



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV METALURGICKÉ KVALITY TAVENINY HLINÍKOVÉ SLITINY NA VLASTNOSTI ODLITKŮ LITÝCH DO KERAMICKÝCH SKOŘEPIN

INFLUENCE OF THE METALLURGICAL QUALITY OF THE ALUMINUM ALLOY MELT ON THE PROPERTIES OF
INVESTMENT CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Antonín Urban

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Antonín Urban**
Studijní program: Slévárenská technologie
program: bez specializace
Studijní obor: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Vedoucí práce: 2022/23
Akademický rok:

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

Vliv metalurgické kvality taveniny hliníkové slitiny na vlastnosti odlitků litých do keramických skořepin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výsledná kvalita odlitků je úzce spjatá s metalurgickou kvalitou výchozí taveniny. Metalurgickou kvalitou taveniny slitin hliníku se mimo jiného rozumí také stupeň odplynění, naočkování a modifikace. To vše má dopad na vnitřní jakost a mechanické vlastnosti výsledných odlitků.

U odlitků litých do pískových či kovových forem je tato problematika známa a lze nalézt určité informace v odborné literatuře. Ovšem u odlitků litých do keramických skořepin je již publikovaných zdrojů podstatně méně. A vzhledem k tomu, že technologie lití do skořepinových forem je ve školní slévárně na VUT v Brně používána, je vhodné tyto znalosti a zkušenosti doplnit.

Cíle diplomové práce:

Teoretické a praktické popsání a ověření vlivu metalurgické kvality taveniny, především stupně odplynění a modifikace, na výslednou kvalitu odlitků litých do keramických skořepin v podmínkách školní slévárny VUT v Brně.

Seznam doporučené literatury:

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

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth - Heinemann Ltd., 2003. ISBN 978-0-7506-4790-8.

Aluminium Casting Technology Handbook. Edited by DL Zalensas, 2th ed. Des Plaines: AFS, 1993. ISBN 0-87433-157-9.

BOLIBRUCHOVÁ, D., E. TILLOVÁ. Zlievarenské zliatiny Al - Si. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2005. 180 s. ISBN 80-8070-485-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem teploty skořepiny, tloušťkou stěny a metalurgického zpracování taveniny na mechanické vlastnosti a strukturu hliníkové slitiny AlSi10Mg odlévané technologií vytavitelného modelu. Experimentální část byla provedena ve školní slévárně. Před zahájením experimentu byla vypočítána řada simulací k prověření proveditelnosti experimentu. Je zde popsán návrh a podmínky při kterých byl experiment prováděn. Dále je v práci popsáno vyhodnocení mechanických vlastností v závislosti na tloušťce stěny, teplotě skořepin a modifikaci. V závěru práce je posouzen účinek modifikace stronciem v závislosti na tloušťce stěny a teplotě skořepiny při lití na snímcích z metalografických výbrusů.

Klíčová slova

Mechanické vlastnosti, modifikace, teplota skořepiny, tloušťka stěny, eutektikum

ABSTRACT

The thesis focuses on the influence of shell temperature, wall thickness, and metallurgical treatment of the melt on the mechanical properties and structure of the AlSi10Mg aluminum alloy processed using the investment casting technique. The experimental part was conducted in the school foundry. Prior to the experiment, a series of simulations were performed to verify the feasibility of the experiment. The thesis describes the experimental design and conditions under which the experiment was conducted. Furthermore, it presents the evaluation of mechanical properties based on wall thickness, shell temperature, and modification. In the conclusion of the thesis, the effect of strontium modification is assessed with respect to wall thickness and shell temperature during casting, using micrographs from metallographic samples.

Keywords

Mechanical properties, modification, shell temperature, wall thickness, eutecticum

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

URBAN, Antonín. *Vliv metalurgické kvality taveniny hliníkové slitiny na vlastnosti odlitků litých do keramických skořepin* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149114>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňa.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma vliv metalurgické kvality taveniny hliníkové slitiny na vlastnosti odlitků litých do keramických skořepin vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Bc. Antonín Urban

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Václavovi Kaňovi Ph.D. za spolupráci, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Poděkování náleží také Ondřeji Štočkovi za ochotné a vstřícné jednání při výrobě skořepinových forem. Dále náleží velké díky mé rodině, přátelům a spolužákům za intenzivní psychickou podporu při tvorbě této práce.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 HLINÍK	10
1.1 Slévárenské slitiny hliníku	11
1.1.1 Slitiny Al – Si	12
2 METALURGIE PODEUTETKICKÝCH siluminů	13
2.1 Modifikace eutektika	14
2.1.1 Jak funguje modifikace	15
2.1.2 Modifikace sodíkem	17
2.1.3 Modifikace stronciem	17
2.2 Očkování	19
2.3 Rozpustnost vodíku v hliníku	21
2.4 Odplyňování	23
2.5 Vměstky ve slitinách hliníku	25
2.6 Technologie lití do skořepinových forem	29
2.7 Proces výroby skořepinové formy	29
3 EXPERIMENT	32
3.1 Numerická simulace	34
3.2 Výsledky numerických simulací	36
3.3 Podstavec pro skořepinu	43
3.4 Proces výroby formy	44
3.5 Podmínky experimentu	46
3.6 Výsledky experimentu	47
3.7 Zhodnocení zabíhavosti kovu v horní části formy	55
3.8 Vyhodnocení účinku modifikace stronciem	57
ZÁVĚR	67

Seznam použitých zdrojů

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD

Slévárenské slitiny hliníku s křemíkem jsou pro výrobu odlitků velmi oblíbené. Mezi jejich přednosti patří nízká hustota, dobré mechanické vlastnosti. Z hlediska zpracování mají dobrou tekutost, zabíhavost a oproti jiným slitinám hliníku malé smrštění. Slitiny mají dobrou obrobitelnost a korozní odolnost.

Školní slévárna na VUT FSI v Brně disponuje strojem pro výrobu skořepinových forem. Cílem této diplomové práce je zjistit dosažitelné mechanické vlastnosti u slitiny AlSi10Mg zpracované technologií vytavitelného modelu za pomoci modifikace eutektika a snižováním teploty skořepiny při lití.

V rámci diplomové práce byl navržen experiment za použití zkušebních tyček s obdélníkovým průřezem o tloušťkách 10 mm, 5 mm a 2 mm. Dále bylo navrženo, že se kov bude odlévat do skořepin o teplotě 550 °C, 300 °C a 18 °C, cílem bylo zajistit rychlejší ochlazování a dosáhnout tak lepších mechanických vlastností. Ještě před zahájením prací na experimentu bylo vypočítáno několik simulací k ověření zabíhavosti kovu při snížených teplotách skořepin a zjištění výskytu a koncentraci porozity v odlitcích. Výsledky z mechanických zkoušek tahem jsou v práci analyzovány a výsledky zobrazeny v grafech.

U forem s 5 mm a 2 mm tyčkami byly odlitky umístěny i v horní části stromečku s cílem zjistit vliv sníženého metalostatického tlaku na zabíhavost kovu v závěru procesu odlévání.

Všechny tloušťky tyček při všech teplotách skořepin byly odlity z nemodifikované a modifikované slitiny. Jako modifikátor bylo použito stroncium. Cílem bylo zjistit vliv modifikace na mechanické vlastnosti, hlavně na tažnost. Dále byly zhotoveny metalografické výbrusy, na kterých bylo možné posoudit efektivitu modifikace v závislosti na tloušťce stěny tyčky a teplotě skořepiny.

1 HLINÍK

Hliník je stříbřitě bílý, lehký kov, který se kvůli svým unikátním vlastnostem široce používá v různých průmyslových odvětvích. Je to třetí nejhojnější prvek na Zemi po kyslíku a křemíku a těží se převážně z bauxitové rudy. Hliník je známý svým vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti, odolností vůči korozi a elektrickou vodivostí, což ho činí všestranným materiálem pro širokou škálu aplikací [16], [17].

Mezi nejčastější použití hliníku patří výstavba, doprava (například automobily, letadla a vlaky), obaly, elektroinstalace a spotřební zboží (jako například nádoby a elektronická zařízení). Také se používá při výrobě jiných kovů, jako jsou měď, olovo a zinek, a při výrobě chemikálií a farmaceutických látek [16], [17].

I když má hliník mnoho výhodných vlastností, může být pro lidské zdraví a životní prostředí škodlivý, pokud se s ním nepracuje správně. Například výroba hliníku vyžaduje velké množství energie a může přispívat k emisím skleníkových plynů a jiným formám znečištění. Nicméně s odpovídajícím regulováním a udržitelnými postupy mohou být výhody hliníku maximalizovány a jeho negativní dopady minimalizovány [16], [17].

Používání hliníku sahá až do starověku, kdy byl tento kov neznámý Evropanům a Asiatům. První záznamy o hliníku se objevily v antickém Řecku, a používal se jako kamenec pro barvení látek. Později se hliník stal součástí lékařských přípravků v evropské medicíně a byl také používán v dekorativním umění a šperkařství [16], [17].

První pokusy o získání čistého hliníku se uskutečnily v 19. století, ale jeho výroba byla náročná a drahá. V roce 1855 navrhl francouzský chemik Henri Sainte-Claire Deville novou metodu výroby hliníku, která umožnila jeho výrobu ve větších množstvích a snížila jeho cenu. V roce 1886 pak americký chemik Charles Martin Hall a francouzský chemik Paul Héroult nezávisle na sobě vynalezli elektrolýzu, která se stala standardní metodou výroby hliníku a umožnila jeho výrobu v masovém měřítku [16], [17].

Od té doby se použití hliníku stalo běžným a jeho využití se rozšířilo do mnoha odvětví.

Hliník je také velmi důležitý materiál v oblasti slévárenství. Hliníkové slitiny mají totiž vynikající slévárenské vlastnosti a lze je odlévat do komplexních tvarů. Proto se hliník často používá k výrobě dílů pro automobilový průmysl, letectví, energetiku a mnoho dalších průmyslových odvětví [16], [17].

Ve slévárenství se používají různé typy hliníkových slitin, které mají různé mechanické vlastnosti, chemickou odolnost a tepelnou stabilitu. Například slitina Al-Si se používá pro výrobu motorových bloků a hlav, zatímco slitina Al – Cu se používá pro výrobu odlitků s vysokou pevností. Slitina Al-Mg má dobrou leštitelnost a dobře se eloxuje, mimo jiné má i vynikající korozní odolnost. Využívá se tedy tam, kde je kladen důraz buď na vzhled nebo korozní odolnost výrobku [16], [17].

V současné době se ve slévárenství používají moderní technologie, jako je například lití do kokil, nízkotlaké a vysokotlaké lití, které umožňují vyrábět hliníkové díly s vysokou přesností a kvalitou. Tyto technologie také snižují množství odpadu při výrobě, což je pro životní prostředí velmi přínosné [16], [17].

Celkově lze říci, že hliník je v oblasti slévárenství velmi důležitý materiál a jeho význam stále roste [16], [17].

1.1 Slévárenské slitiny hliníku

Hliníkové slitiny jsou velmi důležité v oblasti slévárenství, protože mají výborné slévárenské vlastnosti a umožňují vyrábět díly s komplexními tvary. Existuje mnoho různých typů hliníkových slitin, které se používají v různých průmyslových odvětvích. Následuje přehled nejčastěji používaných slitin:

- Slitina Al – Si – Tato slitina obsahuje hlavně hliník a křemík a má výbornou odolnost proti korozi. Používá se pro výrobu dílů pro automobilový průmysl, jako jsou například motorové bloky, hlavy, kryty a konzole [2], [19].
- Slitina Al – Cu – patří k tzv. vysokopevným slitinám hliníku. Vyznačují se vysokou pevností i nad 400 MPa. Tažnost a lomová houževnatost jsou až dvojnásobné oproti slitinám Al – Si. Odlitky z těchto slitin jsou vhodné pro použití za zvýšených teplot. Nevýhodou je jejich obtížná nálitkovatelnost díky širokému intervalu tuhnutí [2], [18].
- Slitina Al – Mg – Tato slitina vyniká svojí sníženou hustotou a vynikající obrobitelností a leštitelností. Má také dobrou korozní odolnost a může se používat v alkalickém prostředí nebo v přítomnosti mořské vody. Příkladem jsou rohatinky pro fixaci lan na lodích [2], [19].
- Slitina Al – Zn – Tato slitina se samočinně vytvrzuje při pokojové teplotě a dosahuje po 20-30 dnech pevnosti kolem 250 MPa při tažnosti přes 5 %. Má tvrdost přibližně 70 HB a vynikající technologické vlastnosti, jako je vysoká rozměrová stabilita, dobrá odolnost proti korozi a snadná obrobitelnost. Po obrobení nebo eloxování je kvalita povrchu vynikající a materiál lze dobře pájet. Nevýhodou však je, že tato slitina má tendenci korodovat pod napětím [2], [18].

Všechny tyto slitiny mají své specifické vlastnosti, které jsou vhodné pro různé průmyslové odvětví. Díky vynikajícím slévárenským vlastnostem hliníku se tyto slitiny často používají pro výrobu dílů nejrůznějších tvarů (obr. 1), což umožňuje vyrábět lehčí a pevnější díly s vysokou přesností [2], [18].



Obr. 1 Příklady výrobků z hliníkových slitin, vlevo kola automobilu, vpravo blok motoru značky Chevrolet [10], [11]

1.1.1 Slitiny Al – Si

Patří mezi nejpoužívanější slitiny vůbec. Hlavní legurou je křemík. Dělí se podle množství křemíku na podeutektické (do 12,5% Si) a nadeutektické (nad 12,5 % Si). Jejich hlavní výhodou oproti ostatním jsou dobré slévárenské vlastnosti a korozní odolnost [2], [18].

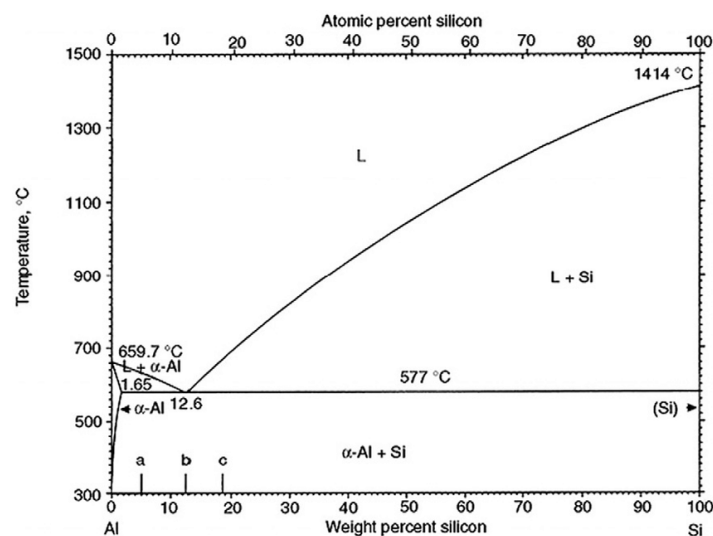
Dají se zpracovávat mnoha způsoby jako je gravitační lití do pískových forem, do kokil, nízkotlaké a vysokotlaké lití a v našem případě lití do skořepinových forem jež zajišťují vynikající rozměrovou přesnost [2], [18].

Křemík v slitinách Al – Si výrazně zlepšuje slévárenské vlastnosti, jako je zabíhavost a tekutost v porovnání s čistým hliníkem. Na obr. 2 je fázový diagram Al – Si, který se pohybuje v rozmezí 0 % až 100 % Si [2], [18].

Plastické vlastnosti slitin se mění v závislosti na množství křemíku a také na přidání dalších prvků, jako jsou měď (do 5 %), hořčík (do 2 %), zinek (do 3 %), mangan (do 3 %), sodík a stroncium (do 0,03 %) a fosfor (do 0,01 %). Přídavek železa do slitin zvyšuje žárupevnost a snižuje připěkovost slitin ke kovovým formám, ale negativně ovlivňuje plastické a pevnostní charakteristiky a jeho obsah by měl být omezen na maximálně 0,7 % pro vysokotlaké lití, jinak se doporučuje obsah železa snížit na minimum. Měď a hořčík působí kladně na pevnostní vlastnosti slitin při vytvrzování, ale snižují odolnost proti korozi. Legování titanem a borem slouží ke zjemnění struktury slitin Al – Si tím, že působí jako krystalizační zárodky. Tato metalurgická úprava se nazývá očkování [2], [19].

Přidáním mědi (do 5 %) do slitin Al – Si se zvyšují mechanické vlastnosti, konkrétně pevnost a tvrdost. V kovu precipituje vytvrzující fáze CuAl_2 buď za studena nebo se procesu vytvrzování může pomoci tepelným zpracováním. Slitiny si zachovávají dobré slévárenské vlastnosti. Mírně se snižuje odolnost proti korozi podle množství přidané mědi. Obrobitelnost je výrazně lepší [2], [18].

Hořčík se do slitin Al – Si přidává max. do 0,7 %. Podobně jako měď umožňuje vytvrzování odlitků. Vytvrzující fáze Mg_2Si ale precipituje pouze za tepla a tepelné zpracování je nutné, pokud je požadováno zvýšení mechanických vlastností. Lze očekávat nárůst tvrdosti a pevnosti v tahu. Tažnost se tepelným zpracováním snižuje a obrobitelnost se zlepšuje [2], [18].



Obr. 2 Fázový diagram hliníku s křemíkem [1]

2 METALURGIE PODEUTETICKÝCH SILUMINŮ

Při tavení a odlévání slitiny dochází k různým chemickým nebo fyzikálním pochodům, které mají negativní vliv na výsledné vlastnosti odlitku. Tavenina reaguje s atmosférou, kelímkem a nástroji za vzniku sloučenin, které jsou nežádoucí. [2], [18]

Do metalurgických úprav se řadí odplynění taveniny. V hliníku je vysoká rozpustnost vodíku, která ale v tuhém stavu prudce klesá a při tuhnutí se díky tomu vylučují bubliny, popřípadě bubliny kombinované s mikrostaženinami. Tyto vady homogenity se obvykle souhrnně nazývají porozita. [2], [18]

Tavenina se také může očkovat. Očkováním se rozumí vnášení zárodkotvorných částic do taveniny, na kterých za již malého přechlazení taveniny začne krystalizovat tuhá fáze. Očkovadlo musí mít podobné rozměry atomové mřížky a na povrchu musí být malý úhel smáčení a jeho částice musí být co nejmenší a dobře se rozptýlené v tavenině. Takový materiál zaručí kvalitní očkování. [2], [18]

K úpravám taveniny se řadí také modifikace. Modifikace je úprava způsobu tuhnutí eutektika pomocí stroncia, sodíku nebo antimonu. Modifikační účinek mají i jiné prvky, ale buď pro jejich vysokou cenu nebo slabý modifikační účinek se v průmyslu nepoužívají. [2], [18]

Tavenina se může taky zbavovat nečistot a vměstků. Toho se dá docílit několika způsoby. Používají se různé rafinační soli, které zapříčiní flotaci nečistot a zároveň jejich zachycení do strusky. Další metodou je velká škála filtrů a sítok, které se umísťují do vtokové soustavy kde zachycují právě zmíněné vměstky a nečistoty. [2], [18]

Efektivním způsobem, jak se zbavit především oxidických plen je vedení tavby a odlévání ve vakuu, tato metoda je však hodně nákladná, a ne každá slévárna jí disponuje. Určité omezení, co se týče velikosti odlitků také představuje velikost vakuované komory. [2], [18]

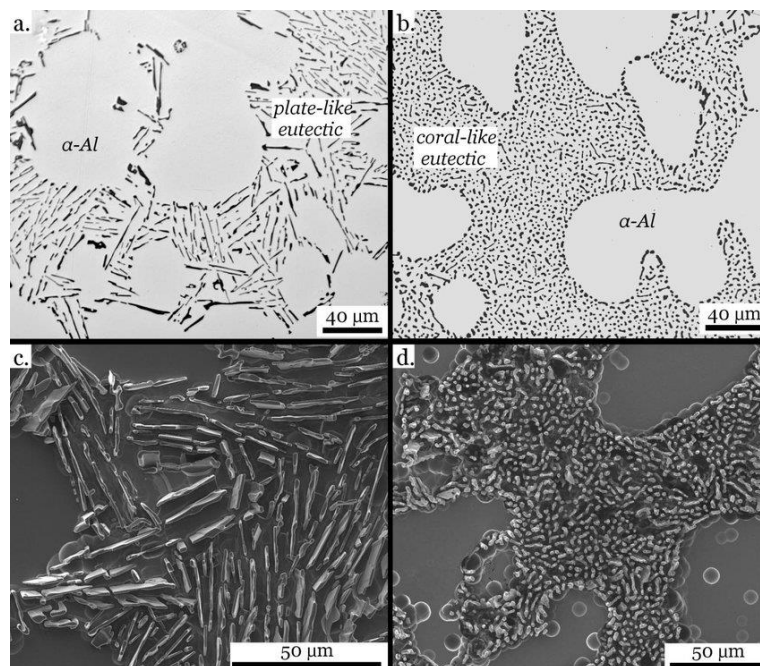
2.1 Modifikace eutektika

Eutektikum je směs čistého hliníku a čistého křemíku s jasně definovanými hranicemi. V nemodifikované slitině křemík tvoří malé destičkové útvary s ostrými hranami, které jsou nevhodné z hlediska napěťových koncentrací. [2], [8]

V první řadě je potřebné si uvědomit, že podle chemického složení slitin Al – Si je v matici určitý podíl eutektika. Pokud je materiál hodně podeutektický, eutektika bude málo a tím pádem modifikace bude mít menší vliv na mechanické vlastnosti. Naopak pokud bude chemické složení blížíci se eutektickému složení bude význam modifikace stoupat. [2], [8]

Chemické prvky, které se dají použít jako modifikátor jsou Sr, Na, Yb, Ba nebo antimon. V průmyslu se však prosadilo Sr, Na a v některých případech antimon. Nevýhodou posledně jmenovaného je, že tvoří se Na a Sr krystalizačně neaktivní sloučeniny, modifikační efekt je tím pádem zrušen. Nedoporučuje se proto ve slévárnách používat slitiny modifikované antimonem a slitiny modifikované Na nebo Sr. Ostatní prvky nemají dostatečný modifikační účinek, a proto se komerčně nevyužívají. [2], [8]

Po modifikaci se křemík vylučuje v podobě změní tenkých vláken (obr. 3b, 3d), která jsou z hlediska napěťových koncentrací více vhodná než destičky s ostrými rohy. Modifikace se z výsledných mechanických vlastností projeví především na zvýšené tažnosti. V malé míře je zaznamenávané i zvýšení tažnosti. [7], [8]



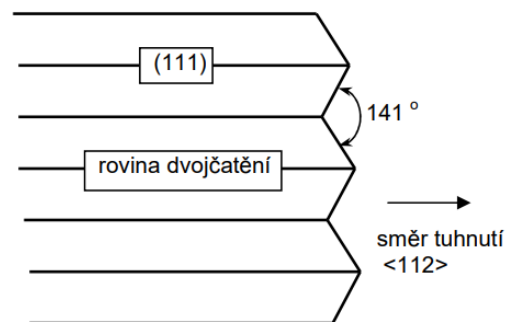
Obr. 3 Snímky znázorňující rozdíl mezi nenamodifikovanou (a, c) a namodifikovanou strukturou (b, d). Snímky c a d jsou z elektronového mikroskopu [8]

Pokud je tavenina ochlazována dostatečně rychle, bude v eutektiku krystalizovat křemík sice v podobě destiček, ale destičky budou tak drobné, že význam modifikace klesá natolik, že slitinu není třeba modifikovat. Tohoto faktu se s výhodou využívá u zpracování siluminů vysokotlakým litím. Náklady na zpracování taveniny se tím sníží. [2]

Rychlé tuhnutí taveniny dále zaručuje menší hodnotu DAS – vzdálenosti mezi sekundárními rameny dendritů α - Al. Je prokázáno, že menší hodnota DAS koreluje se zvýšením meze pevnosti materiálu v tahu. [2], [18]

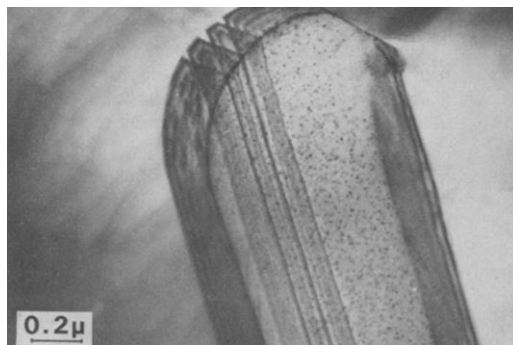
2.1.1 Jak funguje modifikace

Křemík v eutektiku nejčastěji tuhne na zárodku na bázi fosforu ve skoro čisté krystalické podobě a může růst pouze některými směry. Pro modifikaci významnou vlastností křemíku při krystalizaci je schopnost dvojčatění. Jedná se o krystalografickou poruchu, která způsobuje větvení krystalů křemíku. Dle obr. 4 křemík roste přednostně v rovině 112. Dojde-li k dvojčatění stává se tak přes rovinu 111. Obr. 5 je snímek z elektronového mikroskopu kde je schéma z obr. 4 lépe zobrazeno v realitě. Na obr. 6 je zřetelně vidět zmiňované dvojčatění lamelárního křemíku v eutektiku. [2], [7]

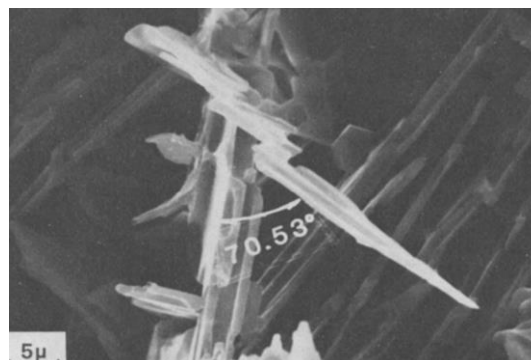


Obr. 4 Schéma znázorňující princip dvojčatění křemíku v eutektiku [2]

Eutektikum, ve kterém je křemík vyloučen v lamelární podobě, vzniká při rychlostech růstu křemíku od 5 $\mu\text{m/s}$ do přibližně 1 mm/s. Při těchto rychlostech růstu jsou lamely křemíku velké a dvojčatění je poměrně časté. Při vyšších rychlostech ochlazování nad 1 mm/s běžných u lití hliníkových slitin do kokil nebo při vysokotlakém lití jsou lamely křemíku podstatně menší, mají hladší povrch a ke dvojčatění dochází podstatně méně než při pomalejším ochlazování. Mechanické vlastnosti se blíží těm, kterých je dosahováno při modifikaci a tato metalurgická úprava tím pádem postrádá význam. [8]



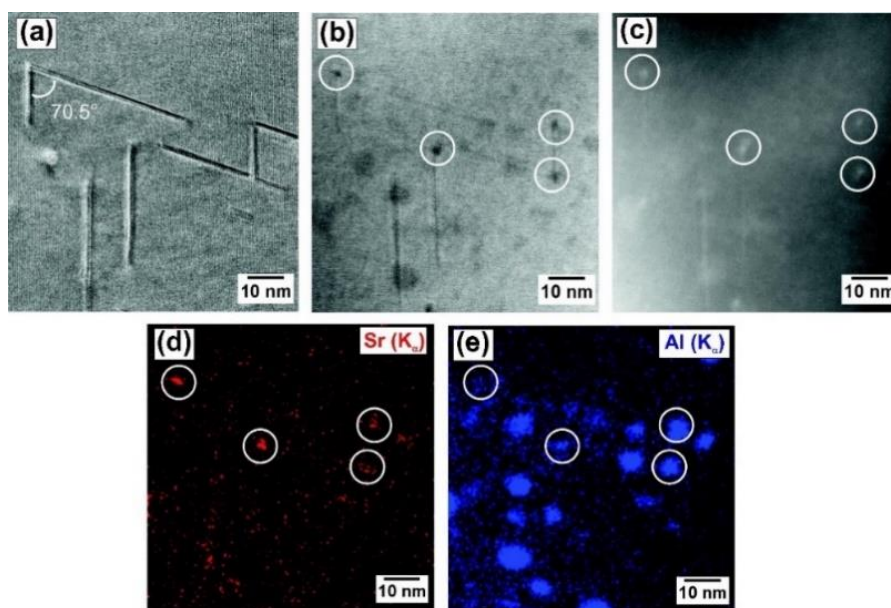
Obr. 5 Špička krystalu křemíku s viditelnými rozhraními dvojčatění, SEM [7]



Obr. 6 rozdvojené lamely křemíku po odleptání matrice, SEM [7]

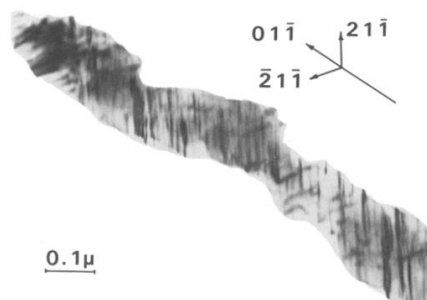
Modifikace sodíkem nebo stronciem silně podporuje dvojčatění. Před frontou tuhnutí segreguje modifikační prvek a s hliníkem a křemíkem tvoří sloučeninu, která funguje jako překážka pro rostoucí krystal křemíku, který upřednostní jinou rovinu pro svůj další růst. Snímek 7a

zobrazuje několik růstových rovin křemíku v eutektické fázi. Za povšimnutí stojí, že svírají úhel $70,5^\circ$ což odpovídá polovině úhlu naznačeného na obr. 5. Další obrázek 7b je ze STEMu se světlym polem, který naznačuje nahromadění materiálu o jiném složení než matrice v oblasti bílých kroužků. Obr 7c je to samé, ale jen v tmavém poli. Snímky 7d a 7e jsou z EDX analyzátoru rozlišujícího množství daného prvku v různých místech skenovaného vzorku. Na obr 7d je analyzováno množství stroncia a na 7e množství hliníku. V bílých kroužcích, kde došlo ke dvojčatění je vidět zvýšený obsah jak Sr tak Al. Je tak zřejmé, že samotné Sr nemá za následek modifikaci, ale na tomto efektu se podílí i hliník. [6], [7]



Obr. 7 (a) dvojčatění křemíku v eutektiku, (b) BF STEM v místě dvojčatění je materiál o jiném chemickém složení, než je matrice, (d, e) Snímek s EDX analyzátoru naznačuje zvýšený obsah Sr a Al v místech dvojčatění [6]

K procesu dvojčatění dochází velmi často, v některých případech každých 5 nm [7]. To znamená, že k procesu dvojčatění krystalu křemíku při tuhnutí dochází až 10^4 krát za sekundu [7]. Z krystalografického hlediska má křemík velmi nepravidelnou strukturu. Vnější povrch vláken je hrubý neboli fazetkový, záleží na četnosti dvojčatění. Vzniklá vláknitá morfologie je důsledkem růstu krystalů křemíku v mnoha směrech na mikroskopické úrovni. Na obr. 8 je snímek ze SEM kde je vlákno křemíku s preferovanou rovinou růstu 011. Zároveň je vidět velké množství dvojčat, které mu udávají jeho specifický tvar. [7]



Obr. 8 Snímek krystalu křemíku z namodifikovaného eutektika s velkým počtem dvojčatění, preferovaná rovina růstu je 011, SEM [7]

2.1.2 Modifikace sodíkem

Sodík je jako modifikační prostředek nejúčinnější. Funguje spolehlivě i při velmi pomalém ochlazování a po zavedení do taveniny je modifikace téměř okamžitá. Jeho nevýhodou je rychlé odeznívání účinku. Je tomu tak protože sodík má bod varu 883 °C a z taveniny se snadno vypařuje, protože parciální tlak sodíku nad hladinou kovu je velmi malý. [2]

Navíc je to prvek hodně reaktivní a má velkou afinitu ke kyslíku. Velmi ochotně reaguje s vodní párou, která se do taveniny snadno dostává ze vsázky, nepředehřátého náradí nebo přímo z tablet ve kterých se sodík často dodává. Tablety vlivem nesprávného skladování snadno zvlhnou. Je třeba dávat pozor, aby se vlhkost do tavby nedostala. Jelikož účinek sodíku rychle odeznívá radí se tato úprava taveniny až na konec metalurgického zpracování taveniny. Po modifikaci je vhodné taveninu hned odlít. [2]

V praxi se ověřilo dávkování pro dosažení ideální modifikace okolo 100 ppm v tuhém stavu, přičemž je potřeba počítat, že využití je jen zhruba 20 % v závislosti na teplotě na níž je tavenina udržovaná. Čím vyšší udržovací teplota tím bude využití sodíku menší. [2]

Sodík v čisté formě musí být díky vysoké reaktivnosti s atmosférou skladován ve vakuu nebo v petroleji, a proto se v této podobě moc nepoužívá. Častější je použití tzv. modifikačních solí, které mají podobu tablet. Ty jsou ze sloučenin chloridů a fluoridů ve kterých je stabilně vázán sodík. Po zavedení tablety do lázně ponorným zvonem se tableta rozpouští a sodík se tak rozpustí v tavenině. Existují i tablety, které se rozpouštějí pomalu. Používají se hlavně v udržovacích pecích, kde může plně namodifikovaná tavenina stát celé hodiny. [2]

V žádném případě není vhodné taveninu po modifikaci sodíkem odplyňovat, protože parciální tlak sodíku je nulový v bublinách argonu nebo jiného inertního plynu a sodík by se velmi ochotně vylučoval do bublin a následně do atmosféry. Modifikační účinek by byl zcela zrušen. [2]

2.1.3 Modifikace stronciem

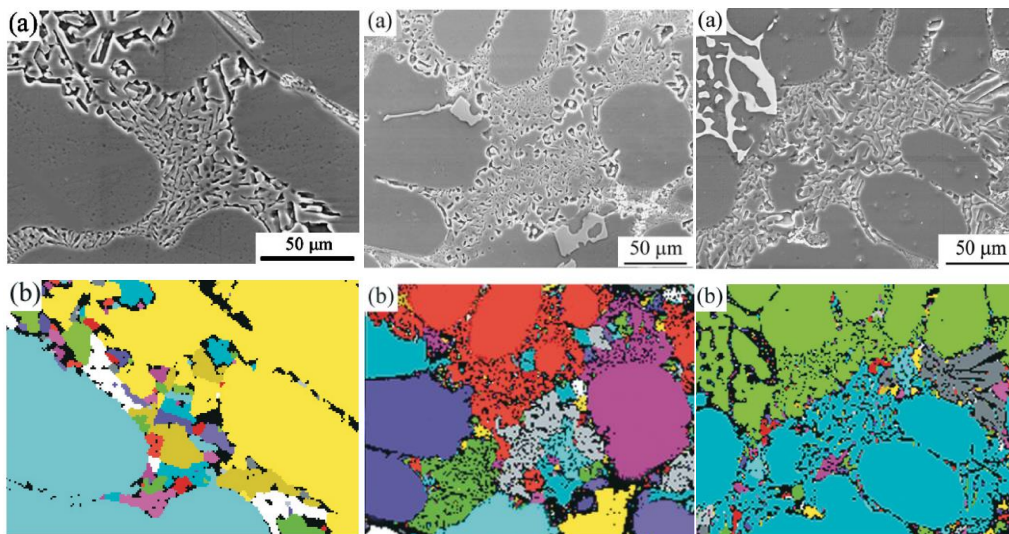
Stroncium má také vysokou afinitu ke kyslíku, a proto se v čisté formě nedodává. Dodává se v předslitinách s hliníkem, kde jeho podíl obvykle tvoří maximálně 45 %. Předslitiny mají podobu tyčí obvykle o průměru 10 až 15 mm. Tyče se dají snadno stříhat a navážít podle požadovaného obsahu v tavenině. Tyče se jednoduše vloží do kelímku a nechají se rozpustit. Pro dosažení homogenní modifikace se musí tavenina občas promíchat. [2]

Stroncium neuniká zdaleka tak rychle z taveniny jako sodík. S přibývajícím časem odstátí se účinek modifikace dokonce zlepšuje, nicméně po cca 9 hodinách klesá obsah stroncia na polovinu a účinek bude klesat. [2]

Nemodifikované eutektikum začíná krystalizovat na primárních dendritech $\alpha - \text{Al}$, přičemž hliník v eutektiku adoptuje mřížkovou orientaci $\alpha - \text{Al}$. Při obsahu Sr cca 100 ppm je schopno eutektikum nukleovat samostatně v tavenině. Při dalším zvyšování obsahu Sr se začínají zárodky eutektika opět vytvářet na primárních dendritech $\alpha - \text{Al}$ pravděpodobně z důvodu nedostatku zárodků AIP. [9]

Obr. 9 znázorňuje pomocí barev krystalografickou orientaci zobrazovaného vzorku. Obrázky označené jako (a) jsou snímky ze SEM mikroskopu. Snímky dole označené jako (b) jsou

výsledky metody difrakce zpětného rozptylu elektronů. Tato analýza umožňuje sledovat krystalografickou orientaci pozorované oblasti. Výsledek je vyobrazen pomocí barev, kdy je každá barva přiřazena jedné krystalografické orientaci. Vzorek vlevo má obsah Sr 70 ppm a vzorek uprostřed 110 ppm a vzorek Vpravo 500 ppm. U obr. 9 vlevo a uprostřed je patrné, že barvy dendritů se z velké většiny neshodují s barvami eutektika tudíž lze s jistotou říci, že eutektikum krystalizovalo nezávisle na dendritech alfa. U obr. 9 vpravo je vidět že eutektikum adoptuje krystalografickou orientaci dendritů fáze alfa. Tento jev může být vysvětlen tak, že sloučeniny vytvořené při nižších obsazích stroncia ještě umožňují nezávislou nukleaci eutektika. Při vyšším obsahu Sr jsou tyto částice příliš velké a nukleace eutektika se přesouvá zpátky na povrch dendritů fáze alfa [9]. Další možností je, že modifikátor spotřeboval většinu zárodků AIP pro křemík a krystalizace se tak přesunula na dendrity α . [9]



Obr. 9 zleva doprava obsahy Sr 70, 110, 500 ppm, nahoře snímky ze SEM, dole z EBSD analýzy pro zjištění krystalografické orientace eutektika [9]

K dobře namodifikované struktuře je potřeba splnit několik předpokladů. Množství modifikátoru se mírně mění podle složení slitiny. Kov, který má chemické složení blízké se eutektickému bude potřebovat víc namodifikovat než kov, který je hodně podeutektický. [18]

Pro dosažení namodifikované struktury je potřeba, aby byl v kovu nízký obsah fosforu, který sice působí jako zárodek pro křemík v podobě AIP, ale zároveň reaguje s modifikátorem. Ten je tak spotřebován a už dále neplní svou roli. Takže je vhodné buď držet množství fosforu na nízké úrovni nebo zvýšit dávkování modifikátoru, tím se ale prodraží kov. [2]

Z technologického hlediska se sodík hodí více pro tlustostěnné odlitky s dlouhou dobou tuhnutí. Jeho modifikační schopnost je totiž lepší a zaručí tak vhodnou strukturu i za těchto podmínek. Problémy mohou nastat u menších taveb např. 30 kg. Všechny komerčně vyráběné modifikátory na bázi Na se dodávají ve velkých tabletách určených pro tavbu o hmotnosti řádově stovek kilogramů. Tablety mají špatnou dělitelnost a drolí se čímž pak vzniká problém jak nadělenou tabletu ponořit do kovu. [2], [21]

Existuje několik názorů ohledně toho, zda modifikace ovlivňuje obsah vodíku v tavenině, naplynění a tvorbu staženin. Výsledky experimentů, které jsou popsány v literárním zdroji [3], naznačují, že sodík a stroncium nemají vliv na rozpustnost vodíku v tavenině a nezvyšují naplynění taveniny. Na druhou stranu, bylo prokázáno, že sodík a stroncium ovlivňují charakter

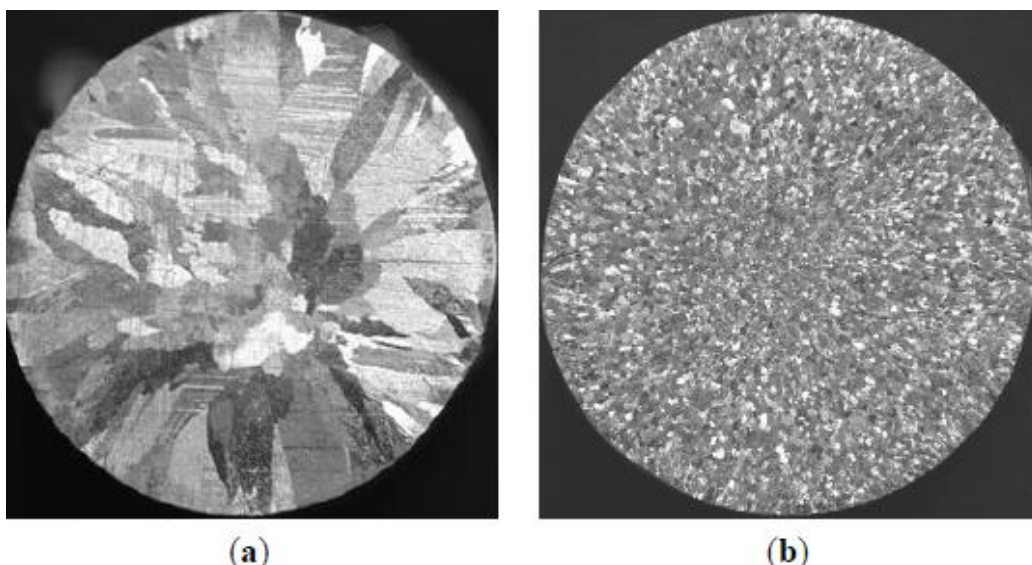
staženin v odlitku. U slitin, které byly ošetřeny modifikátory, se objevují mikrostaženiny rozptýlené do většího objemu namísto velkých soustředěných staženin. Celkový objem staženin zůstává stejný. Namodifikování kovu zapříčiní, že proces tuhnutí bude probíhat více endogenně a tím pádem se zhorší možnost dosazování tekutého kovu do mezidendritických prostor v závěru tuhnutí. Tato skutečnost může hrát roli pro slévárny, které se potýkají s velkými staženinami a používají speciální přípravky k cílenému naplynění odlitků. [3]

Modifikace má především příznivý vliv na tažnost, která se může zvednout až o desítky procent oproti materiálu, který touto úpravou neprošel. Většinou bývá zaznamenán i malý nárůst pevnosti v tahu, ale většinou je tak malý, že je zanedbatelný. Množství stroncia by se pro účinnou modifikaci mělo pohybovat kolem 200 až 300 ppm. Čím více se slitina blíží eutektickému složení tím více stronci je potřeba. Eutektická slitina vyžaduje zhruba 400 ppm stroncia. [2], [9]

2.2 Očkovaní

Očkovaní je metalurgický proces, při kterém se do taveniny vnáší zárodkotvorné částice, na kterých krystalizuje primární fáze. Má význam spíše pro více podeutektické slitiny s menším obsahem Si kde se vylučuje větší množství primární fáze. Tyto částice musí mít co nejvíce podobnou mřížku jako má primární fáze. Na těchto zárodcích bude nukleovat primární fáze již při velmi malých přechlazeních. Výsledkem je zjemněná struktura s velkým počtem malých zrn, porozita se zjemňuje a je více rozprostřená v celém objemu odlitku. Nemění se však hodnota DAS, ta je závislá výhradně funkcí rychlosti ochlazování a růst mechanických vlastností očkovaných slitin nemá s touto hodnotou nic společného. [2], [22]

Očkovaní je vhodné hlavně v případě, že tavenina ve formě tuhne pomalu a kde je malý odvod tepla. Jsou to například technologie lití do písku nebo do skořepiny. Počet vhodných zárodků pro růst tuhé fáze se totiž odvíjí od přechlazení taveniny. V kovu je velké množství potenciálních zárodků, které se postupně aktivují v závislosti na velikosti přechlazení. Proto u technologií jako lití do kokil nebo vysokotlaké lití, kde bývá přechlazení vysoké, očkovaní naprosto ztrácí význam a struktura je i tak jemnozrná. [2], [22]

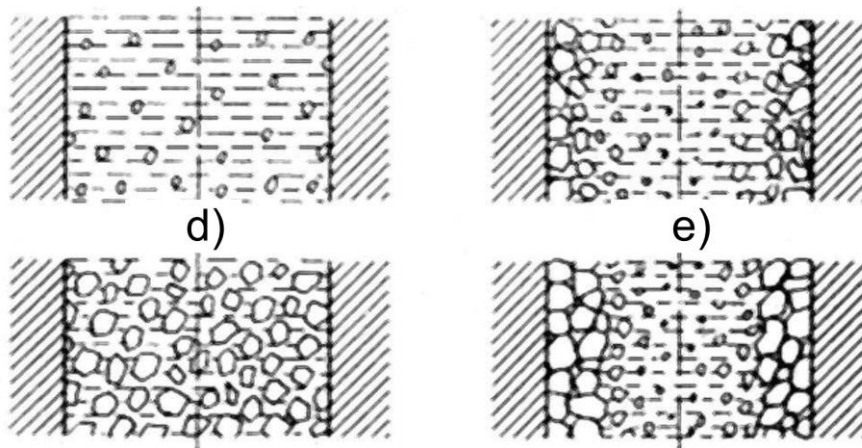


Obr. 10 Metalografické výbrusy čistého hliníku s přidavkem očkovačla Al – 5Ti a) čistý hliník, b) 0,6 % očkovačla

K očkovaní se používají látky na bázi titanu, popřípadě titanu s borem. Očkovací přípravky se prodávají v podobě solí nebo předslutin Al-Ti, Al-Ti-B. Předslitina se v kovu rozpouští a titan dále reaguje s hliníkem za vzniku $TiAl_3$. Tato částice má jako hliník FCC mřížku s podobnými parametry a na ní pak vznikají dendrity primární fáze. $TiAl_3$ se bohužel časem v tavenině zase rozpadá a nastává tak odeznívání očkovacího účinku. Po přibližně 30 minutách je nutno taveninu znovu očkovat. Z předslutin s přidavkem boru vznikají sloučeniny AlB_2 , TiB_2 nebo $(Al,Ti)B_2$ které jsou oproti $TiAl_3$ mnohem menší. Ze stejného množství očkovadla tím pádem vzniká větší množství zárodků. Zároveň přidavek boru podstatně prodlužuje dobu efektivního očkovaní, v některých případech funguje i po přetavení. [2], [22]

Očkovaní zajišťuje větší chemickou a strukturní homogenitu viz obr. 10 a menším rozsahem segregace jednotlivých prvků a díky tomu rostou mechanické vlastnosti slitiny. Významným účinkem je, že v očkovaných slitinách rychleji narůstá pevnost v tuhé fázi při teplotě krystalizace než ve slitinách neočkovaných. Snižuje se tak riziko vzniku trhlin. [2], [22]

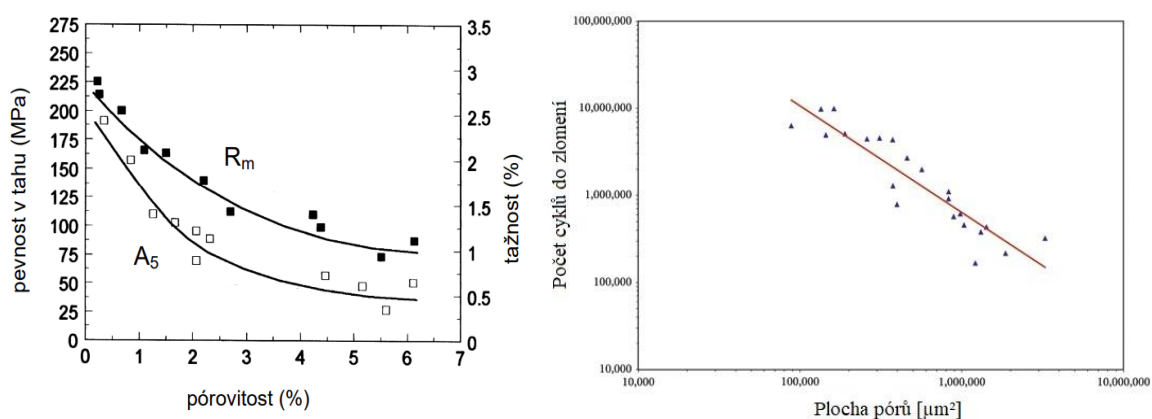
Očkovaní neovlivňuje velikost DAS. Tento parametr je ovlivněn hlavně rychlostí ochlazování. Zjemnění zrna ovlivňuje rozložení staženin nebo mikrostaženin. Neočkované slitiny mají tendenci tvořit soustředěné staženiny nebo oblasti s vysokou koncentrací ředin, zatímco v očkovaných slitinách vznikají spíše rozptýlené mikrostaženiny a řediny, které jsou rovnoměrně rozložené v celém objemu kovu (obr. 11). Charakter rozložení staženin ovlivňuje těsnost odlitků. Odlitky s rovnoměrně rozptýlenými malými staženinami mají větší odolnost proti pronikání tlakových medií. [2], [22]



Obr. 11 Rozdíl mezi kašovitým tuhnutím d) a tuhnutím s homogenní frontou tuhnutí e) [2]

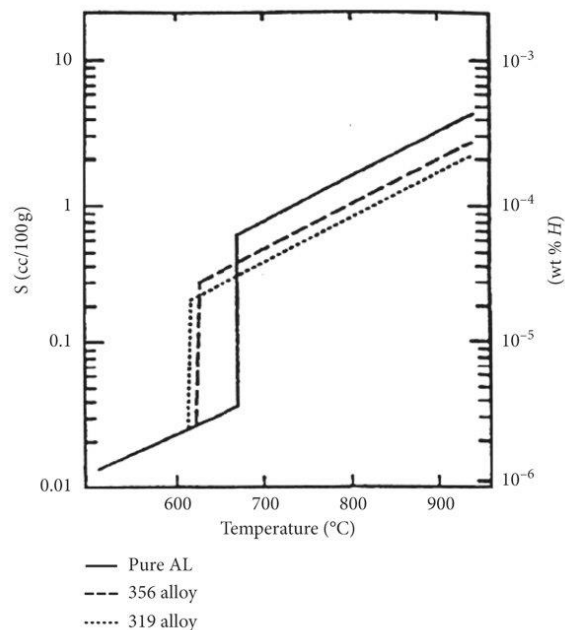
2.3 Rozpustnost vodíku v hliníku

Je obecně známým faktem, že hliník má vysokou rozpustnost vodíku v tekutém stavu, v tuhém stavu ale jeho rozpustnost prudce klesá a vede ke vzniku bublin nebo ke vzniku ředin kombinovaných s bublinami, ty se označují jako porozita. Takto vzniklé vady v odlitcích mají negativní vliv na výsledné mechanické vlastnosti materiálu zejména na tažnost, pevnost (obr. 12) a negativně jsou také ovlivněny únavové charakteristiky materiálu. Z technologického hlediska může být také narušena těsnost odlitků, tekuté nebo plynné médium si najde cestu skrz stěnu odlitku přes vzniklé póry, které bývají v objemu kovu propojeny. U odlitků, u nichž je požadován určitý stupeň těsnosti je často předepisovaná zkouška na těsnost. [2], [3]



Obr. 12 Vlevo graf závislosti pevnosti v tahu a tažnosti na pórovitosti u slitiny AlSi6Cu4, vpravo graf závislosti počtu cyklů do zlomení na pórovitosti u slitiny AlSi7Mg [2], [3]

Na obr. 13 je znázorněna rozpustnost vodíku v hliníku (plná čára) v závislosti na teplotě. Tečkovaná čára je pro slitinu $AlSi_6Cu_3$ a přerušovaná pro $AlSi_7Mg$. Rozpustnost vodíku snižuje nejen Si ale i Zn, Cu a Mn naopak prvky jako Mg, Ca, Li nebo Ti rozpustnost vodíku zvyšují. Z grafu vyplývá, že rozpustnost vodíku je v tuhém stavu mnohem menší oproti tekutému což vysvětluje vznik porozity v odlitcích. V tuhém stavu je rozpustnost vodíku v hliníku přibližně 0,03 ppm. V tekutém stavu je rozpustnost při 660 °C 0,7 ppm. Do taveniny se tedy vejde 20krát více vodíku než do ztuhlého kovu. Navíc pokud se tavenina ohřívá na vyšší teploty rozpustnost vodíku stále roste a pokud je kov při této teplotě odlit množství vodíku pro danou teplotu v něm zůstane a množství pórů se ještě zvýší. Proto se doporučuje taveninu zbytečně nepřehřívat, pokud k tomu není dobrý důvod. [2]



Obr. 13 Graf závislosti rozpustnosti vodíku na teplotě, plná čára znázorňuje rozpustnosti pro čistý hliník, tečkovaná pro $AlSi_6Cu_3$, čárkovaná pro $AlSi_7Mg$ [3]

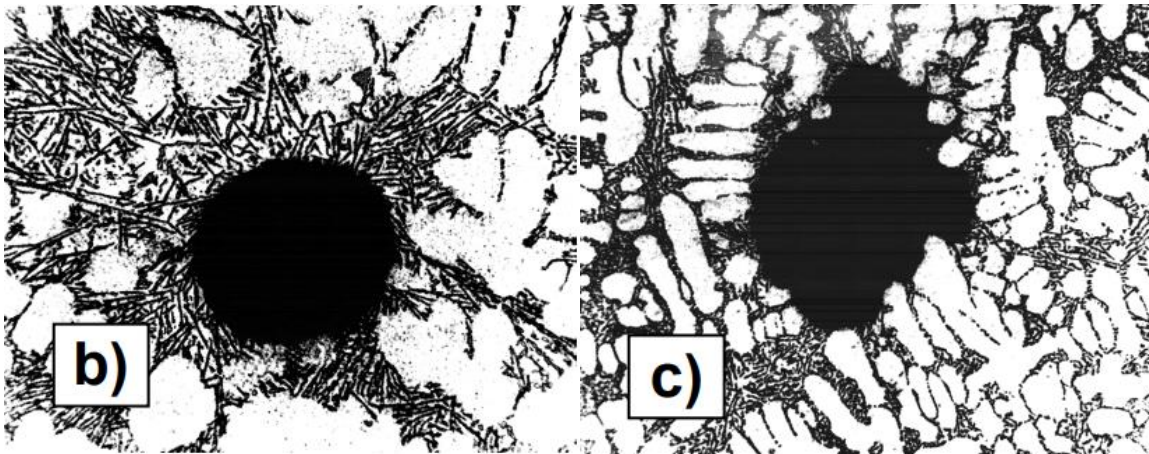
Bubliny vodíku většinou nukleují na cizích částicích heterogenně. Čím více je částice nesmáčivá tím vhodnější jsou podmínky pro vznik vodíkové bubliny. Těmito částicemi jsou nejčastěji kusy vyzdívky pece nebo oxidické vměstky na bázi hliníku, stroncia nebo hořčíku. [2], [3]

Očkování a modifikace mohou ovlivnit množství a rozložení pórů. Když jsou slitiny neočkovány a nemodifikované, mají často tendenci vytvářet soustředěné a velké staženiny. Díky očkování a modifikaci slitina tuhne více v celém objemu kašovité a zvyšuje se sklon k tvorbě rozptýlených mikrostaženin, které už nemají tak negativní vliv na mechanické vlastnosti materiálu. [2], [3]

Míra porozity, mimo množství vodíku rozpuštěného v hliníku, závisí také na rychlosti ochlazování taveniny. Pokud je tavenina ochlazována rychle, všechen vodík se nestihne vyloučit a zůstane tak jako přesycený tuhý roztok v kovu a celková porozita tím pádem klesá. Naopak je-li tavenina ochlazována pomalu (lití do skořepiny, pískových forem) můžeme očekávat vyšší porozitu při stejném množství rozpuštěného vodíku, čas na difuzi vodíku z taveniny do pórů se prodlužuje. [2], [3]

2.4 Odplyňování

Vodík se do materiálu dostává především z atmosférické vlhkosti, nepředehřátého nářadí, ze vsázky nebo ze špatně skladovaných rafinačních nebo modifikačních prostředků. Existuje více způsobů, jak taveninu odplynit. První nejjednodušší je odstát taveniny, ta se ohřeje jen kousek nad teplotu likvidu, aby byla rozpustnost H co nejmenší v tekutém stavu a nechá se odstát po určitou dobu. Přebytný vodík z taveniny mechanismem difuze odejde. Nakonec se rychle ohřeje na odpichovou teplotu a odleje. Metoda to je neefektivní a časově náročná, a proto se v průmyslu vůbec nepoužívá.



Obr. 14 Vlevo snímek vodíkové bubliny, vpravo snímek staženiny kombinované s plynem [2]

Míra odplynění závisí na způsobu, jakým se bude hliník zpracovávat. Pokud se bude jednat o technologii kde tavenina ztuhne rychle nejsou nároky na míru odplynění tak vysoké. Při pomalém ochlazování se nároky zvyšují, protože se čas na difuzi vodíku do pórů prodlužuje a objem dutin v odlitku se bude zvyšovat. Vznikající porozita ale částečně nahrazuje smrštění kovu. Proto se při hlubokém odplynění zvyšují hodnoty smrštění materiálu a kov má celkově větší sklon k tvorbě soustředěných staženin což může být někdy z technologických důvodů nežádoucí. Další možností je nechat taveninu záměrně naplyněnou a přidat do taveniny zárodkotvorný materiál pro bubliny. Tyto materiály jsou často na bázi jemných částic Al_2O_3 , na kterých vodík dobře nukleuje. Místo aby se tvořila porozita nebo soustředěné staženiny, budou dutiny mnohem menší a homogenně rozprostřené v celém objemu odlitku. Negativní vliv na mechanické vlastnosti významně klesá a je zároveň docíleno menšího smrštění materiálu vedoucí k lepší rozměrové přesnosti produkce odlitků. [2], [3], [23]

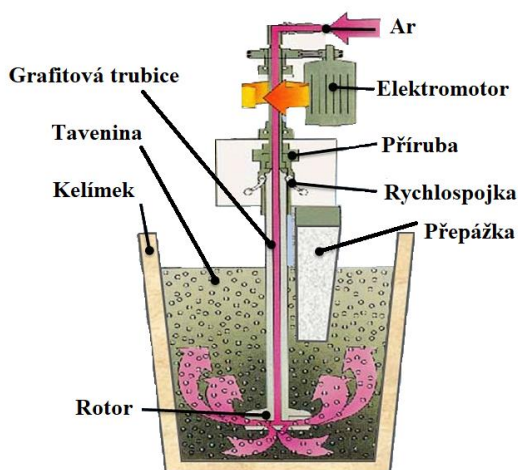
Vodík lze z kovu odstranit vakuováním. Kelímek s taveninou se umístí do zařízení s vakuovanou komorou. Snížením tlaku nad hladinou klesá i parciální tlak vodíku nad taveninou a vodík začne v podobě bublin difundovat z taveniny pryč. Tento jev lze i opticky sledovat jemným probubláváním taveniny způsobené právě bublinami vodíku. [2]

Dalším a nejvíce komerčně využívaným způsobem odplyňování slitin hliníku je dmýchání plynů do taveniny. Plyny mohou být buď inertní (Ar, N_2) nebo aktivní, které s vodíkem v tavenině reagují. Těmi jsou chlor a fluor. Oba prvky ale mohou poškodit zdraví zaměstnanců a jsou ekologicky závadné, a proto se v dnešní době již skoro nepoužívají. Lze s nimi ale dosáhnout lepšího odplynění. Princip odplynění kovu dmýcháním inertními plyny spočívá

v rozdílu parciálních tlaků. V momentě, kdy se bublina plynu dostane do taveniny je v ní parciální tlak vodíku nulový. Vodík difunduje do bubliny, dokud se tlaky nevyrovnají nebo dokud bublina nevypluje na hladinou kovu. Průměr bublin by měl být co nejmenší. Je-li určitý objem plynu rozdělen mezi větší počet malých bublin, jejich povrch bude větší, než pokud bude objem plynu rozdělen jen mezi několik velkých bublin. Pro difuzi je důležité rozhraní kov – bublina a čím větší plocha rozhraní bude tím intenzivnější bude odplynění. Zároveň menší bubliny vyplouvají na povrch pomaleji a čas na difuzi vodíku se prodlužuje. Bubliny inertního plynu také vynášejí vměstky na hladinu, kde jsou pak vyvázány do strusky a z tavby odstraněny, tento proces se nazývá rafinace. [2]

Způsobů, jak dostat plyn do taveniny je několik. Nejméně investičně náročný způsob je ponoření odplyňovací tablety zvonem. Nelze ale dosáhnout dobrých výsledků odplynění. Další možností je porézní tvárnice na dně pánve. Skrz tvárnici je dmýchán plyn do taveniny. Průměr bublin je poměrně velký a bubliny nejsou rovnoměrně rozprostřeny v celém objemu kovu. Výsledky odplynění jsou srovnatelné s odplyňovacími tabletami. Porézní tvárnice se občas kombinuje s vakuováním. Snižují se tím nároky na hloubku vakua a čas potřebný k odplynění se zkracuje. [2]

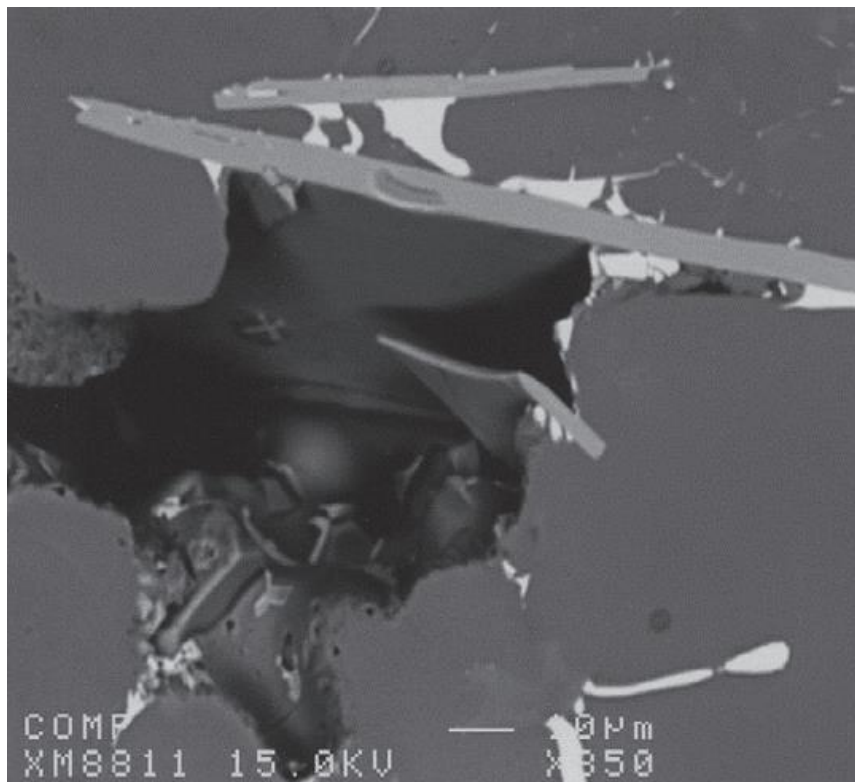
Nejvíce využívanou metodou odplyňování ve slévárnách je rotační zařízení. Toto zařízení se skládá ze sloupu a posuvného ramena ve vertikálním směru. Zařízení je schematicky znázorněno a popsáno na obr. 15. Na ramenu je trubice zakončená rotorem, skrz který je do taveniny dmýchán plyn. Rotací je zajištěna malá velikost bublin a tavenina se zároveň míchá. Dochází k chemické homogenizaci taveniny a odplynění v celém objemu ve velmi krátkém časovém intervalu. Tato zařízení se vyrábí ve stacionárním nebo mobilním provedení. [4], [5]



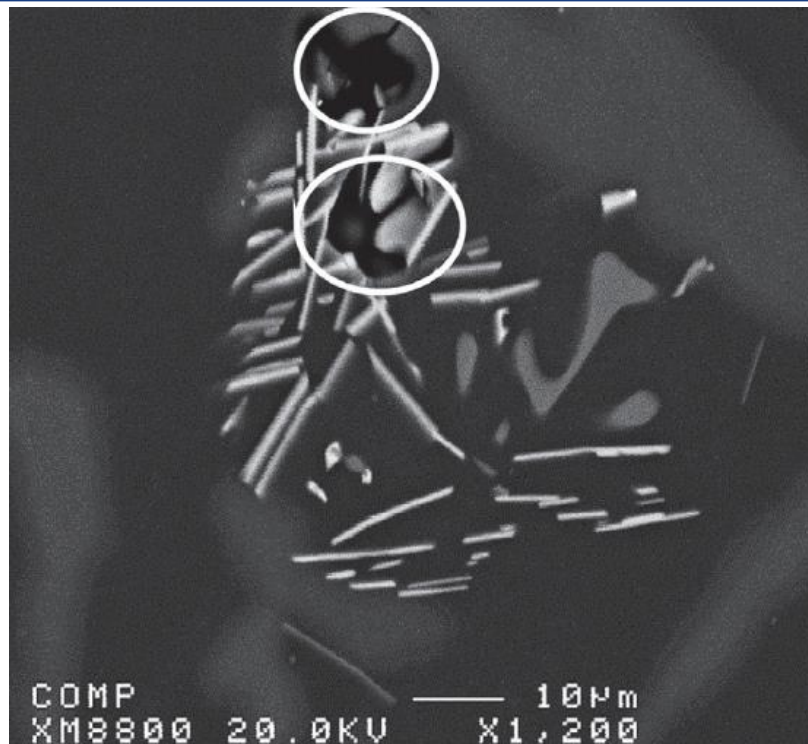
Obr. 15 Vlevo schéma rotačního odplyňovacího zařízení. Vpravo proces odplyňování rotačním zařízením [4], [5]

2.5 Vměstky ve slitinách hliníku

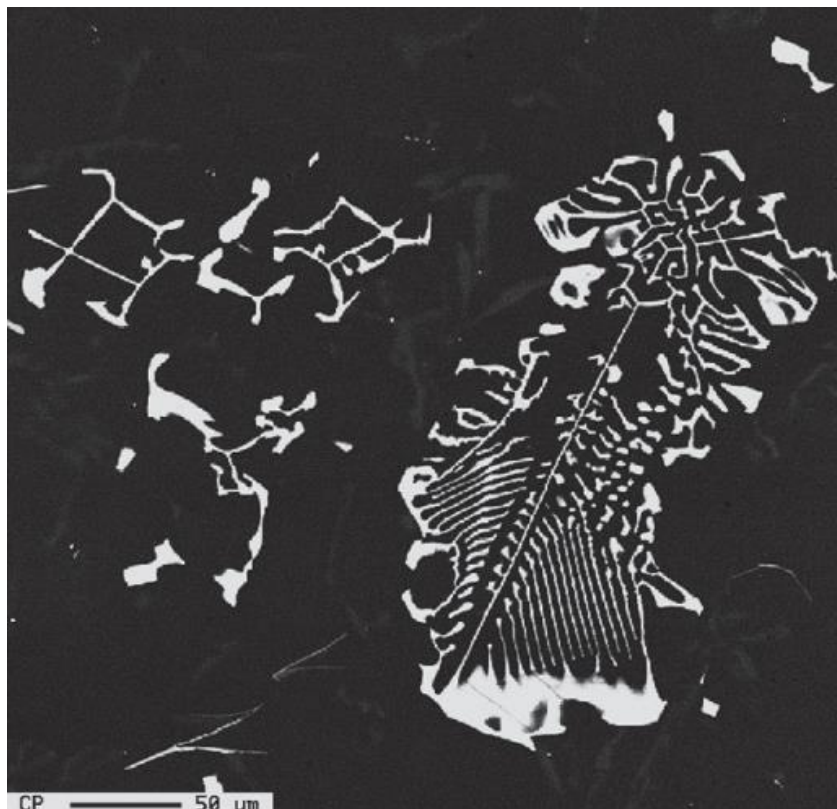
Dalším způsobem, jak může porozita vzniknout je zamezení možnosti dosazování tekutého kovu v mezidendritických prostorách při tuhnutí. Tyto zábrany jsou často tvořeny intermetalickými beta fázemi železa Al_5FeSi , které mají podobu velkých lamel a vznikají nad eutektickou teplotou. Jak je vidět na obr.16 Beta fázi byl zamezen přístup dosazování kovu a v důsledku toho vznikla dutina způsobená smrštěním kovu v kombinaci s vylučováním vodíku. Toto intermetalikum má navíc ostré hrany a často se na ní díky tomu iniciují praskliny. Alfa fáze $\text{Al}_2(\text{Fe,Mn})\text{Si}_2$ (obr. 18) díky svému specifickému tvaru zbrzdí dosazování kovu obvykle nezpůsobuje. Při zhruba $540\text{ }^\circ\text{C}$ část Beta fáze může v přítomnosti hořčíku transformovat na Pi fázi $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$ (obr. 17). Ta tvoří destičky, které jsou oproti Beta fázi přibližně 10x menší. Při jejich nahromadění na jednom místě se mezi nimi mohou tvořit dutiny v důsledku zamezení přístupu taveniny, jak je vidět na obr. 17 v bílých kroužcích.



Obr. 16 Pór vzniklý díky zamezení dosazování tekutého kovu intermetalickou fází Al_5FeSi [3]

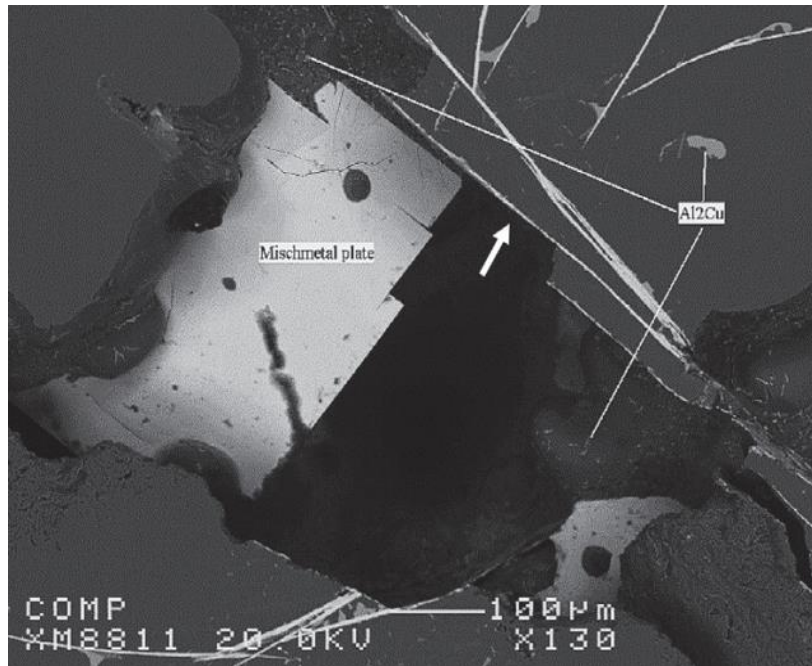


Obr. 17 Malé lamely fáze $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$ zamezující dosazování kovu. Vzniklá porozita označena bílými kroužky [3]



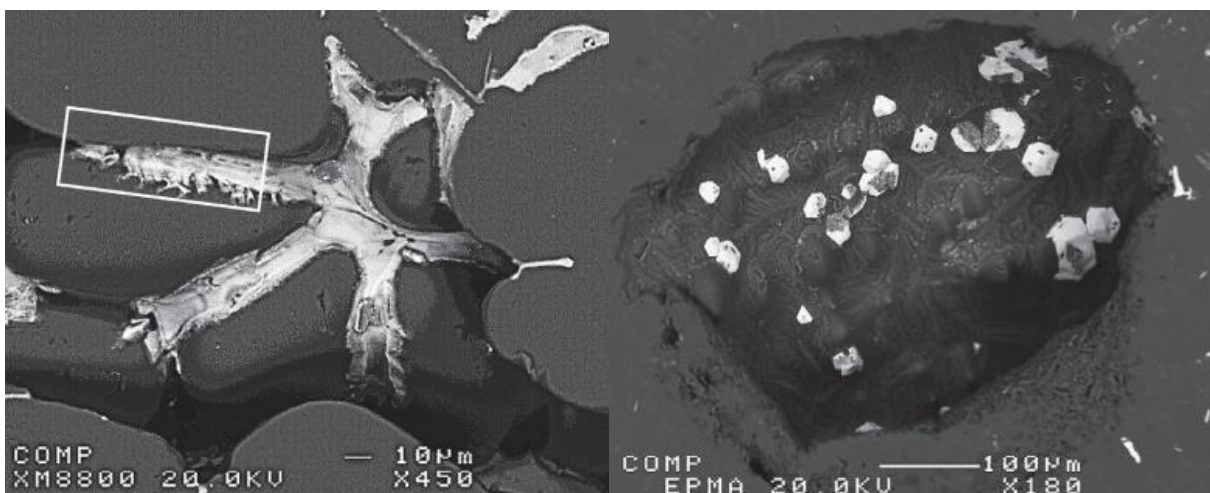
Obr. 18 Intermetalická fáze $\text{Al}_2(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ nebo-li čínské písmo [3]

Podobný účinek jako Beta fáze mají i sloučeniny na bázi KVZ obsahující Cér, Lantan nebo Neodym. Jedná se opět o tenké lamely a jejich účinek na vznik porozity je vidět na Obr. 19. [3]



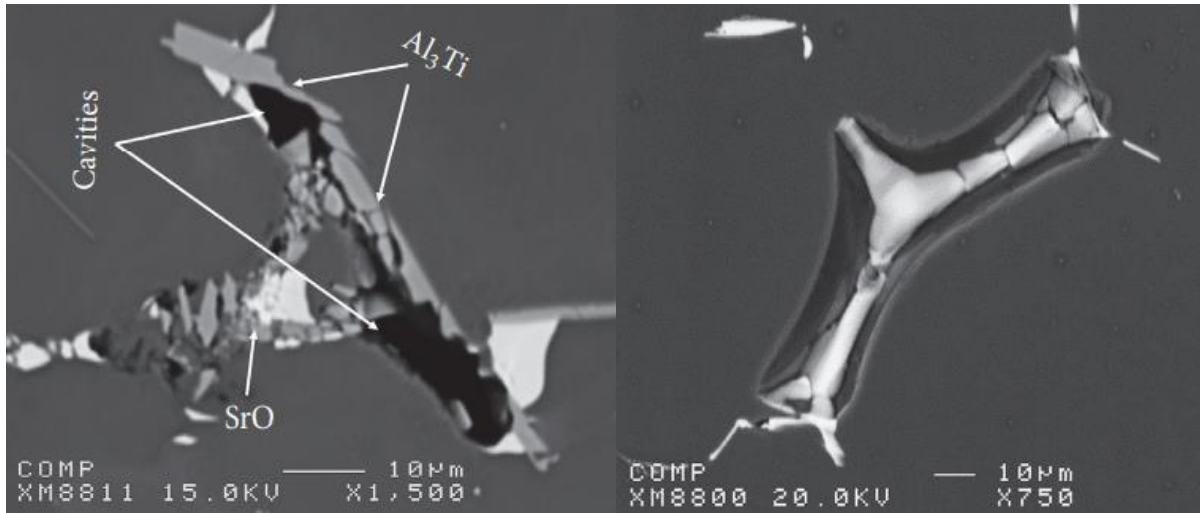
Obr. 19 Lamela intermetalika na bázi kovů vzácných zemin (bílá šipka) zamezila dosazování kovu podobně jako na obr 16. fáze AlFeSi [3]

Ke vzniku porozity také vedou intermetalika, která mají teplotu vzniku vyšší než teplota likvidu slitiny. Například Mg_2Sn má teplotu tuhnutí kolem 770°C . Alfa fáze hliníku začíná nukleovat v tekuté fázi přibližně při 615°C . Mg_2Sn sice poslouží jako zárodek, ale díky jeho hvězdicovému tvaru dochází k uzavření taveniny a vzniku dutiny viz obr. 20 vlevo. Na obr. 20 vpravo se uvnitř zkoumaných dutin se nachází sloučenina $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ v podobě pyramidek. Předpokládá se, že vzniká z AlSr_4 v reakci s Si. Podle velikosti dutin se zvětšují i tyto útvary. [3]



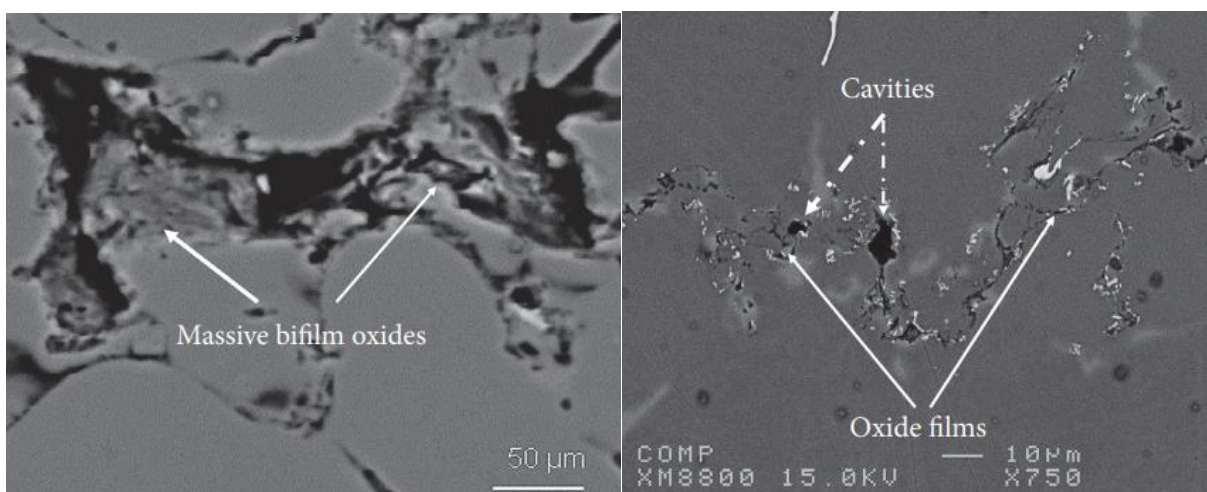
Obr. 20 vlevo porozita vzniklá díky vysokotavitelnému intermetaliku Mg_2Sn , vpravo pór vzniklý v přítomnosti $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ [3]

Při moc velkém dávkování očkovadla a při jeho nevhodné disperzitě může dojít k vytvoření shluků těchto částic vedoucích opět ke vzniku dutin. Velká koncentrace očkovadla společně s oxidem stroncia na jednom místě způsobilo vznik porozity viz obr. 21. Pokud je použito očkovadlo s titanem a borem do taveniny očkované stronciem dochází ke vzniku komplexních sloučenin $AlTiBSr$, které mají tendenci tvořit kavity jež jsou vidět na obr. 21. [3]



Obr. 21 Vlevo pór vzniklý vlivem zamezení dosazování kovu očkovadlem a SrO, vpravo dutina vzniklá díky sloučenině $AlTiBSr$, SEM [3]

Jako vměštky jsou také klasifikovány oxidické blány. Mohou být na bázi hliníku – Al_2O_3 nebo pokud se jedná o vytvrditelný silumin s přísadkou hořčíku tak MgO . Tyto vměštky se do taveniny nejčastěji dostávají z její hladiny, která je jimi permanentně pokrytá. Jedná se například o úkony jako je míchání za účelem homogenizace, odběr vzorků nebo vzhazování legur. Při dostatečném odstátí tyto nečistoty opět vyplouvají na hladinu. Takzvané bifilmy jsou oxidické blány jednou nebo vícekrát přes sebe přeložené a často také způsobují vznik dutin viz obr. 22. Samy o sobě také oslabují homogenitu matrice, snáze se přes ně šíří trhliny, koroze nebo skrze zmíněnou porozitu bude porušena těsnost odlitku. [3]



Obr. 22 Snímky z elektronového mikroskopu znázorňující vliv oxidických filmů na tvorbu porozity [3]

2.6 Technologie lití do skořepinových forem

Technologie vytavitelného modelu se stala jednou z nejdůležitějších moderních technologií v oblasti slévárenství. Za posledních 50 let se tato výrobní metoda vyvinula z metody považované za vysoce specializovanou na technologii, která se dnes běžně používá a plně reflektuje požadavky zákazníků na odlitky s vysokou tvarovou složitostí a rozměrovou přesností a materiálovou kvalitou. [24], [25]

Slévači se stále více zaměřují na výrobu odlitků na hotovo, což znamená minimalizaci dalších dokončovacích operací. Tento přístup umožňuje výrobu hotových součástí rychle, efektivně a ekonomicky, což zvyšuje konkurenceschopnost a uspokojuje potřeby zákazníků. [24], [25]

Metoda spočívá v opakovaném máčení vytavitelného modelu v keramické suspenzi a jeho následným posypáním ostřivem jehož zrna na modelu díky suspenzi ulpí. Postupně se opakovaným vrstvením vytvoří dostatečně tlustá skořepina, která má po vyžhání postačující mechanické vlastnosti, aby při procesu odlévání nepraskla. [24], [25]

2.7 Proces výroby skořepinové formy

Zhotovení voskového modelu – Kvalita hotového odlitku je zcela závislá na kvalitě voskového modelu, který je výchozím materiálem pro výrobu odlitku. Voskový model lze vyrábět různými způsoby, jako například gravitačním litím, odstříkáváním za zvýšeného tlaku (0,5-1 MPa) z tzv. napěněného vosku nebo odstříkáváním za použití vyššího tlaku (2,5-5 MPa) z těstovitého stavu kdy je vosk již napůl tuhém stavu. [24], [26]

Matečné formy, ve kterých se voskové modely vyrábějí, jsou většinou vyrobeny z kovu. Bohatě využívaným materiálem pro formy jsou hliníkové slitiny pro jejich dobrou tepelnou vodivost a vynikající obrobitelnost. Pro formy s vyššími nároky na odolnost proti opotřebení se využívá ocel nebo mosaz. Vyrobit je lze například obráběním nebo odléváním. Správná volba materiálu a postupu výroby voskového modelu má zásadní vliv na kvalitu hotového odlitku. [24], [26]

Sestavení voskových modelů – Po stabilizaci, ke které dochází až po 24 hodinách se voskové modely připevňují na vtokový kůl, který je také zhotoven z vosku. Obvykle se však vyrábí z recyklovaného vosku, který sice nemá tak dobré vlastnosti jako vosk panenský, ale pro účel zhotovení vtoků bohatě dostačuje. Na vtokový kůl s připevněnými modely se dále připevňuje licí kužel, ten může být buď z vosku nebo je dodáván v podobě keramické nálevky. Takováto sestava se nazývá stromeček. Připevňování jednotlivých částí se obvykle provádí pájením nebo lepením. Uspořádání a počet modelů připevněných na kůl je ovlivněno hlavně jejich velikostí a typem zvolené slitiny. Pokud se jedná o velký odlitek, je běžné, že se na vtokový kůl připevní pouze jeden nebo dva modely, zatímco pokud se jedná o malý díl může jich být připevněno na vtokový kůl až několik set. [24], [26]

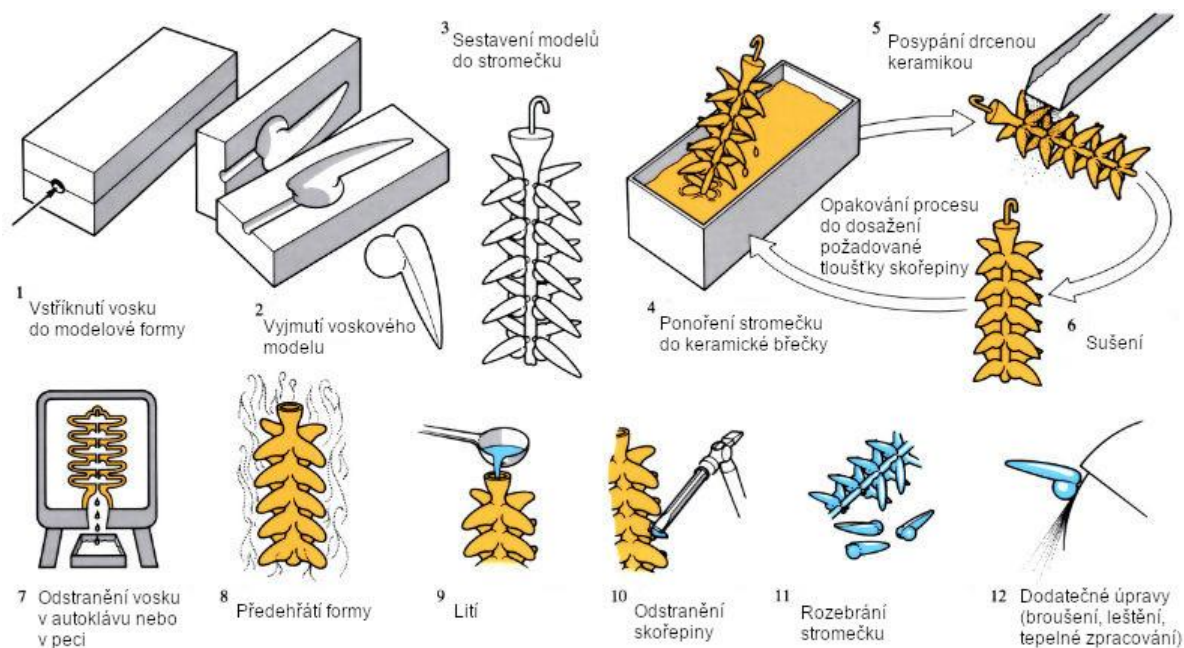
Vtoková soustava, která slouží k přivedení roztaveného kovu do dutiny modelu, často bývá vyrobena z regenerovaného vosku, tedy z vosku, který již byl použit a nejedná se o nový, panenský vosk. Tím se snižují náklady na výrobu a zároveň se snižuje množství odpadu. [24], [26]

Obalování modelů – Potom co je stromeček očištěn a usušen namáčí se do keramické břěčky a nechává se okapat, aby na něm vznikla vrstva o konstantní tloušťce. Břěčka se obvykle skládá

z pojiva, jako jsou například alkosoly nebo hydrosoly, a plniva, zpravidla křemenné moučky. Slévárny v posledních letech přecházejí z alkosolů na hydrosoly, které se sice obtížněji vysouší, ale jsou ekologičtější a snáze se skladují, protože nejsou hořlavé. Namočený stromeček se dále zasypává ostřivem. Ostřivo pro první vrstvu je jemné, aby byl povrch modelu dobře okopírován. Nejčastěji se používá zirkon pro jeho malou tepelnou roztažnost. Nanášení ostřiva se provádí buď sprchou nebo ve fluidizačním loži. Tento proces se opakuje 6 až 12krát podle toho jaká je požadovaná tloušťka stěny skořepiny. Na další vrstvy se používá křemenné nebo molochitové ostřivo o vyšší velikosti zrna. [24], [26]

Sušení obalů – Probíhá na vzduchu, skořepiny jsou obvykle zavěšeny na dopravníku, který je umístěn v místnosti kde je řízena jak teplota, tak vlhkost, aby bylo dosaženo optimálního vysušení v co nejkratším čase. [24], [26]

Vytavování voskové hmoty – Může být provedeno více způsoby. První je metoda flash fire kdy se skořepina s voskem vloží do pece předehřáté na přibližně 750 °C. Vosk uvnitř se roztaví a vyteče. Určité množství vosku se také spálí což je nevýhodou z hlediska hospodárnosti procesu. V peci se pak forma vyžihá při zhruba 1000 °C a získá tak lepší mechanické vlastnosti. Pokud se jedná o skořepiny určené pro lití hliníkových slitin nemusí být tato tepelná úprava provedena. [24], [26]



Obr. 23 Proces produkce odlitků metodou vytavitelného modelu [13]

Další možnost je vytavení vosku v autoklávu pomocí přehřáté páry, která má přibližně 150 °C. Tlaky uvnitř se pohybují okolo 0,5 MPa. Výhodou této metody je téměř nulová ztráta vosku. [24], [26]

Vosk má oproti skořepinové formě hodně velkou tepelnou roztažnost. Proto je důležité, aby se při vytavování rychle natavila vrstva vosku přiléhající ke skořepině, která umožní modelu se roztáhnout. Nedojde tak k porušení celistvosti skořepiny. U vytavování v peci je toho dosahováno tepelným šokem a u vytavování v autoklávu se využívá vysoké tepelné vodivosti ohřáté páry. [24], [26]

Žíhání skořepiny – zde dosahuje forma maximální pevnosti a zároveň se odstraní poslední zbytky těkavých látek a vypálí se zbytkový vosk. Žíhací teploty se pohybují od 1000 °C pro křemenné po 1300 °C pro molochitové nebo korundové skořepiny. [24], [26]

Odlévání – může být provedeno na vzduchu nebo ve vakuu. Odlévat lze do horkých skořepin hned po jejich vytažení z pece nebo se můžou nechat skořepiny vychladnout až na pokojovou teplotu, záleží na tloušťce stěn a na metalurgických požadavcích. To se však nedoporučuje pro skořepiny na bázi SiO₂. Díky cristobalické expanzi se často stává, že se skořepina po nalití kovu roztrhne. [24], [26]

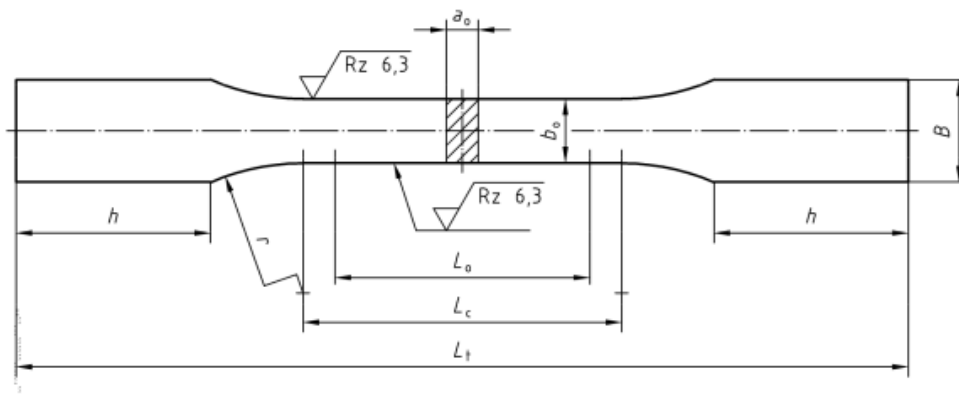
Dokončující operace – jakmile se kov ochladí je z něj skořepina obvykle odstraněna nárazem, vibracemi, tryskáním, nebo vodním paprskem. Odlitky jsou od vtoku obvykle odstraňovány řezáním. Různé operace po odlévání mohou být na odlitcích provedeny jako je tepelné zpracování, povrchová úprava a hipování. [24], [26]

3 EXPERIMENT

Cílem experimentu je zjistit výrobní a kvalitativní možnosti školní slévárny VUT FSI v Brně pro slitinu AlSi10Mg zpracovanou technologií lití do skořepinové formy. Záměrem je zjistit pevnostní charakteristiky slitiny v závislosti na rychlosti ochlazování, modifikaci a různých tloušťkách zkušebních tyčinek pro zkoušku pevnosti v tahu.

Školní slévárna disponuje pracovištěm uzpůsobeným pro výrobu skořepinových forem. Je zde umístěn stroj Cyclone od firmy mk technology, který umí automaticky voskové modely namáčet v břecce, zasypávat ostřivem i formy sušit mezi jednotlivými vrstvami. Je zde stanoviště pro práce spojené s napojováním voskových modelů na vtokový kůl s potřebným vybavením. Vosk se ze skořepin vytavuje metodou flash fire v elektrické odporové peci. Pro první vrstvy se jako ostřivo používá jemná frakce zirkonu. Na další obaly je využíván molochit, který má oproti křemennému ostřivu menší tepelnou roztažnost.

Pro zhodnocení pevnostních charakteristik byla zvolena zkouška tahem. Zkušební tyčky byly zvoleny s obdélníkovým průřezem dle normy DIN 50125 (obr. 24), aby věrohodně reprezentovaly stěny odlitků. Jelikož odlitky mívají stěny o různých tloušťkách, byly zvoleny tyčky o šířce 10 mm, 5 mm a 2 mm. Všechny rozměry tyček jsou zaznamenány v tab. 1. Výroba modelů tyček byla zabezpečena 3D tiskem z vypalitelného filamentu Polycast. Vstupní geometrie byla zvětšena o 1,5 % jako kompenzace smrštění odlévané slitiny. Vzorky nebyly před zkouškou obráběny, zkoušení vzorků probíhalo v jejich litém stavu.



Obr. 24 Výkres tyčky pro zkoušku tahem dle normy DIN 50125

Tabulka 1 Rozměry tyčky dle normy DIN 20125

a_o [mm]	b_o [mm]	L_o [mm]	B_{min} [mm]	r_{min} [mm]	h_{min} [mm]	L_{cmin} [mm]	L_{tmin} [mm]
2	5	18	7	4	12	23	52
5	10	40	15	12	30	51	126
10	25	90	33	20	60	114	258

Je prokázáno že hodnota DAS se zmenšuje se zvyšující se rychlostí ochlazování a s menším DAS se zvyšují mechanické vlastnosti materiálu. Proto bylo navrženo, že slitina bude odlita do skořepin o teplotách 550 °C, 300 °C a 18°C. Existuje ale riziko, že při nižších teplotách bude skořepina náchylnější k popraskání díky tepelnému šoku a její celistvost bude v průběhu lití porušena.

Slitina byla odlita v nenamodifikovaném a modifikovaném stavu při všech třech teplotách skořepin a tloušťkách stěn. Účinnost modifikace byla následně hodnocena na metalografických výbrusech vzorků odebraných přímo ze zkušebních tyčinek. Cílem bylo zjistit účinek této metalurgické úpravy na strukturu při různých rychlostech ochlazování a její vliv na výsledné mechanické vlastnosti zejména na tažnost.

Tyčky o tl. stěny 5 mm a 2 mm byly umístěny i do horní části formy, jak je zobrazeno na obr. 25. Účelem bylo zjistit vliv metalostatického tlaku na zabíhavost kovu v závěru procesu lití při různých teplotách skořepin.



Obr. 25 umístění tyček ve spodní a horní části formy

V tabulce 2 je uveden souhrn odlitých tyček. Celkem bylo zhotoveno 18 skořepin. Jedna tavba vystačila na 3 skořepiny, to činí celkem 6 taveb. Celkem mělo být odlito 96 kusů tyček pro zkoušku tahem. U menších tloušťek stěn se ale vyskytly problémy se zabíhavostí a některé tyčky se nepodařilo odlít. Tato problematika je popsána níže v práci na straně 55. Z dolní sekce každé formy byly pro zkoušku tahem vyčleněny tři tyčky.

Tabulka 2 celkový počet odlitých tyček

t. skořepiny °C	počet ks	Tl. Stěny tyčky [mm]									
		10		5				2			
		nemod	mod	nemod		mod		nemod		mod	
		X		horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
550	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4	
300	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4	
18	4	4	2	4	2	4	2	4	2	4	
Σ	12	12	6	12	6	12	6	12	6	12	
celkem	96 ks										

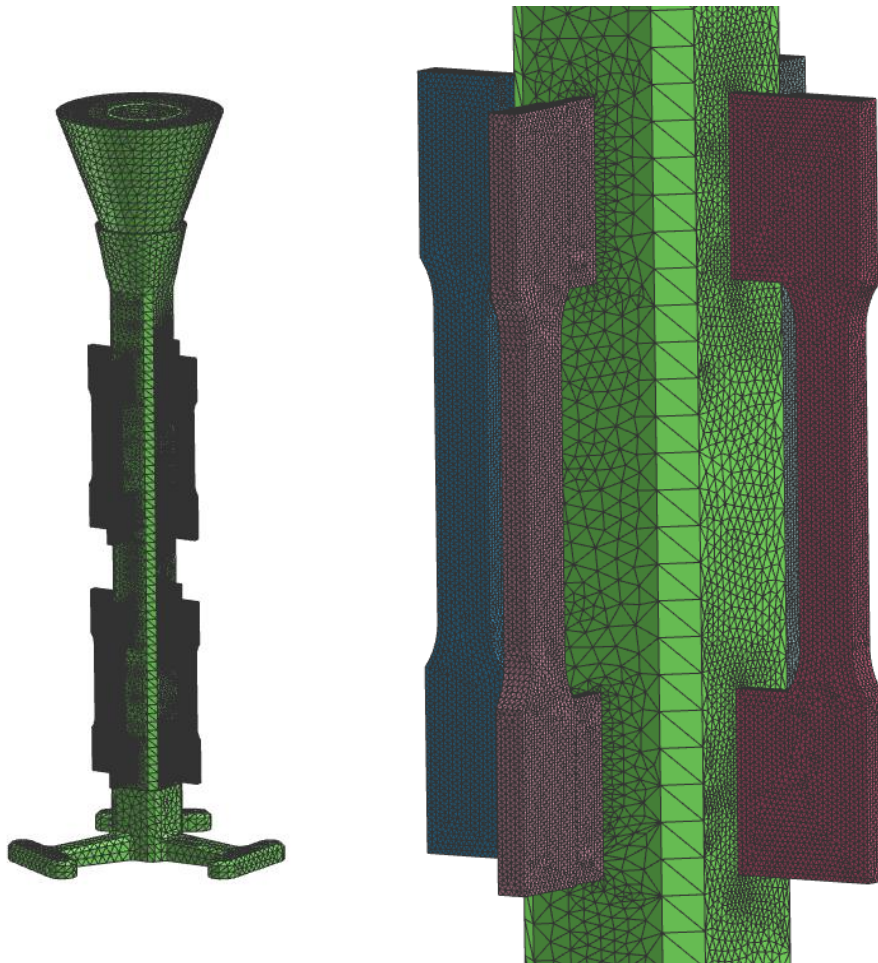
Částí zadání práce je popis a ověření vlivu metalurgické kvality taveniny mimo jiné modifikace a stupně odplynění. Odplyněním se ale praktická část práce nakonec nezabývá. Školní slévárna v čase, kdy probíhaly experimenty nedisponovala žádnou vhodnou technologií, která by zaručila efektivní odplynění. Vzhledem k velké časové náročnosti na přípravu forem, provedení taveb a uskutečnění tahových zkoušek bylo od části zabývajících se odplyňováním upuštěno. Zavedení dalšího parametru do vyhodnocování by znamenalo odlití minimálně dvojnásobného množství vzorků. Provedení stávajícího experimentu bylo i bez hodnocení vlivu odplyňování poměrně finančně náročné.

3.1 Numerická simulace

Před zahájením prací na samotném experimentu bylo přikročeno k vypracování numerických simulací v programu ProCast. Hlavním záměrem tohoto úkonu bylo zjistit potenciální riziko vzniku vad ve zkušebních tyčkách, které by mohly výrazně ovlivnit výsledné naměřené hodnoty pevnosti v tahu. U skořepin vychladlých na 20 °C existuje riziko, že se odlitky nenaplní tekutým kovem, protože se kov bude ochlazovat příliš rychle a v průběhu lití ztuhne. Cílem bylo tedy zjistit, zda ke ztuhnutí kovu v průběhu lití dojde a bude potřeba korekce teploty skořepiny. Dále bylo možné sledovat průběh tuhnutí kovu v tyčkách, jehož charakter se s měnícími se teplotami skořepin měnil.

V první řadě bylo zapotřebí zhotovit odpovídající geometrii vtokové soustavy a na ni napojených odlitků v programu Autodesk Inventor. Geometrie byla následně vyexportována ve vhodném formátu a vložena do simulačního programu. Po provedení oprav geometrie a nadefinování ploch a objemů v prostředí Visual-Mesh byla vytvořena výpočtová síť. ProCast generuje síť variační metodou konečných prvků (FEM). Na jemnosti vygenerované sítě závisí přesnost výpočtu, ale také náročnost na operační paměť počítače a celková doba vlastního výpočtu. Dále jsou definována rozhraní, na kterých se stýká odlitek se skořepinou a okolní atmosférou.

Výpočetní simulace byly provedeny při teplotách skořepiny 550 °C, 300 °C a 20 °C pro všechny tři tloušťky zkušebních těles. Lící teplota kovu byla v simulaci zvolena na 700 °C. Důvodem byly obavy, zda kov zaběhne do 2 mm zkušebních tyček při snížených teplotách skořepin.



Obr. 26 Vygenerovaná síť FEM pro numerickou simulaci, tyčky o tl. stěny 5 mm

Síť byla na odlitku vygenerována výrazně jemnější než na vtokovém kůlu (obr. 26), aby byly výsledky v této oblasti přesnější a snížila se tak časová náročnost výpočtu.

Dále byla programem vygenerována skořepina o tloušťce 8 mm a takto zasíťovaný model byl zasazen do okolního prostředí, kterému byly nadefinovány vlastnosti okolní atmosféry, aby bylo možné simulovat ochlazování skořepiny sáláním. Jako materiál skořepiny byl v programu zvolen molochit, který se používá i ve školní slévárně.

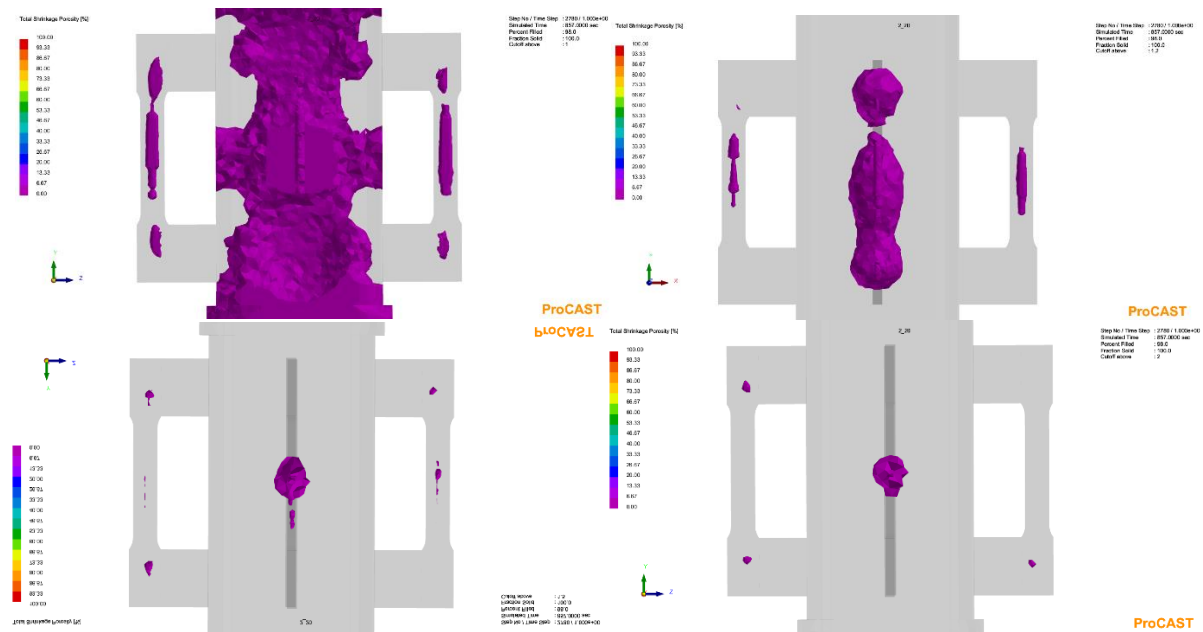


Obr. 27 Vygenerovaná FEM síť skořepiny o tloušťce 8 mm

3.2 Výsledky numerických simulací

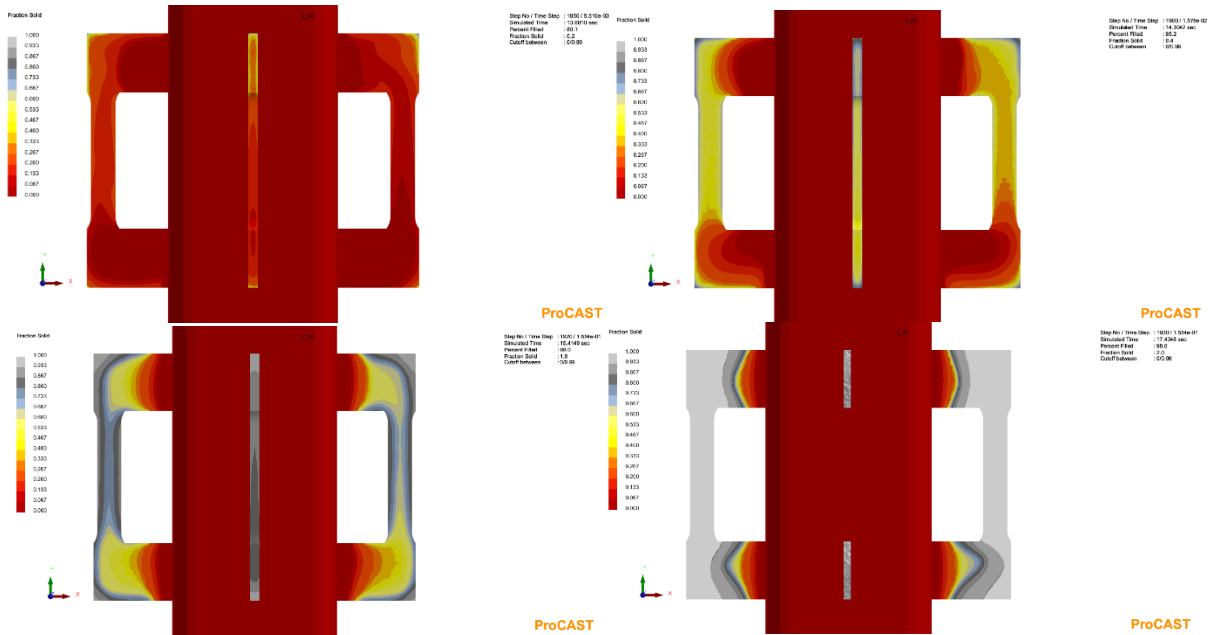
Při vyhodnocování výsledků byla především brána zřetel na potenciální vznik vnitřních vad v tyčkách během tuhnutí, zda se forma naplní i při rychlém ochlazování díky studeným skořepinám a byl sledován i průběh tuhnutí v odlitcích.

Žádné soustředěné stažení nebyly nalezeny ani v jedné simulaci. Porozita se vyskytovala u všech odlitků, jen se měnilo její rozložení. Od každé simulace byly pořízeny čtyři snímky s různým nastavením množství porozity od 1 %, 1,2 %, 1,5 % a 2 %. Na obr. 28 jsou fialově vyznačeny oblasti kde se porozita o dané koncentraci vyskytuje.



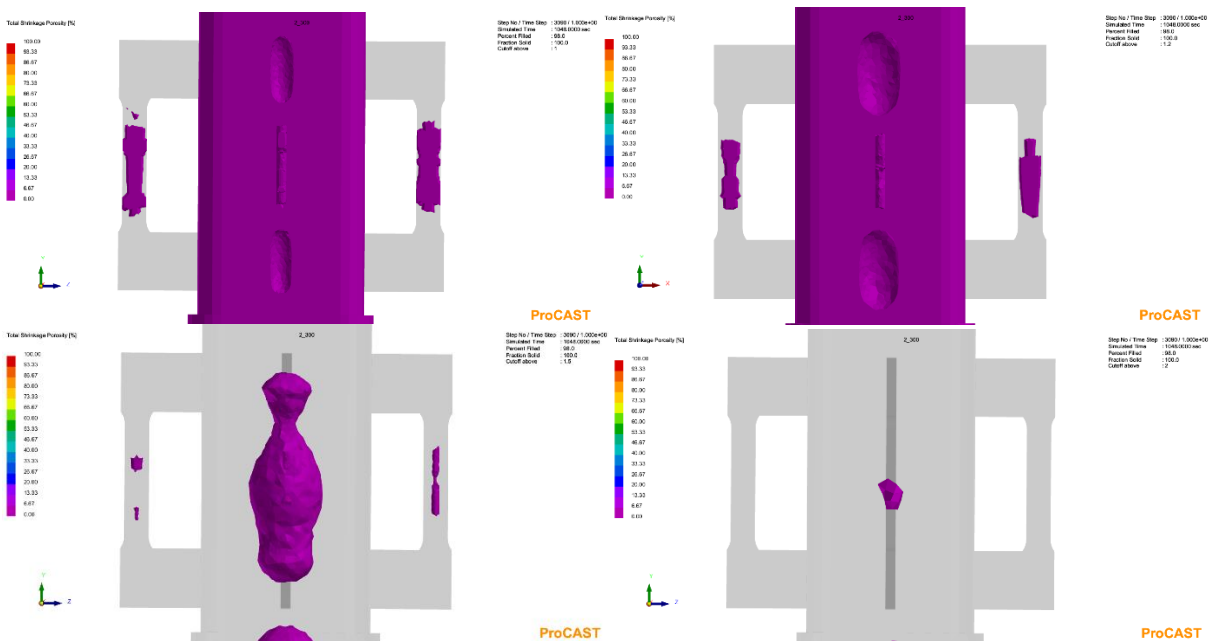
Obr. 28 Výskyt porozity v tyčce o tl. 2 mm při teplotě skořepiny 20 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.

U 2 mm tyček a teplotě skořepiny 20 °C je vidět, že se porozita vyskytuje hlavně v tepelné ose odlitku. Je to dáno tím, že po nalití tuhne kov od stěn ke středu odlitku vlivem rychlého odvodu tepla viz obr. 29. Porozita se v odlitku dle simulace vyskytuje přibližně do 1,5 %. Doba tuhnutí odlitku je dle simulace přibližně 5 sekund.

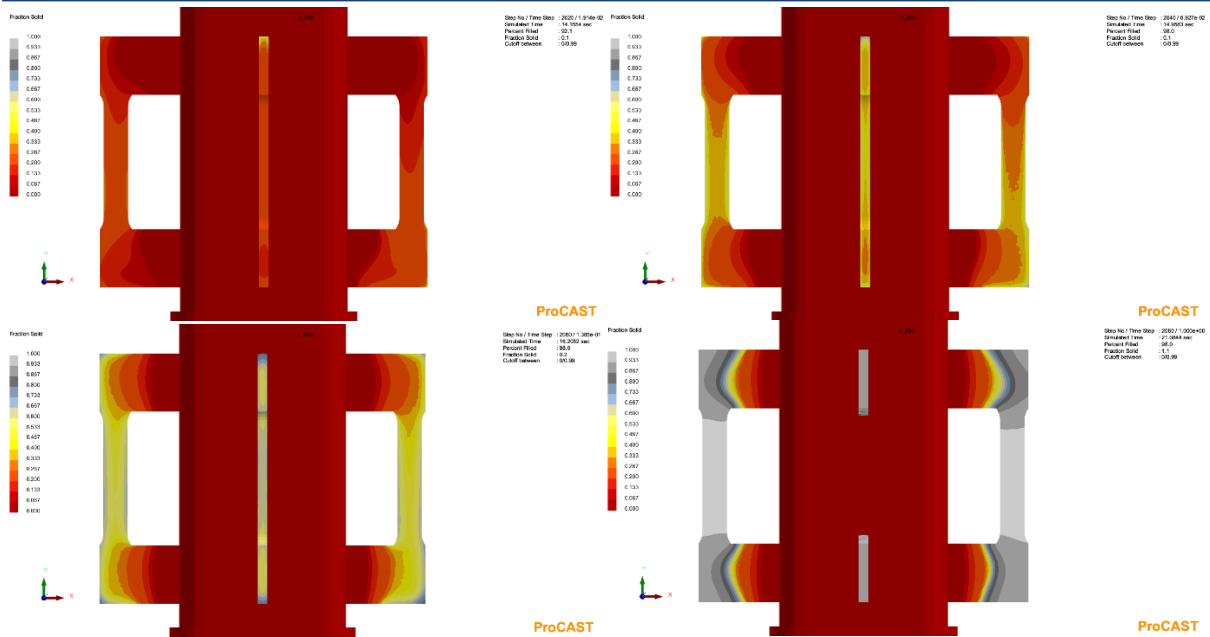


Obr. 29 Průběh tuhnutí odlitků 2 mm tyček o teplotě skořepiny 20 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 13 s, 15 s, 16,5 s a 17,4 s.

U simulace pro 2 mm zkušební tyčku a teplotě skořepiny 300 °C se porozita vyskytuje v tepelné ose, a navíc se objevuje ve středu zkušební tyčky do koncentrace zhruba 1,5 %. Doba tuhnutí odlitku je dle simulace přibližně 17 sekund.

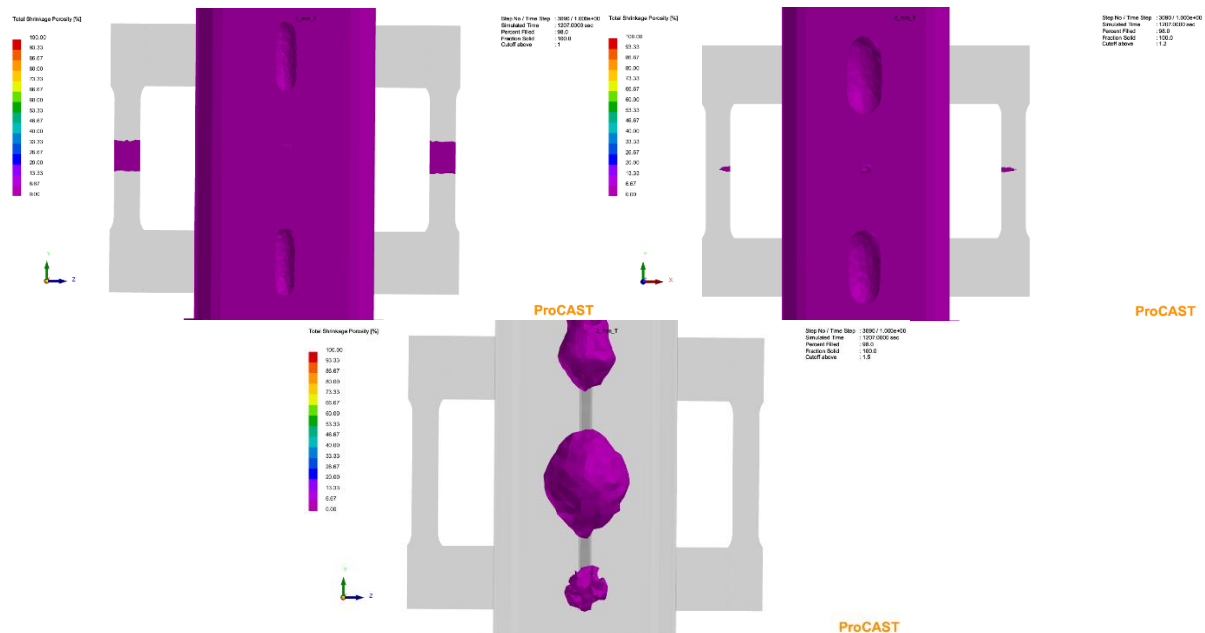


Obr. 30 Výskyt porozity v tyčce o tl. 2 mm při teplotě skořepiny 300 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.

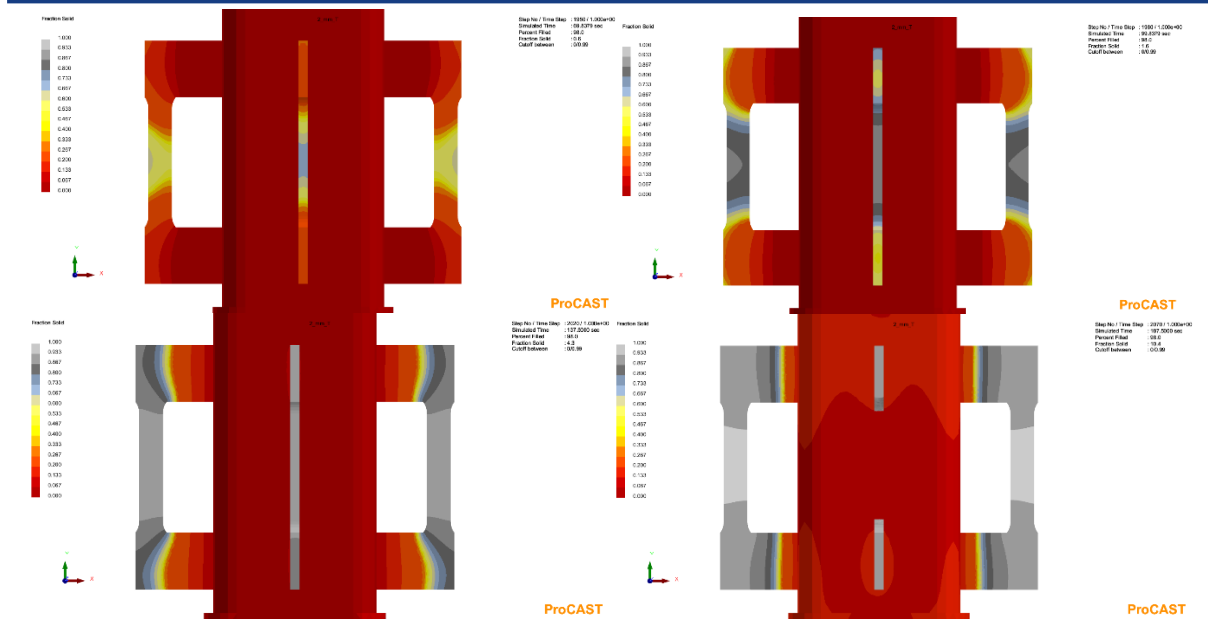


Obr. 31 Průběh tuhnutí odlitků 2 mm tyček o teplotě skořepiny 300 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 14 s, 15 s, 16,2 s a 21 s.

Pro teplotu skořepiny 550 °C 2 mm tyček se porozita nad 1 % vůbec nevyskytovala. Způsob, jakým odlitek tuhl se moc nezměnil. První ztuhlý kov se dle simulace objevuje ve středu tyčky, kde je zároveň predikována 1 % porozita. Fronta tuhnutí dál postupuje od středu do rozšířené části tyčky a směrem do vtokového kůlu. Doba tuhnutí odlitu se výrazně prodlužuje na přibližně 120 vteřin. Menší výskyt porozity by naznačoval možné zlepšení pevnosti v tahu. Naproti tomu je doba tuhnutí kovu podstatně delší což bude mít za následek zvýšení hodnoty DAS která pevnost také ovlivňuje.

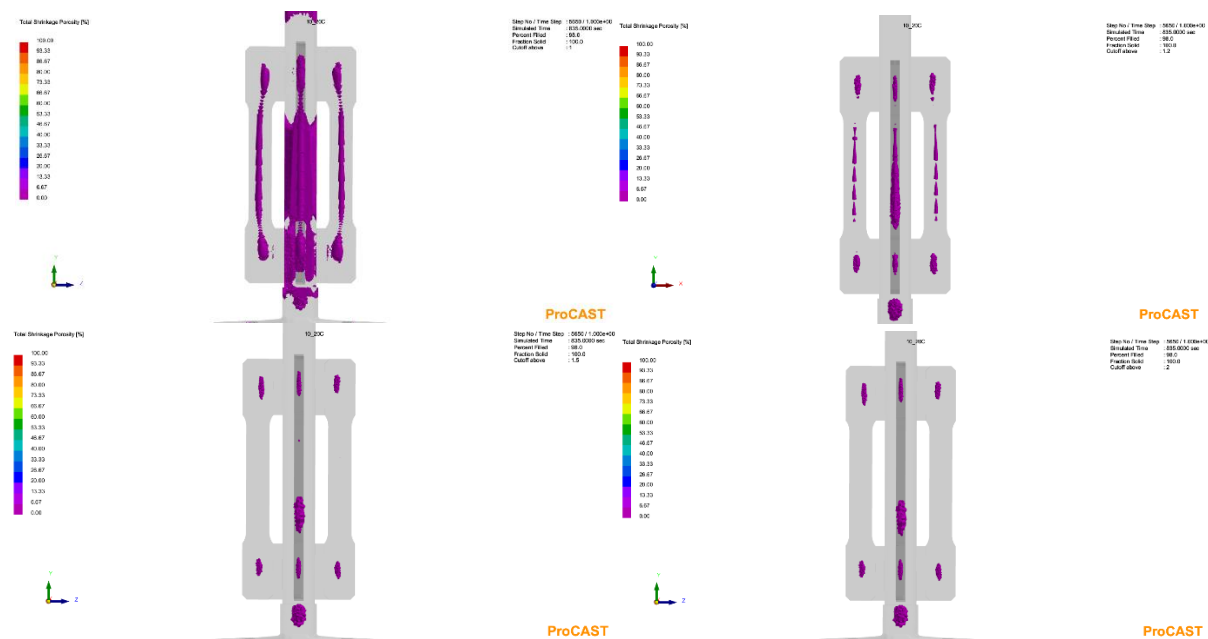


Obr. 32 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 2 mm při teplotě skořepiny 550 °C, vlevo porozita do 1 %, vpravo do 1,2 %, dole do 1,5 %.

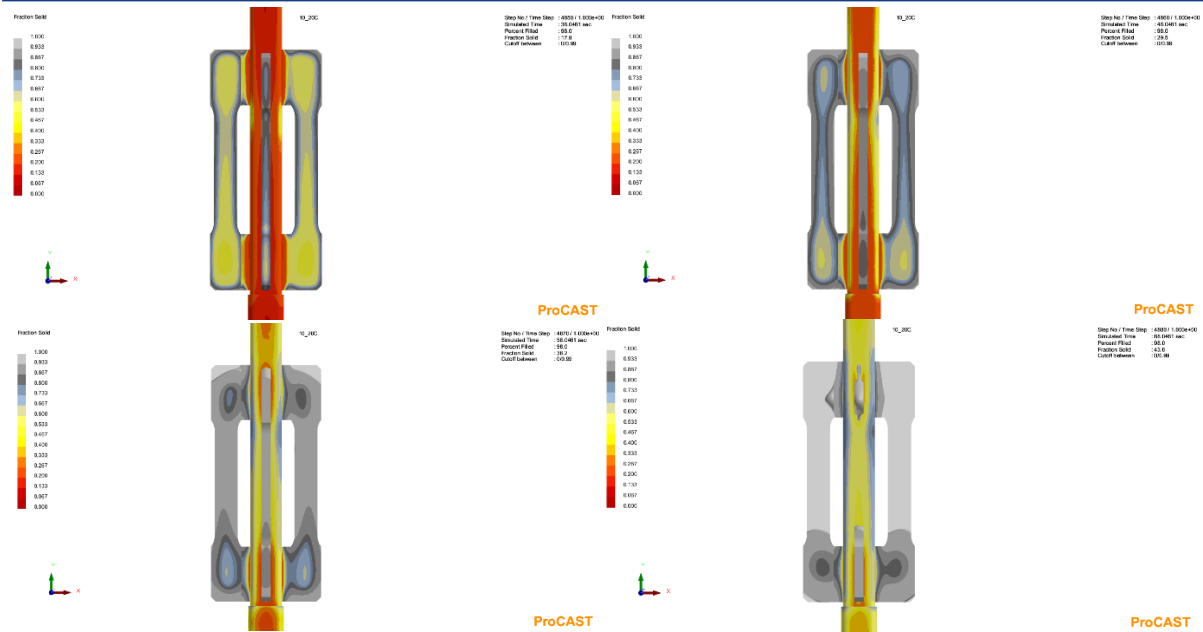


Obr. 33 Průběh tuhnutí odlitků 2 mm tyček o teplotě skořepiny 550 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 60 s, 93 s, 137 s a 187,5 s.

Proces tuhnutí 10 mm tyčky při teplotě skořepiny 20 °C se chová podobně jako u 2 mm při teplotě skořepiny 20 °C. Porozita se vyskytuje opět v tepelné ose do koncentrace zhruba 1,2 %. Vyšší koncentrace porozity se vyskytují pouze v upínací části tahové tyčky. Tavenina dle simulace tuhne od stěn odlitku směrem do tepelné osy, kde byl predikován výskyt porozity. Doba tuhnutí odlitku je dle simulace přibližně 54 vteřin.

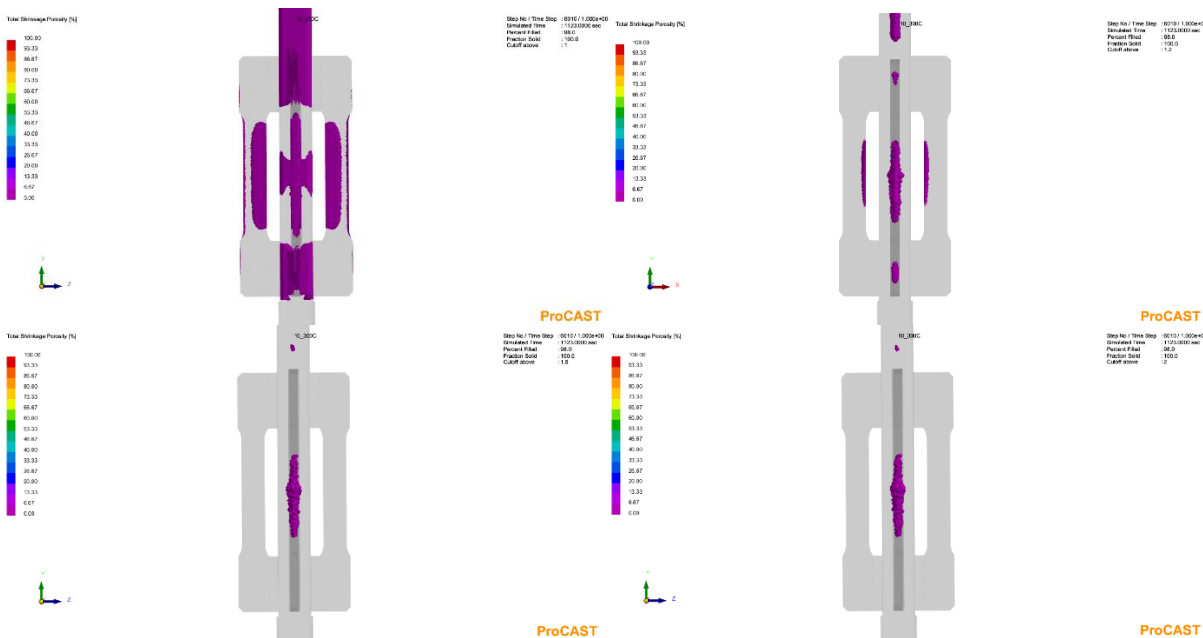


Obr. 34 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 10 mm při teplotě skořepiny 20 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.

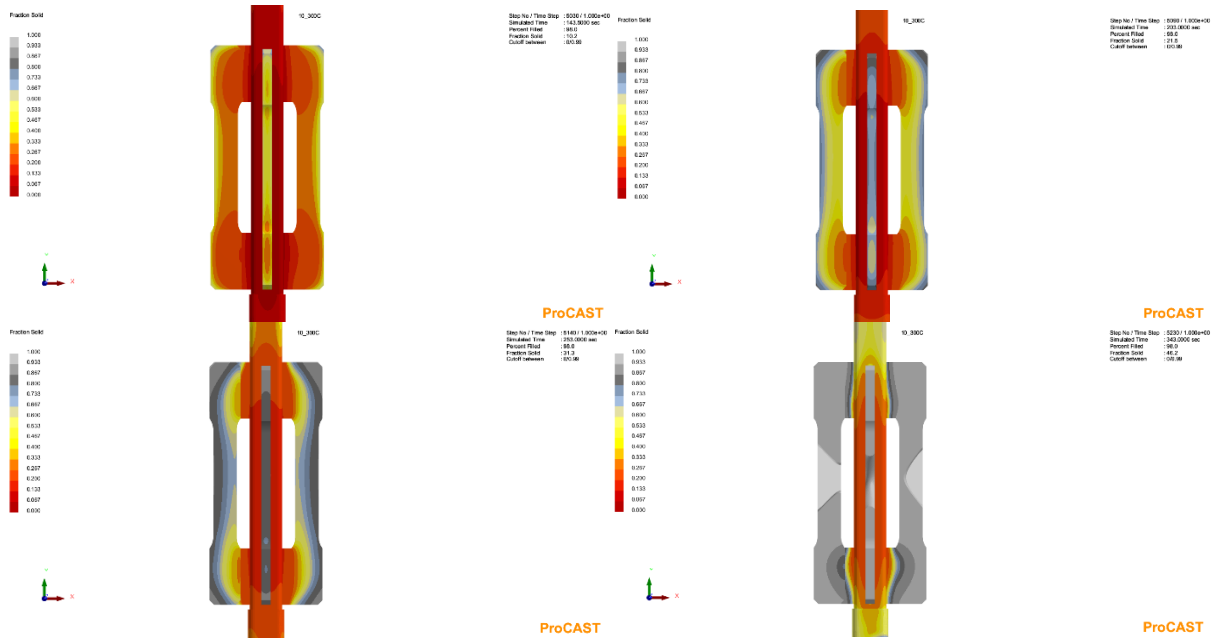


Obr. 35 Průběh tuhnutí odlitků 10 mm tyček o teplotě skořepiny 20 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 36 s, 48 s, 58 s a 85 s.

Po zvýšení teploty skořepiny na 300 °C se oblasti s výskytem porozity přesunuly z tepelné osy směrem ke vtokovému kůlu. Je to pravděpodobně díky tepelnému ovlivnění procesu tuhnutí od vtokového kůlu, jak je vidět na obr. 36. Obdobně jako u 2 mm tyčky a teplotě skořepiny 300 °C se tuhá fáze objevuje nejdříve ve středu odlitku a fronta tuhnutí dále postupuje ze středu do upínací části tyčky a následně do vtokového kůlu. Doba tuhnutí odlitku je dle simulace přibližně 300 vteřin. Porozita se ve velmi omezené míře objevuje v koncentraci 1,2 %.

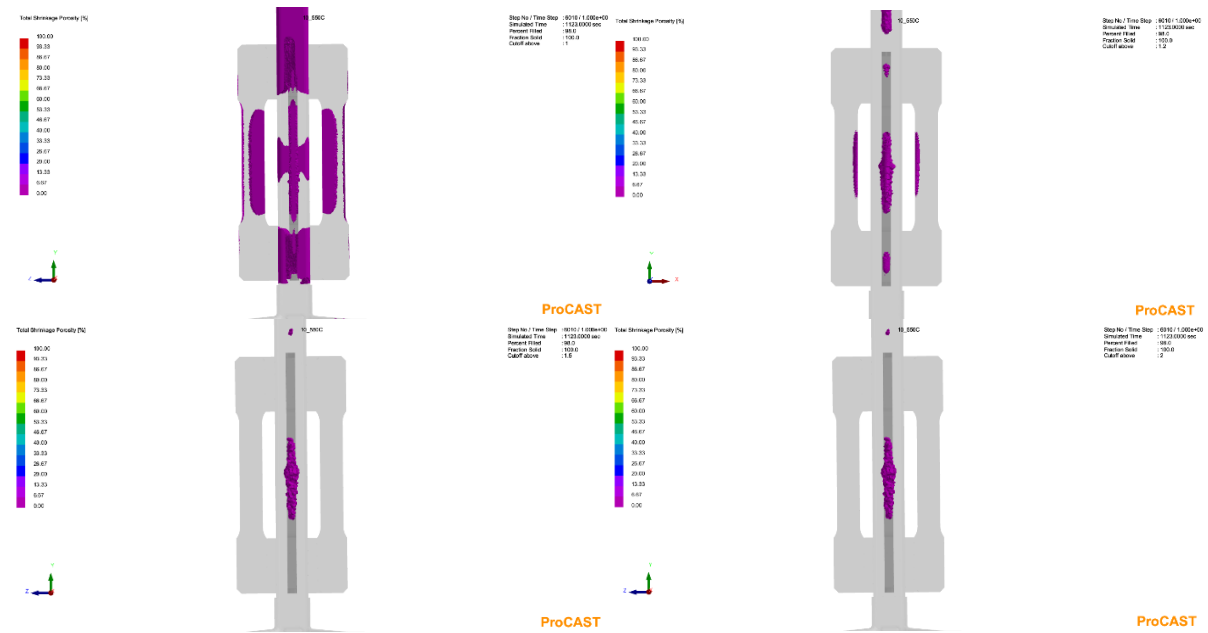


Obr. 36 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 10 mm při teplotě skořepiny 300 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.

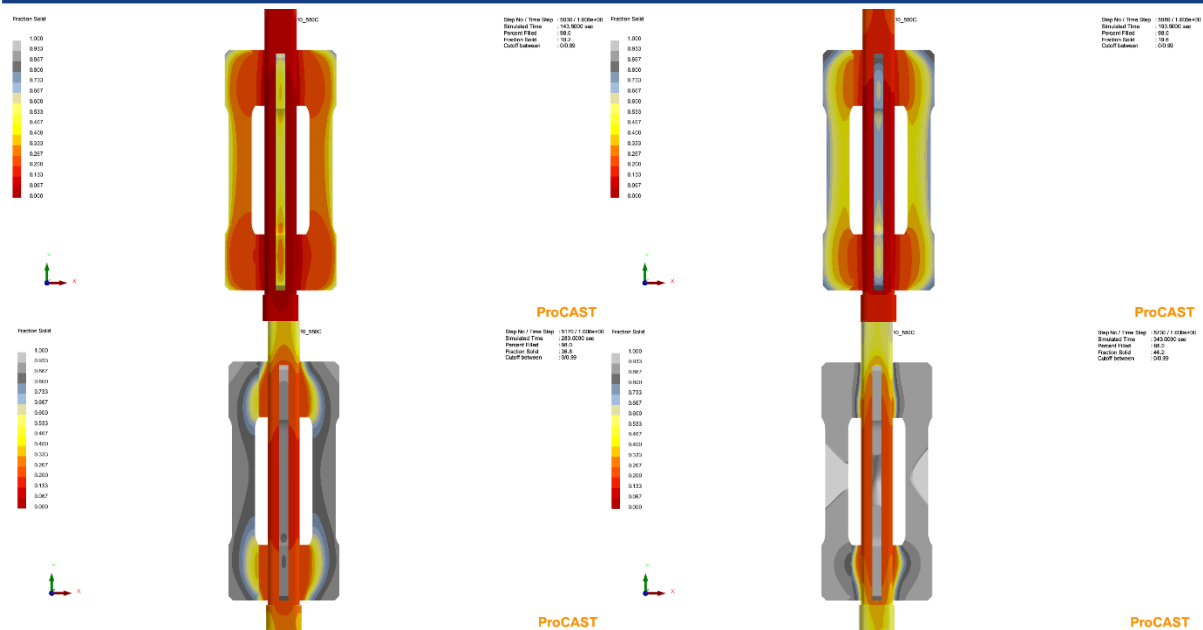


Obr. 37 Průběh tuhnutí odlitků 10 mm tyček o teplotě skořepiny 300 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 143,5 s, 203 s, 253 s a 343 s.

Při zvýšení teploty skořepiny na 550 °C se oproti předchozí simulaci skoro nic nemění až na celkovou dobu tuhnutí odlitků, která je přibližně 600 vteřin.



Obr. 38 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 10 mm při teplotě skořepiny 550 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.



Obr. 39 Průběh tuhnutí odlitků 10 mm tyček o teplotě skořepiny 550 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 143,5 s, 193,5 s, 283 s a 343 s.

Ze simulací pro 10 mm tyčky, obzvlášť u zvýšených teplot skořepin, je vidět, že predikovaný výskyt porozity i způsob jakým se v odlitku tvoří tuhá fáze je ovlivněn teplem od vtokového kůlu a potenciálně může ovlivnit výsledky tahových zkoušek. Řešením by bylo prodloužit zářezy a posunout tak těleso odlitku dál od vtokového kůlu. Toto řešení ale nebylo z technologických důvodů proveditelné. Modely tyček se vtokem byly tisknuty na 3D tiskárně a díky její menší ložné ploše nebylo už nikterak možné model zvětšovat.

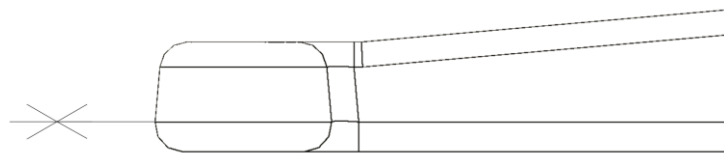
Simulace pro 5 mm tahové tyčky byly také vyhotoveny. Výsledky se ve všech směrech hodně podobají výsledkům simulací 2 mm tahových tyček. Ovlivnění tuhnutí odlitků od vtokového kůlu bylo téměř nezatelné. Doby tuhnutí tyček všech tlouštěk při různých teplotách skořepin dle simulací jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3 Shrnutí časů tuhnutí tyček

T. skoř. [°C]	Čas [s]	Tl. tyčky [mm]		
		10	5	2
550		600	350	120
300		300	46	17
18		54	18	5

3.3 Podstavec pro skořepinu

Aby skořepina mohla stát ve svislé poloze bez částečného zasypávání pískem, který by ovlivnil proces tuhnutí zkušebních vzorků, byl zkonstruován podstavec, který zároveň slouží ke zmírnění prvotního nárazu tekutého kovu na dno formy a zmírnění rizika zpětného vystříknutí taveniny do dutiny odlitku. Geometrie byla zkonstruována v programu Autodesk Inventor a model zhotoven na školní 3D tiskárně Prusa i3 MK3. Vypalitelný filament Polycast nebyl použit, protože by se ho na experiment spotřebovalo velké množství což vzhledem k jeho vyšší pořizovací ceně nebylo vhodné. Místo toho se podstavec vytiskl z PLA plastu a byl použit jako model pro zhotovení formy z lukoprenu. Všechny plochy kolmé na dělicí rovinu mají úkos 5° aby se voskový model z formy snadno vyjímal. Podstavce se tím pádem odlévaly z vosku a forma zároveň bude moci být využívána do budoucna školní slévárnou.



Obr. 40 Náčrtek dělicí roviny na podstavci

Model byl zasazen na dřevěnou desku a rádius pod dělicí rovinou viz obr. 40 byl oblepen plastickou hmotou. Dále byly přidány středící důlky pro bezpečné ustavení horní poloviny formy vůči té spodní, byl vymodelován vtok a výfuky, aby měl vzduch při lití vosku kudy odcházet z formy ven. Na takto připravený podstavec se aplikoval separační prostředek a po jeho zaschnutí se nanasla vrstva lukoprenu proložená tkaninovou sítovinou pro zvýšení pevnosti formy viz obr. 41.



Obr. 41 Vytisknutý model podstavce před (vlevo nahoře) a po (vpravo nahoře) nanesení lukoprenu. Rozdělaná forma po nalití vosku (vlevo dole), hotové podstavce z vosku po odstranění vtokové soustavy (vpravo dole).

3.4 Proces výroby formy

Celá sestava se skládá ze vtokového kůlu, keramické nálevky, podstavce, který byl popsán výše a tyček vytisknutých z PolyCastu. Vtokový kůl byl odlit z vosku do dvoudílné hliníkové formy, kterou školní slévárna disponuje viz. Obr. 42. Do rozebrané formy se zakládá ocelová tyč s přivařenou maticí na jenom konci, kam se našroubuje manipulační trn. Složená forma se umístí do svislé polohy a naleje se vosk. Jelikož se nepoužíval emulgovaný vosk, který má menší hodnoty smrštění musel se vosk v průběhu tuhnutí kůlů několikrát během tuhnutí dolévat. Doba zchladnutí a získání manipulační pevnosti vosku se pohybovala kolem 30 minut.



Obr. 42 Rozložená forma pro zhotovování voskových vtokových kůlů

Po zhotovení kůlů, podstavců a vytisknutí tyček bylo možno přistoupit ke kompletaci stromečků. 5 mm a 2 mm tyček bylo na vtokový kůl připojeno 6, 4 v dolní části a 2 v horní části vtokového kůlu (obr. 43), aby byla zjištěna zabíhavost kovu v závěru procesu lití s ohledem na snížený metalostatický tlak. U 10 mm tyček tento test nebylo možné provést kvůli jejich délce 256 mm kdy po napojení zabíraly většinu délky vtokového kůlu.



Obr. 43 Zkompletovaná vtoková soustava s přilepenými tyčkami z polycastu

Na sestavených stromečcích byl zhotoven primární obal. Úloha primárního obalu je především co nejlépe okopírovat povrch modelu a vytvořit dobrý základ pro zhotovení dalších zpevňujících obalů. Ten se vytvoří máčením stromečku v koloidním roztoku vody a křemíkových částic. Jelikož je primární obal v přímém kontaktu s taveninou je důležité, aby použité ostřívo dobře odolávalo tepelným šokům a mělo malou tepelnou roztažnost, snižuje se tak riziko popraskání formy při procesu lití. Proto bylo použito jemné zirkonové ostřívo. Po dostatečném proschnutí primárního obalu se na obalovacím stroji zhotovilo zbylých sedm vrstev, kde bylo použito molochitové ostřívo. Proces výroby formy je vidět na obr. 44. Břečka určená pro zpevňující obaly má jiný podíl pevných částic křemíku. Technické specifikace materiálů použitých pro výrobu forem jsou shrnuty v tabulkách 4 a 5. Vyhotovení všech sedmi obalů trvalo na stroji přibližně tři hodiny. Skořepiny se vyráběly za pomoci obalovacího stroje Cyclone od firmy mk technology, kterým školní slévárna disponuje. Skořepiny byly po vytavení modelů žháný při 800 °C po dobu 2 hodin s cílem zvýšit jejich pevnost.



Obr. 44 Proces výroby zpevňujících obalů. Vlevo máčení v suspenzi, uprostřed posyp molochitovým ostřivem, vpravo sušení obalu.

Tabulka 4 Doplnující informace ke složkám použitých pro výrobu skořepin

Vrstva	Typ	Název
Primární vrstva	pojivo	Princote® binder
	plnivo	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh
	posyp	Zirkon – 50/150
zesilovací vrstvy	pojivo	Wexcoat® 24
	plnivo	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh
	posyp	Molochite 16/30

Tabulka 5 Technické specifikace keramických suspenzí

Parametr	Princote binder	Wexcoat 24
Základní složka	Koloidní silika	Koloidní silika
Celkový obsah částic SiO ₂	30%	23,5%
Velikost částic	10 nm	10 nm
Hustota	1,18 g.cm ⁻³	1,15 g.cm ⁻³

3.5 Podmínky experimentu

Jako tavicí agregát byla zvolena elektrická odporová pec s kelímkem z SiC s kapacitou 15 kg roztaveného kovu. Jedna tavba vystačila na odlití tří forem, celkem tedy bylo provedeno 6 taveb. Vsázka se u každé tavby skládala z 80 % housek sekundární produkce dodaných firmou REMET a 20 % vratu AlSi10Mg bez zbytkového stroncia. Lící teplota byla stanovena stejně jako v simulaci na 700 °C. Chemické složení housek je shrnuto v tab. 6, jedná se o data dodaná dodavatelem.

Tabulka 6 Chemické složení housek

Chemické složení ingotů dodaných firmou REMET						
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Sr
89,5%	9,67%	0,188%	0,0141%	0,18%	0,311%	0,0001%

Pomocí optického emisního spektrometru Q4 Tasman bylo změřeno chemické složení (tab. 7) modifikované a nemodifikované tavby s tím, že se počítá, že ostatní tavby měly podobné složení, protože skladba vsázky byla vždy shodná. Účinek modifikace byl pozorován na metalografických výbrusech, které jsou popsány níže.

Tabulka 7 Analýza chemického složení taveb

Chemické složení taveb						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Sr
nemod.	9,24	0,20	0,02	0,24	0,28	< 0,0002
mod.	9,49	0,20	0,02	0,23	0,30	0,035

Skořepiny byly temperovány na 555 °C, 305 °C s výdrží na teplotě minimálně 1 hodinu. 5 °C bylo bráno jako rezerva na zchladnutí forem v čase mezi vyjmutím z pece a nalitím kovu. Teplota nepředehřátých forem byla uvažována 18 °C, tato hodnota byla změřena termočlánkem v místě, kde byly skořepiny uloženy. Časová prodleva se mezi otevřením žíhací pece se skořepinami a odlitím pohybovala mezi 15 až 20 sekundami.

Modifikace se prováděla předslitinou AlSr10. Jelikož se účinek modifikace stronciem v čase zlepšuje byla předslitina do taveniny vhažována 30 minut před odléváním a tavenina byla občas promíchána. Odlévání jedné skořepiny trvalo přibližně 5 sekund.



Obr. 45 Vlevo skořepiny připravené na proces odlévání, vpravo stromečky po odstranění skořepiny

3.6 Výsledky experimentu

Tyčky dle normy DIN 50125 byly trhány na stroji Zwick/Roell Z250 za použití extenzometru MultiXtens. Zkouška probíhala dle normy CSN EN ISO 6892-1 (2021).

Pro jednoduchost bylo pro vzorky zavedeno třímístné kódové označení:

- 10, 5, 2 – tloušťka tyčky
- 55, 30, 18 – teplota skořepiny při lítí
- M, N – modifikovaná a nemodifikovaná tavba

Například označení 255N znamená 2 mm tyčka odlitá do skořepiny o teplotě 550 °C, tavenina nebyla modifikována.

Celkem bylo zkoušce tahem podrobena 72 ks tyček. Z každé skořepiny s tyčkou o tl. stěny 10 mm byly vyčleněny tři tyčky. Ze skořepin s tyčkami o tl. stěny 5 mm a 2 mm byly ze spodní části vyčleněny opět tři kusy a z horní části dvě. U 2 mm tyček ze skořepin o teplotách 18 °C a 300 °C se některé vzorky nepodařilo odlít. Seznam tyček podrobených zkoušce tahem je v tabulce 8.

Tabulka 8 Celkový počet tyček podrobených zkoušce tahem

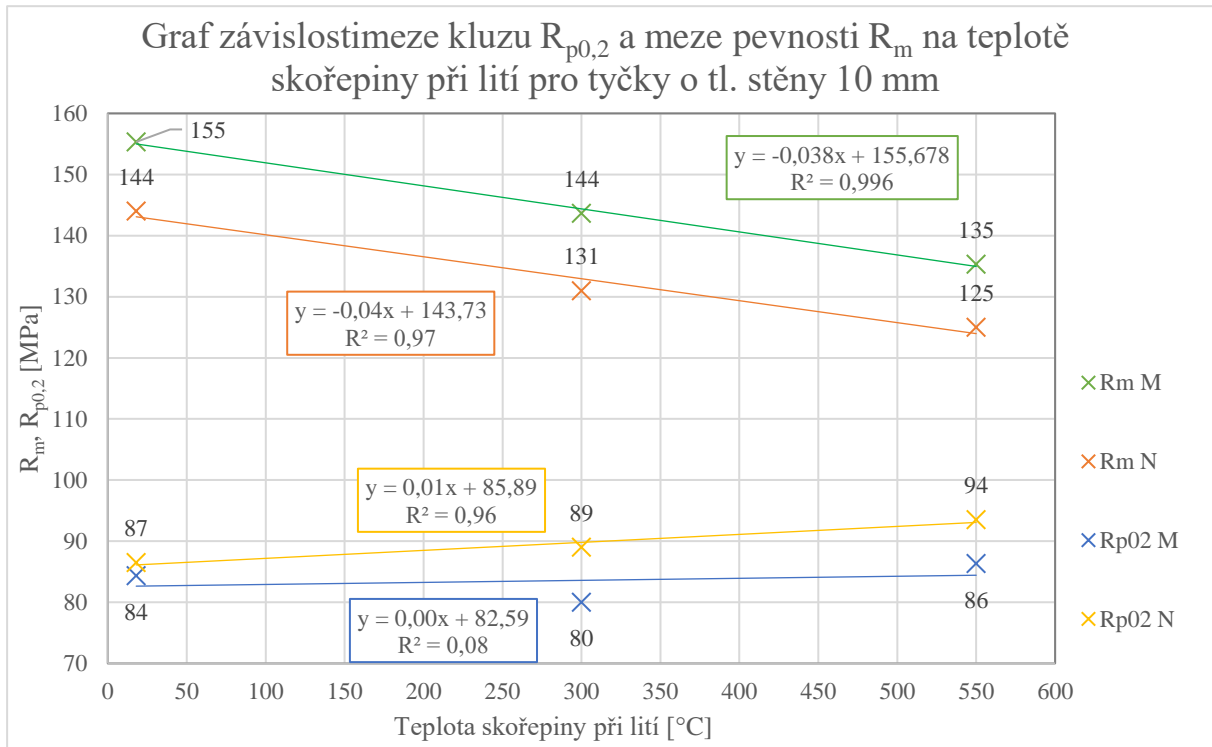
t. skořepiny °C	Tavba	Tl. Stěny tyčky [mm]									
		10		5				2			
		nemod	mod	nemod		mod		nemod		mod	
		X		horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní	horní	dolní
550		3	3	2	3	2	3	2	3	2	3
300		3	3	2	3	2	3	0	3	2	3
18		3	3	2	3	2	3	1	3	1	1
Σ		9	9	6	9	6	9	3	9	5	7
	celkem	72 ks									

Jako první byly testovány tyčky o tloušťce stěny 10 mm. Výsledky jsou shrnuty v tab. 9. Dva výsledky zkoušky pevnosti v tahu byly vyřazeny jedná se o vzorky 1018N a 1055N. Na lomové ploše byly nalezeny vady, které ovlivnily výsledek. Výsledky byly zpracovány pomocí grafů, které jsou popsány níže.

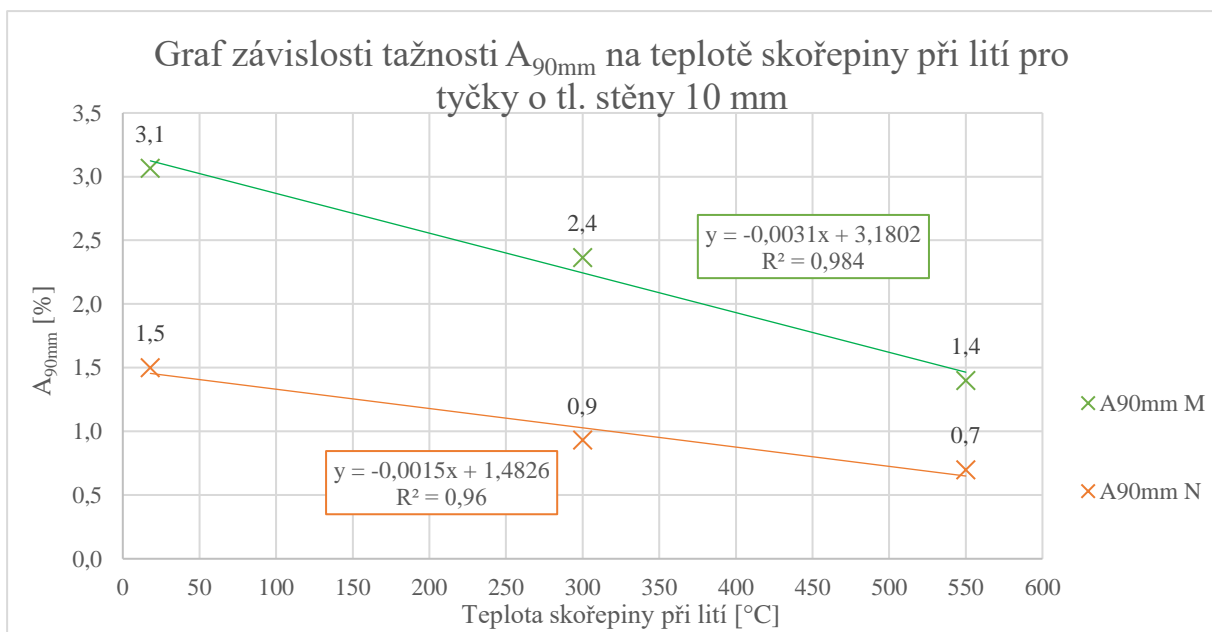
Tabulka 9 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek pro tyčky 10 mm

Mechanické vlastnosti pro tyčky 10 mm							
Tavba		modifikovaná			nemodifikovaná		
Parametr		Rm	Rp0,2	A90mm	Rm	Rp0,2	A90mm
Teplota skořepiny při lítí [°C]	18	154	84	2,9	146	87	1,6
		155	83	3,1			
		157	86	3,2	142	86	1,4
	Průměr	155	84	3,1	144	87	1,5
	300	143	80	2,3	126	88	0,8
		144	81	2,4	130	90	0,9
		144	79	2,4	137	89	1,1
	Průměr	144	80	2,4	131	89	0,9
	550	136	87	1,4			
		134	86	1,3	124	94	0,7
136		86	1,5	126	93	0,7	
Průměr	135	86	1,4	125	94	0,7	

Z grafů na obr. 46 a 47 vyplývá, že mez pevnosti i tažnost s klesající teplotou skořepiny roste. Mezi vzorky 1055M a 1018M bylo zaznamenáno zvýšení meze pevnosti o 14,8 % a 119 % zvýšení tažnosti. mezi vzorky 1055N a 1018N je zvýšení meze pevnosti 15,2 % a 114 % zvýšení tažnosti. Mezi vzorky 1055N a 1018M je zvýšení meze pevnosti o 24 %. Smluvní mez kluzu se téměř nemění. Modifikace má pozitivní vliv jak na mez pevnosti, tak na tažnost. Smluvní mez kluzu se vlivem modifikace mírně snižuje. DAS bylo naměřeno na nemodifikovaných vzorcích $50 \pm 3 \mu\text{m}$ pro teplotu skořepiny $550 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \pm 2 \mu\text{m}$ pro teplotu skořepiny $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a $30 \pm 3 \mu\text{m}$ pro teplotu skořepiny $18 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 46 Graf závislosti meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 10 mm



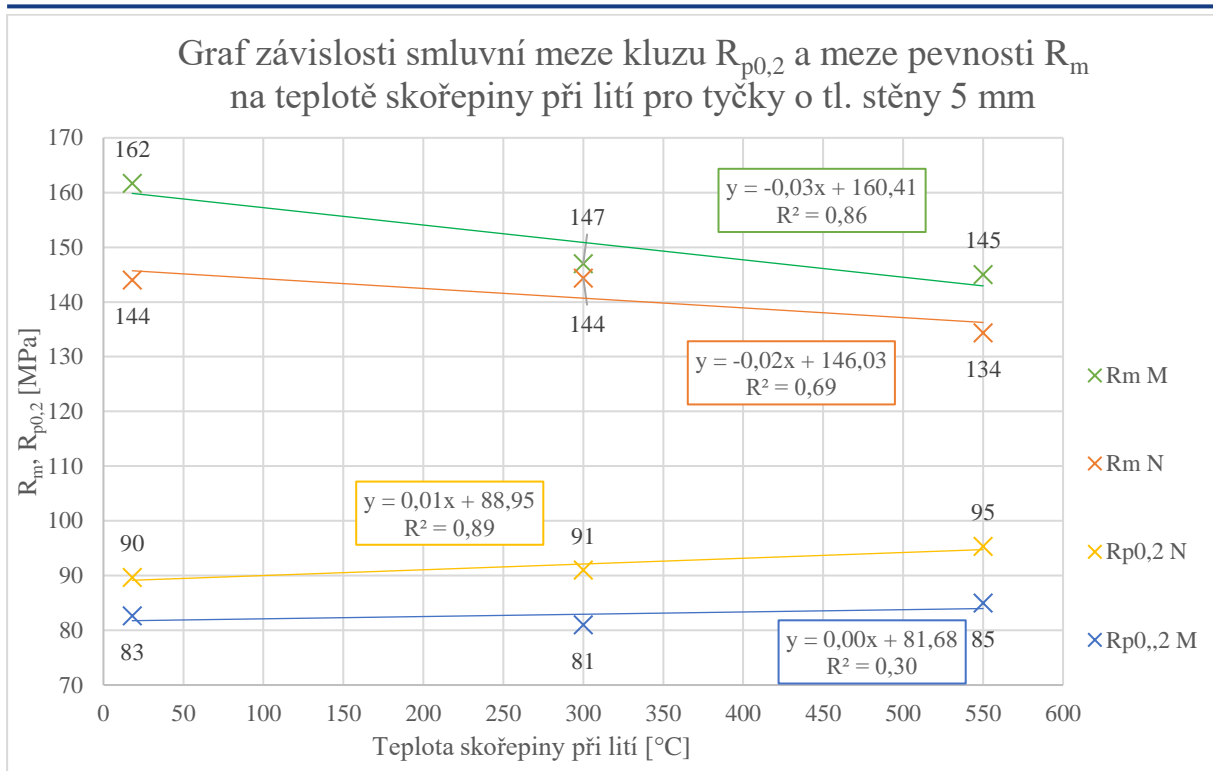
Obr. 47 Graf závislosti tažnosti $A_{90\text{mm}}$ na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 10 mm

V tab. 10 jsou shrnuty výsledky z tyček o tl. stěny 5 mm. Z výsledků lze vyčíst mírné zvýšení mechanických vlastností oproti tyčkám o tl. stěny 10 mm. To je dáno vyšší rychlostí tuhnutí, která se projevila i na menších hodnotách DAS které byly naměřeny $43\pm 5 \mu\text{m}$, $23\pm 1 \mu\text{m}$ a $19\pm 2 \mu\text{m}$ pro skořepiny o teplotách 550 °C, 300 °C a 18 °C.

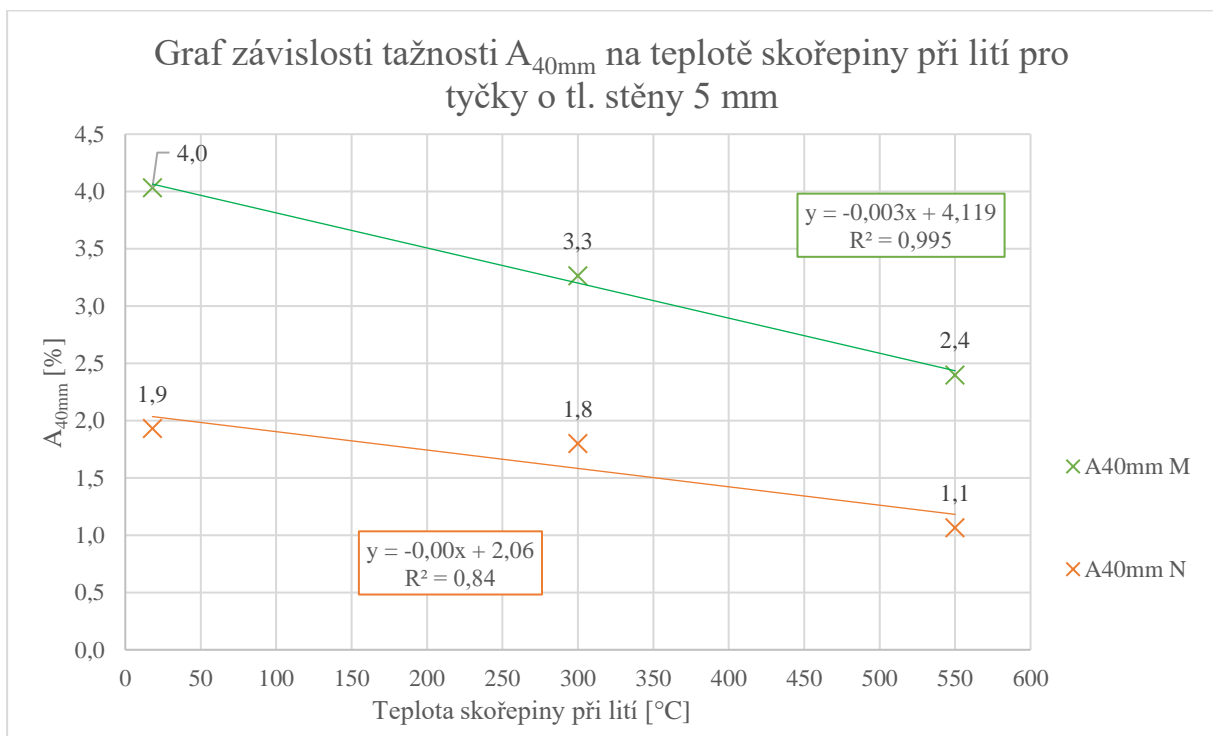
Tabulka 10 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek pro tyčky 5 mm

Mechanické vlastnosti pro tyčky 5 mm							
Tavba	modifikovaná			nemodifikovaná			
Parametr	Rm	Rp0,2	A90mm	Rm	Rp0,2	A90mm	
Teplota skořepiny při lítí [°C]	18	153	82	2,9	146	93	2,5
		168	83	5	139	89	1,3
		164	83	4,2	147	87	2
	Průměr	162	83	4,0	144	90	1,9
	300	144	80	2,9	150	87	2,3
		144	80	3	140	92	1,5
		153	83	3,9	143	94	1,6
	Průměr	147	81	3,3	144	91	1,8
	550	143	84	2,2	131	93	0,9
		146	85	2,5	140	97	1,3
		146	86	2,5	132	96	1
	Průměr	145	85	2,4	134	95	1,1

Podobně jako u 10 mm tyček s klesající teplotou skořepin mez pevnosti a tažnost u tyček o tloušťce stěny 5 mm roste viz. Grafy na obr. 48 a 49. Mezi vzorky 518M a 555M bylo zaznamenáno zvýšení meze pevnosti o 11,7 % a 66,7 % zvýšení tažnosti. Mezi vzorky 518M a 555M je zvýšení meze pevnosti 7,5 % a 72,7 % zvýšení tažnosti. Mezi vzorky 518M a 555N je zvýšení meze pevnosti o 20,9 %. Smluvní mez kluzu se skoro nemění. Modifikace opět způsobila zvýšení tažnosti, meze pevnosti a mírný pokles smluvní meze kluzu. Menší tloušťka stěny způsobila mírné zvýšení mechanických vlastností napříč všemi třemi teplotami skořepin.



Obr. 48 Graf závislosti smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 5 mm



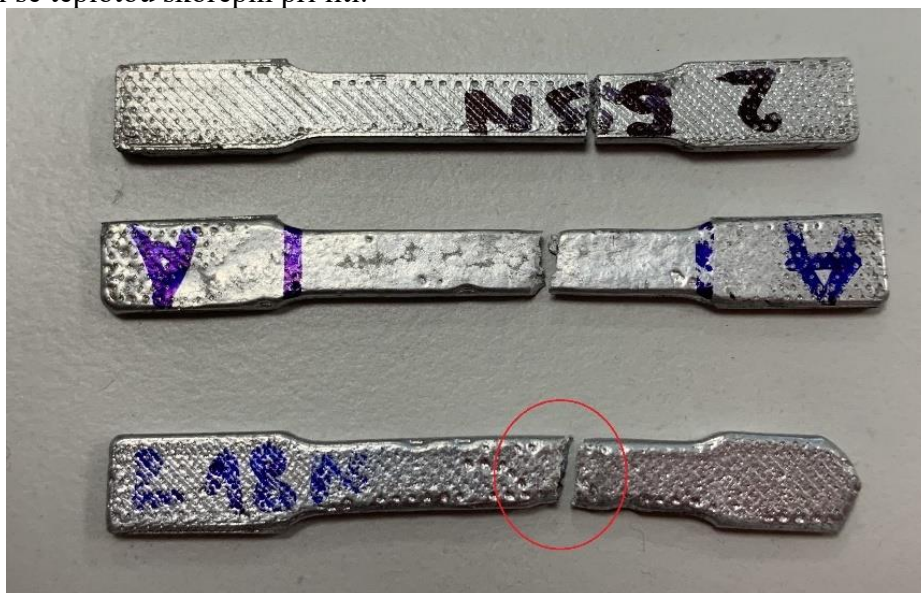
Obr. 49 Graf závislosti tažnosti A_{40mm} na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 5 mm

U 2 mm tyček se vyskytly problémy se zabíhavitostí u studených skořepin, proto u modifikované tavby se skořepinami o teplotě 18 °C dva výsledky chybí. Kov ztuhl dříve, než se zaplnila dutina odlitku. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tab. 11.

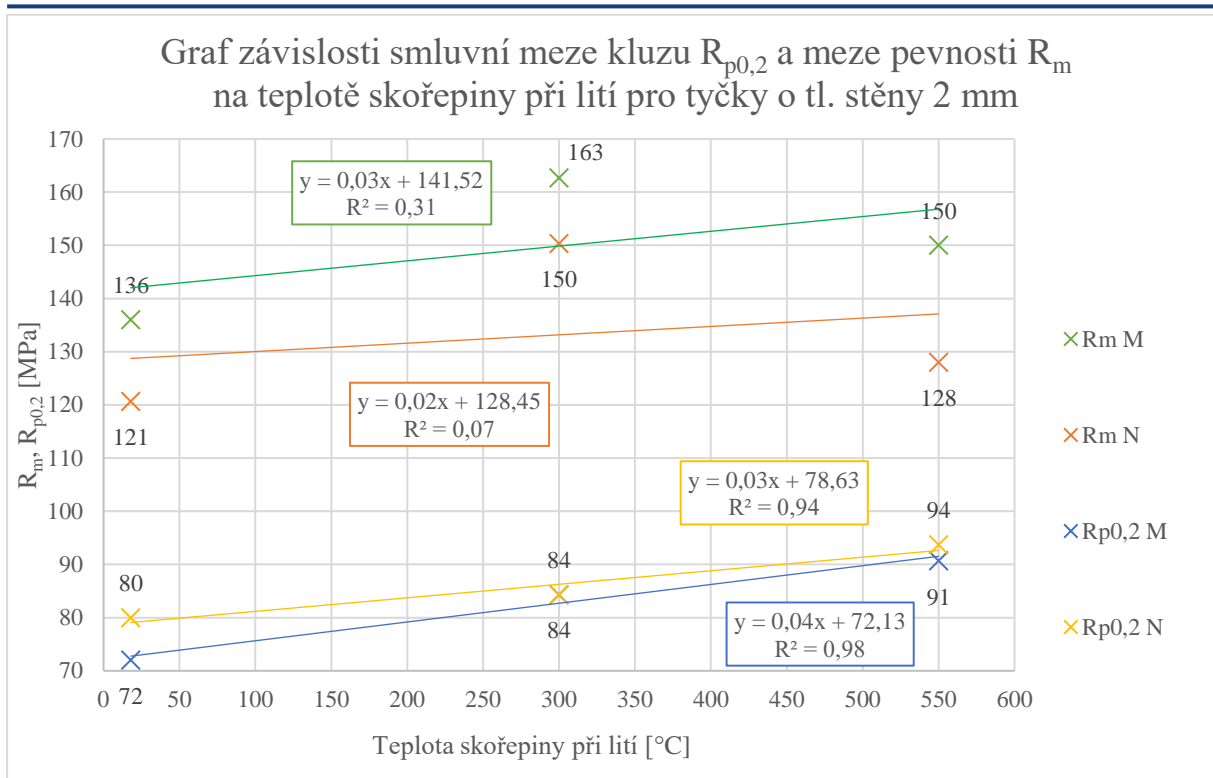
Tabulka 11 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek pro tyčky 2 mm

Mechanické vlastnosti pro tyčky 2 mm							
Tavba		modifikovaná			nemodifikovaná		
Paramter		Rm	Rp0,2	A90mm	Rm	Rp0,2	A90mm
Teplota skořepiny při lítí [°C]	18	136	72	2,7	120	71	2,6
					105	88	2
					137	81	2,5
	Průměr	136	72	2,7	121	80	2,4
	300	170	84	10,3	144	89	2,4
		153	84	6,2	150	78	3,4
		165	85	5,4	157	86	4,1
	Průměr	163	84	7,3	150	84	3,3
	550	156	90	5,3	127	96	1,3
		148	91	3	133	92	1,5
		146	91	4,2	124	93	1
	Průměr	150	91	4,2	128	94	1,3

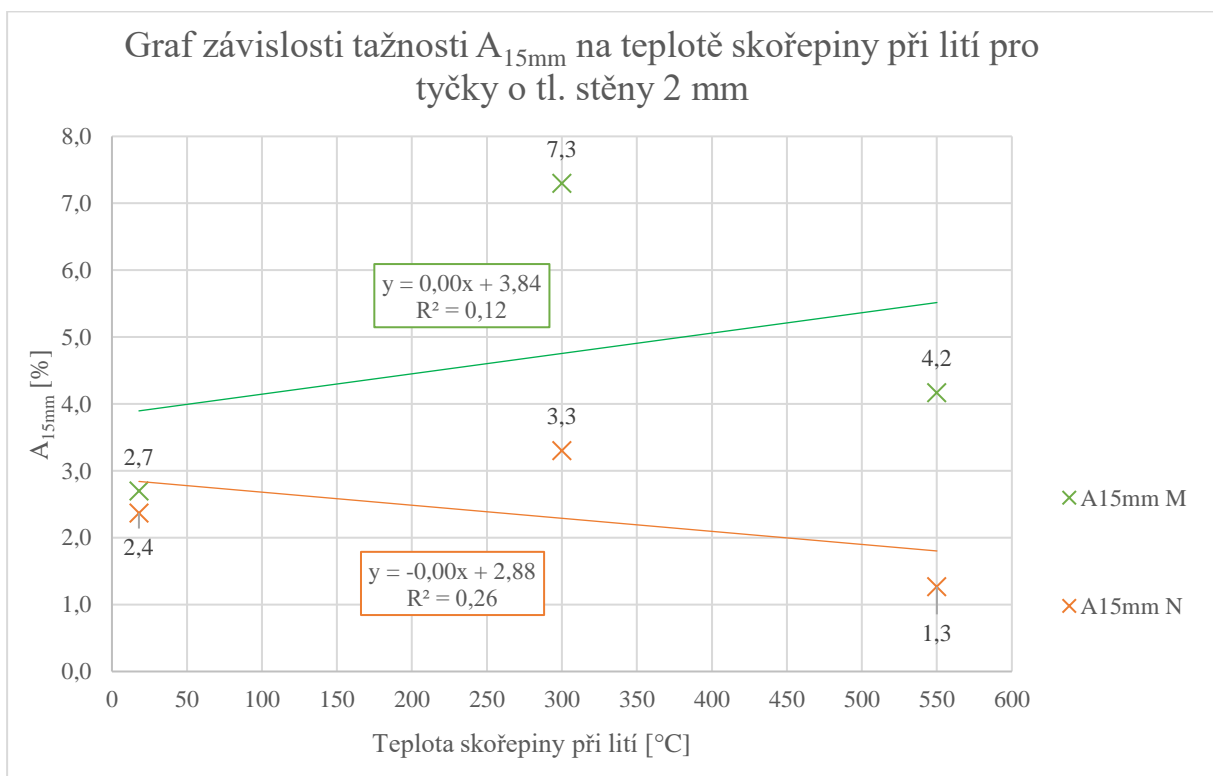
Navzdory očekávání dosahují mez pevnosti a tažnost poměrně nízkých hodnot u tyček litých do 18 °C skořepin. Hodnoty dosahují maxima u skořepin o teplotě 300 °C a u 550 °C opět klesají viz grafy na obr. 51 a 52. Je tomu tak pravděpodobně z důvodu špatné zabíhavitosti taveniny, tyčky měly špatný povrch a nekopírovaly přesně povrch formy. U některých vzorků byly nalezeny studené spoje a oxidické pleny vyplňující většinu plochy lomu. Na obr. 50 jsou tři vzorky 2 mm tyček. Horní je 255N pro porovnání a pod ní jsou 218N. Je jasné vidět, že spodní dvě tyčky mají špatný povrch a mají zaoblené rohy. Geometrie tak neodpovídá normě. Spodní vzorek má dokonce zúžený průřez v místě prasknutí (vyznačeno červenou kružnicí). U této konkrétní tyčky byla mez pevnosti naměřena pouhých 105 MPa. Výsledky vzorků 218M a 218N byly proto z dalších vyhodnocení vyřazeny. DAS dosahovalo hodnot 42±4, 23±3 a 12±2 se snižující se teplotou skořepin při lítí.



Obr. 50 Porovnání geometrické přesnosti vzorku 255N nahoře a 218N uprostřed a dole

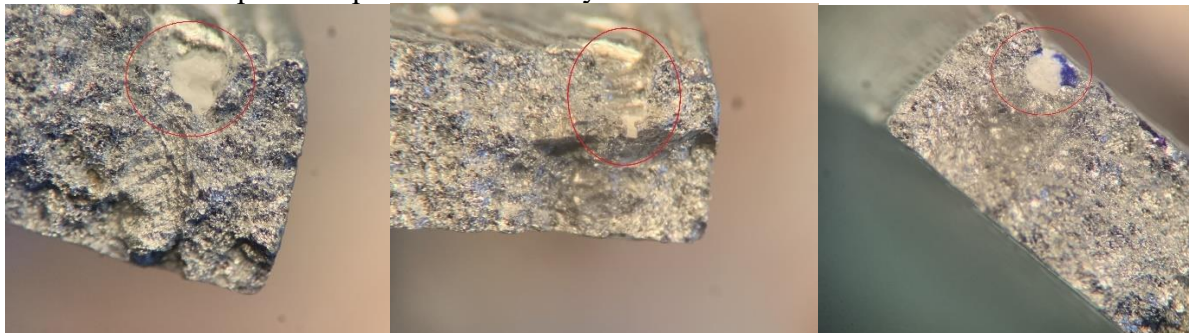


Obr. 51 Graf závislosti smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 2 mm

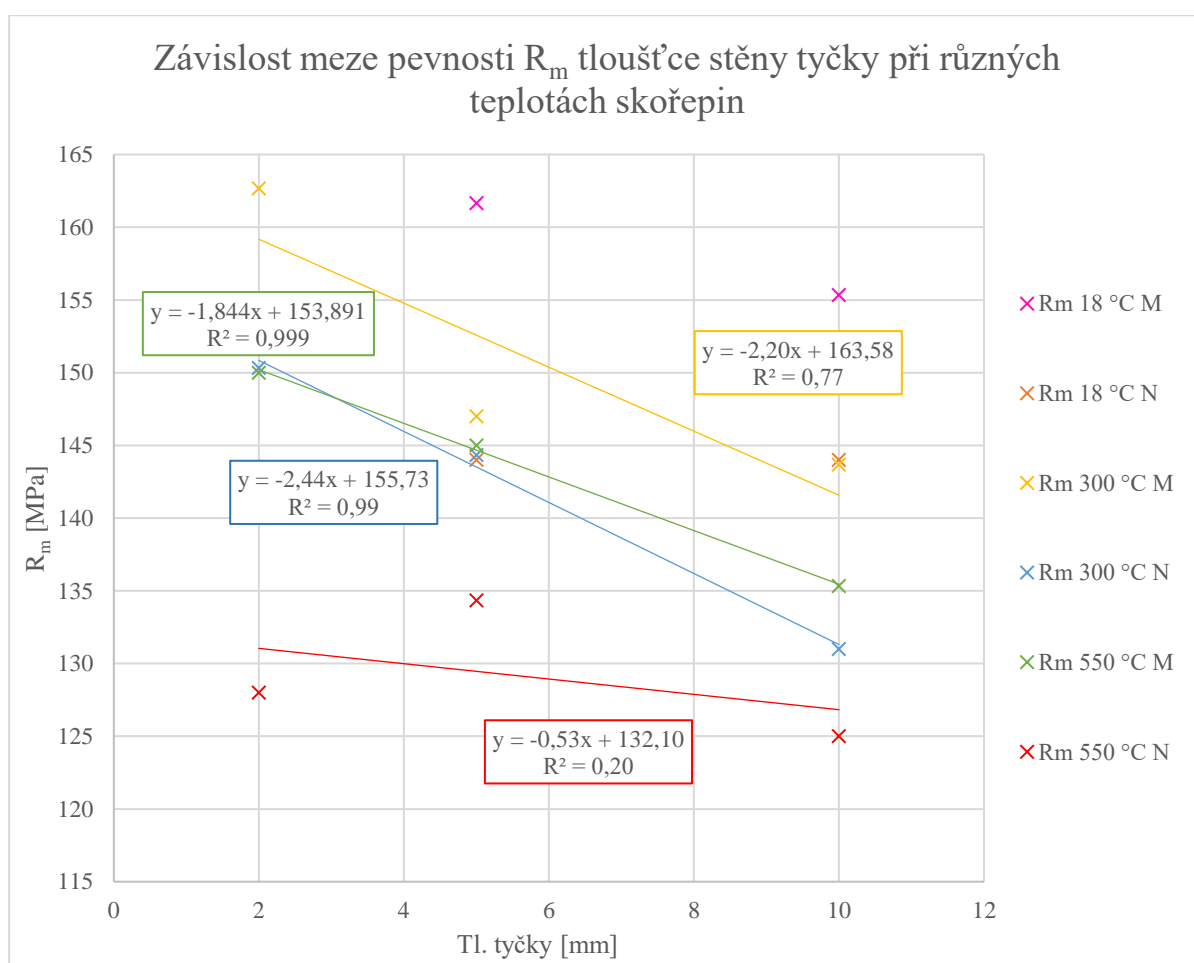


Obr. 52 Graf závislosti tažnosti A_{15mm} na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 2 mm

Následující graf na obr. 54 byl sestaven pro grafické zobrazení vlivu tloušťky stěny na mez pevnosti. Z grafu vyplývá, že se zvyšující se tloušťkou stěny se mechanické vlastnosti snižují. Výjimku tvoří lineární regrese pro teplotu skořepiny 550 °C u nemodifikované slitiny, kde byl koeficient spolehlivosti R^2 vyčíslen pouze na 0,2. Lineární závislost tudíž neplatí. Tyčky 255N totiž vlivem vad průměrně nedosahují dostatečně vysoké meze pevnosti než by teoreticky měly. Při přezkoumání lomových ploch na stereolupě byla u všech tří vzorků zjištěna vada vzniklá při tvorbě primárního obalu. Břečka zatekla do výtisku a vznikl tak při vypalování nesprávný negativ odlitku viz obr. 53. Problém vznikl pravděpodobně špatným nastavením parametrů tisku. Tato vada zapříčinila pokles mechanických vlastností.



Obr. 53 Zjištěné vady na lomové ploše u vzorků 255N



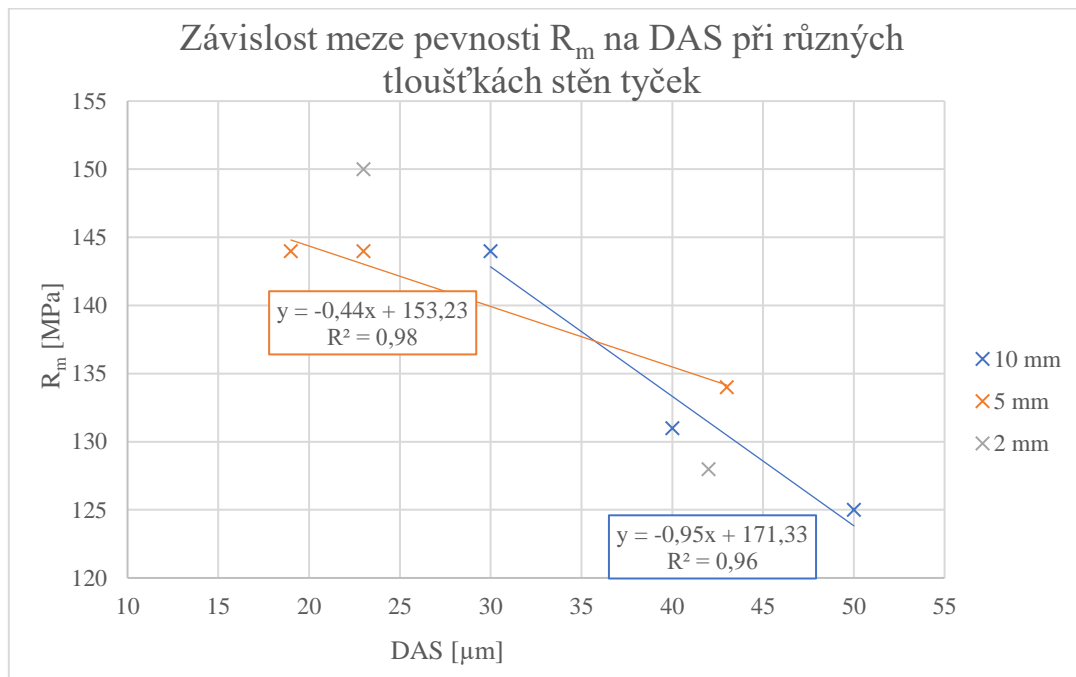
Obr. 54 Graf závislosti meze pevnosti R_m na tloušťce stěny tyčky při různých teplotách skořepin

Celkem bylo zhotoveno 18 metalografických výbrusů z tyček o tloušťce 10 mm, 5 mm a 2 mm odlitých do skořepin o teplotě 550 °C, 300 °C a 18 °C jak z nemodifikované, tak z modifikované tavby. DAS bylo měřeno pouze z nemodifikovaných vzorků. K vyhodnocení byly použity odpovídající výsledky z tahových zkoušek. Výbrusy z modifikovaných taveb byly využity k vyhodnocení efektivity modifikace stronciem. Výsledky měření DAS jsou shrnuty v tabulce 12.

Tabulka 12 DAS z metalografických výbrusů nemodifikovaných vzorků

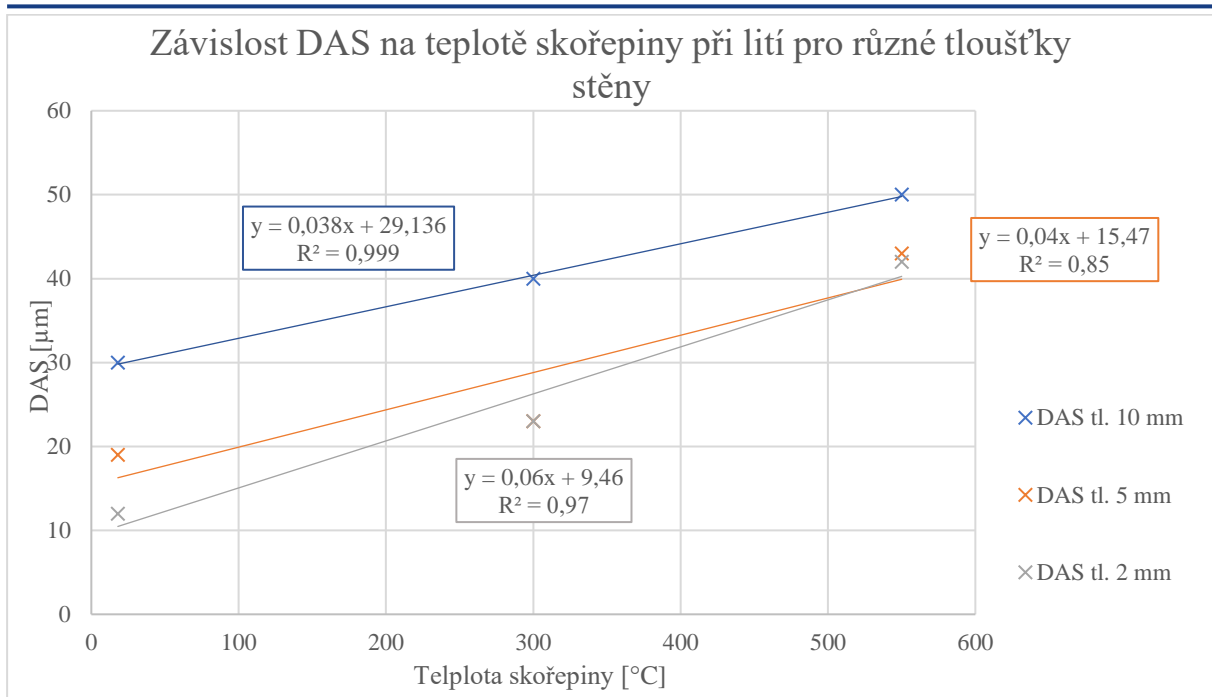
T. skoř. [°C]	DAS	Tl. tyčky [mm]		
		10	5	2
550	50±3	43±5	42±4	
300	40±2	23±1	23±3	
18	30±3	19±2	12±2	

Graf na obr. 55 zobrazuje závislost mezi mezí pevnosti a naměřeným DAS. U tyček o tloušťce stěny 10 mm a 5 mm závislost platí, se zvyšujícím se DAS mez pevnosti klesá. U 2 mm platí závislost také, ale pouze pro teploty skořepin 300 °C a 550 °C. Mez pevnosti při teplotě skořepiny 18 °C byla odstraněna, jeden bod tedy chybí.



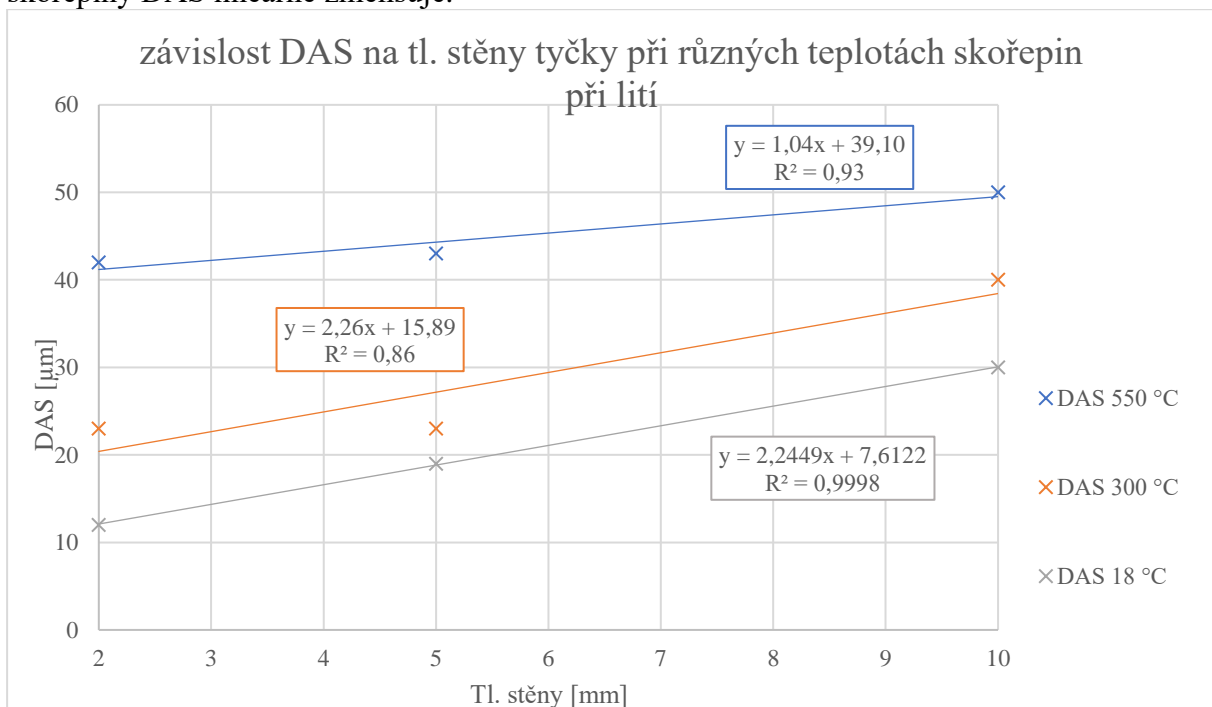
Obr. 55 Graf závislosti meze pevnosti R_m na DAS při různých tloušťkách stěn tyček

Graf na obr. 56 popisuje závislost DAS na teplotě skořepiny při lití. Z výsledků lze vyčíst, že pro jednotlivé tloušťky stěny tyček hodnota DAS s klesající teplotou skořepiny klesá. S tím je spojená mez pevnosti, která se s klesajícím DAS zvyšuje. Tato závislost je popsána v grafu na obr. 55. Mezi 1055 a 1018 se jedná o pokles DAS o 40 %, mezi 555 a 518 byl zaznamenán pokles DAS o 55,8 % a mezi 255 a 218 o 71,4 %.



Obr. 56 Graf závislosti DAS na teplotě skořepiny pro různé tloušťky stěny

Graf na obr. 57 popisuje závislost mezi DAS a měnící se tloušťkou stěny tyčky při konstantní teplotě skořepiny při lití. Lze tedy říci, že se snižující se tloušťkou stěny se při stejné teplotě skořepiny DAS lineárně zmenšuje.

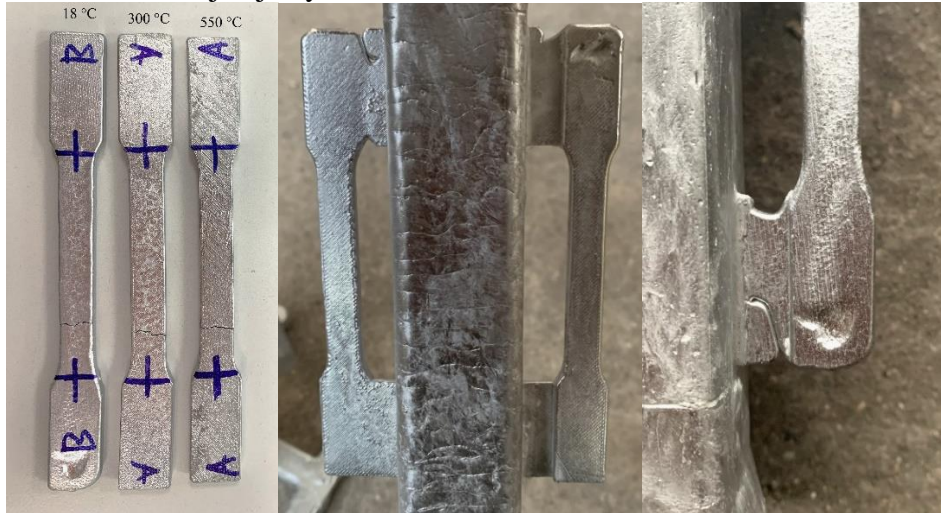


Obr. 57 Graf závislosti DAS na tloušťce stěny při různých teplotách skořepin při lití

3.7 Zhodnocení zabíhavosti kovu v horní části formy

Při zhotovování stromečků s 2 a 5 mm tyčkami byly po dvou kusech připevněny vzorky do horní části stromečku za účelem zjištění zabíhavosti kovu v závěru procesu lití při nižším metalostatickém tlaku a při různých teplotách skořepin.

U 5 mm tyček byla při teplotě 550 °C zabíhavost vynikající. Odlitky neměly povrchové vady a kov skvěle kopíroval povrch formy. Obdobně tomu bylo i u teploty skořepiny 300 °C při lití. Jediné, co se změnilo, že kov nekopíroval i ty nejmenší detaily, nicméně rozměrově stále odpovídal normě. U teploty skořepiny 18 °C nastaly problémy se zabíhavostí. Kov špatně kopíroval povrch formy a ostré rohy se nedolily. Problémy se zabíhavostí nastaly i v horní upínací části tyčky. Na více vzorcích se také vyskytovala vada uzavřeného vzduchu a následného ztuhnutí kovu jak je vyobrazeno na obr. 58.



Obr. 58 Vlevo porovnání zabíhavosti kovu napříč teplotami skořepin u 5 mm tyček, uprostřed a vpravo vady uzavřeného vzduchu

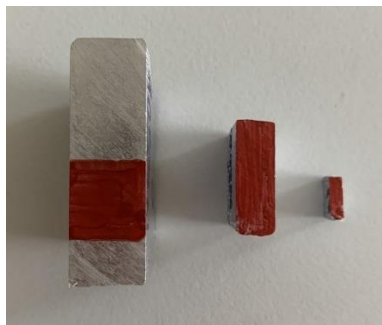
2 mm tyčky se, co se týče zabíhavosti, chovaly podobně jako 5 mm tyčky. Kov dostatečně dobře kopíroval povrch formy při teplotě skořepiny 550 °C. Při 300 °C se již objevovaly náznaky zaoblených rohů, ale na výsledky mechanických vlastností to ještě nemělo vliv. Velké obtíže nastaly při odlévání kovu do skořepin o teplotě 18 °C. objevily se vážné problémy jak ve spodních, tak v horních tyčkách. Objevily se vady způsobené uzavřeným vzduchem a nedodržením geometrie odlitku. Vady jsou znázorněny na obr. 59.



Obr. 59 Vady odlitků tyček o tl. stěny 2 mm při teplotě skořepiny 18 °C

3.8 Vyhodnocení účinku modifikace stronciem

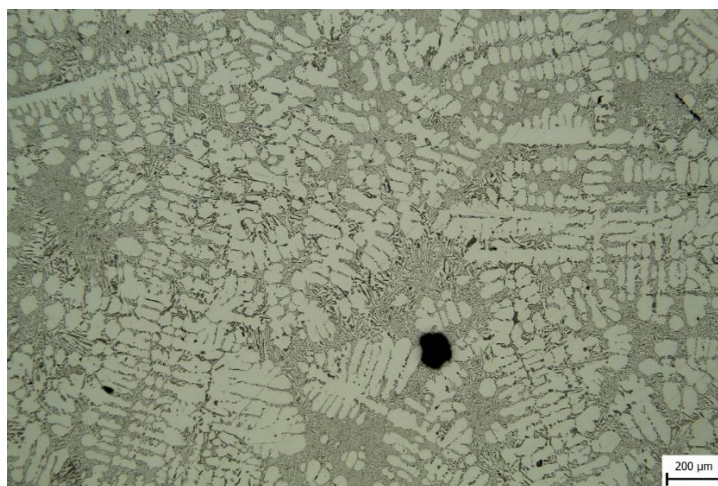
Za tímto účelem byly odebrány vzorky od každé tloušťky stěny v modifikovaném stavu. Vzorky byly odebírány z upínací části tyček viz obr.60. Červenou fixou je vyznačeno odkud konkrétně byl materiál odebrán pro zhotovení výbrusu. Snímky byly pořízeny na optickém mikroskopu Neophot 32 při různých zvětšeních, která jsou poznamenána vždy v popisku snímků.



Obr. 60 Příčný řez upínací částí tyček, vlevo tyčka 10 mm, uprostřed 5 mm a vpravo 2 mm

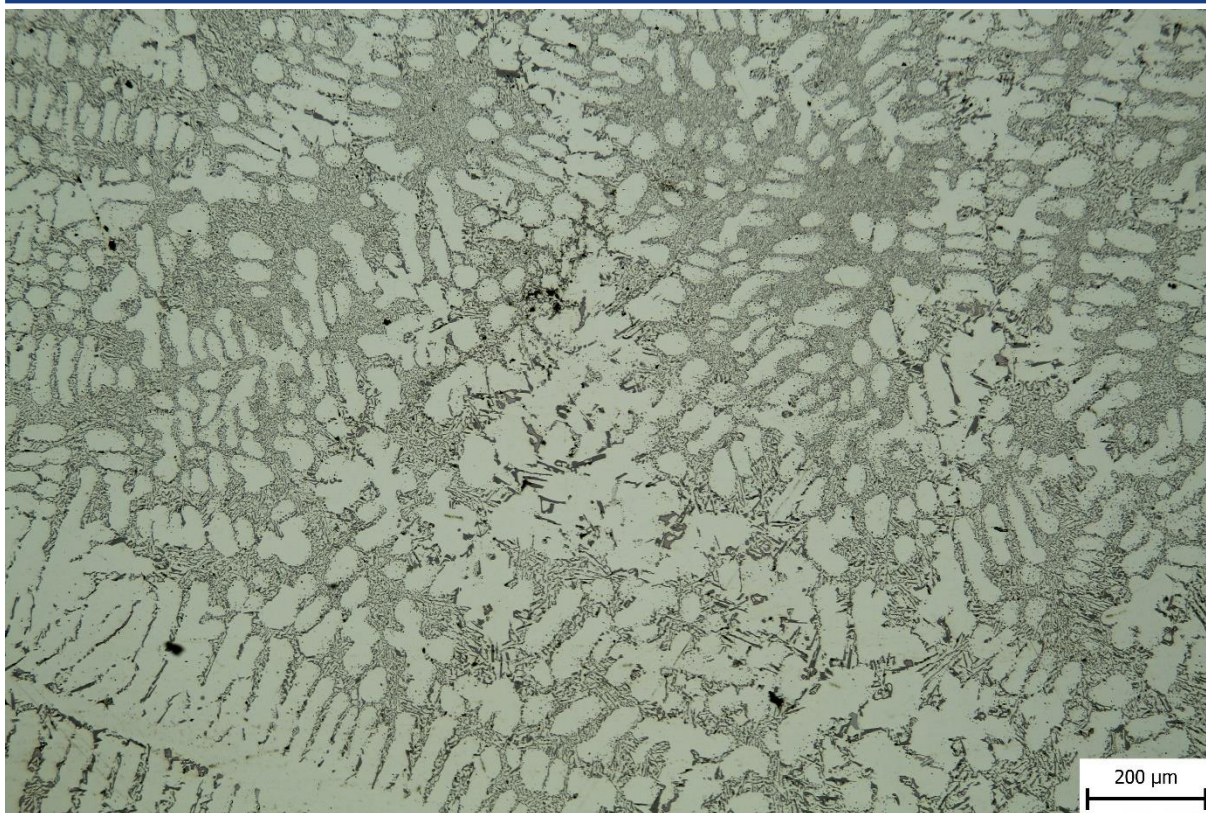


Obr. 61 metalografický výbrus vzorku 1055N, původní zvětšení 100x

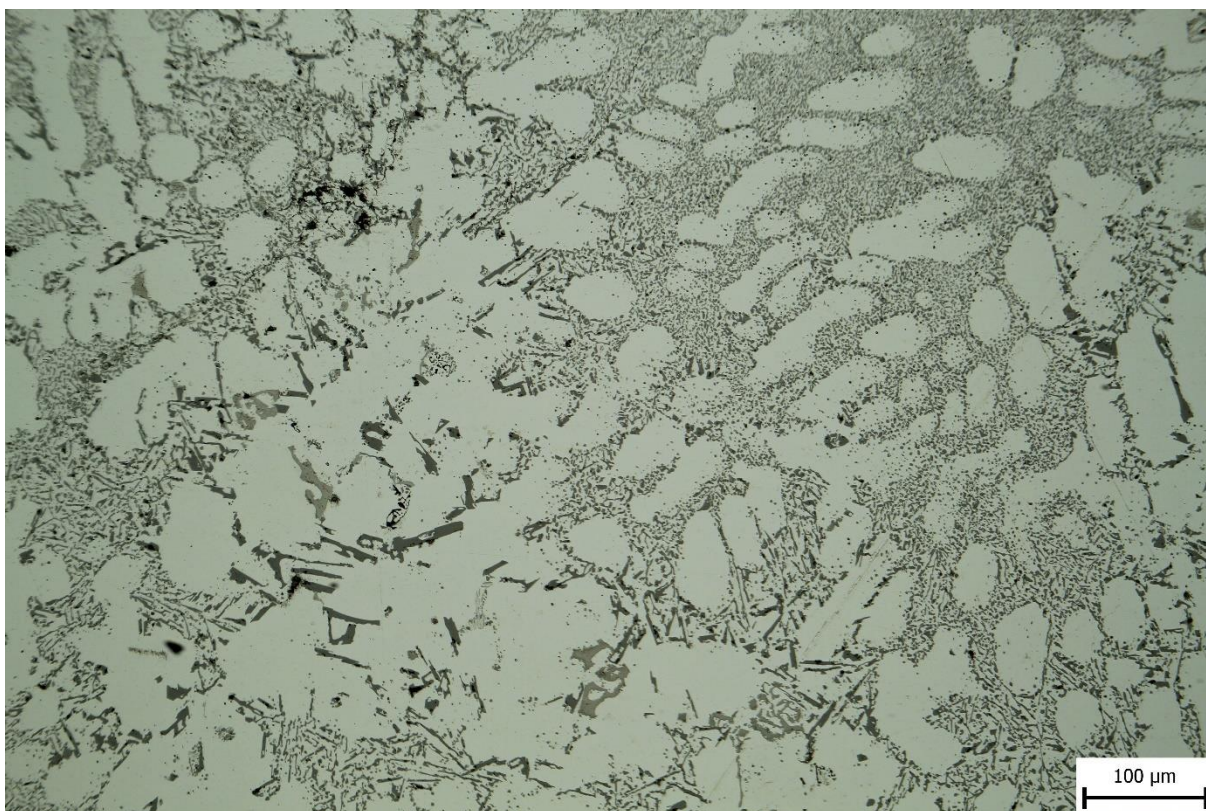


Obr. 62 Metalografický výbrus vzorku 1055M, původní zvětšení 100x

Na obr. 61 je vzorek 1055N, zde lze pozorovat nemodifikované eutektikum s jasně viditelným lamelárním křemíkem. Obr 62 zobrazuje strukturu ze vzorku 1055M. Projevil se zde slabší modifikační účinek stroncia, jsou zřetelně vidět místa kde má křemík lamelární formu, ale zároveň jsou místa, kde modifikace eutektika proběhla v pořádku. Tažnost byla průměrně 1,4 %.

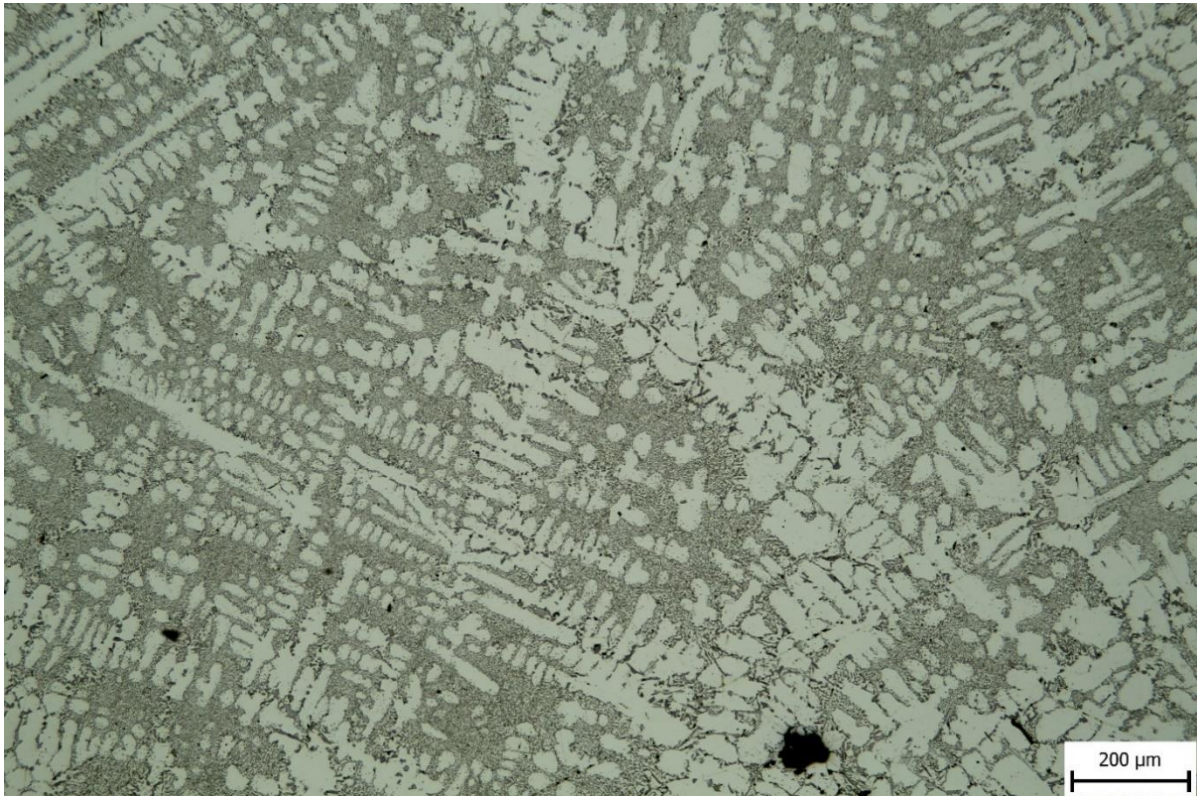


Obr. 63 Metalografický výbrus vzorku 1030M, původní zvětšení 100x

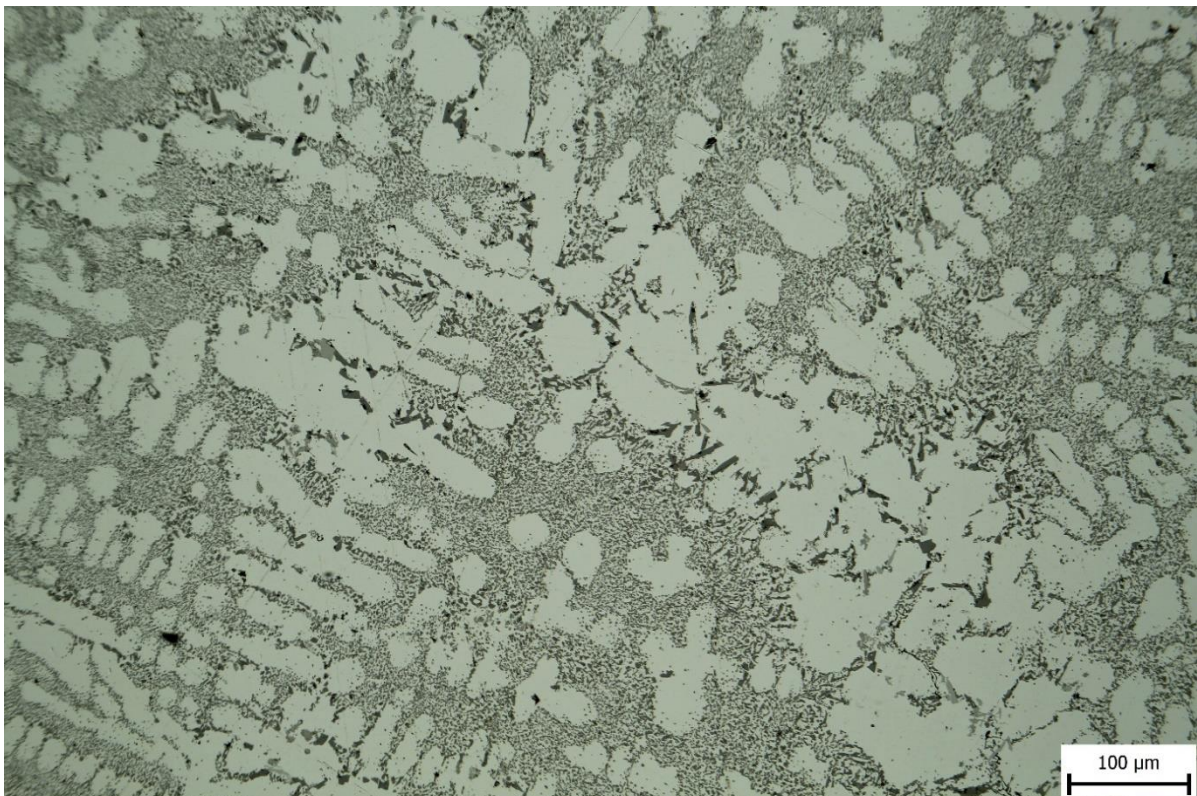


Obr. 64 Metalografický výbrus vzorku 1030M, původní zvětšení 200x

Výskyt lamelárního křemíku (obr. 63, 64) je u vzorku 1030M menší a modifikované eutektikum je díky vyšší rychlosti ochlazování jemnější. To tvrzení potvrzuje i zvýšení tažnosti z 1,4 % u 1055M na 2,4 % u 1030M. Doba tuhnutí vzorků 1030M je dle simulace přibližně 300 vteřin.

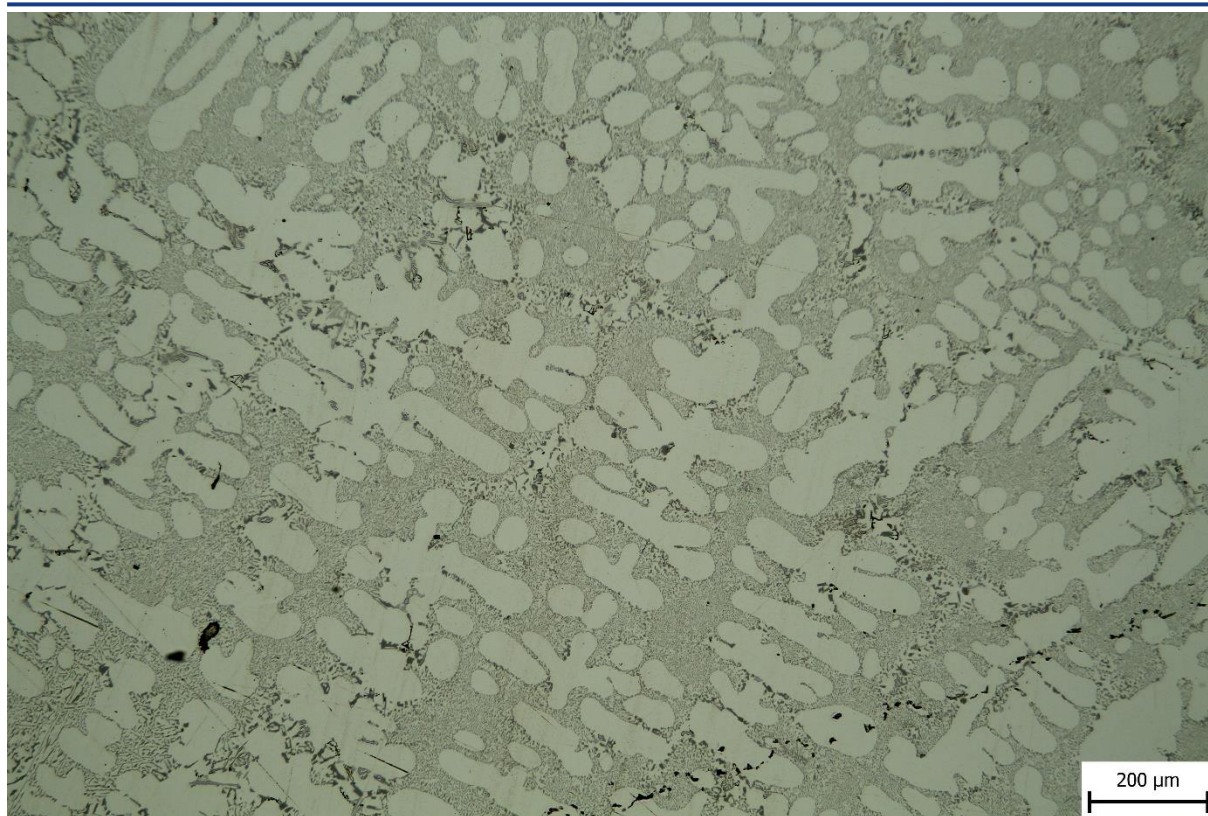


Obr. 65 Metalografický výbrus vzorku 1018M, původní zvětšení 100x

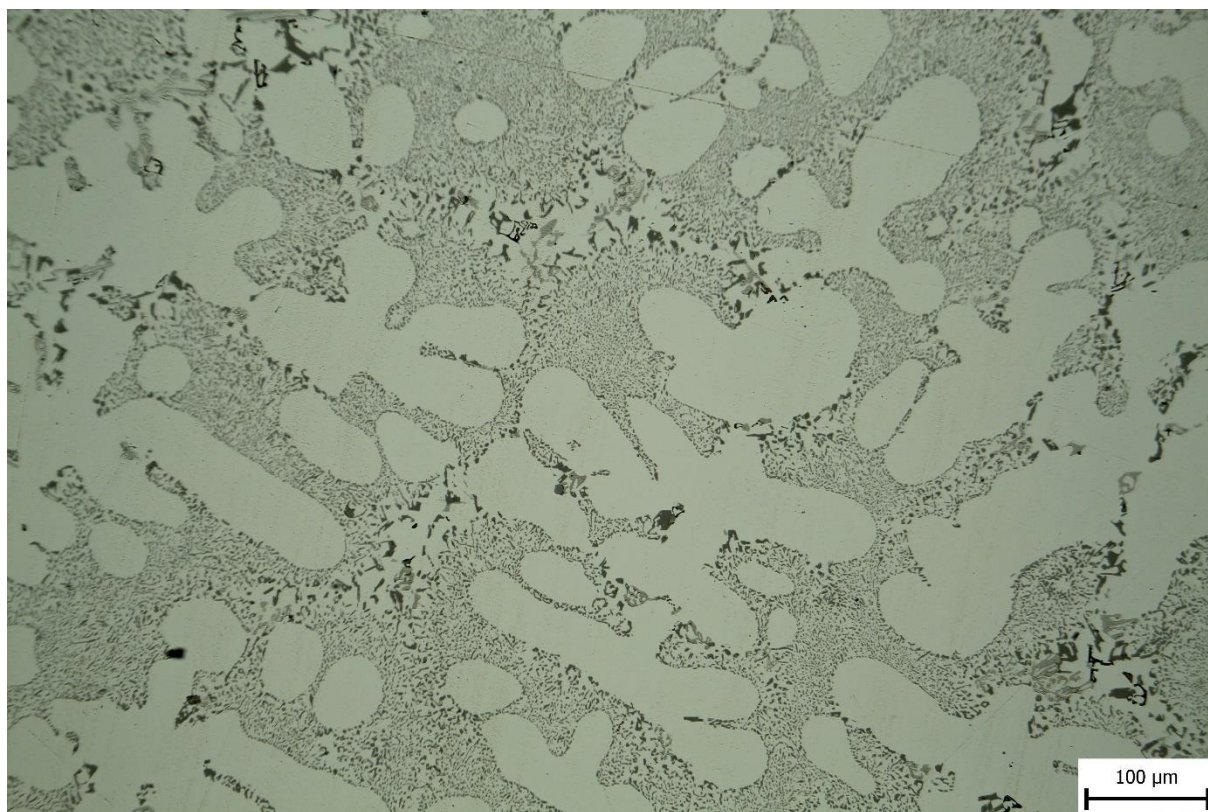


Obr. 66 Metalografický výbrus vzorku 1018M, původní zvětšení 200x

Při snížení teploty skořepiny na 18 °C se poměr lamelárního a modifikovaného křemíku ještě zlepšil viz obr 65, 66. Odpovídá tomu i naměřené zlepšení tažnosti z 2,4 % u 1030M na 3,1 % u 1018M. Stroncium úspěšně fungovalo jako modifikátor i při vysokých rychlostech ochlazování. Dle simulací je doba tuhnutí 10 mm tyčky přibližně 54 vteřin.

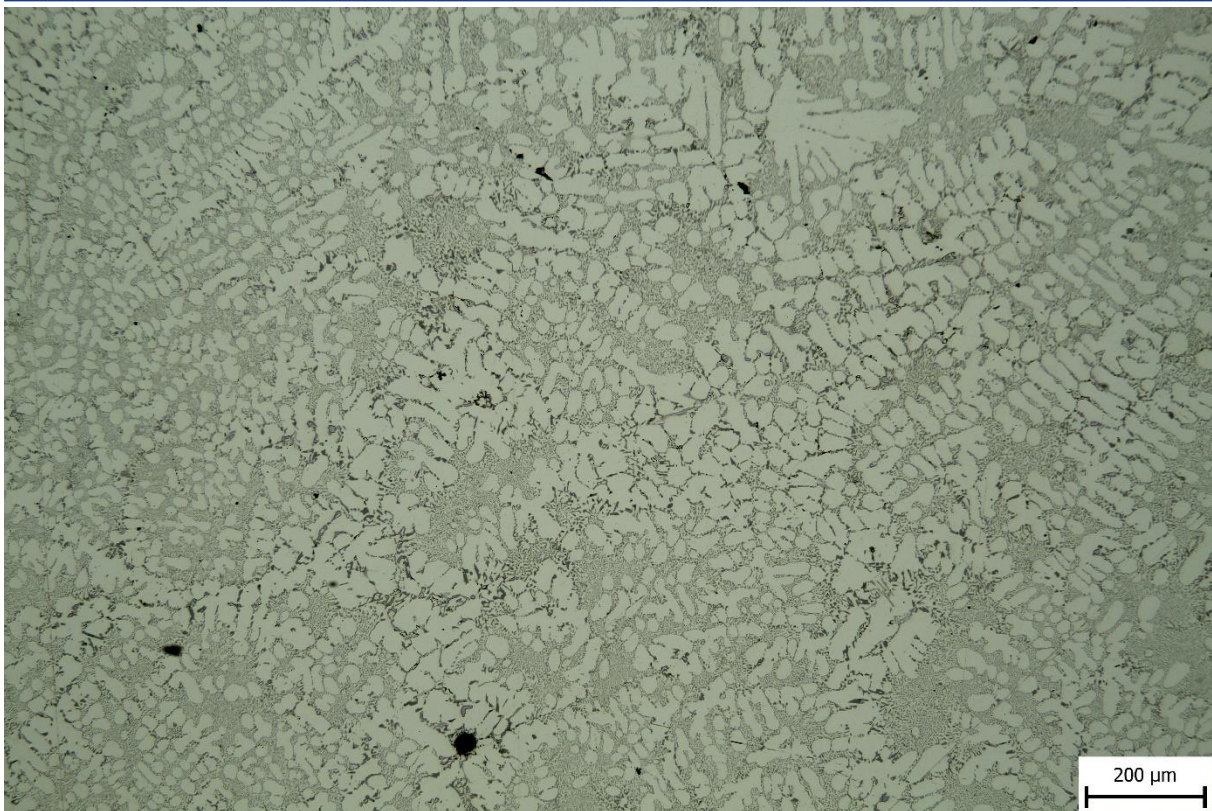


Obr. 67 Metalografický výbrus vzorku 555M, původní zvětšení 100x

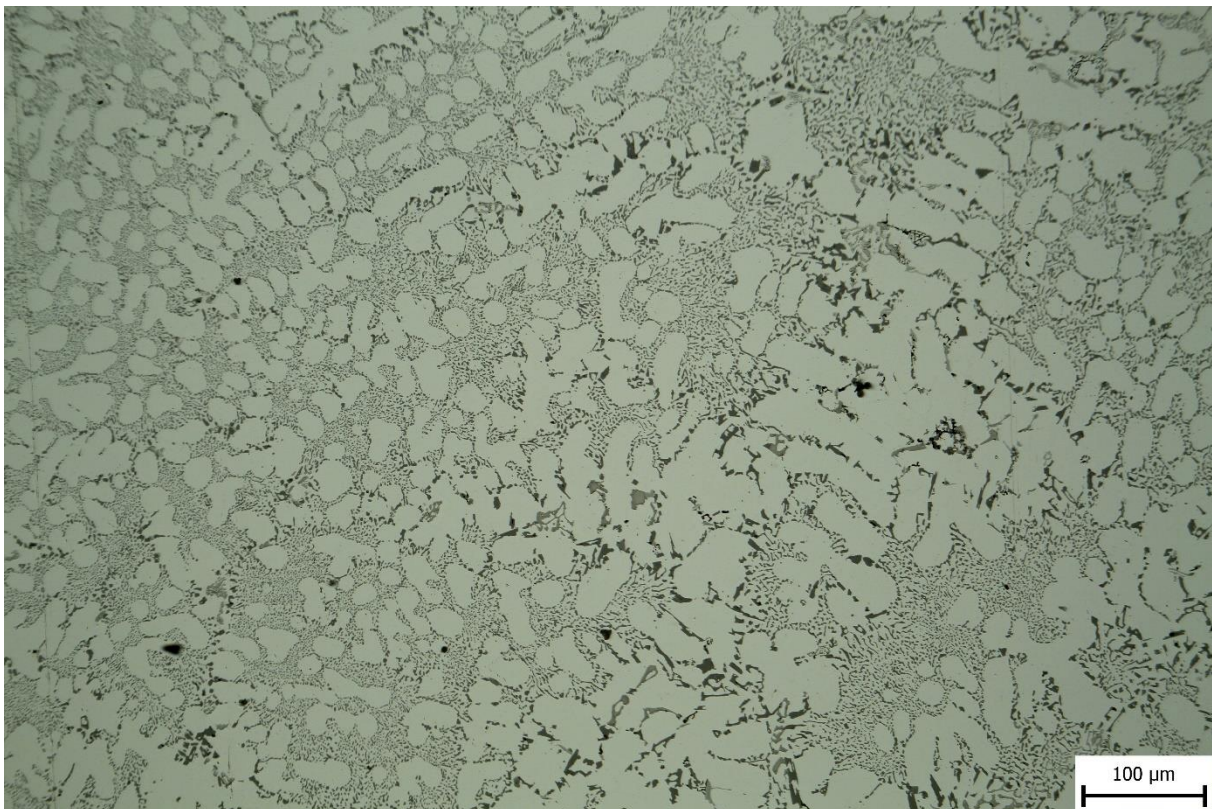


Obr. 68 Metalografický výbrus vzorku 555M, původní zvětšení 200x

Oproti 1055M (Obr. 62) se u vzorku 555M (Obr. 67, 68) lamelární křemík vyskytuje podstatně méně a eutektikum je jemnější. Oproti 1055M, který má tažnost 1,4 % má 555M tažnost 2,4 %.

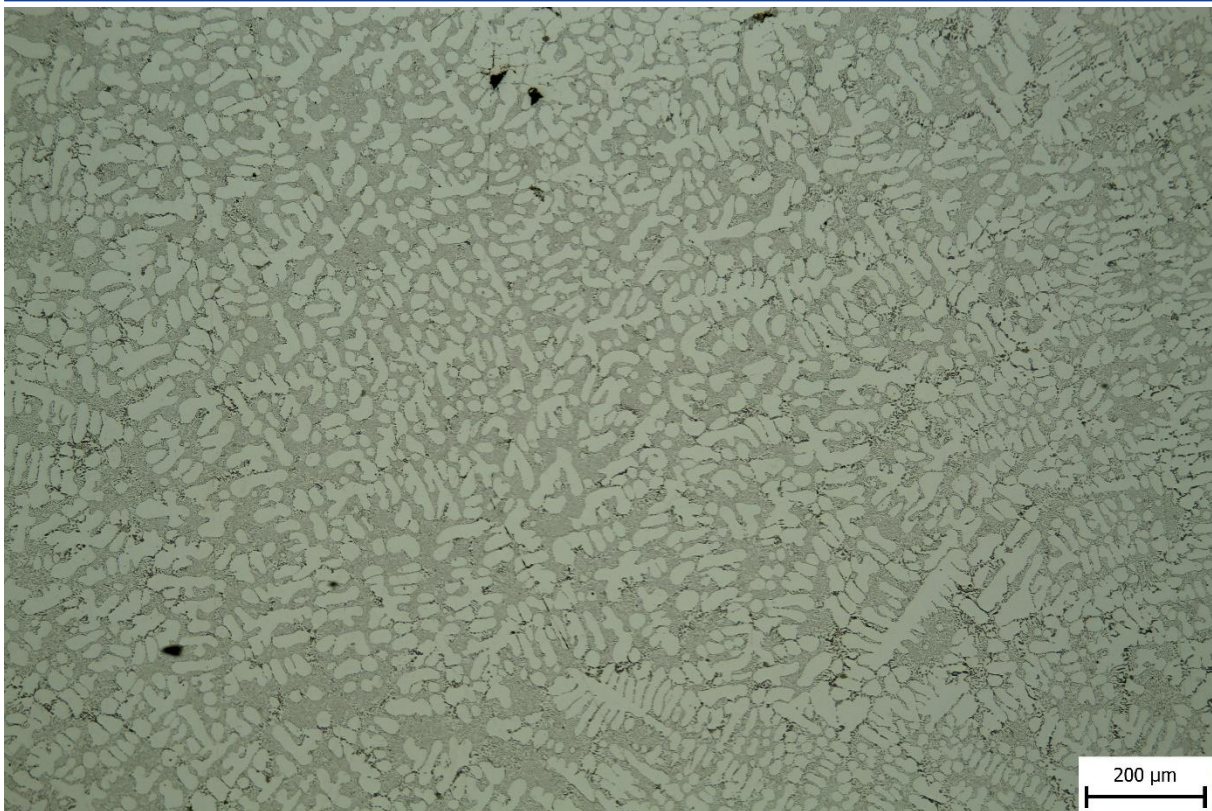


Obr. 69 Metalografický výbrus vzorku 530M, původní zvětšení 100x



Obr. 70 Metalografický výbrus vzorku 530M, původní zvětšení 200x

U vzorku 530M se po vizuální stránce zdá, že účinek modifikace je skoro stejný (obr. 69, 70) jako u 555M, nicméně došlo k zlepšení tažnosti o 0,9 % oproti 555M na 3,3 %.

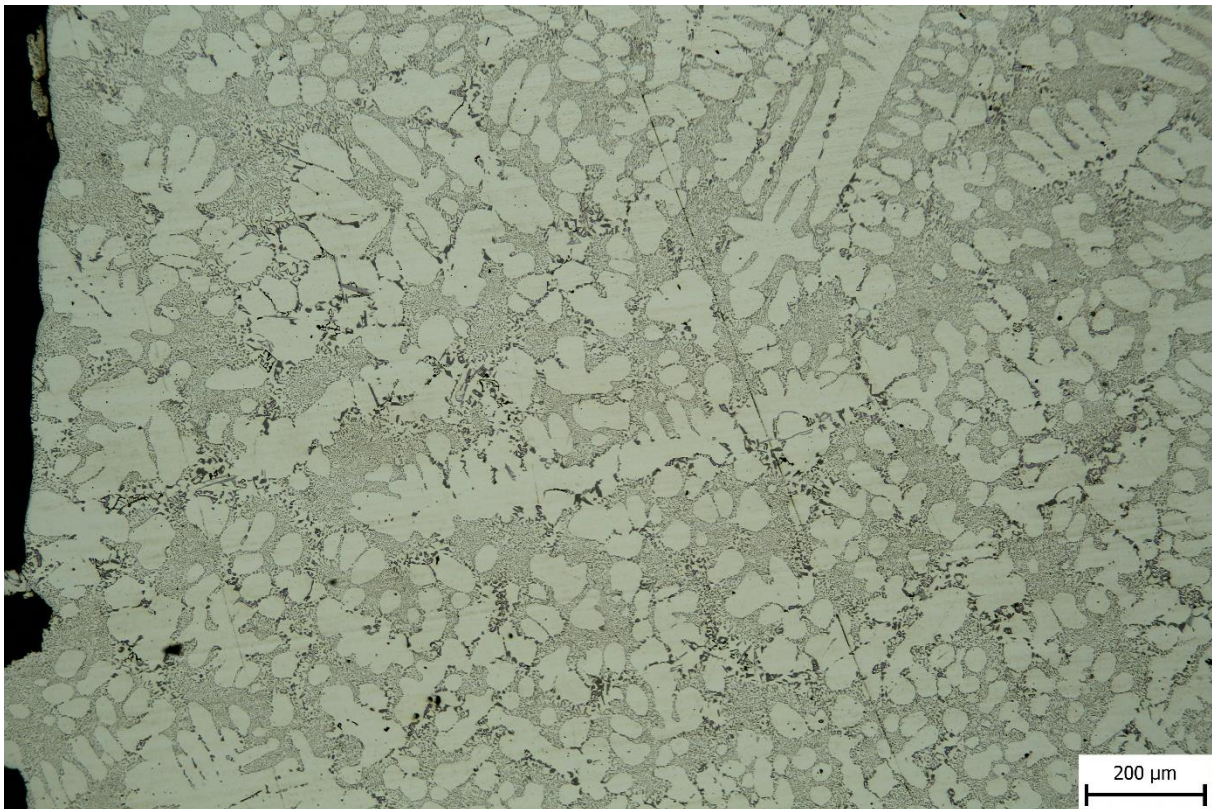


Obr. 71 Metalografický výbrus vzorku 518M, původní zvětšení 100x

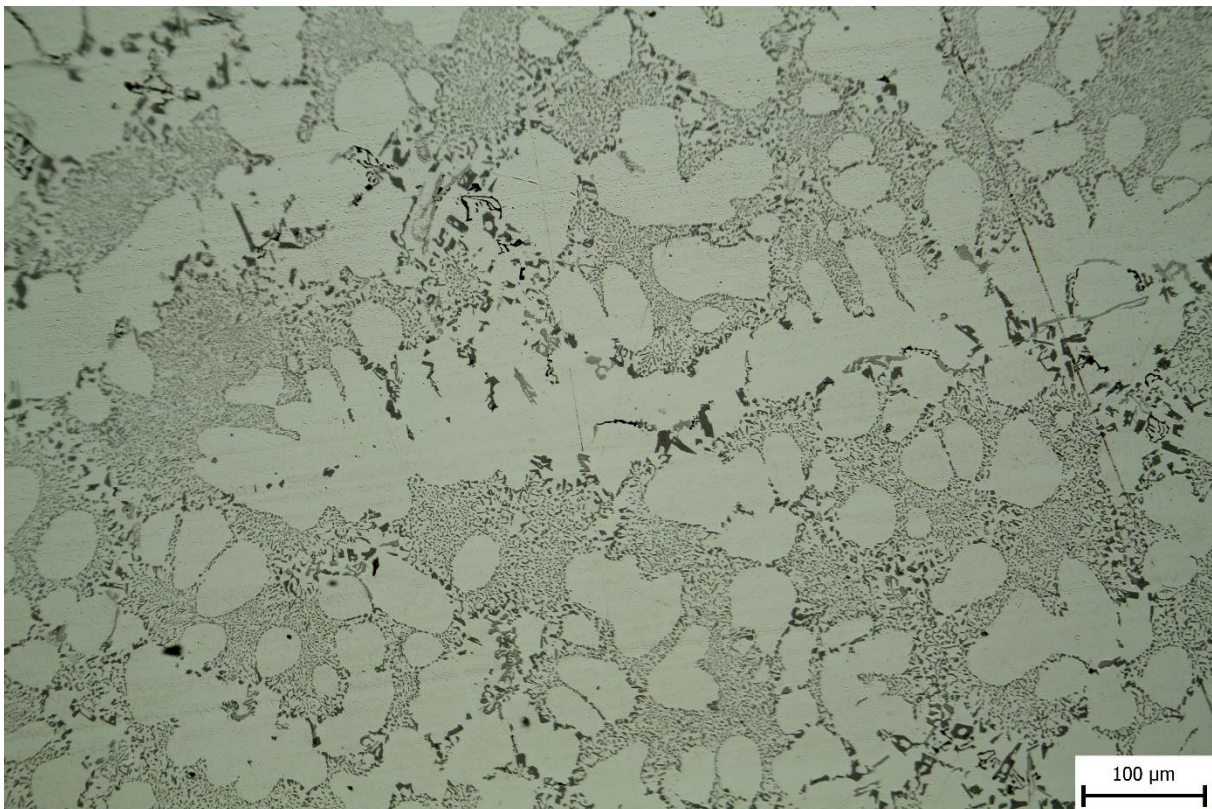


Obr. 72 Metalografický výbrus vzorku 518M, původní zvětšení 200x

Při snižování teploty skořepiny při lití se struktura celkově zjemňuje a účinek modifikace se zlepšuje viz obr. 71, 72. Opět se to projevilo i na zvýšených hodnotách tažnosti z 3,3 % pro 530M na 4 % u 518M.

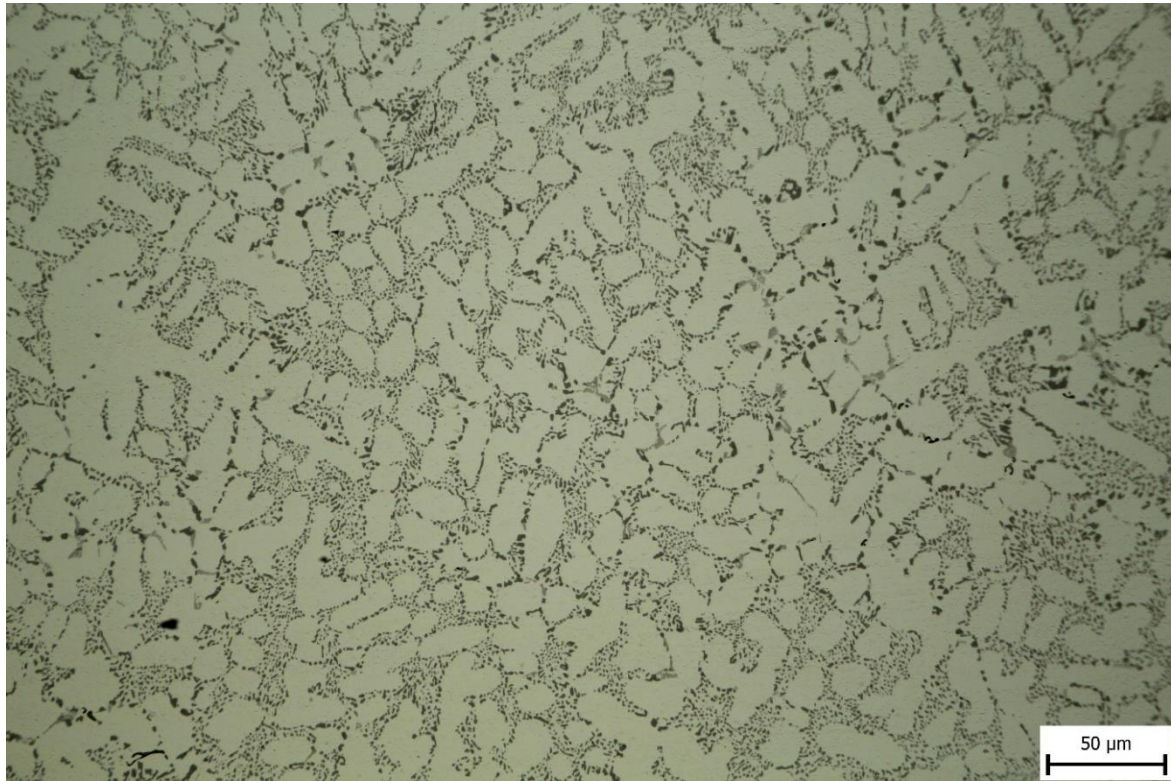


Obr. 73 Metalografický výbrus vzorku 255M, původní zvětšení 100x

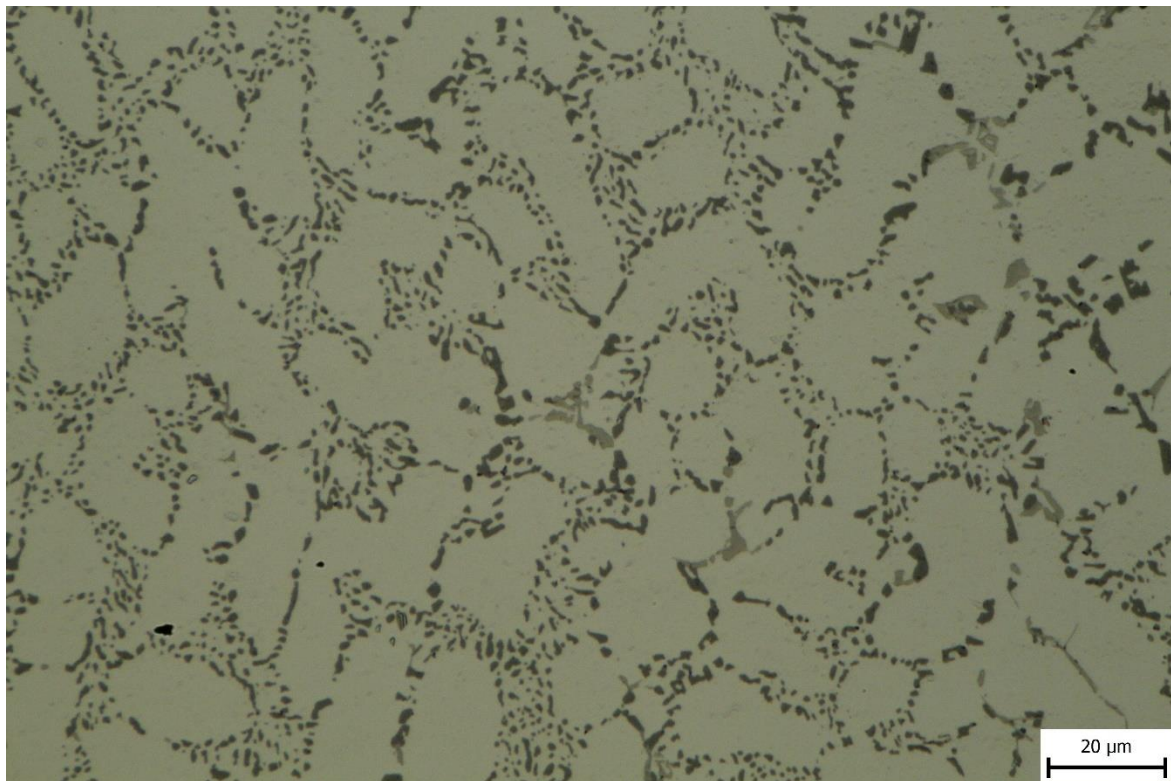


Obr. 74 Metalografický výbrus vzorku 255M, původní zvětšení 200x

U vzorku 255M na obr. 73, 74 lze pozorovat poměrně kvalitní modifikaci, částečně se místy vyskytuje lamelární křemík. Průměrná tažnost u tyček 255M byla 4,2 %.

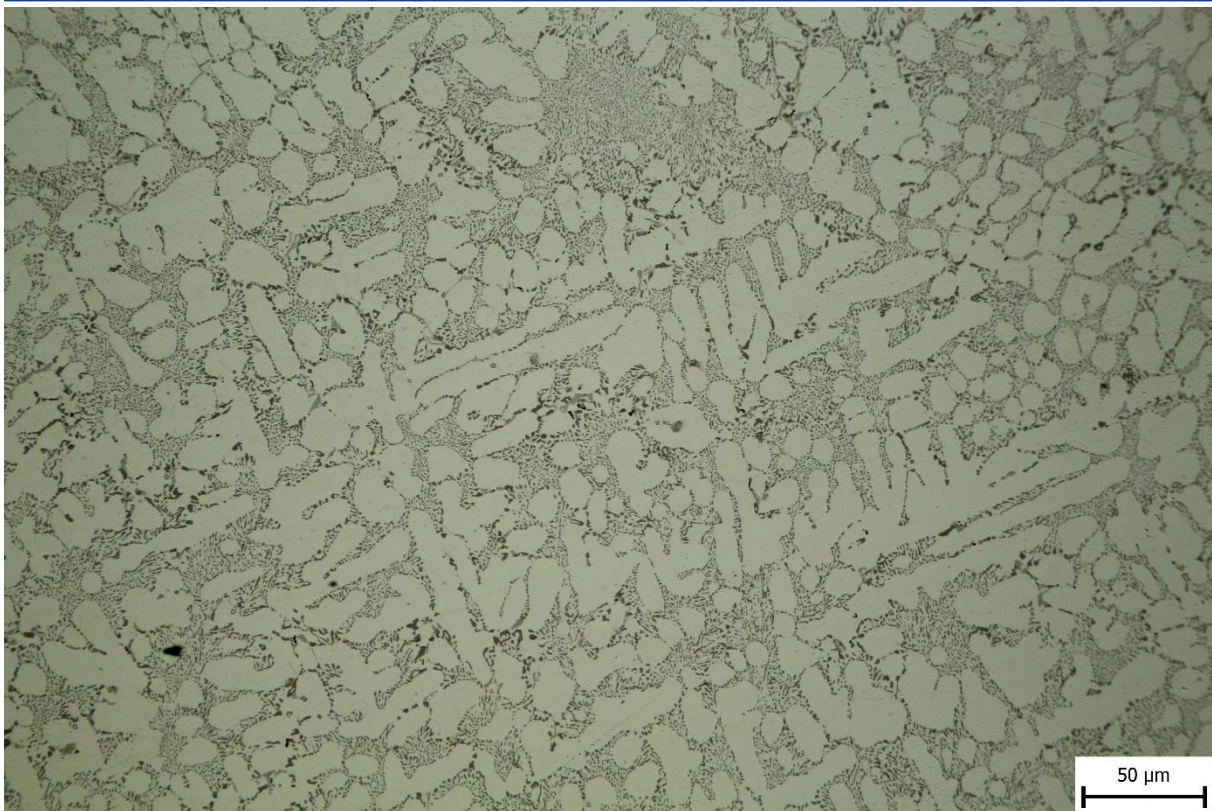


Obr. 75 Metalografický výbrus vzorku 230M, původní zvětšení 400x

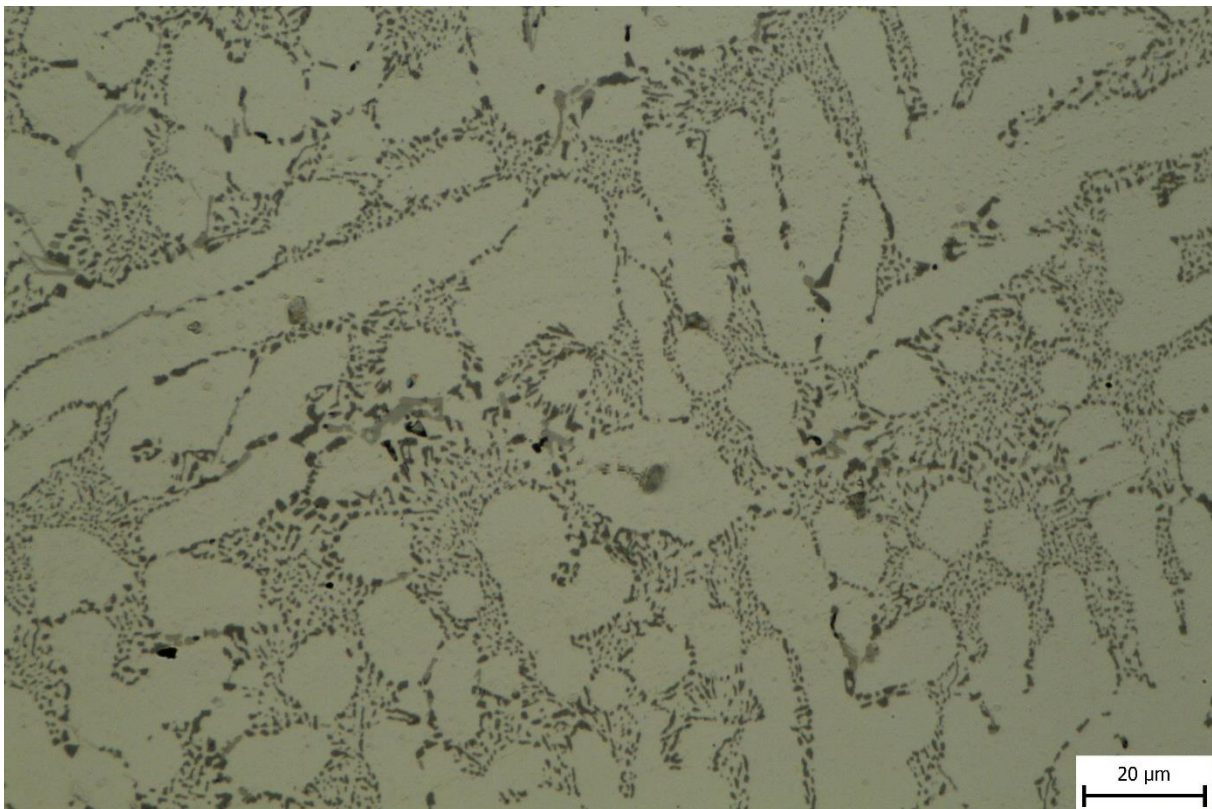


Obr. 76 Metalografický výbrus vzorku 230M, původní zvětšení 1000x

Se snížením teploty skořepiny dochází k podstatnému zjemnění primární fáze i eutektika viz obr. 75 a 76. Pro pozorování účinku modifikace je na obr. 75 místo 100x zvětšení použito 400x zvětšení a na obr. 76 místo 200X použito 1000x zvětšení. Modifikace fungovala dobře v celém průřezu tyčky, místy jsou jen náznaky lamelárního křemíku. Tažnost stoupla na 7,3 %.



Obr. 77 Metalografický výbrus vzorku 218M, původní zvětšení 400x

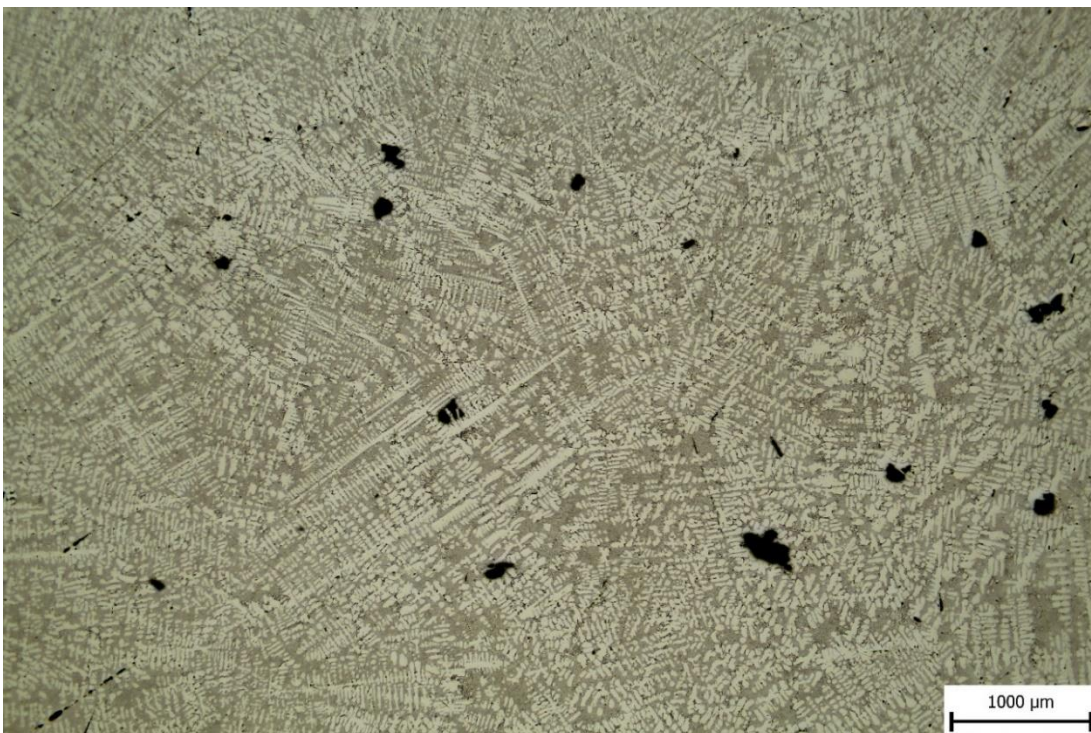


Obr. 78 Metalografický výbrus vzorku 218M, původní zvětšení 1000x

Křemík v eutektiku se snížením teploty skořepiny opět zjemnil, jak je vidět na obr. 77 a 78, ale na zkoušce tahem již nebylo zjištěno zlepšení tažnosti, z již výše popsanych důvodů.



Obr. 79 Vzorek 1055N zcela bez mikrostaženin, původní zvětšení 50x



Obr. 80 Vzorek 1055M s větším počtem mikrostaženin, původní zvětšení 50x

Je známo, že modifikací se pozmění způsob, jakým tavenina tuhne. Má tendenci tuhnout více endogenně na rozdíl od nemodifikované taveniny, která má charakter tuhnutí více exogenní a má tendenci tvořit více soustředěné staženiny. Lze proto očekávat, že modifikovaná tavenina bude mít větší sklon k tvorbě mikrostaženin v celém objemu odlitku. Tento jev bylo možné sledovat na výbrusech na obr. 79 a 80 ze vzorků z tyček o tl. stěny 10 mm napříč všemi třemi teplotami skořepin. Na výbrusu ze vzorku 1055N (obr. 79) není vidět žádná mikrostaženina zato na výbrusu ze vzorku 1055M (obr. 80) je mikrostaženin hned několik. Tento efekt se již tolik neprojevoval u menších tloušťkách stěn.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo teoretické a praktické popsání a ověření vlivu metalurgické kvality taveniny hliníkové slitiny s využitím modifikace a rychlosti tuhnutí, na výslednou kvalitu odlitků litých do keramických skořepin v podmínkách školní slévárny VUT v Brně. V úvodní části byla stručně popsána problematika metalurgie slitin hliníku. Dále byl popsán princip a postup výroby skořepinových forem.

Nejdříve byl specifikován způsob, jakým bude experiment proveden. Ještě před zahájením samotného experimentu bylo provedeno devět simulací v programu ProCAST s cílem zjistit zabíhavost a výskyt porozity při různých tloušťkách stěn zkušebních tyček a teplotách skořepin. Po analýze výsledků simulací vyplynulo, že by experiment měl být proveditelný za všech specifikovaných podmínek. Během experimentu byly ale zjištěny problémy se zabíhavostí a uzavřeným vzduchem během lití jak v horní, tak ve spodní části formy hlavně u 2 mm zkušebních tyček při teplotě skořepin 18 °C. Některé vzorky nebyly odlity vůbec, protože kov ztuhl dříve, než se stihla zaplnit dutina odlitku. U tyček, které se podařilo odlít byly zjištěny geometrické odchylky od normy DIN 50125 což se negativně projevilo na naměřených mechanických vlastnostech.

Dále bylo přistoupeno k analýze dat ze zkoušek mechanických vlastností v tahu. Až na 2 mm tyčky lité do skořepin o teplotě 18 °C, které teoreticky měly vykazovat nejlepší mechanické vlastnosti vyšly výsledky a závislosti mezi nimi dle očekávání. Bylo zjištěno, že se snižující se teplotou skořepiny při lití se mez pevnosti i tažnost zlepšují jak pro nemodifikovanou, tak i pro modifikovanou slitinu. Odpovídá tomu i zmenšující se DAS které je jak známo závislé pouze na rychlosti tuhnutí. Mezi vzorky 1055M ($R_m = 135 \text{ MPa}$, $A = 3,1 \%$) a 1018M ($R_m = 155 \text{ MPa}$, $A = 1,4 \%$) došlo ke zvýšení meze pevnosti o 14,8 % a zvýšení tažnosti o 121 %. Snižováním tloušťky stěny na 5 mm bylo docíleno zvýšené rychlosti tuhnutí, opět se to projevilo i na menších hodnotách DAS u všech teplot skořepin při lití i na zlepšené mezi pevnosti a tažnosti. Oproti tyčkám o tl. stěny 10 mm došlo u 5 mm tyček v průměru o zlepšení meze pevnosti o 4,5 % a 42 % zlepšení tažnosti. Jelikož u 2 mm tyček došlo k neočekávanému snížení mechanických vlastností z důvodu výskytu vad, byly z porovnání vyřazeny. Za účelem zhodnocení zlepšení byly proto v potaz brány pouze vzorky lité do skořepin o teplotě 300 °C a 550 °C. V porovnání se vzorky 555M a 518M tedy došlo ke zvýšení meze pevnosti v průměru o 7 % a zvýšení tažnosti o 102 %. Podle normy ČSN 42 4331 by měly odděleně lité tyčky ze slitiny AlSi10Mg odlévané do pískových forem dosahovat v litém stavu minimálně 160 MPa meze pevnosti a 2 % tažnosti. U tloušťky stěny 10 mm takových hodnot není možné dosáhnout. Pro tloušťku 5 mm toho je možné dosáhnout pouze při teplotě skořepiny 18 °C a modifikace kovu, tyčky 518N měly v průměru mez pevnosti jen 144 MPa. U 2 mm tyček se dají požadavky normy splnit při teplotě skořepiny 300 °C také pouze v modifikovaném stavu. Vzorky 230M měly v průměru mez pevnosti 163 MPa a tažnost 7,3 %. Celkově lze říci, že snižování teploty skořepiny v kombinaci s modifikací za účelem zlepšení mechanických vlastností může určitým způsobem pomoci splnit požadavky této normy. Pokud by ale zákazník požadoval mechanické vlastnosti nad rámec této normy je tato metoda nedostačující. Je nutno dodat, že snižováním teploty skořepiny se zhoršuje zabíhavost taveniny a je to důležitý aspekt při posuzování vyrobitelnosti odlitku.

Od části zadání práce zabývající se popisem a ověřením vlivu odplynění taveniny bylo nakonec v experimentu upuštěno hlavně z důvodu vysoké časové a finanční náročnosti experimentu. Podrobnější informace o tomto rozhodnutí jsou na str. 33.

Tyčky o tl. stěny 5 mm a 2 mm byly na stromečkách umístěny i v horní části forem za účelem zjištění zabíhavosti kovu v závěru procesu lití při nižším metalostatickém tlaku. U 5 mm tyček se objevily problémy pouze při teplotě skořepiny 18 °C kde kombinací vysoké rychlosti tuhnutí a nízkého metalostatického tlaku vznikaly vady uzavřeného vzduchu a studených spojů. Při

teplotách skořepin 550 °C a 300 °C byly tyčky bez povrchových vad. U 2 mm tyček ze skořepin o teplotě 18 °C nastaly vážnější problémy. Dutiny odlitku se buď nezaplňily vůbec nebo se zaplňily, ale odlitek vykazoval výrazné rozměrové odchylky od normy DIN 50125 což se potom projevilo na snížených výsledcích tahových zkoušek.

Za účelem hodnocení efektivity modifikace stronciem byly zhotoveny metalografické výbrusy u všech tloušťek stěny pro všechny teploty skořepin. Bylo zjištěno, že modifikační účinek u vzorku 1055M byl nedostatečný, na výbrusu se vyskytovalo poměrně hodně lamelárního křemíku a projevilo se to i na tažnosti která byla průměrně naměřena 1,4 %. Zvýšení rychlosti tuhnutí ať už to bylo snížením teploty skořepiny nebo zmenšením tloušťky stěny vedlo k podstatnému zredukování výskytu lamelárního křemíku a k celkovému zjemnění struktury eutektika. Nejlepších hodnot tažnosti dosahovaly vzorky 1018M – A = 3,1 %, 518M A = 4 % a 230M A = 7,3 %. Stroncium může fungovat jako efektivní modifikátor pro hliníkové slitiny lité do skořepinových forem, ale je to podmíněno dostatečnou rychlostí tuhnutí a tloušťkou stěn odlitku nepřesahující 10 mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. NIU, Yu MA, Dongsheng CHAI, Yu ZHAN, Guijun BI, Qiuyu NIU a Dongjiang MA. Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing. *Materials & Design* [online]. 2020, 21.11.2019, (186) [cit. 2023-03-07]. ISSN 108205. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108205>
2. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 978-80-2142-790-7.
3. ZEDAN, Yasser, Herbert DOTY, Victor SONGMENE a Samuel FAWZY. A Review Study on the Main Sources of Porosity in Al-Si Cast Alloys. *Advances in material science and engeneering* [online]. 2021, 2021, 2021, 16 [cit. 2023-03-07]. ISSN 1921603. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1155/2021/1921603>
4. Rotary degassing. In: *Gissereilexikon* [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/rotary-degassing-4427/?cHash=5929b71f8da1b49a764755bc88f710cb>
5. Rotary Degassing Method. In: *ADTECH METALLURGICAL MATERIALS CO., LTD* [online]. 2020, 1.8.2020 [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.alloycasting.com/rotary-degassing-method/>
6. TIMPEL, M., N. WANDERKA, R. SCHLESIGER, et al. The role of strontium in modifying aluminium–silicon alloys. *Acta Materialia*. 2012, 60(9), 3920-3928. ISSN 1359-6454. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.031>
7. LU, Shu-Zu a A. HELLAWELL. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning; Impurity induced twinning. *Metallurgical Transactions A*. 1987, 18(10), 1721-1733. ISSN 1543-1940. Dostupné z: doi:10.1007/BF02646204
8. BARRIRERO, Jenifer. *Eutectic Modification of Al-Si casting alloys*. 2019/10/31. ISBN 9789175190075. Dostupné z: doi:10.3384/diss.diva-160235
9. DAHLE, A. K., K. NOGITA, S. D. MCDONALD, J. W. ZINDEL a L. M. HOGAN. Eutectic nucleation and growth in hypoeutectic Al-Si alloys at different strontium levels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001, 32(4), 949-960. ISSN 1543-1940. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-001-0352-y
10. Forged new alloy wheels on a white isolated background cool sports wheels wheels with thin spokes. In: *Freepik* [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: https://www.freepik.com/premium-photo/forged-new-alloy-wheels-white-isolated-background-cool-sports-wheels-wheels-with-thin-spokes-au_21454306.htm
11. Chevrolet Performance 6.2L LS3: L92 Aluminum Engine Blocks. In: *Summit racing equipment* [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.summitracing.com/parts/nal-12673475>
12. Ding, W.; Xia, T.; Zhao, W. Performance Comparison of Al–Ti Master Alloys with Different Microstructures in Grain Refinement of Commercial Purity Aluminum. *Materials* 2014, 7, 3663-3676. <https://doi.org/10.3390/ma7053663>
13. Investment casting. In: *OpenLearn* [online]. 2017, 1.11.2017 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/investment-casting>

-
14. [1] SIAMINWE, Levy. Optimisation of the mechanical properties in an investment cast aluminium alloy [online]. B.m.: Loughborough University. 1. leden 1997 [vid. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/2134/26147>
 15. ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU. Brno, 2009. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
 16. PERIODIC TABLE OF ELEMENTS: LANL: Aluminium [online]. Los Alamos: U. S. energy department, 2021 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://periodic.lanl.gov/13.shtml>
 17. The Whatmans and Wove Paper: The early history of alum [online]. Overfields: Forest Books, 1998 [cit. 2023-04-27].
 18. CAMPBELL, John. Complete Casting Handbook. Second edition. Oxford: Elsevier Science, 2015. ISBN 0081001207.
 19. GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. Zlievarenstvo neželezných kovov. První. Bratislava: ALFA, 1988. ISBN 063-566-88.
 20. GRUZLESKI, John a Bernard CLOSSET. The Treatment of Liquid AluminiumSilicon Alloys. 1. vydání. Des Plaines, Illinois: American Foundrymen's Society, Inc., 1990. ISBN 0-87433-121-8.
 21. PROBLEMATIKA ODPLYNĚNÍ MENŠÍCH MNOŽSTVÍ TAVENINY U SLITIN HLINÍKU. Brno, 2020. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Vedoucí práce Ing. Václav Kaňa, Ph.D.
 22. KORI, S.A., B.S. MURTY a M. CHAKRABORTY. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. Materials Science and Engineering: A. 2000, 283(1), 94-104. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00794-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00794-7)
 23. HORKÝ, K., VRTÍLEK, J., Eliminace staženin pomocí přípravku Probat Fluss MIKRO 100. Slévárství. 2008. 7-8, s. 357-358.
 24. Beeley, P.R. - Smart, R.F.: Investment Casting, The Institute of Materials, The University Press Cambridge UK, 1995
 25. Doškár, J.- Gabriel, J.- Houšť, M.- Pavelka, M.: Výroba přesných odlitků, SNTL Praha, 1976
 26. OPTIMISATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES IN AN INVESTMENT CAST ALUMINIUM ALLOY. Loughborough University, 1997. A Doctoral Thesis. Loughborough University. Vedoucí práce Levy Siaminwe, MSc.
 27. Citace Pro [online]. Brno: Ústřední knihovna VUT v Brně, 2020 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/dokument/V12oEopLmvpkXS7F>
 28. ČSN 42 4331. SLITINA HLINÍKU NA ODLITKY 42 4331: AlSi10Mg. 2. Praha: Vydavatelství
-

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady výrobků z hliníkových slitin, vlevo kola automobilu, vpravo blok motoru značky Chevrolet [10], [11]	11
Obr. 2 Fázový diagram hliníku s křemíkem [1]	12
Obr. 3 Snímky znázorňující rozdíl mezi nenamodifikovanou (a, c) a namodifikovanou strukturou (b, d). Snímky c a d jsou z elektronového mikroskopu [8].....	14
Obr. 4 Schéma znázorňující princip dvojčatění křemíku v eutektiku [2]	15
Obr. 5 Špička krystalu křemíku s viditelnými rozhraními dvojčatění, SEM [7]	15
Obr. 6 rozdvojené lamely křemíku po odleptání matrice, SEM [7].....	15
Obr. 7 (a) dvojčatění křemíku v eutektiku, (b) BF STEM v místě dvojčatění je materiál o jiném chemickém složení než je matrice, (d, e) Snímek s EDX analyzátoru naznačuje zvýšený obsah Sr a Al v místech dvojčatění [6]	16
Obr. 8 Snímek krystalu křemíku z namodifikovaného eutektika s velkým počtem dvojčatění, preferovaná rovina růstu je 011, SEM [7].....	16
Obr. 9 zleva doprava obsahy Sr 70, 110, 500 ppm, nahoře snímky ze SEM, dole z EBSD analýzy pro zjištění krystalografické orientace eutektika [9].....	18
Obr. 10 Metalografické výbrusy čistého hliníku s přidavkem očkovačla Al – 5Ti a) čistý hliník, b) 0,6 % očkovačla	19
Obr. 11 Rozdíl mezi kašovitým tuhnutím d) a tuhnutím s homogenní frontou tuhnutí e) [2] 20	
Obr. 12 Vlevo graf závislosti pevnosti v tahu a tažnosti na pórovitosti u slitiny AlSi6Cu4, vpravo graf závislosti počtu cyklů do lomu na pórovitosti u slitiny AlSi7Mg [2], [3].....	21
Obr. 13 Graf závislosti rozpustnosti vodíku na teplotě, plná čára znázorňuje rozpustnosti pro čistý hliník, tečkovaná pro AlSi6Cu3, čárkovaná pro AlSi7Mg [3]	22
Obr. 14 Vlevo snímek vodíkové bubliny, vpravo snímek staženiny kombinované s plynem [2].....	23
Obr. 15 Vlevo schéma rotačního odplyňovacího zařízení. Vpravo proces odplyňování rotačním zařízením [4], [5].....	24
Obr. 16 Pór vzniklý díky zamezení dosazování tekutého kovu intermetalickou fází Al ₅ FeSi [3]	25
Obr. 17 Malé lamely fáze Al ₈ Mg ₃ FeSi ₆ zamezující dosazování kovu. Vzniklá porozita označena bílými kroužky [3].....	26
Obr. 18 Intermetalická fáze Al ₂ (Fe, Mn) ₃ Si ₂ nebo-li čínské písmo [3]	26
Obr. 19 Lamela intermetalika na bázi kovů vzácných zemin (bílá šipka) zamezila dosazování kovu podobně jako na obr 16. fáze AlFeSi [3]	27
Obr. 20 vlevo porozita vzniklá díky vysokotavitelnému intermetaliku Mg ₂ Sn, vpravo pór vzniklý v přítomnosti Al ₂ Si ₂ Sr [3]	27
Obr. 21 Vlevo pór vzniklý vlivem zamezení dosazování kovu očkovačlem a SrO, vpravo dutina vzniklá díky sloučenině AlTiBSr, SEM [3]	28
Obr. 22 Snímky z elektronového mikroskopu znázorňující vliv oxidických filmů na tvorbu porozity [3].....	28
Obr. 23 Proces produkce odlitků metodou vytavitelného modelu [13]	30
Obr. 24 Výkres tyčky pro zkoušku tahem dle normy DIN 50125	32
Obr. 25 umístění tyček ve spodní a horní části formy	33
Obr. 26 Vygenerovaná síť FEM pro numerickou simulaci, tyčky o tl. stěny 5 mm.....	34
Obr. 27 Vygenerovaná FEM síť skořepiny o tloušťce 8 mm.....	35
Obr. 28 Výskyt porozity v tyčce o tl. 2 mm při teplotě skořepiny 20 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.....	36
Obr. 29 Průběh tuhnutí odlitků 2 mm tyček o teplotě skořepiny 20 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 13 s, 15 s, 16,5 s a 17,4 s.	37

Obr. 30 Výskyt porozity v tyčce o tl. 2 mm při teplotě skořepiny 300 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.....	37
Obr. 31 Průběh tuhnutí odlitků 2 mm tyček o teplotě skořepiny 300 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 14 s, 15 s, 16,2 s a 21 s.	38
Obr. 32 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 2 mm při teplotě skořepiny 550 °C, vlevo porozita do 1 %, vpravo do 1,2 %, dole do 1,5 %.....	38
Obr. 33 Průběh tuhnutí odlitků 2 mm tyček o teplotě skořepiny 550 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 60 s, 93 s, 137 s a 187,5 s.	39
Obr. 34 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 10 mm při teplotě skořepiny 20 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.....	39
Obr. 35 Průběh tuhnutí odlitků 10 mm tyček o teplotě skořepiny 20 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 36 s, 48 s, 58 s a 85 s.	40
Obr. 36 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 10 mm při teplotě skořepiny 300 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.	40
Obr. 37 Průběh tuhnutí odlitků 10 mm tyček o teplotě skořepiny 300 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 143,5 s, 203 s, 253 s a 343 s.	41
Obr. 38 Výskyt porozity v tahové tyčce o tl. 10 mm při teplotě skořepiny 550 °C, vlevo nahoře porozita do 1 %, vpravo nahoře do 1,2 %, vlevo dole do 1,5 %, vpravo dole do 2 %.	41
Obr. 39 Průběh tuhnutí odlitků 10 mm tyček o teplotě skořepiny 550 °C zobrazen pomocí funkce frakce solidu v časech simulace 143,5 s, 193,5 s, 283 s a 343 s.	42
Obr. 40 Náčrtek dělicí roviny na podstavci.....	43
Obr. 41 Vytisknutý model podstavce před (vlevo nahoře) a po (vpravo nahoře) nanesení lukoprenu. Rozdělaná forma po nalití vosku (vlevo dole), hotové podstavce z vosku po odstranění vtokové soustavy (vpravo dole).....	43
Obr. 42 Rozložená forma pro zhotovování voskových vtokových kúlů.....	44
Obr. 43 Zkompletovaná vtoková soustava s přilepenými tyčikami z polycastu.....	44
Obr. 44 Proces výroby zepvňujících obalů. Vlevo máčení v suspenzi, uprostřed posyp molochitovým ostřivem, vpravo sušení obalu.....	45
Obr. 45 Vlevo skořepiny připravené na proces odlévání, vpravo stromečky po odstranění skořepiny.....	46
Obr. 46 Graf závislosti meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 10 mm.....	48
Obr. 47 Graf závislosti tažnosti A_{90mm} na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 10 mm.....	48
Obr. 48 Graf závislosti smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 5 mm.....	50
Obr. 49 Graf závislosti tažnosti A_{40mm} na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 5 mm.....	50
Obr. 50 Porovnání geometrické přesnosti vzorku 255N nahoře a 218N uprostřed a dole.....	51
Obr. 51 Graf závislosti smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 2 mm.....	52
Obr. 52 Graf závislosti tažnosti A_{15mm} na teplotě skořepiny při lití pro tyčky o tl. stěny 2 mm.....	52
Obr. 53 Zjištěné vady na lomové ploše u vzorků 255N.....	53
Obr. 54 Graf závislosti meze pevnosti R_m na tloušťce stěny tyčky při různých teplotách skořepin.....	53
Obr. 55 Graf závislosti meze pevnosti R_m na DAS při různých tloušťkách stěn tyček.....	54
Obr. 56 Graf závislosti DAS na teplotě skořepiny pro různé tloušťky stěny.....	55
Obr. 57 Graf závislosti DAS na tloušťce stěny při různých teplotách skořepin při lití.....	55
Obr. 58 Vlevo porovnání zabíhavosti kovu napříč teplotami skořepin u 5 mm tyček, uprostřed a vpravo vady uzavřeného vzduchu.....	56

Obr. 59 Vady odlitků tyček o tl. stěny 2 mm při teplotě skořepiny 18 °C.....	56
Obr. 60 Příčný řez upínací částí tyček, vlevo tyčka 10 mm, uprostřed 5 mm a vpravo 2 mm	57
Obr. 61 metalografický výbrus vzorku 1055N, původní zvětšení 100x	57
Obr. 62 Metalografický výbrus vzorku 1055M, původní zvětšení 100x	57
Obr. 63 Metalografický výbrus vzorku 1030M, původní zvětšení 100x	58
Obr. 64 Metalografický výbrus vzorku 1030M, původní zvětšení 200x	58
Obr. 65 Metalografický výbrus vzorku 1018M, původní zvětšení 100x	59
Obr. 66 Metalografický výbrus vzorku 1018M, původní zvětšení 200x	59
Obr. 67 Metalografický výbrus vzorku 555M, původní zvětšení 100x	60
Obr. 68 Metalografický výbrus vzorku 555M, původní zvětšení 200x	60
Obr. 69 Metalografický výbrus vzorku 530M, původní zvětšení 100x	61
Obr. 70 Metalografický výbrus vzorku 530M, původní zvětšení 200x	61
Obr. 71 Metalografický výbrus vzorku 518M, původní zvětšení 100x	62
Obr. 72 Metalografický výbrus vzorku 518M, původní zvětšení 200x	62
Obr. 73 Metalografický výbrus vzorku 255M, původní zvětšení 100x	63
Obr. 74 Metalografický výbrus vzorku 255M, původní zvětšení 200x	63
Obr. 75 Metalografický výbrus vzorku 230M, původní zvětšení 400x	64
Obr. 76 Metalografický výbrus vzorku 230M, původní zvětšení 1000x	64
Obr. 77 Metalografický výbrus vzorku 218M, původní zvětšení 400x	65
Obr. 78 Metalografický výbrus vzorku 218M, původní zvětšení 1000x	65
Obr. 79 Vzorek 1055N zcela bez mikrostaženin, původní zvětšení 50x	66
Obr. 80 Vzorek 1055M s větším počtem mikrotaženin, původní zvětšení 50x	66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozměry tyčky dle normy DIN 20125.....	32
Tabulka 2 celkový počet odlitých tyček.....	33
Tabulka 3 Shrnutí časů tuhnutí tyček.....	42
Tabulka 4 Doplnující informace ke složkám použitých pro výrobu skořepin	45
Tabulka 5 Technické specifikace keramických suspenzí.....	45
Tabulka 6 Chemické složení housek.....	46
Tabulka 7 Analýza chemického složení taveb	46
Tabulka 8 Celkový počet tyček podrobených zkoušce tahem	47
Tabulka 9 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek pro tyčky 10 mm.....	47
Tabulka 10 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek pro tyčky 5 mm.....	49
Tabulka 11 Shrnutí výsledků z tahových zkoušek pro tyčky 2 mm.....	51
Tabulka 12 DAS z metalografických výbrusů nemodifikovaných vzorků	54