



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV RYCHLOSTI OCHLAZOVÁNÍ NA MIKROSTRUKTURU ODLITKU ZHOTOVENÉHO METODOU PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

THE INFLUENCE OF COOLING RATE ON THE MICROSTRUCTURE OF CASTING PRODUCED BY
INVESTMENT CASTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Vybíral

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Nekuda

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Ondřej Vybíral**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Nekuda**
Akademický rok: 2023/24

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

Vliv rychlosti ochlazování na mikrostrukturu odlitku zhotoveného metodou přesného lití na vytavitelný model

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Historie výroby odlitků je starší než 5000 let. Od té doby bylo vyvinuto nespočet technologií, kterými lze odlitky zhotovit, přičemž je v současné době zaměřena pozornost především na tvarově složité a tenkostěnné odlitky. Jednou z technologií, která představuje mnohdy jediný způsob výroby těchto typů odlitků, je metoda přesného lití na vytavitelný model.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je sestavit literární rešerši zabývající se problematikou přesného lití na vytavitelný model od výroby voskového modelu až po konečný odlitek. V praktické části bude touto technologií zhotoveno několik keramických skořepin s cílem sledovat vliv různé rychlosti ochlazování kovu po odlití na výslednou mikrostrukturu odlitku.

Seznam doporučené literatury:

LI, Fei a WANG, Fei. Preparation Process of Ceramic Shells. Online. In: Precision Forming Technology of Large Superalloy Castings for Aircraft Engines. Singapore: Springer, 06 February 2021n. l., s. 101-167. ISBN 978-981-33-6220-8. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-33-6220-8_4. [cit. 2023-09-10].

BEELEY, Peter R. a SMART, Robert F. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 0-901716-66-9.

MISHRA, Sarika a RANJANA, Rati. Reverse Solidification Path Methodology for Dewaxing Ceramic Shells in Investment Casting Process. Online. Materials and manufacturing processes. 2010, roč. 25, č. 12, s. 1385-1388. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.496125>. [cit. 2023-10-09].

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená práce poskytuje náhled do problematiky přesného lití a metalurgie slitin hliníku, se zaměřením na siluminy a jejich krystalizaci. V experimentální části byly touto technologií zhotoveny tři zkušební odlitky ze slitiny AlSi7Mg s kombinací různých průřezů, které byly po odlití ochlazovány různou rychlostí. Pro hodnocení vlivu rychlosti ochlazování na mikrostrukturu byla použita DAS analýza. Rovněž byl zkoumán vliv průřezu zkušebních vzorků a místa jejich odběru. Měření prokázalo, že hodnoty DAS jsou nižší u odlitků s vyšší rychlostí ochlazování a menším průřezem. Současně byly naměřeny vyšší hodnoty u vzorků odebraných v blízkosti tepelných uzlů.

Klíčová slova

přesné lití, AlSi7Mg, rychlost ochlazování, DAS analýza

ABSTRACT

The presented work provides an insight into the theme of investment casting method and the metallurgy of aluminum alloys, focusing on silumins and their crystallization. In the experimental part, three test castings were made from the AlSi7Mg alloy using this method, with combination of various cross-sections and different cooling rates. SDAS analysis was used to evaluate the influence of cooling rate on the microstructure. The measured values were examined for their dependencies on the cooling rate, casting cross-section, and different sampling locations. The measurements demonstrated that SDAS value is lower in castings with higher cooling rates and smaller cross-sections. At the same time, higher value was measured in samples taken near thermal nodes.

Keywords

investment casting, AlSi7Mg, cooling rate, SDAS measurements

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VYBÍRAL, Ondřej. *Vliv rychlosti ochlazování na mikrostrukturu odlitku zhotoveného metodou přesného lití na vytavitelný model* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157386>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Pavel Nekuda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv rychlosti ochlazování na mikrostrukturu odlitku zhotoveného metodou přesného lití na vytavitelný model vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Ondřej Vybíral

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Pavlu Nekudovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Také děkuji celému kolektivu odboru slévárenství, zejména Ondřeji Štočkovi, Ing. Václavu Kaňovi, Ph. D. a Ing. Petru Bořilovi, Ph. D., za rady a pomoc s realizací experimentů a měření.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 Úvod do technologie vytavitelného modelu	10
1.1 Princip	11
1.2 Výroba voskových modelů	12
1.3 Výroba skořepin	14
1.4 Odlévání	16
2 Metalurgie slitin hliníku	18
2.1 Slévárenské slitiny hliníku	18
2.2 Binární systém Al-Si	19
2.2.1 Krystalizace primární fáze $\alpha(\text{Al})$	20
3 Experimentální část	22
3.1 Výroba zkušebních vzorků	22
3.1.1 Zhotovení modelů	23
3.1.2 Výroba skořepin	24
3.1.3 Odlévání	25
3.2 Analýza vzorků	26
3.2.1 Příprava metalografických preparátů	26
3.2.2 Analýza pomocí světelné mikroskopie	28
3.2.3 Výsledky měření	29
ZÁVĚR	36

Seznam použitých zdrojů

Seznam výkresů

ÚVOD

Technologický pokrok a stále rozmanitější možnosti realizace tvůrčích myšlenek jsou hybatelem vývoje jednotlivých výrobních odvětví. Jedním z nich je i slévárenství, které od svých počátků, asi 3000-4000 př. n. l., došlo k dnešní špičkové úrovni, avšak s nekončícími možnostmi rozvoje do budoucna. [1]

Produkty slévárenství se podílí na chodu naší společnosti ve všech rovinách, ať ekonomických, uměleckých, ekologických nebo politických. Uspokojují potřeby zákazníků jak v domácnostech, tak i například v jaderné energetice. Pracují tedy v běžných i v extrémně náročných podmínkách. Rozmanitost a úroveň jednotlivých metod výroby odlitků tak odráží rozsah jejich uplatnění. Jednou z těch, která se zásadně podílí na produkci součástí, na které jsou kladeny ty nejvyšší nároky, je metoda přesného lití. Tato technologie výroby se od svých počátků ve 40. letech 20. století dostala z okrajových, vzácných aplikací až k téměř konvenční výrobě, která se běžně používá v zemích s rozvinutým průmyslem. [1]

Jejími specifiky jsou samotná koncepce netrvalého modelu a netrvalé formy. Dává totiž téměř neomezené možnosti výroby tvarově složitých odlitků, bez ohledu na nutnost řešení dělicích rovin, mnohdy zakládání jader a technologických parametrů pomáhajících model z formy vyjmout. Zároveň takto vyráběné součásti dosahují vysoké rozměrové přesnosti a kvality povrchu. Toho je docíleno výtečnými vlastnostmi keramické formy, precizně kopírovat tvar modelu. Tyto skořepinové formy se zhotovují máčením a obalováním voskového modelu v keramické břečce a jejím následným sušením a vypalováním. Další velkou předností je možnost automatizace, která v některých případech může být úplná, tedy bez potřeby lidského zásahu do výroby. S dnešním vývojem v oblasti 3D tisku se objevují i další možnosti uplatnění v podobě Rapid prototypingu. Pomocí 3D tiskárny lze totiž velmi rychle vyrábět modely, což výrazně zkracuje výrobní časy a dává průchod rychlejšímu a preciznějšímu vývoji.

I z hlediska metalurgie je přesné lití velmi zajímavé, jelikož tenké skořepinové formy umožňují precizní řízení odvodu tepla a tím kontrolování vznikající struktury. V problematice řízené krystalizace lze považovat za pomyslný vrchol výrobu odlitků s orientovanou nebo monokrystalickou strukturou. Vliv ochlazování je pro ně zcela zásadní, společně s chemickým složením slitin a podmínkami lití. V těchto případech se jedná výhradně o lití ve vakuu, s využitím zařízení pro přesné řízení teplotního gradientu. Výroba těchto součástí je extrémně náročná jak technicky, tak ekonomicky. Uplatnění tedy nalézají především v oblastech, kde je vyžadována maximální spolehlivost a životnost, jako například u lopatek spalovacích turbín.



Obr. 1 Ukázky odlitků zhotovených metodou přesného lití [2].

1 ÚVOD DO TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Historie této metody sahá hluboko do minulosti, až ke starověkým civilizacím. Nejstarší artefakty, zhotovené přesným litím, byly nalezeny v jihovýchodní Asii. Lokální kmeny zde zhotovovaly bronzové odlitky už 4500 př. n. l., avšak nejednalo se o plošnou znalost metalurgických procesů na úrovni městského státu. První takto vyspělou civilizací, mající velké inženýrské a metalurgické schopnosti, byla dle archeologických objevů Mezopotámie. Její obyvatelé dokázali odlévat řadu zlatých, stříbrných a bronzových artefaktů asi 3000 – 4000 př. n. l. Dalšími, kdo také prokazatelně využíval vytavitelného modelu ještě před našim letopočtem, byli Číňané, Egypťané a Řekové. V roce 1972 bylo objeveno na území Velké Británie přes 7000 artefaktů z 1. století př. n. l., což dokazuje velké rozšíření vědomostí o přesném lití v antickém světě. [1]

O dosažení dechberoucí úrovně této metody se v renesanční Itálii zasloužil italský sochař Benvenuto Cellini, který v roce 1554 zhotovil přes tři metry vysokou [3] bronzovou sochu Persea s uťatou hlavou Medusy (obr. 2). Cellini ve své autobiografii tvrdil, že se o postupu lití na „ztracený vosk“ dozvěděl z knihy mnicha jménem Theophilus Presbyster. Tento text, *Schedula Diversarum Strium*, je datován zhruba do roku 1100 našeho letopočtu, což z něj činí pravděpodobně nejstarší text o slévárenství. [1]

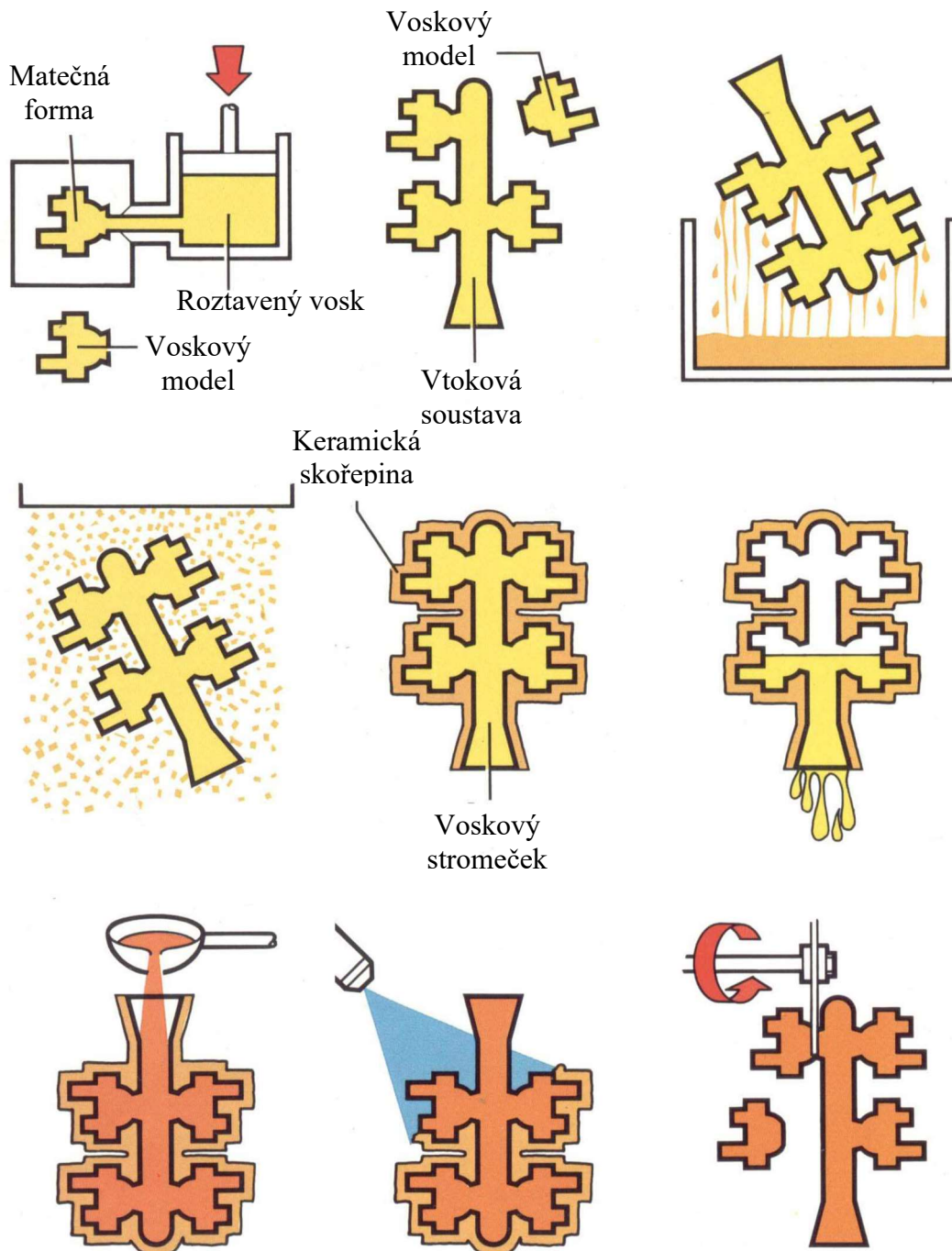


Obr. 2 Benvenuto Cellini – Perseus a Medusa [3].

Co se týče dnešní podoby přesného lití, lze počátky této technologie datovat do období druhé světové války. Impuls k jeho rozvoji dal letecký průmysl vynálezem plynové turbíny. Inženýry byly kladeny mnohem přísnější požadavky, jako rozměrová přesnost a reprodukovatelnost odlitků, odlévání vysokotavitelných slitin, metalurgická čistota a efektivnější výroba, které nebylo možno tehdejšími výrobními technologiemi dosáhnout. V poválečném období rozmach přesného lití pokračoval napříč různými odvětvími, zejména ve Spojených státech a Velké Británii. Další posun nastal v polovině padesátých let, kdy byl proces obohacen o keramické skořepiny. Bylo tak možné odlévat složitější a větší součásti, což podpořilo další expansi metody na trhu. [1]

1.1 Princip

Postup klasické výroby odlitku metodou přesného lití je znázorněn na obrázku 3. Prvním krokem je výroba voskového modelu vstříknutím do matečné formy. Ten se spojí s dalšími komponenty do tzv. stromečku, pokud je žádoucí a možné vyrábět více odlitků najednou. Takto připravená sestava se obaluje v keramické hmotě, a to střídáním máčení v břečce a posypáváním žáruvzdorným ostřivem. Poté je vosk vytaven a vzniklá keramická skořepina je tepelně zpracována. Odlévání se realizuje zpravidla do přehřátých forem. Po odlití se odstraní forma, odlitky se otryskají a oddělí od vtokové soustavy. [1; 4]



Obr. 3 Schéma výroby odlitku pomocí vytavitelného modelu [4].

1.2 Výroba voskových modelů

Model z vosku je vstupním prvkem celé výroby. Jeho kvalita tedy v konečném důsledku majoritně ovlivňuje vlastnosti výrobku, jako rozměrovou a tvarovou přesnost nebo jakost povrchu. Vyrábí se většinou gravitačním nebo tlakovým litím do matečných forem, kdy vosk je dle technologie buď nad teplotou likvidu, nebo těsně pod ní. [4]

Matečná forma je modelové zařízení, sloužící k výrobě a rozmnožování voskových modelů. Dutina formy má tvar vyráběné součástky, při zohlednění tepelné roztažnosti vosku. Jejím cílem je výroba co nejpřesnějších modelů s vysokou kvalitou povrchu. Použití rozličných druhů tohoto zařízení má velký vliv na cenu a kvalitu odlitků. Volba varianty jeho provedení závisí na celkovém počtu vyráběných kusů, počtu kusů v dávce, koncovém použití odlitku a požadavcích na kvalitu odlitku. [5; 6]

Je možné je dělit dle materiálu formy, technologie výroby, konstrukce, stupně mechanizace a účelu použití [5]. Nejběžněji užívané materiály k jejich výrobě jsou kovové slitiny, sádra, plastické hmoty a silikonový kaučuk. Každý z nich má diferenciatně odlišné vlastnosti, které je předurčují pro konkrétní aplikace.

- *Kovové formy* se vyrábějí obráběním, odléváním, galvanoplastikou nebo metalizováním. Uplatňují se zejména při požadavcích vysoké přesnosti a sériovosti odlitků. Jejich výroba je nákladná, avšak vyvážená dlouhou životností formy. [4]
- *Sádrové formy* jsou vyráběny zalitím matečného modelu. Nedosahují vysoké přesnosti a jejich životnost je malá. Využívají se tedy jen ke kusové výrobě a výrobě zkušebních součástí pro ověření návrhů technologie. [5]
- *Formy z plastických hmot* se zhotovují zalitím matečného modelu dentakrylem nebo epoxidovou pryskyřicí. Jedná se o rychlé a levné řešení, avšak s ne příliš vysokou rozměrovou přesností a životností. Vhodné pro malosériovou výrobu. [5]
- *Silikonové formy* se vyrábějí zalitím matečného modelu silikonovým kaučukem. Tyto formy mají oproti ostatním specifickou vlastnost – jsou pružné. Je tak možné vyrábět voskové modely s negativními úkosy a komplikovanými dělicími rovinami. Zároveň je tím ale negativně ovlivněna jejich rozměrová přesnost a životnost. Používají se pro výrobu experimentálních kusů nebo například šperků. [5]

Materiály, používané k výrobě voskových modelů, nejsou samotné vosky. Nesplňují totiž všechny požadavky kladené na modelovou hmotu. Modely se tedy vyrábějí z voskových směsí. Současné voskové směsi jsou kombinacemi různých složek, jako jsou syntetické vosky, přírodní vosky (uhlovodíkové a esterové), přírodní a syntetické pryskyřice, montánní vosk, organická plnidla a voda. [5]

Pro modely a vtokové soustavy se nepoužívají stejné směsi. Od voskových směsí pro modely se očekává především rozměrová přesnost a kvalitní povrch, u vtokových soustav je cílem pevnost [5]. Dalším rozdílem je použití rekultivovaného vosku pro vtokové soustavy [4]. Vlastnosti, kterými by směsi na modely měly disponovat, jsou tvrdost, pevnost, ale zároveň i dostatečná pružnost pro manipulaci, malý obsah popelu, odolnost vůči oxidaci, chemická netečnost, dobrá zabíhavost, možnost regenerace a malá tepelná roztažnost. [5]

Především tepelná roztažnost je vlastností, která vnáší nemalé problémy do výroby přesných odlitků. Během tuhnutí modelová směs značně smršťuje, a zejména u rozměrnějších modelů tak může docházet k značným deformacím tvaru. Těmto problémům lze předcházet zvýšením tlaku vstříkávání do matečné formy, zvýšením rychlosti ochlazování, zakomponováním voskových jader (mají jiné vlastnosti a složení než směsi na modely) nebo použitím chladících přípravků. Směsi používané k výrobě modelů [5; 7]:

- *Neplněné vosky* dosahují vysoké kvality povrchu, je možné je odlévat v širokém rozsahu teplot a snadno se regenerují. V oblastech s vyšší koncentrací materiálu se mohou vyskytnout propadliny. Lze je omezit intenzivnějším chlazením formy nebo zakomponováním voskového jádra.
- *Emulgované vosky* jsou složením podobné neplněným, jsou však obohaceny o asi 7 až 12 % vody nebo vzduchu. Je u nich nižší výskyt propadlin a dosahují vyšší rozměrové přesnosti.
- *Plněné vosky* jsou dnes nejpoužívanější. Obsahují navíc 20 až 40 % plniva, díky čemuž mají vysokou rozměrovou stabilitu a nedochází tolik k propadlinám. Plnivem je organický prášek nerozpustný v základním vosku. Nedosahují tak kvalitního povrchu jako emulgované vosky.

Po ztuhnutí jsou voskové modely vyjmuty z matečných forem a (pokud jsou menších rozměrů) spojují se pájením nebo lepením do stromečků (obr. 4). Tyto tzv. stromečky se skládají z jednotlivých modelů a vtokové soustavy. Vtoková soustava, jak již bylo zmíněno, nebývá z nového vosku, ale z regenerovaného. [4]

Tvar stromečku je navrhován tak, aby zajistil dobrý přístup k jednotlivým modelům, jejich správné obalení, dostatečné rozestupy, bezproblémový odtok vosku při vytavování a snadnou manipulaci s celou soustavou. Pokud by nebylo možné vhodně rozmístit modely pro zajištění odtoku vosku, přidávají se na modely přídavné výfukové otvory. [5]

Během celého sestavování je nutné dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci s modely a jejich spojování. Jakékoli poškození modelu se projeví na budoucím odlitku.



Obr. 4 Modely sestavené do stromečků [8].

Voskové (vytavitelné) modely je možno vyrábět i bez nutnosti zhotovování matečných forem. V posledních desetiletích, za pomoci systémů rapid prototypingu (RP), byly vyvinuty metody jak pro výrobu modelů a matečných forem, tak i přímo keramických skořepin. Jejich cílem je snižování nákladů, urychlování výroby prototypů a zkrácení času nutného pro vývoj každé součásti. Jejich aplikovatelnost se tedy pohybuje maximálně do malosériové výroby, pro kusovou výrobu však představují velký přínos. Pro výrobu vytavitelných modelů se využívají technologie 3D tisku SLA, FDM a FFF. SLA, stereolithography apparatus, je založena na spékání vrstev práškového materiálu a dosahuje poměrně kvalitního povrchu (obr. 5). FDM, potažmo FFF, spočívají v dodávání materiálu ve formě drátu do tiskové hlavy, kde je nataven a nanesen ve vrstvách na model. Tento způsob nanášení vrstev se bohužel velmi negativně promítá do kvality povrchu takto zhotovených modelů, nicméně je tato metoda v technické praxi velmi hojně využívána. [9]



Obr. 5 Model zhotovený metodou SLA připravený na obalování [10].

Ať už se jedná o jakoukoli z výše uvedených technologií, všechny je spojuje poměrně závažný problém, a sice tepelná roztažnost takto zhotovených modelů. To může vést k praskání skořepin (obr. 6) při vytavování modelů. Řešením tohoto problému byl vývoj nových materiálů, jejichž tepelná roztažnost je značně nižší. Takovým materiálem je např. polymethylmethakrylát, užívaný v technologii binder jetting, která dosahuje vysoké kvality povrchu a zároveň rozměrové přesnosti. [9]



Obr. 6 Praskliny na skořepině oběžného kola [11].

1.3 Výroba skořepin

Proces je založen na opakovaném máčení voskového modelu, případně celých stromečků, v keramické suspenzi, sestávající z pojiva a žáruvzdorné moučky, a následném posypávání hrubozrnným ostrivem. Cyklus se opakuje většinou pět až patnáctkrát, dokud není dosaženo požadované tloušťky stěny formy. Namáčení v suspenzi probíhá za současného natáčení a rotace, aby v rozích nebo dutinách nedošlo k ulpění vzduchových bublin. Po vytažení se s modelem opět pohybuje za účelem rovnoměrného rozložení a okapání přebytečné břečky. Po okapání následuje posypávání ostrivem, pro první obal jemnější, další již hrubší zrnitosti až 0,5 mm. Takto připravená vrstva se musí vysušit v klimatizovaném prostoru nebo působením chemického činidla a proces se opakuje. Až je zhotovena dostatečná tloušťka obalu, je model z formy vytaven. Většinou se modely vytavují v autoklávu, ale je možné použít také pec,

dielektrický ohřev, přehřátou modelovou hmotu nebo proud horkého vzduchu. Klíčové je vytvořit mezi modelem a formou dilatační spáru, aby expanse ohřátého modelu nepotrhlala skořepinu. Posledním krokem je vyžihání skořepiny, kdy dojde k jejímu vytvrzení, odstranění zbytků po modelu a předeřtí před litím. Provádí se buď při nižších teplotách 500 – 800 °C, nebo až okolo 1500 °C. Při teplotách pod 900 – 1000 °C však nedojde ke krystalizaci vazné vrstvy SiO₂ a také není zcela možné odstranit ze struktury vodu. Pokud se nejedná o speciální slitiny nebo formy pro řízenou krystalizaci, vyžihání většinou probíhá při 950 – 1100 °C. Při odlévání slitin s nízkým bodem tavení se však teplota omezuje na maximálně 850 °C, aby nedošlo k přílišnému vytvrzení formy, což by mohlo způsobovat praskliny a trhliny při tuhnutí odlitku. [4; 5; 12]

Na skořepiny jsou kladeny požadavky, které si v některých případech i vzájemně odporují. Formy, které zaručí kvalitní odlitky s minimem vad, by měly disponovat pevností, odolností proti deformaci, prodyšností, tepelnou roztažností, tepelnou vodivostí, odolností proti tepelným šokům a termochemickou stabilitou. Jednotlivé parametry ovlivňují vlastnosti forem takto [13]:

- *Pevnost* je nejzákladnější vlastností skořepiny. V průběhu výrobního procesu nabývá skořepina třech různých pevností: pevnosti za syrova, vysokoteplotní pevnosti a residuální pevnosti. Pevnost za syrova se vztahuje k fázi sušení skořepin, pokud je příliš malá, je velké riziko popraskání během vytavování vosku. Vysokoteplotní se vztahuje k vytvrzování a odlévání, musí zajistit, že forma vydrží tepelné namáhání. Residuální je rozuměno pevnost formy po odlití, má tedy vliv na očišťování odlitků. Její vysoká hodnota výrazně komplikuje vytloukání odlitků a může vést k jejich poškození. [13; 14]
- *Odolnost proti deformaci* je také nezanedbatelným parametrem. Skořepiny během výrobního procesu podléhají silovým vlivům, zejména v důsledku tepelné roztažnosti a tlaku taveniny během odlévání. Pokud tedy nebude skořepina dostatečně odolná proti deformaci, dojde k její popraskání. [13]
- *Prodyšnost* formy umožňuje odvod plynů skrz její stěnu. Je ovlivněna především pojivem, ostřivem a tloušťkou skořepin. Různými kombinacemi pojiv a ostřiv lze dosáhnout různé struktury skořepin. Při nízké prodyšnosti nedochází při plnění formy kovem ke správnému odvodu plynů a vlivem vysoké teploty se uvězněný plyn navíc rozpíná. Důsledkem je pórovitost a nezaběhnutí kovu do určitých detailů formy. Prodyšnost má signifikantní vliv při výrobě tenkostěnných odlitků. [13; 15]
- *Tepelná roztažnost* skořepin je dalším parametrem, který velmi zásadně vstupuje do výroby odlitků. Problémem je rozdílná dilatace skořepin, voskových modelů a odlévaného kovu. Po odlití se kov smršťuje výrazně rychleji než forma. V uzavřených dutinách je tak forma vystavena tlakovému namáhání, které roste s rozdílem koeficientů tepelné roztažnosti kovu a formy. Důsledkem mohou být praskliny a deformace odlitků. [14]
- *Tepelná vodivost* forem ovlivňuje rychlost odvodu tepla z nalitého kovu. Rychlost ochlazování ovlivňuje velikost zrna a mechanické vlastnosti odlitků. Většinou je žádoucí, aby rychlost odvodu tepla z odlitku byla co nejvyšší. [13]
- *Odolnost proti tepelným šokům* zajišťuje, že skořepiny neprasknou během prudkých změn teploty, jimž jsou vystaveny během vytvrzování, plnění kovem a ochlazování. [13]
- *Termochemická stabilita* se vztahuje k termochemickým reakcím probíhajícím na rozhraní skořepiny a taveniny. Ovlivňuje zejména kvalitu povrchu, chemické vazby a apretaci odlitků od skořepiny. [13]

Materiály používané pro výrobu skořepiny jsou hlavním prostředkem k ovlivnění výše uvedených parametrů. Od použitého pojiva a ostríva se odvíjí kvalita odlitků, výrobní cyklus a cena skořepin i odlitků.

Pojiva se většinou volí dle velikosti odlitku, teploty vytvrzování, teploty sušení a odlévané slitiny, případně dalších parametrů procesu. Nejčastěji používaná pojiva jsou ethylsilikáty (pojiva na alkoholové bázi) a koloidní roztoky oxidu křemičitého. Předností ethylsilikátů je produktivní výroba skořepin díky rychlému sušení, vysoká pevnost před a po vytvrzení a vysoká odolnost proti tepelné deformaci. Je jimi možné dosahovat velmi hladkých, kvalitních povrchů a přesných rozměrů. S jejich použitím se ale pojí i značná nevýhoda v podobě odpařujícího se alkoholu a malého množství amoniaku, které snadno zaplňují výrobní prostory. V některých zemích tak bylo jejich použití omezeno. Zároveň jejich použití postupně ubývá kvůli ekonomické náročnosti. [5; 13]

V 60. letech minulého století byly vyvinuty křemičité roztoky, které jsou bezpečnější, netoxické a příprava forem je s nimi jednodušší. Disponují také velkou pevností po vytvrzení a odolností proti tepelným šokům. Odlitky zhotovené pomocí těchto pojiv mají excelentní povrch a rozměrovou přesnost, což je také důvodem, proč jejich uplatnění v praxi stále roste. Jejich nedostatky jsou pomalé sušení, dlouhé obalovací časy, nízká pevnost po obalení a příliš vysoká zbytková pevnost po odlití a nízká kopírovací schopnost. Od 80. let se začaly objevovat různé modifikace jako polymerem vyztužené rychleschnoucí křemičité roztoky, roztoky s velkými částicemi nebo vlákny vyztužené roztoky, které výrazně vylepšily vlastnosti těchto pojiv. [13; 15]

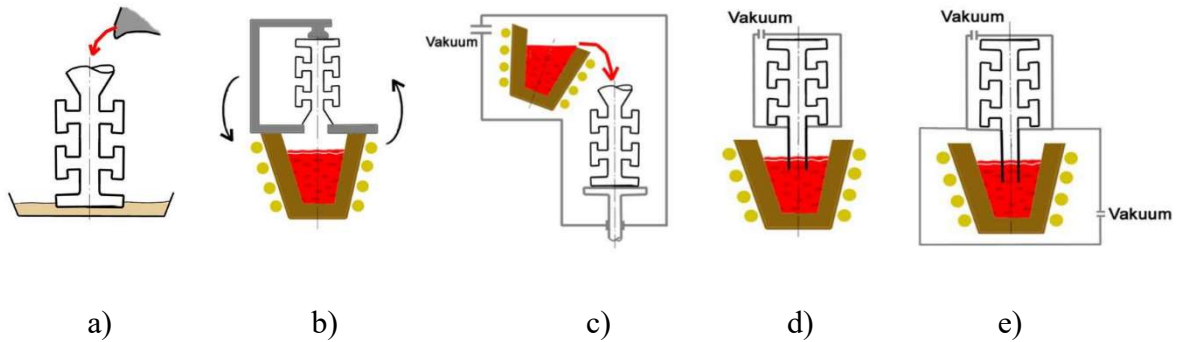
Ostríva tvoří více než 90 % váhy skořepiny a jsou tak velkým činitelem ovlivňujícím její vlastnosti. Rozlišují se jemná prášková ostríva, která se přimíchávají do pojiva, a hrubozrnná pro posypávání. Hrubost i druh posypového materiálu se dále liší podle toho, zda se jedná o primární nebo sekundární obal. Pro primární obaly se nejvíce využívají zirkon a tavený korund v jemnozrnnější podobě. Následné sekundární obaly sestávají z mnohem hrubšího posypu. Využívá se pro ně tavený křemen a aluminosilikáty, jako molochit, mulit, bauxit atd. Hlavním cílem primárního obalu je dobře okopírovat model, sekundárního pak dodat formě pevnost a prodyšnost. Žádoucí je u nich nízká měrná hmotnost, malá tepelná roztažnost, chemická netečnost a nízká residuální pevnost. [13; 14; 15; 16]

1.4 Odlévání

Různorodé požadavky na přesné odlitky vedly k rozvoji speciálních technik tavení a odlévání, které přesahují prosté odlévání gravitačně na vzduchu, jež bylo zděděno po tradičním lití do pískových forem. Některé jsou zaměřeny na ochranu taveniny před atmosférou a jiné na minimalizaci turbulence při přenosu kovu z pece do formy. Další systémy byly vyvinuty pro optimalizaci plnění forem nebo k řízení vývoje mikrostruktury během tuhnutí. Některé z těchto speciálních technik a přidruženého vybavení kombinují tyto cíle za účelem dosažení výjimečné kvality odlitků, a i když nejsou výlučně pro oblast přesného lití, často právě zde naleznou uplatnění i přes vysoké náklady. [1]

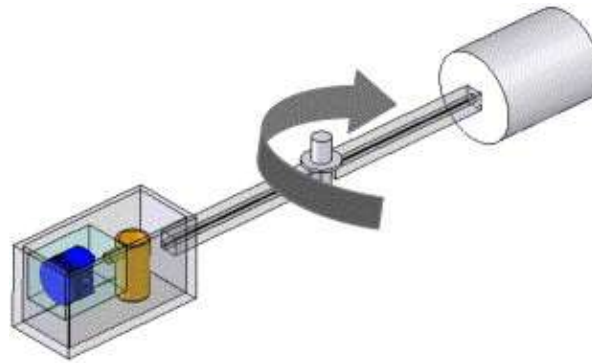
Odlévá se téměř vždy do horkých forem, bezprostředně po vyžhání. Snižuje se tak tepelný šok a pnutí, kterému jsou skořepiny při plnění kovem vystavovány. Pro odlévání do skořepinových forem se užívají techniky (obr. 7 a 8) [4; 5]:

- *Klasické lití* (a), při kterém je předeřhátá skořepina plněna na licím poli gravitačním způsobem. Obdobně jako u pískových forem.
- *Sklopné lití* (b), které také využívá gravitace, ale skořepina se při něm plní přímo z pece. Probíhá upevněním formy na pec, která se následně naklopí, a kov tak zateče do skořepiny. [17]



Obr. 7 Techniky lití [17].

- *Lití ve vakuu* (c) je obdobné gravitačnímu lití, pec i forma jsou však umístěny ve vakuové komoře. Principem je ochrana taveniny před kontaminací atmosférou. [1]
- *Vakuové nasávání* lze rozdělit na metody CLA (d), s formou umístěnou ve vakuu, a CLV (e), kdy tavenina i forma jsou ve vakuu. Skořepina je umístěna nad pecí či kelímkem a tavenina je do ní nasáta podtlakem. [17]



Obr. 8 Princip odstředivého lití [18].

- *Odstředivé lití* (obr. 8) využívá k plnění odstředivých sil při rotaci formy. Tavenina takto dokáže zaběhnout do větších detailů, navíc je vystavena tlaku během tuhnutí, což má příznivý vliv na mechanické vlastnosti. Často nachází uplatnění v dentálních a šperkařských aplikacích (obr. 9). [1; 18]



Obr. 9 Surový odlitek šperků zhotovený odstředivým litím [19].

2 METALURGIE SLITIN HLINÍKU

V počátcích své existence jako technického materiálu byl hliník využíván pouze okrajově. Průlom nastal objevem Hall–Héroultova procesu v roce 1886, který vedl k výraznému zlepšení dostupnosti tohoto kovu. Dříve byla jeho produkce velice nákladná a malé rozšíření hliníku v praxi tento fakt ještě více umocnilo. Snížení jeho ceny mělo historický dopad na vývoj konstrukčních slitin a jejich aplikace. Dalším milníkem ve vývoji a zpracování hliníkových slitin byla metoda vytvrzování hliníku Alfreda Wilma z roku 1905. Všechny tyto inovace, včetně pokroku v oblasti spalovacích motorů a slévárenské technologie, daly základ globalizaci leteckého průmyslu. Dnešní pokročilé hliníko-lithiové a hliníko-skandiumové slitiny si získávají nadále zájem díky svým unikátním a žádoucím vlastnostem. Přirozeně tak objem celosvětové produkce hliníku stále roste. V posledních deseti letech zejména díky automobilovému průmyslu. Automobilky vyvíjejí nové technologie ke snižování emisí a neefektivnějším způsobem je snižování hmotnosti automobilu. Hliníkové odlitky tak dominují v oblasti dopravy, přičemž jejich produkce, vlastnosti, integrace a uplatnění rapidně rostou. Zatímco dříve byly nejčastějšími produkty kola, části motorů a podvozků, dnes většinu tvoří vysokopevnostní strukturální odlitky vyráběné tlakovým litím. Malosériové, hodnotné hliníkové odlitky vyrobené metodou přesného lití jsou již nějakou dobu k dispozici jako strukturální odlitky nebo umělecká díla. Tato oblast zažívá velmi expansní rozvoj díky rozvoji 3D tisku vytavitelných modelů. To je velkým přínosem zejména pro vývoj prototypů, který tvoří někdy až 80 % nákladů na nový produkt. [20]

2.1 Slévárenské slitiny hliníku

Základním činitelem ovlivňujícím vlastnosti slitin hliníku jsou přísadové prvky. Dělí se na přísadové hlavní a vedlejší, z nichž hlavní vymezují typ slitiny a vedlejší příznivě ovlivňují vlastnosti této slitiny. Nejběžnějšími hlavními přísadovými prvky jsou křemík, měď, hořčík a někdy zinek. Jsou nejpoužívanější, protože tvoří s hliníkem eutektické fáze, které přinášejí dobré mechanické a slévárenské vlastnosti. Vznikají tak slitiny [21; 22]:

- Al-Si – siluminy
- Al-Cu – duraluminium
- Al-Mg – hydronalium

Podle počtu přísadových prvků se dělí na:

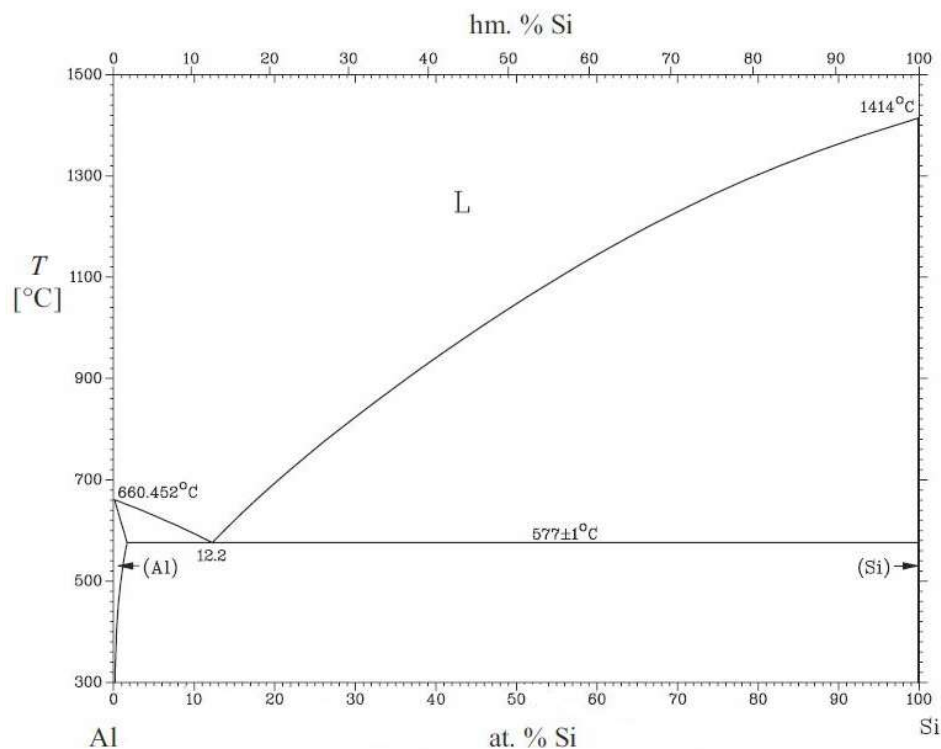
- binární – obsahují pouze jeden přísadový prvek
- ternární – hliník, hlavní a vedlejší přísadový prvek
- vícesložkové – obsahují více vedlejších přísadových prvků

Dále vlastnosti ovlivňují doprovodné prvky, tzv. nečistoty, které se do slitiny dostaly nezáměrně během výroby. Ty mohou při vyšší koncentraci zhoršovat vlastnosti slitiny buď negativním účinkem na základní kov (hliník), nebo vytvářením vlastních fází. Hlavními nečistotami v hliníkových slitinách jsou železo a případně i křemík, které během tuhnutí vytvářejí intermetalické fáze s nepříznivou hrubou morfologií. Ty se pak stávají iniciátory trhlin, což vede ke snížení odolnosti proti únavě a vrubové houževnatosti. V některých případech se ale přidávají záměrně. Například měď v siluminech, jinak nežádoucí kvůli toxicitě a zhoršování korozní odolnosti, zvyšuje pevnost a zlepšuje obrobiteľnost. Stejně tak železo, pokud se jedná o tlakové odlitky ze siluminu. Železo v siluminech, jak již bylo zmíněno, snižuje mechanické vlastnosti, ale také snižuje sklon nalepování kovu na kokily. [21; 22]

Vlivy prvků v jednotlivých slitinách hliníku se tedy mohou výrazně lišit. V některých může být prvek použit jako přísadový, v jiných je považován za nečistotu. Ve slévárenských slitinách je většinou důležité sledovat obsah alkalických kovů (Li, Na, K), kovů vzácných zemin (Ca, Sr) a těžkých kovů s nízkou teplotou tavení (Pb, Sn, Bi, Sb). Nejpoužívanějšími slévárenskými slitinami jsou siluminy. [22]

2.2 Binární systém Al-Si

Fázový diagram siluminů (obr. 10) je o něco jednodušší než u jiných hliníkových slitin. Jejich struktura je totiž vždy tvořena eutektikem, které sestává z eutektického tuhého roztoku hliníku a eutektického křemíku. Je to způsobeno tím, že obsah křemíku v těchto slitinách je vždy vyšší, než jeho maximální rozpustnost, 1,65 %, v primární fázi hliníku při eutektické teplotě 577 °C.



Obr. 10 Rovnovážný diagram Al-Si [23].

Siluminy se rozdělují podle obsahu křemíku do tří skupin [21; 22]:

- *podutektické* – struktura tvořená dendrity primární fáze α hliníku a eutektikem, vyloučeným v mezidendritických prostorech. Obsah křemíku je minimálně 5 %, většinou 7 – 11 %.
- *eutektické* – struktura tvořená jen eutektikem, obsah křemíku se pohybuje mezi 11,5 až 13 %.
- *nadeutektické* – struktura tvořená primárním křemíkem v eutektické matici. Obsah křemíku je 14 – 17 %, ale používají se i slitiny s obsahem téměř 25 %.

U nadeutektických slitin se vyskytuje primární fáze krystalického křemíku, protože při tuhnutí slitin s obsahem přísadového prvku vyšším, než odpovídá eutektickému složení, se vylučuje jako první. Po dosažení eutektické teploty začne tavenina tuhnout jako eutektikum. To pak tvoří

onu matici pro částice primárního křemíku. U siluminů může mít eutektikum různou morfologii podle tvaru vyloučeného křemíku [21]:

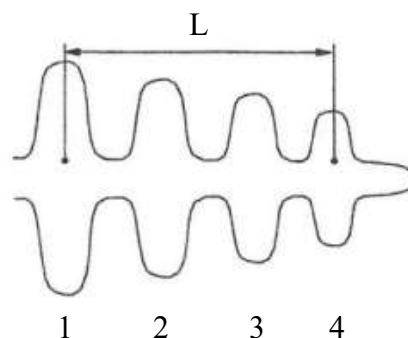
- zrnité
- lamelární
- modifikované

V eutektiku modifikovaném mají částice křemíku podobu jemných vláken. Jeho krystalizace probíhá jiným mechanismem, než u zrnitého a lamelárního, především kvůli motivaci modifikačními prvky. Podobné struktury lze dosáhnout i velmi rychlým ochlazováním rychlostí postupu krystalizační fronty 400 až 1000 $\mu\text{m/s}$. Ačkoli se opticky může takové eutektikum jevit jako modifikované, forma křemíku je jiná. Důležitějším důsledkem však je zjemnění struktury, které zlepšuje mechanické a slévárenské vlastnosti. [21; 24; 25]

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

Tato fáze se vylučuje jako první u podeutektických slitin. Začíná vznikat na částicích přítomných v tavenině z vyzdívkou pecí a pánví, na stěnách formy nebo na záměrně přidaných při očkování. Tento mechanismus se nazývá heterogenní nukleace a nejsou k němu výhodné všechny částice přítomné v tavenině. Jako zárodek pro růst slouží nejlépe ty částice, jejichž stavba je velmi podobná hliníku. Množství zárodků, které jsou energeticky výhodné pro růst, se dá zvýšit i větším přechlazením pod rovnovážnou teplotu tuhnutí. S rostoucím přechlazením totiž úměrně roste i aktivační energie pro vznik zárodků. Při vyšší aktivační energii se aktivují i méně výhodné zárodky. Z těchto pochodů vyplývá, že pro dosažení jemnozrné struktury, která má pozitivní dopad na mechanické vlastnosti, je klíčové buď vnést očkování látky vytvářející příznivé podmínky pro vznik vyššího počtu krystalizačních zárodků, nebo aktivovat větší počet zárodků rychlým ochlazováním. [21]

Jelikož většina prvků v hliníkových slitinách má velký sklon k segregaci (vzniká chemická heterogenita) a rychlost ochlazování v praxi není příliš vysoká, krystalizuje fáze α dendriticky. Tato morfologie je tvořena primární osou dendritu ve směru teplotního gradientu a sekundárními osami, případně i více stupni. Hustota sekundárního větvení je závislá na chemickém složení a rychlosti ochlazování v daném místě. [21; 26]



Obr. 11 Měření DAS [27].

Pro hodnocení takovéto struktury se používá DAS (dendrite arm spacing) analýza. Její princip spočívá ve změření vzdálenosti přes několik sekundárních větví dendritu, který je na metalografickém výbrusu vhodně orientován, a počtu těchto větví, viz. obr. 11. Hodnoty jsou pak zaneseny do vztahu (2.1) [21]:

$$DAS = \frac{L}{n-1} \quad (2.1)$$

kde: L – vzdálenost přes několik sekundárních os [μm],
 n – počet sekundárních os.

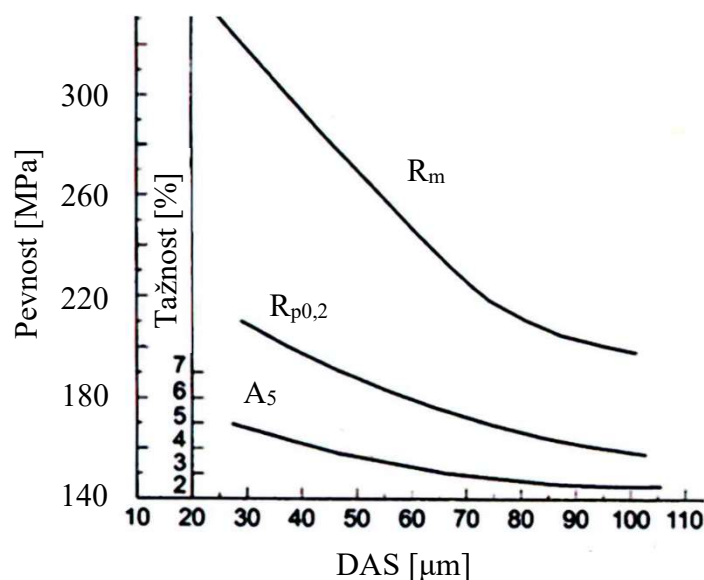
Hodnota DAS má mnohem hlubší význam, než jen průměrnou hodnotu velikosti dendritů. Jak se s jejím klesáním zmenšují vzdálenosti mezi sekundárními osami, zmenšuje se i rozsah segregací. Vměstky tak netvoří síťoví, ale vylučují se jako osamocené částice v mezidendritických prostorách. To přispívá k chemické homogenitě i lepšímu rozložení mikroporozity. Pokud je rychlost ochlazování vysoká, tak navíc zůstává více prvků rozpuštěných v přesyceném tuhém roztoku fáze α , a méně se jich vyloučí jako intermetalické fáze. [21]

Protože hodnotu DAS neovlivňuje velikost primárních zrn, nelze ji ovlivnit očkovaním. Je tedy závislá jen na rychlosti ochlazování v intervalu tuhnutí. Mezi dobou tuhnutí a DAS existuje závislost, která je obecně popsána vztahem (2.2). Vyplývá z ní, že s klesající dobou tuhnutí klesá i hodnota DAS. Obecným důsledkem všech výše popsaných strukturních jevů je, že čím je DAS nižší, tím vyšší jsou mechanické vlastnosti. Tato skutečnost je znázorněna v grafu na obr. 12. [21; 28; 29]

$$DAS = a \cdot t_f^n \quad (2.2)$$

kde: a – konstanta závislá na slitině,
 n – konstanta, hodnota v rozmezí (0,3 až 0,5),
 t_f – místní doba tuhnutí.

Místní dobu tuhnutí t_f lze zjistit z křivek ochlazování nebo simulací tuhnutí. Jedná se o časový úsek, ve kterém teplota klesne z teploty likvidu na teplotu solidu.



Obr. 12 Závislost mechanických vlastností na hodnotě DAS [21].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro hodnocení vlivu rychlosti ochlazování na mikrostrukturu odlitku zhotoveného metodou přesného lití byl jako materiál zvolen podeutektický silumin, konkrétně byla použita slitina AlSi7Mg, s chemickým složením dle tab. 1. Tento materiál byl zvolen z důvodu bohatého obsahu primární fáze α , která tuhne dendriticky, a bude tak možné ji vyhodnotit provedením DAS. Jelikož hodnota této analýzy je závislá na rychlosti ochlazování, bude díky ní poskytnuta představa o vlivu rychlosti ochlazování na výslednou mikrostrukturu odlitku. Pro zajištění různých podmínek ochlazování bylo rozhodnuto zhotovit tři skořepiny, z nichž první byla zaizolována, druhá ponechána na licím poli bez izolace a třetí prudce ochlazována vodou.

Tab. 1 Chemické složení slitiny AlSi7Mg [30]

Obsah prvků [%]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
6,5 - 7,5	0,55	0,20	0,35	0,20 - 0,65	0,15	0,15	0,15	0,05	0,05 - 0,25

3.1 Výroba zkušebních vzorků

V první fázi byla navržena geometrie experimentálního odlitku. Při její tvorbě byla brána v úvahu následující kritéria:

- kombinace různých velikostí průřezů
- dostatečná délka vzorků, pro zajištění co nejdelší oblasti s přibližně stejnými podmínkami tuhnutí a zároveň z hlediska možného dosazování kovu
- možnost zajistit zhruba stejný odvod tepla pro všechny vzorky
- technologické parametry modelu, z hlediska způsobu plnění keramické formy kovem

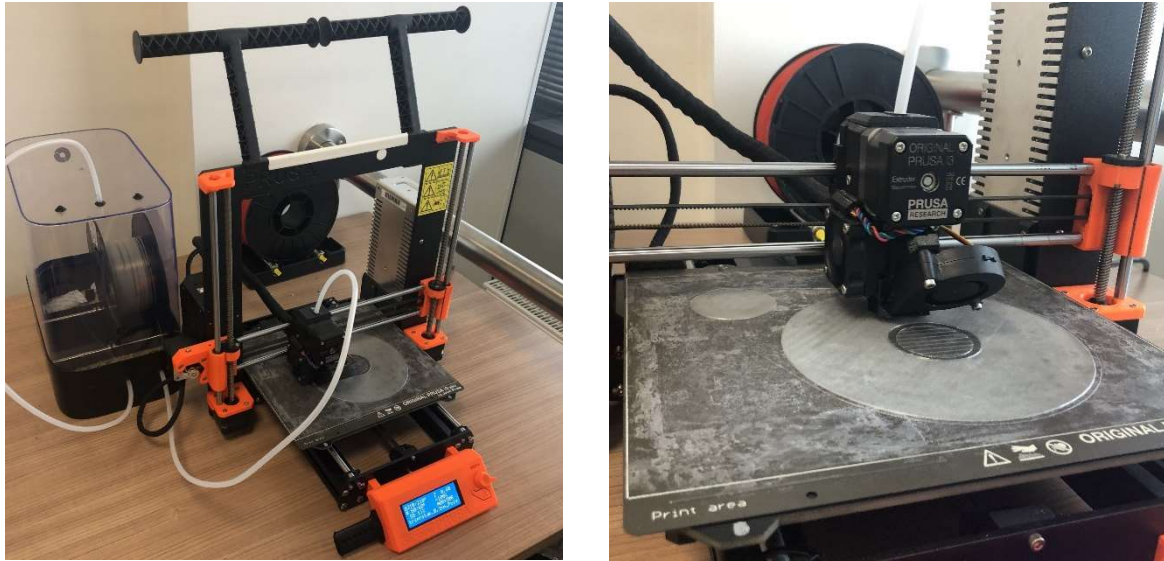
Po zhodnocení všech těchto požadavků byla navržena geometrie se třemi tyčovými vzorky a vtokovou soustavou, viz. obrázek 13. Maximální průměr tyče byl zvolen tak, aby bylo možné ideálně celý průřez zalisovat do pryskyřice při chystání metalografických výbrusů. Průměry vzorků jsou 20; 15 a 10 mm a jejich délka činí 150 mm. Zeleně zvýrazněný čep je určen k upevnění keramické nálevky.



Obr. 13 Model experimentálního odlitku.

3.1.1 Zhotovení modelů

S ohledem na potřebu jen máloho počtu modelů (tři) a bez požadavků na rozměrovou přesnost či jakost povrchu, bylo přistoupeno k využití metod RP. Konkrétně k tisku modelů technologií FDM. Toto řešení je časově i finančně mnohem efektivnější, než zhotovování matečné formy. Pro lepší podmínky tisku byla geometrie rozdělena na dva samostatné modely, vzorky s vtokovou soustavou a čep pro upevnění nálevky. Nebylo tak nutné generovat tolik podpor, které by bylo nutné následně odstraňovat. Použita byla tiskárna PRUSA i3 MK3 (obr. 14), jejíž rozměry 250×210×210 mm [31] dostačovaly maximálně pro tisk jednoho modelu (tedy dvou separátních částí) najednou.



Obr. 14 Tisk modelu odlitku.

Pro tisk modelů pro přesné lití se využívá speciální filament PolyCast od firmy Polymaker. Jeho výhodou je především možnost jeho úplného vytavení při zanechání jen asi 0,003 % popela z hmotnosti modelu. Další užitnou vlastností je možnost vyhlazení povrchu naleptáním pomocí isopropylalkoholu. Jelikož drsnost povrchu nebyla pro experiment podstatná, nebylo této možnosti využito. Pro vytavení modelů výrobce doporučuje 1000 – 1200 °C po dobu 1 až 2 hodin. Pokud by byla geometrie modelu extrémně složitá, bylo by nutné vytavování provést dvakrát. To ovšem není případ řešeného, jednoduchého modelu, viz. obr 15. [32]



Obr. 15 Zhotovený model odlitku.

3.1.2 Výroba skořepin

Jednotlivé modely byly nejprve očištěny od podpor a obě jejich části byly následně zkompletovány za pomoci lepidla. Na takto připravené modely byla nasazena keramická nálevka, která byla zafixována zalitím voskem (obr. 16). Do hmoty v nálevce byl také vložen čep se závitem, aby bylo možné s modely manipulovat našroubováním tyče.



Obr. 16 Lepení nálevky na model.

Obalování bylo prováděno na zařízení Cyclone od společnosti MK technology, s výjimkou primárního obalu. První máčení v břečce a posypávání jemnozrnějším ostřivem bylo realizováno ručně, pro docílení kvalitnějšího odstranění vzduchových bublin a rovnoměrného rozprostření keramické břečky a následného posypu. Složení použité primární a sekundární keramické suspenze uvádí tabulka 2. Jako posypový materiál pro primární obal byl použit zirkon, pro sekundární pak molochit s výrazně hrubší zrnitostí. Mezi primárním (obr. 17) a sekundárním (obr. 18) obalem bylo ještě možné vytvořit mezivrstvu pro docílení plynulejšího přechodu mezi jemným a hrubým ostřivem, na kterou by byl použit mulit. S ohledem na účel odlitku to však nebylo třeba. Celkově bylo nanášeno 8 obalů, které byly vysoušeny na vzduchu, každý cca. 3 hodiny.

Tab. 2 Doplňující údaje o použitých složkách.

Název		
Obal	Primární	Sekundární
Pojivo	Primcote® binder	Wexcoat® 24
Plnivo	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh
Posyp	Zirkon – 50/150	Molochite 16/30



Obr. 17 Model po nanesení prim. obalu.



Obr. 18 Model po nanesení sek. obalu.

Po vysušení bylo přistoupeno k vytavování modelu a následnému vyžhání skořepin v komorové žhací peci LAC PK 360/12. Vytavování bylo prováděno asi půl hodiny při teplotě 650 °C. Jelikož při vytavování modelů z PolyCastu existuje riziko potrhání skořepin vlivem dilatace modelu, byly před vyžháním skořepiny zkontrolovány. Vyžhání bylo provedeno ohřevem na 800 °C s výdrží na teplotě po dobu jedné hodiny.

3.1.3 Odlévání

Zmíněná slitina AlSi7Mg byla natavena v elektrické odporové peci (obr. 19), naočkována a odplyněna za pomoci rotorového odplyňovacího zařízení (obr. 20). Díky odplynění zároveň došlo k částečné rafinaci taveniny. Mezi tím byly v žhací peci přehřívány skořepiny na 500 °C. Těsně před odlitím měla tavenina teplotu 700 °C.



Obr. 19 Tavení vsázky.



Obr. 20 Rotorové odplyňovací zařízení.

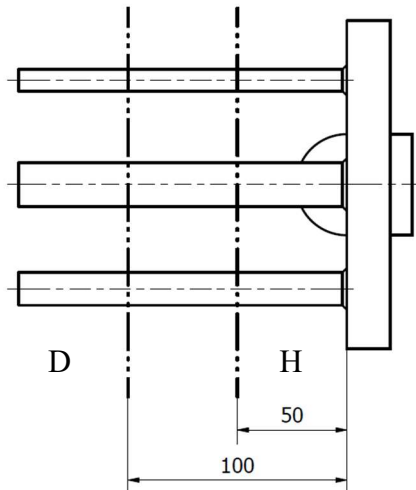
Samotné odlévání bylo provedeno klasickým způsobem, tedy gravitačně na licím poli, kam byly umístěny přehřáté skořepiny (obr. 21). První byla odlita skořepina, která byla zaizolována sibralem (tkanina z keramických vláken), následně skořepina bez izolace, a jako poslední skořepina, která byla zchlazena ponořením do vody.



Obr. 21 Odlévané skořepiny.

3.2 Analýza vzorků

Vyrobené tyčové vzorky byly odděleny od vtokové soustavy a označeny. Jejich analýza probíhala změřením hodnoty DAS na metalografických výbrusech z různých částí vzorků, viz. obr. 22, ze všech tří odlitků. Takto získané hodnoty byly porovnávány s ohledem na způsob ochlazování a průřez vzorku. Jelikož u nejmenšího průměru vzorku (10 mm) došlo u všech tří odlitků k nezaběhnutí, je u nich zkoumána struktura pouze v jedné části.



Obr. 22 Schéma dělení a značení vzorků.

3.2.1 Příprava metalografických preparátů

Vzorky byly nařezány dle schématu (obr. 22) pomocí laboratorní pily Struers Labotom-3 (obr. 23). Důležitou vlastností tohoto zařízení je chlazení emulzí v místě řezu. Nemělo by tak docházet k odlétávání jisker a tepelnému ovlivnění vzorků, což by je pro prováděný experiment znehodnotilo. Z každé zkoumané části byl oddělen vzorek ze strany řezu o tloušťce cca 5 mm.



Obr. 23 Laboratorní pila Struers Labotom-3.

Takto nadělených 15 vzorků bylo zbaveno otřepů a zalisováno na automatickém lisu (obr. 24) do pryskyřice, což výrazně usnadnilo manipulaci se vzorky v následujících krocích. Použita byla pryskyřice Levo Fast, která byla vytvrzena při teplotě 190 °C a tlaku 250 bar. Vzorky po zalisování jsou ukázány na obr. 25.



Obr. 24 Lis Metkon ECOPRESS 100



Obr. 25 Zalisované vzorky.

Samotné broušení a následné leštění bylo prováděno na brusce Struers LaboPol-5, viz. obr. 26. Postup přípravy vzorků byl konvenční, tedy nejprve hrubé a jemné broušení za mokra a následné leštění s diamantovou suspenzí. Jelikož u některých vzorků nebylo po prvním leštění dosaženo kvalitního výsledku, byly následně ještě přeštěny s použitím jiných pláten a suspenzí. Použité kotouče, plátna, brusná média a otáčky jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Použité nástroje a podmínky.

	Kotouč	Médium	Otáčky [ot/min]
Broušení hrubé	SiC zrnitost 800	Voda	300
Broušení jemné	SiC zrnitost 1200	Voda	300
Leštění	MD - Dac	Diamantová suspenze DiaDuo-2 3 μm	150
	DP - Nap	Diamantová suspenze DiaDuo-2 3 μm	150
	OP - Chem	Suspenze oxidu křemičitého OP-S NonDry 0.25 μ	150



Obr. 26 Broušení vzorků na brusce Struers LaboPol-5.

Během celého procesu přípravy výbrusů byly vzorky oplachovány lihem a důkladně vysoušeny. Důraz na očišťování vzorků mezi operacemi, a i očišťování používaných přístrojů a nástrojů, je klíčový, jelikož by mohly být vzorky sebemenší částicí nebo nečistotou poškozeny a bylo by nutné postup opakovat.

3.2.2 Analýza pomocí světelné mikroskopie

Pro pozorování mikrostruktury připravených metalografických preparátů (obr. 27) byl použit inverzní optický mikroskop, konkrétně ZEISS Neophot 32 (obr. 28), vybavený digitálním fotoaparátem Canon EOS 4000D, kterým byly pořízeny snímky všech vzorků.

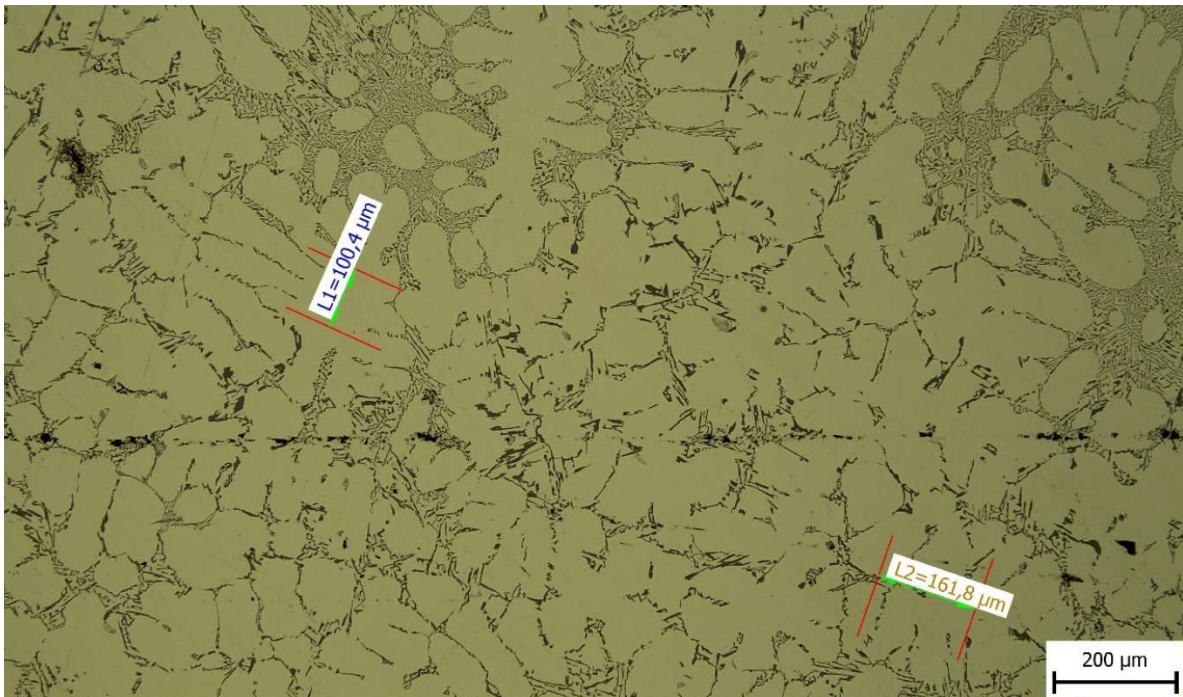


Obr. 27 Hotové výbrusy.



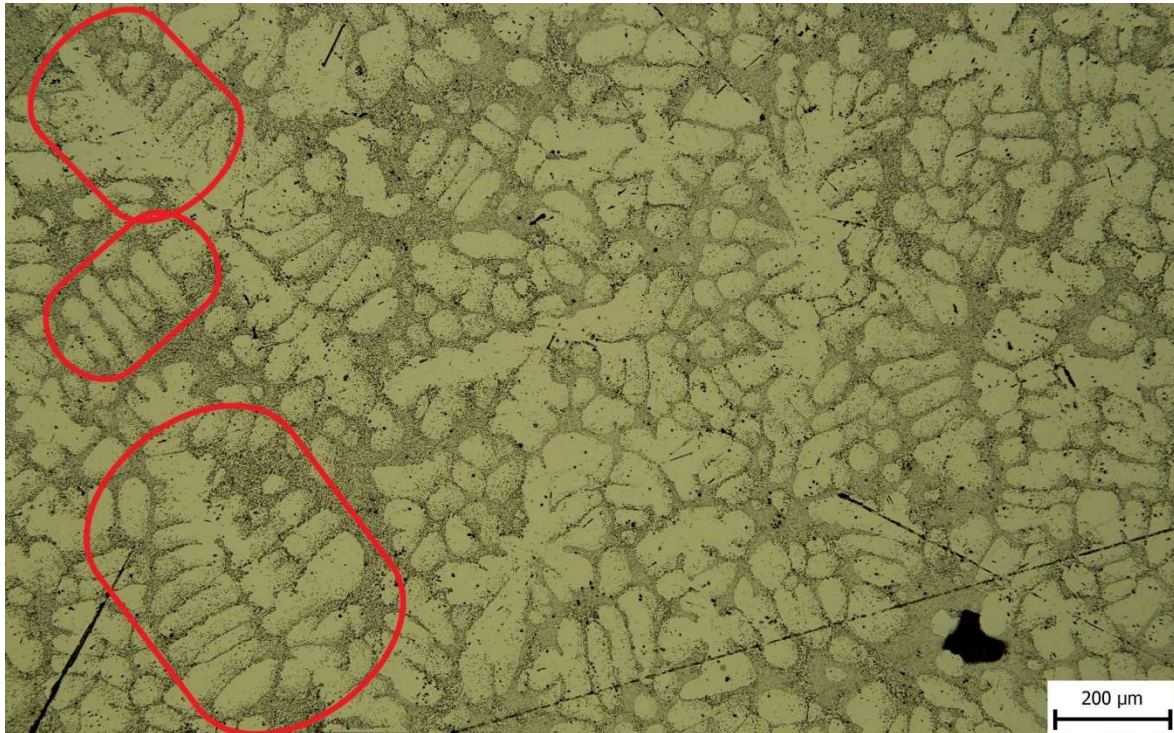
Obr. 28 Mikroskop Neophot 32.

Obrazová analýza vzorků byla provedena pomocí softwaru QuickPHOTO INDUSTRIAL 3.2. V něm byly sekundární osy dendritů prokládány rovnoběžkami a měřena jejich vzdálenost, která byla zaznamenána s počtem os pro vyhodnocení. Příklad měření je na obr. 29.



Obr. 29 Měření vzdálenosti sekundárních os, původní zvětšení 100x.

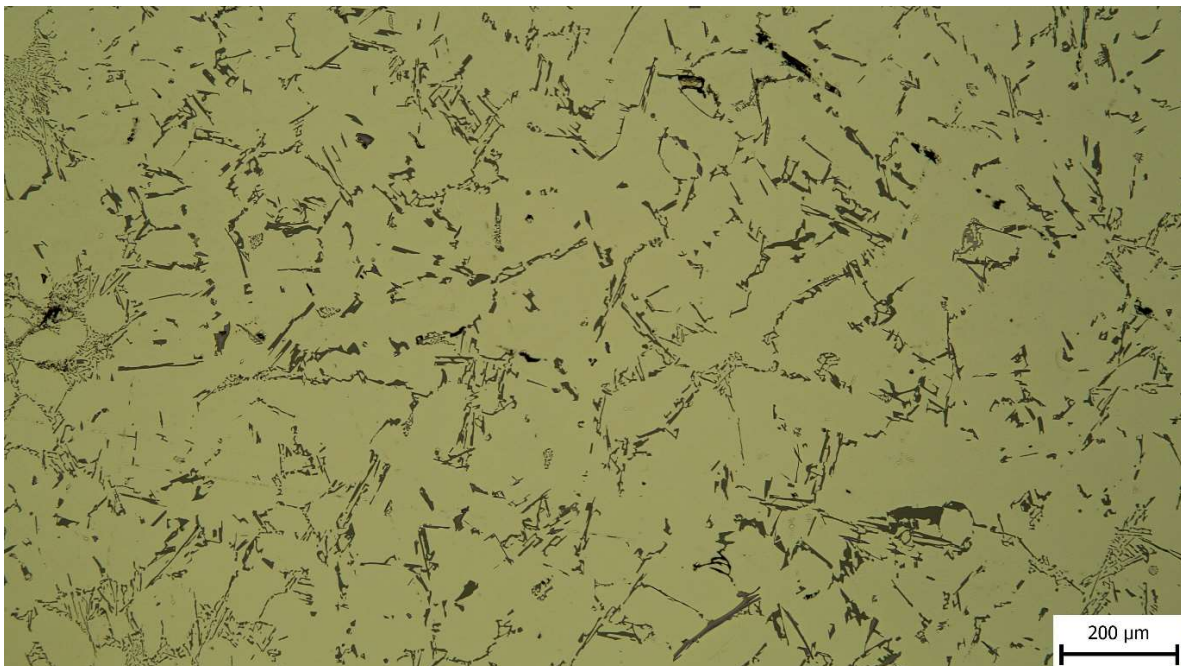
Ne vždy však bylo snadné nalézt velký počet dobře orientovaných dendritů, jelikož jsou v prostoru vykrytalizovány s náhodnou orientací a protnuty rovinou řezu (pozorovaný povrch vzorku) v různých polohách. Dendrity s příznivou orientací pro měření jsou označeny na obrázku 30. Při vyhodnocování tak byla na pořízených snímcích měřena vzdálenost sekundárních os u co možná nejlépe orientovaných dendritů.



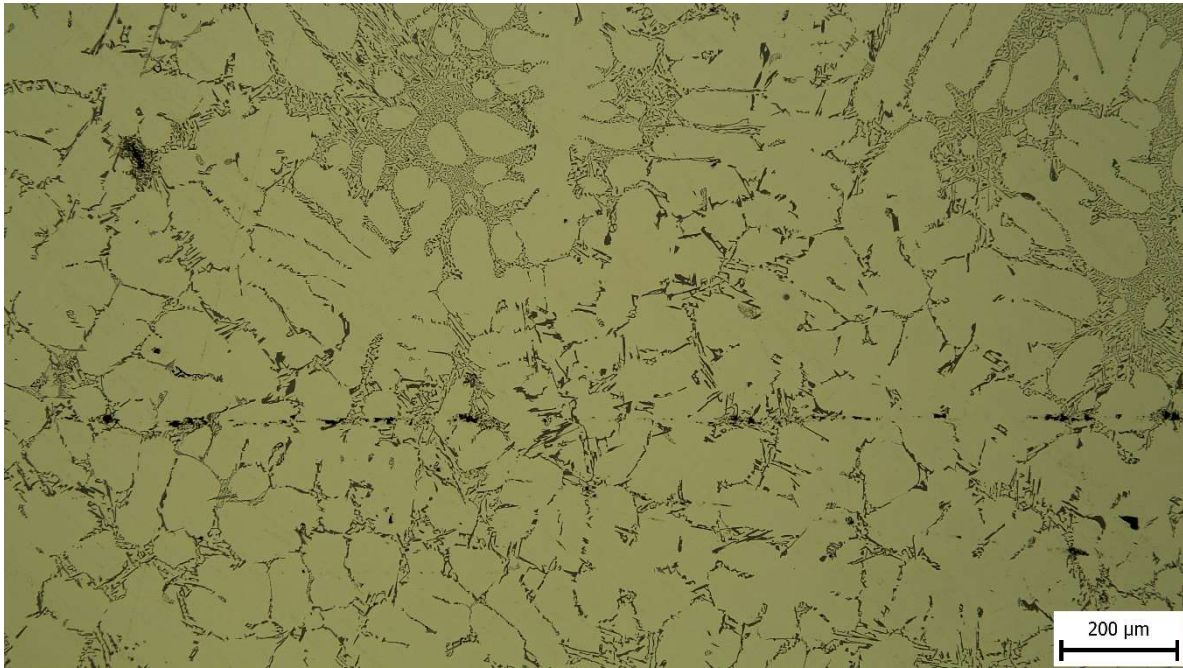
Obr. 30 Dendrity s příznivou orientací pro měření, původní zvětšení 100x.

3.2.3 Výsledky měření

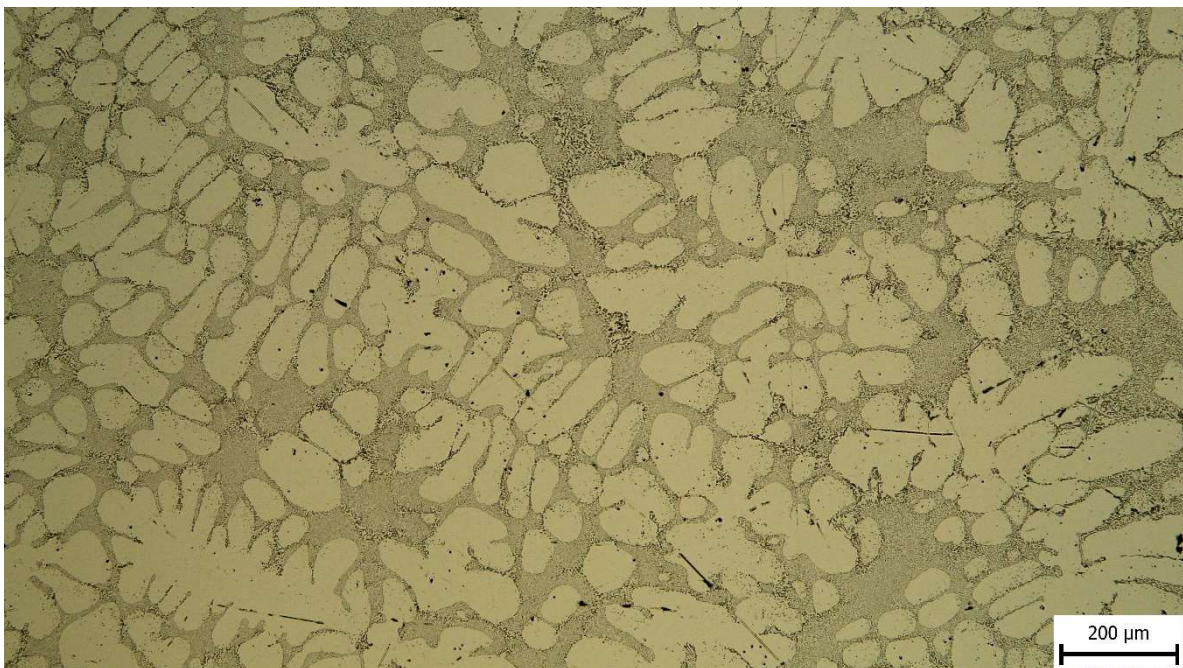
Při pohledu na snímky struktury vzorků, náležících různě ochlazovaným odlitkům, je patrný velký vliv rychlosti ochlazování na strukturu vzorků. Pouhým okem je možno porovnat rozdíl ve velikosti dendritů či jemnosti a morfologii eutektické fáze. Míru této rozdílnosti lze pozorovat na snímcích vzorků z odlitku zaizolovaného na obr. 31, bez izolace na obr. 32 a prudce ochlazeného na obr. 33.



Obr. 31 Struktura vzorku PD20 (zaizolovaný odlitek), původní zvětšení 100x.



Obr. 32 Struktura vzorku SH20 (odlitek bez izolace), původní zvětšení 100x.



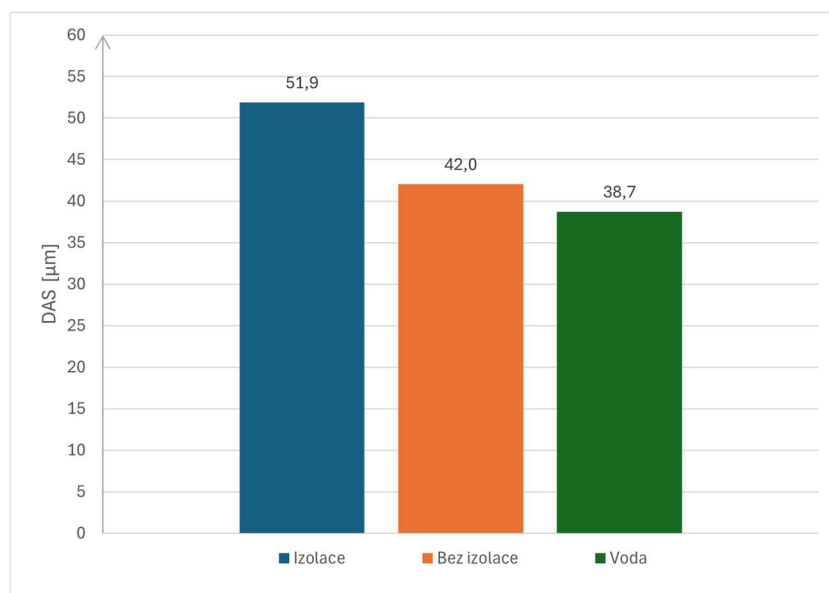
Obr. 33 Struktura vzorku RH20 (prudce ochlazovaný odlitek), původní zvětšení 100x.

Hodnoty DAS byly vyhodnocovány jak pro každý odebraný vzorek zvlášť, tedy s ohledem na konkrétní odlitek a místo odběru, tak i bez uvažování těchto jednotlivých parametrů. Po provedení základní statistiky, kdy byly nejodlehlejší hodnoty vyloučeny pomocí Grubbsova a Dixonova testu, byly závislosti vlivu jednotlivých parametrů na hodnoty DAS vyneseny do grafů. Souhrnné výsledky a přehled značení vzorků jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 Souhrn výsledků a značení vzorků

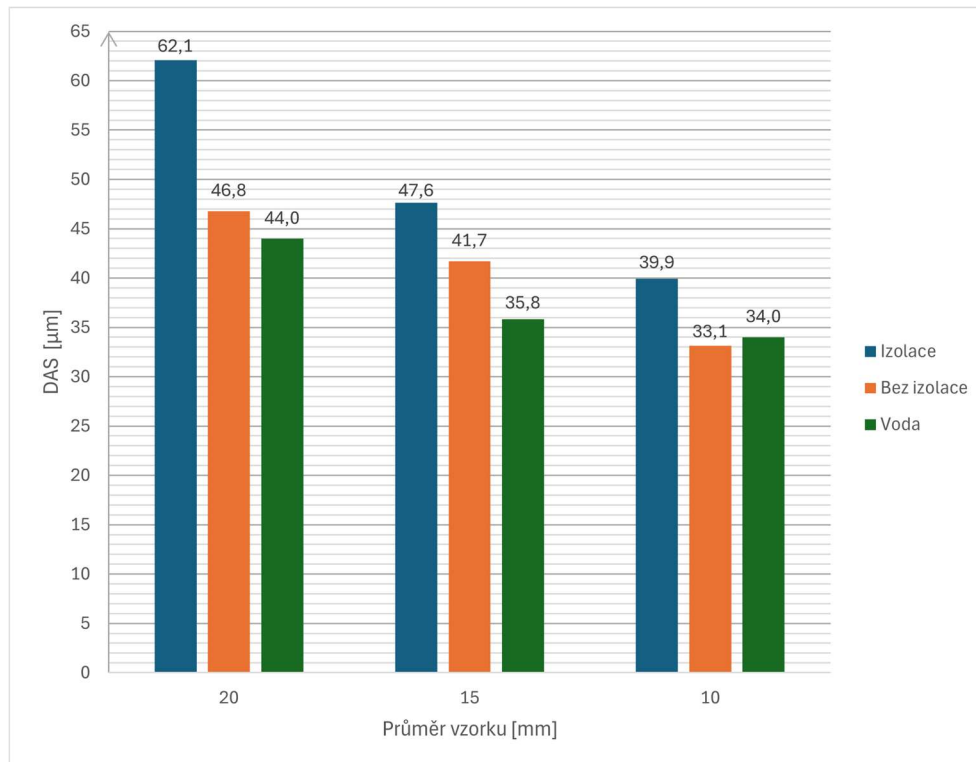
Vzorek	Ochlazování	Místo odběru	Průměr vzorku [mm]	DAS [μm]	Sm. odch. [μm]	Průměr DAS [μm]
P10	Izolace	-	10	39,9	5,5	51,9
PD15		D	15	50,7	8,3	
PH15		H	15	44,6	7,7	
PD20		D	20	52,9	6,9	
PH20		H	20	71,2	9,0	
S10	Bez izolace	-	10	33,1	3,2	42,0
SD15		D	15	38,9	6,8	
SH15		H	15	44,5	4,8	
SD20		D	20	44,8	4,0	
SH20		H	20	48,8	7,0	
R10	Voda	-	10	34,0	5,9	38,7
RD15		D	15	31,7	4,4	
RH15		H	15	40,0	4,8	
RD20		D	20	41,9	4,8	
RH20		H	20	46,1	7,5	

Po zprůměrování všech hodnot, naměřených v rámci jednoho odlitku, a jejich porovnání v grafu 1, jsou výsledky shledány jako odpovídající teoretickým předpokladům. Tedy, že u odlitků s delší dobou tuhnutí je dendritům ponecháno více času pro jejich růst, a hodnota DAS je tedy vyšší. Naopak u rychle ochlazeného odlitku byly naměřeny hodnoty nižší, jelikož došlo k rychlejšímu ochlazení taveniny, a dendritům tak nebylo dáno tolik času pro růst do větších rozměrů.



Graf 1 Porovnání průměrných hodnot DAS jednotlivých odlitků.

Rozdíly mezi porovnávanými zprůměrovanými hodnotami nejsou nijak markantní a lze je chápat především jako orientační. Poněkud lépe odpovídají skutečnosti data při porovnání průměrných hodnot z jednotlivých tyčí každého odlitku. Tato data jsou zobrazena v grafu 2.



Graf 2 Porovnání průměrných hodnot DAS jednotlivých tyčí v rámci každého odlitku.

Rozdíly mezi hodnotami jsou větší a vesměs také plní předpoklad klesajících hodnot s rostoucí rychlostí ochlazování. Jediným bodem, kdy teoretické předpoklady nejsou shodné s naměřenými hodnotami, jsou nejmenší průřezy ($\varnothing 10$ mm) vzorku bez izolace a zchlazeného vodou. Důvodem může být jak nezaběhnutí těchto vzorků, tak chyba měření.

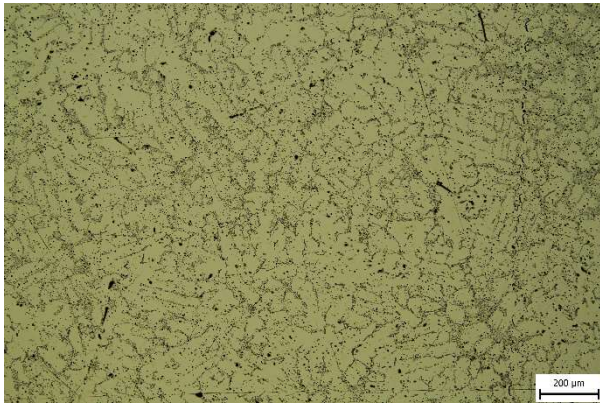
Lze také pozorovat určitý trend hodnot v závislosti na změně průměru vzorku. Tuto skutečnost je možné i opticky pozorovat na snímcích struktur jednotlivých tyčí v rámci každého odlitku. Ukázky změny struktury v závislosti na změně průřezu vzorku jsou prezentovány vždy třemi snímky z každého odlitku. Na obr. 34 – 36 je odlitek zaizolovaný, na obr. 37 – 39 bez izolace a na obr. 40 – 42 zchlazený vodou.



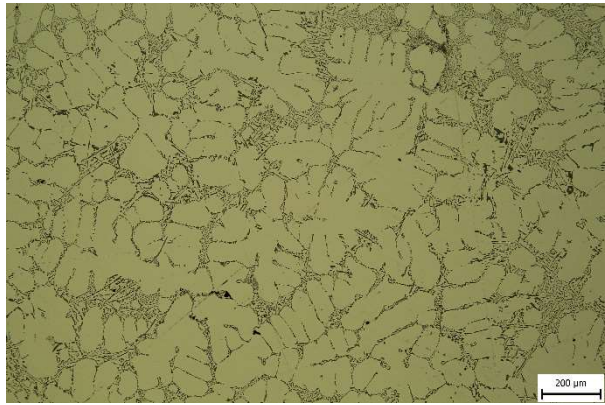
Obr. 34 Struktura vzorku PH20, původní zvětšení 100x.



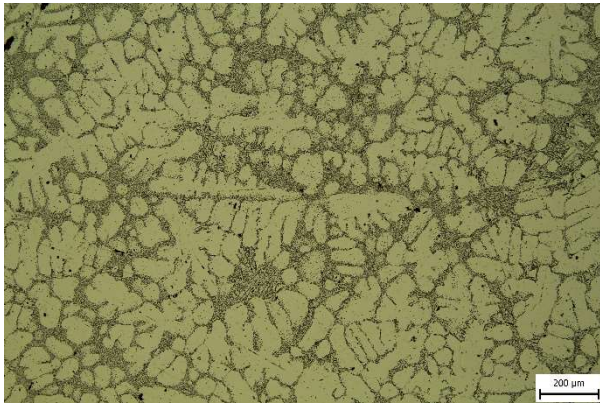
Obr. 35 Struktura vzorku PH15, původní zvětšení 100x.



Obr. 36 Struktura vzorku P10, původní zvětšení 100x.



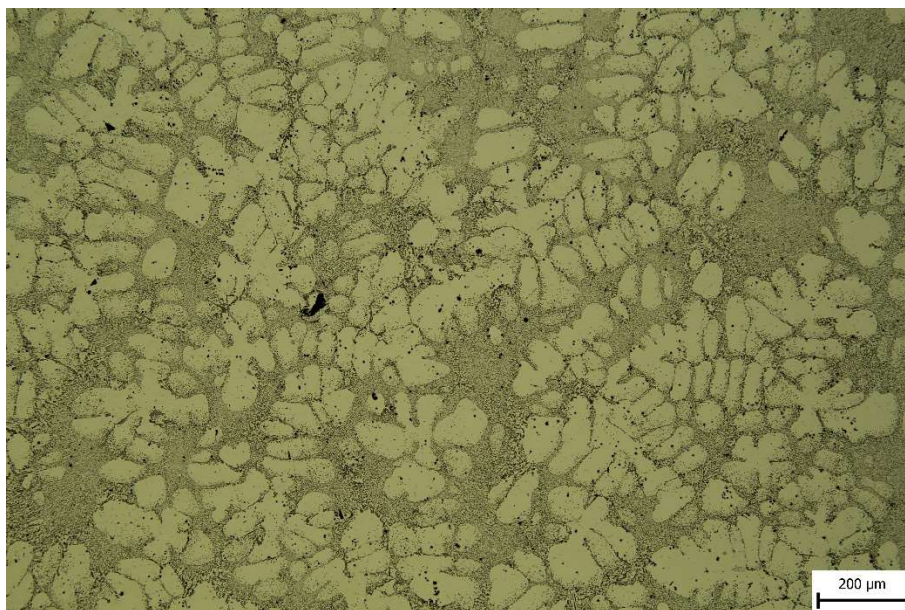
Obr. 37 Struktura vzorku SH20, původní zvětšení 100x.



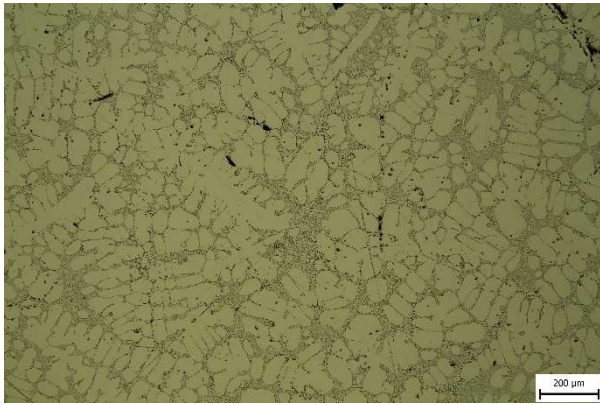
Obr. 38 Struktura vzorku SH15, původní zvětšení 100x.



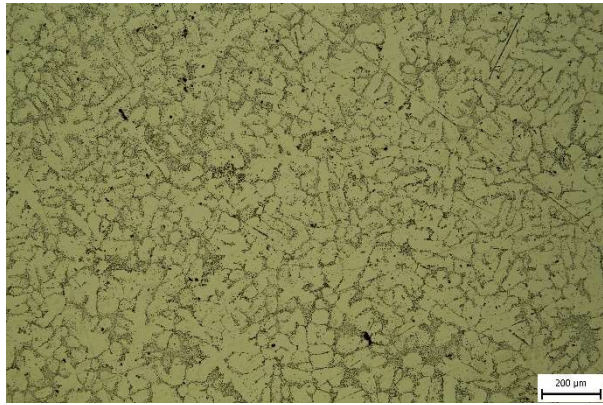
Obr. 39 Struktura vzorku S10, původní zvětšení 100x.



Obr. 40 Struktura vzorku RD20, původní zvětšení 100x.

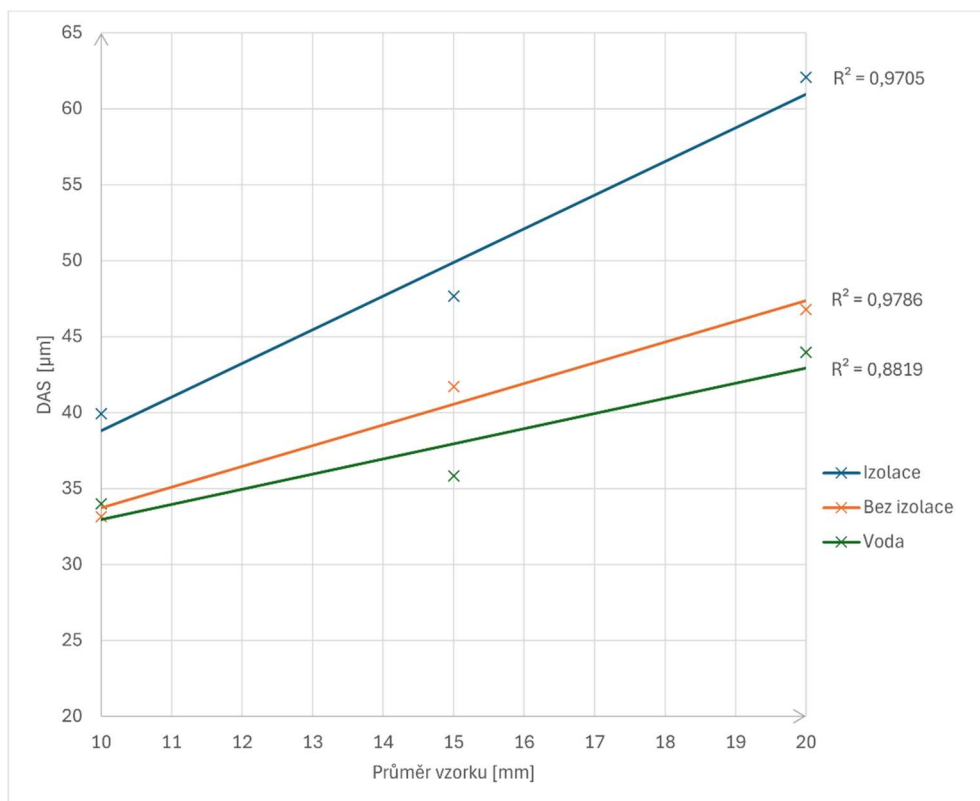


Obr. 41 Struktura vzorku RD15, původní zvětšení 100x.



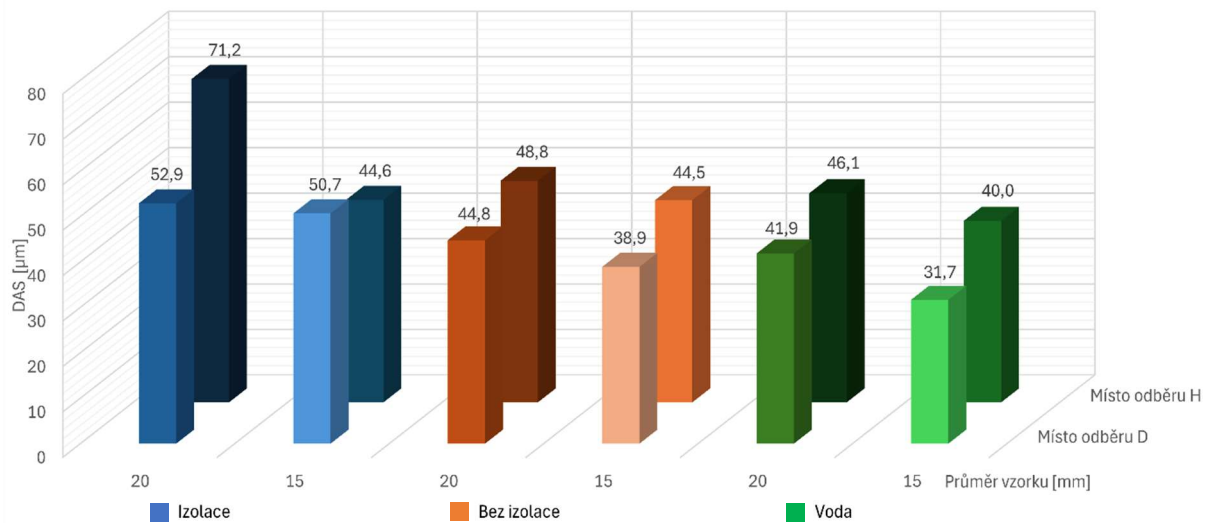
Obr. 42 Struktura vzorku R10, původní zvětšení 100x.

Pro vizualizaci tohoto vlivu změny průřezu vzorku na hodnotu DAS, byly naměřené body ze všech odliček vyneseny do grafu 3. Body jsou proloženy regresními přímkami náležícími každému odličku podle druhu ochlazování. Koefficienty determinace pro přímky náležící odličku izolovanému a bez izolace jsou poměrně vysoké. Jejich význam je však čistě vizualizační, protože jsou vyhodnocovány pouze tři body a nelze tak říct, zda je závislost mezi průměrem vzorku a hodnotou DAS čistě lineární. Celkově však jejich průběh potvrzuje závislost mezi růstem hodnot DAS se zvětšujícím se průměrem vzorku.



Graf 3 Závislost DAS na průměru vzorku.

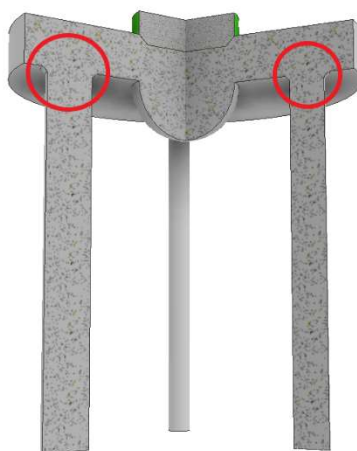
Při zkoumání naměřených hodnot na nejmenší možné úrovni, tedy při uvažování nejen způsobu ochlazování a průměru vzorku, ale i místa odběru podle obr. 22, byl vypořádan rozdíly v hodnotách naměřených na vzorcích náležících jedné tyči. Nesourodost hodnot v závislosti na místě odběru je prezentováno v grafu 4.



Graf 4 Rozdílnost DAS v závislosti na místě odběru.

Jak je vidět v grafu 4, hodnoty DAS směrem od vtokové soustavy (místo odběru **H**) ke konci tyče (místo odběru **D**) klesají. Jedinou výjimkou jsou hodnoty naměřené na tyči Ø15 mm ze zaizolovaného odlitku. Je možné, že odchylka byla způsobena chybou v měření, nebo byla tato tyč nedostatečně zaizolována. Tím by se dané místo mohlo ochlazovat rychleji a dendrity by dosáhly menších rozměrů. Navíc nelze s jistotou konstatovat, zda jsou hodnoty chybné v místě odběru **H**, **D** nebo v obou místech.

Celkově je však závislost mezi místem odběru a hodnotu DAS zjevná. Důvodem, proč jsou hodnoty v místě **H** vyšší, než v místě **D**, je nejspíše kumulace tepla ve vtokové soustavě. Místa přechodu tyče do disku vtokové soustavy, zvýrazněná na obrázku 43, byla tepelnými uzly. Což následně způsobilo delší dobu tuhnutí taveniny v místě odběru **H**. Tento fakt lze pokládat za doložení správného návrhu vtokové soustavy, jelikož disk splnil funkci nálitku a dodával tekutý kov do tyčí během jejich tuhnutí.



Obr. 43 Místa tepelného uzlu.

ZÁVĚR

Teoretická část práce poskytuje náhled do problematiky přesného lití. Postupně v ní byly rozebrány jednotlivé fáze výroby odlitku touto metodou, včetně parametrů majících vliv na výrobní proces a výsledný produkt. Dále pojednává o základech metalurgie slévárenských slitin hliníku. V návaznosti na experimentální část byla detailněji rozebrána problematika siluminů a jejich krystalizace.

Pro hodnocení vlivu rychlosti ochlazování odlitku zhotoveného metodou přesného lití byl v praktické části nejprve zvolen odlévaný materiál, způsoby ochlazování, metoda hodnocení vlivu na mikrostrukturu, geometrie experimentálního odlitku, technologie výroby modelu a volba vstupních surovin pro zhotovení skořepinové formy.

Odlitek bylo rozhodnuto zhotovit z podeutektického siluminu, ve kterém je značně zastoupena primární fáze $\alpha(\text{Al})$, která krystalizuje dendriticky. Použita byla slitina AlSi7Mg . Pro vyhodnocení vlivu rychlosti ochlazování byla použita DAS analýza, jelikož hustota sekundárního větvení dendritů je ovlivněna právě rychlostí ochlazování. Navrženy byly tři způsoby ochlazování: zaizolování odlitku, ponechání bez izolace a chlazení vodou. Geometrie odlitku byla navržena s ohledem na zajištění rovnoměrného odvodu tepla u každého odlitku, použití různých průřezů odlitku a technologická hlediska metody přesného lití. K výrobě vytavitelného modelu bylo rozhodnuto využít metody rapid prototyping a model vytisknout z PolyCastu na 3D FDM tiskárně. Modely byly obalovány, s výjimkou primárního obalu, strojně na zařízení Cyclone. Následně byly modely vytaveny a skořepiny vyžihány. Po odlití byly odlitky apretovány a rozřezány na zkoumané vzorky.

Po provedení DAS analýzy byl na statisticky zpracovaných datech vyhodnocován vliv různé rychlosti ochlazování na mikrostrukturu. Zkoumána byla také závislost mezi naměřenými hodnotami a změnou průřezu vzorku, a vliv různého místa odběru vzorku na naměřené hodnoty. Všechny zkoumané závislosti byly vyneseny do grafů.

Zjištěný vliv rychlosti ochlazování na mikrostrukturu je v souladu teoretickými předpoklady, které byly uvedeny v rešeršní části práce. Rovněž byl prokázán vliv průřezu vzorku na výslednou hodnotu DAS, kdy byly vzdálenosti sekundárního větvení dendritů zvětšovány s průřezem vzorku. Tato závislost byla potvrzena u všech třech různě chlazených odlitků. Poslední zkoumaná závislost byla také patrná z naměřených hodnot, a sice že hodnoty DAS směrem k části odlitku, kde byla tavenina ztuhlá později, byly vyšší. Tento jev byl zdůvodněn přítomností tepelného uzlu ve vtokové soustavě, ke které byly tyčové vzorky připojeny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BEELEY, Peter R. a Robert F. SMART. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 978-0-901716-66-8.
 2. PBS Group, a. s. In: *Produkty* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.pbs.cz/cz/Presne-liti>
 3. ŠÍŠKOVÁ, Pavlína. Perseus a Medusa. *CK Ciao Italia* [online]. 2019 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.ciaoitalia.cz/perseus-a-medusa/>
 4. HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [PDF]. Brno, 2009 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
 5. HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. 2007 [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/419638-Ing-ales-herman-ph-d.html>
 6. KOSOUR, Vojtěch. *Technologie rychlého prototypování za použití FDM a současně za použití technologie vytavitelného modelu* [PDF]. Brno, 2008. Dostupné také z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7086. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. M. Horáček, CSc.
 7. TALANDA, HORÁČEK a JEDOVNICKÝ. Moderní voskové směsi a výběr jejich nejvhodnějších kombinací pro slévárnu FIMES a. s. *Slévárství*. 2012, LX(9-10), 332-336. ISSN 0037- 6825.
 8. *Voskové modely sestavené do stromečků* [online]. In: PŘESNÉ ODLITKY S.R.O. [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: <https://www.presne-odlitky.com/produkty.html>
 9. KRUTIŠ, Vladimír, Pavel NOVOSAD, Antonín ZÁDĚRA a Václav KAŇA. Requirements for Hybrid Technology Enabling the Production of High-Precision Thin-Wall Castings. *Materials* [online]. Switzerland: MDPI, 2022, 15(11), 3805 [cit. 2024-02-09]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15113805
 10. LUMLEY, Roger N. Chapter 4 - Aluminium Investment Casting and Rapid Prototyping for Aerospace Applications. In: *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Woodhead Publishing, 2018, s. 123-158. ISBN 978-0-08-102063-0. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00004-7>
 11. LI, Zhihui, Yaozhong ZHANG, Xiaoyan CHEN, et al. Ceramic shell fabrication via Stereo Lithography Apparatus: Recent progress on cracking problems and preventive measures: Recent progress on cracking problems and preventive measures. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024, **28**, 1341-1358. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.069>
 12. MISHRA, Sarika a Rati RANJANA. Reverse Solidification Path Methodology for Dewaxing Ceramic Shells in Investment Casting Process. *Materials and Manufacturing Processes*. Taylor & Francis, 2010/12/03, **25**(12), 1385-1388. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2010.496125
 13. LI, Fei a Fei WANG. Preparation Process of Ceramic Shells. In: *Precision Forming Technology of Large Superalloy Castings for Aircraft Engines*. Singapore: Springer, 2021, s. 101-167. ISBN 978-981-33-6220-8. Dostupné také z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-33-6220-8>
 14. KOLCZYK-TYLKA, Joanna a Jerzy ZYCH. Investigations Concerning Improvements of the Knock Out Property of Ceramic Moulds Applied in the
-

- Investment Casting Technology. *Archives of Foundry Engineering* [online]. Foundry Commission of the Polish Academy of Sciences, 2023, **2023**(4), 34-39 [cit. 2024-02-09]. ISSN 2299-2944. Dostupné z: doi:10.24425/afe.2023.146676
15. LÜ, Kai, Xiangdong LIU, Zhaoxin DU a Yanfen LI. Properties of hybrid fibre reinforced shell for investment casting. *Ceramics International*. 2016, **42**(14), 15397-15404. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.188>
 16. WEI, Qian, Jiangwei ZHONG, Zilin XU, Qingyan XU a Baicheng LIU. Microstructure evolution and mechanical properties of ceramic shell moulds for investment casting of turbine blades by selective laser sintering. *Ceramics International*. 2018, **44**(11), 12088-12097. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.227>
 17. HORÁČEK, Milan. *VÝROBA ODLITKŮ TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU: Odlévání* [Online]. Brno. Dostupné také z: <https://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-ii/mhpslkeramickeformy.pdf>
 18. CHIRITA, G., D. SOARES a F.S. SILVA. Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al–Si alloys. *Materials & Design*. 2008, **29**(1), 20-27. ISSN 0261-3069. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.011>
 19. Jewelry Casting. In: SUPERB ELECTROMACHINERY CO. *Centrifugal Casting Machine* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.superbmelt.com/centrifugal-casting-machine/>
 20. LUMLEY, Roger N. Introduction: Aluminium, the Strategic Material: Aluminium, the Strategic Material. In: *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Woodhead Publishing, 2018, xvii-xxx. ISBN 978-0-08-102063-0. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.10000-1>
 21. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin* [online]. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. [cit. 2024-02-29]. ISBN 80-214-2790-6. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/0766d029-bd41-4580-8a36-853cfae4570f/content>
 22. GLAZOFF, Michael V., Alexandra V. KHVAN, Vadim S. ZOLOTOREVSKY, Nikolai A. BELOV a Alan T. DINSDALE. *Chapter 1 - Phase Diagrams for Binary and Multicomponent Aluminum Systems*. In: . Butterworth-Heinemann, 2019, s. 1-131. ISBN 978-0-12-811805-4. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811805-4.00001-8>
 23. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
 24. PENG, Jianfei, Wanlin WANG, Shuaijie YUAN, Yan ZHAN, Jie ZENG, Peiyuan GAN a Junyu JI. Improved mechanical and frictional properties of hypereutectic Al–Si alloy by modifying Si phase with La addition. *Materials Today Communications*. 2024, **38**, 107857. ISSN 2352-4928. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107857>
 25. LI, Quan, Xinxiu LIU, Junsheng WANG, Chengpeng XUE a Shuo WANG. Boosting the grain refinement of commercial Al alloys by compound addition of Sc. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024, **28**, 1774-1783. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.125>

-
26. GLAZOFF, Michael V., Alexandra V. KHVAN, Vadim S. ZOLOTOREVSKY, Nikolai A. BELOV a Alan T. DINSDALE. *Chapter 2 - Structure and Microstructure of Aluminum Alloys in As-Cast State*. In: . Butterworth-Heinemann, 2019, s. 133-234. ISBN 978-0-12-811805-4. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811805-4.00002-X>
 27. JANOŠŤÁK, J. *Vliv modifikace a očkování na strukturu a mechanické vlastnosti slitin hliníku* [online]. Brno, 2014 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/0766d029-bd41-4580-8a36-853cfae4570f/content>. Diplomová práce. VUT FSI. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
 28. HARUYAMA, SHIGEYUKI, Ken KAMINISHI, Hirohide KAIDA, Fumitoshi OGAWA a Tatsuo SEKINE. Effects of DAS and Defect on Impact Tensile Properties of AC4CH Aluminum Casting Alloy. In: *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers* [online]. A 70. 2004, s. 258-265 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-DAS-and-Defect-on-Impact-Tensile-of-Haruyama-Kaminishi/01e39d5cb6ed1cf34893eb31a805c9291ee1bed1>
 29. JIA, Zhengfeng, Tao LIU, Qingqiang ZENG, Huibin QING a Huixian SHEN. Mechanical Properties Research on Cylinder Head Based on Simulation of Secondary Dendrite Arm. In: (CHINA SAE), China Society of Automotive Engineers, ed. *Proceedings of China SAE Congress 2018: Selected Papers* [online]. 574. Singapore: Springer Singapore, 2018, s. 525-535 [cit. 2024-04-27]. Lecture Notes in Electrical Engineering. ISBN 978-981-13-9717-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-13-9718-9_39
 30. ISO 3522:2007(E). *Aluminium and aluminium alloys, Castings: Chemical composition and mechanical properties* [PDF]. Fourth edition. Switzerland, 2007 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/45815/a79ca13cbcf340079c59a796313bfdb8/ISO-3522-2007.pdf>
 31. 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+. PRUSA RESEARCH A.S. *Prusa3D by Josef Prusa* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
 32. PolyCast. *Polymaker* [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://polymaker.com/product/polycast/>
-

SEZNAM VÝKRESŮ

Model odlitku BP-239384-01
