



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE METALURGICKÝCH POSTUPŮ VE
SLÉVÁRNĚ HLINÍKOVÝCH SLITIN**

OPTIMIZATION OF METALLURGICAL PROCESSES IN ALUMINUM ALLOYS FOUNDRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Halaška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Halaška**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Optimalizace metalurgických postupů ve slévárně hliníkových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě odlitků ze slitin hliníku má správné metalurgické zpracování taveniny zásadní dopad na kvalitu výsledného odlitku. Očkování a modifikace mohou významně ovlivňovat mechanické vlastnosti materiálu. Stupeň odplynění má vliv na některé technologické vlastnosti a samozřejmě také na výskyt bublin v odlitku.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce prováděné ve firmě MSR Engines je popis současného stavu přípravy a metalurgického zpracování taveniny hliníkové slitiny, zejména z pohledu modifikace, očkování a odplynění taveniny. Následujícím krokem pak bude návrh a ověření optimalizačních opatření pro zvýšení kvality odlévaného kovu a tím i výsledných odlitků.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 0-7506-4790-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem přípravy a metalurgického zpracování taveniny na mechanické vlastnosti a strukturu hliníkových slitin typu Al-Si. Experimentální část proběhla ve firmě MSR Engines s.r.o. V této části je popsán současný (modifikace sodíkem) a nově navržený (modifikace stronciem) stav přípravy a metalurgického zpracování taveniny. Je zde uveden průběh zkušebních taveb, zkoušení odebraných vzorků, vyhodnocení zkoušek a pozorování vlivu jednotlivých modifikátorů na strukturu.

Klíčová slova

Hliník, Al-Si, modifikace, odplynění, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

Diploma thesis examines the influence of the preparation and metallurgical treatment on the mechanical properties and structure of aluminium alloys Al-Si. The experimental part was carried out at MSR Engines s.r.o. This part describes the current (sodium modification) and newly proposed (strontium modification) state of preparation and metallurgical processing of melt. There is state the course of experimental melting processes, testing of samples, evaluation of tests and observation of the impact of individual modifiers on the structure.

Key words

Aluminium, Al-Si, modification, degassing, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALAŠKA, J. *Optimalizace metalurgických postupů ve slévárně hliníkových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace metalurgických postupů ve slévárně hliníkových slitin** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Halaška

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě MSR Engines s.r.o. za možnost provedení experimentu k této práci. Nakonec bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 Historie používání hliníku	11
2 Slévárenské slitiny hliníku	13
2.1 Slitiny Al-Si	15
2.1.1 Slitiny Al-Si-Cu	17
2.1.2 Slitiny Al-Si-Mg	17
2.2 Slitiny Al-Cu	19
2.3 Slitiny Al-Mg	19
2.4 Slitiny Al-Zn.....	20
3 Metalurgie podeutektických slitin Al-Si	22
3.1 Modifikace eutektika	23
3.1.1 Růst eutektického křemíku	24
3.1.2 Účinnost modifikace	26
3.1.3 Modifikace sodíkem	27
3.1.4 Modifikace stronciem	28
3.1.5 Modifikace antimonem.....	29
3.1.6 Quench modifikace	29
3.1.7 Působení modifikace na mikrostrukturu	30
3.1.8 Přemodifikování	31
3.1.9 Vliv modifikace na porozitu	32
3.1.10 Vlastnosti modifikovaných slitin	32
3.2 Očkování	33
3.3 Rafinace a odplyňování	36
3.3.1 Rafinace	36
3.3.2 Odplyňování	39
4 Experiment	43
4.1 Představení slévárny.....	43
4.2 Plán experimentu	44
4.3 Výroba zkušebních skořepin.....	44
4.4 Průběh zkušební tavby s modifikací pomocí sodíku	46

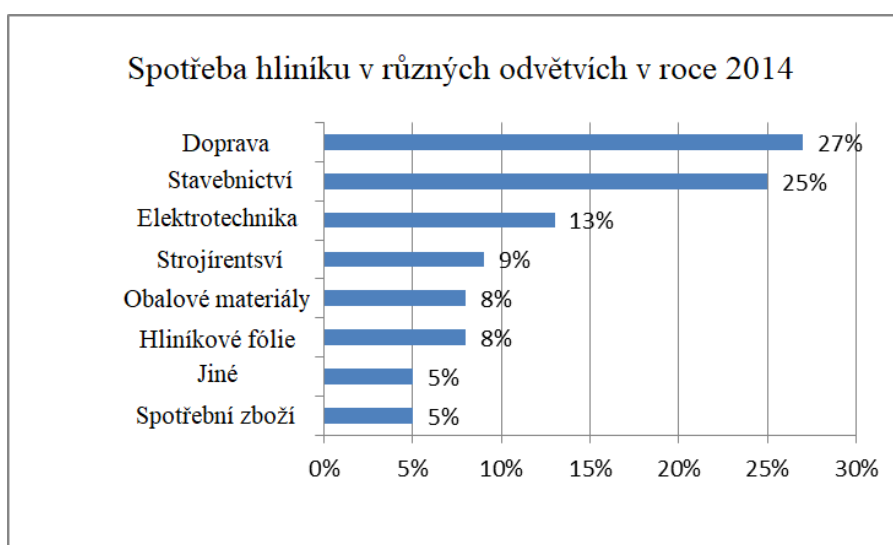
4.5 Průběh zkušební tavby s modifikací pomocí stroncia	50
4.6 Zpracování zkušebních vzorků.....	52
4.6.1 Rozbor hodnot mechanických vlastností.....	53
4.6.2 Rozbor hodnot spektrální analýzy	65
4.6.3 Rozbor hodnot Dichte Indexu	69
4.6.4 Rozbor metalografických vzorků.....	70
ZÁVĚR	76
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	78
SEZNAM OBRÁZKŮ	80
SEZNAM GRAFŮ	81
SEZNAM TABULEK.....	81
SEZNAM PŘÍLOH	81

ÚVOD

Hliník je třetím nejrozšířenějším prvkem a nejrozšířenějším kovovým prvkem na zemi. Je využíván v široké škále odvětví pro výrobu nejrůznějších součástí. V každodenním životě se s hliníkovými výrobky setkáváme a díky svým vlastnostem je stále více využíván. [1]

Hliník je stříbrno-bílý, lehký kov. Je měkký a tažný. Další vlastností je jeho nízká hustota ($\rho = 2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), vysoká tepelná vodivost, dobrá odolnost proti korozi, je netoxický a nemagnetický. Dobře se taví ($t = 660 \text{ }^\circ\text{C}$), odlévá, obrábí a tváří. Jako čistý kov se ovšem nepoužívá. Přidáním určitých legur ve správném poměru lze dosáhnout vynikajících mechanických vlastností a také možnosti dalšího tepelného zpracování. Z tohoto důvodu se využívají výhradně hliníkové slitiny. [2]

Komerčně začal být využíván nejdříve ve stavebnictví, a to až na konci 19. století. Ve strojírenství nastal rozmach využívání hliníkových slitin hlavně až po 2. světové válce. Postupně se začal rozšiřovat do oblastí dopravy, potravinářství, energetiky a chemického průmyslu. V dnešní době je nejvíce hliníku využíváno v dopravě (graf 1), a to převážně v leteckém a automobilním průmyslu (obrázek 1). Nahrazení ocelových a litinových dílů, právě součástmi z hliníku, přispělo k výraznému snížení hmotnosti při zachování požadovaných vlastností na materiál. Tento zásah vedl ke snížení spotřeby paliva, zvýšení výkonu a prodloužení životnosti stroje. Literární zdroj [3] uvádí, že při nahrazení některých ocelových dílů za hliníkové, se sníží hmotnost automobilu až o 50 kg, a to vede k úspoře 850 litrů paliva za jeden rok. [1], [3]



Graf 1 Spotřeba hliníku v různých odvětvích v roce 2014 [4]

Z hlediska slévárenství je třeba neustálý vývoj a zdokonalování technologií výroby hliníkových odlitků. Kvůli vzrůstající konkurenci v oblasti nových materiálů (nové slitiny a plasty), v oblasti zkoušení materiálů (nové a přesnější metody) a v neposlední řadě v oblasti vzrůstajících požadavků zákazníka (lepší mechanické vlastnosti a cena), je dnes již nutné disponovat správnou technologií výroby hliníkových odlitků. Za každým odlitkem se skrývá mnoho operací – metalurgie, technologie přípravy forem, apretace, tepelné zpracování a další, které musí být vyladěny tak, aby byla zaručena stálá kvalita odlitků a na konci byl spokojený zákazník i profitující slévárna.



Obr. 1 Jaguar XJ – automobil, ve kterém je použito mnoho hliníkových odlitků a dílů [5]

1 HISTORIE POUŽÍVÁNÍ HLINÍKU

Analýza kovového ornamentu, který byl nalezen v hrobce vojenského vůdce Chou-Chu ze 3. století n.l., ukázala 85% obsah hliníku. Jak byl tento předmět vyroben zůstává záhadou, jelikož záznamy o využívání hliníku z této doby nebyly doposud nalezeny. Ke konci 17. století bylo známo, že oxid hlinitý obsahuje kov, ale všechny pokusy o jeho extrahování selhaly. Humphry Davy používal elektrický proud k extrahování sodíku a draslíku ze zemin (oxidů), ovšem ani tato metoda nevyprodukovala hliník. Jako vůbec první stál za vyprodukováním hliníku Hans Christian Oersted v roce 1825, v Kodani, Dánsku. Dosáhl toho ohříváním chloridu hlinitého s draslíkem. Jeho vzorek nebyl zcela chemicky čistý, proto německý chemik Friedrich Wöhler v roce 1827 zdokonalil tuto metodu a získal čistý hliník. Dosáhl toho záměnou draslíku za sodík. [2]

Po desetiletí byl hliník ceněn více než zlato. Napoleon III., první prezident Druhé Francouzské republiky, nechával pyšně servírovat svým váženým hostům pokrmy na talířích z hliníku a používány byly také hliníkové přibory. Zlom nastal v roce 1886, kdy francouzský inženýr Paul Heroult a Američan Charles Hall nezávisle na sobě vynalezli elektrolytickou metodu k získání hliníku. Proces spočívá v tavení oxidu hlinitého v lázni roztaveného kryolitu. Hall-Heroultova metoda elektrolýzy, společně s Bayerovou metodou získávání oxidu hlinitého z rudy bauxitu, se využívá dodnes. Bauxit, oxid hlinitý a hliník lze vidět na obrázku 2. [6], [7]



Obr. 2 Ruda bauxitu, oxid hlinitý a houska hliníku [5]

Průmyslová výroba hliníku začala přibližně až po dalším uplynulém desetiletí po objevení Hall-Heroultovy metody. Hliník patřil stále mezi velmi drahé kovy důsledkem jeho malé produkce. Využíval se v klenotnictví a na speciální účely. Se zvyšující se produkcí, přístupností hliníku a jeho surovin, klesala jeho cena a začaly se tak vyrábět výrobky pro každodenní použití. Strmý nárůst nastal hlavně na počátku 2. světové války. Hliník se využíval k výrobě rámu letadel, letadlových lodí, infrastruktury lodí, radarů, nebo vybavení vojenské kuchyně. Začaly se vyvíjet nové hliníkové slitiny a zdokonalovat slévárenské procesy tak, aby výrobky vyhovovaly požadovaným specifikacím. Velkého rozšíření se dočkala technologie tlakového i kokilového lití. [1], [3], [7]

V současnosti je největším odběratelem hliníku dopravní průmysl, zejména letecký, automobilní a lodní. Důvodem použití hliníkových slitin je jeho nízká hmotnost a mechanické vlastnosti, zejména při nízkých teplotách. U letadla Airbus A340 tvoří hliníkové slitiny přibližně 60 tun z jeho celkové váhy 90 tun. U automobilů lze nalézt součásti z hliníkových slitin v interiéru (volantové kolo, ramena pedálů, ramena zrcátek, výztužné sloupky) i exteriéru (kryt motoru, blok motoru, písty, kola – obrázek 3). Aplikace těchto součástí vede ke snížení hmotnosti automobilu, lepšího využití paliva a snížení emisí CO₂. Díky těmto krokům jsou uspokojeny politicko-enviromentální požadavky. [1], [8]



Obr. 3 Hliníková kola [5]

2 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

Slévárenské slitiny jsou vyráběny buď z hliníku vyrobeného elektrolýzou, do kterého jsou přidány jednotlivé prvky – tzv. slitiny prvního tavení, anebo z recyklovaného hliníkového šrotu – tzv. slitiny druhého tavení. V současnosti je odhadováno, že více než 50 % odlitků z hliníku je vyrobeno z hliníkového šrotu. [3]

Hliníkové slitiny jsou charakteristické jejich nízkou měrnou hmotností, která se pohybuje okolo měrné hmotnosti čistého hliníku v závislosti na jejich hlavních legujících prvcích. K jejich nízké hmotnosti jsou zde také další přednosti, jako například nízké tavicí teploty, nepatrná rozpustnost plynů s výjimkou vodíku, vynikající slévárenské vlastnosti zejména blízko eutektickému složení 11,7 % křemíku, dobrá obrobitelnost a povrch odlitku, dobrá odolnost vůči korozi, dobrá elektrická a tepelná vodivost. Nevýhodou je objemové smrštění, které se tvoří během tuhnutí. Objemové smrštění se vyskytuje zejména u slitin s 3,5-8,5 % křemíku. Při navrhování formy musí být brán v potaz koeficient smrštění kovu, aby bylo dosaženo rozměrové přesnosti odlitku. Dále se musí předejít trhlinám za tepla a porozitě vlivem stahování. Při volbě konkrétní slitiny s daným chemickým složením se musí dbát na základní tři parametry, které jsou [3], [9]:

- Slévatelnost
- Mechanické vlastnosti
- Užité vlastnosti

Slévatelnost hliníkových slitin se určuje nalitím slitiny do speciální formy, kde se poté vyhodnocuje zabíhavost, tendence ke vzniku trhlin za tepla a vzniku staženin. Slévárenské vlastnosti jsou závislé na chemickém složení slitiny a intervalu tuhnutí. [3]

Nejlepších mechanických vlastností lze dosáhnout především tepelným zpracováním (u slitin, kde je tepelné zpracování možné). V leteckém a kosmickém průmyslu jsou kladeny ty nejvyšší požadavky na kvalitu odlitků. Této kvality se dosáhne, jestliže je přesně hlídán proces tavení a lití kovu, množství vměstků v tavenině, očkování a modifikace eutektika. V mnoha slévárnách dosahují i běžné komerční odlitky velmi vysoké kvality. To je způsobeno dodržováním předepsaných postupů a neustálého vylepšování technologie. Dnešním cílem sléváren je nastolení a udržení určité kvality odlitků. [3], [10]

Slévárenské slitiny pro běžné užití jsou vybírány podle charakteristik, jako jsou [3]:

- Mechanické vlastnosti
- Obrobitelnost
- Odolnost vůči korozi

Slévárenské slitiny pro speciální použití jsou rozdělovány dle jejich jedinečných vlastností [3]:

- Odolnost za vysokých teplot
- Nízký koeficient tepelné roztažnosti
- Pro výrobu ložisek (slitiny legované cínem)

Slitiny obsahují základní prvek (u hliníkových slitin hliník), hlavní přísadový prvek, vedlejší přísadové prvky a doprovodné prvky. Hlavní přísadový prvek je rozhodující pro vlastnosti dané slitiny a jeho obsah je po základním prvku nejvyšší. Mezi tyto prvky patří křemík, měď a hořčík. Výjimečně zinek nebo mangan. Dle těchto prvků jsou následně odvozeny také názvy slitin [7]:

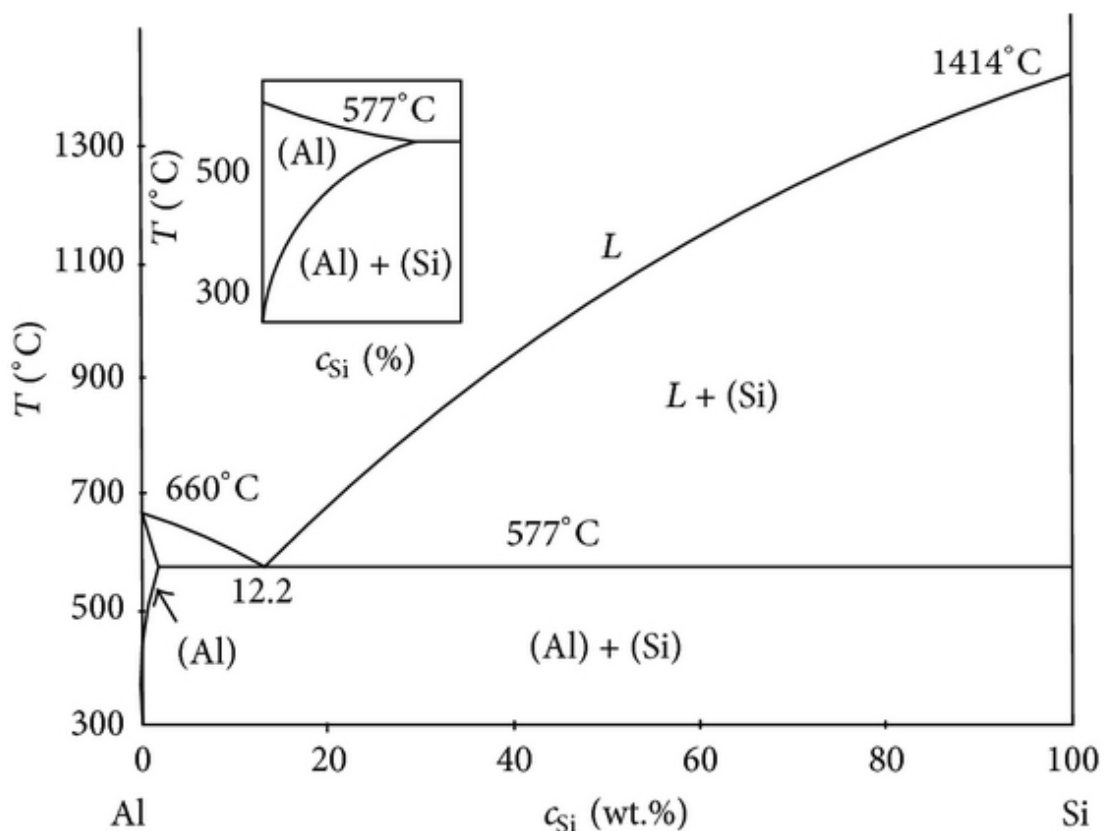
- Slitiny Al – Si - silumin
- Slitiny Al – Cu - duraluminium
- Slitiny Al – Mg - hydronalium

Vedlejších přísadových prvků může být v dané slitině více. Ovlivňují některé mechanické vlastnosti, strukturu, obrobitelnost, a především umožňují tepelné zpracování. Vedlejší prvek, který nejvíce ovlivňuje vlastnosti slitiny, pak rozděluje slitiny do dalších skupin. U skupiny siluminů je to např. Al-Si-Mg, Al-Si-Cu apod. [7]

Doprovodné prvky se dostanou do taveniny ze vsázkových surovin, vyzdívek, tavicích přípravků na úpravu taveniny, anebo náradí. Nejsou tedy přidávány do taveniny záměrně. Jejich obsah je omezen horní přípustnou hranicí, jelikož při vysokém obsahu mají negativní vliv na slévárenské, chemické či mechanické vlastnosti. [7], [10]

2.1 Slitiny Al-Si

Odlitky ze siluminů představují 85-90 % z celkového množství hliníkových odlitků. Binární slitiny se používají nejčastěji jako podeutektické a eutektické. Na obrázku 4 je binární diagram Al-Si. [3], [7]

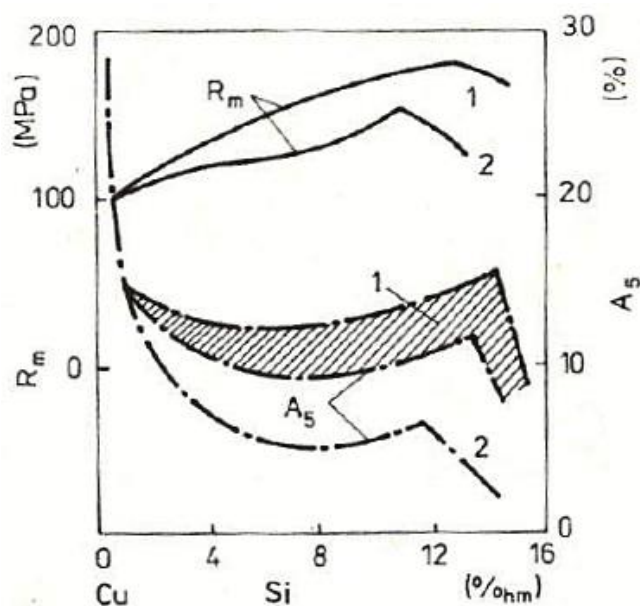


Obr. 4 Binární diagram Al-Si [11]

Obecně se využívají tam, kde je zapotřebí dobrá slévateľnost a odolnost vůči korozi. Hlavním legujícím prvem je zde křemík. Proměnlivá rozpustnost křemíku v hliníku v závislosti na teplotě vedla ke snaze zlepšit pevnostní charakteristiky binárních slitin vytvrzováním. Při těchto pokusech se ovšem zjistilo, že už při procesu ochlazování z teploty rozpouštěcího žhání se částice křemíku vylučují z tuhého roztoku α . Proto nelze tepelné zpracování u binárních slitin použít. Z původně binárních slitin se tak vyvinuly vícesložkové slitiny s různými oblastmi použití. [1], [12]

V porovnání s vlastnostmi čistého hliníku, přítomnost křemíku velmi zlepšuje zabíhavost, tekutost a obecně všechny slévářenské vlastnosti. Závislost R_m a A_5

na obsahu křemíku ve slitinách Al-Si lze vidět na obrázku 5. Jeho obsah bývá obecně 5 až 25 % a v závislosti na jeho množství se mění také plastické vlastnosti. Kromě křemíku zlepšují původní vlastnosti binárních slitin také měď (do 5 %), hořčík (do 2 %), zinek (do 3 %), mangan (do 3 %), chrom, kobalt, nikl, molybden, berylium, zirkonium, sodík a stroncium (do 0,02 %) – jejich funkcí je namodifikovat slitinu a fosfor (do 0,01 %). Někdy se používá také železo (do 3 %), jelikož částečně zvyšuje žárupevnost. Ovšem negativní vliv má na plastické i pevnostní charakteristiky a jeho obsah by měl být do 0,7 %. Nepříznivé účinky železa odstraňují prvky jako kobalt, chrom, molybden a nikl. Měď působí kladně na zvýšení pevnostních vlastností slitin při vytvrzování, ale současně snižuje odolnost proti korozi. Podobně jako měď funguje hořčík. Leguje se jím kvůli zvýšení pevnostních charakteristik vytvrzováním. Jeho účinnost není tak vysoká, jako u mědi, ovšem jeho pozitivní vlastností je nesnížení odolnosti vůči korozi. Titan a bor působí ve slitinách Al-Si jako krystalizační zárodky a využívají se tak pro zjemnění struktury. [10], [12]



Obr. 5 Závislost R_m a A_5 na obsahu křemíku ve slitinách na bázi Al-Si
(1 – modifikovaný, 2- nemodifikovaný) [12]

Normalizované slitiny na bázi Al-Si lze dle legujících prvků rozdělit takto [12]:

- a) Al-Si-Mn
- b) Al-Si-Mg
- c) Al-Si-Cu
- d) Al-Si-Ni-Cu-Mg-Mn

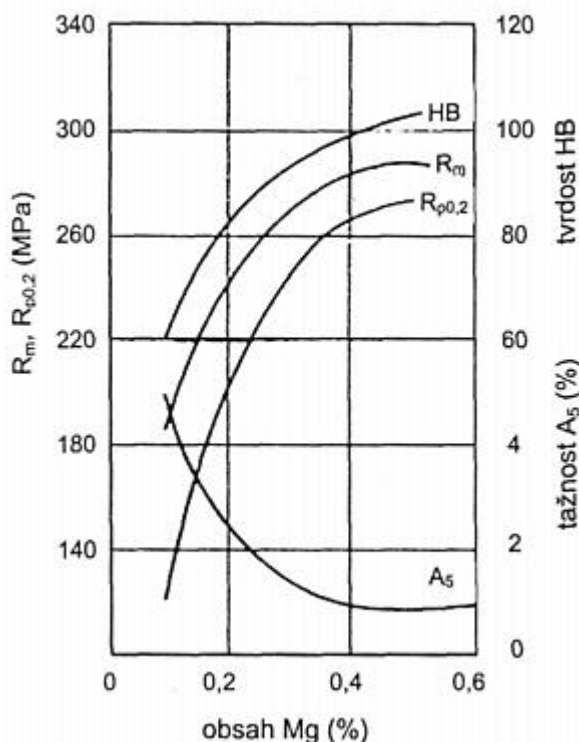
2.1.1 Slitiny Al-Si-Cu

Nejvíce používaná skupina hliníkových slitin, která dominuje především v automobilovém průmyslu. Jedná se o slitiny s obsahem křemíku 6-13 % (převážně ale podeutektické) a 1-5 % mědi. Jak už bylo poznamenáno dříve, měď snižuje odolnost proti korozi – nemožnost použití odlitků v mořské vodě. Pro automobilový průmysl je ovšem obvykle dostačující. Výhodou je snížení stahování kovu při tuhnutí a zlepšení nepropustnosti odlitku. Obrobitelnost se s přidavkem mědi významně zlepšuje. U slitin s vyšším obsahem křemíku se zlepšuje také zabíhavost. Ke zvýšení mechanických vlastností se doporučuje očkování – zjemnění primárního zrna. Tepelné zpracování se nevyužívá, jelikož s přítomností mědi dochází k samovolnému vytvrzování odlitků během několika dní. Tyto slitiny jsou vhodné zejména pro výrobu složitých odlitků litých pod tlakem a také pro gravitační odlévání do kokil. [7], [10] Příklady některých slitin:

- AlSi5Cu – univerzální slitina; střední pevnost za normálních teplot; špatná odolnost vůči korozi; použití pro motorové odlitky (hlavy válců), strojní díly a odlitky pro elektrotechniku. [7]
- AlSi9Cu – nejčastěji používaná slitina pro tlakové lití; střední mechanické hodnoty; dobrá pevnost za vyšších teplot; střední odolnost proti korozi; doporučuje se zjemnění primárního zrna a při pomalém ochlazení modifikace; použití pro automobilový průmysl (skříně, bloky, hlavy válců atd.), elektrotechnický průmysl a domácí spotřebiče. [7]

2.1.2 Slitiny Al-Si-Mg

Tyto slitiny jsou podeutektické s obsahem hořčíku 0,25-0,45 % (někdy až 0,7 %). Slitiny mají v litém stavu pouze průměrné mechanické vlastnosti. Závislost mechanických vlastností na obsahu hořčíku u vytvrzené slitiny AlSi9 lze vidět na obrázku 6. Hořčík se zde vylučuje jako fáze Mg₂Si. Díky hořčíku je možné provádět precipitační vytvrzování (rozpouštěcí žhání při teplotě 535±5 °C a umělé stárnutí při teplotě 160-170 °C) a tím získat výborné mechanické vlastnosti. Dle procentuálního obsahu křemíku se dělí na dva typy, a to AlSi7Mg a AlSi10Mg. Slitiny blíže eutektickému složení mají lepší svařitelnost a celkově také slévárenské vlastnosti. Odlitky z těchto slitin se používají jako velmi namáhané součásti, především v leteckém a automobilním průmyslu. Odlévají se gravitačně do pískových nebo kovových forem. Lze je odlévat také pod tlakem. [7], [12]



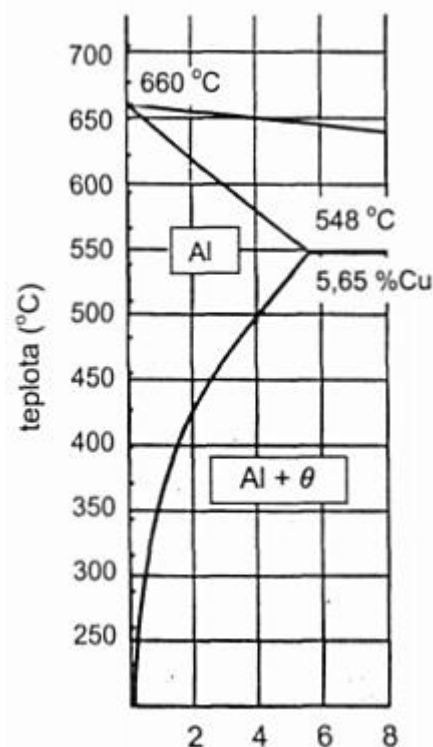
Obr. 6 Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si9 po vytvrzení [7]

Příklady některých slitin:

- AlSi7Mg0,3 – vysocepevná slitina; dobrá tažnost a houževnatost; dobré slévárenské vlastnosti; dobrá odolnost vůči korozi; dobrá svařitelnost i obrobitelnost; vytvrditelná slitina; vhodné provádět očkování a modifikaci eutektika; použití pro letecký a raketový průmysl (díly motorů, podvozky). [7]
- AlSi7Mg0,6 – slitina s nejvyššími mechanickými vlastnostmi u slitin typu Al-Si; vlastnostmi a použitím podobná jako slitina AlSi7Mg0,3; použití pro odlitky s požadavky na vysokou pevnost a houževnatost (letecký průmysl). [7]
- AlSi10Mg – mírně podeutektická slitina; obsah doprovodných prvků i nečistot je velmi nízký; pro všechny technologie odlévání; nutno provést modifikaci; výborné slévárenské a technologické vlastnosti; dobrá odolnost proti korozi; používá se ve vytvrzeném stavu; použití pro tvarově složité, tenkostěnné a odlitky s vysokým nárokem na pevnost i houževnatost – motorové díly, brzdové čelisti, klikové skříně. [7]

2.2 Slitiny Al-Cu

Slitiny Al-Cu jsou v porovnání se slitinami Al-Si charakteristické vyššími pevnostními vlastnostmi za zvýšených teplot a patří k vysokopevným slitinám hliníku. Tažnost a lomová houževnatost je dvojnásobná v porovnání se slitinami Al-Si. Pevnost dosahuje hodnot nad 400 MPa. Na druhou stranu mají nižší odolnost proti korozi, jsou náchylné na vznik trhlin a slévárenské vlastnosti jsou také špatné. Slévárenské vlastnosti se dají zlepšit vyšším obsahem křemíku, ovšem na úkor snížení pevnostních vlastností. Na obrázku 7 lze vidět výřez rovnovážného diagramu Al-Cu. Normalizované slitiny obvykle obsahují 4-5 % mědi, do 0,3 % titanu pro zjemnění primárního zrna, hořčík do 0,35 %, který zvyšuje pevnost nebo mangan do 0,5 %. Pro získání lepších mechanických vlastností lze do slitin přidat další prvky jako např. nikl nebo stříbro. Právě slitiny se stříbrem mají po vytvrzení mimořádně vysoké mechanické vlastnosti při pokojové i zvýšené teplotě. Použití pro odlitky s vysokou pevností a při práci za vysokých teplot – hlavy válců, turbíny, převodové skříně. [7], [12]

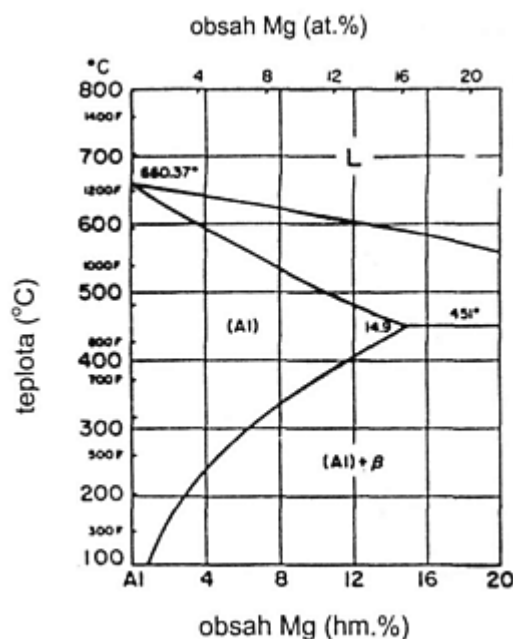


Obr. 7 Výřez rovnovážného diagramu Al-Cu [7]

2.3 Slitiny Al-Mg

U slitin na bázi Al-Mg je hlavním legujícím prvkem hořčík o obsahu zpravidla 9-12 %. Čím vyšší je obsah hořčíku, tím širší je dvoufázové pásmo tuhnutí slitiny a tím se zhoršují slévárenské vlastnosti. Výřez rovnovážného diagramu Al-Mg lze vidět na obrázku 8. Slitiny se dělí na 3 základní typy, slitiny s 3, 5 a 9 % Mg. Podobně jako u slitin Al-Cu lze slévárenské vlastnosti zlepšit vyšším obsahem křemíku. Křemík ovšem snižuje tažnost, proto se udržuje na co nejnižší hodnotě. Při tavení se tvoří velké množství oxidů MgO, také trpí velkým sklonem k naplynění. Sklon k naplynění a tvorbě oxidů lze snížit přísadou berylia. Hodnoty mechanických vlastností jsou průměrné až podprůměrné. Pevnosti nedosahují hodnot jako u slitin Al-Si a při teplotě nad 100 °C se mechanické vlastnosti zhoršují. Vynikající vlastností těchto slitin je jejich výborná obrobiteľnosť a leštitelnosť. Dajú sa dobre povrchově

upravit. Další pozitivní vlastností je výborná odolnost proti korozi, zvláště v mořské vodě a lehce alkalickém prostředí. Díky jejich pozitivním vlastnostem se využívají v lodním průmyslu, potravinářství a chemickém průmyslu. Také slouží pro výrobu dekorativních předmětů. Rozšíření těchto slitin je ovšem nízké. [7], [12]



Obr. 8 Výřez rovnovážného diagramu Al-Mg [7]

2.4 Slitiny Al-Zn

Slitiny s obsahem zinku 5-7 % a do 1 % hořčíku. Mají dobrou odolnost proti korozi a vysokou rozměrovou stabilitu. Lze je dobře obrábět a pájet. Může docházet ke korozi pod napětím. Slévárenské vlastnosti jsou průměrné až podprůměrné. Trpí sklonem k praskání za tepla a vznikem staženin. Slitiny se samovolně vytvrzují za studena. Po uplynutí přibližně 20-30 dní může být pevnost v tahu okolo 250 MPa a tažnost přes 5 %. Přidáním a kombinací vhodných legur je možné dosáhnout pevností až kolem 500 MPa. Příkladem slitin Al-Zn je slitina AlZn5Mg. [7]

Na závěr této kapitoly *Slévárenské slitiny hliníku* je tabulka 1 se zástupci jednotlivých skupin slitin a srovnání jejich základních vlastností.

Tab. 1 Charakteristiky slévarenských Al-Si slitin [3]

Vysvětlivky: značení slitin dle americké normy AA, v závorce dle chem. složení

P – lití do písku, TF – trvalá forma, TL – tlakové lití, 1 – nejlepší, 5 – nejhorší

Slitina	319.0 (AlSi5Cu)	332.0 (AlSi9Cu3Mg)	355.0 (AlSi5Cu1Mg)	A356.0 (AlSi7Mg)	A357.0 (AlSi7Mg0,6)	380.0 (AlSi8Cu3Fe)	390.0 (AlSi17Cu4Mg)	413.0 (AlSi11)	443.0 (AlSi5)
Způsob lití	P, TF	TF	P, TF	P, TF	P, TF	TL	TL	TL	TF
Odolnost proti trhlinám	2	1	1	1	1	2	2	1	1
Tlaková těsnost	2	2	1	1	1	1	2	2	1
Zabíhavost	2	1	1	1	1	2	2	1	2
Sklon k staženinám	2	2	1	1	1	-	-	-	1
Odolnost proti korozi	3	3	3	2	2	5	2	2	2
Obrobitelnost	3	4	3	3	3	3	4	4	5
Svařitelnost	2	2	2	2	2	4	2	4	1

3 METALURGIE PODEUTEKTICKÝCH SLITIN AL-SI

Při tavení vsázky v pecním agregátu dochází k různým fyzikálně chemickým pochodům, interakcím mezi kovem a různými materiály. Mezi tyto materiály patří vyzdívky pecí, slévárenské nářadí, plynná atmosféra v peci, tavidlo, různé chemické přípravky a další. Mezi pochody patří zejména oxidace, dezoxidace, naplynění nebo odplynění, vypařování vsázky, legování a odlévání. Dochází tak ke změně chemických, fyzikálních, mechanických a dalších vlastností taveniny. Jelikož výsledný odlitek nemůže mít lepší kvalitu, než byla kvalita taveniny před odléváním, je velmi důležité dodržovat základní pravidla tavení a provádět správně operace, které zajistí vysokou metalurgickou kvalitu roztaveného kovu. Mezi tyto konečné operace zajišťující výbornou kvalitu kovu patří očkování, modifikace, odplynění a rafinace kovu. Tyto operace budou proto detailněji rozebrány v následujících kapitolách. [1], [7], [10]

Mezi obecné základní zásady tavení patří [7]:

- Jestliže je nová vyzdívka nebo nový kelímek, tak musí být řádně vysušen.
- Vsázkové suroviny musí být suché, čisté a nejlépe předeštěné. Žíhání vsázkových surovin se má provádět především při dosazování materiálu do již nataveného kovu, tak aby byla odstraněna veškerá vlhkost.
- Vsázkové suroviny skladovat v suchém prostředí.
- Před tavením vyčistit pec. Odstranit z kelímku zbytky chemických přípravků, strusky a oxidů Al_2O_3 .
- Tavit rychle. Vyhnout se polotuhému stavu vsázky, kvůli naplynění a vzniku oxidických vměstků.
- Tavidla a chemické přípravky skladovat na suchém místě v uzavřené nádobě.
- Tavící a rafinační přípravky ponořit až na dno lázně kovu. Následně promíchat, vyčkat na proběhnutí reakce. Po odstátí stáhnout zbytky přípravků a vzniklou strusku z hladiny kovu.
- Železné nářadí musí být řádně natřeno příslušným nátěrem a předeštěno.
- Před přidáním legur, očkovačů a modifikačních prostředků se musí stáhnout struska.

- Zbytečně nepřehřívat taveninu. Při přehřátí nad 800 °C dochází k naplynění taveniny. Taveninu přehřát pouze na teplotu, která je potřebná pro použití různých chemických přípravků a také k vyrovnání tepelných ztrát při přepravě taveniny z pece nebo pánve do formy. Licí teplota závisí na daném chemickém složení, velikosti, složitosti a tloušťce stěn odlitku.
- Během tavení kontrolovat teplotu ponorným teploměrem přímo v tavenině. Teplota nastavená na displeji pece neodpovídá skutečné teplotě taveniny.
- Dle požadované kvality a druhu slitiny provést dokončující metalurgické pochody, jako odplynění, očkování a modifikace. Pořadí operací volit tak, aby se jejich účinky navzájem nevyrušily.

3.1 Modifikace eutektika

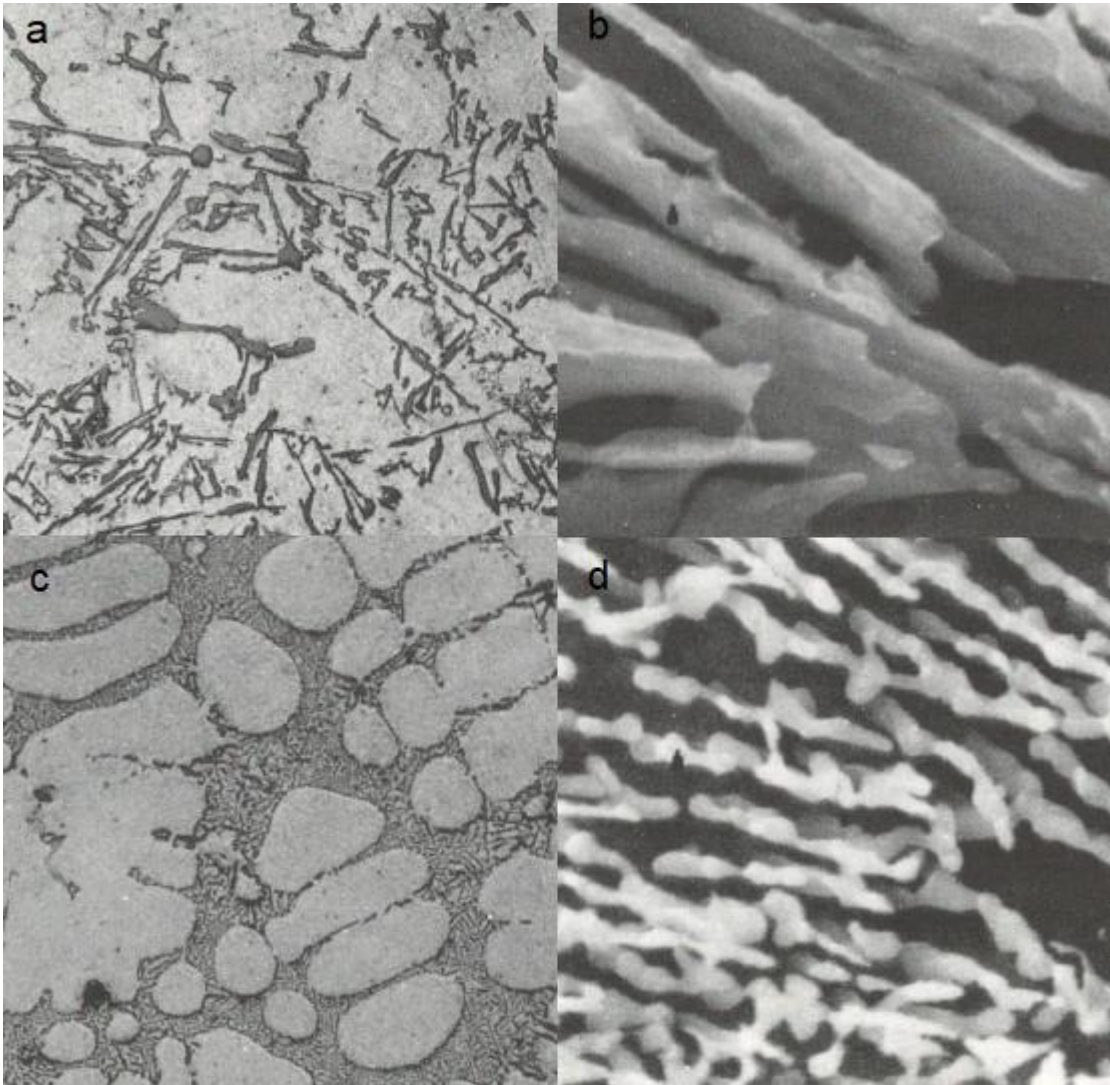
Mikrostruktura slitin Al-Si závisí hlavně na chemickém složení a licím procesu. Rychlé ochlazení kovu u tlakového lití způsobí jemnou eutektickou strukturu, malé dendritické buňky, krátkou vzdálenost větví dendritů a také redukuje velikost zrna. U lití do kokil a lití do písku se setkáme s pomalým ochlazováním kovu ve formě. Takový stav vyžaduje použití eutektických modifikátorů jako je stroncium nebo sodík, které zaručí jemné rozložení eutektického křemíku. [3], [7], [13]

V roce 1921 Američan Aladar Pacz objevil, že slitiny Al-Si s obsahem křemíku 5 až 15 % mohou být upraveny fluoridem sodným za účelem lepší tažnosti a obrobitelnosti. Tento objev se stal velmi významným pro slévárny hliníkových slitin a vznikly tak nové moderní materiály s vysokými mechanickými vlastnostmi. Při přidání malého množství sodíku do taveniny byla na následných metalografických výbrusech jemná, globulární morfologie eutektického křemíku, namísto velkých destiček s ostrými hranami a konci. Po pozdějším vynálezu elektronového mikroskopu se zjistilo, že viděná globulární struktura je koncem křemíkových vláken, které spolu tvoří propojenou síť. Pohledy na výbrusy pod optickým a elektronovým mikroskopem lze vidět na obrázku 9. Právě změna morfologie křemíku při tuhnutí je podstatou modifikace. [3]

Základní fakta u modifikace jsou [3]:

- Je známo několik prvků, které způsobují modifikaci. Ty jsou zahrnuty v IA a IIA sloupci periodické tabulky. Také to jsou prvky vzácných zemin. Z těchto všech je k vytvoření jemné, rovnoměrné a vláknité struktury nejefektivnější sodík.

- Modifikátory jsou účinné při velmi nízké koncentraci (u Na 50-100 ppm, u Sr 200-400 ppm).

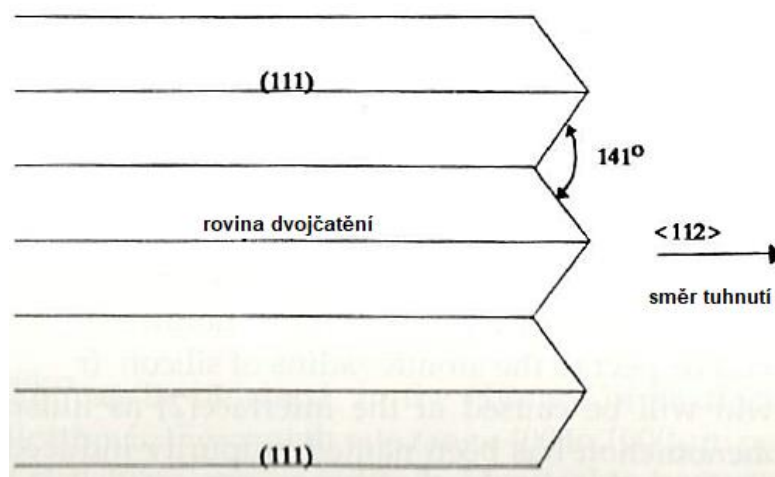


Obr. 9 Mikrostruktura slitiny AlSi7Mg [3]
a – nemodifikovaná, optický mikroskop (zvětšeno 100x)
b – nemodifikovaná, elektronový mikroskop
c – modifikovaná, optický mikroskop (zvětšeno 100x)
d – modifikovaná, elektronový mikroskop

3.1.1 Růst eutektického křemíku

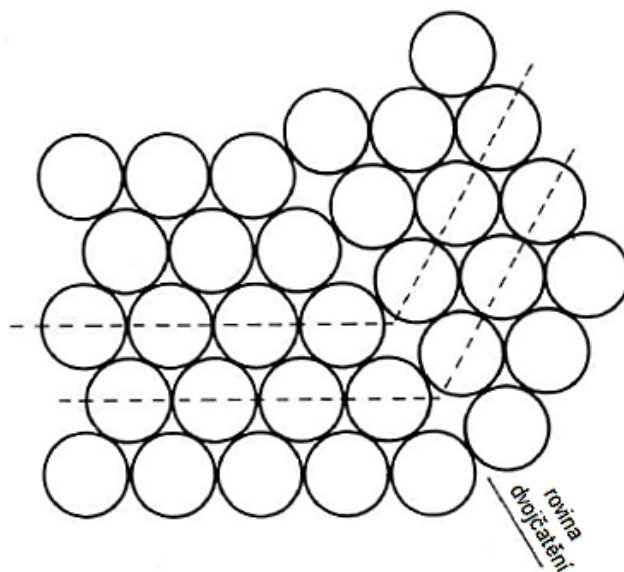
Křemík je nekovový prvek a tuhne tzv. tvárným způsobem. To znamená, že tvoří krystaly, které jsou ohraničeny definovanými krystalografickými rovinami a obvykle mohou růst pouze určitými krystalografickými směry. [3]

Růst křemíku u nemodifikované slitiny je zobrazen na obrázku 10. Samotný krystal zde může růst pouze ve směru $\langle 112 \rangle$. To způsobuje tvorbu velkých a plochých stěn krystalu z rovin $\langle 111 \rangle$. [3]



Obr. 10 Schéma růstu jehlicovitého křemíku v tavenině [3]

Velmi důležitou vlastností u krystalizace křemíku je snadná tvorba dvojčat. Dvojčata jsou krystalografické poruchy, které vznikají, když se v krystalu velké skupiny atomů rovnoměrně posunou přes rovinu dvojčatění. Schéma je zobrazeno na obrázku 11. U křemíku se dvojčata snadno tvoří přes roviny $\langle 111 \rangle$. Modifikovaná slitina obsahuje mnohem větší množství dvojčat, které tvoří právě požadovanou vláknitou strukturu. Tato vlákna křemíku jsou krystalograficky nedokonalá a každá nedokonalost na povrchu má za následek ohýbání, křivení a dělení na jemnou mikrostrukturu. Vzniklé roviny u nemodifikovaného kovu jsou díky své krystalografické dokonalosti omezeny v tomto tvarování, z tohoto důvodu tvoří jen hrubé jehlicovité útvary. [3]



Obr. 11 Dvojčatění v krystalu [3]

3.1.2 Účinnost modifikace

Účinnost různých prvků jako modifikátoru, se hodnotí podle počtu dvojčat, který je prvek schopen vyprodukovat ve vláknech křemíku. Pět různých prvků, které jsou schopny modifikace a velikosti mezer mezi dvojčaty jsou uvedeny v tabulce 2. Z tabulky je zřejmé, že sodík produkuje nejvíce dvojčat a tvoří nejjemnější modifikovanou strukturu již při velmi malé koncentraci. Z tohoto hlediska působí jako ideální prvek pro modifikaci. Vstupují sem ovšem také další faktory jako je stabilita v tavenině, tlak par a snadné rozpouštění. Tyto a další faktory hrají roli při výběru modifikátoru u jednotlivých slitin a používané technologie. Výhody a nevýhody nejpoužívanějších modifikátorů budou rozebrány v dalších kapitolách. [3]

Tab. 2 Vzdálenost dvojčat u modifikace různých prvků [3]

Struktura	Modifikátor	Mezera mezi dvojčaty při konstantní rychlosti tuhnutí [nm]
jehlicovitá	žádný	400
vláknitá	Na	5
vláknitá	Sr	30
vláknitá	Ba	30
vláknitá	Ca	100
vláknitá	Yb	50

3.1.3 Modifikace sodíkem

Sodík se do taveniny aplikuje ve formě modifikační soli, exotermické tablety, nebo jako kovový sodík ve vakuově uzavřené hliníkové kapsli. Je velmi reaktivní, a proto musí být zabalen tak, aby se zabránilo oxidaci a zvlhnutí. Samotný kokový sodík se skladuje pod petrolejem a byl takto ve slévárnách používán. Metoda byla ovšem nepraktická a z petroleje se mohl do taveniny dostat vodík. Hliníkové předslitiny se sodíkem se k účelu modifikace nepoužívají z důvodu velmi nízké rozpustnosti sodíku v hliníku (okolo 0,01 %). Dávkuje se tak, aby výsledná slitina obsahovala 50 až 100 ppm sodíku. Obecně platí, že čím blíže je slitina eutektickému bodu (čím více křemíku), tím je potřeba více sodíku. Modifikace sodíkem se doporučuje pro silnostěnné odlitky. [3], [7]

Při aplikaci je sodík ponořen do taveniny děrovaným zvonem. Lehké míchání zvonem urychlí průběh rozpuštění. Nadměrné míchání a pohyb kovu může vnést do taveniny vodík. Rozpuštění sodíku v tavenině je prakticky okamžité, ovšem využití je pouze 20 až 30 %. Reakce je velmi bouřlivá (bublání a hoření na povrchu taveniny). Účinek modifikace je okamžitý. [3], [7]

Hlavní nevýhodou sodíku je odeznívání modifikačního účinku. K odeznívání dochází především vypařováním. Požadovaný obsah sodíku je 50 až 100 ppm, proto je nutné provést lití během 30 až 40 minut po modifikaci. Odeznívání velmi záleží také na dalších okolnostech. Míchání a pohyb taveniny urychluje odeznívání sodíku, a proto se například odplyňování po modifikaci nedoporučuje. Jinak bude odeznívat sodík také v elektrické indukční peci a odporové peci. V EIP se tavenina neustále pohybuje, takže odeznívání bude rychlejší. Kvůli odeznívání sodíku z taveniny je v podstatě nemožné využívat již předmodifikované ingoty, tak jak je to možné u stroncia. V případě poklesu sodíku na nepřijatelnou hodnotu se musí tavenina opětovně namodifikovat. Po modifikaci sodíkem nelze dále taveninu upravovat přípravky na bázi chloru nebo fluoru. Sodík má k těmto prvkům vysokou afinitu a ruší se tak jeho modifikační účinek. Každá slévárna by si proto měla vyzkoušet a stanovit svůj vlastní technologický postup přípravy taveniny v závislosti na tom, jakým vybavením a přípravky disponuje. [3], [7]

3.1.4 Modifikace stronciem

Na rozdíl od sodíku se stroncium používá výhradně ve formě předslitín s hliníkem. Další možností jsou již předmodifikované ingoty, které se pouze roztaví. Nejběžnější předslitiny jsou:

- AlSr_{3,5}
- AlSr₁₀
- AlSr₁₀Si₁₄
- Sr₉₀Al₁₀

Čisté stroncium se jako modifikátor někdy používalo, ale je velmi reaktivní se vzduchem a vodní párou. Předslitiny, které obsahují pod 45 % Sr, nejsou na vzduchu reaktivní a nejsou pro ně předepsány žádné speciální podmínky pro skladování. Slitina Sr₉₀Al₁₀ musí být skladována v uzavřených vakuových nádobách, jelikož reaguje se vzduchem podobně jako čisté stroncium, pouze v menší míře. Aby bylo dosaženo plně modifikované struktury, slitina musí obsahovat 200 ppm Sr. Pro eutektické slitiny je potřeba až 400 ppm Sr. Jelikož je stroncium slabší modifikátor než sodík, doporučuje se pro tenkostěnné odlitky lité do kokil, anebo při lití do písku. U silnostěnných odlitků s dlouhou dobou tuhnutí by úroveň modifikace nebyla dostatečná. [3], [7]

Aplikace předslitiny se stronciem je oproti sodíku tichá a nehrozí vnesení vodíku do taveniny. Tyč z předslitiny se ponoří do taveniny a nechá se rozpustit. Následuje promíchání taveniny a prodleva přibližně 5 až 10 minut před zahájením lití. Prodleva je důležitá z hlediska náběhu modifikačního účinku stroncia. Účinek se dokonce po určité době ještě zlepšuje. Využití stroncia je vysoké (přibližně 90 %). [3], [7]

Odeznívání stroncia z taveniny je značně pomalejší než u sodíku a je považováno za polotrvalý modifikátor. Stroncium vyprchá převážně oxidací. Jestliže je po modifikaci hodnota 250 ppm Sr, během 9 hodin klesne koncentrace na poloviční hodnotu a během dalších 7 hodin na hodnotu 30 ppm. Tyto časové hodnoty jsou v porovnání s 30 minutami u sodíku velmi dlouhé. Z tohoto důvodu je možné využití předmodifikovaných ingotů a stroncium zůstane v tavenině dokonce i po přetavbě vratného materiálu. Stejně jako u sodíku záleží snižování obsahu stroncia na dalších okolnostech, také nesmí být po modifikaci použity přípravky obsahující chlor nebo fluor. [3], [7]

Kombinovaná modifikace sodíkem a stronciem

Prvky lze používat pro modifikaci společně. Okamžitý účinek sodíku pokryje modifikaci ihned po aplikaci, zatímco stroncium kvůli svému pomalejšímu náběhu modifikačního účinku, zajistí modifikaci po zbytek lití. Mezi těmito prvky není známa jakákoliv interakce, a tak se mohou bez problému využívat. Lze tak najednou odlévat odlitky tlustostěnné na začátku lití a po určité době přejít k lití tenkostěnných odlitků. Bohužel neexistuje modifikační prostředek, který by obsahoval oba dva prvky. Proto je nutné pro kombinovanou modifikaci využít oba modifikátory zvlášť. [3], [7]

3.1.5 Modifikace antimonem

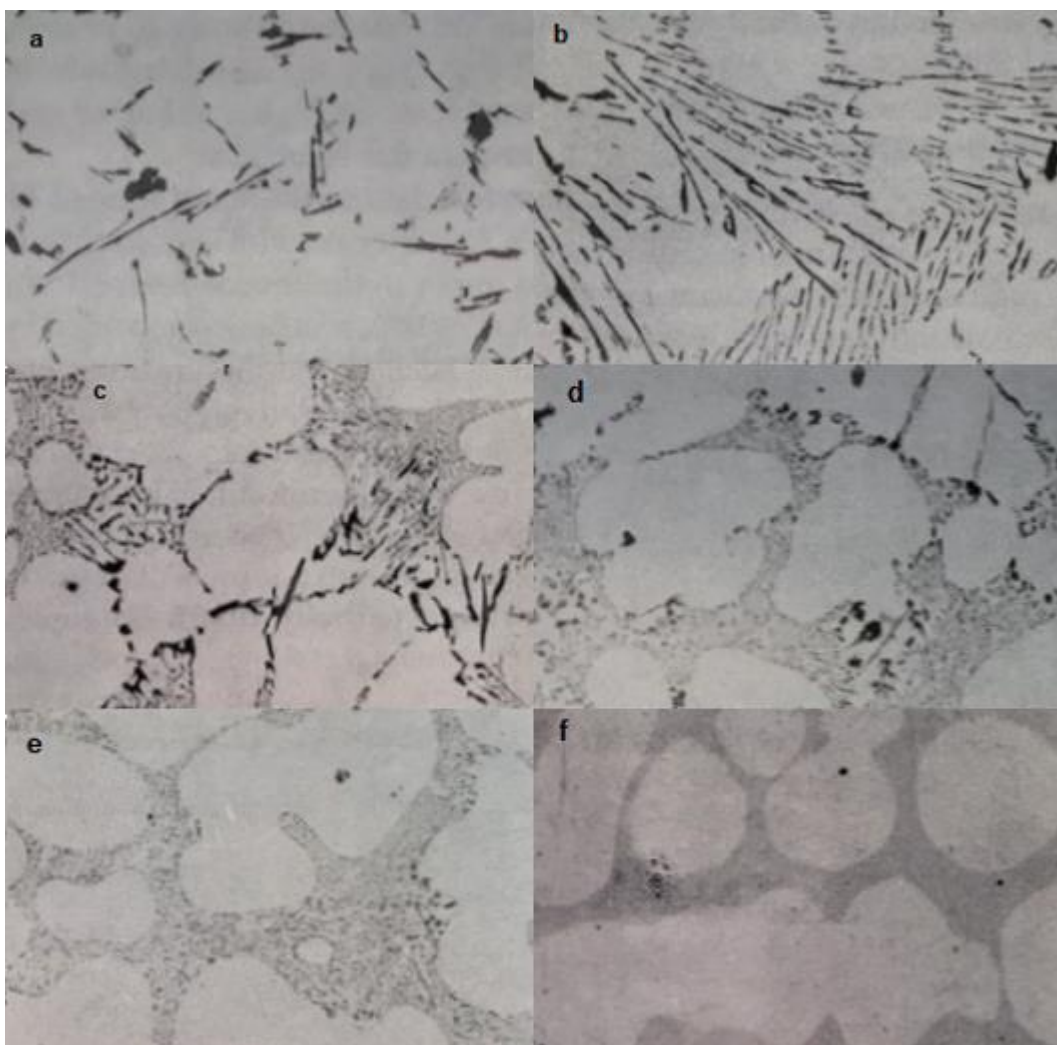
Antimon je toxický prvek, navíc reaguje s rozpuštěným vodíkem v tavenině a tvoří tak vysoce toxický plyn stiban. Z tohoto důvodu se ve slévárnách do taveniny nepřidává a dodává se již obsažený v předmodifikovaných ingotech v množství 100-300 ppm. Antimon je v tavenině velmi stabilní a jeho vyprchání je téměř nulové. Antimon ruší modifikační účinek sodíku a stroncia, a proto se nedoporučuje společné používání těchto modifikátorů. Použitím antimonu nevznikne jemná vláknitá struktura jako je tomu u sodíku nebo stroncia, ale pouze struktura s jemným lamelárním křemíkem. [3], [7]

3.1.6 Quench modifikace

K dosažení modifikované struktury nemusí být nutně použito chemických modifikátorů. Vlákňité eutektické struktury lze dosáhnout velmi rychlým tuhnutím kovu. Předpoklad takové struktury je tuhnutí rychlostí přibližně 400 až 1000 μm za sekundu. Pod optickým mikroskopem se tato dosažená struktura jeví stejná jako při použití chemických modifikátorů, ovšem při použití elektronového mikroskopu lze vidět, že křemík má formu jako nemodifikovaná slitina a netvoří žádné nebo velmi malé množství dvojčat. Strukturu tvoří extrémně jemná forma nemodifikovaného eutektika, které bylo dosaženo velmi rychlým tuhnutím. V praxi se tato metoda nevyužívá, jelikož jsou chemické modifikátory mnohem účinnější. Výjimkou je technologie tlakového lití, kde jsou časy tuhnutí velmi rychlé a je tak dosaženo jemné struktury i bez použití chemické modifikace. [3]

3.1.7 Působení modifikace na mikrostrukturu

Modifikace pomocí sodíku a stroncia tvoří jemnou vláknitou strukturu. U stroncia nebývá struktura tak rovnoměrná jako u sodíku. Antimon vytváří pouze strukturu lamelární. Na obrázku 12 lze vidět jednotlivé struktury podeutektické slitiny s různým stupněm modifikace. [3]



Obr. 12 Působení modifikace na strukturu (zvětšeno 200x) [3]

*a – nemodifikováno, b – lamelární struktura
c – částečná modifikace, d – absence lamelární struktury
e – vlákna eutektického křemíku, f – velmi jemná struktura*

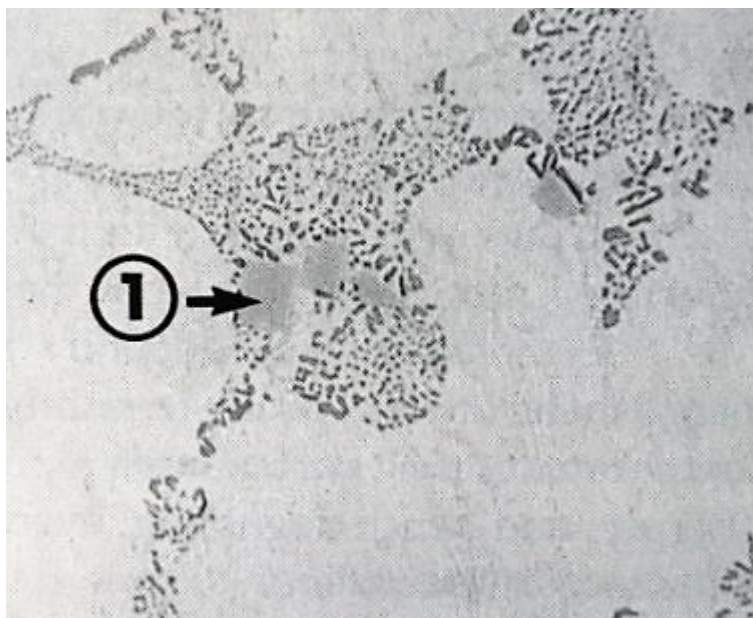
Komerční odlitky budou mít vždy strukturu označenou *a – e*. Struktura označené písmenem *f* se někdy nazývá jako supermodifikovaná a v jiných než laboratorních podmínkách jí nelze dosáhnout. [3]

Mikrostrukturu ovlivňuje zejména následujících pět bodů [3], [7]:

- Typ použitého modifikátoru.
- Nečistoty obsažené v tavenině – negativní vliv má zejména fosfor, a to již při velmi malém obsahu. V řádu několika ppm.
- Množství použitého modifikátoru.
- Doba tuhnutí.
- Obsah křemíku.

3.1.8 Přemodifikování

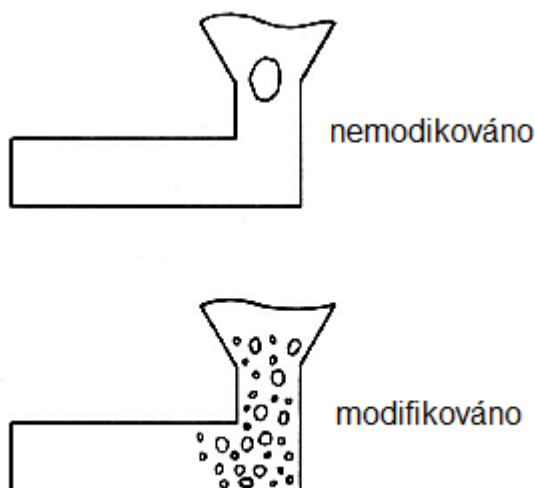
Příliš vysoký obsah modifikátoru má za následek snížení mechanických vlastností slitiny. K přemodifikování dochází při nadměrném obsahu modifikátoru ve slitině. Množství modifikátoru je závislé na obsahu křemíku. Jestliže je ve slitině více modifikátoru, než je potřeba k úplné modifikaci křemíku, vznikají na hranicích zrn hrubé částice vlivem odměšení přebytečného modifikátoru. U sodíku se tvoří intermetalická fáze AlSiNa a u stroncia Al_4SrSi_2 . Tyto hrubé útvary jsou viditelné na obrázku 13. [3], [7]



Obr. 13 Hrubé částice na hranicích zrn u slitiny AlSi7Mg . [3]
Číslo 1 značí fázi Al_4SrSi_2 .

3.1.9 Vliv modifikace na porozitu

Existuje několik názorů na to, jestli má modifikace vliv na obsah vodíku v tavenině, s tím spojené naplynění a tvorba staženin. Bohužel ne všechny se shodují. Nicméně pokusy, které byly provedeny a jsou uvedeny v literárním zdroji [3], uvádí, že sodík ani stroncium nemají vliv na rozpustnost vodíku v tavenině a nezvyšují tak naplynění taveniny. Bylo ovšem prokázáno, že sodík i stroncium mění charakter staženin v odlitku. U slitin, které byly ošetřeny modifikátory, se nevyskytují velké soustředěné staženiny, nýbrž mikrostaženiny rozptýlené do většího objemu. Přitom celkový objem staženin zůstává stejný. Jak se mění charakter staženiny lze vidět na obrázku 14. Tato skutečnost může hrát roli u sléváren, které trápí velké staženiny a cíleně naplňují odlitky speciálními přípravky. [3]



Obr. 14 Změna charakteru staženin modifikací [3]

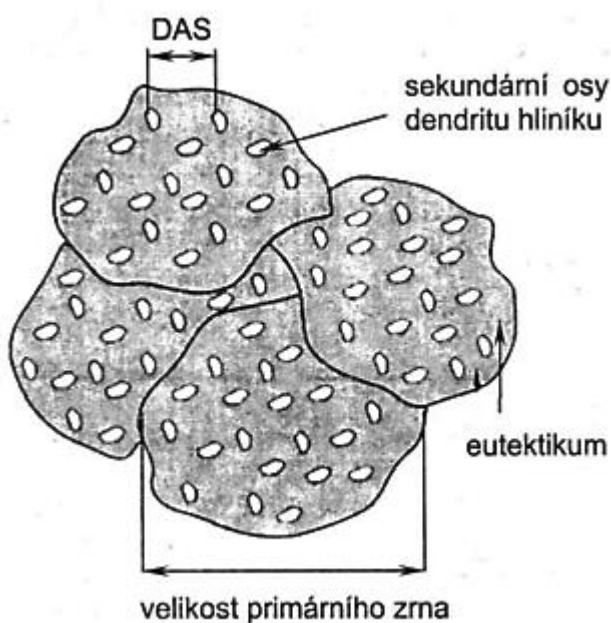
3.1.10 Vlastnosti modifikovaných slitin

Jak již bylo zmíněno, modifikací se ovlivňuje mikrostruktura. Je třeba se zamyslet nad tím, že není důležité, jestli je ve slitině přítomný modifikátor, ale to, jak modifikátor změnil mikrostrukturu. U nemodifikované slitiny působí hrubé jehlicovité desky v mikrostruktuře jako koncentrátoři napětí a tím snižují mechanické vlastnosti. Zaoblené tvary u modifikované struktury tak zvyšují mechanické vlastnosti, a to zejména tažnost (až nad 10 %) a o něco méně pevnost v tahu. [3], [7]

Modifikací se mění také slévárenské vlastnosti. Dle většiny autorů se snižuje zabíhavost. Kladně působí na sklon ke vzniku soustředěných staženin, který snižuje a zvyšuje rozsah mikrostaženin a ředin. Sklon ke vzniku trhlin se snižuje. [7]

3.2 Očkování

Velmi důležitým parametrem u Al-Si slitin je velikost zrn primární fáze, která rozhoduje o jejich vlastnostech. Tento parametr je důležitý zejména u slitin s obsahem křemíku 5 až 7 %. U slitin s vyšším obsahem eutektika není velikost zrna tak důležitá jako modifikace eutektika, od které se poté odvíjí jejich vlastnosti. Dalším velmi důležitým parametrem je hodnota DAS (Dendrite Arm Spacing) neboli vzdálenost sekundárních os dendritů. Pro představu se velikost zrn pohybuje v rozmezí 1-10 mm, hodnota DAS v rozmezí 10 až 150 μm a destičky eutektického křemíku mají délku až 2 mm, nebo průměr do 1 μm u zaobleného tvaru. Na obrázku 15 lze vidět základní strukturní elementy podeutektické slitiny Al-Si. [1], [3], [7]



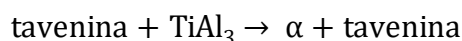
Obr. 15 Základní strukturní elementy podeutektické slitiny Al-Si [7]

Při tuhnutí slitiny je pro nukleaci každého zrna potřeba jeden nukleační zárodek. Zárodky jsou tvořeny z cizích částic, které se vyskytují v tavenině. Díky různorodosti zárodků je každý z nich jinak vhodný pro nukleaci a stávají se aktivními při různých teplotách. Částice, které mají podobnou krystalografickou mřížku jako hliník, se stanou aktivními velmi blízko teplotě krystalizace taveniny, respektive při menším přechlazení taveniny pod teplotu krystalizace. Částice s odlišnou krystalografickou mřížkou potřebují k nastartování mnohem větší přechlazení pod teplotu krystalizace. U tenkostěnných odlitků a odlitků litých do kokil dochází k velmi intenzivnímu chlazení a tím pádem i k aktivaci méně příznivých zárodků. To vede k tvorbě velkého počtu zrn a jemnozrné struktury. U silnostěnných odlitků

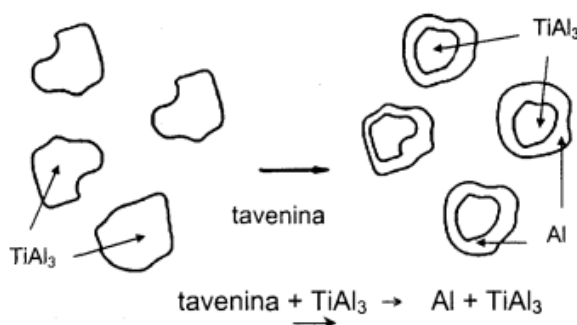
litých do písku je chlazení ovšem pomalé a nedojde tak k nastartování méně příznivých zárodků. Výsledkem je růst pouze malého počtu zrn a hrubozrnná struktura. V tomto případě se musí tavenina předem naočkovat, aby bylo dosaženo jemnozrnné struktury. Očkování spočívá ve vnášení nukleačních zárodků, respektive látek, ze kterých se nukleační zárodky vytvoří. Díky vysokému počtu zárodků vzniká jemnozrnná struktura i při pomalém ochlazování. Parametr DAS, jehož hodnota závisí na rychlosti ochlazování, zůstává stejná, jelikož ochlazování se nemění. Mění se pouze struktura z hrubozrnné na jemnozrnnou. Účinek očkování proto nemá tak zásadní vliv na vlastnosti slitin jako intenzivní ochlazování odlitku. Nicméně očkování potlačuje sklon k tvorbě trhlin a porozitu. [3], [7], [10]

Ke zjemnění zrna se nejčastěji používají přípravky s titanem nebo titanem a borem. Přípravky bývají ve formě očkovacích solí, tablet nebo jako předslitiny Al-Ti nebo Al-Ti-B. [7]

Přípravky s titanem obsahují většinou do 10 % titanu. Titan reaguje s hliníkem a tvoří intermetalické fáze $TiAl_3$. Tato fáze má podobnou krystalografickou mřížku jako hliník, a tak slouží jako vhodný zárodek pro krystalizaci. Fáze $TiAl_3$ reaguje s taveninou při teplotě $665\text{ }^\circ\text{C}$ podle peritektické rovnice [3], [7]:



Částice $TiAl_3$ slouží jako zárodek, který obalí tuhý roztok α a pokračuje tak růst zrna. Schéma nukleace zárodku lze vidět na obrázku 16. V předslitinách s titanem se titan vyskytuje jako fáze $TiAl_3$. Předslitina, která obsahuje velké množství malých částic, bude mít lepší očkovací účinek než předslitina s velkými zárodky o malém počtu. Aby bylo očkování úspěšné, musí tavenina obsahovat alespoň 0,02 až 0,1 % Ti. Účinek očkování předslitin trvá okolo 30 až 45 minut. Zárodky se po této době rozpouští. [1], [3], [7]

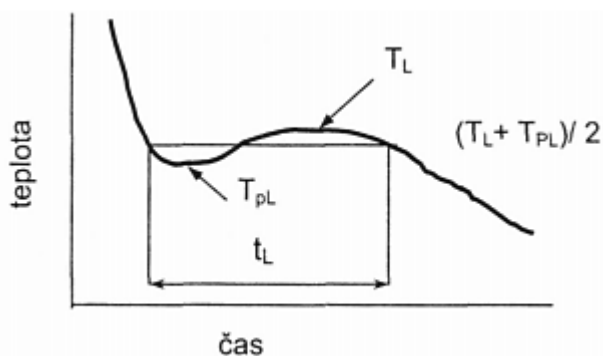


Obr. 16 Nukleace zárodků $TiAl_3$ při peritektické reakci [7]

Při použití přípravků s titanem a borem se dosahuje lepších očkovacích účinků. Samotný bor ovšem očkovací účinek nemá. Tvoří intermetalické fáze s hliníkem a titanem (TiB_2 a $(Ti, Al)B_2$), které se vyskytují na povrchu fáze $TiAl_3$. Tyto částice pak slouží jako nukleační zárodky pro růst zrn. Předslitiny obsahují většinou do 5 % Ti a do 1 % B v různých poměrech. Tyto přípravky se doporučují zejména při lití do pískových forem, jelikož AlB_2 má očkovací účinek již při velmi malém přechlazení a také zde bor velice zpomaluje odeznívání účinku očkování. [1], [7]

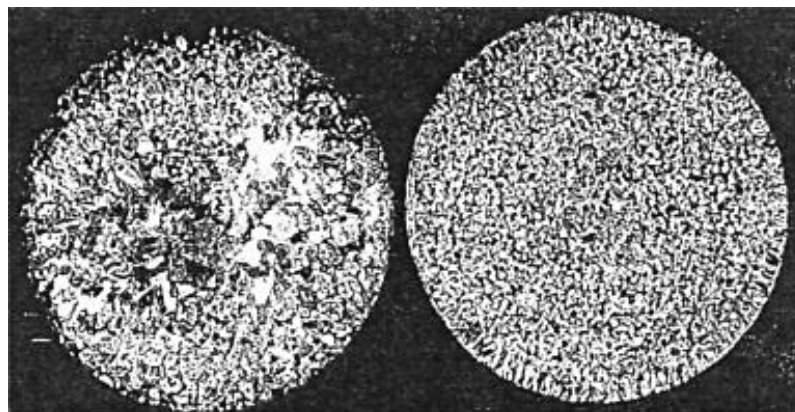
Účinek očkování se hodnotí z údajů z termické analýzy pomocí čísla KF (Kornfeinung) – křivka chladnutí taveniny je na obrázku 17. Druhým způsobem je porovnání vzorků s etalony. Hodnota čísla KF záleží na použitém zkušebním zařízení. Obecně platí, že čím jemnější je struktura, tím vyšší číslo KF bude. Vztah pro výpočet čísla KF je:

$$KF = 11,41 - 0,347 \cdot t_L + 0,66 (T_L - 550)$$



Obr. 17 Křivka chladnutí z termické analýzy pro vyhodnocení čísla KF [7]

Zjemnění zrna má efekt na řadu vlastností. Mezi nejdůležitější patří zvýšení pevnosti a tažnosti, zvýšení těsnosti odlitků vlivem lepšího rozložení staženin, celková zdravotnost odlitku, snížení sklonu ke vzniku trhlin, lepší obrobiteľnosť a zlepšení povrchu po anodické oxidaci. Rozdíl mezi neočkovanou slitinou a slitinou po očkování lze vidět na obrázku 18. [7]



*Obr. 18 Účinek očkování u slitiny AlSi7 [7]
(vlevo neočkováná, vpravo očkováná)*

3.3 Rafinace a odplyňování

Pojem rafinace a odplynění znamená vyčištění a odstranění nežádoucích nečistot, vměstků a prvků z taveniny tak, aby byla zajištěna co nejvyšší kvalita roztavené slitiny. V tavenině se vyskytují různé druhy kovových i nekovových vměstků. Mezi nekovové vměstky patří částice z kelímků, pecí, pánví, zbytky ostřiva, nátěry, postříky nářadí, zbytky taviv a přípravků pro úpravu struktury taveniny, dále jsou to různé oxidy – zde oxid hlinitý Al_2O_3 , nitridy, karbidy a boridy. Mezi kovové vměstky patří předslitiny, intermetalické fáze, které vznikají během tavení a zbytky nerozpuštěných legur. Mezi prvky, které jsou u hliníkových slitin nežádoucí, patří zejména rozpuštěný vodík, který se do taveniny může dostat z atmosféry, špatně vysušeného nářadí, anebo rafinačních solí. Také při velkém přehřátí taveniny, dochází ke zvýšení obsahu vodíku, jelikož rozpustnost vodíku roste se zvyšující se teplotou. Odstraněním vměstků a rozpuštěného vodíku se dosáhne dobrých mechanických vlastností, zdravoti odlitku a také dobrých slévárenských vlastností (zabíhavost). [1], [3]

3.3.1 Rafinace

Mezi nejčastější rafinační pochody patří [7]:

- Odstátí taveniny
- Vynášení vměstků plynovými bublinami
- Použití rafinačních a krycích solí
- Filtrace – mechanické zachycení vměstků

Odstátí taveniny

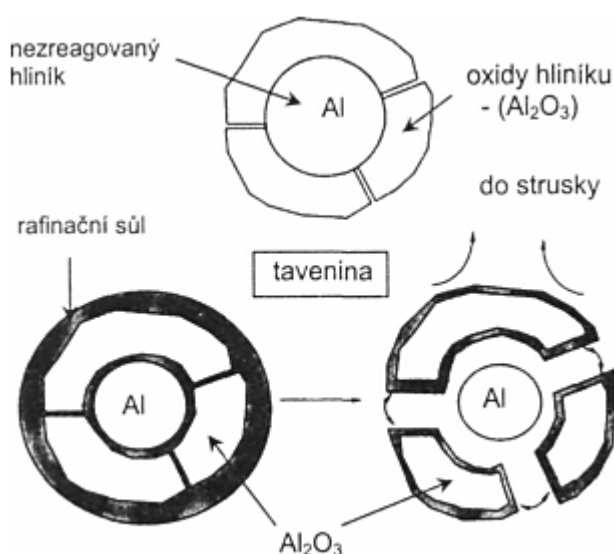
Tento proces rafinace taveniny je velmi časově náročný (v řádu desítek minut) a neefektivní. Využívá se vyplouvání vměstků na hladinu kovu, kde dojde k jejich následujícímu stažení. V praxi se používá výjimečně. [7]

Vynášení pomocí plynových bublin

Tento způsob rafinace probíhá současně s odplyňováním taveniny. Vměstky jsou vlivem pohybu plynových bublin vynášeny na hladinu kovu. Podrobněji bude tato problematika rozebrána v kapitole 3.3.2 Odplyňování. [7]

Rafinační a krycí soli

Rafinační přípravky jsou navrženy tak, aby snížily ztráty kovového hliníku a obsah nežádoucích prvků v tavenině. Soli se musí do taveniny ponořit ponorným zvonem a dokonale promíchat. Aktivní složkou zde často bývá fluorosilikát sodný Na_2SiF_6 . Tato složka dokáže proniknout mezi kov a oxidickou obálku, která ho obaluje. Následně tuto obálku celou rozruší a vynese ji na hladinu kovu. Uvolněný kov se vrátí zpátky do taveniny. Schéma toho procesu lze vidět na obrázku 19. Rafinační přípravky jsou většinou složeny ze směsi chloridových a fluoridových solí, proto je nutností dát pozor na posloupnost zpracování taveniny, jelikož tyto prvky ruší účinek modifikace sodíku a stroncia. [3], [7]

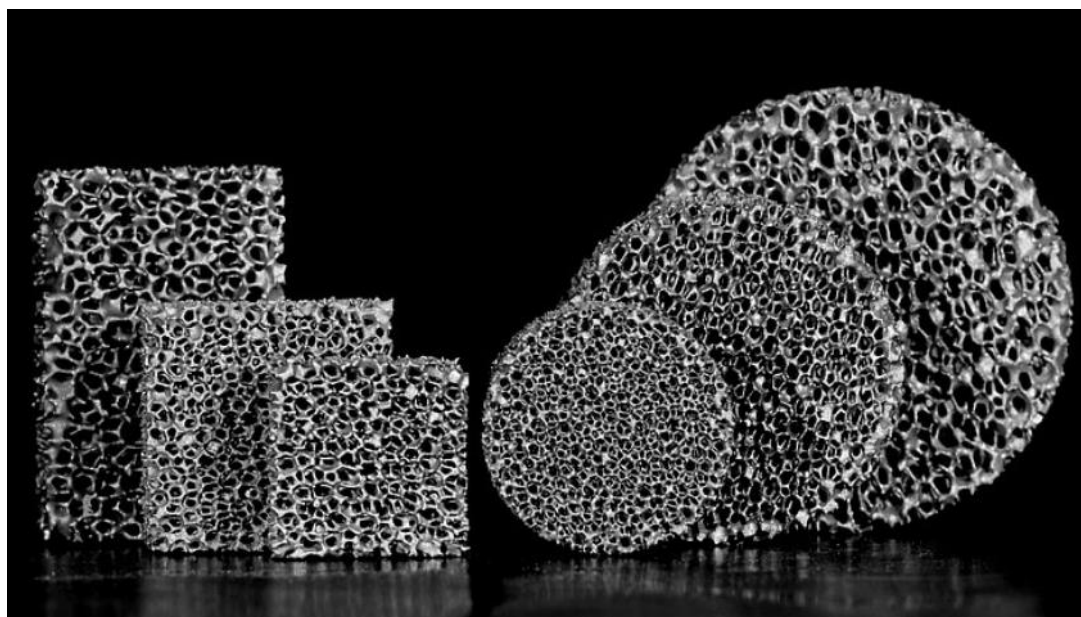


Obr. 19 Efekt rafinace [7]

Krycí přípravky jsou směsi různých solí, které vytvoří na povrchu taveniny ochrannou vrstvu strusky, která brání oxidaci a reakci se vzdušnou vlhkostí. Zároveň se z nich nesmí dostávat vměstky do taveniny. Složení těchto solí se volí tak, aby byla struska tekutá, dobře se s ní pracovalo a teplota tavení byla nižší než tavicí teplota taveniny. Nejčastěji obsahují chloridy a fluoridy alkalických kovů (NaCl, KCl, Na₃AlF₆, NaF, KF a další). U siluminů se moc často nepoužívají. [3], [7]

Filtrace

V dnešní době se odlitky, u nichž je požadována vysoká kvalita, odlévají převážně přes filtry. Tento proces je velmi účinným způsobem odstraňování vměstků. Používají se filtry tkaninové, kovové vyrobené z ocelových drátků a keramické. Filtry mají různé tvary a velikosti. Keramické filtry je možné vidět na obrázku 20. [1], [3]



Obr. 20 Keramické pěnové filtry na bázi Al₂O₃ [14]

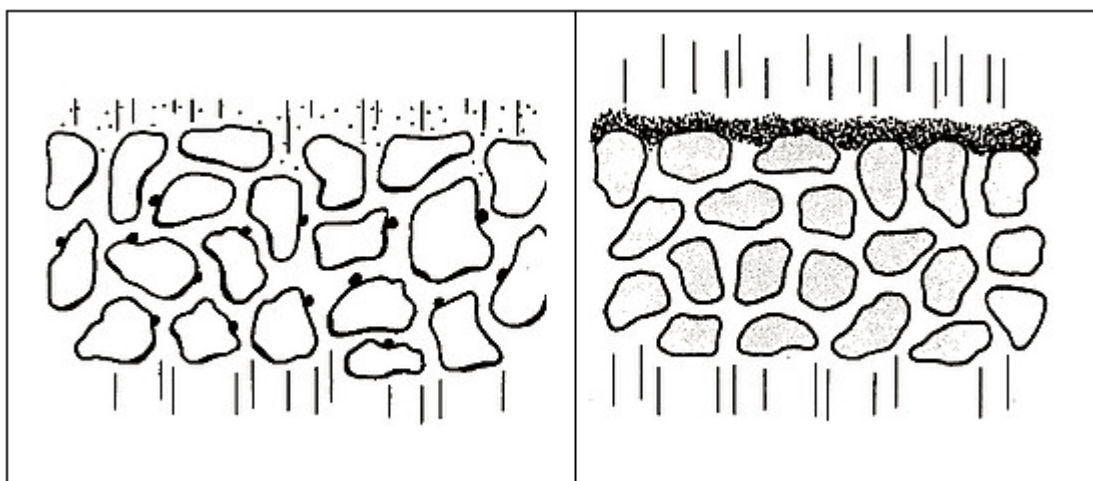
Pro hliníkové slitiny existují dva hlavní typy filtrace. Mechanismus lze vidět na obrázku 21. [3]

- Hlubková filtrace.
- Filtrační koláč, kde se na povrchu filtru vytvoří vrstva ze zachycených vměstků.

Hlubková filtrace spočívá v proudění kovu přes filtr. Zachycují se zde malé částice a nalepují se na stěnu filtru. Tyto částice jsou obvykle menší než póry filtru

a drží zde většinou elektrostatickými silami. Postupně se jednotlivé částice spojují a tvoří mosty mezi stěnami filtru. Dochází tak k zachycení i těch nejmenších částic. [3], [15]

Filtrační koláč slouží k zachytávání částic větších, než jsou póry filtru. Vytvoří se tak vrstva nečistot na čele filtru, na které se postupně zachytávají další a další vměstky. Jakmile je vrstva příliš tlustá, dojde k ucpání filtru. [3], [15]



Obr. 21 Typy filtrace – vlevo hloubková, vpravo filtrační koláč [15]

Mimo zachytávání vměstků dochází při filtraci také ke zpomalení a uklidnění kovu, aby nedocházelo k víření kovu ve formě. [3]

3.3.2 Odplyňování

Jak již bylo zmíněno dříve, vodík je jediný plyn, který se rozpouští v tavenině hliníku a ovlivňuje ji. Bohužel se rozpouští velmi snadno a vyskytuje se všude okolo nás. Hraje velkou roli na zdravotnost odlitku, jelikož s ním souvisí veškerá porozita (plynové bubliny a staženiny) v odlitku. Zejména při výrobě odlitků pro letecký průmysl jsou kladeny vysoké požadavky na vlastnosti, především na jejich reprodukovatelnost. Někdy může být ovšem velmi nízká hodnota vodíku nežádoucí. U velmi dobře odplyněné taveniny vznikají soustředné staženiny a musí být zajištěno perfektní dosazování kovu. Z tohoto důvodu se v některých slévárnách tavenina řízeně naplyňuje speciálními přípravky. Řízené naplynění má za následek vznik velmi malých vodíkových bublin, které zvýší objem kovu a tím zamezí tvorbě stažení. Odlitky se také nemusí tolik nálitkovat. Kontrola a úprava obsahu vodíku v tavenině

je proto velmi důležitá a měla by se provádět v každé slévárně hliníkových slitin. [3], [7]

Měření obsahu vodíku v tavenině by se mělo provádět vždy před začátkem lití. To rozhodne, zda je tavenina v pořádku a může se začít odlévat, nebo je potřeba dalšího odplynění či naplynění. Techniky měření naplynění se dělí na laboratorní a provozní. Laboratorní zkoušky se v praxi nevyužívají. Mezi provozní zkoušky se řadí [7]:

- Gürtlerova zkouška – do pískové formy se odlije vzorek o $\varnothing 40-60$ mm a tloušťce 15-25 mm. Po ztuhnutí se hodnotí hladinu vzorku. Vzorek s nízkým obsahem vodíku má propadlou, zatímco naplyněný vzorek má hladinu vydutou. Zkouška je pouze orientační. [7]
- Metoda Straube-Pfeiffer – do kovového nebo keramického kelímku se odlije vzorek taveniny a nechá se ztuhnout při tlaku 5-10 kPa. Při podtlaku se vyloučí podstatně více vodíku, a proto je tato metoda citlivější než Gürtlerova. Po ztuhnutí se vzorek rozřízne na dvě půlky a vzniklý řez se porovná se vzorníkem, na kterém jsou vzorky s různým stupněm naplynění. [3], [7]
- Metoda dvojího vážení – Dichte index – nejčastěji využívaná metoda ke zjištění naplynění. Do kovových kelímků o objemu 40-80 ml se odlijí dva vzorky. Jeden vzorek se nechá ztuhnout za atmosférického tlaku a druhý za podtlaku (obvykle 8 kPa) ve vakuové komoře. Následuje zvážení vzorků na vzduchu a po ponoření do vody s využitím Archimedova zákona. Z hmotností se u obou vzorků určí hustota. Z určených hustot se poté stanoví Dichte index. [7]
- Telegas, Alscan, Chapel a další – fungují na principu přímého měření vodíku v tavenině. [7]

Odplyňování vakuováním

Při použití této metody je pánev s roztaveným kovem přemístěna do vakuovacího zařízení, následně se uzavře zvonem a sníží se tlak. Obvykle se tlak snižuje na hodnotu 5 kPa. Dle Sievertsova zákona $S = k \cdot \sqrt{p_{H_2}}$ se snížením parciálního tlaku p_{H_2} sníží rozpustnost vodíku v tavenině. Jakmile je maximální rozpustnost vodíku při tomto podtlaku menší, než je jeho aktuální obsah, stává se tavenina

přesyceným roztokem a vodík uniká ve formě malých bublin. Odplynění vakuováním lze zefektivnit dmýcháním inertního plynu do taveniny. Vodík potom nemusí tvořit vlastní bubliny, ale difunduje do bublin inertního plynu. [7]

Odplyňování probubláváním inertními a aktivními plyny

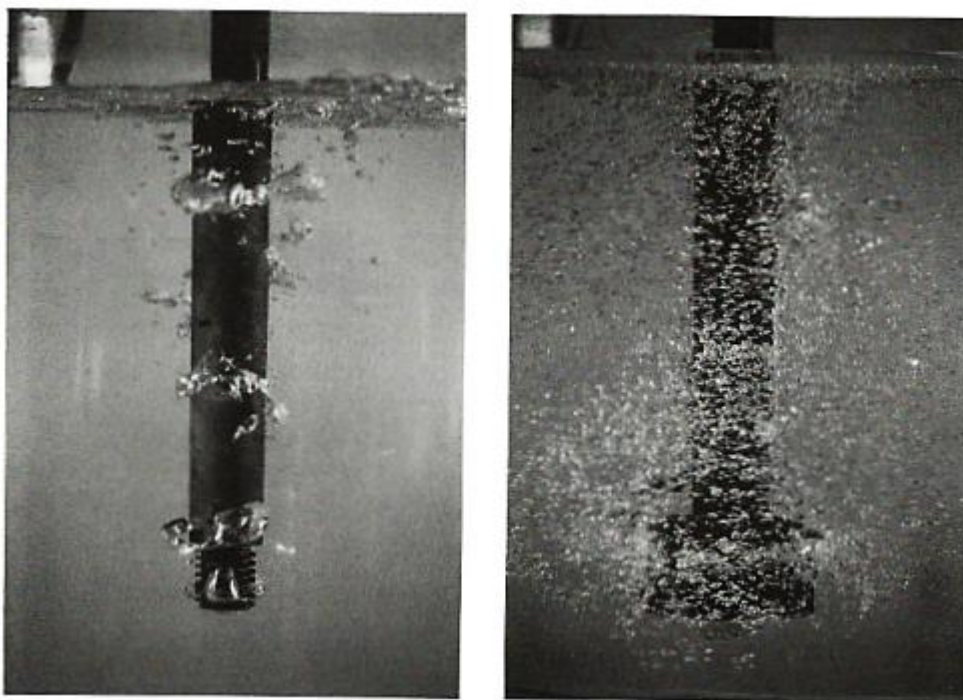
Principem této metody je difuze vodíku do bublin s nulovým parciálním tlakem vodíku. Vodík je poté s těmito bublinami vynášen na hladinu kovu (inertní plyny), nebo s nimi chemicky reaguje (aktivní plyny). [7]

Mezi inertní plyny, které se používají na odplyňování hliníkových slitin, patří argon nebo dusík. Při použití inertních plynů musí být zajištěna tvorba co nejmenší velikosti bublin, rozptýlení bublin do celého objemu taveniny a také dostatečně dlouhá dráha pohybu bublin – bubliny se musí tvořit u dna kelímku. Musí být zaručena také vysoká čistota těchto plynů (u dusíku alespoň 99,99 %), aby neobsahovaly vlhkost. Účinek odplynění argonem a dusíkem je srovnatelný. [7]

Aktivními plyny jsou chlor a fluor. Principem je chemická reakce s vodíkem při průchodu plynu taveninou. Problémem při použití aktivních plynů je reakce i s jinými prvky v tavenině. Jak již bylo zmíněno dříve, chlor a fluor ruší účinek modifikace sodíku a stroncia, a proto je nutné modifikovat až po odplynění. Mohou také snížit obsah hořčíku. Míra odplynění je vyšší než u použití neutrálních plynů. Využívání aktivních plynů sebou nese přísné ekologické předpisy, které se musí dodržovat. V některých zemích jsou prostředky s fluorem zakázány. [7]

Plyny se do taveniny aplikují v plynné formě nebo jako odplyňovací soli. Odplyňovací soli jsou v podobě tablet, prášku nebo granulátu. Po ponoření na dno kelímku se rozkládají a vzniká tak plynný dusík, chlor nebo fluor. Možností je také dmýchat tyto soli zároveň s dusíkem nebo argonem. Při použití přímo plynné formy plynů se využívají různé trubice, porézní tvárnice nebo rotační impelery, kterými se do taveniny plyny dmýchají. Odplyňovací trubice musí být ponořeny vždy až ke dnu kelímku a jsou vhodné spíše pro menší kelímky. Trubice s otevřeným koncem tvoří poměrně velké bubliny a odplynění není tak účinné. Bubliny lze zmenšit použitím porézní zátky na konci trubice a účinek tak zvýšit. Používají se trubice grafitové, keramické nebo kovové. Porézní tvárnice jsou umístěny na dnu kelímku ve vzdávce. Plyn je zde přiváděn skrz kelímek do tvárnice. Tvar tvárnice a rozložení děr na tvárnici musí zajišťovat tvorbu malých bublin a jejich rozptýlení do celého objemu taveniny. Účinek odplyňovacích trubic a porézních tvárníc

je v podstatě stejný. Zvýšením účinku odplynění může dojít instalací rotorové zařízení. Tato zařízení mohou být stabilní nebo mobilní. U mobilního zařízení je výhodou možná obsluha více pecí. Plyn je zde vháněn pomocí grafitového rotoru, který je zakončen impelerem. Impeler tvoří velmi drobné bublinky (1-3 mm), které zajistí dobré promíchání taveniny a účinné odplynění. Porovnání velikosti bublin u trubice s otevřeným koncem a rotačního impeleru je vidět na obrázku 22. [3], [7]



Obr. 22 Porovnání velikosti bublin u trubice s otevřeným koncem a rotačního impeleru [3]

4 EXPERIMENT

Experiment proběhl ve firmě MSR Engines ve Střelicích u Brna. Tato firma se zabývá vývojem a výrobou nízkoobjemových závodních i klasických spalovacích motorů. Hlavním produktem firmy je motorový surf Jetsurf, který lze vidět na obrázku 23. Součástí firmy je také malá slévárna přesného lití. [16], [17]

Cílem experimentu bylo porovnání účinku stávajícího postupu modifikace sodíkem a nově navrženého postupu modifikace pomocí stroncia na mechanické vlastnosti a výslednou strukturu materiálu. Dále bylo zkoumáno odeznívání modifikačního účinku v průběhu lití a také vliv různých metalurgických zásahů na naplynění taveniny.



Obr. 23 Jízda na Jetsurfu [18]

4.1 Představení slévárny

Slévárna využívá technologii vytavitelného modelu. Je tvořena z voskovny, kde jsou zhotovovány voskové modely z tzv. měkkých vosků pomocí plničky (tzv. pastovačky) a jádra z vodou rozpustitelného vosku na vstříkolisu. Dále z obalovny, sušárny a licího prostoru. Vytavování vosku ze skořepiny probíhá v mikrovlnném zařízení. Žhání skořepin, a také tepelné zpracování odlitků zajišťují dvě elektrické odporové žhací pece. Kov je taven v kelímkové elektrické odporové peci s kapacitou 200 kg taveniny. Odlévá se ruční páničkou o objemu 18 kg hliníkové slitiny. Apretace odlitků probíhá na pásové pile a v tryskacím boxu pomocí křemenného písku.

4.2 Plán experimentu

Při plánování experimentu byl brán ohled na vybavení, produkci a finanční náklady slévárny. Chod slévárny zajišťují 2 až 3 zaměstnanci, kteří mají rozdělené jednotlivé úkony. Odlévání probíhá zpravidla jednou týdně a trvá přibližně 2 hodiny. K modifikaci je používán sodík. Jelikož je v literatuře uváděn modifikační účinek sodíku pouze cca 30 minut, cílem bylo ověření modifikačního účinku sodíku na výsledné vlastnosti během celé doby lití. Následně byla navržena modifikace stronciem a opět ověřen modifikační účinek stroncia na výsledné vlastnosti.

4.3 Výroba zkušebních skořepin

První fází výroby skořepin u technologie vytavitelného modelu je výroba voskového modelu. „Měkké“ vosky patří do skupiny emulsifikovaných vosků a plnivo zde tvoří vzduch. Roztavený vosk se nalije do plničky, kde je míchán speciálními noži, které promíchají vosk se vzduchem. Správně namíchaný vosk se pozná při odstříknutí vosku na připravenou podložku. Jestliže je vosk v pastovitém stavu a nabývá na objemu, je v pořádku a obsluha může plnit formy. Naplněním formy voskem vzniká voskový model. U rozměrů matečné formy se musí počítat se smrštěním vosku a konstrukce musí být navržena tak, aby bylo možné voskový model bez problému vyjmout a nedošlo k jeho poškození. Po vyjmutí modelu z formy se musí odložit do regálu, kde zchladne a získá manipulační pevnost. Takto připravené modely se následně přilepí na vtokovou soustavu do tzv. stromečku. Stromečky musí být sestaveny tak, aby bylo zajištěno klidné plnění kovu a výsledné odlitky šly od vtokové soustavy dobře oddělit.

Pro experiment bylo potřeba vyrobit voskový model ve tvaru zkušební tyčinky pro zkoušku tahem. Jelikož ve slévárně podobná matečná forma na výrobu těchto tyčinek není, byly použity jako voskové modely hranaté tyčinky o rozměru 17x17x170 mm a po odlití obrobena na požadované rozměry. Výroba matečné formy z kovu by byla pro experiment příliš finančně a časově náročná.

Po přilepení voskových tyčinek ke vtokové soustavě (obrázek 24) následovalo namočení stromečku v keramické břečce a posypání křemenným ostřivem, které se provádí ručně. Takto zpracovaný stromeček byl umístěn do sušárny, aby se vytvořil základní keramický obal. Po uschnutí obalu se tento proces s namáčením, posypem a sušením ještě pětkrát opakoval, aby se vytvořil dostatečně pevný keramický obal.



Obr. 24 Voskový stromeček

Dalším krokem bylo vytavení vosku v mikrovlnném zařízení a vyžhání skořepiny v žhací peci při 750 °C. Při žhání dojde k vypálení zbytku vosku a nečistot ve skořepině. Výslednou skořepinu lze vidět na obrázku 25.



Obr. 25 Vyžíhaná skořepina

Celkem bylo potřeba vyrobit 8 skořepin po 7 tyčinkách. Počet skořepin a tyčinek potřebných na jednotlivé zkušební tavby je v tabulce 3.

Tab. 3 Rozpis skořepin pro zkušební tavby

Tavba	Počet skořepin	Počet zkušebních tyčinek	Poznámky
Zkušební tavba s modifikací sodíkem	5	35	Co 20 minut odlít 1 skořepinu Z každé skořepiny: 3 tyčinky v litém stavu 3 tyčinky tepelné zpracování 1 tyčinka záložní
Zkušební tavba s modifikací stronciem	3	21	Skořepinu odlít na začátku, uprostřed a na konci lití Z každé skořepiny: 3 tyčinky v litém stavu 3 tyčinky tepelné zpracování 1 tyčinka záložní

4.4 Průběh zkušební tavby s modifikací pomocí sodíku

Zkouška spočívala v natavení vsázky v elektrické odporové peci, jejím následném metalurgickém zpracování dle stávajícího předpisu slévárny, průběžným odběrem vzorků a měřením naplynění.

Odlévána byla slitina AlSi10Mg. Vsázka byla složena z 50 % vratného materiálu a 50 % nových housek (celkem 175 kg). Obsah základních prvků ve slitině AlSi10Mg garantovaný dodavatelem je v tabulce 4. Po natavení vsázky a přehřátí na požadovanou teplotu 680 °C, následovalo změření naplynění metodou dvojího vážení neboli měření Dichte Indexu. Měření Dichte Indexu bylo prováděno vždy po každém metalurgickém zásahu (očkování, rafinace, odplynění, modifikace) a poté v průběhu lití.

Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi10Mg garantované dodavatelem [19]

-	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti
Min [%]	-	0,30	9,00	-	0,20	-	-
Max [%]	0,03	0,50	10,50	0,30	0,40	0,10	0,15

Očkování taveniny bylo provedeno pomocí očkovacích tablet Mikrosal Al T 100. Aplikace a množství tablet byla zvolena dle pokynů výrobce (přibližně 1 tableta na 100 kg taveniny). 1,5 tablety bylo ponořeno do taveniny pomocí děrovaného zvonu na dno kelímku a za mírného míchání se počkalo na proběhnutí reakce tablet

s taveninou. Po proběhnutí reakce byl zbytek tablet a vzniklé nečistoty staženy z hladiny kovu. Dále proběhlo měření DI. [20]

Následovala rafinace kovu pomocí rafinační soli Probat-Fluss Al 224. Rafinační sůl byla nasypána na hladinu kovu a poté ponořena děrovaným zvonem na dno kelímku. Reakce soli s taveninou se projevila bubláním taveniny, které doprovázely plamínky. Po přibližně třech minutách reakce skončila a zbytek soli i vzniklé nečistoty byly staženy z hladiny kovu. [20] Následovalo změření Dichte Indexu a odplynění taveniny pomocí dmýchání argonu. Argon o čistotě 4.6 byl v množství 2,5 l/min vháněn do taveniny po dobu 10 minut pomocí rotačního zařízení – obrázek 26. Po odplynění byly opět staženy nečistoty z hladiny kovu a bylo provedeno měření Dichte Indexu. Obsluha také provedla Straube-Pfeiffer test, který je ve slévárně používán k orientačnímu zjištění naplynění.



Obr. 26 Odplyňování taveniny dmýcháním argonu

Dalším krokem byla modifikace pomocí sodíkových tablet Eutektal T 201. Množství tablet a jejich aplikace byla zvolena dle pokynů výrobce (přibližně 1 tableta na 100 kg taveniny). 1,5 tablety bylo ponořeno děrovaným zvonem na dno taveniny. Následovala bouřlivá reakce s taveninou. Po skončení reakce byly zbytky tablet a nečistot staženy z hladiny kovu a bylo změřeno naplynění.

Po kompletní metalurgické úpravě taveniny se začalo okamžitě odlévat, z důvodu poměrně rychlého odeznívání modifikačního účinku sodíku. Vzorky na zkoušku tahem byly odlévány do předem předehřátých skořepin (570 °C) přibližně každých 25 minut. Na každou skořepinu byl po odlití připevněn vázací drát s označenou známkou tak, aby nedošlo k jejich záměně. Ve stejném čase jako vzorky na zkoušku tahem byly odlévány také vzorky na chemické složení taveniny do speciální kokily. V průběhu lití byl také třikrát měřen Dichte index. Celkový zápis průběhu přípravy taveniny a následného odlévání je v tabulce 5.

Tab. 5 Zázpis ze zkušební tavby s modifikací sodíkem

Operace	Čas [hod]	Teplota [°C]	Přípravek	Množství	DI [%]	Poznámky
Měření DI	0:00	-	-	-	2,26	Vzorky: 12-1P a 12-1V
Očkování	0:00	680	Mikrosal Al T 100	1,5 tablety	-	-
Měření DI	0:05	-	-	-	3,79	Vzorky: 12-2P a 12-2V
Rafinace	0:05	-	Probat Fluss Al 224	75 g	-	-
Měření DI	0:10	-	-	-	3,02	Vzorky: 12-3P a 12-3V
Odplynění	0:11	-	Argon 4.6	2,5 l/min po 10 min	-	-
Měření DI	0:22	-	-	-	2,29	Vzorky: 12-4P a 12-4V
Modifikace	0:25	-	Eutektal T 201	1,5 tablety	-	-
Začátek lití	0:30	679	-	-	-	-
Měření DI	0:30	-	-	-	1,51	Vzorky: 12-5P a 12-5V
Odlití vzorku na chem. složení	0:30	679	-	-	-	Vzorek: CHEM1
Odlévání zkušebních tyčinek	0:30	679	-	-	-	Značení tyčinek: 1
Odlití vzorku na chem. složení	0:51	679	-	-	-	Vzorek: CHEM2
Odlévání zkušebních tyčinek	0:51	679	-	-	-	Značení tyčinek: 2
Měření DI	1:14	-	-	-	1,51	Vzorky: 12-6P a 12-6V
Odlití vzorku na chem. složení	1:14	679	-	-	-	Vzorek: CHEM3
Odlévání zkušebních tyčinek	1:14	679	-	-	-	Značení tyčinek: 3
Odlití vzorku na chem. složení	1:39	671	-	-	-	Vzorek: CHEM4
Odlévání zkušebních tyčinek	1:39	671	-	-	-	Značení tyčinek: 4
Měření DI	2:00	-	-	-	1,14	Vzorky: 12-7P a 12-7V
Odlití vzorku na chem. složení	2:00	668	-	-	-	Vzorek: CHEM5
Odlévání zkušebních tyčinek	2:00	668	-	-	-	Značení tyčinek: 5

4.5 Průběh zkušební tavby s modifikací pomocí stroncia

Druhá zkušební tavba probíhala velmi podobně jako ta první. Vsázku tvořil opět z 50 % vratný materiál a z 50 % nové housky. Celková hmotnost vsázky byla 154 kg. Očkování, rafinace a odplynění mělo stejné podmínky jako v prvním případě tak, aby byly vzorky ovlivněny pouze jiným druhem modifikace. Modifikace byla provedena pomocí předslitiny AlSr10 ve formě tyčí. Návrh byl, aby tavenina obsahovala 200 ppm Sr. Z hmotnosti vsázky byla dopočítána hmotnost předslitiny AlSr10 (342 g), která byla přidána do taveniny. Bylo počítáno s 90% využitím Sr. Určené množství předslitiny bylo ponořeno do taveniny před odplyněním a chvíli se vyčkal, než se tyče rozpustí. Poté začalo odplynění za stejných podmínek jako u první tavby. Popsaný způsob aplikace modifikátoru byl zvolen z důvodu dobrého rozptýlení stroncia v tavenině a její celkové homogenizace.

Po ukončení odplynění začalo odlévání běžné produkce slévárny. První zkušební skořepina byla odlita po 15 minutách od začátku lití. Druhá přibližně v polovině a třetí na konci lití. Důvodem nižšího počtu odběru vzorků byl teoretický fakt, že modifikace stronciem je dlouhodobá a mechanické vlastnosti by měly být velmi podobné na začátku, v průběhu i na konci lití. V průběhu lití byly také odebírány vzorky na chemické složení a bylo měřeno naplynění metodou dvojího vážení. Během odlévání došlo k prasknutí licí pánvičky. Z důvodu její opravy bylo lití přibližně o 15 minut prodlouženo. Celkový zápis průběhu přípravy taveniny a následného odlévání je v tabulce 6.

Tab. 6 Zázpis ze zkušební tavby s modifikací stronciem

Operace	Čas [hod]	Teplota [°C]	Přípravek	Množství	DI [%]	Poznámky
Měření DI	0:00	-	-	-	2,26	Vzorky: 15-1P a 15-1V
Očkování	0:00	680	Mikrosal Al T 100	1,5 tablety	-	-
Měření DI	0:05	-	-	-	2,64	Vzorky: 15-2P a 15-2V
Rafinace	0:05	-	Probat Fluss Al 224	75 g	-	-
Měření DI	0:10	-	-	-	3,62	Vzorky: 15-3P a 15-3V
Odlití vzorku na chem. složení	0:10	680	-	-	-	Vzorek: CHEMSr1
Modifikace	0:11	-	Předslitina AISr10	342 g	-	-
Odplynění	0:12	-	Argon 4.6	2,5 l/min po 10 min	-	-
Začátek lití	0:25	-	-	-	-	-
Měření DI	0:25	-	-	-	2,64	Vzorky: 15-4P a 15-4V
Odlití vzorku na chem. složení	0:25	681	-	-	-	Vzorek: CHEMSr2
Odlévání zkušebních tyčinek	0:40	681	-	-	-	Značení tyčinek: P1
Měření DI	1:05	-	-	-	2,26	Vzorky: 15-5P a 15-5V
Odlití vzorku na chem. složení	1:23	678	-	-	-	Vzorek: CHEMSr3
Odlévání zkušebních tyčinek	1:23	678	-	-	-	Značení tyčinek: P2
Měření DI	1:48	-	-	-	2,63	Vzorky: 15-5P a 15-5V
Odlití vzorku na chem. složení	2:06	667	-	-	-	Vzorek: CHEMSr4
Odlévání zkušebních tyčinek	2:06	667	-	-	-	Značení tyčinek: P3

4.6 Zpracování zkušebních vzorků

Po zchladnutí odlitků byla ze vzorků odstraněna skořepina. Z každého stromečku byly určeny 3 tyčinky, na kterých bylo provedeno tepelné zpracování, 3 tyčinky, které zůstaly v litém stavu a 1 tyčinka jako náhradní. Na každou tyčinku byla vyražena příslušná značka. Odlité a oražené zkušební tyčinky zbavené skořepiny jsou na obrázku 27.

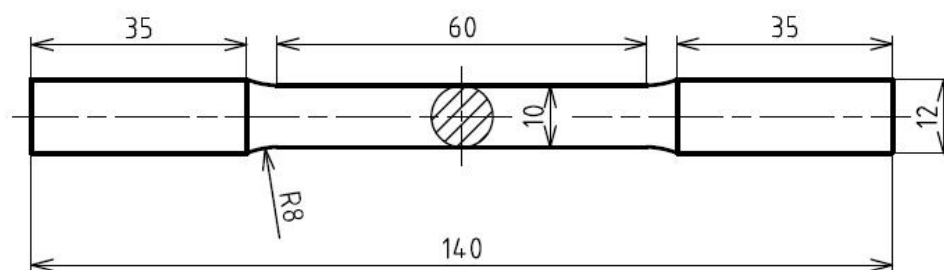


Obr. 27 Odlité zkušební tyčinky

Po odstranění vtokové soustavy bylo provedeno na určených tyčinkách tepelné zpracování. To bylo rozděleno na rozpouštěcí žíhání a precipitační vytvrzení. Při rozpouštěcím žíhání byly vzorky v peci při teplotě 530 °C po dobu 3 hodin. Po uplynutí této doby byly vzorky zchlazeny ve vodě. Následovalo

precipitační vytvrzení při teplotě 180 °C po dobu 10 hodin. Poté byla pec vypnuta, otevřena a vzorky pomalu zchladly.

Následně putovaly všechny tyčinky k obráběcímu stroji, kde byly obrobeny na konečný rozměr a tvar pro zkoušku tahem. Rozměry byly zvoleny dle normy DIN 50125:2009-07. Jelikož byly vzorky oraženy a při obrobení značka zmizela, byl kladen velký důraz na okamžitý popis vzorků nesmazatelným fixem, aby nedošlo k jejich záměně. Obrobená tyčinka a její výkres je na obrázku 28.



Obr. 28 Výkres [21] a fotografie obrobené tyčinky pro zkoušku tahem

Takto upravené vzorky pro zkoušku tahem i chemického složení byly převezeny na FSI VUT v Brně, kde proběhla jejich analýza a vyhodnocení.

4.6.1 Rozbor hodnot mechanických vlastností

Měření meze pevnosti v tahu R_m , meze kluzu v tahu $R_{p0,2}$ a tažnosti A , bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (2017) na univerzálním trhacím stroji ZWICK Z250 Allround-Line (obrázek 29). V případě zkušební tavby s modifikací sodíkem bylo přetrženo vždy 6 zkušebních tyčinek pro daný čas, z toho 3 v litém stavu a 3 v tepelně zpracovaném stavu. V případě zkušební tavby s modifikací stronciem byly pro daný čas přetrženy vždy 4 zkušební tyčinky, z toho 2 v litém

stavu a 2 v tepelně zpracovaném stavu. Vzhledem k malému počtu vzorků, mohou být výsledné hodnoty ovlivněny defekty ve zkušebních tyčinkách. K výsledkům je proto nutné přihlížet pouze informativně. Pro získání výsledků s vysokou spolehlivostí by bylo potřeba provést statistické vyhodnocení na větším počtu vzorků pro daný stav. Tato možnost by byla ovšem finančně náročná.



Obr. 29 Univerzální trhací stroj ZWICK Z250 Allround-Line [22]

Hodnoty meze pevnosti v tahu R_m , meze kluzu v tahu $R_{p0,2}$, tažnosti A a také změřené obsahy sodíku pro modifikaci sodíkem jsou uvedeny v tabulce 7. Pro modifikaci stronciem v tabulce 8.

Tab. 7 Hodnoty R_m , $R_{p0,2}$ a A - modifikace sodíkem

SODÍK	Označení vzorku	Čas po modifikaci [min]	Obsah Na [ppm]	R_m [MPa]	A [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]
Litý stav	1	4	65	168	3,5	98
	2	25	49	168	3,6	98
	3	48	39	165	3,3	97
	4	73	30	158	2,7	96
	5	94	20	154	2,0	96
Po tepelném zpracování	11	4	65	266	0,7	245
	21	25	49	267	0,9	241
	31	48	39	257	0,5	240
	41	73	30	262	0,6	243
	51	94	20	252	0,6	228

Tab. 8 Hodnoty R_m , $R_{p0,2}$ a A - modifikace stronciem

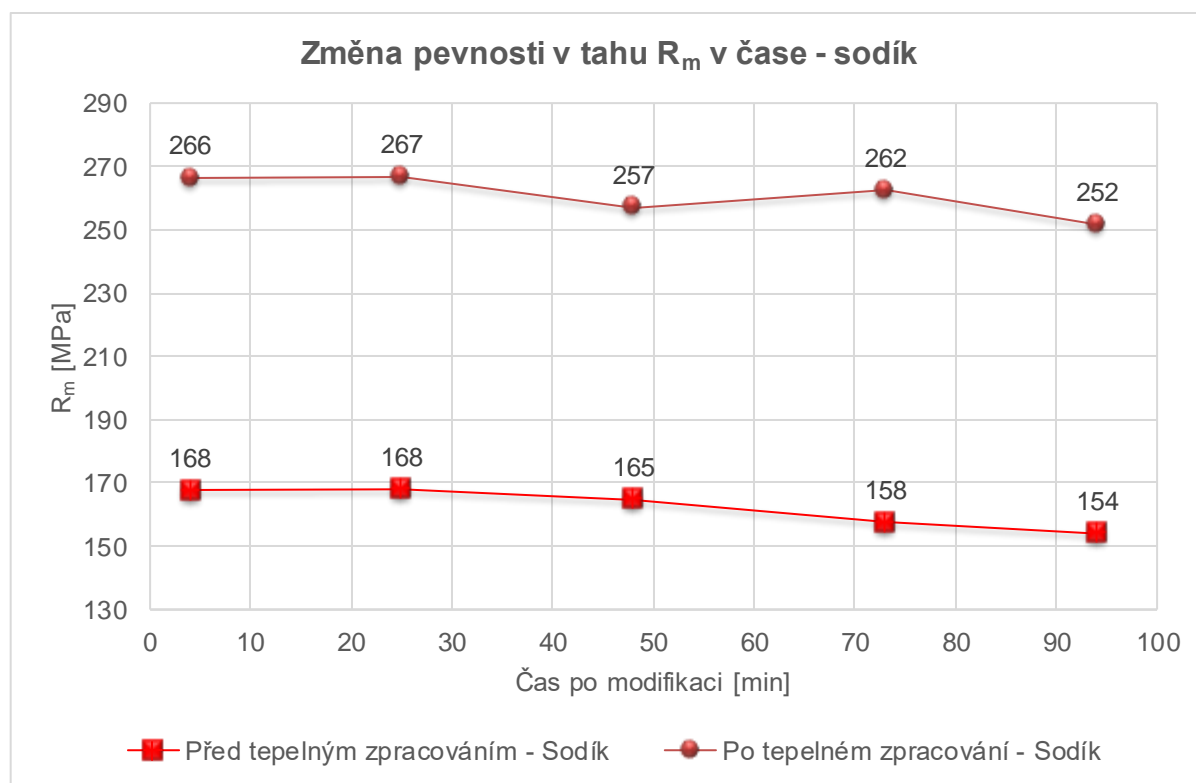
STRONCIUM	Označení vzorku	Čas po modifikaci [min]	Obsah Sr [ppm]	R_m [MPa]	A [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]
Litý stav	P1	29	150	158	2,5	98
	P2	72	130	160	2,6	102
	P3	115	91	152	2,0	99
Po tepelném zpracování	P11	29	150	248	0,6	229
	P22	72	130	255	0,5	236
	P33	115	91	252	0,5	229

Mez pevnosti v tahu R_m

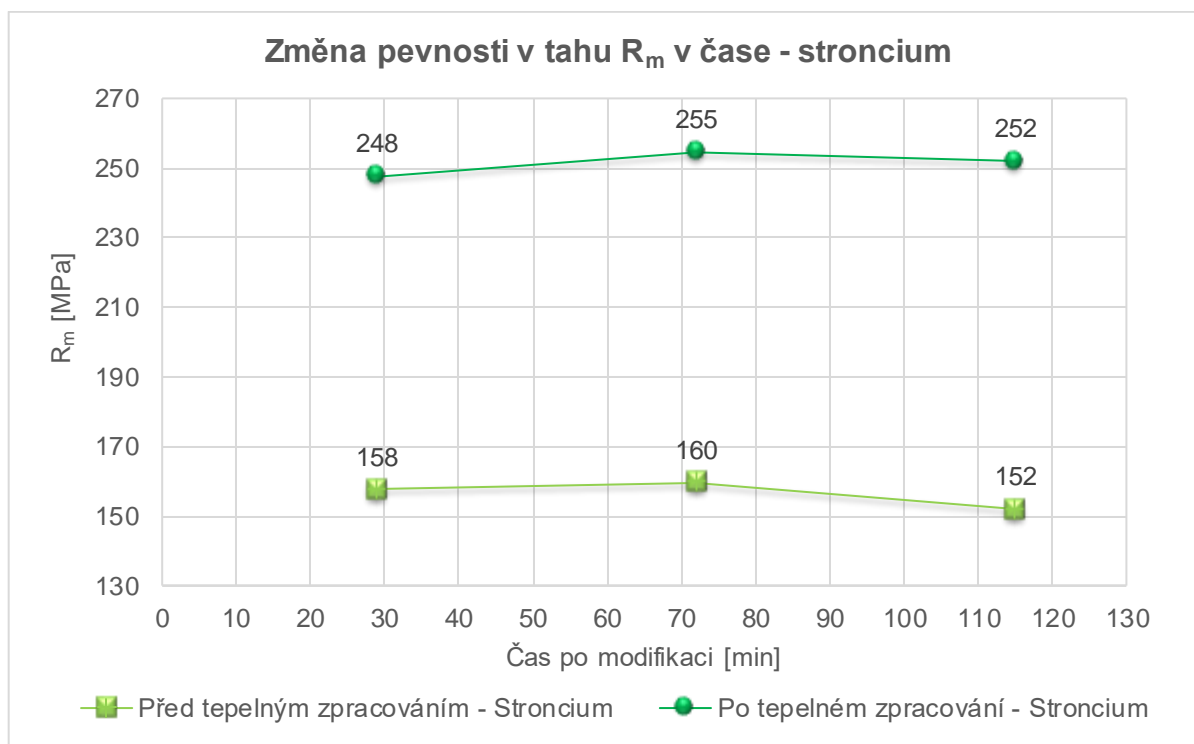
Naměřené hodnoty pevnosti v tahu R_m jsou vyneseny v grafech 2,3 a 4. U modifikace sodíkem je patrný postupný pokles R_m vlivem odeznívání modifikačního účinku – graf 2. Tato závislost je nejlépe vidět u vzorků v litém stavu, kde se hodnoty drží přibližně 50 minut na podobné hodnotě (168 MPa) a následně začnou klesat. U vzorků v tepelně zpracovaném stavu tuto závislost narušuje měření č. 4, kde je hodnota vyšší než předcházející. Tato odchylka, jak již bylo zmíněno, může být ovlivněna různými defekty ve zkušebních tyčinkách, a také malým počtem vzorků.

U modifikace stronciem lze vidět poměrně stálý modifikační účinek a hodnoty se drží přibližně na stejné úrovni – graf 3. Je zřejmý také malý nárůst pevnosti přibližně do 75 minut. Poté začnou hodnoty opět klesat. Hodnoty jsou oproti modifikaci sodíkem stabilnější.

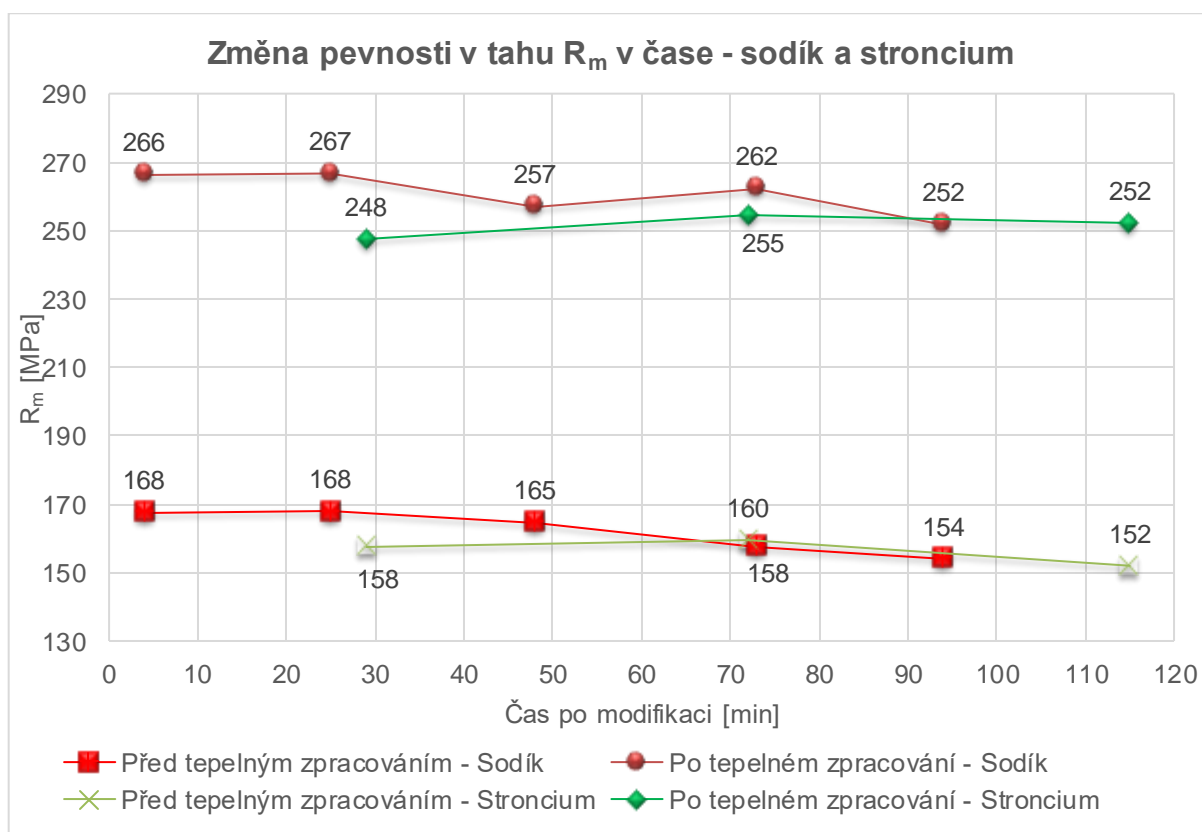
V grafu 4 jsou společně vyneseny hodnoty modifikace sodíkem i stronciem. Je zřejmé, že sodík je silný modifikátor a hodnoty R_m jsou oproti stronciu ze začátku vyšší. Z křivek u vzorků v litém stavu je patrné, že přibližně po 70 minutách dojde k vyrovnání hodnot a drží se na podobné úrovni. Tento fakt může být způsoben nedostatečnou modifikací eutektika způsobenou malým množstvím stroncia v tavenině. Z grafů je patrné, že tepelným zpracováním došlo ke zvýšení pevností v tahu přibližně o 100 MPa.



Graf 2 Závislost pevnosti v tahu R_m na čase – sodík



Graf 3 Závislost pevnosti v tahu R_m na čase – stroncium



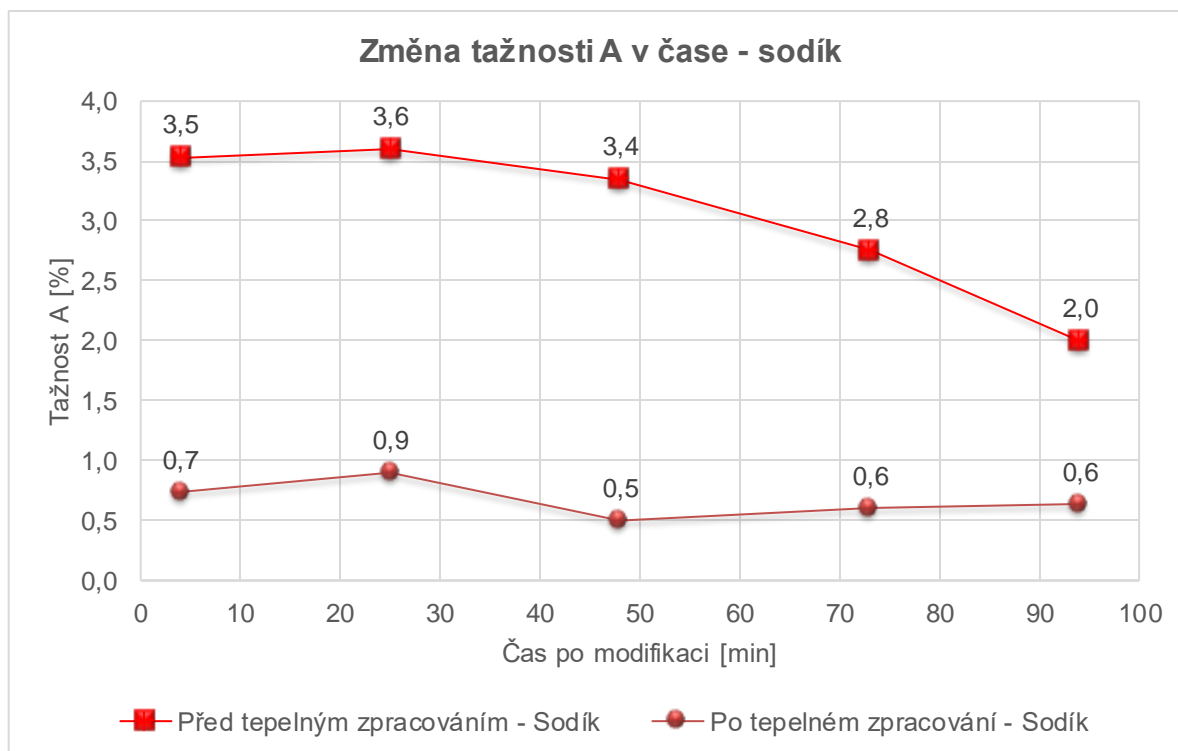
Graf 4 Závislost pevnosti v tahu R_m na čase – sodík a stroncium

Tažnost A

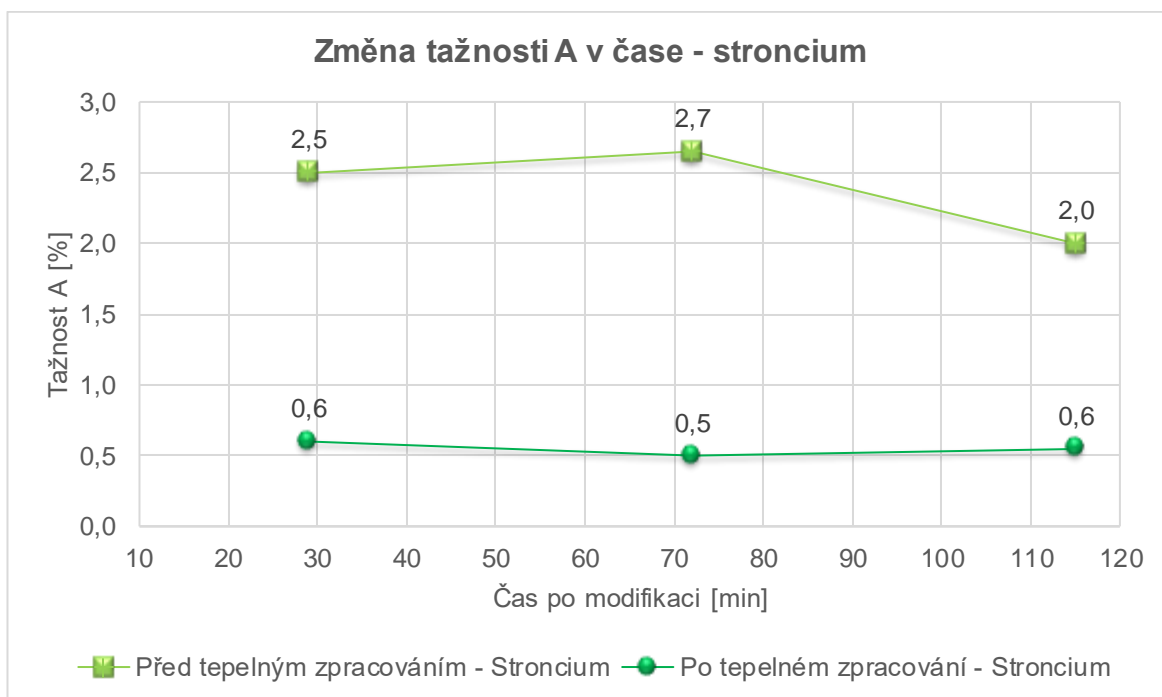
Hodnoty tažnosti jsou vyneseny v grafu 5,6 a 7. Z grafu 5 je vidět mírný nárůst tažnosti mezi 1. a 2. měřením a poté opět pokles vlivem odeznívání modifikačního účinku sodíku. Závislost je dobře viditelná u vzorků v litém stavu. U vzorků po tepelném zpracování je zřejmá odchylka od této závislosti u třetího měření.

U modifikace stronciem je u vzorků v tepelně nezpracovaném stavu patrná stejná závislost jako u R_m – graf 6. Nárůst tažnosti s následným poklesem. Vzorky po tepelném zpracování tuto závislost nemají.

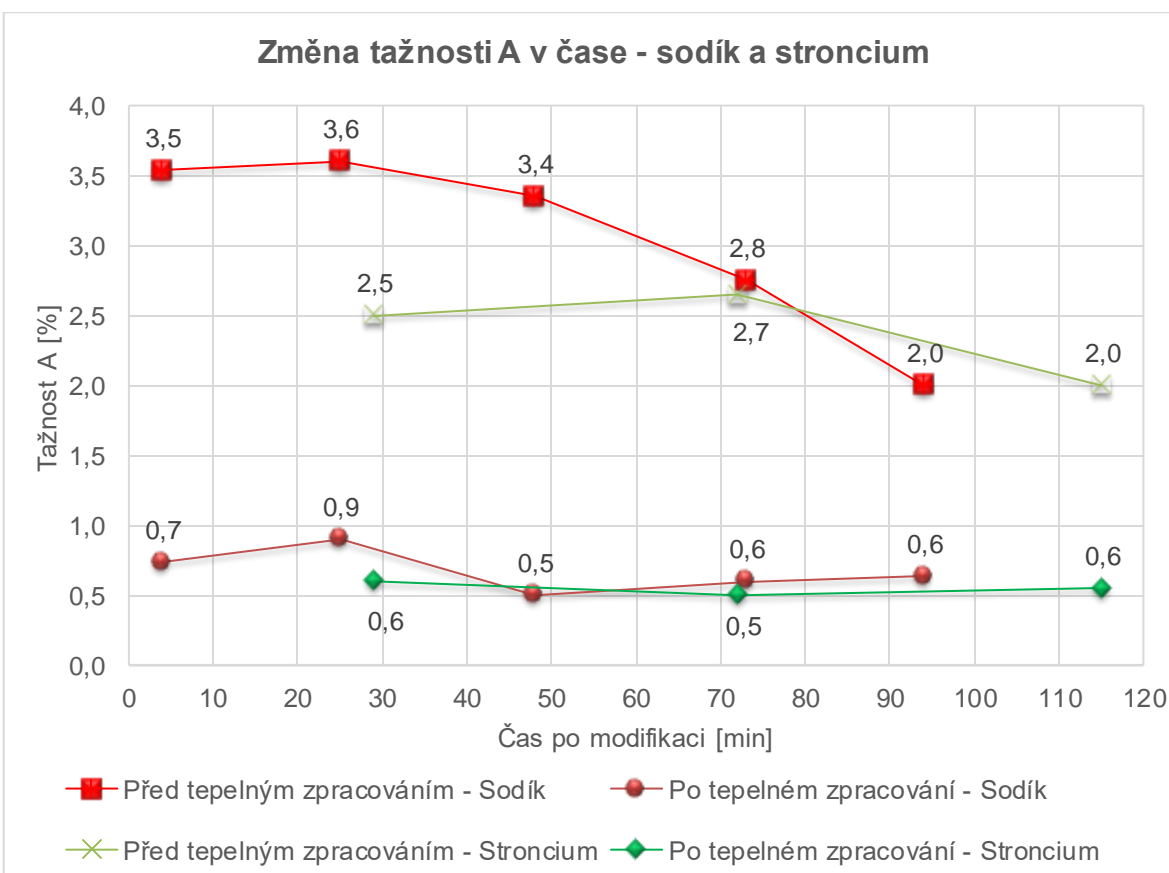
Při srovnání hodnot modifikace sodíkem a stronciem (graf 7) jsou hodnoty tažnosti i přes odeznívající účinek sodíku vyšší než u stroncia. Z grafů je patrné, že tepelným zpracováním se tažnost snížila přibližně o 2-2,5 %.



Graf 5 Závislost tažnosti A na čase – sodík



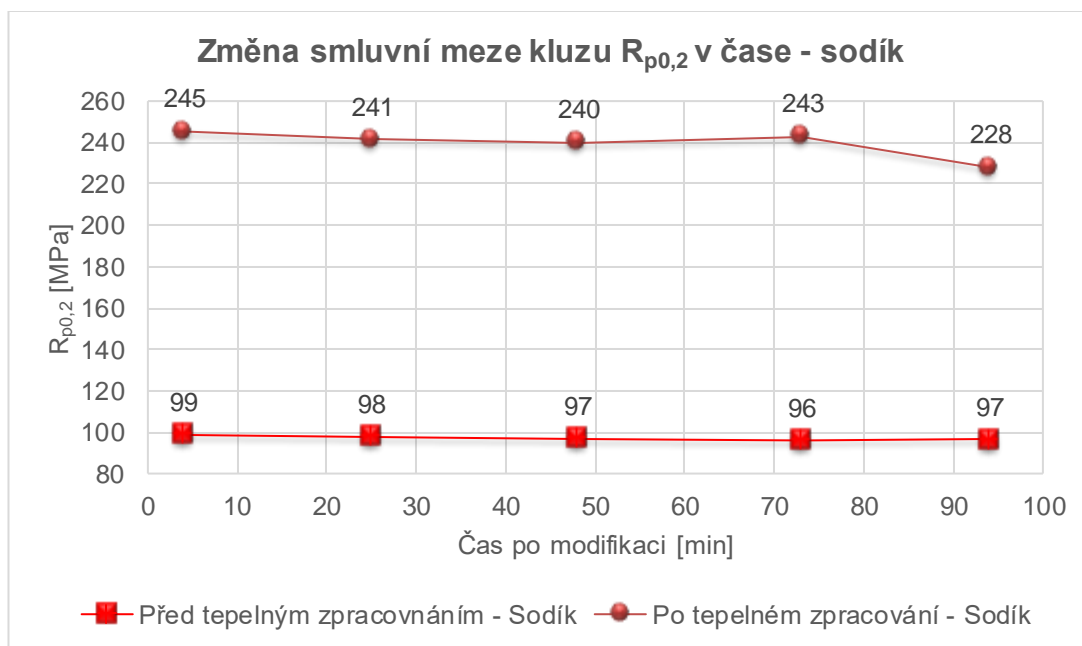
Graf 6 Závislost tažnosti A na čase – stroncium



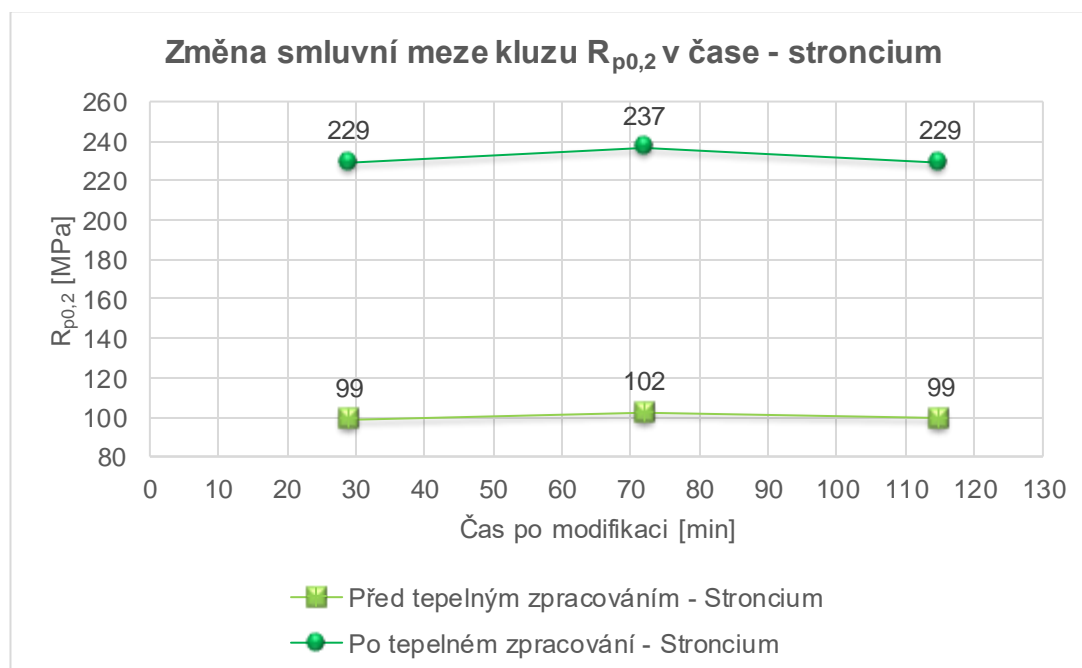
Graf 7 Závislost tažnosti A na čase – sodík a stroncium

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

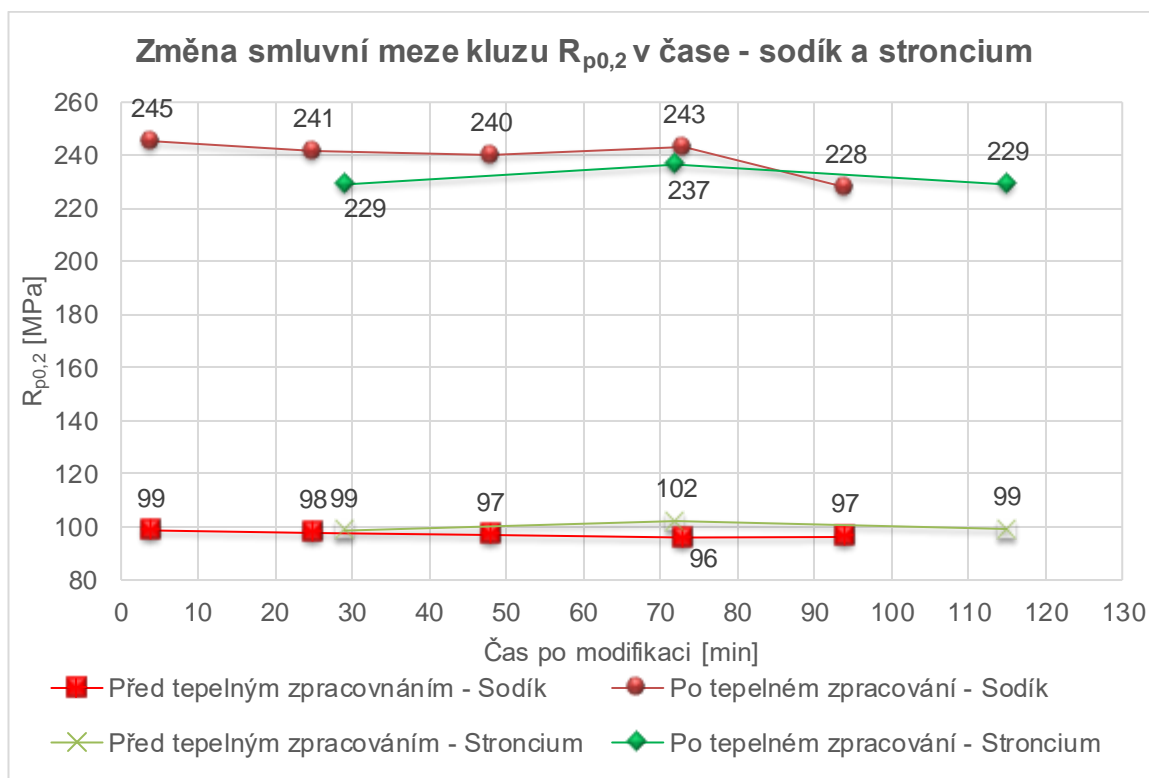
Hodnoty smluvní meze kluzu jsou vyneseny v grafech 8,9 a 10. Z grafů je patrný velmi podobný charakter křivek jako u pevnosti v tahu. Tepelným zpracováním došlo ke zvýšení meze kluzu u sodíku přibližně o 140-145 MPa a u stroncia o 130 MPa.



Graf 8 Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na čase – sodík



Graf 9 Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na čase – stroncium



Graf 10 Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na čase – sodík a stroncium

Tvrдость

Měření tvrdosti proběhlo na tvrdoměru Brinell HOP 3000 od firmy LECO dle normy ČSN EN ISO 6506-1. Pro měření bylo použito nominální zatížení $F = 9807 \text{ N}$, indentor – kulička z tvrdokovu o průměru 10 mm. Z popsanych hodnot je tvrdost značena HBW 10/1000. Měření bylo provedeno na vyfrézované ploše na přetržených zkušebních tyčinkách po tahové zkoušce. Na každém vzorku byla tvrdost měřena třikrát. Vzorek po měření tvrdostí je na obrázku 30. Vyhodnocení tvrdosti proběhlo v programu QuickPHOTO Industrial 2.3. Z naměřených hodnot byl spočten aritmetický průměr. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.

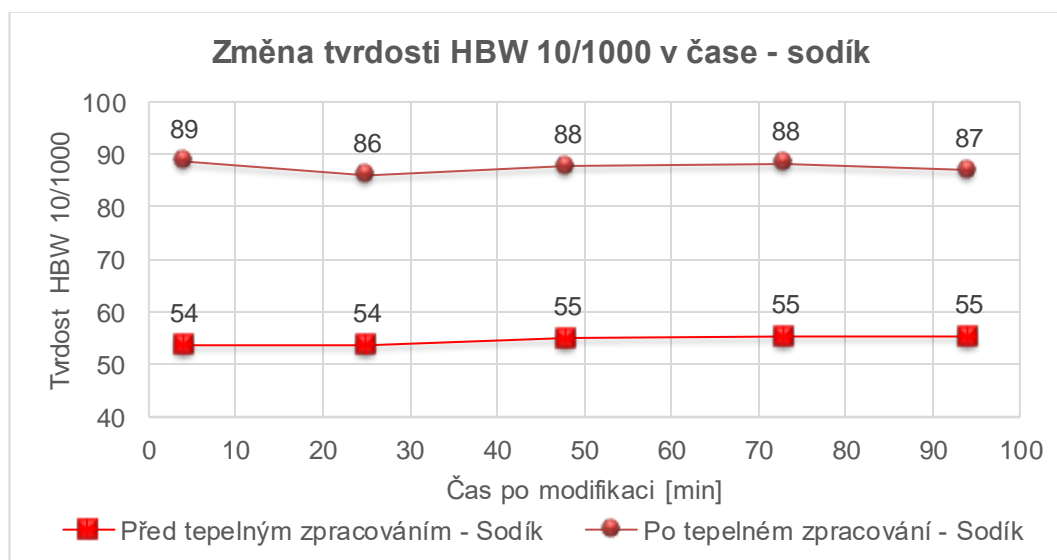


Obr. 30 Vzorek po měření tvrdosti

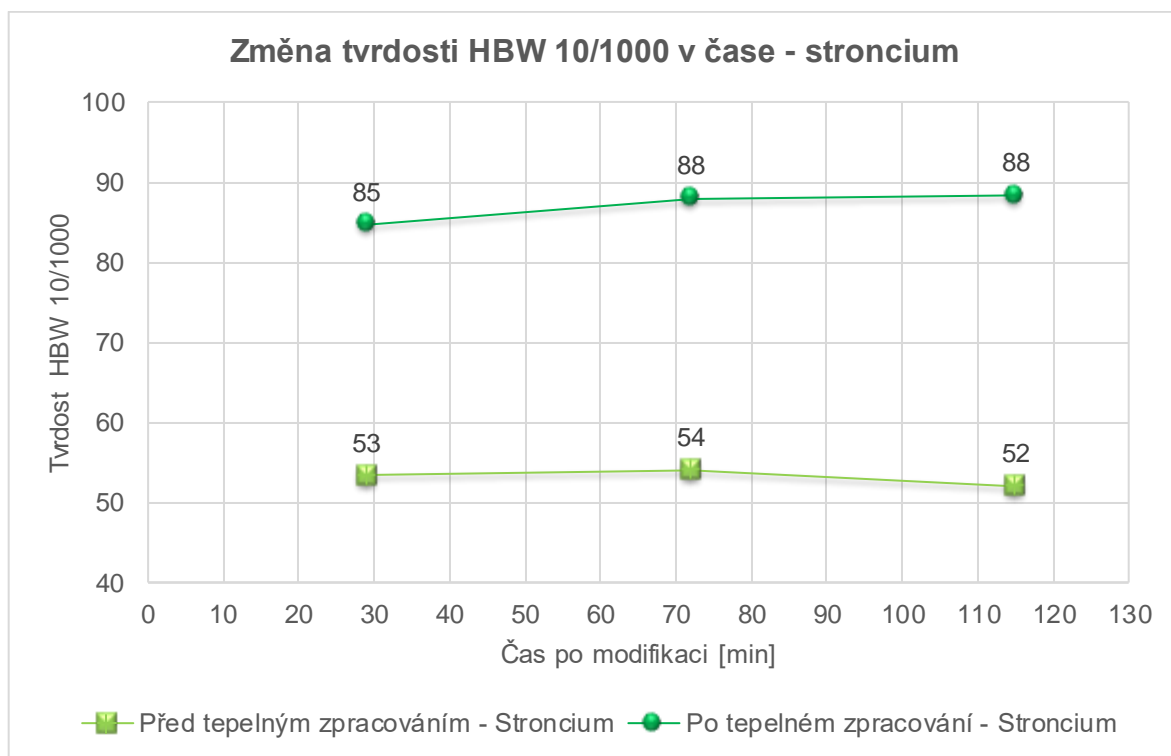
Tab. 9 Tabulka naměřených hodnot HBW 10/1000

SODÍK			
Označení vzorku - litý stav	Tvrdość HBW	Označení vzorku - po TZ	Tvrdość HBW
1	54	11	89
2	54	21	86
3	55	31	88
4	55	41	88
5	55	51	87
STRONCIUM			
P1	53	P11	85
P2	54	P22	88
P3	52	P33	88

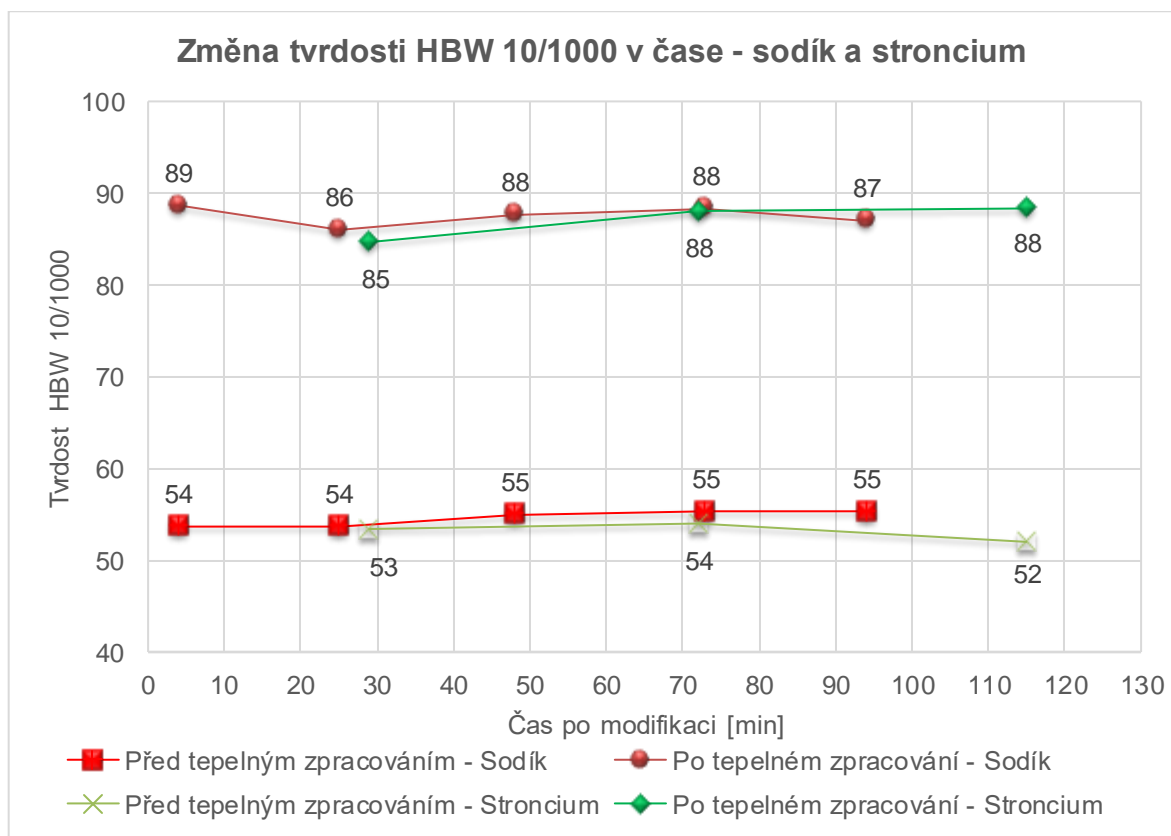
Hodnoty z tabulky 9 jsou vyneseny v grafech 11, 12 a 13.



Graf 11 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 na čase – sodík

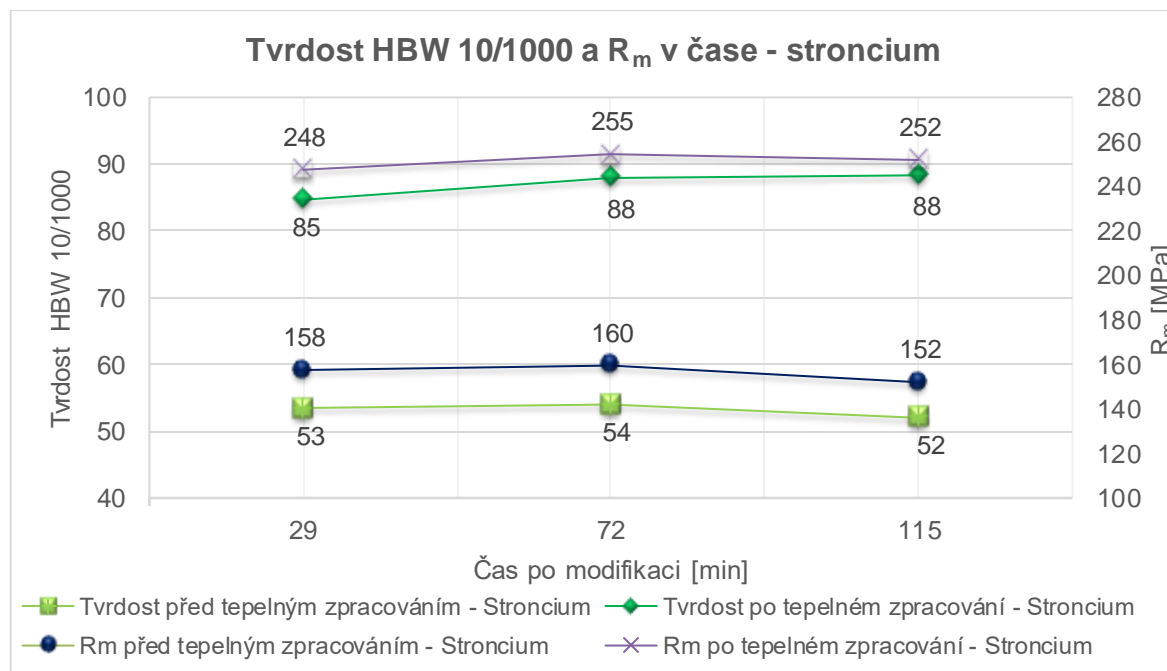


Graf 12 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 na čase – stroncium

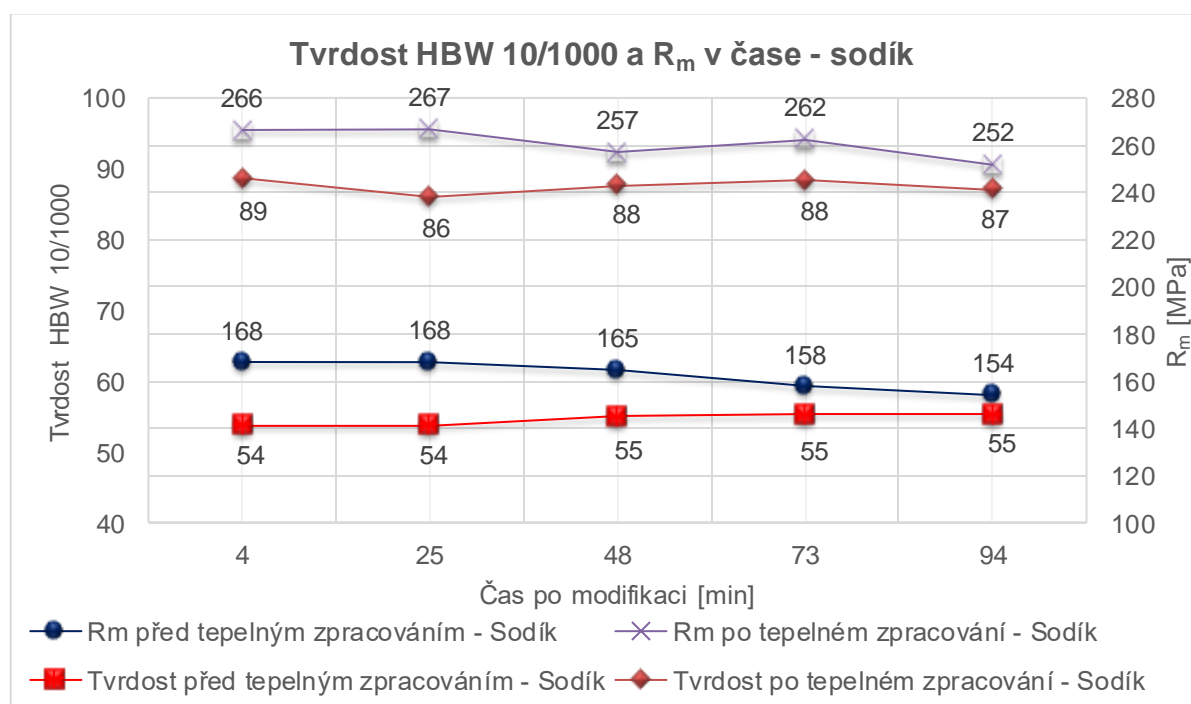


Graf 13 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 na čase – sodík a stroncium

Z grafu 13 je patrné, že dosažená tvrdost je téměř stejná u obou modifikátorů. U modifikace stronciem je, i přes malý počet měření, zřejmá závislost mezi tvrdostí a R_m . Závislost je vynesena v grafu 14. U sodíku taková závislost patrná není – graf 15.



Graf 14 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 a R_m na čase – stroncium



Graf 15 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 a R_m na čase – sodík

4.6.2 Rozbor hodnot spektrální analýzy

Chemická analýza prvků byla provedena na stolním jiskrovém emisním spektrometru Q4 TASMÁN (obrázek 31). Hlavním cílem měření chemického složení bylo stanovení obsahu modifikačních prvků sodíku a stroncia v průběhu lití. Ostatní prvky byly sledovány pouze informativně. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 10 a 11.



Obr. 31 Jiskrový spektrometr Q4 TASMÁN [23]

Tab. 10 Chemické složení taveniny s modifikací sodíkem v průběhu lití

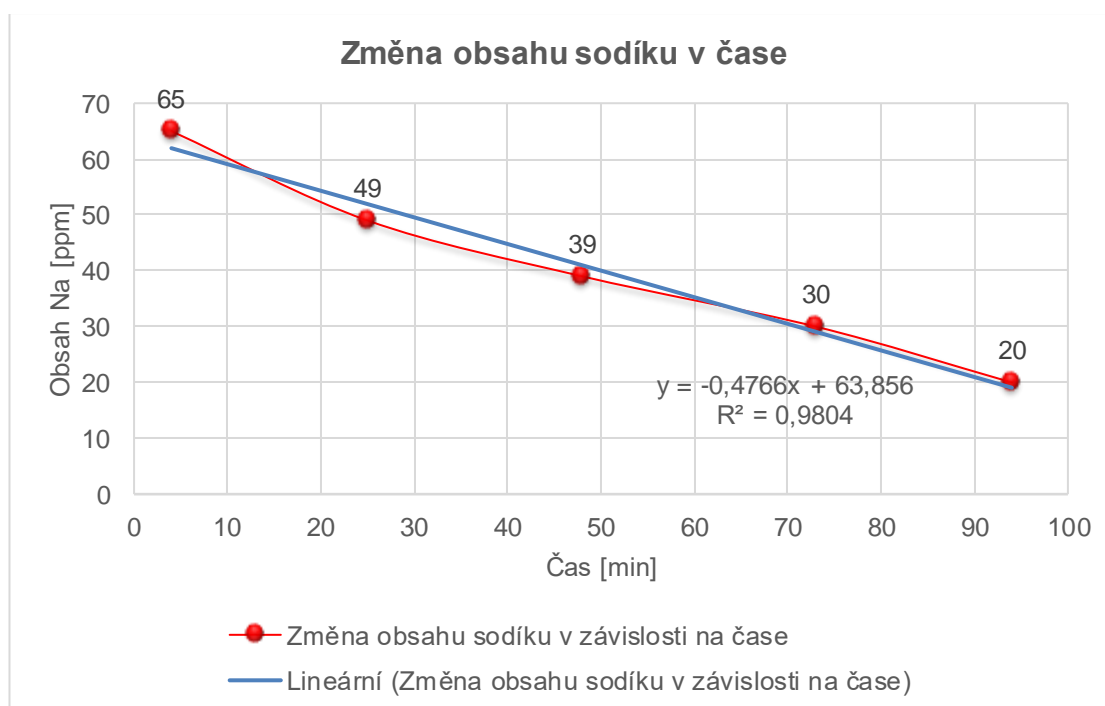
Slitina: AlSi10Mg	Modifikátor: Sodík									
Chem.složení:	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Na
Č. měření/čas po mod. [min]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1. / 4	8,9960	0,1450	0,0034	0,2600	0,3430	0,0038	0,0030	0,0054	0,0470	0,0065
2. / 25	8,8730	0,1430	0,0033	0,2570	0,3370	0,0037	0,0029	0,0053	0,0470	0,0049
3. / 48	8,9250	0,1480	0,0035	0,2620	0,3510	0,0038	0,0032	0,0056	0,0460	0,0039
4. / 73	8,8700	0,1460	0,0034	0,2590	0,3460	0,0038	0,0031	0,0056	0,0470	0,0030
5. / 94	9,0520	0,1460	0,0034	0,2580	0,3400	0,0037	0,0030	0,0055	0,0460	0,0020

Tab. 11 Chemické složení taveniny s modifikací stronciem v průběhu lití

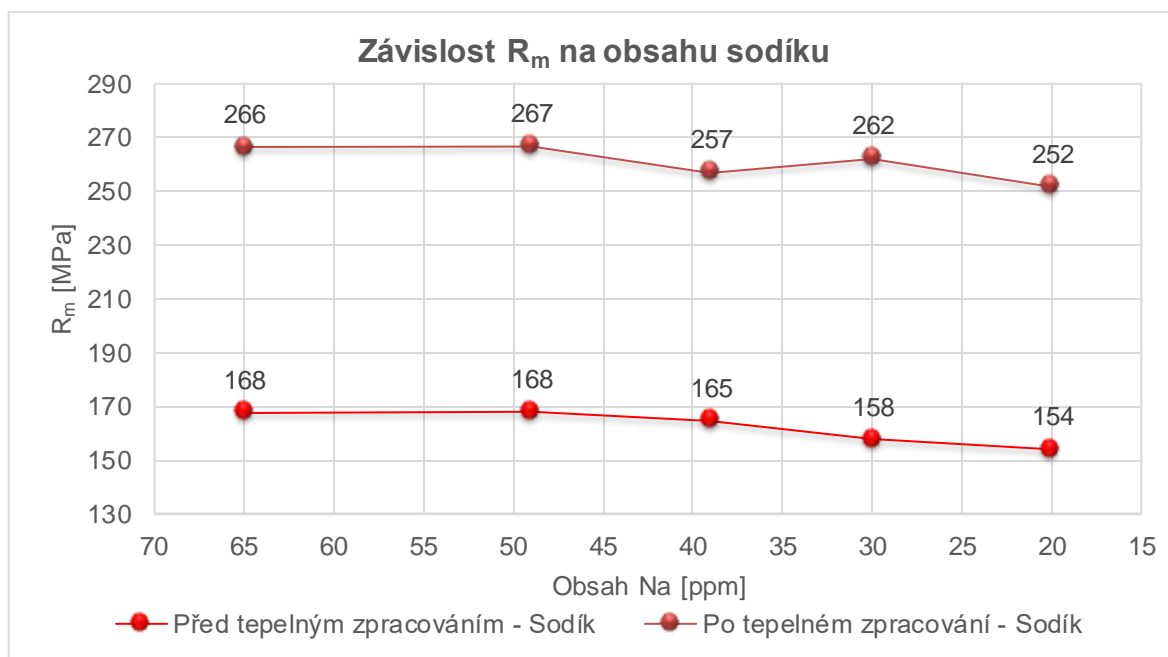
Slitina: A1Si10Mg	Modifikátor: Stroncium									
Chem.složení:	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sr
Č.měření/čas po mod. [min]	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1. / před mod.	9,0820	0,1390	0,0047	0,2550	0,3360	0,0035	0,0031	0,0086	0,0480	<0,0010
2. / 14	9,0360	0,1410	0,0048	0,2570	0,3380	0,0035	0,0030	0,0083	0,0480	0,0150
3. / 72	9,2020	0,1420	0,0048	0,2580	0,3390	0,0036	0,0031	0,0087	0,0480	0,0130
4. / 155	9,0790	0,1390	0,0047	0,2540	0,3240	0,0036	0,0027	0,0084	0,0480	0,0091

Sodík

Snižování obsahu sodíku vlivem vypařování je dobře viditelné v grafu 16. Z rovnice přímky, která prochází naměřenými hodnotami, lze určit snížení obsahu sodíku v tavenině za určitý čas. Během 10 minut se obsah sodíku sníží přibližně o 5 ppm. Z této skutečnosti lze vycházet, jestliže je potřeba taveninu domodifikovat v průběhu lití a není možnost použít spektrometr pro stanovení přesného chemického složení. Trend snižování obsahu sodíku by bylo ovšem nutné ověřit dalším měřením jednotlivých taveb. Vliv obsahu sodíku na pevnost v tahu R_m je vidět v grafu 17.



Graf 16 Závislost obsahu sodíku v čase



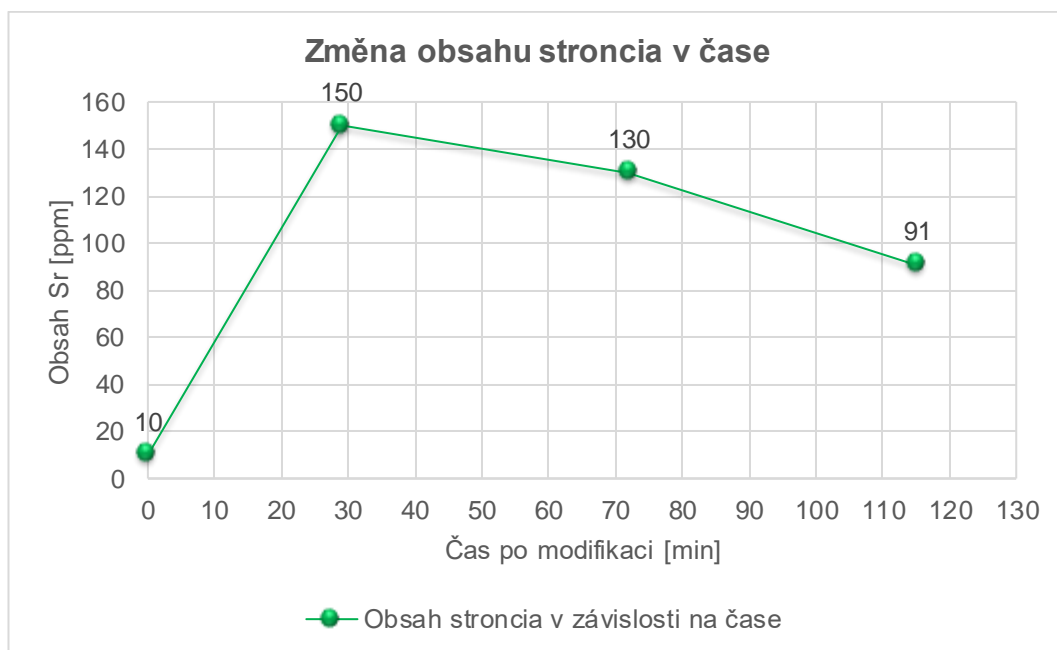
Graf 17 Závislost R_m na obsahu sodíku v tavenině

Z grafu 17 je patrné, že k poklesu R_m dochází při obsahu sodíku pod 50 ppm. Tato hodnota odpovídá přibližně času 30 minut po modifikaci. Tento fakt potvrzuje hodnoty uváděné v literatuře. Modifikační účinek by se dal teoreticky prodloužit vyšším počátečním namodifikováním (do 100 ppm Na, aby nedošlo k přemodifikování).

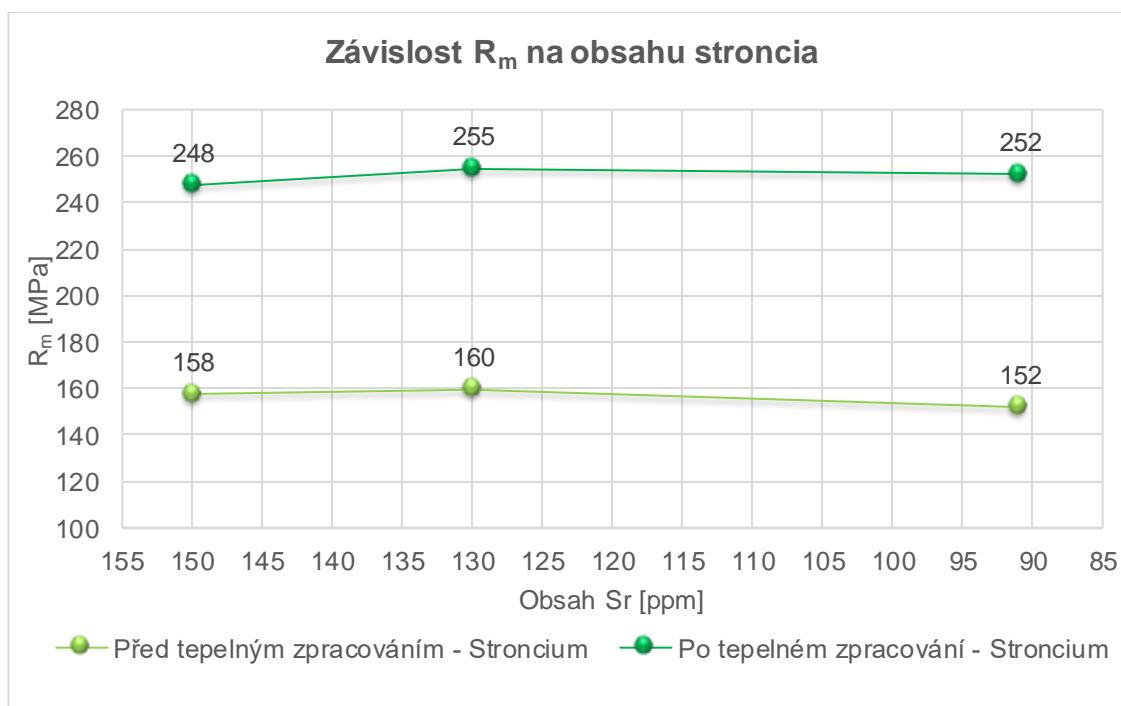
Stroncium

Z naměřených hodnot obsahu stroncia je zřejmé, že využití Sr při modifikaci bylo nižší než uvažovaných 90 %. Z tohoto důvodu nebylo dosaženo plánovaného obsahu 200 ppm. Hodnota 150 ppm, které bylo dosaženo, je v literatuře uváděna jako spodní mez pro dobrou modifikaci eutektika. Důvodem mohla být zvolená aplikace tyčí předslitiny AlSr10. Odplyněním mohla být část stroncia vynesena argonem na hladinu a stažena se zbytkem nečistot. Nízký obsah stroncia po modifikaci může být důvodem nižších mechanických hodnot, než tomu bylo u modifikace sodíkem.

Překvapivým faktem jsou poměrně velké ztráty stroncia v čase – lze vidět v grafu 18. Důvodem mohla být oxidace nebo špatná homogenizace taveniny. V grafu 19 je vidět závislost pevnosti v tahu R_m na obsahu Sr.



Graf 18 Závislost obsahu stroncia v čase
(první hodnota je obsah Sr před modifikací)

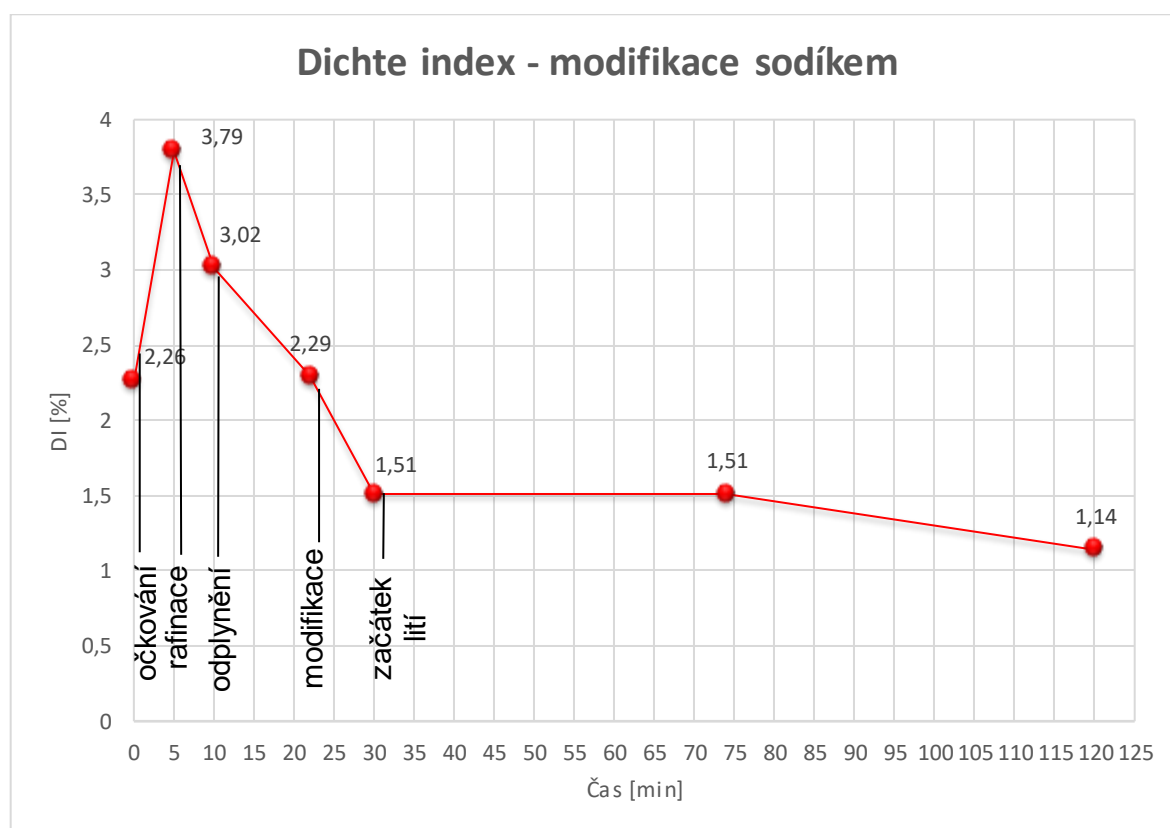


Graf 19 Závislost R_m na obsahu stroncia v tavenině

Z grafu 19 je zřejmý malý nárůst pevnosti v průběhu lití. Ke konci lití začaly pevnosti opět klesat. I přes nižší obsah stroncia v tavenině v průběhu lití, je nárůst pevnosti pravděpodobně důsledkem „inkubační doby“ náběhu modifikace stroncia.

4.6.3 Rozbor hodnot Dichte Indexu

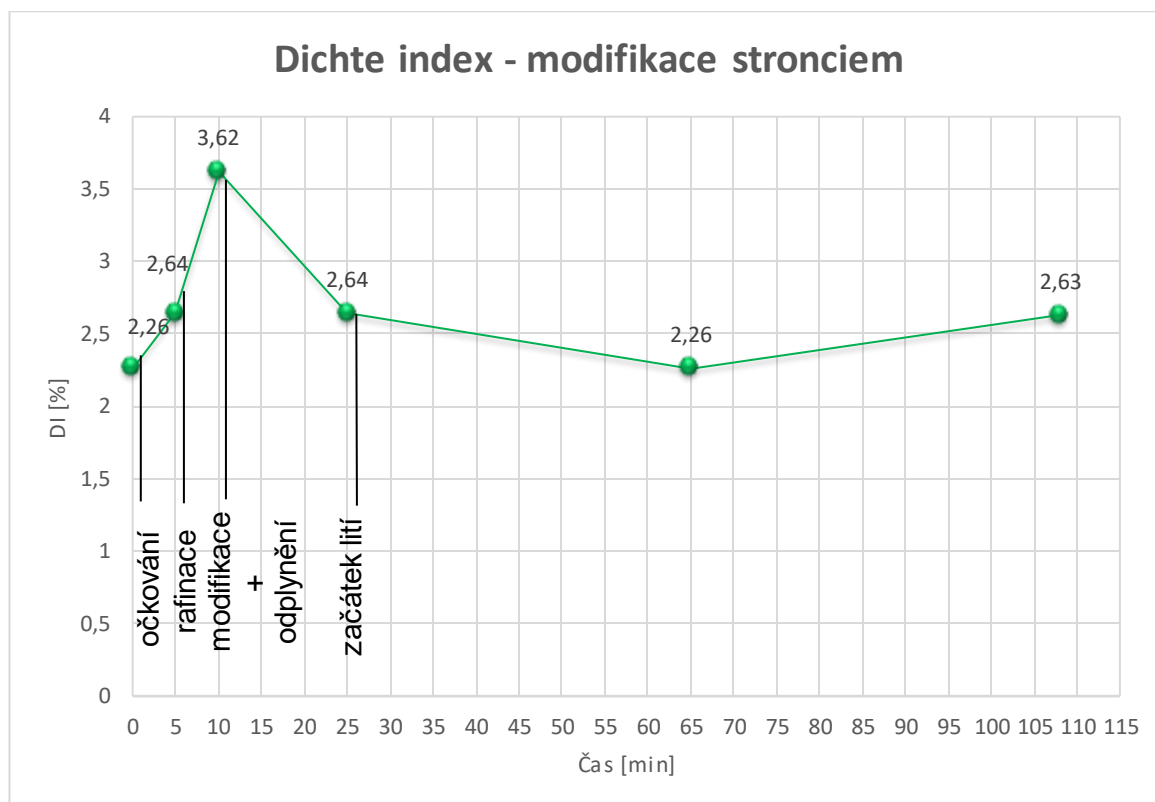
Naplynění taveniny bylo měřeno u obou zkušebních taveb před metalurgickým zpracováním, po každém metalurgickém zásahu a poté v průběhu lití. K měření bylo z Odboru slévárenství FSI VUT v Brně zapůjčeno speciální vybavení, které slouží ke stanovení Dichte Indexu. Naměřené hodnoty jsou vidět v grafu 20 a 21.



Graf 20 Hodnoty DI u modifikace sodíkem

Z grafu 20 je patrné, že k největšímu naplynění taveniny došlo po očkování. Důvodem je pravděpodobně bublání a víření kovu nebo navlhlá očkovací tableta. Nicméně následnou rafinací a odplyněním se hodnota DI dostala zpátky na počáteční hodnotu 2,29 %. Zajímavým faktem, je pokles DI po modifikaci na hodnotu 1,51 %. Modifikace byla doprovázena bouřlivou reakcí a předpokládalo se lehké naplynění. Vysvětlením může být, že vodík difundoval do bublin

z modifikační tablety a byl s nimi vynesena na hladinu. Během lití se hodnota DI držela na stejné úrovni (1,51 %) a ke konci dokonce klesla (1,14 %).



Graf 21 Hodnoty DI u modifikace stronciem

U druhé zkušební tavby se hodnota naplynění opět zvedla po očkování na 2,64 %. Při následné rafinaci se ovšem hodnota opět zvýšila téměř o 1 %. Důvodem byla zřejmě vlhkost v rafinační soli. Po odplynění hodnota klesla (2,64 %) a do konce lití už nevzrostla.

4.6.4 Rozbor metalografických vzorků

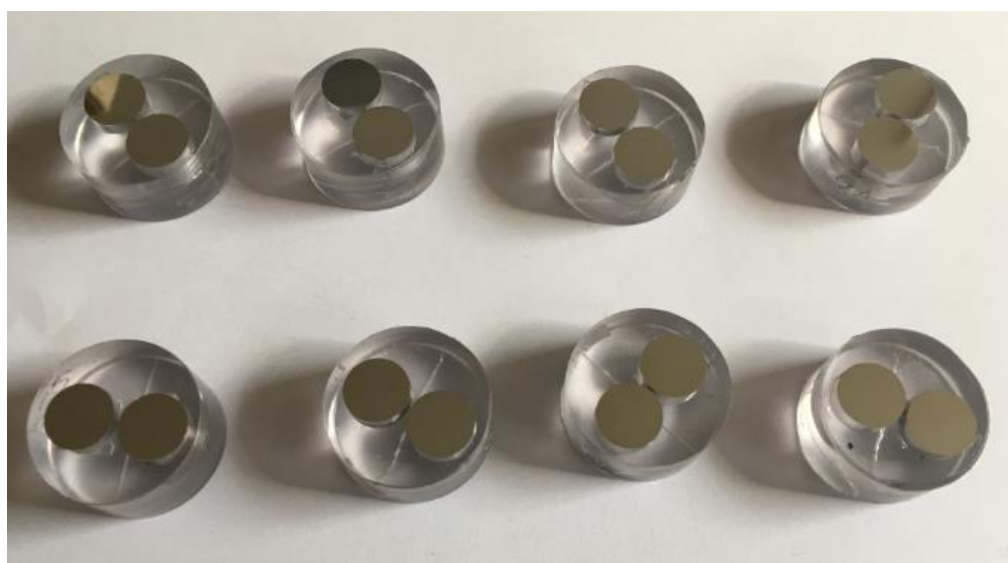
Vzorky pro metalografické výbrusy byly nařezány na pásové pile z přetržených zkušebních tyčinek (obrázek 32). Celkem bylo zhotoveno 16 výbrusů – 10 s modifikací sodíkem a 6 s modifikací stronciem. Nařezané vzorky byly zalisovány do průhledné plastické hmoty. Kvůli časové úspoře při leštění a úspoře materiálu byly zalisovány vzorky do jednoho válečku po dvou (obrázek 33). Po zalisování byly vzorky řádně označeny, vybroušeny a vyleštěny. Postup broušení a leštění je v tabulce 12.

Tab. 12 Postup leštění metalografických vzorků.

Pořadí	Pomůcky	Čas [min]	Otáčky [ot/min]
1.	Brusný kotouč - drsnost 80, voda	3	300
2.	Brusný kotouč - drsnost 220, voda	3	300
3.	Brusný kotouč - drsnost 800, voda	3	300
4.	Brusný kotouč - drsnost 1200, voda	3	300
5.	Leštící kotouč na hliník, leštící suspenze se zrnitostí 9 μm	5	150
6.	Leštící kotouč, leštící suspenze se zrnitostí 3 μm	5	150



Obr. 32 Uřezaný vzorek na metalografický výbrus

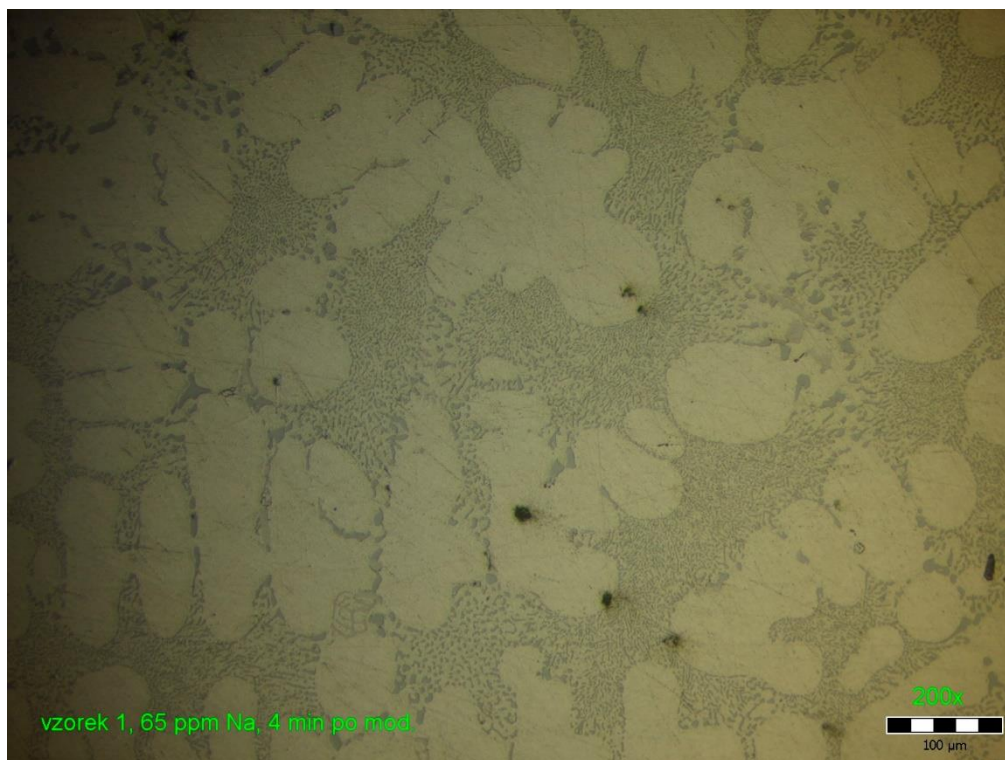


Obr. 33 Vyleštěné metalografické vzorky

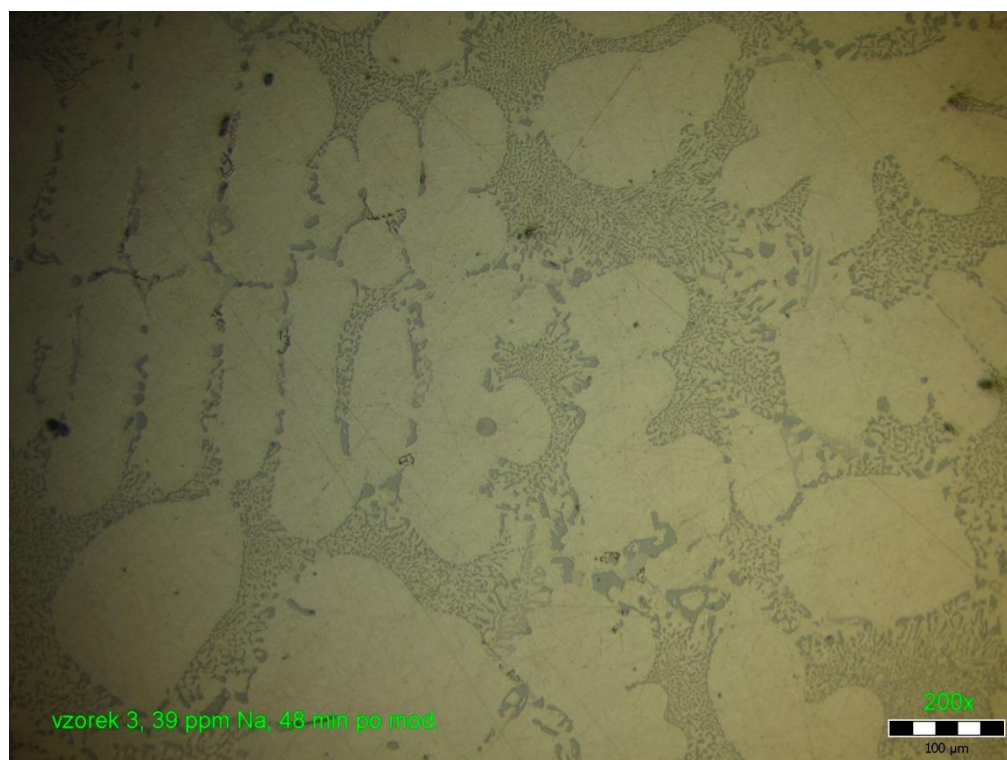
Vyleštěné vzorky byly umyty ve vodě, opláchnuty lihem a utřeny vatovým tampónkem. Následovalo pozorování vzorků pod mikroskopem MTM 406 se zaměřením na úroveň modifikace eutektika a pořízení snímků.

Pozorování vzorků

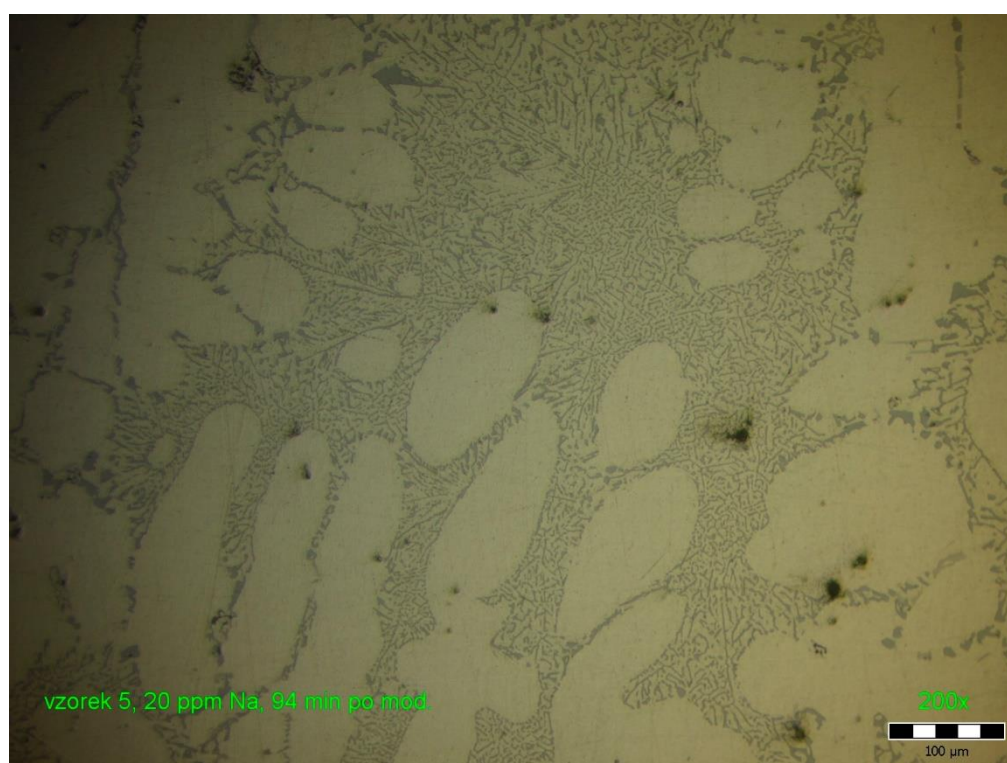
Pod mikroskopem byl pozorován vliv modifikace na tvar eutektického křemíku. Při modifikaci sodíkem lze na snímcích pozorovat postupné hrubnutí eutektika vlivem odeznívání modifikačního účinku. Na obrázku 34 lze vidět strukturu po čtyřech minutách od modifikace sodíkem. Eutektikum je dostatečně modifikované. Na obrázku 35 lze vidět strukturu po 48 minutách po modifikaci, kdy začaly dle mechanických zkoušek klesat mechanické hodnoty. Při porovnání těchto snímků je patrné, že eutektikum začíná pomalu hrubnout, což se projevilo právě na poklesu mechanických hodnot. Nejlépe pozorovatelná změna tvaru eutektika je na obrázku 36, na kterém je struktura po 94 minutách po modifikaci. Eutektikum je zde oproti obrázku 34 hrubé. Je zřejmé, že obsah 20 ppm Na je příliš nízký pro dosažení dobře modifikovaného eutektika.



Obr. 34 Struktura vzorku 1 - modifikace sodíkem (200x zvětšeno)



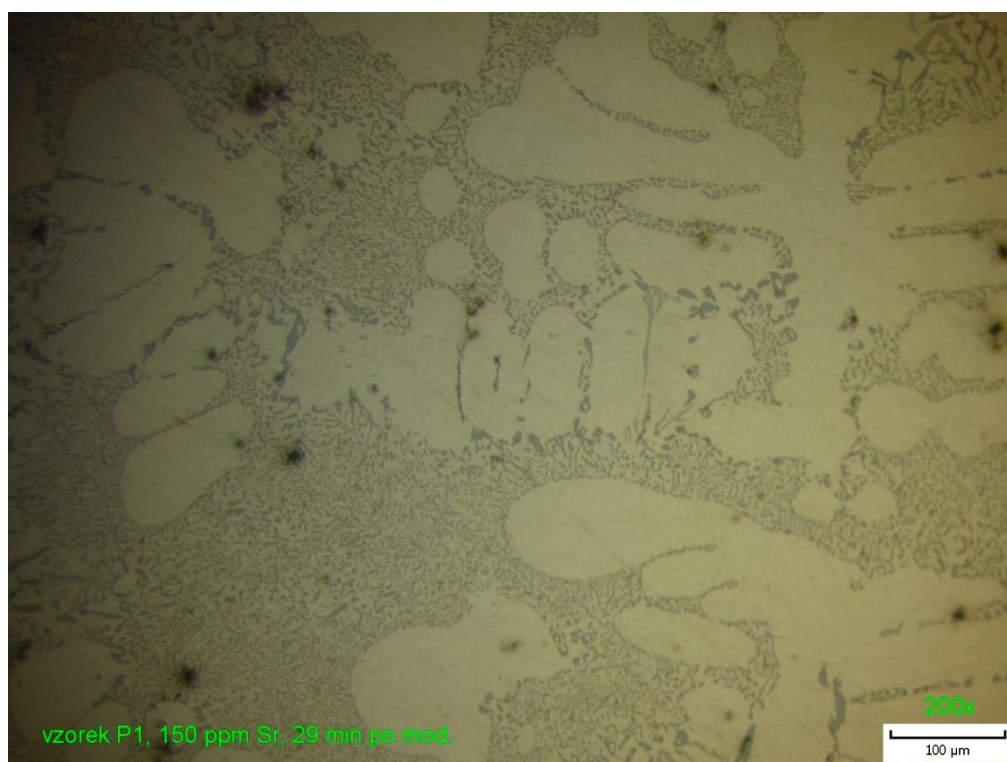
Obr. 35 Struktura vzorku 3 - modifikace sodíkem (200x zvětšeno)



Obr. 36 Struktura vzorku 5 - modifikace sodíkem (200x zvětšeno)

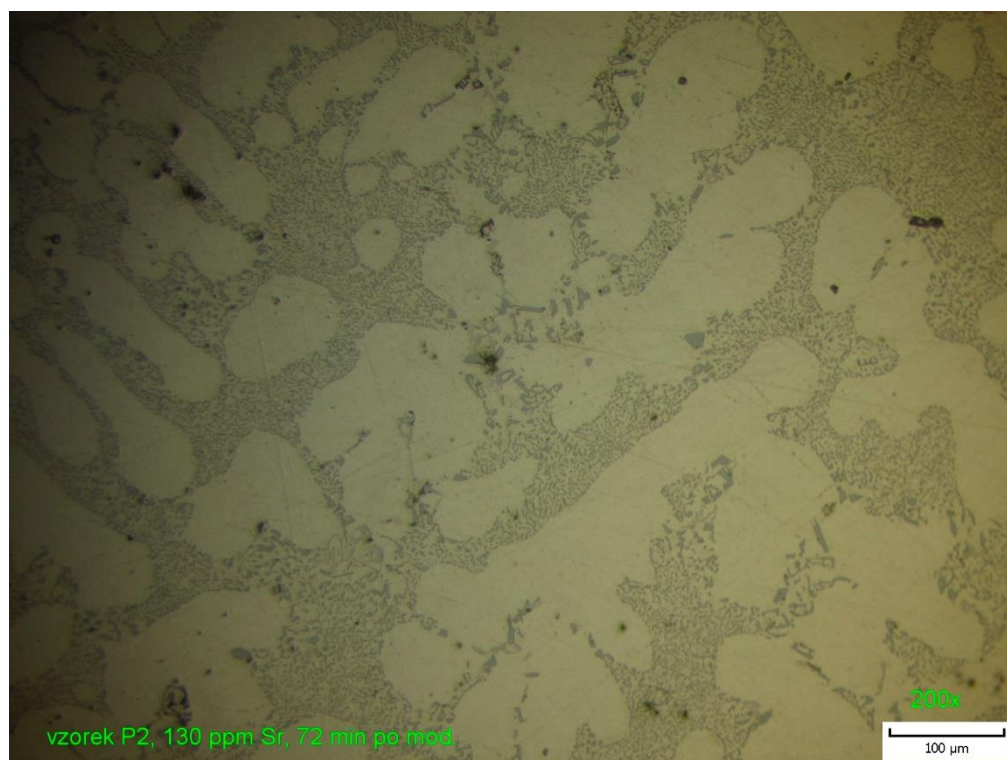
Na vzorcích modifikovaných stronciem lze také vidět modifikované eutektikum a je u všech vzorků velmi podobné. Zajímavostí je srovnání struktury vzorků P1 a P2. I přes nižší obsah stroncia u vzorku P2 je vidět jemnější eutektikum než u vzorku P1. Struktura těchto vzorků je na obrázku 37 a 38. Tomuto faktu odpovídají také lepší mechanické hodnoty u P2. Důvodem je pravděpodobně opět tzv. inkubační doba náběhu modifikačního účinku stroncia. Při porovnání vzorků P1, P2 a P3 (stroncium) se vzorky 1, 2, 3, 4 a 5 (sodík), mají vzorky se stronciem hrubší eutektikum než vzorky 1 a 2, velmi podobnou se vzorky 3 a 4, jemnější než vzorek 5.

Tepelné zpracování má na modifikované eutektikum efekt globularizace. Globularizace má příznivý účinek na mechanické vlastnosti, jelikož oblé tvary částic eutektického křemíku, nejsou takové koncentrátoři napětí, jako tvary špičaté. Globularizace eutektika po tepelném zpracování je dobře viditelná na vzorku 51 – obrázek 39.

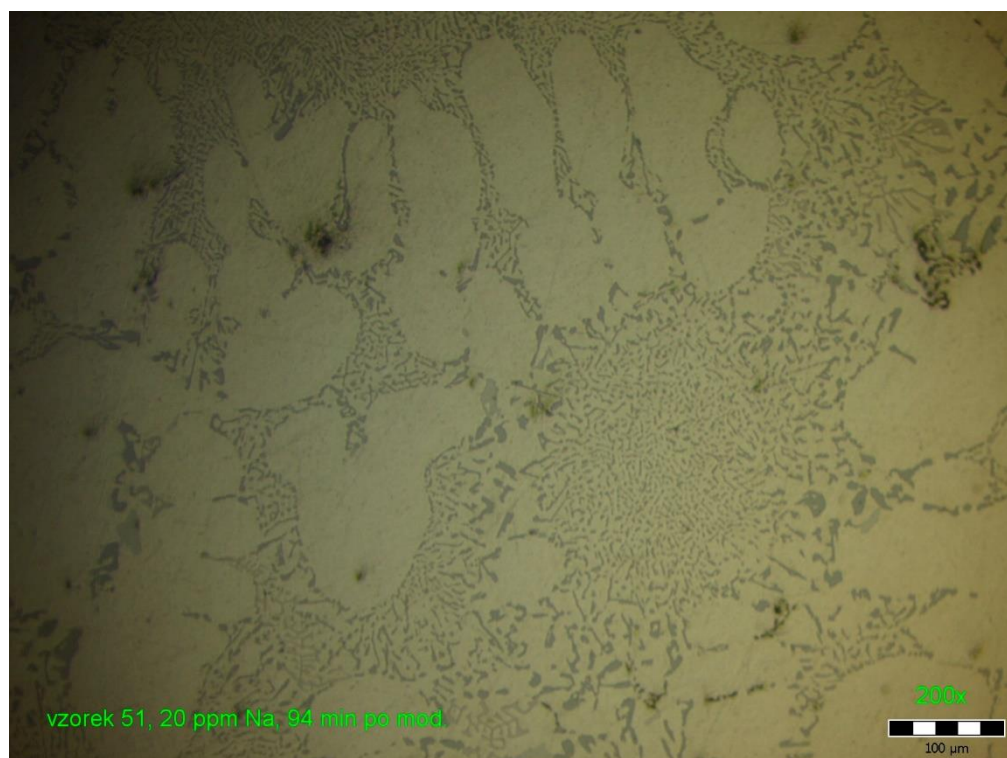


Obr. 37 Struktura vzorku P1 - modifikace stronciem (200x zvětšeno)

Všechny snímky struktur jednotlivých vzorků při zvětšení 100 a 200 jsou obsaženy v příloze 1 Snímky struktury vzorků modifikovaných sodíkem a v příloze 2 Snímky struktur vzorků modifikovaných stronciem.



Obr. 38 Struktura vzorku P2 - modifikace stronciem (200x zvětšeno)



Obr. 39 Struktura vzorku 51 - modifikace sodíkem, po TZ (200x zvětšeno)

ZÁVĚR

Cílem této práce byl popis a vyhodnocení stávajícího stavu přípravy a metalurgického zpracování taveniny ve firmě MSR Engines s.r.o., kde odlévají slitinu AISi10Mg pomocí technologie vytavitelného modelu. Následujícím krokem bylo navržení a ověření optimalizačního opatření pro zvýšení kvality taveniny. Z tohoto důvodu byly odlity dvě zkušební tavby, při kterých byly odebírány vzorky pro stanovení mechanických vlastností, chemického složení a naplynění.

První zkušební tavba proběhla dle stávajícího technologického postupu s modifikací sodíkem ve formě tablet EUTEKTAL T 201. U druhé zkušební tavby bylo jako modifikátor použito stroncium ve formě tyčí předslitiny AISr10.

Při zjišťování chemického složení se u modifikace sodíkem potvrdil teoretický fakt, že dochází k postupným ztrátám sodíku vlivem vypařování. Z počáteční hodnoty 65 ppm, klesl obsah sodíku po 48 minutách po modifikaci na 39 ppm. Tento obsah již nebyl dostatečný pro dobrou modifikaci eutektika a projevil se tak negativně na mechanických vlastnostech. Jelikož odlévání trvalo přes 1,5 hodiny, obsah sodíku klesl až na hodnotu 20 ppm. U modifikace stronciem došlo k zajímavému výsledku. V literatuře je uváděn modifikační účinek stroncia jako polotrvalý a ke ztrátám dochází pouze oxidací. Výsledky chemického složení ovšem ukázaly, že z hodnoty 150 ppm, klesl obsah stroncia během 43 minut po modifikaci na 130 ppm. Konečná hodnota po 115 minutách po modifikaci byla 91 ppm stroncia. Skutečnost vysokých ztrát stroncia nemusí být ovšem zcela pravdivá. Mohlo dojít ke zkreslení výsledků vlivem špatné homogenity taveniny. K ověření tohoto faktu by bylo potřeba provést další zkušební tavbu.

Mechanické vlastnosti byly měřeny na univerzálním trhacím stroji a tvrdoměru. Z výsledných hodnot je patrný pokles mechanických hodnot vlivem odeznívání modifikačního účinku sodíku. Během 90 minut klesla pevnost v tahu R_m v litém stavu o 14 MPa. Při modifikaci stronciem jsou mechanické hodnoty stabilnější. Během 86 minut klesla pevnost v tahu R_m v litém stavu o 6 MPa. Potvrdil se také fakt postupného nástupu modifikačního účinku stroncia. Mechanické hodnoty byly, i přes nižší obsah stroncia, po 72 minutách po modifikaci vyšší ($R_m = 160$ MPa, 54 HBW v litém stavu) než hodnoty po 29 minutách po modifikaci ($R_m = 158$ MPa, 53 HBW). Při srovnání hodnot sodíku a stroncia, jsou hodnoty dosažené sodíkem ze začátku modifikace vyšší ($R_m = 168$ MPa v litém stavu) a postupně se dostanou na stejnou úroveň ($R_m = 160$ v litém stavu). Důvodem může být silnější modifikační účinek sodíku nebo příliš nízký obsah stroncia.

Při pozorování struktury na metalografických výbrusech byla patrná nejlepší modifikace eutektika u vzorku 1 – modifikace sodíkem, 4 minuty po modifikaci. S narůstajícím časem po modifikaci eutektikum postupně hrublo, což se projevilo na mechanických vlastnostech jejich poklesem. Vzorky se stronciem měly strukturu velmi podobnou. Nejjemnější eutektikum lze vidět u vzorku P2 – 72 minut po modifikaci. Důvodem je opět postupný náběh modifikačního účinku. Na vzorcích po tepelném zpracování byl dobře pozorovatelný efekt globularizace eutektika, který je prospěšný pro lepší mechanické vlastnosti.

Naplynění bylo měřeno metodou dvojího vážení neboli stanovením Dichte Indexu. Bylo měřeno vždy po každém metalurgickém zásahu a v průběhu lití. U obou taveb došlo k naplynění taveniny po očkování (u sodíku o 1,53 % a u stroncia o 0,38 %). U tavby s modifikací sodíkem došlo následnou rafinací, odplyněním a modifikací k poklesu Dichte Indexu (1,51 %). Hodnota DI se poté držela v průběhu lití na přibližně stejné úrovni (1,51 %). U tavby s modifikací stronciem došlo po rafinaci k naplynění přibližně o 1 %. Důvodem byla nejspíše vlhká rafinační sůl. Po modifikaci a odplynění se DI opět snížil a během lití se držel na přibližně konstantní hodnotě (2,64 %).

Kvůli malému počtu zkoušených vzorků a měření, lze k výsledným hodnotám přihlížet pouze orientačně a nelze se podle nich zcela řídit. Nicméně je možné z nich vycházet a provedením dalších zkoušek a pokusů, stanovit ustálený technologický postup přípravy taveniny, podle kterého bude možné odlévat odlitky stálé a vysoké kvality.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. 1. vydání. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [2] Aluminium. *Periodic table* [online]. London: Royal Society of Chemistry, 2017 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>
- [3] GRUZLESKI, John a Bernard CLOSSET. *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys*. 1. vydání. Des Plaines, Illinois: American Foundrymen's Society, Inc., 1990. ISBN 0-87433-121-8.
- [4] Global Construction industry Opportunities and its Aluminium usage. *Lodec Jinshu* [online]. Shanghai: Lodec Jinshu, 2016 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://lodecjinshu.com/en/global-construction-industry/>
- [5] Images. *World Aluminium* [online]. London: The International Aluminium Institute, 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://www.world-aluminium.org/images/>
- [6] PAPPAS, Stephanie. Facts About Aluminium. *Livescience* [online]. New York: Live Science, 2014 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/28865-aluminum.html>
- [7] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [8] Aluminum casting. *Foundry Lexicon* [online]. Schaffhausen: Fritsch Media GmbH, 2018 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/aluminum-casting-3150/>
- [9] *Casting Design and Performance*. First printing. Ohio: ASM International, 2009. ISBN 978-0-87170-724-6.
- [10] CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook*. First edition. Oxford: Elsevier Ltd., 2011. ISBN 978-1-85617-809-9.
- [11] The Al-Si phase diagram. In: *Researchgate* [online]. Berlín: Researchgate, 2014 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/The-Al-Si-phase-diagram-6_fig6_258390327
- [12] GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. *Zlievarenstvo neželezných kovov*. První. Bratislava: ALFA, 1988. ISBN 063-566-88.
- [13] Modifier. *Foundry Lexicon* [online]. Schaffhausen: Fritsch Media, 2018 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/modifier-3214/>
- [14] Filtrace neželezných kovů. *Lanik* [online]. Boskovice: LANIK s.r.o., 2018 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.lanik.eu/filtrace-nezeleznych-kovu/>
- [15] Typy filtrů a jejich použití. *Lanik* [online]. Boskovice: LANIK s.r.o., 2018 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.lanik.eu/typy-filtru-a-jejich-pouziti/>
- [16] O naší firmě. *MSR Engines* [online]. Střelice u Brna: MSR Engines, 2016 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.msrengines.com/index.htm>
- [17] JANÍKOVÁ, Simona. České motorové surfy mají úspěch ve světě. Na prknech z Brna jezdí herec Stallone nebo pilot F1 Hamilton. *Ihned* [online]. Praha:

- Hospodářské noviny, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://ihned.cz/c1-66102120-ceske-motorove-surfy-maji-uspech-ve-svete-na-prknech-z-brna-jezdi-herec-stallone-nebo-pilot-fl-hamilton>
- [18] Gallery. *Jetsurf* [online]. Francie: Jetsurf, 2017 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.jetsurf.com/hq/gallery/photos/>
- [19] Products. *Norton Aluminium* [online]. Cannock: Norton Aluminium, 2017 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.nortal.co.uk/aluminium-alloy-products/>
- [20] Chemické a metalurgické preparáty pro úpravu taveniny. *Šebesta služby slévárnám s.r.o.* [online]. Hennef: Schäfer, 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.sebestasro.cz/cz/technologie/gravitacni-liti>
- [21] *DIN 50125 - Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. Berlin: Alleinverkauf der Normen durch Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [22] NOGOVÁ, Andrea. Když se řekne ZWICK. *FSInfo* [online]. Brno: FSI VUT Brno, 2013 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://fsinfo.fme.vutbr.cz/index.php/casopis/fsi-zive/45-kdyz-se-rekne-zwick>
- [23] JISKROVÝ SPEKTROMETR Q4 TASMAN. *BAS* [online]. Rudice: BAS Rudice spol. s r.o., 2018 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://www.bas.cz/bruker-quantron/q4_tasman.php

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Jaguar XJ – automobil, ve kterém je použito mnoho hliníkových odlitků a dílů [5]	10
Obr. 2 Ruda bauxitu, oxid hlinitý a houska hliníku [5]	11
Obr. 3 Hliníková kola [5]	12
Obr. 4 Binární diagram Al-Si [11]	15
Obr. 5 Závislost R_m a A_5 na obsahu křemíku ve slitinách na bázi Al-Si	16
Obr. 6 Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si ₉ po vytvrzení [7]	18
Obr. 7 Výřez rovnovážného diagramu Al-Cu [7]	19
Obr. 8 Výřez rovnovážného diagramu Al-Mg [7]	20
Obr. 9 Mikrostruktura slitiny AlSi7Mg [3]	24
Obr. 10 Schéma růstu jehlicovitého křemíku v tavenině [3]	25
Obr. 11 Dvojčatění v krystalu [3]	26
Obr. 12 Působení modifikace na strukturu (zvětšeno 200x) [3]	30
Obr. 13 Hrubé částice na hranicích zrn u slitiny AlSi7Mg. [3]	31
Obr. 14 Změna charakteru staženin modifikací [3]	32
Obr. 15 Základní strukturní elementy podeutektické slitiny Al-Si [7]	33
Obr. 16 Nukleace zárodků TiAl ₃ při peritektické reakci [7]	34
Obr. 17 Křivka chladnutí z termické analýzy pro vyhodnocení čísla KF [7]	35
Obr. 18 Účinek očkování u slitiny AlSi7 [7]	36
Obr. 19 Efekt rafinace [7]	37
Obr. 20 Keramické pěnové filtry na bázi Al ₂ O ₃ [14]	38
Obr. 21 Typy filtrace – vlevo hloubková, vpravo filtrační koláč [15]	39
Obr. 22 Porovnání velikosti bublin u trubice s otevřeným koncem a rotačního impeleru [3]	42
Obr. 23 Jízda na Jetsurfu [18]	43
Obr. 24 Voskový stromeček	45
Obr. 25 Vyžíhaná skořepina	45
Obr. 26 Odplyňování taveniny dmýcháním argonu	47
Obr. 27 Odlité zkušební tyčinky	52
Obr. 28 Výkres [21] a fotografie obrobené tyčinky pro zkoušku tahem	53
Obr. 29 Univerzální trhací stroj ZWICK Z250 Allround-Line [22]	54
Obr. 30 Vzorek pro měření tvrdosti	62
Obr. 31 Jiskrový spektrometr Q4 TASMAN [23]	65
Obr. 32 Uřezaný vzorek na metalografický výbrus	71
Obr. 33 Vyleštěné metalografické vzorky	71
Obr. 34 Struktura vzorku 1 - modifikace sodíkem (200x zvětšeno)	72
Obr. 35 Struktura vzorku 3 - modifikace sodíkem (200x zvětšeno)	73
Obr. 36 Struktura vzorku 5 - modifikace sodíkem (200x zvětšeno)	73
Obr. 37 Struktura vzorku P1 - modifikace stronciem (200x zvětšeno)	74
Obr. 38 Struktura vzorku P2 - modifikace stronciem (200x zvětšeno)	75
Obr. 39 Struktura vzorku 51 - modifikace sodíkem, po TZ (200x zvětšeno)	75

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Spotřeba hliníku v různých odvětvích v roce 2014 [4]	9
Graf 2 Závislost pevnosti v tahu R_m na čase – sodík	56
Graf 3 Závislost pevnosti v tahu R_m na čase – stroncium	57
Graf 4 Závislost pevnosti v tahu R_m na čase – sodík a stroncium	57
Graf 5 Závislost tažnosti A na čase – sodík	58
Graf 6 Závislost tažnosti A na čase – stroncium	59
Graf 7 Závislost tažnosti A na čase – sodík a stroncium	59
Graf 8 Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na čase – sodík	60
Graf 9 Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na čase – stroncium	60
Graf 10 Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na čase – sodík a stroncium	61
Graf 11 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 na čase – sodík	62
Graf 12 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 na čase – stroncium	63
Graf 13 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 na čase – sodík a stroncium	63
Graf 14 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 a R_m na čase – stroncium	64
Graf 15 Závislost tvrdosti HBW 10/1000 a R_m na čase – sodík	64
Graf 16 Závislost obsahu sodíku v čase	66
Graf 17 Závislost R_m na obsahu sodíku v tavenině	67
Graf 18 Závislost obsahu stroncia v čase	68
Graf 19 Závislost R_m na obsahu stroncia v tavenině	68
Graf 20 Hodnoty DI u modifikace sodíkem	69
Graf 21 Hodnoty DI u modifikace stronciem	70

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Charakteristiky slévárenských Al-Si slitin [3]	21
Tab. 2 Vzdálenost dvojčat u modifikace různých prvků [3]	26
Tab. 3 Rozpis skořepin pro zkušební tavby	46
Tab. 4 Chemické složení slitiny AlSi10Mg garantované dodavatelem [19]	46
Tab. 5 Zápis ze zkušební tavby s modifikací sodíkem	49
Tab. 6 Zápis ze zkušební tavby s modifikací stronciem	51
Tab. 7 Hodnoty R_m , $R_{p0,2}$ a A - modifikace sodíkem	55
Tab. 8 Hodnoty R_m , $R_{p0,2}$ a A - modifikace stronciem	55
Tab. 9 Tabulka naměřených hodnot HBW 10/1000	62
Tab. 10 Chemické složení taveniny s modifikací sodíkem v průběhu lití	65
Tab. 11 Chemické složení taveniny s modifikací stronciem v průběhu lití	66
Tab. 12 Postup leštění metalografických vzorků.	71

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Snímky struktury vzorků modifikovaných sodíkem

Příloha 2 Snímky struktury vzorků modifikovaných stronciem

