



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV UMÍSTĚNÍ AL ODLITKŮ V PECI TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI

INFLUENCE OF LOCATION OF AL CASTINGS IN A HEAT TREATMENT FURNACE ON MECHANICAL
PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Toufar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Horenský

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Tomáš Toufar
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Slévárenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Horenský
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv umístění Al odlitků v peci tepelného zpracování na mechanické vlastnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelné zpracování slitin hliníku představuje složitý a velmi specifický proces. U těchto slitin jsou požadované teploty, rychlosti ohřevu, doba výdrže i následná rychlost ochlazování zadávány v úzkých, přesně vymezených tolerancích. Pece jsou proto osazeny ventilátory. Nucená cirkulace vzduchu přispívá k rovnoměrnému rozložení teploty a rychlejšímu předávání tepla do vsázky a umožňuje tak naladění prázdné pece dle normy DIN 17052–1. Diplomová práce bude zaměřena na ověření vlivu umístění odlitku v zaplněné žíhací peci na jeho mechanické vlastnosti.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je zjistit vliv polohy odlitku v zaplněné žíhací peci při rozpouštěcím žíhání na jeho mechanické vlastnosti.

Seznam doporučené literatury:

SIGWORTH, G. a G. TOTTEN. Heat Treatment of Aluminum Alloys Castings. ASM Handbook Volume 4E: Heat Treating of Nonferrous Alloys. Materials Park (USA): ASM International, 2016, 274-288. ISBN 978-1-62708-112-2.

MACKENZIE, S. a G. TOTTEN. Metallurgy of Heat-Treatable Aluminum Alloys. ASM Handbook Volume 4E: Heat Treating of Nonferrous Alloys. Materials Park (USA): ASM International, 2016, 65-113. ISBN 978-1-62708-112-2.

GRÍGEROVÁ, T., I. LUKÁČ a R. KOŘENÝ. Zlievarenstvo neželezných kovov. Bratislava: Alfa, 1988.

MICHNA, Š. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.

DIN 17052-1. Heat treatment furnaces - Part 1: Requirements for temperature uniformity. Complete revision. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2013.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

TOUFAR Tomáš: Vliv umístění Al odlitků v peci tepelného zpracování na mechanické vlastnosti

Tato diplomová práce se zabývá umístěním hliníkových odlitků v peci tepelného zpracování a jeho vlivem na mechanické vlastnosti. Jako zkušební vzorky se pro experimentální část použily tahové tyčky, které byly odlity z podeutektického siluminu AlSi7Mg0,6. Tyto vzorky se v peci uložily do míst, kde byly teploty kalibrovány dodavatelem pece. Následně se provedly tahové zkoušky k vyhodnocení jejich výsledných mechanických vlastností. Experiment proběhl ve slévárně neželezných kovů MESIT foundry, a.s. v Uherském Hradišti.

Klíčová slova: Hliník, tepelné zpracování, AlSi7Mg0,6, tahové zkoušky, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

TOUFAR Tomáš: Influence of location of Al castings in a heat treatment furnace on mechanical properties

The present Master thesis deals with location of aluminium castings in the heat treatment furnace and its influence on mechanical properties. As testing samples for the experimental part, tensile bars were used; they were cast from the subeutectic silumin AlSi7Mg0,6. These samples were placed in the furnace in the locations where temperatures were calibrated by the furnace supplier. Then, tensile tests were performed to evaluate the resulting mechanical properties of the samples. The experiment was carried out in the foundry of non-ferrous metals, MESIT foundry Ltd., Uherské Hradiště.

Keywords: Aluminium, heat treatment, AlSi7Mg0,6, tensile tests, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOUFAR, Tomáš. *Vliv umístění Al odlitek v peci tepelného zpracování na mechanické vlastnosti*. Brno 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s. Vedoucí práce Ing. Jiří Horenský.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv umístění Al odlitků v peci tepelného zpracování na mechanické vlastnosti vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Tomáš Toufar

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Jiřímu Horenskému za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Gabriele Holčapkové za praktické připomínky k experimentu a všem pracovníkům firmy MESIT foundry, a.s. za jejich ochotu a spolupráci při realizaci experimentální části. Děkuji také doc. RNDr. Bohumilu Marošovi, CSc. za rady při zpracování statistické analýzy. Zvláštní poděkování bych rád věnoval své rodině, která mě podporovala během celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Obsah

ÚVOD	10
1 HLINÍK	11
1.1 Výskyt a výroba	11
1.2 Vlastnosti hliníku	14
1.3 Použití technického hliníku	15
2 SLITINY HLINÍKU	16
2.1 Vliv přísadových prvků	16
2.2 Rozdělení slitin hliníku	17
2.3 Slitiny hliníku pro tváření	17
2.3.1 Slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi	18
2.3.2 Slitiny s vyšší a vysokou pevností, ale nízkou odolností proti korozi	18
2.4 Slévárenské slitiny hliníku	18
2.4.1 Slitiny Al-Si	19
2.4.2 Slitiny Al-Cu	32
2.4.3 Slitiny Al-Mg	33
2.4.4 Slitiny Al-Zn	35
3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU	37
3.1 Vytvrzování	37
3.1.1 Rozpouštěcí žihání	38
3.1.2 Ochlazení slitiny	39
3.1.3 Precipitační vytvrzování	40
3.2 Žihání	43
3.2.1 Žihání na odstranění vnitřního pnutí	43
3.2.2 Stabilizační žihání	44
3.2.3 Žihání na měkko	44
3.2.4 Homogenizační žihání	44
3.3 Značení režimů tepelného zpracování	45
4 EXPERIMENT	46
4.1 Představení slévárny	46

4.2	Popis experimentu	46
4.3	Příprava zkušebních tahových tyček	51
4.3.1	Výroba skořepinové formy.....	51
4.3.2	Příprava slitiny	53
4.3.3	Odlévání	56
4.3.4	Dokončovací operace	56
4.3.5	Tepelné zpracování tahových tyček	57
4.4	Měření mechanických vlastností	59
4.5	Vyhodnocení získaných hodnot	60
4.5.1	Plná pec - pevnost	61
4.5.2	Plná pec - tažnost.....	63
4.5.3	Prázdna pec - pevnost.....	65
4.5.4	Prázdna pec - tažnost.....	67
4.5.5	Výsledky z pece KNC/H 1000/65	69
4.6	Rozbor metalografických vzorků	70
5	ZÁVĚR	71

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých obrázků

Seznam použitých tabulek

Seznam použitých grafů

Seznam příloh

ÚVOD

Slitiny hliníku slévárenského typu je možné řadit mezi materiály, které se využívají pro výrobu odlitků odlišných tvarů, u nichž jsou kladeny vysoké nároky na mechanické vlastnosti. Těchto vlastností lze dosáhnout pomocí různých technologií, které se využívají pro jejich výrobu. Následně se odlitky některých hliníkových slitin mohou tepelně zpracovávat a navyšovat tak hodnoty jejich mechanických vlastností. [1], [2]

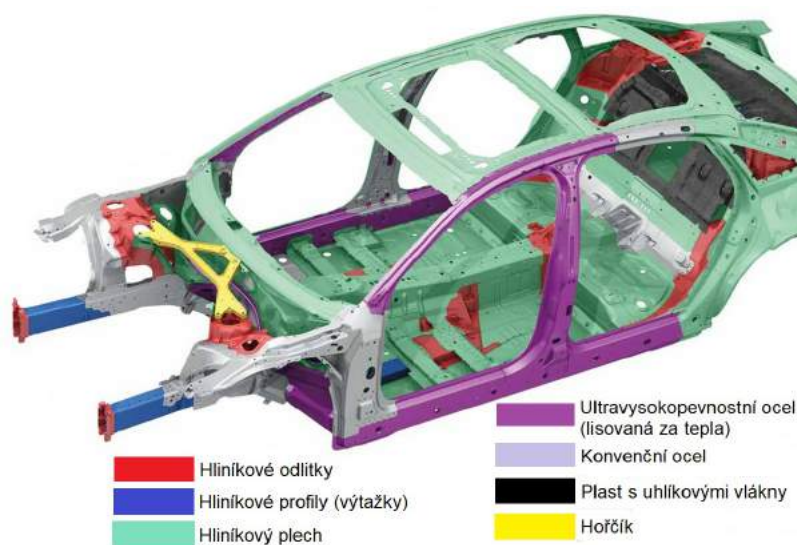
V dnešní době se vývoj hliníkových slitin především zabývá zlepšením mechanických vlastností již používaných slitin. Zlepšují se způsoby odlévání, chladnutí taveniny při tuhnutí či tepelného zpracování slitin hliníku.

Své uplatnění nalézá hliník a jeho slitiny v řadě průmyslových odvětví. Z důvodu výhodného poměru nízké měrné hmotnosti a výborných mechanických vlastností jsou alternativou ke konstrukčním ocelím. Tab. 1 uvádí spotřebu tohoto materiálu v různých průmyslových oborech. [3]

Tab. 1 Spotřeba hliníku v různých odvětvích průmyslu v roce 2014 [3].

Odvětví	Spotřeba [%]
Doprava	27
Stavebnictví	25
Elektrotechnika	13
Strojírenství	9
Obalové materiály	8
Hliníkové fólie	8
Jiné	5
Spotřební zboží	5

Z tabulky je vidět, že hliník a jeho slitiny se nejvíce využívají v dopravním průmyslu (letadla, osobní auta, vlaky, lodě, kosmonautika). Podle literárního zdroje [49] lze nahrazením ocelových dílů za hliníkové snížit hmotnost osobního auta až o 50 kg, což vede k úspoře 850 litrů paliva za rok. Na obr. 1 jsou uvedeny příklady použití hliníkových komponentů v automobilovém průmyslu u rámu pro Audi A8 čtvrté generace. Karoserie je tvořena z 58 % hliníkem. [4], [5], [6]



Obr. 1 Vícemateriálový rám Audi Space Frame [6]

1 HLINÍK

Lehký, nepolymorfní kov, bělavě šedé barvy s hustotou přibližně třikrát nižší než má železo. Po kyslíku a křemíku je s asi 8 % třetím nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře. Ačkoliv má hliník takto hojné zastoupení, ve větší míře se začal průmyslově vyrábět až v druhé polovině devatenáctého století. V této době na sobě nezávisle patentoval francouzský vědec Paul T. Héroult a americký vynálezce Charles M. Hall elektrolytickou výrobu hliníku z bauxitu, která se až na drobné změny používá dodnes. [1], [7], [8]

Čísla celosvětové produkce hliníku nebyly do konce 2. světové války nijak výrazné. Značný progres nastal po roce 1946, kdy došlo k masivnímu rozvoji automobilové a letecké dopravy. Dalším důvodem použití hliníkových odlitků byla možnost odlévat tento materiál do kovových forem metodou tlakového lití. V tab. 2 je uvedena roční primární výroba hliníku dle IAI (International Aluminium Institute) mezi roky 1900 až 2013. Dle prognóz se do roku 2025 výroba hliníku bude stále zvyšovat a naroste přibližně o 400 až 600 %. [1], [5], [8]

Tab. 2 Roční primární výroba hliníku dle IAI [8].

Rok výroby	1900	1920	1946	1975	1990	2000	2010	2013
Světová výroba [t.10 ³]	8	128	681	12 326	19 514	24 657	42 353	49 701

1.1 Výskyt a výroba

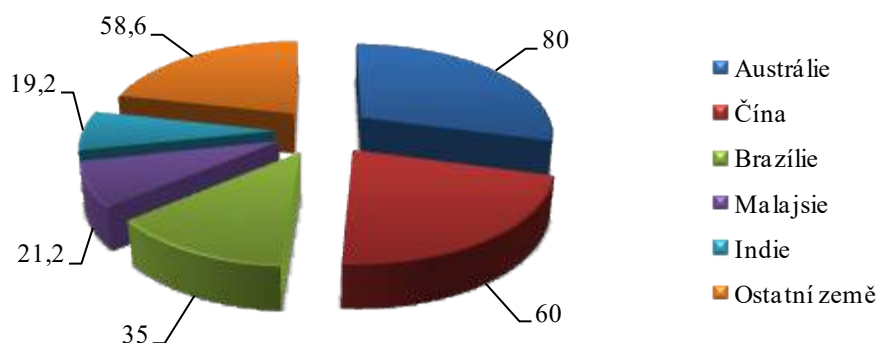
V přírodě je hliník vázán v mnoha sloučeninách, mezi které se řadí: bauxit, korund, spinel, kaolin, kryolit, diaspor atd. Nejvýznamnější hliníkovou rudou je bauxit (obr. 2). Jedná se o hnědočervenou horninu složenou z několika hydratovaných oxidů hliníku s obsahem oxidů železa, křemíku a titanu, v němž se obsah Al_2O_3 pohybuje okolo 50 %. Výskyt bauxitu je úzce spojen s tropickým podnebím, kde vlivem prudkých srážek dochází k vyluhování rozpustných silikátů z hornin a na místě jsou zanechány jen minerály hliníku a železa. Následná směs, již nazývaná bauxit, se tvoří jejich hydroxidací a oxidací. [1], [7], [8], [9], [10]



Obr. 2 Bauxit [11]

Země s největší produkcí této horniny je Austrálie, která se na celkovém objemu výroby podílí až jednou třetinou. Mezi další státy s významnou těžbou bauxitu patří Guinea, Jamajka, Brazílie a Čína. Celosvětové zásoby bauxitu se odhadují na více než 50 bilionů tun. V grafu 1 jsou uvedeny země s největší těžbou bauxitu v roce 2015. V tomto roce se světová produkce pohybovala přibližně okolo 274 mil. tun, ze kterých se až 90 % využilo pro výrobu hliníku. [8], [10]

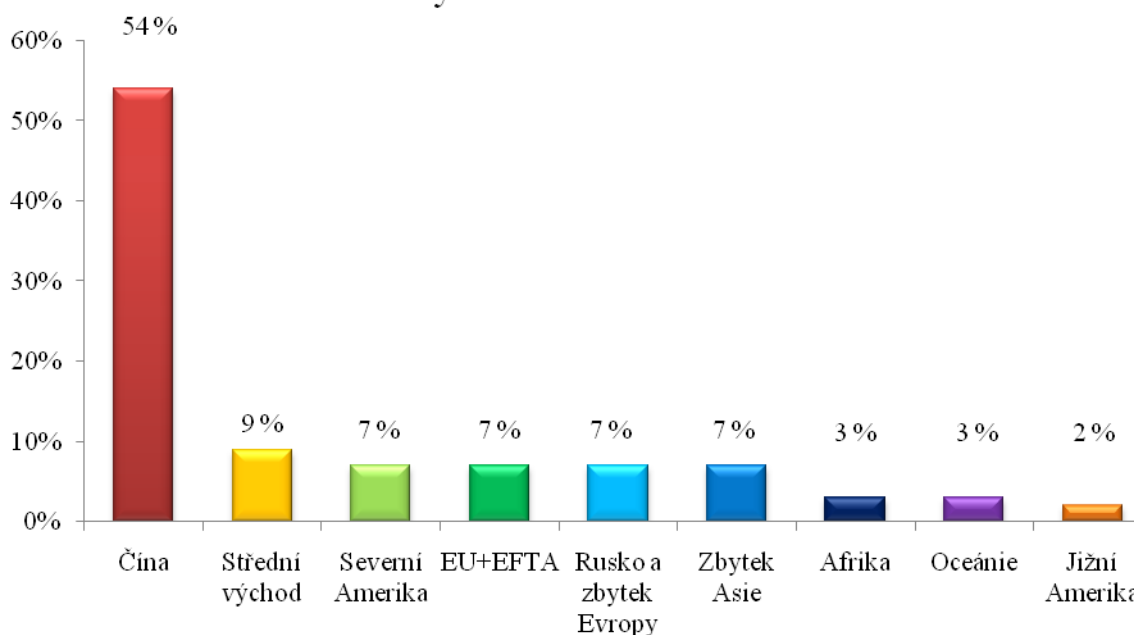
Těžba bauxitu ve světě v mil. tun v roce 2015



Graf 1 Státy s nejvyšší produkcí bauxitu [10]

Z bauxitu se elektrolýzou roztoku oxidu hlinitého v roztavených fluoridech získá hliník. Nejprve je nutné získat oxid hlinitý z hlinitanových rud. Tento proces se skládá z mletí, loužení a žíhání při teplotě 1200 až 1300 °C. Následuje elektrolytický postup redukce oxidů z elektrolytu. Vhodným elektrolytem, který se nachází v elektrolyzních pecích za teplot okolo 960 °C, je roztavený kryolit (Na_3AlF_6). Do lázně přidávaný oxid hlinitý se v kryolitu rozpouští, na katodě se vylučuje kovový hliník a kyslík se usazuje na uhlíkové anodě. V grafu 2 jsou zobrazeny země, popřípadě regiony, s největší produkcí primárního hliníku v roce 2016. [1], [7], [8], [9], [11]

Primární výroba hliníku v roce 2016



Graf 2 Rozdělení regionů dle výroby primárního hliníku [11]

Získání hliníku z bauxitu je energeticky velmi náročné, často se tak vyrábí v zemích s levnou elektrickou energií. Například Norsko patří k zemím, které bauxit dováží a ke zpracování využívají elektrickou energii z vodních elektráren. K zhotovení 1 tuny hliníku je nutné zpracovat okolo 4 tun bauxitu, 14 MWh elektrické energie a 20 GJ tepelné energie. Výsledný hliník má čistotu až 99,9 %. Zároveň se vytváří značné množství červeného toxického kalu (na 1 tunu hliníku až 0,5 tuny odpadu), který musí hliníkárna ukládat do skládek. Tento odpad představuje nebezpečí nejen pro životní prostředí, ale i lidské zdraví. V roce 2010 v Maďarsku došlo k protržení hráze odkládiště a úniku kalu (obr. 3). [1], [5], [7]



Obr. 3 Podtržená hráz skládky s toxickým odpadem [12]

Na Slovensku se elektrolytickou výrobou primárního hliníku zabývá firma Slovalco, a.s. v Žiaru nad Hronom. Vlivem vysoké energetické náročnosti této metody je tento podnik největším odběratelem elektrické energie na Slovensku. V elektrolyzní hale (obr. 4) s délkou 806 m je umístěno 226 elektrolyzérů s výrobní kapacitou primárního hliníku více než 165 tisíc tun tekutého kovu. [13]



Obr. 4 Elektrolyzní pece [13]

1.2 Vlastnosti hliníku

Příčinou rychlého vývoje a spotřeby hliníku je zejména kombinace jeho vlastností. Hliník krystalizuje do plošně centrované krystalické mřížky, v důsledku čehož má dobré plastické vlastnosti za tepla i za studena. V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty některých základních vlastností tohoto kovu, díky kterým je využíván v různých odvětvích průmyslu, např. tepelná vodivost v energetickém průmyslu, účinný průřez pro neutrony v jaderné energetice. [14], [15]

Významnými fyzikálními vlastnostmi tohoto kovu jsou vysoké hodnoty elektrické a tepelné vodivosti. Oproti mědi má však hliník nižší elektrickou vodivost, proto musí mít vodič z hliníku větší průřez, aby dosáhl vodivosti měděného vodiče. Hliník je také křehčí, proto se vodiče často opakovaným ohybem lehce zlomí. Přísadovými prvky se elektrická vodivost značně snižuje. [1], [8]

Čistý hliník má nízké mechanické vlastnosti. Pevnost v tahu pod 100 MPa, tvrdost 20 až 30 HB. Naopak plastické vlastnosti jsou dobré, kdy tažnost může přesahovat až 20 %. Tvar mřížky ovlivňuje vlastnosti za nízkých teplot, kdy u některých typů hliníkových slitin mohou být hodnoty mechanických vlastností vyšší než při pokojové teplotě. [1], [8], [16]

Hliník při kontaktu s kyslíkem tvoří na povrchu tenký stabilní oxid hlinitý (Al_2O_3). Za normálních teplot má tato vrstva hloubku přibližně do 10 nm, která brání v hlubší oxidaci a zajišťuje velmi dobrou odolnost proti prostředí. Elektrolyticky lze oxidickou vrstvu zesílit (eloxovat), čímž se dosáhne lepších ochranných účinků a povrch získá vyšší tvrdost. Tímto procesem se vrstva zvýší na 5 až 25 μm . [1], [8], [14]

Důsledkem vysoké měrné tepelné kapacity asi $0,9 \text{ kJ}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$ a vysokého skupenského tepla tání $396 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ jsou hliník a jeho slitiny vysoce energeticky náročné na roztavení. [1]

Tab. 3 Hodnoty některých fyzikálních vlastností hliníku [8], [14].

Vlastnosti	Hodnoty
Mřížka	Kubická plošně centrovaná
Parametr mřížky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Hustota	$2,6989 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (při $20 \text{ }^\circ\text{C}$)
Teplot tavení	$660,4 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota varu	$2\,494 \text{ }^\circ\text{C}$
Tepelná vodivost	$247 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ (při $25 \text{ }^\circ\text{C}$)
Elektrická vodivost	62 \% IACS (Al 99,8) $65 - 66 \text{ \% IACS}$ (Al 99,999+)
Atomová hmotnost	26,98154
Objemová změna při krystalizaci	6,5 %
Specifické teplo	$0,900 \text{ kJ}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}$ (při $25 \text{ }^\circ\text{C}$) $1,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}$ (při $660,4 \text{ }^\circ\text{C}$)
Spalné teplo	$31,05 \text{ MJ}\cdot\text{kg}$
Elektrický odpor	$26,2 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ (Al 99,999+ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$) $26,55 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ (Al 99,8 při $20 \text{ }^\circ\text{C}$)
Účinný průřez pro neutrony	$0,2 \text{ b/atom}$ pro energii neutronu $0,02 \text{ V}$ $0,65 \text{ b/atom}$ pro energii neutronu 100 MW

1.3 Použití technického hliníku

Použití hliníku technické čistoty je na rozdíl od jeho slitin výrazně nižší, přesto se s jeho výrobky denně setkáváme. Na obr. 5 jsou uvedeny příklady hliníkových produktů používaných nejen v domácnosti. Uplatnění ve velké míře omezují zejména jeho nízké pevnostní vlastnosti. Pevnost v tahu měkkého čistého hliníku se pohybuje v rozmezí od 40 do 70 MPa s tažností až 30 % a tvrdosti do 23 HB. Přibližně 60 % technického hliníku se zpracuje na plechy. Dalšími hutními výrobky jsou dráty a tyče. Tab. 4 uvádí vybrané odvětví a výrobky, v kterých se používá hliník. [5], [9], [17], [18]

Každé odvětví průmyslu vyžaduje jiné procento čistoty hliníku. Nejpoužívanějším typem hliníku je Al99,5. Toto označení udává, že max. obsah nečistot je menší než 0,5 %. Použití nachází u málo mechanicky namáhaných konstrukčních prvků, dobře svařitelných, výrazně korozně odolných, tepelně a elektricky vodivých. [9], [15], [19]

Tab. 4 Použití hliníku ve vybraných oblastech průmyslu [15], [18].

Průmyslové odvětví	Výrobek
Elektrotechnický průmysl	vodiče rozvodných zařízení, fólie pro kondenzátory
Potravinářský průmysl	plechovky, fólie (alobal), nádoby na jídlo
Chemický průmysl	výměníky chemických zařízení
Strojírenství	alitování povrchové vrstvy na výrobcích z oceli
Automobilový průmysl	chladiče automobilů, nádrže
Hutní průmysl	legující přísada, dezoxidace oceli



Obr. 5 Příklady hliníkových produktů [20]

2 SLITINY HLINÍKU

První vyvinutou hliníkovou slitinou bylo duraluminium (AlCu4Mg) z roku 1906. U této slitiny byla snaha tepelným zpracováním zvýšit pevnost a tvrdost. Povedlo se dosáhnout tvrdosti až 110 HB a uplatnění našla při stavbě vzducholodí a letadel. Snaha konstruktérů snížit váhu výrobků a zároveň zachovat přijatelné pevnosti, zapříčinilo zvýšení použití těchto slitin. Slitiny hliníku se začaly řadit, společně s ocelí, mezi nejpoužívanější kovové konstrukční materiály. V současné době se normuje více jak na sto slitin hliníku. [1], [9], [19], [21]

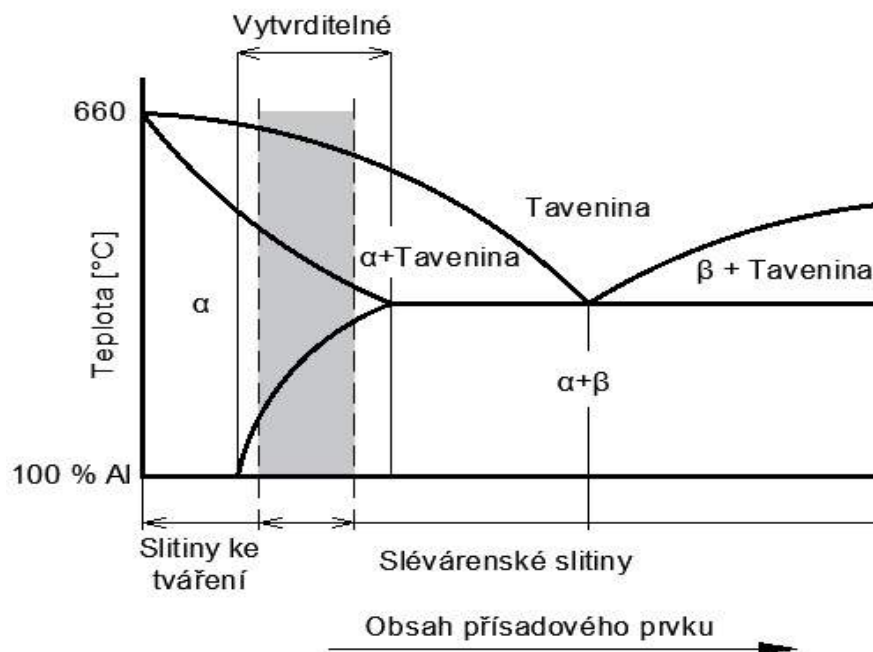
2.1 Vliv přísadových prvků

Legováním jedním nebo více prvky lze mechanické či fyzikální vlastnosti hliníku zlepšit. Obsahy některých základních prvků a jejich vliv na vlastnosti jsou následující: [1], [5], [7], [22], [23], [24]

- Měď – nejstarší přísadový prvek, který ovlivňuje mechanické vlastnosti slitin. Zvyšuje pevnost a tvrdost, ale zhoršuje tvárnost a odolnost proti korozi. Ve slévárenských slitinách může být jeho obsah až 12 %, ve slitinách ke tváření asi 6 %.
- Křemík – nejvýznamnější přísada slévárenských slitin hliníku. Ve slitinách Al-Si se s rostoucím obsahem křemíku zlepší téměř všechny slévárenské vlastnosti. S vyšším obsahem tohoto prvku poněkud roste i cena slitiny. Slévárenské slitiny mohou mít obsah křemíku i nad 20 %, oproti tomu slitiny ke tváření jen do 1 %.
- Hořčík – zvyšuje předpoklady pro tepelné zpracování slitin. Čím vyšší obsah hořčíku ve slitinách, tím vyšší má hodnoty pevnosti slitina po vytvrzování. Ve slévárenských slitinách je jeho obsah až 11 %, ve slitinách pro tváření až 8 %.
- Železo – nečistota, která má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti slitin hliníku. Do vsázky se dostane např. z nenatřeného tavičského nářadí. Ve slévárenských slitinách je jeho obsah do 1 %. V některých případech se železo přidává záměrně, např. u tlakového lití snižuje lepení kovu na formu a prodlužuje tak jeho životnost. Obsah ve slitinách pro tváření se pohybuje do 0,5 %, případně až do 1,6 %.
- Mangan – kompenzuje škodlivý vliv železa. Ve slévárenských slitinách se jeho obsah volí tak, aby byl min. 50 % možného obsahu železa. Zvyšuje tvárnost, pevnost a odolnost proti korozi. Je-li jeho obsah ve slitině vysoký, zvyšuje křehkost.
- Zinek – slitiny hliníku se zinkem se vyznačují vyšší pevností, horší houževnatostí a odolností proti korozi. Jeho obsah bývá do 7 %, u slitin k tváření do 8 %.
- Nikl – jeho obsah bývá až do 2 %. Hliníkové slitiny s obsahem niklu si udržují dobré mechanické vlastnosti za vyšších teplot.
- Titan – ve slitinách hliníku je zásadní jeho očkovací účinek a tím zjemňování zrna.
- Lithium – reaktivní prvek, nejlehčí ze skupiny alkalických kovů ($< 1 \text{ g.cm}^{-3}$). Přidává se ke slitinám z důvodu snižování jejich hustoty. Jeho obsah bývá do 5 %.
- Chrom, kobalt, cín, olovo a další prvky jsou ve slitinách hliníku jen v nepatrných množstvích, přesto mohou ovlivňovat některé vlastnosti.

2.2 Rozdělení slitin hliníku

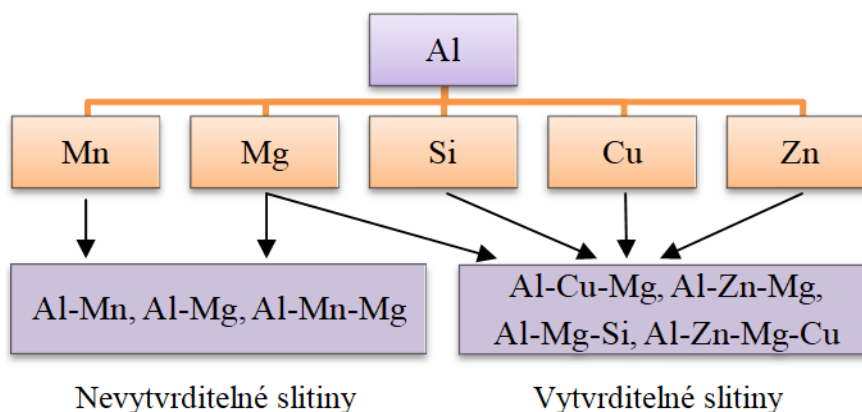
Hliníkové slitiny se dělí do dvou základních skupin, a to na slitiny slévárenské a na slitiny ke tváření. Na obr. 6 je zjednodušené rozdělení binárních slitin hliníku v obecném rovnovážném diagramu. [9], [19]



Obr. 6 Rozdělení slitin hliníku [25]

2.3 Slitiny hliníku pro tváření

V tvářených slitinách není množství přísadového prvku větší než jeho maximální rozpustnost, aby během tuhnutí vznikl tuhý roztok. Slitiny se nejčastěji dělí dle tepelného zpracování. Klasifikují se tak na slitiny tepelným zpracováním vytvrditelné a na nevytvrditelné (obr. 7). Zákazníky však především zajímají vlastnosti dané slitiny. Z tohoto důvodu se rozdělují do skupin podle mechanických a fyzikálních vlastností. [19], [22]



Obr. 7 Rozdělení tvářených slitin hliníku [26]

2.3.1 Slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi

Do skupiny nízkopevnostních slitin se řadí Al-Mn, Al-Mg. Mají výbornou odolnost proti korozi, což je způsobeno nepřítomností mědi. Tepelným zpracováním se nedají vytvrdit, ale mají dobrou tvařitelnost, lomovou houževnatost, odolnost proti vibračnímu zatížení a svařitelnost. [9], [21]

Slitinu Al-Mg-Si lze na rozdíl od předchozích materiálů tepelným zpracováním vytvrdit a výborně leštit. Jsou známé pod názvem Avial a svoje uplatnění nachází v letectví a architektuře, kde jsou vhodné pro ozdobné účely. [9], [21]

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

Nejvýznamnějším typem těchto slitin k tváření jsou Al-Cu-Mg. Jsou to zejména duraly AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn. Lze je vytvrdit a jejich pevnost se pohybuje nad 500 MPa. Využívají se zejména k výrobě plechů a výlisků. Mají nižší korozní odolnost, proto je nutné duralové plechy plátovat čistým hliníkem. [9], [21]

Slitinami, které nacházejí uplatnění v leteckém průmyslu, jsou Al-Li. Mají nižší hmotnost a vyšší modul pružnosti v tahu než klasické slitiny hliníku. Do většiny těchto slitin se přidává zirkon, který zvyšuje pevnost i houževnatost. Nevýhodou lithia je jeho vysoká reaktivnost a tím schopnost oxidovat na vzduchu. Z tohoto důvodu dochází ke zhoršeným podmínkám při tavení a odlévání. [9], [21]

2.4 Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny se oproti slitinám ke tváření vyznačují vyšším obsahem přísadových prvků a výskytu eutektika ve struktuře. Slitina s vyšším podílem eutektika má lepší slévárenské vlastnosti. Lze tak odlévat tvarově složité a tenkostěnné odlitky. Plasticitu slitin zhoršují intermetalické fáze, proto je nutné zjemnit strukturu rychlým tuhnutím nebo očkovaním před litím. Na rozdíl od slitin k tváření mají tyto slitiny nižší mechanické vlastnosti, které souvisí nejen s druhem slitiny, ale i způsobem odlévání. Hrubá struktura s nižší pevností se dosáhne při lití do písku. Při lití do kovových forem nebo litím pod tlakem se vytváří jemnější struktura s lepšími vlastnostmi. [9], [17], [21], [22]

Hlavní přísadové prvky definují slitinám hliníku jejich vlastnosti a hned po hliníku bývá jejich obsah druhý nejvyšší. Hlavními přísadami ve slévárenských slitinách hliníku jsou křemík, měď, hořčík, a výjimečně i zinek. Slitiny je možné rozdělit podle hlavního přísadového prvku. V případě křemíku se jedná o siluminy, u mědi o duralaluminia, u hořčíku o hydronalia a slitiny se zinkem se nazývají unifonty či zinkové siluminy. [1], [7], [19]

Slitiny dále obsahují i další prvky, které jsou záměrně přidávané do slitin, aby zlepšovaly některé vlastnosti, případně kompenzovaly vliv doprovodných prvků. Nazývají se vedlejší přísadové prvky a jejich obsah bývá nižší, než obsah hlavního přísadového prvku. Mohou také rozdělovat slitiny do podskupin, např. slitiny Al-Si se dále mohou dělit na Al-Si-Mg, Al-Si-Cu apod. [1], [23], [27]

Prvky, které se do slitiny nepřidávají záměrně, se označují doprovodné. Mají negativní vliv na mechanické, chemické i technologické vlastnosti. Jejich obsah je omezen do maximálního přípustného obsahu a při překročení se považují za nečistoty. Do slitin se dostávají z vsázky nebo z vyzdívkou během tavení. V některých případech se do slitin přidávají úmyslně prvky, které jsou považovány za nečistotu. Například siluminy pro

tlakové lití obsahují železo. Má negativní vliv na mechanické vlastnosti, ale omezuje sklon odlitků k nalepování na kovové formy. [1], [23], [27]

Výhody slévárenských slitin hliníku oproti slitinám z jiných kovů jsou následující [5]:

- zvyšující se podíl eutektika zlepšuje již tak dobrou slévatelnost,
- nízká teplota tavení,
- dobré povrchové vlastnosti hliníkových odlitků,
- dobrá chemická stabilita (odolnost proti korozi),
- malý interval krystalizace,
- vhodnými technologiemi lze v odlitcích minimalizovat množství vodíku,
- většina slitin má nízkou náchylnost k tvorbě trhlin za tepla.

2.4.1 Slitiny Al-Si

Nejrozšířenější skupinou hliníkových slitin jsou siluminy. Dle normy ČSN EN 1706 se třídí na 29 druhů jednoduchých nebo komplexních slitin tohoto typu. Slitiny Al-Si je možné dělit do tří základních skupin podle obsahu křemíku [1], [7]:

➤ Podeutektické siluminy

- jejich struktura je tvořena sítí primárních dendritů fáze α a eutektikem, vylučující se v mezidendritických prostorech,
- tyto siluminy mají obvykle 7 až 11 % Si, kdy čím vyšší je jeho obsah, tím vyšší je obsah eutektika.

➤ Eutektické siluminy

- strukturu tvoří pouze eutektikum, u modifikovaných slitin se však objevují i jednotlivé krystaly primární fáze,
- obsah křemíku mají přibližně mezi 11,5 až 13 %.

➤ Nadeutektické siluminy

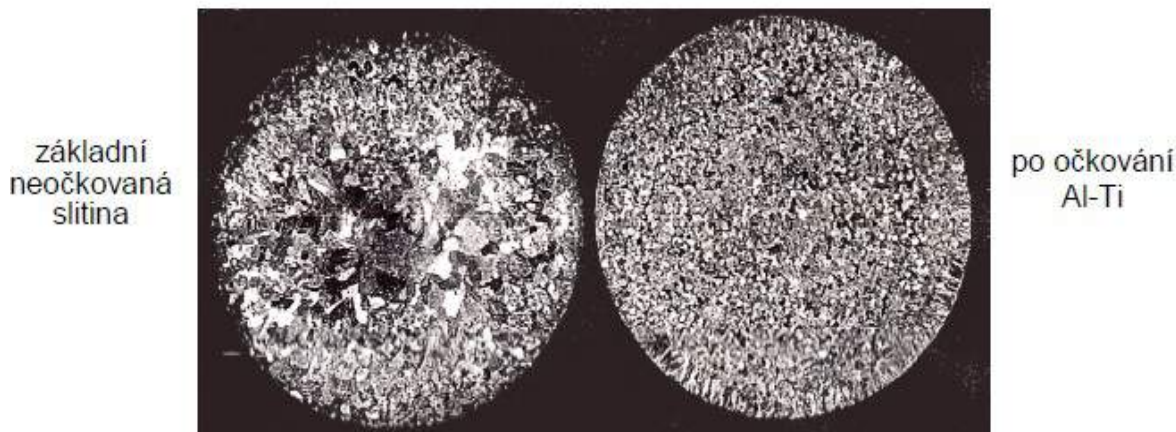
- struktura obsahuje částice primárního křemíku, jehož obsah se ve slitině pohybuje v rozmezí od 14 do 17 % (v některých případech až 25 %).

Očkování siluminů

Očkování je metalurgický proces, pomocí kterého se v kovu navyšuje množství krystalizačních zárodků. Přidává se určitý obsah vhodných látek. Čím vyšší bude počet zárodků, tím víc se struktura zjemní (obr. 8), zvýší se vnitřní homogenita a materiál bude vykazovat lepší mechanické vlastnosti. Nejvíce očkovací účinek ovlivňuje materiál, který zpracováváme. Očkováním se upraví pouze primární dendritická fáze α , proto je výhodné jej aplikovat u podeutektických siluminů (obsah křemíku okolo 5 až 7 %), kde strukturu tvoří převážně primární fáze. [5]

Do taveniny se prvky očkovacího charakteru vnášejí v předslitinách, případně v očkovacích solích (např. K_2TiF_6 , KBF_4). Nejčastěji jsou používány předslitiny, které se snáze dávkuje a po jejich přidání stačí taveninu pouze promíchat. Při aplikaci tablet je navíc nutné z hladiny stáhnout produkty mezi tabletou a taveninou. Z toho důvodu se titan do taveniny přidává ve formě předslitin typu AlTi (např. $AlTi_6$), které obsahují intermetalickou sloučeninu $TiAl_3$. Bór se aplikuje v předslitinách typu AlB (např. AlB_4),

ve kterých je obsažena intermetalická sloučenina AlB_2 . Nejběžnější forma očkování je kombinace obou prvků v předslitinách typu $AlTiB$ (např. $AlTi_5B_1$, $AlTi_5B_{0,2}$), které obsahují intermetalické sloučeniny TiB_2 a $TiAl_3$. Jelikož se sloučenina TiB_2 na rozdíl od sloučenin AlB_2 a $TiAl_3$ v tuhém roztoku hliníku nerozpouští, dochází k částečnému zachování očkovacího účinku i po přetavení. [5]



Obr. 8 Vliv očkování na velikost zrna slitiny $AlSi7$ [1]

Během očkování dochází ke zvýšení chemické a strukturní homogenity slitiny a snížení sklonu k segregacím jednotlivých prvků, což má za následek zlepšení mechanických a technologických vlastností. K dalším výhodám očkování patří [1]:

- nahrazení soustředěných staženin rovnoměrně rozptýlenými mikrostaženinami a ředinami,
- zvýšení pevnosti a tažnosti,
- nižší pórovitost a sklon slitiny ke vzniku trhlin,
- zvýšení těsnosti odlitků,
- lepší obrobitelnost,
- zlepšení kvality povrchu po anodické oxidaci,
- dosažení vyšších mechanických vlastností po tepelném zpracování.

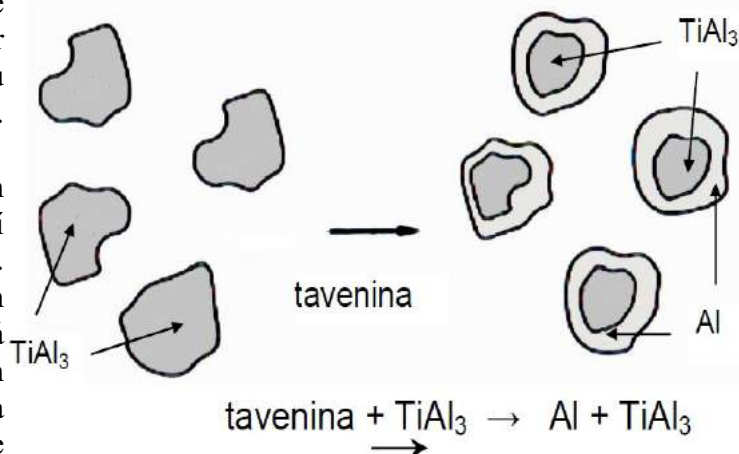
a) Očkování titanem

Očkování pomocí samotného titanu není moc účinné a odvíjí se od množství titanu obsahujícího již ve slitině před očkováním. Dochází k reakci roztaveného hliníku s intermetalickou fází $TiAl_3$ při peritektické teplotě 665 °C (obr. 9). Výsledkem této reakce je primární fáze $\alpha(Al)$. Jelikož mají krystalky $TiAl_3$ podobnou krystalickou mřížku jako hliník (kubickou plošně centrovanou), jsou tyto krystalky vhodné jako zárodky pro jeho růst. Přidá-li se předslitina do hliníkové taveniny, dojde k rozložení části $TiAl_3$ na Al a Ti . Na růstu primární fáze se však podílejí pouze ty krystalky, které se v tavenině nerozpustí. [1], [5]

Roste-li teplota očkování a zároveň se prodlužuje délka výdrže na této teplotě, pak množství nerozpuštěných částic $TiAl_3$ klesá. Očkování titanem se tak využívá u slitin, které již mají vyšší obsah titanu. U těchto slitin se sníží rychlé odeznívání očkovacího účinku, které běžně trvá 30 až 45 minut. Nesmí však dojít k překročení obsahu 0,19 % Ti

v systému Al-Ti. Vyloučené částice $TiAl_3$ by poté měly tvar destiček a na výbrusu budou zobrazeny jako dlouhé jehlice. [1], [5], [24]

U slitin očkovaných titanem se nejčastěji používají předslitiny s obsahem 5 % Ti. V těchto předslutinách se titan vyskytuje jako intermetalická sloučenina $TiAl_3$, která čím jemněji je vyloučena v předslutině, tím jemnější bude výsledná struktura primární fáze. Taveninu lze úspěšně očkovat přidáním 0,02 až 0,1 % Ti. [1]



Obr. 9 Nukleace zárodků $TiAl_3$ při peritektické reakci v systému Al-Ti [1]

b) Očkování bórem

Pohledy autorů nad využitím

samotného bóru jako očkovacího prvku se liší. Dle jednoho názoru se očkování samotným bórem v siluminech dosáhne vůbec nejlepšího zjemňujícího účinku. [5]. Jiní tvrdí, že částice AlB_2 , které spolu bór a hliník v tavenině vytváří, nejsou schopny sloužit jako krystalizační zárodky primární fáze. [1]

Podle prvního názoru působí částice AlB_2 jako krystalizační zárodky. Nicméně problém je s vnášením bóru do kovu. V tavenině se bór při dávkování předslitin typu AlB (např. AlB_4) vyskytuje ve tvaru hrubých částic. Tyto částice se pomalu rozpouští, což může způsobit segregaci fáze AlB_2 a zkomplikovat určení množství bóru k očkování. Používají se proto předslitiny typu SiB , jejichž rozpouštění v tavenině je snazší a lze tak jednodušeji určit množství předslitiny. [5]

Při očkování samotným bórem se musí sledovat obsah titanu ve slitině. V tavenině totiž dochází k reakcím titanu a bóru za vzniku fáze TiB_2 . Tato fáze má však jinou krystalovou mřížku než hliník a nemůže tak pro něj sloužit jako krystalizační zárodek. Jelikož se touto reakcí snižuje obsah bóru v tavenině, klesá i množství vytvořených částic AlB_2 . Ke krystalizaci AlB_2 nakonec dojde až při eutektické přeměně, kdy primární fáze je již vytvořena a očkování na ni nemá efekt. V tavenině je nutné mít okolo 150 ppm bóru (cca 0,2 až 0,4 % AlB_4), aby se dosáhlo úspěšného očkování. [5]

c) Očkování kombinací titanu a bóru

Kvalitního očkovacího účinku se dosahuje použitím předslitin s obsahem Ti a B. Udává se, že účinek očkování slitin hliníku touto formou je lepší než samotným titanem. [1], [5]

Hliník, titan a bór spolu vytvářejí částice AlB_2 , TiB_2 a $(Al, Ti)B_2$. Tyto částice mají velikost okolo 0,5 až 2 μm a jsou tak menší než krystaly $TiAl_3$. Z toho důvodu slouží částice $TiAl_3$ jako krystalizační zárodky a společně mohou vytvářet velké množství zárodků. Primární zrno je tvořeno z TiB_2 a následný obal se vytváří difúzí z $TiAl_3$. [1], [27]

V předslutinách obvykle bývá obsah titanu a bóru v poměru 5:1 (5 % Ti a 1 % B). Bór se v nich váže s částí titanu ve sloučenině TiB_2 a zbylý titan se vyskytuje ve fázi $TiAl_3$.

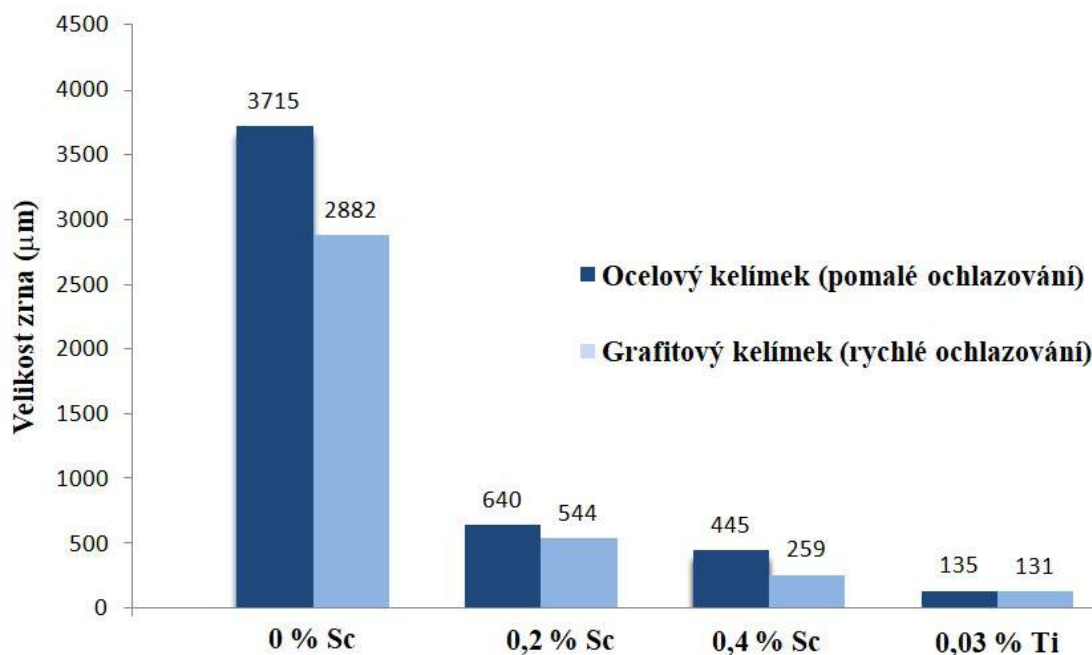
Poté částice TiB_2 slouží společně s nerozpuštěnými krystaly $TiAl_3$ jako krystalizační zárodky. Přidá-li se předslitina $AlTiB$ v množství 0,02 až 0,05 % (což odpovídá asi 0,01 % Ti a 0,003 % B) do taveniny, dosáhne se výrazného zjemňujícího účinku. Dávkování předslitiny by nemělo překročit hranici 0,1 %, protože se poté už primární zrna výrazně nezjemňují. Nemělo by docházet k přeočkování slitiny, protože při obsahu bóru nad 0,004 % dojde k jeho segregaci a vytvářejí se shluky tvrdých boridů, což zhoršuje práci při obrábění. [1], [5]

K vytvoření dostatečného množství zárodků se tavenina nechává na očkovací teplotě 5 až 10 minut. Nemělo by se s očkovací teplotou překročit cca 750 °C, vznikaly by oblasti s vysokou koncentrací TiB_2 , což má za následek zhrubnutí struktury. Vyšší obsah křemíku ve slitině má za následek snížení očkovacího účinku a nutnost zvýšení dávkování předslitiny. Ve slitinách je rovněž důležité množství titanu před očkováním. Titan ovlivňuje očkovací účinek, a proto by se jeho obsah měl pohybovat v rozmezí 0,1 až 0,2 %. Přidáním předslitiny do taveniny dojde k přiblížení obsahu titanu na hodnotu peritektické koncentrace (0,19 % Ti) a v důsledku toho se rozpouští méně $TaAl_3$. Do taveniny se částice $TiAl_3$ dostanou v předslitině společně s TiB_2 a dojde k zesílení očkovacího účinku. Očkovací účinek odeznívá pomaleji než v případě použití samotného titanu. U slitin s vyšším obsahem křemíku (např. $AlSi9Cu3$, $AlSi11$) účinek klesá teprve po 30 minutách. [5]

d) Očkování jinými prvky

Kromě běžných způsobů je možné slitiny hliníku očkovat také dalšími prvky, které se vyznačují očkovacím účinkem [5], [24], [28], [29], [30]:

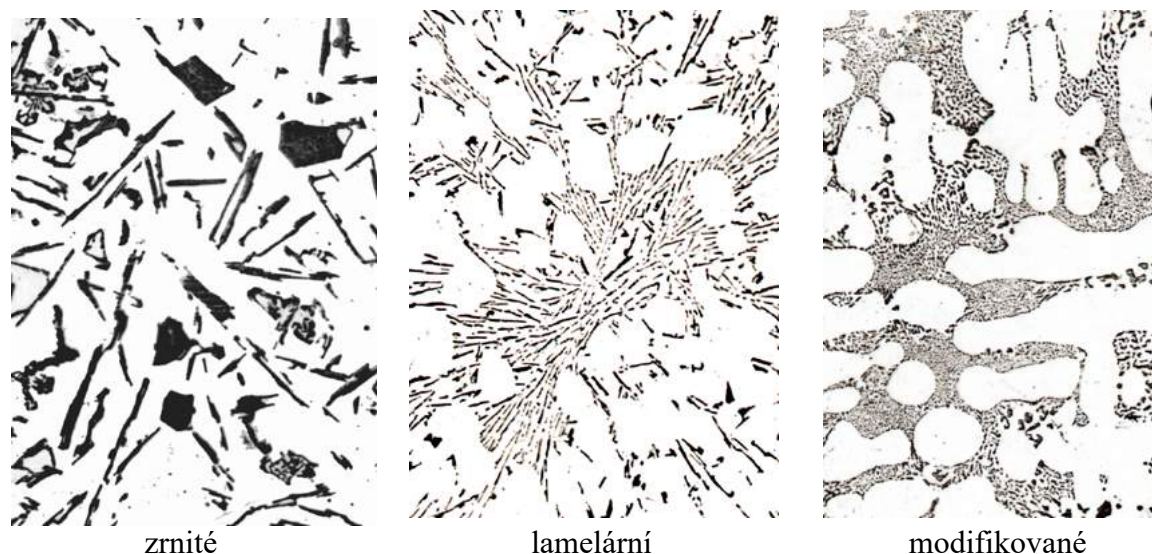
- Fosfor – využívá se pro zjemnění primárního křemíku u siluminů s nadeutektickým složením. Přidává se ve formě očkovacích solí (např. PCl_5), předslutin CuP_{10} či Ni-P. Společně s hliníkem vytváří zárodky (fosfid hlinitý AlP), které jsou určeny ke krystalizaci primárního křemíku. Stejně jako antimon ruší fosfor modifikační účinky sodíku a stroncia.
- Zirkon – očkovacího účinku se dosáhne přidáním 0,05 až 0,15 % tohoto prvku. Ve slitinách, které obsahují větší množství zirkonu a jsou očkovány titanem či kombinací titanu a bóru, dochází ke zhrubnutí zrna. Dojde k vzájemnému vyrušení očkovacích účinků.
- Vanad – je-li přidán vanad v rozsahu 0,05 až 0,015 %, dochází ve slitině ke změně kulminární dendritické struktury na buněčnou rovnosou.
- Skandium – aby se dosáhlo stejného očkovacího účinku jako v případě titanu či kombinací titanu a bóru, je nutné jej dávkovat až 10x více. Uplatnění nachází především při očkování slitin hliníku pro tváření. Slévárenské slitiny mají vyšší obsah příměsových prvků a tvoří tak se skandiem komplexní sloučeniny, které nejsou vhodné jako krystalizační zárodky. Graf 3 uvádí účinnost skandia a titanu na velikosti zrn slitiny typu $AlSiMg$. Z výsledků lze vidět, že účinnost skandia je nižší než u titanu.

Graf 3 Srovnání velikost zrn α -fáze při očkování skandiem a titanem [28]

Morfologie eutektika ve slitinách Al-Si

V siluminech se křemík vyloučí jako čistý prvek s minimálním obsahem jiných příměsí. Částice eutektického křemíku mohou mít velikost od několika mikrometrů až milimetrů v závislosti na chemickém složení slitiny. Ke krystalizaci se využívají heterogenní zárodky založené na bázi fosforu. Fosfor není do taveniny záměrně přidáván, ale dostane se do ní z vsázky, z vyzdívek pecí nebo používaných rafinačních solí. Obsah fosforu řádově v jednotkách ppm je dostačující, aby mohl vykonávat funkci zárodků. Strukturu eutektika slitin Al-Si lze rozdělit do tří základních druhů (obr. 10). Podle tvaru vyloučeného křemíku se rozlišují na [1], [16]:

- **Zrnité eutektikum** – běžně se vyskytující eutektikum u slitin technické čistoty, ve kterých je obsah fosforu 5 až 10 ppm. Na výbrusu se tento typ eutektika vyskytuje jako větší ostrohranné lamelární zrna. Z hlediska energetické náročnosti není krystalizace zrnitého eutektika náročná a vzniká již při nízkém přechlazení (cca 1 až 2 K).
- **Lamelární eutektikum** – vytváří se v čisté slitině, která má nízký obsah sodíku a fosforu pod 1 až 2 ppm. Ke krystalizaci lamelárního eutektika dochází při větším přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou (cca 2 až 5 K). Křemík se vyloučí v podobě jemných lamel, které jsou uspořádány těsně vedle sebe. Vyskytuje se také ve slitině modifikované arsenem, antimonem, selenem či kadmíem.
- **Modifikované eutektikum** – za použití modifikačních prvků, jako je především sodík a stroncium, vzniká ve slitinách tento typ eutektika. V modifikovaném eutektiku mají částice křemíku tvar jemných vláken, na metalografickém výbrusu mají tvar teček. Slitiny s touto formou eutektika se vyznačují zvýšenými mechanickými hodnotami (zejména tažností).



Obr. 10 Struktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si [1]

Modifikace slitin Al-Si

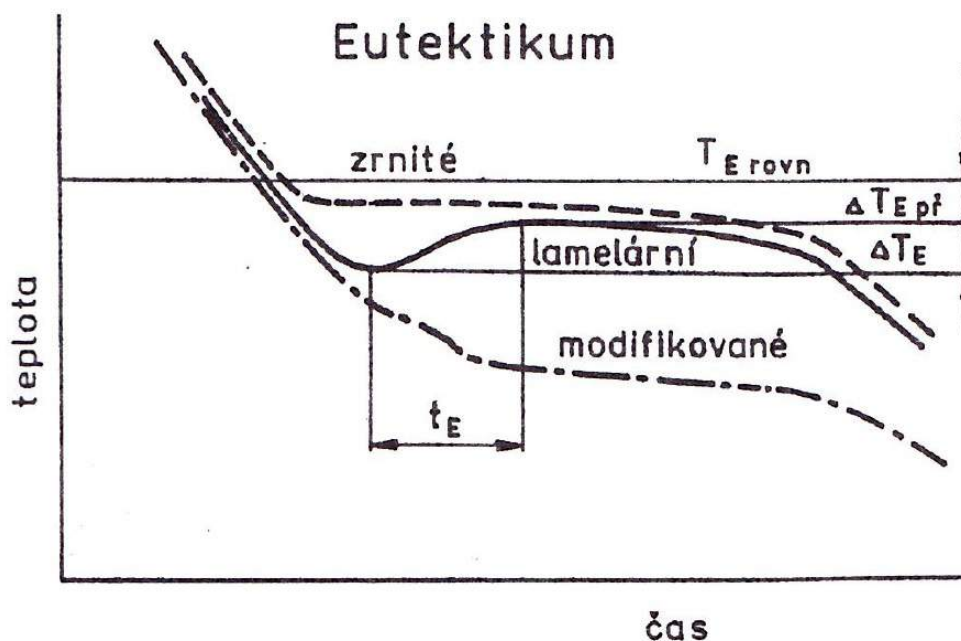
Pro modifikaci slitin Al-Si se převážně používá sodík a stroncium, případně i antimon. Modifikací lze zvýšit pevnostní a zejména plastické vlastnosti jako je tažnost a houževnatost. U modifikovaných slitin může být tažnost až o 6 % rozdílná od původní slitiny. Během modifikace také dochází ke klesání eutektické teploty na asi 564 °C a posunu eutektické koncentrace křemíku na cca 14 % Si. U slitin s obsahem křemíku nižším než 5 % nemá modifikování smysl. [1], [5], [9], [27]

Modifikační účinek ruší fosfor, proto je z velké části ovlivněn jeho množstvím ve slitině. Na kritický obsah fosforu má vliv rychlost ochlazování, tzn., že při daném obsahu fosforu se v místech s tlustší stěnou odlitku objevují oblasti s nemodifikovaným křemíkem a naopak tenké stěny jsou namodifikovány dobře. V běžných slitinách Al-Si se množství fosforu pohybuje v rozmezí od 0,0012 do 0,0015 %. K jeho zvýšení může dojít, např. je-li hliník taven v litinových kelímcích nebo použitím většího množství vratného materiálu do vsázky. Ve vratném materiálu zůstává fosfor i po přetavení slitiny, jelikož nedochází k jeho propalu. [24]

Obsah modifikačních prvků je nutné ve slitině navýšit, pokud se v ní vyskytuje větší množství fosforu. V případě, že množství modifikačního prvku překročí mezní hranici (např. u sodíku nad 180 až 200 ppm), dojde k „přemodifikování“ slitiny. Přemodifikovaná struktura se vyznačuje vyloučenými hrubými útvary křemíku na hranicích zrn, což má negativní vliv na mechanické vlastnosti (zejména na tažnost) dané slitiny. [1]

Ke kontrole efektu modifikace lze využít mnoho způsobů. Stanovit množství modifikačního prvku lze pomocí chemického rozboru na spektrometru. Rozhodující vliv na úspěšnou modifikaci má zejména dosažená struktura eutektika, proto samotné množství modifikačního prvku ještě nevypovídá o dobré modifikaci. Eutektickou strukturu můžeme nejlépe zhodnotit pozorováním metalografických výbrusů. Tato metoda je však zdoluhavá. Častěji se ve slévárnách používá rychlejší zkouška, během které se pozorují křivky chladnutí získané z termické analýzy. Během zkoušky se porovnává křivka chladnutí u nemodifikované slitiny s výsledky z termické analýzy. Podle výsledků se určí, do jakého rozsahu je eutektikum modifikováno. U slitin komerční čistoty je častým typem zrnité eutektikum. Utváří se při podchlazení o 1 až 2 K pod rovnovážnou eutektickou teplotou při

minimální rekalescenci. Eutektikum lamelárního typu vzniká při podchlazení o 2 až 4 K s výraznější rekalescencí. Eutektická teplota se u slitin, které jsou modifikovány sodíkem, snižuje až o 10 K (při použití stroncia dochází k nižšímu poklesu). Na obr. 11 jsou uvedeny jednotlivé křivky chladnutí v oblasti eutektika. [1]



Obr. 11 Křivky ochlazování v oblasti eutektika [1]

Na účinnost modifikace má výrazný vliv rychlost ochlazování. U tlakově litých tenkostěnných odlitků se struktury v modifikovaném či nemodifikovaném stavu výrazně neliší. Naopak velkého modifikačního účinku se dosáhne v tlustostěnných odlitcích litých do pískových forem. Na vlastnosti slitin Al-Si má modifikace tyto vlivy [1]:

- výrazné zvýšení tažnosti (zvláště v kombinaci s tepelným zpracováním),
- mírné zvýšení pevnosti v tahu (u pomalu chladnoucích odlitků pevnost naopak mírně klesá),
- zvýšení houževnatosti a rázové pevnosti,
- zhoršení vnitřní homogenity (zvláště u pomalu chladnoucích odlitků),
- mírné zhoršení zabíhavosti,
- snížení sklonu ke vzniku trhlin a soustředěných staženin,
- částečné snížení negativního vlivu mikroporozity.

a) Modifikace sodíkem

Nejsilnějším modifikačním prvkem, jehož účinek je spolehlivý i při pomalém ochlazování, je sodík. Chceme-li ve slitině získat zcela modifikovanou strukturu, musí obsahovat zhruba 50 až 100 ppm tohoto prvku. Využití sodíku se však pohybuje jen okolo 10 až 20 % a s vyšší teplotou taveniny jeho využitelnost dále klesá. K náběhu účinku dochází během prvních dvou minut. [1], [5], [16], [27]

Různé druhy modifikačních přípravků obsahujících sodík [1], [5], [7], [9], [27]:

- Kovový sodík – jelikož má sodík vysokou reaktivnost, používá se převážně jen ve vakuovaných patronách (obal z hliníkového plechu). Pomocí zvonu se vkládají ke dnu lázně, kde se rychle roztaví. Patrony chemicky nevnaší do taveniny žádné cizí prvky. Dávkování sodíku bývá obvykle od 0,05 do 0,1 %.
- Modifikační soli – směsi chloridů a fluoridů (např. NaCl+KCl+NaF – tzv. sůl T3, doba účinnosti 10÷15 min.). Tyto směsi se nejčastěji aplikují ve formě tablet, případně také v práškové podobě. Ponoří se zvonem ke dnu lázně, která se po odeznění reakce zamíchá (na hladinu vyplavou produkty reakce, které se poté stáhnou). Taveninu je možné po 5 až 10 minutách odlévat. Při modifikaci tímto způsobem se dávkuje přibližně asi 0,8 až 1,0 % soli na hmotnost taveniny.
- Exotermické modifikační tablety – vlivem exotermického efektu se z tablet uvolňuje sodík ve formě par. V tavenině zůstane max. asi 30 % sodíku, zbytek vyhořívá na hladině. Při lití do kokil se dávkuje množství 0,02÷0,12 %, v případě lití do písku 0,1÷0,2 %. V dnešní době se jedná o nejpoužívanější modifikační přípravky.

Nevýhody sodíku jako modifikátor ve slitinách Al-Si [5], [27]:

- zvyšuje naplynění,
- rozšiřuje interval tuhnutí slitiny, což zvětšuje její sklon k tvorbě rozptýlených mikrostaženin,
- krátkodobá účinnost,
- negativní vliv na zabíhavost,
- sodík má nízkou hustotu ($970 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), což způsobuje jeho rychlý propal, kdy určitá část ponořeného množství ihned vyplave na hladinu a shoří.

Po konci modifikace se sodík vypaří z hladiny taveniny a jeho obsah v lázni klesá. Modifikační účinek postupně slábne, až dojde k jeho zániku. Tento proces se nazývá odeznívání modifikace, během kterého se struktura slitin zpětně vrací do stavu před modifikací. Modifikační účinek sodíku bývá obvykle 15 až 20 minut (max. 30 minut). Do této doby je nutné kov odlít, při delší prodlevě by se musela tavenina domodifikovat. [1], [5], [7], [16]

Vzhledem k vysoké afinitě sodíku a flóru, musí být modifikace provedena až po rafinaci. Rafinační soli obsahující chlór a flór by se sodíkem vytvořily modifikačně neaktivní sloučeniny. Také odplynění taveniny by mělo předcházet modifikaci, protože sodík proniká do bublin probublávaného plynu a uniká s nimi z taveniny. Vzhledem k nevýhodám sodíku je snaha hledat jinou alternativu. V současné době se tak sodík nahrazuje stronciem. [1], [5], [7], [16]

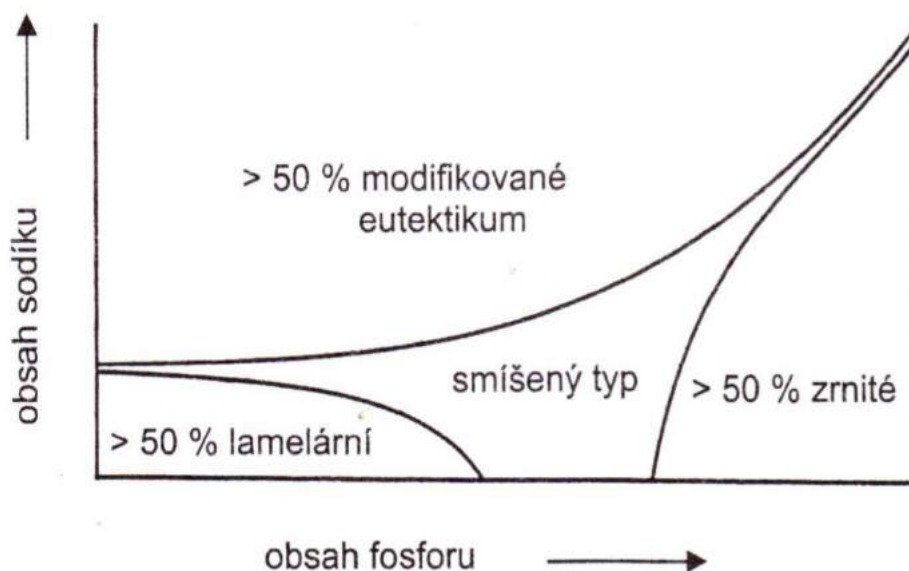
b) Modifikace stronciem

Stroncium je častý modifikátor používaný u podeutektických a eutektických siluminů. Oproti sodíku je stroncium méně reaktivní prvek s vysokým a stabilním využitím (až 90 %). Používá se jako předslitina s hliníkem, ve kterých obsah stroncia bývá v rozmezí od 3,5 do 10 %. Strukturu předslitin tvoří čistý hliník a intermetalická fáze Al₄Sr. Dalším typem používaných předslitin jsou AlSr₁₀Si₁₆ a AlSr₁₀Si₁₄, které se vyznačují poloviční rychlostí rozpouštění. [1], [5], [7], [16], [27]

Jednotlivé předslitiny se nejčastěji dodávají jako tyče s průměrem okolo 10 mm a délce asi 500 mm. Předslitiny stroncia se dávkuje na základě stanovení počtu tyčí na danou hmotnost taveniny. Pohyb taveniny (např. indukčním mícháním) zapříčiňuje rychlý náběh modifikačního účinku. Odezívání je pomalé a dostatečný účinek modifikace trvá 3 až 6 hodin. Přidáním 0,05 až 0,2 % beryllia do taveniny se dosáhne prodloužení modifikačního účinku až na 10 hodin. [1], [5], [16]

Aby se dosáhlo dostatečného modifikačního účinku, je nutné u podeutektických slitin dávkovat 150 až 200 ppm stroncia a u eutektických slitin až 400 ppm stroncia. I v případě takového dávkování jsou modifikační účinky stroncia slabší než u sodíku. Modifikaci stronciem je tak vhodné volit u tenkostěnných odlitků nebo při lití do kovových forem [1], [5], [27]

Množství nečistot v tavenině ovlivňuje účinek stroncia. Je-li ve slitině obsah fosforu v řádu desítek ppm, dochází k rušení modifikačního účinku stroncia a k navyšování spotřeb modifikačního přípravku (obr. 12) ve snaze zachovat modifikovanou strukturu. Obdobně jako u sodíku, lze modifikaci zrušit použitím přípravků obsahujících chlor či fluor. [1], [7], [27]



Obr. 12 Závislost struktury eutektika na obsahu P a Na (podobné pro Sr) [1]

c) Modifikace antimonem

Princip modifikace slitin Al-Si antimonem není stejný jako u sodíku a stroncia. Jeho vlivem se tvoří pouze struktura s jemným, lamelárním křemíkem. K usnadnění práce slévárnám se přidává antimon do siluminů již v hutích v množství 0,1 až 0,3 %. Účinek antimonu je trvalý, ale zároveň ruší účinky sodíku a stroncia. Nemělo by tak docházet ke kombinaci těchto modifikačních prvků (vznikají krystalizačně neaktivní sloučeniny). V ČR se modifikace siluminů pomocí antimonu nepoužívá. [1], [16]

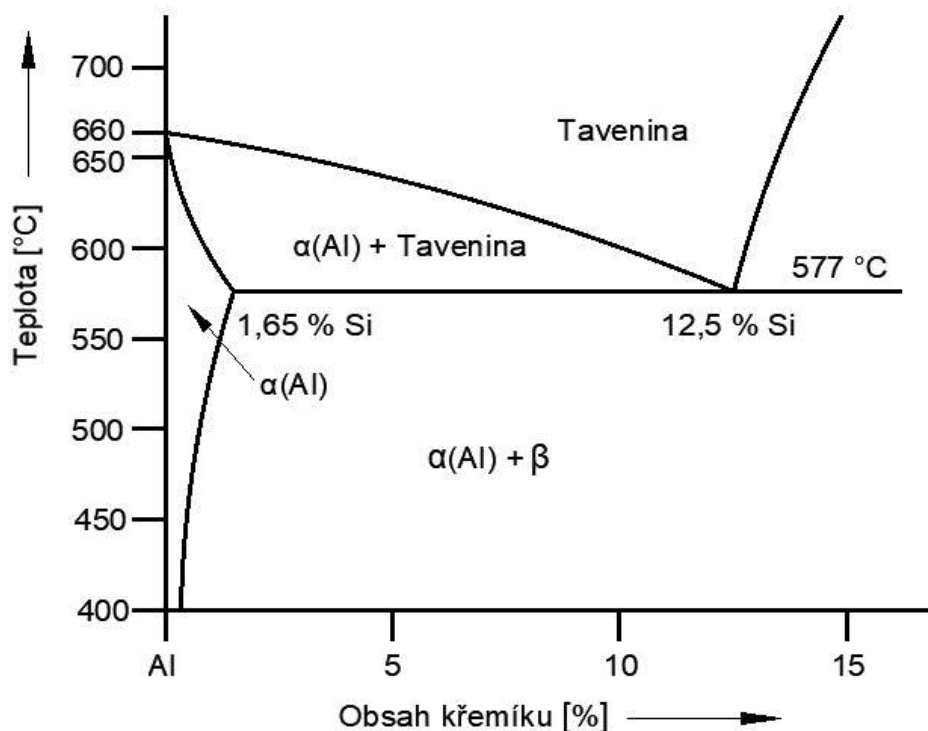
d) Modifikace jinými prvky

Modifikačního účinku lze ve slitinách Al-Si dosáhnout i dalšími méně využívanými prvky [5], [31]:

- Telur – není vhodný u slitin, ve kterých se obsah křemíku pohybuje nad 13 %. V těchto slitinách již nedojde ke zvýšení mechanických vlastností. Trvalého modifikačního účinku se dosáhne v množství 0,04 až 0,4 %.
- Barium – účinek obdobný jako u stroncia. Stejně jako u stroncia lze modifikační účinek prodloužit přidáním beryllia.
- Vápník – má negativní vliv v tavenině, která je modifikována sodíkem nebo stronciem (vznikají hrubé částice eutektického křemíku a struktura pak vypadá jako přemodifikovaná). Obsah vápníku by tak neměl překročit 0,001 %.
- Skandium – v běžném slévárenském provozu se nepoužívá. Jedinou vlastností skandia je, že i při nízkém obsahu má, jako dosud jediný zjištěný prvek, modifikační i očukující účinek.
- Síra – k dosažení příznivého efektu na eutektikum by obsah síry měl být do 0,01 %.

Slitiny typu Al-Si

Eutektický bod slitin Al-Si se nachází při teplotě 577 °C a koncentraci křemíku 12,5 % (některé zdroje uvádí koncentraci jen 11,7 %). Rovnovázný diagram Al-Si je uveden na obr. 13. Rozpustnost křemíku v hliníku je při eutektické teplotě jen 1,65 % a s klesající teplotou se dále snižuje, kdy za teplot okolo 200 °C činí asi 0,05 %. Ve slévárenských slitinách se vždy vyskytuje eutektikum $\alpha(\text{Al})$ -Si, jelikož množství křemíku je vyšší než jeho maximální rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. [1], [7], [16], [24], [32]



Obr. 13 Rovnovázný diagram Al-Si [1]

Binární siluminy jsou využívány z důvodu dobrých slévárenských vlastností, svařitelnosti, odolnosti proti korozi. Příklady odlitků z typického binárního siluminu AlSi11 jsou uvedeny na obr. 14. Odlitky se vyznačují dobrou těsností vůči plynům a kapalinám. Obsah křemíku se nejčastěji pohybuje od 10 do 13 %, kdy interval tuhnutí se s rostoucím množstvím až do eutektického obsahu zmenšuje. Slitina má tak lepší zabíhavost či sklon k tvorbě staženin. Obrobitelnost těchto siluminů je střední, ale lze ji modifikací částečně vylepšit. Charakteristika vybrané slitiny AlSi12 je uvedena v tab. 5. [1], [5], [7], [19], [27]

Tab. 5 Využití a základní vlastnosti slitiny AlSi12 [1], [7], [19].

Slitina	Vlastnosti	Použití
AlSi12	Eutektická slitina se vyznačuje výbornými slévárenskými i technologickými vlastnostmi. Má výbornou odolnost proti korozi, dobrou obrobitelnost a střední pevnost.	Pro tenkostěnné, nepropustné odlitky. Výrobky mají dobrou houževnatost a odolnost proti korozi. Např. odlitky lopatek, žebrovaných těles, tělesa pump.



Obr. 14 Odlitky ze slitin typu AlSi11 [33]

Slitiny typu Al-Si-Cu

Řadí se mezi nejpoužívanější typy hliníkových slitin, kdy tvoří až polovinu celkové výroby odlitků ze slitin hliníku. Jsou to slitiny podeutektické (případně až eutektické) s obsahem 6 až 13 % Si a 1 až 5 % Cu. V odlitcích dochází vlivem přítomnosti mědi či zinku k samovolnému vytvrzování, které trvá až několik dnů. Při rychlém ochlazení odlitku během tuhnutí vznikne více přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. Po jeho rozpadu vznikají precipitáty a dojde ke zpevnění struktury. [1], [9]

Měď má výrazný vliv na vlastnosti slitin. Zlepšuje obrobitelnost, nepropustnost odlitků, zmenšuje stahování kovu při tuhnutí a naplynění taveniny. Při obsahu nad asi 2 % Cu se zhoršuje korozní odolnost v atmosférických podmínkách a je nutné použít některý způsob povrchové ochrany. Odolnost proti korozi je možno zvýšit i aplikací stříbra jako legujícího prvku. Zvýšený obsah křemíku zlepšuje u slitin zabíhavost. V litém stavu mají tyto slitiny vyšší pevnost a tvrdost, ale nižší plastické vlastnosti než slitiny Al-Si. [1], [27], [32]

Hlavní oblast použití tohoto typu materiálu je automobilový průmysl. Typickou slitinou je AlSi9Cu3, která nachází uplatnění u tlakově litých odlitků, např. bloky motorů, skříně převodovek atd. Tab. 6 ukazuje vybrané slitiny Al-Si-Cu s jejich základní charakteristikou a oblastí použití. Odlitky složitých tvarů lze odlévat tlakovým litím či gravitačně do kovových forem. Slitina s nízkým obsahem křemíku je vhodná pro jednoduché tlustostěnné odlitky. Naopak s vyšším obsahem křemíku se hodí pro složité a více namáhané odlitky. Pro výrobu pístů spalovacích motorů případně bloků motorů se využívají nadeutektické slitiny. Jejich obsah bývá okolo 14 až 17 % Si, 4 % Cu, 0,5 % Mg a max. 2 % Ni. Mezi komplexní slitiny se řadí slitina AlSi12CuNiMg, která má dobré kluzné vlastnosti a udržuje si pevnostní vlastnosti za zvýšených teplot. Odlitky této slitiny jsou uvedeny na obr. 15. [1], [7], [9], [24]

Tab. 6 Využití a základní charakteristika některých slitin typu Al-Si-Cu [1].

Slitina	Vlastnosti	Použití
AlSi5Cu	Dobrá obrobiteľnosť a pevnosť za vyšších teplot. Pri normálnej teplote je pevnosť nižšia a korozivzdornosť špatná. Vhodná pre prácu v suchom alebo masťnom prostredí.	Odlitky do osobných automobilů, např. hlavy válců. Strojní díly a součásti pracující za zvýšených teplot.
AlSi9Cu	Řadí se mezi nejpoužívanější slitiny. Dobrá obrobiteľnosť, střední mechanické vlastnosti a korozivzdornosť, za vyšších teplot dobrá pevnosť. Oproti slitině AlSi5Cu má nižší sklon ke vzniku trhlin.	Automobilové odlitky - víka, skříně, bloky, hlavy válců. Komponenty elektromotorů a domácích spotřebičů. Vhodná pro tvarově komplikované a tenkostěnné odlitky.



Obr. 15 Odlitky ze slitiny AlSi12CuNiMg [33]

Slitiny typu Al-Si-Mg

Množství hořčíku se ve slitinách Al-Si-Mg pohybuje od 0,3 až do 0,7 %. Hořčík umožňuje vytvrzovat tento typ slitin za tepla. Vytvrzováním se zvyšují mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost), které v litém stavu dosahují průměrných hodnot. Na druhou stranu mají slitiny po vytvrzování nižší tažnost než v litém stavu. V důsledku zvýšení tvrdosti matrice má hořčík pozitivní vliv i na obrobiteľnost. Je-li slitina obohacena titanem, jak je tomu u typu AlSi7MgTi, může se pevnost v tahu pohybovat až okolo 300 MPa. [1], [5], [16], [24], [27]

Slitiny mají podeutektické složení. Podle obsahu křemíku se rozlišují do dvou skupin na AlSi7Mg a AlSi10Mg. Vyšší obsah křemíku ve slitinách zlepšuje slévárenské vlastnosti a svařitelnost. Slitiny je možné odlévat gravitačně do pískových či kovových forem nebo pod tlakem. [1], [7], [27]

Odlitky z těchto slitin jsou často využívány pro svoje dobré slévárenské vlastnosti. Uplatnění nacházejí u vysoce namáhaných komponentů v leteckém či automobilním průmyslu (obr. 16). V tab. 7 jsou uvedeny vybrané slitiny typu Al-Si-Mg a vypsána jejich charakteristika a oblast použití. [1], [19]

Tab. 7 Využití a základní vlastnosti některých slitin typu Al-Si-Mg [1].

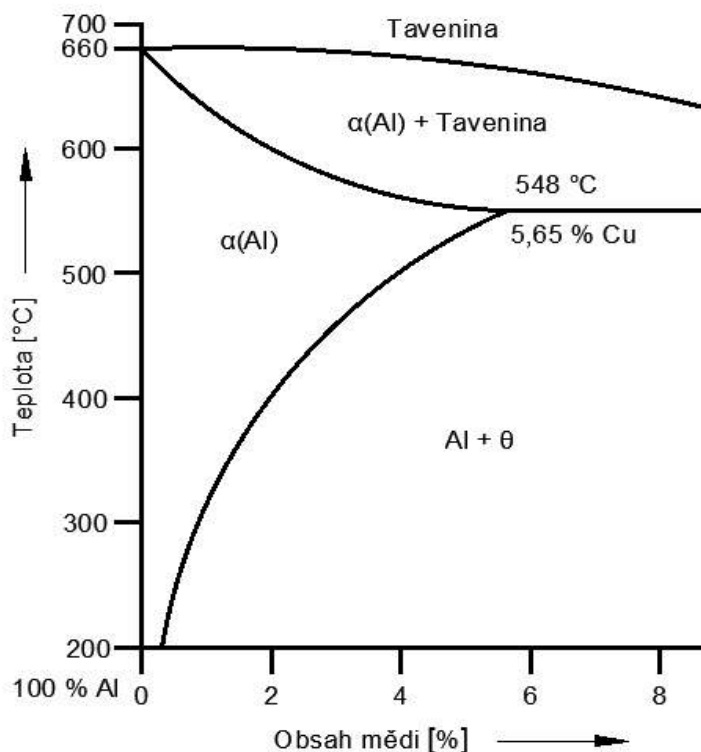
Slitina	Vlastnosti	Použití
AlSi7Mg0,3	Slitina s vysokou pevností, dobrou odolností proti korozi, svařitelností a obrobiteľností. Označuje se dobrou tažností, houževnatostí a slévárenskými vlastnostmi.	Odlitky pro letecký, raketový a automobilní průmysl.
AlSi7Mg0,6	Nejvyšší mechanické vlastnosti ze slitin Al-Si. Slitina má špatnou obrobiteľnost, ale dobrou odolnost proti vzniku trhlin a nepropustnost.	Odlitky s vyššími nároky na pevnost a houževnatost v leteckém či automobilovém průmyslu. Vysokorychlostní dmychadla, ventilátory.
AlSi10Mg	Slitina s dobrou obrobiteľností a odolností proti korozi. Výborné slévárenské a technologické vlastnosti.	Odlitky s tvarově složitým, tenkostěnným tvarem a nároky na vyšší pevnost a houževnatost. Komponenty motorů, hlavy válců, brzdové čelisti, klikové skříně.



Obr. 16 Odlitky ze slitin typu AlSi7Mg0,3 [33]

2.4.2 Slitiny Al-Cu

Mezi nejstarší typy hliníkových slitin se řadí slitiny Al-Cu. Měď a hliník společně tvoří slitiny s omezenou rozpustností v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ a s eutektikem, které se skládá z fázi $\alpha(\text{Al})$ a intermetalické fáze Al_2Cu , označované jako fáze θ . Eutektický systém hliníku s mědí tvoří eutektická teplota $548\text{ }^\circ\text{C}$ a eutektický obsah $33,2\text{ } \%$ Cu. Rovnovážený diagram Al-Cu je uveden na obr. 17. Slévárenské slitiny Al-Cu obsahují až $12\text{ } \%$ mědi. Při eutektické teplotě má měď v hliníku rozpustnost okolo $5,7\text{ } \%$ a se snižující teplotou klesá. Klesající rozpustnost mědi umožňuje vytvrzovat slitiny za tepla, případně za studena. V technické praxi nemají slitiny s obsahem mědi vyšším, než je jeho maximální rozpustnost v hliníku význam, proto se obsah mědi pohybuje od 4 do $5\text{ } \%$. [1], [7], [19], [21], [34]



Obr. 17 Rovnovážený diagram Al-Cu [1], [25]

Vliv přísadových prvků v normalizovaných slitinách Al-Cu [1], [16], [19]:

- **Titan** – zjemnění primárního zrna při obsahu okolo $0,3\text{ } \%$ Ti,
- **Hořčík** – zvýšení pevnosti slitin při obsahu do $0,35\text{ } \%$ Mg,
- **Mangan** – max. obsah do $0,5\text{ } \%$ Mn,
- **Nikl** – slitiny s obsahem $2\text{ } \%$ Ni a $1,5\text{ } \%$ Mg jsou vhodné při použití za vyšších teplot. Během vytvrzování vznikne precipitát fáze NiAl_3 , slitiny poté mají lepší pevnost a tvrdost za zvýšených teplot.
- **Stříbro** – obsah $0,4$ až $1\text{ } \%$ Ag zaručuje po vytvrzení vysoké mechanické vlastnosti za normálních a zvýšených teplot.

Jelikož je možné slévárenské slitiny Al-Cu tepelně zpracovat, charakterizují se vysokou pevností přesahující až 400 MPa . Oproti slitinám Al-Si mají vyšší tažnost, lomovou houževnatost a lepší leštitelnost. Na druhou stranu mají špatnou svařitelnost, odolnost proti korozi a slévárenské vlastnosti. Široký interval tuhnutí způsobuje špatnou zabíhavost a náchylnost k tvorbě trhlin za tepla. Nálitkování těchto slitin je velmi obtížné. Přísadou křemíku lze slévárenské vlastnosti zlepšit, ale s jeho vyšším obsahem klesají mechanické vlastnosti. [1], [9], [16], [17], [21], [24]

Gravitačním litím se slitiny Al-Cu odlévají do kovových, pískových či skořepinových forem. Vlivem špatných slévárenských vlastností mají slitiny náchylnost k praskání

a tvorbě rozptýlených staženin. Částečně lze vlastnosti zlepšit očkovaním ke zjemnění zrna. [1], [19]

Uplatnění nacházejí při výrobě odlitků pístů a hlav válců ve spalovacích motorech pro automobilový případně letecký průmysl, které dlouhodobě pracují za zvýšených teplot. Důsledkem špatných slévárenských vlastností jsou slitiny Al-Cu často nahrazovány slitinami Al-Si. Na obr. 18 jsou uvedeny ukázky odlitků ze slitin typu Al-Cu. [1], [9], [16], [19]



Obr. 18 Příklady odlitků ze slitin typu Al-Cu [33]

2.4.3 Slitiny Al-Mg

Slitiny Al-Mg mají špatné slévárenské vlastnosti, které souvisí s obsahem hořčíku. Ve slévárenských slitinách se obsah hořčíku pohybuje od 3 do 9 %. Čím vyšší je množství hořčíku, tím se dvoufázové pásmo tuhnutí zvětšuje a slévárenské vlastnosti jako zabíhavost, sklon k vzniku rozptýlených staženin a trhlin se zhoršují. Přísadou 0,5 až 2,5 % Si lze mírně tyto negativní vlastnosti zlepšit. Na druhou stranu s množstvím křemíku klesá tažnost a měl by tak být jeho obsah co nejnižší. [1], [9], [16], [32]

Eutektický bod se u těchto slitin nachází při teplotě 450 °C a eutektické koncentraci 34,5 % Mg. Maximální rozpustnost hořčíku v hliníku je při eutektické teplotě 17,4 % a stejně jako u slitin Al-Cu se rozpustnost s klesající teplotou snižuje. Obr. 19 zobrazuje rovnovážný diagram systému Al-Mg. S obsahem přísadových prvků rozpustnost dále klesá. Eutektikum je složeno z fází $\alpha(\text{Al})$ a Al_8Mg_5 , která se označuje fází β . Je-li ve slitině obsah křemíku okolo 1 %, váže se hořčík do sloučeniny Mg_2Si vylučované jako intermetalická fáze. Tato fáze umožňuje slitiny vytvrzovat. Ve většině případů se odlitky využívají tepelně nezpracované. [1], [16], [19], [32]

Kov by se neměl během tavení přehřívat nad teplotu 750 °C. Slitiny jsou náchylné k naplynění, kdy při tuhnutí v odlitcích vznikají bubliny a staženiny, jejichž množství roste se zvyšující se teplotou kovu.

Přísadou asi 10 až 30 ppm beryllia je možné zmírnit sklon k naplynění a současně snížit náchylnost hořčíku k oxidaci, čímž se zlepší zabíhavost a tekutost slitiny. [1], [16], [19]

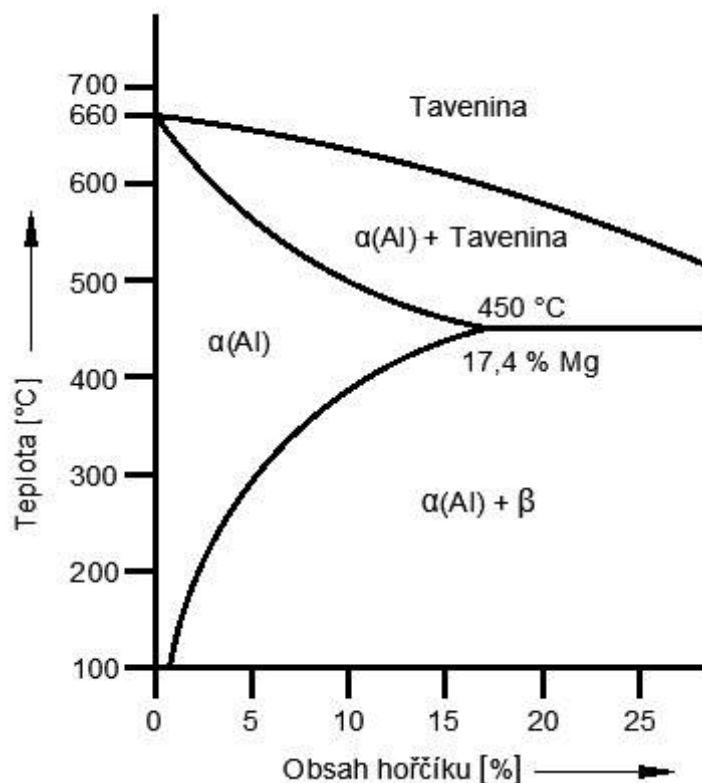
Slévárenské slitiny se dělí podle obsahu hořčíku do tří skupin a to s 3, 5 a 9 % Mg. Do pískových nebo kovových forem se gravitačním litím odlévají slitiny s 3 a 5 % Mg. Odlévá-li se kov do pískových forem, je vhodné, aby se do formovací směsi přidala kyselina boritá a zamezilo se tak reakcí mezi kovem a formou. Naopak slitiny s 9 % Mg jsou v důsledku širšího pásma tuhnutí odlévány tlakovým litím. [1], [16], [21], [24], [34]

Slitiny tohoto typu se vyznačují relativně špatnými mechanickými vlastnostmi, které za teplot vyšších jak 100 °C klesají. S vyšším obsahem hořčíku pevnost roste, ale stále nedosahuje hodnot jako u běžných siluminů. Slitiny Al-Mg se vyznačují vysokou odolností proti korozi v mořské vodě nebo v slabě alkalickém prostředí, výbornou obrobiteľnosť a leštitelností. S vysokým obsahem křemíku však leštitelnost klesá. Eloxováním je možné provést úpravy povrchu odlitku. [1], [16], [19], [21], [34]

Uplatnění těchto slitin není velké a volí se zejména kvůli jejich vynikajícímu vzhledu povrchu a korozní odolnosti. Využívají se tak na středně namáhané odlitky v korozně náročných prostředí, jako jsou lodní díly nebo skříň čerpadel na mořskou vodu (obr. 20). Také pro dekorativní účely ve stavebnictví, v chemickém a potravinářském průmyslu nebo jako ozdobné díly u automobilů. Ve většině jiných případů jsou nahrazovány slitinami Al-Si. [1], [7], [9], [19], [22]



Obr. 20 Skříň čerpadla ze slitiny AlMg5Si [33]



Obr. 19 Rovnovážný diagram Al-Mg [1], [25]

Zajímavou slitinou je AlMg5Si2Mn známá pod názvem Magsimal 59. Stejně jako slitiny Al-Mg má tento materiál dobrou odolnost proti korozi, leštitelnost, obrobitelnost a navíc vyšší pevnost a houževnatost. Slitina je vhodná pro odlitky zhotovených vysokotlakým litím, kdy se u tloušťky stěn od 2 do 4 mm dosáhne pevnosti až 340 MPa a tažnosti do 18 %. Používají se tak pro odlitky do letadel, domácích spotřebičů, chemického a automobilového průmyslu, jako jsou závěsy kol či volanty. Na obr. 21 jsou odlitky ze slitiny AlMg5Si2Mn pro automobilový průmysl. [33]



Obr. 21 Odlitky ze slitiny AlMg5Si2Mn [33]

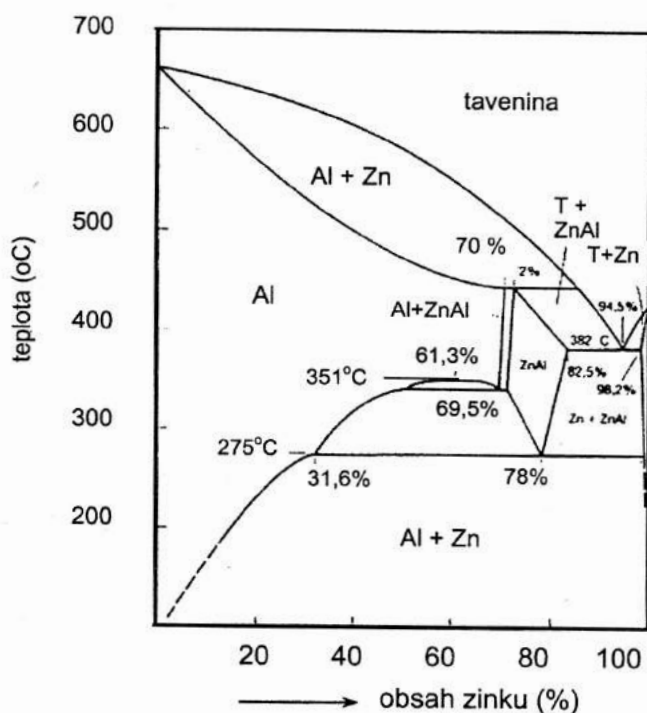
2.4.4 Slitiny Al-Zn

Eutektický bod tohoto systému udává obsah zinku 94,5 % a teplota 382 °C. Za nízkých teplot rozpustnost zinku v $\alpha(\text{Al})$ klesá až na 2 %. Obr. 22 uvádí rovnovážný diagram systému Al-Zn. Při výskytu mědi ve slitině se rozpustnost zinku zvedá na 5,5 %, z tohoto důvodu se v technických slitinách objevuje zinek v tuhém roztoku. Při vysokých teplotách roste rozpustnost zinku v $\alpha(\text{Al})$ až na 70 %. Naopak rozpustnost zinku snižuje hořčík. Společně vytváří intermetalické fáze $\text{MgZn}_2 + \text{Al}_2\text{Zn}_3\text{Mg}_3$, umožňující vytvrzování. Vykytuje-li se ve slitině zároveň i křemík, váže na sebe hořčík a zinek zůstane rozpuštěn v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. [1], [16], [19]

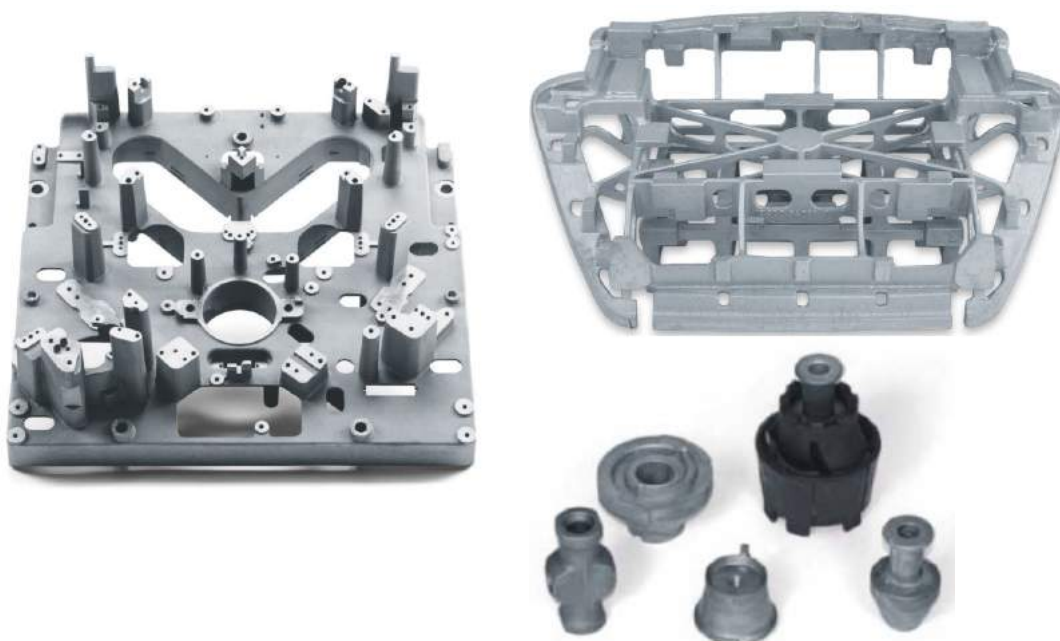
Obsah zinku se ve slitinách pohybuje v rozmezí od 4 do 7 % a obsah hořčíku do 1 %. Samovolně se vytvrzují za studena, kdy pevnost v tahu 250 MPa, tažnost 5 % a tvrdost asi 70 HB je možné dosáhnout po 20 až 30 dnech. Celý proces lze urychlit umělým stárnutím. Nejlepší mechanické hodnoty však dosahují slitiny po tepelném zpracování, které se skládá z žíhání, rychlého ochlazení a umělého stárnutí. Slitiny se vyznačují dobrou obrobitelností, kvalitou povrchu po obrobení, rozměrovou stabilitou. Při použití vhodných legur je možné u slitin Al-Zn dosáhnout pevnost až kolem 500 MPa. Další výhodou je dobrá odolnost proti korozi, avšak pod napětím mají tyto materiály vyšší sklon ke korozi, kterou lze

potlačit přísadou železa. Negativní vlastností slitin Al-Zn je velká náchylnost k praskání za tepla, sklon ke vzniku staženin a horší těsnost odlitků. [1], [7], [9], [19], [24], [34]

Vlivem dobré zabíhavosti jsou tyto slitiny vhodné k výrobě tvarových odlitků. Pod označením EN AC-71100 je v normě ČSN EN 1706 uvedena slitina AlZn10Si8Mg, jejíž odlitky jsou vhodné pro textilní průmysl, domácí spotřebiče a strojírenství (obr. 23). Slitinu je možné gravitačně odlévat do pískových či kovových forem. Výroba těchto slitin se ve velké míře příliš nerozšířila, např. v našich slévárnách se prakticky nepoužívá. [1], [7], [33]



Obr. 22 Rovnovážný diagram Al-Zn [1]



Obr. 23 Odlitky ze slitiny AlZn10Si8Mg [33]

3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Podle normy ČSN 42 0056 jsou odlitky ze slitin hliníku tepelně zpracovány za účelem dosažení požadované struktury a vlastností pomocí jednoho či více žíhacích cyklů. Základní pojmy tepelného zpracování [5]:

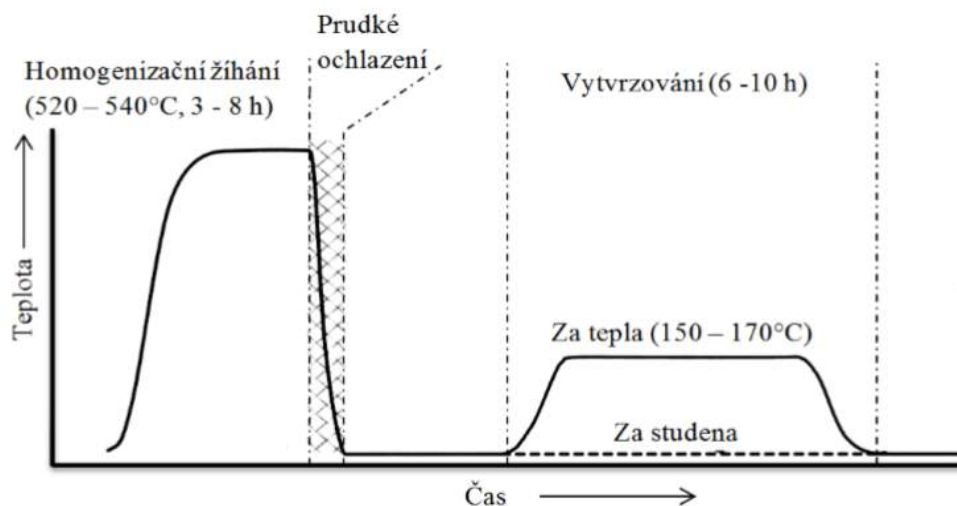
- Žíhací cyklus – teplotní změna výrobku v určitém rozmezí v závislosti na čase,
- Ohřev – proces, při kterém se teplota součásti zvyšuje na hodnotu nezbytnou k dalšímu zpracování,
- Rychlost ohřevu – vzrůst teploty výrobku za jednotku času,
- Ochlazování – snižování teploty součásti na požadovanou hodnotu,
- Rychlost ochlazování – pokles teploty výrobku za jednotku času,
- Kritická rychlost ochlazování – nejmenší rychlost ochlazování, při které po rozpouštěcím žíhání nedochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku,
- Výdrž, prodleva – přetrvání výrobku na teplotě nutné k provedení daného tepelného zpracování.

Tepelné zpracování slitin hliníku má především za úkol zvýšit mechanické vlastnosti, snížit vnitřní pnutí nebo ovlivnit rozložení prvků ve struktuře odlitků. Především se tepelné zpracování volí pro odlitky lité gravitačně do pískových nebo kovových forem. V průběhu tuhnutí v těchto odlitcích segregují přísadové a doprovodné prvky a vzniká hrubá struktura. U tlakově litých odlitků bývá účinek tepelného zpracování nízký, protože struktura v těchto odlitcích je více homogenní. [1]

Důležitým technologickým hlediskem je dodržení teplotního intervalu u jednotlivých procesů zpracování, který je zejména ovlivněn chemickým složením, strukturou kovu a tloušťkou stěn v odlitcích. K dosažení správného tepelného zpracování je nutné, aby v peci bylo možné přesně regulovat teplotu a její rozložení bylo v odlitku rovnoměrné. Vyžaduje se, aby teplota v peci byla v toleranci $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u homogenizačního žíhání $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1]

3.1 Vytvrzování

Vytvrzování je nejdůležitější postup tepelného zpracování slitin hliníku (obr. 24), kdy lze do značné míry zvýšit mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitiny. Zvýší se mez pevnosti R_m , mez kluzu $R_{p0,2}$ a tvrdost. Tažnost však obvykle u slitin klesá. [1], [5]



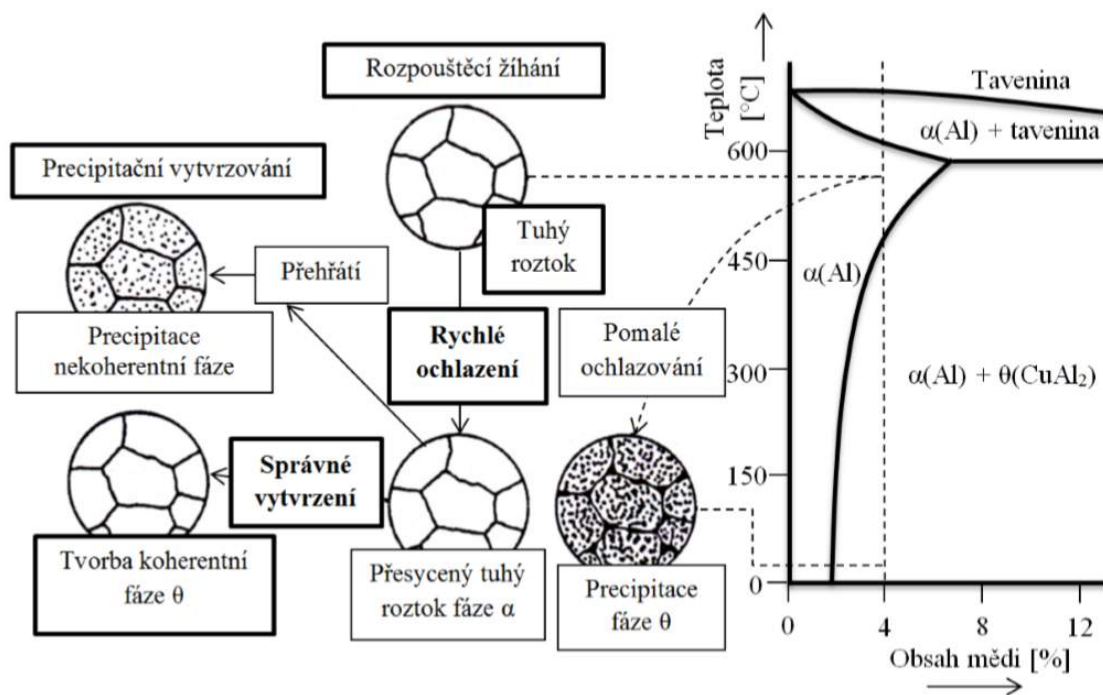
Obr. 24 Časový a teplotní průběh jednotlivých operací při vytvrzování [1]

Podmíněným požadavkem tohoto tepelného zpracování je změna rozpustnosti legujícího prvku v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Mezi tyto prvky patří měď a hořčík, případně nikl nebo zinek. Obsah těchto prvků musí být v rozmezí mezi rozpustností při normální teplotě a maximální rozpustností při eutektické teplotě v $\alpha(\text{Al})$. Vytvrditelné slitiny mohou být binární či vícesložkové, v nichž jsou obsaženy výše uvedené prvky, např. Al-Cu, Al-Si-Cu nebo Al-Si-Mg. [1], [5], [7], [34]

Ve struktuře odlítka se při pomalém ochlazení začnou přísadové prvky vylučovat jako intermetalické fáze, např. CuAl_2 , Mg_2Si , Ni_3Al a další. Tyto nově vzniklé vyloučené fáze jsou hrubé a nepříznivě ovlivňují vlastnosti slitiny. Účelem vytvrzování je dosažení zpětného rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku $\alpha(\text{Al})$, aby se vyloučily jako koherentní nebo semi-koherentní útvary. Vlivem toho jsou slitiny zpevněny. [1], [9]

Vytvrzování je složeno ze tří na sebe navazujících technologických operací (obr. 25), kdy provedení každé z nich ovlivňuje konečné vlastnosti materiálu. Jednotlivé etapy jsou [1], [5], [19], [21]:

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



Obr. 25 Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [1]

3.1.1 Rozpouštěcí žihání

Odlitek je ohříván na teplotu nad křivkou změny rozpustnosti s následnou výdrží na této teplotě. Během výdrže dojde k rozpuštění intermetalických fází, které obsahují vytvrzující přísadové prvky. U slitin s množstvím přísadového prvku blízkému maximální rozpustnosti ve fázi $\alpha(\text{Al})$ je z důvodu úzkého tepelného intervalu mezi teplotou solidu a křivkou změny rozpustnosti nutné volit rozpouštěcí teplotu ve správné výši. [1], [5], [7], [19]

Pro slitiny hliníku se rozpouštěcí teploty volí v rozsahu od 470 do 530 °C, nesmí však být vyšší než teplota solidu. V případě výchytky k vyšším teplotám nastává trvalé znehodnocení slitiny. Dochází k natavení slitiny na hranicích zrn, což má za následek prudké hrubnutí zrna. Probíhá-li žihání při nižších teplotách, omezí se vytvrzováním očekávané zlepšení vlastností odlitku. Proto se musí žihací teploty udržet v rozmezí ± 5 °C. [1], [7], [19], [35], [36]

Na dobu výdrže potřebné teploty má vliv zejména tloušťka zpracovaných odlitků a velikost fází, které je nutné rozpustit v tuhém roztoku. Hrubší fáze v odlitcích se rozpouštějí pomaleji, než stejné fáze vyloučené v jemných útvarech ve tvářených slitinách. [1], [27], [34], [35]

Častou snahou je zkrácení doby žihání na co nejnižší hodnotu, protože prodlužováním žihání dochází k hrubnutí zrna a tím zhoršení vlastností. Předpokládaných mechanických vlastností se rovněž nedosáhne, bude-li doba žihání příliš krátká. Doba žihání také ovlivňuje předchozí tepelné zpracování a to zda slitina byla vytvrzena či homogenizačně žihána. Příklad kompletního zařízení pro rozpouštěcí žihání je uveden na obr. 26. [1], [19]



Obr. 26 Zařízení pro rozpouštěcí žihání [37]

3.1.2 Ochlazení slitiny

Na ukončené rozpouštěcí žihání navazuje ochlazení odlitku. Účelem je zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku z přesyceného roztoku fáze $\alpha(\text{Al})$. U hliníkových slitin se většinou ochlazuje do vody o teplotě 20 až 40 °C. Vlivem tepelného pnutí se u tvarově komplikovaných odlitků může po prudkém ochlazení objevit deformace. Doporučuje se tak odlitky zamáčet do lázně s teplotou 40 až 80 °C a až poté dochládit ve studené vodě. [1], [9], [19]

Způsob a rychlost ochlazení je ovlivněn chemickým složením slitiny, tvarem odlitku a dalšími vlivy, jež se podílejí na vlastnostech konečného výrobku. Jedním z faktorů, který působí na rychlost ochlazení je volba ochlazovacího média. Odlitky lze ochlazovat např. ve studené nebo teplé vodě, vodní mlze, oleji či v solných roztocích. Ochlazovací rychlosti při nulové rychlosti proudění pro konkrétní média jsou uvedeny v tab. 8. [5], [19], [34], [35], [36]

Tab. 8 Ochlazovací rychlost médií [5].

Kalící médium	Rychlost ochlazení [°C/s] 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

Je-li odlitek s vyšší teplotou, než je teplota bodu varu vody, ochlazován ve vodě, vytváří se na povrchu pára, která se musí cirkulací vody průběžně odstraňovat. Hodnoty ochlazovacích rychlostí při různých rychlostech proudění jsou uvedeny v tab. 9. [5]

Tab. 9 Rychlost ochlazování médií v závislosti na rychlosti proudění [5].

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

Dalším důležitým vlivem je doba mezi vytažením odlitku z pece a následným ochlazováním. Odlitek by se měl ochlazovat co nejdříve po vyjmutí ze žhací pece, např. u tenkostěnných odlitků by neměla doba mezi vyjmutím z pece a ponořením do vody přesáhnout 10 sekund. Interval zamočení odlitků z homogenizační teploty je rozdílný podle druhu slitiny a měl by se u běžných odlitků pohybovat od 10 do 20 s. Z tohoto důvodu se musí podřídit i konstrukce pece a lázně (např. pece s pohyblivým dnem, kdy odlitky padají přímo do lázně). Není-li rychlost ochlazování odlitku dost rychlá nebo odlitek není ochlazován ihned po vyjmutí z pece, může dojít k částečné segregaci přísadového prvku na hranicích zrn. Odlitek má poté horší odolnost proti korozi, nižší tažnost a pevnost. [1], [7], [19], [34], [35]

Po prudkém ochlazení má slitina strukturu tvořenou přesyceným tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$. Homogenní stav se oproti heterogennímu za normální teploty vyznačuje nižší pevností, ale naopak vyšší houževnatostí a tažností. [1], [19], [22]

3.1.3 Precipitační vytvrzování

Proces, který se často nazývá stárnutí. Dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$, jehož průběh je především ovlivněn teplotou. Během stárnutí přísadové prvky difundují do mikroskopických oblastí se zvýšeným obsahem těchto přísad. Vlivem tohoto slučování vznikají nové fáze, např. Mg_2Si , CuAl_2 . Z těchto zárodků postupně rostou koherentní precipitáty nazývané Guinier-Prestonova pásma. [1], [7], [17], [19], [34], [36]

Rozpad tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ může probíhat samovolně již po zchlazení při teplotě okolí. K tomuto rozpadu dochází především u slitin Al-Cu-Mg, Al-Cu-Ni, Al-Mg-Si a Al-Zn-Mg-Cu. U některých slitin je možné tento rozpad zvýšením teploty urychlit. [34]

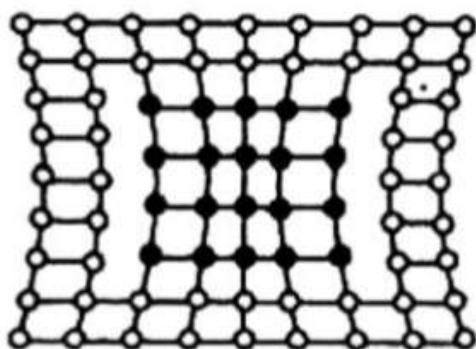
Guinier-Prestonovy pásma mají destičkovité uspořádání vytvrzujícího prvku s tloušťkou řádově 10^{-9} až 10^{-10} m. Jsou to zóny bohaté na přísady, ale s jiným uspořádáním atomů. Rozměry atomů legujících prvků jsou jiné než u atomů hliníku v základní mřížce. Krystalická mřížka se částečně deformuje a vzniká vnitřní pnutí (obr. 30), což má za následek zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Při zvýšených teplotách se koherentní precipitáty s časem zvětšují a jejich počet klesá. [1], [19], [21], [34]

Snižování počtu precipitátů zapříčiní postupné vytrácení koherence a vazba krystalických mřížek precipitátů s tuhým roztokem se postupně rozpadá. [1]

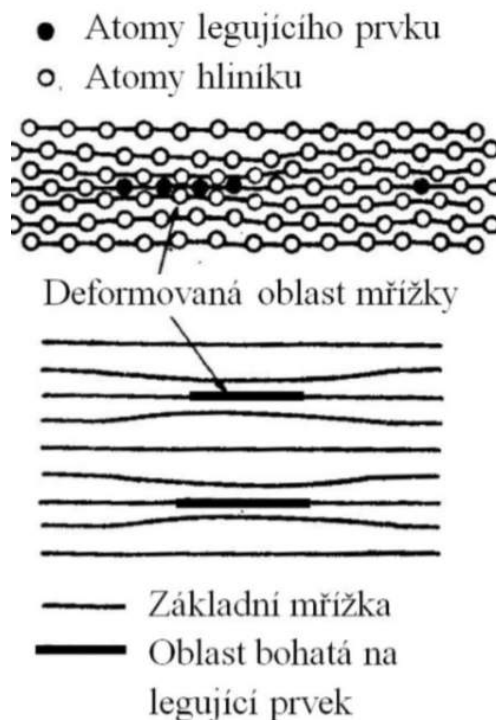
V prvním stádiu rozpadu jde o tzv. semikoherentní či částečně koherentní fáze (obr. 27). Ve slitinách se po vytvrzení obvykle tyto fáze vyskytují. Jsou stále propojeny s tuhým roztokem a tvorbou dislokací jsou nahrazeny rozdíly v mřížových parametrech, což má za následek zvýšení pevnosti a tvrdosti. [1], [19], [21]

Je-li slitina vytvrzována za příliš vysokých teplot nebo příliš dlouho, dojde k přestárnutí slitiny. Nastává změna z částečně koherentní na nekoherentní fázi (obr. 28 a 29), která již nemá vazby s tuhým roztokem $\alpha(\text{Al})$. Ztráty vazeb mají vliv na hodnoty pevnosti a tvrdosti, které postupně klesají až na původní hodnoty před tepelným zpracováním. Slitiny, které jsou mírně přestárnuté, jsou tak charakteristické vyšší tažností a nižší pevností s tvrdostí oproti maximu. Z toho důvodu se v některých případech používá tepelné zpracování T64. [1], [19]

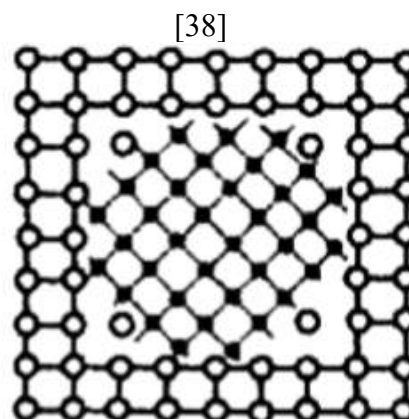
Podle teploty, při které se vytvrzování hliníkových slitin uskutečňuje, je možné tento proces dělit na vytvrzování probíhající za normálních teplot (tzv. přirozené stárnutí) a za vyšších teplot (tzv. umělé stárnutí). [1], [17], [19], [21]



Obr. 28 Částečně koherentní precipitát



Obr. 27 Vznik pásem s vyšším obsahem legujících prvků [34]



Obr. 29 Nekoherentní precipitát [38]

a) Vytvrzování za vyšších teplot

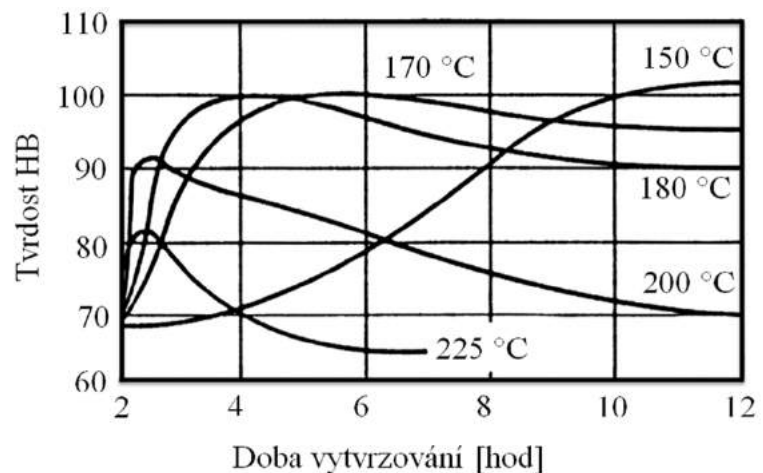
Za teploty okolí probíhá difúze precipitačních prvků velmi pomalu, proto se pro urychlení toho procesu používá vytvrzování při vyšších teplotách. Podle typu slitiny jsou vytvrzovací teploty voleny v mezích od 140 do 180 °C (u jistých slitin mohou přesahovat až 200 °C) a doba vytvrzování 3 až 8 hodin. Při vyšších teplotách je vhodné zkrátit dobu vytvrzování. Na obr. 30 jsou zobrazeny hodnoty mechanických vlastností slitiny

AlSi10Mg v závislosti na vytvrzovacích teplotách. S vyššími, než optimálními teplotami se dosahuje horších mechanických vlastností a je tak nutné dodržet teplotu společně s časem v úzkém rozmezí. [1], [17], [21], [33], [36], [39]

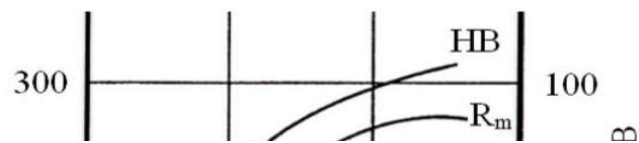
Obsah vytvrzujícího prvku má vliv na výsledné vlastnosti slitin po vytvrzení. Obvyklý obsah hořčíku se u

slitin Al-Si-Mg pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,45 %, u vysokopevných slitin až 0,7 %. Pevnost a tvrdost se s vyšším obsahem hořčíku zvyšuje, nicméně tažnost klesá (obr. 31) [1]

U slitin, které mají po stárnutí za vyšších teplot nejlepší mechanické vlastnosti, zaleží také na době mezi okamžikem ochlazení a počátkem ohřevu na teplotu stárnutí. Interval je různý podle druhu slitiny. [34]



Obr. 30 Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [1]

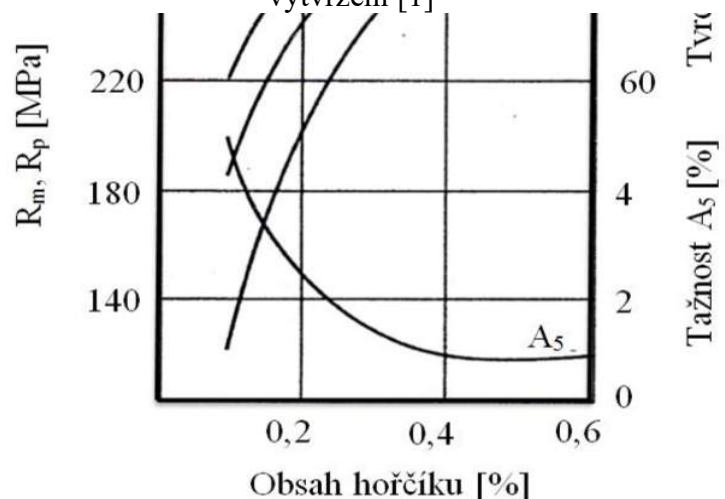


Obr. 31 Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti po vytvrzení [1]

b) Vytvrzování za normální teploty

Vytvrzování při normální teplotě je možné vlivem velké pohyblivosti atomů. Při rychlém tuhnutí, např. ve slitinách litých do kovových forem, vzniká částečně přesycená fáze α -Al. Při pokojové teplotě dochází k vytvrzování a zvýší se pevnosti a tvrdosti odlitků. [1], [36]

Slitiny AlZnMg a AlCu4 jsou vytvrzovány za studena. Někdy se také vytvrzují i slitiny typu AlSiCu s vysokým obsahem mědi (např. AlSi6Cu4 nebo AlSi8Cu3). Přirozené stárnutí je proces pomalý, samovolný a konečné vlastnosti získá odlitek za více jak 100 až



150 hodin. Proto jsou mechanické vlastnosti u těchto výrobků měřeny až po 8 dnech po odlití. [1], [22]

Poklesne-li během stárnutí teplota pod pokojovou teplotu, dojde ke zpomalení procesu stárnutí a může dojít i k jeho úplnému zastavení. Tohoto faktoru lze využít k prodloužení doby, kdy je možné polotovary zpracovávat, např. hlubokým tažením, nýtováním apod. [34]

3.2 Žihání

Druhým typem tepelného zpracování je žihání. U hliníkových slitin se žihání neřadí mezi běžné způsoby tepelného zpracování a některé druhy bývají samostatnou částí vytvrzování. Cílem žihání je dosáhnout stavu, který se bude co nejvíce blížit rovnovážnému stavu soustavy. Volba teplot se řídí podle druhu a stavu slitiny před žiháním a požadavky na výsledné vlastnosti slitiny. [1], [19], [35]

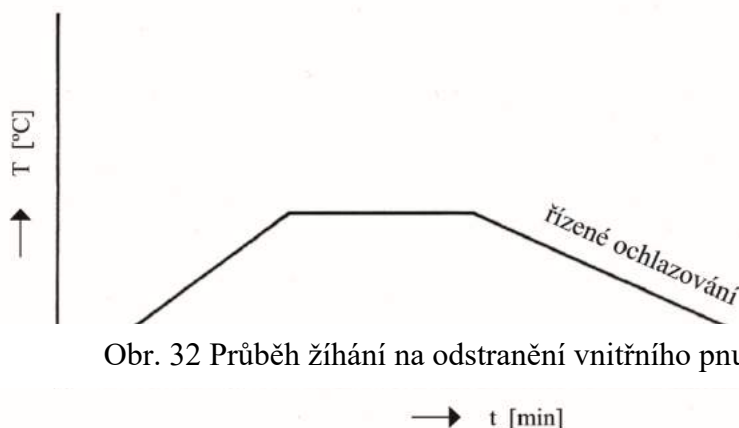
Hlavní používané typy žihání u odlitků [1]:

- žihání na odstranění vnitřního pnutí,
- stabilizační žihání,
- žihání na měkko,
- homogenizační žihání.

3.2.1 Žihání na odstranění vnitřního pnutí

Důvodem použití tohoto druhu tepelného zpracování je snížení vnitřního pnutí u konečných výrobků. Výskyt vnitřního pnutí v odlitku je způsoben nerovnoměrným ochlazením různě silných stěn odlitků nebo brzděným smršťováním v nepoddajné formě či tuhou konstrukcí odlitku. [1], [9], [19], [35]

Tento proces je složen z žihání pod rekrytalizační teplotou s výdrží na této teplotě a následným řízeným ochlazením (obr. 32). Odlitky z hliníkových slitin jsou žihány při teplotách 200 až 250 °C a doba setrvání na teplotě se pohybuje od 6 do 8 hodin. Následné pozvolné ochlazení probíhá v peci nebo na vzduchu. Zvýšením teploty na 250 až 350 °C lze dosáhnout dokonalého snížení vnitřních pnutí, ale zároveň může docházet k určitému poklesu pevnostních charakteristik. [1], [5], [9], [19], [35]

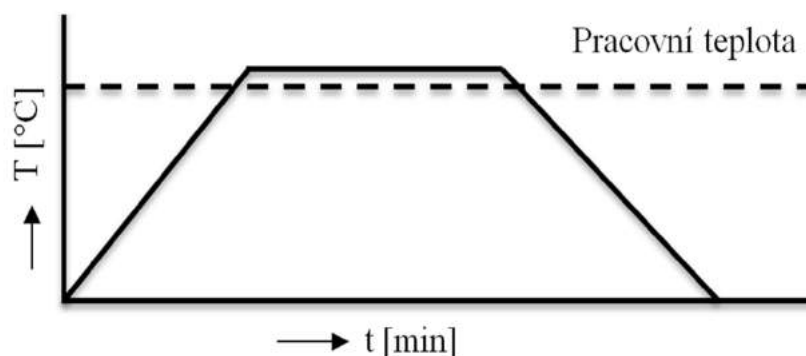


Obr. 32 Průběh žihání na odstranění vnitřního pnutí [5]

3.2.2 Stabilizační žihání

Jedná se o typ žihání, jehož cílem je stabilizace rozměrů, tvarů nebo vlastností výrobků. Využívá se u slitin, které pracují za zvýšených teplot, nebo v případech, kdy v průběhu provozu dochází k ohřevu, např. třením. [1], [5], [36], [39]

Pro stabilizační žihání se volí teploty vyšší, než je maximální předpokládaná teplota materiálu při provozních podmínkách. Teploty jsou v rozsahu od 240 do 350 °C podle druhu slitiny. Doba stabilizačního žihání se může pohybovat až v řádu několika desítek hodin. Obr. 33 uvádí průběh stabilizačního žihání v závislosti na teplotě a času. [1], [5], [36], [39]



Obr. 33 Průběh stabilizačního žihání [5]

3.2.3 Žihání na měkko

Žihání na měkko je tepelné zpracování vytvrzeného odlitku za účelem obnovení jeho vlastností, které měl před vytvrzením. Pevnost i tvrdost se snižuje a získává se tažnost. [34]

Využívá se jen u slitin, které byly vytvrzeny a je tak nutné je vyžít, aby se dosáhlo rovnovážného stavu. Teplota žihání se obvykle volí v rozmezí 350 až 450 °C. Na žihání navazuje pomalé ochlazování v peci na teplotu okolo 200 °C a dále ochlazení na vzduchu. Tento druh žihání lze použít nejen pro odlévané hliníkové slitiny, ale i slitiny tvářené. [1], [19], [35]

3.2.4 Homogenizační žihání

Homogenizační žihání je dlouhodobý proces, který se provádí v případech, kdy je nutné v odlitcích odstranit chemickou heterogenitu, která vzniká během tuhnutí. Často se homogenizace samostatně neprovádí, ale bývá součástí vytvrzování. [1], [19], [35]

Teplota procesu je vyšší než teplota odpovídající křivce změny rozpustnosti přísadového prvku v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Doba žihání závisí zejména na druhu slitiny a jejím stavu. U slitin s vyšší koncentrací přísadových prvků se vyžaduje delší prodleva na teplotě a naopak. Slévárenské slitiny se obvykle žihají 3 až 16 hodin. Doba žihání by se však neměla prodlužovat, protože v průběhu žihání může docházet k hrubnutí zrna a tím k zhoršení některých mechanických vlastností. Po homogenizačním žihání se provádí ochlazování na vzduchu nebo v některých případech i v peci. [1], [5], [22], [35]

Použitím dvou po sobě následných různých teplot má za následek snížení či odstranění chemické heterogenity difuzními procesy. Tento způsob homogenizace se nazývá dvojstupňový. [5]

3.3 Značení režimů tepelného zpracování

Z ASM normy, která má platnost v USA a Kanadě, bylo převzato značení stavu tepelného zpracování hliníku a jeho slitin. Tato norma je v souladu s normou ČSN EN 515 a její značení má platnost pro celou Evropskou unii. [5]

Písmeno T označuje způsob tepelného zpracování, ke kterému se dále přiřazuje jedno nebo dvě číslice. Výjimkou je značení písmeny F a O. Nejčastější typy tepelných zpracování používaných ve slévárenství jsou vypsány v tab. 10. [1]

Tab. 10 Označení vybraných stavů odlitků [1], [5], [7].

Značení	Typ tepelného zpracování	Teploty	Čas
F	Výchozí litý stav		
O	Žihání na odstranění vnitřních pnutí případně stabilizační žihání. Ochlazování na vzduchu.	340 °C	2 až 3 hod
T3	Po rozpouštěcím žihání, tváření za studena a přirozené stárnutí.		
T4	Rozpouštěcí žihání a následné vytvrzení za studena.		
T5	Při poměrně nízkých teplotách umělé stárnutí bez předchozího homogenizačního žihání. Vhodné pro získání lepší obrobitelnosti a k odstranění vnitřního pnutí.	205 až 260 °C	7 až 10 hod
T6	Vytvrzování – skládá se z homogenizačního žihání, rychlého ochlazení a precipitačního vytvrzení za tepla. Docílení vhodné vysoké pevnosti a houževnatosti.	145 až 160 °C	3 až 5 hod
T61	Vytvrzování k získání maximální pevnosti a tvrdosti. Houževnatost se sníží.	150 až 170 °C	6 až 10 hod
T64	Vytvrzování na maximální houževnatost		
T7	Obdobné vytvrzování jako stav T6, ale s přestárnutím. Dochází ke stabilizaci mechanických vlastností a rozměrů odlitků. Oproti T6 je v tomto případě nižší pevnost, ale vyšší tažnost.	190 až 225 °C	4 až 6 hod
T71	Přestárnutí do stabilního stavu. Na rozdíl od stavu T7 se zvýší teplotní stabilita a odolnost proti korozi pod napětím. Pevnost se však sníží.	225 až 260 °C	6 až 10 hod

4 EXPERIMENT

Diplomová práce vznikla ve spolupráci se slévárnou MESIT foundry, a.s. a byla zaměřena na posouzení, zda má na výsledné mechanické vlastnosti hliníkových odlitků vliv jejich umístění v peci tepelného zpracování. Pro experiment byla vybrána pec LAC, u které laboratoř firmy LAC provedla měření rovnoměrnosti teplot pomocí termočlánků. V peci jsme provedli dvě zkoušky. V obou případech byly jako zkušební vzorky použity svazky tahových tyček, které se rozmístily do míst měřených termočlánkem. Jednotlivé hodnoty mechanických vlastností byly následně vyhodnoceny na trhacím stroji.

4.1 Představení slévárny

Slévárna MESIT foundry je součástí akciové společnosti MESIT holding, která v sobě zahrnuje 11 firem. Na obr. 34 je zobrazen letecký pohled na budovy společnosti MESIT holding. Většina z těchto firem sídlí v jednom areálu v Uherském Hradišti. Samotná slévárna se především zabývá výrobou tenkostěnných hliníkových odlitků, případně odlitků z barevných kovů a to metodou vytavitelného vosku. Odlitky nacházejí uplatnění v leteckém, obranném či dopravním průmyslu. Společnost se nezaměřuje jen na domácí trh, ale úspěšně spolupracuje i se zahraničními zákazníky v Evropě, Asii a v Severní a Jižní Americe. V současné době jde až 60 % produktů slévárny na export. [40]

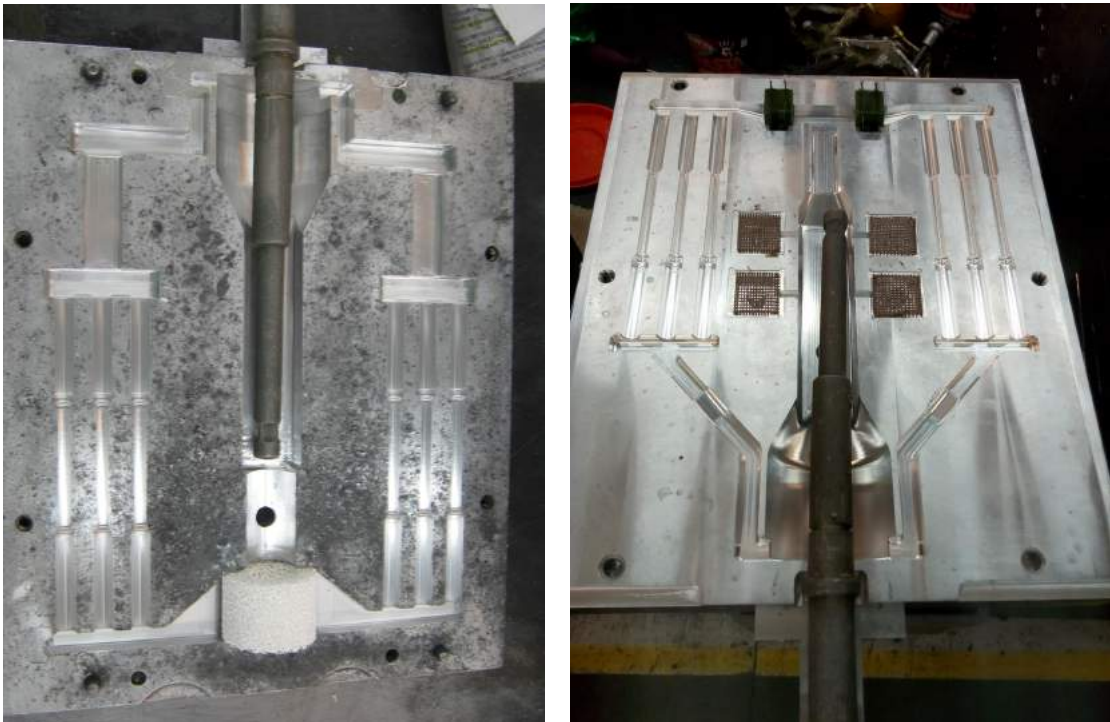


Obr. 34 Budovy společnosti MESIT holding [40]

4.2 Popis experimentu

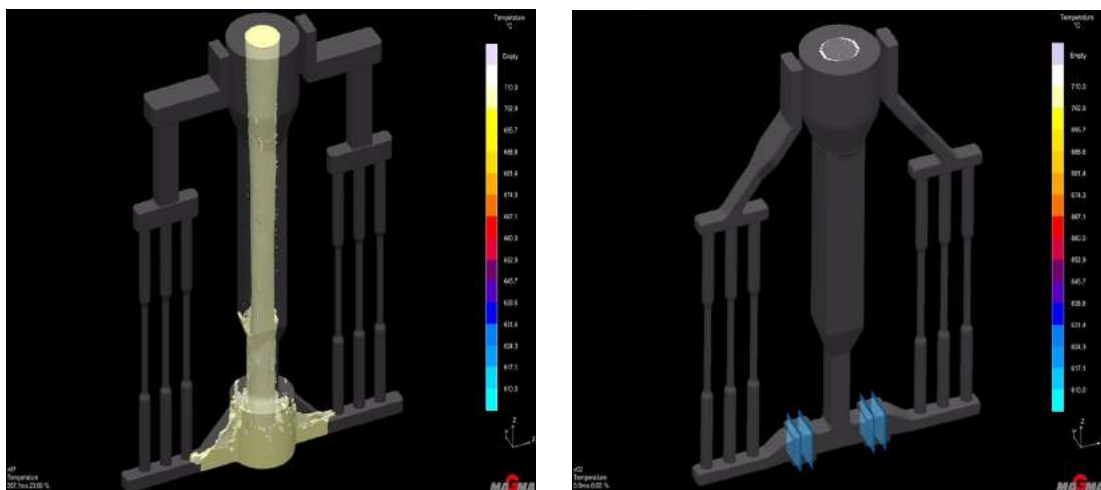
Ve slévárně se dříve k výrobě voskových modelů tahových tyček používala forma s šesti tyčkami a keramickým filtrem vespod vtokového kůlu (obr. 35, vlevo). Problémem u takto odlitých tahových tyček byl výskyt vad (zejména oxidických plen), které komplikovaly hodnocení tahových zkoušek. Docházelo k případům, kdy z dvanácti zkoušených tyček vyhovovaly jen čtyři. Výsledky tahové zkoušky tak nebyly kompletní. Z tohoto důvodu byla navržena, zkonstruována a vyrobena nová forma. Zásadní změnou od původní formy bylo nahrazení keramického filtru čtyřmi plátňovými filtry od firmy Pyrotek (obr. 35, vpravo). Filtry jsou vkládány do bočních rozváděcích kanálů po dvou na

každé straně. Součástí formy jsou i další čtyři plátňové filtry připojené na vtokový kůl, které se zalisují do vosku a vkládají do další připravované formy.



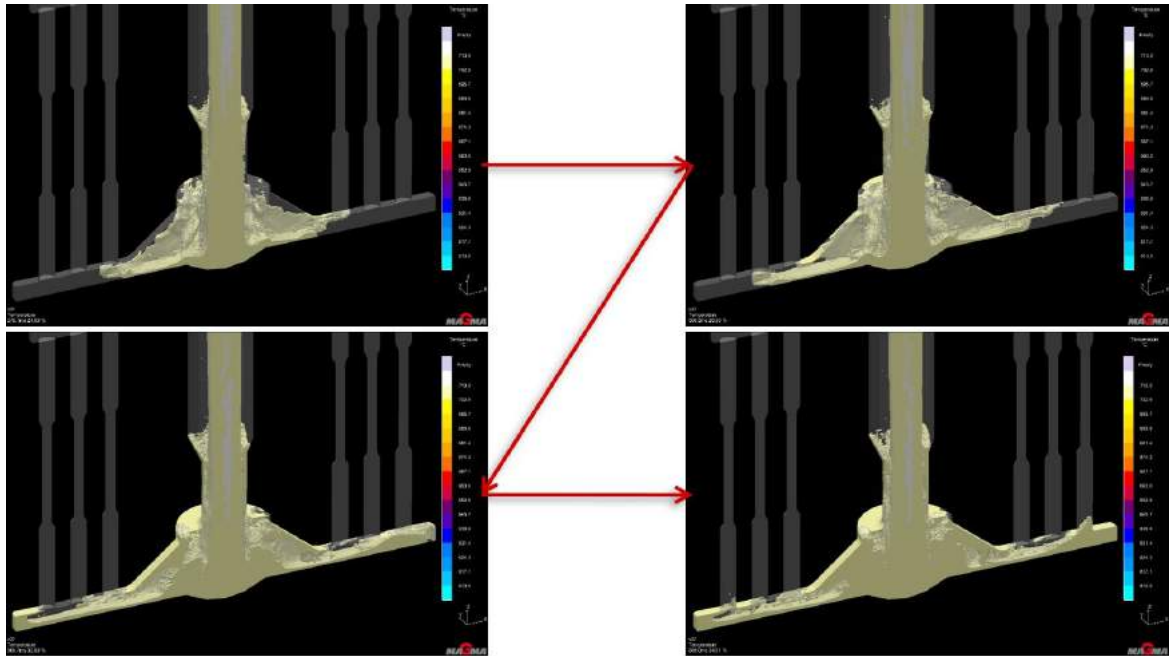
Obr. 35 Forma s keramickým filtrem (vlevo), forma s plátňovými filtry (vpravo)

Vliv změny konstrukce formy na průběhu plnění taveninou je porovnán pomocí simulačního programu MAGMASOFT. Simulací se porovnává varianta jak s původním keramickým filtrem (obr. 36, vlevo), tak i s novými plátňovými filtry (obr. 36, vpravo).

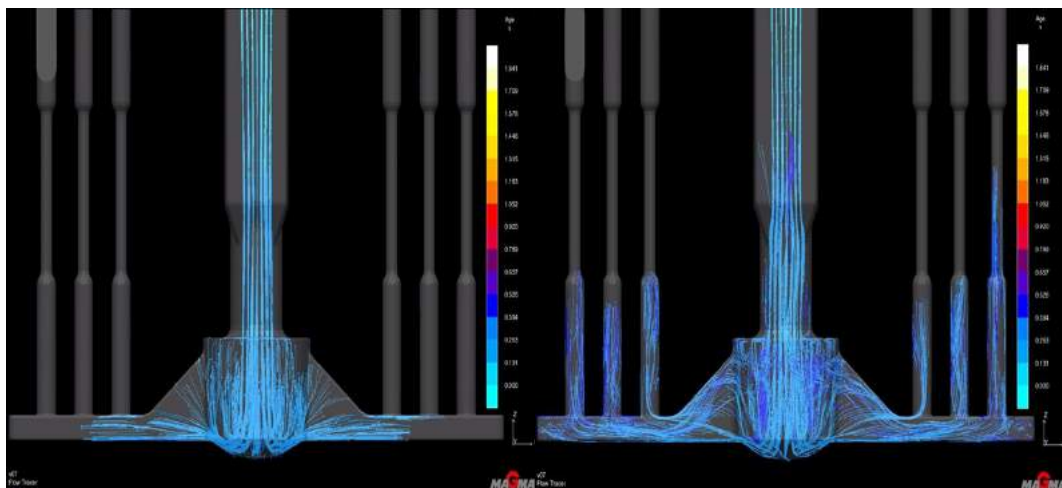


Obr. 36 Skořepina s keramickým filtrem (vlevo), skořepina s plátňovými filtry (vpravo)

U původního tvaru vtokové soustavy se tavenina dostává do keramického filtru, poté postupuje rozváděcími kanály až do zbytku skořepiny (obr. 37). Nevýhodou této vtokové soustavy je, že před samotným plněním tahových tyček dochází u keramického filtru k podpovrchovým turbulencím. Průběh postupu taveniny vtokovou soustavou je také znázorněn pomocí trasovacích částic na obr. 38.

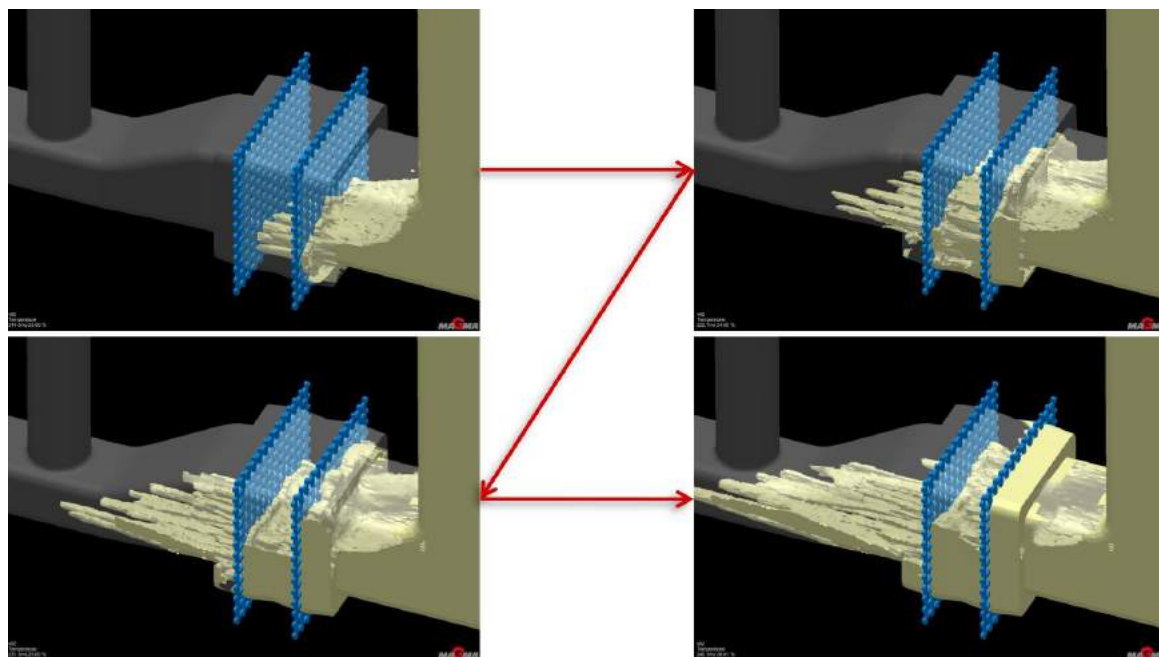


Obr. 37 Chování taveniny v oblasti keramického filtru

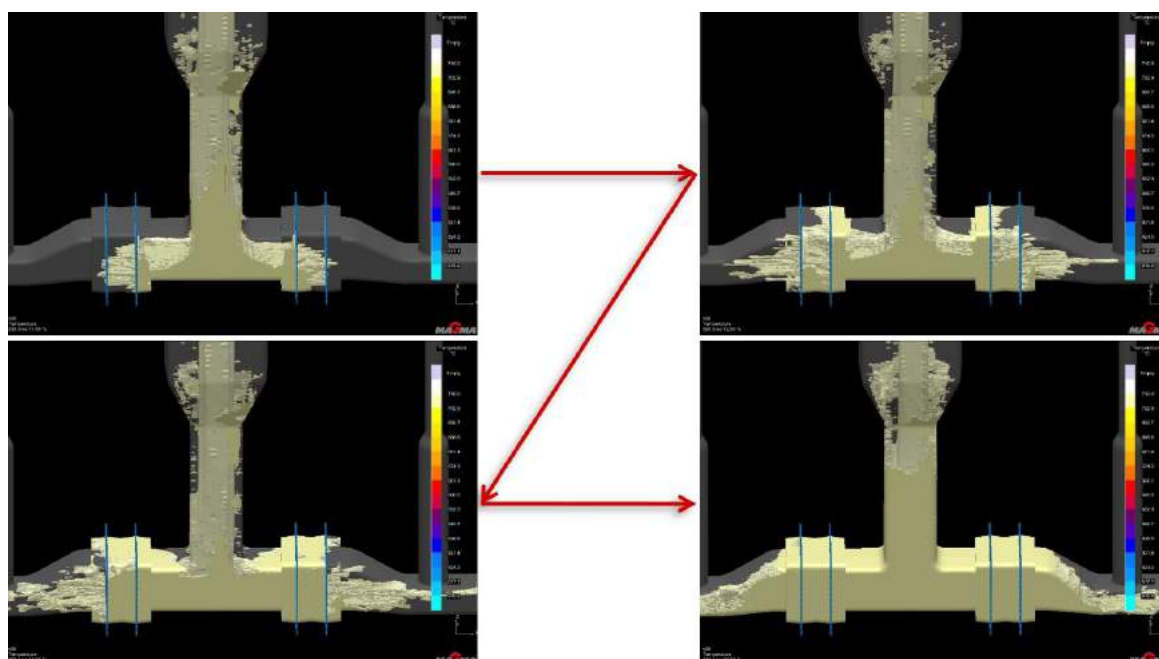


Obr. 38 Trasovací částice v průběhu lití - původní filtr

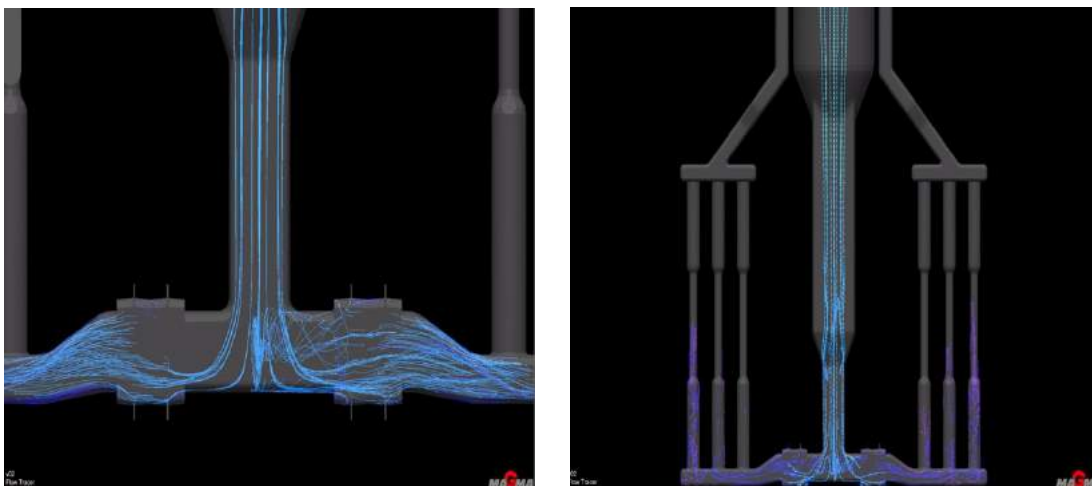
Ve vtokové soustavě, kde jsou umístěny plátňové filtry, je možné z obrázků vidět, že se povedlo dosáhnout usměrněného proudění taveniny (obr. 39 a 40). První plátňový filtr zachycuje největší dávku taveniny, který se chová jako bariéra, za kterou tavenina cirkuluje. Druhý plátňový filtr již propouští zklidněnou taveninu a usměrňuje její tok při vlastním plnění tyček. Průběh postupu taveniny vtokovou soustavou až do samotných tahových tyček a odstranění podvrchových vírů pomocí plátňových filtrů je také znázorněn pomocí trasovacích částic na obr. 41.



Obr. 39 Chování taveniny v oblasti plátňových filtrů



Obr. 40 Charakter plnění - zaměřeno na oblast filtrů



Obr. 41 Trasovací částice v průběhu lití - nové filtry

K porovnání obou vtokových soustav je uvedeno i množství vzduchu v průběhu lití. Na obr. 42 je zobrazeno jeho množství při zaplnění skořepiny z 38 %.



Obr. 42 Zahlčený vzduch v obou variantách vtokové soustavy

K tepelnému zpracování tahových tyček je použita nově zakoupená pec s ozn. KNC/V 1000/65 od firmy LAC. Tato pec byla zkalibrována a má nejnovější certifikát o rovnoměrnosti teplot, který je uveden v příloze 1. Hodnoty teplot v jednotlivých místech pece byly zjišťovány dodavatelem pomocí termočlánků v jejich laboroři. Z certifikátu vyplývá, že pec je v pořádku. Na přiloženém certifikátu nás zaujaly rozdíly v naměřených teplotách v různých místech pece, které jsou reprezentovány přiděleným číslem termočlánku. Termočlánek č. 1 dosahuje max. 538 °C. Kdežto u termočlánku č. 5 se po ustálení teplot pohybuje teplota okolo 545 °C. Obě hodnoty však odpovídají normě: 542 °C +/- 6 °C. Cílem je tak zjistit, zda rozdíly v teplotách ovlivní výsledné hodnoty mechanických vlastností tahových tyček. Případně jaký vliv má tepelné zpracování na vzorky, pokud se zpracují v prázdné nebo v plně zarovnané peci odlitky. U vzorků požadujeme dosáhnout vyšších mechanických vlastností - pevnost 310 MPa a tažnost 5 %.

4.3 Příprava zkušebních tahových tyček

Výroba tahových tyček probíhá podle technologického postupu zavedeného ve slévárně k odlévání slitin hliníku.

4.3.1 Výroba skořepinové formy

Skořepinové formy se ve slévárně MESIT foundry, a.s. vyrábí podle metody vytavitelného modelu. K zhotovení voskového modelu je použita matečná forma z neželezného kovu. Používá se vosk od firmy Blayson. Forma se před naplněním důkladně očistí, aby se zabránilo možnému výskytu vad na voskových modelech. Plnění formy probíhá pomocí vstřikovacího lisu, který vstříkne zahřátý vosk do formy. Doba plnění formy voskového modelu je dána jeho složitostí a objemem vosku. Teplotní parametry používaného lisu jsou uvedeny v tab. 11. Při plnění formy voskem je důležité sledovat některé parametry, které uvádí tab. 12.

Tab. 11 Hodnoty teplot vstřikovacího lisu.

Označení lisu	SHELL-O-MATIC: SYSTEM #1 65 TON INJECTOR
Teplota vosku v zásobníku	66 °C
Teplota v plnicím válci	65 °C
Teplota v trysce	64 °C

Tab. 12 Sledované parametry během plnění formy.

Parametry	Povolený rozsah hodnot	Dosažené hodnoty
Tlak vstřiku	150 - 400 psi	150 psi
Doba plnění formy	20 - 90 s	90 s
Tlak sevření lisu	1000 - 1500 psi	1000 psi
Průtok	150 - 400 kg/min	250 kg/min

Po naplnění formy je nutné ponechat vosk ve formě, aby došlo k jeho ztuhnutí na pevnost, při které ho lze z formy bezpečně vyjmout. V našem případě se musí dodržet doba minimálně 15 až 20 s. Tvar původního voskového modelu je zobrazen na obr. 43 (vlevo). Nový voskový model již s plátnovými filtry je uveden na obr. 43 (vpravo).



Obr. 43 Původní voskový model (vlevo), nový voskový model (vpravo)

Stromečky se poté nechávají alespoň jeden den stabilizovat. Dalším krokem je obalování stromečků. Pro každý samostatný výrobek je dán vlastní program obalování, který se může lišit počtem jednotlivých obalů a dobou sušení. Největší důraz při obalování je kladen na první dva obaly, které jsou důležité z hlediska kvality povrchu odlitku. Používá se vazná kapalina od firmy Ransom&Randolh. Pro první, lícní obaly je používáno pojivo Primcote, pro ostatní obaly již pojivo Matrixol. Pro moučku a posyp jsou využívány Molochity od firmy Imerys. Stromečky lze obalovat ručně či pomocí robotu. Volba způsobu obalování závisí na složitosti voskového modelu, kdy pro konstrukčně náročnější modely se volí ruční způsob. Pokud je to z technologického hlediska možné, dává se přednost obalování robotem. V našem případě jsou stromečky obalovány robotem. Firma využívá obalovací linku od firmy VA Technology Ltd. Linka se skládá z obalovacího robotu Kawasaki (obr. 44), tří dopravníků a dvou sušáren. Robot ze závěsného dopravníku přebírá jednotlivé stromečky, namáčí je a následně obaluje ostřivem. Po těchto operacích vrací robot stromeček zpět na závěsný dopravník. V místnostech, kde se voskové modely zpracovávají, je hlídána předepsaná vlhkost a teplota vzduchu.



Obr. 44 Obalovací robot

Během výroby je nutné dodržet předepsané sušení jednotlivých nanášených obalů. Pokud výrobky obsahují hluboké tvary či žebrování, mohou se sušit i o několik hodin déle. Následně stromečky putují do bojlerklávu, kde dochází k vytavování vosku ze skořepiny. Jeden pracovní cyklus v bojlerklávu trvá 20 min a tlak ve vyvíječi páry dosahuje hodnot 9 barů. Samotnému lití keramických skořepin ještě předchází jejich zavezení do žihací pece, kde se předehřívají na teplotu 680 °C po dobu min. 2 hodin.

4.3.2 Příprava slitiny

Typickými odlévanými slitinami slévárny jsou siluminy AlSi7Mg0,3 a AlSi7Mg0,6. Tyto materiály se využívají pro odlitky do leteckého a automobilního průmyslu. Pro náš experiment jsme zvolili podeutektický silumin EN AC-42200 neboli AlSi7Mg0,6 z důvodu dosažení nejvyšších možných mechanických vlastností u slitin Al-Si. Jelikož slitina obsahuje hořčík, splňuje předpoklad pro vytvrzování. Zvolený materiál je také označován pod zkratkou A357 podle normy US Aluminium Association. Předepsané chemické složení dle normy ČSN EN 1706 je uvedeno v tab. 13. [1]

Tab. 13 Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 dle normy ČSN EN 1706 [41].

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Obsah nečistot	
								Jeden prvek	Celkem
Min. obsah [%]	6,5	-	-	-	0,45	-	0,08	-	-
Max. obsah [%]	7,5	0,19	0,05	0,10	0,70	0,07	0,25	0,03	0,10

K odlití všech tahových tyček se použije elektrická odporová pec, která je v tavně zabudována do země. Použije se grafitový kelímek označením BU 250, jehož maximální obsah je 200 kg nataveného hliníku. Složení vsázky: 70 % nový materiál a 30 % vratný materiál ze slévárny. Veškeré zpracování a manipulaci s kovem provádí kvalifikovaní pracovníci slévárny MESIT foundry, a.s. Pro získání potřebné kvality slitiny bude nutné během tavení provést některé metalurgické zásahy (rafinace, odplynění, očkování, modifikace). Množství použitých přípravků je voleno podle zavedených předpisů slévárny. Po těchto operacích vždy následuje měření naplynění taveniny pomocí metody dvojího vážení. Princip metody spočívá v porovnání hustoty vzorku slitiny, který ztuhl při atmosférickém tlaku se vzorkem, který ztuhl za podtlaku (obr. 45). Z hustot lze následně určit Dichte Index podle vztahu [1]:

$$DI = \frac{(\rho_{vz\ atm} - \rho_{vz\ vak})}{\rho_{vz\ atm}} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde: $\rho_{vz\ atm}$ - hustota vzorku, který ztuhl při atmosférickém tlaku [kg/m³],
 $\rho_{vz\ vak}$ - hustota vzorku, který ztuhl ve vakuu [kg/m³].

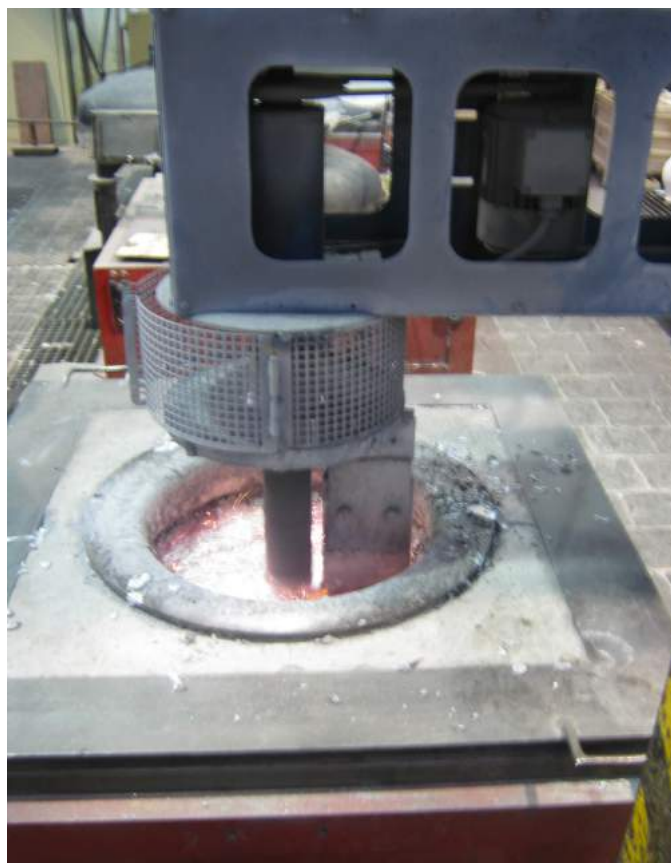


Obr. 45 Měření Dichte Indexu

Po natavení vsázky a přehřátí taveniny se do lázně přidá rafinační sůl COVERAL GR 2410. Na množství jedné pece se přidá 400 g rafinační soli. Sůl se nasype na hladinu taveniny a pomocí děrovaného zvonu se ponoří na dno kelímku. Zde začne ihned reagovat s taveninou a na hladině se začnou objevovat červeno-oranžové plamínky. Po odstátí taveniny (cca. 5 min.) se z její hladiny stáhne vyplavená struska (vměstky, nečistoty) a následně provede první odplynění. Odplynění probíhá pomocí zařízení FDU (Foundry Degassing Unit), ve firmě označované OZAL 001 (obr. 46). Jako inertní plyn je používán 99% dusík s označením 5.0. Parametry odplynění jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Parametry odplyňování zařízením FDU od firmy FOSECO.

Parametry odplyňování	Hodnota
Průtok plynu	10 ÷ 15 l/min.
Otáčky rotoru	450 ÷ 500 otáček/min.
Doba odplyňování	2 x 5 min.
Typ rotoru	FOSECO XSR175
Typ plynu	Dusík 5.0



Obr. 46 Odplyňování taveniny dmýcháním dusíku

Po odplynění se z odlitého vzorku zjistí na spektrálním analyzátoru chemické složení taveniny. V tab. 15 je uvedeno chemické složení slitiny po prvním odplynění. Dále se změří Dichte Index, který se po prvním odplynění bez modifikace a očkování sníží na minimum. V našem případě se dosáhne nejnižší hodnoty, a to 0,38 %.

Tab. 15 Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 po prvním odplynění.

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Obsah [%]	7,03	0,082	<0,001	0,0022	0,429	<0,001	0,137	92,3

Po první spektrální analýze je množství hořčíku ve slitině pod minimálním přípustným obsahem, proto se jeho obsah musí navýšit. K dolegování je používán čistý hořčík. Slévárna ho nakupuje ve formě malých nařezaných kousků, aby šel snadno přidávat a nemusel se dořezávat přímo ve slévárně. Do taveniny se tak přidá 300 g čistého hořčíku, aby jeho množství ve výsledném měření taveniny vzrostlo o 0,1 %.

Následuje modifikace slitiny pomocí modifikačních tablet SIMODAL 77. Do připravovaného množství kovu se přidá 1,5 tablety tohoto modifikátoru. Před aplikací do taveniny je nutné nechat modifikační tablety dosušit u víka pece. Poté se pokládají na vyčištěnou hladinu kovu a pomocí děrovaného zvonu se ponoří na dno kelímku. Tablety ihned začnou reagovat s taveninou. Po skončení reakce se zvon vyjme z taveniny a řádně očistí. Následně se děrovanou naběračkou stáhnou nečistoty, které vyplavou na hladinu.

Dále se provede očkování. K očkování je používána předslitina AlTi5B1, která účinně zjmenu velikost primárního zrna připravované slitiny. Do kelímku se očkovadlo přidá ve formě 10 tyčí o délce 50 cm a průměru 10 mm. Titanové tyče se volně vnoří do taveniny, kde se okamžitě rozpustí. Obsah titanu je nutné následně ověřit na spektrálním analyzátoru.

Po modifikaci a očkování je důležité provést odplynění, protože modifikační tablety obsahují soli NaCl, které mají velkou afinitu ke vzdušnému kyslíku. Velmi rychle s ním reagují a tím zvyšují hodnotu naplynění. Tavenina se odplyní a následně provede kontrola chemického složení a hodnoty naplynění. V tab. 16 je uvedeno chemické složení slitiny po modifikaci.

Tab. 16 Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 po modifikaci.

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Obsah [%]	7,40	0,082	<0,001	0,0022	0,55	<0,001	0,153	91,8

Celkové množství všech přidávaných metalurgických přípravků do připravované slitiny je v tab. 17.

Tab. 17 Použité přípravky v připravované slitině.

Dolegování	Refinace		Modifikace		Očkování	
	Množství Mg [g/pec]	Typ rafin. soli	Množství [g/pec]	Typ modifikátoru	Množství [ks/pec]	Typ očkovadla
300	COVERAL GR 2410	400	SIMODAL 77	1,5 tablety	AlTi5B1	10 tyčí

Ze získaného chemického složení je ověřeno, že přidáním čistého hořčíku se ve slitině zvýší jeho obsah přibližně o 0,1 %. Z důvodu očkování taveniny se také prověří i obsah titanu. Jeho množství se rovněž zvýšilo asi o 0,02 %.

Po předchozích zásazích do taveniny vzrostla hodnota Dichte Indexu na 1,89 %. Podle předpisu slévárny je však maximální povolená hodnota 1,5 %. Provede se tedy druhé,

poslední odplynění. Konečná hodnota naplynění klesla na 1,13 % a připravovaná slitina se může začít odlévat. Tab. 18 uvádí výsledné chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6. Kompletní složení všech prvků ve slitině je uvedeno v příloze 2. Získané obsahy všech prvků ve slitině jsou v požadovaném rozmezí dle normy ČSN EN 1706. S výsledným obsahem hořčíku a titanu se podařilo dosáhnout ideálních hodnot, které má slévárna vyzkoušené jako nejlepší pro odlévanou slitinu.

Tab. 18 Výsledné chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6.

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Obsah [%]	6,85	0,086	0,0002	0,001	0,52	<0,001	0,169	92,3

4.3.3 Odlévání

Skořepiny se odlévají pomocí ruční pánve, která se před samotným odléváním nahřívá položením na druhou pec. Na obr. 47 je zobrazena připravená tavenina v elektrické odporové peci. Licí teplota tekutého kovu je 750 °C. Celkový čas odlévání všech čtyřiceti stromečků trhacích tyček je hlídán a nepřekročil 30 minut. Poslední odlité stromečky jsou označeny drátem a poslouží k porovnání účinku modifikátoru.



Obr. 47 Připravená tavenina k odlévání

4.3.4 Dokončovací operace

Odlité tahové tyčky se nechají vychladnout do druhého dne. Poté jsou ručně oklepány kladivem od zbytků skořepiny a odříznuty od vtokové soustavy. Tyčky se obvykle nepískují, pouze v případě, pokud vrstva skořepiny je silně připečená. Jednotlivé tahové tyčky jsou rozděleny do pořadače, tak aby se mezi sebou nezamíchaly. Následně se připravily na svázání drátkem po 6 kusech a označily pořadovým číslem podle termočlásku v peci.

4.3.5 Tepelné zpracování tahových tyček

Tepelné zpracování tahových tyček se provádí podle parametrů uvedené v tab. 19. Proces se skládá z rozpouštěcího žhání, kdy dochází k rozpuštění přísadového prvku (v našem případě hořčíku) v matrici a následným ochlazením ve vodě vzniká přesycený tuhý roztok. Poté při umělém stárnutí dojde k difuzi a vzniku koherentních precipitátů. Tyto precipitáty způsobují vnitřní pnutí, které je důvodem zvýšení pevnosti a tvrdosti zpracovávané slitiny. [1]

Tab. 19 Parametry tepelné zpracování odlévané slitiny EN AC-42200.

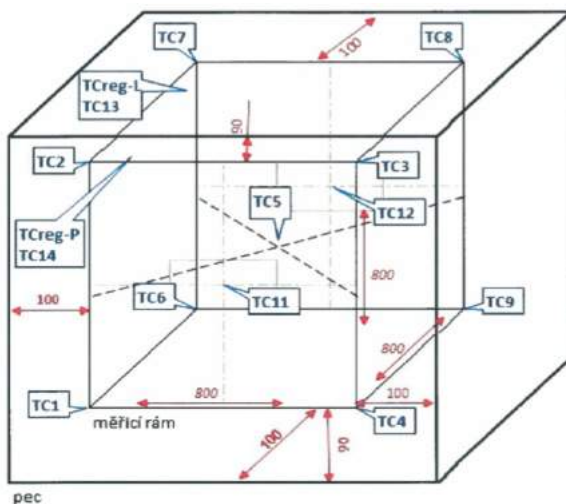
Slitina	Typ TZ	Rozpouštěcí žhání				Umělé stárnutí		
		Teplota [°C]	Výdrž [h]	Ochlazení	Teplota lázně [°C]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Ochlazení
EN AC-42200 (357.0)	T6	547±3	10±1	Voda	25±10	160±3	5±1	Vzduch

Celkem se provádí dvě zkoušky tepelného zpracování v nové peci KNC/V 1000/65 a jedna zkouška v peci KNC/H 1000/65. V běžně používané peci KNC/H 1000/65 (obr. 48) je provedeno tepelné zpracování šesti stromečků. Tyto stromečky jsou během zpracování umístěny uprostřed pece. Tahové tyčky z dvou stromečků jsou použity k ověření účinnosti tepelného zpracování, k porovnání výsledků mezi oběma pecemi a k srovnání zvolených programů. Zbylé čtyři stromečky, označené drátem, slouží k ověření modifikace.



Obr. 48 Pec KNC/H 1000/65

V nové peci jsou odlitky umístěny podle poloh termočlánků v měřicím rámu. Pro náš experiment se tak u obou zkoušek rozmístí po dvou svazcích tahových tyček (1 svazek = 6 tyček) na místa, která odpovídají číslům prvních devíti termočlánků, jak je uvedeno na obr. 49. V peci KNC/V 1000/65 (obr. 50) tak pro obě zkoušky tepelně zpracujeme tahové tyčky z 36 stromečků.



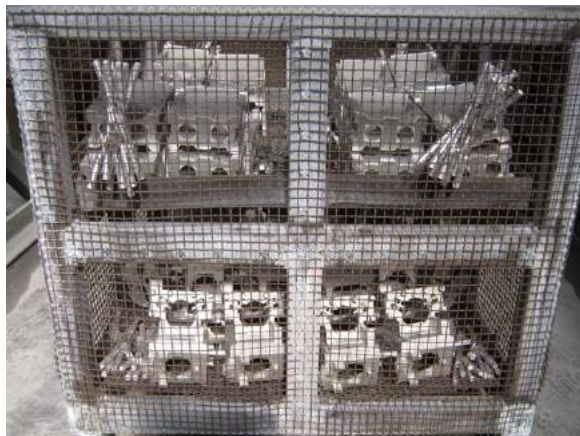
pec

Obr. 49 Poloha termočlánků v měřicím rámu



Obr. 50 Pec KNC/V 1000/65

První zkouška je provedena v peci plně obsazené odlitky. Svazky tyček se umístí podle pořadí a ke koši se přiváží drátem (obr. 51). Svazky tahových tyček jsou uloženy tak, aby se nedotýkaly odlitků. Problém nastal uprostřed v místě č. 5, kde se svazky musí rozdělit do dvou různých míst, aby nedošlo k jejich kontaktu s ocelovou konstrukcí koše. U této zkoušky si chceme ověřit, zda výsledné mechanické vlastnosti jednotlivých tahových tyček mohou být ovlivněny jejich umístěním blízko silnostěnných odlitků, popřípadě jejich uložením v zákrytu odlitků vůči cirkulaci tepla.



Obr. 51 Umístění svazků v plném koši

Následná druhá zkouška se již prováděla v prázdné peci. Svazky tyček se v koši uloží stejně jako v případně plné pece (obr. 52). Pro každé tepelné zpracování je vystavován protokol, který uvádí grafický průběh teplot během prováděného procesu. Tento protokol je uveden v příloze 3.



Obr. 52 Umístění svazků v prázdném koši

4.4 Měření mechanických vlastností

Po tepelném zpracování jsou svazky tahových tyček přeneseny do laboratoře, kde se na trhacím stroji vyhodnotí dosažené hodnoty pevnosti a tažnosti. Hodnoty se měří pomocí trhacího stroje ZDM 10/90 (obr. 53, vlevo). Před samotným upnutím tyčky jsou na ni zakresleny rysky se vzdáleností 50 mm, které budou sloužit k vyhodnocení tažnosti. Po upnutí tyčky do sklíčidla je na ni připojen průtahoměr mini MFA 2 (obr. 53, vpravo). Po zapnutí stroje dochází k postupnému natahování tyčky až do jejího prasknutí.



Obr. 53 Trhací stroj ZDM 10/90 (vlevo), umístění průtahoměru mini MFA 2 (vpravo)

Hodnoty pevnosti jsou ihned po přetržení tyček odesílány do počítače. Tažnost je nutné následně ručně přeměřit posuvným měřítkem, kdy se k sobě připojí oba konce přetržené tyčky a měří se vzdálenost mezi naznačenými ryskami. Při měření tažnosti je důležité, aby se oba konce k sobě připojily tak, jak byly přetrženy. Na obr. 54 je zobrazeno správné a naopak špatné připojení konců tyček. Vlivem nesprávného připojení se posuvným měřítkem naměří jiná vzdálenost a přepočítávaná tažnost vyjde odlišně. Výsledná tažnost se určí ze vztahu:

$$A = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde: l_1 - konečná délka [mm],
 l_0 - počáteční délka [mm].



Správné připojení



Špatné připojení

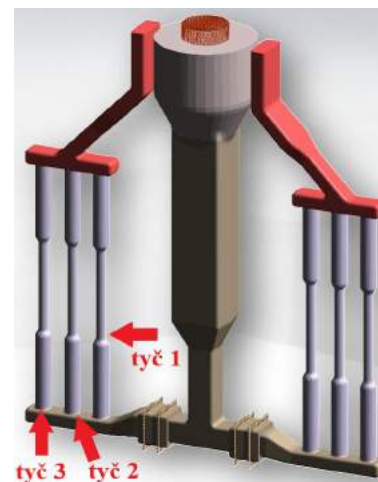
Obr. 54 Připojení přetržených konců tyček

Veškeré záznamy o provedených zkouškách u všech tahových tyček byly při měření zapisovány do protokolů, které jsou uvedeny v příloze 4.

4.5 Vyhodnocení získaných hodnot

V této části se zaměříme na vyhodnocení získaných dat. Mezi naše faktory bereme v úvahu umístění tyček v peci a pořadí tyčky ve stromečku. Pro každé umístění v peci se provedlo dvanáct zkoušek, u kterých první čtyři odpovídají tyči 1, další čtyři tyči 2 a zbylé tyči 3. Umístění tyček ve stromečku je zobrazeno na obr. 55.

Před samotným vyhodnocováním dat provedeme čištění hrubých chyb pomocí krabicového grafu. Upravená data budeme porovnávat pomocí vícefaktorové analýzy rozptylu ANOVA. Nejprve se zaměříme na ověření předpokladu normality a homogenity rozptylů. Po ověření normality budeme testovat homogenitu rozptylů, která ukazuje zda-li náhodné výběry pocházejí z normálního rozložení se stejným rozptylem. Pokud oba předpoklady budou



Obr. 55 Rozdělení tahových tyček

splněny, provedeme analýzu ANOVA. V opačném případě provedeme Kruskalův-Wallisův test. Veškeré výpočty budou provedeny pomocí programu Minitab. [42]

4.5.1 Plná pec - pevnost

V tab. 20 jsou uvedeny veškeré hodnoty pevnosti, které se podařilo dosáhnout u tahových tyček tepelným zpracováním v plné peci.

Tab. 20 Naměřené hodnoty pevnosti v plné peci.

Plná pec - pevnost [MPa]									
Č. zk.	Umístění v peci								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	312,86	284,58	330,54	98,82	179,70	265,30	314,97	287,28	315,82
2	261,74	329,99	322,78	329,71	235,35	316,70	332,77	298,48	248,30
3	328,35	326,75	328,76	330,37	259,72	282,34	303,23	319,89	298,38
4	302,01	330,50	326,51	332,68	320,91	220,61	322,36	319,34	296,79
5	233,50	322,39	327,96	335,67	312,53	295,61	331,96	304,20	321,81
6	282,11	305,10	314,19	326,69	265,68	297,06	289,48	295,87	329,67
7	268,01	335,41	316,70	304,66	301,57	249,70	301,42	316,63	312,11
8	270,12	331,28	327,24	324,44	289,27	310,57	313,58	318,16	322,95
9	203,77	46,47	330,56	336,19	328,58	262,33	308,56	292,33	262,52
10	298,53	333,54	326,84	338,31	320,28	271,83	295,34	291,24	274,02
11	306,94	316,34	335,38	315,98	328,72	278,32	321,29	316,59	334,99
12	268,22	302,12	328,93	338,37	317,06	294,05	303,91	326,46	331,37

Normalitu náhodných složek můžeme ověřit pomocí tří testů, z nichž jsme vybrali Anderson-Darlingův test, jehož výsledek je uveden v tab. 21. Test je založen na předpokladu normality náhodných složek a hypotézy jsme definovali následovně:

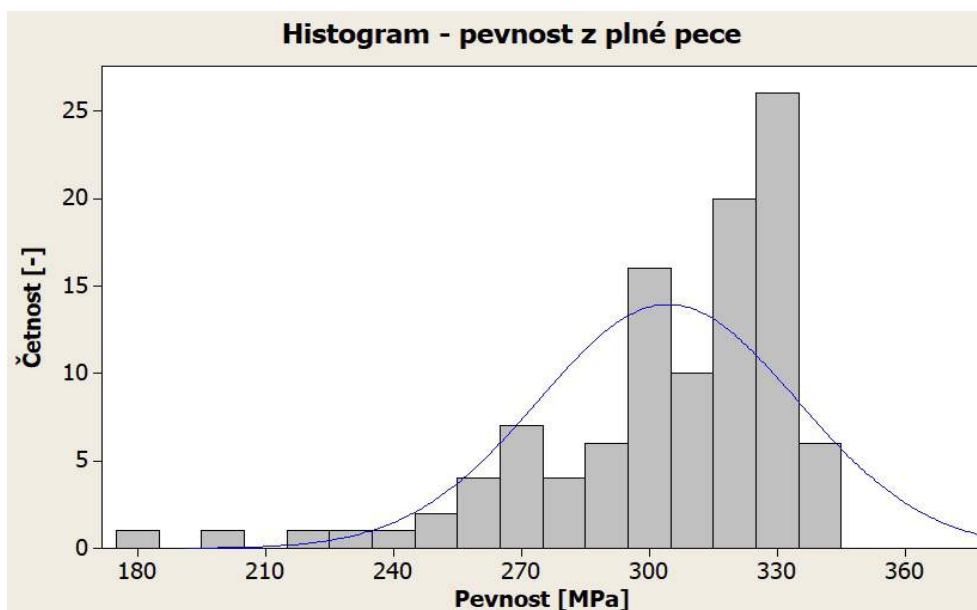
H_0 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který má normální rozdělení

H_1 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který nemá normální rozdělení

Tab. 21 Ověření normality hodnot pevnosti v plné peci.

Test	p-hodnota	Výsledek
Anderson-Darling	0,005	Zamítáme H_0

Na hladině 0,05 zamítáme nulovou hypotézu o normálním rozdělení náhodných složek. Pro lepší viditelnost rozložení dat můžeme vidět histogram (graf 4), který nám normalitu také nepotvrdil. Předpoklad normality není splněn.



Graf 4 Rozložení dat pevnosti z plné pece

Dále se zaměříme na předpoklad homogenity rozptylů. V našem případě ji budeme testovat pomocí Levenova testu (tab. 22). Nepoužijeme Bartlettův test, jelikož tento test je citlivý na porušení předpokladu normality. Definované hypotézy:

$$H_0: \text{dvojice rozptylů se neliší}$$

$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice rozptylů se liší}$$

Tab. 22 Ověření homogenity rozptylů hodnot pevnosti v plné peci.

Test	p-hodnota	Výsledek
Levenův	0,017	Zamítáme H_0

Podle Levenova testu zamítáme nulovou hypotézu a náhodné výběry dvojic rozptylů se tedy liší. Předpoklad homogenity rozptylů není splněn.

Jelikož jsou oba předpoklady porušeny, použijeme Kruskal-Wallisův test, který je neparametrickou obdobou analýzy rozptylu. Výsledky testu jsou uvedeny v tab. 23. Definované hypotézy:

$$H_0: \text{dvojice mediánů se neliší}$$

$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice mediánů se liší}$$

Tab. 23 Pevnost z plné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.

Kruskal-Wallisův test	p-hodnota	Výsledek
Umístění	0,000	Zamítáme H_0
Tyč	0,732	Nezamítáme H_0

Podle neparametrického testu vyšlo, že umístění tyčí v peci má skoro se spolehlivostí 100% vliv na výslednou pevnost. Naproti tomu výběr jednotlivé tyče ze stromečku neovlivňuje pevnost. Jelikož tento test je zaměřen na jednoduché třídění analýzy rozptylu, nemůžeme zde porovnat vzájemnou interakci mezi faktory umístění a volbou

tyče. Tuto interakci bychom mohli provést u analýzy ANOVA, kterou zde uvedeme i přes nesplněný předpoklad normality. V tab. 24 jsou uvedeny výsledné p-hodnoty analýzy ANOVA.

Tab. 24 Výsledky analýzy rozptylu ANOVA.

Faktory	p-hodnota
Umístění	0,088
Tyč	0,542
Umístění - tyč	0,185

Z výsledků této analýzy lze vyvodit, že s 95% spolehlivostí nemá na pevnost vliv žádný z faktorů ani jejich vzájemná interakce. Z Kruskal-Wallisova testu jsme však zjistili, že umístění tyčí je významné a špatnou volbou testovací analýzy bychom ke správnému výsledku nedošli.

4.5.2 Plná pec - tažnost

V tab. 25 jsou uvedeny veškeré hodnoty tažnosti, které se podařilo dosáhnout u tahových tyček tepelným zpracováním v plné peci.

Tab. 25 Naměřené hodnoty tažnosti v plné peci.

Plná pec - tažnost [%]									
Č. zk.	Umístění v peci								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,16	1,84	7,84	6,42	6,64	1,46	4,00	6,00	6,20
2	1,70	5,80	7,30	4,92	9,10	5,00	7,02	6,30	4,52
3	5,20	6,26	7,66	5,14	6,18	2,62	3,30	8,48	7,30
4	2,50	7,52	7,66	5,62	5,66	3,12	6,62	10,04	6,00
5	1,30	5,06	8,64	7,42	6,18	3,16	4,96	7,90	6,86
6	2,12	2,52	5,50	4,44	4,04	3,24	2,72	6,96	6,28
7	1,76	7,14	6,48	3,12	5,44	2,04	3,80	6,78	5,82
8	2,70	6,16	4,42	4,96	5,36	3,98	4,94	9,18	5,66
9	2,60	3,88	6,80	5,98	7,66	1,92	3,50	6,74	5,00
10	2,44	6,46	8,00	9,04	9,68	1,94	3,42	6,52	7,10
11	2,64	3,18	8,40	3,94	7,34	2,14	6,38	7,12	9,36
12	2,10	2,44	8,30	6,82	10,10	2,36	4,08	9,30	6,44

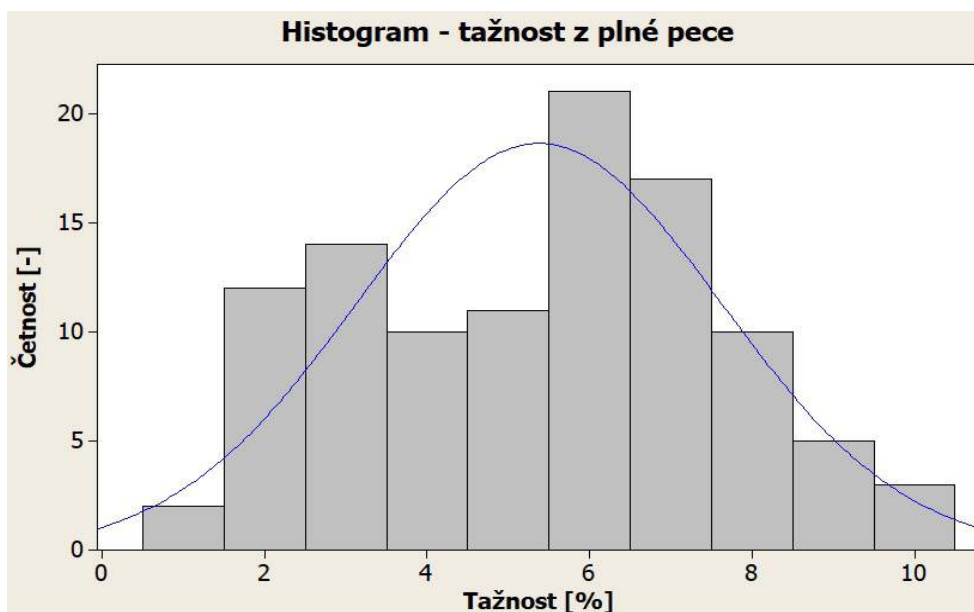
Normalitu jsme ověřovali jako v předešlém případě pomocí Anderson-Darlingova testu. Výsledky jsou uvedeny v tab. 26. Hypotézy jsme stanovili následovně:

- H_0 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který má normální rozdělení
 H_1 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který nemá normální rozdělení

Tab. 26 Ověření normality hodnot tažnosti v plné peci.

Testy	P - hodnota	Výsledek
Anderson-Darling	0,010	Zamítáme H_0

Ani v tomto případě jsme normalitu nepotvrdili, takže předpoklad zamítáme. Pro lepší viditelnost rozložení dat můžeme vidět histogram v grafu 5.



Graf 5 Rozložení dat tažnosti z plné pece

Následuje Levenův test, jehož hypotézy jsou zobrazeny níže. Výsledky testu jsou uvedeny v tab. 27.

$$H_0: \text{dvojice rozptylů se neliší}$$
$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice rozptylů se liší}$$

Tab. 27 Ověření homogenity rozptylů hodnot tažnosti v plné peci.

Test	p-hodnota	Výsledek
Levenův	0,345	Nezamítáme H_0

Podle Levenova testu nezamítáme nulovou hypotézu a náhodné výběry dvojic rozptylů se neliší. Předpoklad homogenity rozptylů je splněn. Nyní použijeme Kruskal-Wallisův test. Výsledky testu jsou zobrazeny v tab. 28. Definované hypotézy:

$$H_0: \text{dvojice mediánů se neliší}$$
$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice mediánů se liší}$$

Tab. 28 Tažnost z plné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.

Kruskal-Wallisův test	p-hodnota	Výsledek
Umístění	0,000	Zamítáme H_0
Tyč	0,356	Nezamítáme H_0

Na výslednou tažnost tahových tyček má stejně jako u pevnosti vliv pouze umístění v peci. Volba tyče je i v tomto případě nepodstatná.

4.5.3 Prázdna pec - pevnost

V tab. 29 jsou uvedeny veškeré hodnoty pevnosti, které se podařilo dosáhnout u tahových tyček tepelným zpracováním v prázdné peci.

Tab. 29 Naměřené hodnoty pevnosti v prázdné peci.

Prázdna pec – pevnost [MPa]									
Č. zk.	Umístění v peci								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	318,23	328,09	332,95	322,25	341,97	337,10	331,68	301,50	327,86
2	224,37	324,66	326,33	266,56	335,99	336,03	330,66	304,82	331,29
3	261,92	331,08	330,53	217,98	331,96	318,13	334,60	327,70	329,60
4	319,14	329,19	331,88	323,84	323,34	299,19	333,72	331,52	327,89
5	338,70	324,35	334,40	326,10	325,40	322,91	326,59	303,20	322,95
6	332,03	326,46	248,95	319,53	340,55	329,91	332,90	301,88	327,37
7	317,90	333,20	187,00	320,36	326,84	310,39	326,59	323,55	325,26
8	309,48	301,21	329,78	327,26	330,33	314,73	334,19	323,71	330,56
9	331,90	274,87	331,41	321,32	338,32	332,84	333,62	314,42	323,68
10	308,27	325,81	337,75	328,74	342,36	334,77	337,82	313,59	325,84
11	317,45	332,48	331,50	327,57	329,23	315,79	332,97	325,06	329,73
12	309,51	327,71	329,23	325,86	331,33	194,45	335,43	329,28	331,24

Ověříme normalitu náhodných složek, jehož výsledek je uveden v tab. 30. Hypotézy jsou definovány následovně:

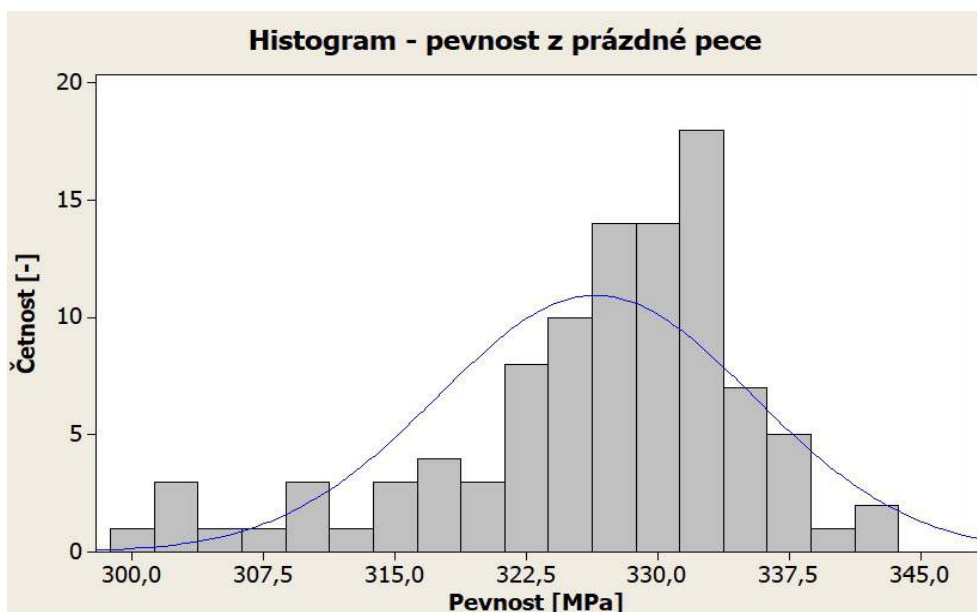
H_0 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který má normální rozdělení

H_1 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který nemá normální rozdělení

Tab. 30 Ověření normality hodnot pevnosti v prázdné peci.

Test	p-hodnota	Výsledek
Anderson-Darling	0,005	Zamítáme H_0

Nulovou hypotézu o normálním rozdělení náhodných složek jsme zamítli. Předpoklad normality není splněn a v grafu 6 je zobrazen histogram rozdělení dat pevnosti.



Graf 6 Rozložení dat pevnosti z prázdné pece

Pomocí Levenova testu budeme chtít splnit předpoklad o homogenitě rozptylů. Hypotézy:

$$H_0: \text{dvojice rozptylů se neliší}$$

$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice rozptylů se liší}$$

Tab. 31 Ověření homogenity rozptylů hodnot pevnosti v prázdné peci.

Test	p-hodnota	Výsledek
Levenův	0,000	Zamítáme H_0

Náhodné výběry dvojic rozptylů se liší, protože jsme zamítli nulovou hypotézu. U prázdné pece v případě pevnosti nevyšel ani jeden z předpokladů. Následně budeme testovat analýzu rozptylu podle Kruskal-Wallisova testu. Definované hypotézy:

$$H_0: \text{dvojice mediánů se neliší}$$

$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice mediánů se liší}$$

Tab. 32 Pevnost z prázdné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.

Kruskal-Wallisův test	p-hodnota	Výsledek
Umístění	0,000	Zamítáme H_0
Tyč	0,239	Nezamítáme H_0

V prázdné peci má na pevnost vliv pouze umístění, jelikož jeho p-hodnota je nižší než zvolená hladina významnosti 0,05. U faktoru volby tyče je p-hodnota vysoko nad hladinou významnosti.

4.5.4 Prázdňá pec - tažňost

V tab. 33 jsou uvedeny veškeré hodnoty tažňosti, které se podařilo dosáhnout u tahových tyček tepelným zpracováním v prázdňé peci.

Tab. 33 Naměřené hodnoty tažňosti v prázdňé peci.

Prázdňá pec - tažňost [%]									
Č. zk.	Umístění v peci								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,26	8,74	8,94	8,68	8,02	8,66	8,64	8,34	9,62
2	5,92	9,04	7,12	8,62	7,20	9,52	6,82	8,56	9,92
3	6,94	7,42	9,60	8,42	8,38	8,62	9,50	8,02	10,14
4	8,50	8,08	9,82	8,98	6,38	5,18	8,70	8,96	8,54
5	9,96	9,48	8,60	8,82	6,14	6,14	6,60	8,12	8,30
6	8,90	8,10	7,88	8,38	9,44	6,96	7,56	7,38	10,28
7	7,54	8,04	4,34	8,44	9,50	6,04	6,40	8,14	7,50
8	6,32	7,90	9,38	8,98	7,60	8,48	7,72	8,60	9,74
9	7,72	7,98	7,76	8,00	7,44	8,28	8,22	9,96	8,54
10	5,58	9,60	9,82	10,60	9,40	8,98	8,96	9,92	9,44
11	7,90	9,92	9,30	9,38	8,34	9,84	8,52	9,80	9,56
12	7,10	7,12	8,38	9,44	9,68	8,22	8,68	9,14	9,92

Normalitu budeme ověřovat pomocí Anderson-Darlingův testu, jehož výsledek je uveden v tab. 34. Hypotézy jsme definovali následovně:

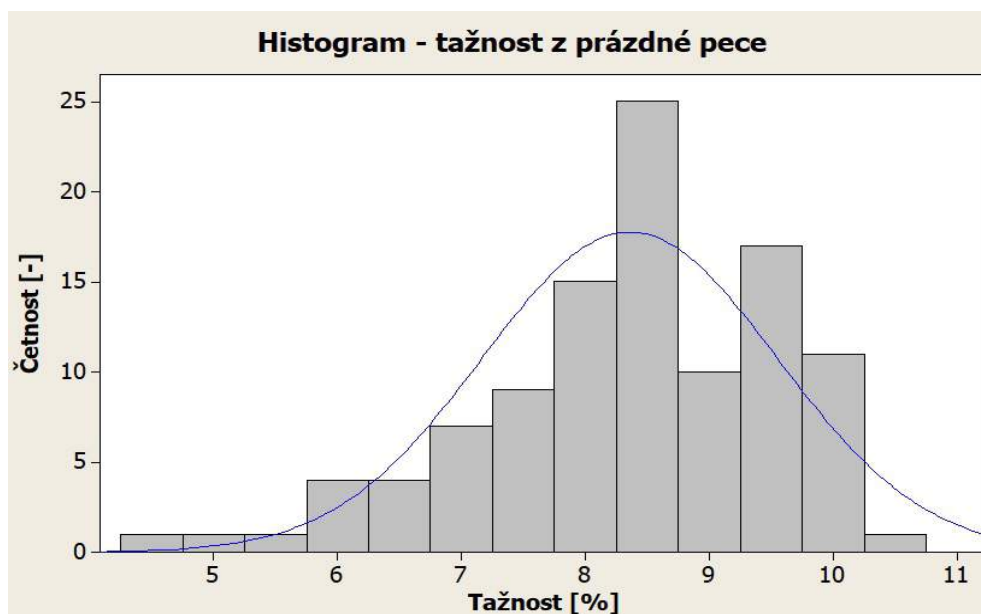
H_0 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který má normální rozdělení

H_1 : výběrový soubor pochází ze základního souboru, který nemá normální rozdělení

Tab. 34 Ověření normality hodnot tažňosti v prázdňé peci.

Test	p-hodnota	Výsledek
Anderson-Darling	0,005	Zamítáme H_0

Nulovou hypotézu zamítáme, tudíž normální rozložení můžeme vyloučit. V grafu 7 je zobrazen histogram naměřených hodnot. Předpoklad normality není splněn.



Graf 7 Rozložení dat tažnosti z prázdné pece

Dále se zaměříme na předpoklad homogenity rozptylů pomocí Levenova testu. Definované hypotézy:

$$H_0: \text{dvojice rozptylů se neliší}$$

$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice rozptylů se liší}$$

Tab. 35 Ověření homogenity rozptylů hodnot tažnosti v prázdné peci.

Test	p-hodnota	Výsledek
Levenův	0,201	Nezamítáme H_0

Předpoklad homogenity rozptylů je splněn, avšak hodnoty nemají normální rozdělení, tudíž i zde budeme testovat za pomoci Kruskal-Wallisova testu. Definované hypotézy:

$$H_0: \text{dvojice mediánů se neliší}$$

$$H_1: \text{aspoň jedna dvojice mediánů se liší}$$

Tab. 36 Tažnost z prázdné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.

Kruskal-Wallisův test	p-hodnota	Výsledek
Umístění	0,007	Zamítáme H_0
Tyč	0,054	Nezamítáme H_0

Podle Kruskal-Wallisova testu nám faktor umístění ukazuje vliv na tažnost v prázdné peci. Volba tyče neovlivňuje výslednou tažnost, protože její hodnota je nad hladinou významnosti 0,05.

4.5.5 Výsledky z pece KNC/H 1000/65

Dále jsme provedli měření mechanických vlastností u tahových tyček z posledního odlitého stromečku k ověření účinnosti modifikace. Výsledky jsou zobrazeny v tab. 37. V poslední řadě bylo provedeno měření hodnot pevnosti a tažnosti u tahových tyček ze dvou stromečků, které byly tepelně zpracovány v peci KNC/H 1000/65. Těmito výsledky si chceme ověřit, zda je tepelné zpracování běžným způsobem v pořádku. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 38

Tab. 37 Mechanické vlastnosti u tahových tyček z posledního stromečku.

Tahové tyčky z posledního stromečku			
Číslo zkoušky	Vzorek	Pevnost [MPa]	Tažnost [%]
1	tyč 1	329,60	5,80
2	tyč 1	331,54	6,98
3	tyč 2	334,04	7,80
4	tyč 2	336,94	7,54
5	tyč 3	323,66	4,66
6	tyč 3	335,46	7,98

Tab. 38 Mechanické vlastnosti u tahových tyček z pece KNC/H 1000/65.

Tahové tyčky z pece KNC/H 1000/65				
Číslo zkoušky	Vzorek	Pevnost [MPa]	Tažnost [%]	Chyba
1	tyč 1A	329,85	8,04	-
2	tyč 1A	329,52	8,00	-
3	tyč 1B	331,02	8,84	-
4	tyč 1B	330,27	7,76	-
5	tyč 2A	322,62	6,20	-
6	tyč 2A	326,04	7,80	-
7	tyč 2B	338,63	8,64	-
8	tyč 2B	332,32	9,72	-
9	tyč 3A	200,75	8,80	-
10	tyč 3A	46,71	0,06	proklouznutí čelistí
11	tyč 3B	333,26	9,30	-
12	tyč 3B	332,35	9,24	-

Z dosažených výsledků mechanických vlastností z posledního odlitého stromečku jsme si ověřili, že modifikace taveniny byla i po 30 min dostatečně účinná. U všech šesti tyček bylo dosaženo vyšší pevnosti než požadovaných 310 MPa. Tažnost vyšla také vyšší než požadovaných 5 %, výjimkou je pouze hodnota 4,66 % u zkoušky č. 5.

Také jsme si ověřili, že tepelné zpracování odlitků ve starší pec KNC/H 1000/65, která je používána v běžné výrobě, je v pořádku. Pokud nebereme v úvahu tyč ze zkoušky č. 10, kdy došlo k chybě při měření, povedlo se dosáhnout u všech tyčí vyšší než požadované hodnoty tažnosti. Hodnoty pevnosti jsou také vyšší než požadované, výjimkou je pouze tyč ze zkoušky č. 9.

4.6 Rozbor metalografických vzorků

K dosažení správných výsledků bylo nutné mít i dobře připravenou taveninu. K ověření struktury připravené slitiny se provedlo několik výbrusů z obou použitých pecí na tepelné zpracování. Na obr. 56 je uveden výbrus ze vzorku, který se tepelně zpracovával v nové peci KNC/V 1000/65. Na obr. 57 je zobrazen výbrus ze vzorku z pece KNC/H 1000/65. Ze vzorků jsme se přesvědčili, že se ve strukturách nevyskytují nečistoty, které by ovlivňovaly výsledky měření.



Zvětšení 25x



Zvětšení 100x

Obr. 56 Struktura vzorku z pece KNC/V 1000/65



Zvětšení 25x



Zvětšení 50x

Obr. 57 Struktura vzorku z pece KNC/H 1000/65

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjistit, zda výsledné hodnoty mechanických vlastností ovlivňuje umístění hliníkových odlitků v peci tepelného zpracování. Tento experiment byl proveden ve společnosti MESIT foundry, a.s. Cílem experimentu bylo dosažení zvýšených hodnot mechanických vlastností, především pevnosti alespoň 310 MPa, meze kluzu 240 MPa a tažnosti 5 % při použití nové pece KNC/V 1000/65. Dále porovnání výsledků mechanických vlastností v prázdné a plně obsazené peci a porovnání výsledků se starším typem pece na tepelné zpracování označené KNC/H 1000/65. Zkušebními vzorky pro diplomovou práci byly zvoleny tahové tyčky, pro které se navrhla a zkonstruovala nová forma.

Dříve se pro výrobu tahových tyček používala forma, do které se vkládal keramický filtr. V nové formě došlo k nahrazení keramického filtru plátnovými filtry. Pozitivní vliv konstrukce nové formy a použití nových filtrů byl prokázán i pomocí simulace softwaru MAGMASOFT. Lepších výsledků bylo dosaženo při běžné sériové výrobě. V tyčkách se nevyskytovaly oxidy a nečistoty, které by zkreslovaly výsledky zkoušek.

První tepelné zpracování tahových tyček probíhalo v plné peci, kdy společně s tyčkami byly v peci i silnostěnné odlitky. Tahové tyčky byly rozmístěny v peci do devíti pozic, které odpovídají umístění termočlánků během kalibrace tohoto zařízení. Špatné rozmístění těchto odlitků v plné peci nebo zbytečně přeplněná pec může ve výsledku snížit hodnoty mechanických vlastností. Podle neparametrického testu bylo prokázáno, že rozmístění tahových tyček v plné peci má zásadní vliv na dobré výsledky mechanických vlastností. Z Kruskal-Wallisova testu vychází, že umístění tyček v peci má téměř se 100% spolehlivostí vliv na výslednou pevnost. Naproti tomu volba jednotlivé tyčky ze stromečku neovlivňuje pevnost. Výsledná tažnost je stejně jako u pevnosti ovlivněna pouze umístěním tyček v peci, ne však volbou tyčky ze stromečku.

Tepelné zpracování tahových tyček následně probíhalo i v prázdné peci za nezměněných podmínek. Stejně jako u plné pece, i zde jsme porovnávali hodnoty pomocí Kruskal-Wallisova testu. Z výsledku bylo potvrzeno, že pevnost a tažnost dosahují výborných výsledků, které převyšují minimální požadované hodnoty dle materiálové normy. I v tomto případě jsme došli k závěru, že na výslednou pevnost má vliv umístění tahových tyček v peci. Stejně jako v plné peci i zde neovlivňuje výsledky pevnosti volba tyček ze stromečku. Podle statistiky je výsledná tažnost ovlivněna pouze umístěním tyček, výběr tyčky ze stromečku je zanedbatelný.

Při experimentu byl také využit starší typ pece KNC/H 1000/65, ve které jsme si ověřili, pomocí posledního odlitého stromečku, účinnost modifikace taveniny. Výsledné hodnoty mechanických vlastností naznačují, že i po 30 minutách byla modifikace taveniny stále dostatečně účinná. Dále se v peci tepelně zpracovaly tahové tyčky ze dvou náhodně vybraných stromečků, které dokázaly správnou funkčnost běžně používané pece v provozu.

Z naměřených hodnot pevnosti a tažnosti, které byly statisticky ověřeny, můžeme říct, že provoz nové pece firmy LAC KNC/V 1000/65 je správně nastaven. Pro plnou i prázdnou pec však vychází podle Kruskal-Wallisova testu, že na výsledné mechanické vlastnosti má zásadní vliv pouze umístění odlitků v peci tepelného zpracování, nikoliv volba tyče ze stromečku. Je na posouzení společnosti MESIT foundry, a.s. vyzkoušet jiný typ úložného koše, např. oválného pro tepelné zpracování. Další možností může být jiné rozmístění odlitků v koši, zejména pak silnostěnných odlitků, tak aby nezůstávaly v zákrytu jiných dílů. Je však nutné zaručit vždy správné proudění vzduchu a rovnoměrnou cirkulaci horkého vzduchu v peci.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2790-6.
2. ŠERÁK, Jan, Martin LIBICH, Dalibor VOJTĚCH a Pavel NOVÁK. Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti a korozní odolnost hliníkových slitin. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren české republiky, 2015, LXIII(5-6), 158-161. ISSN 0037-6825.
3. Global Construction industry Opportunities and its Aluminium usage. *Lodec Jinshu* [online]. Shanghai: Lodec Jinshu, 2016 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://lodecjinshu.com/en/global-construction-industry/>
4. GRUZLESKI, John a Bernard CLOSSET. *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys*. 1. vydání. Des Plaines, Illinois: American Foundrymen's Society, Inc., 1990. ISBN 0-87433-121-8.
5. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
6. Karoserie nového Audi A8: Hliník na ústupu!. *Auto.cz* [online]. 2017 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://auto.cz/karoserie-noveho-audi-a8-hlinik-na-ustupu-105526>
7. NĚMEC, Milan a Jaroslav PROVAZNÍK. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
8. MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 978-80-260-7132-7.
9. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
10. JIRÁSEK, Jakub a Martin SIVEK, *Ložiska nerostů: multimediální učební text*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2007. ISBN 978-80-248-1276-2. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/index.html>
11. *European Aluminium* [online]. 2016 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://www.european-aluminium.eu/>
12. Jedovatý kal sa dostal do Dunaja: Hynu ryby!. *Pluska* [online]. 2010 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://pluska.sk/zahranicie/jedovaty-kal-dostal-do-dunaja.html>
13. SLOVALCO [online]. Žiar nad Hronom [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <http://www.slovalco.sk/>
14. MICHNA, Štefan. *Technologie a zpracování hliníkových materiálů*. Vyd. 2., dopl. Ústí nad Labem: Štefan Michna, 2015. ISBN 978-80-260-7706-0.
15. PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech: celostátní vysokoškolská učebnice pro skupinu studijních oborů Strojírenství a ostatní kovodělná výroba*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
16. NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.

17. JONŠTA, Zdeněk. *Nauka o kovech II*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-958-1.
18. LAŠTOVICA, Petr. Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. Vedoucí práce Ing. Markéta Říhová.
19. PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK, Přemysl RYŠ, Mojmír CENEK a Antonín HRBEK. *Nauka o materiálu*. 1.[díl], *Nauka o kovech*. 2., zcela přeprac. a rozš. vyd. Praha: Academia, 1973.
20. Výrobky z hliníku. Hliník [online]. 2018 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://hapldominik.estranky.cz/fotoalbum/vyrobky-z-hliniku/>
21. JANKURA, Daniel, Janette BREZINOVÁ, Jarmila ŠEVČÍKOVÁ, Dagmar DRAGANOVSKÁ a Anna GUZANOVÁ. *Materiály v strojárskzej výrobe a technológje ich finalizácie*. Košice]: Technická univerzita v Košiciach, 2011. ISBN 978-80-553-0786-2.
22. MOHYLA, Miroslav. *Strojirenské materiály I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1994. ISBN 80-7078-261-7.
23. DOLEŽAL, Jaroslav, Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ a Vojtěch KUČERA. Současné poznatky o vlivu doprovodných prvků ve slitinách Al-Si. *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren české republiky, 2015, **LXIII**(9-10), 345-348. ISSN 0037-6825.
24. GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. *Zlievarenstvo neželezných kovov*. Bratislava, 1988. Edícia hutníckej literatúry.
25. SILBERNAGEL, Arnošt. *Nauka o materiálu: struktura a vlastnosti kovových materiálů*. [Díl] 1. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1991. ISBN 80-7078-116-5.
26. POLMEAR, Ian. *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. 4. Elsevier Science, 2005. ISBN 0750663715.
27. BOLIBRUCHOVÁ, Dana a Eva TILLOVÁ. *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. V Žiline: Žilinská univerzita, 2005. Vysokoškolské učebnice.
28. Grain refinement mechanism in an Al-Si-Mg alloy with scandium. ScienceDirect [online]. 2012 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0925838812011784>
29. Role of zirconium and impurities in grain refinement of aluminium with Al-Ti-B. *Materials Science and Technology* [online]. 1997, roč. 13, č. 9 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/20116712?accountid=17115>
30. Influence of Vanadium on the Microstructure of A319 Alloy. *Indian Institute of Metals* [online]. 2011, roč. 64, 4-5 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s12666-011-0109-2>
31. The basics of Aluminium modification. In: *Aluminiumindustry.org* [online]. 2013 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.aluminiumindustry.org/en/basics-aluminium-modification.html>

32. *Slévárenská ročenka 2017: Slitiny hliníku a hořčíku na odlitky*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2017. ISBN 978-80-02-02747-8.
33. *Aluminium Rheinfelden* [online]. RHEINFELDEN ALLOYS GmbH & Co., 2018 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://rheinfelden-alloys.eu/en/allyos/>
34. CHVOJKA, Jiří a Miroslav BRZOBOHATÝ. *Zpracování a použití hliníku a jeho slitin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Řada hutnické literatury.
35. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
36. MORES, Antonín a Milan NĚMEC. *Technologická zařízení sléváren*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04490-2.
37. *LAC: Art of Heating* [online]. Židlochovice: LAC, 2018 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/kalici-linka-na-zpracovani-hlinikovych-odlitku-knc-v-klv>
38. KARABAY, Sedat. 2008. Influence of AlB₂ 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. 2019-03-11]. ISBN 0261-3069. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306907001677>
39. MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01002-3.
40. O nás. *MESIT foundry* [online]. Uherské Hradiště: MESIT foundry, 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.mesitfoundry.cz/cs>
41. *ČSN EN 1706 (421433) A Hliník a slitiny hliníku - Odlitky - Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
42. BUDÍKOVÁ, Marie, Maria KRÁLOVÁ a Bohumil MAROŠ. *Průvodce základními statistickými metodami*. Praha: Grada, 2010. Expert. ISBN 978-80-247-3243-5.

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vícemateriálový rám Audi Space Frame [6]	10
Obr. 2 Bauxit [11]	11
Obr. 3 Podtržená hráz skládky s toxickým odpadem [12]	13
Obr. 4 Elektrolyzní pece [13].....	13
Obr. 5 Příklady hliníkových produktů [20].....	15
Obr. 6 Rozdělení slitin hliníku [25]	17
Obr. 7 Rozdělení tvářených slitin hliníku [26].....	17
Obr. 8 Vliv očkování na velikost zrna slitiny AlSi7 [1]	20
Obr. 9 Nukleace zárodků TiAl3 při peritektické reakci v systému Al-Ti [1]	21
Obr. 10 Struktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si [1]	24
Obr. 11 Křivky ochlazování v oblasti eutektika [1].....	25
Obr. 12 Závislost struktury eutektika na obsahu P a Na (podobné pro Sr) [1]	27
Obr. 13 Rovnovážný diagram Al-Si [1].....	28
Obr. 14 Odlitky ze slitin typu AlSi11 [33].....	29
Obr. 15 Odlitky ze slitiny AlSi12CuNiMg [33].....	30
Obr. 16 Odlitky ze slitin typu AlSi7Mg0,3 [33]	31
Obr. 17 Rovnovážný diagram Al-Cu [1], [25]	32
Obr. 18 Příklady odlitků ze slitin typu Al-Cu [33]	33
Obr. 19 Rovnovážný diagram Al-Mg [1], [25].....	34
Obr. 20 Skříň čerpadla ze slitiny AlMg5Si [33]	34
Obr. 21 Odlitky ze slitiny AlMg5Si2Mn [33].....	35
Obr. 22 Rovnovážný diagram Al-Zn [1].....	36
Obr. 23 Odlitky ze slitiny AlZn10Si8Mg [33].....	36
Obr. 24 Časový a teplotní průběh jednotlivých operací při vytvrzování [1]	37
Obr. 25 Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [1]	38
Obr. 26 Zařízení pro rozpouštěcí žíhání [37]	39
Obr. 27 Vznik pásem s vyšším obsahem legujících prvků [34].....	41
Obr. 28 Částečně koherentní precipitát [38]	41
Obr. 29 Nekoherentní precipitát [38].....	41
Obr. 30 Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [1].....	42
Obr. 31 Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti po vytvrzení [1]	42
Obr. 32 Průběh žíhání na odstranění vnitřního pnutí [5]	43
Obr. 33 Průběh stabilizačního žíhání [5].....	44
Obr. 34 Budovy společnosti MESIT holding [40]	46
Obr. 35 Forma s keramickým filtrem (vlevo), forma s plátnovými filtry (vpravo)	47
Obr. 36 Skořepina s keramickým filtrem (vlevo), skořepina s plátnovými filtry (vpravo)	47
Obr. 37 Chování taveniny v oblasti keramického filtru.....	48
Obr. 38 Trasovací částice v průběhu lití - původní filtr.....	48
Obr. 39 Chování taveniny v oblasti plátnových filtrů.....	49

Obr. 40 Charakter plnění - zaměřeno na oblast filtrů.....	49
Obr. 41 Trasovací částice v průběhu lití - nové filtry	50
Obr. 42 Zahlcený vzduch v obou variantách vtokové soustavy.....	50
Obr. 43 Původní voskový model (vlevo), nový voskový model (vpravo).....	51
Obr. 44 Obalovací robot.....	52
Obr. 45 Měření Dichte Indexu	53
Obr. 46 Odplyňování taveniny dmýcháním dusíku	54
Obr. 47 Připravená tavenina k odlévání	56
Obr. 48 Pec KNC/H 1000/65	57
Obr. 49 Poloha termočlánků v měřicím rámu	58
Obr. 50 Pec KNC/V 1000/65	58
Obr. 51 Umístění svazků v plném koši	58
Obr. 52 Umístění svazků v prázdném koši	59
Obr. 53 Trhací stroj ZDM 10/90 (vlevo), umístění průtahoměru mini MFA 2 (vpravo)	59
Obr. 54 Připojení přetržených konců tyček.....	60
Obr. 55 Rozdělení tahových tyček	60
Obr. 56 Struktura vzorku z pece KNC/V 1000/65	70
Obr. 57 Struktura vzorku z pece KNC/H 1000/65	70

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 Spotřeba hliníku v různých odvětvích průmyslu v roce 2014 [3].....	10
Tab. 2 Roční primární výroba hliníku dle IAI [8].....	11
Tab. 3 Hodnoty některých fyzikálních vlastností hliníku [8], [14].....	14
Tab. 4 Použití hliníku ve vybraných oblastech průmyslu [15], [18].....	15
Tab. 5 Využití a základní vlastnosti slitiny AlSi12 [1], [7], [19].....	29
Tab. 6 Využití a základní charakteristika některých slitin typu Al-Si-Cu [1].	30
Tab. 7 Využití a základní vlastnosti některých slitin typu Al-Si-Mg [1].	31
Tab. 8 Ochlazovací rychlost médií [5].....	39
Tab. 9 Rychlost ochlazování médií v závislosti na rychlosti proudění [5].	40
Tab. 10 Označení vybraných stavů odlitků [1], [5], [7].....	45
Tab. 11 Hodnoty teplot vstřikovacího lisu.....	51
Tab. 12 Sledované parametry během plnění formy.	51
Tab. 13 Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 dle normy ČSN EN 1706 [41].	53
Tab. 14 Parametry odplynování zařízením FDU od firmy FOSECO.	54
Tab. 15 Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 po prvním odplynění.....	55
Tab. 16 Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 po modifikaci.....	55
Tab. 17 Použité přípravky v připravované slitině.	55
Tab. 18 Výsledné chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6.	56
Tab. 19 Parametry tepelné zpracování odlévané slitiny EN AC-42200.	57
Tab. 20 Naměřené hodnoty pevnosti v plné peci.	61
Tab. 21 Ověření normality hodnot pevnosti v plné peci.	61
Tab. 22 Ověření homogenity rozptylů hodnot pevnosti v plné peci.	62
Tab. 23 Pevnost z plné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.	62
Tab. 24 Výsledky analýzy rozptylu ANOVA.	63
Tab. 25 Naměřené hodnoty tažnosti v plné peci.	63
Tab. 26 Ověření normality hodnot tažnosti v plné peci.	64
Tab. 27 Ověření homogenity rozptylů hodnot tažnosti v plné peci.	64
Tab. 28 Tažnost z plné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.	65
Tab. 29 Naměřené hodnoty pevnosti v prázdné peci.	65
Tab. 30 Ověření normality hodnot pevnosti v prázdné peci.	65
Tab. 31 Ověření homogenity rozptylů hodnot pevnosti v prázdné peci.	66
Tab. 32 Pevnost z prázdné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.....	66
Tab. 33 Naměřené hodnoty tažnosti v prázdné peci.	67
Tab. 34 Ověření normality hodnot tažnosti v prázdné peci.	67
Tab. 35 Ověření homogenity rozptylů hodnot tažnosti v prázdné peci.	68
Tab. 36 Tažnost z prázdné pece - výsledky Kruskal-Wallisova testu.....	68
Tab. 37 Mechanické vlastnosti u tahových tyček z posledního stromečku.	69
Tab. 38 Mechanické vlastnosti u tahových tyček z pece KNC/H 1000/65.....	69

SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

Graf 1 Státy s nejvyšší produkcí bauxitu [10].....	12
Graf 2 Rozdělení regionů dle výroby primárního hliníku [11]	12
Graf 3 Srovnání velikost zrn α -fáze při očkování skandiem a titanem [28]	23
Graf 4 Rozložení dat pevnosti z plné pece.....	62
Graf 5 Rozložení dat tažnosti z plné pece.....	64
Graf 6 Rozložení dat pevnosti z prázdné pece	66
Graf 7 Rozložení dat tažnosti z prázdné pece	68

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Protokol měření rovnoměrnosti teplot u pece KNC/V 1000/65
Příloha 2	Výsledné chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6
Příloha 3	Protokoly tepelného zpracování
Příloha 4	Protokoly naměřených hodnot tahových tyček