



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA ZÁVISLOSTI RŮZNÉHO ZPŮSOBU OCHLAZOVÁNÍ AL ODLITKŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI, MIKROSKOPICKOU STRUKTURU A VZDÁLENOSTI SEKUNDÁRNÍCH OS DENDRITŮ, DAS

ANALYSIS OF DIFFERENT WAYS/SPEED OF COOLING AL CASINGS DURING THEIR SOLIDIFICATION AND INFLUENCE TO THE MECHANICAL PROPERTIES, STRUCTURE AND DENDRITE ARM SPACING OF THE FINAL CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Holčapek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jiří Holčápek**
Studijní program: Slévárenská technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Horáček, CSc.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Analýza závislosti různého způsobu ochlazování Al odlitků na mechanické vlastnosti, mikroskopickou strukturu a vzdálenosti sekundárních os dendritů, DAS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude zaměřena na různé způsoby ochlazování odlitků. Bude porovnáno volné ochlazování vzduchem s různými chladícími médii. Jednotlivé vzorky budou zpracovány v laboratoři, vyhodnoceny na metalografickém mikroskopu, kde bude pozorována vnitřní struktura odlitků, intermetalické fáze a bude měřena vzdálenost sekundárních os dendritů, DAS. Všechny vzorky budou vyhodnoceny tahovou zkouškou pro zjištění mechanických vlastností jak v surovém stavu, tak po tepelném zpracování

Cíle diplomové práce:

Vyhodnotit nejlepší způsob ochlazování odlitků v porovnání mechanických vlastností, metalografické struktury a DAS.

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. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry, Proceedings of the World Technical Forum, Brno 1st – 3rd June, 2009.

HORÁČEK, M., J. CILEČEK. Capabilities of Investment Casting Technology, Livarski Vestnik, Vol.54, 4/2006, pp. 175 - 186. ISSN 0024-5135.

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá nalezením nejlepšího způsobu ochlazování skořepinové formy v průběhu tuhnutí taveniny za účelem dosažení požadovaných hodnot mechanických vlastností. V průběhu experimentu bylo prováděno ochlazování několika způsoby. Ofukování skořepiny stlačeným vzduchem, zanořování do vodní lázně a do roztoků kalících polymerů různými rychlostmi. Nejvhodnější metodou dosahující nejvyšších mechanických hodnot byla vybrána metoda rychlého zanoření skořepinové formy do roztoku kalícího polymeru o určité koncentraci. Požadovaných mechanických hodnot bylo dosaženo.

Klíčová slova

přesné lití, řízená krystalizace, mechanické vlastnosti, sekundární osy dendritů, slitina AlSi7Mg0,6

ABSTRACT

This master's thesis deals with finding the best way to cool a ceramic shell mould during solidification of the melt to achieve the required values of mechanical properties. During the experimental part we tried different cooling methods. This involved blowing the shell with compressed air, submerge in water and wetting in a quenching polymer solutions at different speeds. The best way reaching the highest values of mechanical properties was chosen the method of rapid submerge of the shell mould in a solution of quenching polymer of a specific concentration. The mechanical properties have been achieved.

Key words

investment casting, controlled solidification, mechanical properties, secondary dendrite arm spacing, AlSi7Mg0,6 alloy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLČAPEK, Jiří. *Analýza závislosti různého způsobu ochlazování Al odlitků na mechanické vlastnosti, mikroskopickou strukturu a vzdálenosti sekundárních os dendritů, DAS* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140669>. 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 Analýza závislosti různého způsobu ochlazování Al odlišků na mechanické vlastnosti, mikroskopickou strukturu a vzdálenosti sekundárních os dendritů, DAS vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Jiří Holčapek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Děkuji doc. RNDr. Bohumilu Marošovi, CSc. za pomoc při statistickém vyhodnocení dat. Chtěl bych také poděkovat své rodině za podporu během studia a při psaní diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě MESIT machinery, a.s., odštěpný závod foundry, za možnost uskutečnění praktické části diplomové práce. Stejně tak poděkování patří místním technologům i všem technickým pracovníkům, kteří se na realizaci podíleli.

OBSAH

ÚVOD	8
1 TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 Představení firmy MESIT machinery, a.s., odštěpný závod foundry.....	9
1.2 Technologie vytavitelného voskového modelu	10
1.2.1 Výroba voskového modelu	10
1.2.2 Výroba skořepiny	10
1.2.3 Tavení a odlévání.....	14
1.2.4 Způsoby zjemnění zrna.....	18
1.2.5 Dokončující operace	19
1.2.6 Tepelné zpracování.....	20
1.2.7 Kontrola	22
1.3 Slévárenské slitiny hliníku	24
1.3.1 Siluminy.....	24
1.3.2 Duralaluminium.....	26
1.3.3 Hydronalium.....	27
1.4 Krystalizace siluminů	28
1.4.1 Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$	28
1.4.2 Krystalizace eutektika.....	30
1.5 Vyhodnocení SDAS	32
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
2.1 Experimentální slitina AlSi7Mg0,6.....	34
2.2 Experimentální zařízení použítá při experimentu.....	36
2.2.1 Vstřikolis	36
2.2.2 Obalovací linka.....	36
2.2.3 Bojlerkláv	37
2.2.4 Žíhací pece.....	37
2.2.5 Tavicí pece.....	37
2.2.6 Dokončující operace	38
2.2.7 Pec na tepelné zpracování.....	39
2.2.8 Kontrola konečných odlitků a jejich oprava.....	39
2.3 Specifikace zkušebního odlitku.....	40
2.4 Metodiky zkoušení odlitých vzorků	42
2.5 Způsoby ochlazování.....	45
2.5.1 Ofukování stlačeným vzduchem	47
2.5.2 Zanoření do vody.....	50
2.5.3 Ochlazování do kalícího polymeru.....	51
2.5.4 Řízené naplynění taveniny.....	61
2.6 Shrnutí	64
ZÁVĚR.....	66
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [34].....	67
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	69
SEZNAM PŘÍLOH.....	70

ÚVOD

Technologie přesného lití na vytavitelný model je jednou z nejstarších metod výroby odlitků na světě. V současné době je metoda považována za vysoce přesnou, moderní, inovativní a perspektivní technologii. Odlitky jsou odlévány téměř na hotovo tzv. („near net shape“), kdy po odlití nejsou vyžadovány dokončující operace. Metoda je určena pro tvarově náročné odlity s malými tloušťkami stěn s vysokou rozměrovou přesností za dodržení vysoké vnitřní homogenity materiálu. Tyto vlastnosti jsou vyžadovány především v leteckém a kosmickém průmyslu. Dále odlitky zhotovené touto metodou nacházejí uplatnění v průmyslu automobilovém a zbrojařském. Výhody lehkých a tvarově složitých odlitků jsou využívány i ve zdravotnictví a dopravě.

Díky čím dál vyšším požadavkům na tvarovou složitost odlitků, a díky pokroku a vývoji nových možností výroby, jsou v technologii uplatňovány moderní metody rapid prototyping, neboli metody rychlého prototypování. Kdy cesta od návrhu a konstrukce 3D modelu k finálnímu odlitku prototypu trvá i méně než týden.

Požadavky se nevztahují jen na složitější tvary odlitků, ale také na výsledné hodnoty mechanických vlastností. Vyšší mechanické hodnoty jsou vyžadovány kvůli úspoře materiálu a tím i úspoře energií při dopravě. Jednou z možností zvýšení mechanických vlastností je jemnozrnější struktura, které lze dosáhnout rychlejším ochlazováním.

Tato diplomová práce se zabývá zvýšením mechanických vlastností pomocí usměrněného tuhnutí taveniny. Tzn. v okamžiku od odlití formy po ztuhnutí kovu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části bude uveden princip technologie vytavitelného modelu. Dále bude pojednáno o slévarenských slitinách a o krystalizaci nejdůležitějších hliníkových slévarenských slitin siluminech. Diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou MESIT machinery, a.s., odštěpný závod foundry (dále jen slévárna MESIT). Na začátku bude v krátkosti představena.

1.1 Představení firmy MESIT machinery, a.s., odštěpný závod foundry

Společnost byla založena v roce 1993 a její název byl Fimes, a.s. Od 1.1.2016 byla přejmenována na MESIT foundry, a.s a stala se dceřinou firmou společnosti MESIT holding. K 1.1.2022 vznikla spojením tří společností divize Machinery, do které spadají odštěpné závody machining, foundry a galvanica. [1;2]

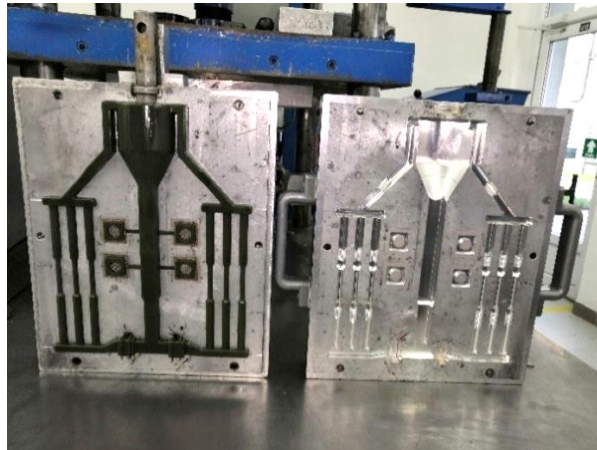
Slévárna se zabývá výrobou technologicky náročných tenkostěnných přesných odlitků z hliníkových slitin, dále přesných odlitků z barevných kovů, dříve i z ocelí různých jakostí. Výroba je zaměřena na technologii přesného lití pomocí vytavitelného voskového modelu. Díky systému kvality, který je certifikován pro letecký průmysl, typ certifikace AS9100D, jsou odlitky dodávány pro dodavatele největších světových výrobců letadel. Mezi další zákazníky patří výrobci elektrotechniky, dopravní a zdravotnické techniky a optiky. [1;2]

1.2 Technologie vytavitelného voskového modelu

Technologie přesného lití pomocí vytavitelného voskového modelu je jednou z nejstarších technologií lití kovů do forem. Jedná se o jednu z nejpřesnějších technologií současnosti. Technologií je dosahováno mnohem vyšších přesností v porovnání s konvenčními metodami. Vhodnost technologie spočívá v možnosti různé sériovosti. Díky metodám RP neboli rapid prototyping, lze vyrábět prototypové odlitky v řádech jednotek až desítek kusů. Při výrobě matečné formy se jedná o desítky, stovky i tisíce kusů. Odlitky jsou často tvarově složité a tenkostěnné s vysokými požadavky na vnitřní homogenitu. Konkurenceschopnost takových odlitků je postavena na tvarové složitosti a konečné kvalitě, které by nešlo jinými metodami dosáhnout. Princip technologie jsou popsány v následujících podkapitolách:

1.2.1 Výroba voskového modelu

Celý proces začíná výrobou voskového modelu na vstříkolisu, kdy je do matečné formy vstříknut modelový vosk. Matečná forma je nejčastěji vyráběna obráběním na obráběcích CNC strojích z duralových bloků. Před plněním je forma opatřena separačním přípravkem. Po složení a zajištění formy proti otevření je forma naplněna voskovou směsí. Po ztuhnutí vosku je forma rozebrána, očištěna a složena pro další plnění. Model je vytažen a přesunut na další pracoviště.



Obr. 1 Matečná forma s modelem ve vstříkolisu

Na obr. 1 je znázorněna rozložená matečná forma s odstříknutým modelem a vtokovou soustavou.

V případě drobných modelů se ručně sestaví tzv. stromeček, který je tvořen licím kulem, na který se ručně přilepují voskové modely. V případě, kdy se odlévá pouze jeden rozměrnější odlitek, se stromeček nesestavuje, pouze se připojuje vtoková soustava k modelu. Další možností je výroba modelu společně se vtokovou soustavou jako je na obr. 1.

1.2.2 Výroba skořepiny

Výroba vysoce jakostních, tenkostěnných hliníkových odlitků litých metodou vytavitelného modelu s sebou přináší vysoké nároky kladené na technologii celého procesu, v níž hraje skořepinová forma velmi významnou roli. Pokud nejsou použity vhodné materiály a není dodržen správný postup výroby, nelze vyrobit jakostní formu. [3]

Keramická skořepina se postupným nabalováním jednotlivých vrstev zhotoví kolem celého voskového modelu. Princip obalování spočívá v opakovaném namáčení voskového stromečku do keramické suspenze, sestávající z pojiva a plniva, a v následném posypání žárovzdorným materiálem o vhodné zrnitosti. Po každém nanesení příslušné vrstvy následuje sušení. Technologii lze rozdělit do několika základních operací: [4]

- Ponoření do keramické suspenze

Keramická suspenze udává základní vlastnosti keramických skořepin. Skládá se z plniva požadované velikosti suspendovaného v kapalném pojivu na bázi vody a dalších tekutých komponent, jako je polymer, smáčedlo a odpěňovač. [5]

- Posyp modelů zrnitým keramickým materiálem

Po vyjmutí voskového stromečku z obalové hmoty a odkapání následuje posyp žárovzdorným materiálem vhodné zrnitosti. Na první tři lícni obaly, které rozhodují o jakosti povrchu odlitku, se používá jemný materiál o zrnitosti 0,175-0,25 mm, na další, tzv. zpevňovací obaly pak hrubší 0,25-0,5 mm z důvodu lepší prodyšnosti. [5]

- Sušení keramických skořepin

Po nanesení keramické suspenze a posypání žárovzdorným materiálem následuje sušení. Tuhnutí jednotlivých obalů, z nichž se skořepina skládá, probíhá buď odpařením těkavých látek z obalové hmoty (přeměna solu v gel), nebo působením chemického činidla. [4]

- Vytavování voskové hmoty ze skořepiny

Aby bylo možné do skořepinové formy odlévat, je nutné odstranit veškerý vosk uvnitř skořepinové formy, tzn. voskový model i vtokovou soustavu, což se provádí v tlakové nádobě za působení teploty a tlaku páry. Cílem této operace je odstranit veškerý vosk z keramické skořepiny bez jejího poškození. [4]

- Žihání keramických skořepin

Žihání slouží k převodu amorfni formy vazné vrstvičky SiO_2 na formu krystalickou za současného odstranění zbylých těkavých látek, jako je voda a vosk. Pro zajištění požadovaných mechanických vlastností musí pracovní teploty dosahovat více než 800 °C, většinou se pohybují od 900 do 1100 °C dle charakteru použitých pecí a vlastností skořepin. [5]

Teplota žihání keramických skořepin pro slitiny hliníku mnohdy nedosahuje minimální požadované teploty zajišťující dostatečné mechanické vlastnosti. Při tak nízkých teplotách ještě nedošlo ke slinování a nejsou ukončeny všechny probíhající reakce. Důsledkem toho je nízká pevnost skořepin, která je zpravidla nižší než před samotným žiháním. Proto je třeba volit takový materiál, který je schopen zajistit dostatečnou pevnost skořepin jak pro vytavování, tak pro lití. [6]

Pro obalování a posyp modelů je ve slévárně MESIT využívána robotická linka. Proces obalování robotem je na obr. 2 a proces posypu keramickým materiálem na obr. 3.



Obr. 2 Robot se stromečky a kád' s břečkou



Obr. 3 Robot se stromečky v bubnovém sypači

Výhodou robotického obalování je značná úspora času a pracovní síly. Mezi každým naneseným obalem je nutné dokonalé vysušení nanesené vrstvy. Sušení je uskutečňováno v klimatizované místnosti, ve které je konstantní teplota a vlhkost.

Postupné nanášení vrstev dalo mimochodem vzniknout anglickému názvu investment casting. Tento název je používán v anglicky mluvících zemích pro technologii přesného lití na vytavitelný model. Slovem „to invest“ se míní nanášení vrstev. Další název pro tuto technologii je lost wax neboli ztracený vosk. [4]

Vytavování vosku ze skořepiny je poměrně složitý proces, kdy musí dojít k tzv. tepelnému šoku. Tepelný šok neboli rychlá změna teplot v systému skořepina – vosk využívá rozdílné roztažnosti v tomto systému. Vrstva vosku v těsné blízkosti skořepiny je vlivem teploty a tlaku páry natavena takovou rychlostí, že prakticky nestačí dojít k objemové změně vosku. Vosk začne vytékat ze skořepiny a vzniklá mezera zabraňuje praskání skořepiny v důsledku rozdílné tepelné roztažnosti vosku a keramiky.

Tepelného šoku lze dosáhnout několika způsoby. Nejčastější a nejpoužívanější způsob je za pomoci přehřáté páry, která je výborným tepelným médiem způsobující rychlý přenos tepla. Zařízení s přehřátou párou je označováno jako tzv. „bojlerkláv a autokláv“. Další možností je mikrovlnný ohřev nebo metoda tzv. „flesh fire“, kdy je skořepina vložena do žhací pece s vysokou teplotou. U této metody dochází ke značné ztrátě vosku.

Rozdíl mezi autoklávem a bojlerklávem je následující. Bojlerkláv je složen z tlakové nádoby určené pro umístění odlitků a prostoru s přehřátou vodou pod vysokým tlakem tzv. vyvíječem páry. Po uzavření dveří bojlerklávu dochází, pomocí otevření ventilů, k zaplnění prostoru se skořepinami přehřátou párou o tlaku 10 barů a teplotě 165–180 °C. Autokláv obsahuje pouze pracovní prostor pro umístění odlitků. K zaplnění prostoru párou dochází pomocí externího vyvíječe páry. V moderních slévárnách je upřednostňován bojlerkláv.



Obr. 4 Bojlerkláv se skořepinami

Na obr.4 je znázorněn bojlerkláv naplněný skořepinami určenými k vytavení. Doba vytavování záleží na velikosti a tloušťce voskového modelu, pohybuje se v řádu 10-20 minut.

V průběhu technologie přesného lití dochází k částečnému znehodnocení použité voskové směsi (směs ztrácí své potřebné technologické vlastnosti). Takto znehodnocená vosková směs může být použita znovu, jen pokud projde procesem recyklace. Recyklací dochází k úplné nebo částečné obnově technologických vlastností, úspoře financí a zároveň k menšímu poškozování životního prostředí [7]. [8]

Recyklaci modelových voskových směsí dělíme na:

- Regeneraci – jednoduchý proces recyklace, kterým vzniká pouze vosk vhodný na výrobu vtoků.
- Rekonstituci – pokročilý proces recyklace, kterým vzniká vosk vhodný i na výrobu modelů. Vosk je čištěn a důkladně filtrován. Následně jsou přidány nové složky, které

zaručují původní požadované vlastnosti. Rozměrová přesnost modelů z rekonstituovaného a panenského vosku je téměř totožná. [8]

Před samotným keramickým žíháním skořepin je do licího kůlu vložen keramický filtr pro zachycování nečistot a oxidických blan z taveniny během odlévání. Poté jsou skořepiny umístěny do žíhacích pecí, jako je znázorněno na obr. 5.

Z důvodu nízké hustoty hliníkových slitin a z toho plynoucí nízký metalostatický tlak na dno formy není ve slévárnách hliníkových odlitků vyžadována sintrace keramické skořepiny. Dostačující pevnosti je dosaženo při zahřátí formy na teplotu 680 °C. Při této teplotě je odléván kov do skořepiny.



Obr. 5 Keramické formy v žíhací peci

1.2.3 Tavení a odlévání

Tavení slitin se uskutečňuje v indukčních nebo odporových pecích. V případě hliníkových slitin je možné použít pouze odporové pece. Je to z důvodu míchání taveniny v indukčních pecích vlivem indukčních proudů. Indukčního míchání je běžně a s výhodou využíváno u tavení ocelí nebo barevných kovů kromě hliníku. Míchání přispívá k tepelné a chemické homogenizaci taveniny. U hliníkových slitin však na povrchu taveniny dochází k okamžité oxidaci a vlivem míchání by docházelo ke strhávání oxidických blan do taveniny, což by vedlo k jejímu znehodnocení. Z těchto důvodů se pro tavení hliníkových slitin používají nejčastěji elektrické odporové pece nebo pece plynové.

Tavení začíná vyčištěním tavícího kelímku a vložením vsázky složené z vratu a nového materiálu. Po roztavení vsázky je změřena teplota. Pro kvalitní odlitky je nutná kvalitně připravená a chemicky upravená tavenina. Před odlitím jsou nezbytné následující kroky:

1. Rafinace:

Rafinací se rozumí pojem čištění taveniny, při kterém je snižováno množství vměstků. Vměstky mohou být kovové a nekovové. Mezi kovové vměstky patří nedokonale rozpuštěné legující prvky, předslitiny nebo intermetalické fáze, které v tavenině existují nebo se zde tvoří. Mezi nekovové vměstky jsou řazeny oxidy, nejčastěji oxid hlinitý Al_2O_3 , který vzniká okamžitě při kontaktu čistého povrchu roztaveného hliníku s okolní atmosférou. Dále nitridy (AlN , Mg_3N_2 , TiN a jiné), karbidy (Al_4C_3 , TiC , ZrC) a boridy (AlB_2 , TiB_2 , ZrB_2). [9; 10]

Rafinace se provádí několika způsoby:

- I. Odstátí taveniny, jehož principem je vyplouvání vměstků na hladinu taveniny. Vzhledem k podobným hustotám je tento proces zdlouhavý a neefektivní.
- II. Vynášení vměstků plynovými bublinami, k tomuto způsobu dochází při odplynění taveniny.
- III. Chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí, kdy krycí soli brání vzniku nových vměstků tím, že zabraňují kontaktu taveniny a okolní atmosféry. Účelem rafinačních solí je odstranění oxidických vměstků z taveniny a snížení ztrát kovového hliníku. Cílem rafinace je rozrušení oxidických obálek a uvolnění nezreagovaného kovu do lázně. U krycích a rafinačních solí se z chemického hlediska jedná především o chloridy a fluoridy alkalických kovů.
- IV. Filtrace, jedná se o účinný způsob zachycování vměstků. Používají se především ploché tkaninové filtry, které jsou vidět na obr. 1, dále kovová sítká, jejichž používáním a následným přetavováním se v tavenině zvyšuje nežádoucí obsah železa, nebo keramické filtry ať už pěnové, lisované nebo extrudované. [10]

Většinou jsou ve slévárnách využívány všechny způsoby rafinace. K samotné rafinaci dochází po prvním stažení hladiny, na kterou tavič nasype odměřené množství rafinační soli, která je dokonale vysušena. Sůl je zanořena do taveniny pomocí děrovaného zvonu až na dno kelímku. Reakci soli a taveniny je možné pozorovat vznikem bublin na hladině taveniny. Nečistoty vyplavené na hladinu jsou z hladiny průběžně stahovány. [11]

Důvod suché vsázky, solí a pracovního nářadí je zřejmý. Do taveniny se nesmí dostat žádná vlhkost nebo voda, aby nedocházelo ke zvýšenému obsahu rozpuštěného vodíku v tavenině, který je nežádoucí. Dále vlhkost vnesená do lázně může způsobit vystříknutí kovu.

2. Modifikace:

Modifikace je proces spočívající ve změně růstové jednotky eutektického křemíku z destičky na tyčinku. Plně modifikovaná struktura musí obsahovat 0,005-0,01 % sodíku. Kontrola modifikace se provádí na základě chemického rozboru nebo pomocí termické analýzy. [11]

Prvky s modifikačním účinkem na slévárenské slitiny Al-Si jsou pouze sodík nebo stroncium. Modifikací se mírně zvyšují pevnostní vlastnosti, ale velmi výrazně se zvyšují vlastnosti plastické, a to tažnost a houževnatost. [10]

Při modifikaci je položena modifikační tableta na vyčištěnou hladinu taveniny a zanořena děrovaným zvonem. Po ukončení modifikace se hladina opět stáhne od vzniklých nečistot. [11]

3. Odplynění taveniny

Odplyňování je metalurgický proces, jehož cílem je snížení obsahu vodíku na takovou úroveň, kdy nedochází k vyloučení bublin. Přípustný obsah vodíku je závislý na technologii odlévání, tloušťkách stěn a použití odlitku. Obecně platí, že při pomalejším tuhnutí je vyšší sklon ke vzniku bublin a tím musí být tavenina lépe odplyněna.

Pro odplynění se používají dva principy. Vakuování taveniny a probublávání taveniny aktivními nebo neaktivními plyny.

Princip vakuování taveniny je založen na snižování tlaku atmosféry nad hladinou kovu. Snižováním parciálního tlaku p_{H_2} je podle Sievertsova zákona snížena rozpustnost vodíku v tavenině. Tavenina se stává přesyceným roztokem a vodík z ní odchází ve formě bublin.

Probublávání taveniny plynem je založeno na principu difuze vodíku do bublin s nulovým parciálním tlakem vodíku, s nimiž je vynášen na hladinu nebo s nimi reaguje. Zda vodík s plyny reaguje nebo nereaguje se označuje odplynování aktivními nebo neaktivními plyny.

Aktivními plyny jsou označovány takové plyny, které reagují s vodíkem. Jedná se o chlor a fluor. Chlor reaguje s tekutým hliníkem za vzniku chloridu hlinitého, který je při teplotě rozpuštěného kovu plynný. Vodík se pomocí difuze dostává do bublin chloridu hlinitého, kde reaguje za vzniku chlorovodíku. Ten odchází ve formě bublin z taveniny do okolní atmosféry. A hliníku, který se vrací zpět do taveniny. Chlorid hlinitý dále reaguje i s jinými prvky v tavenině a způsobuje jejich úbytek. Jedná se o prvky Na, Sr, Li, Mg, Ca. Obsah hořčíku v tavenině a modifikační účinek je aktivními plyny velmi negativně ovlivňován.

Chlor je jedovatý a korozní plyn, z tohoto důvodu je jeho používání omezováno. Použití plynů a solí s fluorem je ve většině zemí zakázáno z důvodu jeho toxicity.

Jako inertní, neutrální plyny pro odplynění slitin hliníku je využíván argon a dusík. V praxi se využívají plyny o vysoké čistotě, s označením 4.9 nebo 5.0. Plyny jsou vháněny u dna pánve tak, aby se tvořily co nejmenší bubliny. Bubliny mají zpočátku nulový parciální tlak vodíku, a tak do nich vodík difunduje. Bubliny vyplouvají na hladinu. Intenzita odplynění závisí na velikosti styčné plochy obou medií a na čase, po který bubliny vyplouvají. Malá velikost bublin, dlouhá dráha vyplouvání a dobré promíchávání taveniny jsou klíčovými podmínkami účinného odplynění. [10]

Ve slévárně MESIT se tavenina odplyňuje pomocí probublávání inertním plynem. Konkrétně se jedná o vysoce čistý dusík s označením 5.0. Probublávání se provádí pomocí přístroje OZAL 001, které je zobrazeno na obr. 6. Vždy se používají dva odplynovací cykly, při tavně delší než 40 minut je přidáno ještě jedno odplynění. [11]



Obr. 6 Přístroj OZAL 001 na odplynění taveniny

4. Očkování

Očkování je proces, kterým se ovlivňuje stav krystalizačních zárodků a jeho důsledkem je zjemnění struktury. Očkování je zvláště účinné u slitin s obsahem křemíku 5-7 %. Zjemnění tuhého roztoku α je dosahováno přidáním prvků Ti a B, které jsou do taveniny přidávány jednotlivě nebo dohromady. Tyto prvky jsou do taveniny vnášeny pomocí očkovacích solí, očkovacích tablet nebo ve formě předslitin. [9; 10]

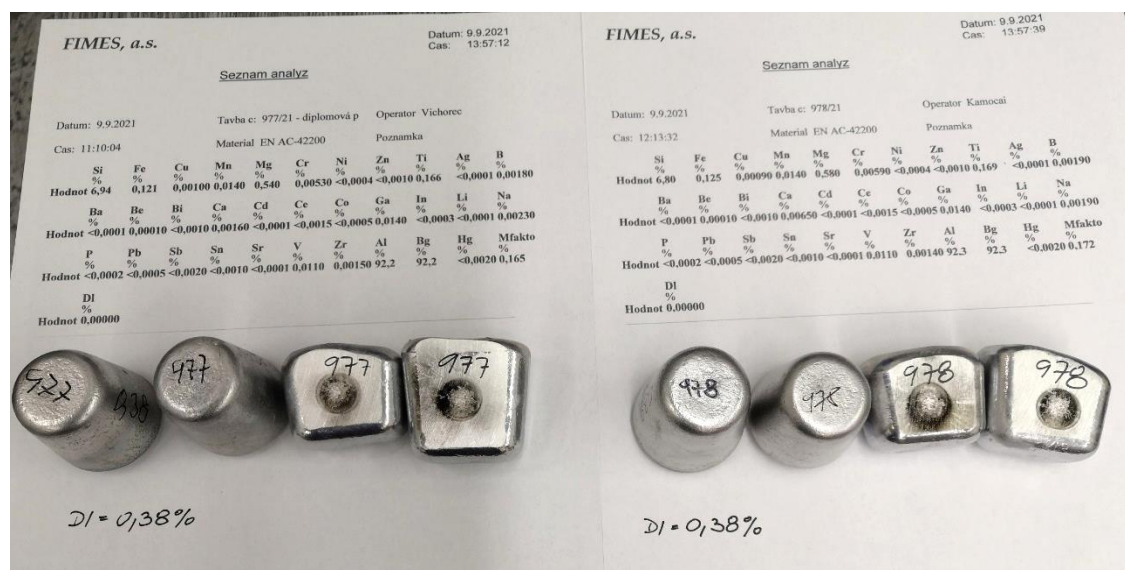
Ve slévárně MESIT se očkování provádí pomocí předslitiny AlTi5B1 ve formě drátu. Množství očkovacích tyčí je závislé na druhu slitiny. [11]

5. Chemický rozbor a DICHTÉ INDEX

Po ukončení tavby je z taveniny odebrán vzorek k chemickému rozboru. Vyhodnocení je prováděno na emisním spektrometru. Odchyly chemického složení jsou upraveny pomocí přísadových prvků ve formě předslitin. Nejčastěji je upravován obsah hořčíku, který je ještě reaktivnější než hliník, a proto dochází k jeho propalu.

Naplynění se stanovuje tzv. metodou dvojího vážení. Principem metody je porovnání hustoty vzorku slitiny, který ztuhl při atmosférickém tlaku se vzorkem, který ztuhl za podtlaku. Z hustot vzorků je určen tzv. index hustoty, z německého dichte index označovaný jako DI. [10]

Vzorky po chemické analýze a po měření naplynění jsou na obr. 7.



Obr. 7 Vzorky s výsledky chemické analýzy a naplynění

6. Odstátí, stažení strusky a doladění licí teploty

Během vyhodnocení DI a chemického rozboru dochází k odstátí taveniny, maximálně však 15 minut z důvodu odeznívacího účinku modifikačního přípravku. Modifikační účinek je totiž kratší než u stroncia. Následně jsou staženy zbytky strusky. Následuje ověření teploty taveniny pomocí vpichového teploměru a případně je její hodnota upravena. [11]

7. Lití

Po provedení předchozích kroků je na řadě samotné odlití formy tekutým kovem. Existuje několik způsobů odlévání skořepin. Nejčastěji se jedná o ruční, gravitační lití jako je znázorněno na obr. 8. Další možností je sklopné lití, kdy je forma pevně spojena s pecí a dojde k otočení o 180°. Skořepiny je možné odlévat též za využití vakua, tento

proces je využíván u odlitků ze superslitin na bázi Ni a Ti. Poslední možností je vakuové nasávání taveniny do skořepiny.

Běžně je při odlévání používána ruční licí pánev vyrobená z oceli. Pánev je opatřena nátěrem, který zabraňuje rozpouštění železa do slitiny, které má negativní vliv na mechanické vlastnosti. Ve struktuře vytváří železo intermetalické fáze ve tvaru jehlic, které způsobují pokles mechanických vlastností.



Obr. 8 Odlévání formy na licím poli

Po odlití skořepiny je tavenina přirozeně ochlazována a následně tuhne. Vnější zásahem, pomocí určitého způsobu ochlazování, lze dosáhnout rychlejšího odvodu tepla. O velikosti zrn budoucího odlitku je rozhodováno během tuhnutí taveniny. Rychlejšším odvodem tepla je dosahováno jemnějších zrn ve struktuře a tím i vyšších mechanických vlastností.

1.2.4 Způsoby zjemnění zrna

V moderních slévárnách je požadavek na jemnozrnnou strukturu u vysoce jakostních odlitků. Způsobů zjemnění zrna je hned několik. Nejběžnějším způsobem je očkování taveniny očkovacími přípravky, kdy dochází ke zvýšení počtu vhodných krystalizačních zárodků, jak bylo popsáno výše.

Další možností, zejména u niklových superslitin, je opatření lící části skořepiny přípravkem na bázi kobaltu. Jedná se buď o oxidy nebo hlinitany tohoto kovu. Tyto částice fungují jako krystalizační zárodky. U objemnějších odlitků ze superslitin na bázi niklu je využíváno metody Grainex. Do vyžíhané skořepiny je odlita tavenina a forma je uvedena do rotačního pohybu. Po určité době je otáčení reverzováno. Tím dochází k odlamování rostoucích dendritů pomocí opačně rotující taveniny. Dochází k tzv. multiplikaci dendritů a tím ke zjemnění zrna. Multiplikace dendritů lze dosáhnout i cestou přirozené konvekce taveniny. K tomuto jevu dochází díky konvenčním proudům vzniklých v tavenině, kvůli rozdílným teplotám taveniny v okolí tuhnoucí fronty a v objemu neztuhlé části odlitku. Multiplikace dendritů je způsobena vzniklým konvekčním proudem taveniny. Tyto metody nejsou vhodné pro hliníkové odlitky z důvodu tenkých stěn odlitků a endogenního tuhnutí odlitků. Konvekčního proudění není

dosaženo kvůli tuhnutí taveniny v celém objemu. Jednou z možností, jak u hliníkových slitin ovlivnit velikost zrn je ochlazování taveniny v průběhu tuhnutí.

Ochlazováním taveniny ve skořepině v průběhu tuhnutí je dosahováno struktury s vyššími mechanickými vlastnostmi. To je způsobeno jemnějšími zrny ve struktuře. Při rychlejším ochlazování dochází k aktivaci méně aktivních krystalizačních zárodků, které se dále vyvíjejí. Cílem diplomové práce je dosažení co nejvyšších mechanických vlastností za pomoci různých způsobů ochlazování.

Řízenou krystalizací ve smyslu jemnozrnější struktury se ve světě zabývá několik firem. Jedná se o společnosti dodávající odlitky náročným zákazníkům zejména v leteckém průmyslu.

Řízenou krystalizací se jako první začala zabývat firma TITAL. Svou technologii si nechala patentovat pod názvem HERO Premium Casting. Firma TITAL byla certifikována firmou Airbus jako jediná, zabývající se metodou přesného lití, pro odlévání leteckých součástek s licím faktorem (CF) 1.0. [12]

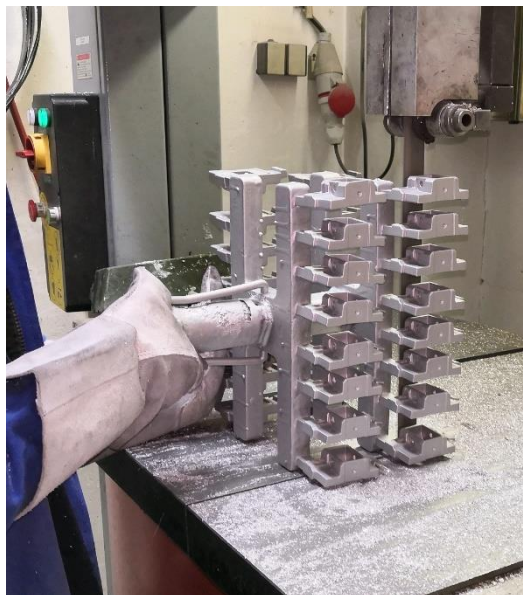
Další technologii pro řízenou krystalizaci vyvinula firma Zollern pod názvem Sophia. Obě technologie detailněji popisuje bakalářská práce od Petra Blažíka. [13]

Z tuzemských firem se o řízenou krystalizaci a jejím vlastním vývojem zabývá firma ALUCAST s označením licího procesu ANNA. Další metoda pro ovlivnění tuhnutí odlitků je patentována pod názvem JF casting. [14]

1.2.5 Dokončující operace

Po odlití, ztuhnutí a vychladnutí odlitku je na řadě odstranění keramické skořepiny z odlitku. K tomuto úkonu jsou využívána vibrační zařízení, která odstraní většinu skořepiny. Zbytky skořepiny jsou odstraňovány pomocí vysokotlakého vodního čističe. U tenkostěnných odlitků a odlitků náchylných na mechanické poškození je pro odstranění skořepiny využíván výhradně vysokotlaký čistič.

Následuje operace oddělení odlitků od vtokové soustavy, nejčastěji pomocí pásových a kotoučových pil. Dále jsou pomocí brusek začišťovány vtoky na odlitcích. Jedná se o ruční práci. Odřezávání odlitků pásovou pilou je na obr. 9.



Obr. 9 Odřezávání odlitků pásovou pilou

Po separaci jednotlivých odlitků dochází k jejich tryskání v tryskačích, které mohou být buď závěsné, jako na obr. 10, stolové, průběžné nebo bubnové. Tryskáním dochází k ucelení a sjednocení povrchu. Do odlitku je tryskáním vnášeno tlakové napětí, které uzavírá mikrotrhliny. Tryskáním dochází k odstranění drobných povrchových vad.



Obr. 10 Odlitky zavěšené v tryskači

1.2.6 Tepelné zpracování

Účelem tepelného zpracování hliníkových slitin je zejména zvýšení mechanických vlastností nebo snížení vnitřního pnutí. Většina hliníkových odlitků je používána v tepelně nezpracovaném stavu. Častěji je využíváno u odlitků litych do pískových nebo keramických forem, v nichž při tuhnutí vznikají hrubší zrna ve struktuře. U tlakově litych odlitků není tepelné zpracování využíváno z důvodu rychlého tuhnutí v kokile a tím vzniklé jemnozrné struktury. [10]

Nejčastějším způsobem TZ hliníkových odlitků je vytvrzování. Vytvrzováním je dosahováno vyšší meze pevnosti, smluvní meze kluzu a tvrdosti. Tažnost je obvykle nižší. Podle schopnosti slitiny k tomuto způsobu TZ jsou hliníkové slitiny děleny na vytvrzitelné a nevytvrzitelné. Podmínkou vytvrzování je obsah legujícího prvku s výraznou změnou jeho rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Tato změna rozpustnosti je základním předpokladem pro vznik přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Takovými prvky jsou zejména Mg a Cu. [9; 10]

Vytvrzování je složeno z následujících úkonů:

- **Rozpouštěcí žihání** je ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, teplotu nad křivkou změny rozpustnosti a výdrž na této teplotě. Během této doby jsou rozpuštěny intermetalické fáze obsahující vytvrzující prvky do tuhého roztoku. Zejména CuAl_2 nebo Mg_2Si .
- **Prudké ochlazení**, jehož cílem je zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku z přesyceného roztoku fáze $\alpha(\text{Al})$. Ochlazení probíhá kritickou nebo nadkritickou rychlostí. Kritická rychlost ochlazení je nejmenší rychlost ochlazení z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku. Z důvodu rychlého

ochlazování je jako chladicí medium používána studená voda. Doba mezi vyjmutím odlitků ze žíhací pece a ochlazením musí být co nejkratší. U tenkostěnných odlitků nemá překročit 10 s. Důležité je také rozmístění odlitků v koši pro rovnoměrné ochlazování. Tento proces je nesprávně označován jako kalení.

- **Precipitační vytvrzování** neboli **stárnutí**, je proces, při kterém dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Při stárnutí dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších tímto prvkem a v nich k nukleaci nové fáze. U slitin Al-Si-Mg je touto fází Mg_2Si , u slitin Al-Cu je to fáze Cu_2Al . Podle pohyblivosti atomů vytvrzujícího prvku je vytvrzování dosahováno buď za normální teploty, proces je označován jako přirozené stárnutí neboli vytvrzování za studena, nebo za zvýšených teplot označován jako umělé stárnutí neboli vytvrzování za tepla.

Vytvrzování za tepla je využíváno u slitin typu Al-Si-Mg nebo Al-Mg. Teploty vytvrzování jsou voleny podle slitiny. Obvyklé rozmezí teplot je 140-180 °C po dobu 3-8 hodin. Je nezbytné dodržovat prodlevy a teploty v úzkých mezích pro získání požadovaných vlastností. Průběh TZ při vytvrzování za tepla je znázorněn na obr 11. [10]



Obr. 11 Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla (orientační hodnoty)

Vytvrzování za studena je využíván u slitin typu Al-Zn-Mg, AlCu4 a také slitiny Al-Si-Cu s vysokým obsahem mědi. Vytvrzování při normální teplotě je dosaženo díky vysoké pohyblivosti některých prvků. Proces přirozeného stárnutí je pomalý, obvykle trvá 100-150 hod. [9; 10]

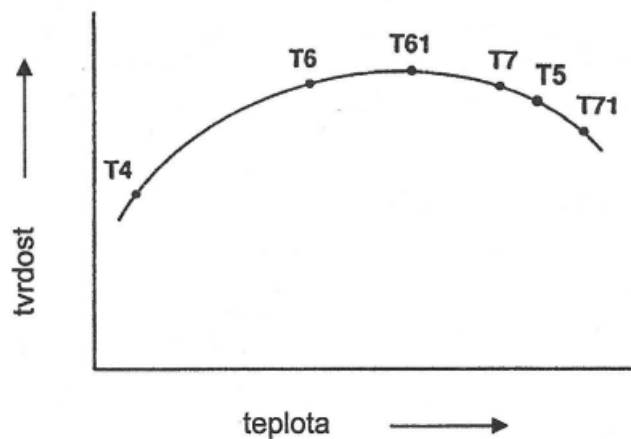
Nejběžnější způsoby tepelného zpracování hliníkových odlitků, jejich značení a význam:

- **F** – v litém stavu, meze mechanických vlastností se nespecifikují
- **O** – žíhání na odstranění vnitřních pnutí nebo stabilizační žíhání. Typické teploty do 340 °C po dobu 2-3 hod. Ochlazování na vzduchu.
- **T4** – rozpouštěcí žíhání a následné vytvrzení za studena
- **T5** – umělé stárnutí při relativně nízkých teplotách bez předchozího homogenizačního žíhání. Typické teploty v rozmezí 205-260 °C po dobu 7-10 hod.
- **T6** – vytvrzování – složeno z homogenizačního žíhání, prudkého ochlazení a precipitačního vytvrzení za tepla. Pro dosažení optimální pevnosti a houževnatosti. Typická teplota 145-160 °C po dobu 3-5 hod.
- **T7** – vytvrzování s přestárnutím. Tímto TZ je dosaženo stabilizace mechanických vlastností a rozměrů odlitku. Pevnost je nižší a houževnatost vyšší než při zpracování T6. Typická teplota 190-225 °C po dobu 4-6 hod.

Každé z TZ je dále složeno z několika podskupin podle preferovaných vlastností:

- **T61** – vytvrzování pro dosažení maximální pevnosti a tvrdosti.
- **T64** – vytvrzování na maximální houževnatost.
- **T71** – přestárnutí do stabilního stavu. Je dosažena ještě vyšší teplotní stabilita oproti T7. [9; 10]

Závislost tvrdosti slitiny na teplotě žíhání zobrazeno na obr. 12. [10]



Obr. 12 Závislost tvrdosti slitiny na teplotě žíhání při zpracování T4 až T71

1.2.7 Kontrola

U všech odlitků je stanovena bezpodmínečná vizuální kontrola. Dále jsou využívány nedestruktivní metody zkoušení jako jsou penetrační zkouška, ultrazvuk nebo rentgen. Princip penetrační zkoušky je založen na vztlínání penetračního přípravku z povrchových vad, jako jsou trhliny, praskliny a drobné bubliny nebo řediny do vývojky. U větších bublin bývá výsledek zkreslený. V penetrantu je obsažen fotoluminiscenční prášek. Po osvětlení UV světlem dochází ke zvýraznění vad. Penetrační zkouška je zobrazena na obr. 13.



Obr. 13 Odlitky na penetrační zkoušce pod UV světlem

Další nedestruktivní zkouška je zkouška ultrazvukem. Pomocí sondy je do zkoušeného odlitku vyslán signál. Podle vráceného signálu je stanovena zdravotnost odlitku. Ultrazvukem jsou odhalovány vnitřní vady jako jsou trhliny nebo dutiny.

U odlitků s vysokými požadavky na jakost a zdravotnost je prováděna rentgenová zkouška. Pomocí rentgenové zkoušky jsou zjišťovány vnitřní vady jako jsou mikroporozita, bubliny, staženiny, trhliny a jiné.

Zkouška rentgenem je prováděna dvojím způsobem:

- Radioskopie – prohlížení odlitku na monitoru.
- Radiografie – rentgenování odlitků na film a vytvoření fotografického snímku. [15]

Dále je prováděna kontrola klíčových rozměrů. Vlivem brzděného smršťování dochází u odlitků k rozměrové nepřesnosti. Pro dosažení předepsaných tolerancí odlitků jsou využívány kalibrační přípravky. Drobné povrchové vady jako např. bubliny mohou být, pokud nemají vliv na funkci odlitku, opraveny navařováním materiálu.

Pokud jsou splněny všechny kontrolované požadavky na odlitek tak je uvolněn k expedici.

1.3 Slévárenské slitiny hliníku

Vlastnosti čistého hliníku jsou pro konstrukční účely nevyhovující. Pro výrobu odlitků jsou výhradně používány jeho slitiny s jinými kovy. Přísadové prvky zvyšují mechanické vlastnosti (mez pevnosti, tažnost, tvrdost), zlepšují technologické vlastnosti (obrobitelnost, odolnost proti korozi, svařitelnost, lešitelnost, nepropustnost) a slévárenské vlastnosti (zabíhavost, sklon ke vzniku staženin, sklon k naplynění, odolnost proti vzniku trhlin a prasklin). Výsledné vlastnosti jsou dány množstvím a vzájemnou kombinací přísadových prvků. [10]

Hlavním přísadovým prvkem jsou určeny vlastnosti slitiny. Hlavní přísadový prvek spolu se základním (Al) vymezuje typ slitiny. Jeho obsah bývá obvykle druhý nejvyšší. Hlavními přísadovými prvky ve slévárenských slitinách jsou křemík, měď a hořčík. Výjimečně zinek nebo mangan. Podle nich se slitiny hliníku dělí na základní typy s obvyklými názvy

- Al-Si siluminy
- Al-Cu duralaluminium
- Al-Mg hydronalium

Siluminy jsou nejdůležitějším typem slévárenských slitin hliníku, představují velkou většinu produkce hliníkových odlitků. [10]

1.3.1 Siluminy

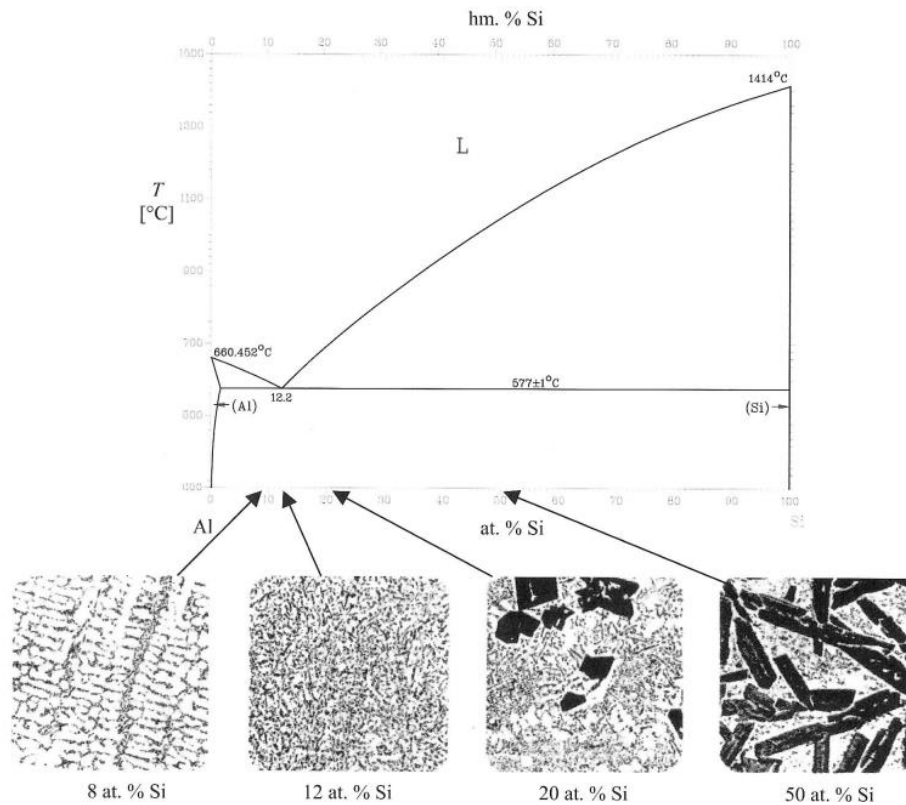
Průmyslový význam slitiny Al-Si je podmíněn jejich vysokou zabíhavostí, nízkým sklonem k tvorbě staženin při lití a možností svařování a pájení. Tuhé částice křemíku zvyšují odolnost proti otěru. Do siluminů mohou být přidávány taku měď nebo hořčík za účelem vytvrzování stárnutím. [9]

Křemík má v hliníku jen omezenou rozpustnost. Při eutektické teplotě je rozpustnost pouze 1,65 % Si a při poklesu teploty se dále snižuje. Ve slévárenských slitinách je obsah křemíku vždy vyšší, než je maximální rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$, proto vždy obsahují eutektikum $\alpha(\text{Al})$ -Si. Eutektická koncentrace křemíku je 12,5 % Si při eutektické teplotě 577 °C. [10]

Podle obsahu křemíku se siluminy dělí na:

- **Podutektické**
Jejich struktura je tvořena sítí primárních dendritů fáze $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem, které se vylučuje v mezidendritických prostorech. S rostoucím obsahem křemíku roste obsah eutektika. Obsah křemíku je vždy vyšší než 5 %, nejčastěji mezi 7 a 11 %.
- **Eutektické**
Obsahují přibližně 11,5 – 13 % Si. Struktura je tvořena pouze eutektikem. Někdy se však vyskytují i jednotlivé krystaly fáze $\alpha(\text{Al})$.
- **Nadeutektické**
Obsahují částice primárního křemíku uložené v eutektické matici. Obvyklý obsah křemíku je 14–17 %, výjimečně až 25 %. [10]

Fázový diagram Al-Si spolu s mikrostrukturami slitin s různým obsahem Si je na obr. 14. [9]



Obr. 14 Fázový diagram systému Al-Si s mikrostrukturami slitin s různým obsahem Si

Jako hlavní přísadový prvek bývá využíván křemík. Téměř všechny slévárenské technologické vlastnosti jsou lepší vzhledem k jeho rostoucímu obsahu. Slitiny s nižším obsahem křemíku je vhodné očkovat a slitiny s vysokým podílem eutektika modifikovat. Obě metody je možno vzájemně kombinovat.

S rostoucím obsahem křemíku se mění zejména následující vlastnosti:

- Zvyšuje se zabíhavost.
- Zmenšuje se součinitel stahování během uhnutí a sklon ke vzniku mikrostaženin.
- Snižuje se nebezpečí trhlin a prasklin.
- Pevnost a tažnost se s obsahem křemíku výrazně nemění.
- Zlepšují se kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru.
- Zmenšuje se tepelná roztažnost.
- Zvyšuje se korozní odolnost. [10]

1.3.2 Duralaluminium

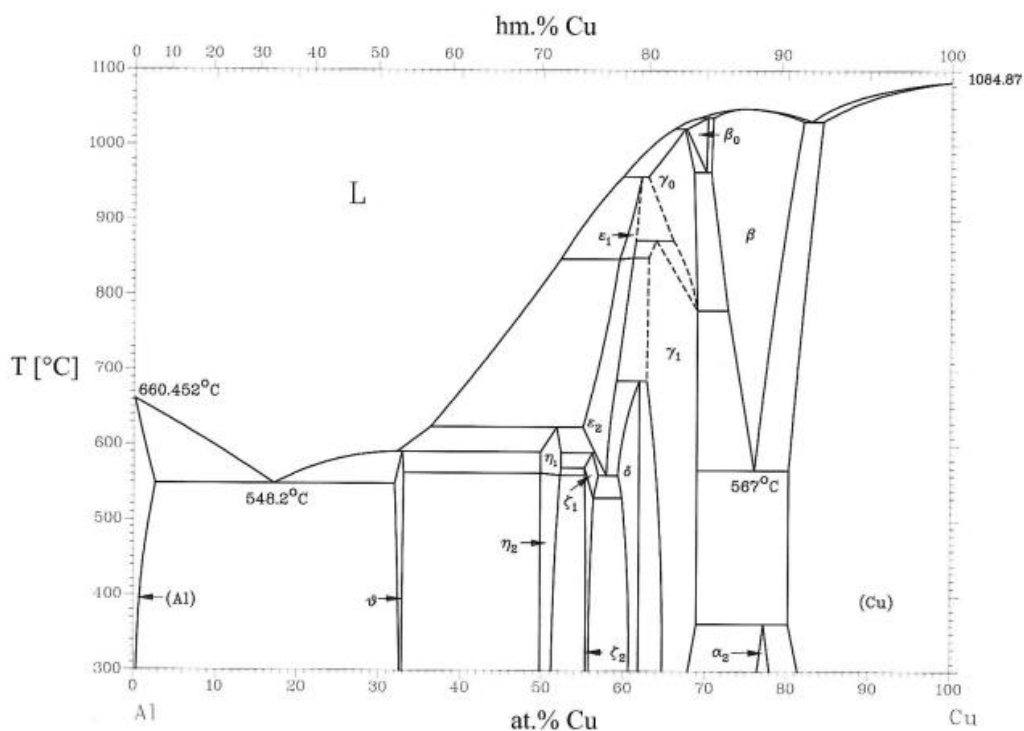
Patří mezi vysokopevnostní hliníkové slitiny. I přes vysoké pevnostní hodnoty, větší než 400 MPa, si udržují vysokou tažnost, až dvojnásobnou v porovnání se slitinami Al-Si.

Měď tvoří s hliníkem slitiny s omezenou rozpustností v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$ a s eutetikem, které je tvořeno fázemi $\alpha(\text{Al})$ a intermetalickou fází Al_2Cu označovanou jako fáze θ . Eutektická teplota je 548 °C, eutektická koncentrace 33,2 % Cu. Rozpustnost mědi při eutektické teplotě je maximálně 5,7 % a s klesající teplotou klesá. Snižující se rozpustnost Cu umožňuje provádět vytvrzování, které se provádí za tepla i za studena. Měď je považována za jeden z nejdůležitějších prvků v hliníkových slitinách díky zpevňujícímu účinku. [9; 10]

Slévárenské slitiny obsahují obvykle 4-5 % Cu. Slitiny s vyšším obsahem mědi nemají technický význam. Odličky z těchto slitin jsou vhodné pro použití i za zvýšených teplot až do 300 °C. [10; 16]

Slévárenské vlastnosti jsou velmi špatné. Díky širokému pásmu tuhnutí jsou slitiny obtížně nálitkovatelné. Pro zajištění vnitřní homogenity je nutné, aby tuhnutí bylo usměrněné s velkým teplotním gradientem. Slévárenské vlastnosti lze zlepšit přidávkem křemíku, který ovšem způsobuje snížení pevnostních vlastností. Kvůli špatným slévárenským vlastnostem je snaha omezit používání těchto slitin a nahradit je příznivějšími slitinami typu Al-Si. [10]

Značně složitější fázový diagram tvoří systém Al-Cu vyobrazený na obr. 15. Pro slévárenské potřeby je použitelná pouze levá část diagramu. [9]



Obr. 15 Fázový diagram systému Al-Cu

1.3.3 Hydronalium

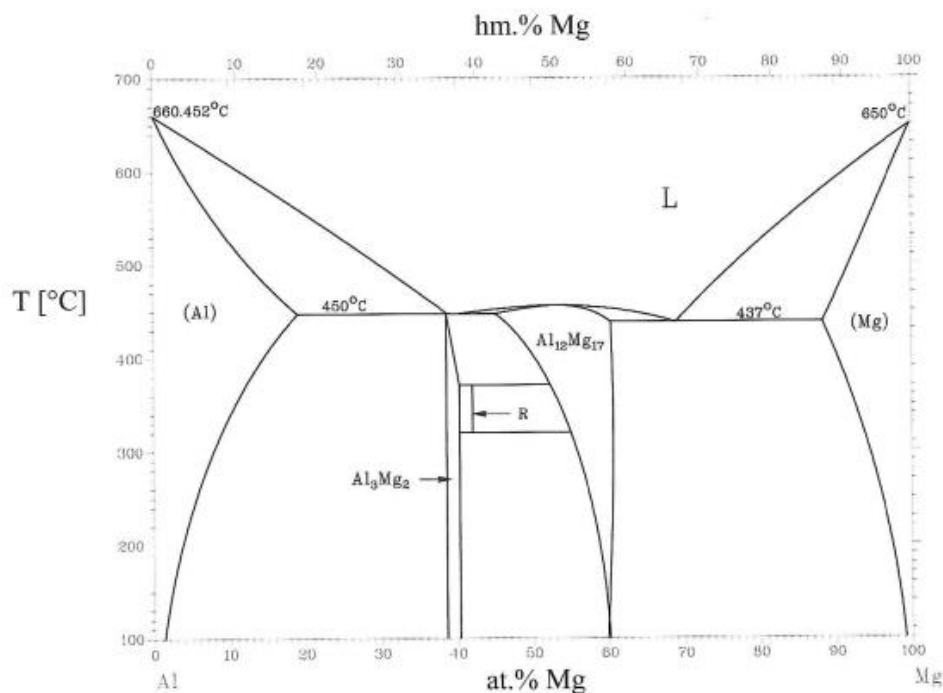
Hořčík tvoří s hliníkem slitiny s maximální rozpustností 17,4 % Mg při eutektické teplotě 450 °C. S klesající teplotou rozpustnost klesá. Eutektikum je tvořeno fázemi $\alpha(\text{Al})$ a Al_8Mg_5 , označované jako fáze β . Pokud je ve slitině obsažen křemík, váže se hořčík především do sloučeniny Mg_2Si . Ta se vylučuje jako intermetalická fáze, která umožňuje vytvrzování.

Podle obsahu hořčíku se se slévárenské slitiny Al-Mg dělí na typy se 3, 5 a 9 % Mg. S vyšším obsahem hořčíku se rozšiřuje dvoufázové pásmo tuhnutí, díky čemuž se horší slévárenské vlastnosti. Celkově jsou slévárenské vlastnosti u slitin Al-Mg hodnoceny jako špatné. Slitiny mají zhoršenou zabíhavost, sklon ke vzniku rozptýlených staženin a trhlin. Mají velký sklon k naplynění, z čehož plyne obtížná výroba nepropustných odlitků. S rostoucím obsahem hořčíku se též zvedá reaktivita slitiny vůči atmosféře i formě.

Mechanické vlastnosti jsou poměrně špatné. Pevnosti s rostoucím obsahem hořčíku rostou, ale i tak zůstávají pod hodnotou běžných siluminů. Při teplotách nad 100 °C se mechanické vlastnosti zhoršují. Tyto slitiny mají výbornou obrobitelnost a lešitelnost a jsou eloxovatelné.

Slitiny Al-Mg se používají především tam, kde je vyžadována vysoká odolnost proti korozi, zvláště v mírně alkalickém prostředí a proti mořské vodě. Obsah mědi a zinku ve slitině korozní odolnost snižuje. [10]

Fázový diagram systému Al-Mg znázorněn na obr. 16 [9]. Pro slévárenské slitiny hliníku se využívá pouze levá část diagramu. Většinou se nepoužívají slitiny s obsahem Mg vyšší než 10 %, výjimečně až 13 % Mg [17].

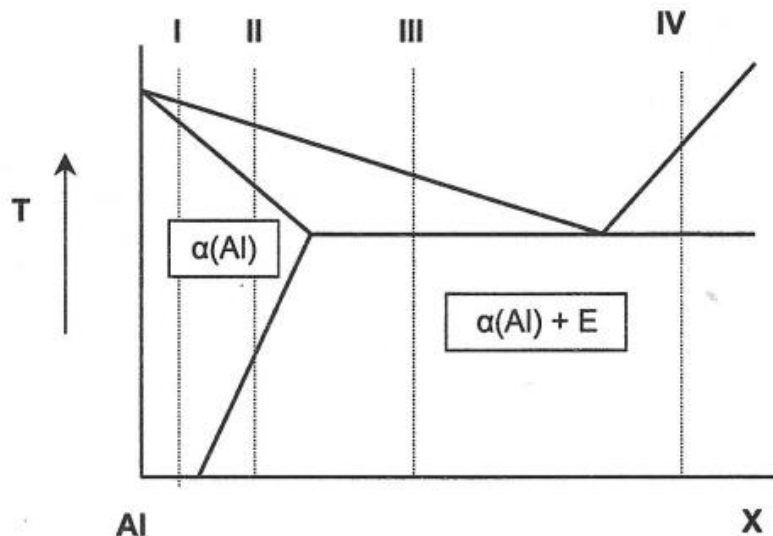


Obr. 16 Fázový diagram systému Al-Mg

1.4 Krystalizace siluminů

V oblasti obvyklých koncentrací tvoří hliník s přísadovými prvky podobné rovnovážné diagramy s omezenou rozpustností přísadového prvku v hliníku a se vznikem eutektika jako je na obr. 17. Ve slitinách hliníku bývají přítomny následující strukturní složky:

- **Homogenní tuhý roztok hliníku** označován jako $\alpha(\text{Al})$. Jde o substituční tuhý roztok, v němž atomy přísadového prvku nahrazují jeden nebo více atomů Al. Jiná velikost substitučních atomů způsobuje deformaci mřížky, která se projevuje nárůstem pevnosti a poklesem plastických vlastností. Snižování rozpustnosti přísadových prvků při chladnutí ztuhlého kovu je vlastnost, která umožňuje nejdůležitější způsob TZ hliníkových slitin tzv. vytvrzování.
- **Eutektikum** je tvořeno fází $\alpha(\text{Al})$ a čistým přísadovým prvkem nebo jeho sloučeninou. Vyskytuje se u všech slévárenských slitin AlSi z důvodu, že obsah křemíku ve slitinách je vždy vyšší než než maximální hodnota rozpustnosti.
- **Primární fáze přísadového prvku** se vyskytuje v případě vyššího obsahu přísadového prvku, než odpovídá eutektickému složení. Tuhnutí začíná vylučováním primární fáze přísadového prvku. Pouze u nadeutektických slitin AlSi.
- **Intermetalické fáze** jsou strukturní složky s vlastní krystalickou strukturou. Jedná se o chemické sloučeniny vznikající z přítomných přísadových a doprovodných prvků. [10]



Obr. 17 Obecný tvar rovnovážných diagramů hliníku

1.4.1 Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$

U podeutektických slitin AlSi začíná krystalizace vznikem primární fáze $\alpha(\text{Al})$. V technických slitinách dochází ke krystalizaci této fáze mechanismem heterogenní nukleace na cizích zárodcích. Jako krystalizační zárodky mohou působit oxidy, spinely nebo jiné částice vyskytující se v tavenině. Jako zárodek může též působit stěna formy. Ne všechny cizí částice však působí jako krystalizační zárodky.

Aby částice mohla působit jako zárodek je nutné, aby mezi částicí a tuhnoucí fází byla co nejmenší mezifázová energie. Zárodek musí být tuhnoucí fází smáčivý. Měřítkem smáčivosti je kontaktní úhel θ mezi krystalizačním zárodkem a tuhnoucí fází, úhel je znázorněn na obr. 18.

Čím je kontaktní úhel menší, tím lepší je smáčivost. Dobré smáčivosti bývá dosaženo, když jsou obě složky některými atomovými rovinami krystalograficky podobné. Čím větší je podobnost strukturní stavby mezi částicí a hliníkem, tím efektivněji částice působí jako zárodek pro krystalizaci. [10]



Obr. 18 Smáčivost tuhnoucí fáze a krystalizačního zárodku

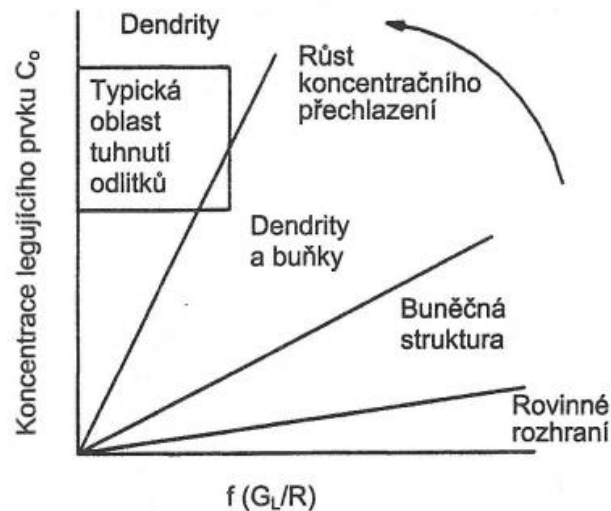
K nukleaci krystalů $\alpha(\text{Al})$ na krystalizačně vhodných částicích může docházet již při malém přechlazení. U krystalizačně méně vhodných zárodcích je nutné přechlazení vyšší. Díky tomu se při pomalém chladnutí krystalizačně málo vhodné zárodky vůbec neaktivují a vzniká hrubozrnná struktura. Pro jemnozrnnou strukturu, která je obecně vyžadována z důvodu lepších mechanických vlastností odlitku, se cíleně zvyšuje počet vhodných krystalizačních zárodků. Zvýšení lze dosáhnout dvěma způsoby, z nichž každý funguje na jiném principu:

- **Očkováním** se zvyšuje množství vhodných zárodků pomocí očkovacích přípravků, k nukleaci dochází při malém přechlazení.
- **Rychlým ochlazením** dochází v tavenině k velkému přechlazení pod rovnovážnou teplotu, kdy se v tavenině aktivují i energeticky méně vhodné zárodky.[10]

Druhý způsob zvýšení vhodných krystalizačních zárodků pomocí rychlého ochlazení v průběhu tuhnutí je náplní diplomové práce.

Po nukleaci krystalizačních zárodků dochází k jejich růstu do taveniny. Růst probíhá do doby, než je omezen sousedními krystaly. Oblast struktury, která vznikla z jednoho krystalizačního zárodka se nazývá primární zrnno. Množství a velikost zrn závisí na počtu aktivních zárodků. Pokud dojde k aktivaci malého počtu zárodků, tak je výsledná struktura hrubozrnná. Slitiny s velkým počtem aktivních zárodků tuhnou jako jemnozrnné. [10]

Způsob růstu primárních krystalů hliníku je závislý na obsahu přísadového prvku a na vzniku a velikosti koncentračního přechlazení. Morfologie struktury znamená popis tvaru strukturních složek. Souvislost morfologie primární fáze a velikostí koncentračního přechlazení je schematicky znázorněna na obr. 19. [10]



Obr. 19 Souvislost morfologie primární fáze na velikosti koncentračního přechlazení

Tuhnutí odlitků probíhá většinou mechanismem růstu dendritů. Dendrity vytváří složitý systém tvořený primárními, sekundárními případně terciárními větvemi. Primární osy dendritů rostou vždy ve směru teplotního gradientu. Větvení dendritů je pravidelné a dochází k němu ve směru konkrétních krystalizačních směrů. Přísadový prvek se vytlačuje do taveniny před frontu tuhnutí a také do mezidendritických prostor. Důsledkem všech těchto podmínek je, že se liší nejenom morfologie různých slitin, ale i struktura téže slitiny při různých ochlazovacích rychlostech. [10]

Velikost dendritů, především pak vzdálenost jejich sekundárních os je důležitý a často sledovaný parametr. Je označován jako SDAS nebo DAS, z anglického „Secondary dendrite arm spacing“. Hodnota DAS je klíčový parametr, který bude sledován v průběhu experimentu DP. Způsob určení a vyhodnocení DAS je popsán v následující kapitole.

1.4.2 Krystalizace eutektika

Jelikož je obsah křemíku ve všech slévárenských slitinách siluminů větší než rozpustnost při eutektické teplotě, tak se vždy vyskytuje eutektikum $\alpha(\text{Al})\text{-Si}$.

Struktura podeutektických siluminů je tvořena sítí primárních dendritů fáze $\alpha(\text{Al})$ a eutektikem, které se vylučuje v mezidendritických prostorech. S rostoucím obsahem křemíku roste i obsah eutektika. [10]

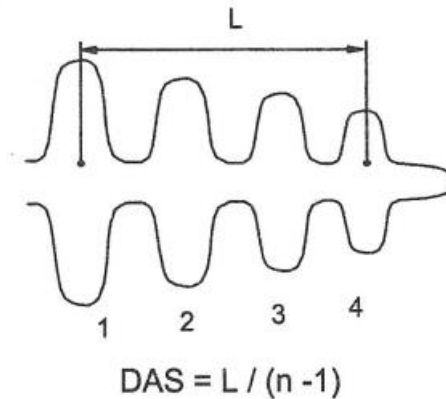
Křemík se v siluminech vylučuje prakticky jako čistý prvek s minimálním obsahem příměsí. Velikost částic eutektického křemíku může být v rozmezí méně než 1 μm až více jak 2 mm. Podle tvaru částic se nazývá i typ eutektika, a to:

- **Zrnité** – vzniká za přítomnosti fosforu v množství 5-10 ppm. Eutektický křemík se vylučuje ve tvaru polyedrických zrn nebo hrubých lamel. Jedná se o obvyklou formu eutektika.
- **Lamelární** – vzniká v čistých slitinách s nízkým obsahem fosforu 1-2 ppm. Křemík tvoří jemné lamely uspořádané vedle sebe. Eutektická zrna jsou mnohem menší než u zrnitého eutektika.
- **Modifikované** – vzniká za přítomnosti modifikačních prvků, zejména sodíku a stroncia. Částice křemíku v modifikovaném eutektiku mají tvar jemných vláken, na metalografickém výbrusu mají tvar tečky. Operace pro dosažení tohoto eutektika se nazývá modifikace. Modifikací se dosahují výrazně lepší mechanické vlastnosti, zejména tažnost.

Vláknitá modifikovaná struktura může vzniknout nejenom použitím tzv. modifikátorů, ale také rychlým tuhnutím s rychlostí postupu krystalizační fronty $400-1000 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ačkoliv opticky vypadá takové eutektikum stejně, jako po chemické modifikaci, elektronovou mikroskopií bylo zjištěno, že tato struktura odpovídá velmi jemně vyloučené nemodifikované formě křemíku. Oba způsoby modifikace vedou ke zjemnění struktury [10]

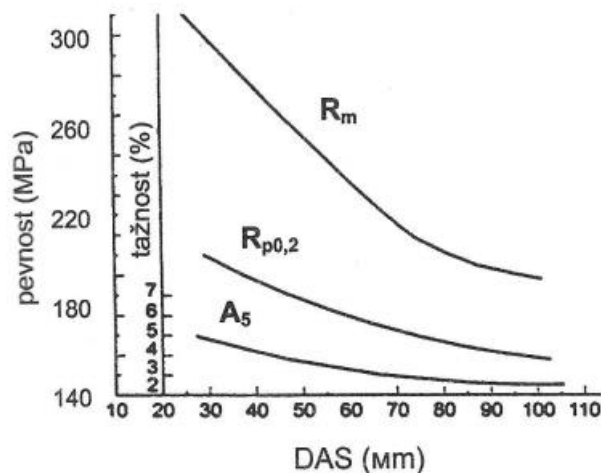
1.5 Vyhodnocení SDAS

SDAS neboli „Secondary dendrite arm spacing“ je v běžné praxi označováno zkráceně jako DAS. Parametr odkazuje na vzdálenost sekundárních os dendritů. Jedná se o důležitou strukturní vlastnost hliníkových odlitků. Hodnota DAS je závislá na rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí taveniny a na chemickém složení slitiny. Hodnota DAS je závislá na rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí, na chemickém složení slitiny je zjišťována metalograficky. Na vhodném dendritu je na metalografickém výbrusu změřena vzdálenost „L“ přes několik sekundárních větví „n“. Tato vzdálenost je vydělena počtem mezer (n-1) mezi větvemi, přes které je vzdálenost měřena. Princip se vzorem výpočtu je znázorněn na obr.20. [10; 18]



Obr. 20 Způsob měření DAS

S hodnotou DAS je spojena řada dalších strukturních jevů. Čím menší je hodnota DAS tím menší jsou segregáční vzdálenosti. Při menším rozsahu segregací jsou vylučovány menší částice intermetalických vměstků. Nečistoty vyloučené v mezidendritických prostorech tvoří sítě. Chemické složení je více homogenní a mikroporozita je rozložena příznivěji. Při nižších hodnotách DAS je dosahováno vyšších mechanických hodnot. Jejich závislost na velikosti DAS je znázorněna na obr. 21. [10]



Obr. 21 Závislost mechanických vlastností na DAS

Hodnota DAS není závislá na velikosti primárních zrn, tudíž není závislá na očkování. Hodnota je ovlivněna pouze rychlostí ochlazování v intervalu tuhnutí. Čím kratší doba tuhnutí tím menší hodnota DAS. Čím menší je velikost primárního zrna a DAS, tím lepší je chemická a strukturní homogenita slitiny a tím je dosahováno lepších vlastností. [10; 18]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem diplomové práce je nalezení nejlepšího způsobu ochlazování odlitků v porovnání mechanických vlastností, metalografické struktury a vyhodnocení vzdálenosti sekundárních os dendritů, DAS. Požadavek slévárny na dosažení analyzovaných mechanických vlastností byl stanoven na hodnoty meze pevnosti v tahu $R_m 330$ MPa, smluvní meze kluzu $R_{p0,2} 260$ MPa a tažnosti $A_5 4$ %.

Diplomová práce je zaměřena na různé způsoby ochlazování hliníkových odlitků. Bude porovnáváno volné ochlazování vzduchem s různými chladícími médii. Jednotlivé vzorky budou laboratorně zpracovány, vyhodnoceny na metalografickém mikroskopu, kde bude pozorována vnitřní struktura odlitků, intermetalické fáze, celková poretita a bude měřena vzdálenost sekundárních os dendritů. Všechny vzorky budou vyhodnoceny tahovou zkouškou pro zjištění mechanických vlastností, jak v surovém stavu, tak po tepelném zpracování.

Ochlazování odlitků je procesem řízené krystalizace, díky které je dosahováno rovnoměrné a jemnozrné struktury. Pomocí těchto charakteristik je dosahováno vyšších mechanických vlastností. Procesem řízené krystalizace se zabývají společnosti, které se specializují na výrobky zejména pro letecký průmyslu.

Dílčím úkolem této diplomové práce je získání informací o řízené krystalizaci v podobě pokusů a zkoušek, jejichž vyhodnocením je nalezení nejvhodnějšího chladícího média. Získané informace by měly být užitečné pro slévárnu MESIT při zavádění nové robotizované linky pro řízenou krystalizaci. Doposud je ve slévárně úspěšně využívána metoda ochlazování tepelných uzlů odlitků pomocí stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch je přiváděn na inkriminovaná místa speciálními jednoúčelovými přípravky a nastavením vhodného tlaku vzduchu.

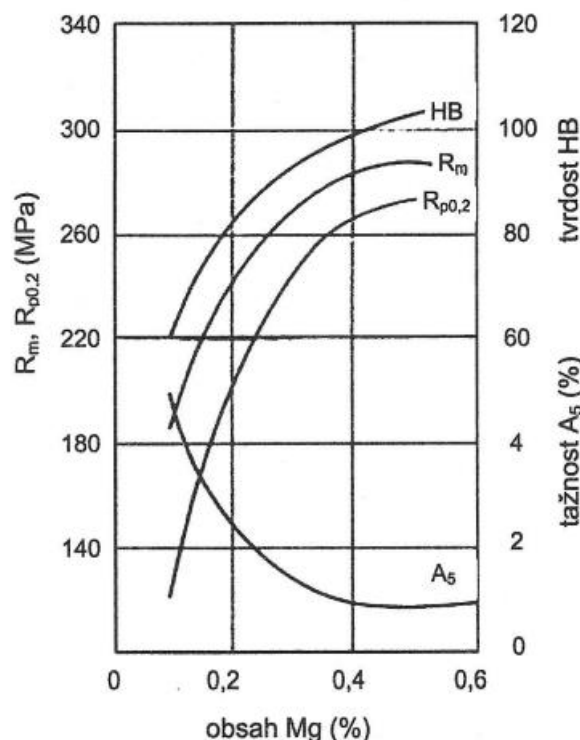
Plán experimentu:

- Ochlazování stlačeným vzduchem o tlaku 1 bar.
- Ochlazování stlačeným vzduchem o tlaku 2 bary.
- Ochlazování ve vodní lázni.
- Ochlazování vodní mlhou.
- Ochlazování v polymeru POLYQUENCH 500D-AL.
- Ochlazování v polymeru POLYQUENCH VP85KB-F1.
- Zkouška řízeného naplynění taveniny MIKRO 100.

2.1 Experimentální slitina AlSi7Mg0,6

Pro uskutečnění experimentu byla zvolena slitina AlSi7Mg0,6. Jedná se o jednu ze dvou nejčastěji používaných hliníkových slitin ve slévárně MESIT. Druhou slitinou, která je zpracovávána ve slévárně, je slitina s označením AlSi7Mg0,3. Obě slitiny jsou zpracovávány pro své vlastnosti, které charakterizuje především to, že se jedná o vysokopevnostní slitiny s dobrou tažností a houževnatostí. Vyznačují se velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, obrobiteľností a svařitelností. Slitiny mají dobrou odolnost proti vzniku trhlin. Slitina AlSi7Mg0,6, označována dle normy ČSN EN 1706 jako slitina AC 42200 má vyšší obsah hořčíku, který zaručuje po tepelném zpracování vyšší pevnosti. Jedná se o slitinu s nejvyššími mechanickými vlastnostmi typu Al-Si. Slitiny nacházejí své uplatnění zejména v leteckém průmyslu, při výrobě namáhaných motorových součástí, ventilátorů, jsou součástí podvozků, rámců, které vyžadují vysokou pevnost a houževnatost. Slitina má po tepelném zpracování dobrou obrobiteľnost, avšak je méně vhodná pro dekorativní anodickou oxidaci. [10; 19]

Slitiny Al-Si-Mg jsou charakteristické svým obsahem hořčíku v rozmezí 0,2-0,7 %. Proces vytvrzování za tepla je umožněn právě přítomností hořčíku. Hořčík je při běžné teplotě ochlazování vylučován jako fáze Mg_2Si . Vlastnosti po odlití jsou u těchto slitin pouze průměrné, vysokých hodnot se dosahuje až tepelným zpracováním. Umělým stárnutím se oproti litému stavu snižuje tažnost. Na obr 22 je znázorněn vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti vytvrzené slitiny AlSi9. [10]



Obr. 22 Vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny AlSi9

Chemické složení slitiny AlSi7Mg0,6 podle normy ČSN EN 1706 vyobrazeno v tab.1. [19]

Tab. 1 Chemické složení slitiny podle normy ČSN EN 1706

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
6,5-7,5	0,19	0,05	0,10	0,45-0,70	-	-	0,07	-	-	0,25	zbytek

Mechanické vlastnosti odděleně odlitých zkušebních těles ze slitiny AlSi7Mg0,6, podle normy ČSN EN 1706 jsou znázorněny v tab. 2. [19]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,6 po T6 podle normy ČSN EN 1706

Označení stavu	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa] min.	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min.	Tažnost A [%] min	Tvrdost podle Brinella HBW min.
T6	290	240	2	85

2.2 Experimentální zařízení použítá při experimentu

Při přípravě experimentu byla využita zařízení běžně se vyskytující ve slévárnách přesného lití hliníkových slitin. Technická zařízení jsou popsána v následujících podkapitolách:

2.2.1 Vstřikolis

Vstřikolis je zařízení, které slouží pro plnění duralových matečných forem voskovou směsí v polotuhém stavu. Příprava voskové směsi začíná v taviči vosku, který je naplněn voskem ve formě drobných pelet. Po natavení je vosk přečerpán do kondicionéru, který je konstruován tak, aby vosková směs byla udržována na stálé, požadované teplotě, aby do vosku nebyly vmíchány bublinky vzduchu. Z kondicionéru je vosk přečerpán do vstřikovacího válce, který je ovládán hydraulickým válcem. [20]

2.2.2 Obalovací linka

Všechny sestavené vtokové soustavy s nalepenými modely, nazývanými stromečky, musí být před zavěšením do robotické obalovací linky řádně odmaštěny, aby po nanesení keramické suspenze došlo k optimálnímu ulpění obalovací směsi na celém povrchu voskových modelů. Každý stromeček je opatřen speciálním čárovým kódem, podle kterého je výrobní proces kontrolován a identifikován. Stromeček je dopravníkem přesunut k šestiosému robotu od firmy Kawasaki. Podle předem nadefinovaného programu robot provede předepsané úkony. Nadefinovaný program specifikuje pohyby robota, úhel, pod kterým jsou stromečky vnořeny do kádí s keramickou suspenzí, typem keramické suspenze, dobou okapávání, směrem otáčení, případně opakovaným zamočením pod jiným úhlem, aby bylo dosaženo zamočení celé plochy voskových modelů včetně koutů, žebrování, hlubokých a úzkých otvorů. Po namočení stromečku v dané nádobě s keramickou suspenzí a po optimálním okapání keramické suspenze je stromeček přesunut robotem do gravitačního sypače s ostřivem. Robot, podle nadefinovaného programu, volí výběr ze čtyř kádí s keramickou suspenzí a ze třech bubnových sypačů. Každá nádoba a každý bubnový sypač obsahuje jiný druh materiálu s rozdílnou recepturou. Po ukončení procesu obalování je stromeček zavěšen do klimatizované sušárny. Použitý materiál pro namíchání keramické suspenze v příslušném tanku a použitý posypový materiál v sypači je zpracován v tabulce 3 [21]. Po nanesení všech, předem naprogramovaných, vrstev a jejich vysušení, jsou stromečky připraveny k další operaci, a to operaci vytavování.

Tabulka 3 Rozpis použitých materiálu v obalovací lince

Tank č.:	1.	2.	3.	Předsmáčení
Obal č.:	1	2-3	4 a více	Dle receptury dílu
Pojivo:	Primcote	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate	MatriXsol 30 + MXC Ecel X2 Blend	MatriXsol
Moučka:	Mulgrain 60 325#	Molochite 200#	Molochite 120#	-
Sypač č.:	1.	2.	3.	
Obal č.:	1	2-3	4 a více	
Písek:	Molochite 50/80	Molochite 30/80	Molochite 16/30	

2.2.3 Bojlerkláv

Pro vytavení vosku ze skořepin je využíváno technické zařízení bojlerkláv. Bojlerkláv vyvíjí vodní páru pod tlakem 10-11 Bar, s teplotou 180-195 °C, která rozpouští vosk. Díky tepelnému šoku způsobeného párou dojde k okamžitému odtavení tenké vrstvy vosku. Náběh zařízení musí být na maximální tlak během 8 sekund. Tím je umožněno zbytkovému vosku dilatovat, aniž by došlo k poškození skořepiny. Jeden celý cyklus vytavování trvá 15 minut. Po otevření hydraulických dveří bojlerklávu je vyvezen vozík s jednotlivými skořepinovými formami, které je nutné uložit minimálně na 24 hodin v regále skořepin na dosušení. Všechny licí nálevky jednotlivých stromečků se kryjí ochranou krytkou, která zabraňuje vniknutí nečistot do skořepinové formy. Pro vysokou jakost odlitků přesného lití je čistota skořepiny velmi důležitá. Po skončení procesu vytavování je vosk vypuštěn do připravených nádob a následně určen k dalšímu zpracování v externí firmě. Použitý vosk je externě vyčištěn, přefiltrován, doplněn chybějícími aditivy a následně se používá jako vosk vtokový, pro výrobu částí vtokových soustav. [22]

2.2.4 Žihací pece

V žihací peci v případě žihání skořepin pro Al slitiny dochází pouze k ohřevu skořepiny na teploty lití a vypálení organických složek skořepinové formy. Samotná skořepinová forma již po vytavení v bojlerklávu je dostatečně pevná pro odlévání Al slitin. Následná sintrace v peci není proto ani nutná ani žádoucí z důvodu následného snadného odstraňování skořepiny po odlití. Pro žihání je využívána elektrická, odporově vytápěná pec. Jedná se o žihací pec s označením VKT 2400/12, výrobcem je firma LAC.

Všechny skořepinové formy před vložením do žihací pece jsou nejdříve opatřeny pěnovými keramickými filtry a následně vyskládány na pojízdný vozík pece. Po naplnění kapacity pece je její prostor uzavřen a dochází ke zvyšování teploty až na konečnou hodnotu 680 °C. Během tohoto procesu je skořepina zbavena veškerého zbytkového vosku jeho vyhořením. Prostor je vytápěn odporovými spirálami na stěnách pece a uvnitř vozíku. Pec je dále vybavena větracími klapkami, které umožňují odvětrávání a ochlazování prostoru pece. V žihací pecích je možno nastavit rovnoměrné rozložení teploty dle DIN 17052-1. [23]

2.2.5 Tavicí pece

Pro tavení slitiny je využívána elektrická, odporová, kelímková udržovací pec (výrobce ELSKLO, typ 200T/1000°C/48kW/HT200). Pracovní prostor pece je tvořen SiC kelímek příslušné velikosti a tvaru. Topný systém je tvořen topnými panely s fixovanými spirálami rozmístěnými po vnitřním obvodu pece. Výkon pece je 48 kW. Pec je opatřena havarijním výtokem pro případ prasknutí kelímku. Tavicí pec je znázorněna na obr. 23. [24]



Obr. 23 Odporová tavící pec ELSKLO

Po natavení vsázky, jejím odplynění, modifikaci a očkování je provedena kontrola chemického složení pomocí emisního spektrometru. Ze získaných výsledků je možné taveninu upravit přidáním chybějících prvků. Nejčastěji se jedná o doplnění hořčíku z důvodu jeho propalu při procesu tavení. Prvky jsou nejčastěji dodávány ve formě předslitin např. AlMg20.

Po získání požadovaného chemického složení dojde k odplynění taveniny dusíkem a ke změření Dichte Indexu. Pokud jsou získané údaje shodné s požadovanými je přistoupeno k samotnému odlití. V rámci experimentu bylo u každé tavby dosahováno hodnoty DI 0,38-0,75 %, což jsou hodnoty velmi nízké a žádané.

Odlití je provedeno ruční pánvičkou na licím poli jako je znázorněno na obr. 8. Po odlití byly skořepiny, v rámci experimentu, brány pomocí slévárenských vidlí a umístovány do nádob s různými chladicími médii. Postupy a výsledky různých způsobů ochlazování jsou zpracovány a vyhodnoceny dále v textu.

2.2.6 Dokončující operace

Po odlití a vychladnutí odlitků je na řadě odstranění skořepiny. Pro odstranění hlavního množství skořepiny z odlitku jsou využívány vibrační stoly, pneumatická kladiva, vibrační rošty apod. Šetrnější metodou k odstranění skořepiny je za pomoci vysokotlaké vody.

Ve slévárně MESIT se používá závěsný tryskač (typu TZNZ od firmy Kovo Staněk s.r.o.). Jako tryskačí medium jsou využívány nerezové kuličky. [25]

Po odstranění veškeré skořepiny je na řadě proces odstranění vtokové soustavy od odlitků. Běžně se tak děje na pásových nebo kotoučových bruskách. Jedná se o manuální práci.

Oddělené odlitky jsou následně ještě tryskány zrnitým médiem v tlakových kabinách pro odstranění zbytků skořepiny z hlubokých neprůchozích děr nebo složitých tvarů.

2.2.7 Pec na tepelné zpracování

Vysokých mechanických hodnot některých hliníkových slitin je dosahováno až po TZ. Experimentální slitina, AlSi7Mg0,6 patří do této skupiny slitin. Vysokých vlastností je dosahováno až po procesu umělého stárnutí. Jak bylo popsáno v podkapitole 1.2.11, je proces umělého stárnutí specifický a pro jeho zvládnutí je vyžadováno typické zařízení.

Ve slévárně MESIT je pro TZ používána elektricky vyhřívaná, horizontální komorová pec s nuceným vnitřním oběhem (označení KNC/H 1000/65 od firmy LAC s.r.o.). Tím je dosahováno rovnoměrného rozložení teplot v celém prostoru pece. Pro prudké ochlazení po rozpouštěcím žihání je pod pecí instalována lázeň s vodou a její cirkulací pro dokonalé ochlazení odlitků. Komorová pec s kalící lázní je na obr. 24. [26]



Obr. 24 Komorová pec s kalící lázní

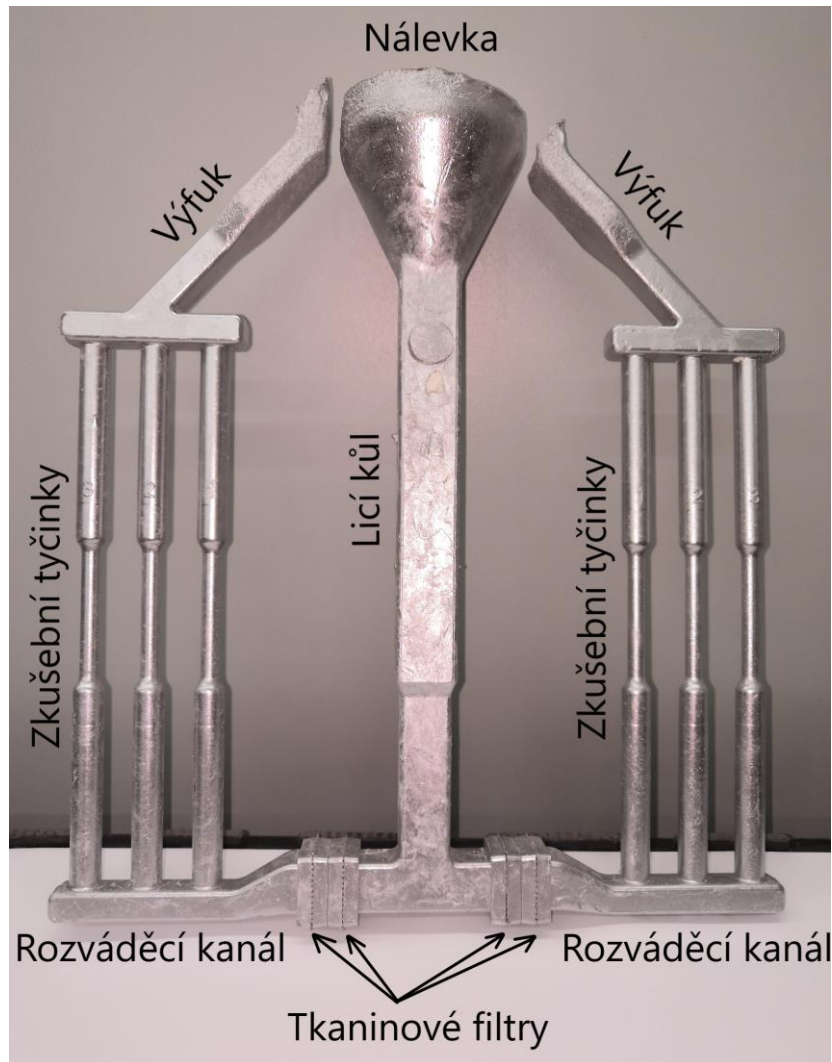
2.2.8 Kontrola konečných odlitků a jejich oprava

Pro kontrolu vnitřní jakosti leteckých odlitků je využíváno rentgenové zařízení (MU 2000 od firmy YXLON) [15] Experimentální vzorky rentgenovány nebyly.

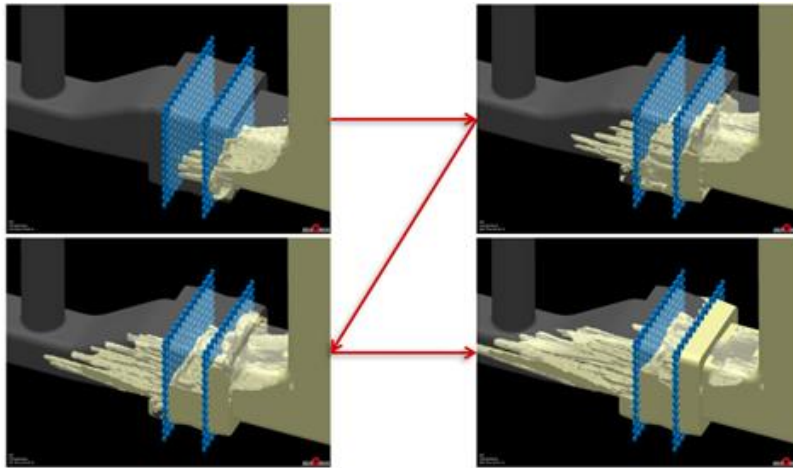
U drobných povrchových vad, které nemají vliv na funkčnost odlitku a po schválení od zákazníka, je možná oprava odlitku pomocí svařování. Svařováním se opravují vady jako jsou bubliny nebo zadrobeniny. Pro povrchové opravy je využito laserové navařovací zařízení (Alpha Laser ALM 200). Pro hlubší závary se použije elektrická svářečka TIG od výrobce Lincoln Electric, typ Square Wave TIG 275. [27]

2.3 Specifikace zkušební odličky

V experimentální části byly využity zkušební tyčinky určené pro statickou zkoušku tahem. Na obr. 25 jsou vyobrazeny zkušební tyčinky s celou vtokovou soustavou. Je zde patrná nálevka a licí kůl. V rozváděcích kanálech jsou umístěny dva tkaninové filtry za sebou pro filtraci nečistot a pro změnu turbulentního proudění na laminární. Vliv tkaninových filtrů je zobrazen na obr. 26. Simulace turbulentního víření byla zpracována softwarem MAGMA. Dále jsou zde umístěny zkušební tyčinky tři kusy na každou stranu. Označení tyčinek je číselné 1, 2 a 3. Tyčinky nejbližší licího kůlu jsou označeny číslem 1, prostřední číslem 2 a krajní číslem 3. Nad tyčinkami je vyústění výfuku. Výfuky jsou součástí formy z důvodu dokonalého zaplnění formy taveninou.



Obr. 25 Odlitek zkušebních tyček se vtokovou soustavou



Obr. 26 Vliv tkaninových filtrů na proudění taveniny (zdroj MAGMA)

Detailní rozměry trhacích tyčinek a celého odlitků jsou patrné z přiloženého výkresu Trhací tyčinky. Důvod tvaru zkušební vzorku je zřejmý. Z jednoho odlitku jsou zjištěny všechny požadované mechanické vlastnosti a také struktura materiálu. Mikrostruktura materiálu byla vyhodnocována z horního a spodního kraje zkušební tyčinky jako je na obr. 27.



Obr. 27 Místa pro odběr vzorků pro vyhodnocení mikrostruktury

2.4 Metodiky zkoušení odlitých vzorků

Nejprve byly zkušební tyčinky podrobeny statické zkoušce tahem na stroji TIRA test 2850 s maximálním zatížením 50 kN, zařízení je znázorněno na obr. 28. Zkouška byla provedena za pokojové teploty. Vzorky nebyly před zkouškou obráběny, zkoušení vzorků probíhalo v jejich odlitém stavu. Po ukončení zkoušky, přetržením zkušební tyčinky, byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti: mez pevnosti R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a tažnost A_5 , které jsou pro slévárenské potřeby nejdůležitější.



Obr. 28 Zařízení pro statickou zkoušku tahem TIRA test 2850

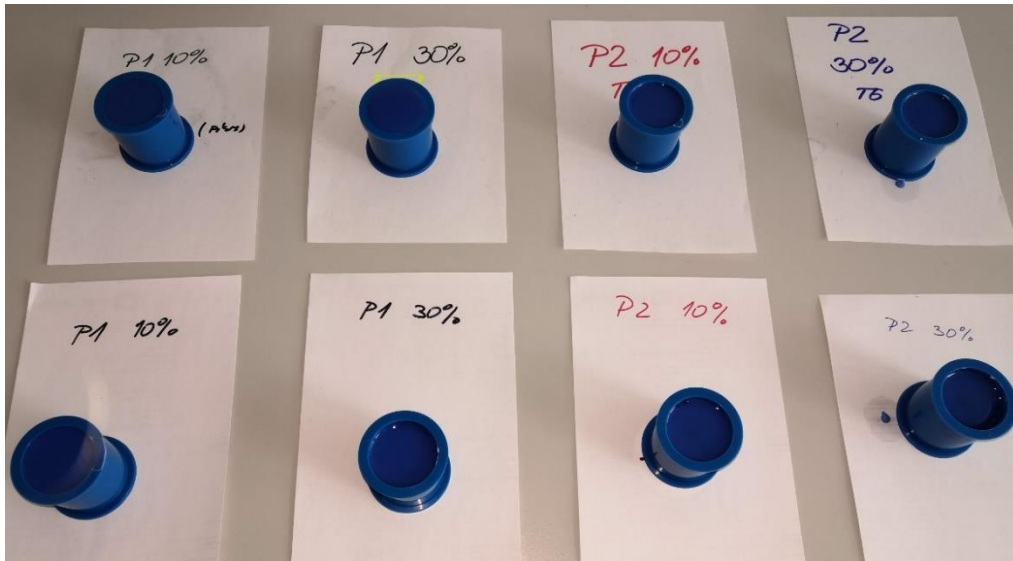
Pro posuzování metalografického výbrusu byly vždy odebírány vzorky z tyčinky se stejným číselným označením. Z jedné tyčinky byly odebrány vždy dva vzorky pro vyhodnocení DAS. Vždy jeden vzorek pocházel ze spodní části tyčinky (v průběhu experimentu uváděn u parametru DAS jako „DAS dolní“) a z horní části tyčinky (v průběhu experimentu uváděn u parametru DAS jako „DAS horní“).

Postup přípravy vzorků pro hodnocení mikrostruktury:

- **Odběr vzorků** – byly odříznuty asi 1 cm dlouhé kousky z tyčinek. Vzorek se musel odříznout tak, aby nebyl tepelně ovlivněn, také vzorek nesměl pocházet z místa přetržení z důvodu plastické deformace části.
- **Zalítí vzorků** – bylo prováděno pomocí pryskyřice VariDur 200 firmy BUEHLER do zkušebního válcového tubusu. Pryskyřice byla smíchána z práškového plniva a kapalného tvrdidla. Po vytvrzení byly vzorky připraveny na broušení. Roztřízené a zalité vzorky jsou na obr. 29.
- **Broušení vzorků** bylo prováděno na plně automatické, vodou chlazené brusce EcoMet 30. Bruska je určena pro zpracování čtyř vzorů najednou. Broušení probíhá pomocí brusného kotouče zrnitosti P400, jehož zrna jsou složena z SiC.
- **Leštění vzorků** bylo uskutečněno ve čtyřech etapách. Po broušení byl odebrán brousící kotouč a následně vyměněn za měkčený kotouč, na který se nanášela diamantová pasta s označením MetaDi 9, 3 a 1 μm , s postupnou klesající zrnitostí diamantového abraziva.

Proces leštění byl prováděn pomocí předem nastaveného programu. Každá diamantová pasta měla určenu vlastní lešticí tkaninovou desku, na které leštění probíhalo, aby nedocházelo ke znečištění jednotlivých tkaninových desek určených pro jemnější pasty a tím k poškrábání vzorků. Mezi každou výměnou lešticí desky bylo zařízení opláchnuto vodou. Stejně tak i vzorky byly oplachovány pod proudem vody a následně ofouknuty stlačeným vzduchem.

- **Zrcadlový lesk** byl dosažen na semišové lešticí desce za současného smáčení nekrytalickou koloidní silikou. Po vyleštění byly vzorky opláchnuty, ofouknuty, založeny a popsány pro další krok. Bruska společně s lešticími přípravky je zobrazena na obr. 30.



Obr. 29 Odlité a roztřízené vzorky



Obr. 30 Automatická bruska EcoMet 30 společně s lešticími přípravky

Po vyleštění byla u vzorků pozorována jejich mikrostruktura pomocí mikroskopu. Jednalo se o mikroskop (NIKON Eclipse MA 100N) vybavený kamerou (DFK33UX250) pro digitální přenos a za pomoci softwaru NIS-Elements byla prováděna obrazová analýza.

Metalografická analýza je používána pro hodnocení primární fáze, typu a morfologie eutektika a intermetalických fází [10]. Ve slévárně je využívána metoda optické mikroskopie. Účelem mikroskopického hodnocení je především posouzení stupně modifikace eutektika Al-Si [10].

Pro účely DP byly vyhodnocovány především dendrity, hlavně pak vzdálenost jejich sekundárních větví, tzv. SDAS, parametr důležitý pro popis dendritické struktury slitin Al-Si. Dále byly na vzorcích pozorovány typické intermetalické fáze často se nacházející v siluminech. Obrazovou analýzou byla vyhodnocována výsledná pomezí odlitku.

2.5 Způsoby ochlazování

Nejprve byly odlity vzorky, které ztuhly na vzduchu bez jakéhokoliv vnějšího ochlazování. Lící teplota taveniny u všech zkoušek byla 740 °C, skořepiny byly žíhány na teplotu 680 °C. Všechny tyčinky byly tepelně zpracovány procesem T6, jelikož se jedná o nejčastější způsob TZ prováděný ve slévárně. Hodnoty TZ byly následující:

- Rozpouštěcí žíhání – 545 °C po dobu 11 hodin a následné ochlazení do vody.
- Precipitační vytvrzování – 160 °C po dobu 5 hodin a následné ochlazení na vzduchu.

Teploty a časy TZ byly voleny na základě výsledků dřívějších zkoušek.

Následně byly vzorky podrobeny tahové zkoušce a byla hodnocena mikroskopická struktura. Výsledky byly určeny pro porovnání s budoucími výsledky různých způsobů ochlazování vzorků. Většina vzorků byla odlita v minimálním množství dvou stomečků, aby vzniklo alespoň dvanáct tyčinek a průměrná hodnota vlastností měla vypovídající hodnotu. Všechny výsledky byly zpracovány ve formě průměrné hodnoty, ke které byla přidána dvounásobná hodnota směrodatné odchylky pro docílení 95% pravděpodobnosti. Všechny naměřené hodnoty byly po konzultaci s doc. RNDr. Bohumilem Marošem, CSc. testovány Grubbsovým testem odlehých hodnot [28]. Nejprve byl statistický soubor uspořádán do vzestupné řady a vypočítána výběrová směrodatná odchylka. Následoval výpočet testovací veličiny, který byl proveden podle následujících dvou vztahů pro test nejvyšší a nejnižší hodnoty [28].

$$G_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \sqrt{\frac{n-1}{n}}; G_2 = \frac{x_n - \bar{x}}{s} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}$$

Jestliže byla testovací veličina G_1 nebo G_2 větší než příslušná kritická hodnota, pak byla nulová hypotéza zamítnuta. Všechna naměřená data parametru DAS jsou zpracována v příloze 2. Všechna data naměřených mechanických vlastností jsou zpracována v příloze 3.

Výsledky průměrných mechanických hodnot a výsledného DAS u vzorku ztuhlého bez ochlazování jsou zpracovány v tabulce 4.

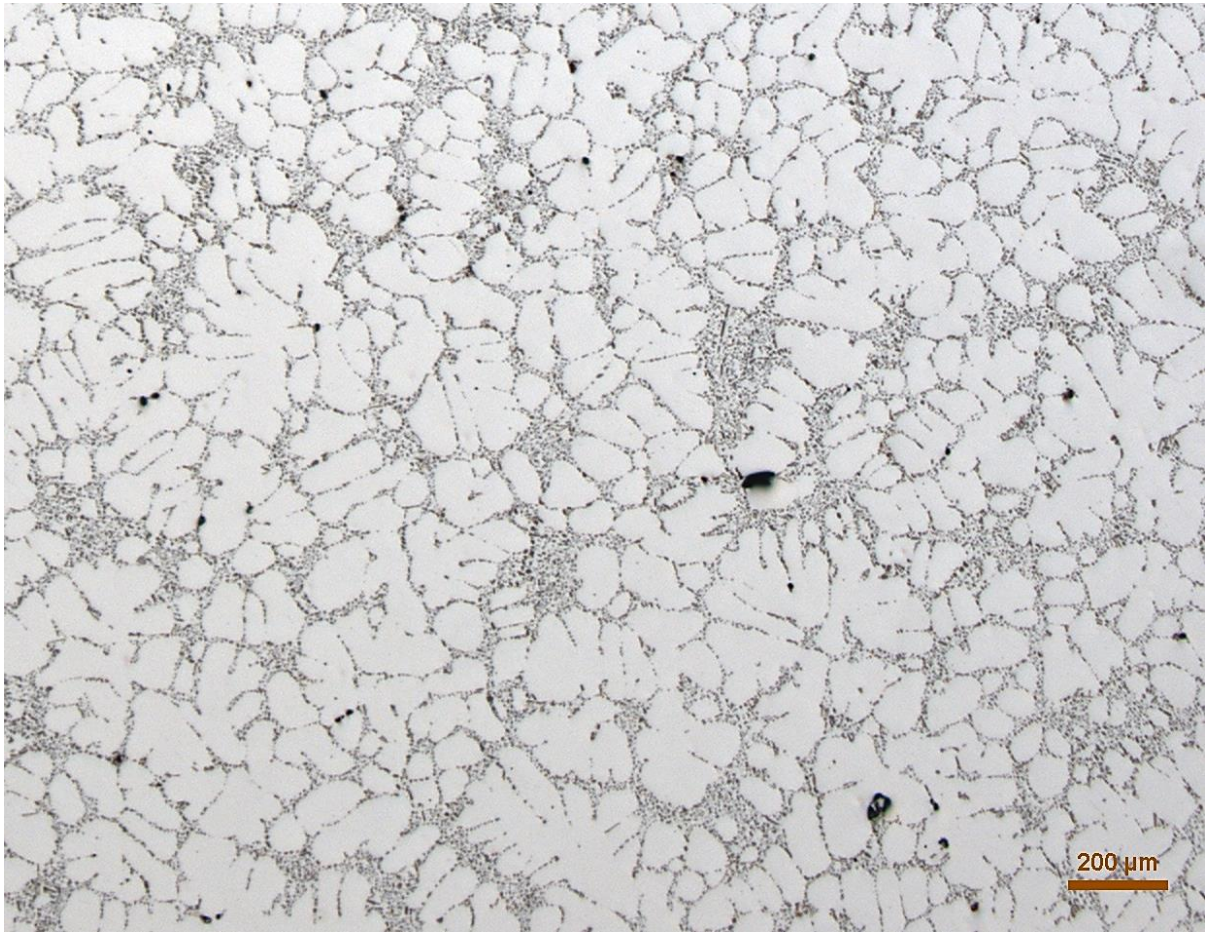
Tabulka 4 Výsledky vzorků bez vnějšího ochlazování

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	DAS horní [μm]	DAS dolní [μm]
Bez chlazení, bez TZ	184,0±3,2	117,5±4,7	4,4±0,6	-	--
Bez chlazení, T6	318,0±7,0	252,9±14,0	5,3±1,2	53,3±15,7	60,1±16,9

Nižší hodnota DAS u vzorku z horní části byla pravděpodobně způsobena nižší teplotou taveniny. Toho bylo dosaženo spodním plněním skořepiny bez ochlazování.

Snímek výsledné mikrostruktury byl pořízen vždy 25 krát zvětšený. Mikrostruktura vzorku ztuhnutého bez vnějšího ochlazování s T6 je zobrazena na obr. 31. Jedná se o vzorek odebraný z horní části tyčinky. Z důvodu podobné mikrostruktury je vložen pouze jeden vzorek.

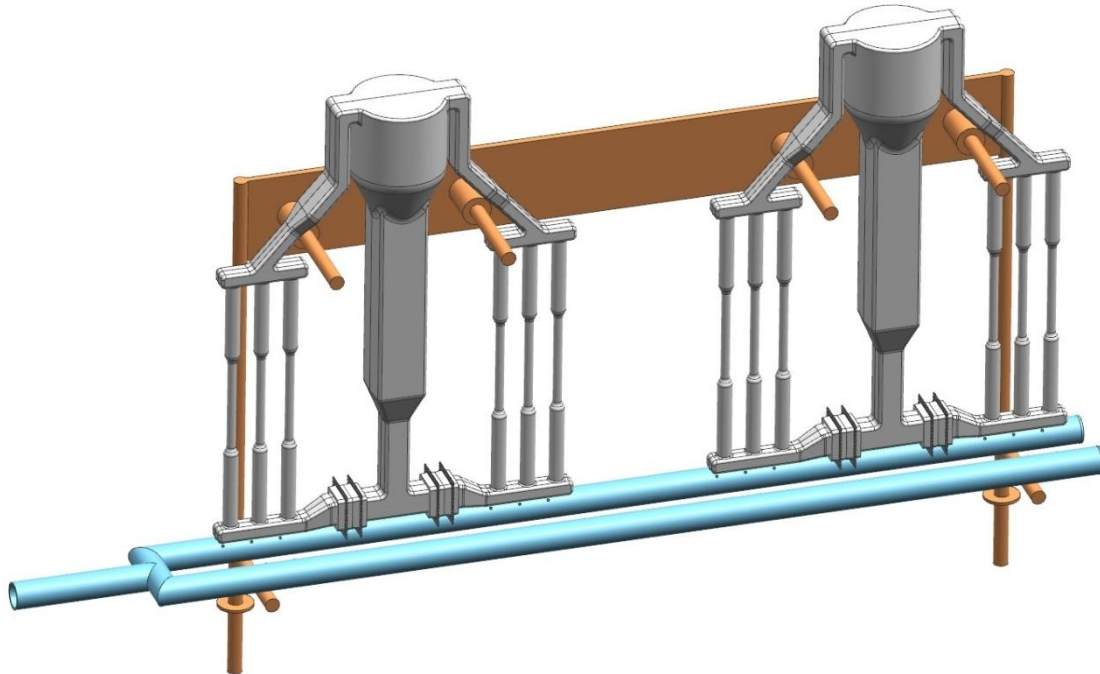
Na vzorku mikrostruktury je patrné především modifikované eutektikum a řídkce rozmístěna mikroporozita.



Obr. 31 Vzorek bez chlazení, T6, horní část

2.5.1 Ofukování stlačeným vzduchem

První metodou ochlazování bylo ofukování pomocí stlačeného vzduchu. Tlak stlačeného vzduchu byl zvolen na hodnoty 1 a 2 bary, teplota stlačeného vzduchu odpovídala teplotě okolí. Zdrojem stlačeného vzduchu byl centrální rozvod stlačeného vzduchu. Zařízení pro ofukování stromečků a jejich uložení na stojanu viz obr.32.



Obr. 32 Zařízení pro ofukování zkoušených vzorků

Stromečky byly před odlitím zavěšeny na rám ukotvený k licímu poli a následně odlity. Proces ofukování byl směřován na spodní část odlitku, aby byla vytvořena tuhnuící fronta postupující směrem nahoru. Ofukování vzorku trvalo do doby úplného zatuhnutí taveniny v nálevce, kde byl největší objem kovu. Po jejím zatuhnutí byl ztuhlý i kov ve zbytku formy. Výsledky experimentu ochlazování pomocí stlačeným vzduchem jsou zpracovány v tabulce 5.

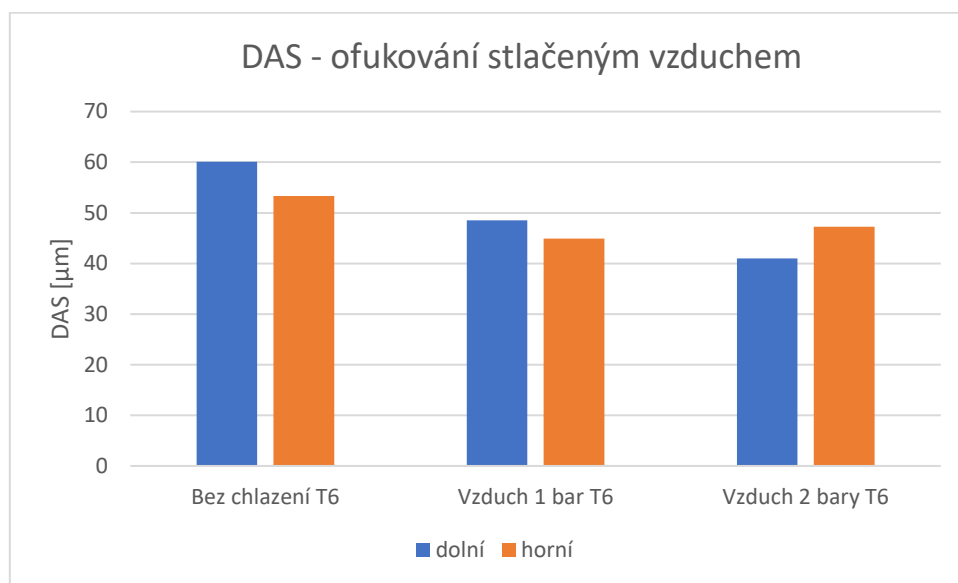
Tabulka 5 Výsledky vzorků ochlazovaných stlačeným vzduchem

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	DAS horní [μm]	DAS dolní [μm]
Bez chlazení, T6	318,0±6,6	252,9±13,4	5,3±1,2	53,3±15,2	60,1±14,9
Vzduch 1 bar, bez TZ	185,4±4,4	115,3±2,8	4,8±0,5	42,2±7,2	51,1±20,0
Vzduch 1 bar, T6	319,2±5,8	254,0±8,6	5,7±1,4	44,9±12,3	48,5±11,6
Vzduch 2 bary, bez TZ	184,1±6,0	114,8±4,2	4,4±1,2	49,1±9,6	46,1±12,5
Vzduch 2 bary, T6	324,5±9,6	262,4±5,8	5,3±2,4	45,6±11,2	41,0±17,6

Z výsledků je patrné, že došlo k poklesu hodnoty DAS. U vzorků ofukovaných stlačeným vzduchem po TZ byla dosažena požadovaná hodnota $R_{p0,2}$. Průměrná hodnota tažnosti dosahovala předepsaných hodnot u všech vzorků. Při ochlazování stlačeným vzduchem o tlaku 1 baru byly hodnoty DAS vyšší u vzorku z dolní části než z horní části. Z výsledků byla patrná

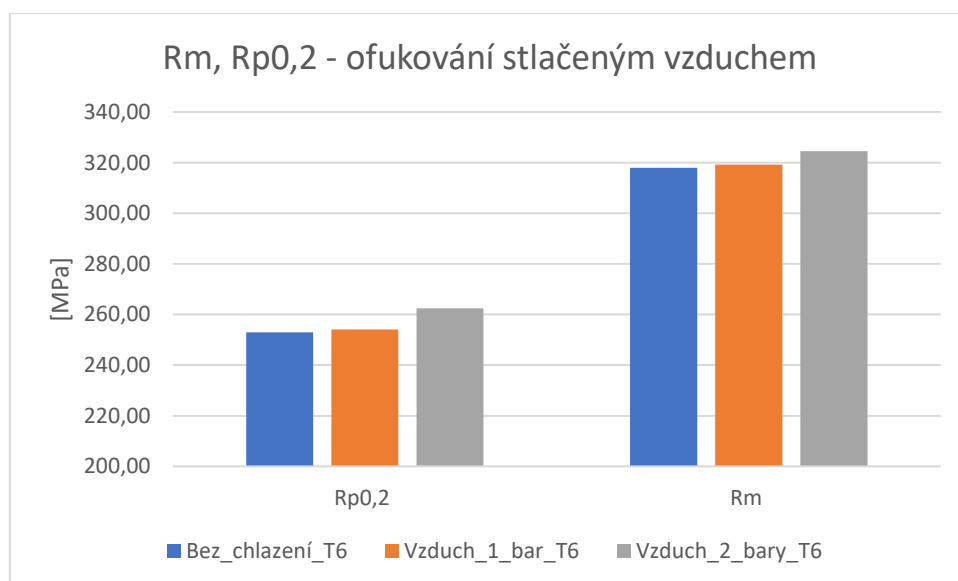
nehomogenita struktury v horní a dolní části zkušební tyčinky. Toho bylo dosaženo stejně jako v předchozím experimentu. Díky spodnímu plnění je nejchladnější tavenina v horní části tyčinky, kde ztuhne dříve než tavenina ve spodní části tyčinky, kde došlo k akumulaci tepla proudící taveninou. Ofukování stlačeným vzduchem o tlaku 1 bar nevyvolalo tuhnoucí frontu v tavenině podle předpokladu.

U vzorku ochlazovaného ofukováním stlačeným vzduchem o tlaku 2 bary byly hodnoty dle očekávání v dolní části nižší než v horní části. Vliv ofukování se projevil. Závislost průměrné hodnoty DAS u vzorků ochlazovaných vzduchem, v horní a dolní části zkoušené tyčinky, viz obr. 33.



Obr. 33 Průměrné hodnoty DAS pro horní a dolní vzorek při ofukování stlačeným vzduchem

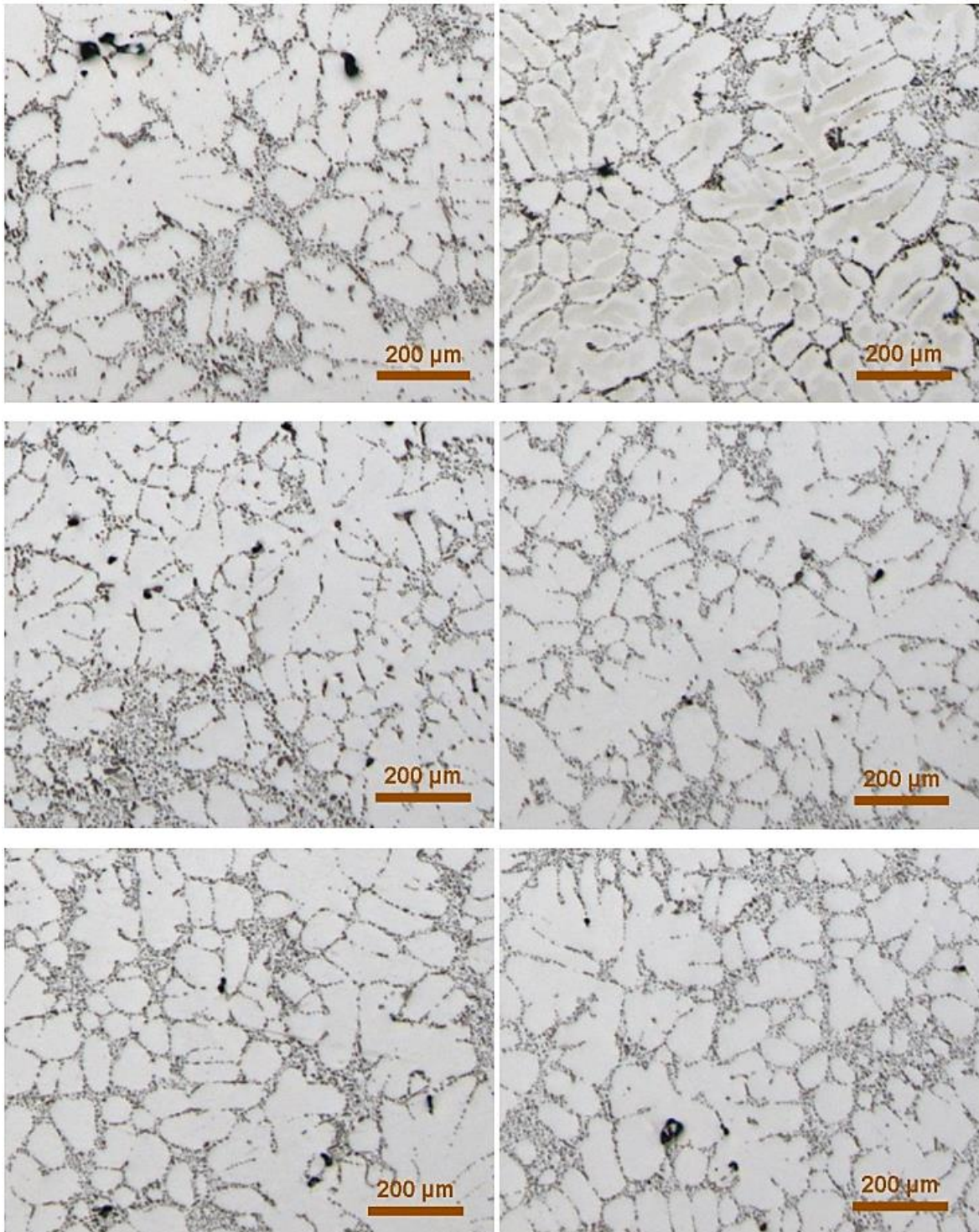
Z grafického vyobrazení mechanických hodnot viz obr. 34 je patrný nárůst meze pevnosti a smluvní meze kluzu se vzrůstajícím tlakem vzduchu použitým při ochlazování. Tažnost dosahovala u všech vzorků podobných hodnot.



Obr. 34 Průměrné hodnoty R_m a $R_{p0,2}$ u vzorků ochlazovaných stlačeným vzduchem

Mikrostruktura ochlazovaných vzorků viz obr. 35, rozdělených následovně: v levém sloupci jsou vzorky odebrané ze spodní části tyčinky a v pravém sloupci vzorky odebrané z horní části

tyčinky. V prvním řádku jsou vzorky ofukované stlačeným vzduchem o tlaku 1 bar, ve druhém řádku jsou vzorky ochlazované stlačeným vzduchem o tlaku 2 bary, ve třetím řádku jsou vzorky ztuhlé volně na vzduchu.



Obr. 35 Mikrostruktury vzorků ochlazované stlačeným vzduchem o tlaku 1 a 2 bary, a bez ochlazování

Mikrostruktury jsou si velice podobné. Z výbrusu je patrná nízká a velmi jemně rozptýlená perezita. Pro získání nižšího DAS byl uvažován rychlejší způsob ochlazování. Z předpokladů vyplynula metoda zanoření stromečku do kapalného média, nejdříve do vody.

2.5.2 Zanoření do vody

Pro zchlazení stromečku do vody byly pořízeny plechové nádoby o objemu 30 l. Dvě nádoby byly napuštěny vodou z vodovodu. Hladina vody byla nižší než výška stromečku, aby po umístění stromečku na dno nádoby nedošlo k zaplavení nálevky skořepinové formy vodou.

Po odlití byly stromečky přesunuty pomocí slévárenských vidlí do nádob s vodou. Při zanořování docházelo k prudkému vývinu vodní páry. Pravděpodobně došlo k prostupu páry stěnou skořepiny až do taveniny. Na hladině taveniny byla patrná tvorba bublin způsobená párou. Naplynění taveniny znehodnotilo vzorky. Znehodnocení se projevilo již při tahové zkoušce, kdy po přetržení nebyly naměřeny žádné hodnoty. Toho bylo docíleno pravděpodobně tak, že v tavenině vznikly oxidické blány, které porušovaly soudržnost materiálu.

Dalším pokusem bylo přidání kuchyňské soli do vodní lázně, ta měla vykazovat vyšší odvod tepla. [10] Při zanořování stromečku opět došlo ke tvorbě bublin na hladině taveniny vznikající párou a zanořování bylo kvůli bezpečnosti přerušeno. Vzorky nebyly podrobeny ani tahové zkoušce ani mikroskopickému rozboru.

S vodním chlazením byl proveden ještě jeden pokus. V plechové nádobě byly rovnoměrně rozloženy trysky tvořící drobné kapičky vody, určené pro ochlazování vnějších prostor. Výhodou pokusu byla jeho jednoduchost a možnost připojení zařízení na vodovodní řád bez jakýchkoliv složitých příprav. Po spuštění trysek byl stromeček uchopen pomocí vidlí a pomalu spouštěn do prostoru nádoby zaplněné vodním aerosolem. Pokus je znázorněn na obr. 36. Při kontaktu mikroskopických vodních kapek s rozžhavenou skořepinou docházelo k Leidenfrostovu jevy, kdy kapky vody nesmáčely povrch, ale byly obklopeny vrstvou vodní páry, díky které nedocházelo k přímému kontaktu vody a skořepiny [29]. Po určitém ochlazení skořepiny došlo k jejímu smočení vodou a k vývinu páry. Došlo opět k penetraci páry skrze skořepinu do taveniny a tím k probublání taveniny a jejímu vystříknutí. Z důvodu vystříknutí taveniny byl pokus přerušen.

Průměrné hodnoty mechanických vlastností byly i přes zmíněné probublání taveniny srovnatelné s hodnotami vzorku ztuhlého bez vnějšího ochlazování. Jmenovitě $R_m=320,0$ MPa, $R_{p0,2}=256,6$ MPa, $A_5=5,2$ %. Hodnota DAS nebyla měřena z důvodu nedokončení pokusu.



Obr. 36 Ochlazování vodní mlhou

2.5.3 Ochlazování do kalícího polymeru

Po neúspěšném ochlazování ponorem do vody byla oslovena firma ESCOND zabývající se tepelným zpracováním kovů. Ta po konzultaci požadavků nabídla dva kalící, vodou ředitelné polymery. Ty byly následně zakoupeny. Pro jednoduchost jsou v experimentu polymery označovány jako Polymer 1 (P1) a Polymer 2 (P2).

- Polymer 1 – označení POLYQUENCH 500D-AL. Jedná se o nehořlavý kalící prostředek na bázi modifikovaného „PAG“ polymeru s novým inhibátorem koroze. Přípravek vyhovuje současným požadavkům na kalící médium, hygieny a fyziologii práce. Přípravek byl navržen pro mírné kalení hliníkových součástí.

Pro kalení je přípravek ředěn na koncentrace v rozmezí 5-20 %.[30]

- Polymer 2 – označení POLYQUENCH VP85KB-F1. Je kalící prostředek na bázi polymeru typu „PVP“. Byl vyvinut jako přímá alternativa kalení do oleje. Významnou výhodou je jeho fyziologická nezávadnost. Ani při jeho tepelném rozkladu nejsou uvolňovány produkty zapáchající nebo škodlivé. Prostředek je nehořlavý a vodou ředitelný.

Hlavní oblasti použití jsou zušlechťování z tvářecí teploty, běžné zušlechťování výkovek citlivých na vznik trhlin a úplné nebo částečné kalení nástrojů z legovaných nástrojových materiálů. [31]

Pro experimentální účely byly roztoky polymerů nařaděny na následující koncentrace viz tabulka 6. Koncentrace byly měřeny pomocí optického refraktometru. Následně byly roztoky polymerů rozděleny do plechových nádob a pro snadnější orientaci důkladně popsány informacemi o typu a koncentraci polymeru.

Tabulka 6 Koncentrace příslušných polymerů použitých v průběhu experimentu

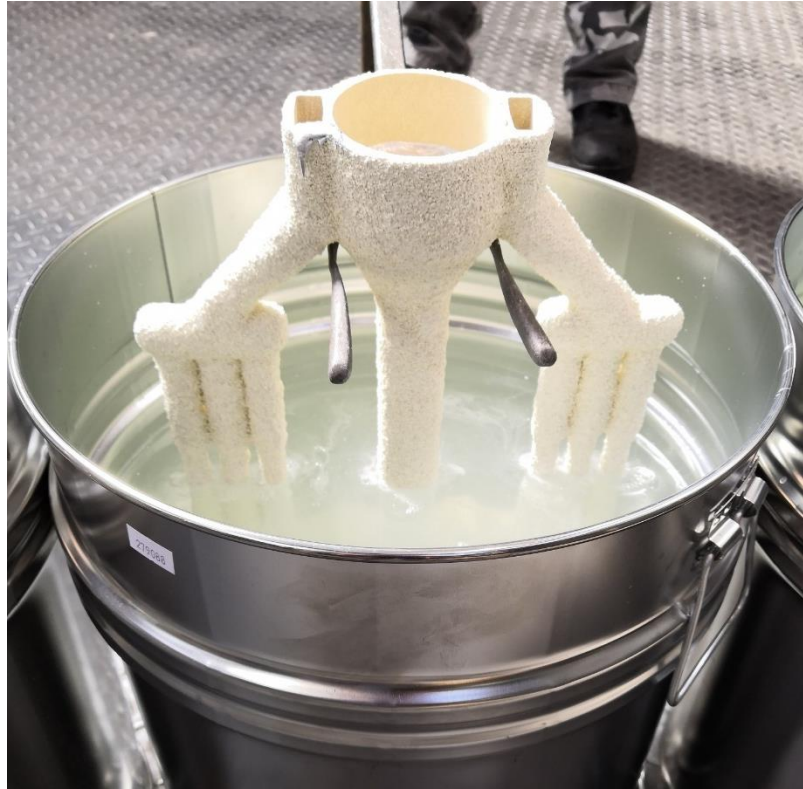
	Koncentrace 1	Koncentrace 2
Polymer 1	8 %	14 %
Polymer 2	5 %	8 %

Křivky ochlazování jsou znázorněny v příloze 1 [32]. Z grafu je patrné, že u polymeru 1 je dosahováno vyšší ochlazovací rychlosti než u polymeru 2.

Byly zvoleny tři metody ochlazování skořepiny v polymeru. V prvním případě se jednalo o pomalé zanořování s cílem vytvořit tuhnoucí frontu a řízeně ochlazovat odlitek od spodu směrem nahoru. Druhým způsobem bylo částečné zanoření, kdy stromečky byly zanořeny pouze do úrovně rozváděcích kanálů, s předpokladem rychlého ztuhnutí spodní části a následného usměrněného tuhnutí od spodu směrem nahoru. Posledním způsobem bylo rychlé zanoření celého stromečku do polymeru. Způsoby ochlazování jsou detailněji popsány a vyhodnoceny níže.

Roztoky byly rozděleny vždy tak, že ve dvou nádobách byl jeden polymer o jedné koncentraci, pro možnost opakování pokusů bez přehřívání lázně. Každý ze způsobů ochlazování byl prováděn minimálně dvakrát, aby vzniklo 12 zkušebních tyčinek. Po každém provedeném ochlazení a vyjmutí skořepiny z nádoby bylo provedeno měření teploty lázně. Teplota by podle výrobce neměla přesáhnout 40 °C, aby si zachovala své vlastnosti [29].

- **Pomalé zanořování** – při pomalém zanořování byl stromeček po odlití uchopen do slévárenských vidlí, jak je znázorněno na obr. 37. Zanořování bylo prováděno ručně, přes opěrný stojan. Rychlost zanořování byla asi $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Na skořepině byly vyznačeny vzdálenosti a byl měřen čas. Tím bylo dosaženo alespoň orientačně zvolené rychlosti. Při zanořování docházelo jen k mírnému vývinu bublin v polymeru bez vývinu kouře. Po zanoření stromečku až po nálevku, kdy došlo i k jejímu ztuhnutí, byl stromeček vytažen a odložen do připravené bedny, kde došlo k jeho ochlazení na teplotu okolí.

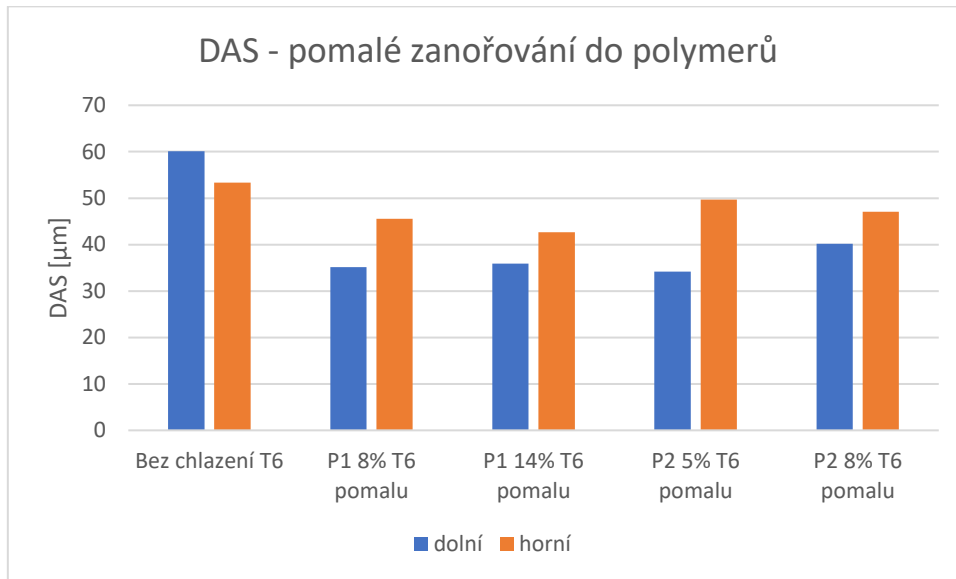


Obr. 37 Zanořování skořepiny do polymeru pomocí vidlí

Výsledky pomalého zanořování jsou zpracovány v tabulce 7. Hodnoty DAS jsou zpracovány graficky viz obr. 38. Mechanické vlastnosti nebyly z důvodu jejich nízkých hodnot statisticky vyhodnocovány.

Tabulka 7 Výsledné hodnoty pomalého zanořování do polymerů

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	DAS horní [μm]	DAS dolní [μm]
Bez chlazení, T6	318,0±6,6	252,9±13,4	5,3±1,2	53,3±15,7	60,1±16,9
P1, 8 %, T6	293,7	245,1	2,5	45,6±7,6	35,1±6,4
P1, 14 %, T6	260,9	237,0	1,1	42,7±12,1	35,9±11,0
P2, 5 %, T6	275,6	240,2	2,3	49,7±15,8	34,2±10,2
P2, 8 %, T6	265,5	242,9	0,7	47,1±16,6	40,2±11,2

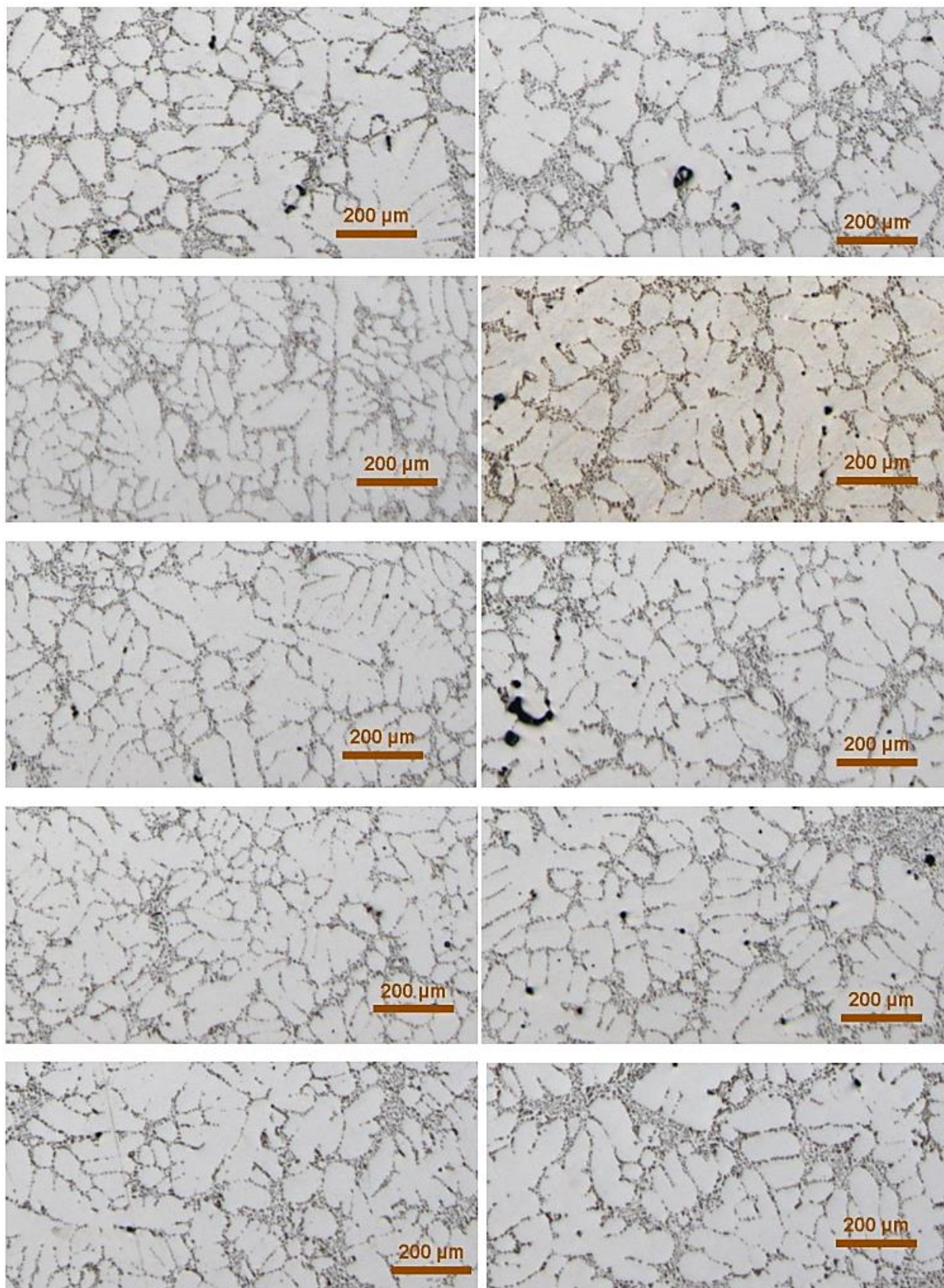


Obr. 38 Průměrné hodnoty DAS pro horní a dolní vzorek při pomalém zanořování do polymerů

Z výsledků je patrný pokles hodnoty DAS u všech vzorků zanořených do polymerů podle předpokladu. Všechny vzorky odebrané ze spodní části tyčinky vykazují nižší hodnoty DAS než vzorky odebrané z její horní části. Tuto závislost lze pozorovat na přiloženém obr. 39, který znázorňuje jednotlivé mikrostruktury. Obrázky jsou seřazeny tak, že v levém sloupci jsou vzorky odebrané ze spodní části tyčinky a v pravém sloupci vzorky z části horní, pořadí vzorků je stejné jako v předešlé tabulce 7.

Z přiložených mikrostruktur je patrná změna velikosti dendritů a tím i jejich sekundárních os v porovnání s přiloženými mikrostrukturami vzorku ztuhlého na vzduchu bez ochlazování. Patrná je i rozdílná velikost dendritů ze vzorků v horní a dolní části. To je důsledkem vnitřní nehomogenity odlitku, která není vhodná.

Pro získání homogenní struktury by bylo vhodné rychlost zanořování zvýšit. Vzhledem k velmi špatným výsledkům mechanických vlastností, kdy pouze u jednoho vzorku, (konkrétně P1 8 %), dosahovaly hodnoty mechanických vlastností spodních hodnot předepsaných normou, byla tato metoda ochlazování vyloučena. Dalším uvažovaným způsobem bylo částečné zanoření.



Obr. 39 Mikrostruktury jednotlivých vzorků ochlazovaných pomalým zanořením

- **Částečné zanoření** – bylo provedeno tak, že jedinou ponořenou částí stromečku byly rozváděcí kanály, jako je znázorněno na obr. 40. Předpoklad byl vytvoření tuhnoucí fronty ve spodní části odlitku a její postup směrem nahoru.



Obr. 40 Částečné ponoření vzorků

Při tomto pokusu docházelo k částečnému vývinu kouře a páry. Jelikož v nádobě nebyla instalována nucená cirkulace média, docházelo k lokálnímu přehřívání polymeru a jeho varu v okolí skořepiny. V průběhu tuhnutí docházelo ke tvorbě bublin na hladině taveniny. Proces ochlazování trval až do ztuhnutí taveniny v nálevce. Výsledky částečného ponoru jsou vyhodnoceny v tabulce 8. Pro srovnání je vložen řádek s hodnotami vzorku ztuhlého volně na vzduchu bez chlazení.

Tabulka 8 Výsledné hodnoty částečného zanoření vzorků do polymerů

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	DAS horní [μm]	DAS dolní [μm]
Bez chlazení, T6	318,0±6,6	252,9±13,4	5,3±1,2	53,3±15,2	60,1±14,9
P1, 8 %, T6	271,1	246,5	1,5	-	-
P1, 14 %, T6	317,5±4,1	242,9±4,9	6,8±1,2	-	-
P2, 5 %, T6	266,0±35,52	231,0±9,0	1,5±1,1	-	-
P2, 8 %, T6	275,3±16,8	234,6±8,8	1,6±1,0	-	-

Výsledky mechanických hodnot byly opět mnohem horší než u vzorku bez chlazení. DAS nebylo měřeno s ohledem na nízké mechanické hodnoty. U vzorku P1 8 %, po provedení tahové zkoušky byly naměřeny pouze 3 hodnoty, které se zásadně lišily, proto i jejich hodnoty nejsou vypovídající, směrodatná odchylka není uvedena. Výjimkou byl jen vzorek ochlazovaný do P1 o koncentraci 14 %. Výsledky jsou téměř srovnatelné se vzorkem bez chlazení. U tažnosti je dokonce dosahováno ještě vyšších hodnot. Tuto anomálii lze pravděpodobně vysvětlit tak, že vzorek byl zanořen až delší dobu po odlití, kdy již došlo k natuhnutí vnější vrstvy taveniny a tím bylo zabráněno prostupu páry stěnou skořepiny a následné probublání taveniny, jako tomu bylo u některých vzorků. Hodnoty mechanických vlastností nejsou graficky zpracovány z důvodu jejich nízkých hodnot. Proto i tato metoda ochlazování byla vyloučena.

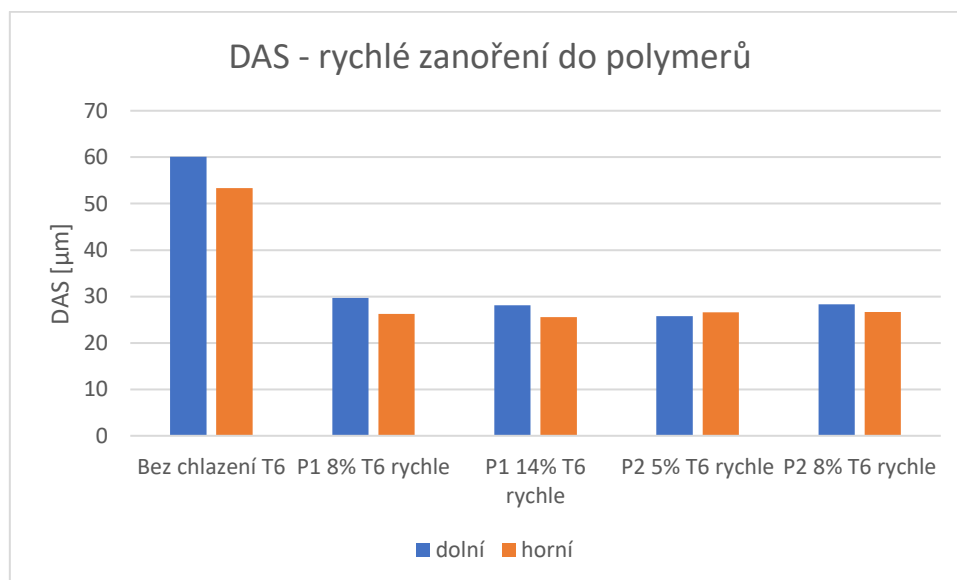
- **Rychlé zanoření** – posledním pokusem bylo zanoření stromečků do polymeru v co nejkratším čase po odlití. Všechny vzorky byly zanořeny, až po nálevku, v intervalu 10 sekund po odlití. Čas se lišil v závislosti na organizaci práce na pracovišti. Během tuhnutí bylo pomocí vidlí se vzorky pohybováno pro částečnou cirkulaci média, aby nedocházelo k lokálnímu přehřívání polymeru a tím ke tvorbě páry, která by mohla taveninu znehodnotit jako v předešlých případech.

Výsledné průměrné hodnoty mechanických vlastností a hodnoty DAS vzorku s rychlým zanořením jsou zpracovány v tabulce 9.

Tabulka 9 Výsledné mechanických hodnot a DAS při rychlém zanoření

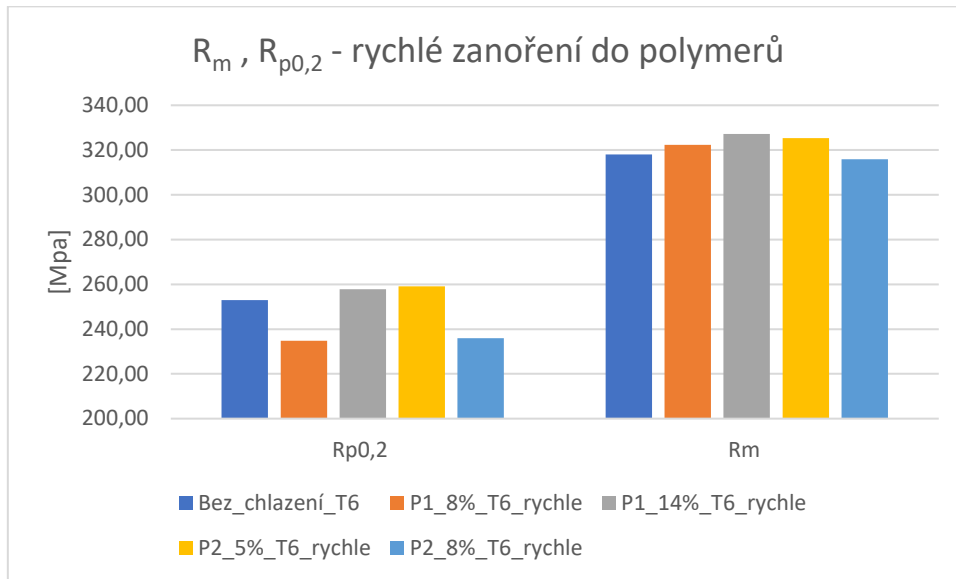
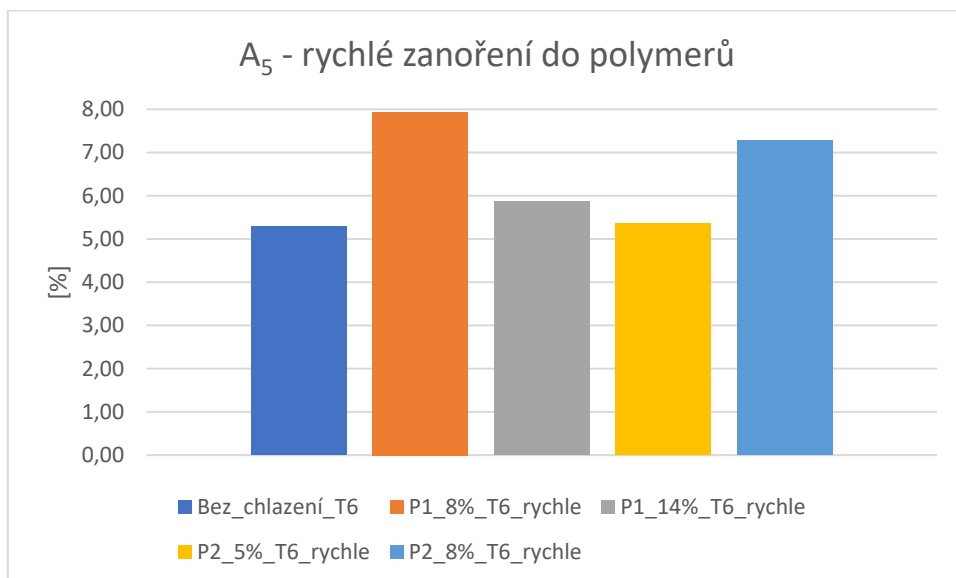
Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]	DAS horní [μm]	DAS dolní [μm]
Bez chlazení, T6	318,0±6,6	252,9±13,4	5,3±1,2	53,3±15,7	60,1±16,9
P1, 8 %, T6	322,3±7,6	234,8±7,6	7,9±3,0	26,3±6,8	29,7±6,0
P1, 14 %, T6	327,2±15,7	257,9±4,2	6,3±3,4	25,6±4,2	28,1±6,0
P2, 5 %, T6	325,4±18,2	259,1±6,4	5,4±3,9	26,6±9,0	25,8±7,0
P2, 8 %, T6	315,9±16,2	235,9±14,4	7,3±3,6	26,7±10,8	28,3±4,2

Hodnoty DAS horních a dolních vzorků ztuhlých při rychlém zanořování jsou graficky zpracovány na obr. 41. Z grafu je patrný pokles hodnoty u všech vzorků. Koncentrace roztoku polymeru neměla zásadní vliv na výslednou hodnotu DAS. U všech vzorků došlo v porovnání se vzorkem ztuhlým na vzduchu ke snížení hodnoty DAS na polovinu.



Obr. 41 Průměrné hodnoty DAS pro horní a dolní vzorek při rychlém zanoření do polymerů

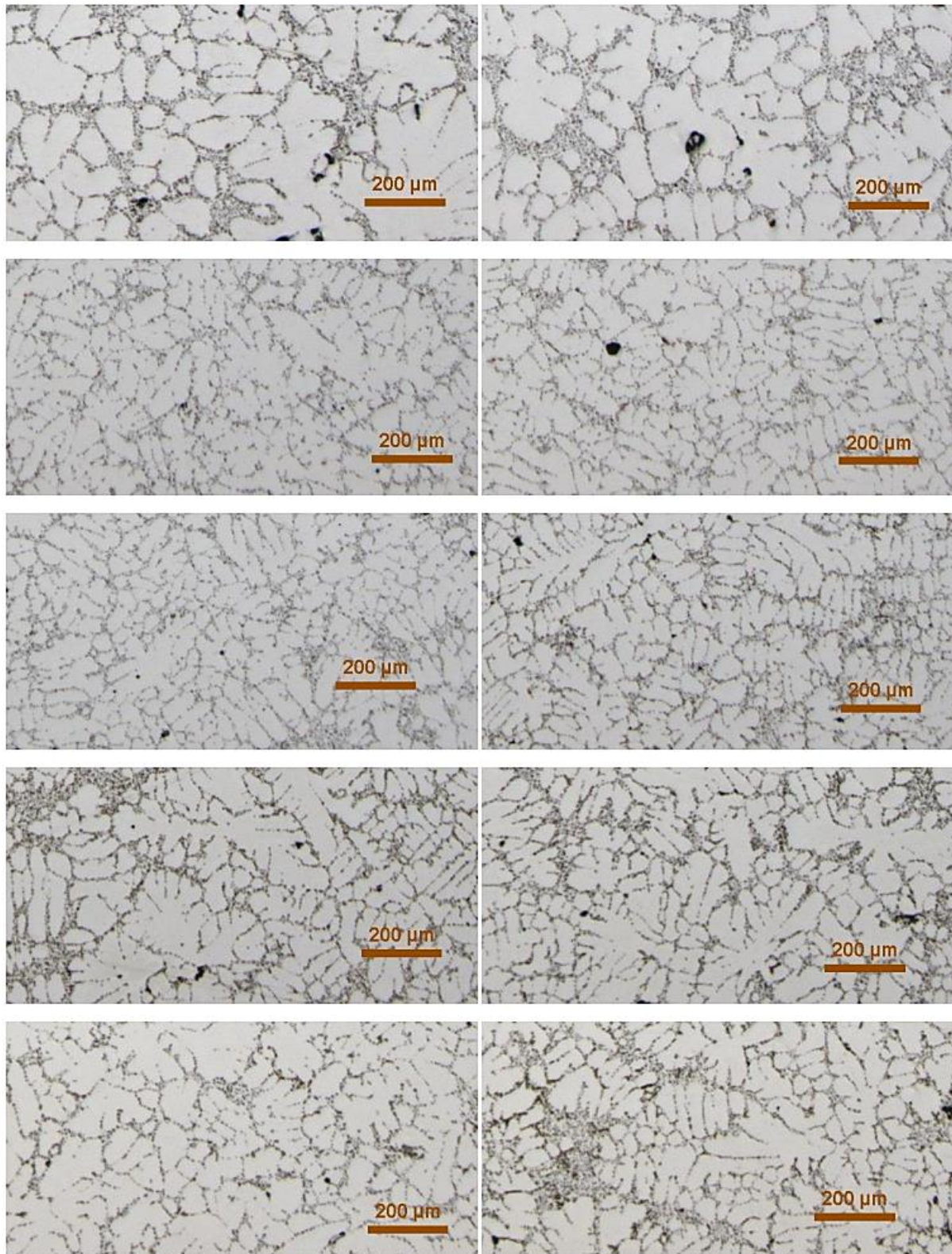
Z výsledných hodnot je patrný drobný nárůst mechanických vlastností. Pro názornost byly mechanické vlastnosti R_m a $R_{p0,2}$ zpracovány i graficky viz obr. 42. Výsledky průměrných hodnot tažností jsou graficky zpracovány viz obr. 43.


 Obr. 42 Hodnoty R_m a $R_{p0,2}$ v závislosti na chladícím médiu


Obr. 43 Průměrné hodnoty tažnosti dosažené při rychlém zanoření do polymerů

Tento způsob ochlazování byl považován jako vhodný a přínosný. Předběžnými favority se stal vzorek P1 14 % s nejlepšími výsledky u parametrů R_m i $R_{p0,2}$ a vzorek P2 5 % s dosahující druhých nejvyšších hodnot. Vzorky z těchto favorizovaných lázní dosahovaly horších hodnot tažností než v lázních zbývajících. Požadovaná hodnota tažnosti byla dosažena vždy. Pro ověření současných byla provedena další zkouška.

Výsledné mikrostruktury vzorků ochlazených rychlým zanořením do polymeru jsou vyobrazeny na obr. 44. Pro porovnání je zde i vzorek ztuhlý bez vnějšího ochlazování. Vzorky jsou seřazeny jako v tabulce 9. V levém sloupci jsou hodnoty vzorku odebraného ze spodní části zkušební tyčinky a v pravém hodnoty odebrané z horní části.



Obr. 44 Mikrostruktury vzorků ochlazované rychlým zanořením do polymerů

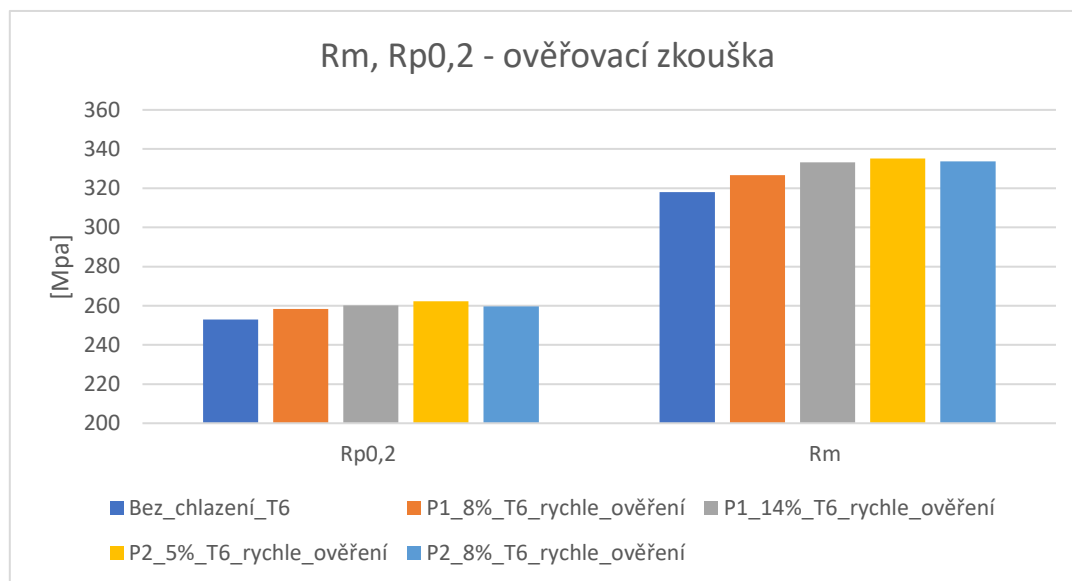
Z mikrostruktur je patrné snížení velikosti dendritů v porovnání se vzorkem bez ochlazování. Při porovnání vzorků odebraných z horní a spodní části zkušební tyčinky rozdíl není patrný. Výsledná struktura je homogenní v celé výšce zkušebního odlitku.

Ověřovací zkouška byla naplánována tak, že ve vzorcích P1 14 % a P2 5 % bude rychle zanořeno po třech stromečcích, z čehož vznikne 18 tyčinek na tahovou zkoušku. Ve vzorcích s horšími výsledky z předešlé zkoušky, konkrétně P1 8 % a P2 8 %, bude rychle zanořeno po dvou stromečcích.

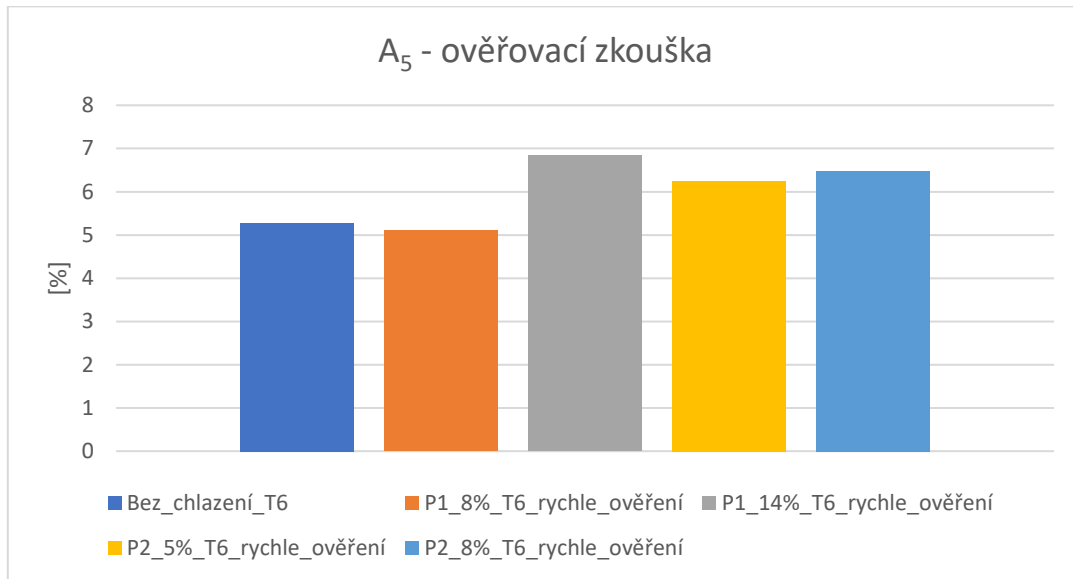
Výsledky mechanických vlastností opakované zkoušky rychlého zanoření jsou vyhodnoceny v tabulce 10. Hodnoty DAS již nebyly měřeny, jelikož pro praktické využití odlitků mají hlavní význam dosažené mechanické vlastnosti. Dále byly jednotlivé mechanické vlastnosti zpracovány graficky viz obr. 45 a 46, vždy v porovnání dosažených hodnot u vzorku ztuhlého volně na vzduchu bez ochlazování.

Tabulka 10 Výsledky mechanických hodnot opakované zkoušky rychlého zanoření

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]
P1, 8 %, T6	326,7±21,2	258,3±11,9	5,1±3,2
P1, 14 %, T6	333,2±13,0	260,1±11,8	6,8±3,3
P2, 5 %, T6	335,1±10,4	262,3±9,6	6,3±2,7
P2, 8 %, T6	333,7±16,1	259,7±14,4	6,5±4,1



Obr. 45 Průměrné dosažené hodnoty R_m a $R_{p0,2}$ při ověřovací zkoušce



Obr. 46 Průměrné hodnoty tažnosti při ověřovací zkoušce

Opakovanou zkouškou byla potvrzena vhodná volba rychlého zanoření vzorků do polymerů. Nejlepších hodnot mechanických vlastností bylo dosaženo u předpokládaných vzorků. Požadovaných hodnot bylo dosaženo. Některé vzorové tyčinky dosahovaly hodnot meze pevnosti převyšující 340 MPa. U sledovaného parametru tažnosti bylo dosaženo požadované hodnoty 4 %. Ve všech případech byla tato hodnota vyšší. U parametru smluvní mez kluzu bylo dosahováno spodní hranice požadovaných hodnot.

2.5.4 Řízené naplynění taveniny

Po obrazové analýze byla na všech vzorcích zjištěna mikroporozita. U konkrétního vzorku P2 5 % dosahovala naměřená celková porozita hodnoty 0,29 % u vzorku ze spodní části a 0,30 % u vzorku odebraného z horní části zkušební tyčinky. Ve většině případů se jedná o velmi malé rozptýlené bublinky. V některých případech byla detekována mikrostaženina ve tvaru mezidenritických prostor. Tento tvar je považován za méně vhodný než tvar kulaté bubliny. Ostré tvary mezidenritických prostor slouží jako koncentrátoři napětí a při zatížení se v nich iniciuje trhlinka.

Pro změnu mikrostaženin v mikroporozitu je vhodný proces řízeného naplynění taveniny. Po oslovení firmy Šebesta – služby slévárnám a následné konzultaci byl dodán přípravek Probat Fluss MIKRO 100 pro řízené naplynění taveniny.

Počet a velikost bublin, které vznikají během tuhnutí materiálu, je dán množstvím rozpuštěného vodíku a množstvím vhodných zárodků, které jsou v tavenině přítomny. Při velkém množství vodíku, ale malém zárodků, získáváme ve výsledné struktuře malé množství velkých bublin. S tím se setkáváme při aplikaci naplyňovacích tablet. [33]

Pokud zachováme množství vodíku, ale zvýšíme množství heterogenních zárodků v tavenině, bude ve výsledné struktuře vyšší obsah bublin, které budou menší. Pokud tavenině dáme k dispozici velké množství zárodků, tak již při malém obsahu vodíku obdržíme v konečné struktuře velké množství malých bublin. Ve výsledné struktuře proto eliminujeme nedostatek tekutého kovu dosazovaného do tepelného uzlu během tuhnutí pomocí tvorby bublin, které však nejdou vidět na rentgenu. Součet objemu bublin v konečném efektu eliminuje stahování. [33]

Po konzultaci s dodavatelem byly pro účel experimentu určeny 4 koncentrace přípravku MIKRO 100 v tavenině. Koncentrace jsou 0,25 %, 0,5 %, 1,00 % a 1,5 %, jedná se o hmotnostní procenta vzhledem k vsázce tavící pece. Přípravek je dodáván ve formě tyčí jako předslitina. Tyče byly naděleny a rozváženy pro dosažení koncentrací.

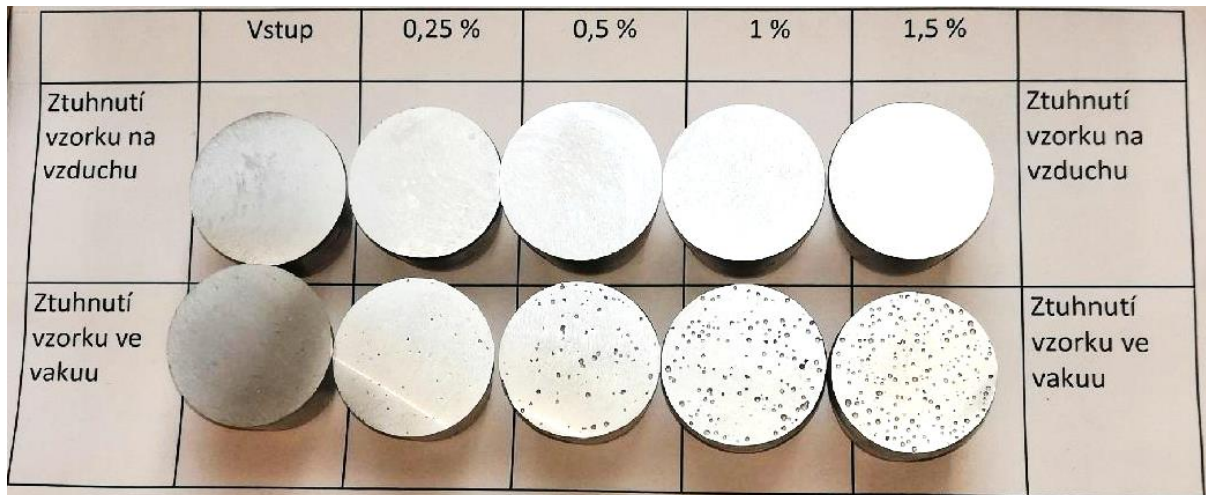
Po standardní přípravě taveniny očkování, modifikace, odplynění a stažení hladiny byl odebrány vzorky pro chemický rozbor a pro měření DI. Následně došlo k aplikaci první dávky přípravku MIKRO 100 do taveniny pro dosažení koncentrace 0,25 %. Po jeho rozpuštění došlo k vyublaní na povrch taveniny, ta se podle technického listu musí zanořit a rozmíchat. Po zamíchání byl znovu měřen DI. Následně došlo k odlití čtyř stromečků, z nichž dva tuhly na vzduchu a dva byly rychle zanořeny do roztoku polymeru 2 o koncentraci 8 %.

Po odlití první zkoušky byla provedena druhá. Do taveniny byl přidán navážený prostředek pro výslednou koncentraci 0,50 % a znovu byly odlity čtyři stromečky, se stejnými parametry ochlazování jako v první zkoušce. Následovalo přidání přípravku pro dosažení koncentrace 1,00 % a následně 1,50 %. Vždy byly odlity čtyři stromečky a způsob ochlazování byl vždy stejný. Po každém odlití byla měřena teplota roztoku polymeru, aby nedošlo k jeho přehřátí.

Vliv obsahu přípravku MIKRO 100 na následné hodnotě DI je zpracováno v tabulce 11. Na obr. 47 je patrný vliv koncentrace přípravku na množství vzniklých bublin v tavenině, vzorky jsou seřazeny stejně jako v tabulce. V horním řádku jsou vzorky ztuhlé na vzduchu, ve spodním vzorky ztuhlé ve vakuu při měření DI.

Tabulka 11 Vliv obsahu MIKRO 100 na DI

Koncentrace MIKRO 100	0,00 %	0,25 %	0,50 %	1,00 %	1,50 %
DI	0,75 %	1,88 %	3,77 %	9,13 %	12,55 %



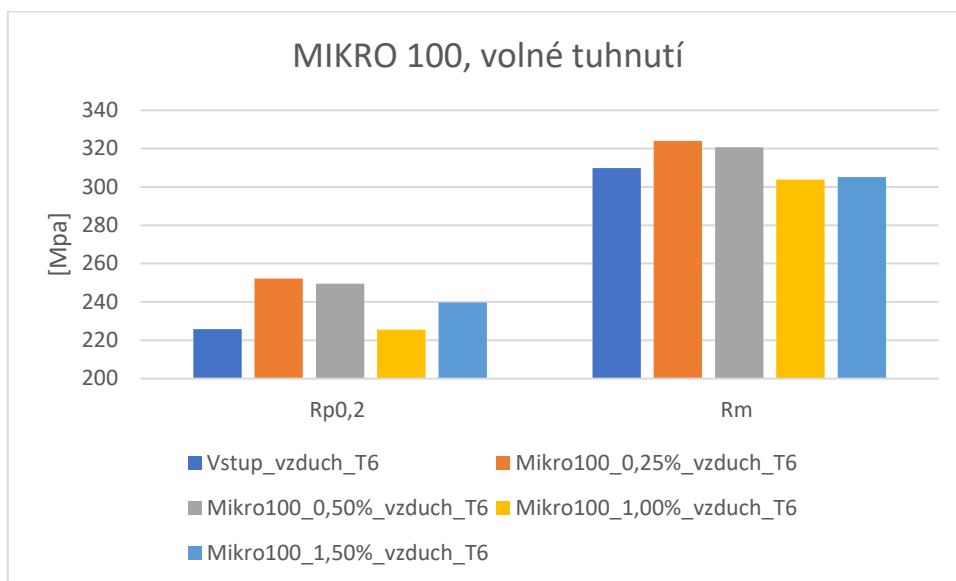
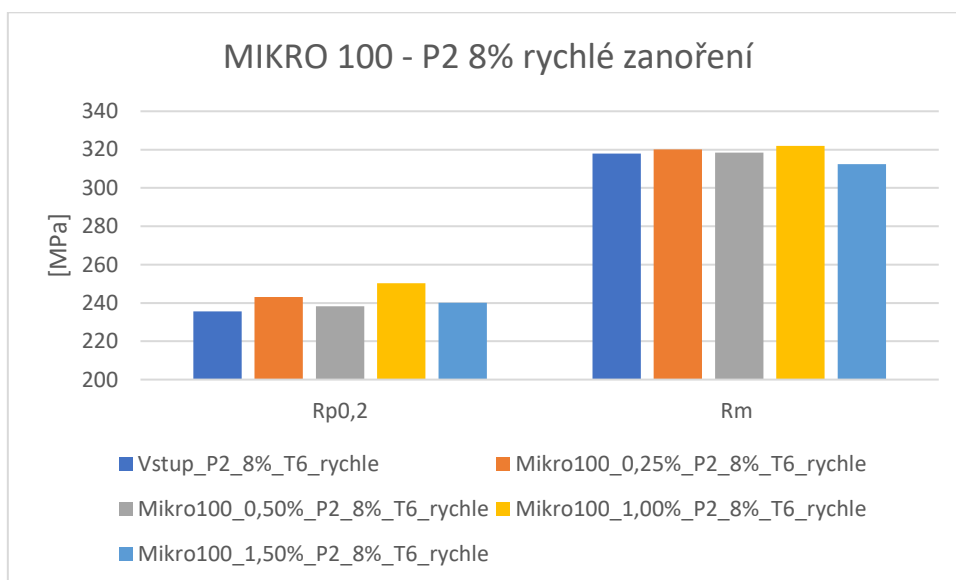
Obr. 47 Vliv obsahu přípravku MIKRO 100 na naplynění taveniny

Naměřené hodnoty mechanických vlastností vzorků s využitím přípravku MIKRO 100 jsou zpracovány v tabulce 12.

Tabulka 12 Výsledné mechanické hodnoty při různých koncentracích přípravku MIKRO 100

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_5 [%]
0,00 % MIKRO 100, vzduch, T6	309,8±7,0	225,8±9,0	7,6±2,7
0,00 % MIKRO 100, P2 8 %, T6	317,9±12,6	235,6±15,5	7,2±2,8
0,25 % MIKRO 100, vzduch, T6	324,1±4,6	252,3±10,8	7,1±2,0
0,25 % MIKRO 100, P2 8 %, T6	320,2±12,3	243,1±18,1	6,5±2,4
0,50 % MIKRO 100, vzduch, T6	320,7±6,2	249,5±17,6	7,2±1,5
0,50 % MIKRO 100, P2 8 %, T6	318,4±15,4	238,2±24,6	8,3±2,8
1,00 % MIKRO 100, vzduch, T6	303,8±3,6	225,4±8,2	7,3±1,5
1,00 % MIKRO 100, P2 8 %, T6	321,9±7,6	250,2±9,0	7,1±2,4
1,50 % MIKRO 100, vzduch, T6	305,1±3,2	239,6±15,1	5,2±1,0
1,50 % MIKRO 100, P2 8 %, T6	312,4±6,0	240,1±12,6	6,8±1,5

Výsledky mechanických vlastností vzorků ztuhlých volně na vzduchu jsou zpracovány graficky viz obr. 48. U vzorků s koncentrací přípravku MIKRO 100 0,25 % a 0,50 % se projevil nárůst hodnot R_m a $R_{p0,2}$. Se zvyšujícím se obsahem přípravku hodnoty klesaly. U vzorku bez obsahu přípravku (u standardně lité taveniny) byly naměřeny hodnoty menší než v předchozích zkouškách. Hodnoty tažnosti u všech vzorků byly vyšší než požadované hodnoty. Ze zjištěných hodnot pravděpodobně došlo k chybě při procesu TZ.


 Obr. 48 Vliv koncentrace přípravku MIKRO 100 na R_m a $R_{p0,2}$

 Obr. 49 Vliv koncentrace přípravku MIKRO 100 na R_m a $R_{p0,2}$

U vzorků obsahující přípravek MIKRO 100 zchlazených do polymeru 2 o koncentraci 8 % nedošlo k nárůstu mechanických vlastností, pravděpodobně z důvodu velmi rychlého ztuhnutí, kdy nebyl dostatek času k nukleaci a vývinu bublin. Teorii by mohla být potvrzena na metalografickém výbrusu. Ty se ovšem nedělaly z důvodu nedostatečných mechanických hodnot.

2.6 Shrnutí

Řízená krystalizace ve smyslu zjemnění zrna v průběhu tuhnutí taveniny pomocí ochlazování skořepiny je velmi náročný proces. Zjemnění zrna je všeobecně vyžadováno ve slévárnách pro získání vyšších mechanických vlastností finálního odlitku. Některé slévárny přesného lití hliníkových odlitků ve světě, ale v současné době i v České republice již ovládly tento proces, nebo se o to pokoušejí. Jelikož se jedná především o slévárny dodávající odlitky pro letecký a kosmický průmysl, je zvládnutí tohoto procesu náročné na čas i finance. Ovládnutí procesu také díky zvýšeným hodnotám mechanických vlastností a vyšší jakosti odlitku předurčuje slévárnu dodávající takovéto odlitky jako konkurenceschopnější. Z tohoto důvodu si slévárny chrání své „know how“ a v literatuře se nevyskytuje mnoho informací o tomto procesu.

Z tohoto důvodu bylo ve slévárně MESIT rozhodnuto o vlastním vývoji řízené krystalizace hliníkových odlitků pomocí ochlazování skořepiny v procesu tuhnutí taveniny. Ve slévárně MESIT byly již dříve zkoušeny způsoby zrychleného ochlazování skořepiny ihned po odlití, jako například její ofukování stlačeným vzduchem nebo zanořování do vody. Způsob ofukování je běžně ve slévárně MESIT používán pro ochlazování tepelných uzlů určitých odlitků, nikoliv však pro zjemnění zrna. Proces zanořování skořepiny do vody se ukázal jako nevyhovující, a to především z důvodu vysokého vývinu vodní páry, která se dostávala prodyšnou skořepinou až do taveniny, kde způsobovala její naplynění. To vedlo ke znehodnocení výsledného odlitku. Tato diplomová práce by měla navázat na zmíněné neúspěšné předešlé pokusy a měla za úkol především ověřit reálné možnosti zrychleného ochlazování v průběhu tuhnutí odlitku.

Pro experimentální část byly odlévány sestavy normovaných zkušebních tyčinek určených pro statickou zkoušku tahem. Příprava taveniny probíhala standardně, se vstupem 50 % vratného materiálu a 50 % nového materiálu. Všechny zkušební vzorky byly odlévány ze stejné lící teploty. U všech vzorků bylo provedeno tepelné zpracování T6.

Rozdíly byly pouze v metodách ochlazování skořepiny. Průběh experimentu byl naplánován tak, že nejdříve byly pro porovnání odlity vzorky bez jakéhokoliv ochlazování, tzn. volně chladnoucí na vzduchu. Hlavní část experimentu pak byla zaměřena na chlazení odlitých skořepin pomocí stlačeného vzduchu a poté především ponořováním do různých kapalin (voda, roztok polymerů). Následně byl proveden ještě jeden nový pokus ochlazování pomocí vodní mlhy.

Výsledky mechanických vlastností u vzorků ochlazovaných pomocí stlačeného vzduchu dosahovaly u nižšího z tlaků srovnatelné hodnoty jako u vzorku bez ochlazování, došlo jen k nepatrnému poklesu hodnoty DAS. Hodnota DAS však byla rozdílná v rámci jedné zkušební tyčinky, a to tak, že u vzorku odebraného z její horní části a dolní části docházelo k rozdílu. Paradoxně byly hodnoty DAS nižší u vzorku z horní části než u vzorku z dolní části, kde docházelo k ofukování. Toho bylo dosaženo pravděpodobně spodním plněním stromečku, kdy nejchladnější tavenina byla vždy v horní části tyčinek. U vzorku ochlazovaného vyšším tlakem byly mechanické hodnoty nepatrně vyšší než u vzorků bez ochlazování. U vzorků z horní a dolní části zkušební tyčinky již nebyly patrné rozdílné hodnoty DAS. Ale bylo patrné snížení hodnoty DAS u obou vzorků. Z toho plyne, že se již projevil vliv ochlazování stlačeným vzduchem.

Při ochlazování skořepin zanořením do vody docházelo k velkému vývinu páry, která se dostávala skrze taveninu, kterou následně znehodnotila. Výsledky mechanických vlastností byly nízké a nedosahovaly ani spodní hranice mechanických vlastností daných normou ČSN EN 1706 a ukázaly se společně s metodou jako nepoužitelné. Při použití ochlazování skořepiny pomocí vodní mlhy docházelo k částečnému probublávání taveniny. Výsledky mechanických vlastností byly srovnatelné se vzorkem ztuhlým bez ochlazování. Tento experiment nepřinesl zlepšení vlastností.

Po zakoupení dvou typů „kalících polymerů“ byly naplánovány další pokusy. Nejprve byl každý z polymerů naředěn na dvě různé koncentrace. Pro vlastní ochlazování byly naplánovány tři rychlosti ochlazování. Pomalé ochlazování, kdy byly skořepiny ponořovány rychlostí asi $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále tzv. „částečné zanoření“, kdy byla zanořena jenom spodní část skořepiny (po úroveň spodního rozváděcího kanálu), a nakonec rychlé zanoření celé skořepiny v časovém intervalu nejpozději deset sekund po odlití. Každý způsob zanořování byl proveden do obou polymerů o dvou koncentracích v počtu dvou stromečků. Tím vzniklo u každého způsobu ochlazování v každé ochlazovací lázni dvanáct zkušebních tyčinek pro následné vyhodnocení.

Při pomalém zanořování skořepin do polymerů nedocházelo až na výjimky k probublání taveniny vznikající párou (u polymerů se jednalo o jejich vodná roztok). Hodnoty mechanických vlastností po tomto způsobu ochlazování nedosahovaly ani spodních hodnot udávaných normou. Ovlivnění sledovaného parametru DAS se již dosáhlo. Vzorek odebraný ze spodní části zkušební tyčinky vykazoval nižší hodnoty DAS než vzorek odebraný z její horní části. Celkově došlo k asi 30% poklesu hodnoty DAS v porovnání se vzorkem ztuhlým bez ochlazování. Rozdílné hodnoty v horní a spodní části lze vysvětlit pomalým zanořováním. K dosažení stejných hodnot by zřejmě měla být rychlost zanořování vyšší. Kvůli nízkým hodnotám mechanických vlastností byla metoda pomalého zanořování skořepiny zamítnuta.

V dalším pokusu, tj. při částečném zanoření, byla zanořena pouze spodní část stromečku s cílem vytvořit tuhnoucí vrstvu od spodu nahoru. Bylo provedeno ochlazení jednoho stromečku v každém z polymerů v obou koncentracích. Výsledky mechanických hodnot až na jeden případ nedosahovaly ani na spodní hodnotu předepsanou normou. V jednom případě byly výsledky mechanických vlastností srovnatelné se vzorkem ztuhlým bez ochlazování. Tuto výjimku od ostatních vzorků lze vysvětlit možným zpožděním počátku ochlazování, kdy mohlo dojít k natuhnutí vrstvy taveniny, přes kterou se již nedostala pára. Z důvodu rozdílné hodnoty DAS v horní a dolní části zkušební tyčinky, z toho plynoucí vnitřní strukturní heterogenitě a nedostatečných mechanických vlastností byla metoda částečného zanoření zamítnuta.

Posledním z pokusů ochlazování skořepin v „kalících polymerech“ byla metoda rychlého zanoření. K zanoření došlo nejpozději deset sekund po odlití. Vždy byl ochlazován minimálně jeden stromeček v každém z polymerů v obou koncentracích. Hodnoty mechanických vlastností ukázaly tuto metodu jako vhodnou. U dvou vzorků bylo dosaženo srovnatelných hodnot mechanických vlastností jako u vzorku ztuhlého bez ochlazování. U dalších dvou vzorků bylo dosaženo vyšších hodnot. Metoda rychlého ochlazení v polymeru se ukázala jako vhodná. Pro ověření hodnot byla proto následně provedena ještě další zkouška. U dvou chladících lázní (P1 8% a P2 8%), kde bylo v předešlém pokusu dosaženo srovnatelných výsledků, byly ochlazovány vždy dva stromečky. U zbývajících dvou lázní (P1 14% a P2 5%), kde bylo dosaženo mechanických hodnot vyšších, byly odlity stromečky tři. Následné výsledky potvrdily vhodnost vybraných lázní o daných koncentracích. Hodnoty mechanických vlastností dosahovaly hodnot vyžadovaných slévárnou. Hodnoty parametru DAS dosahovaly polovičních hodnot v porovnání se vzorkem ztuhlým bez ochlazování.

Poslední zkouškou celého experimentu bylo naplánováno řízené naplynění taveniny pomocí přípravku MIKRO 100. Bylo předpokládáno nahrazení místy se vyskytující mikrostaženiny bublinkami, a tím zvýšení mechanických vlastností. Cíle nebylo dosaženo z důvodu již velmi malé mikroporozity současných odlitků z důvodu výborného odplynění. Přípravek je spíše vhodný pro masivní odlitky, kde kompenzuje staženiny a ne mikrostaženiny. Mechanické vlastnosti byly srovnatelné s hodnotami u vzorku ztuhlého bez ochlazování.

ZÁVĚR

Zjemnění zrna pomocí ochlazování hliníkových odlitků v průběhu tuhnutí taveniny je složitý a specifický proces. Cílem diplomové práce bylo nalezení nejvhodnějšího způsobu ochlazování skořepiny pro získání jemnějšího zrna a dosažení předepsaných požadovaných hodnot mechanických vlastností, které jsou výrazně vyšší, než požaduje norma ČSN EN 1706.

Ze všech zkoušených metod v průběhu experimentu byla vybrána ta metoda ochlazování, která vykazovala nejlepší výsledky mechanických vlastností. Jednalo se o rychlé ochlazování do chladícího média (kalícího polymeru) o vybrané koncentraci. Výsledky experimentu potvrdily, že rozhodujícím faktorem na mechanické vlastnosti byla rychlost ochlazování, přičemž faktor koncentrace vybraného polymeru byl v pořadí důležitosti až jako druhý. Rovněž se potvrdilo, že na hodnotu DAS má pozitivní vliv pouze rychlost ochlazování. Pro praktické využití náročných odlitků jsou nejdůležitějším parametrem mechanické vlastnosti. Hodnota DAS je spíše informativní a nemusí být vždy v korelaci s ostatními výsledky. Ukázalo se také, že je velmi důležité mít dokonale zvládnutou technologii řízené krystalizace ve smyslu opakovatelnosti a tím k udržení neshodné výroby na přijatelné úrovni. Právě z důvodu opakovatelnosti a náročnosti na přesnost je nutné řízenou krystalizaci automatizovat.

Požadovaných mechanických hodnot, bylo dosaženo ochlazováním metodou rychlého zanoření (do 10 sekund po odlití skořepiny) do roztoku vybraného kalícího polymeru o dané koncentraci.

Pro získání ještě vyšších mechanických hodnot doporučuji ve výzkumu pokračovat těmito směry:

- Zaměřit se pouze na ochlazování metodou rychlého zanoření skořepinové formy do roztoku již vybraného polymeru, pomalé zanoření není efektivní.
- Rychlost zanoření stanovit přesněji pomocí robotického pohybu budoucího pracoviště.
- Zaměřit se na výběr nejvhodnější koncentrace roztoku vybraného polymeru.
- Zaměřit se na optimální teplotu chladící lázně vybraného polymeru.
- Ověřit výsledky vybraného polymeru s nucenou cirkulací chladícího média.

Rovněž následné tepelné zpracování může a nepochybně také zásadně ovlivňuje mechanické vlastnosti odlitku. Tento fakt byl ve slévárně MESIT vyhodnocen tak, že s ohledem na experimenty provedené v minulosti jsou současné používané parametry tepelného zpracování považovány za optimální.

Ve slévárně MESIT je plánováno experimentální robotické pracoviště pro výzkum řízeného tuhnutí, jehož ústředním mechanickým prvkem bude robot ABB v provedení pro slévárnu. Robot zajistí potřebnou míru přesnosti, opakovatelnosti a volnosti pro dokončení tohoto náročného úkolu. Pracoviště bude instalováno a spuštěno v červenci roku 2022 a je součástí dotačního programu Aplikace VIII. S názvem programu „Vývoj technologie řízeného tuhnutí odlitků ze slitin hliníku pro letecký průmysl“ pod registračním číslem CZ.01.1.02./0.0./0.0./20_321/0024381.

Výsledky experimentální části diplomové práce jsou zásadními vstupními fakty a informacemi pro vybavení a nastavení tohoto výzkumného pracoviště. Důležité údaje jako např. výběr polymeru, jeho koncentrace a rychlost ochlazování budou základem pro další výzkum a vývoj ve slévárně MESIT na novém pracovišti. Věřím, že diplomová práce svými výsledky a doporučeními může v konečném důsledku pomoci urychlit vývoj a také úsporu finančních prostředků ve slévárně MESIT v dalším výzkumu řízeného tuhnutí odlitků a zavedení této technologie do praxe.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [34]

1. *MESIT times: 1952-2022 jsme s vámi už sedmdesát let.* 2. vydání. Březen 2022.
2. MESIT FOUNDRY. *Příručka kvality MESIT foundry.* 4. vydání. Uherské Hradiště, 2021.
3. FIMES, a.s. *Výzkum a vývoj technologie výroby rozměrných, tenkostěnných a vysoce jakostních odlitků z Al slitin (ALFA-TA 01010766): Odborná zpráva o postupu jednotlivých prací a dosažených výsledcích.* Uherské hradiště 2012
4. BEELEY, P.R., R.F. SMART. *Investment Casting.* 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
5. HORÁČEK, M.: *Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu.* In: *Odbor slévárenství* [online]. ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit.2014-03-03]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>
6. SOUKUPOVÁ, L., HORÁČEK, M., VAŠŤÁK, P. a KRUMREI, T. *Optimalizace technologie skořepinové formy pro odlitky ze slitin Al litých metodou vytavitelného modelu.* *Slévárenství.* 2014, **62**(5-6), 152-155. ISSN 0037-6825.
7. HIRST, R.: *Cost Reduction Through Wax Reclamation: EICF Best Practise Workshop Bilbao.* *Investment Casting Wax* [online]. 2005 [cit. 2012-05-24]. z: <http://investmentcastingwax.com/doenloads/tl3.pdf>.
8. TALANDA, I., HORÁČEK, M. a JEDOVNICKÝ, J. *Moderní voskové směsi a výběr jejich nejvhodnějších kombinací pro slévárnu Fimes, a.s.* *Slévárenství.* Brno, 2012, **60**(9-10), 332-336. ISSN 0037-6825.
9. MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku.* 1. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s.: il. ISBN 80-89041-88-4.
10. ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
11. VAŠŤÁK, P. *Pracovní předpis 132502: Tavení a odlévání hliníkových odlitků.* Uherské Hradiště, 2021.
12. AEROSPACE TECHNOLOGY. *TITAL: Titanium Investment Castings, Aluminium Investment Castings, HERO Premium Casting® and Rapid Prototyping* [online]. Londýn, 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.aerospace-technology.com/contractors/sub_contract/tital/
13. BLAŽÍK, P. *Lití na vytavitelný model – progresivní slévárenská technologie.* Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
14. ALUCAST. *O nás* [online]. Tupesy, 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://alucast.cz/cs/o-nas>
15. KUČERA, T. *Pracovní předpis 131007: Zkouška RTG.* Vydání 2./ revize 2. Uherské Hradiště, 2014.
16. SHIN, D., SHYAM, A., LEE, S., YAMAMOTO, Y. a HAYNES, J. A. *Solute segregation at the Al/θ'-Al₂Cu interface in Al-Cu alloys.* *Acta materialia* [online]. OXFORD: Elsevier, 2017, **141**(C), 327-340 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi: 10.1016/j.actamat.2017.09.020
17. JANG, D.H., PARK Y.B. a W.J KIM. *Significant strengthening in superlight Al-Mg alloy with an exceptionally large amount of Mg (13 wt%) after cold rolling.* *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and*

- processing* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2019, (744), 36-44 [cit. 2022-05-08]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi: 10.1016/j.msea.2018.11.132
18. ZHU, K., PAN, J., HE, K., WU, N. a ZENG, J. Study on Aging Characteristics of Cast A357 Alloy. *Procedia Manufacturing* [online]. Elsevier B.V, 2019, **37**, 247-252 [cit. 2022-05-13]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2019.12.043 (DAS)
 19. ČSN EN 1706. *Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha, 2020.
 20. SHELL-O-MATIC. *Wax delivery systems* [online]. Montreal, Quebec, 2017 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.shellomatic.com/products/wax-delivery-systems/>
 21. VAŠŤÁK, P. *Pracovní předpis 132200: Výroba skořepinových forem*. Vydání 1./ revize2. Uherské Hradiště, 2021.
 22. VAŠŤÁK, P. *Pracovní předpis 132300: Vytavování*. Vydání 2./ revize 4. Uherské Hradiště, únor 2022. [X]
 23. LAC. *Vozokomorová pec VKT* [online]. Židlochovice, 2021 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/vozokomorova-pec-vkt>
 24. ELSKLO. *Katalog pecí: Slévárenské pece Al/Cu* [online]. Tanvald, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <http://www.elsklo.cz/cs/katalog-peci/stacionarni-udrzovaci-elektricke-kelimkove-pece-pro-slitiny-hliniku.html>
 25. KOVO STANĚK s.r.o. *Nová tryskáč zařízení závěsná* [online]. Brumovice na Moravě, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <http://www.kovostanek.cz/tryskaci-zarizeni/>
 26. LAC. *Žíhací pece: Horizontální komorová pec s nucenou cirkulací KNC/H* [online]. Židlochovice, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/horizontalni-komorova-pec-s-nucenou-cirkulaci-knc>
 27. ŠMÍD, D. *Pracovní předpis 132930: Svařování odlitek*. Uherské Hradiště, 2012.
 28. MAROŠ, B. *Test odlehých hodnot* [elektronická pošta]. Message to: 191413utbr.cz. 16. května 2022 8:27 [cit. 2022-05-19]
 29. BIANCE, Anne-laure, CLANET, C. a QUÉRÉ, D. Leidenfrost drops. *Physics of fluids (1994)* [online]. MELVILLE: AMER INST PHYSICS, 2003, **15**(6), 1632-1637 [cit. 2022-05-15]. ISSN 1070-6631. Dostupné z: doi:10.1063/1.1572161(Leidenfrost)
 30. ESCOND. *SERVISCOL 98S: TL_Polyquench_500D-AL*. Čerčany, 2016. (polymer 1)
 31. ESCOND. *SERVISCOL 98S: TL_Polyquench_VP85KB-F1*. Čerčany, 2016. (polymer 2)
 32. SCHIRNER, R. *VP85KBF1 10% P500DAL 10%*. Stuttgart, 2021.
 33. HORKÝ, K. a VRTÍLEK, J. Eliminace staženin pomocí přípravku Probat Fluss MIKRO 100. *Slévárenství*. Brno, 2008, **56**(7-8), 357-358. ISSN 0037-6825.
 34. CITACE PRO, *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2022-05-20]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
L	vzdálenost měřená přes sekundární větve dendritu	[μm]
n	počet sekundárních větví dendritu	[-]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
A_5	tažnost	[%]
DAS	Vzdálenost sekundárních os dendritů	[μm]

Zkratky

Označení	Legenda
TZ	tepelné zpracování
DI	Dichte index
RP	Rapid prototyping
CNC	Computer Numerical Control

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Křivky ochlazování QC POLYQUENCH VP85KB-F1 10 % POLYQUENCH
500D-AL 10 % -2021-08-03
- Příloha 2 Naměřené hodnoty DAS
- Příloha 3 Naměřené mechanické vlastnosti

Seznam výkresů

Trhací tyčinky, 23-01-007-F-059

Příloha 1

Křivky ochlazování polymerů POLYQUENCH VPK85KB-F1 10 % a POLYQUENCH 500D-AL 10 %. [26]

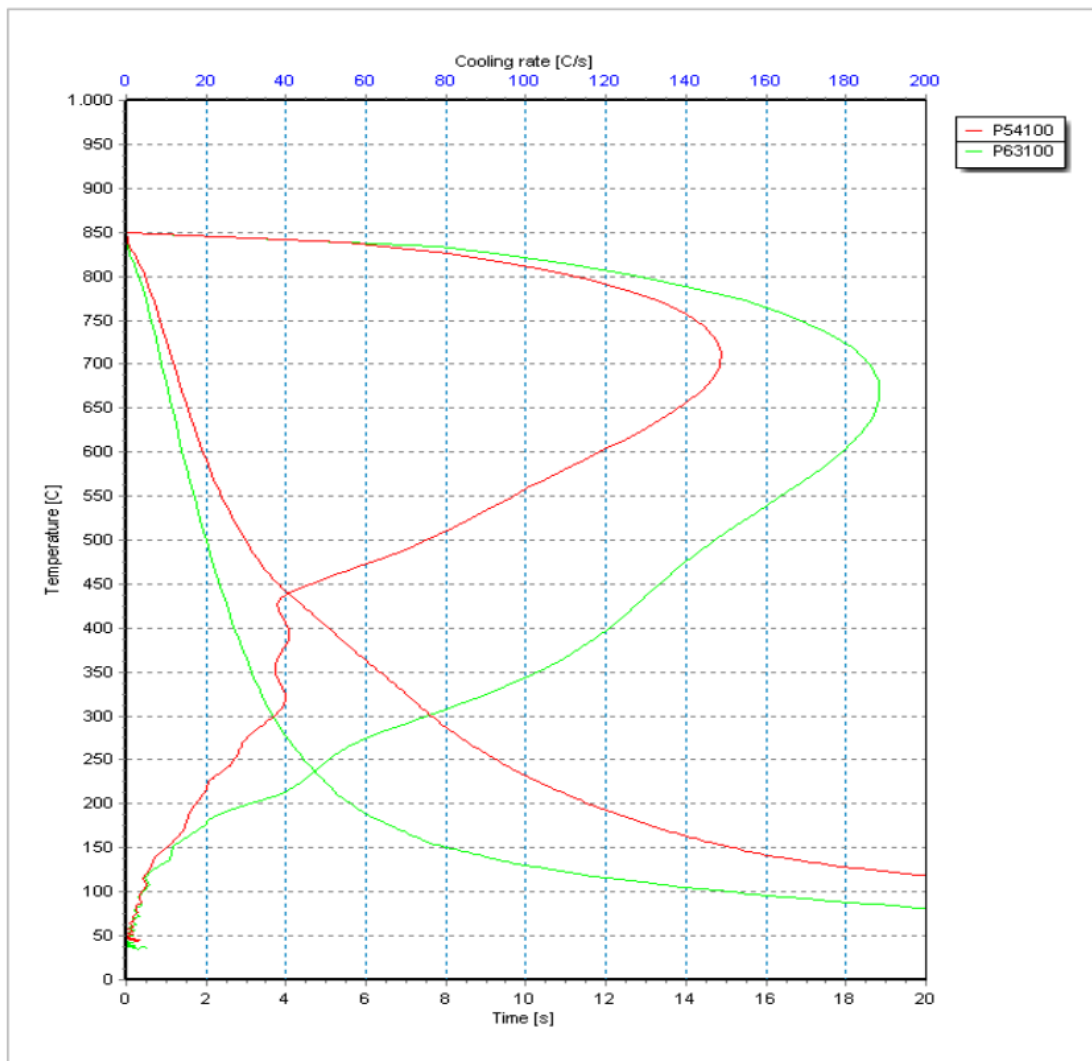


Probe: POLYQUENCH VP85KB-F1 und POLYQUENCH 500D-AL

Prüftemperatur: 20 °C
Umwälzung: 0 min⁻¹

P54100	—	149 °C/s	711 °C	POLYQUENCH VP85KB-F1 - 10,0 %ige Frischlösung
P63100	—	188 °C/s	685 °C	POLYQUENCH 500D-AL - 10,0 %ige Frischlösung

Datum: 03.08.2021



ISO 9950
INCONEL 600; 12,5 mmØ x 60 mm

Naměřené hodnoty DAS

Vzduch 1 bar bez TZ

měření č.:	dolní	horní
1	50,76	39,36
2	69,04	42,39
3	68,16	44,74
4	51,89	41,39
5	48,44	39,48
6	40,10	43,44
7	48,56	38,54
8	40,47	39,01
9	47,73	42,79
10	45,43	50,78
průměr	51,06	42,19
sm. odchylka	10,03	3,68

Vzduch 1 bar T6

měření č.:	dolní	horní
1	35,33	36,38
2	44,37	52,21
3	51,11	42,25
4	52,6	34,18
5	46,43	51,71
6	45,15	45,66
7	51,92	45,62
8	52,58	41,75
9	50,79	49,43
10	54,76	50,06
průměr	48,50	44,93
sm. odchylka	5,80	6,26

Vzduch 2 bary bez TZ

měření č.:	dolní	horní
1	52,88	51,47
2	56,08	43,05
3	40,26	54,90
4	38,21	43,84
5	54,34	50,09
6	40,91	45,15
7	44,61	47,47
8	46,47	46,25
9	44,49	50,73
10	43,12	57,89
průměr	46,14	49,08
sm. odchylka	6,24	4,84

Vzduch 2 bary T6

měření č.:	dolní	horní
1	31,76	40,35
2	54,91	51,26
3	54,92	38,20
4	38,57	50,05
5	35,33	55,15
6	35,29	44,74
7	50,35	42,50
8	36,30	52,93
9	34,87	49,15
10	37,54	48,32
průměr	40,98	47,27
sm. odchylka	8,83	5,59

P1 8% T6 pomalu

měření č.:	dolní	horní
1	34,73	52,32
2	32,86	49,19
3	30,33	43,98
4	38,50	44,81
5	35,92	48,25
6	38,09	44,20
7	33,19	38,28
8	32,48	47,25
9	40,91	44,29
10	34,36	42,99
průměr	35,14	45,56
sm. odchylka	3,23	3,87

P1 8% T6 rychle

měření č.:	dolní	horní
1	34,24	24,96
2	26,30	23,48
3	29,28	26,04
4	29,66	23,73
5	25,89	32,74
6	32,14	22,30
7	26,54	30,34
8	31,72	27,05
9	28,12	28,64
10	32,89	23,45
průměr	29,68	26,27
sm. odchylka	2,97	3,41

Naměřené hodnoty DAS

P1 14% T6 pomalu

měření č.:	dolní	horní
1	40,65	39,20
2	43,08	40,69
3	30,00	39,87
4	29,97	52,53
5	28,28	35,08
6	41,48	39,48
7	31,47	54,17
8	38,52	43,92
9	39,17	41,00
10	36,67	40,77
průměr	35,93	42,67
sm. odchylka	5,49	6,05

P1 14% T6 rychle

měření č.:	dolní	horní
1	32,29	27,01
2	26,15	28,67
3	25,64	26,42
4	25,97	24,91
5	23,64	28,24
6	27,39	24,86
7	32,27	22,20
8	30,88	23,23
9	29,57	26,22
10	27,55	23,85
průměr	28,14	25,56
sm. odchylka	2,98	2,13

P2 5% T6 pomalu

měření č.:	dolní	horní
1	36,62	42,00
2	39,12	54,26
3	41,48	49,91
4	27,87	44,43
5	30,85	44,91
6	32,38	52,46
7	28,46	65,58
8	41,56	40,92
9	31,24	44,65
10	32,56	57,94
průměr	34,21	49,71
sm. odchylka	5,12	7,90

P2 5% T6 rychle

měření č.:	dolní	horní
1	29,43	27,16
2	24,79	24,71
3	18,53	20,52
4	29,42	27,94
5	26,52	36,40
6	27,80	26,73
7	23,90	26,98
8	22,01	20,47
9	28,67	26,03
10	26,63	28,66
průměr	25,77	26,56
sm. odchylka	3,52	4,48

P2 8% T6 pomalu

měření č.:	dolní	horní
1	39,19	39,65
2	39,86	48,52
3	37,02	42,23
4	49,70	47,41
5	44,63	40,77
6	34,31	46,05
7	41,40	51,05
8	40,31	52,62
9	45,37	65,66
10	30,11	36,79
průměr	40,19	47,08
sm. odchylka	5,64	8,30

P2 8% T6 rychle

měření č.:	dolní	horní
1	27,14	34,13
2	27,20	22,61
3	24,34	31,29
4	30,80	20,60
5	30,52	23,70
6	26,88	33,24
7	29,41	23,10
8	30,39	29,80
9	29,38	19,48
10	27,05	28,88
průměr	28,31	26,68
sm. odchylka	2,10	5,39

Naměřené mechanické vlastnosti

Bez chlazení_bez_TZ

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	119,20	186,96	4,55
2	117,39	184,33	4,73
3	114,72	181,69	4,51
4	115,25	183,51	4,74
5	119,69	183,25	4,07
6	116,67	183,59	4,17
7	114,42	184,06	4,80
8	118,80	182,53	4,03
9	118,11	183,52	3,89
10	114,70	182,66	4,40
11	121,53	185,98	4,32
12	119,89	186,10	4,32
průměr	117,53	184,02	4,38
sm.odch.	2,38	1,59	0,30

Bez chlazení_T6

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	253,28	322,73	6,55
2	240,47	319,62	5,62
3	258,30	319,32	4,96
4	255,70	319,42	5,32
5	262,64	320,69	4,20
6	259,32	322,62	5,96
7	249,97	312,79	5,19
8	243,89	313,86	5,18
9	247,88	314,41	5,17
10	257,34	314,51	4,48
11	259,37	319,68	5,57
12	246,81	316,16	5,16
průměr	252,91	317,98	5,28
sm.odch.	7,02	3,48	0,62

Vzduch_1_bar_surový_bez_TZ

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	114,56	181,62	4,70
2	115,00	187,50	5,42
3	115,39	185,07	4,99
4	114,20	185,86	4,97
5	116,17	183,82	4,54
6	113,11	182,65	4,38
7	114,85	185,69	4,81
8	116,57	186,60	4,86
9	118,43	187,61	4,80
10	115,80	184,55	4,83
11	115,75	189,21	4,78
12	113,83	184,19	4,69
průměr	115,31	185,36	4,81
sm.odch.	1,40	2,18	0,26

Vzduch_1_bar_T6

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	252,20	316,96	6,02
2	251,19	318,61	5,79
3	251,16	316,73	5,61
4	262,46	323,91	5,39
5	252,81	321,65	6,70
6	254,39	317,45	4,61
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	254,04	319,22	5,69
sm.odch.	4,30	2,92	0,69

Vzduch_2_bary_bez_TZ

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	117,57	188,15	4,90
2	112,43	183,16	4,89
3	113,10	176,79	3,56
4	115,84	185,49	4,28
5	113,48	183,33	4,43
6	112,62	184,81	4,24
7	118,21	187,15	4,78
8	114,23	186,02	5,19
9	112,03	184,17	4,77
10	116,12	180,42	3,20
11	116,04	184,51	4,67
12	116,13	184,73	4,18
průměr	114,82	184,06	4,42
sm.odch.	2,10	3,03	0,58

Vzduch_2_bary_T6

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	260,82	324,56	5,71
2	267,53	326,97	5,22
3	259,25	324,98	5,33
4	263,54	327,87	5,78
5	261,66	327,75	6,67
6	261,65	314,97	3,00
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	262,41	324,52	5,29
sm.odch.	2,87	4,88	1,23

Naměřené mechanické vlastnosti

Polymer_P1_8%_T6_pomalu

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	247,48	320,08	6,52
2	247,51	300,33	2,02
3	238,30	270,49	0,66
4	247,61	275,42	0,67
5	243,73	308,70	3,38
6	246,15	287,36	1,76
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	245,13	293,73	2,50
sm.odch.	3,66	19,38	2,21

Polymer_P1_14%_T6_pomalu

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	234,17	252,35	0,48
2	242,18	245,26	0,23
3	229,45	281,09	2,26
4	241,89	295,76	2,72
5	237,33	269,42	0,98
6	-	221,64	0,08
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	237,00	260,92	1,13
sm.odch.	5,38	26,66	1,11

Polymer_P2_5%_T6_pomalu

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	229,98	248,81	0,41
2	243,49	283,43	1,81
3	241,26	303,30	3,66
4	242,17	258,48	0,44
5	-	239,69	0,12
6	244,19	319,61	7,12
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	240,22	275,55	2,26
sm.odch.	5,84	31,83	2,72

Polymer_P2_8%_T6_pomalu

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	240,43	281,60	1,31
2	247,66	275,76	0,77
3	242,98	277,37	1,16
4	242,38	261,75	0,40
5	244,40	252,78	0,35
6	239,34	243,90	0,25
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	242,87	265,53	0,71
sm.odch.	2,96	15,15	0,45

Vodní_mlha_T6

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	262,70	325,06	6,22
2	264,76	320,64	4,76
3	258,16	309,42	2,45
4	252,90	322,49	5,71
5	250,94	322,09	5,30
6	249,92	320,21	4,03
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	256,56	319,99	4,75
sm.odch.	6,27	5,45	1,36

Naměřené mechanické vlastnosti

Polymer_P1_8%_T6_částecně

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	253,08	268,87	0,54
2	246,48	304,61	3,87
3	-	-	-
4	-	-	-
5	-	-	-
6	239,88	239,89	0,22
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	246,48	271,12	1,54
sm.odch.	6,60	32,42	2,02

Polymer_P1_14%_T6_částecně

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	243,10	314,60	6,43
2	243,90	318,37	7,55
3	243,58	317,28	5,95
4	240,51	316,69	6,79
5	239,87	316,94	7,02
6	246,58	320,83	7,27
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	242,92	317,45	6,84
sm.odch.	2,45	2,06	0,58

Polymer_P2_5%_T6_částecně

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	236,36	237,21	0,24
2	231,45	261,91	0,82
3	229,90	277,69	2,11
4	226,42	255,88	0,78
5	226,01	282,73	3,26
6	235,92	280,57	1,98
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	231,01	266,00	1,53
sm.odch.	4,48	17,76	1,12

Polymer_P2_8%_T6_částecně

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	235,50	268,60	1,22
2	237,45	280,71	1,80
3	235,05	267,57	1,25
4	239,38	289,64	2,58
5	233,15	271,54	1,25
6	226,75	273,93	1,41
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	234,55	275,33	1,59
sm.odch.	4,37	8,43	0,53

Polymer_P1_8%_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	230,50	326,09	9,60
2	230,61	324,18	9,80
3	236,71	326,27	8,20
4	233,47	317,22	6,47
5	238,84	319,26	6,84
6	238,64	320,49	6,74
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	234,80	322,25	7,94
sm.odch.	3,81	3,79	1,49

Polymer_P1_14%_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	254,86	327,61	5,46
2	258,42	320,21	4,21
3	260,77	334,22	6,76
4	257,83	331,77	6,99
5	259,25	334,19	8,04
6	256,19	315,36	3,73
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	257,89	327,23	5,87
sm.odch.	2,12	7,85	1,69

Polymer_P2_5%_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	259,34	333,68	7,90
2	258,98	328,83	5,90
3	262,82	328,19	5,30
4	256,01	308,01	2,28
5	254,98	329,91	6,64
6	262,57	323,53	4,11
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	259,12	325,36	5,36
sm.odch.	3,24	9,10	1,97

Polymer_P2_8%_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	242,22	326,26	8,90
2	233,03	318,85	8,14
3	224,39	310,84	6,93
4	242,10	303,57	3,81
5	232,42	314,67	7,58
6	241,36	321,47	8,27
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	235,92	315,94	7,27
sm.odch.	7,23	8,08	1,82

Naměřené mechanické vlastnosti

Polymer_P1_8%_T6_rychle_ověření

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	251,63	332,84	6,21
2	267,83	338,65	5,80
3	267,43	327,14	3,75
4	253,21	335,98	6,37
5	258,53	325,07	4,54
6	255,19	333,33	7,12
7	253,08	328,33	5,91
8	254,69	331,40	6,71
9	259,10	332,42	6,03
10	265,96	311,02	2,74
11	260,59	322,27	3,93
12	252,51	302,17	2,12
průměr	258,31	326,72	5,10
sm.odch.	5,97	10,61	1,64

Polymer_P2_8%_T6_rychle_ověření

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	252,51	337,94	8,04
2	260,30	344,31	8,15
3	259,45	323,68	4,20
4	246,22	334,41	6,69
5	265,71	337,07	6,99
6	270,23	343,62	9,36
7	256,39	339,82	9,86
8	269,31	333,33	5,28
9	252,96	317,96	3,59
10	256,34	327,24	4,96
11	261,78	337,25	5,90
12	265,04	328,28	4,73
průměr	259,69	333,74	6,48
sm.odch.	7,22	8,04	2,04

Polymer_P1_14%_T6_rychle_ověření

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	263,29	340,82	9,31
2	267,62	342,92	9,05
3	265,25	338,44	7,29
4	261,18	336,70	7,31
5	256,68	338,08	9,98
6	258,77	328,29	5,74
7	261,91	333,03	6,06
8	252,09	328,38	6,27
9	263,02	328,19	5,41
10	249,82	325,37	4,96
11	255,25	318,03	3,62
12	268,68	329,43	4,60
13	254,04	330,21	6,79
14	253,06	329,71	7,31
15	255,75	334,09	7,96
16	261,05	336,14	7,08
17	265,73	336,72	6,56
18	268,41	342,21	7,72
průměr	260,09	333,15	6,83
sm.odch.	5,91	6,50	1,66

Polymer_P2_5%_T6_rychle_ověření

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	254,85	323,95	3,77
2	267,86	334,09	5,94
3	259,30	341,69	7,43
4	263,78	326,55	4,11
5	261,91	338,42	7,63
6	260,91	336,75	7,18
7	259,85	328,75	4,94
8	262,89	338,65	6,06
9	264,94	333,42	4,94
10	258,22	334,91	7,33
11	260,37	337,17	6,53
12	273,26	340,22	6,24
13	260,26	337,98	8,14
14	262,68	338,76	7,26
15	261,52	337,62	7,25
16	262,68	326,77	4,25
17	255,19	337,60	7,44
18	271,56	338,43	5,98
průměr	262,34	335,10	6,25
sm.odch.	4,82	5,18	1,35

Naměřené mechanické vlastnosti

Vstup_vzduch_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	224,29	311,08	9,57
2	219,95	305,19	8,77
3	230,59	310,63	5,95
4	221,63	307,36	6,40
5	230,29	309,38	7,55
6	228,11	315,29	7,62
průměr	225,81	309,82	7,64
sm.odch.	4,52	3,46	1,37

Vstup_polymer_P2_8%_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	242,09	320,72	6,99
2	241,64	327,14	9,12
3	230,11	311,77	6,72
4	233,54	313,96	6,93
5	242,54	311,93	5,06
6	223,79	321,81	8,43
průměr	235,62	317,89	7,21
sm.odch.	7,75	6,28	1,42

Mikro100_0,25%_vzduch_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	257,01	326,49	6,46
2	251,98	324,23	8,45
3	243,12	320,13	7,45
4	258,55	325,74	5,75
5	250,99	322,80	7,90
6	251,91	324,92	6,66
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	252,26	324,05	7,11
sm.odch.	5,43	2,30	1,00

Mikro100_0,25%_polymer_P2_8%_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	242,71	313,46	5,38
2	239,91	320,35	6,37
3	246,61	321,57	6,41
4	234,30	326,54	9,53
5	230,62	310,10	5,94
6	232,48	319,75	7,99
7	247,21	318,17	6,07
8	250,79	321,90	5,99
9	250,95	324,47	5,74
10	239,42	321,44	6,80
11	262,43	331,95	6,93
12	239,75	312,17	5,32
průměr	243,10	320,16	6,54
sm.odch.	9,07	6,17	1,19

Mikro100_0,50%_vzduch_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	234,96	317,87	7,40
2	246,21	316,44	6,25
3	258,16	324,42	7,16
4	257,53	322,74	6,51
5	246,44	320,35	8,38
6	253,56	322,62	7,28
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	249,48	320,74	7,16
sm.odch.	8,80	3,10	0,75

Mikro100_0,50%_polymer_P2_8%_T6_rychle

tyčka č.:	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A [%]
1	241,66	325,37	9,80
2	253,06	322,89	6,50
3	245,16	318,19	7,48
4	251,31	328,65	8,93
5	231,79	302,56	5,81
6	249,88	323,05	6,48
7	250,15	325,67	9,00
8	214,85	307,25	9,37
9	222,60	313,43	9,60
10	230,78	317,93	8,93
11	235,85	318,68	9,43
12	231,79	316,79	8,69
průměr	238,24	318,37	8,34
sm.odch.	12,30	7,69	1,39

Naměřené mechanické vlastnosti

Mikro100_1,00%_vzduch_T6_rychle

tyčka č.:	$R_{p0,2}$ [N/mm]	R_m [N/mm]	A [%]
1	233,03	305,66	6,54
2	222,12	303,41	7,02
3	222,48	305,42	8,47
4	226,40	300,61	6,74
5	222,95	303,71	7,85
6	225,61	304,12	6,89
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	225,43	303,82	7,25
sm.odch.	4,11	1,82	0,75

Mikro100_1,00%_polymer_P2_8%_T6_rychle

tyčka č.:	$R_{p0,2}$ [N/mm]	R_m [N/mm]	A [%]
1	257,39	320,43	5,70
2	244,34	320,73	6,77
3	248,16	322,67	7,92
4	257,62	328,00	8,00
5	248,10	323,69	8,09
6	248,17	323,10	8,72
7	244,58	320,93	6,97
8	252,31	326,41	7,58
9	248,69	319,42	5,82
10	253,60	313,53	4,66
11	249,68	322,17	7,67
12	-	-	-
průměr	250,24	321,92	7,08
sm.odch.	4,52	3,79	1,24

Mikro100_1,50%_vzduch_T6_rychle

tyčka č.:	$R_{p0,2}$ [N/mm]	R_m [N/mm]	A [%]
1	225,63	305,44	5,55
2	241,95	304,80	4,75
3	244,00	302,44	4,68
4	245,36	306,22	4,66
5	236,58	304,75	5,58
6	244,20	307,08	5,69
7			
8			
9			
10			
11			
12			
průměr	239,62	305,12	5,15
sm.odch.	7,53	1,59	0,50

Mikro100_1,50%_polymer_P2_8%_T6_rychle

tyčka č.:	$R_{p0,2}$ [N/mm]	R_m [N/mm]	A [%]
1	239,47	312,48	7,06
2	245,32	311,33	4,83
3	248,02	315,10	6,49
4	243,29	312,69	6,93
5	234,52	306,35	6,48
6	236,14	312,47	7,64
7	249,86	317,34	7,47
8	231,84	311,26	7,27
9	243,28	316,73	7,21
10	242,39	311,84	6,18
11	235,86	311,49	6,69
12	230,66	309,53	7,13
průměr	240,05	312,38	6,78
sm.odch.	6,28	3,00	0,75