zrna. [1]
- **rychlé ochlazení** – vznikne přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. Cílem je zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku. Doba mezi výjmutím odlitku ze žihací pece a ponoření do vody musí být co nejkratší, především u odlitků s tenkými stěnami (max. 10s). Důležité je také rovnoměrné ochlazování kvůli segregacím. [1]
- **precipitační vytvrzování (stárnutí)** – tvoří se precipitát a zpevní se struktura. Dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Při stárnutí dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších tímto prvkem a v nich k nukleaci nové fáze.[1]



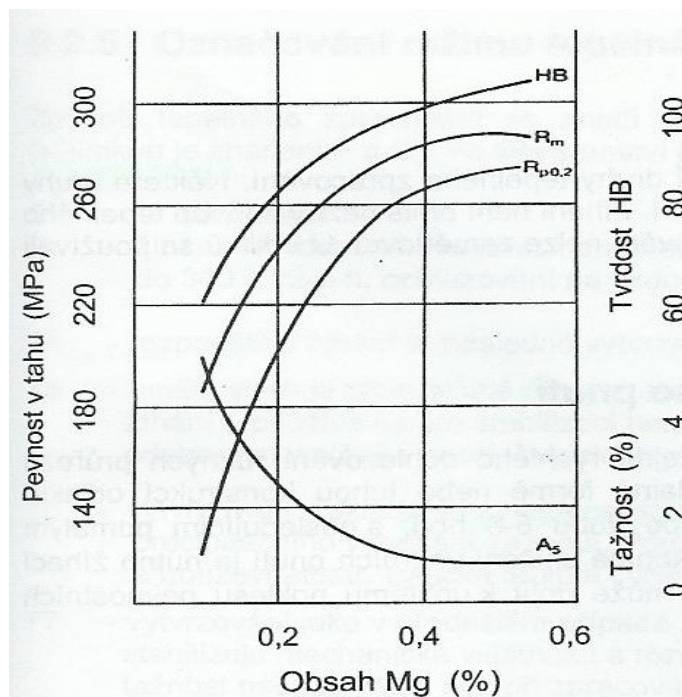
Obr. 19: vyloučení precipitační fáze : a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) částečně koherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát [1]

- **Vytvrzování za tepla** – Tímto způsobem vytvrzujeme slitiny Al-Si-Mg a Al-Mg. Teploty vytvrzování se volí podle druhu slitiny, většinou mezi 140 – 180°C, doba vytvrzování bývá okolo 3 až 8 hod. Při příliš vysokých teplotách se získávají horší mechanické vlastnosti než při teplotách optimálních.[1]

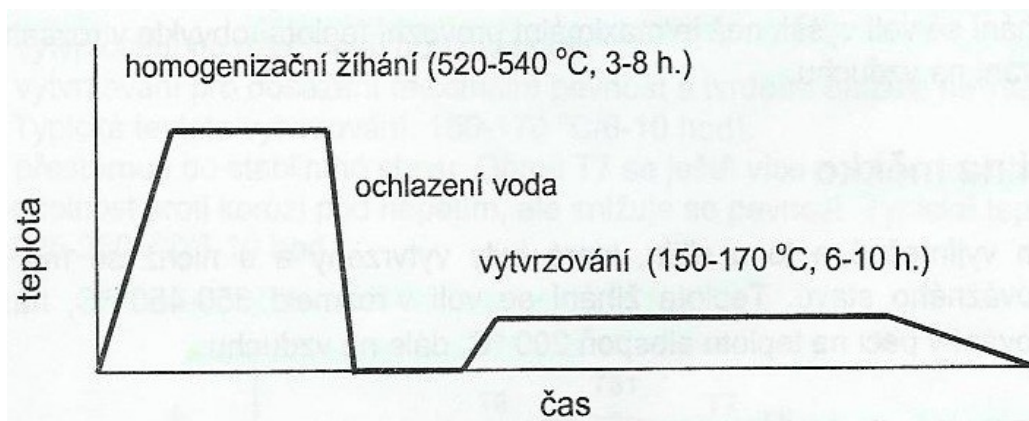


Obr. 20: Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [1]

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



Obr. 21: Vliv Mg na mechanické vlastnosti po vytvrzení [1]



Obr. 22: diagram tepelného zprac. při vytvrzování za tepla [1]

- **Vytvrzování za studena**

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

5.2 Žihání

Pod tento pojem se zařazují všechny ostatní typy tepelného zpracování. Některé druhy žihání jsou vlastně samostatnou částí vytvrzování. U slitin hliníku se příliš nepoužívá.[1]

5.2.1 Žihání na odstranění vnitřního pnutí

Vnitřní pnutí vznikne když se rozdílně ochlazují různé průřezy nebo když se brzdí smršťování v nepoddajné formě nebo je tuhá konstrukce odlitku. Provádí se při teplotách od 200 do 250°C po dobu 6 – 8 hod. s následným pomalým ochlazováním v peci nebo na vzduchu. Pro úplné odbourání vnitřního pnutí se teploty zvýší na 250 – 350°C. [1]

5.2.2 Stabilizační žihání

Používáme ho na odlitky, které jsou v provozu tepelně namáhány. Cílem je rozměrová stabilizace velmi přesných výrobků. Teplota bývá vyšší než maximální provozní teplota daného odlitku, většinou volíme 240 – 350°C, chladíme na vzduchu.[1]

5.2.3 Žihání na měkko

Používá se jen zřídka u slitin které byly vytvrzeny a mají zpětně dosáhnout rovnovážného stavu. Teplota bývá 350 – 450°C, ochlazujeme pozvolna v ochlazovacích pecích na teplotu 200°C a nakonec na vzduchu.[1]

5.2.4 Homogenizační žihání

Používáme ho když potřebujeme odstranit chemickou heterogenitu, která nám v odlitku vznikne během tuhnutí. Teplota bývá vyšší než teplota křivky změny rozpustnosti přísadového prvku v tuhém roztoku $\alpha - Al$ po dobu, která je závislá na stupni heterogenity složení a na disperzitě struktury, obvykle 3 – 15 hod. Může zhrubnout zrna, proto se doba žihání zbytečně neprodlužuje. Obvykle je toto žihání součástí vytvrzování, samotné se moc nepoužívá.[1]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

V této bakalářské práci bylo cílem zjistit pomocí tahových zkoušek a zkoušek tvrdosti jaký druh tepelného zpracování je nejlepší pro slitinu hliníku typu AlSi7Mg0,3 a jaké výhody má jeho použití. V teoretické části už jsou zmíněny jednotlivé druhy tepelného zpracování a k čemu se používají. V praktické části budeme tyto informace experimentálně ověřovat.

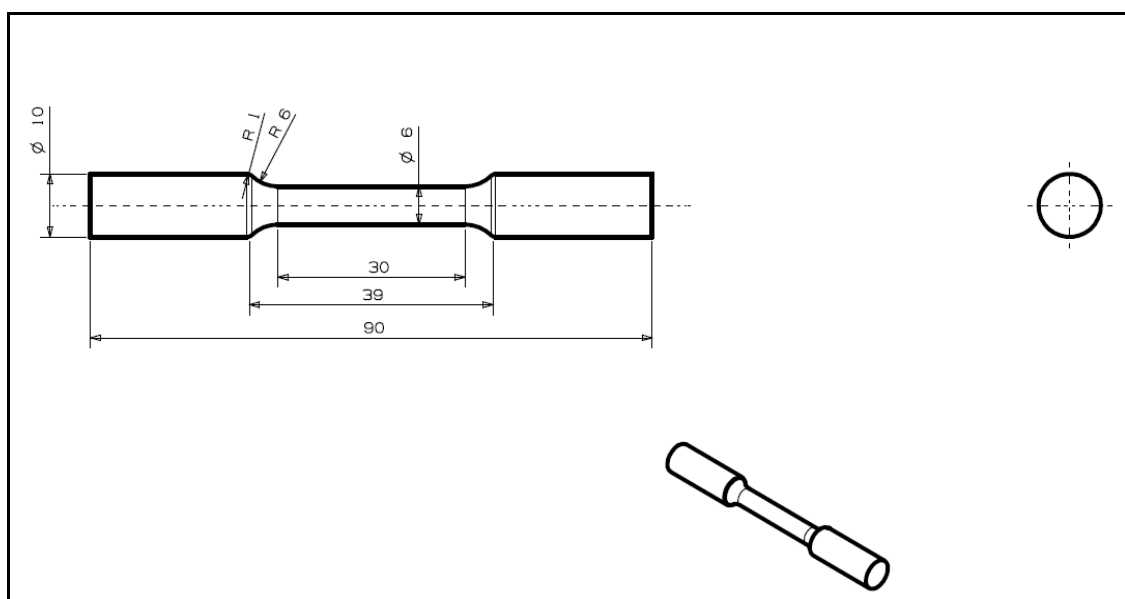
Praktická část se bude skládat z :

- Příprava zkušebních vzorků
- Tepelné zpracování vzorků
- Mechanické zkoušky (tahem, tvrdosti)
- Porovnání a vyhodnocení jednotlivých metod tepelného zpracování

6.1 Zkušební vzorky

Naše zkušební vzorky (tyčinky) byly zhotoveny z materiálu AlSi7Mg0,3 metodou odlévání do skořepinových forem. Bylo zhotoveno 90 kusů tyčinek, aby naše měření bylo co nejpřesnější a dalo se použít v praxi.

Jedná se o tyčinky kruhového průřezu „ $d_0 = 6\text{ mm}$ “, a měřené délce „ $L_0 = 30\text{ mm}$ “, . Po provedení zkoušky se tyčinka natáhne na délku „ L_u “, a vytvoří se tzv. Krček, který má průřez „ d “.



Obr. 23: Zkušební tyčinka



Obr. 24: Svazek zkušebních tyčinek

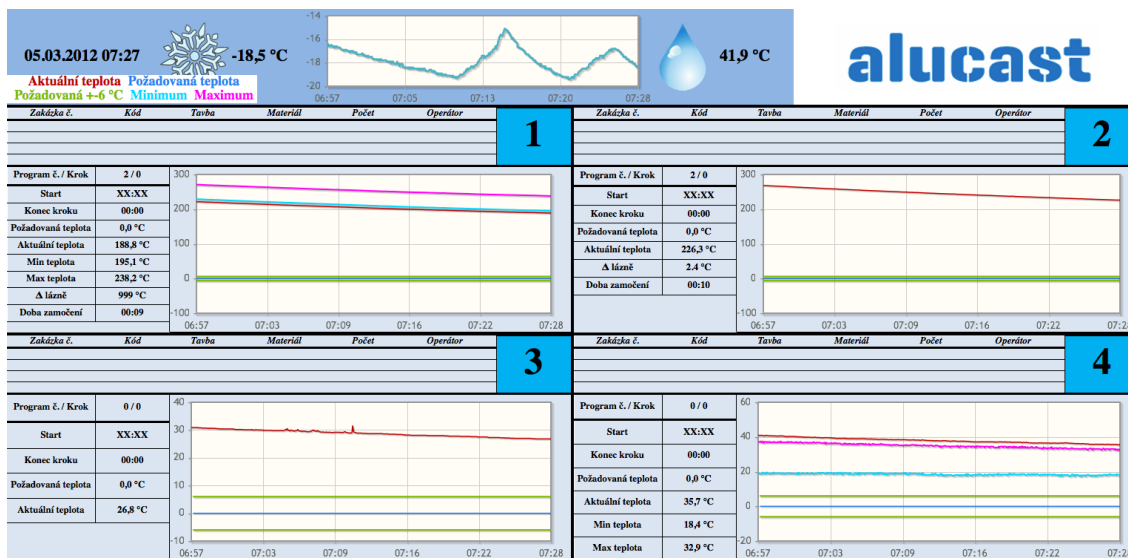
6.2 Tepelné zpracování zkušebních vzorků

V našem případě probíhaly dva typy tepelného zpracování ve dvou různých pecích. Měli jsme tři série měření, materiál zůstal stejný (AlSi7Mg0,3).

- 1. Série : Rozpouštěcí žihání = 6h., Umělé stárnutí = 3,5h.
- 2. Série : Rozpouštěcí žihání = 6h., Umělé stárnutí = 5h.
- 3. Série : Rozpouštěcí žihání = 6h., Umělé stárnutí = 6h.

Pece používané k tepelnému zpracování ve firmě alucast, s.r.o. jsou monitorované a můžeme získat i grafické znázornění průběhu teplot.

Rozpouštěcí žihání mělo teplotu $538^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$ a umělé stárnutí mělo teplotu $154^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$.



Obr. 25: Obecné znázornění průběhu tepelného zpracování

- **Rozpouštěcí žihání**

Tento typ tepelného zpracování byl prováděn v peci od výrobce LAC, s.r.o. pracovní teploty 529 – 543 °C, pracovní prostor 850 x 850 x 850 mm, certifikována dle NADCAP (dle AMS 2771 a AMS 2750), instrumentace typu C, třída 2 (1 x řídicí termočlánek ty "S" , 2x monitorovací termočláanky typ "S"). Naše konkrétní teplota byla 538°C ± 6°C.



Obr. 26: Pec na rozpouštěcí žihání

- **Umělé stárnutí**

Tento typ tepelného zpracování byl prováděn v peci od výrobce LAC, s.r.o. - pracovní teploty 140 – 190 °C, pracovní prostor 850 x 850 x 850 mm, certifikována dle NADCAP (dle AMS 2771 a AMS 2750), instrumentace typu C, třída 2 (1 x řídicí termočlánek ty "S" , 2x monitorovací termočlánky typ "S"). Naše konkrétní teplota byla 154°C ± 6°C.



Obr. 27: Pec na umělé stárnutí

6.3 Mechanické zkoušky

6.3.1 Tahová zkouška

Tahovou zkoušku sme prováděli na univerzálním trhacím stroji Zwick/Roell Beta 50, serien nummer: 193091/2010, auftrags nummer: 10-0150, Type : BT1-FR50TH.A1K, Order no. DO706280/2227647, Power 230V-50/60Hz, 10A-1L/PE/N, Fnom 50kN.

Zkouška tahem patří mezi základní a nejčastěji používané mechanické zkoušky. Principem této zkoušky je přetržení zkušební tyče a vyhodnocení tzv. napěťových a deformačních charakteristik. Mezi dvě čelisti se upne zkušební tyčinka daného tvaru a materiálu, čelisti tuto tyčinku natahují každá stejně velkou silou. Tyčinka je namáhána pouze v podélném směru. Přístroj byl napojen na počítač, který všechny potřebné charakteristiky vyhodnotil.



Obr. 28: Univerzální trhací stroj Zwick/Roell Beta 50

Součástí našeho trhacího stroje je i laserový průtahoměr, který během zkoušky vyhodnocuje tažnost daného zkušebního vzorku.



Obr. 29: Laserový průtahoměr

Po provedení tahové zkoušky zjistíme 4 základní normované mechanické vlastnosti:

Napětíové charakteristiky :

- Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]

- Mez kluzu v tahu R_e [MPa]

Deformační charakteristiky :

- Tažnost A [%]
- Kontrakce Z [%]



Obr. 30: Detail čelistí trhačského stroje

Definice a výpočet mechanických vlastností :

- Mez pevnosti v tahu – je to smluvní napětí, které odpovídá největšímu možnému zatížení $F_{\max} = F_m$, které předchází porušení zkušební tyče.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

- Mez kluzu v tahu – nejmenší napětí, které má na svědomí plastické deformace.
 - a) Charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko – plastickou oblastí křivky.
 - b) V tahovém diagramu $F - \Delta L$ ($R - \epsilon$) se projevuje formou:

- výraznou R_e ($=R_{eH}$)
- nevýraznou $R_{p0,2}$

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

- Tažnost – Poměrná podélná trvalá deformace.

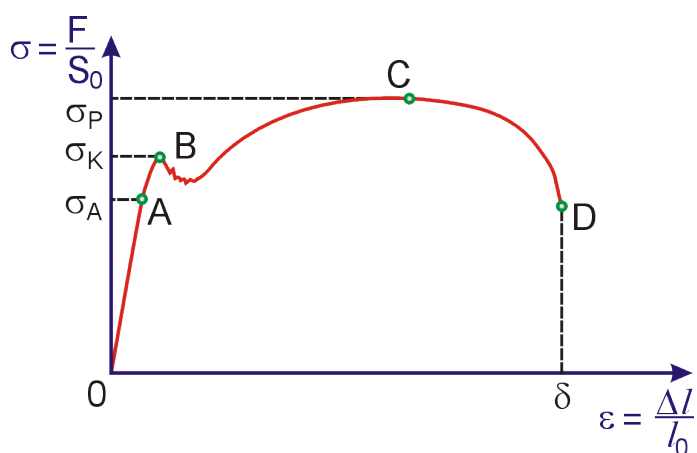
$$A = \varepsilon_u = \left(\frac{\Delta L}{L} \right) \cdot 100 = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

- Kontrakce – Největší trvalé zúžení průměru, odměřené po přetržení v místě lomu.

$$Z = \psi_u = \left(\frac{\Delta S}{S} \right) \cdot 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

[7]

Obecný tvar tahového diagramu :



Obr. 31: tahový diagram [8]

A – Mez úměrnosti [MPa]

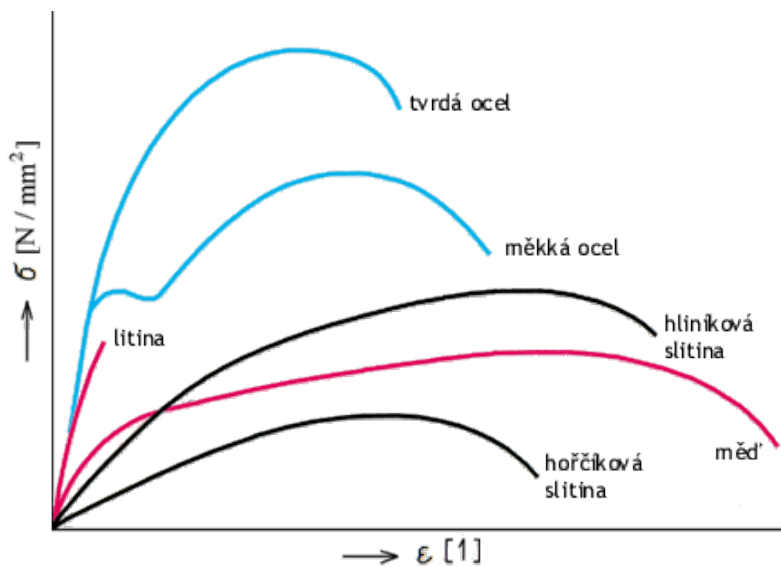
B – Mez kluzu [MPa]

C – Mez pevnosti [MPa]

D – Bod přetržení tyčinky [MPa]

ε - prodloužení [mm]

σ - Pevnost [MPa]



Obr. 32: tahový diagram pro různé typy kovů [9]

6.3.2 Zkouška tvrdosti

Tvrdot je odolnost povrchu materiálu proti porušení cizím tělesem.

Podle způsobu porušení povrchu se zkoušky dělí na :

- Statické – vnikací zkoušky
- Dynamické – rázové zkoušky
- Zkoušky vrypem – u křehkých materiálů a minerálů

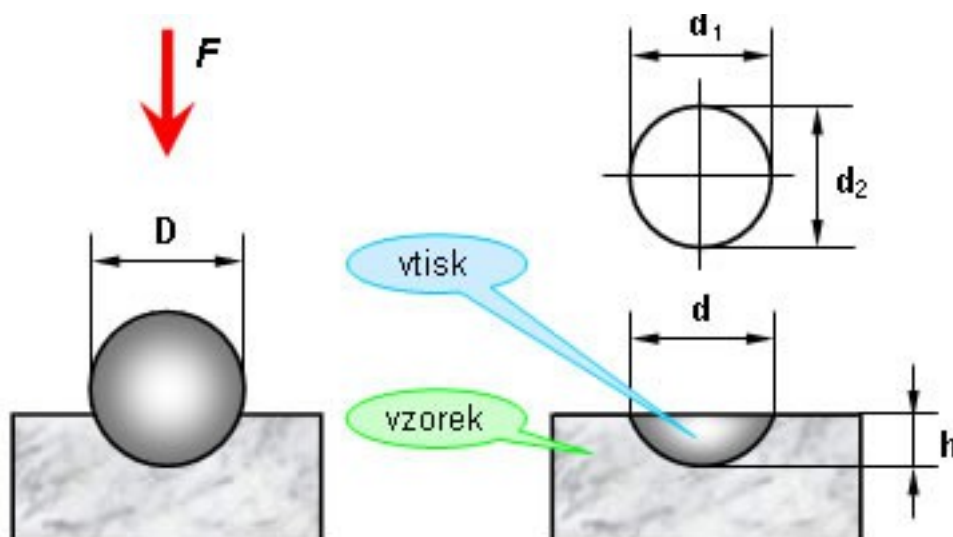
Měření sme prováděli na univerzálním tvrdoměru VEB Werkstoffprufmaschinen (Leipzig), Fabr. Nr. 308/283 (50Hz, 220V, 0,5A), rok výroby: 1968, zatížení 15,625-250kp (kgf) – použití pro Brinell a Vickers, indentor: kulička z tvrdokovu průměr 2,5mm.



Obr. 33: Univerzální tvrdoměr VEB

Brinellova zkouška :

Při této zkoušce je konstantním zatížením zatlačována kulička z tvrdokovu o průměru „ D „ do vyleštěné plochy zkušebního vzorku. Průměr vtisku změříme dvakrát a uděláme z hodnot „ d_1 „ a „ d_2 „ průměr „ d „



Obr. 34: Zkouška podle Brinella [11]

Tvrlost se pak vypočítá :

$$HB = F / S \quad (5)$$

Je-li „d,, průměr a „h,, hloubka vtisku, pak je jeho plocha dána vztahem :

$$S = \pi \cdot D \cdot h = \pi \cdot D \cdot 0,5 \cdot [D - (D^2 - d^2)^{0,5}] \quad [\text{mm}^2] \quad (6)$$

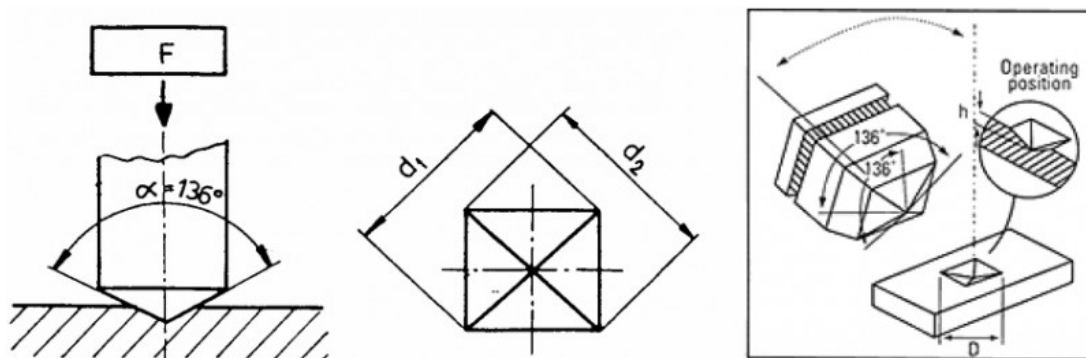
Vickersova zkouška :

Při této zkoušce se do vyleštěného zkušebního vzorku zatlačí čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136° . Otiskem je pravidelný čtyřhranný vtisk. Tento úhel je zvolen tak, aby co nejméně ovlivnil výsledek a proto, aby se hodnoty tvrdosti moc nelišily od tvrdosti stanovené Brinellem. U vtisku měříme jeho úhlopříčku.

Hodnota tvrdosti se pak vypočítá :

$$HV = 0,189 \cdot (F/u^2) \quad (7)$$

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



Obr. 35: zkouška podle Vickerse [12]

Pro náš případ jsme použili Brinellovu zkoušku měření tvrdosti, takže jsme tvrdost určovali v jednotkách HB a měření probíhalo podle norem **ASTM E10** a **EN ISO 6506-1**.

7 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

7.1 Výsledky tahové zkoušky

7.1.1 1. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 3,5 h)

Tab. 3: Hodnoty naměřené pro 1.sérii

vzorek	Rm [Mpa]	A [%]	Rp0,2 [Mpa]
1	285,7	4,9	197,7
2	278,5	2,6	174,4
3	285,3	3,6	193
4	283,7	3,6	184,2
5	284,8	4,1	196
6	281,3	4,5	193,4
7	298,6	4,3	206,5
8	293,3	1,8	204
9	289,8	5	201,2
10	286,2	5,3	204,4
11	298,6	8,1	206,6
12	294,9	3,3	199,6
13	294,4	5,5	205,9
14	291,6	4,2	203,5
15	295,9	4,2	203,7
16	295,2	4,6	202,9
17	283,1	3,3	195,9
18	291,7	3,3	204,9
19	295,7	4,3	200,4
20	295,7	7,1	199,5
21	295,6	7,1	199,7
22	296,3	5,4	201,2
23	295,8	3,1	202,4
24	292,6	5,1	203,7
25	300,3	9,2	201,4
26	301,9	8,2	202
27	298,8	5,4	200
28	298,7	5,9	204,7
29	297,9	7,1	198,4
30	302,7	7,2	205
X	292,82	5,04	199,87
s	6,46	1,79	6,77

Vypočítali sme zde směrodatnou odchylku „ s „ :

Je to odchylka od typických případů měření v souboru zkoumaných čísel.

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{x=1}^n (x_i - x)^2} \quad (8)$$

- n – počet měření
- x – aritmetický průměr
- x_i – hodnota jednotlivých měření
- s – směrodatná odchylka

Dále jsme vypočítali aritmetický průměr „ x “, :

Je to součet všech měření podělený celkovým počtem měření.

$$x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{x=1}^n x_i \quad (9)$$

- n – počet měření
- x – aritmetický průměr
- x_i - hodnota jednotlivých měření

1.Série :

- $R_m = 292,82$ MPa ... Mez pevnosti v tahu, $s = 6,46$
- $A = 5,04$ % ... Tažnost, $s = 1,79$
- $R_{p0,2} = 199,87$ MPa ... Smluvní mez kluzu, $s = 6,77$

7.1.2 2. Série (Rozpouštěcí žhání = 6 h, Umělé stárnutí = 5 h)

Tab. 4: Hodnoty naměřené pro 2. sérii

vzorek	R _m [Mpa]	A [%]	R _{p0,2} [Mpa]
1	303,1	3,1	213,1
2	303,1	4,5	208,9
3	303,6	4	209,3
4	302,7	5,2	210,7
5	295,4	4,2	204,9
6	292,2	3,7	205,4
7	285,9	4,6	202,7
8	291,7	6	218,7
9	288,5	3,7	204,5
10	298,5	6,8	216,5
11	289,5	2,9	205,9
12	296,6	3,6	211,7
13	308,4	4,3	206,6
14	306	3,7	213,1
15	308,2	4,1	212,2
16	310,5	3,7	213,1
17	310,7	8	215,2
18	310,6	4,5	212,4
19	290,8	3,2	202,8
20	289,2	4,2	200,8
21	285,3	4,7	201,9
22	282	4	204,3
23	281,8	2	198,6
24	292,6	2,3	208,5
25	296,8	3,5	212,6
26	297,7	2,6	210,5
27	294,1	2,9	204,3
28	298	4,5	207,8
29	300	5,9	207,7
30	293,9	3,8	209,5
X	296,91	4,14	208,47
s	8,49	1,28	4,90

2. Série :

- R_m = 296,91 MPa ... Mez pevnosti v tahu, s = 8,49
- A = 4,14 % ... Tažnost, s = 1,28
- R_{p0,2} = 208,47 MPa ... Smluvní mez kluzu, s = 4,90

7.1.3 3. Série (Rozpouštěcí žhání = 6 h, Umělé stárnutí = 6 h)

Tab. 5: Naměřené hodnoty pro 3. sérii

vzorek	R _m [Mpa]	A [%]	R _{p0,2} [Mpa]
1	290,3	5	198,2
2	293,8	4,1	196,8
3	276	2,5	195,3
4	289,3	3,8	197,5
5	293,4	5	198,1
6	294,8	6,6	199,1
7	297,7	6	198,5
8	298	5,2	204,7
9	300,2	5,8	201,2
10	300,5	7,8	210,1
11	295,5	4,1	201,1
12	303,8	5,9	205,7
13	287,5	4,8	195,5
14	290,9	3,9	199,5
15	286,8	2,8	196,2
16	286,9	5,6	201,4
17	288,1	5,3	201,2
18	288,8	4,8	194,9
19	284,8	3	195
20	288,5	3,9	196,7
21	287,9	3,5	195,8
22	293,1	4,5	202
23	290,7	4,8	194,3
24	288,1	4,1	193,6
25	276,5	2,6	194
26	277,6	4,3	191
27	280,8	2,5	196,2
28	282,4	3,9	188,5
29	278,2	3,5	199,8
30	280,8	3,5	173
X	289,06	4,44	197,16
s	7,33	1,26	6,31

3. Série :

- R_m = 289,06 MPa ... Mez pevnosti v tahu, s = 7,33
- A = 4,44 % ... Tažnost, s = 1,25
- R_{p0,2} = 197,16 MPa ... Smluvní mez kluzu, s = 6,31

7.2 Výsledky zkoušek tvrdosti

7.2.1 1. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 3,5 h)

Tab. 6: Hodnoty tvrdosti 1. série

Číslo vzorku	1. měření (d1)	2. měření (d2)	Průměr měření (d)	HB
1	0,88	0,89	0,885	98,3
2	0,89	0,88	0,885	98,3
3	0,91	0,9	0,905	93,9
4	0,89	0,9	0,895	96,1
5	0,92	0,9	0,91	92,8
6	0,89	0,9	0,895	96,1
7	0,93	0,95	0,94	86,8
8	0,93	0,88	0,905	93,9
9	0,89	0,89	0,89	97,2
10	0,92	0,91	0,915	91,8
11	0,92	0,93	0,925	89,7
12	0,91	0,9	0,905	93,9
13	0,9	0,91	0,905	93,9
14	0,88	0,89	0,885	98,3
15	0,89	0,9	0,895	96,1
16	0,89	0,92	0,905	93,9
17	0,9	0,91	0,905	93,9
18	0,89	0,88	0,885	98,3
19	0,9	0,9	0,9	95
20	0,91	0,91	0,91	92,8
21	0,93	0,92	0,925	89,7
22	0,92	0,92	0,92	90,7
23	0,9	0,9	0,9	95
24	0,89	0,89	0,89	97,2
25	0,89	0,9	0,895	96,1
26	0,91	0,89	0,9	95
27	0,92	0,92	0,92	90,7
28	0,9	0,91	0,905	93,9
29	0,9	0,92	0,91	92,8
30	0,89	0,91	0,9	95
X	0,903	0,904	0,904	94,237
s	0,015	0,016	0,013	2,842

Nejdůležitější je zde hodnota HB, kterou získáme výpočtem ze vzorce :

$$HB = \frac{F}{S} \quad (5)$$

nebo z tabulek pro měření tvrdosti dle Brinella kde $HB = 2,5/62,5$ a $F/D^2 = 10$.

Pro 1. sérii měřených vzorků z materiálu AlSi7Mg0,3 bylo **HB = 94,237**

7.2.2 2. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 5 h)

Tab. 7: hodnoty tvrdosti 2. série

Číslo vzorku	1. měření (d1)	2. měření (d2)	Průměr měření (d)	HB
1	0,88	0,88	0,88	99,5
2	0,89	0,91	0,9	95
3	0,89	0,9	0,895	96,1
4	0,92	0,91	0,915	91,8
5	0,9	0,89	0,895	96,1
6	0,91	0,9	0,905	93,9
7	0,89	0,9	0,895	96,1
8	0,88	0,89	0,885	98,3
9	0,91	0,9	0,905	93,9
10	0,9	0,88	0,89	97,2
11	0,89	0,9	0,895	96,1
12	0,91	0,89	0,9	95
13	0,88	0,9	0,89	97,2
14	0,88	0,9	0,89	97,2
15	0,88	0,89	0,885	98,3
16	0,87	0,88	0,875	101
17	0,89	0,88	0,885	98,3
18	0,92	0,9	0,91	92,8
19	0,9	0,9	0,9	95
20	0,89	0,88	0,885	98,3
21	0,91	0,89	0,9	95
22	0,92	0,91	0,915	91,8
23	0,88	0,88	0,88	99,5
24	0,87	0,88	0,875	101
25	0,89	0,91	0,9	95
26	0,89	0,9	0,895	96,1
27	0,9	0,91	0,905	93,9
28	0,89	0,91	0,9	95
29	0,87	0,9	0,885	98,3
30	0,88	0,89	0,885	98,3
X	0,893	0,895	0,894	96,367
s	0,015	0,011	0,011	2,431

Pro 2. sérii měřených vzorků z materiálu AlSi7Mg0,3 bylo **HB = 96,367**

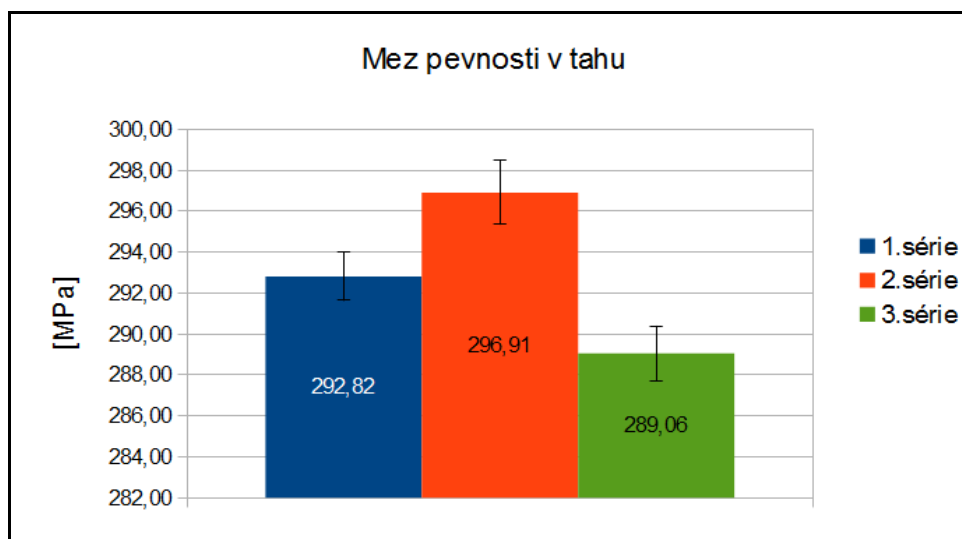
7.2.3 3. Série (Rozpouštěcí žihání = 6 h, Umělé stárnutí = 6 h)

Tab. 8: Hodnoty tvrdosti 3. série

Číslo vzorku	1. měření (d1)	2. měření (d2)	Průměr měření (d)	HB
1	0,89	0,87	0,88	99,5
2	0,87	0,87	0,87	102
3	0,88	0,87	0,875	101
4	0,88	0,87	0,875	101
5	0,86	0,85	0,855	106
6	0,87	0,87	0,87	102
7	0,86	0,87	0,865	103
8	0,85	0,86	0,855	106
9	0,87	0,88	0,875	101
10	0,89	0,86	0,875	101
11	0,88	0,87	0,875	101
12	0,86	0,86	0,86	104
13	0,86	0,88	0,87	102
14	0,85	0,88	0,865	103
15	0,86	0,86	0,86	104
16	0,87	0,88	0,875	101
17	0,88	0,88	0,88	99,5
18	0,89	0,87	0,88	99,5
19	0,87	0,85	0,86	104
20	0,86	0,85	0,855	106
21	0,85	0,87	0,86	104
22	0,85	0,86	0,855	106
23	0,86	0,87	0,865	103
24	0,88	0,86	0,87	102
25	0,86	0,86	0,86	104
26	0,87	0,88	0,875	101
27	0,85	0,87	0,86	104
28	0,88	0,86	0,87	102
29	0,89	0,87	0,88	99,5
30	0,85	0,87	0,86	104
X	0,868	0,867	0,868	102,533
s	0,013	0,009	0,008	2,021

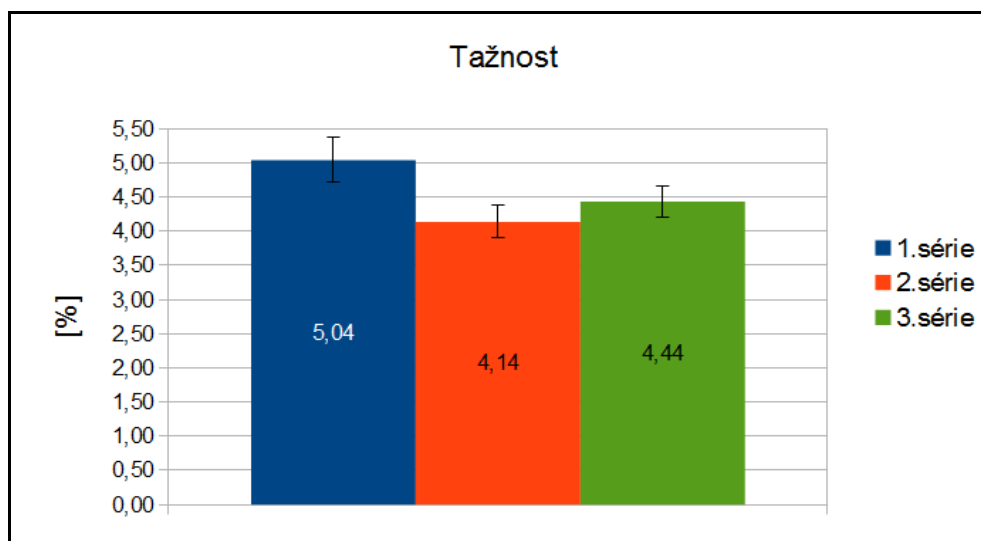
Pro 3. sérii měřených vzorků z materiálu AlSi7Mg0,3 bylo **HB = 102,533**

7.3 Grafické znázorění a vyhodnocení



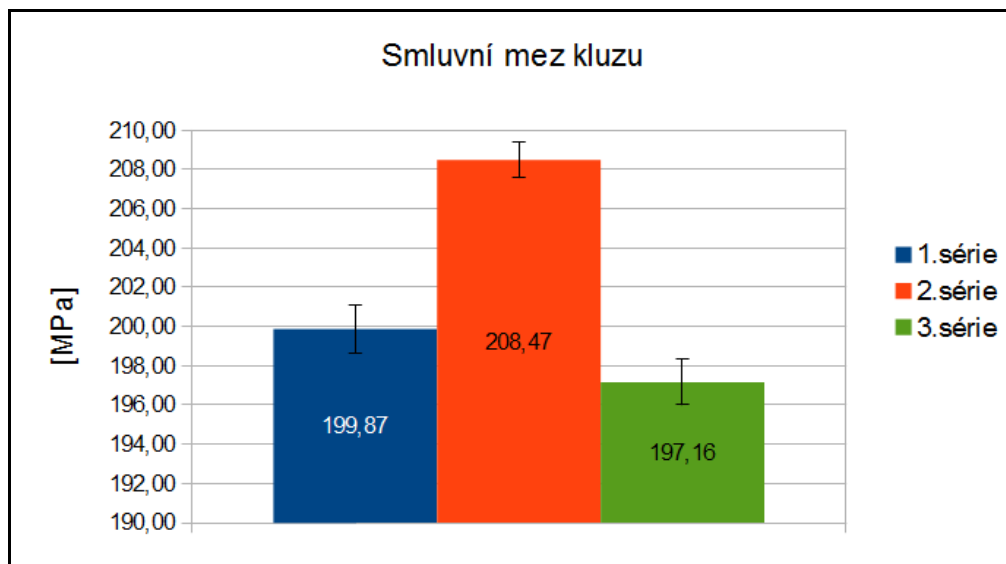
Obr. 36: Vyhodnocení „ R_m „

Z grafu vyhodnocení Meze pevnosti v tahu „ R_m „ na obr. 35. je vidět, že hodnoty R_m se měnili v závislosti na tepelném zpracování, konkrétně na fázi umělého stárnutí, které sme v našem případě jako jediné měnili, první fáze tepelného zpracování, kterou nazýváme rozpuštěcí žihání zůstávala na kosntatní hodnotě 6 h. Je znatelné, že nejvhodnější doba umělého stárnutí pro odlitky z materiálu AISI7Mg0,3 o průměrech zhruba 6 mm je ve 2. sérii a to 5 h., hodnota $R_m = 296,91\text{MPa}$, poté následuje 1. série se 3,5 hodinami, $R_m = 292,82\text{MPa}$, a nejhůře dopadla 3. série s 6 hodinami, kde bylo $R_m = 289,06\text{MPa}$.



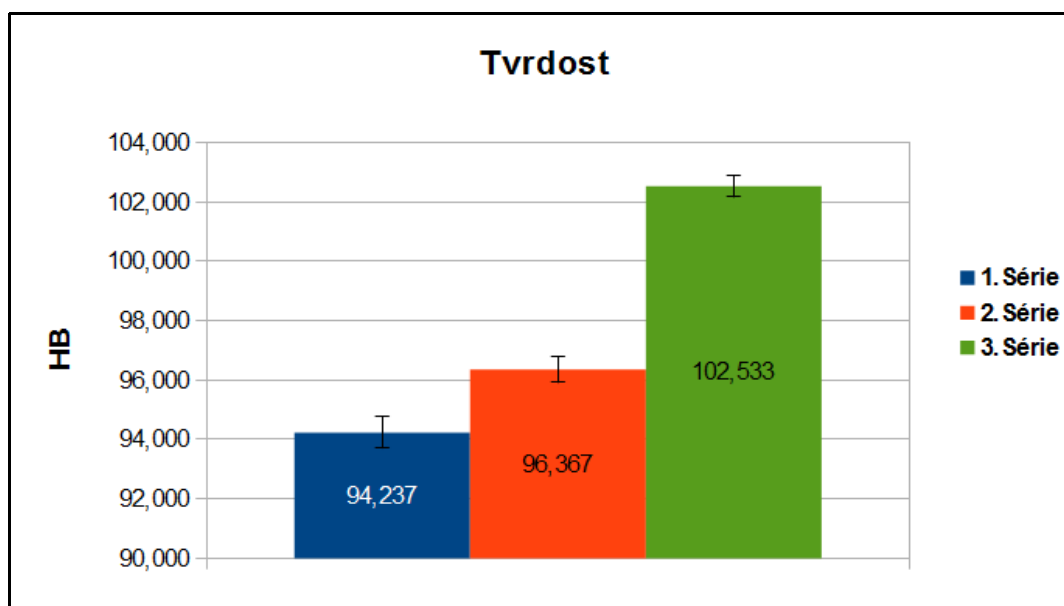
Obr. 37: Vyhodnocení tažnosti „ A „

Z grafu vyhodnocení tažnosti „A,, na obr. 36. vidíme, že nejlépe můžeme hodnotit vzorky z 1. série, kde byla hodnota tažnosti $A = 5,04 \%$, poté vzorky z 3. série kde byla tažnost $A = 4,44 \%$ a nakonec vzorky z 2. série kde $A = 4,14 \%$. Mezi druhou a třetí sérií byly rozdíly hodnot tažnosti minimální.



Obr. 38: Vyhodnocení „ $R_{p0,2}$ „

Z grafu smluvní meze kluzu „ $R_{p0,2}$ „ na obr. 37. zjistíme, že hodnota $R_{p0,2}$ je největší v 2. sérii a to $R_{p0,2} = 208,47$ MPa, poté hodnoty poměrně hodně klesají, druhou největší hodnotu vidíme v 1. sérii a to $R_{p0,2} = 199,87$ MPa, Nejhůře dopadla 3. série kde byla naměřena hodnota $R_{p0,2} = 197,16$ Mpa.



Obr. 39: Vyhodnocení tvrdosti dle HB

Na grafu Tvrdosti z obr. 38. vidíme, že nejlepší tepelné zpracování pro materiály AlSi7Mg0,3 o průměru 6 mm z hlediska tvrdosti bylo použito ve 3. sérii, je to rozpouštěcí žihání 6 h a umělé stárnutí 6 h při, kterém sme dosáhli hodnoty HB = 102,533. Poté v 2. sérii bylo zjištěno HB = 96,367 a ve 3. sérii HB = 94,237.

7.3.1 Vyhodnocení

Tab. 9: Vyhodnocení optimálního tepelného zpracování

Opt. Tep. zpracování pro zlepšení mechanických vlastností	
Mechanické vlastnosti	Optimální Tepelné zpracování
R_m [Mpa]	RZ = 6h (538°C), US = 5h (154°C)
$R_{p0,2}$ [Mpa]	RZ = 6h (538°C), US = 5h (154°C)
A [%]	RZ = 6h (538°C), US = 3,5h (154°C)
HB	RZ = 6h (538°C), US = 6h (154°C)

ZÁVĚR

Účelem této bakalářské práce bylo optimalizovat tepelné zpracování, konkrétně kombinaci rozpouštěcího žíhání a umělého stárnutí pro hliníkové slitiny. Zvolili jsme materiál AISI7Mg0,3, který byl ve formě 90 kusů zkušebních tyčinek o průměru $d_0 = 6$ mm a délce $l_0 = 30$ mm vyrobených odléváním, metodou vytavitelných modelů tepelně zpracován třemi různými způsoby a poté na univerzálním zkušebním zařízení ZWICK BETA 50 zkoušen na mechanické vlastnosti. Poté byl zkoušen na Tvrdoměru VEB, podle zásad pro zkoušení tvrdosti podle Brinella.

Hodnoty na kterých nám nejvíce záleželo a tudíž jsme je zkoumali byly Mez pevnosti v tahu, Smluvní mez kluzu, tažnost a tvrdost materiálu. Tyto hodnoty jsou totiž nejdůležitější a zákazníci požadují jejich přesné údaje.

Z hlediska meze pevnosti v tahu „ R_m “, by bylo optimální volit rozpouštěcí žíhání 6h a následné umělé stárnutí 5 h.

Z hlediska smluvní meze kluzu „ $R_{p0,2}$ “, by bylo optimální volit rozpouštěcí žíhání 6h a následné umělé stárnutí 5 h.

Z hlediska tažnosti „ A “, by bylo optimální volit rozpouštěcí žíhání 6 h a následné umělé stárnutí jen 3,5h.

Aby byla co nejlepší tvrdost, pak bysme měli volit rozpouštěcí žíhání 6 h a následné umělé stárnutí 6 h.

Dle naměřených hodnot pro materiály o tloušťce okolo 6 mm je optimálním tepelným zpracováním 2. série (RZ = 6 h, US = 5 h) při teplotách (RZ = 538°C a US = 154°C). Jedná se o proces, při kterém je většina mechanických vlastností nejlepší protože v praxi by zákazník nežádal pouze jednu konkrétní vlastnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.: Metalurgie neželezných slitin, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. ISBN 80-214-2790-6
- [2] Luděk Ptáček a kolektiv: Nauka o materiálu II., 2002. ISBN: 80-7204-248-3
- [3] Dostupné z bakalářské práce: Optimalizace procesu zpracování profilů ze slitin hliníku / Petr Šedivý 2011
- [4] Dostupné z <http://www.lorini.biz/met/m2/imag/4594/4594g.jpg>
- [5] Dostupné z <http://www.alu-profily.cz/wp-content/uploads/2012/06/Aluminium-4-300x300.jpg>
- [6] Dostupné z http://www.spojeneslevarny.cz/editor/images/hlinik_liti_full.jpg
- [7] Dostupné z <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
- [8] Dostupné z physics.mff.cuni.cz
- [9] Dostupné z ljinfo.blogspot.com
- [10] Dostupné z http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [11] Dostupné z www.zadania-seminarky.sk
- [12] Dostupné z www.chempoint.cz

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al	Hliník
α	Tuhý roztok
Mg	Hořčík
Cu	Měď
Si	Křemík
Zn	Zinek
R_m	Mez pevnosti v tahu [MPa]
F	Zátěžná síla [N]
A	Tažnost [%]
Ni	Nikl
Cr	Chrom
ΔX	Rozdíl mezi požadovaným a aktuálním obsahem prvku X ve slitině [%]
$X_{\text{předsl.}}$	Koncentrace přísadového prvku v předslitině [%]
Fe	Železo
Mn	Mangan
Ti	Titan
a	Mřížková konstanta [m]
Q	Index kvality [MPa]
k	Koeficient pro danou slitinu
MIG	Svařování (metal inert gas)
WIG	Svařování (Wolfram inert gas)
R_e	Mez kluzu v tahu [MPa]
Z	Kontrakce [%]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu [MPa]
S	Průřez tyčinky [mm ²]
s	Směrodatná odchylka
x	Aritmetický průměr
n	Počet měření
HB	Tvrdost podle Brinella
HV	Tvrdost podle Vickerse
L_0	Počáteční délka tyčinky [mm]
L_u	Konečná délka tyčinky [mm]
S_0	Počáteční průřez tyčinky [mm ²]
S_u	Konečný průřez tyčinky [mm ²]
A	Mez úměrnosti [MPa]
B	Mez kluzu [MPa]

C	Mez pevnosti [MPa]
D	Bod přetržení tyčinky [MPa]
ε	Prodloužení [mm]
σ	Pevnost [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklad čistého hliníku [5].....	13
Obr. 2 Index kvality pro slitinu AlSi7Mg [1].....	17
Obr. 3 Housky slitin hliníku [4].....	20
Obr. 4: Elektrická odporová kelímková pec [1].....	23
Obr. 5: Dvoukomorová plynová pec [1].....	24
Obr. 6: Šachtová tavící pec StricoWestofen [1].....	24
Obr. 7: Elektrická vanová pec (tříkomorová) [1].....	25
Obr. 8: Dávkovací pec [1].....	25
Obr. 9: křivka ochlazování [1].....	28
Obr. 10: Určení velikosti primárních zrn metalografickým způsobem [1].....	29
Obr. 11: ukázka lití do pískových forem [6].....	30
Obr. 12: Lití hliníkových slitin do skořepinových forem.....	31
Obr. 13: kokilový stroj s dvoudílnou formou [1].....	32
Obr. 14: kovová forma s jádry - pohled do dělicí roviny [1].....	32
Obr. 15: Horizontální tlakový stroj se studenou komorou [1].....	33
Obr. 16: stroj pro nízkotlaké lití [1].....	34
Obr. 17: Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku [1].....	36
Obr. 18: Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [1].....	37
Obr. 19: vyloučení precipitační fáze : a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) částečně koherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát [1].....	38
Obr. 20: Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [1].....	38
Obr. 21: Vliv Mg na mechanické vlastnosti po vytvrzení [1].....	39
Obr. 22: diagram tepelného zprac. při vytvrzování za tepla [1].....	39
Obr. 23: Zkušební tyčinka.....	42
Obr. 24: Svazek zkušebních tyčinek	43
Obr. 25: Obecné znázornění průběhu tepelného zpracování.....	44
Obr. 26: Pec na rozpouštěcí žíhání.....	44
Obr. 27: Pec na umělé stárnutí.....	45
Obr. 28: Univerzální trhací stroj Zwick/Roell Beta 50.....	46
Obr. 29: Laserový průtahoměr.....	46
Obr. 30: Detail čelistí trhacího stroje.....	47
Obr. 31: tahový diagram [8].....	48
Obr. 32: tahový diagram pro různé typy kovů [9].....	49

Obr. 33: Univerzální tvrdoměr VEB.....	50
Obr. 34: Zkouška podle Brinella [11].....	50
Obr. 35: zkouška podle Vickerse [12].....	51
Obr. 36: Vyhodnocení „Rm „.....	59
Obr. 37: Vyhodnocení tažnosti „A„.....	59
Obr. 38: Vyhodnocení „Rp0,2 „.....	60
Obr. 39: Vyhodnocení tvrdosti dle HB.....	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Způsob značení slitin hliníku dle ČSN EN 1706 [1].....	18
Tab. 2 Tepelně-fyzikální vl. některých nželezných kovů [1].....	21
Tab. 3: Hodnoty naměřené pro 1.sérii.....	53
Tab. 4: Hodnoty naměřené pro 2. sérii.....	55
Tab. 5: Naměřené hodnoty pro 3. sérii.....	56
Tab. 6: Hodnoty tvrdosti 1. série.....	57
Tab. 7: hodnoty tvrdosti 2. série.....	58
Tab. 8: Hodnoty tvrdosti 3. série.....	59
Tab. 9: Vyhodnocení optimálního tepelného zpracování.....	62