



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH ODLITKŮ

HEAT TREATMENT OF ALUMINUM CASTINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Mátl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2020

Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Vojtěch Mátl
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Václav Kaňa, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 bakalářské práce:

Tepelné zpracování hliníkových odlitků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelné zpracování je proces, který umožňuje v širokém rozmezí měnit nejen mechanické vlastnosti materiálů. V praxi se ve velké míře používá u ocelí i jiných slitin železa. Nicméně i u slitin hliníku na odlitky má své důležité a nezastupitelné místo.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je sestavení ucelené literární rešerše pojednávající o tepelném zpracování hliníku a jeho slitin s důrazem na slévárenské slitiny. Součástí práce bude i praktický experiment zkoumající vliv podmínek při vytvrzování na výsledné vlastnosti slitiny.

Seznam doporučené literatury:

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

GRUZLESKI, J.E. a B.M. CLOSSET. The treatment of liquid aluminum-silicon alloys. Des Plaines: American Foundrymen's Society, c1999. ISBN 08-743-3121-8.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tématem tepelného zpracování hliníkových odlitků. První část práce je tvořena přehledem slévárenských slitin a používaných technologií výroby odlitků, za kterými následuje popis tepelného zpracování. Ve druhé části je popsán experiment, zkoumající vliv podmínek při vytvrzování na výsledné vlastnosti hliníkové slitiny.

Klíčová slova:

Slitiny hliníku, slévárenské slitiny, hliníkové odlitky, tepelné zpracování, žhání, vytvrzování, tvrdost

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the topic of heat treatment of aluminium castings. The first part of this thesis comprises of casting alloys and casting technology summary, followed by description of aluminium heat treatment. The second part describes an experiment, that examines the effect of conditions during aging upon final aluminium alloy properties.

Key words:

Aluminium alloys, casting alloys, aluminium castings, heat treatment, annealing, hardening, hardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MÁTL, Vojtěch. *Tepelné zpracování hliníkových odlitků* [online]. Brno, 2021. 45 s. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132834>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství. Vedoucí práce Václav Kaňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci na téma **Tepelné zpracování hliníkových odlitků** vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 30.4.2021

.....
Vojtěch Mátl

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval při vytváření této bakalářské práce. Stejný dík patří i Odboru slévárenství a jeho členům za to, že mi umožnili práci ve školní slévárně a laboratořích.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu v průběhu dosavadního studia na vysoké škole.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD	9
1 SLITINY HLINÍKU	10
1.1 Rozdělení slitin	10
1.2 Označování slitin	11
2 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY	12
2.1 Slitiny Al-Si	12
2.1.1 Binární slitiny Al-Si	12
2.1.2 Nadeutektické slitiny Al-Si	13
2.1.3 Slitiny Al-Si-Cu	13
2.1.4 Slitiny Al-Si-Mg	14
2.2 Slitiny Al-Cu	15
2.3 Slitiny Al-Mg	15
2.4 Slitiny Al-Zn	16
3 VÝROBA HLINÍKOVÝCH ODLITKŮ	17
3.1 Lití do netrvalých forem	17
3.2 Lití do trvalých forem	19
4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ	22
4.1 Žihání	22
4.2 Vytvrzování	23
4.2.1 Rozpouštěcí žihání	24
4.2.2 Ochlazení ze žihací teploty	24
4.2.3 Precipitační vytvrzení	26
4.3 Značení tepelného zpracování	27
4.4 Zařízení pro tepelné zpracování	28
4.5 Řešení problémů tepelného zpracování	30
5 EXPERIMENT	31
5.1 Návrh experimentu	31
5.2 Příprava vzorků	32
5.3 Rozpouštěcí žihání	32
5.4 Vytvrzování	34
5.5 Měření tvrdosti	37
ZÁVĚRY	40

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM TABULEK

ÚVOD

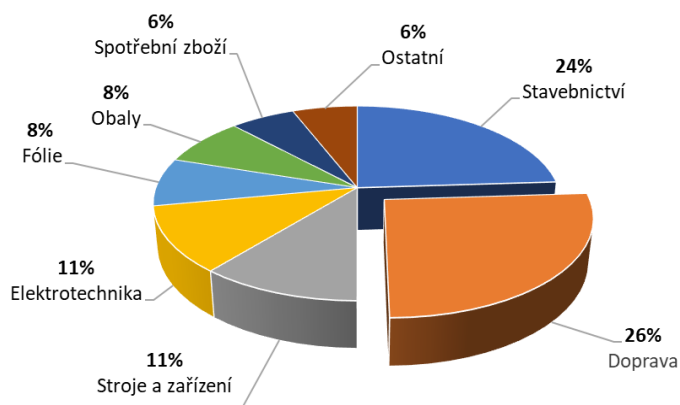
Od nápojových plechovek, až po bloky spalovacích motorů jsme obklopeni výrobky z tohoto lehkého kovu. Reč je samozřejmě o hliníku. Od doby jeho prvního izolování uběhlo už 196 let. Za tu dobu byla jeho výroba výrazně zefektivněna a zlevněna, díky čemuž se posunul z pozice netradičního šperku až na místo druhého nejpoužívanějšího kovu ve strojírenské výrobě [1,2].

Přestože se čistý hliník dobře uplatňuje v elektrotechnice, pro konstrukční použití se z důvodu malé pevnosti příliš nehodí. Jeho slitiny s dalšími prvky tímto nedostatkem však netrpí a umožňují naplno využít jeho potenciál.

Právě slitiny hliníku se staly prakticky nenahraditelným materiálem především v dopravě viz obr. 1. Mezi další významné odběratele patří stavebnictví, strojírná výroba, elektrotechnika a potravinářský průmysl [1,3].

Hlavní výhodou slitin je jejich nízká hustota, která umožňuje snižování hmotnosti dopravních prostředků, tím pádem i spotřeby paliva a vyprodukovaných emisí, při zachování požadovaných mechanických vlastností a bezpečnosti. Dalšími výhodami hliníkových slitin jsou například odolnost proti korozi, dobrá tvařitelnost a svařitelnost.

Příklady použití hliníkových slitin jsou zobrazeny na obr. 2.



Obr. 1 Spotřeba hliníku podle odvětví v roce 2019 [4]



Obr. 2 Příklady použití hliníkových slitin [5,6,7,8,9]

1 SLITINY HLINÍKU

Jak již bylo zmíněno, častěji než čistý hliník se používají jeho slitiny s dalšími prvky. Mezi hlavní legující prvky patří především měď, křemík, hořčík, zinek a v menší míře mangan a nikl. Právě tyto prvky udělují slitinám jejich požadované vlastnosti a určují oblast jejich následného použití [3,10].

1.1 Rozdělení slitin

Druh a obsah přísadových prvků umožňuje hliníkové slitiny rozdělit podle několika základních kritérií:

- chemického složení:

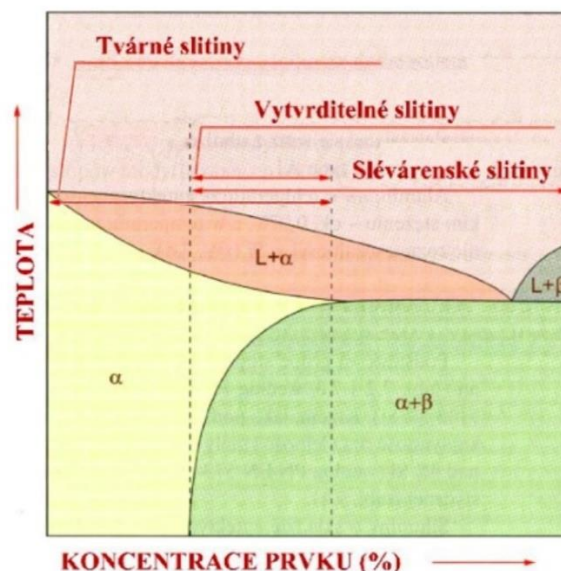
Al-Cu-Mg	Al-Mg	Al-Zn
Al-Cu-Ni	Al-Mg-Si	Al-Zn-Mg
Al-Si	Al-Mn	
- odolnosti proti korozi:

slitiny se zvýšenou odolností proti chemickým vlivům,
slitiny s menší odolností proti chemickým vlivům (např. slitiny s obsahem Cu)
- schopnosti tepelného zpracování:

nevytvrditelné (je možné provést pouze žhání),
vytvrditelné (umožňují za určitých podmínek výrazné zvýšení mechanických vlastností)
- způsob zpracování:

slitiny ke tváření,
slitiny slévárenské

Obecně je možné určit způsob zpracování a to, jestli se jedná o slitinu vytvrditelnou nebo nevytvrditelnou pomocí rovnovážného diagramu hliníku a přísadových prvků viz obr. 3 [3,10,11].



Obr. 3 Schéma rozdělení hliníkových slitin [12]

Slévárenské slitiny hliníku mají většinou větší podíl legujících prvků než slitiny určené pro tváření. Pro vytvrditelnost slitiny je nutná změna rozpustnosti legujícího prvku v tuhém roztoku α [3,10,11].

1.2 Označování slitin

Označování hliníku a jeho slitin se řídí Českými technickými normami a v současné době je platné jak původní označení podle ČSN, tak nové označení podle ČSN EN. Normy ČSN EN mají však v technické praxi přednost. Velmi často je možné se v tuzemských slévárnách setkat také s označením podle německé normy DIN 1725 a výjimečně podle amerických ASTM [2,11].

Slitiny pro tváření se podle ČSN EN 573-1 až 3 označují pomocí:

- předpony EN následované mezerou,
- písmenem A udávajícím slitinu hliníku,
- písmenem W (z anglického wrought) označujícím zpracování tvářením,
- spojovací čárkou,
- čtveřicí číslic specifikujících chemické složení

Čtyřmístné označení dělí slitiny do skupin podle hlavních legujících prvků:

řada 1xxx – Al (min. 99,00 %)	řada 5xxx – slitiny AlMg
řada 2xxx – slitiny AlCu	řada 6xxx – slitiny AlMgSi
řada 3xxx – slitiny AlMg	řada 7xxx – slitiny AlZn
řada 4xxx – slitiny AlSi	řada 8xxx – slitiny Al s různými prvky

První dvojčíslí 10xx ve skupině slitin 1xxx označuje nelegovaný hliník a poslední dvojčíslí obsah příměsných prvků v desetinách procent. U ostatních skupin 2xxx až 8xxx je druhou číslicí v řadě určen druh modifikace a poslední dvě číslice slouží k rozlišení dané skupiny [1,11].

Slévárenské slitiny se označují podle normy ČSN EN 1706. Princip je v podstatě stejný, jako u označení tvářených slitin a jejich značení je následující:

- předpona EN následovaná mezerou,
- písmeno A udávající slitinu hliníku,
- písmeno C (z anglického cast) označující odlitky, případně B pro ingoty nebo M pro předslitiny,
- spojovací čárka,
- čtveřice číslic specifikujících chemické složení

V tomto případě následuje pětimístné číselné označení, které má stejný význam jako u slitin ke tváření:

řada 1xxxx – Al (min. 99,00 %)	řada 5xxxx – slitiny AlMg
řada 2xxxx – slitiny AlCu	řada 6xxxx – slitiny AlMgSi
řada 3xxxx – slitiny AlMg	řada 7xxxx – slitiny AlZn
řada 4xxxx – slitiny AlSi	řada 8xxxx – slitiny Al s různými prvky

Číslice následující za označením řady upřesňuje skupinu slitin a třetí číslice rozlišuje slitiny s minimálními rozdíly v chemickém složení. Čtvrtá číslice je všeobecně 0 a poslední číslice je s výjimkou leteckých slitin vždy 0 [1,2,11].

2 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY

Pro slévárenské účely existuje nepřehledné množství slitin, které se od sebe v některých případech liší pouze obsahem nečistot. Například americká Aluminium Association zaregistrovala do roku 2015 přes 300 různých slitin. Příčinou tak velkého množství je fakt, že složení jednotlivých slitin je většinou vyvíjeno pro dosažení specifických vlastností, připravených na míru určitému použití [13,14].

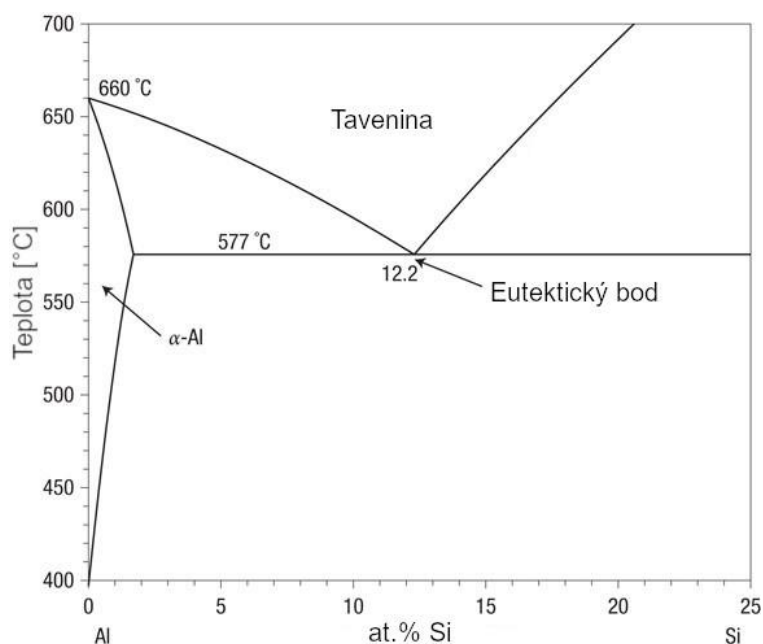
Obecně je možné slévárenské slitiny rozdělit podle hlavních přísadových prvků do čtyř skupin:

- slitiny typu Al-Si (siluminy),
- slitiny typu Al-Cu (duraluminium),
- slitiny typu Al-Mg (hydronalium),
- Slitiny typu Al-Zn

Pro změnu určitých vlastností základních slitin jsou přidávány vedlejší přísadové prvky. Podle jejich počtu v základní slitině vznikají binární, ternární, nebo vícesložkové slitiny [2,10].

2.1 Slitiny Al-Si

Siluminy jsou nejvíce využívanou skupinou slitin a představují 85 až 90 % celkové produkce hliníkových odlitků. Mezi jejich výhody patří především výborná slévatelnost. Dalšími vlastnostmi jsou dobrá odolnost proti korozi a relativně dobrá obrobiteľnosť a svařitelnost. Fázový diagram soustavy Al-Si se nachází na obr. 4 [14].



Obr. 4 Část diagramu soustavy Al-Si [15]

2.1.1 Binární slitiny Al-Si

Tyto slitiny jsou obvykle používány jako eutektické, nebo podeutektické. Vyznačují se dobrou slévatelností a odolností proti korozi. Kromě základních prvků obsahují také železo a mangan. Obsah doprovodných prvků je omezen na velmi nízké hodnoty (pod 0,1 %), ale při vyšších nárocích na korozivzdornost může být obsah Cu vyžadován ještě níže (pod 0,05 %). Zvyšující se obsah Si zlepšuje slévárenské vlastnosti a jeho obsah se pohybuje většinou v rozmezí 10-13 % [2].

Slévárenské vlastnosti binárních slitin jsou dobré. S rostoucím obsahem Si se zmenšuje interval tuhnutí a objem staženin. Zabíhavost taveniny se naopak zvětšuje, což má kladný vliv na proces odlévání. Mechanické vlastnosti slitin dosahují pouze středních hodnot, ale je možné je částečně zlepšit přidáním malého množství Cu, Mg, nebo Ni. Tvárnost slitin je ovlivněna obsahem Fe, jež má vliv na vznik křehkých fází β -AlFeSi [2,13,14].

Z binárních siluminů je možné zhotovovat odlitky s dobrou těsností vůči plynům a kapalinám, které jsou dobře svařitelné a odolávají korozi. Pro výrobu dekorativních předmětů se nehodí, jelikož vlhká atmosféra zbarvuje povrch odlitků do matně šedé barvy [2].

2.1.2 Nadeutektické slitiny Al-Si

Nadeutektické slitiny systému Al-Si obsahují více než 12,5 % křemíku. Důvodem k jejich používání je dobrá zabíhavost, vysoká odolnost proti opotřebení a zhruba o 15 % nižší tepelná roztažnost oproti podeutektickým slitinám. Zvyšující se obsah Si výrazně zvětšuje pásmo tuhnutí, proto je jeho obsah většinou do 20 %. Jako přísadové prvky se v nadeutektických siluminech objevují Cu, Mg, Mn a Ni. Pro zlepšení obrobitelnosti je možné zjemnit strukturu zrn pomocí fosforu [2,14,16].

Podíl jejich výroby je v porovnání s ostatními siluminy poměrně nízký. Mezi typické odlitky z těchto slitin patří písty spalovacích motorů, hlavy válců, kompresory, pumpy a součásti brzdových systémů [2].

Progresivní slitinou této skupiny slitin je AlSi17CuMg. Tento silumin je vhodný pro lití do pískových i kovových forem a uplatňuje se především pro lití bloků motorů osobních automobilů. Hlavním důvodem pro jeho použití v této oblasti je jeho nízká tepelná roztažnost, vysoká tepelná vodivost a vysoké mechanické vlastnosti, které převyšují vlastnosti podeutektických siluminů. Srovnání s vlastnostmi vybraných slitin se nachází v tab. 1 [2].

Tab. 1 Srovnání vlastností slitiny AlSi17CuMg s podeutektickými slitinami [2]

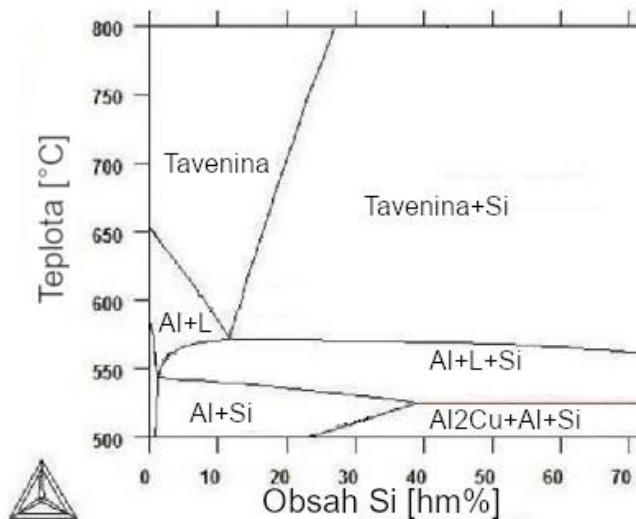
	Slitina				
	AlSi9Cu		AlSi6Cu4		AlSi17Cu4
Metoda lití	P/K	T	P/K	T	P/K
Stav	F	F	F	F	T6
R_{p0,2} [MPa]	90-100	140	90-100	150	190-320
R_m [MPa]	150-170	240	150-170	220	220-360
A5 [%]	1	1	1	1	0,5
Tvrдость HB	60-75	80	60-75		90-150
Součinitel tepelné roztaž. 20-200 °C [10⁻⁶/K]	22	22	22	22	16
Součinitel tepelné vodivosti [W/m.K]	100-110	100-110	110-120	110-120	117-134

Metody lití: P – do písku, K – gravitačně do kovových forem, T – tlakové lití

2.1.3 Slitiny Al-Si-Cu

Tento typ slitin je nejvíce využívaným siluminem, a tím pádem i nejvíce využívanou hliníkovou slitinou, tvořící zhruba polovinu vyráběných odlitků. Fázový diagram systému Al-Si-Cu se nachází na obr. 5. Chemické složení slitin se pohybuje v rozmezí 6-13 % Si a 1-5 % Cu [2,16].

Slitiny Al-Si-Cu se využívají zejména pro tlakové lití, proto je preferován i vyšší podíl Fe než u jiných siluminů. Železo totiž snižuje riziko nalepování slitiny na povrch kovové formy, ale jeho obsah je nutné kontrolovat, protože vytváří křehké fáze AlFeSi, které mají nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti. Stejně tak obsah Mg musí být pod hranicí 0,3 % z důvodu zamezení vzniku částic Mg₂Si, jejichž přítomnost snižuje pevnost slitiny. Měď obsažená ve slitinách sice zlepšuje obrobitelnost a zvyšuje pevnost a tvrdost, na druhou stranu ale snižuje korozivzdornost odlitků. Tento fakt ale na použití v automobilovém průmyslu nemá takový vliv a je ho možné odstranit vhodnou povrchovou úpravou např. nátěrem [2,14,16].



Obr. 5 Fázový diagram systému Al-Si-3Cu [17]

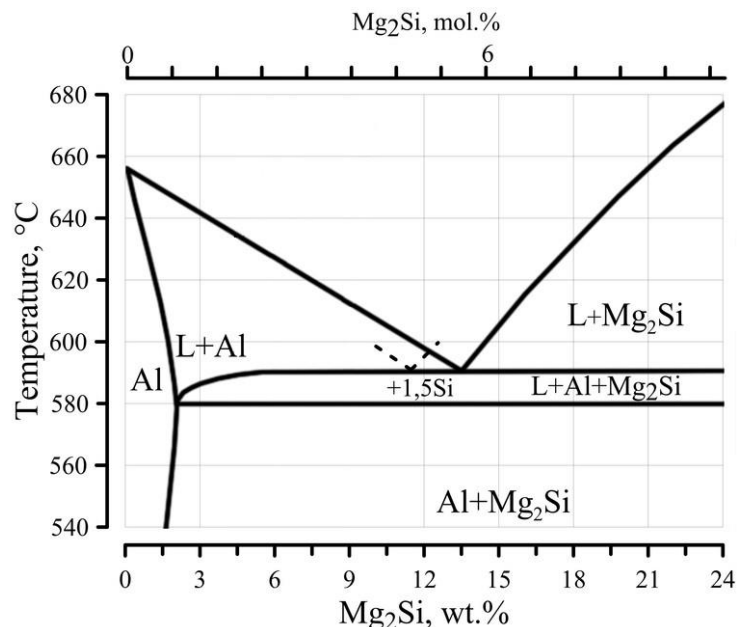
Odlitky se používají v tepelně nezpracovaném stavu, díky přítomnosti Cu a Zn však dochází do určité míry k samovolnému vytvrzení, které probíhá po dobu několika dnů. Slitiny jsou kromě tlakového lití vhodné i pro výrobu složitých odlitků gravitačním litím do pískových nebo kovových forem [2,13].

2.1.4 Slitiny Al-Si-Mg

Přidáním hořčíku do slitin Al-Si vznikne další důležitá skupina hliníkových slitin, která kombinuje dobré slévárenské vlastnosti s dobrými vlastnostmi mechanickými. Jejich hlavní předností se ale projeví až po tepelném zpracování. Množství Mg se pohybuje v rozmezí od 0,25 do 0,45 % (někdy až 0,7 %), což umožňuje provést vytvrzení za tepla [2,16].

Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické a obsah Si je rozděluje na dva typy, AlSi7Mg a AlSi10Mg. Slitiny s vyšším obsahem Si dosahují lepších slévárenských vlastností a také lepší svařitelnosti. Obsah doprovodných prvků je přísně limitován podobně jako u binárních slitin Al-Si. Fázový diagram Al-Mg₂Si je znázorněn na obr. 6 [2].

Odlévání probíhá do pískových nebo kovových forem, gravitačně i za zvýšených sil a výsledné odlitky se využívají pro vysoce namáhané součásti v leteckém a automobilním průmyslu [2,14].



Obr. 6 Fázový diagram systému Al-Mg₂Si [18]

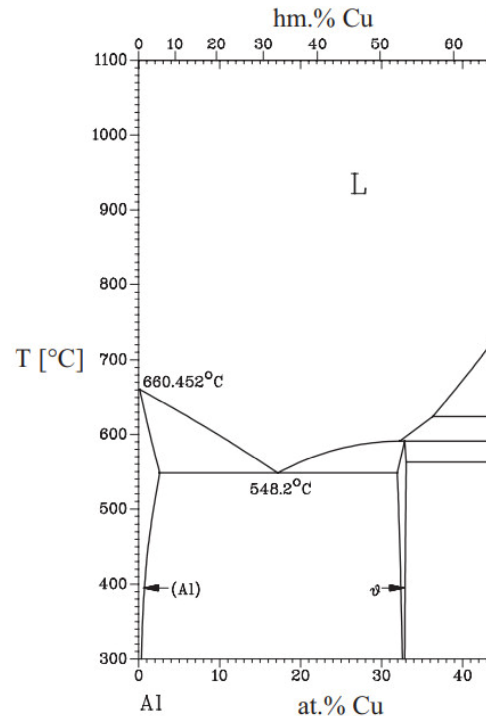
2.2 Slitiny Al-Cu

Měď patří mezi jeden z nejdůležitějších prvků v hliníkových slitinách, neboť dosahuje vysoké rozpustnosti a působí zpevňujícím účinkem. Slitiny Al-Cu se řadí mezi tzv. vysokopevnostní slitiny s mezí pevnosti až 400 MPa. Ocenitelná je také jejich lomová houževnatost a tažnost, které dosahují dvojnásobku hodnot slitin Al-Si [1,2].

Nevýhodou jsou bohužel špatné slévárenské vlastnosti. Důsledkem širokého intervalu tuhnutí, viz obr. 7, je obtížné slitiny nálitkovat a pro zajištění správného tuhnutí je nutný správný návrh vtokové soustavy a velký teplotní gradient tuhnutí [2,14].

Slitiny pro slévárenské použití obsahují zhruba 4-5 % Cu a případně další přísady, jako Mg nebo Ag pro zlepšení mechanických vlastností. Právě přidáním 0,4-1 % Ag je zajištěno dosažení mimořádně vysokých pevností a velmi dobré odolnosti proti korozi pod napětím. Pro použití za zvýšených teplot jsou vhodné slitiny s obsahem 2 % Ni a 1,5 % Mg. Díky těmto prvkům vznikají během vytvrzení precipitáty NiAl_3 , které zaručují pevnost a tvrdost za zvýšených teplot [2,13,16].

Použití duraluminiových slitin má své místo u odlitků s vysokými nároky na pevnost, jako jsou například převodové skříně, hlavy válců a turbíny. Vzhledem ke slévárenským vlastnostem je snaha nahrazovat tyto slitiny slitinami na bázi Al-Si [2].



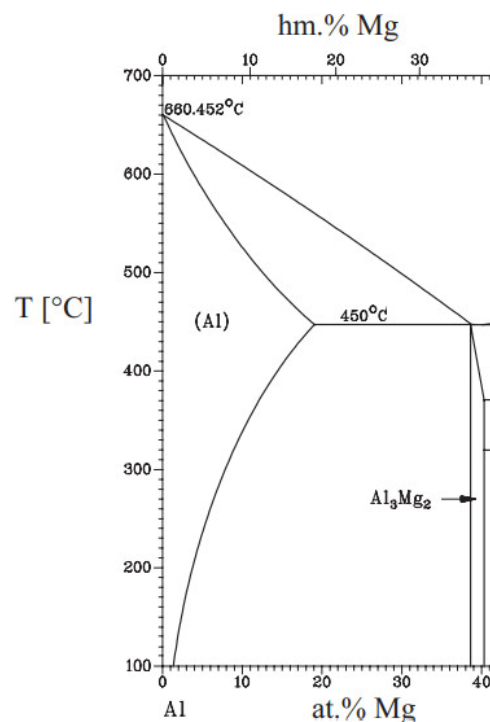
Obr. 7 Část diagramu systému Al-Cu [1]

2.3 Slitiny Al-Mg

Slitiny Al-Mg tvoří základ pro důležitou skupinu nevytvrditelných slitin. Vyznačují se vysokou odolností proti korozi, a to i v mořské vodě a alkalickém prostředí. Mezi další kladné vlastnosti patří výborná obrobitelnost, leštitelnost a možnost povrchové úpravy eloxováním [2,14,16].

Obsah Mg v binárních slitinách se pohybuje mezi 4 a 10 %. Většina odlitků z těchto slitin je odlévána do písku, nicméně slitiny se 7-8 % Mg mají také omezené použití při odlévání do kokil a pro tlakové lití [13].

Všechny slitiny této skupiny se vyznačují špatnými slévárenskými vlastnostmi z toho důvodu, že tuhnutí probíhá v širokém pásmu teplot, viz obr. 8. Jsou také citlivé na znečištění křemíkem a náchylné k naplynění a tvorbě oxidů. Z těchto důvodů je nutné slitiny před samotným odléváním odplynit a pečlivě očistit hladinu kovu. Zároveň je nutné provést zjemnění zrna, neboť jemnější zrna předchází vzniku trhlin a povrchových vad po eloxování [2,14,16].



Obr. 8 Část diagramu systému Al-Mg [1]

Oxidaci taveniny je možné potlačit přidáním malého množství (0,03 %) Be, což má za následek vznik neprostupného povlaku oxidů na hladině taveniny, který ji chrání. V porovnání se siluminy je potřeba věnovat také větší pozornost vtokové soustavě, která vyžaduje z důvodu obtížného nálitkování a krátké dosazovací vzdálenosti použití vnějších chladítek [2,13,14].

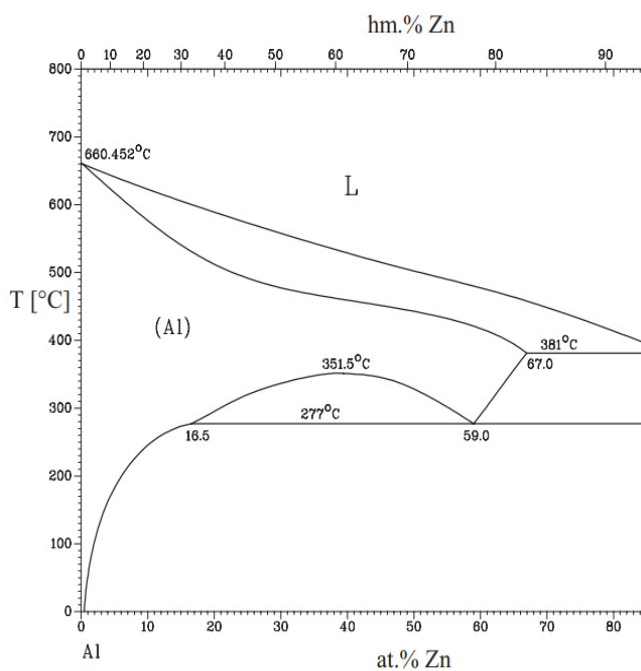
Mezi oblasti použití slitin na bázi hydronálie patří chemický a potravinářský průmysl, optika, lodní kování a dekorativní předměty pro interiér i exteriér [2].

2.4 Slitiny Al-Zn

V minulosti bylo používáno několik druhů slitin na bázi Al-Zn. Pro současné použití jsou však z důvodu špatných slévárenských a mechanických vlastností zastaralé. Výjimku tvoří pouze slitiny sloužící k výrobě obětovaných elektrod, chránících ocelové konstrukce před korozi ve slané vodě. Případné lití se provádí většinou do písku, jelikož trvalé formy mohou způsobovat popraskání odlitků. Fázový diagram systému Al-Zn se nachází na obr. 9 [10,13].

Slévárenské vlastnosti těchto slitin je možné částečně zlepšit přidáním Si v obsahu do 5 %. Mechanické vlastnosti zlepšuje přidání Mg a tepelné zpracování. Odlitky z těchto slitin jsou schopné vytvrzení za pokojových teplot v intervalu několika týdnů. Pevnost v tahu těchto slitin se pohybuje v závislosti na složení v rozmezí 210 až 310 MPa [10,13].

Výhodou by mohla být relativně vysoká teplota tavení, což umožňuje montáž odlitků pomocí tvrdého pájení. Další výhodou je dobrá obrobiteľnosť a rozměrová stálost [13,16].



Obr. 9 Část diagramu systému Al-Zn [1]

3 VÝROBA HLINÍKOVÝCH ODLITKŮ

Slitiny hliníku umožňují pro výrobu odlitků použití téměř všech slévárenských technologií. Díky jejich relativně nízké teplotě tavení nekladou na formovací směsi, respektive materiály forem tak vysoké nároky, jako je tomu v případě slitin železa [2,16].

Výběr vhodné metody odlévání závisí na požadavcích, které jsou na ně kladeny výslednými odlitky a nejdůležitějšími z nich jsou:

- vlastnosti odlévané slitiny (zabíhavost, smrštění),
- konstrukce odlitku (tvar, tloušťka stěn, dutiny),
- mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, tvárnost),
- schopnost dalšího zpracování (obrobitelnost, svařitelnost, povrchové úpravy),
- údržba (těsnost formy, oteřuvzdornost, rozměrová stálost, korozivzdornost),
- ekonomika (produktivita, cena materiálu, cena opracování, cena tepelného zpracování) [16]

Technologii výroby odlitků můžeme podle druhu použitých forem rozdělit na dvě skupiny a těmi jsou odlitky zhotovené litím do netrvalých forem a litím do trvalých forem.

3.1 Lití do netrvalých forem

Netrvalé formy jsou zhotoveny z různých formovacích směsí a pro vyjmutí ztuhlého odlitku musí být rozbity. Pro odlévání do netrvalých forem se nabízí několik metod se svými specifickými přednostmi, nedostatky a oblastí použití.

Pískové formy:

Výroba odlitků do pískových forem je nejjednodušší a nejlevnější metodou lití. Vyznačuje se svou flexibilitou a možností výroby široké škály různě objemných odlitků. Uplatňuje se především pro kusovou a malosériovou výrobu, kde by bylo použití kovových forem příliš drahé, a pro výrobu odlitků velkých hmotností [1,2].

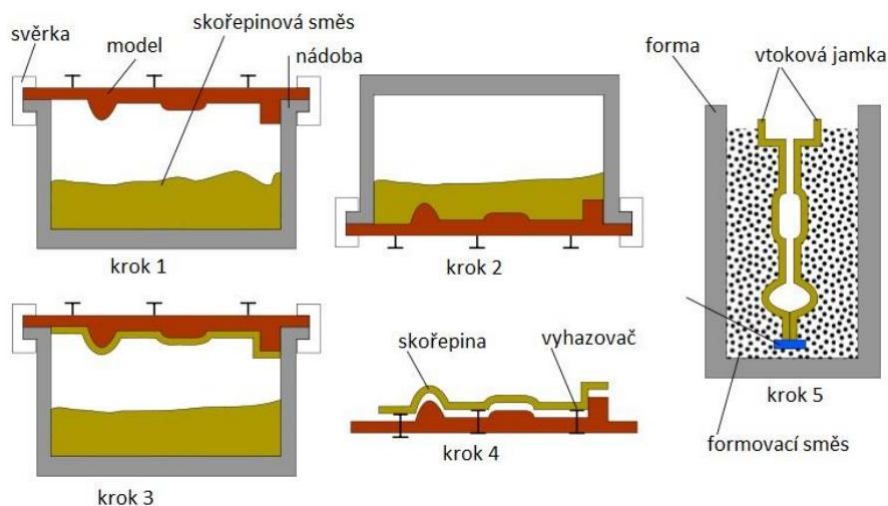
Tvar odlitku je zhotoven pomocí modelu, který tvoří otisk ve formovací směsi a případné dutiny uvnitř odlitku jsou vytvořeny pomocí jader. Díky menším nárokům na prodyšnost je možné použít jemnější ostřiva, která umožňují dosažení lepšího povrchu. Jelikož se lící teploty pohybují v rozmezí 700-750 °C, je z hlediska žáruvzdornosti dostačujícím ostřivem křemičitý písek. Jako pojivo se nejčastěji používá jíł (bentonitové směsi) nebo vodní sklo vytvrzené pomocí CO₂ [1,2,16].

Tloušťka stěn dosažitelná litím do pískových forem je závislá na velikosti odlitku a zabíhavosti slitiny. Běžně dosažitelnou tloušťkou jsou 3-4 mm, ale v některých případech je možné dosáhnout i tloušťky 2 mm. Pro výrobu silnostěnných odlitků by měla být v co největší míře využívána chladítka a tloušťka stěn by neměla přesahovat 40 mm [2,16].

Skořepinové formy:

Skořepinové formy jsou tvořeny ostřivem spojeným natavenou pryskyřicí. Jejich výroba probíhá zasypáním nahřáté modelové desky směsí ostřiva a pojiva. Díky teplu sálajícímu z desky se na jejím povrchu vytvoří tenká skořepina, která je následně sejmuta a spojena se svou druhou polovinou, viz obr. 10 [16].

Odlitky zhotovené touto metodou mají vyšší kvalitu povrchu než odlitky lité do písku, ale limitujícím faktorem jsou náklady na zařízení a omezená velikost vyrobitelných odlitků [16].

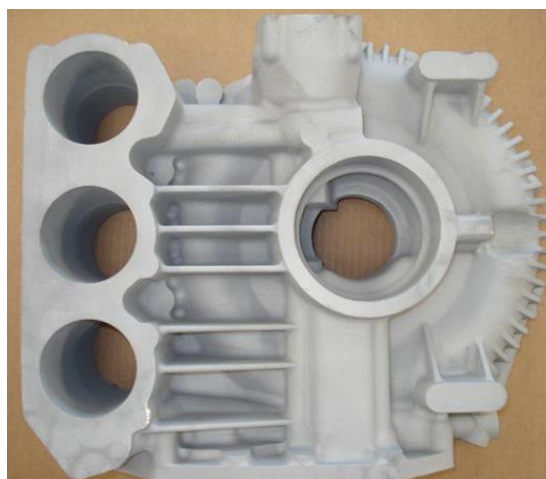


Obr. 10 Postup výroby skořepinové formy [19]

Sádrové formy:

Přestože se jedná o poměrně starou metodu, má i v dnešní době své využití díky vysoké hladkosti povrchu a vysoké rozměrové přesnosti odlitků. Spočívá v nanášení nebo zalití voskového modelu sádrou o vysoké čistotě. Pro zvýšení prodyšnosti a snížení křehkosti jsou do ní přidávána plniva (např. antuka, křemenný písek nebo drcený šamot). Po jejím zatuhnutí je forma vysušena a voskový model z ní vyteče ven [1,16].

Přestože je tato metoda jednoduchá, dostupná a umožňuje výrobu kvalitních odlitků s drsností 1,3 až 3,2 μm , omezuje se její využití spíše na umělecké předměty a prototypové odlitky, viz obr. 11. Důvodem je náročné sušení a žhání ztuhlé formy, které je nutné pro dosažení správných vlastností odlitku, ale pro průmyslové použití je poněkud omezující [1,16].



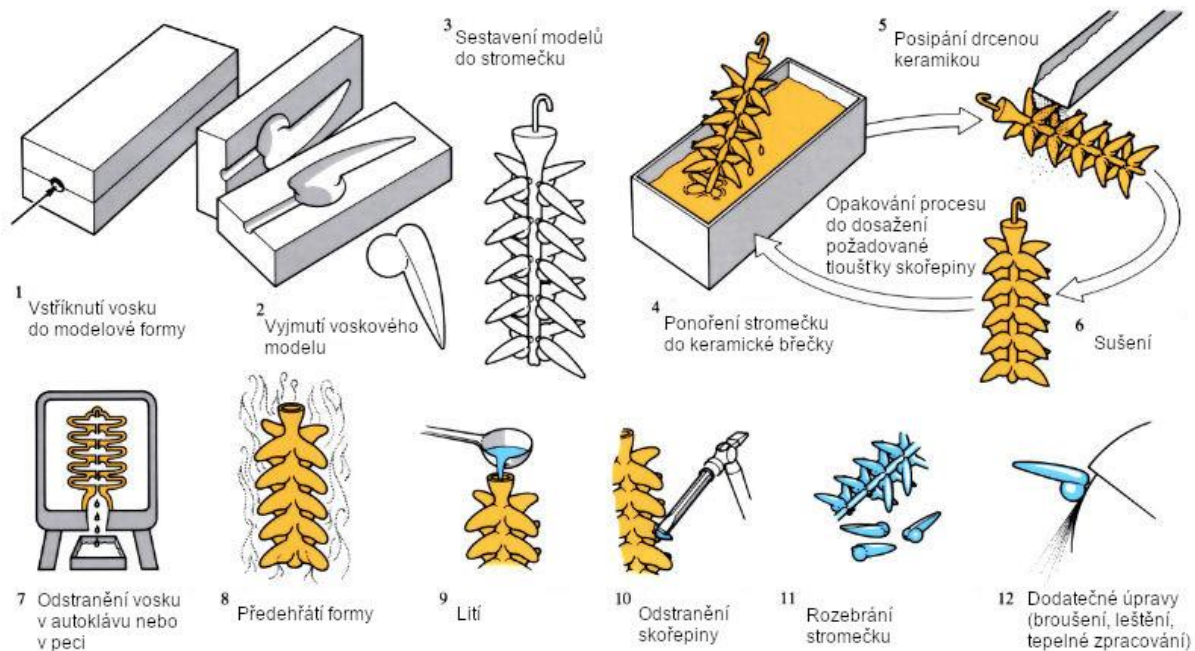
Obr. 11 Odlitek zhotovený v sádrové formě [20]

Vytavitelný model:

Metoda vytavitelného modelu spočívá ve zhotovení modelu z vosku, případně plastických hmot nebo jiného materiálu s nízkou teplotou tavení. Několik modelů je následně spojeno do tzv. stromečku, jehož střed tvoří vtoková soustava. V dalším kroku je stromeček namočen v keramické břečce, posypán práškovou keramikou a vysušen. Tento proces je opakován, dokud se nedosáhne požadované tloušťky skořepiny. Vosk je z formy odstraněn podobně jako v případě sádrových forem jejich zahřátím. Celý postup je schematicky znázorněn na obr. 12. [1,16].

Metoda vytavitelného modelu umožňuje především výrobu menších tvarově složitých odlitků. Kvalita odlitků může téměř konkurovat technologii obrábění díky vysoké kvalitě povrchu a rozměrovým tolerancím $\pm 0,1$ až $0,03$ mm. Před samotným litím jsou formy předehřaty na teplotu 200-300 $^{\circ}\text{C}$ [1,2,16].

Mezi odlitky zhotovené metodou vytavitelného modelu patří například ozubená kola, lopatky, části zbraní, letecké a strojní komponenty [1,16].



Obr. 12 Postup výroby odlitků metodou vytavitelného modelu [21]

3.2 Lití do trvalých forem

Trvalé formy jsou zhotoveny převážně ze železných slitin a umožňují vícenásobné použití. Hodí se především pro odlitky menších rozměrů, jelikož jejich velikost je značně ovlivněna vysokými výrobními náklady. Podmínkou jejich použití je vysoká sériovost výroby [2].

Gravitační lití:

Gravitační lití do kovových forem patří mezi poměrně jednoduché, ale produktivní metody výroby odlitků. Zvýšená rychlost ochlazování taveniny, díky lepšímu přenosu tepla, vede ke vzniku jemnější struktury a tím pádem i lepším mechanickým vlastnostem. Formy bývají zhotoveny z litiny s kuličkovým nebo lupínkovým grafitem a umožňují použití pískových i kovových jader [1,2].

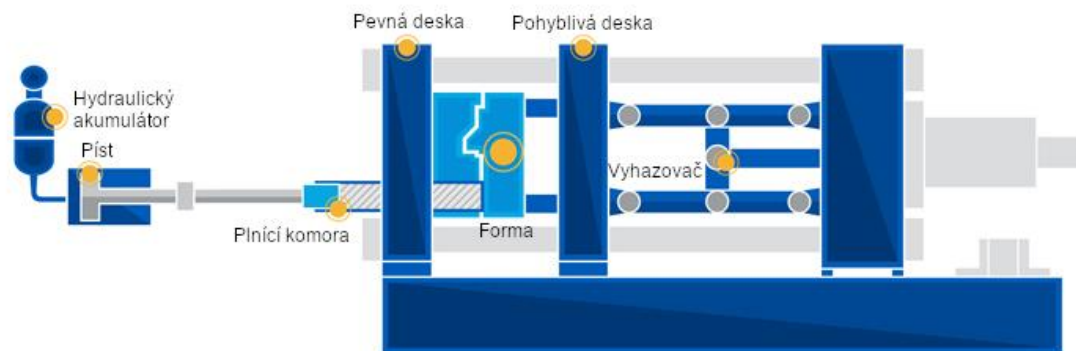
Mezi výhody lití do kovových forem patří vysoká přesnost a kvalita povrchu odlitků, menší přídavky na obrábění a možnost automatizace procesu. Nevýhodami jsou naopak pracnost návrhu a výroby forem a jejich vyšší cena [1].

Minimální tloušťky stěn, které se v těchto formách vyrábí by neměly být větší než 4 mm a musí být opatřeny dostatečnými úkosi pro vyjmutí. Pro správný průběh odlévání jsou formy udržovány na provozní teplotě 200-250 °C a povrch licí dutiny je pravidelně ošetřován nátěry, které zamezují nalepování odlitků [2,16].

Tlakové lití:

Jedná se o nejdůležitější technologii pro lití hliníkových slitin, která umožňuje vysoce produktivní výrobu. Spočívá ve vstříkávání taveniny do dutiny formy pod vysokým tlakem (až 250 MPa), což umožňuje výrobu komplikovaných odlitků s tloušťkami stěn 1-2 mm. Dosažitelná je také vysoká přesnost odlitků, jejich tvar však musí respektovat rozebíratelnost formy a možnost vysunutí jader [1,2,16].

Přestože je technologie tlakového lití realizována pomocí strojů s teplou a studenou komorou, pro hliníkové odlitky se používají téměř výhradně stroje se studenou komorou. Zobrazen na obr. 13. Důvodem je především vysoká reaktivita hliníku se železem obsaženým v součástech licího stroje [1,2,16].



Obr. 13 Lící stroj se studenou komorou [22]

Lítí probíhá nalitím taveniny o teplotě 610-650 °C do plnicí komory a jejímu rychlému vtlačení do dutiny formy. Po ztuhnutí odlitku se forma rozevře a odlitek je vyjmut ven. Pracovní teplota forem je udržována pomocí vodního chlazení a jejich povrch je ošetřován postřiky, které zlepšují průběh lití a povrch odlitků. Pro tlakové lití je používáno široké množství slitin Al-Si, Al-Si-Cu a A-Mg [1,2,16].

Nevýhodou tlakového lití je nízká vnitřní homogenita. Velké množství vměstků a vzduchových bublin způsobené rychlým plněním a oxidací taveniny snižuje kvalitu odlitků. Řešením je optimalizace lících podmínek a správný návrh formy, případně i použití forem vakuovaných [1,2].

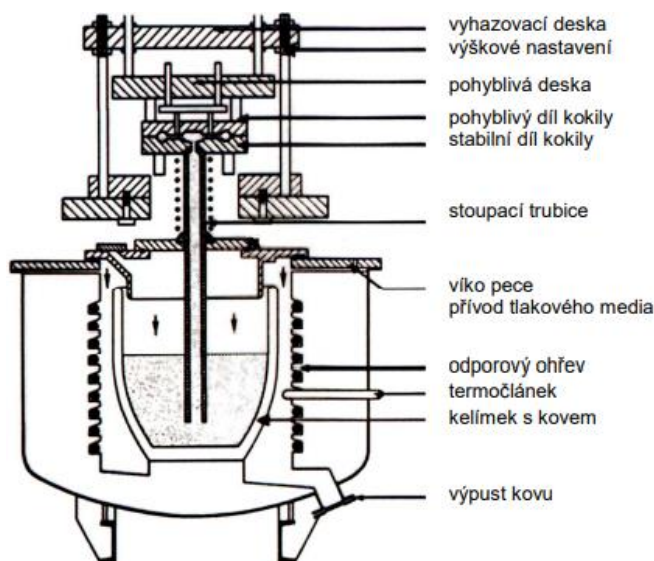
Nízkotlaké lití:

Metoda nízkotlakého lití se vyznačuje především vysokým využitím tekutého kovu (90-95 %). Uskutečňuje se v zařízení, které je tvořeno hermeticky uzavřenou udržovací pecí, nad kterou je upnuta dělená kovová forma. Lití probíhá zvýšením tlaku na hladinu kovu, což má za následek jeho stoupání skrz žáruvzdornou trubici spojující formu s udržovací pecí. Jelikož je trubice umístěna pod hladinou kovu, zabraňuje vstupu vměstků do dutiny formy. Schéma lícího stroje je vidět na obr. 14 [1,2,16].

Kvalita odlitků zhotovených touto technologií je velmi vysoká a zaručuje jejich vynikající těsnost a minimum vměstků. Nízkotlaké lití se uplatňuje především pro výrobu automobilových kol, která jsou téměř všechna vyráběna touto technologií [1,2,16].

Odstředivé lití:

Odstředivé lití představuje specifickou technologii odlévání hliníku. V průběhu lití i tuhnutí odlitku forma (nebo více forem) rotuje, což umožňuje výrobu odlitků s vysokou kvalitou povrchu, hustotou a dobrými mechanickými vlastnostmi [1,16].



Obr. 14 Schéma stroje pro nízkotlaké lití [2]

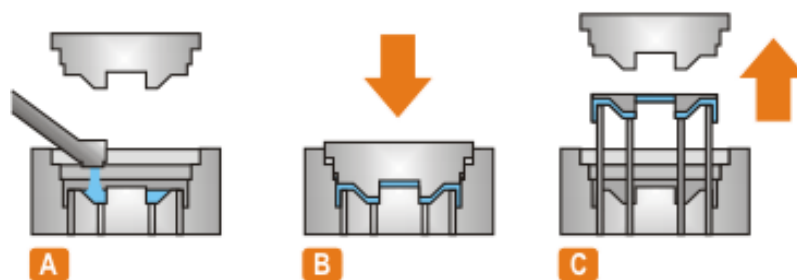
Podle polohy osy rotace je odstředivé lití rozděleno na pravé a nepravé. Při pravém lití se osa rotace formy shoduje s osou odlitku (např. kola automobilů), naopak při nepravém lití je kolem osy rotace umístěno více forem se společnou vtokovou soustavou [1].

Odstředivým litím je možné zhotovovat například odlitky kol a jejich nábojů, rotorů a válců pro tiskařské a papírenské stroje [16].

Squeeze casting:

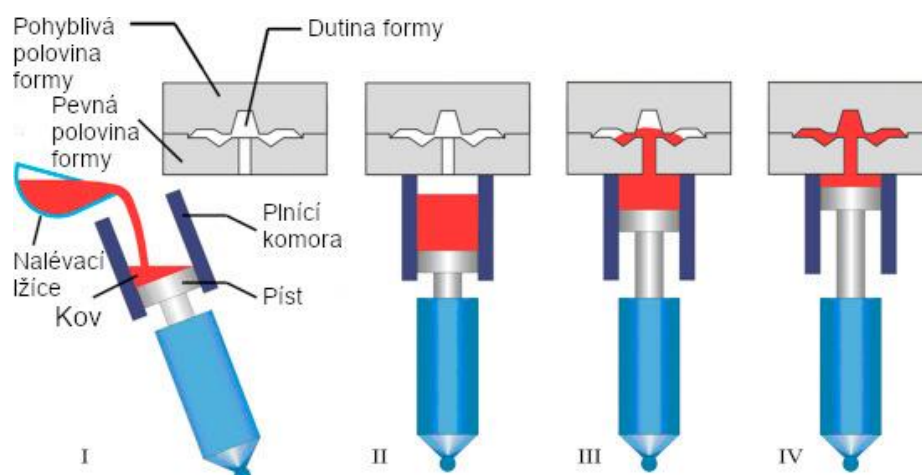
Squeeze casting je progresivní metoda lití do kovových forem, která kombinuje výhody pomalého plnění formy a tuhnutí za vysokého tlaku. Její předností je schopnost výroby odlitků s jemnozrnnou strukturou, vysokou hustotou a výbornými mechanickými vlastnostmi. Velký potenciál také představuje její jednoduchost, využití kovu a možnost automatizace [2,16].

Podle konstrukce liciho zařízení je možné tuto technologii rozdělit na přímou a nepřímou. Při přímém squeeze castingu se do dutiny formy volně nalije roztavená slitina, která je následně stlačena vrchní částí formy, viz obr. 15. Po ztuhnutí je forma otevřena a odlitek vytlačěn vyhazovači [2].



Obr. 15 Průběh přímého squeeze castingu [23]

Nepřímý squeeze casting je podobný nízkotlakému lití. Kov je dávkován do výklopné lici komory, umístěné pod formou a následně je pomalu vtláčován do dutiny formy, viz obr. 16. Proudění kovu je laminární, což zabraňuje jeho víření a oxidaci. Rychlost plnění je řádově $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a tlak 150 MPa [2].



Obr. 16 Průběh nepřímého squeeze castingu [24]

Oblastí použití je výroba pístů, kol pro osobní i nákladní automobily a komponentů karoserií [2,16].

4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ

Tepelné zpracování zahrnuje v širším smyslu všechny procesy spojené s ohřevem a ochlazením, které mají za úkol změnit mechanické či fyzikální vlastnosti, strukturu nebo velikost zbytkových napětí kovového výrobku. Na rozdíl od slitin železa se převážná část hliníkových slitin používá v litém stavu a tepelně se nezpracovává. To je dáno tím, že u tlakově litých odlitků, které převyšují počet odlitků odlévaných jinými metodami, se vyskytuje více homogenní struktura s menší mírou segregace. Tato struktura snižuje vliv tepelného zpracování na výsledné vlastnosti [2,16,25].

V případě odlitků z hliníkových slitin se tepelné zpracování provádí především za účelem dosažení některých vybraných vlastností, jako jsou:

- zvýšení pevnosti,
- zvýšení tvrdosti,
- zvýšení odolnosti proti otěru,
- zlepšení korozní odolnosti,
- zajištění rozměrové stálosti,
- snížení vnitřního pnutí,
- homogenizace chemického složení

Tepelné zpracování, které slouží k dosažení těchto vlastností je možné rozdělit do dvou skupin, a to žíhání a vytvrzování [1,2,16].

4.1 Žíhání

V oblasti hliníkových odlitků není žíhání příliš běžným druhem tepelného zpracování. Výjimku však tvoří rozpouštěcí žíhání, jež je nedílnou součástí procesu vytvrzování, který bude popsán níže. Dalšími druhy žíhání jsou žíhání homogenizační, stabilizační, na měkko a na odstranění vnitřního pnutí [1,2,11].

Průběh žíhání je úzce spjatý s jeho teplotou, proto je nutné v jeho průběhu dodržovat určité tolerance teplot. Ty se obvykle pohybují v rozmezí ± 5 °C a u homogenizačního žíhání i ± 3 °C. Z tohoto důvodu je potřeba provádět tepelné zpracování v pecích s přesnou regulací teploty a její vysokou homogenitou v prostoru pece [2,25].

Homogenizační žíhání:

Jedná se o žíhání, jehož účelem je odstranění chemické heterogenity, která vzniká během tuhnutí odlitků. Teploty homogenizačního žíhání překračují křivku změny rozpustnosti přísadového prvku v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ po dobu, která závisí na heterogenitě složení a disperzitě struktury [1,2].

Doba trvání se pohybuje mezi 3-15 hodinami, avšak neměla by se zbytečně prodlužovat, jelikož během žíhání může docházet ke zhrubnutí zrna, což má za následek zhoršení mechanických vlastností odlitku. Tento druh žíhání se samostatně používá jen výjimečně a obvykle tvoří součást vytvrzování [2].

Stabilizační žíhání:

Stabilizační žíhání se využívá ke stabilizaci struktury, rozměrů, mechanických, fyzikálních a chemických vlastností. Cílem je stabilizace velmi přesných výrobků (např. pro využití v optice) a odlitků, které pracují za zvýšených nebo kolísajících teplot [1,2].

Stabilizační teplota se nachází výše, než leží maximální provozní teplota. Obvykle to bývají teploty 240-350 °C, po kterých následuje ochlazení na vzduchu [1,2].

Žihání na měkko:

Žihání na měkko se uplatňuje pouze výjimečně. Používá se u vytvrzených slitin, u kterých je požadováno zpětné dosažení rovnovážného stavu. Žihací teploty se pohybují v rozmezí 350 až 400 °C s následným ochlazením v peci na teplotu okolo 200 °C. Po vyjmutí z pece jsou odlitky dochlazeny na vzduchu [2].

Žihání na odstranění vnitřního pnutí:

Tento druh žihání pomáhá odstranit pnutí uvnitř odlitků vzniklá jako následek nesteromerné rychlosti tuhnutí různých částí odlitku. Používá se u odlitků zhotovených v kovových formách a po svařování [2,11].

Žihání probíhá při teplotě 200-250 °C po dobu 6-8 hodin. Následuje pomalé ochlazování v peci nebo na vzduchu. Pro dosažení dokonalého snížení vnitřních pnutí je možné teplotu zvýšit na 250-350 °C, při zvýšených teplotách však hrozí určitý pokles pevnosti [2].

4.2 Vytvrzování

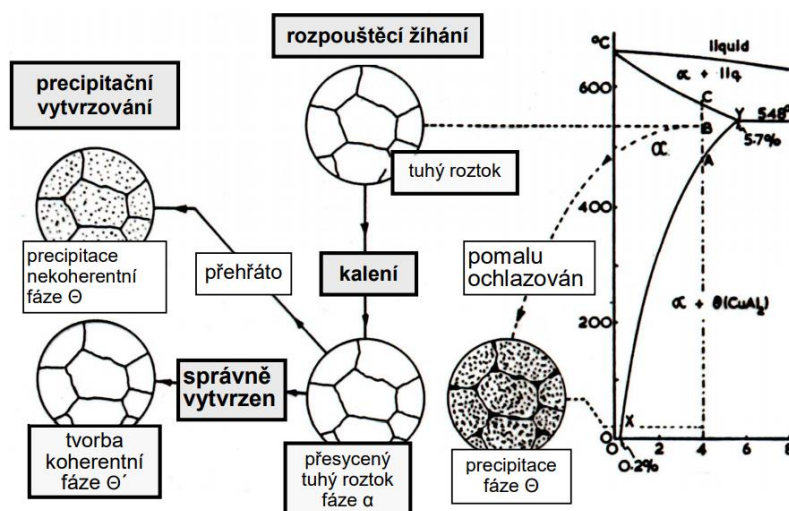
Vytvrzování tvoří nejdůležitější druh tepelného zpracování hliníkových slitin. Umožňuje v podstatné míře zvýšit mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost, ovšem na úkor snížení tažnosti. V praxi je hojně využíváno pro zlepšení mechanických vlastností odlitků litých gravitačně do pískových a kovových forem nebo nízkotlakým litím. Jak již bylo zmíněno dříve, pro odlitky zhotovené vysokotlakým litím se z důvodu menší účinnosti způsobené homogenní strukturou příliš nepoužívá [1,2].

Nezbytnou podmínkou pro vytvrzování je, aby byl ve slitině přítomen alespoň jeden prvek s dostatečnou rozpustností v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Takovými prvky jsou typicky Cu a Mg, v některých případech Ni a Zn. Obsah těchto prvků ve slitině musí být zároveň vyšší, než je jejich rozpustnost za normálních teplot, a nižší než maximální rozpustnost v tuhém roztoku při eutektické teplotě [2,16].

Princip vytvrzování spočívá v rozpouštění intermetalických fází (např. Mg_2Si , CuAl_2 , Ni_3Al a MgZn_2), které se vylučují při tuhnutí odlitku v pískové nebo kovové formě a jejich zpětném vylučování ve formě koherentních nebo semi-koherentních útvarů. Tato změna zaručí zpevnění slitiny [1,2].

Průběh vytvrzování je znázorněn na obr. 17 a skládá se z následujících kroků:

- rozpouštěcího žihání, které zajistí rozpuštění intermetalických fází v $\alpha(\text{Al})$,
- rychlého ochlazení ze žihací teploty, díky němuž vznikne přesycený tuhý roztok,
- precipitačního vytvrzení, které umožní vznik precipitátu zpevňujícího strukturu [2]

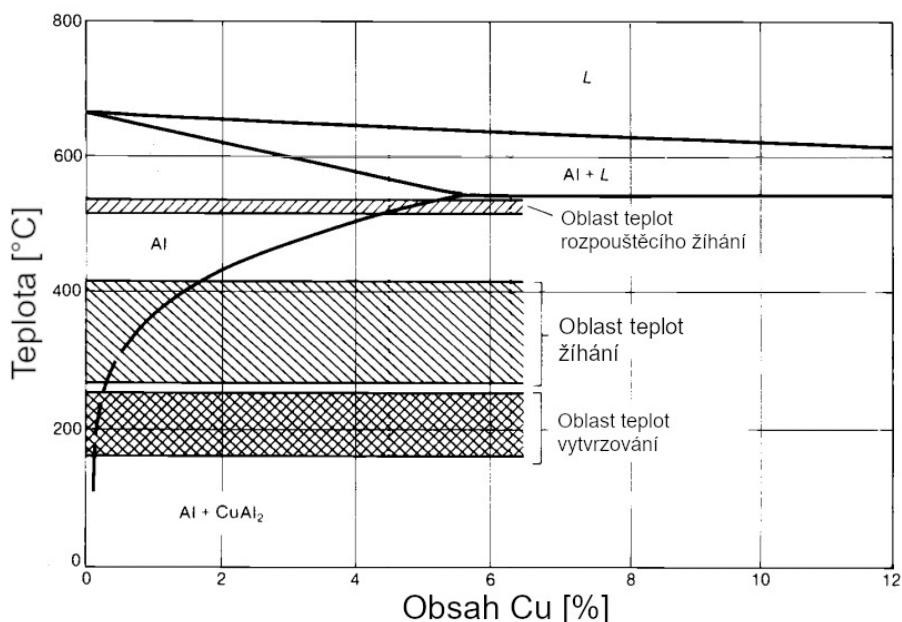


Obr. 17 Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [2]

4.2.1 Rozpouštěcí žíhání

Prvním krokem při vytvrzování je provedení rozpouštěcího žíhání. Rozpouštěcí žíhání se provádí zahřátím odlitků na teplotu zhruba 10-15 °C pod eutektickou teplotou, což umožňuje rozpouštění intermetalických fází v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Rychlost ohřívání na žíhací teplotu není ve většině případů důležitá. Pokud slitina obsahuje více druhů rozpustných prvků (např. Al-Si-Cu-Mg), probíhá ohřev stupňovitě, aby nedošlo k natavení fází s nižší teplotou tavení [1,2,16,26].

Po dosažení žíhací teploty je nutné ji udržovat v úzkém tolerančním pásmu ± 5 °C. Jelikož je žíhací teplota velmi blízko teplotě eutektické, viz obr. 18, může, zvláště u slitin, které se blíží maximální rozpustnosti přísadového prvku, docházet k natavování slitiny na hranicích zrn. To má za následek jejich hrubnutí a může vést až k tepelnému zborcení odlitku [2,26].



Obr. 18 Rozmezí teplot tepelného zpracování slitiny Al-Cu [25]

Doba rozpouštěcího žíhání by měla být dostatečně dlouhá, aby bylo zajištěno dokonalé rozpouštění segregovaných fází vytvrzujícího prvku a závisí především na disperzitě struktury odlitku. Prodleva na žíhací teplotě se může v závislosti na rozměrech a způsobu výroby odlitku pohybovat v širokém intervalu, který je přibližně od 3 do 6 hodin. Průběh rozpouštěcího žíhání by se neměl zbytečně prodlužovat, jelikož dochází k hrubnutí zrn [2].

4.2.2 Ochlazení ze žíhací teploty

Cílem této operace, která je často nesprávně označována jako kalení, je rychlé ochlazení odlitků, které má za úkol zamezit vyloučení intermetalických fází a umožnit vznik metastabilního přesyceného roztoku. Tato rychlá změna teploty má za následek také nárůst napětí uvnitř odlitku, které je v některých případech minimalizováno na úkor dosažitelných vlastností snížením rychlosti ochlazování [2,16,26].

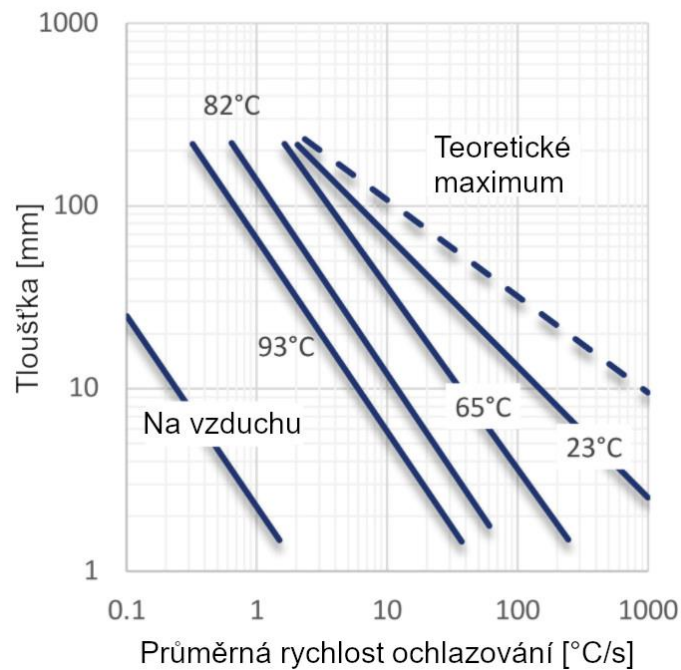
Obecně je ale požadována doba ochlazování co nejkratší, proto by neměla doba mezi vyjmutím odlitků z žíhací pece a jejich ponořením do chladícího média přesáhnout 20 sekund. Zvláště citlivost tenkostěnných odlitků na zpětné vylučování intermetalických fází je vysoká. V jejich případě je požadavek ještě přísnější a to maximálně 10 sekund [2,16,26].

Pro zajištění takto krátké doby mezi žíháním a ochlazováním jsou často používány speciální pece s otevíratelným dnem, ze kterých odlitky vypadnou přímo do chladící lázně. Objem lázně musí být dostatečně velký, aby nedošlo k výraznému ovlivnění teploty vloženými odlitky. Je také doporučeno zajistit proudění ochlazovacího média nebo pohyb s odlitky uvnitř nádrže tak, aby nedocházelo ke vzniku páry zpomalující ochlazování [2,16,26].

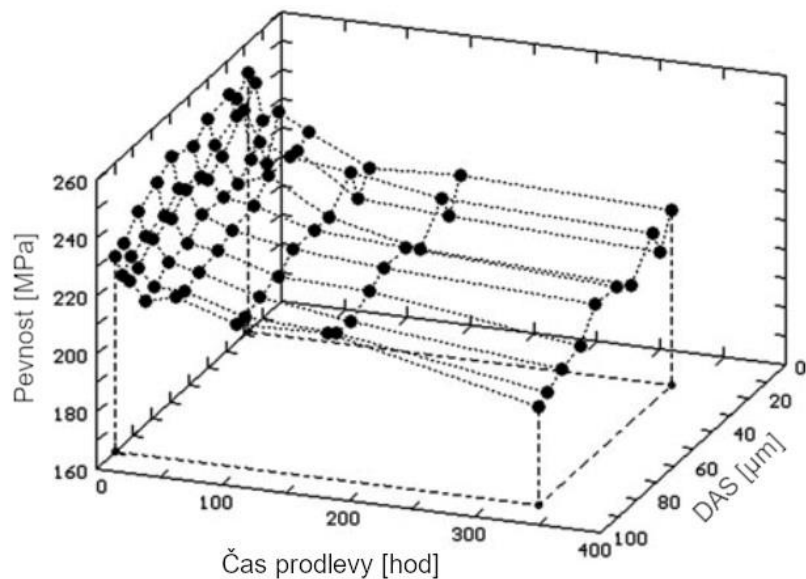
Jako médium pro ochlazování odlitků je nejčastěji používána voda. Struktura obsahující přesycený tuhý roztok je poměrně měkká, proto u odlitků většinou vznik napětových prasklin nehrozí. U silnostěnných odlitků s velkými rozdíly v tloušťkách stěn je však lepší jim předcházet zahřátím vodní lázně na 40-80 °C s následným dochlazením ve studené vodě [2,16].

Jako možná alternativa k zahřáté vodní lázni se nabízí použití roztoku vody a glykolu, který se používá při tepelném zpracování hliníkových plechů. Vliv teploty vodní lázně na rychlost ochlazování je znázorněn na obr. 19 [1,25].

Kromě prodlevy mezi vyjmutím odlitků ze žíhací pece a jejich ochlazením, má na vlastnosti vytvrzené slitiny také vliv prodleva mezi ochlazením a precipitačním vytvrzením, které posléze následuje. V experimentu, který se tímto problémem zabýval, bylo dokázáno, že prodleva mezi ochlazením zkoumané slitiny A356 (AlSi7Mg0,3) a jejím vytvrzením snižuje dosažitelnou pevnost při vytvrzení této slitiny. Jedná se o následek poklesu míry precipitace částic Mg_2Si během vytvrzování. Graf závislosti pevnosti na prodlevě je znázorněn na obr. 20 [28].



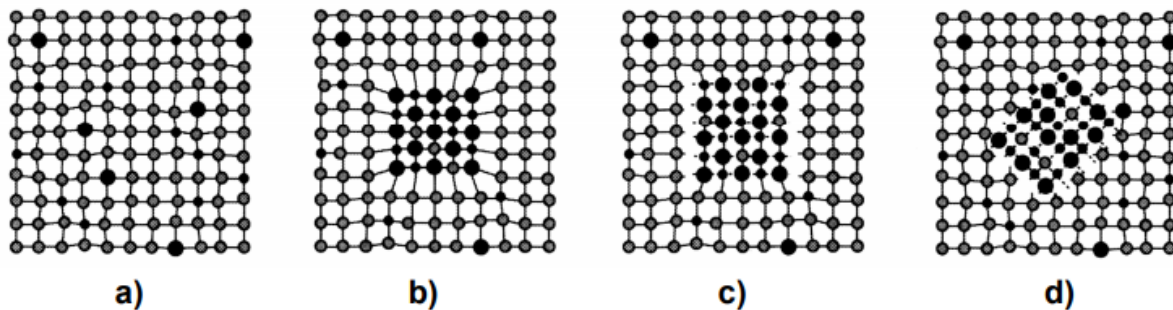
Obr. 19 Vliv teploty vodní lázně na rychlost ochlazování [27]



Obr. 20 Závislost pevnosti slitiny A356 na prodlevě a DAS [28]

4.2.3 Precipitační vytvrzení

Posledním krokem vytvrzování hliníkových slitin je precipitační vytvrzení. Tento proces spočívá v postupném rozpadu přesyceného roztoku $\alpha(\text{Al})$, difúzi atomů přísadového prvku a následné nukleaci nových intermetalických fází. Tento proces je znázorněn na obr. 21 a popsán v následujících odstavcích [2,16,26].



a)

b)

c)

d)

a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát,

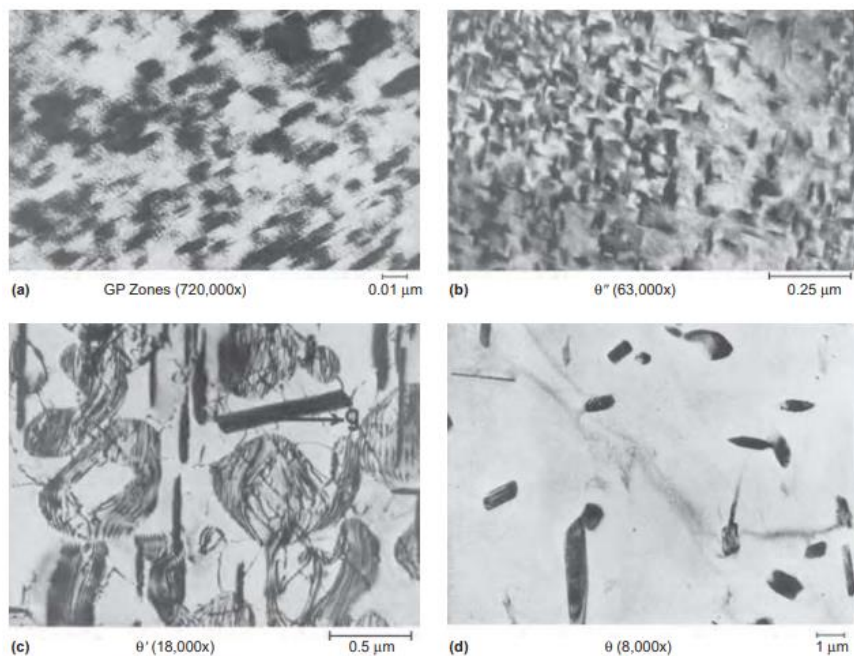
c) semikoherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát

Obr. 21 Průběh precipitace [2]

V první fázi vytváří intermetalické fáze koherentní precipitáty označované jako Guinier-Prestonovy zóny. V těchto zónách jsou atomy vytvrzujícího prvku uspořádány do destiček o tloušťce 0,1 až 1 nm. Koherentní precipitáty tvoří součást krystalické mřížky tuhého roztoku a jejich přítomnost mřížku deformuje. Tato deformace vyvolává vnitřní pnutí a vede ke zvýšení tvrdosti a pevnosti slitiny, které je od procesu vytvrzování požadováno. S nárůstem teploty nad optimální hodnotu a přibývajícím časem vytvrzování se precipitáty zvětšují a jejich počet se snižuje [2,16,26].

V další fázi precipitace se začínají vazby mezi precipitáty a tuhým roztokem vytrácet. To vede ke vzniku semikoherentních útvarů, které ještě neztratily veškeré vazby na krystalickou mřížku tuhého roztoku. Vznik semikoherentního precipitátu je ještě doprovázen nárůstem tvrdosti a pevnosti. Dobře vytvrzené slitiny obvykle obsahují koherentně až semikoherentně vyloučenou vytvrzující fázi [2,16,26].

V posledním stádiu vytvrzování dochází k úplné ztrátě vazeb mezi tuhým roztokem a precipitátem, což má za následek pokles tvrdosti a pevnosti na hodnoty blízké se hodnotám před vytvrzením. Toto stádium se nazývá přestárnutí a dochází k němu při příliš



a) Guinier-Prestonovy zóny,

b, c) semikoherentní precipitáty, d) nekoherentní precipitáty

Obr. 22 Průběh precipitace slitiny Al-Cu pod elektronovým mikroskopem [26]

vysokých teplotách nebo příliš dlouhých časech vytvrzování. Nicméně i částečné přestárnutí může být v některých případech žádoucí, neboť může kombinovat zvýšenou pevnost a tvrdost slitiny při částečném zachování její původní tažnosti [2,16].

Na obr. 22 jsou znázorněny snímky z elektronového mikroskopu zachycující průběh precipitace slitiny Al-Cu.

Pohyblivost atomů se podle druhu vytvrzujícího prvku liší. Některé prvky jsou díky vysoké pohyblivosti schopny účinného vytvrzení i za pokojových teplot, jiné naopak vyžadují pomoc v podobě zahřátí slitiny. Z tohoto důvodu se vytvrzování dělí podle teploty na vytvrzování za tepla a za studena [2,26].

Vytvrzení za tepla

Vytvrzování za tepla probíhá v závislosti na druhu slitiny při teplotách 140-180 °C (výjimečně i přes 200 °C) po dobu 3-8 hodin. Mezi slitiny vytvrditelné za tepla patří slitiny na bázi Al-Si-Mg. Bohužel neplatí, že zvyšující se teplota vytvrzování přinese lepší vlastnosti za kratší čas, proto je potřeba volit teploty v optimálních mezích pro danou slitinu [2].

Výsledné vlastnosti jsou závislé také na obsahu hořčíku, který se u běžně vytvrditelných slitin Al-Si-Mg pohybuje v rozmezí 0,3-0,45 % a jeho vliv na mechanické vlastnosti je uveden na obr. 23 [2]

Vytvrzení za studena

Vytvrzování za studena je možné díky vysoké pohyblivosti atomů vytvrzujícího prvku. Nejenom po provedení rozpouštěcího žíhání, ale také při dosažení rychlého tuhnutí taveniny (např. při liti do kokil) jsou některé druhy slitin schopny začít za pokojových teplot vylučovat intermetalické fáze z homogenního tuhého roztoku. Právě takové samovolné vylučování vede ke zvýšení tvrdosti [2].

Mezi samovytvrditelné slitiny patří slitiny typu Al-Zn-Mg, slitina AlCu4 a některé slitiny systému Al-Si-Cu s vysokým obsahem mědi. Úskalím samovolného vytvrzování je jeho dlouhá doba. Konečných vlastností odlitků je dosaženo zhruba po 100 až 150 hodinách, což umožňuje kontrolu jejich vlastností a případné další zpracování obráběním až týden po provedení tepelného zpracování [2,16].

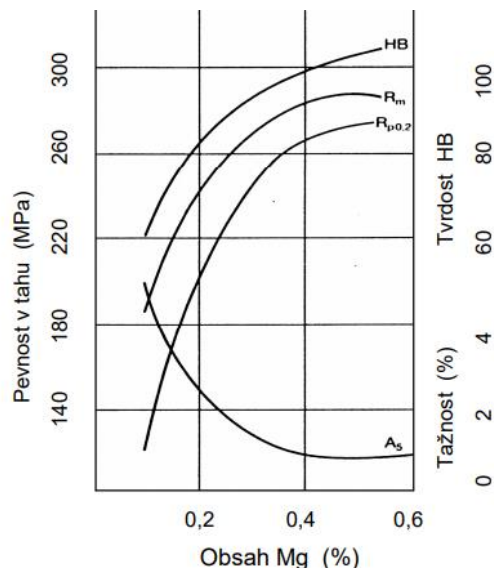
4.3 Značení tepelného zpracování

Označování stavu tepelného zpracování odlitků bylo převzato z amerického označování podle ASM (American Society of Metals), která toto označování poprvé zavedla v USA a Kanadě. Označování je v souladu s normou ČSN EN 515 [1].

Označování tepelného zpracování odlitků může být shrnuto do tří základních kategorií:

- F – označující odlitky v litém stavu, u kterých není po vyjmutí z formy prováděno žádné další zpracování,
- O – označující žíhání na odstranění vnitřního pnutí (typicky za teplot 340 °C po dobu 2-3 hodin s dochlazením na vzduchu),
- T – označující jiný druh tepelného zpracování než značky F a O

Jelikož u zpracování odlitků nejsou v kategoriích F a O žádná předepsaná rozdělení, jedinou kategorií, kterou je možné dále dělit je kategorie T [2,16,29].



Obr. 23 Vliv Mg na mechanické vlastnosti po vytvrzení [2]

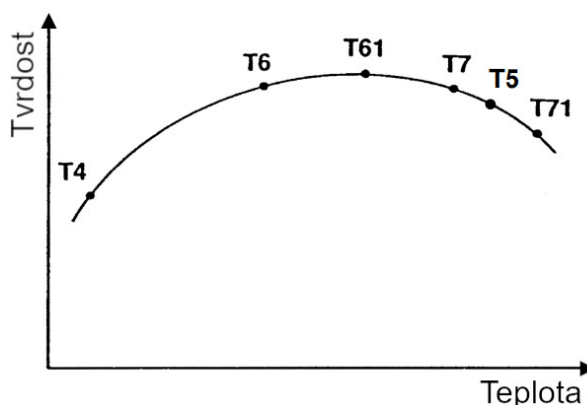
V této skupině je tedy možné nalézt čtyři označení s následujícím významem:

- T4 – rozpouštěcí žíhání s následným vytvrzením za studena,
- T5 – umělé stárnutí při relativně nízkých teplotách, bez homogenizačního žíhání (pro stabilizaci rozměrů, zlepšení obrobitelnosti a odstranění vnitřního pnutí), které obvykle probíhá při teplotách 205-260 °C po dobu 3-5 hodin,
- T6 – vytvrzování skládající se z homogenizačního žíhání, rychlého ochlazení a precipitačního vytvrzení (obvykle 145-160 °C během 3-5 hodin),
- T7 – vytvrzování s přestárnutím, tepelné zpracování stabilizuje mechanické vlastnosti a rozměry odlitků, oproti zpracování T6 se sníží pevnost a zvýší tažnost (typické teploty 190-225 °C a čas 6-10 hodin)

Pro další přiblížení podmínek a vlastností zpracování je možné zařadit za předchozí označení dodatkové číslice např.:

- T61 – vytvrzení na maximální pevnost a tvrdost (150-170 °C, 6-10 hodin),
- T64 – vytvrzení na maximální houževnatost,
- T71 – přestárnutí do stabilního stavu (225-260 °C, 6-10 hodin)

Vztah mezi druhem tepelného zpracování, teplotou a tvrdostí je uvedený na obr. 24 [2,29].



Obr. 24 Závislost tvrdosti na teplotě tepelného zpracování [2]

4.4 Zařízení pro tepelné zpracování

Tepelné zpracování hliníkových odlitků se provádí v komorových, nebo šachtových pecích, které jsou vybaveny potřebným příslušenstvím pro manipulaci s odlitky a systémy na měření teploty. Velikost a typ pece závisí na druhu tepelného zpracování a velikosti odlitků. Zdroj energie pecí tvoří převážně elektrická energie [1].

Jako samotné metody ohřevu je možné použít ohřev v roztavených solných lázních, pecích s normální atmosférou a indukční ohřev. Ten je však používán spíše při zpracování tvářených slitin hliníku [25].

Solné lázně:

Solné lázně mají oproti pecím s normální atmosférou vysoké využití energie (93-97 %), umožňují tak rychlejší ohřátí vložených odlitků na požadovanou teplotu a vysokou přesnost její regulace. Dalšími výhodami solných lázní jsou vysoká teplotní homogenita a možnost společného ohřevu odlitků různých velikostí s různou dobou výdrže na teplotě [1,25].

V solných lázních musí být pečlivě dodržovány teplotní limity, jelikož ohřátí nebo ochlazení velké masy soli je energeticky i časově náročné. Tím pádem by solná lázeň přišla o většinu výhod oproti pecím s normální atmosférou [25].

Nevýhodou solných lázní jsou zbytky solí, které zůstávají na povrchu odlitků po vytažení a mohly by vést ke korozi. Z tohoto důvodu je zapotřebí odlitky pečlivě očistit nebo soli neutralizovat (např. pomocí $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ nebo $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Další nevýhodou je jejich nebezpečí pro pracovníky, kteří musí být chráněni proti kontaktu s roztavenou solí i případnými výparů. Pec využívající solné lázně je zobrazena na obr. 25 [26].



Obr. 25 Pec využívající solné lázně [30]

Pec s normální atmosférou:

Účinnost těchto pecí je oproti roztaveným solím znatelně nižší, pouze 60 %. Nabízejí však větší teplotní flexibilitu, díky čemuž jsou používány více než solné lázně. Tato výhoda se nejvíce projeví při zpracovávání odlitků, které vyžadují odlišné teploty žhání nebo vytvrzování. V takovém případě by náklady na úpravu teploty solné lázně mnohonásobně převyšovaly její výhody [25].

Nicméně i v případě pecí s normální atmosférou je zapotřebí určitá prodleva mezi vyjmutím jednoho druhu odlitků a vložením druhého druhu. Ta umožní stabilizaci teploty stěn pece a minimalizuje odchylky měření teploty způsobené sáláním. Pec s normální atmosférou je vidět na obr. 26 [25].



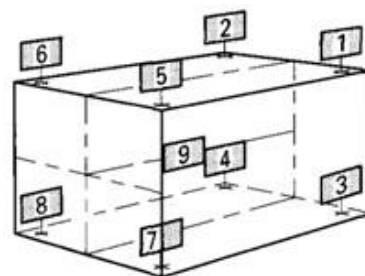
Obr. 26 Vkládání odlitků do pece s normální atmosférou [31]

Kontrola teploty v pecích:

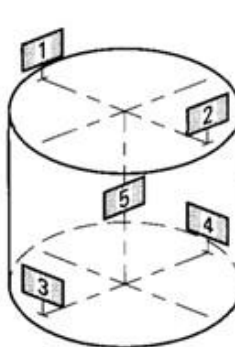
Význam kontroly teploty v pecích je značný, jelikož výsledek prováděného tepelného zpracování je v mnoha případech závislý na dodržení předepsaných teplot s úzkým tolerančním pásmem. Každá měřicí zóna uvnitř pece by tedy měla obsahovat alespoň dva termočlánky. Jeden plní kontrolní funkci a druhý sloužící jako pojistka, která sepne při překročení nastavené teploty, obvykle maximální dovolené hodnoty pro daný druh tepelného zpracování [25].

Použité termočlánky by měly mít z důvodu vyšší přesnosti správný rozsah (např. 400-600 °C místo 0-600 °C) a měly by také umožnit pořizování záznamu teploty. Průměr termočlánku musí být přiměřený nejmenší tloušťce materiálu v peci, aby na změnu teploty reagoval rychleji než tepelně zpracovávaný materiál. Přístrojům napojeným na termočlánky je potřeba zajistit ochranu před vlhkostí, prachem, vibracemi a výraznými výkyvy teploty [25].

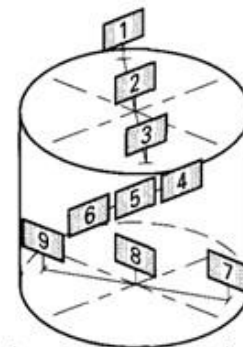
Důležitým faktorem je také rozmístění termočlánků uvnitř pece. Jsou umístěny tak, aby co nejlépe zaznamenávaly stav teploty prostředí v klíčových částech pece, viz obr. 27. Pro hladký průběh tepelného zpracování jsou termočlánky pravidelně kontrolovány pomocí kalibrovaných kontrolních sond. Taková kontrola probíhá umístěním sondy do blízkosti termočlánku a zkoumáním odchylky naměřených hodnot [25].



Obdélníková pec



Válcová solná lázeň



Válcová pec s normální atmosférou

Obr. 27 Umístění termočlánků v peci [25]

4.5 Řešení problémů tepelného zpracování

Výsledek tepelného zpracování je hodnocen obvykle podle mechanických vlastností odlitku, kterými jsou pevnost v tahu, pevnost na mezi kluzu a prodloužení. Pokud není požadovaných kritérií tepelným zpracováním dosaženo, je zapotřebí analyzovat použité postupy a na základě výsledků provést jejich úpravu [16].

V první řadě je potřeba zkontrolovat záznamy z pecí, ve kterých bylo tepelné zpracování prováděno, jestli byly dodrženy správné teplotní a časové intervaly. Případně je možné zkontrolovat teplotu ochlazovací lázně a ověřit prodlevu mezi vytažením ze žíhací pece a ochlazením. Kvalitu rozpouštěcího žíhání je dále možné posoudit zkoumáním metalografického výbrusu. Přestárnutí slitiny je však díky velikosti precipitátů vznikajících za vyšších teplot snáze určitelné než stárnutí nedostatečné [16].

Vliv na vlastnosti po tepelném zpracování může mít i chemické složení odlitků. Pokud tedy není nalezena chyba v podmínkách provedení tepelného zpracování, je zapotřebí zkontrolovat, jestli obsahy jednotlivých prvků nepřekračují povolené limity. Na závěr se kontroluje průběh zkoušek mechanických vlastností [16].

V mnoha případech je možné tepelné zpracování opakovat, pokud tedy byla chyba způsobující nezdar zpracování vyřešena nebo se jí nelézt nepodařilo provede se tepelné zpracování znovu. V případě slitin Al-Cu je pouze nutné opakované rozpouštěcí žíhání provádět při stejných nebo vyšších teplotách než to původní, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku [16].

5 EXPERIMENT

Cílem této práce bylo, mimo jiné, experimentální zjištění vlivu podmínek při vytvrzování na výsledné vlastnosti hliníkové slitiny. Za tímto účelem byl navržen experiment, jehož cílem je závislost mezi podmínkami vytvrzení a dosaženými vlastnostmi slitiny popsat.

5.1 Návrh experimentu

Volba materiálu:

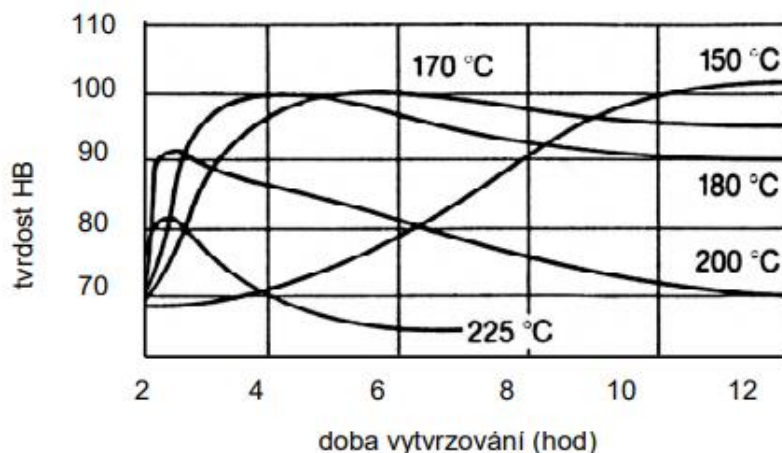
Jednou z vhodných slitin pro vytvrzování je slitina AlSi10Mg. Jedná se o mírně podeutektickou slitinu s nízkým obsahem doprovodných prvků a nečistot s výbornými slévárenskými a technologickými vlastnostmi. Je vhodná pro všechny technologie lití a při tuhnutí netvoří vnitřní staženiny. Používá se při odlévání tenkostěnných, tvarově složitých součástí, u kterých jsou kladeny vysoké nároky na pevnost a houževnatost (např. části spalovacích motorů, klikové skříně a brzdové čelisti) [2].

Důvodem pro použití této slitiny v experimentu byl fakt, že je v praxi používána ve vytvrzeném stavu T6 a také byla k dispozici ve školní slévárně.

Určení zkoumaných podmínek:

Jak již bylo zmíněno v kapitole zabývající se tepelným zpracováním, podmínky při vytvrzování mají významný vliv na výslednou tvrdost odlitku. Podmínky, které tuto vlastnost ovlivňují, jsou teplota a doba vytvrzování.

Pro zvolenou slitinu je ideální provádět vytvrzování při teplotách 150 až 175 °C, po dobu 5 až 15 hodin. Teoretický vliv teploty a času na výslednou tvrdost je znázorněn na obr. 28.



Obr. 28 Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [2]

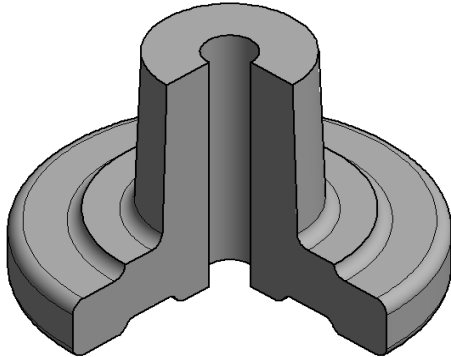
Z uvedených závislostí vyplývá, že při stoupající teplotě vytvrzování se sice zkracuje potřebná doba vytvrzování, ale děje se tak na úkor dosažitelné tvrdosti slitiny. V běžně používaném intervalu teplot 150-175 °C není pokles tvrdosti tak patrný, po překročení se však dosažitelná tvrdost výrazně snižuje. Právě tímto poklesem tvrdosti za zvýšených teplot vytvrzování se navržený experiment zabývá.

Určení podmínek experimentu:

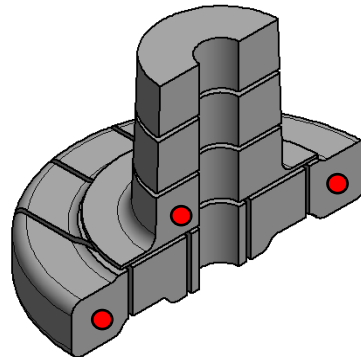
Pro provedení experimentu byly určeny 3 teploty a 5 časů. Tyto teploty byly podle teoretické závislosti tvrdosti na teplotě a době vytvrzení navrženy tak, aby v časovém intervalu šesti hodin, pokud možno, zachytily pokles maximální dosažitelné tvrdosti slitiny. Jednotlivé teploty byly orientačně zvoleny uvnitř, na okraji a mimo používaný interval a jejich hodnota byla 167 °C, 177 °C a 190 °C. Časy vytvrzování byly zvoleny na 2, 3, 4, 5 a 6 hodin.

5.2 Příprava vzorků

Pro samotnou přípravu patnácti vzorků potřebných pro experiment byl vybrán odlitek příruby, který byl na rámové pile rozřezán na 16 dílů přibližně stejné tloušťky. Vzhled příruby a její dělení ilustrují obrázky 29 a 30.



Obr. 29 Model příruby se čtvrtinovým řezem



Obr. 30 Model poloviny příruby rozdělený na vzorky

Některé vzorky bylo z důvodu umístění v peci, nebo snazšího měření tvrdosti po vytvrzení nutné dále upravit seříznutím oblých hran. S touto úpravou bylo od začátku počítáno, proto mají i takto upravené vzorky přibližně stejnou tloušťku, jako vzorky ostatní. Takto upravené vzorky jsou na obr. 30 označeny červenou značkou.

Označování vzorků bylo provedeno vyražením kombinace písmena určujícím teplotu vytvrzování

a čísla, které odpovídá době vytvrzování v hodinách. Například označení vzorku A2 odpovídá teplotě 167 °C a době vytvrzování 2 hodiny. Výsledná podoba vzorků je vidět na obr. 31.

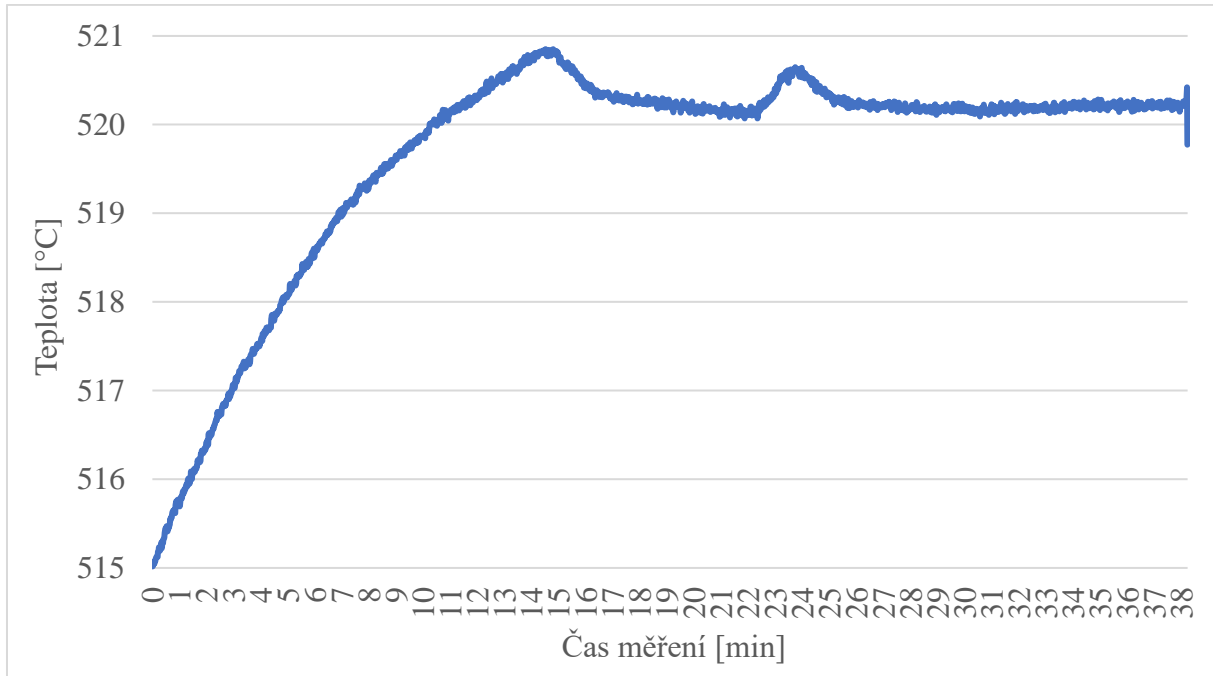


Obr. 31 Fotografie vzorků

5.3 Rozpouštěcí žihání

Aby bylo možné provést samotné vytvrzení hliníkové slitiny, musí mu předcházet rozpouštěcí žihání a následné rychlé ochlazení vzorků. Pro zvolenou slitinu AlSi10Mg je používána teplota rozpouštěcího žihání 510-525 °C po dobu 3-6 hodin s následným ochlazením ve vodě. Důležitým parametrem rozpouštěcího žihání je také odchylka teploty, která by měla být ± 5 °C [2].

V případě experimentu byla zvolena teplota 520 ± 5 °C, která leží přibližně uprostřed intervalu používaných teplot. Vzhledem k malé velikosti vzorků byla zvolena doba žíhání 3 hodiny. Teplota žíhání byla kontrolována pomocí termočlánku typu K. Část záznamu průběhu teploty pro první sadu vzorků je zobrazen na obr. 32. Z grafu je patrné, že poté co se teplota termočlánku srovnala s teplotou uvnitř pece, udržuje se záznam na hodnotách zhruba mezi teplotou 520 a 521 °C.



Obr. 32 Část průběhu teploty rozpouštěcího žíhání

Samotné rozpouštěcí žíhání bylo prováděno v elektrických odporových pecích znázorněných na fotografiích níže, viz obr. 33 a obr. 34. Ochlazení vzorků bylo provedeno jejich rychlým ponořením do nádoby s vodou umístěnou poblíž pece. Vzorky nebyly do vody pouze vloženy, ale bylo s nimi pohybováno, aby se zamezilo vzniku parního polštáře, který by bránil rychlému ochlazení.



Záznam průběhu teploty Nádoba s vodou Termočlánek Elektrická odporová pec

Obr. 33 Průběh rozpouštěcího žíhání sad A a C



Teploměř

Orientační měření teploty

Elektrická odporová pec

Obr. 34 Průběh rozpouštěcího žíhání sady B

V průběhu experimentu došlo bohužel k závadě na ovládní jedné z použitých elektrických pecí, která byla použita při vytvrzování sady vzorků A a rozpouštěcím žíhání sady vzorků C. V případě vytvrzování sady A tato závada komplikovala nastavení teploty, ale neměla na průběh vytvrzení zásadní vliv. V případě rozpouštěcího žíhání sady C došlo na neštěstí k úplnému vypnutí pece zhruba ve dvou třetinách žíhacího cyklu. Vzorky byly narychlo přemístěny do jiné pece, ale zvýšená teplota při jejím náběhu společně s nešťastným umístěním jednoho ze vzorků blízko topné spirály způsobily překročení požadované teploty a jeho částečné natavení.

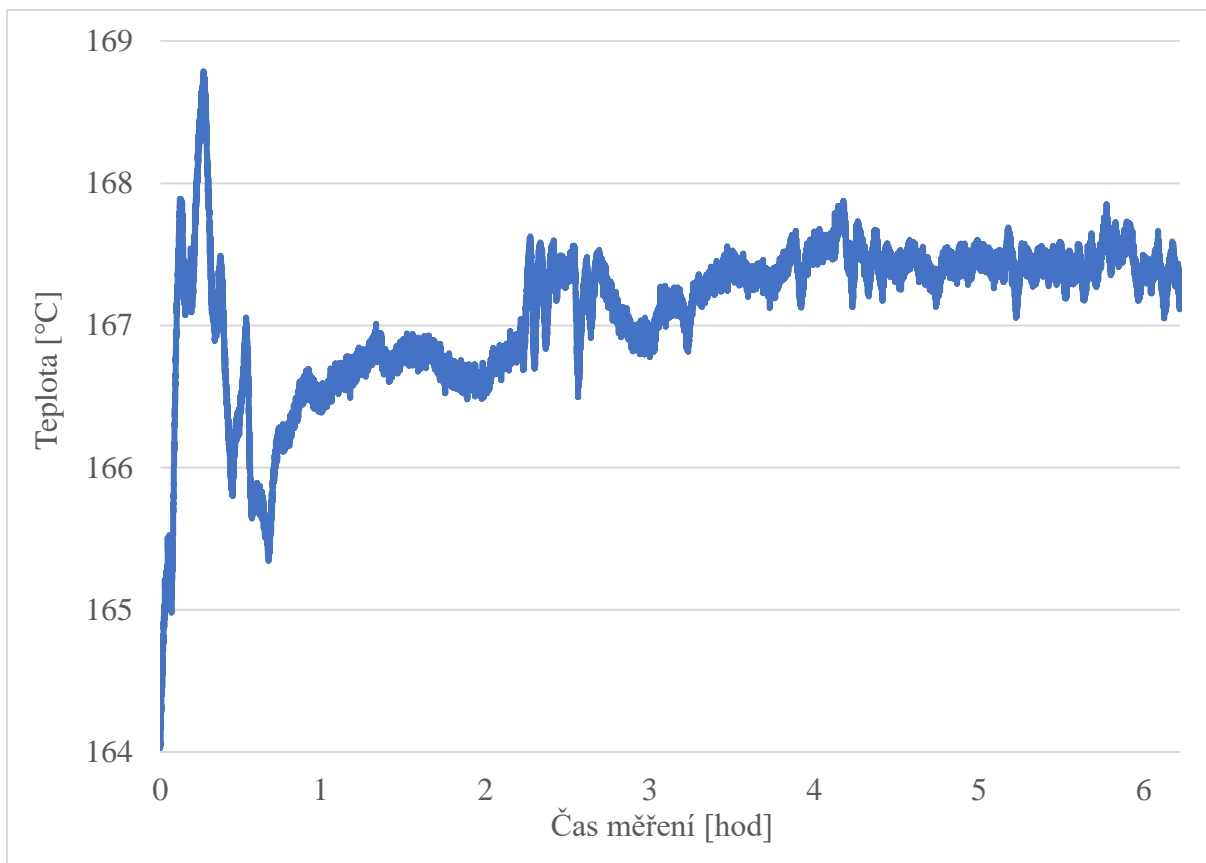
5.4 Vytvrzování

Pro vytvrzování byly použity následující teploty a časy:

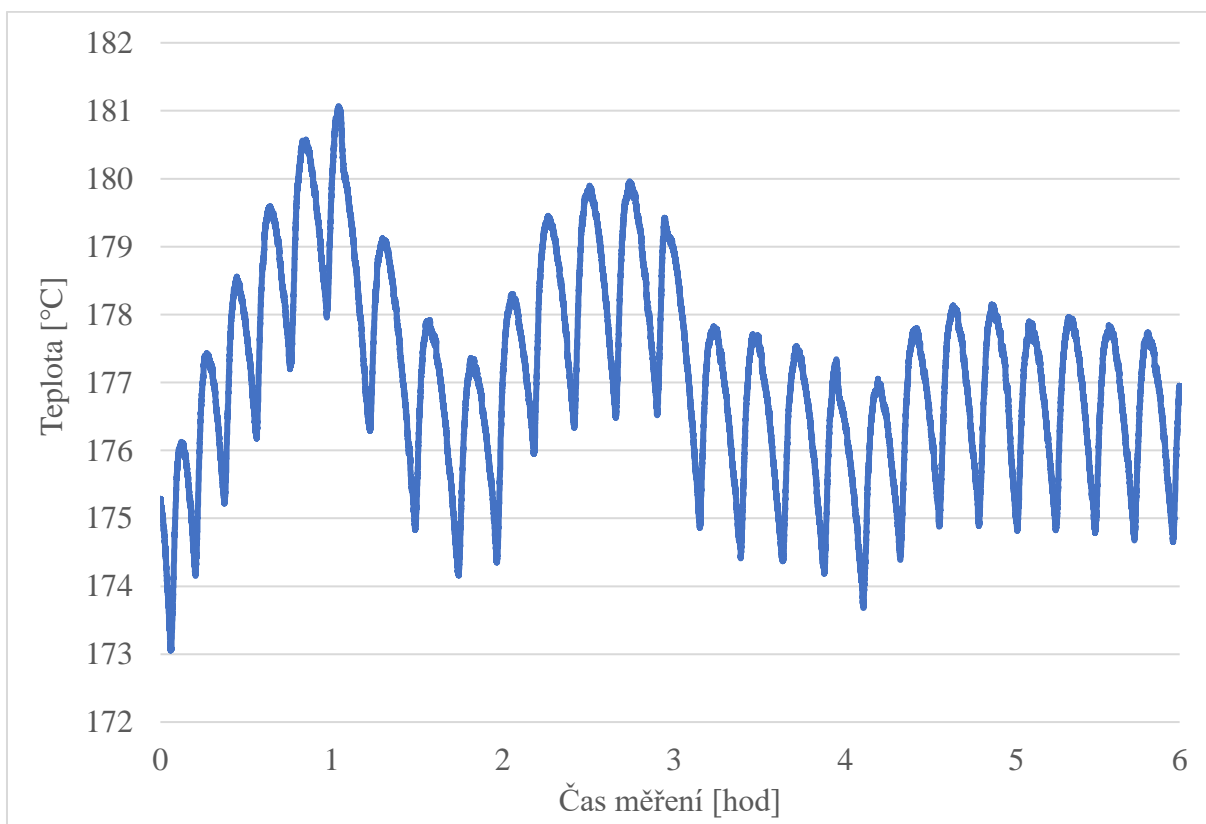
- sada vzorků A – 167 ± 3 °C, v intervalech 2, 3, 4, 5 a 6 hodin,
- sada vzorků B – 177 ± 3 °C, v intervalech 2, 3, 4, 5 a 6 hodin,
- sada vzorků C – 190 ± 4 °C, v intervalech 2, 3, 4, 5 a 6 hodin

Kontrola teploty byla prováděna termočlánkem typu K, podobně jako u žíhání, a její záznam zobrazují následující grafy na obrázcích 35, 36 a 37.

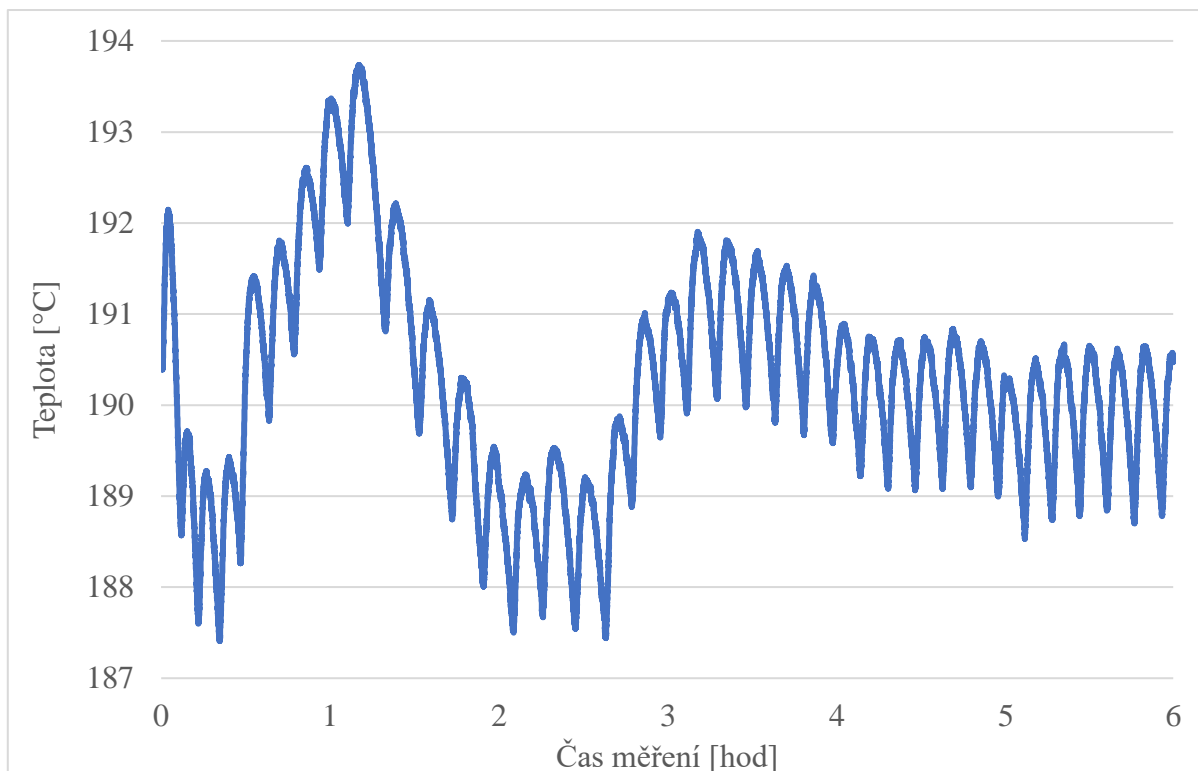
Závada na elektrické odporové peci při vytvrzování sady A se promítla do záznamu teploty tím, že je její průběh oproti průběhům z ostatních měření nepravidelný, viz obr. 35. Tento průběh byl způsoben regulací teploty pomocí pootvírání dvířek pece.



Obr. 35 Průběh teploty vytvrzování sady vzorků A

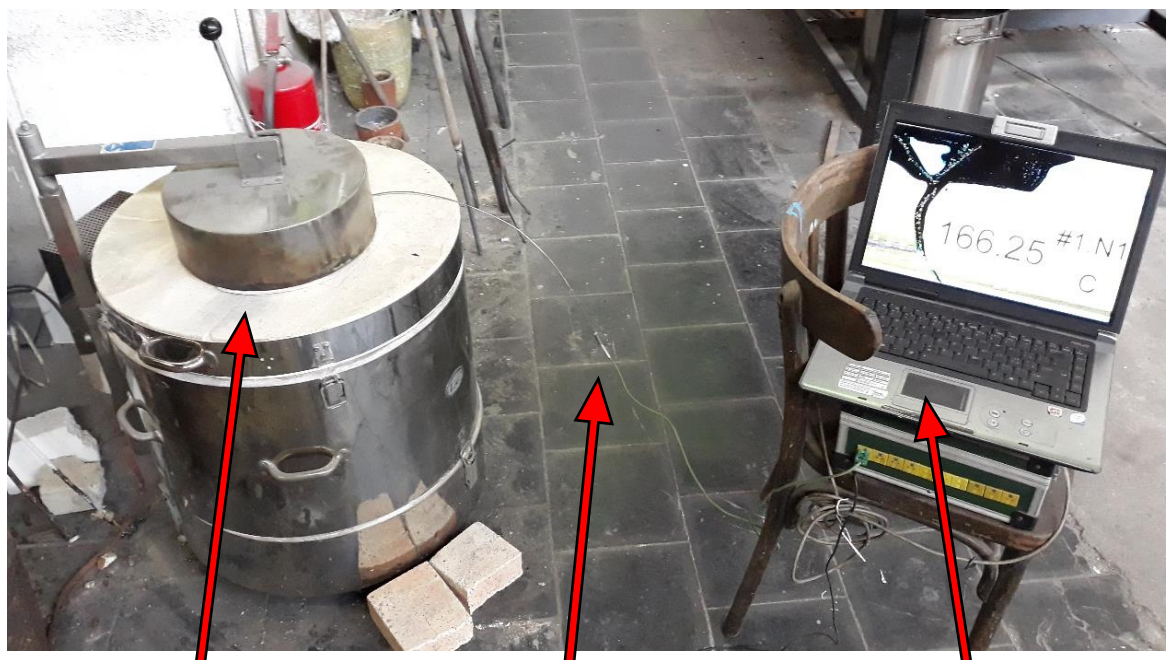


Obr. 36 Průběh teploty vytvrzování sady vzorků B



Obr. 37 Průběh teploty vytvrzování sady vzorků C

K vytvrzování byla použita podobná sestava jako v případě rozpouštěcího žhání, která sestávala z elektrické odporové pece, termočlánek a počítače se záznamem teploty, viz obrázky 38 a 39.

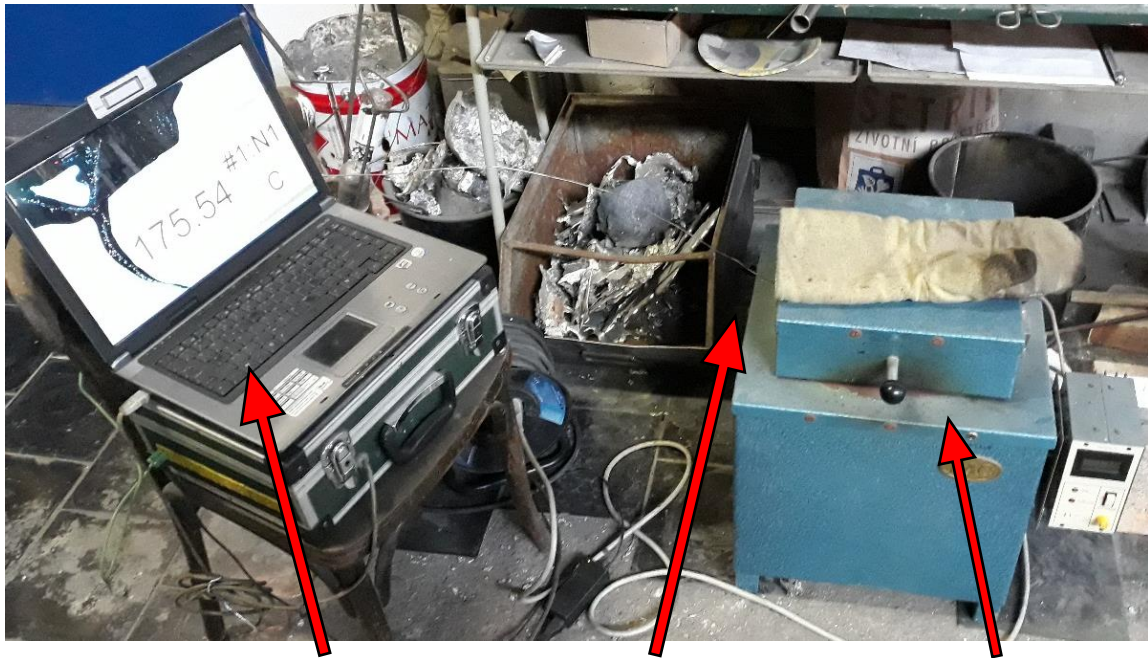


Elektrická odporová pec

Termočlánek

Záznam průběhu teploty

Obr. 38 Průběh vytvrzování sady A



Záznam průběhu teploty

Termočlánek

Elektrická odporová pec

Obr. 39 Průběh vytvrzování sad B a C

5.5 Měření tvrdosti

Na závěr experimentu bylo zapotřebí zjistit hodnotu dosažené tvrdosti jednotlivých vzorků. Pro toto měření byla zvolena zkouška tvrdosti podle Brinella, která spočívá v zatlacování zkušebního tělíska tzv. indentoru do zkoumaného materiálu a následného určení tvrdosti podle velikosti vtisku.

V případě Brinellovi zkoušky má indentor tvar kuličky o průměru 2,5, 5 nebo 10 mm a je vyroben z kalené oceli (značení tvrdosti HBS) nebo slinutého karbidu (značení tvrdosti HBW). Použitý průměr indentoru, velikost zatěžující síly a doba jejího působení jsou dány normou ČSN EN ISO 6506-1.

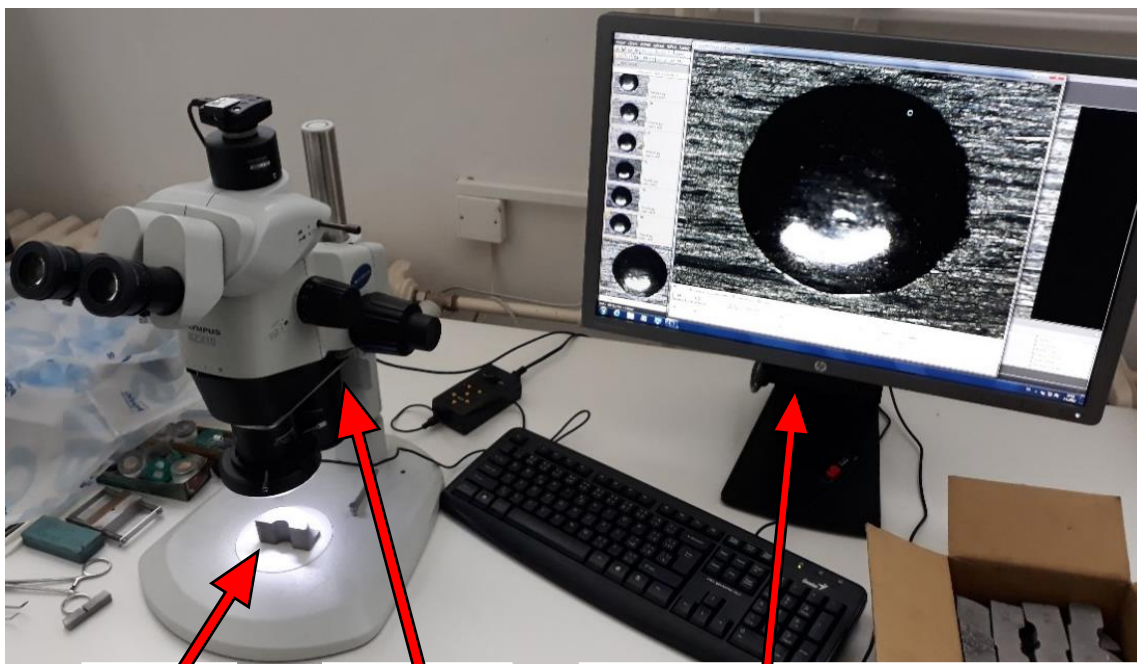
V případě experimentu byly použity následující parametry zkoušky, které jsou určeny pro zkoušení lehkých kovů a jejich slitin:

- materiál indentoru: slinutý karbid,
- průměr indentoru: $D = 5 \text{ mm}$,
- poměr zatížení a průměru: $10 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,
- velikost zatěžující síly: $F = 2452 \text{ N}$,
- doba zatížení: $t = 10 \text{ s}$

V průběhu zkoušení byly na každém vzorku vytvořeny tři vtisky, jejichž velikost a odpovídající tvrdost byly vyhodnoceny pomocí mikroskopu a softwaru QuickPHOTO Industrial 3.1. Z těchto tří hodnot byl následně vypočítán aritmetický průměr, který reprezentuje výslednou tvrdost vzorku. Použitý tvrdoměr je možné vidět na obr. 40 a sestava na měření tvrdosti je znázorněna na obr. 41.



Obr. 40 Tvrdoměr



Vzorek

Mikroskop

Měření vtisku a vyhodnocení tvrdosti

Obr. 41 Průběh vyhodnocení tvrdosti

Následující tabulky 2 až 5 uvádějí naměřené hodnoty tvrdosti, jejich aritmetický průměr a směrodatnou odchylku pro jednotlivé sady vzorků a pro vzorek, na kterém bylo provedeno pouze rozpouštěcí žihání.

Tab. 2 Hodnoty tvrdosti sady A

Hodnota tvrdosti HBW 5/250					
Číslo měření	A2	A3	A4	A5	A6
1	104	98	113	101	104
2	109	98	109	109	100
3	101	96	91	100	93
\bar{x}	105	97	104	103	99
$s(x)$	4,0	1,2	11,7	4,9	5,6

Tab. 3 Hodnoty tvrdosti sady B

Hodnota tvrdosti HBW 5/250					
Číslo měření	B2	B3	B4	B5	B6
1	103	103	99	100	105
2	100	102	93	103	97
3	100	100	101	106	101
\bar{x}	101	102	98	103	101
$s(x)$	1,7	1,5	4,2	3,0	4,0

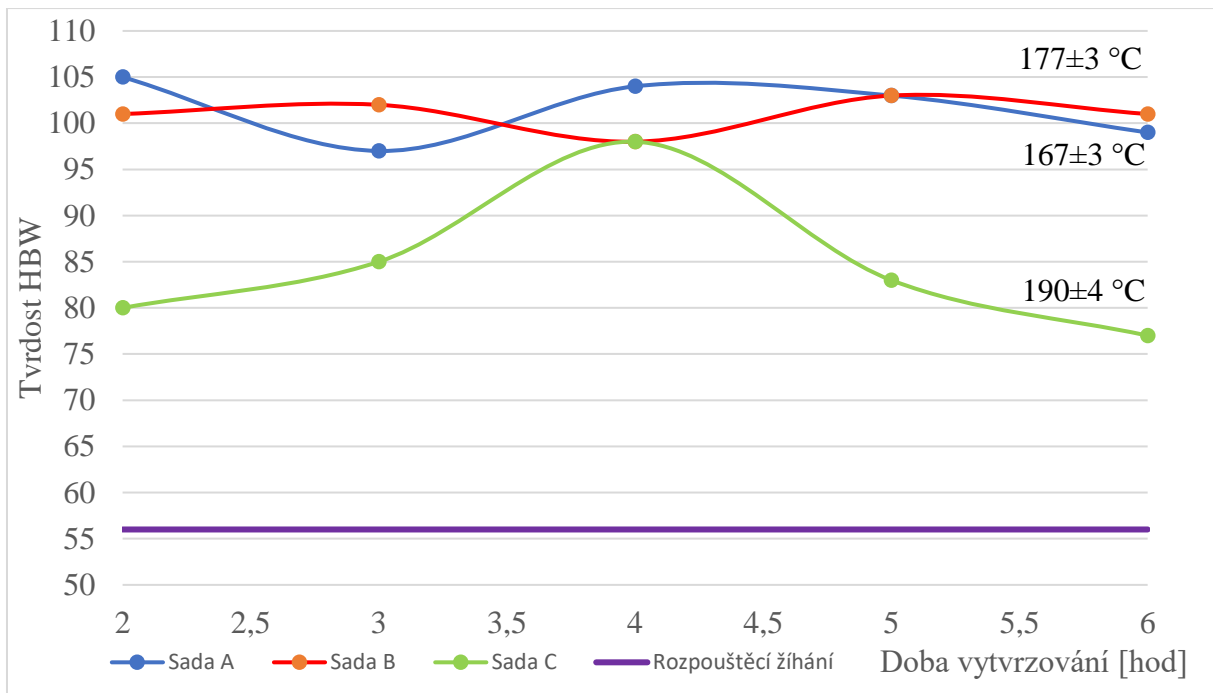
Tab. 4 Hodnoty tvrdosti sady C

Hodnota tvrdosti HBW 5/250					
Číslo měření	C2	C3	C4	C5	C6
1	78	85	101	89	76
2	84	84	91	79	79
3	77	86	101	81	76
\bar{x}	80	85	98	83	77
$s_{(x)}$	3,8	1,0	5,8	5,3	1,7

Tab. 5 Hodnoty tvrdosti po žihání

Hodnota tvrdosti HBW 5/250	
Číslo měření	Vzorek po rozpouštěcím žihání
1	56
2	57
3	55
\bar{x}	56
$s_{(x)}$	1,0

Ze získaných dat byly vytvořeny následující závislosti teploty, doby vytvrzování a tvrdosti HBW, které jsou uvedeny v grafu na obr. 42.



Obr. 42 Průběh dosažené tvrdosti slitiny AlSi10Mg

ZÁVĚRY

Po dokončení experimentu, který měl za úkol popsat vliv teploty a doby vytvrzování na výslednou tvrdost slitiny, jsou k dispozici 4 sady dat. Tři z těchto sad reprezentují tvrdost dosaženou vytvrzováním při různých teplotách a jedna sada ilustruje tvrdost vzorku, na kterém bylo provedeno pouze rozpouštěcí žihání.

Ze získaných závislostí je patrné, že dosažené tvrdosti sady A se pohybují zhruba ve stejných hodnotách okolo 102 HBW pro všechny vzorky. To je v rozporu s údaji teoretické závislosti, podle které mělo být maximální tvrdosti 100 HB dosaženo až kolem šesté hodiny vytvrzování. Příčinou by mohla být malá velikost vzorků, díky čemuž bylo dosaženo maximální tvrdosti už po dvou hodinách vytvrzování.

Podobný případ nastal i u sady vzorků B. V tomto případě bylo předpokládáno dosažení maximální tvrdosti mezi 4. a 5. hodinou následované mírným poklesem tvrdosti. Mezi tvrdostí vzorků B5 a B6 je sice rozdíl, který by mohl naznačovat začínající pokles, ale pro ověření, že se nejedná pouze o odchylku, by bylo zapotřebí mít k dispozici více dat.

Naproti tomu průběh sady C, která byla vytvrzována za nejvyšší teploty, se teoretickým závislostem velice blíží. Nárůst tvrdosti na hodnotu 98 HBW během prvních čtyř hodin následovaný jejím výrazným poklesem odpovídá předpokládanému výsledku vytvrzování této sady. Vzorkem, který byl při rozpouštěcím žihání sady C nedopatřením nataven, byl vzorek C6. Jedná se tedy o poslední údaj v grafu tvrdosti, a proto by jeho vliv na průběh zjištěné závislosti nebyl tak dramatický. Nicméně dosažená hodnota 77 HBW víceméně odpovídá teoretickému předpokladu.

Poslední křivka v grafu umožňuje porovnání tvrdosti po vytvrzení s tvrdostí pouze po rozpouštěcím žihání. Hodnota tvrdosti měkké struktury přesyceného roztoku získaná rozpouštěcím žiháním je téměř dvakrát nižší než hodnoty dosažitelné precipitačním vytvrzením.

Na základě podkladů získaných experimentem bych si dovolil konstatovat, že za zvýšených teplot vytvrzování skutečně dochází k výraznému poklesu dosažitelné tvrdosti v závislosti na čase vytvrzování, a proto by měla být volbě podmínek vytvrzování hliníkových odlitků věnována náležitá pozornost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005, 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
2. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
3. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-7080-600-1.
4. Global end use of aluminium products in 2019, by sector. *Statista* [online]. 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/280983/share-of-aluminum-consumption-by-sector/>
5. Next-generation Audi Q5 cuts up to 198.4 pounds with HS steel, aluminium. *REPAIRER DRIVEN NEWS* [online]. DRIVEN COMMUNICATIONS, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.repairerdrivennews.com/2016/10/04/next-generation-audi-q5-cuts-up-to-198-4-pounds-with-hs-steel-aluminum/>
6. Hliník, materiál 21. století. *STAVEBNICTVÍ 3000.CZ: věrohodný pohled na stavění a materiál* [online]. Hradec Králové: VEGA spol., 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/hlinik-material-21-stoleti>
7. Numerická etalonní geometrie. *O letadlech* [online]. 2015 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://www.slavetind.cz/copodarilo/NEG/CojeNEG.aspx>
8. High quality engine block cylinder for D4CB engine. *Alibaba.com* [online]. Alibaba Group, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/high-quality-aluminum-engine-block-cylinder_2022678122.html
9. BUDWEISER BUDVAR 12světly ležák 0,5l plech. *JASO DISTRIBUTOR* [online]. SOFICO-CZ, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: https://www.jaso.cz/budvar-12-0-5l-plech-ean10086-skup10301.php?18_let=ano
10. CHVOJKA, Jiří a Miroslav BRZOBOHATÝ. *Zpracování a použití hliníku a jeho slitin*. Praha: SNTL, 1961, 360 s. DT 669.716.717.
11. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
12. LIGAS, Aleš. Studium beta fáze v *Al-Mg-Si slitinách pomocí nekonvenčních metod elektronové mikroskopie* [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30309385.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Mgr. Šárka Mikmeková, Ph.D.
13. POLMEAR, Ian, David STJOHN, Jian-Feng NIE a Ma QIAN. *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals* [online]. 5. vyd. Oxford: Elsevier, 2017 [cit. 2021-03-23]. ISBN 978-0-08-099430-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpLAMLME01/viewerType:toc//root_slug:light-alloys-metallurgy/url_slug:light-alloys-metallurgy

14. GRUZLESKI, John E. a Bernard M. CLOSSET. *The treatment of liquid aluminum-silicon alloys*. Des Plaines: The American Foundrymen's Society, 1999. ISBN 0-87433-121-8.
15. WANG, Yewu, Senz STEPHAN, Volker SCHMIDT a Ulrich GÖSELE. Epitaxial growth of silicon nanowires using an aluminium catalyst. *Nature nanotechnology* [online]. 2006, 186 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: doi:10.1038/nnano.2006.133
16. KAUFMAN, John Gilbert a Elwin L. ROOY. *Aluminium Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications* [online]. Materials Park: ASM International, 2004 [cit. 2021-03-23]. ISBN 978-1-62198-478-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpAACPPA0M/viewerType:toc//root_slug:aluminum-alloy-castings/url_slug:front-matter?issue_id=kpAACPPA0M&hierarchy=
17. OLIVEIRA, Ronaldo, Diego FERREIRA, Robson LIMA a Claudio SIQUEIRA. Effect of Squeeze Casting on Microhardness and Microstructure of Al-3Cu-xSi Alloys. *Materials Reserch* [online]. 2019, 22 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: doi:10.1590/1980-5373-mr-2019-0145
18. PRACHOVÁ, Olena, Jakub HORNÍK a Kostiantyn MYKHALENKOV. *EFFECT OF THE ADDITION OF LI ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HYPOEUTECTIC Al-Mg2Si ALLOYS* [online]. 2015, 55(4), 7 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2015.55.0253
19. Shell molding process.svg. *Wikimedia commons* [online]. Wikimedia, 2020 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Shell_molding_process.svg&page=1
20. Casting portfolio. *Specialized castings* [online]. Greenville: Specialized castings, 2016 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <http://spcastings.com/casting-portfolio/>
21. Investment casting. *OpenLearn* [online]. The Open University, 2020 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/investment-casting>
22. Cold chamber die casting. *DYNACAST: A form technologies company* [online]. Dynacast, 2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.dynacast.com/en/specialty-die-casting/die-cast-process/cold-chamber-die-casting>
23. Aluminium Casting Techniques: Sand Casting and Die Casting Processes. *AZO Materials* [online]. AZoNetwork, 2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1392>
24. Squeeze casting. *ScienceDirect* [online]. Elsevier B.V., 2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/squeeze-casting>
25. Heat Treating of Aluminium Alloys. *ASM Handbook: Volume 4: Heat Treating* [online]. Materials Park: ASM International, 1991, s. 841-879 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: doi:10.1361/asmhba0001205

26. CAMPBELL, F.C. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys* [online]. Materials Park: ASM International, 2008 [cit. 2021-04-19]. ISBN 978-1-68015-960-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpEMEA000U/viewerType:toc//root_slug:elements-metallurgy-engineering/url_slug:elements-metallurgy-engineering
27. Heat treatment of aluminum, part II: Water quenching. *Thermal processing* [online]. Pelham: Thermal processing, 2018 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://thermalprocessing.com/heat-treatment-of-aluminum-part-ii-water-quenching/>
28. CARRERA, Efrén, Alejandro GONZÁLES, José TALAMANTES-SILVA a Rafael COLÁS. Effect of the Delay in Time Between Cooling and Aging in Heat-Treated Cast Aluminum Alloys. *Metallurgical and Material Transactions B* [online]. 2011, 8 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: doi:10.1007/s11663-011-9534-1
29. KAUFMAN, John Gilbert. *Introduction to Aluminium Alloys and Tempers* [online]. Materials Park: ASM International, 2000 [cit. 2021-03-23]. ISBN 978-1-62870-205-7. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpIAAT0002/viewerType:toc//root_slug:viewerType%3Aatoc/url_slug:root_slug%3Aintroduction-aluminum?kpromoter=federation
30. Salt Bath Heat Treating Processes. *AJAX Electric Co.* [online]. Huntingdon Valley: Ajax Electric Co., 2013 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://ajaxelectric.com/heat-treating-products/>
31. Aluminum Heat Treatment. *Harrison Castings* [online]. Leicester: Harrison Castings, 2021 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: https://www.harrisoncastings.com/en_US/capabilities/aluminum-heat-treatment/
32. *Citace PRO* [online]. Brno: Citace.com, 2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Spotřeba hliníku podle odvětví v roce 2019 [4].....	9
Obr. 2 Příklady použití hliníkových slitin [5,6,7,8,9]	9
Obr. 3 Schéma rozdělení hliníkových slitin [12]	10
Obr. 4 Část diagramu soustavy Al-Si [15]	12
Obr. 5 Fázový diagram systému Al-Si-3Cu [17]	14
Obr. 6 Fázový diagram systému Al-Mg ₂ Si [18].....	14
Obr. 7 Část diagramu systému Al-Cu [1].....	15
Obr. 8 Část diagramu systému Al-Mg [1].....	15
Obr. 9 Část diagramu systému Al-Zn [1]	16
Obr. 10 Postup výroby skořepinové formy [19]	18
Obr. 11 Odlitek zhotovený v sádrové formě [20]	18
Obr. 12 Postup výroby odlitků metodou vytavitelného modelu [21].....	19
Obr. 13 Licí stroj se studenou komorou [22]	20
Obr. 14 Schéma stroje pro nízkotlaké lití [2]	20
Obr. 15 Průběh přímého squeeze castingu [23]	21
Obr. 16 Průběh nepřímého squeeze castingu [24].....	21
Obr. 17 Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu [2]	23
Obr. 18 Rozmezí teplot tepelného zpracování slitiny Al-Cu [25].....	24
Obr. 19 Vliv teploty vodní lázně na rychlost ochlazování [27]	25
Obr. 20 Závislost pevnosti slitiny A356 na prodlevě a DAS [28]	25
Obr. 21 Průběh precipitace [2]	26
Obr. 22 Průběh precipitace slitiny Al-Cu pod elektronovým mikroskopem [26].....	26
Obr. 23 Vliv Mg na mechanické vlastnosti po vytvrzení [2]	27
Obr. 24 Závislost tvrdosti na teplotě tepelného zpracování [2]	28
Obr. 25 Pec využívající solné lázně [30].....	29
Obr. 26 Vkládání odlitků do pece s normální atmosférou [31].....	29
Obr. 27 Umístění termočlánků v peci [25].....	30
Obr. 28 Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [2].....	31
Obr. 29 Model příruby se čtvrtinovým řezem.....	32
Obr. 30 Model poloviny příruby rozdělený na vzorky.....	32
Obr. 31 Fotografie vzorků.....	32
Obr. 32 Část průběhu teploty rozpouštěcího žíhání	33
Obr. 33 Průběh rozpouštěcího žíhání sad A a C	33
Obr. 34 Průběh rozpouštěcího žíhání sady B	34
Obr. 35 Průběh teploty vytvrzování sady vzorků A.....	35
Obr. 36 Průběh teploty vytvrzování sady vzorků B.....	35
Obr. 37 Průběh teploty vytvrzování sady vzorků C	36
Obr. 38 Průběh vytvrzování sady A	36
Obr. 39 Průběh vytvrzování sad B a C	37
Obr. 40 Tvrdoměr.....	37
Obr. 41 Průběh vyhodnocení tvrdosti	38
Obr. 42 Průběh dosažené tvrdosti slitiny AlSi10Mg.....	39

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání vlastností slitiny AlSi17CuMg s podeutektickými slitinami [2]	13
Tab. 2 Hodnoty tvrdosti sady A	38
Tab. 3 Hodnoty tvrdosti sady B	38
Tab. 4 Hodnoty tvrdosti sady C	39
Tab. 5 Hodnota tvrdosti po žíhání	39