



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ ZE
SLITIN AL**

"OPTIMIZING THE AL CASTING HEAT TREATMENT"

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Barbora Ostrézi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Bc. Barbora Ostrží
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Slévárenská technologie
Vedoucí práce:	prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
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:

Optimalizace tepelného zpracování odlitků ze slitin Al

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optimalizovat parametry rozpouštěcího žíhání a umělého stárnutí (tj. teploty a především doby) tvarově složitých odlitků ze slitin Al, zhotovených technologií vytavitelného modelu.

Cíle diplomové práce:

Nalezení optimálních parametrů tepelného zpracování tvarově složitých odlitků ze slitin Al a to především v závislosti na tvarové konfiguraci a převažující tloušťce stěn odlitku.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0- 901716-66-9.

CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.

HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. Slévárenství, 2001, č. 10, s. 570 – 580. ISSN 0037-6825.

HORÁČEK, M., J. CILEČEK. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets, Foundry Trade Journal, U.K., Volume 180, Nr. 3641, 2007, p. 32 - 35. ISSN 0015-9042.

HORÁČEK, M. Accuracy of castings manufactured by the lost wax process, Foundry Trade Journal 3535, October, 1997, p. 424 - 429. ISSN 0015-9042.

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

Tato diplomová práce je zaměřena na tepelné zpracování slitiny hliníku AlSi7Mg0,6 a sledování vlivu chladicího média na její mechanické vlastnosti. První část práce se zabývá obecným popisem slitin hliníku, jejich chemickým složením, chováním a mechanickými vlastnostmi, se zvýšenou pozorností na slitiny Al-Si-Mg. Tato část je následována shrnutím běžně užívaných kroků tepelného zpracování slitin hliníku. Třetí část práce je poté věnována experimentu. Odlitky a zkušební tyčinky byly odlity metodou vytavitelného modelu ve společnosti Alucast, s.r.o. Po rozpouštěcím žíhání se odlitky a vzorky rychle ochladily ve čtyřech různých lázních. Následně byly všechny tyto vzorky podrobeny zkoušce tahem, kde byly vyhodnoceny jejich mechanické vlastnosti (mez pevnosti, mez kluzu a tažnost). Stejně tak byla pomocí mikroskopu vyhodnocena i dosažená mikrostruktura po tepelném zpracování. V poslední části jsou shrnuty dosažené výsledky.

Klíčová slova

Slitiny hliníku, tepelné zpracování, precipitace, chladící lázeň, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

This master's thesis focuses on the heat treatment of the aluminium alloy AlSi7Mg0,6 and also investigates the effects of different coolants usage on its mechanical properties. First part is dedicated to the description of aluminium alloys, their chemical composition, behaviour and mechanical properties with particular attention to the Al-Si-Mg alloys. This part was followed by the summary of commonly used heat treatment of aluminium alloys. The third part is dedicated to the experiment. Castings and test specimens were wax casted at Alucast, s.r.o. company. After annealing, the samples were quickly cooled down in four different coolants and underwent tensile testing. Their mechanical properties (tensile strength, yield point and ductility) were evaluated as well as microstructure. In the last part, the achieved results are presented.

Key words

Aluminium alloys, heat treatment, precipitation, coolants, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OSTRÉZÍ, Barbora. *Optimalizace tepelného zpracování odlitků ze slitin Al* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116482>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Horáček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace tepelného zpracování odlitků ze slitin Al** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Barbora Ostréží

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Rovněž děkuji Ing. Radimu Čagánkovi za ochotu a vstřícné jednání při realizaci experimentu a Ing. Jarmilu Cilečkovi za možnost uskutečnit diplomovou práci ve společnosti Alucast, s.r.o.

Mé poděkování také patří rodičům a rodině, že mě po celou dobu podporovali a umožnili mi studovat.

OBSAH

Abstrakt	
Prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
1 SLITINY HLINÍKU	9
1.1 Chemické složení hliníkových slitin	9
1.1.1 Přehled nečistot a legur ovlivňující strukturu slitin typu Al-Si	12
1.2 Slévárenské vlastnosti	13
1.3 Mechanické vlastnosti slitin typu Al-Si	13
1.4 Slitina typu Al-Si-Mg	14
1.4.1 Slitina AlSi7Mg0,6	15
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU	16
2.1 Vytvrzování	16
2.1.1 Rozpouštěcí žíhání	18
2.1.2 Ochlazení z žíhací teploty	20
2.1.3 Precipitační vytvrzování	24
2.2 Žíhání	29
2.3 Označení režimů tepelného zpracování	30
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31
3.1 Technologie vytavitelného modelu	31
3.2 Porovnání současné praxe tepelného zpracování ve slévárně	32
3.3 Praktická část	36
3.3.1 Varianty odlitků a zkušebních tyčinek	36
3.3.2 Proces lití	39
3.3.3 Tepelné zpracování	41
3.3.4 Měření mechanických vlastností	46
3.3.5 Sledování mikrostruktury	47
4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	49
4.1 Hodnocení mechanických vlastností	49
4.2 Hodnocení mikrostruktury	56
ZÁVĚR	59
Seznam použitých zdrojů	61
Seznam příloh	63

ÚVOD

Hliník se v dnešní době stal nedílnou součástí našeho života. Setkáváme se s ním od potravinářských obalů, příborů, zahradního nábytku, až po součásti automobilů a letadel. Právě automobilový a letecký průmysl určují hlavní využití hliníkových slitin. Dobrá zabíhavost umožňuje vyrábět odlitky složitých tvarů různými technologiemi, jako je tlakové lití či lití na vytavitelný model. Lehkost, pevnost a korozní odolnost dále rozšiřují jeho využití. Jednou z nevýhod hliníku je, že bez přísad nemá příliš dobré vlastnosti. Proto se legováním získávají nové slitiny, které již dosahují lepších vlastností, jak mechanických, chemických tak slévárenských.

Rozmach použití slitin hliníku v automobilovém, leteckém a raketovém průmyslu je zapříčiněn především jejich nízkou hmotností. Lze tak zredukovat celkovou hmotnost konstrukce stroje, což vede k nižší spotřebě paliva. Právě snížení emisí, vznikajících při spalování paliva, je jedním z kroků pro ochranu životního prostředí. Z tohoto důvodu se také tato odvětví potýkají s četnými legislativními omezeními.

Odlitky s nejnižší hmotností jsou ze slitin typu Al-Mg, mají však vysoký sklon k naplynění a jejich výroba je velice složitá. Pro vyšší mechanické vlastnosti se používá tepelné zpracování, konkrétně vytvrzování, které také snižuje vnitřní pnutí odlitků. Tímto způsobem se zlepšuje i korozní odolnost a obrobitelnost. Vhodným nastavením parametrů lze získat různé kombinace mechanických vlastností např. dosáhnout vysokých tažností.

Právě procesem vytvrzování se zabývá tato diplomová práce. Vytvrzovaná slitina je typu Al-Si-Mg a byla použita pro odlitek na němž byl proveden experiment za účelem zjištění vlivu kalící lázně na mechanické vlastnosti. Tento odlitek byl dále rozšířen na dvě varianty s různou vtokovou a „nálitkovou soustavou“. Odlitek byl vyroben technologií vytavitelného modelu do samonosné skořepiny. Po rozpouštěcím žhání byly odlitky zchlazeny do čtyř různých lázní. Vzorky byly podrobeny měření mechanických vlastností. Po porovnání výsledků byla vyhodnocena nejlepší varianta.

1 SLITINY HLINÍKU

Hliník patří mezi nejrozšířenější kovy, co se týče výskytu v zemské kůře. Získává se z bauxitu, kde je hlavní složkou oxid hlinitý. Z něj se pomocí elektrolytického procesu získá hliník. Jeho výroba se započala v roce 1886, což ho dělá poměrně mladým. Největší rozmach přišel po 2. světové válce a dnes se řadí jako druhý nejpoužívanější kov, hned po železe. [1,4]

Čistý hliník nemá příliš dobré mechanické vlastnosti, proto se používá ve slitinách s různými prvky, kdy lze dosáhnout kombinací chemických, fyzikálních, mechanických a technologických vlastností prvků vysokých hodnot konečných vlastností výrobku. Pevnost v tahu čistého hliníku je pod 100 MPa a tvrdost okolo 20÷30 HB. Má vysokou elektrickou a tepelnou vodivost, nevýhodou je vysoké skupenské teplo tání 396 kJ.kg^{-1} , což činí vysokou energetickou náročnost na roztavení hliníku. Díky tvorbě oxidické vrstvy Al_2O_3 na povrchu jsou výrobky ze slitin Al velmi odolné vůči korozi. Lze dosáhnout plasticity až nad 20 %, avšak u slitin tažnost klesá. Přísadové prvky obecně zlepšují technologické vlastnosti. [1,4,5]

Slitiny hliníku se díky jejich chemické odolnosti a nízké hmotnosti využívají v široké škále oblastí, nejvíce však v automobilovém průmyslu. Další odvětví jsou stavebnictví, doprava, energetický, potravinářský a chemický průmysl, obalový materiál. Tzv. hutní hliník s čistotou $98 \div 99,7 \%$ se využívá k deoxidaci oceli. Čím dál častěji se odlitky vyrábí pomocí vysokotlakého lití. Přehled některých fyzikálních vlastností čistého Al je uveden v tab. 1. [1,4,5,6]

Tab. 1 fyzikální vlastnosti čistého hliníku [1]

Vlastnosti	Hodnoty
Krystalická mřížka	Kubická plošně centrovaná (FCC)
Hustota	$2\,699 \text{ kg.m}^{-3}$
Teplota tání	$660 \text{ }^\circ\text{C}$
Tepelná vodivost	$235 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (při $20 \text{ }^\circ\text{C}$)

1.1 Chemické složení hliníkových slitin

Všechny slitiny jsou složeny z následujících prvků:

- **Základní prvek** – určuje druh slitiny, zde je to Al
- **Hlavní přísadový prvek** – rozhoduje o vlastnostech slitin, spolu se základním prvkem určují typ slitiny, obsah tohoto prvku je druhý největší ve slitině. Dle tří hlavních prvků se dělí na:
 - Al – **Si** → siluminy
 - Al – **Cu** → duraluminium
 - Al – **Mg** → hydronalium

- **Vedlejší přísadový prvek** – příznivě ovlivňuje některé vlastnosti a strukturu, kompenzuje nepříznivé vlivy jiných prvků, jeho obsah je nižší než obsah hlavního prvku, ve slitině jich může být hned několik, je důležitý z hlediska tepelného zpracování (Al-Si-Cu, Al-Si-Mg)
- **Doprovodné prvky** – jsou ty prvky, které do slitiny nebyly přidány úmyslně (z vyzdívek, náradí, ve vsázce), při vysokém obsahu působí nepříznivě, jsou považovány za nečistoty

Ve slévárenství se nejčastěji používají slitiny, kde je hlavní přísadový prvek křemík → **Al-Si** (siluminy). Jejich velkou výhodou jsou dobré mechanické vlastnosti a korozní odolnost. Mají také dobrou svařitelnost. Proto se využívají hojně v automobilovém a leteckém průmyslu. [1,5,7]

Co se týče struktury slitiny, jsou téměř vždy tvořené heterogenní strukturou s následujícími složkami: [1,6]

Tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$ – jde o substituční (atom přísadového prvku nahradí v mřížce atom Al) tuhý roztok s maximální rozpustností 1,65 % Si při eutektické teplotě. Rozpustnost se dále snižuje s klesající teplotou.

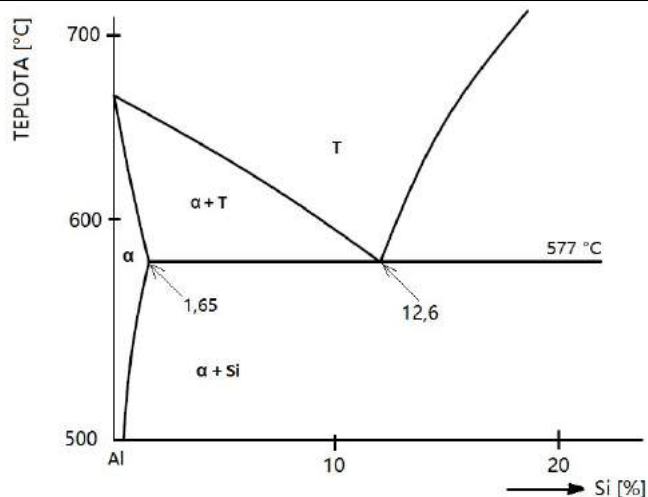
Eutektikum – skládá se z fáze $\alpha(\text{Al})$ a krystalů čistého křemíku nebo z jeho sloučeniny (intermetalické fáze).

Primární fáze – vyskytuje se u slitin s vysokým obsahem přísadového prvku (Si), než je eutektické složení, který je vyloučen jako hrubé krystaly Si. Při tuhnutí dochází k vyloučení primární fáze přísadového prvku a po překročení eutektické teploty pokračuje krystalizací eutektika.

Intermetalická fáze – jsou to fáze, které vznikly z přísadových a doprovodných prvků a jejich obsah je vyšší, než je maximální rozpustnost v kovové matici. Mají vlastní krystalickou strukturu, která se liší obsahem, kombinací přítomných prvků a podmínkami tuhnutí slitiny. Fáze se dělí na valenční, elektronové a intersticiální.

Pro vytvrzování je důležitá struktura slitiny. Jedním z důležitých aspektů je rozpustnost křemíku. Si má ve slitinách při eutektické teplotě pouze malou rozpustnost, a to 1,65 %. Proto je obsah křemíku ve slévárenských slitinách vždy vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v tuhém roztoku a vždy obsahují eutektikum $\alpha(\text{Al})$ -Si. Eutektická teplota je 577 °C a koncentrace je 12,6 %. Eutektikum a jeho morfologie je ve vytvrzování důležitá při sferoidizaci. Siluminy lze rozdělit do tří skupin, dle obsahu křemíku v rovnovážném diagramu na obr. 1:

- Podeutektické (7 ÷ 11 % Si)
- Eutektické (11,5 ÷ 13 % Si)
- Nadeutektické (14 ÷ 17 % Si; výjimečně až do 25 %)



Obr. 1 Část rovnovážného diagramu Al-Si [1]

Podeutektické

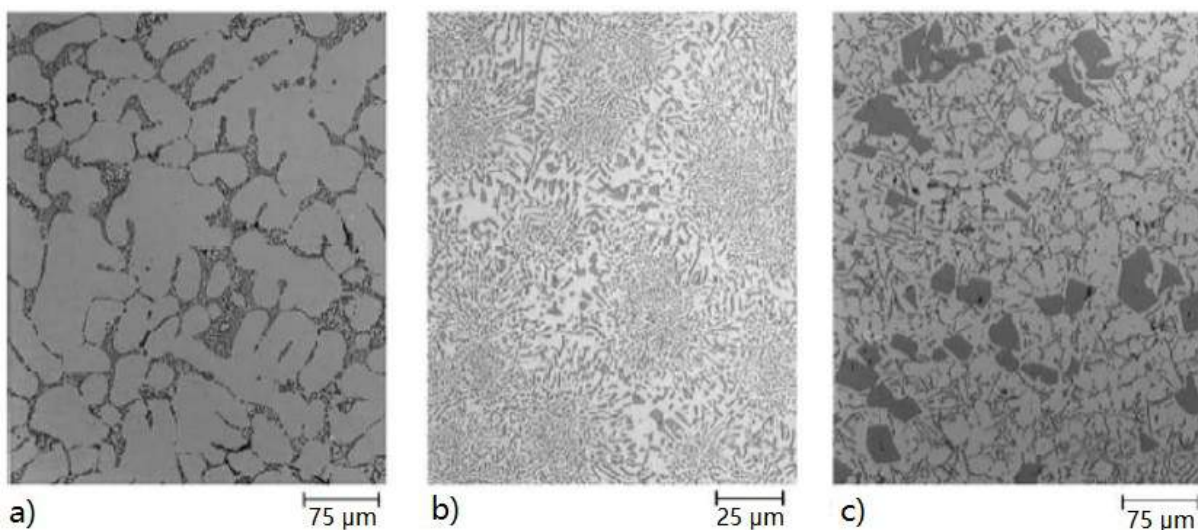
Struktura je tvořena síťovým primárních dendritů fáze α (Al) a eutektikem, jenž je vyloučeno v mezidendritických prostorech obr. 2 a). Pokud roste obsah křemíku, roste i obsah eutektika. Vždy obsahují více než 5 % Si. Tyto siluminy se používají, kvůli nižší zabíhavosti (oproti eutektickým slitinám) na tvarově jednodušší a mechanicky méně namáhané součásti. [1,6,7]

Eutektické

Jsou tvořeny čistě eutektickou strukturou obr. 2 b), pokud je však slitina modifikována můžou se vyskytovat i jednotlivé krystaly fáze α (Al). Díky výborné zabíhavosti se eutektické siluminy využívají na tenkostěnné a tvarově složité odlitky. [1,6,7]

Nadeutektické

Tyto siluminy jsou tvořeny převážně primárními krystaly křemíku uloženého v eutektické matici obr. 2 c). Hrubé jehlicové krystaly vznikají díky větší krystalizační schopnosti křemíku oproti Al, a způsobují křehkost slitiny. Je tedy nutné je modifikovat a strukturu zjemnit. Jejich výhodou je malá teplotní roztažnost a vysoká odolnost proti abrazivnímu opotřebení. [1,6,7]



Obr. 2 Struktura slitiny, a) podeutektická, b) eutektická, c) nadeutektická [7]

1.1.1 Přehled nečistot a legur ovlivňující strukturu slitin typu Al-Si [1,4,6,7,8,9]

Si – křemík → zlepšuje téměř všechny technologické a slévárenské vlastnosti. Při vyšším obsahu zužuje interval tuhnutí, zvyšuje se zabíhavost, kluzné vlastnosti, korozní odolnost otěruvzdornost a snižuje se tepelná roztažnost, nebezpečí trhlin a prasklin, sklon vzniku mikrostaženin. Při nižším obsahu eutektika je vhodné slitinu očkovat, naopak při vyšším podílu eutektika se slitina modifikuje.

Cu – měď → legováním slitiny do 5 % Cu se získává vyšší pevnost a tvrdost, zlepšuje obrobitelnost. Spolu s hliníkem tvoří fázi CuAl_2 . Nevýhodou je, že snižuje tažnost a korozní odolnost, při tuhnutí Cu značně rozšiřuje interval tuhnutí. Spolu s Mg tvoří vícesložkové síťový, které tuhne až při teplotě 480 °C. Cu se nedá ze slitin běžnými metalurgickými postupy odstranit.

Mg – hořčík → prvek umožňuje provádět vytvrzování za tepla, proto je velice důležitý. Jeho obsah je od 0,3 do 0,7 %. V litém stavu nemá praktický žádné účinky na vlastnosti, ty se projeví až při vytvrzování, kdy se s rostoucím obsahem Mg zvyšuje pevnost. S křemíkem tvoří intermetalickou fázi Mg_2Si , která se dále rozpouští precipitačním žháním.

Fe – železo → má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti a zhoršuje obrobitelnost, odolnost proti korozi, a proto je považováno za nečistotu. Do slitin se dostává ze vsázky, kovových forem či náradí a v Al nemá téměř žádnou rozpustnost. Již při malých koncentracích tvoří intermetalické fáze, jako jsou např. $\beta\text{-AlFeSi}$, jež má tvar jehlic, a $\alpha\text{-AlFeMnSi}$, jež je tvarově složitější (dle tvaru je nazývána jako „čínské písmo“). Tyto fáze výrazně zhoršují tažnost. Jejich kompenzace se provádí pomocí manganu. Do slitin se však železo do obsahu pod 1 % přidává záměrně, jelikož při tlakovém lití snižuje lepení slitiny na kovovou formu. Běžně je ve slitinách obsaženo do 0,6 %, u vysokopevnostních pod 0,15 %.

Mn – mangan → jeho hlavní úkol je kompenzovat negativní vliv železa. Mění morfologii železa z jehlic do souvislého tvaru. Obsah Mn se má rovnat 1/2 obsahu železa. Díky tomu se snižuje křehkost, zvyšují se mechanické vlastnosti a korozní odolnost. Při vyšším obsahu Mn, Fe a Cr může vznikat tzv. „kal“, což je nežádoucí tvrdá fáze. [1]

Ni – nikl → slitiny s obsahem okolo 1 ÷ 2 % Ni mají díky intermetalické fázi Al_3Ni dobré mechanické vlastnosti za zvýšených teplot a snížený stupeň tepelné roztažnosti. Nikl nemá velký vliv na obrobitelnost a korozní odolnost, dále se s rostoucím obsahem Ni slévárenské vlastnosti snižují. [8]

Ti – titan → jeho největší význam je při očkování, kdy vzniklá sloučenina Al_3Ti slouží jako krystalizační zárodek pro nukleaci primární fáze $\alpha(\text{Al})$ a zjemňuje strukturu. Jemná struktura má potom příznivý vliv na obrobitelnost, možnosti povrchové úpravy a lepší odolnost proti korozi. Titan je karbidotvorný prvek, při vyšších koncentracích tvoří hrubé krystaly, které zhoršují obrobitelnost.

Zn – zinek → řadí se mezi netypické legury a je používán v obsahu 1÷3 % ve slitinách Al-Si-Cu. Zlepšuje obrobitelnost, tekutost a zabíhavost slitin, u tlakového lití snižují lepení kovu na formu. Také mírně zvyšuje mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi.

Ca – vápník → je považován především za nežádoucí prvek, který ve slitině způsobuje naplynění a tvorbu mikrostaženin již při malých obsazích, a to 50 ppm. Do slitiny se dostává spolu s křemíkem v tisícinách procenta. Má slabý modifikační účinek, ten se však nijak nevyužívá.

Be – berylium → již při malých obsazích v řádu několika setin vytváří na hladině ochranný film, který chrání před oxidací. Také zlepšuje mechanické vlastnosti, i tak se používá výjimečně.

Li – lithium → pro jeho velmi malou hustotu se používá s obsahem do 5 % pro snížení hustoty slitin. Tyto slitiny jsou velmi lehké a užívají se v leteckém a kosmickém průmyslu. Zlepšují mechanické vlastnosti při nízkých teplotách. Jejich nevýhodou je však vysoká reaktivnost při metalurgických procesech, proto je jejich používání zatím značně omezeno.

Ag – stříbro → používá se zcela výjimečně. Má však příznivý účinek na vytvrzování a zlepšuje odolnost proti korozi.

Vanad, bór, chrom, zirkonium → občas se používají pro zjemnění primárního zrna.

Olovo, vizmut, kadmium → považují se za nežádoucí prvky, jelikož snižují houževnatost slitiny.

Dále se mohou jako legující prvky vyskytovat také **antimon, fosfor, sodík, stroncium** a **cín**.

1.2 Slévárenské vlastnosti

Jsou to ty vlastnosti, které souvisí s procesem odlévání. Nejlepšími slévárenskými vlastnostmi disponují slitiny s úzkým intervalem tuhnutí. Naopak ty, co mají široký interval tuhnutí, mají špatné slévárenské vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou především:

- zabíhavost
- sklon k naplynění
- sklon ke stahování a tvorbě ředin
- sklon k tvorbě prasklin a trhlin
- smrštění

Důležitá vlastnost je zabíhavost, která souvisí s šířkou intervalu tuhnutí. Při úzkém intervalu, který mají eutektické slitiny, je zabíhavost, tedy schopnost vyplnit dutinu formy, podstatně lepší než u slitin se širokým intervalem. Dále je zde důležitý obsah oxidických vměstků, povrchové napětí kovu, smáčivost formy, konstrukce odlitku a podmínky odlévání. Tekutost kovu je brána jako viskozita kovu a se zabíhavostí souvisí pouze částečně. [1,8,5]

1.3 Mechanické vlastnosti slitin typu Al-Si

Mechanické vlastnosti ovlivňuje celé řada činitelů, jako je chemické složení, struktura slitiny, přítomnosti a tvaru intermetalických fází, tloušťka stěny odlitku, způsob odlévání (tlakové lití do kokil x lití do pískových forem) či nečistoty. Ty se do slitiny mohou dostat vlivem metalurgických reakcí, z vyzdívky, ze vsázky apod., nebo se jedná o legující prvky vyskytující se ve stopových prvcích. Lepší mechanické vlastnosti zajišťuje jemnozrnná struktura vzniklá rychlým ochlazováním při tuhnutí. S rostoucí tloušťkou stěny mechanické vlastnosti klesají. Nejčastější mechanické zkoušky jsou zkoušky tvrdosti a tahem. Dále je to zkouška tlakem, vrubové houževnatosti (rázem v ohybu), sledování vlastností za zvýšených teplot či

rozměrová stabilita. Dle mechanických vlastností se volí vhodný materiál a jeho předpokládané použití tak, aby výrobek splňoval zadané požadavky. [1,3,9]

Pro měření tvrdosti se využívá Brinellova metoda a běžně se u slitin Al-Si pohybuje v mezích 60÷80 HB. U vytvrzovaných je to potom výše, a to kolem 100 HB. Lze také říct, že s rostoucím obsahem legur roste pevnost. Výhodou u zkoušky tvrdosti je, že se provádí přímo na odlitku a není potřeba výrobek deformovat. [1,3]

Velice důležitá je zkouška tahem, díky níž získáme mez pevnosti R_m , mez kluzu $R_{p0,2}$ a tažnost A , popřípadě kontrakce Z . Pevnost se běžně pohybuje okolo 150÷250 MPa. Vytvrzením se pevnost zvýší až o 30÷50 %, u slitin Al-Si-Mg se dosahuje hodnot až okolo 330 MPa, dále roste i mez kluzu, a to až o 80 %, a také tažnost roste z běžných 1÷4 % na podstatně vyšší hodnoty asi o 200 %. [1,3,5]

Co podstatně snižuje mechanické vlastnosti, jsou zvýšené provozní teploty, a to u některých slitin (Al-Si-Mg) již při 200 °C (slitin Al-Cu do 250 °C), kdy může dojít k tečení. Naopak tažnost roste. Významnou roli zde také hraje čas, kdy při delším časovém namáhání se odlitek plasticky deformuje (creep). Vyšší stabilita se získá přísadou mědi, niklu nebo kobaltu. Za snížené teploty se díky krystalické (FCC) mřížce vlastnosti lehce zlepšují. Lze říct, že se tvrdost dokonce mírně zvyšuje. [1,3]

Jak již bylo uvedeno výše, křemík je zde hlavní legující prvek a je tedy velice důležité, jak se ve struktuře nachází. Tvar a rozptýlení eutektického křemíku tedy výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti lze zlepšit hned několika způsoby: [1,3,7]

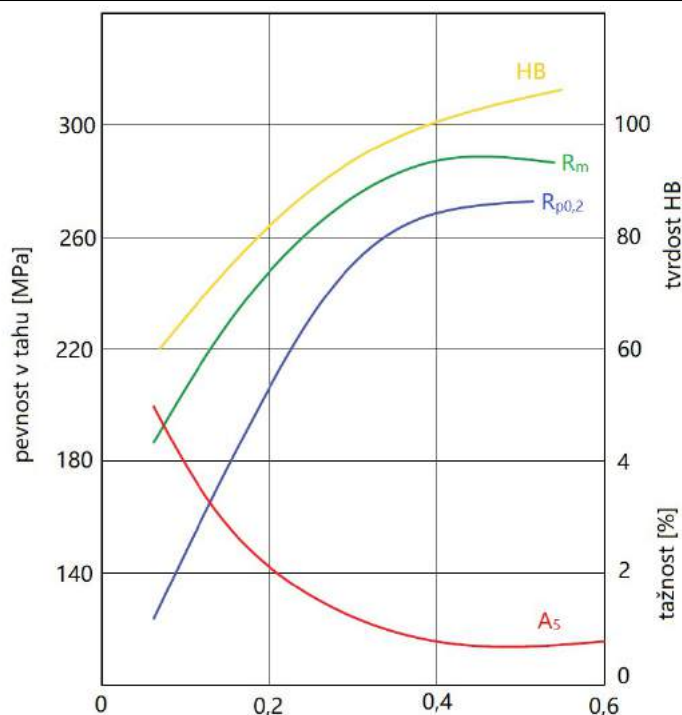
- Krystalizace primární fáze
- Krystalizace eutektika ve slitinách Al-Si
- Očkování slitiny
- Modifikace slitin
- Tepelné zpracování odlitků

Tato práce je však zaměřená na tepelné zpracování – vytvrzováním, a tudíž další uvedené způsoby nebudou více rozebírány. Lze je vyhledat např. v literatuře [1],[3].

1.4 Slitina typu Al-Si-Mg

Jedná se o slitiny s přísadou Mg, které mají v litém stavu průměrné mechanické vlastnosti, ale velmi dobré slévárenské vlastnosti. Díky obsahu 0,25÷0,45 % Mg (někdy až 0,7 %) se jedná o slitiny s nejvyššími mechanickými vlastnostmi, jelikož Mg umožňuje vytvrzování za tepla. Hořčík se ve slitině vylučuje při běžné rychlosti ochlazování jako intermetalická fáze Mg_2Si . Po vytvrzení dochází k zvýšení pevnosti, tvrdosti, ale současně se snižuje tažnost, jak jde vidět na obr. 3. Tyto vlastnosti dále ovlivňuje obsah Mg, kdy s rostoucím obsahem zvyšují a zlepšuje se korozní odolnost. I rostoucí obsah křemíku má vliv na lepší slévárenské vlastnosti a svařitelnost. [1,6]

Odlitky této slitiny se řadí mezi vysoce namáhané a nejčastěji se používají v automobilovém, leteckém a raketovém průmyslu, ale i v jiných odvětvích, kde se vyžaduje vysoká pevnost a houževnatost, např. pro motorové díly. Způsob odlévání je jak do pískových, kovových, tak do keramických forem, gravitačně a tlakově. [1,6]



Obr. 3 Vliv obsahu Mg na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si 9 po vytvrzení [1]

1.4.1 Slitina AlSi7Mg0,6

Její značení je dle evropské normy ČSN EN 1706: EN AC-42200. Ve slévárně je běžně označovaná jako A357, dle normy US Aluminium Association. Hlavní legující prvky jsou zde křemík a hořčík. Jedná se o slitinu typu Al-Si s nejvyššími mechanickými vlastnostmi viz tab.2 pro slitiny litých na vytavitelný model. [1,6]

Tab. 2 přehled mechanických vlastností [14]

Slitina	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A [%]	Tvrdost [HBW]
EN AC - AlSi7Mg0,6	290	240	2	90

Mají minimální množství příměsí a nečistot, a proto mají velmi dobré slévárenské vlastnosti a odolnost proti korozi. Také mají výbornou odolnost proti vzniku trhlin a jsou nepropustné. Z těchto důvodů byla tato slitina vybrána pro odlitek, jenž je dále upravován vytvrzováním, jemuž se tato diplomová práce věnuje. Její chemické složení je uvedeno v tab. 3, jak uvádí zdroj[23]. [1,6]

Tab. 3 Přehled základního chemického složení slitiny AlSi7Mg0,6 [23]

Slitina	Chemické složení v [%]							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Be
AlSi7Mg0,6	6,50-7,50	0,20	0,20	0,10	0,45-0,70	0,10	0,04-0,20	0,07

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ SLITIN HLINÍKU

Tepelné zpracování se provádí hned z několika důvodů: zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřního pnutí v odlitku a ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře. V neposlední řadě lze též dosáhnout lepší obrobiteľnosti odlitků, zvýšení korozní odolnosti, popřípadě dosáhnout změny jiných technologických vlastností. Tepelné zpracování má větší význam u odlitků litých do pískových forem, či při gravitačním lití do kovových forem než u tlakově litých odlitků, jelikož je jejich struktura díky pomalejšímu ochlazování hrubší a vyskytují se zde segregace přísadových a doprovodných prvků. U tlakového lití mají odlitky strukturu více homogenní, a tudíž zde vytvrzení nemá příliš velký vliv. [1,6,11]

Rozlišují se dva druhy tepelného zpracování:

-vytvrzování

-žihání

Velice důležitou roli zde hraje teplotní režim celého cyklu, přičemž každý druh tepelného zpracování má tento cyklus odlišný. Rozdíl je v rychlosti ohřevu, výdrži na určité teplotě a rychlosti následného ochlazení. Z toho plyne, že žihací cyklus závisí především na teplotě a čase. Hodnoty žihacích teplot jsou závislé na chemickém složení slitiny, disperzitě výchozí struktury a tloušťce stěn odlitků. Tyto hodnoty je nutné dodržovat v úzkém rozmezí, tj. nepřekročit toleranci $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy u homogenizačního žihání je tato tolerance dokonce nižší, a to $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Doba homogenizace se pohybuje běžně okolo 3÷6 hod. [1,8,10]

2.1 Vytvrzování

Vytvrzování patří mezi nejčastější a nejvýznamnější způsoby tepelného zpracování slitin hliníku. Jeho pomocí lze dosahovat vyšších fyzikálních a mechanických vlastností, jako je mez pevnosti (R_m) a mez kluzu ($R_{p0,2}$), avšak zároveň dochází ke snížení tažnosti (A) slitiny. Tyto vytvrzené slitiny je poté možno dlouhodobě mechanicky zatěžovat i za vyšších teplot, a to až do 275°C . Využívá se zde změny rozpustnosti přísadových prvků (legur) v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ při chlazení. Dle toho, zda mají, či nemají slitiny přísadový prvek, se dělí na: [1,2,3,6]

- **vytvrditelné** – tyto slitiny mají přísadový prvek, a je tedy možno je tepelně zpracovat. Typickými zástupci vytvrditelných slitin jsou především slitiny Al-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg.

- **nevytvrditelné** – tyto slitiny nemají přísadový prvek a jejich zpevnění lze dosáhnout pouze tvářením za studena. Deformací původní mřížky vzniká nová mřížka a je tak získána rekrytalizovaná struktura. Vyšší pevnosti je dosaženo substitučním zpevněním tuhého roztoku (legováním). Typickými zástupci jsou slitiny Al-Mn, Al-Mg.

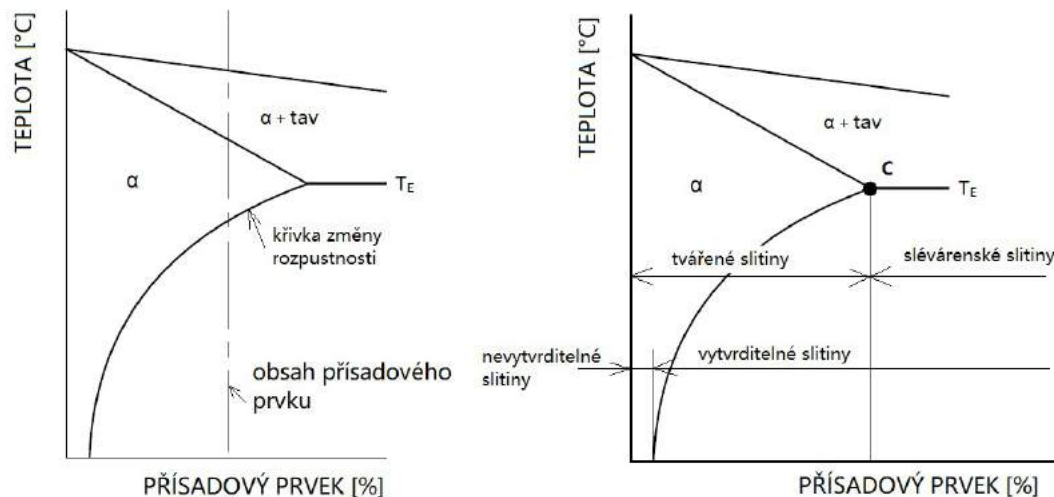
Nutné podmínkami pro vytvrzování: [1,3,13]

- přítomnost přísadového prvku (nejčastěji jsou to prvky Cu a Mg, dále Zn a Ni)
- přísadový prvek má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$
- rozpustnost legujícího (přísadového) prvku v tuhém roztoku s rostoucí teplotou vzrůstá

Dále se slitiny mohou dělit dle užití:

- slitiny pro tváření
- slitiny pro odlitky

Zde rozhoduje především chemické složení a obsah přísadového prvku. Pro tváření se používají slitiny s nižším obsahem přísadových prvků, a to až do koncentrace odpovídající bodu C v obr. 4. Díky převládajícímu tuhému roztoku jsou tyto slitiny lépe tvářitelné než slitiny s vyšším procentem přísadového prvku, než je tomu v bodě C. Právě ty jsou vhodné jako slévárenské slitiny. Mají ve struktuře eutektikum, jsou hůře tvářitelné, ale mají dobré slévárenské vlastnosti. [4,5,6]



Obr. 4 Diagram změny rozpustnosti a rozdělení slitin hliníku [1][4]

Vlivem pomalého ochlazení odlitku v pískové či kovové formě dochází k vyloučení přísadového prvku v podobě intermetalických fází (např. CuAl_2 , Mg_2Si), které negativně ovlivňuje pevnost a houževnatost. Úkolem vytvrzení je poté zpětné rozpuštění těchto fází do homogenního roztoku $\alpha(\text{Al})$ a následné vyloučení v podobě jemných koherentních, či semi-koherentních útvarů. Vyloučením těchto útvarů je, na rozdíl od pomalého ochlazení, dosahováno zpevnění slitiny. [1,2,13]

Průběh vytvrzování se skládá ze tří částí:

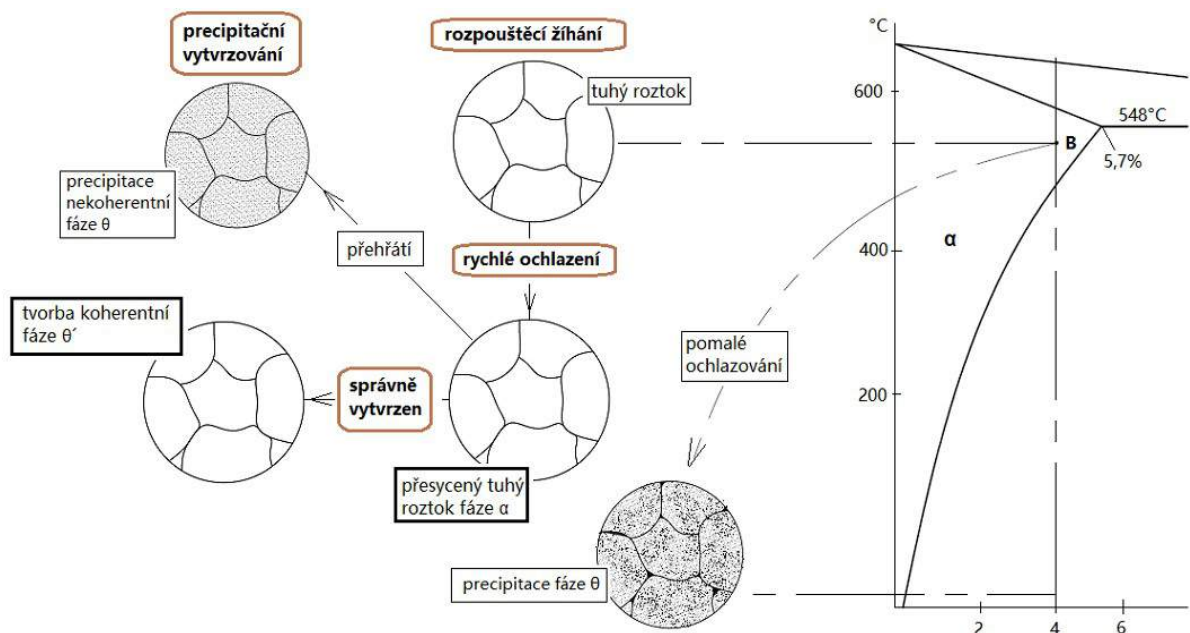
- rozpouštěcí žíhání $\rightarrow$ vznik tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$
- ochlazení $\rightarrow$ vytvoří se přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$
- precipitační vytvrzení (stárnutí) $\rightarrow$ zpevnění struktury

Hlavní parametry, které ovlivňují mechanické vlastnosti u TZ:

- teplota rozpouštěcího žíhání
- doba výdrže na teplotě při RŽ
- teplota chladicí lázně
- druh kalící lázně (voda, polymer)
- rychlost ochlazení
- rozmístění odlitků v koši
- teplota při umělém stárnutí
- doba výdrže na teplotě při US

2.1.1 Rozpouštěcí žihání

Jedním z důležitých kroků vytvrzování je právě rozpouštěcí žihání. Je potřebné pro získání homogenního roztoku $\alpha(\text{Al})$ pomocí maximálního rozpuštění intermetalických fází, které v sobě obsahují přísadový prvek, jenž umožňuje vytvrzení tuhého roztoku. Významnou roli zde hraje teplota a doba výdrže na této teplotě, která se pohybuje okolo $8 \div 15^\circ\text{C}$ pod eutektickou teplotou, avšak zároveň musí být nad křivkou změny rozpustnosti. V obr. 5 se jedná o bod B. Pro každou slitinu je tato teplota jiná, závisí především na chemickém složení slitiny, množství přísadového prvku (jeho maximální rozpustnosti). Rozpouštěcí teplota se nesmí překročit, jelikož by mohlo v místech, kde se nachází nerozpuštěné částice vytvrzující fáze, dojít k natavování slitiny na hranic zrn. Zrno by hrublo a mohlo by dojít k deformaci odlitku a následnému snížení mechanických vlastností. Na druhou stranu nedosažení této teploty by zapříčinilo nedokonalé rozpuštění fází a nezískaly by se požadované vlastnosti. Tolerance je zde velmi malá, přibližně $3 \div 5^\circ\text{C}$. [2,6,8,11]

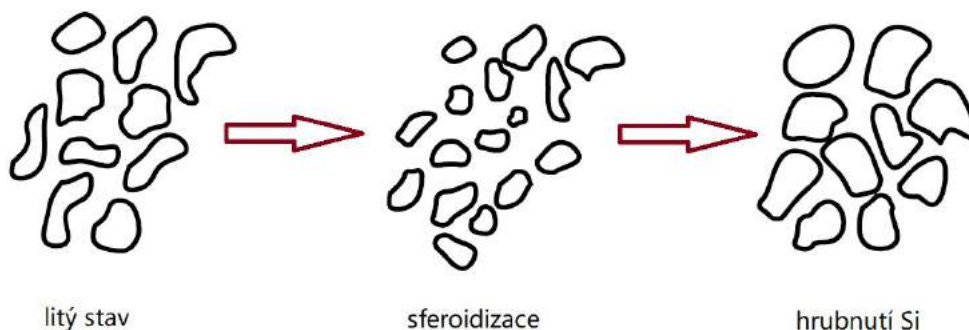


Obr. 5 Diagram teplotního průběhu vytvrzování u slitiny Al-Cu [1]

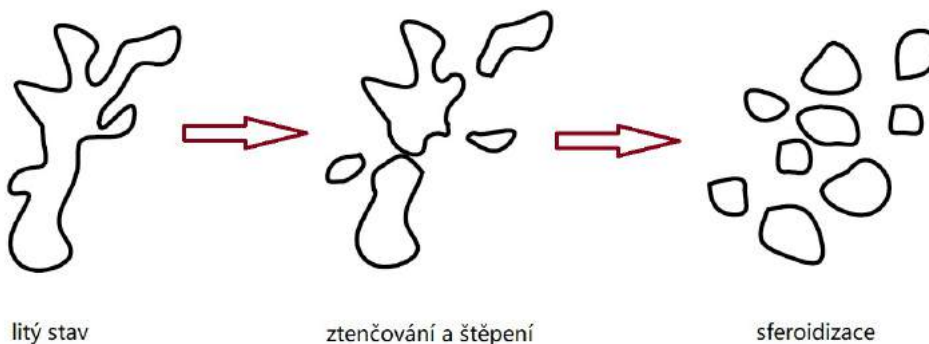
Druhou významnou roli hraje rychlost ohřívání na požadovanou teplotu. Neměla by být příliš rychlá, jinak by se nestihla intermetalická fáze a s ní i přísadový prvek dostatečně rozpustit. Proto se rychlost musí volit spíše pomalá. Stejně tak se odvíjí i prodleva na požadované homogenizační teplotě. Prodleva musí být dostatečně dlouhá pro získání homogenního tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ a také pro rozpuštění maximálního množství vytvrzující fáze. Vliv zde má disperzita výchozí struktury.

U silnostěnných odlitků litých do pískových forem je struktura hrubší, a proto je potřeba, aby byla doba rozpouštěcího žihání podstatně delší, než je tomu u tenkostěnných odlitků litých do kovových a pískových forem, které mají jemnozrnnou strukturu. Proto je interval teplot velice široký, a to od několika minut, až po 15 hod. Tato doba ovšem nemá být příliš dlouhá, jelikož by docházelo k hrubnutí zrna a zhoršily by se mechanické vlastnosti. Rychlosti a doby výdrže, které slévárna Alucast používá s ohledem na druh používané slitiny, jsou uvedeny v příloze 1. [1,2,13]

Dále může být struktura ovlivněna sferoidizací eutektického křemíku při dostatečně dlouhé době zahřívání na určitou teplotu. Křemík má významný vliv na mechanické vlastnosti dle toho, zda je slitina modifikovaná, či nikoliv. V litém stavu je eutektický křemík ve slitinách hrubý, má deskovitý (jehlicovitý) tvar a slitinu způsobuje křehkou s nízkými mechanickými vlastnostmi. Pomocí tepelného zpracování se tyčinka eutektického křemíku sbalí do oblých tvarů. Díky tomu získá slitina vyšší tažnosti. U modifikované slitiny tento proces nastává rychleji než u slitin nemodifikovaných, protože se zde eutektický křemík vyskytuje v jemných, částečně zaoblených tvarech, viz obr. 6. Tomuto jevu napomáhá i dostatečně rychlé ochlazení slitiny. Proces sferoidizace u nemodifikovaných slitin se skládá ze ztenčování hrubého deskovitého křemíku, který se dále větví – štěpí. Vzniklé, už oddělené větvičky dále sferoidizují viz obr. 7. Při příliš dlouhé době zahřívání tyto částice hrubnou. Sferoidizaci tedy podporuje modifikace a zvýšená rychlost chlazení. Jelikož dochází ke změně morfologie eutektického křemíku, je potřeba zajistit dlouhé časy prodlevy při rozpouštěcím žíhání. [1,2,6,14]



Obr. 6 Rozpad částic modifikované slitiny [14]



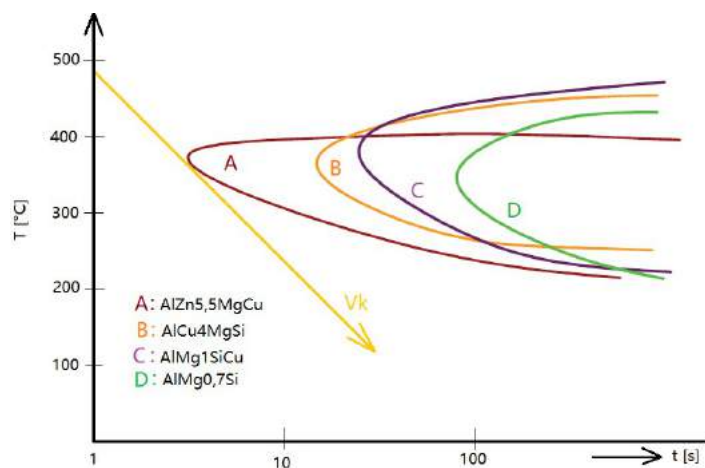
Obr. 7 Rozpad částic nemodifikované slitiny [14]

2.1.2 Ochlazení z žíhací teploty

Ochlazování se provádí za účelem získání přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ při pokojové teplotě, a tím zabránění vyloučení vytvrzujících fází legujícího prvku z tuhého roztoku. Proto ochlazení musí následovat krátce po vyjmutí z žíhací pece. [1,10]

Při ochlazení hraje velkou roli rychlost ochlazování a rozmístění odlitků v koši. Volba rychlosti ochlazování a teplota kalící lázně, již je nejčastěji voda, je závislá především na citlivosti slitiny na ochlazení, velikosti odlitků a jejich počtu. Aby při přemísťování odlitků z žíhací pece nedošlo k nechtěnému ochlazení vlivem okolní atmosféry, musí být toto přemístění do chladicí lázně provedeno v čase kratším než 10 sekund u tenkostěnných odlitků, a 20 sekund u odlitků silnostěnných. Volba správné rychlosti ochlazování je stěžejním kritériem zajištění požadovaných mechanických vlastností odlitku. Při velice rychlém ochlazení by mohlo v odlitku dojít k vysokým vnitřním pnutím a následné deformaci odlitku, a to především u silnostěnných a tvarově komplikovaných odlitků. Naopak při pomalém ochlazení by docházelo k segregaci v podobě hrubých útvarů na hranicích zrn, což by vedlo ke zhoršení požadovaných vlastností. [1,2,8,15]

Proto se k určení rychlosti používají tzv. C křivky (obr. 8), které znázorňují kritické rychlosti ochlazování – v_k – pro dané slitiny. Kritická rychlost je nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při které nedojde k rozpadu přesyceného tuhého roztoku [3]. Každá slitina má svoji specifickou kritickou rychlost ochlazování, přičemž se tyto rychlosti pohybují v průměru okolo $100\text{ }^{\circ}\text{C.s}^{-1}$ v intervalu $400\div 290\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mezi nejcitlivější slitiny na rychlost ochlazení patří slitiny typu Al-Zn-Mg [2], jak lze vidět na obr. 8, kdy je potřeba se pohybovat takřka nadkritickou rychlostí. Při ochlazování je snaha vyhnout tzv. „nosu“, kdy se dosahuje rychlosti ochlazení až $200\text{ }^{\circ}\text{C.s}^{-1}$. [3,12,18]



Obr. 8 C křivka s kritickou rychlostí ochlazování pro různé slitiny [3]

Pro získání vztahu mezi ochlazovaným materiálem a chladícím prostředím se užívá Grossmannův faktor H , který je definován následujícím vztahem [3]:

$$H = \frac{h}{2 \cdot k}$$

kde: h ...koeficient mezipovrchové tepelné vodivosti [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

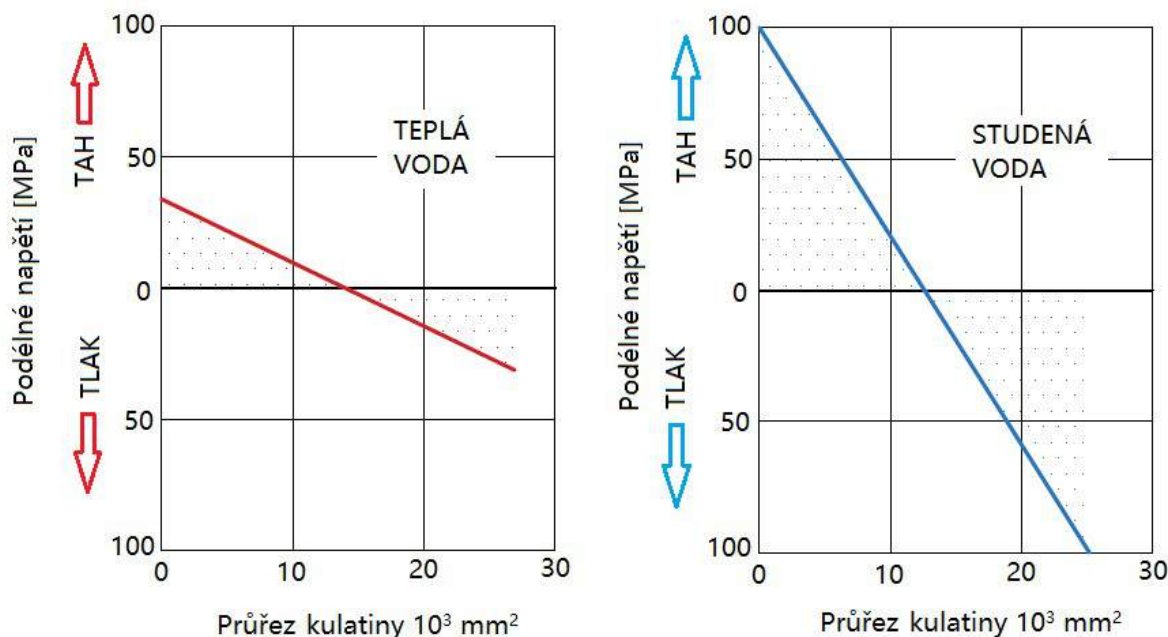
k ...tepelná vodivost chlazeného materiálu [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

Čím vyšší je hodnota faktoru H , tím intenzivnější je ochlazování materiálu. Faktor také značně souvisí s teplotou chladicího média a jeho rychlostí proudění. Významné je i použití druhu chladicí lázně, zda se bude ochlazovat ve vodě, lázni na bázi soli, či glykolu s různou koncentrací. [2,3]

Rychlost přemístění odlitků z pece do chladicí lázně je jednou ze stěžejních operací ochlazování. Tato rychlost musí být co největší, aby bylo minimalizováno ochlazení odlitků na vzduchu. Teplota nesmí klesnout pod $415\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proto se používají žíhací pece s otevíratelným dnem, kdy koš s odlitky „propadne“ do chladicího bazénu. Celý tento proces se musí uskutečnit v intervalu $5\div 20\text{ s}$, aby se tak zabránilo segregaci fází. Čas je měřen od otevření dveří pece, po úplné zamočení koše v ochlazovací lázni. [2,3,10,19]

Jak tedy bylo uvedeno výše, pro rovnoměrné ochlazení všech odlitků uložených v koši je nutné zajistit dostatečný objem chladicí lázně a proudění vody, přičemž proud nesmí směřovat přímo na odlitky, aby nevznikalo lokální ochlazení, čímž by mohlo dojít k tvorbě vnitřního pnutí. Je proto doporučeno s košem ve vodě mírně pohybovat. Důležité je také rozmístění odlitků. U silnostěnných může při ochlazování vznikat var vody, a tím se značně omezí ochlazovací efekt. To je zapříčiněno díky ochrannému účinku parní obálky, kterou stoupající bubliny k hladině okolo odlitku vytvoří. Při velkém počtu odlitků v koši by také mohlo dojít k vyššímu zahřátí vody, a tím pádem k horšímu ochlazení. V žádném případě se odlitky nesmí navzájem překrývat. [2,3,15,19]

Rychlost ochlazování má vliv také na zbytkové pnutí v odlitku, zvláště u tvarově složitých a rozměrných odlitků, kde se střed odlitku může ochladit později než jeho povrch. Tím by vznikla nerovnoměrná struktura materiálu a následné pnutí. Z tohoto důvodu se někdy odlitky chladí v teplé vodě okolo $65\div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, namísto běžně používaných teplot. Teplá voda zabrání velkému pnutí, jak je vidět na obr. 9 [18], kdy je ochlazována kulatina z materiálu EN AW 6151 o průřezu 10^3 mm^2 z teploty $540\text{ }^{\circ}\text{C}$. Povrchové napětí dosahuje až 100 MPa u studené vody, u teplé je to podstatně méně. [2,3,18]

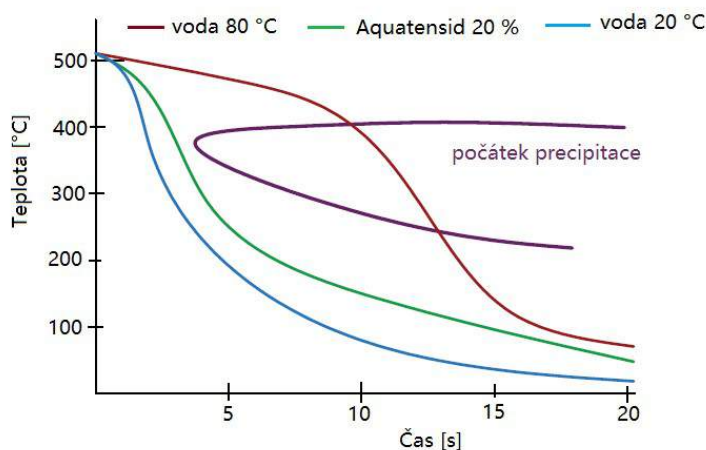


Obr. 9 Vliv teploty chladicího média na napětí v odlitku [18]

Při rychlejší ochlazení se dosahuje lepších mechanických a korozních vlastnostech. Korozní odolnost slitiny závisí na tom, zda se precipitát vyloučí uvnitř zrna, nebo na hranicích. [2] Např. jak uvádí literatura [20] slitiny legované antimonem a podrobené tepelnému zpracování měly lepší korozní odolnost jako před tímto procesem.

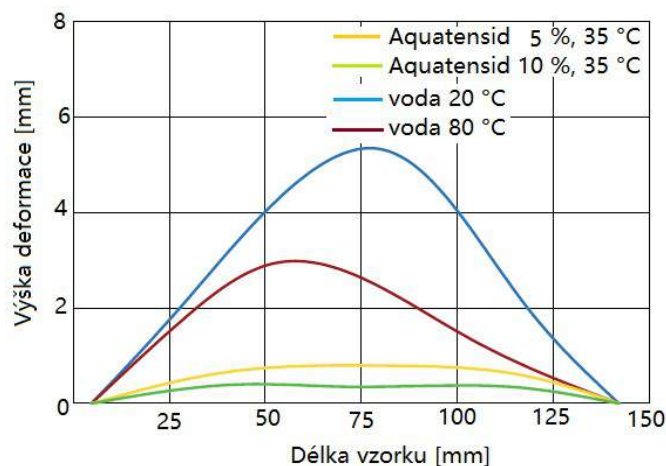
Chladicí prostředí

Značný rozdíl při ochlazení („kalení“) také činí druh použité kalicí lázně a její teplota. Bezesporu nejpoužívanější je voda, a to z důvodu nejintenzivnějšího účinku ochlazení, nenáročnosti a dostupnosti. Tepelná vodivost a výparné teplo vody je velké, a proto má i velké chladicí účinky. Jelikož se odlitek ochlazuje z homogenizační teploty na teploty max. $150\div 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, nesmí teplota lázně stoupnout o více jak $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proto je voda automaticky měřena jak před, během, tak po procesu kalení. Doba, po kterou odlitky zůstávají v lázni, je různá dle tloušťky stěny. Jak uvádí literatura [10], na tloušťku 2,5 cm je min. doba v lázni 2 minuty. Většinou se však používá délka ochlazení rovna cca osmi minutám. Nežádoucí je zde tvorba parního polštáře, který značně snižuje účinnost kalení. Pro jeho rozrušení je doporučeno s odlitkem pohybovat, aby měl odlitek zajištěn přímý styk s vodou. Další nevýhodou je, že při chlazení dochází k větším deformacím odlitku a větším vnitřním pnutím než u lázně s příměsí polymeru. Ohřátím vody na vyšší teplotu se snižuje její ochlazovací účinek, v důsledku čehož je odlitek ochlazen pomaleji a nedochází k vnitřním pnutím. To názorně ukazuje obr. 10. Výhodou užití teplejší vody je, že její odpařování probíhá méně intenzivněji, než je tomu u vody s nižší teplotou. Zajímavostí je, že odstátá voda, která je zbavená vzduchu, má lepší kalicí vlastnosti než čerstvě napuštěná, která obsahuje více vzduch a rozšiřuje tak parní polštář. Voda se musí pravidelně kontrolovat a čistit od okují a jiných nečistot. [8,10,21]



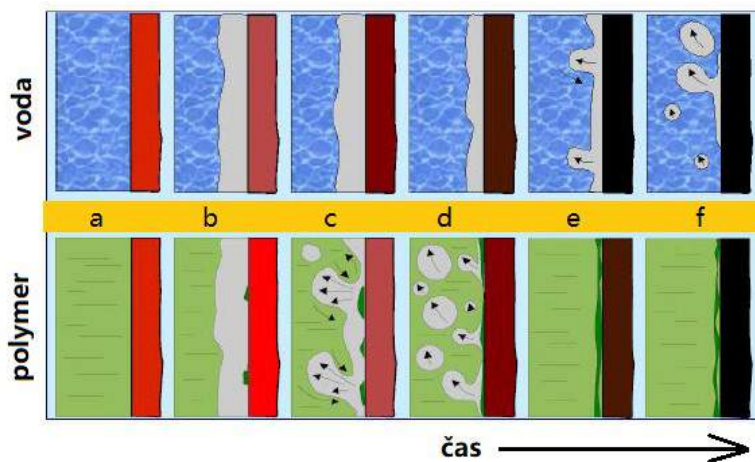
Obr. 10 Vliv teploty kalicí lázně na rychlost ochlazení [22]

Polymer (olej) umožňuje mírnější ochlazení než voda, avšak dostatečné na to, aby se odlitek potřebně ochladil. Díky tomu v odlitku vznikají mnohem menší vnitřní pnutí, čímž dochází k potlačení deformace, jak lze vidět na obr. 11, kdy byla měřena hliníková deska z materiálu EN AW-6061 o velikosti 50x15x1,5 mm při teplotě $530\text{ }^{\circ}\text{C}$. [17,21,22]



Obr. 11 Porovnání vlivu polymeru a vody na deformaci odlitku [22]

Doporučuje se zde chladit ty slitiny, které mají malou kritickou rychlost ochlazování. Výhodou je, že vzniklý parní polštář je díky polymeru odtrháván hned po zamočení odlitku. Polymer se používá v různých koncentracích 5÷30 %, přičemž u precipitace je nejvýhodnější koncentrace 20 %. Při zahřátí na cca 80 °C se vytvoří na povrchu odlitku jemný film, který okamžitě odtrhává parní obálku viz obr. 12 a tvoří izolaci, to vede k pomalejšímu ochlazení a následné redukci vnitřního pnutí po celém povrchu odlitku. Po klesnutí teploty odlitku pod 75 °C se tento film rozpustí. [19,21,22]



Obr. 12 Rozdíl mezi odtržením parní obálky u vody a polymeru [19]

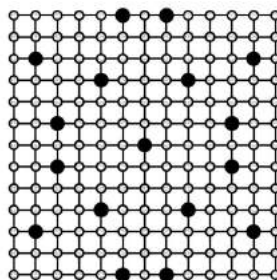
Pomocí kuchyňských a jiných chemických solí lze zvýšit ochlazovací účinek. Přibližně při použití 5÷10 % soli se snižuje rozpustnost plynů. [21]

Zamražení

Zamražení se provádí především u odlitků, které se nekalibrují ihned po ochlazení. Tento krok se provádí z důvodu zastavení procesu stárnutí a zastavení tvorby vytvrzující fáze. Kdyby odlitky dosáhly vysokých hodnot pevností, kalibrace by následně nebyla možná. Po rozpouštěcím žíhání odlitek dosahuje maximální tažnosti, je ohebný, a proto je snadné ho kalibrovat. Odlitky musí být do 45 minut uloženy do mrazáku. Toto neplatí pro odlitky, které jsou kalibrovány do 24 hod. [10,16]

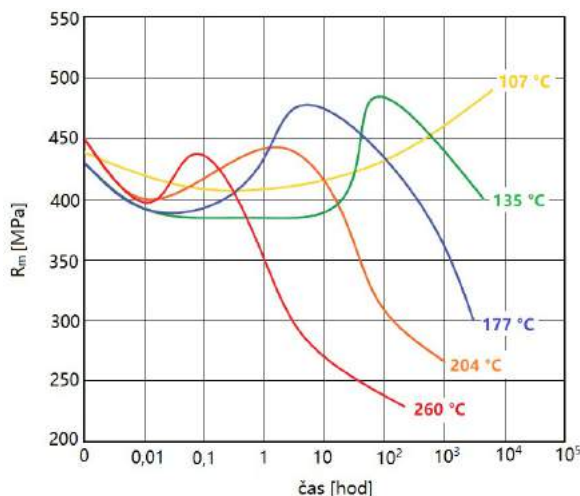
2.1.3 Precipitační vytvrzování

Proces precipitačního vytvrzování, jenž je také nazýván jako stárnutí, spočívá v tom, že přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$ obr. 13 získaný rychlým ochlazením se postupně vlivem termodynamické nestability rozpadne a v materiálu dochází k vnitřním (substrukturním) změnám. Ty nastávají hned po rychlém ochlazení z homogenizační teploty. Precipitát vznikne *difuzí* přísadového prvku do mikroskopických oblastí v celém objemu, které jsou již tímto prvkem obohaceny a dojde k nukleaci nové jemné fáze. Tyto fáze způsobí ve slitině zvýšení pevnosti, meze kluzu a tvrdosti, avšak sníží tažnost. [1,2,8,17]



Obr. 13 Přesycený tuhý roztok [1]

U každé slitiny je fáze jiná, např. u slitiny Al-Cu je touto fází CuAl_2 , u slitiny Al-Si-Mg je to fáze Mg_2Si , u slitin zinku fáze MgZn_2 a u slitin niklu je to NiAl_3 . Celý proces je závislý na teplotě, při které probíhá, a době výdrže na požadované teplotě. Zde platí, že čím vyšší je teplota, tím dříve se dosáhne maximální hodnoty pevnosti specifické pro každou slitinu, ale i tak jsou nižší jako při delším ohřívání za nižší teploty, jak názorně ukazuje obr. 14. [2,8,14,17]



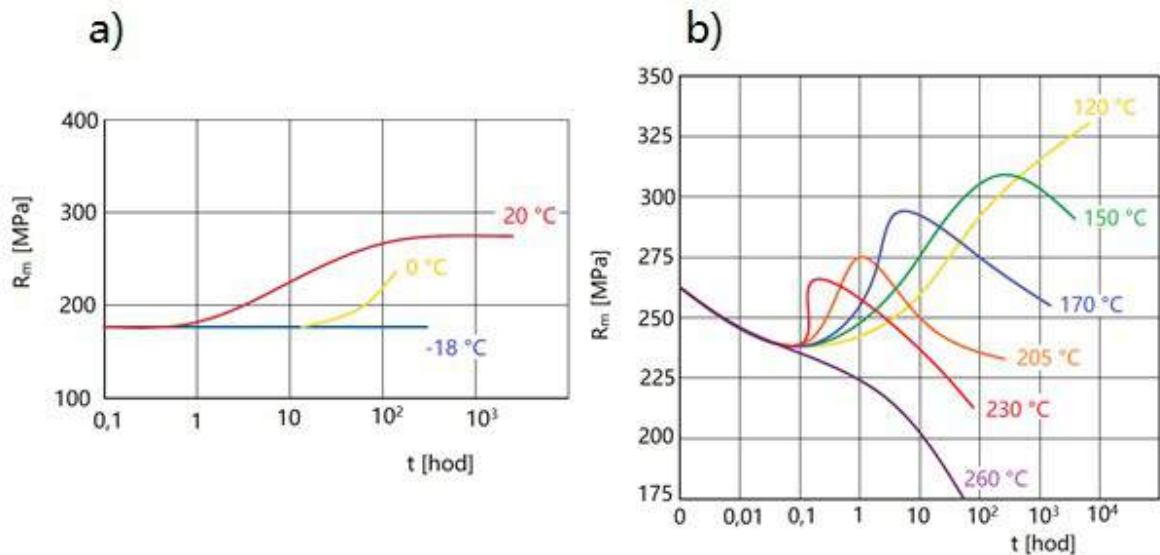
Obr. 14 Pevnost slitiny EN AW – 2014 [18]

Proces vytvrzování je ovlivněn chemickým složením kovové matrice a přísadami. Rozpad přesyceného tuhého roztoku může probíhat buď za pokojové teploty, nebo za zvýšené. Při procesu za zvýšené teploty mluvíme o vytvrzování za tepla, či o umělém stárnutí. Typickým případem je slitina Al-Si-Mg. Proces probíhající za pokojové teploty, pro nějž jsou typické slitiny Al-Cu, Al-Si-Cu, Al-Zn-Mg, se nazývá přirozené stárnutí, nebo vytvrzování za studena. [1,3,6]

Každá slitina má různý čas rozpadu, což je to dáno chemickým složením. Během tohoto času dochází v materiálu k neustálým vnitřním změnám krystalické mřížky, jež mění mechanické, fyzikální, korozní a technologické vlastnosti, a tyto

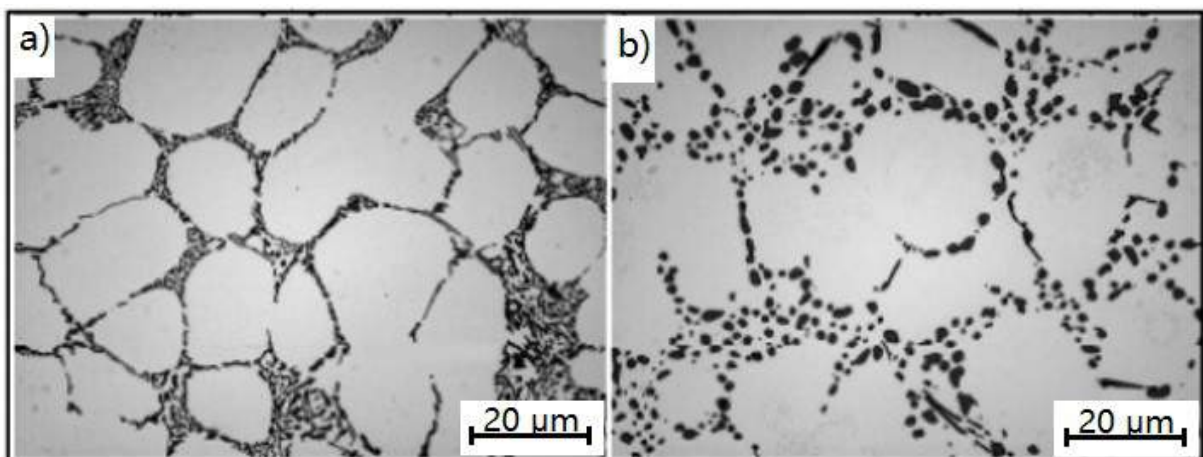
procesy jsou nazvány tzv. kinetikou rozpadu. Znalost křivek rozpadu pro danou slitinu je velice důležitá, jelikož podle nich lze určit přesný čas a teplotu potřebnou pro získání požadovaných mechanických vlastností. [1,3,8,10]

Zde se nejvíce ukazuje podstata vytvrzování. Např. u slitiny typu Al-Mg-Si nelze dosáhnout pomocí přirozeného stárnutí tak vysokých hodnot pevnosti, jako u umělého stárnutí. Ukazují to křivky kinetiky rozpadu viz. obr. 15. Zde lze vidět, že na obrázku 15 a) se nedosahuje při přirozeném stárnutí hodnoty 300 MPa ani po době delší než 40 dní, naopak při umělém stárnutí (obr. 15 b) se této hodnoty dosáhlo již po 10 hodinách při teplotě 170 °C. [3]



Obr. 15 Křivky kinetiky rozpadu slitiny EN AW – 6262, a) při přirozeném stárnutí, b) při umělém stárnutí [3]

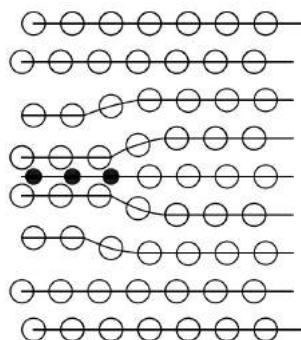
Pokud bude doba vytvrzování příliš dlouhá, může dojít k hrubnutí precipitátu, a tím klesá tažnost a mechanické vlastnosti. Tento jev se nazývá přestárnutí. Vytvrzená výsledná struktura je na obr. 16 b. [1,3,8,10]



Obr. 16 Struktura slitiny a) před vytvrzením, b) po vytvrzení [7]

Proces precipitace

Celý proces precipitace probíhá tak, že se v místech obohacených na vytvrzující prvek nukleuje nová fáze. Difuze atomů je spojena s rozsáhlým pohybem vakancí, tedy bodových poruch krystalické mřížky, které jsou soustředěny v určitých směrech, většinou rovnoběžně s plochami elementární kubické mřížky. Růstem těchto zárodků vznikají koherentní precipitáty, které se označují jako Guinier-Prestonova pásma I, dále jen GPI zóny. Jsou tedy první fází procesu a jsou to v podstatě pásma přebytečných atomů přísadového prvku a mají destičkový tvar, viz obr. 17. Tyto zóny jsou velké přibližně 1 až 2 atomové roviny. Dle přísadového prvku je ovlivněna její hustota (běžně okolo 10^{18} cm^{-3}), rychlost tvorby zón a také výsledný tvar precipitátu, viz tab. 4. [2,6,8,17]

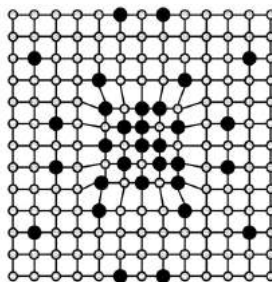


Obr. 17 Schématické zobrazení tvorby roviny GPI [17]

Tab. 4 Ukázka některých soustav schopných vytvrzování [17]

Základní kov	Přísadový prvek	Tvar precipitátu	Precipitát
Al	Cu	Destičkovité zóny bohaté na Cu	$\text{Al}_2\text{Cu} - \theta$
	Mg-Si	Jehlicovité zóny bohaté na Mg a Si	$\text{Mg}_2\text{Si} - \beta$
	Ag	Kulovité zóny bohaté na Ag	$\text{Ag}_2\text{Al} - \gamma$

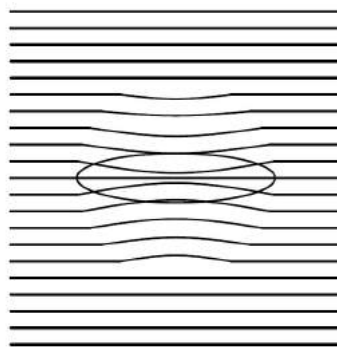
V této fázi se krystalická mřížka GP zón liší oproti mřížce kovové matrice, navzájem však zůstávají tyto mřížky koherentní – soudržné. Mřížka kovové matrice je deformována vlivem pohybu dislokací, které vyvolávají pnutí způsobující zvýšení pevnosti a tvrdosti. Schéma znázornění koherentního precipitátu je na obr. 18. [2,3,6,8,17]



Obr. 18 Koherentní precipitát [1]

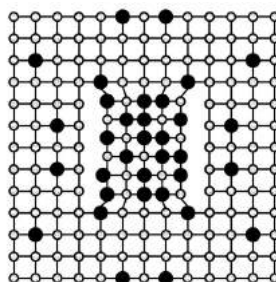
Druhá fáze stárnutí je nárůst dalších precipitátů při navýšení teploty s rostoucím časem. Jsou to vícevrstvé destičkové útvary složené z několika meziatomových vrstev, které se pravidelně střídají s vrstvami přísadového prvku.

Opět jsou rovnoběžné s rovinami kubické mřížky a nazývají se Guinier-Prestonova pásma II (GPII). Tyto roviny znázorňuje obr. 19. Tato pásma se nadále zvětšují a jejich počet zároveň klesá. I přesto mají velký vliv na zvyšování pevnosti, tvrdosti a dalších vlastností. Takto přirozeně stárne např. slitina typu Al-Cu. [2,3,8,17]



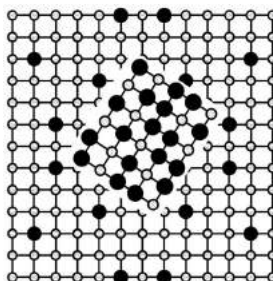
Obr. 19 Schématické znázornění GPII [17]

Třetí krok je tvorba částečně koherentní fáze (též semikoherentní). To je fáze, která postupně ztrácí koherentnost obr. 20, tedy přestává být částečně spojena s krystalickou mřížkou. Celý proces je navíc doprovázen zvýšením pevnosti a tvrdosti slitiny. Často se ve slitině vyskytují jak koherentní, tak semikoherentní fáze. [1,2,8,17]



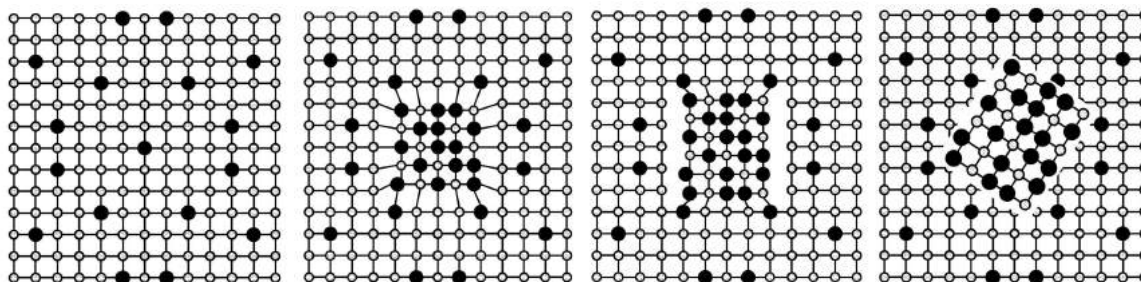
Obr. 20 Semikoherentní fáze [1]

Poslední fáze je charakteristická postupnou ztrátou koherence. Je to stav, kdy se fáze stává nekoherentní (obr. 21), což znamená, že přestává být soudržná s krystalickou mřížkou kovové matrice, zároveň výrazně klesá pevnost a tvrdost, avšak roste tažnost a houževnatost slitiny. U slitin, kde je požadována vyšší tažnost, bývá tento jev někdy záměrně vyvoláván. Tomuto jevu se říká přestárnutí. Je ho dosahováno především vysokou teplotou, či dlouhou dobou vytvrzování. [1,2,8,17]



Obr. 21 Nekoherentní fáze [1]

Celý proces precipitace a postupné tvoření jednotlivých precipitátů je schematicky zobrazeno na obr. 22.

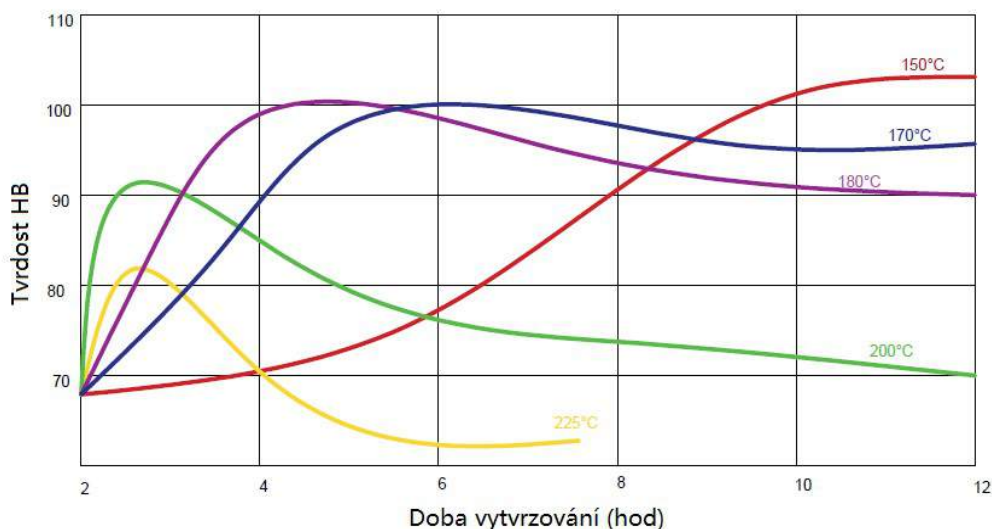


Obr. 22 Celý proces precipitace [1]

Vytvrzování za tepla

Jak už bylo uvedeno výše, vytvrzování za tepla se provádí u slitin, které obsahují Mg (Al-Si-Mg, Al-Mg). Potřebná teplota a doba vytvrzování závisí na chemickém složení slitiny a obsahu vytvrzujícího prvku Mg. Tyto obsahy se pohybují v rozmezí 0,3÷0,45 % Mg, přičemž teplota vytvrzování se pohybuje okolo 150÷190 °C a jeho doba v rozmezí 3÷8 hod.

Platí zde však, že při použití vyšších teplot se dosahuje maximálních hodnot mechanických vlastností již v krátkých časech, avšak tyto dosažené hodnoty jsou nižší než u pomalého vytvrzování za nižších teplot. Názorně to ukazuje závislost v obr. 23, jež je pro slitinu AlSi10Mg typická, jak uvádí literatura [1]. Dále platí, že s rostoucím obsahem hořčíku roste pevnost a tvrdost, ale klesá tažnost, viz obr. 3 výše. Je velice složité dosáhnout maximálních hodnot různých za stejných podmínek vytvrzování, proto je důležité najít ideální parametry teploty a času dle toho, jaké vlastnosti má mít daný odlitek přednostně. [1,2,10]



Obr. 23 Závislost doby vytvrzování a teploty na tvrdost slitiny AlSi10Mg [1]

Vytvrzování za studena

Toto vytvrzování je možné pouze u slitin, které obsahují Cu. Měď má vysokou pohyblivost atomů, a tak vytvrzování probíhá již při pokojové teplotě. Vytvrzení probíhá po rozpouštěcím žíhání s následným rychlým ochlazením (možné i při dostatečně rychlém ochlazení při lití do kovových forem), kdy vzniká částečně přesycená fáze α -Al, která se při pokojové teplotě a delší době (až několik dní) samovolným způsobem vytvrdí. Tomuto procesu se také říká stárnutí a odlitek získá konečné mechanické vlastnosti až po více než 100÷150 hod. Všechny mechanické zkoušky a obrábění by se měly provádět až po 8 dnech od tepelného vytvrzování. [1,2]

2.2 Žíhání

Je to pojem, který zahrnuje další způsoby tepelného zpracování. Uplatňujeme několik druhů žíhání, a to dle požadovaných mechanických vlastností odlitku. Užívané způsoby žíhání jsou popsány níže. [1,2,18]

A) Žíhání na odstranění vnitřního pnutí

Vnitřní pnutí v odlitku vzniká hned z několika důvodů. Může být zapříčiněno nerovnoměrným chladnutím odlitku ve formě, způsobeným různými tloušťkami odlitku. Dále může být zapříčiněno také konstrukcí odlitku a samotnou formou, která brání při smrštění odlitku. Napětí může také vznikat při svařování tvarově složitých odlitků. Ohřívací teplota, na které se setrvává 6 až 8 hodin, bývá v rozmezí 300÷380 °C a poté následuje pomalé ochlazování v peci nebo na vzduchu. [1,5,12]

B) Stabilizační žíhání

Stabilizační žíhání se provádí za účelem stabilizace rozměrů velice přesných odlitků a mechanických, chemických a fyzikálních vlastností u odlitků, které jsou namáhány zvýšenými teplotami či kolísavými teplotami způsobenými například třením. Teplota žíhání bývá vyšší, než je maximální provozní teplota, tj. v rozsahu 250÷350 °C. Ochlazování je pak prováděno na vzduchu. [1,3]

C) Žíhání na měkko

Toto žíhání se užívá ojediněle, a to u odlitků, které už byly dříve vytvrzené a chceme u nich zpětně dosáhnout rovnovážného stavu. Žíhací teploty se pohybují od 350 °C do 450 °C s následným pozvolným ochlazením v peci na teplotu okolo 200 °C, dále se ochladí na vzduchu. [1,6]

D) Homogenizační žíhání

Je určeno pro případy, kdy je nutno snížit nebo odstranit chemickou heterogenitu, která se v odlitku vytvořila v průběhu tuhnutí. Vše probíhá za zvýšených teplot, tj. nad křivkou změny rozpustnosti legujícího prvku v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Chemické složení a struktura slitiny určuje délku výdrže na homogenizační teplotě, která se pohybuje obvykle v rozmezí 3÷15 hod. Doba této výdrže ovšem nesmí být příliš dlouhá, protože by mohlo docházet k hrubnutí zrna, což by vedlo ke snížení mechanických vlastností. Je také možno provést dvojstupňovou homogenizaci, tj. použití dvou rozdílných teplot. [1,2,3]

2.3 Označení režimů tepelného zpracování

Označování odlitků dle normy ČSN EN 515 je platné pro celou Evropskou unii a toto značení bylo převzato z normy ASM. Ve slévárenství se stavy odlitků po tepelném zpracování označují nejčastěji písmeny:

F – odlitky v litém stavu

O – žíhání – odlitky po odstranění vnitřního pnutí, a po stabilizačním žíháním

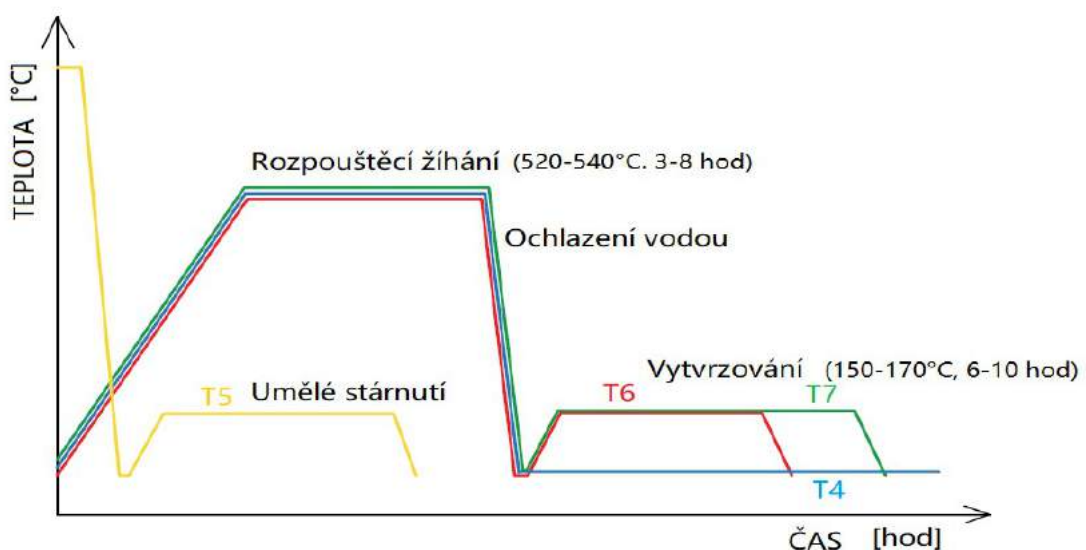
T – základní druhy tepelného zpracování, avšak jiné jako O

V tab. 5 je přehled základních nejpoužívanějších operací, které se mimo dělení písmenem rozlišují i jednou, či více číslicemi. [1,2]

Tab. 5 Příklady tepelného zpracování u odlitků z Al [1,14]

Značení	Tepelné zpracování
T4	Rozpouštěcí žíhání s následným vytvrzením za studena
T5	Vytvrzování za tepla (umělé stárnutí)
T6	Rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení s následným vytvrzením za tepla
T7	Rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení, vytvrzení za tepla a přestárnutí
T61	Vytvrzení pro získání maximální pevnosti a tvrdosti
T64	Rozpouštěcí žíhání, umělé stárnutí bez dostárnutí

Na obr. 24 jsou graficky znázorněny některé průběhy tepelného zpracování, jež jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 24 Průběhy jednotlivých procesů tepelného zpracování [2]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

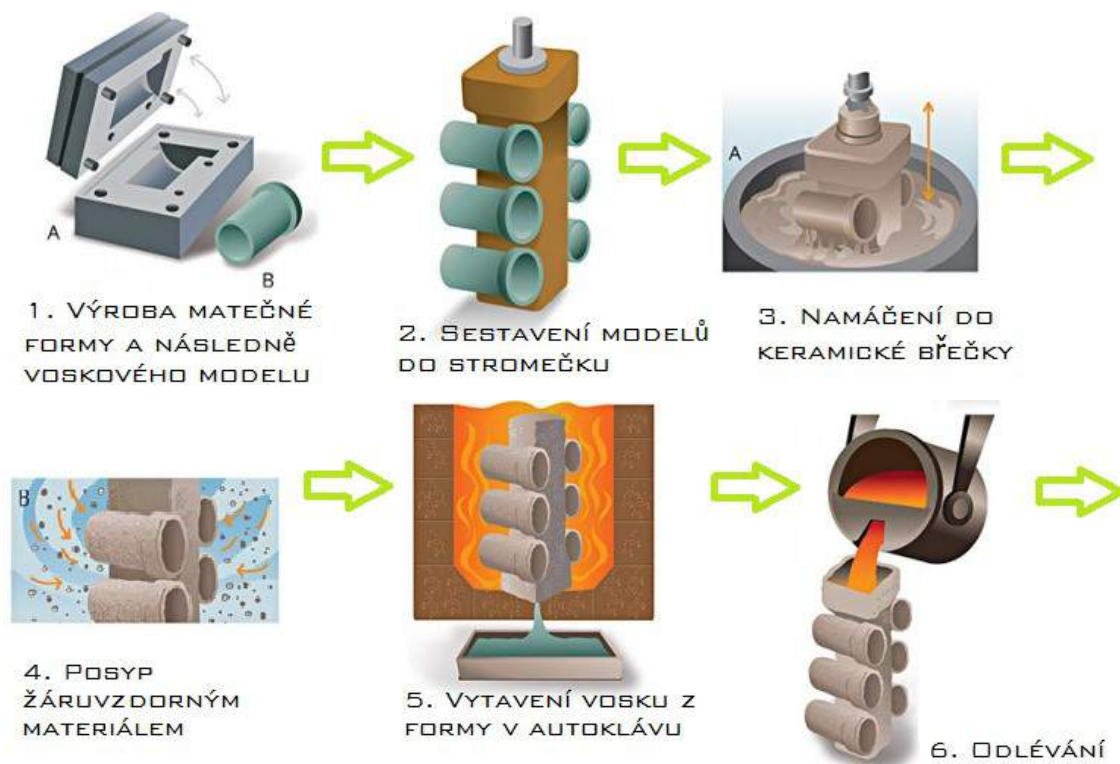
Cílem této diplomové práce bylo nalezení optimálních parametrů tepelného zpracování tvarově složitých odlitků ze slitiny hliníku, konkrétně ze slitiny AlSi7Mg0,6. Hlavním parametrem tepelného zpracování je především teplota kalící lázně, která ovlivňuje mechanické vlastnosti a strukturu odlitku. Zadání a celá realizace byla zadána a provedena společností Alucast, s.r.o.

Dílčí cíle diplomové práce:

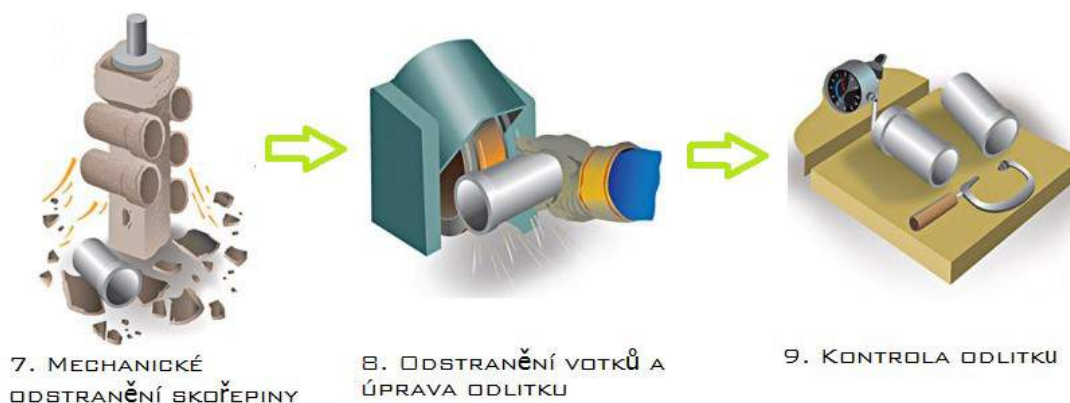
- Zhodnocení současné praxe tepelného zpracování ve společnosti Alucast, s.r.o.
- Navrhnout optimální parametry teploty lázně z naměřených hodnot, popřípadě druh lázně pro získání požadovaných mechanických hodnot

3.1 Technologie vytavitelného modelu

Tato technologie byla použita při výrobě odlitků a zkušebních tyčinek pro experiment. Je také označována jako přesné lití a samotný princip spočívá ve výrobě voskového modelu v matečné formě. Tento krok je velice důležitý, jelikož přesností matečné formy je ovlivněna i přesnost budoucího odlitku. Následuje sestavení stromečku z modelů odlitků a vtokového kůlu, který zde slouží jako nálietek. Poté je celá soustava několikrát ponořena do keramické břechky a následně posypána žáruvzdorným materiálem s velikostí nejjemnějších zrn od 0,1 mm až po 0,5 mm. Takto vytvořená skořepina se dále několik hodin suší při určité teplotě a vlhkosti. Následně je vytaven vosk v autoklávu a skořepina putuje na žíhání, aby dosáhla požadované pevnosti. Odléváno je do vyžíhané skořepiny a po ochlazení jsou odlitky odřezány od vtokové soustavy. Celý proces je znázorněn na obr. 25. [24, 25]



Obr. 25 Proces přesného lití [25]



Obr. 25 Proces přesného lití [25]

3.2 Porovnání současné praxe tepelného zpracování ve slévárně

V této části je diplomová práce zaměřena na přehled současné praxe tepelného zpracování ve firmě Alucast, s.r.o. Pro rozpouštěcí žíhání i umělé stárnutí jsou v této slévárně používány hodnoty teplot a doby výdrže na těchto teplotách dle pracovního předpisu. Souhrn těchto parametrů je, s ohledem na vytvrzovanou slitinu, uveden v příloze 1. Ačkoli byly tyto dva parametry vždy slévárnou dodržovány, teplota chladicí lázně v dalším kroku nikoli. Její teplota, s ohledem na roční období a s ním související počasí, vždy kolísala.

Porovnávány byly dva různé odlitky viz obr. 26, Přičemž oba byly odlity ze slitiny AlSi7Mg0,6 . Ke každému odlitku byly také odlity trhací tyčinky o průměru 6 mm a délce 30 mm. Vzorky pro trhací zkoušku z odlitků vyřezávány nebyly. Odlitky i tyčinky byly odlity v pěti různých tavnách a podrobeny rozpouštěcímu žíhání, rychlému ochlazení ve vodě, zamrazení, kalibraci, a nakonec umělému stárnutí. Následně byly měřeny hodnoty meze pevnosti, kluzu a tažnosti na zařízení pro zkoušku tahem o zatížení 10 kN.



Obr. 26 Odlitek č.1 a odlitek č.2

Rozpouštěcí žíhání má slévárna s ohledem na slitinu nastaveno jako program č.2, dle technologického postupu s dobou $8\div 9$ hod a teplotou 543 ± 6 °C. V obecné praxi je tento proces označován jako T4. Tento program byl aplikován u obou odlitků a všech tyčinek. Ve všech dávkách byly podmínky rozpouštěcího žíhání dodrženy. Podrobnější přehled výsledků z procesu tepelného zpracování a výsledků trhací zkoušky je pro každý odlitek a každou tavbu v přílohách 2 a 3.

Teplota vody před zamočením koše se u odlitku č.1 pohybovala od cca 28,5 °C do 37,2 °C. U odlitku č.2 to bylo od cca 37,9 °C do 46,6 °C. Rozdílnost těchto teplot nastala z důvodu, že se jednotlivé tavby a následné úpravy odlitků prováděly v jiné dny a teplota vody se tak různila především v důsledku změny ročního období a s ním souvisejícího počasí. Ani v jednom případě se však nestalo, že by teplotní rozdíl před a po zamočení činil více jak 14 °C. V lázni odlitky setrvaly po dobu ± 6 min.

Po zamočení byly odlitky vloženy do 45 min do chladicího zařízení, kde setrvaly do následné kalibrace. Teplota se pohybovala okolo -17 °C. Zde byly výkyvy teplot způsobeny otevíráním a zavíráním chladicího zařízení při vkládání a odebírání odlitků.

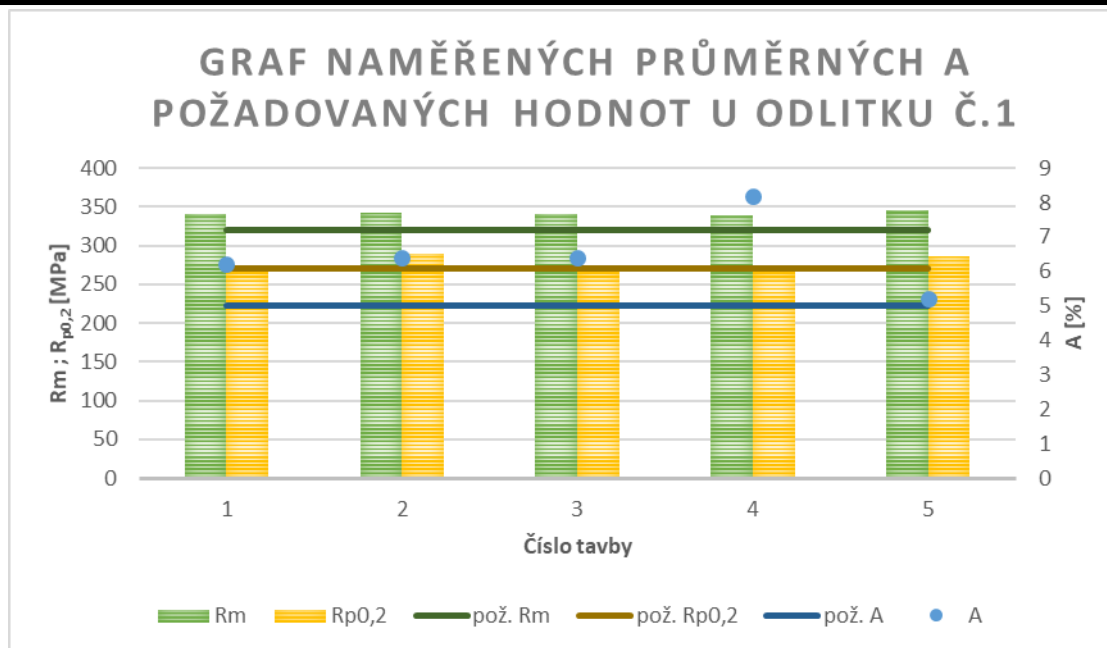
Umělé stárnutí je opět s ohledem na slitinu nastaveno na dobu 6 hod ± 15 min při teplotě $160^\circ \pm 6$ °C, tedy jako T6 (pro slévárnu je to program č.4). Zde byly objeveny výkyvy času, a to ve dvou případech u odlitku č. 1 (konkrétně u tavby č.1 a tavby č.2), kdy doba byla 5 hod a 38 min, což mohlo být způsobeno nepřesně uloženým termočlánkem, který měřil nejstudenější místo v peci při jejím náběhu na požadovanou teplotu. Proto je čas kratší, než je požadovaný, ale i tak byla požadovaná teplota v peci po dobu 6 hodin.

Po celém procesu tepelného zpracování byly z kulatých tyčinek na zařízení pro trhací zkoušku měřeny hodnoty meze pevnosti (R_m), meze kluzu ($R_{p0,2}$) a tažnosti (A) při teplotě 25 °C. Výsledné průměrné hodnoty ze všech taveb a požadované hodnoty odlitku č.1 jsou uvedeny v tab. 6, pro odlitek č. 2 jsou korespondující hodnoty uvedeny v tab. 7. V grafech 1 a 2 je přehledně zobrazeno, zda jednotlivé tavby dosáhly požadovaných hodnot či nikoli.

Odlitek č.1:

Tab. 6 Tabulka s průměrnými hodnotami výsledků z trhací zkoušky pro odlitek č.1

Tavba	Počet tyčinek [ks]	d_0 [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	Teplota lázně [°C]	R_m [MPa]	A_{30} [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]
1	2	5,96	27,81	9480,64	37,2	341,0	6,2	272,8
2	2	6,02	28,46	9759,01	37,3	342,9	6,4	289,0
3	2	5,96	27,85	9465,93	31,9	339,9	6,4	271,5
4	4	6,01	28,39	9646,17	28,7	339,7	8,2	265,9
5	2	5,96	27,85	9643,22	31,9	346,2	5,2	285,8
Požadováno						320,0	5,0	270,0



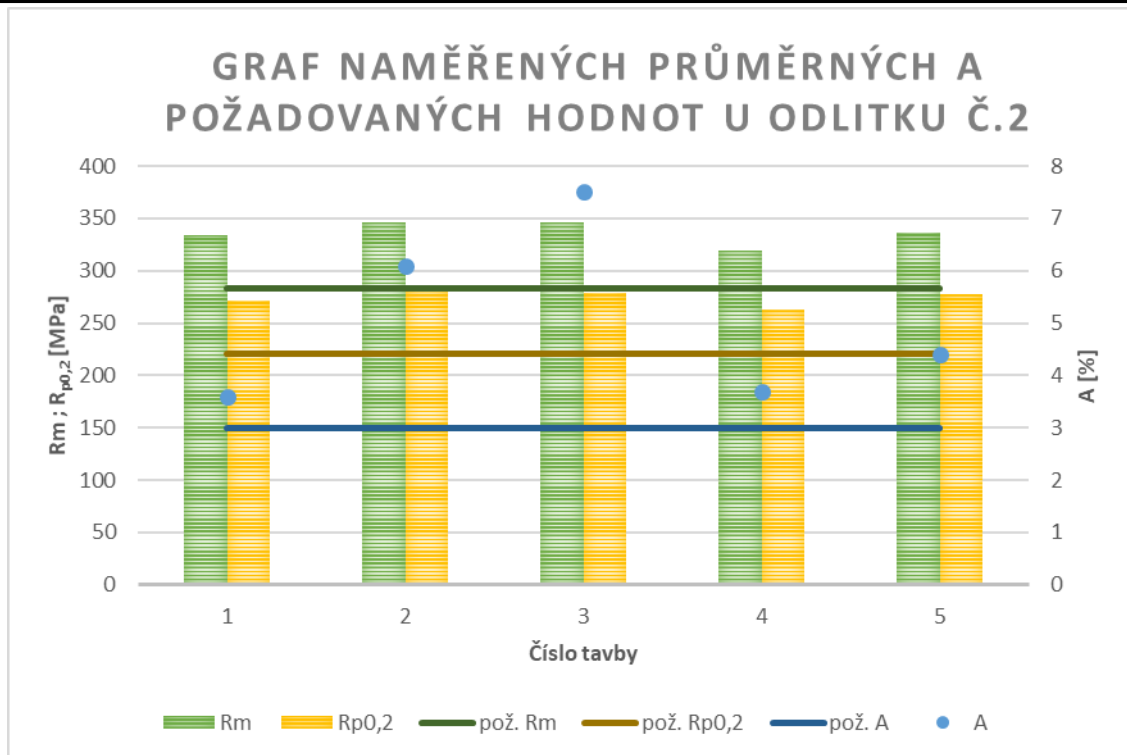
Graf 1 Graf naměřených a požadovaných hodnot pro odlitek č.1

Z grafu 1 lze snadno vyčíst, že u odlitku č.1 bylo požadované pevnosti dosaženo ve všech dávkách. Stejně tak, co se týče požadavků tažnosti. Téměř ve všech tavbách hodnoty tažnosti přesahovaly 6 %, přičemž požadovanou hodnotou bylo 5 %. U meze kluzu nebylo požadavků dosaženo pouze v jednom případě. To mohlo být způsobeno nestálou teplotou vody v lázni či umístěním odlitku uprostřed koše, tedy mimo dosah proudící kapaliny, která slouží pro rovnoměrné ochlazení odlitků.

Odlitek č.2:

Tab. 7 Tabulka s průměrnými hodnotami výsledků z trhací zkoušky pro odlitek č.2

Tavba	Počet tyčinek [ks]	d ₀ [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	Teplota lázně [°C]	R _m [MPa]	A ₃₀ [%]	R _{p0,2} [MPa]
1	4	5,98	28,16	9394,5	37,9	333,7	3,6	271,7
2	4	6,00	28,25	9770,82	40,0	345,9	6,1	281,8
3	4	6,03	28,53	9888,40	46,5	346,6	7,5	278,8
4	4	6,00	28,25	9023,25	41,9	319,4	3,7	262,9
5	4	6,00	28,23	9502,87	23,8	336,7	4,4	277,6
Požadováno						283,0	3,0	221,0



Graf 2 Graf naměřených a požadovaných hodnot u odlitku č.2

Z grafu 2 lze vidět, že bylo dosaženo požadovaných hodnot všech parametrů ve všech případech. V některých tavných případech bylo dosaženo téměř dvojnásobku požadované hodnoty tahnosti, konkrétně v případě tavnosti č. 3, kdy měla voda teplotu 46,5 °C. To mohlo být způsobeno především vyšší teplotou lázně. Jak uvádí literatura [2], vysoké tahnosti se dosahuje při vyšších teplotách vody, která v tomto případě byla v průměru 40 °C. Naopak vysokých pevností se dosahuje při nižších teplotách lázně.

V této dílčí části diplomové práce bylo provedeno porovnání dvou odlitků a zhodnoceno, zda bylo dosaženo požadovaných vlastností při dosud používaných parametrech tepelného zpracování. Až na dva případy, zde bylo požadovaných hodnot dosaženo. Ačkoliv slévárna používá přesně nastavené hodnoty teplot a času pouze pro rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí je možné, že právě teplota chladicího média (v tomto případě vody) má vliv na měnící se hodnoty mechanických vlastností. Proto je následující experiment zaměřen na vliv teploty chladicího prostředí.

3.3 Praktická část

V této praktické části jsou popsány jednotlivé kroky experimentu od návrhu a výroby odlitků až po jejich lití a následné tepelné zpracování. Jelikož slévárna doposud nijak nesledovala vliv teploty a druhu chladicího média na mechanické vlastnosti, je experiment zaměřen na tuto fázi tepelného zpracování.

Experiment byl prováděn na odlitku, který slouží jako sloupek řídicí páky do kokpitu letadla L410 společnosti Aircraft Industries viz. obr. 27. Tento sloupek byl zhotoven technologií vytavitelného modelu, princip technologie je popsán v kapitole 3.1. Voskový model odlitku je k vidění na obr. 26 b) výše. Jak odlitek, tak zkušební tyčinky byly odlity ze stejné slitiny a to AlSi7Mg0,6 . Dále pak byly odlitky i zkušební tyčinky tepelně zpracovány za stejných podmínek.



Obr. 27 Použití odlitku v letadle

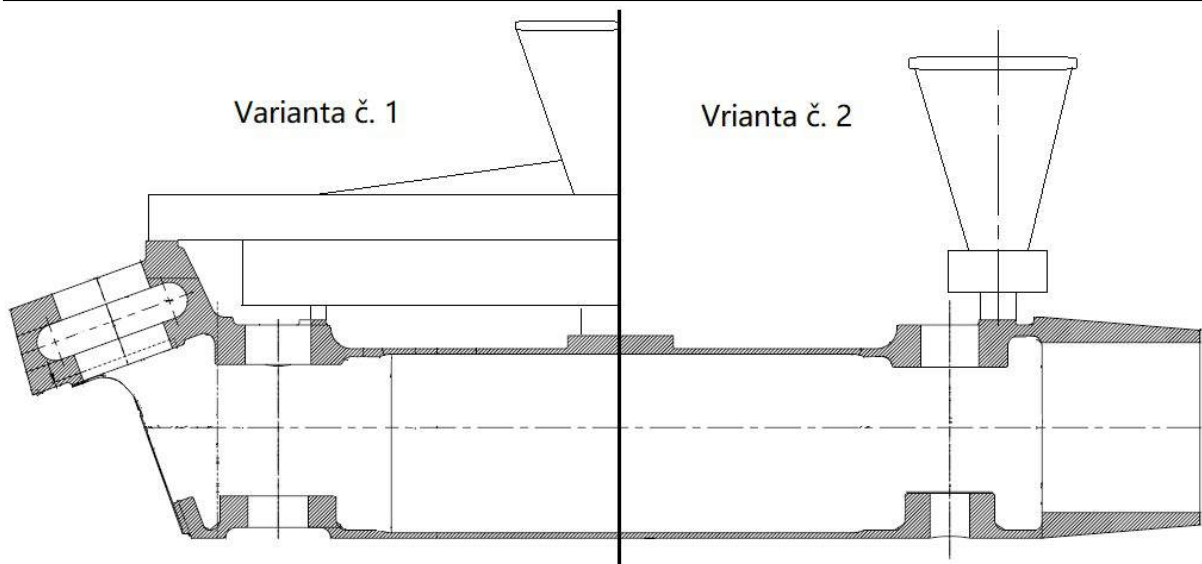
3.3.1 Varianty odlitků a zkušebních tyčinek

Pro experiment byly vytvořeny a následně porovnány dvě varianty jednoho odlitku. Jednotlivé varianty se od sebe liší konstrukcí nálitků. Další rozdíl byl v ochlazování jednotlivých odlitků při jejich lití, což je dále popsáno níže. Současně s odlitky byly odlity dva druhy tyčinek, kulaté a ploché. Ty se také rozlišují způsobem jejich chlazení.

A) Varianty odlitků

Jak již bylo uvedeno, odlitky se od sebe lišily konstrukcí nálitků. Vtoková soustava byla navržena tak, aby plnění probíhalo spodem. Ve vtokové soustavě byl také umístěn keramický pěnový filtr pro zachycení případných oxidických blan a nečistot.

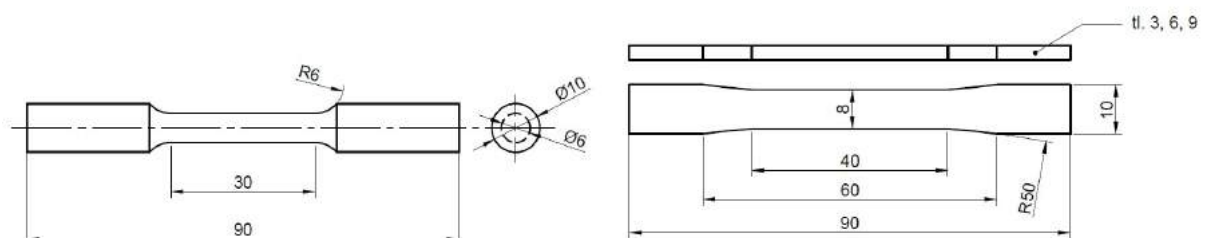
Variantou č. 1 je odlitek s „nálitkovou soustavou“ umístěnou v horní části podélně přes celý odlitek. Tuto variantu slévárna dosud používá. Je zde dosahováno vysokých mechanických hodnot. Přehled o současném stavu tepelného zpracování tohoto odlitku je rozebrán v kapitole 3.2. Pro tento experiment byla navržena nová varianta (č. 2), kdy byla podlouhlá „nálitková soustava“ odstraněna a byla nahrazena dvěma oddělenými nálitky. Ukázka návrhu odlitku s vtokovou soustavou je na obr. 28. U této varianty se předpokládalo ještě lepších mechanických vlastností než u první varianty, jelikož se zde nenachází podlouhlý nálitek, který by mohl tepelně ovlivňovat horní část odlitku. Pro obě varianty bylo odlito 6 kusů.



Obr. 28 Náskres porovnávaného odlitku a jeho dvě varianty

B) Zkušební tyčinky

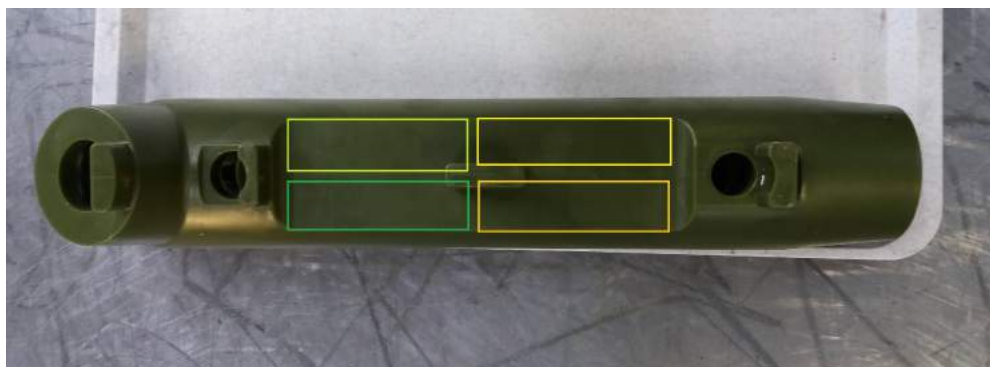
Zkušební tyčinky byly také odlity metodou vytavitelného modelu do samostatné skořepiny, avšak spolu s odlitky z jedné tavby. Ve skořepině byl také umístěn pěnový keramický filtr pro zachycení nečistot. Byly zvoleny dva typy, a to zkušební tyčinky kruhového a plochého průřezu. Jejich rozměry jsou uvedeny na obr. 29 a jejich počet a způsob ochlazení je uveden v tab. 8. Dále byly z každého odlitku vyřezány 4 vzorky (viz obr. 30). Rozměry tyčinek jsou uvedeny v přílohách 8 a 9. Vzhledem k tomu, že plocha výřezů byla volena s ohledem na nejjednodušší získání vzorků, je zde značnou nevýhodou, že vyřezané tyčinky byly odebrány z horní plochy odlitků, kde je možný výskyt nečistot vyplouvajících na povrch, což může značně ovlivnit mechanické vlastnosti. Vyřezané vzorky nebyly nijak rovnány ani sbrušovány. Byly pouze upraveny do tvaru podobného plochým tyčinkám. Ploché zkušební tyčinky pak simulovaly tenkou stěnu odlitku, aby se zjistilo, zda budou mít podobné výsledné hodnoty jako vyřezané vzorky z odlitků. Při shodě výsledků u přímo odlitých zkušebních tyčinek a tyčinek vyřezaných z odlitků, kdy odpadá potřeba vyřezávat tyčinky z odlitků a namísto nich je možné použít přímo odlitých tyčinek.



Obr. 29 Rozměry zkušebních tyčinek, a) kulatý , b) plochý průřez

Tab. 8 Typy použitých tyčinek, typ ochlazení a jejich počet

Kulaté tyčinky		Ploché tyčinky	
A – pomalu ofukem	B – postupně zamočené	C – postupně zamočené	D – rychle zamočené
40 ks	40 ks	24 ks	48 ks

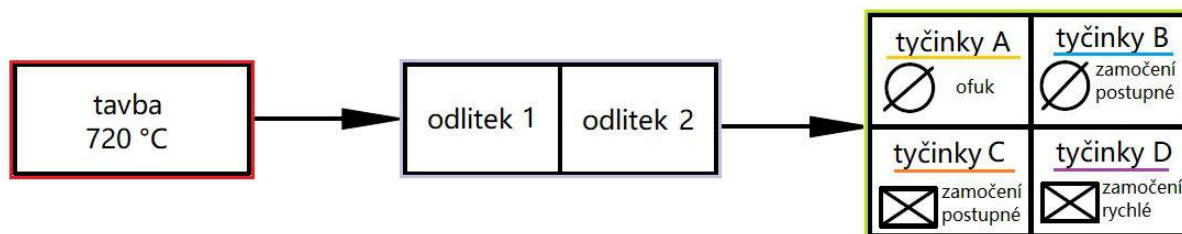


Obr. 30 Označení míst odběru vzorků z odlitku

Přehled označení variant odlitků, tyčinek, typ ochlazení a označení jednotlivých vzorků je uveden v tab. 9. Schéma odlévaných variant je na obr. 31.

Tab. 9 Přehled označení variant a vzorků

Označení varianty	Vzorek	Typ ochlazení	Označení tyčinek
A	Tyčinky kulaté	Ofukem	3, 4, 5, 6
B		Postupné zamočení	7, 8, 9, 10
C	Tyčinky ploché	Postupné zamočení	11, 12, 13, 14
D		Rychlé zamočení	15, 16, 17, 18
Odlitek č.1	Tyčinky vyřezané z odlitků	Postupné zamočení	3_7, 4_8, 5_9, 6_10
Odlitek č.2		Rychlé zamočení	11_15, 12_16, 13_17, 14_18



Obr. 31 Schéma použitých variant

3.3.2 Proces lití

A) Použitá slitina

Jak již bylo uvedeno výše pro experiment byla použita slitina AlSi7Mg0,6. Po natavení byla slitina odplyněna na FDU zařízení s dmýchaným dusíkem N5 (99,999 % N) po dobu 5÷7 min. Rafinační sůl byla použita Probat – Fluss Al 224. Hodnota Dichteindexu pak byla naměřena DI=1,18 %. Jako očkovadlo byl použit drát o složení AlTi5B1 ve množství 0,2 kg na 100 kg taveniny. Pro modifikaci taveniny byla použita jedna tableta Eutektal T 201, kde hlavní podíl tvoří sodík. Slitina byla udržována v kelímkové peci o kapacitě 120 kg při teplotě 720 °C.

Měření chemického složení slitiny bylo provedeno za pomoci stolního jiskrového opticko-emisního spektrometru Q4 TASMAN. Naměřené a předepsané chemické složení dle normy DIN EN 1706 je uvedeno v tabulce 10.

Tab. 10 Přehled požadovaného a naměřeného chemického složení slitiny

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	ostatní	Al
Předepsaný obsah [%]	6,50 7,50	0,20	0,20	0,10	0,45 0,70	0,10	0,04 0,20	0,05	zbytek
Naměřený obsah [%]	6,664	0,093	<0,001	0,0069	0,467	0,0011	0,144	<0,05	92,61

b) Odlévání odlitků a tyčinek a jejich ochlazování

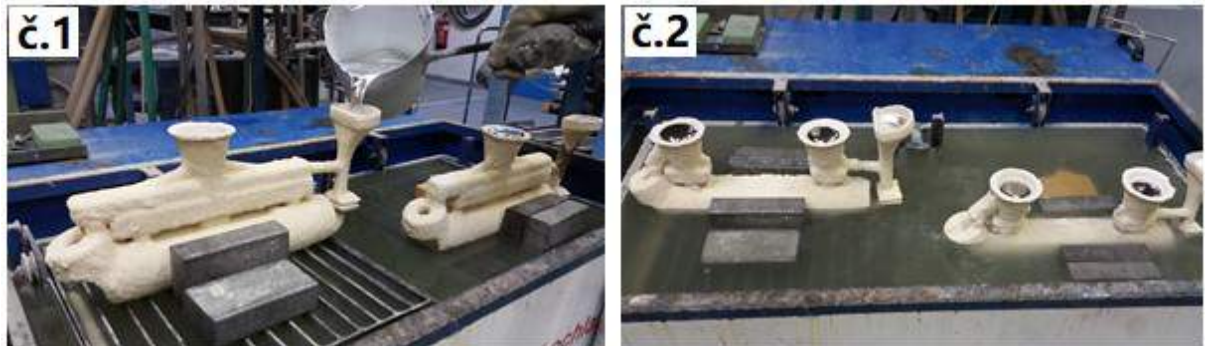
Po vyžhání keramické skořepiny v peci, kde žhací teplota dosahovala 750 °C, byly skořepiny uloženy do zamáčecího zařízení ANNA, které sloužilo jako lící pole. Ponořením do kapaliny bylo docíleno řízeného ochlazování od spodní části odlitku. Teplota zamáčecí lázně byla 31 °C. Po umístění odlitků do stojanu následovalo odlití. U varianty odlitku č. 1 bylo ochlazení prováděno postupným ponořováním do kapaliny dle tab. 11.

Tab. 11 Program zamočení do chladicí kapaliny

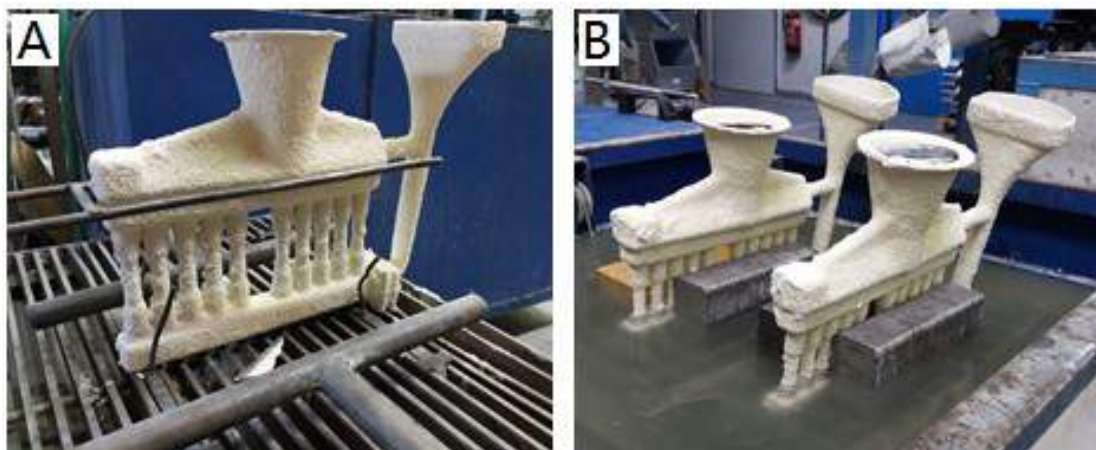
	Hloubka zanoření [mm]	Čas setrvání [s]
Zóna 1	20	90
Zóna 2	20	60
Zóna 3	20	30
	10	250

Varianta odlitku č. 2 byla do lázně ponořena rychlým konstantním pohybem. V lázni odlitky setrvaly do úplného ztuhnutí (po dobu cca 5 min). Teplota lázně nesměla překročit 35 °C, jinak by následovalo její automatické ochlazování čerpadlem. Po vytažení z lázně odlitky dále samovolně chladly na vzduchu.

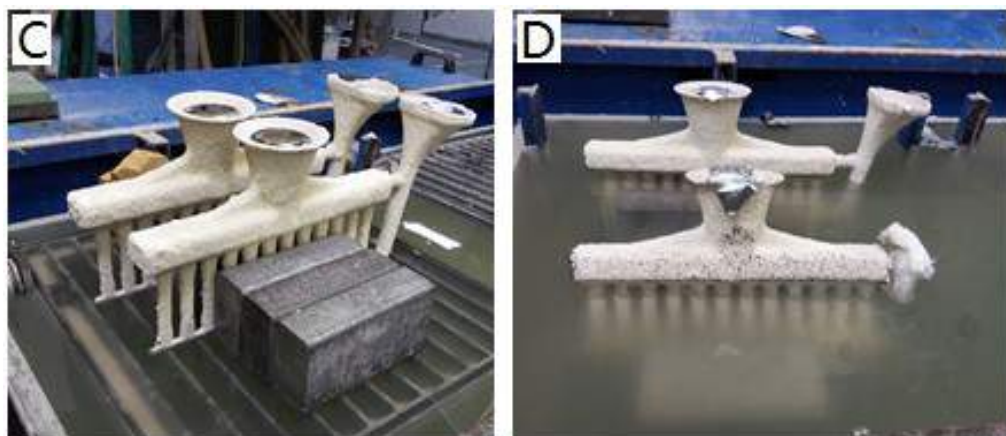
U zkušebních těles byl postup obdobný. Tyčinky A byly umístěny na speciální stojan, kde byly po dobu cca 5 min ofukovány vzduchem do spodní části stromečku. Tím se opět docílilo řízeného ochlazování. Tuto metodu slévárna běžně používá. Tyčinky B a C byly po odlití zamočeny do lázně postupně, stejnými rychlostmi jako odlitek varianty č. 1 viz tab. 11 výše. Poslední tyčinky D byly do lázně zamočeny rychle najednou. Vytažené tyčinky z lázně následně samovolně chladly na vzduchu. Použité technologie chlazení odlitků jsou vidět na obr. 32.



Obr. 32 a) Metody zamočení odlitků Varianty č.1 a varianty č.2



b) Metody ochlazení kulatých tyčinek, ofukem A a postupným zamočením B



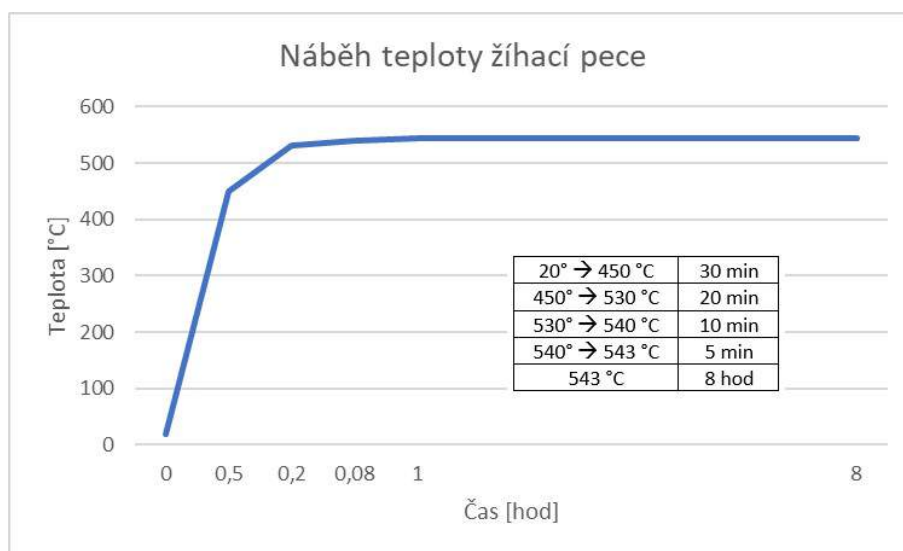
c) Metody ochlazení plochých tyčinek, zamočení postupné C a rychlé najednou D

3.3.3 Tepelné zpracování

Procesu tepelného zpracování byly podrobeny všechny odlité varianty. Podmínky rozpouštěcího žíhání a umělého stárnutí byly pro všechny uvedené varianty stejné. Lišily se zde však teploty a druhy kalícího zařízení. Celá problematika je podrobně rozebrána níže.

A) Rozpouštěcí žíhání

Po otryskání vzorků vodou a odřezání vtokové soustavy následovalo rozpouštěcí žíhání. To bylo provedeno na peci LAC PP140/65 o vnitřních rozměrech pece (š_xv_xh) 450 x 500 x 600 mm a objemu 135 l. Před použitím byla pec zkalibrována. Teplota uvnitř pece byla měřena automaticky. Podmínky pro rozpouštěcí žíhání byly nastaveny na teplotu 543 °C a dobu 8 hodin, tedy režim T4 (pro slévárnu pracovní program č.2, dle technologického postupu). Průběh teploty pece v závislosti na čase je znázorněn v grafu 3.



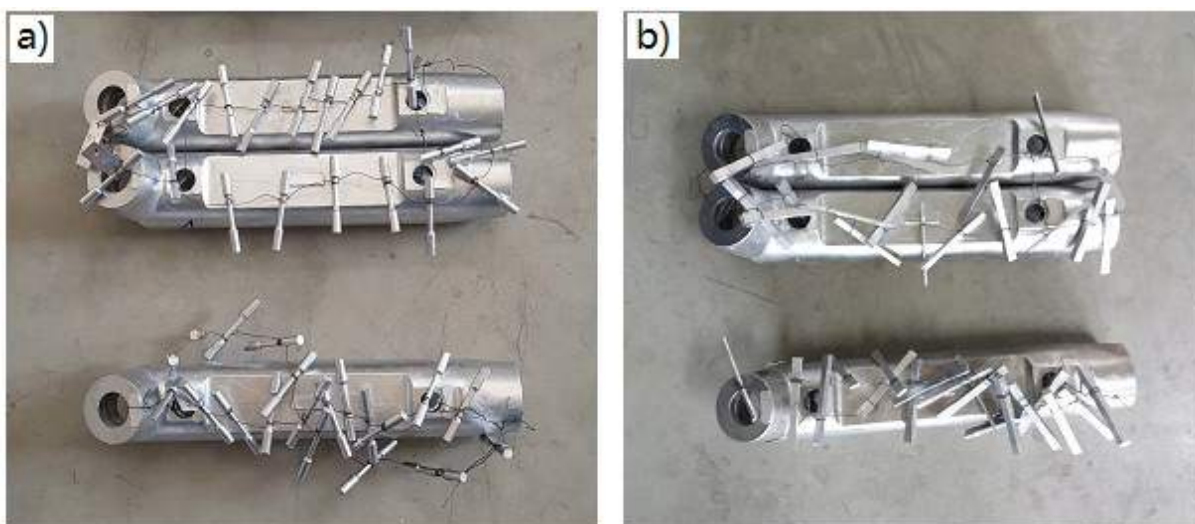
Graf.3 Náběh teploty žíhací pece a jejich časy

Rozmístění odlitků je vidět na obr. 33. Z časové náročnosti a dispozice pece byl proces rozpouštěcího žíhání rozdělen do dvou dnů. První den byly žíhány odlitky varianty 1 a obě varianty tyčinek s kruhovým průřezem. Na odlitky byly zkušební tyčinky přivázány pomocí drátu, a to tak, aby na každém odlitku bylo 10 ks tyčinek varianty A a 10 ks varianty B viz obr. 34 a).



Obr. 33 rozmístění odlitků v žíhací peci

Druhý den byly žíhány odlitky varianty 2 a obě varianty plochých tyčinek. Opět byly tyčinky přivázány pomocí drátu, tentokrát varianty C po 6 ks a varianty D po 12 ks na každý odlitek. Rozmístění v žíhací peci bylo stejné jako u předchozího dne. Soustava odlitků a tyčinek je vidět na obr. 34 b).



Obr. 34 Soustavy odlitků a tyčinek, a) s kulatým průřezem, b) s plochým průřezem

B) Ochlazení v chladícím médiu

Ochlazení následovalo ihned po rozpouštěcím žíhání. Účelem bylo zjistit jaký vliv má teplota chladící lázně na mechanické vlastnosti odlitků po rozpouštěcím žíhání. Proto byly pro tento experiment připraveny čtyři lázně. Jednalo se o čistou vodu

o teplotách 0 °C, 20 °C a 40 °C, a o polymer Aquatensid o koncentraci 10 % a teplotě 31 °C. Tento polymer s uvedenou koncentrací slévárna běžně používá, avšak teplota kolísá s ohledem na roční období, což platí i pro vodu.

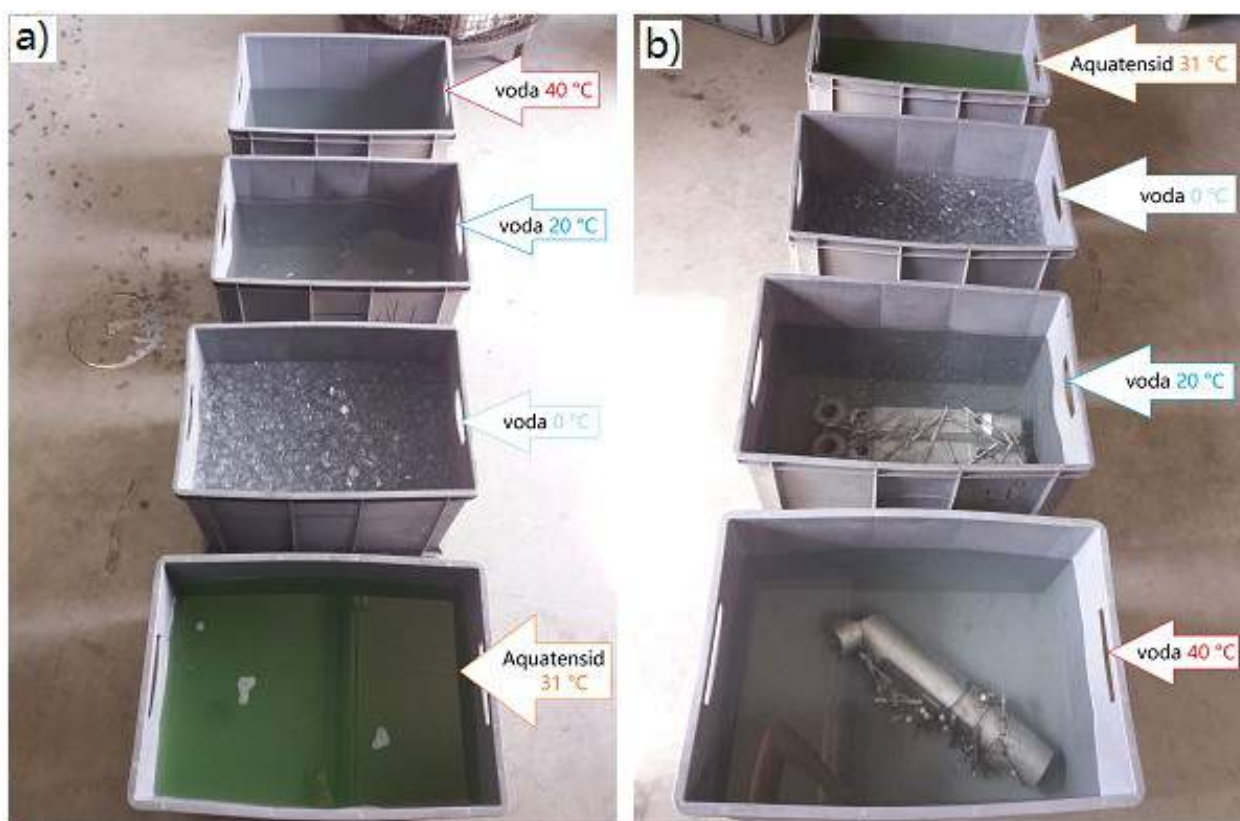
Požadované teploty vody byly dosahovány různými způsoby. Lázně o teplotě 0 °C se snažilo docílit pomocí ledových kostek. Naopak teploty nejteplejší lázně bylo dosaženo smícháním vody z bazénu o teplotě 36 °C, který je neustále napuštěn a je slévárnou používán při tepelném zpracování, s ohřátou vodou ve varné konvici. Voda

o teplotě 20 °C pak byla získána smícháním vody z bazénu s vodou z kohoutku o teplotě 13 °C. Teplota lázně Aquatensidu se nijak neupravovala, byla použita aktuální z bazénu, jelikož měla požadovanou teplotu. Nicméně dosažení či udržení přesných teplot je v praxi obtížné. Konkrétně u vody o teplotě 0 °C se této hodnoty nepodařilo dosáhnout, avšak dosažená teplota se pohybovala v tolerancích 2 stupňů Celsia od této hodnoty. Teplota lázně byla měřena elektrickým ručním teploměrem. Všechny čtyři lázně byly smíchány v nádobách o objemu cca 70 l, kde bylo následně provedeno i ochlazení. Použité nádoby a různé lázně jsou na obr. 35.

Vzhledem k tomu, že odlitků bylo odlito z každé varianty 6 kusů, a že se očekávalo dosažení nejvyšších mechanických hodnot při teplotách lázně 20 °C vody a 31 °C u polymeru, bylo rozmístění odlitků spolu s tyčinkami do nádob takové, jak uvádí tab. 12. Toto rozmístění bylo stejné pro oba dny.

Tab. 12 Kusové rozložení odlitků v lázních

Teplota lázně	0 °C	20 °C	40 °C	AQ 31 °C
Odlitek [ks]	1	2	1	2



Obr. 35 Použité nádoby a lázně, a) teploty lázní, b) lázně se zamočenými odlitky

Za pomoci obsluhy byly odlitky z žíhací pece vyjmuty a vloženy do jednotlivých kalicích médií, za času přemístění pod 10 s. Po zamočení se s odlitky v nádobách manuálně pohybovalo různými směry, jelikož zde nešlo zajistit automatické proudění kapaliny. Odlitky v lázni setrvaly po dobu cca 8 min a následně byla změřena teplota lázně pro zjištění, zda rozdíl teplot nepřesáhl 14 °C. Limit rozdílů teplot před a po zchlazení byly požadovány firmou Aircraft Industries. Přesažení těchto tolerancí mohlo nastat v důsledku malého objemu lázně a v některých případech umístění

dvou odlitků v nádobě možné, avšak ani v jednom případě se tak nestalo. Naměřené hodnoty teplot lázní před a po zamočení spolu s počtem kusů odlitků jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Naměřené teploty lázní před a po zamočení odlitků

Teplota lázně (kusy odlitků v lázni)		0 °C (1 ks)	20 °C (2 ks)	40 °C (1 ks)	AQ 31 °C (2 ks)
Den	Zamočení	Naměřená teplota [°C]			
1.	Před	1,5	19,9	39,9	31,2
	Po	1,9	26,2	42,0	35,3
2.	Před	1,2	20,5	38,8	31,1
	Po	2,6	25,9	40,7	36,3

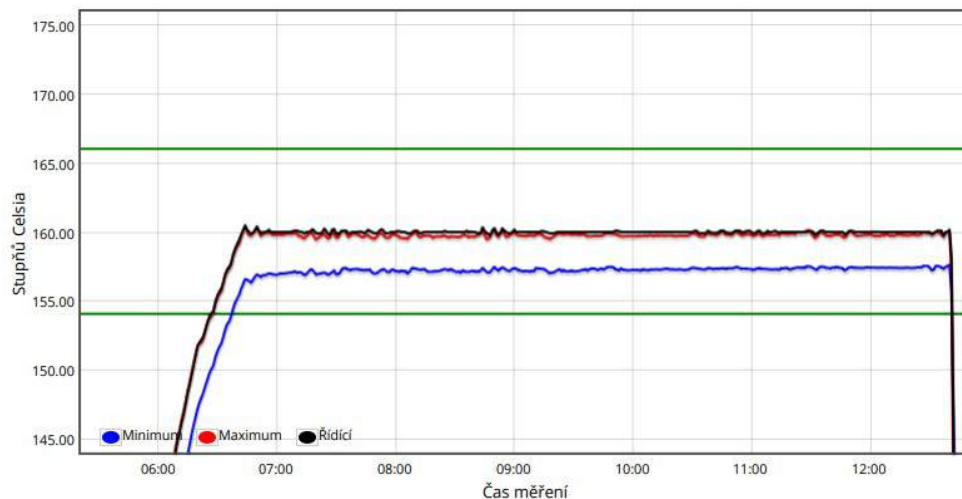
Po vychladnutí byly odlitky umístěny do chladicího zařízení při teplotě -18 °C. Zde odlitky varianty č.1 setrvaly po dobu cca 42 hod a odlitky varianty č.2 po dobu cca 18 hod.

C) Precipitační vytvrzování (umělé stárnutí)

Proces precipitačního vytvrzování byl proveden v komorové sušárně SV 1002/30 Mk. II o vnitřních rozměrech (š_xv_xh) 1000 x 1000 x 1000 mm a objemu 1000 l. Program byl nastaven na teplotu 160 °C a doba výdrže na teplotě byla nastavena na 6 hod ±15 min. Tedy režim T6, pro slévárnu používaný program č.4, dle technologického postupu. Odlitky byly do pece umístěny viz obr. 36. Po ukončení umělého stárnutí se pec automaticky otevřela a odlitky v ní samovolně chladly. Náběh teploty a její průběh po celou dobu umělého stárnutí (US) je vidět na grafu 4.

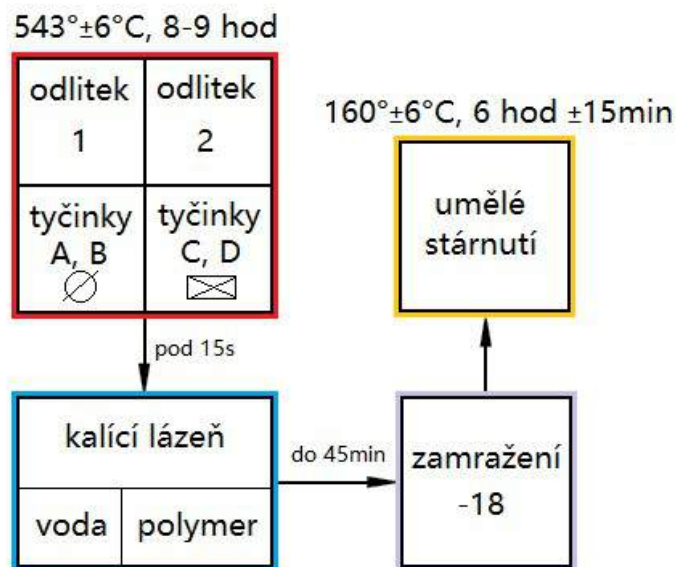


Obr. 36 Rozmístění odlitků v peci při US

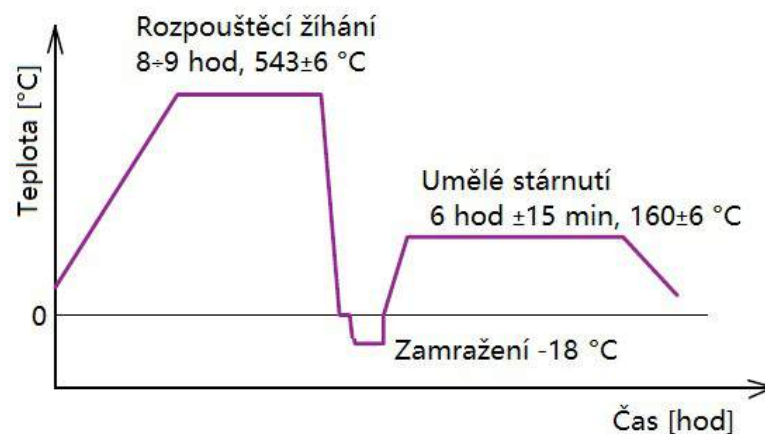


Obr. 4 Náběh a celkový průběh teploty při US

Na obr. 37 je schematicky znázorněn postup celého procesu a jeho parametry. Diagram průběhu tepelného zpracování je pak zobrazen na obr. 38.



Obr. 37 Schématické znázornění použitých vzorků a celého procesu tepelného zpracování a užitě parametry



Obr. 38 Diagram průběhu celého procesu tepelného zpracování

3.3.4 Měření mechanických vlastností

Měření bylo provedeno na zařízení pro trhací zkoušku ve firmě Alucast, s.r.o. Jde o univerzální trhací stroj Zwick/ROELL Beta 50. Zatěžující síla byla 10 kN a zkouška byla prováděna v rozmezí teplot 26÷28 °C. Stroj pak následně automaticky vyhodnocoval následující parametry:

Mez pevnosti v tahu (R_m) – ta je vypočtena jako poměr zatěžující síly a původního průřezu zkušební tyčinky

$$R_m = \frac{F_m}{S_o}$$

F_m ...zatěžující síla

S_o ...počáteční průřez zkušební tyčinky

Mez kluzu ($R_{p0,2}$) – je vypočtena jako napětí při 0,2 % deformace zkušební tyčinky

$$A = \frac{\Delta L}{L_o} * 100$$

L ...rozdíl délek tyčinky po a před roztržením

L_o ...původní délka tyčinky

Prodloužení tyčinky – tažnost (A) – ta je zaznamenána pomocí laserového průtahoměru, který toto měření provádí vždy při každé zkoušce

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_o}$$

$F_{p0,2}$...síla na mezi kluzu (kdy vznikají plastické deformace)

S_o ...počáteční průřez zkušební tyčinky

Tahová zkouška byla provedena u všech variant tepelně zpracovaných zkušebních tyčinek. Minimální hodnoty požadovaných mechanických vlastností jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Požadované minimální hodnoty mechanických vlastností

Požadované minimální hodnoty mechanických vlastností		
R_m	$R_{p0,2}$	A
283 MPa	221 MPa	3 %

Z každé varianty byla provedena tahová zkouška vždy na čtyřech tyčinkách. I přesto, že tyčinky varianty C a D obsahovaly celkem 12 ks tyčinek, avšak různých tloušťek a to 3, 6 a 9 mm, byly vybrány na měření pouze tyčinky o tloušťce 3 mm a 6 mm, vždy po dvou kusech. Zařízení pro zkoušku tahem zaznamenávalo průběh zkoušky u každé měřené tyčinky. Výsledné hodnoty, které jsou uvedeny v tabulkách kapitole 4.1, jsou aritmetickými průměry mezí pevnosti, kluzu a tažnosti všech tyčinek.

3.3.5 Sledování mikrostruktury

Mikrostruktura byla sledována za účelem zjištění, zda na má mít vliv rychlost zamáčení po odlití. Určovala se zde hodnota vzdálenosti sekundárních os dendritů (DAS) a procento pórovitosti (PST). Jelikož se nesledovala struktura před tepelným zpracováním, nelze usoudit, zda měl samotný proces tepelného zpracování na tyto dvě hodnoty vliv. Porovnávají se zde obě varianty odlitku, jelikož se od sebe liší právě rychlostí zamočení při lití. Tedy postupné zamočení (varianta č.1) s cyklem uvedeným v tab. 11 výše a rychlé zamočení celého odlitku najednou (varianta č.2). Vzorek byl vyřezán v místě s tepelným uzlem, proto je zde sledována pórovitost. Z každého odlitku, který prošel procesem tepelného zpracování byl odebrán jeden vzorek z dolní části a jeden vzorek z horní části. Na obr. 39 je vidět místo odběru u jednoho odlitku. Tyto dva vzorky jsou dále označovány jako (H) a (S). Tloušťka stěny H je 12,5 mm a tloušťka stěny S je 13 mm. Dále je zde sledována mikrostruktura v tenké stěně odlitku u vzorku s tloušťkou 3 mm, označovaného jako H- st. Ukázka odběru vzorku přímo z odlitku je na obr. 40.

Pro dokumentaci struktury byl použit optodigitální mikroskop Olympus DSX510. Následné měření DAS a PST bylo provedeno s využitím obrazové analýzy Olympus Stream s rozlišením Materials Extensions.



Obr. 39 Označení odběrů vzorků na modelu odlitku



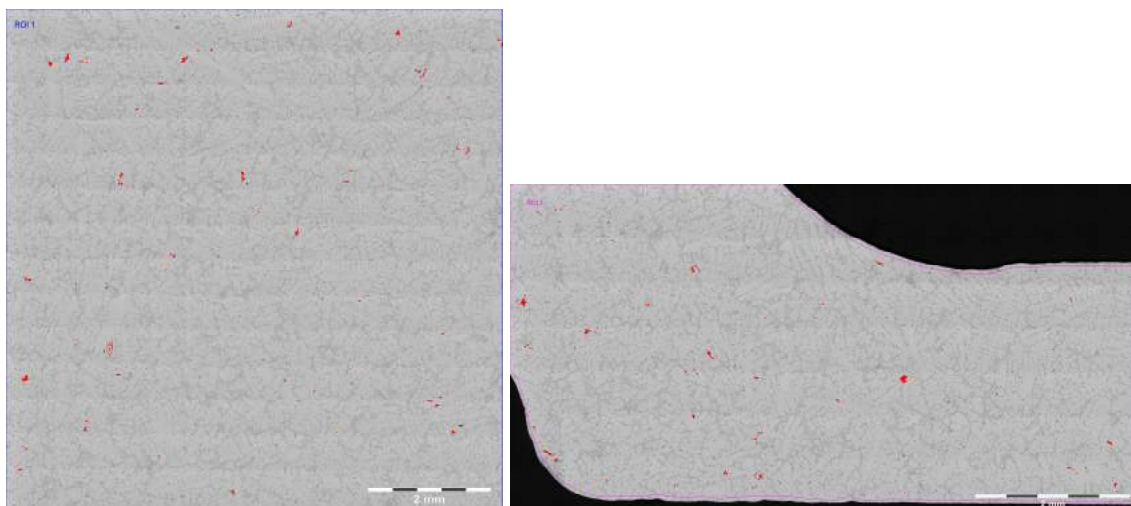
Obr. 40 Ukázka odběru vzorků pro metalografii z odlitku

Příklad způsobu měření hodnoty DAS je zobrazen na obr. 41.



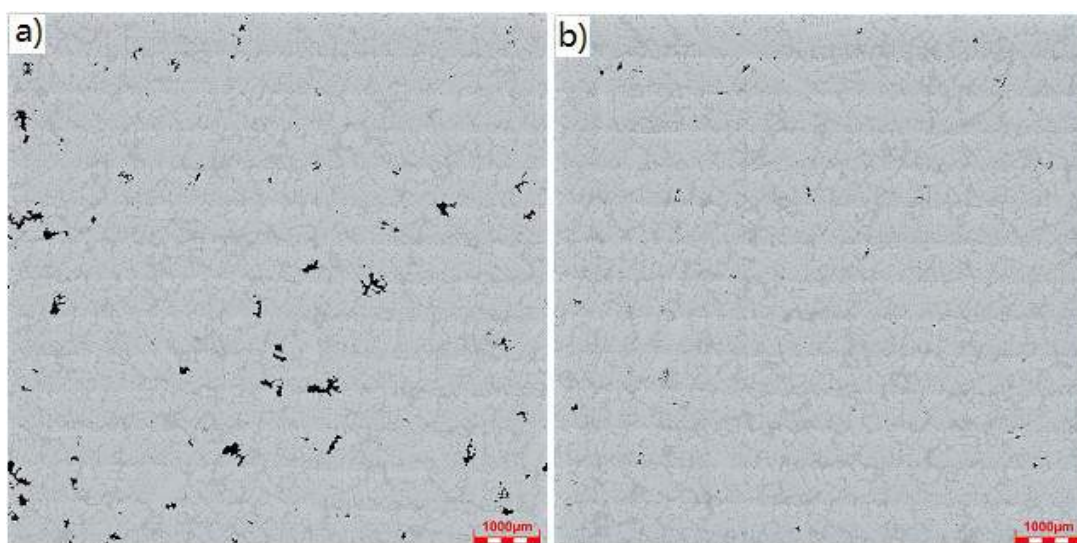
Obr. 41 Ukázka měření hodnoty DAS u vzorku z odlitku č.2 ve zvětšení 200 μm

Ukázka měření pórovitosti u tlustostěnného a tenkostěnného vzorku z odlitku č. 1 se nachází na obr. 42.



Obr. 42 Ukázka měření pórovitosti a zobrazení tenké stěny odlitku varianty č.1

Na obr. 43 je pro porovnání vzorek s největší pórovitostí a), který byl odebrán z odlitku č.2 z horní části a vzorek s nejnižší pórovitostí b) odebraný z odlitku č. 1, také z horní části.



Obr. 43 Ukázka vzorků s nejvyšší a nejnižší pórovitostí

4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

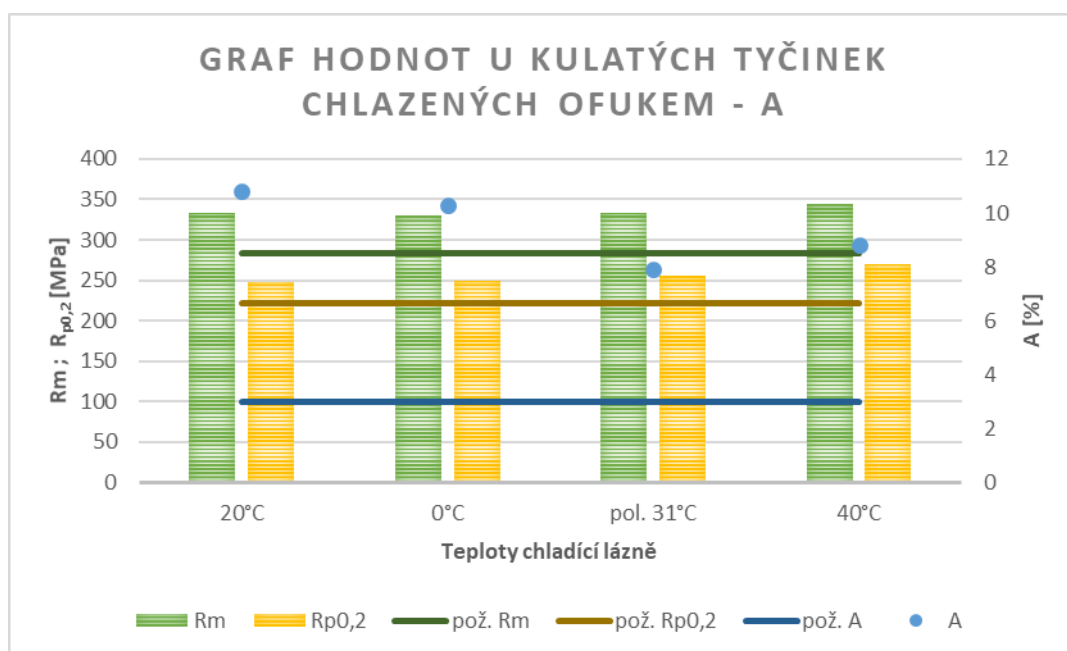
4.1 Hodnocení mechanických vlastností

Dosažené hodnoty mechanických vlastností jednotlivých druhů tyčinek v různých teplotách lázní jsou znázorněny pomocí sloupcových grafů. Vodorovné přímkou značí požadované minimální hodnoty. Pod každou tabulkou je umístěn příslušný graf hodnot s výsledky z trhací zkoušky. Podrobnější výsledky všech měření se nachází v přílohách 4 až 9.

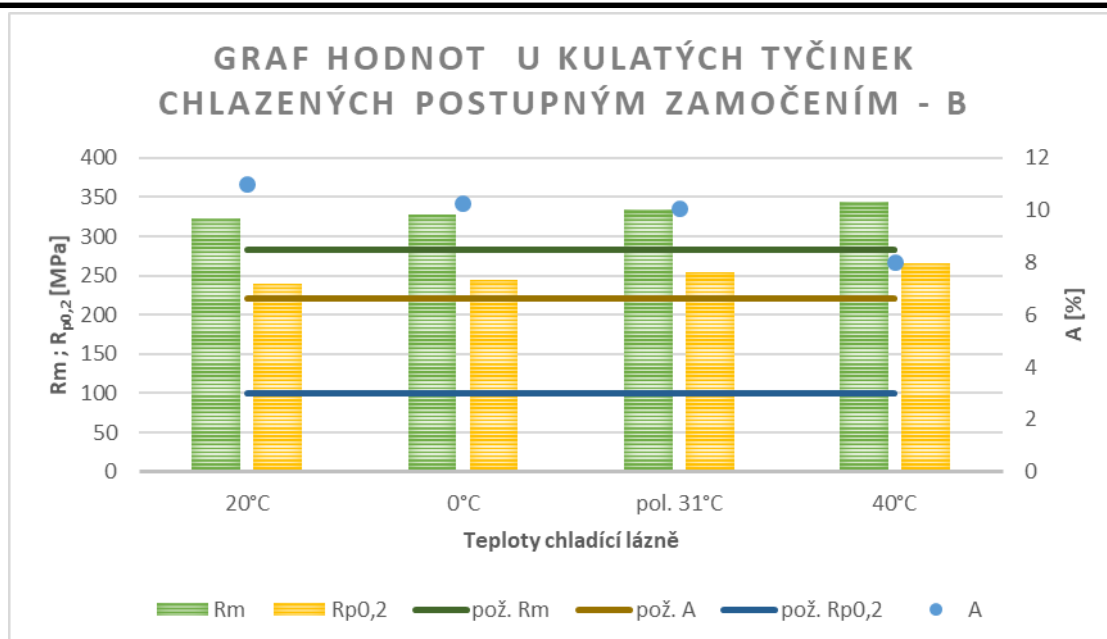
a) Kulaté tyčinky

Tab. 15 Tabulka s průměrnými hodnotami u kulatých tyčinek

Kulaté tyčinky		F_m	R_m	A_{30}	$R_{p0,2}$	Kalící lázeň
Označení		[N]	[MPa]	[%]	[MPa]	
Ochlazené ofukem – A	3	9 437,7	333,8	10,8	247,7	Voda 20 °C
	4	9 319,0	329,6	10,3	249,0	Voda 0 °C
	5	9 422,1	333,2	7,9	255,4	Pol. 31 °C
	6	9 720,8	343,8	8,8	270,2	Voda 40 °C
Ochlazené postupným zamočením – B	7	9 124,4	322,7	11,0	239,1	Voda 20 °C
	8	9 281,4	328,3	10,3	244,9	Voda 0 °C
	9	9 478,7	335,2	10,1	254,0	Pol. 31 °C
	10	9 618,5	340,2	8,0	265,2	Voda 40 °C



Graf. 5 Graf dosažených a požadovaných hodnot u kulatých tyčinek chlazených ofukem



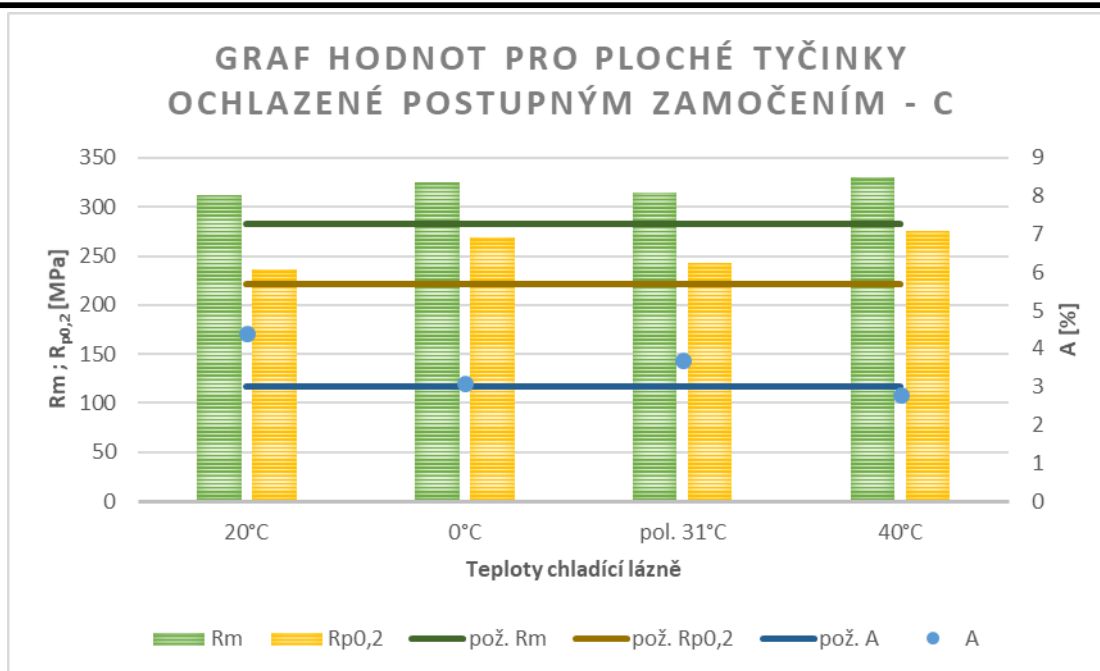
Graf. 6 Graf dosažených a požadovaných hodnot u kulatých tyčinek chlazených postupným zamočením

Z výsledků lze vidět, že požadovaných hodnot je dosaženo ve všech případech. Tažnost dokonce trojnásobně převyšuje požadavek. Zde se v obou variantách nejvyšší hodnoty meze pevnosti a meze kluzu dosáhlo v 40 °C vodě, tažnost byla naopak nejvyšší ve 20 °C. Z těchto výsledků lze vyzorovat protichůdnost tažnosti a pevnosti. U tyčinek zamočených ve 20 °C vodě je nejvyšší tažnost, ale nejnižší pevnost a to u obou typů chlazení. U 40 °C je to naopak.

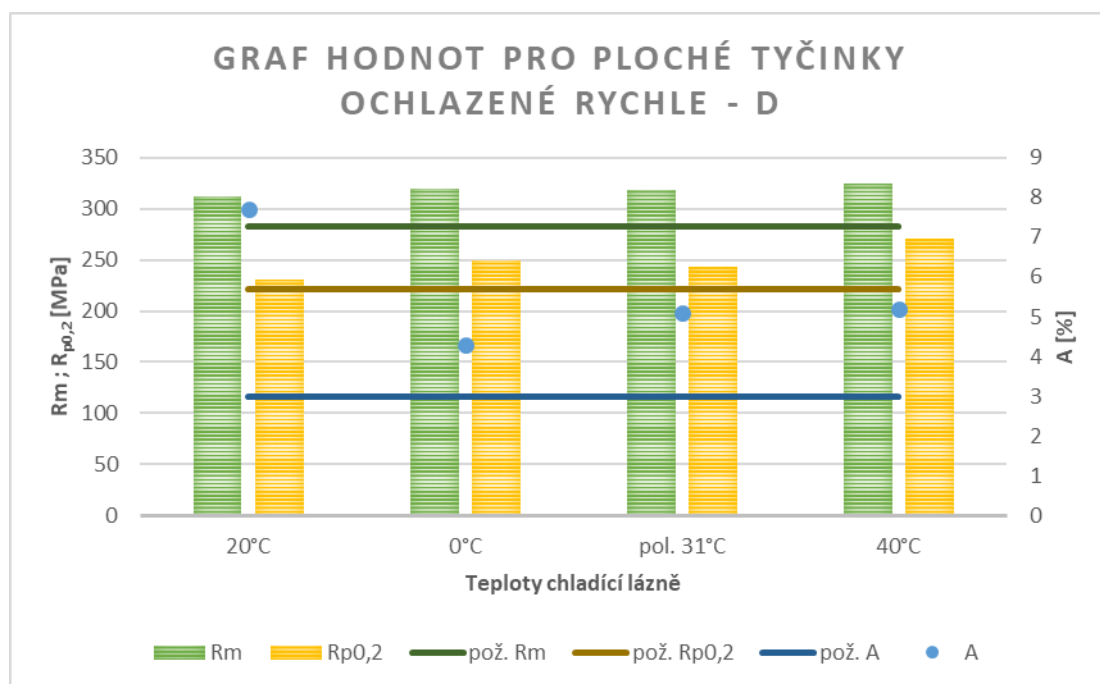
b) Ploché tyčinky

Tab. 16 Tabulka s průměrnými hodnotami u plochých tyčinek

Ploché tyčinky		F_m	R_m	A_{30}	$R_{p0,2}$	Kalící lázeň
Označení		[N]	[MPa]	[%]	[MPa]	
Ochlazené postupným zamočením – C	11	10 738,0	311,4	4,4	236,0	Voda 20 °C
	14	11 206,6	325,3	3,1	268,8	Voda 0 °C
	12	10 827,7	314,1	3,7	243,2	Pol. 31 °C
	13	11 403,2	330,2	2,8	276,1	Voda 40 °C
Ochlazené rychlým zamočením – D	15	10 800,7	312,8	7,7	321,1	Voda 20 °C
	18	11 038,8	319,2	4,3	249,5	Voda 0 °C
	16	11 012,5	319,0	5,1	243,0	Pol. 31 °C
	17	11 200,4	324,2	5,2	270,7	Voda 40 °C



Graf. 7 Graf dosažených a požadovaných hodnot u plochých tyčinek chlazených postupným zamočením



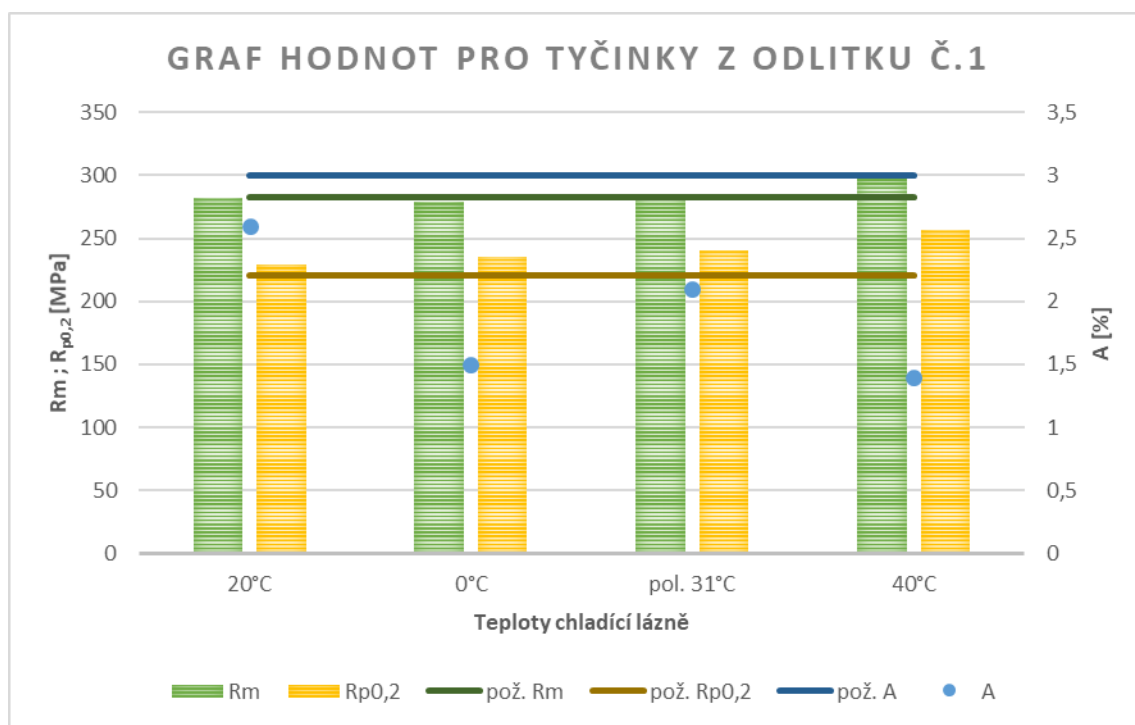
Graf. 8 Graf dosažených a požadovaných hodnot u plochých tyčinek chlazených rychlým zamočením

Zde lze vidět, že požadovaných hodnot nebylo dosaženo pouze v jednom případě. U varianty C nebylo dosaženo požadované tažnosti. Nutno však upozornit na fakt, že u dvou tyčinek, konkrétně u varianty C a tyčinek zamočených v 0 °C a 40 °C vodě, byla v tyčince objevena vada, která mohla ovlivnit právě tyto zjištěné hodnoty. Z výsledků lze konstatovat, že nejvyšší meze pevnosti a meze kluzu v obou případech bylo opět dosaženo ve vodě o teplotě 40 °C. Nejvyšších hodnot tažnosti bylo poté dosaženo u tyčinek varianty C zamočených v polymeru o teplotě 31 °C a u varianty D zamočených ve vodě o teplotě 20 °C. I zde si lze povšimnout protichůdnosti pevnosti a tažnosti.

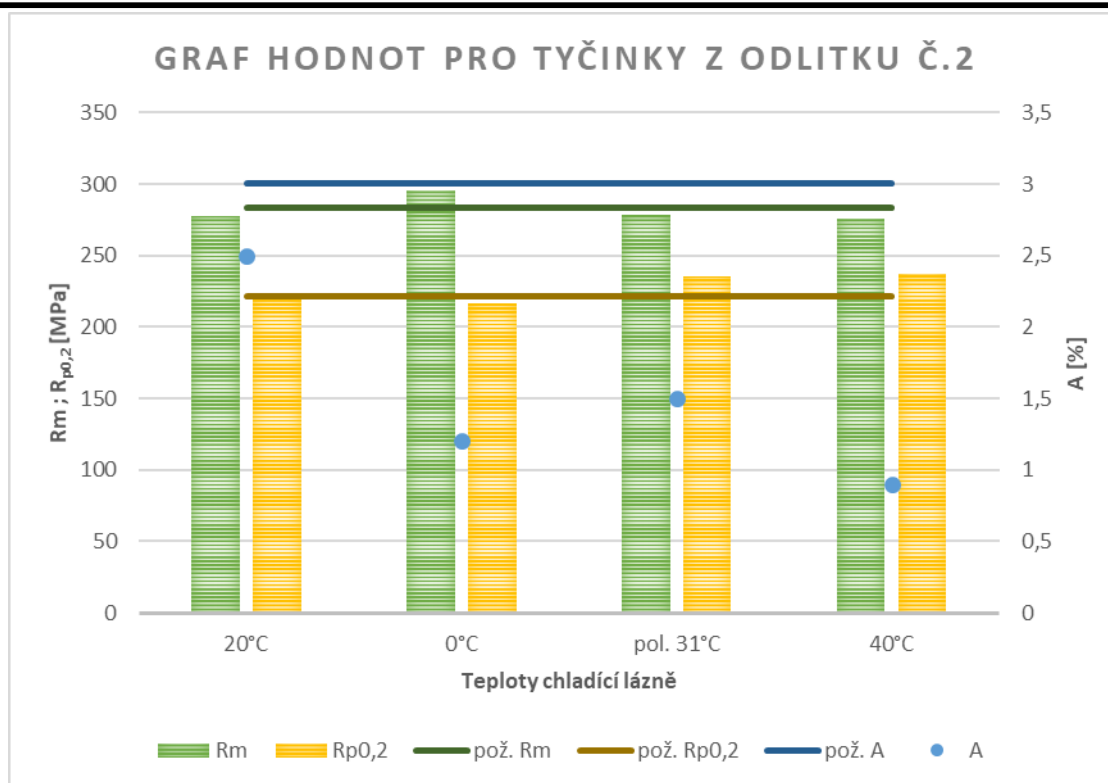
c) Tyčinky z odlitků

Tab. 17 Tabulka s průměrnými hodnotami u tyčinek vyřezaných z odlitků

Tyčinky z odlitku		F_m	R_m	A_{30}	$R_{p0,2}$	Kalící lázeň
Označení		[N]	[MPa]	[%]	[MPa]	
Varianta č. 1	3_7	11 254,8	282,3	2,6	229,6	Voda 20 °C
	4_8	10 914,4	279,0	1,5	234,9	Voda 0 °C
	5_9	11 090,8	284,8	2,1	240,1	Pol. 31 °C
	6_10	12 284,5	298,1	1,4	257,1	Voda 40 °C
Varianta č. 2	11_15	11 376,4	277,4	2,5	221,9	Voda 20 °C
	14_18	13 191,1	295,3	1,2	216,7	Voda 0 °C
	12_16	11 373,1	278,6	1,5	235,2	Pol. 31 °C
	13_17	11 450,9	275,6	0,9	237,2	Voda 40 °C



Graf. 9 Graf dosažených a požadovaných hodnot u tyčinek vyřezaných z odlitků č.1

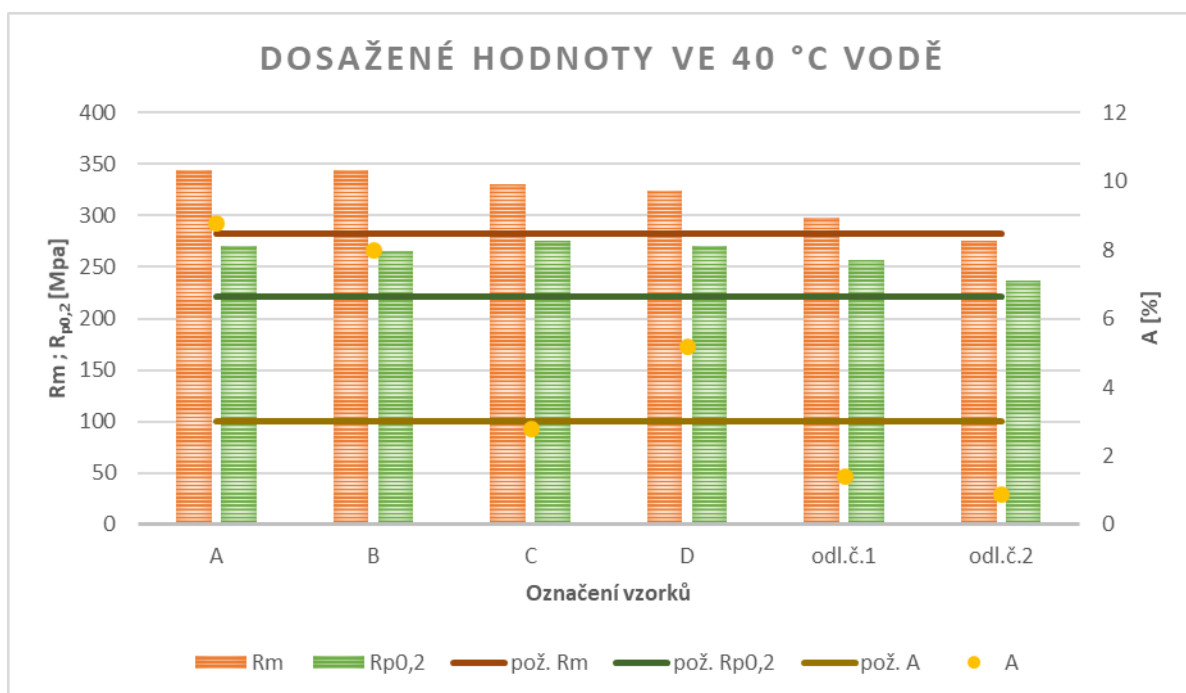


Graf. 10 Graf dosažených a požadovaných hodnot u tyčinek vyřezaných z odlitků č.2

Obecně se u vzorků odebíraných přímo z odlitků předpokládá, že dosahují nižších hodnot mechanických vlastností než u zkušebních tyčinek. Může to být způsobeno právě již zmiňovanou polohou plochy odběru vzorků a s tím související výskyt nečistot. Celkově se zde dosahuje malých tažností. Ani v jednom případě nebylo dosaženo požadovaných minimálních hodnot. Nejvyšších hodnot tažnosti bylo dosaženo u tyčinek zamočených ve 20 °C. Naopak požadovaných hodnot pevnosti v kluzu bylo, i když těsně, dosaženo ve všech případech. Nejvyšší hodnoty meze kluzu bylo dosaženo u obou variant odlitků zamočených do 40 °C vody. Požadované meze pevnosti bylo dosaženo u odlitku č.1 pouze v 40 °C vodě a u odlitku č.2 v 0 °C vodě.

Výsledné grafy pro jednotlivé lázně a typy tyčinek jsou zobrazeny v grafech 11 až 14. Z výsledků lze určit, že nejlepší variantou je lázeň o teplotě 40 °C a jako druhá nejlepší vyšla voda o teplotě 20 °C.

Graf. 11 Požadované a dosažené hodnoty ve 40 °C vodě



A-tyčinky kulaté – ofuk

B-tyčinky kulaté – pomalé zamočení

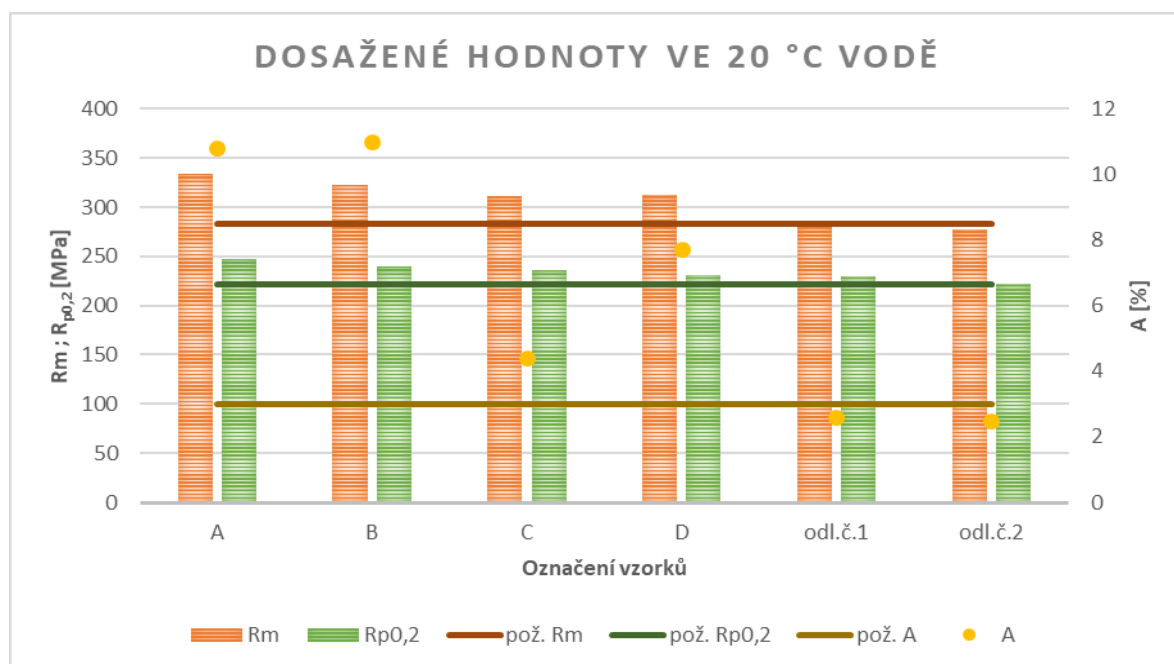
C-tyčinky ploché – pomalé zamočení

D-tyčinky ploché – rychlé zamočení

Odl.č.1- vyřezané tyčinky – pomalé zamočení

Odl.č.2- vyřezané tyčinky – rychle zamočené

Graf. 12 Požadované a dosažené hodnoty ve 20 °C vodě



A-tyčinky kulaté – ofuk

B-tyčinky kulaté – pomalé zamočení

C-tyčinky ploché – pomalé zamočení

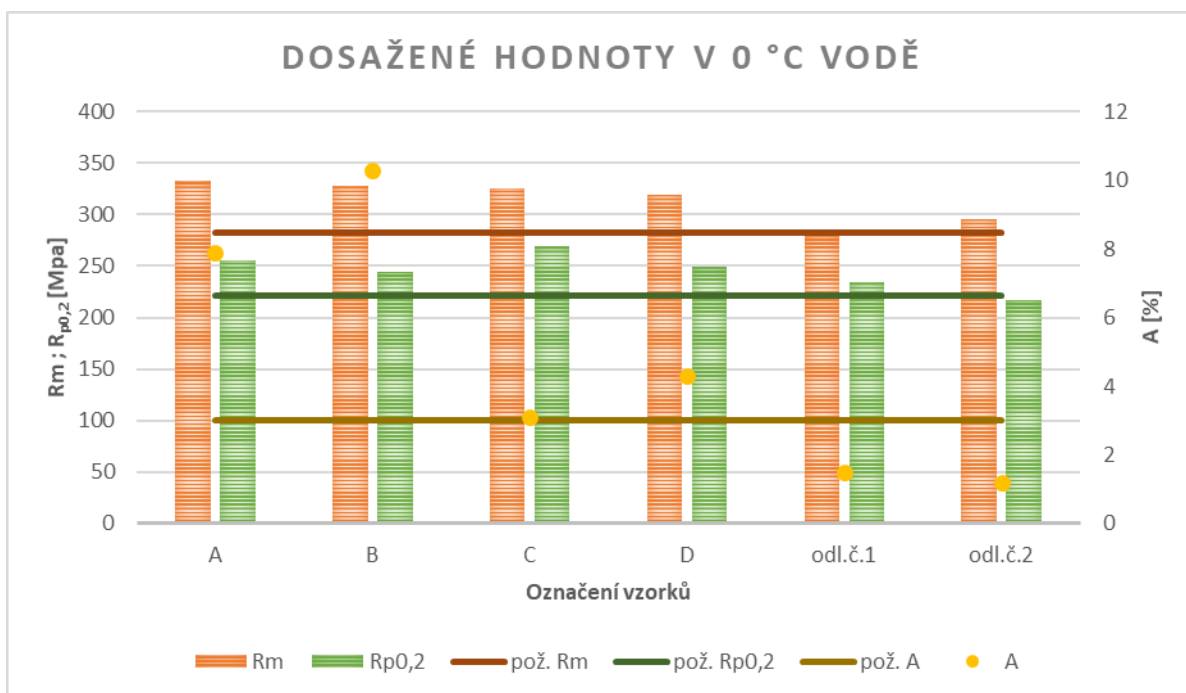
D-tyčinky ploché – rychlé zamočení

Odl.č.1- vyřezané tyčinky – pomalé zamočení

Odl.č.2- vyřezané tyčinky – rychle zamočené

Co se týče porovnání vody o teplotě 0 °C a polymeru o teplotě 31 °C, nepatrně lépe vychází polymerová lázeň. Voda měla vyšší hodnoty pouze u meze pevnosti. Vzhledem k tomu, že je tato teplota lázně těžko udržitelná je lepší použít polymer.

Graf. 13 Požadované a dosažené hodnoty v 0 °C vodě



A-tyčinky kulaté – ofuk

B-tyčinky kulaté – pomalé zamočení

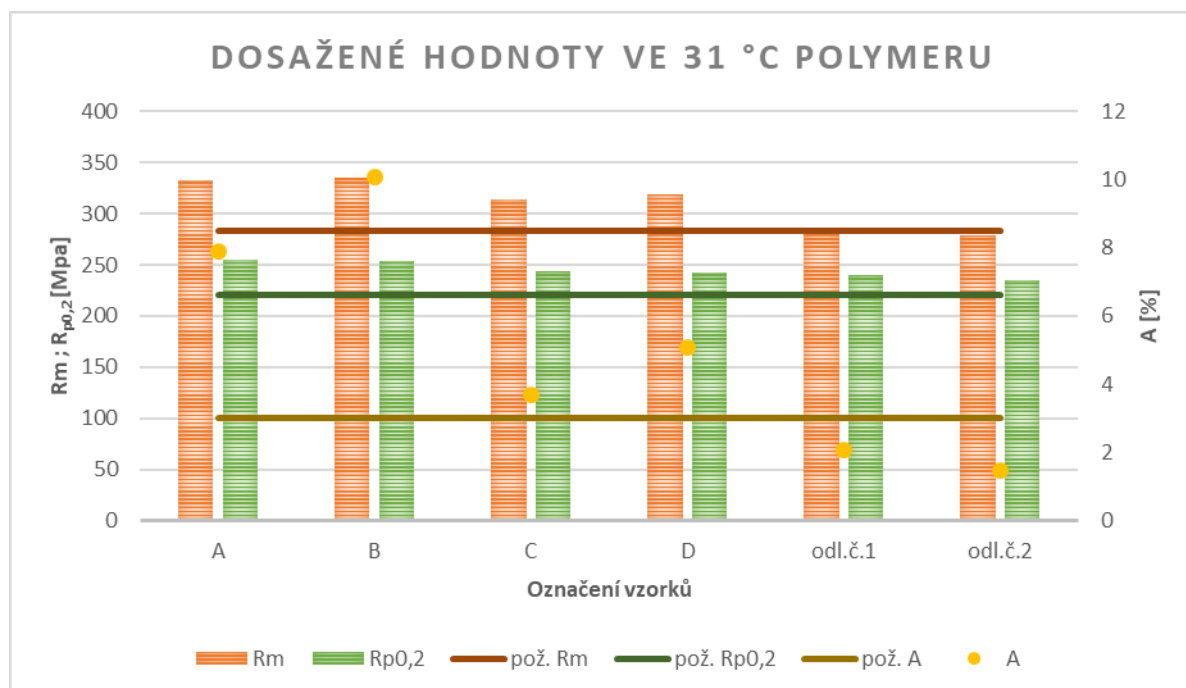
C-tyčinky ploché – pomalé zamočení

D-tyčinky ploché – rychlé zamočení

Odl.č.1- vyřezané tyčinky – pomalé zamočení

Odl.č.2- vyřezané tyčinky – rychle zamočené

Graf. 14 Požadované a dosažené hodnoty ve 31 °C polymeru



A-tyčinky kulaté – ofuk

B-tyčinky kulaté – pomalé zamočení

C-tyčinky ploché – pomalé zamočení

D-tyčinky ploché – rychlé zamočení

Odl.č.1- vyřezané tyčinky – pomalé zamočení

Odl.č.2- vyřezané tyčinky – rychle zamočené

4.2 Hodnocení mikrostruktury

Struktura byla sledována na odlitcích po tepelném zpracování. Samotné tepelné zpracování má vliv především na eutektický křemík a jeho sferoidizaci. Eutektikum je ovlivněno modifikací křemíku. Sledovaná mikrostruktura byla ovlivněna především rychlostí chladnutí odlitků. Také se sledoval rozdíl hodnot DAS a PST v horní a dolní poloze odlitků.

A) Měření hodnoty DAS

Naměřené průměrné hodnoty DAS jsou uvedeny v tabulkách 18 a 19. Každá varianta odlitků je dále rozdělena dle toho, v jaké lázni byla po rozpouštěcím žíhání ochlazena. Podrobnější výsledky měření jednotlivých vzorků jsou uvedeny v přílohách 10 a 11.

Tab. 18 Naměřené průměrné hodnoty u odlitku č.1

Označení vzorků	Teplota lázně RŽ	Hodnoty DAS naměřených u odlitků č. 1		
		H	H-st	S
3_7	20 °C	45,50	47,89	51,75
4_8	0 °C	41,98	40,44	44,69
5_9	31 °C	44,03	44,49	41,75
6_10	40 °C	42,80	40,17	53,60

Jelikož byla tato varianta odlitku po odlití ochlazena v lázni postupně, lze zde očekávat pomalý průběh chladnutí, a tudíž větší hodnoty DAS – delší dendrity. Rozdíl mezi horní a spodní polohou vzorků je viditelný, avšak lze konstatovat, že rozdíl je zde nepatrný. Vzorky z vrchní části odlitků (S) mají delší dendrity na rozdíl od vzorků odebraných z dolní části (H).

Tab. 19 Naměřené průměrné hodnoty u odlitku č.2

Označení vzorků	Teplota lázně RŽ	Hodnoty DAS naměřených u odlitků č. 2		
		H	H-st	S
11_15	20 °C	39,02	41,69	44,71
14_18	0 °C	39,15	39,96	40,31
12_16	31 °C	42,19	35,56	43,66
13_17	40 °C	46,04	40,41	43,65

Varianta odlitku č.2 byla po odlití zamočena do lázně rychle, tudíž zde lze kvůli kratšímu chladnutí očekávat kratší dendrity, tedy menší hodnotu DAS. Zde není rozdíl mezi polohami vzorků tak výrazný jako u odlitku č. 1, jelikož horní část odlitku byla ochlazována stejně rychle jako spodní část. Lze považovat rozdíl za nepatrný.

Při porovnání výsledků u obou variant odlitků lze konstatovat, že varianta č.2 má jemnější strukturu tudíž je tato varianta vhodnější.

B) Měření porezity

Při měření měly nalezené póry podobu mikrostaženin v mezidendritických prostorech. Větší pórovitosti se dosáhne u rychle tuhnuoucích odlitků, kdy krystaly tuhé fáze uzavrou malé objemy taveniny. Do těchto prostor již nemůže dosazovat tekutý kov, a tak dochází ke vzniku mikrostaženin.

Zhodnocení pórovitosti pro každou variantu odlitku s rozdílnými lázněmi zamočení při rozpouštěcím žíhání je uvedeno v tab. 20 a 21. Plocha měření se u silnostěnných vzorků H a S v průměru pohybovala okolo 66 mm² a u tenkostěnných vzorků H – st okolo 27 mm².

Tab. 20 Tabulka naměřených hodnot pórovitostí u odlitků varianty č.1

Označení vzorků	Teplota lázně RŽ	Procento pórovitosti u odlitku varianty č.1 [%]		
		H	H-st	S
3_7	20 °C	0,256	0,224	0,276
4_8	0 °C	0,158	0,197	0,323
5_9	31 °C	0,204	0,287	0,285
6_10	40 °C	0,258	0,162	0,380

Tab. 21 Tabulka naměřených hodnot pórovitostí u odlitků varianty č.2

Označení vzorků	Teplota lázně RŽ	Procento pórovitosti u odlitku varianty č.2 [%]		
		H	H-st	S
11_15	20 °C	0,277	0,444	0,508
14_18	0 °C	0,331	0,267	0,255
12_16	31 °C	1,169	0,777	0,308
13_17	40 °C	0,389	0,394	0,273

Porezita je ovlivněna několika faktory. Nejdůležitějším z nich je rychlost chladnutí. Také místa odebraných vzorků se nacházela při lití v různé rovině, a lišila

se zde tloušťka stěny. Důležitou roli hraje i konstrukce „nálitkové soustavy“. Varianta č. 1 má podlouhlou „nálitkovou soustavu“ nad horní částí odlitku, která prohřívala jeho horní část. Byl ochlazován pomalu, a tak proběhlo dosazování kovu do celého odlitku.

Druhý odlitek byl ochlazen rychle v celém objemu a dlouhá „nálitková soustava“ zde chyběla. Tudíž bylo možné očekávat vyšší porezity, jelikož rychle vytvořené dendrity zabrání dosazování do míst, kde se stále nachází tavenina. Nelze zde tedy přesně určit rozdíl mezi horní a spodní částí odlitku a jeho pórovitostí.

Z naměřených výsledků lze ale usoudit, že vyšší porezity se dosáhlo u odlitku č.2.

ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo zjištění optimálních parametrů tepelného zpracování odlitků ze slitiny AlSi7Mg0,6 a to především teploty a typu použité kalící lázně. Dílčí část se pak zabývá možností ovlivnění mechanických hodnot vybraného odlitku pomocí změny nálitkového systému.

Z výsledků získaných v průběhu experimentů spojených s optimalizací parametrů tepelného zpracování (především kalící lázně) vybraných odlitků lze vyvodit některé dílčí závěry.

Jelikož se varianty odlitků od sebe liší konstrukcí „nálitkové soustavy“, bylo očekáváno dosažení rozdílných hodnot mechanických vlastností. Ty byly zkoumány s pomocí různých typů zkušebních tyčinek – „standartních“ kulatých a dále plochých a vyřezaných přímo ze stěny odlitku. Každý typ tyčinky byl ochlazován jiným způsobem (viz Tab. 11 - kap. 3.3.2.)

Nejvyšších hodnot mezí kluzu a pevnosti bylo dosaženo u kulatých tyčinek, které byly zamočeny do čisté vody o teplotě 40 °C. Jejich výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 15. Ploché tyčinky zamočené do stejné lázně vykazovaly také poměrně vysoké hodnoty mechanických vlastností. Přehled dosažených hodnot je uveden v Tab. 16. Nejvyšší tažnosti u kulatých i plochých tyčinek bylo dosaženo v čisté vodě o teplotě 20 °C.

Hodnoty mechanických vlastností tyčinek vyřezaných přímo ze stěn odlitků jsou nižší oproti hodnotám získaným z kulatých a plochých předlitých tyčinek. Velkou roli hraje především místo odběru vzorku. Nacházely se v horní části odlitku, kde je možný výskyt vyplavených nečistot (viz obr. 30.). Nejvyšších mechanických hodnot bylo opět dosaženo ve vodě o teplotě 40 °C. (viz. Tab. 17).

Jako optimální se tedy jeví teplota kalící lázně 40 °C, při použití čisté vody bez přísad, kdy bylo dosahováno nejvyšších hodnot mezí kluzu a pevnosti.

U mikrostruktury bylo hodnoceno procento pórovitosti (PST) a hodnota vzdáleností sekundárních os (DAS). Tyto parametry byly ovlivněny především rychlostí ochlazení, přičemž vyšších mechanických hodnot se obecně dosahuje při jemnější struktuře odlitku. Odlitky varianty č. 1 byly ochlazovány postupně a pomalu, v porovnání s odlitky varianty č. 2, které byly zamočeny rychle najednou. Bylo tak provedeno v zamáčecím zařízení ANNA. Jemnější struktury (nižší hodnoty DAS) bylo dosaženo u varianty č. 2. Bylo zde však vyšší procento porezity než u varianty č. 1, což bylo způsobeno rychlým ochlazením, kdy se v mezidendritických prostorech uzavřel mikroobjem taveniny a tekutý kov se do těchto míst nestihl dosazovat. Toto procento pórovitosti bylo však relativně malé a hodnota DAS se v horní části odlitku příliš nelišila od dolní části.

Návrh dalšího postupu

V případě dalšího hlubšího zkoumání této problematiky je potřeba především rozhodnout, které z mechanických vlastností mají pro následné užití odlitku vyšší prioritu. Zda mít hrubozrnnou strukturu s nižším obsahem porezity, ale horšími

mechanickými vlastnostmi, nebo mít jemnozrnnou strukturu s lepšími mechanickými vlastnostmi, ale s vyšší pórovitostí.

Samotné porovnání realizovaných variant odlitků s různými nálitkovými soustavami však nebylo zcela možné, což bylo zapříčiněno jejich rozdílným způsobem (rychlostí) zamáčení.

Pro přesnější zjištění vlivu kalící lázně rozpouštěcího žíhání na mechanické vlastnosti by bylo vhodnější zamáčet obě varianty stejným cyklem ochlazení. Docílí se tak podobných hodnot vzdáleností sekundárních os a pórovitosti. Následně by pak bylo možné provádět potřebné experimenty s vypovídajícími výsledky.

Pokud je vyžadována jemnozrnná struktura doporučuje se odlitek zamočit rychle najednou i s rizikem vyššího výskytu mikrostaženin.

Jelikož bylo vyšších mechanických hodnot dosaženo u varianty č. 1 (odlitek s podlouhlou nálitkovou soustavou), slévárna Alucast, s.r.o. nemusí na základě výsledků této diplomové práce měnit konstrukci „nálitkové soustavy“. Teplotu vody kalící lázně je pak doporučeno udržovat na teplotě 40 °C po všechny roční období.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ROUČKA, Jaromír, 2004. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2790-6.
2. LETOVANEC, Juraj, 2018. *Vliv teplotního režimu vytvrzování slitin typu Al-Si na mechanické vlastnosti*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
3. MICHNA, Štefan a kol., 2005. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin. ISBN 80-8904-88-4.
4. SLAVÍČEK, Jiří, 2011. *Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
5. LAŠTOVICA, Petr, 2012. *Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
6. HRČKOVÁ, Martina, 2011. *Optimalizace tepelného zpracování slitiny hliníku AlSi7Mg0,6*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
7. *Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti*, 2014. Tupesy, Alucast, s.r.o.
8. KREJČÍ, Tomáš, 2009. *Precipitační vytvrzování odlitků ze slitin hliníku*. Liberec. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
9. ROLEČEK, Jakub, 2012. *Mechanické vlastnosti a struktura slitin hliníku po tepelném zpracování*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
10. NĚMEC, 2017. *Tepelné zpracování Al slitin: Pracovní předpis pro tepelné zpracování Al odlitků*. Tupesy.
11. BOLIBRUCHOVÁ, Dana a Richard PASTIRČÁK, 2018. *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilina: Edis. ISBN 978-80-554-1463-8.
12. PTÁČEK, Luděk, 2002. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM. ISBN 80-720-4248-3.
13. ZELNÍČKOVÁ, Marta, 2016. *Optimalizace tepelného zpracování odlitků litých metodou SEED*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
14. *Metalurgie: Firemní materiály*, Tupesy, Alucast, s.r.o.
15. *Ochlazování odlitků v zamáčecí lázni*, 2014. Tupesy, Alucast, s.r.o.
16. *Vliv zamrazení (zmrazení) odlitků*, 2014. Tupesy, Alucast, s.r.o.
17. Precipitace, 2005. In: *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň: ATeam [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Precipitace09_10.pdf
18. CUBBERLY, William H, 1979. *Metals Handbook: Volume 2, properties and selection: Nonferrous alloys and pure metals*. 9 th. United States of America: American Society For Metals. ISBN 0-87170-008-5.
19. BARTOŠ, Ladislav a Thorsten BEITZ, 2013. Pozitivní aspekty použití polymerů ve vodních lázních precipitačního vytvrzování Al. In: *Trendy ve zpracování slitin neželezných kovů: 5. Holečkova konference*. Brno: Česká slévárenská společnost, s. 8. ISBN 978-80-02-02427-9.
20. SVOBODOVÁ, Jaroslava a Jaromír CAIS, 2014. Vliv tepelného zpracování na korozní odolnost slitiny AlSi7Mg0,3 legované antimonem. *Slévárenství*. LXII (7-8), 216-219.
21. WALLA, Viktor, 1965. *Kaličství v kostce*. Praha: Polytechnická knižnice. ISBN 24-058-65.
22. TECHOIL, 2012. *Oleje, Polymery a soli pro kalící a zušlechťovací lázně: Aquatensid D*. Pořič nad Sázavou.
23. Přehled materiálů a mechanických hodnot, 2019. *Alucast, s.r.o.* [online]. Tupesy [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://alucast.cz/data/userfiles/files/Alucast_mechanical_properties.pdf

24. OSTRÉZÍ, Barbora, 2017. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
25. BEELEY, P.R a R.F SMART, 1995. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials. ISBN 0-901716-66-9.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Přehled programů tepelného zpracování

Příloha 2 Odlitek č. 1 kolo s žebry

Příloha 3 Odlitek č. 2 sloupek do letadla

Příloha 4 Tyčinky kulaté: chlazené ofukem A

Příloha 5 Tyčinky kulaté: zamočené postupně B

Příloha 6 Tyčinky ploché: zamočené postupně C

Příloha 7 Tyčinky ploché: zamočené rychle D

Příloha 8 Tyčinky z odlitku varianty č. 1

Příloha 9 Tyčinky z odlitku varianty č. 2

Příloha 10 Tabulka s výsledky z měření hodnoty DAS u odlitku č. 1

Příloha 11 Tabulka s výsledky z měření hodnoty DAS u odlitku č. 2