



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ZÁKLADNÍ METODY OVLIVŇOVÁNÍ
STRUKTURY HLINÍKOVÝCH SLITIN**

BASIC METHODS OF INFLUENCING THE ALUMINUM ALLOYS STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH JANSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. PETR BLAŽÍK

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Vojtěch Janský
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Blažík
Akademický rok:	2015/16

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

Základní metody ovlivňování struktury hliníkových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti se používá několik metod ovlivňování struktury hliníkových odlitků. Základními z nich jsou modifikace, očkování a rychlost ochlazování, které se používají nejčastěji v kombinaci a nebo všechno dohromady. Cílem všech těchto metod je zjemnění struktury odlitku čímž dochází ke zvýšení jejich mechanických vlastností odlitků.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je sepsat rešerši popisující běžně používané metody ovlivňování struktury hliníkových odlitků a jejich vliv na mechanické vlastnosti. V experimentální části práce bude provedeno porovnání ovlivněné a neovlivněné struktury hliníkové slitiny.

Seznam literatury:

Roučka, J. (2004): Metalurgie neželezných slitin. Skripta VUT. Brno: Akademické nakladatelství CERM, str. 148, ISBN 80-214-2790-6.

Michna, Š. (2005): Encyklopedie hliníku. Děčín: Adin, s.r.o., str. 722, ISBN 80-890-4188-4.

Doškář, J. aj. (1976): Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, str. 315, DT 621.746.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je pojednat o běžných způsobech ovlivnění struktury hliníkových slitin. Práce se zabývá rychlostí ochlazování, očkovaním a modifikací. V experimentální části jsou porovnávány snímky vzorků různých odlitků a vliv již zmíněných způsobů ovlivnění struktury při tuhnutí.

Klíčová slova

hliník, siluminy, zjemnění zrna, očkování, modifikace

ABSTRACT

The goal of this thesis is to deal with common ways influencing of structure of aluminium alloys. Thesis deals with speed of cooling, inoculation and modification. The experimental part compares photos of samples of different castings and influence of already mentioned ways of influencing of structure during solidification.

Key words

aluminium, silumins, grain refinement, inoculation, modification

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANSKÝ, Vojtěch. *Základní metody ovlivňování struktury hliníkových slitin*. Brno 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 42 s. Vedoucí práce Ing. Petr Blažík

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: ZÁKLADNÍ METODY OVLIVŇOVÁNÍ STRUKTURY HLINÍKOVÝCH SLITIN vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 16. 5. 2016

.....

Vojtěch Janský

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Petrovi Blažíkovi za cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Kovolit a.s., jmenovitě panu Ing. Markovi Kolmačkovi, za věnování odlitku pro experimentální část této práce a svým rodičům za jejich trpělivost a podporu.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	8
1 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU.....	9
2 OVLIVŇOVÁNÍ STRUKTURY PRIMÁRNÍ FÁZE.....	10
2.1 RYCHLOST OCHLAZOVÁNÍ.....	10
2.1.1 VLIV NA NUKLEACI.....	10
2.1.2 VLIV NA STRUKTURU.....	11
2.2 OČKOVÁNÍ.....	13
2.2.1 OČKOVÁNÍ TITANEM.....	13
2.2.2 OČKOVÁNÍ KOMBINACÍ TITANU A BÓRU.....	14
2.2.3 OČKOVÁNÍ BÓREM.....	15
2.2.4 OČKOVACÍ PROSTŘEDKY.....	15
2.2.5 JINÉ OČKOVACÍ PRVKY.....	16
2.3 DOPADY NA VLASTNOSTI SLITIN.....	17
3 OVLIVŇOVÁNÍ MORFOLOGIE EUTEKTIKA.....	18
3.1 VZNIK A TVAR EUTEKTIKA VE SLITINÁCH Al-Si.....	18
3.2 MODIFIKACE SODÍKEM.....	21
3.2.1 DÁVKOVÁNÍ.....	22
3.3 MODIFIKOVÁNÍ STRONCIEM.....	23
3.4 DALŠÍ MODIFIKAČNÍ PRVKY.....	24
3.5 PŮSOBENÍ MODIFIKACE NA VLASTNOSTI SILUMINŮ.....	25
4 FOSFOR.....	26
4.1 STRUKTURA NADEUTEKTICKÝCH SLITIN Al-Si.....	26
4.2 UŽITÍ FOSFORU.....	26
5 EXPERIMENT.....	27
5.1 VÝROBA VZORKŮ.....	27
5.1.1 POUŽITÉ ODLITKY.....	27
5.1.2 VÝROBA VÝBRUSŮ.....	30
5.2 POROVNÁNÍ VZORKŮ POD MIKROSKOPEM.....	31
5.2.1 VZOREK teK.....	31
5.2.2 VZOREK teMB.....	33
5.2.3 VZOREK teMK.....	34
5.2.4 VZOREK TIMK.....	36
5.2.5 VZOREK teMS.....	37
5.3 VYHODNOCENÍ.....	39
ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	42

ÚVOD

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem na zemi. Přes jeho užití prakticky ve všech oblastech lidského života, od víček od jogurtů po velká dopravní letadla, je hliník využíván relativně krátkou dobu [1]. Prvním člověkem, kterému se podařilo izolovat čistý hliník, byl teprve v roce 1825 Hans Christian Oersted. V roce 1854 dokázal francouzský chemik Deville zavést způsob výroby desetkrát levnější než Oersted. Až šedesát let po Oerstedovi objevili, nezávisle na sobě, způsob průmyslové výroby pomocí elektrolýzy pánové Hérault a Hall. První slitina, známá jako dural (AlCu4Mg), byla vyrobena v roce 1906. [2,3].

Slévárenské slitiny hliníku mají nespornou výhodu v nízké hustotě při zachování relativně dobré pevnosti. Další výhodou je odolnost slitin, neobsahujících měď, vůči korozi. K nevýhodám těchto slitin patří relativně nízká tvrdost a špatná odolnost vůči alkalickým látkám. Při odlévání musí být kladen velký důraz na průběh a technologii lití, protože z tuhnoucí taveniny vznikají velká zrna s ostrými hranami, způsobujícími ztrátu pevnosti a nárůst křehkosti. Je tedy důležité taveninu ovlivňovat, aby tak vznikala jemná a homogenní struktura. [3,4]

1 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

Tyto slitiny jsou užívány k výrobě různotvarých odlitků [5]. Čistý hliník je k odlévání nevhodný, proto se užívají slitiny, které se dle hlavních přídavných prvků dělí na: [6,7]

- siluminy – Al-Si
- duralaluminia – Al-Cu
- hydronalia – Al-Mg

a další, avšak již mnohem méně využívané slitiny typu Al-Zn a Al-Li [5].

U slitin jsou posuzovány tři velké skupiny vlastností: [6]

- technologické – souvisí s výrobou (slévárenské vlastnosti, obrobitelnost, odolnost vůči korozi atd.)
- mechanické – pevnost, tažnost aj.
- umožňující tepelné zpracování – možnost vytvrzování aj.

Slévárenské vlastnosti jsou spjaty s intervalem tuhnutí, takže nejlepších vlastností dosahují eutektické slitiny. Mezi nimi vystupuje hlavně zabíhavost (nezaměňovat s tekutostí) a sklony ke vzniku staženin.

Mechanické vlastnosti jsou silně závislé na struktuře kovu, přítomnosti intermetalických fází a na tepelném zpracování. Čím jemnější struktura je, tím lepších vlastností výrobek dosahuje. S rostoucím množstvím intermetalických částic se značně, vzhledem k jejich tvrdosti, zhoršuje obrobitelnost.

Pomocí různých typů tepelných zpracování je možné dodatečně slitinu upravit. Nejběžnějším typem je vytvrzování, které je typické hlavně pro duralaluminia [6,8]

2 OVLIVŇOVÁNÍ STRUKTURY PRIMÁRNÍ FÁZE

Možnosti ovlivňování primární fáze jsou v praxi využívané dvě, rychlost ochlazování a očkování. Každá z těchto možností je využita tehdy, když je to při výrobě vhodné a výhodné (vyšší rychlost ochlazování například není možné využít u tlustostěnných odlitků).

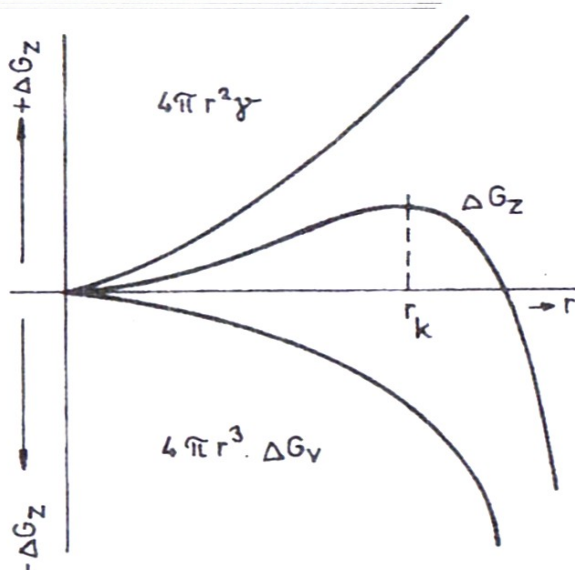
2.1 RYCHLOST OCHLAZOVÁNÍ

2.1.1 VLIV NA NUKLEACI

Růstu krystalů primární fáze přechází jejich nukleace, tzn. vznik stabilních krystalizačních zárodků, které se již nerozpustí zpátky do taveniny. Nukleace probíhá dvojí, homogenní a heterogenní.[6,9]

Při homogenní nukleaci vznikají zárodky přímo v tavenině, tento proces je však relativně náročný oproti heterogenní nukleaci, při které zárodky vznikají na cizích tělesech (stěny formy, vměstky).[9]

Platí, že pro úhel $\Theta = 180^\circ$ (úplná nesmáčivost) aktivační volná entalpie heterogenní nukleace $\Delta G'_k$ odpovídá aktivační volné entalpii homogenní nukleace ΔG_k , což je kritická energie, při které již dochází ke vzniku stabilního zárodku o poloměru r_k . S klesající hodnotou úhlu Θ (částečná smáčivost) se snižuje i $\Delta G'_k$. V extrémním případě, kdy $\Theta = 0^\circ$ by $\Delta G'_k$ bylo rovno nule a nukleace by probíhala bez přechlazení. Heterogenní nukleace probíhá při mnohem menším přechlazení než nukleace homogenní (heterogenní při 98% T_M , zatímco homogenní až od 80% T_M). [9]

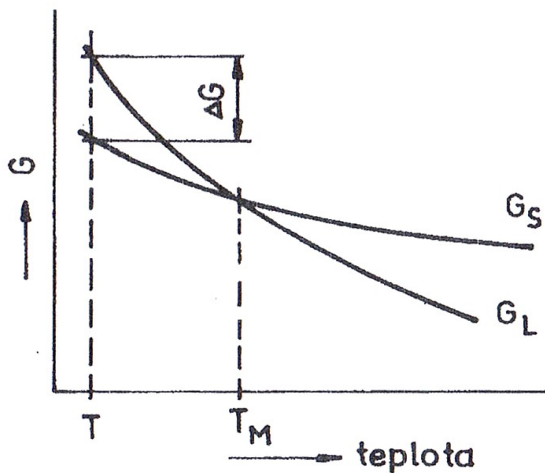


Obr.1 Závislost volné entalpie na poloměru zárodku r , hodnoty ΔG_k nabývá v bodě r_k [9]

U homogenní nukleace můžeme určit i tzv. Rychlost nukleace N^* , což je množství dostatečně velkých zárodků za jednotku času v jednotce objemu, dle vztahu (1)

$$N^* = N_0 \cdot e^{-\frac{\Delta G_K + \Delta G_A}{R \cdot T}} \quad (1)$$

pozn.: N_0 vyjadřuje množství míst, kde mohou zárodky, vzhledem k jejich rozměrům vznikat. ΔG_A je aktivační volná entalpie difuze – energetická bariéra mezi fázemi. [9]



Ze vztahu (1) je zřejmé, že s rostoucí ΔG_K a klesající teplotou T množství vhodných zárodků roste, proto je rychlost chlazení jedním ze zásadních faktorů krystalizace taveniny. [9]

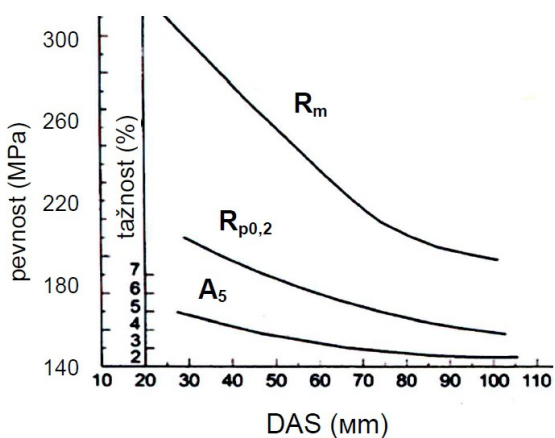
Obr. 2 Závislost volné entalpie na teplotě [9]

2.1.2 VLIV NA STRUKTURU

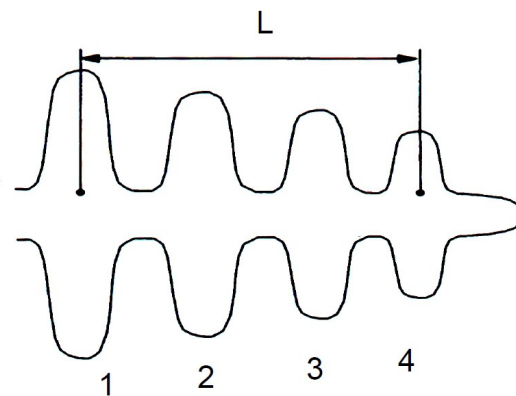
Další veličinou, která je významně závislá na rychlosti chladnutí je vzdálenost sekundárních os dendritů -tzv. DAS (dendrite arm spacing). Tato veličina charakterizuje hustotu sekundárních os dendritů. Na její velikosti jsou závislé další strukturní jevy – s klesající hodnotou DAS klesají i segregační vzdálenosti, při kterých vznikají i menší intermetalické vměstky, nečistoty netvoří síťoví a celkově je složení slitiny více homogenní. Dá se říci, že pokud se snižuje hodnota DAS, zlepšují se mechanické vlastnosti materiálu (viz obr. 3) [6,10]

Velikost DAS lze zjistit dvěma způsoby – praktickým a teoretickým. Prakticky se určí metalograficky – na výbrusu vhodného dendritu se změří vzdálenost přes několik sekundárních os a podělí se počtem mezer [6], čili:

$$DAS = \frac{L}{n-1} \quad (2)$$



Obr. 3 Vliv DAS na mechanické vlastnosti [6]



Obr. 4 Princip měření DAS [6]

Teoretický způsob znamená, že DAS lze vypočítat pomocí vzorce (3):

$$DAS = a \cdot t_f^n \quad (3)$$

pozn.: a je konstanta závislá na slitině, n je konstanta v intervalu $\langle 0,3;0,5 \rangle$ a t_f je místní doba tuhnutí, což je čas, za který v daném místě klesne teplota likvidu na teplotu solidu – lze ji získat z křivek ochlazování. [6]

2.2 OČKOVÁNÍ

Stejně, jako rychlé ochlazování, i očkování zjemňuje strukturu odlitku. K tomuto zjemnění však dochází velmi odlišným způsobem. Při očkování je do taveniny vpravena látka, která zvyšuje počet nukleačních zárodků, na kterých mohou růst krystaly $\alpha(\text{Al})$ fáze. Je tedy možné zjemnit strukturu i u odlitků, u kterých není rychlé ochlazování možné (odlitky s tlustými stěnami, odlitky lité do písku). Jelikož očkování ovlivňuje primární fázi $\alpha(\text{Al})$, účinnost očkování je tedy vyšší při větším množství této fáze (siluminy s menším množstvím křemíku a duraly, které obsahují pouze primární fázi) [1,6,7]

Na rozdíl od rychlého ochlazování nezpůsobuje očkování snížení hodnoty DAS. Proto není očkování tak účinné jako rychlé ochlazování. [6]

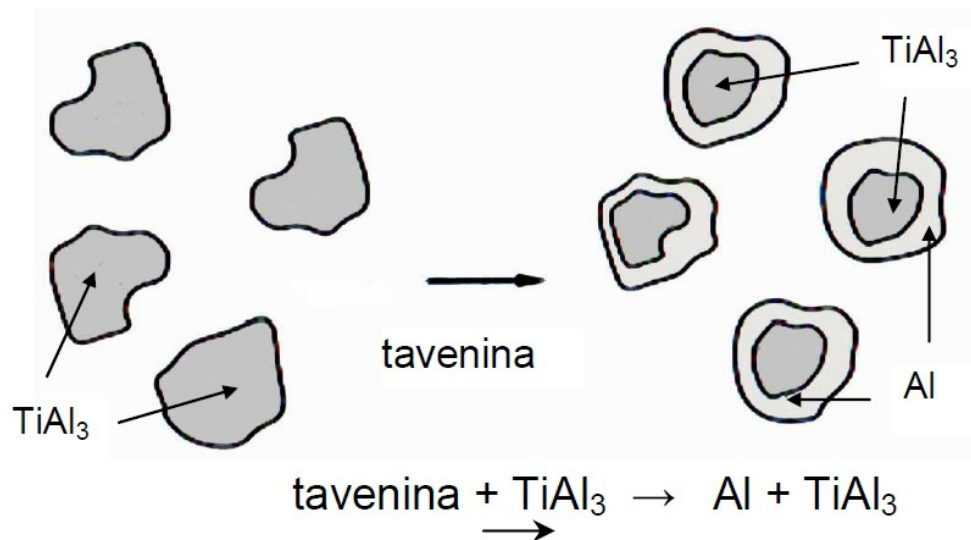
Mezi nejčastější očkovačké prostředky patří titan, bór a kombinace těchto prvků. [11]

2.2.1 OČKOVÁNÍ TITANEM

Očkovačkémi zárodky při užití samotným titanem jsou částice titanu hlinitého (TiAl_3). Tyto částice mají stejný typ krystalické mřížky (kubickou plošně centrovanou) a velmi podobný mřížkový parametr, takže jsou téměř ideálními zárodky. Tyto zárodky však mají jednu velkou nevýhodu – jsou v tavenině rozpustné, takže jen menší množství částic ve skutečnosti slouží jako zárodky. Z tohoto důvodu je efekt očkování nižší se zvyšujícími se teplotami a dlouhou výdrží na těchto teplotách. Těmto vlivům lze předejít. Při dostatečném obsahu titanu v původní slitině dojde při teplotě 665°C a koncentraci titanu 0,19% k peritektické přeměně [1], při které dojde k vyloučení částic TiAl_3 . Množství titanu nesmí být příliš vysoké, protože při vyšším množství titanu by docházelo k vylučování nežádoucích destiček TiAl_3 . [1,6]

Samotný růst zrn probíhá tak, že kolem částice TiAl_3 se utvoří obálka tuhé fáze $\alpha(\text{Al})$, na které následně pokračuje růst dendritů. [6] – viz. obr. 5

Dávkování titanu se realizuje pomocí předslitin typu AlTi , v nichž už je intermetalický TiAl_3 přítomen. Obsah titanu v těchto předslitinách bývá kolem 5%. Disperzita samotného TiAl_3 v předslitině je velmi významným faktorem, na kterém závisí účinnost očkovačla. [1,6]



Obr. 5 Mechanismus růstu dendritu na zárodcích TiAl_3 [6]

2.2.2 OČKOVÁNÍ KOMBINACÍ TITANU A BÓRU

Při použití kombinace titanu a bóru (obvykle do 5% Ti a 1% B v předslitině) se dosahuje velmi uspokojivých výsledků zjemnění struktury. Autoři literatury [1,6] se shodují, že kombinace titanu a bóru má podstatně lepší účinnost než užití samotného titanu. V předslitině je bór navázán ve formě TiB_2 , která je v předslitině velmi jemně vyloučena a není rozpustná. Tyto částičky mají velikost pouze od 0,5 do 2 μm a vzhledem k rozdílnosti krystalické mřížky nemohou sami o sobě vyhovovat jako krystalizační zárodky primární fáze, avšak mohou sloužit jako zárodky pro vznik částic TiAl_3 , které je obalí a následně na nich dochází ke krystalizaci fáze $\alpha(\text{Al})$. Jako další krystalizační zárodky pak slouží nerozpuštěné částice TiAl_3 , které jsou vneseny v předslitině a zároveň se nerozpustily v tavenině. [1,6]

Účinnost této kombinace ve velké míře závisí na poměru prvků v předslitině. Výzkumy byl zjištěn nejlepší poměr těchto dvou prvků - $\text{Ti}:\text{B} = 2,2:1$. [6] Bór významně prodlužuje dobu účinného očkovaní, účinek dokonce trvá i po přetavení. Nebezpečím při použití bóru je překročení množství 0,004%. Nad touto koncentrací totiž bór tvoří shluky boridů, které tvoří nárůstky, zanášející kelímek, a tvrdé částice na odlitcích, které způsobují problémy při obrábění. [6]

2.2.3 OČKOVÁNÍ BÓREM

V případě užití bóru panuje mezi jednotlivými autory rozpor. Dle některých je bór neúčinnějším očkovačem [1], zatímco podle jiných samotný bór očkovací účinek nemá. [6]

Je pozoruhodné, že autoři [1,6] se shodují, že bór tvoří částice AlB_2 , které působí jako zárodky pro krystalizaci, avšak neshodují se ohledně vpravení bóru do taveniny. Dle literatury [6] se tak děje pouze v kombinaci a titanem, kdežto v literatuře [1] tvrdí, že lze použít i samotný bór.

Částice AlB_2 jsou vnášeny do taveniny pomocí předslitin typu AlB , případně SiB pro snazší dávkování bóru. Důvodem je velikost částic AlB_2 v předslitině, které se následně obtížně rozpouštějí a pomalé rozpouštění těchto velkých částic může způsobit segregaci bóru, takže je velmi problematické určit jeho vhodné množství. Právě předslitiny SiB těmto problémům předcházejí, jelikož dvě třetiny bóru jsou obsaženy ve formě boridu křemíku, který se velmi rychle rozpustí (zbytek je rozpuštěn v křemíku). Potřebné zárodky AlB_2 následně vznikají až při primární krystalizaci, což znamená, že účinnost tohoto typu očkování není závislá na čase, protože zárodky vznikají až při ochlazení. [1] Zárodky AlB_2 jsou velmi vhodné při odlévání odlitků se silnými stěnami nebo při lití do písku, poněvadž se aktivují už při mírném přechlazení. [6]

Problémem při používání samostatného bóru je hladina obsahu titanu. S rostoucím množstvím titanu se snižují účinky bóru. K tomu dochází vznikem fáze TiB_2 , která okolí ochuzuje o bór, čímž vzniká méně částic AlB_2 , při dostatečném snížení množství dokonce ani nebude primárně krystalizovat, nýbrž vznikne až při eutektické přeměně, takže její očkovací účinek bude nulový. To znamená, že veškeré očkování bude závislé na částicích TiB_2 , které však mají velmi odlišnou krystalickou mřížku od mřížky hliníku, takže se nejprve musí obalit fází $TiAl_3$. Tento proces byl již popsán v odstavci o očkování titanem. [1,11].

2.2.4 OČKOVACÍ PROSTŘEDKY

Očkování může probíhat pomocí dvou typů látek vnášených do taveniny, již zmíněnými předslitinami a také pomocí očkovacích solí. [1,6]

Předslitiny mají formu tyčí, standardně o průměru 10 a délce 500 milimetrů, takže je velmi jednoduché napočítat potřebné množství očkovače na „tyče“. Tyto tyče jsou ponořeny do taveniny a po rozpouštění je tavenina promíchána. [6]

Očkovací soli mívají podobu sypkého prášku nebo tablet, které jsou ponořeny ke dnu tavicího kelímku a promíchány. U solí je důležité skladování, jelikož špatně vysušené soli mohou do taveniny vnášet nežádoucí vlhkost. [6]

Účinek obou typů očkovadel se dostavuje velmi rychle a obvykle je možné odlévat 5 až 10 minut po promísení. Delší prodleva na tavicí teplotě nemá smysl, protože v případě titanu účinek postupně odeznívá a v případě bóru nic nezlepšuje. [6]

2.2.5 JINÉ OČKOVACÍ PRVKY

Tyto prvky mají určitý očkovací účinek, nicméně nepatří mezi rozšířené očkovací prostředky. [1]

ZIRKON

Problémem při užití zirkonu je vzájemné vyrušení očkovacího účinku při současném užití titanu nebo směsi titanu a bóru. [12]

SKANDIUM

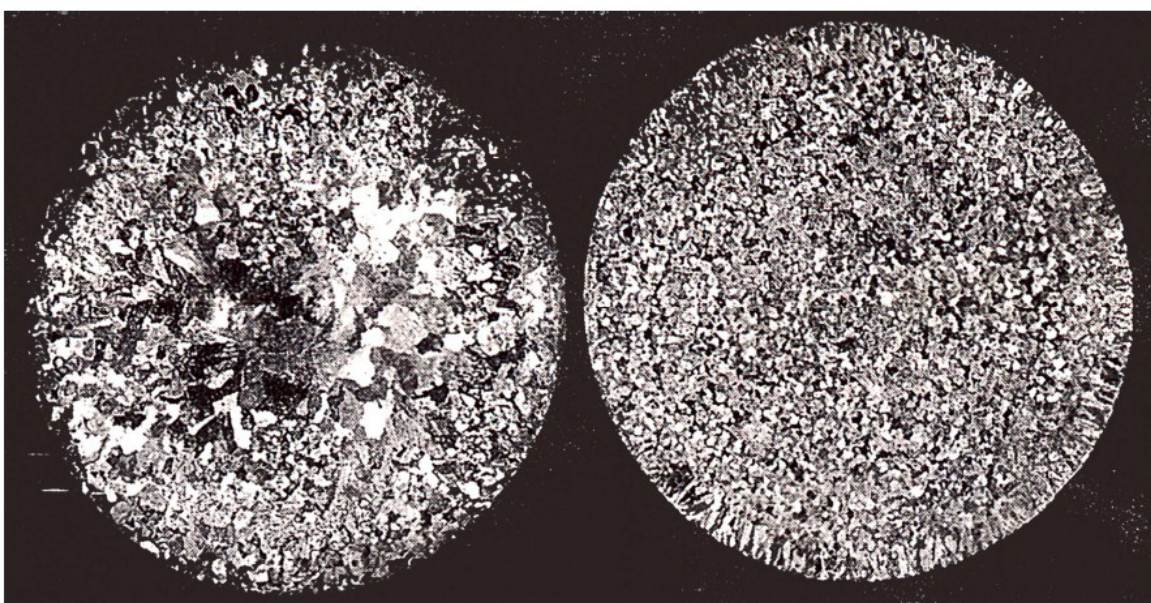
Skandium je některými svými vlastnostmi unikátní přísadový prvek, jelikož umožňuje zároveň s očkováním primární fáze i modifikovat eutektikum. Nevýhodou je značně nízká účinnost (oproti kombinaci titanu a bóru až desetkrát) a tvorba kompletních sloučenin (hlavně s Si, Mg a Fe), které nejsou schopny sloužit jako zárodky krystalizace, takže jsou vhodné spíše pro tvářecí slitiny hliníku s menším množstvím příměsových prvků. [12]

Dalšími prvky s doloženým pozitivním účinkem na strukturu hliníkových slitin jsou vanad, niob, chrom, kobalt, železo nebo nikl. Jak již bylo zmíněno, tyto prvky nejsou v praktickém měřítku rozšířeny. [1]

2.3 DOPADY NA VLASTNOSTI SLITIN

Můžeme prohlásit, že vlastnosti slitin jsou u obou způsobů ovlivnění podobné, protože při obou postupech dochází ke zjemnění struktury. Slitiny s jemnější strukturou mají vyšší pevnost a tažnost, mají menší sklony ke vzniku trhlin a jsou lépe obrobitelné. Tyto vlastnosti jsou spojeny právě s jemnou strukturou, která má však za následek větší chemickou a strukturní homogenitu. Právě z těchto dopadů vlastnosti odlitků vycházejí. [6]

Jemné zrno má také vliv na rozložení staženin, zatímco u větších zrn vznikají staženiny soustředěné, u ovlivněných odlitků jsou staženiny rozptýleny, což má také vliv na těsnost odlitků, které jsou více odolné proti pronikání tlakových médií. [6]



Obr. 6 Porovnání struktury neočkované a očkované slitiny Al-Si7 [6]

3 OVLIVŇOVÁNÍ MORFOLOGIE EUTEKTIKA

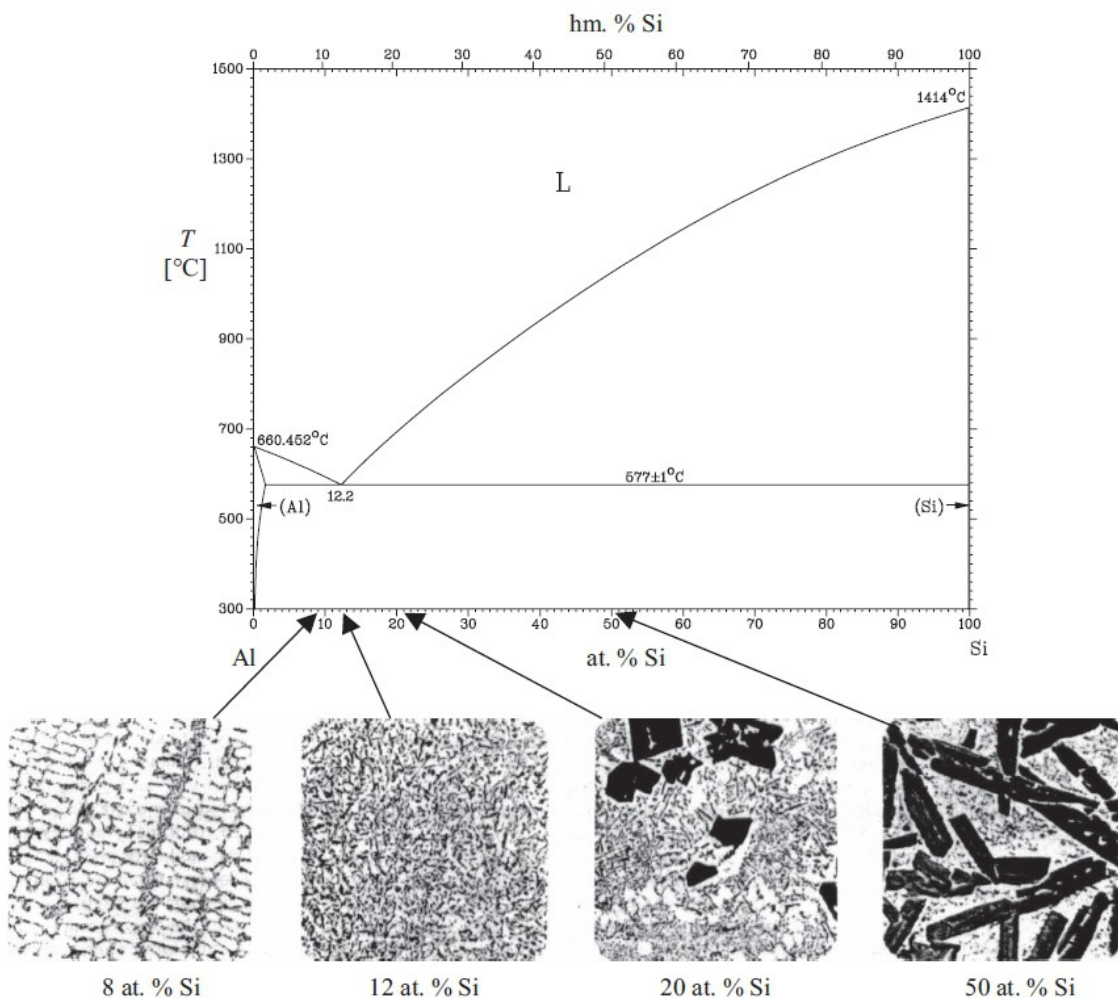
V této kapitole budou uvažovány pouze slitiny Al-Si, jelikož jiné slitiny, jako například Al-Cu vůbec nevytváří eutektikum, které je právě modifikací ovlivňováno. [6]

3.1 VZNIK A TVAR EUTEKTIKA VE SLITINÁCH Al-Si

Siluminy lze rozdělit dle množství křemíku na: [7]

- podeutektické – se strukturou (α + eutektikum)
- eutektické – s eutektickou strukturou
- nadeutektické – se strukturou (čistý křemík + eutektikum)

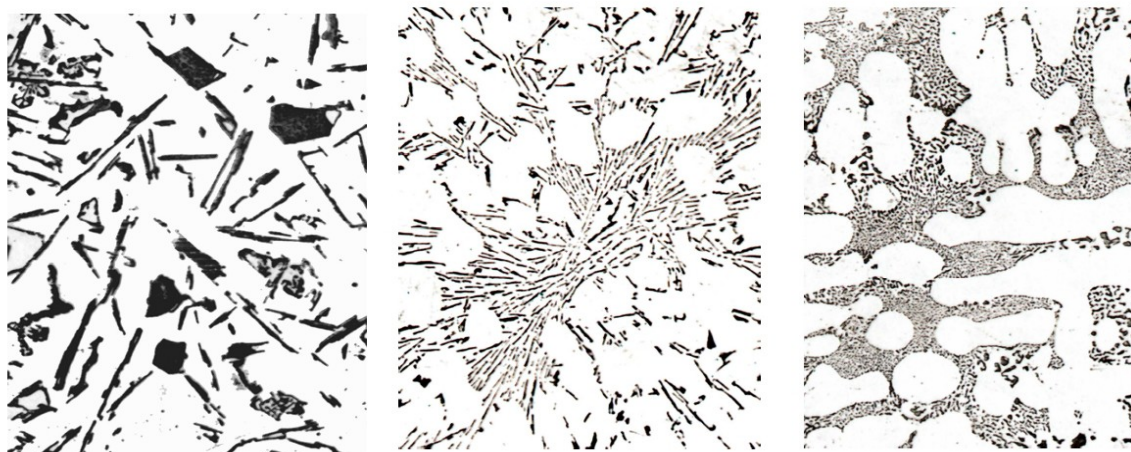
Poloha eutektického bodu se dle různých autorů [1,5,6] různí. Při stejné eutektické teplotě 577°C jsou uváděny hodnoty eutektické koncentrace 11,3% [1], 11,7% [5] a 12,5% [6]. Siluminy vždy obsahují eutektikum, jelikož křemík má v hliníku silně omezenou rozpustnost (při eutektické teplotě 1,59% [1] nebo 1,65% [6], s klesající teplotou dále klesá – pro 300°C přibližně 0,22% [6] a pro 200°C jen 0,05% [1]), proto je důležité ovlivňování jeho morfologie.



Obr. 7 Binární diagram Al-Si a charakteristiky struktury pro různé množství křemíku [1]

Dle morfologické podoby částic křemíku v eutektiku rozlišujeme tři typy eutektika [1,6]

- zrnité
- lamelární
- modifikované



Obr. 8 Struktura zrnitého, lamelárního a modifikovaného eutektického křemíku [6]

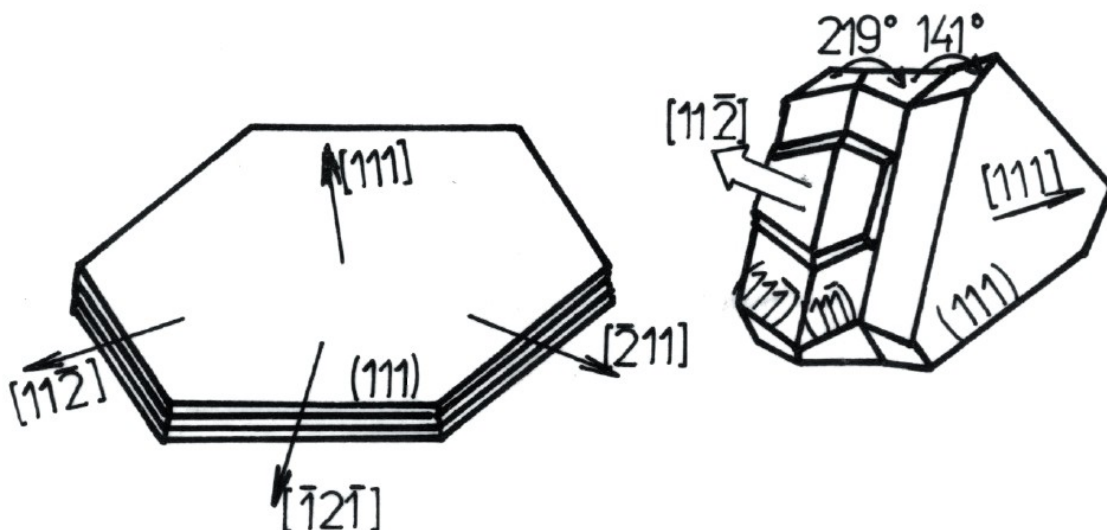
ZRNITÉ EUTEKTIKUM

Desky křemíku jsou rozloženy neorientovaně [1]. Tento typ vzniká při dostatečném množství fosforu (5 – 10 ppm), který se do vsázky dostává různými způsoby. Fosfor vytváří s hliníkem zárodky AIP, vhodné pro krystalizaci křemíku, který následně vytváří hrubé lamely nebo polyedrická zrna (dle [1] se jedná o hexagonální desky) [1,6].

LAMELÁRNÍ EUTEKTIKUM

Desky křemíku jsou rozloženy vějířovitě. [1] Toto eutektikum se objevuje pouze v čistých slitinách s nízkým množstvím fosforu (1 – 2 ppm) a velmi nízkým obsahem sodíku. Vzniklá křemíková zrna jsou menší než u zrnitého eutektika, ale kvůli vyšší energetické náročnosti vznikají při větším přechlazení než eutektikum zrnité. [1,6]

Samotná krystalizace křemíku probíhá u obou typů stejně. Růst krystalu probíhá pomocí dvojčatění podle roviny (111) pod úhlem 141° nejčastěji ve směru $\langle 211 \rangle$, přičemž roviny dvojčat postupují rychleji než fronta tuhnutí fází, takže dendrity hliníku už jen vyplňují mezery mezi vzniklými zrny křemíku, ať už zrnitého nebo lamelárního. [1,6] Tvar zrn má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti slitiny a na výbrusu se jeví jako dlouhé jehlice [13,14].



Obr. 9 Směry růstu a roviny dvojčatění při růstu eutektického křemíku [1]

MODIFIKOVANÉ EUTEKTIKUM

Na rozdíl od nemodifikovaného má křemík v modifikovaném eutektiku tvar tyčinek až vláken, která se na výbrusu jeví jako oblá zrnka. Vzhledem k jeho tvaru má příznivý vliv na mechanické vlastnosti. [6,13]

Dle autorů [1,5] není změna tvaru křemíku z nemodifikovaného na modifikovaný dostatečně objasněno, nicméně se shodují s autorem [6] na projevech těchto neznámých pochodů, a sice zpomalení růstu eutektického křemíku.

Zjemnění růstu způsobují právě modifikační prvky snížením rychlosti difuze křemíku v tavenině a díky nízkému rozdělovacímu součiniteli jsou stále tlačeny před frontou tuhnutí, takže stále působí. Modifikátory také ovlivňují vzdálenost rovin dvojčatění křemíku, na čemž závisí jejich efektivita – viz tab. 1. Díky mnohým rovinám jsou zrna na povrchu hrubá a každá vada se může stát místem pro další větvení křemíku [5]. Na rozdíl od nemodifikovaných slitin, kdy na rozhraní mezi křemíkem a hliníkem vznikají hrany a hovoříme o fasetově-nefasetovém systému, se v modifikované slitině vytváří systém fasetově-fasetový, kdy má rozhraní zaoblený tvar.[1]

struktura	modifikátor	Vzdálenost rovin dvojčatění při konstantní rychlosti chladnutí (nm)
zrnitá	žádný	400
vláknitá	Na	5
vláknitá	Sr	30
vláknitá	Ba	30
vláknitá	Ca	100
vláknitá	Yb	50

Tab. 1: Vliv modifikátoru na dvojčatění křemíku při stejných ochlazovacích podmínkách [6]

Modifikace také upravuje tvar binárního diagramu Al-Si. Poloha eutektického bodu se přesouvá do nižší teploty a do vyšší koncentrace křemíku, takže u slitin s eutektickým nebo nadeutektickým složením dojde po modifikaci ke vzniku struktury podeutektické [5].

3.2 MODIFIKACE SODÍKEM

Z tabulky 1 je zřejmé, že sodík je nejúčinnější modifikační přípravek. Jeho použití zajistí dobrý výsledek i při odlévání s pomalou rychlostí ochlazování. Dávkování sodíku ve velké míře záleží na množství křemíku, nicméně dalším důležitým faktorem je právě rychlost ochlazování. [6]

Přes všechny výhody je snaha sodík nahrazovat jinými modifikátory pro jeho nevýhody: [1,6]

- vyšší naplynění taveniny
- slitiny není možné odplyňovat, jelikož by docházelo ke ztrátě modifikačního účinku (sodík se slučuje s odplyňovacím přípravkem)
- vyšší výskyt rozptýlených porezit v důsledku zvýšení koeficientu objemové smrštivosti
- komplikované dávkování při sériové výrobě
- malé využití vneseného modifikátoru

Malé využití je způsobeno vysokou reaktivností sodíku, což má za následek bouřlivý var při vnesení do taveniny, kdy se většina sodíku vypaří a tudíž není použitelný. Se zvyšující se teplotou se využití logicky snižuje.[6]

3.2.1 DÁVKOVÁNÍ

Sodík je v současné době možné dávkovat třemi obvyklými způsoby: v čisté podobě, ve formě solí a pomocí exotermických tablet. [6]

ČISTÝ SODÍK

Vzhledem k reaktivnosti je nutné sodík aplikovat ve vakuových patronách, vyrobených z hliníku, který se při aplikaci roztaví a tak nedochází ke vnášení cizích prvků. Dávkování pomocí patron je velmi prosté, jelikož se vyrábí v různých velikostech. Zástupce tohoto způsobu dávkování jsou patrony NAVAC od firmy Foseco, jejichž účinnost se pohybuje kolem půl hodiny. [1,6,15]

SODÍKOVÉ SOLI

Tyto soli jsou obvykle směsí fluoridových a chloridových solí, jako například NaCl, KCl a NaF. Tato směs se aplikuje ponořením pomocí zvonu ke dnu kelímku, zamícháním a následným stáhnutím zbytků směsi z hladiny. Tato reakce většinou trvá 5 až 10 minut a odlitky je nutno dolévat do 15 až 20 minut, jinak modifikační účinek vyprchá. Typickými přípravky jsou sůl T3 a soli COVERAL. [1,6,7,15,16]

EXOTERMICKÉ MODIFIKAČNÍ TABLETY

Tyto tablety jsou dnes nejvíce používaným způsobem sodíkové modifikace. [12] Již z názvu vyplývá, že využívají exotermický efekt, při kterém dojde k uvolňování sodíku ve formě páry. K tomuto hoření jsou využívány dva pochody. Prvním a starším je hoření hliníkové krupičky, ale s nutným obsahem oxidovadla. Novější způsob užívá hořčičkové třísky, které oxidovadlo nepotřebují. Výhodou těchto tablet je lepší využití sodíku (až 30%). [6]

3.3 MODIFIKOVÁNÍ STRONCIEM

Přestože starší literatura se o stronciu buďto nezmiňuje [17] a nebo před stronciem varuje z hygienických důvodů a také z důvodu znehodnocování slitiny [18], je dnes stroncium stále častěji užívaným modifikátorem. Velkou výhodou oproti sodíku je déle trvající modifikační účinek, který lze z jedné až dvou hodin pomocí beryllia prodloužit až na deset hodin. K dávkování se používají různé předslitiny, takže dávkování je, vzhledem k normalizovaným rozměrům předslitinových tyčí, velmi jednoduché. [1,6]

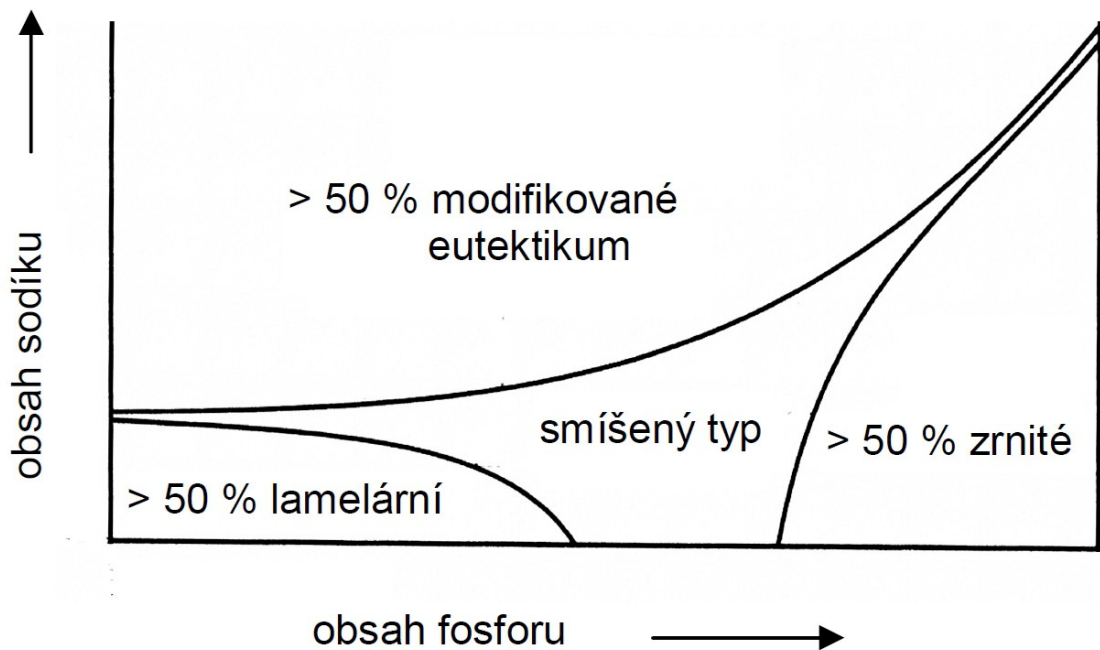
Obsah stroncia v předslitinách je obvykle od tří do deseti procent, jako například $AlSi_{13}Sr_{10}$, $AlSi_{16}Sr_{10}$ nebo $AlSr_5$, případně, u nás výjimečně používané, předslitiny s většinovým množstvím stroncia ($Sr_{90}Al_{10}$). [1,6]

Předslitiny s menším obsahem stroncia jsou tvořeny částicemi Al_4Sr , případně i eutektikum Al-Si, a čistým hliníkem. [1,6]

Samotný proces modifikace se skládá z několika kroků: [1]

- rozpad Al_4Sr v tavenině,
- tvorba nové fáze Al_2Si_2Sr ,
- rozpad Al_2Si_2Sr a vznik volného Sr
- Působení Sr na růst křemíku,
- částečná neutralizace sloučením s fosforem.

Na rozdíl od sodíku stroncium nepůsobí okamžitě, ale má „inkubační dobu“ během které vzniká fáze Al_2Si_2Sr a z ní následně Sr. Velikost částic Al_4Sr v předslitině tudíž výrazně ovlivňuje tuto dobu, kdy pro malá zrna (10 až 130 μm) jsou to dvě až pět minut, ale pro velká zrna (100 až 400 μm) to může být deset minut, ale také až půl hodiny. S rostoucí délkou náběhu také klesá účinnost, protože asi deset minut po vnesení začíná stroncium reagovat s fosforem za vzniku fosfidu stroncia, přičemž není možná modifikace, dokud tyto reakce neustanou. Až po zreagování veškerého fosforu může zbývající stroncium ovlivňovat tuhnutí křemíku. Těmto negativním reakcím lze předejít dvěma způsoby. První možností je odlévat do deseti minut od aplikace stroncia, k čemuž je třeba předslitn s dostatečně jemnými částicemi Al_4Sr . Druhou cestou je snížení množství fosforu v tavenině pod 0,0015%. [1,6]



Obr. 10 Závislost struktury eutektika na obsahu fosforu a sodíku [6]

3.4 DALŠÍ MODIFIKAČNÍ PRVKY

ANTIMON

V případě antimonu se nejedná o pravou modifikaci. Jeho vlivem totiž nevzniká modifikované eutektikum, ale jemné lamelární eutektikum. Tento účinek neodeznívá, takže je možné přidávat antimon do slitiny už ve slévárnách při výrobě housek. Pro opravdovou modifikaci je ale antimon prvkem naprosto nežádoucím. Vytváří totiž se stronciem a sodíkem neaktivní sloučeniny a tím snižuje množství aktivního modifikátoru. [6,19]

TELLUR

Při použití od 0,04 do 0,4% má tellur trvalý modifikační účinek, nicméně se nehodí pro nadeutektické slitiny, jelikož u těchto slitin nezpůsobuje zlepšení mechanických vlastností. [1]

BARYUM

Má podobnou účinnost jako stroncium a jeho výdrž lze, podobně jako u stroncia, prodloužit pomocí malého množství beryllia. [1]

VÁPNIK

Jedná se, z pohledu modifikace, o velmi rozporuplný prvek. Dle [1] někteří autoři tvrdí, že vápník potlačuje účinky stroncia a sodíku, nicméně dle jiných autorů struktura neodpovídá morfologii nemodifikovanému, ale naopak přemodifikovanému eutektiku, což ukazuje na modifikační schopnosti vápníku v součinnosti s Na a Sr. Již [18] zmiňuje užití vápníku, jako patentovaný způsob modifikace v tehdejším Sovětském svazu. Nevýhodou vápníku je zvýšení sklonu slitiny k naplynění a tvorbě mikrostaženin, takže je brán jako nežádoucí prvek. [6] Z těchto důvodů se doporučuje udržovat obsah vápníku ve slitinách do 0,001%. [1]

SÍRA

Doporučené modifikační množství se pohybuje od 0,01 do 0,02%. [1]

3.5 PŮSOBENÍ MODIFIKACE NA VLASTNOSTI SILUMINŮ

Působení modifikace na vlastnosti materiálu se projevuje pouze v případě, že mezi modifikovanou a nemodifikovanou strukturou panují značné rozdíly (při odlévání do kovových forem je rozdíl, vzhledem k rychlosti chladnutí, minimální). [6]

Z mechanických vlastností působí modifikace na tažnost, jejíž hodnota stoupá až k hodnotám kolem deseti procent, a houževnatost a rázovou pevnost, u kterých, ve spojení s tepelným zpracováním, dochází k nárůstu v řádu stovek procent. [6]

Naproti tomu modifikace téměř neovlivňuje pevnost v tahu a únavovou pevnost. [6]

Slévárenské vlastnosti jsou ovlivněny jak pozitivně, tak negativně. Za pozitivní přínos lze určitě považovat snížení tendence ke vzniku trhlin a soustředěných staženin a kompenzace vlivů mikroporozity. Negativním efektem je lehce se zhoršující zabíhavost, která se však příliš výrazně neprojevuje. [6]

4 NADEUTEKTICKÉ SILUMINY

4.1 STRUKTURA NADEUTEKTICKÝCH SLITIN Al-Si

U nadeutektických siluminů nevzniká primární $\alpha(\text{Al})$ fáze, ale sekundární křemíková fáze. V podstatě jedinými nukleačními zárodky pro tuto fázi jsou částice AlP. Problém je, že ve standardních slitinách je množství fosforu velmi malé, zárodků je málo a krystalizace probíhá až při velkém přechlazení (až desítky Kelvinů). Vzhledem k malému množství zárodků jsou vznikající krystaly velmi velké (20 až 120 μm), což má nepříznivý vliv na obrobiteľnosť a slévárenské vlastnosti. [6]

4.2 UŽITÍ FOSFORU

Zdroje [1,5,6,7] se neshodují v pohledu na aplikaci fosforu na nadeutektické slitiny. Zatímco [1,5] tento děj uvádějí jako modifikaci, [6,7] jej zařazují mezi očkovací prostředky.

Po přidání fosforu do taveniny vzniká velké množství zárodků AlP, čímž dojde ke zjemnění částic křemíku. Eutektický křemík fosforem ovlivněn není, takže buďto vznikne zrnité eutektikum [6], a nebo proběhne tzv. dvoustupňová modifikace [1], kdy se nejprve vnáší fosfor a až při nižší teplotě sodík. Výsledkem je jemná struktura jak primárního, tak eutektického křemíku, což znamená lepší mechanické vlastnosti. [1]

Fosfor se dává v podobě předslitin CuP10 nebo Ni-P, v podobě červeného fosforu nebo ve formě solí, například PCl_5 , která zároveň uvolňuje chlór sloužící k odplynění. Se zvyšujícím se množstvím křemíku pochopitelně roste i potřebné množství fosforu. Odeznívání účinku probíhá pomalu (3 až 5 hodin). [6,7]

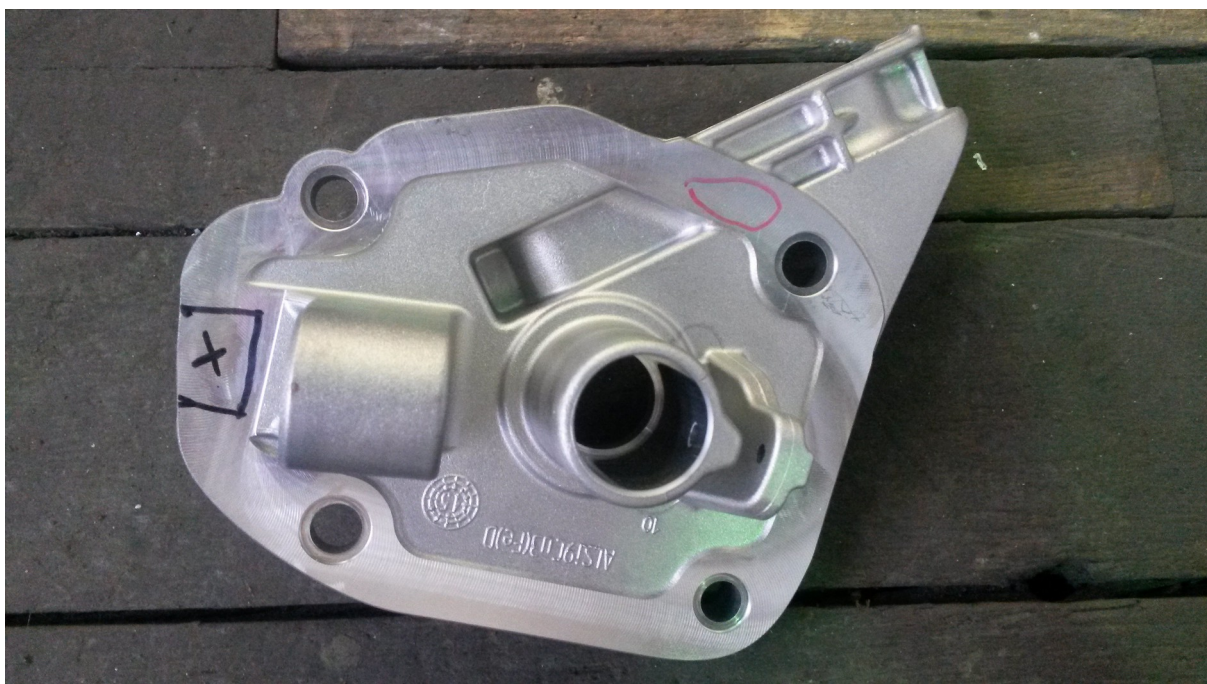
5 EXPERIMENT

Cílem experimentu bylo ověřit teoretické předpoklady morfologie jednotlivých struktur a vzájemně je porovnat. Byly porovnávány slitiny modifikované a nemodifikované, tlustostěnné a tenkostěnné a slitiny odlévané do kokilu, bentonitu a skořepiny. Rozdílem mezi dobře modifikovanou a nemodifikovanou strukturou by měl být ve tvaru eutektika, rozdíl mezi tlustostěnným a tenkostěnným odlitkem v celkové jemnosti struktury, dané rychlostí ochlazování, což je hlavní faktor také pro rozdíly mezi strukturou u kovové, skořepinové a bentonitové formy.

5.1 VÝROBA VZORKŮ

5.1.1 POUŽITÉ ODLITKY

Vzorky byly odebrány ze čtyř různých odlitků. Prvním byl sériový dílec vyráběný metodou tlakového lití ve firmě Kovolit a.s., Modřice, u kterého nebyla provedena modifikace nebo očkování. Dle dokumentace se jedná o slitinu $AlSi9Cu3(Fe)$. Její složení je uvedeno v tabulce 2.



Obr. 11 Odlitek z Kovolitu. Černým obdélníkem je zaznačeno místo odebrání vzorku

Chemické složení slitiny $AlSi9Cu3(Fe)$ [%]					
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
9,02	0,883	2,20	0,326	0,167	0,851

Tab. 2 Chemické složení slitiny $AlSi9Cu3(Fe)$

Druhý vzorek byl odebrán z modifikovaného ingotu ze slévárny FSI VUT. Tento ingot byl vsázkou pro třetí a čtvrtý vzorek.



Obr. 12 Cihlový ingot ze školní slévárny. Obdélník opět značí místo odebrání vzorku

Třetí vzorek, taktéž obsahující modifikátor, byl odlit do kovové kokily v dílně na FSI VUT. Tento odlitek byl použit jako model při výrobě bentonitové formy pro čtvrtý vzorek.



Obr. 13 Odlitek z kokily

Druhý, třetí i čtvrtý vzorek byly vyrobeny ze slitiny AlSi7Mg. Její složení je v tabulce 3. Měření bylo provedeno optickým emisním spektrometrem Q4 Tasman.

Chemické složení slitiny AlSi7Mg [%]				
Si	Cu	Sr	Mg	Fe
8,363	0,251	0,0021	0,257	0,220

Tab. 3 Chemické složení slitiny AlSi7Mg



Obr. 14 Do bentonitu odlitá kopie odlitku z kokily

Vzorky z těchto dvou odlitků byly odebrány v nejužším místě kanálku.



Obr. 15 Porovnání kvality povrchu obou vzorků.

5.1.2 VÝROBA VÝBRUSŮ

Vzorky byly vyříznuty pomocí kotoučové rozbrušovačky Struers Labotom 3. Značení vzorků bylo zvoleno následovně:

- teK – tenkostěnný, nemodifikovaný odlitek z kokily (výrobek firmy Kovolit – obr. č. 11)
- TIMK – tlustostěnný, modifikovaný odlitek (z cihlové formy – obrázek č.12)
- teMK – tenkostěnný, modifikovaný odlitek z kokily (obr. 13)
- teMB – tenkostěnný, modifikovaný odlitek odlévaný do bentonitu (obr. 14)
- teMS – tenkostěnný, modifikovaný odlitek litý do skořepiny
 - tento odlitek byl vyroben ze slitiny AlSi10Mg. Složení této slitiny je uvedeno v tabulce 4.

Chemické složení slitiny AlSi10Mg [%]						
Si	Mg	Mn	Cu	Na	Fe	Sr
10,25	0,278	0,153	0,0088	0,0031	0,313	-

Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi10Mg

pozn.: vzorky TIMK, teMK a teMB byly modifikovány stronciem a vzorek teMS sodíkem.

Po vyříznutí byly tyto výbrusy zalisovány do bakelitu, což umožnilo jednoduchou manipulaci se vzorky při leštění. Leštění bylo provedeno na poloautomatickém leštícím stroji Struers Labopol 5 těmito brusnými kotouči::

- 1) Brusný kotouč Struers na hliník Ø200mm, drsnost 220 + voda
- 2) Brusný kotouč Struers Ø200mm, drsnost 800 + voda
- 3) Brusný kotouč Struers Ø200mm, drsnost 1000 + voda
- 4) Leštící kotouč firmy Struers na hliník: Ø200 mm + monokrystalická diamantová leštící suspenze DiaDuo-2 firmy Struers o drsnosti 9 µm
- 5) Leštící kotouč firmy Struers - Ø200 mm, + monokrystalická diamantová leštící suspenze DiaDuo-2 firmy Struers o drsnosti 3 µm

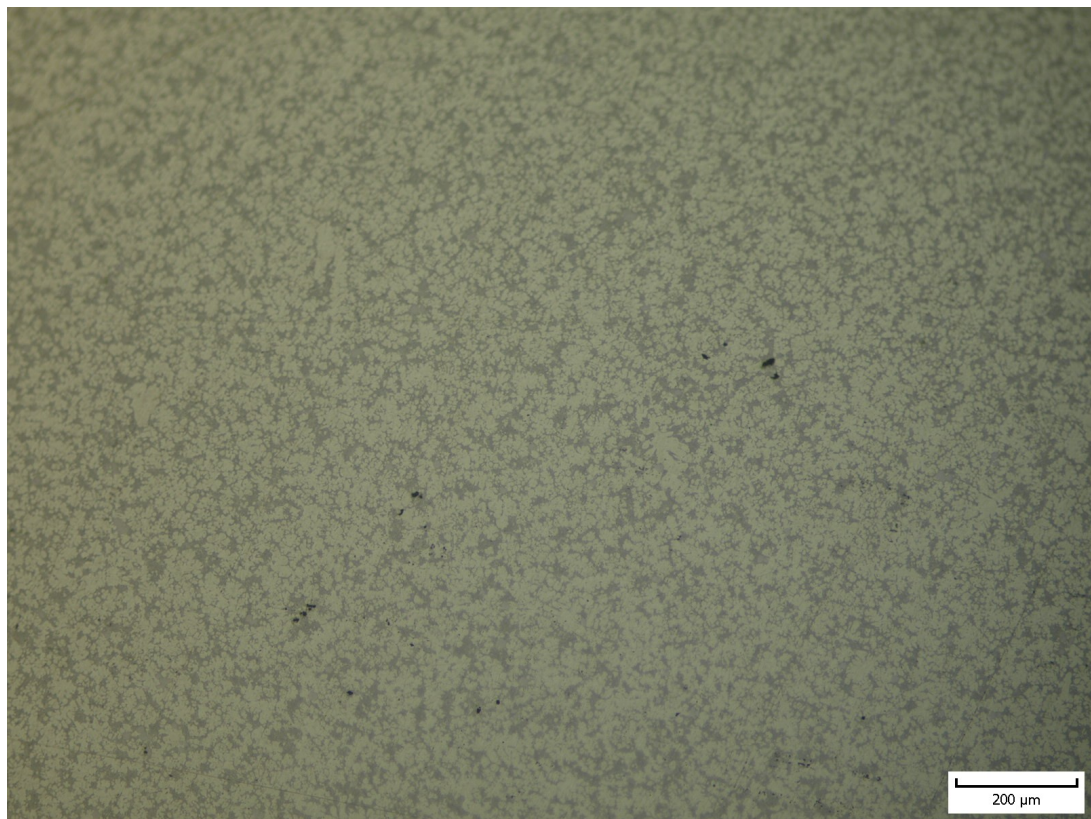
pozn.: Vzhledem k relativně poškrábanému povrchu byly jemnější kotouče použity několikrát.

5.2 POROVNÁNÍ VZORKŮ POD MIKROSKOPEM

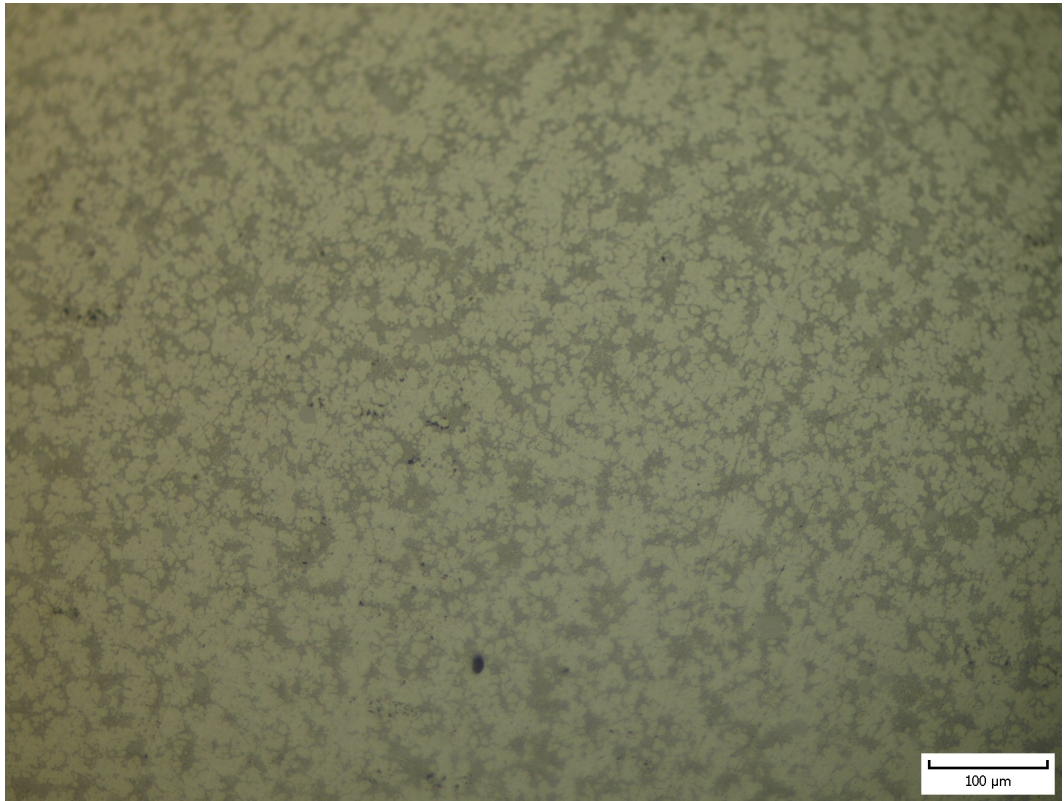
Dostatečně vyleštěné vzorky byly pozorovány pod mikroskopem pro ověření vlivu modifikace a rychlosti ochlazování. Vzhledem k přetrvávajícím problémům s poškozením povrchu byly snímky vyfotografovány na místech nejméně zasažených. Fotografie byly pořízeny s přiblížením 100, 200 a 400. U přiblížení 400 byly problémy s rozostřením, jelikož povrch vzorků byl vlivem leštění zakřiven.

5.2.1 VZOREK teK

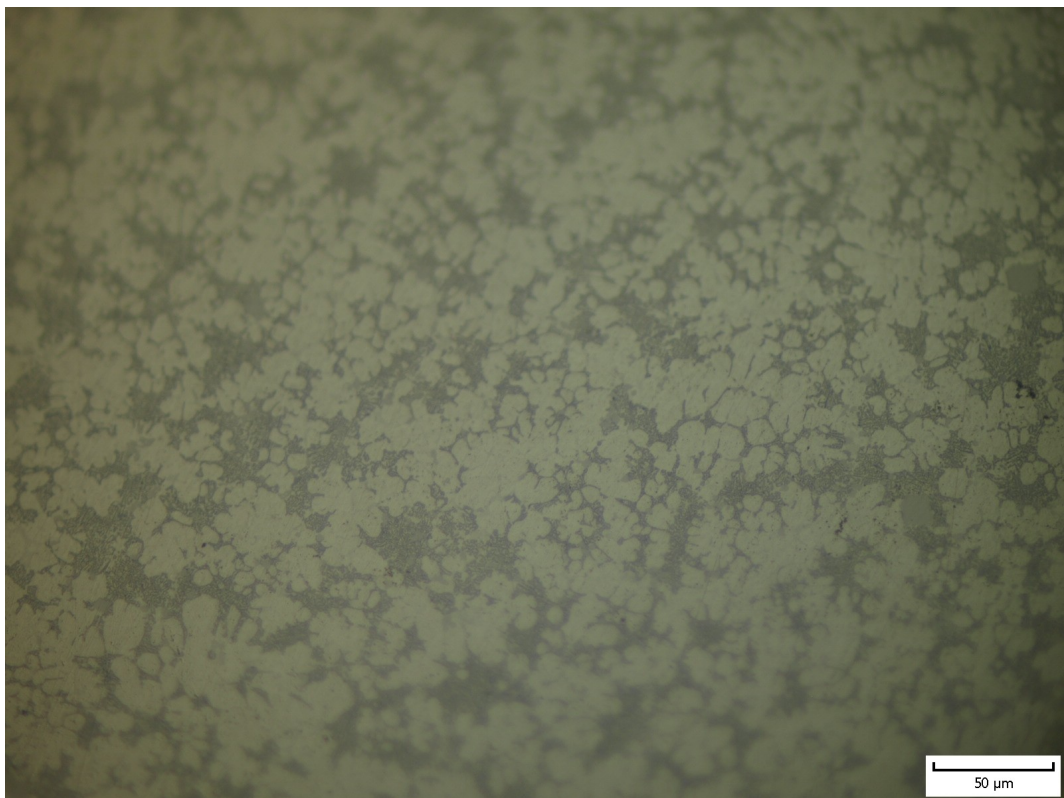
Na vzorku bylo možné pozorovat velmi jemnou strukturu, hlavně z důvodu velmi rychlého ochlazování při tuhnutí.



Obr. 16 Fotografie vzorku teK (zvětšeno 100x)



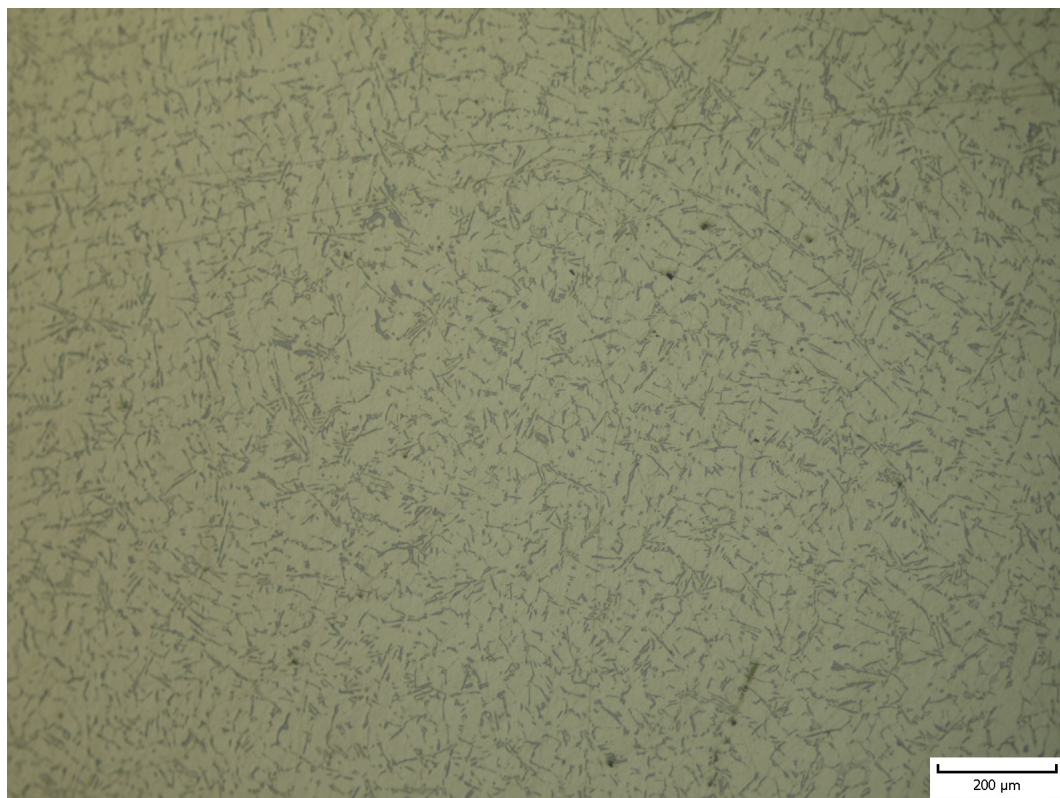
Obr. 17 Fotografie vzorku teK (zvětšeno 200x)



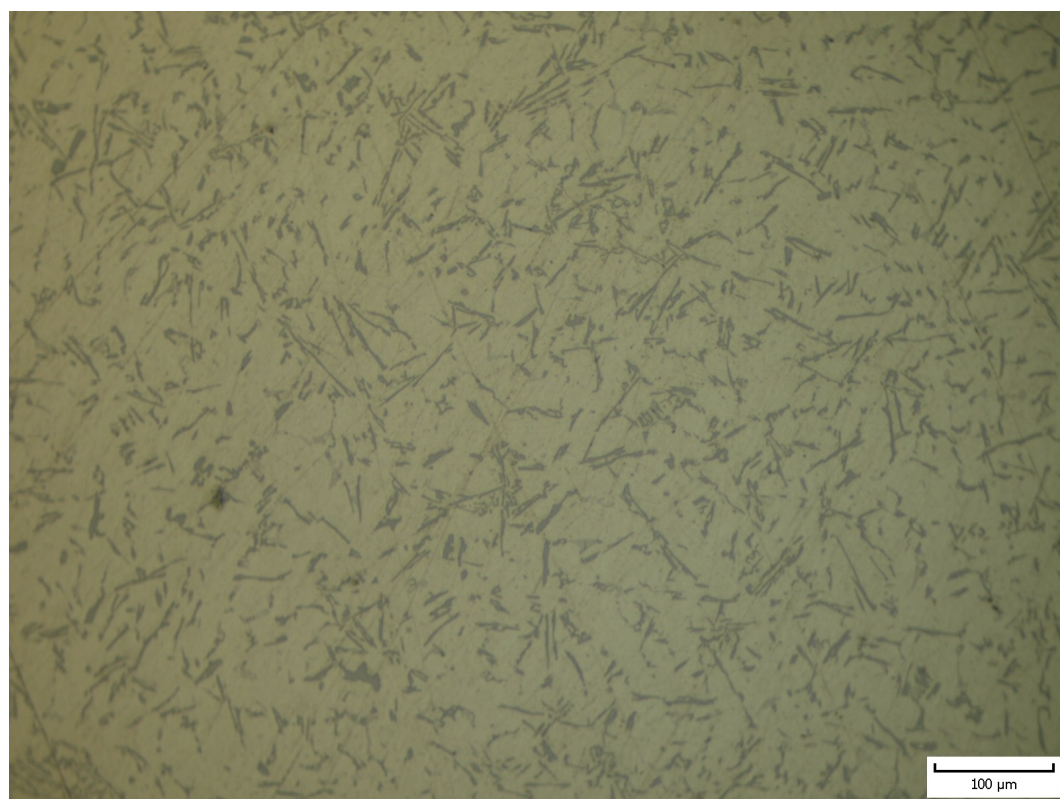
Obr. 18 Fotografie vzorku teK (zvětšeno 400x)

5.2.2 VZOREK teMB

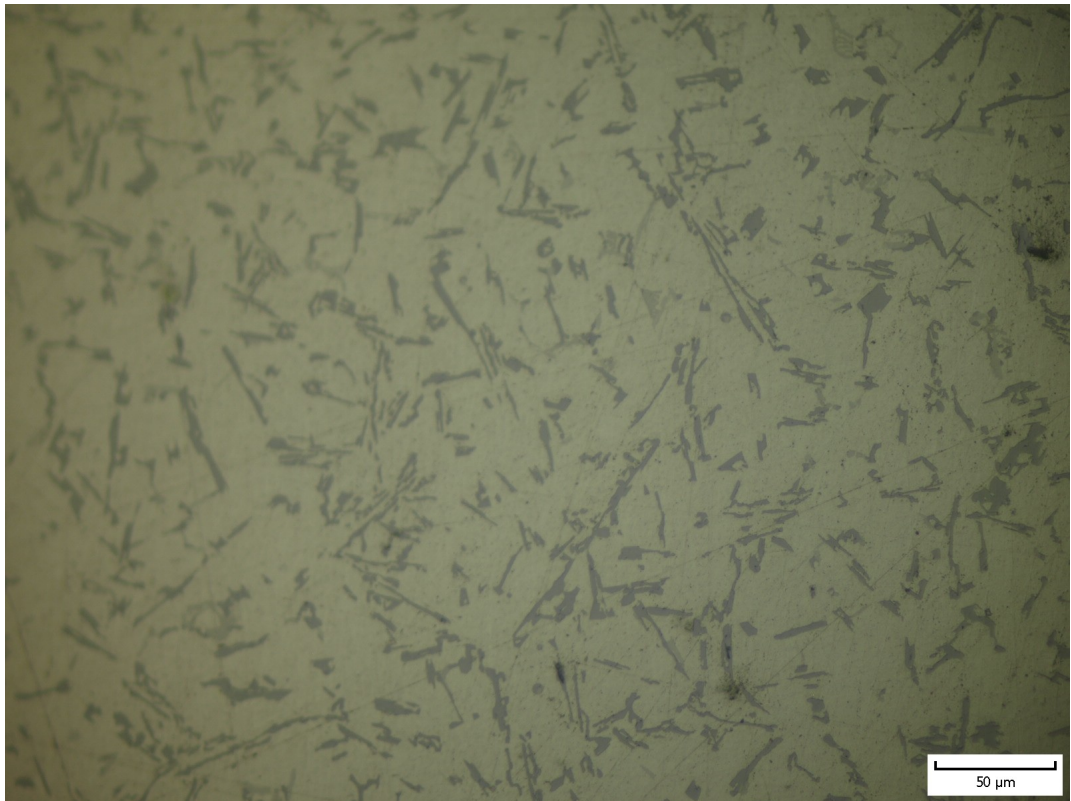
Vzorek byl odléván do bentonitu, takže odvod tepla skrze stěny formy byl pomalejší než při odlévání do kokily. Tento vzorek obsahoval hrubé lamelární eutektikum.



Obr. 19 Fotografie vzorku teMB (zvětšeno 100x)



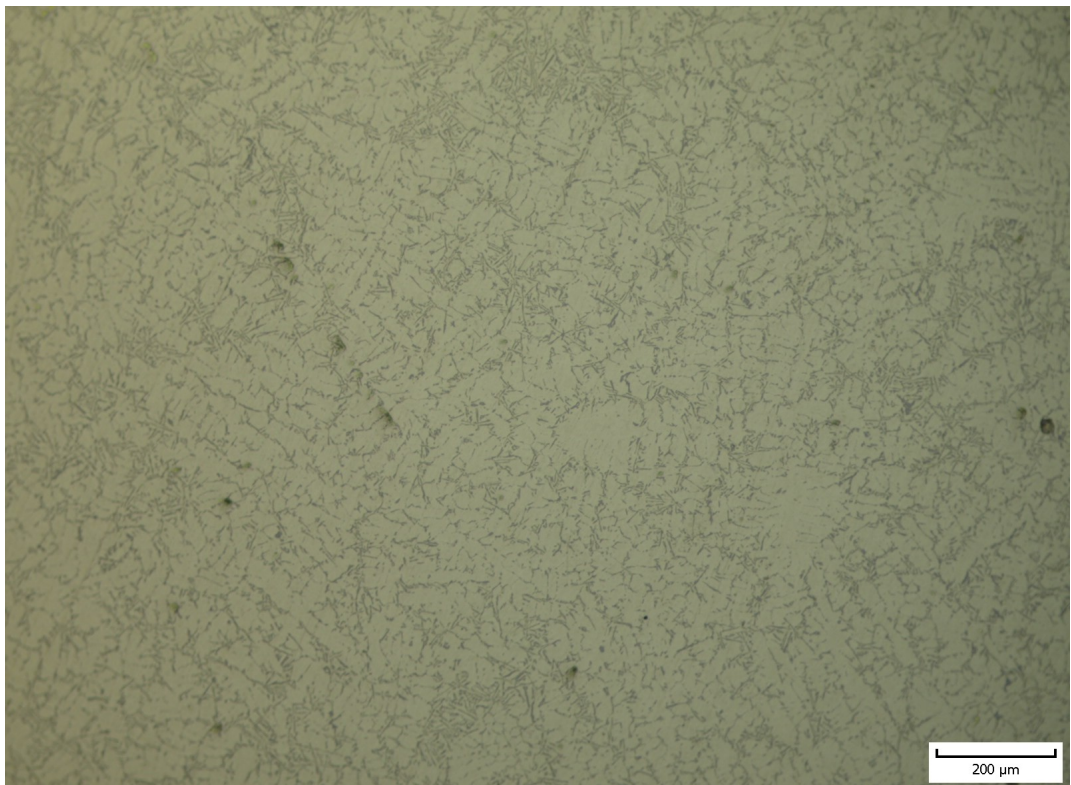
Obr. 20 Fotografie vzorku teMB (zvětšeno 200x)



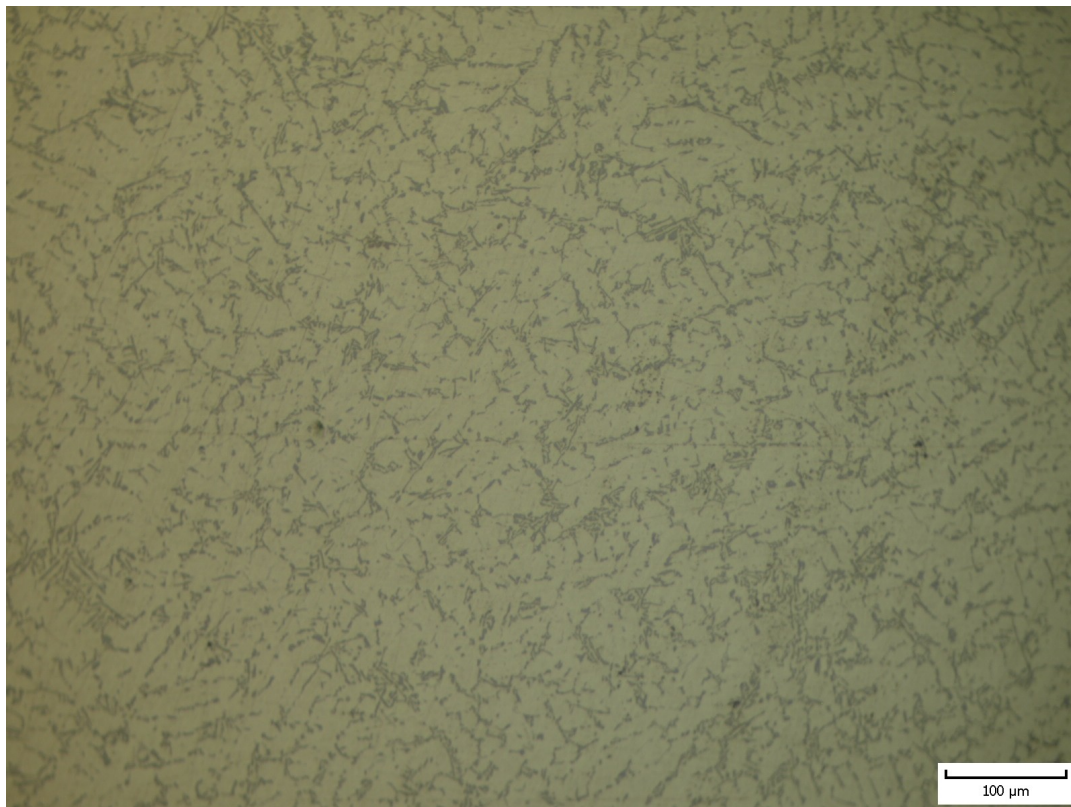
Obr. 21 Fotografie vzorku teMB (zvětšeno 400x)

5.2.3 VZOREK teMK

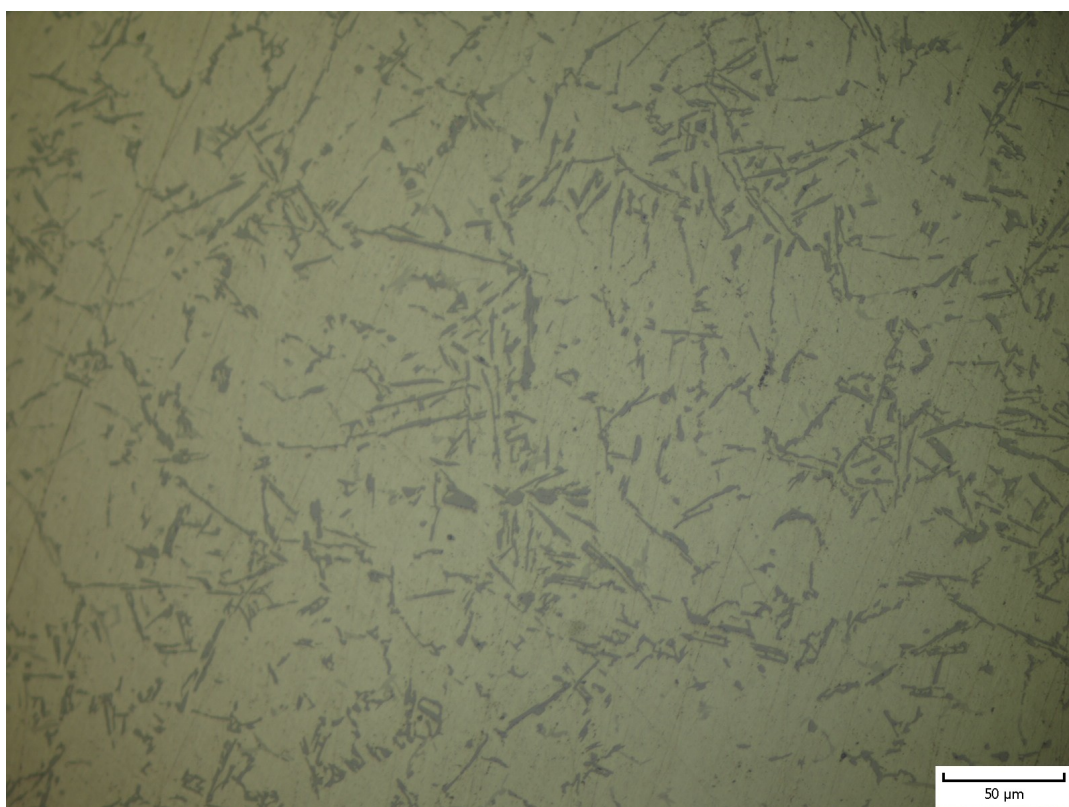
Tento vzorek měl proti předchozímu strukturu jemnější, přestože se ale jednalo o modifikovanou slitinu, nebyla modifikace pozorována. Vzorek obsahoval pouze hrubé lamelární eutektikum.



Obr. 22 Fotografie vzorku teMK (zvětšeno 100x)



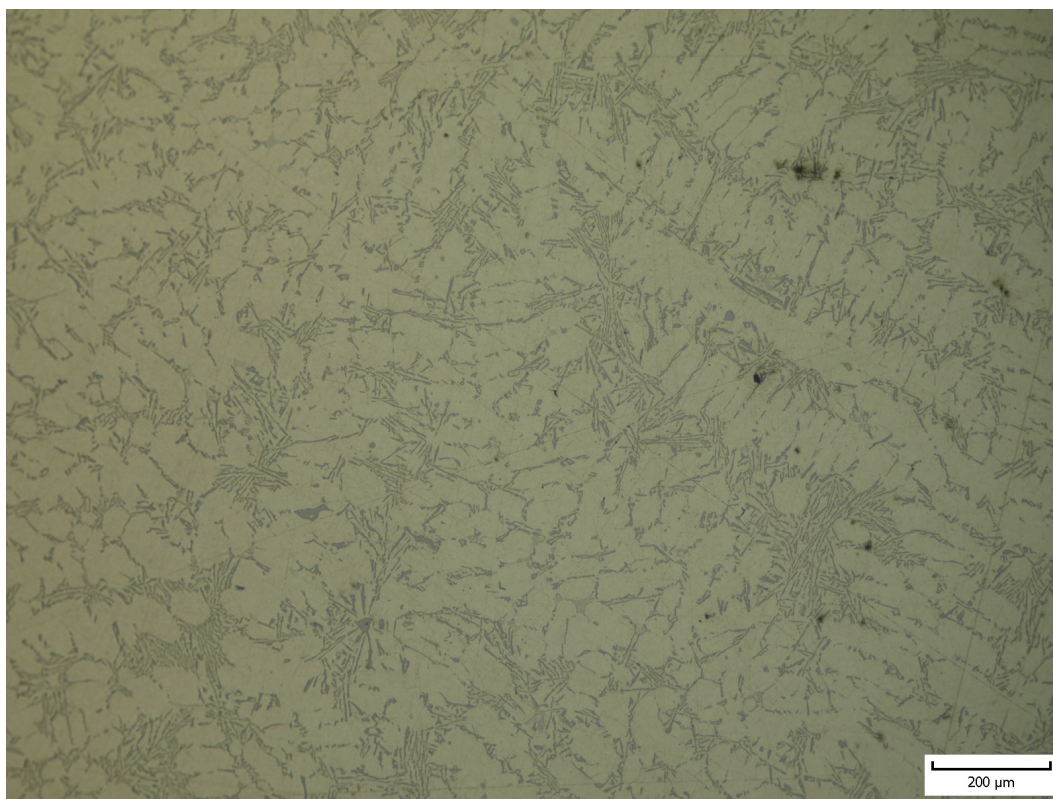
Obr. 23 Fotografie vzorku teMK (zvětšeno 200x)



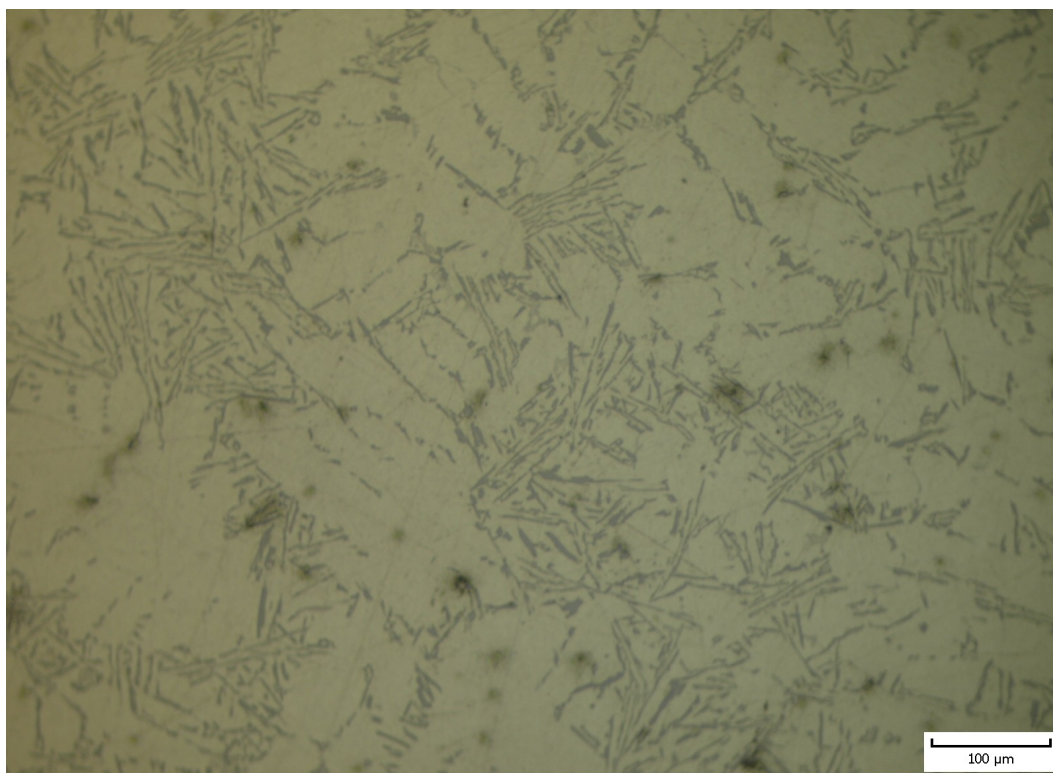
Obr. 24 Fotografie vzorku teMK (zvětšeno 400x)

5.2.4 VZOREK TIMK

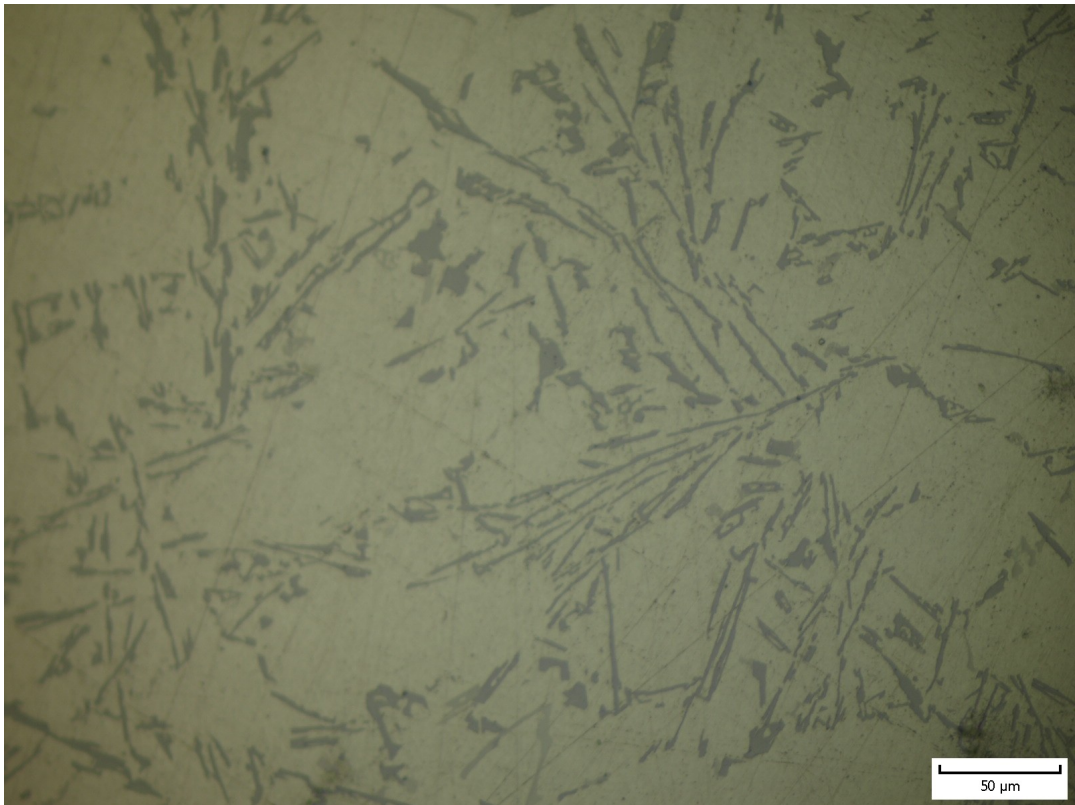
U tohoto vzorku byla předpokládána hrubší struktura s relativně velkými dendrity primární fáze, protože tento vzorek chladl oproti ostatním vzorkům nejpomaleji. Eutektikum je lamelární a vytváří charakteristické vějířky. Dendrity primární fáze jsou na snímcích dobře zřetelné.



Obr. 25 Fotografie vzorku TIMK (zvětšeno 100x)



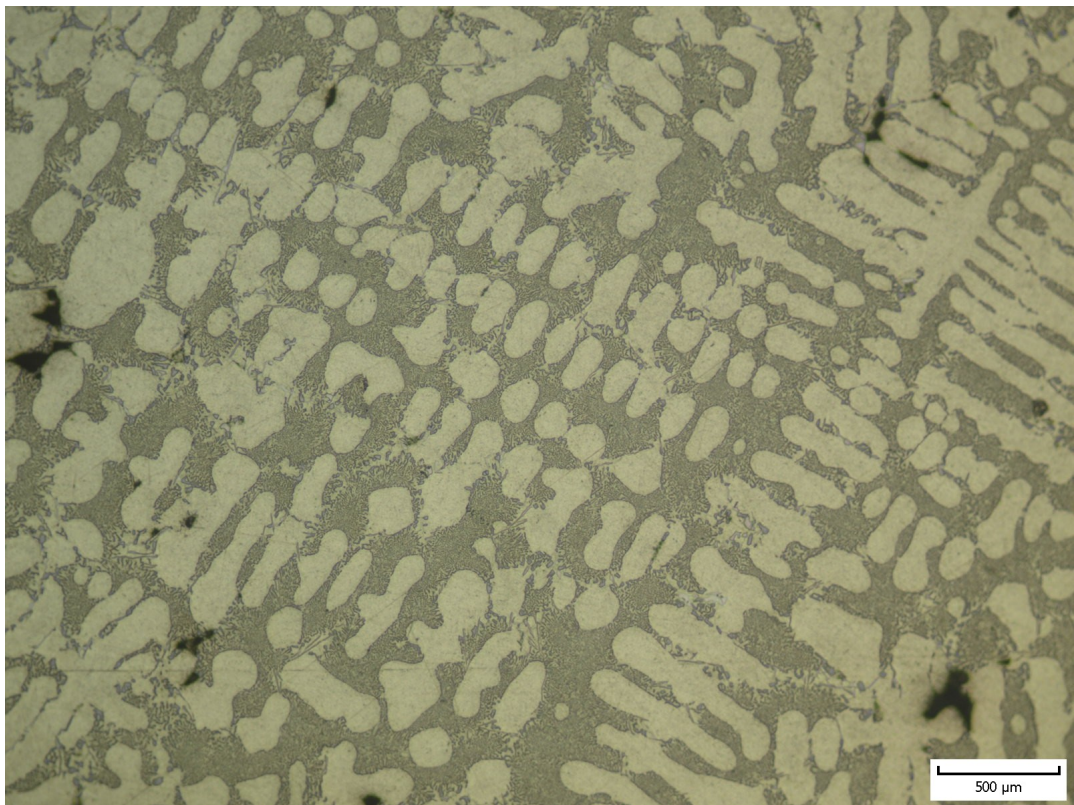
Obr. 26 Fotografie vzorku TIMK (zvětšeno 200x)



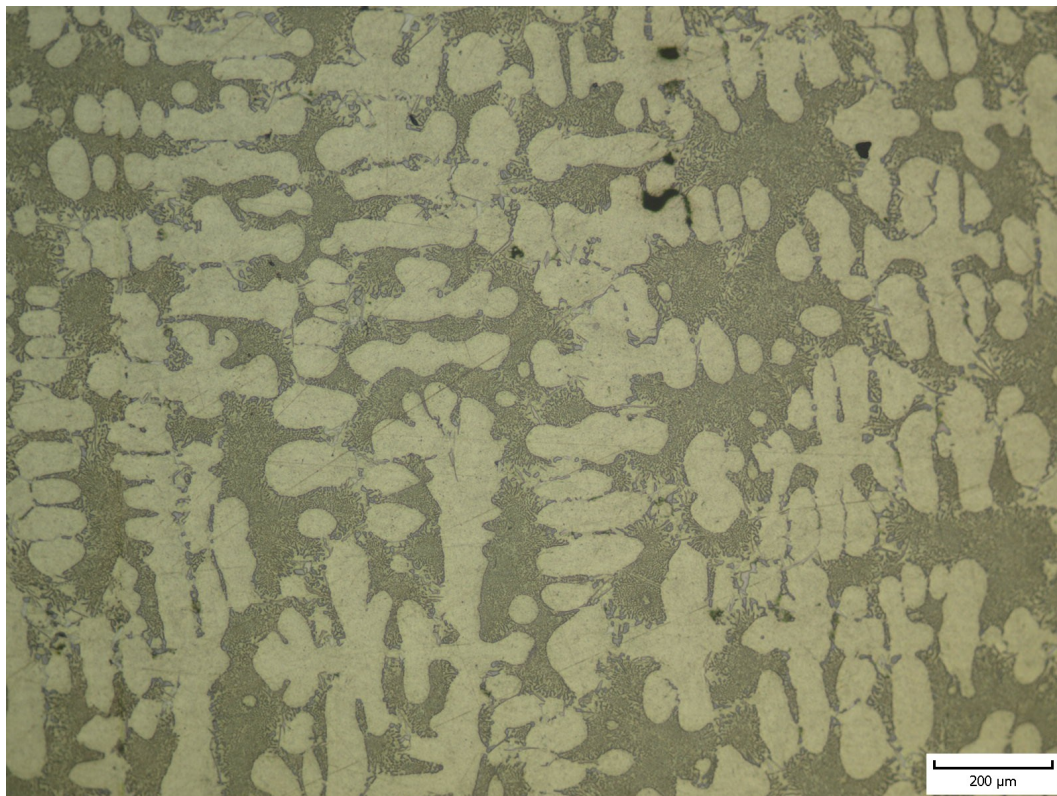
Obr. 27 Fotografie vzorku TIMK (zvětšeno 400x)

5.2.5 VZOREK teMS

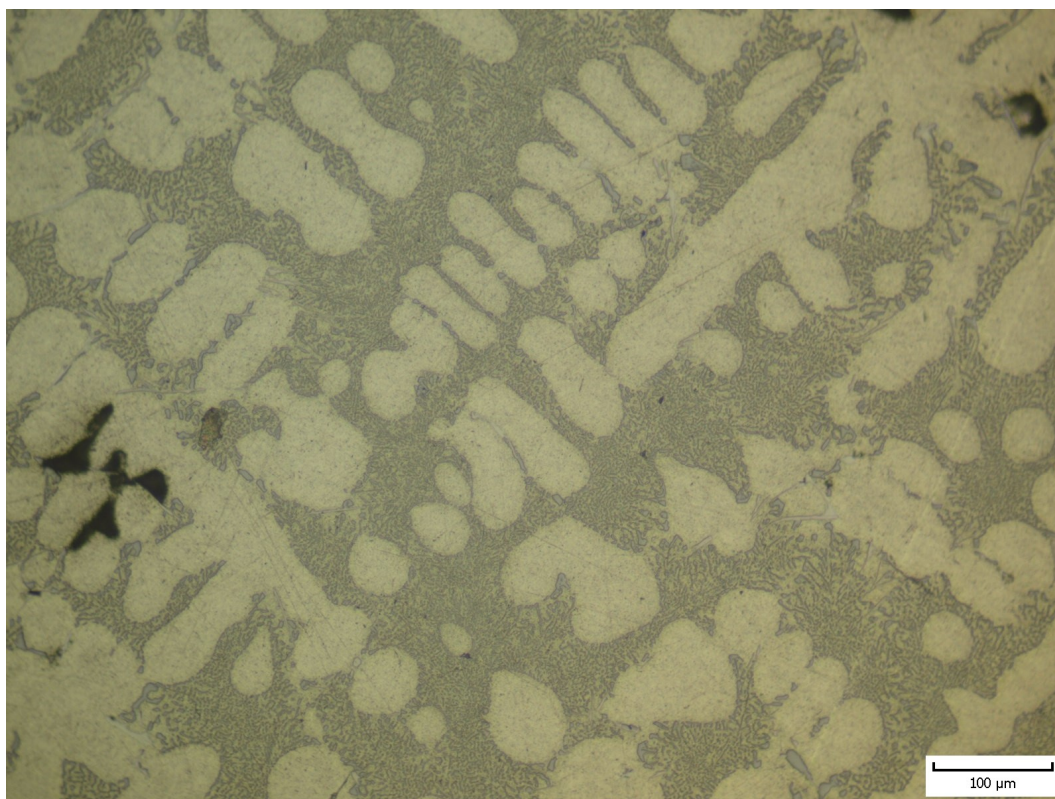
Poslední vzorek obsahuje dokonale modifikovanou strukturu. Je to způsobeno tenkou stěnou odlitku a také tím, že k modifikování byl použit sodík v dostatečném množství, a ne stroncium jako u ostatních modifikovaných vzorků.



Obr. 28 Fotografie vzorku teMS (zvětšeno 40x)



Obr. 29 Fotografie vzorku teMS (zvětšeno 100x)



Obr. 30 Fotografie vzorku teMS (zvětšeno 200x)

5.3 VYHODNOCENÍ

U vzorku odlévaného tlakovým litím bylo dosaženo velmi jemné struktury. Vzorky modifikované stronciem nebyly, nejspíš vzhledem k nedostatečnému množství použitého modifikátoru, dostatečně modifikovány. Jediný téměř dokonale ovlivněný vzorek byl modifikován sodíkem. Tyto výsledky také závisí na povaze formy a tloušťce stěn. Kovová forma, resp. kokila taveninu rychle ochladí díky dobré tepelné vodivosti, zatímco bentonit takové možnosti nemá. Tloušťka stěn je také určující, jelikož uprostřed zůstává odlitek nejdéle při vysoké teplotě, takže při velké tloušťce stěn je tato prostřední část velmi obtížně ovlivnitelná (viz. vzorek TIMK).

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vypracovat řešení na dané téma a poznatky z teoretické části následně ověřit v praxi. Při odlévání hliníku je velkým problémem se vznikem hrubozrnné struktury, která má za následek špatné mechanické vlastnosti. Ke zkvalitnění struktury se využívá očkování, modifikace a vyšší rychlost ochlazování odlitku. Očkováním se do taveniny vnáší nukleační zárodky, nejčastěji na bázi titanu a bóru. Modifikace ovlivňuje tvar eutektika, k čemuž se nejčastěji používá sodík v podobě solí a stroncium obsažené v předslitinách, dodávaných ve tvaru tyčinek. Na výslednou strukturu má také významný vliv forma, do které se odlévá. Z forem má největší vliv kovová kokila, jelikož umožňuje rychlý odvod tepla z odlitku.

V experimentální části byly odebrány vzorky k posouzení a pozorování vlivů jednotlivých technologických procesů. Byl porovnán vliv rychlosti chlazení a rozdílnost mezi slitinou nemodifikovanou, modifikovanou stronciem a modifikovanou sodíkem. V našem případě měl nejlepší, resp. nejvíce homogenní strukturu odlitek vyrobený tlakovým litím, následně odlitek modifikovaný sodíkem. Hrubozrnnější strukturu obsahovaly odlitky modifikované stronciem, což ovšem nelze chápat tak, že stroncium nemá modifikační účinek, pouze byl při daném množství stroncia a slitiny nepostačující.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. : il. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] Historie hliníku. In: Alinvest [online]. 2012 [cit. 2016-5-13]. Dostupné z: <http://www.alinvest.cz/hlinik/historie-hliniku>
- [3] Hliník a slitiny hliníku. In :ZČU [online]. 2009 [cit. 2016-5-13]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf
- [4] YU, J.M., N. WANDERKA, G. MIEHE a J. BANHART. Intermetallic phases in high purity Al-10Si-0.3Fe cast alloys with and without Sr modification studied by FIB tomography and TEM. *Intermetallics*[online]. 2016, **72**, 53-61 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.intermet.2016.02.003. ISSN 09669795. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966979516300140>
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ISBN 80-7204-248-3.
- [6] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [7] Slévárenství – teorie. *VSCHT* [online]. 2008 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_slevarenstvi/teorie.htm
- [8] Tepelné zpracování hliníkových slitin – teorie. *VSCHT* [online]. 2008 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_hlin_sl/index.htm
- [9] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2.* opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.
- [10] WANG, Q.G., M. PRAUD, A. NEEDLEMAN, K.S. KIM, J.R. GRIFFITHS, C.J. DAVIDSON, C.H. CÁCERES a A.A. BENZERGA. Size effects in aluminium alloy castings. *Acta Materialia* [online]. 2010, **58**(8), 3006-3013 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.01.032. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645410000467>
- [11] NOWAK, M., L. BOLZONI a N. HARI BABU. Grain refinement of Al–Si alloys by Nb–B inoculation. Part I: Concept development and effect on binary alloys. *Materials* [online]. 2015, **66**, 366-375 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.066. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914006827>

- [12] JANOŠŤÁK, J. *Vliv modifikace a očkování na strukturu a mechanické vlastnosti slitin hliníku*. Brno, 2014, 71 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86092. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír Roučka.
- [13] BARBOSA, J., H. PUGA, J. OLIVEIRA, S. RIBEIRO a M. PROKIC. Physical modification of intermetallic phases in Al–Si–Cu alloys. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2014, **148**(3), 1163-1170 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2014.09.041. ISSN 02540584. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0254058414006233>
- [14] PEŠEK, J. *Studium vlivu metalurgických a technologických parametrů na mechanické vlastnosti slitin hliníku*. Brno, 2013. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67410. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Ladislav Zemčík.
- [15] Modifiers for aluminium alloys. *Foseco* [online]. 2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.foseco.com/en-gb/end-markets/foundry/products-services/non-ferrous-foundry/non-ferrous-foundry-detail/productsinfo/metal-treatment-2/modifiers-for-aluminium-alloys/>
- [16] Přípravky pro rafinaci hliníku a jeho slitin. *Pragochema* [online]. 2008 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.pragochema.cz/?start=2&lan=cz&vyr=Pripravky-pro-rafinaci-hliniku-a-jeho-slitin>
- [17] MAZANEC, Karel. *Fyzikální metalurgie neželezných kovů a složených materiálů*. 2. vyd. Ostrava: VŠB, 1987, 148 s.
- [18] *Metalurgické procesy při tavení neželezných kovů*. Brno: ČSVTS, 1972, 69 s
- [19] DAHLE, A.K., K. NOGITA, S.D. MCDONALD, C. DINNIS a L. LU. Eutectic modification and microstructure development in Al–Si Alloys. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2005, **413-414**, 243-248 [cit. 2016-05-20]. DOI: 10.1016/j.msea.2005.09.055. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509305011147>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Θ	[°]	úhel smáčivosti
ΔG_K	[J]	aktivační volná entalpie nukleace
T_M	[K]	teplota tání
N^*	[s ⁻¹ ·m ⁻³]	rychlost nukleace
N_0	[-]	počet vhodných míst
ΔG_A	[J]	aktivační volná entalpie difuze
R	[J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹]	molární plynová konstanta
T	[K]	teplota
DAS	[m]	dendrit arm spacing
a	[-]	konstanta slitiny
n	[-]	konstanta
t_f	[s]	místní doba tuhnutí
r_K	[m]	poloměr nukleačního zárodku