



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ROZLEHLÝCH TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ Z HLINÍKOVÝCH SLITIN

PRODUCTION OF SPACIOUS THIN WALL CASTINGS FROM ALUMINIUM ALLOY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK MEDUNA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výrobou rozlehlých tenkostěnných odlitků z hliníkových slitin s dobrou kvalitou povrchu. Při odlévání jsou použity různé typy formovacích směsí a slitin hliníku. Cílem práce je vyhodnotit kvalitu povrchu odlitků, rozbor vad a zhodnocení výsledků.

Klíčová slova

porezita, tenkostěnné odlitky, hliníkové slitiny

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the production of spacious thin-walled castings of aluminum alloys with a good surface quality. During the casting process, different types of molding sands and aluminum alloys are used. The target of the diploma thesis is to evaluate the casting surface quality, to analyse the defects and to evaluate the results.

Key words

porosity, thin-walled castings, aluminum alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MEDUNA, R. *Výroba rozlehlých tenkostěnných odlitků z hliníkových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma výroba rozlehlých tenkostěnných odlitků z hliníkových slitin vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

18.05.2008

.....
Radek Meduna

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jaromírovi Roučkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	8
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1.1 Technologie rotomolding.....	9
1.1.1 Rotační tváření plastů.....	9
1.1.2 Představení společnosti CZ PLAST s.r.o.....	11
1.1.3 Formy pro rotomolding.....	13
1.1.4 Nastínění řešeného problému - kvalita forem.....	14
1.2 Hliník a jeho slitiny.....	16
1.2.1 Historie používání hliníkových slitin.....	16
1.2.2 Slévárenské slitiny hliníku.....	16
1.2.3 Vlastnosti slitin hliníku.....	16
1.2.4 Technologické vlastnosti.....	17
1.2.5 Mechanické vlastnosti.....	17
1.3 Slitiny Al-Si.....	18
1.3.1 Vliv legujících prvků na vlastnosti slitiny Al-Si.....	18
1.3.2 Vliv přísadových prvků na porezitu slitin Al-Si.....	20
1.4 Krystalizace slitin Al-Si.....	22
1.4.1 Růst primární fáze – vliv intenzity tuhnutí.....	22
1.4.2 Očkování slitin hliníku.....	23
1.4.3 Modifikace eutektika ve slitinách Al-Si.....	25
1.5 Plyny ve slitinách hliníku.....	27
1.5.1 Rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku.....	27
1.5.2 Vznik plynových dutin v odlitcích.....	28
1.5.3 Mechanizmy vzniku porezity.....	29
1.5.4 Odplyňování hliníkových slitin.....	31
1.5.5 Způsoby odplyňování.....	32
1.5.6 Rafinace hliníkových slitin.....	33
1.5.7 Filtrace hliníkových slitin.....	34
1.6 Odlévání rozlehlých tenkostěnných odlitků.....	36
1.6.1 Formovací směsi.....	36
1.6.2 Interakce tekutého kovu s formou.....	37
1.6.3 Vtokové soustavy pro slitiny Al-Si.....	38
2 experimentální část.....	40
2.1 Představení slévárny.....	40
2.2 Odlévané slitiny.....	40
2.2.1 Slitina DIN 226.....	40
2.2.2 Slitina ČSN 424331.....	41
2.2.3 Slitina DIN 231.....	41
2.3 Postup při výrobě odlitků.....	42
2.3.1 Výroba formy.....	42
2.3.2 Formovací směsi.....	43
2.3.3 Úprava taveniny.....	47

2.3.4 Kontrola taveniny.....	48
2.3.5 Odlévání.....	49
2.3.6 RTG zkoušky.....	50
2.4 Metalografické výbrusy vzorků.....	52
2.4.1 Vyřezávání vzorků.....	52
2.4.2 Metalografické výbrusy.....	53
2.5 Vyhodnocení vzorků.....	54
2.5.1 Hodnocení kvality povrchu odlitku	54
2.5.2 Hodnocení porezity povrchu odlitku	55
2.5.3 Hodnocení porezity v řezu stěnou odlitku	56
2.5.4 Analýza kulatosti pórů	58
Závěr	62
Seznam použitých zdrojů.....	63
Seznam použitých zkratk a symbolů	65
Seznam příloh.....	66

Úvod

Slévárenské slitiny hliníku jsou často používány pro své příznivé vlastnosti. V první řadě je to dostupnost hliníku jako samostatného prvku v zemské kůře, kde je vázán ve sloučeninách, jako jsou bauxit, kryolit, korund kaolin a další. Dále jsou výhodné technologické vlastnosti, které jsou důležité zejména pro výrobu součástí, počínaje slévárenskými vlastnostmi jako jsou zabíhavost, nízká teplota tavení, dále pak odolnost proti korozi, obrobitelnost a další. Z hlediska mechanických vlastností jsou nejzajímavější pevnost, tvrdost a tažnost. Požadovaných vlastností hliníkových slitin lze dosáhnout kombinací různých legujících prvků, případně následným tepelným zpracováním odlitků, které je vhodné především pro zvýšení tvrdostí.

Technologie odlévání hliníkových odlitků je vázána především na požadovaných vlastnostech a tvarové složitosti odlitku a na ekonomičnosti výroby. Pro velké série odlitků menších a středních rozměrů se nejčastěji používá technologie tlakového lití, kokilové lití a nízkotlaké lití. Všechny tyto metody mají společnou charakteristiku v podobě kovové formy, tzv. kokily, jejíž výroba je poměrně nákladná. Dále je značně rozšířena metoda lití do skořepinových forem – vytavitelného voskového modelu, která je vhodná pro menší, ale tvarově složitější odlitky. Pro kusovou a malosériovou výrobu se používá technologie lití do pískových forem. Je to velmi flexibilní metoda, lze ji použít pro všechny hmotnostní a tvarové kategorie odlitků. V případě výroby rozlehlých tenkostěnných odlitků je to s ohledem na nízkou sériovost (ve většině případů se jedná pouze o kusy) v podstatě jediná možnost výroby.

Rozlehlé tenkostěnné odlitky ze slitin hliníku se používají jako „matečné“ formy pro výrobu plastových součástí technologií rotačního tváření plastu, známou spíše pod názvem ROTOMOLDING. Tato technologie bude více přiblížena v následujících kapitolách. Požadavky na formy pro rotační tváření spočívají především v dodržení tloušťky stěny materiálu a ve výborné kvalitě povrchu odlitku. Tyto hlavní požadavky jsou nejdůležitějším faktorem s ohledem na kvalitu výroby, a proto se tato práce bude dále zabývat především studiem vlivu typu hliníkové slitiny, jakosti taveniny, druhu formy a vtokového systému s ohledem na výše uvedené požadavky [1], [2].

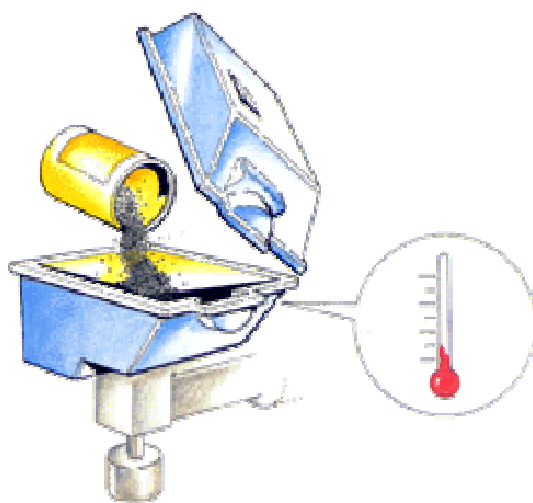
1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Technologie rotomolding

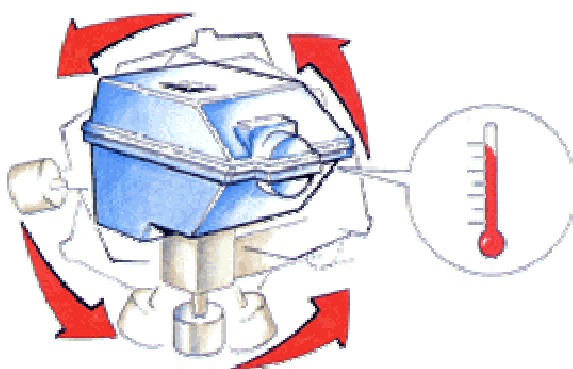
Tato kapitola ve stručnosti přiblíží výrobu plastových dílů technologií rotačního tváření plastů.

1.1.1 Rotační tváření plastů

Rotační tváření plastů je moderní technologie v Evropě známá spíše pod názvem ROTOMOLDING. Jde o přetváření základního plastového granulátu pomocí tepla, gravitace a vnitřního tvaru formy do výrobku, který je dutý. Schéma technologie rotačního tváření je znázorněno na obrázku 1.1.1–1.1.4 [3].



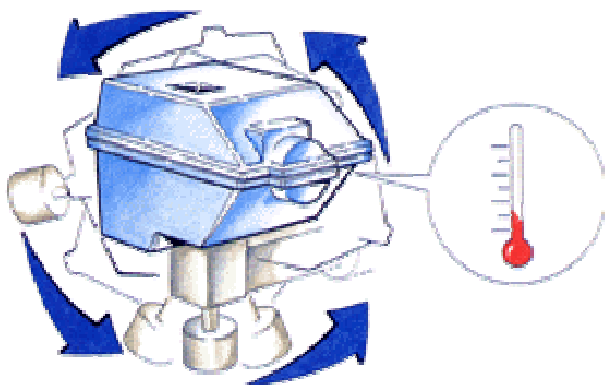
Obr. 1.1.1 Plnění formy základním materiálem.



Obr. 1.1.2 Sintrování za působení tepla a rotace

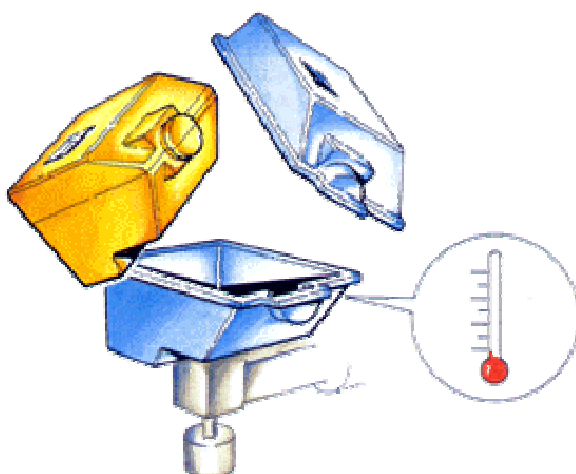
Forma je dělená na dvě nebo více částí. Základní materiál v podobě práškového granulátu se v přesně odměřeném množství nasype do otevřené formy (obr. 1.1.1). Poté dojde k uzavření formy.

Uzavřená forma vjíždí do pece, kde dochází k sintrování za působení tepla a pomocí rotace kolem dvou os (obr. 1.1.2). Přesná definice rotace umožňuje zatečení materiálu do méně přístupných míst a určuje tloušťku stěny.



Po dosažení definované teploty forma dále rotuje v peci, dokud nedojde k natavení veškerého materiálu na stěnu formy a spečení materiálu. Při další fázi výroby forma vyjede z pece a dochází k chlazení za pomoci proudícího vzduchu. Forma stále rotuje (**obr. 1.1.3**).

Obr. 1.1.3 Chlazení formy



Po dochlazení na stanovenou teplotu dochází k vyjmutí hotového výrobku z formy (**obr. 1.1.4**). Po vyjmutí výrobku se odstraní otřepy z dělicí roviny.

Obr. 1.1.4 Vyjmutí hotového výrobku z formy

Jako vstupní surovinu lze použít polypropylen, polyethylen a polyamid v práškové formě. Všechny typy materiálu jsou dodávány v široké barevné škále, je tak možno zajistit barevné provedení výrobku. Vlastnosti těchto materiálů jsou upraveny speciálně pro tuto technologii a jsou odolné proti UV záření.

Výrobky jsou duté, bez vnitřních pnutí a švů, mají pravidelnou vnitřní strukturu a tvarovou paměť. Vzhledem k použité technologii mají výrobky zesílené hrany a rohy, které jsou tak nositelem pevnosti a slabší, pružnější stěny zvyšují odolnost výrobků proti poškození. Při výrobním procesu se do výrobku dají zalít matice, šrouby a nátrubky, které pak slouží k upevnění výrobku ke konstrukci nebo k montáži dalších komponentů a zařízení. Výrobky jsou plně recyklovatelné, použitý materiál je čistý a při výrobě nedochází k zatěžování životního prostředí. Standardními výrobky jsou různé

druhy nádrží, ale lze vyrábět i ploché předměty, vzniklé dodatečným opracováním polotovarů.

Přednosti rotačního tváření plastů:

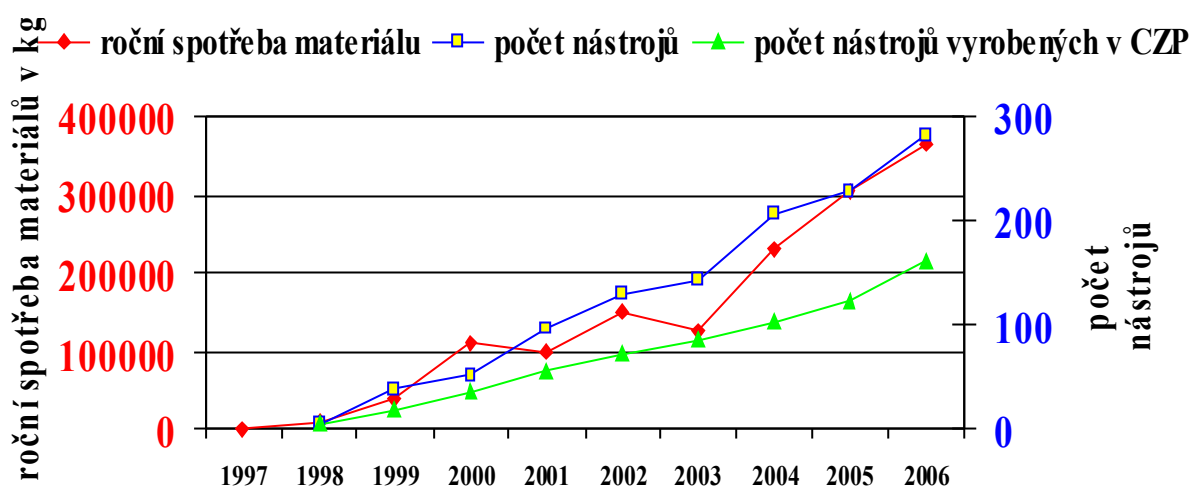
- produktivní výroba i malých sérií výrobků
- výroba uzavřených těsných nádob
- možnost velikosti výrobků od malé velikosti až po výrobky velkých rozměrů ($1 \text{ dm}^3 - 10\,000 \text{ dm}^3$)
- tloušťka stěny výrobků až několik cm
- možnost definování složitých tvarů a detailů již při výrobní operaci (závity, osazení apod.)
- možnost usazení výztužných kovových profilů do výrobku (závitové vložky, příruby, vypouštěcí zátky, atd.)

Zápory rotačního tváření plastů:

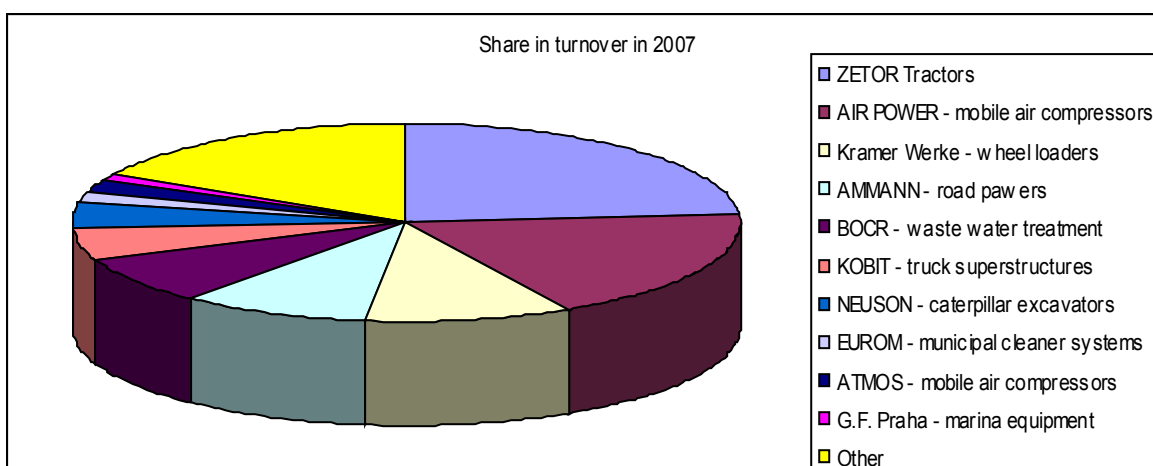
- vzhledem k velkému smrštění materiálu nelze při výrobě dosáhnout vysokých rozměrových přesností

1.1.2 Představení společnosti CZ PLAST s.r.o.

Společnost CZ PLAST s.r.o. byla založena na jaře roku 1997 jako soukromá společnost s ryze českým kapitálem. Od svého vzniku si začala budovat postavení na českém trhu a postupně začala pronikat se svými dodávkami do okolních zemí. V současnosti je CZ PLAST na pozici největšího českého výrobce v oblasti rotačního tváření plastů a disponuje také silným odběratelským zázemím po celé Evropě i v USA. Na obrázku 1.1.5 a 1.1.6 je znázorněna stoupající tendence výroby, resp. největší odběratelé firmy CZ PLAST s.r.o. [3].



Obr. 1.1.5 Výrobní statistiky firmy CZ PLAST s.r.o.



Obr. 1.1.6 Nejvýznamnější odběratelé firmy CZ PLAST s.r.o.

Výrobní program společnosti je zaměřen pouze na zakázkovou výrobu, především se jedná o specializované technické výrobky, jako jsou nádrže o různých objemech, podle vnitřního media lze rozdělit na palivové - autobusy Karosa, traktory Zetor, motocykly, nádrže na chladicí kapalinu – silniční válce, kryty a blatníky pro stroje Kramer, vzduchové potrubí a jiné. Ukázky výrobků jsou uvedeny na obrázku 1.1.7 [3].





Obr. 1.1.7 Ukázky výrobků společnosti CZ PLAST s.r.o.

Cílem společnosti CZ PLAST s.r.o. je poskytovat komplexní služby spojené s dodávkami plastových dílů vyráběných technologií rotačního tváření, spoluprací při návrhu a konstrukci výrobku, výrobu formy, vlastní výrobou a dodávkou hotových výrobků. Mezi další cíle patří také vývoj nových materiálů. V roce 2007 se společnost CZ PLAST podílela a následně patentovala nový materiál pro rotační tváření. Materiál s obchodním názvem CORPLASTEN[®] je vysoce odolný proti otěru a otevírá tak nové možnosti pro využití rotačně tvářených plastů v oblastech manipulace se sypkými materiály, např. při dopravě písků, stavební suti apod. Využitím materiálu CORPLASTEN[®] se při testovacím provozu v pískovně dosáhlo zvýšení životnosti plastového dílu až na 5-ti násobek původní hodnoty a to při zachování všech vlastností. Tento materiál byl oceněn na veletrhu Chemplast a na Mezinárodním strojírenském veletrhu 2007 v Brně mu byla udělena zlatá medaile technického týdeníku.

Společnost CZ PLAST s.r.o. je držitelem certifikace ISO 9001:2001.

1.1.3 Formy pro rotomolding

Formy pro rotační tváření plastů jsou navrhovány s prvotním cílem dlouhodobé výroby kvalitních plastových výrobků, požadovaných vlastností, tvarové a rozměrové stálosti a jakosti povrchu. Formy se vyrábějí svařováním – z ocelového plechu, frézováním z bloku hliníku nebo jako hliníkové odlitky. Svařování se používá především pro velké a tvarově nenáročné formy.

Výchozím materiálem pro výrobu forem odléváním jsou slitiny hliníku. Tento materiál je vhodný zejména pro své příznivé technologické a mechanické vlastnosti, jako je nízká hmotnost, dostatečná pevnost, snadné obrábění, výborná tepelná vodivost a odolnost proti korozi. Na obrázku **1.1.8** je znázorněna polovina formy pro rotační tváření plastů, vyrobená odléváním z hliníkové slitiny.



Obr. 1.1.8 Forma pro rotomolding



Obr. 1.1.9 Makroporezita

1.1.4 Nastínění řešeného problému - kvalita forem

Kvalita plastového výrobku je přímo úměrná kvalitě vyrobené formy. Rozměrové tolerance jsou kontrolovány již při výrobě odlitků, při samotném dokončování forem je brán zřetel na přesné obrobení dosedacích ploch v dělicí rovině a na vnitřní kvalitu povrchu formy. Ta musí být dána především kvalitou odlitku, protože při dokončování forem pouze dochází k začištění vnitřních, tj. funkčních ploch. Hliníkové odlitky mají sklony k tvorbě porezity, což může být častou příčinou znehodnocení daného plastového výrobku. Jemný plastový prášek se při ohřátí formy dostane do polotekutého stavu a naprosto přesně kopíruje daný povrch. Pokud se ve formě vyskytuje porezita větších rozměrů (řádově se jedná o jednotky milimetrů viz **obr. 1.1.9**), dochází následně k zatečení plastu do póru, kde zatuhne a ve výsledku dochází z pozitivního „nárustu“ na povrchu formy viz obrázek **1.1.10**. Odstranění těchto nárůstů je ekonomicky nemožné (vzhledem k velké pracnosti) a technologicky velice složité, protože se nárůsty vyskytují nepravidelně a na jejich odstranění by nešlo použít žádnou mechanizaci. Pokud se však jedná o pohledové díly, nepomůže ani odstranění těchto nárůstů, neboť na materiálu jsou viditelné stopy po opracování.

Mikroporezita na vnitřním povrchu formy má zcela odlišný dopad na výrobek. Uzavřením vzduchu v dutině a jeho následným ohříváním dojde k expanzi a přehřátý vzduch pronikne do nataveného plastového materiálu, kde vytvoří vzduchovou bublinu, která je po ochlazení v kontaktu s povrchem plastu, jak je patrné z obrázku **1.1.11**.



Obr. 1.1.10 Nárůstky na povrchu formy



Obr. 1.1.11 Bublíny na povrchu výrobku

1.2 Hliník a jeho slitiny

Tato kapitola se bude zabývat slitinami hliníku, které jsou vhodné pro odlévání tenkostěnných odlitků do netrvalých forem, vlastnostmi slitin a vhodnosti jejich použití.

1.2.1 Historie používání hliníkových slitin

Hliník se získává elektrolýzou hydratovaného oxidu hlinitého, známého spíše pod názvem bauxit. Bauxit je směs oxidů, v němž má největší zastoupení Al_2O_3 . Historie používání hliníku není příliš dlouhá, poprvé byl laboratorně získán v roce 1825 Christanem Oerstedem [1]. K výraznému rozvoji používání hliníku a jeho slitin přispěly obě světové války, kdy byl hliník využíván především při stavbě letadel. Další výrazný nárůst výroby odlitků nastal po druhé světové válce, především rozšířením odlévání do kovových forem a tlakového lití. Nevýznamnějším odběratelem hliníkových odlitků je především dopravní průmysl – automobilový a letecký. V České Republice nedochází během posledních let k výraznému zvýšení výroby hliníkových odlitků, ale výroba se soustřeďuje spíše na náročnější odlitky. Z porovnání statistických údajů produkce odlitků pro rok 2005 – 80252 tun [4] a 2004 – 74243 tun [5] je zřejmé, že se produkce hliníkových odlitků výrazně nemění.

Budoucnost hliníkových slitin souvisí především s unikátními vlastnostmi těchto slitin a především se zlepšováním technologií výroby odlitků např. vývoji nových rafinačních procesů a lepšího vyčištění taveniny, lepší filtraci, výzkumu makrosegregace a tvorby intermetalických fází. Oproti tomu nelze očekávat další výrazný vývoj nových slitin [6].

1.2.2 Slévárenské slitiny hliníku

Protože vlastnosti čistého hliníku jsou pro konstrukční účely nevyhovující, používají se pro výrobu odlitků především slitiny hliníku. Ve slitinách je základním prvkem vždy hliník, jako hlavní přísadové prvky jsou nejčastěji používány Si – slitiny jsou známy pod názvem **silumíny**, dále Cu – duralaluminium a Mg – hydronalium. Vedlejší přísadové prvky (Cu, Mg a další) ovlivňují některé vlastnosti daného typu slitiny – např. zvýšení mechanických vlastností, zlepšují tepelné zpracování, ovlivňují strukturu kovu. Nejčastějšími používanými slitinami jsou slitiny Al-Si, který mají v celkové produkci zastoupení až 90% - těmi to slitinami se dále budeme podrobněji zabývat.

1.2.3 Vlastnosti slitin hliníku

Vlastnosti hliníku se dělí do dvou významnějších kategorií. Mezi ně patří technologické a mechanické vlastnosti. Technologické vlastnosti jsou důležité zejména při výrobě součástí, patří mezi ně slévárenské vlastnosti, odolnost proti korozi, obrobitelnost, svařitelnost a další. Mechanické vlastnosti charakterizují zejména schopnost odlitku snášet zatížení.

1.2.4 Technologické vlastnosti

Z technologických vlastností jsou při výrobě tenkostěnných odlitků do písku nejdůležitější slévárenské vlastnosti. Mezi tyto řadíme:

- **Zabíhavost** je schopnost tekutého kovu vyplňovat dutinu formy. Zabíhavost je závislá na šířce dvoufázového pásma, tj. na intervalu tuhnutí slitiny. Slitiny, které mají eutektické složení, nebo se mu blíží, mají dobrou zabíhavost, naopak slitiny s širokým intervalem tuhnutí špatně zabíhají. Dále zabíhavost výrazně snižují přítomné nečistoty v tavenině např. vměstky. Velký vliv na zabíhavost má povrchové napětí, smáčivost formy apod. Schopnost materiálu k vyplnění dutiny formy určuje, jak tenkostěnné odlitky je možno vyrobit a jak bude kov kopírovat formu [1].
- **Sklon ke vzniku staženin** lze charakterizovat jako úbytek kovu během tuhnutí. Při tomto úbytku vznikají v odlitku dutiny – staženiny. Staženiny mohou být podle polohy vůči povrchu vnitřní nebo vnější a podle velikosti soustředěné nebo rozptýlené – řediny. Slitiny s chemickým složením blízko eutektickému tuhnou spíše soustředěnými staženinami, tyto slitiny lze dobře nálítovat a předpokládá se u nich dostatečná těsnost odlitků.
- **Sklon k naplynění** je charakterizován rozpustností plynů v tekutém stavu. Množství plynů pohlcených taveninou je přímo úměrné tvorbě plynových bublin v odlitku.

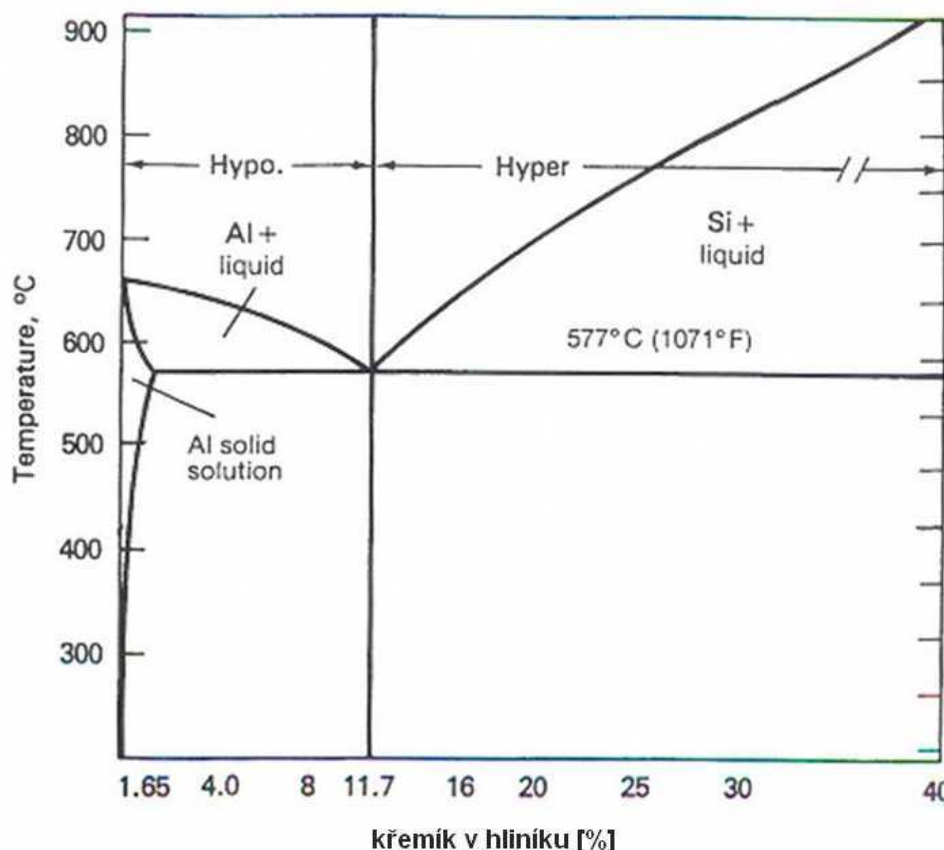
1.2.5 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti hliníkových slitin jsou v litém stavu lepší než po tváření. Jsou závislé na druhu slitiny a základní kovové matici, na přísadových prvcích a druhu tepelného zpracování. Mechanické charakteristiky (především pevnost a tvrdost) jsou při odlévání do kovových forem o 20% i více procent vyšší než při lití do pískových forem. Z toho je zřejmé, že nejlepších mechanických vlastností se dosahuje při jemnozrnné struktuře, proto by se při odlévání měly preferovat metody, které zaručují vysokou rychlost ochlazování.

- **Mez pevnosti R_m** závisí na metodě odlévání, použité slitině a tloušťce stěny. U hliníkových slitin se pevnost pohybuje v rozmezí 150–240 MPa, tyto hodnoty lze podstatně zvýšit tepelným zpracováním.
- **Tvrdost** slitin Al-Si se v nevytvrzeném stavu pohybuje okolo 60-80 HB. Zvýšení tvrdosti lze dosáhnout vytvrzením.
- **Tažnost A** - běžné hliníkové slitiny mají poměrně nízkou tažnost, která se pohybuje okolo 1-4%. Zvýšení tažnosti lze dosáhnout především modifikací eutektické fáze, kdy může dojít k růstu tažnosti až o 200% [1].

1.3 Slitiny Al-Si

Slitiny hliníku s křemíkem jsou nejčastěji používané slévárenské slitiny, především pro jejich příznivé vlastnosti. Slitiny Al-Si mají výbornou zabíhavost, málo stahují a nejsou náchylné k tvorbě trhlin za tepla – toto platí především pro slitiny se složením blízké eutektickému bodu. Diagram binární slitiny Al-Si je na obrázku 1.3.1. Eutektická koncentrace křemíku, která udává maximální rozpustnost toho prvku se v literatuře poněkud liší, například ve [2] a [6] je uvedeno 11,7% Si a [1] uvádí eutektickou koncentraci 12,6 % Si.



Obr. 1.3.1 Rovnovážný diagram Al-Si [2]

1.3.1 Vliv legujících prvků na vlastnosti slitiny Al-Si

Hliníkové slitiny jsou charakteristické přítomností množstvím intermetalických fází. Intermetalické fáze vnesené do slitiny v počáteční výrobě většinou negativně ovlivňují vlastnosti. Legováním lze docílit snížení škodlivých účinků nežádoucích prvků a vytvoření příznivých intermetalických fází, které mají pozitivní vliv na vlastnosti slitiny [6].

Křemík

Křemík je základní legující prvek, jehož přítomností dochází k výraznému zlepšení slévárenských a technologických vlastností. Dochází ke zlepšení zabíhavosti, snižuje se sklon ke vzniku staženin a trhlin za tepla, dochází ke zlepšení kluzných vlastností a odolností proti otěru a zvyšuje se korozní odolnost.

Měď

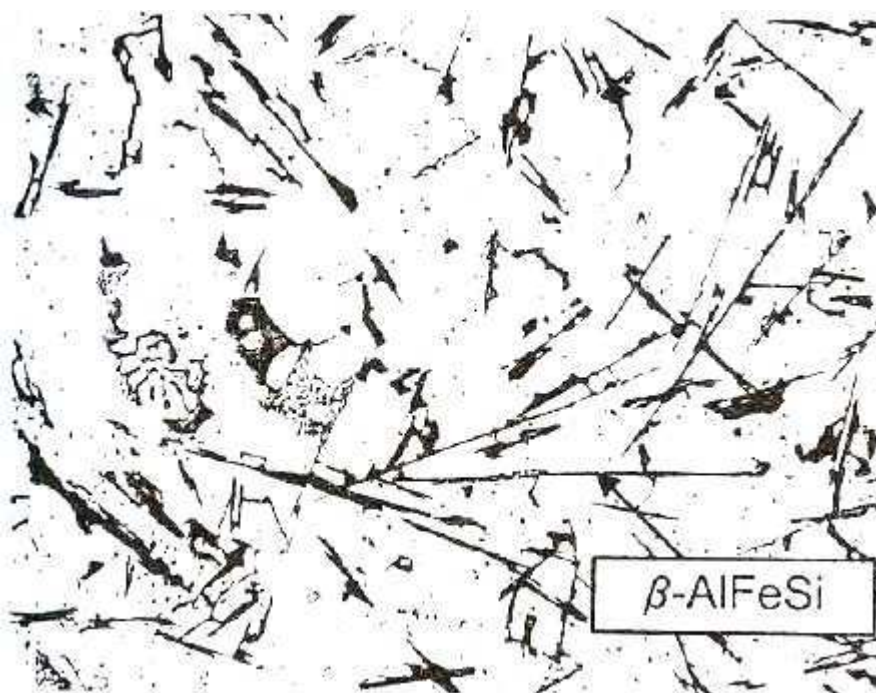
Měď je nejčastější přísadový prvek. Tvoří vícesložková eutektika, která umožňují tepelné vytvrzování. Měď zvyšuje pevnosti a tvrdost slitiny, zlepšuje obrobiteľnosť. Mezi nepříznivé vlivy mědi lze řadit zhoršení tažnosti, snížení korozní odolnosti a zhoršení tekutosti slitiny, což má negativní vliv především na zabíhavost.

Hořčík

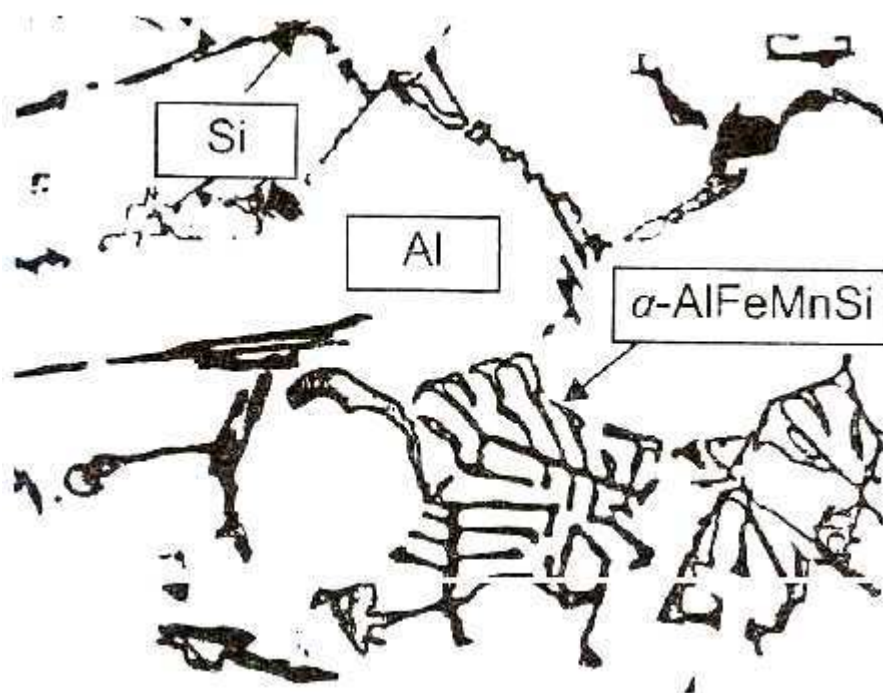
Hořčík ve slitinách Al-Si vytváří intermetalickou sloučeninu, která umožňuje zvýšení pevnostních vlastností tepelným vytvrzováním. Stejně jako většina prvků, které tvoří intermetalické fáze však zhoršuje zabíhavost slitiny.

Železo

Železo je považováno za nečistotu ve všech slitinách Al-Si které jsou odlévány do nekovových forem. Výrazný vliv má zejména při větší koncentraci než je 0,4 hm. % kdy dochází ke vzniku různých intermetalických fází. Nejhorší jsou křehké fáze Al_5FeSi , označovány jako β -fáze železa (**obr. 1.3.2**). Tyto fáze tvoří hrubé deskovité útvary, které výrazně porušují strukturu a mají vliv na výrazné snížení mechanických vlastností. Vyloučení této fáze lze zabránit přidáním manganu, který se na železo vyváže a vytváří fázi tzv. čínského písma. Tato struktura má vzhledem ke své kompaktnosti menší vliv na mechanické vlastnosti (**obr. 1.3.3**). Dále železo při větších koncentracích snižuje obrobiteľnosť, zabíhavost a odolnost proti korozi. Příznivý vliv železa je pro metodu tlakového lití, kde dochází ke snižování lepení kovu na formu.



Obr. 1.3.2 β -fáze železa [1]



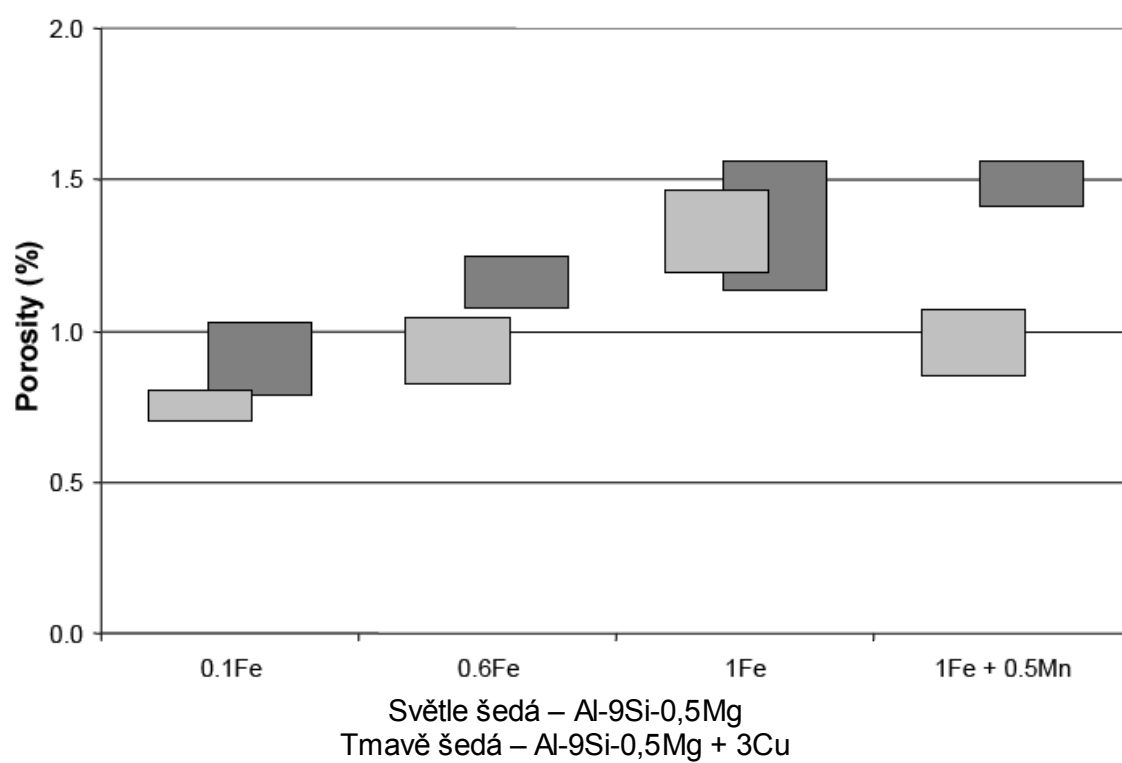
Obr. 1.3.3 Čínské písmo – α -fáze železa [1]

Mangan

Jak už bylo výše uvedeno, hlavní úlohou manganu je kompenzace nepříznivého vlivu železa. Obsah manganu by měl být kolem $\frac{1}{2}$ obsahu železa. Na slévarenské vlastnosti nemá mangan v obvyklých koncentracích žádný vliv.

1.3.2 Vliv přísadových prvků na porezitu slitin Al-Si

Největší negativní vliv na tvorbu porezity v hliníkových slitinách má železo. Při jeho vylučování dochází ke vzniku intermetalických sloučenin, které vytvářejí překážku v proudění kovu a výrazně tak zhoršují tekutost a dosazování. Porezitu vzniklou těmito překážkami v proudění kovu lze snížit přidáním manganu a změnou struktury na α -fázi železa. Dinnis [9] ve svém experimentu zkoumal vliv přísadových prvků na porezitu. Při odlévání vzorků bylo měřeno naplynění kovu a bylo zjištěno, že hodnota naplynění příliš nekorelovala s úrovní porezity. Dále byl zjištěn vliv přísady železa na velikosti zrna eutektika. Železo redukuje počet zárodků, což způsobuje růst velikosti zrn. Se vzrůstající přísadou Fe tak dochází k růstu velikosti zrn a zvýšení porezity. Zvýšení počtu zárodků se dosáhne přidáním manganu, ale tato metoda není tak účinná ve slitinách s obsahem mědi. Efekt manganu závisí na koncentraci mědi v dané slitině. Ve slitinách s mědí totiž dochází přidáním manganu spíše ke zvýšení porezity, zatímco ve slitinách bez mědi dojde k redukci porezity. Obsah porezity ve zkoumaných slitinách je na obrázku 1.3.4.



Obr. 1.3.4 Obsah porezity [9]

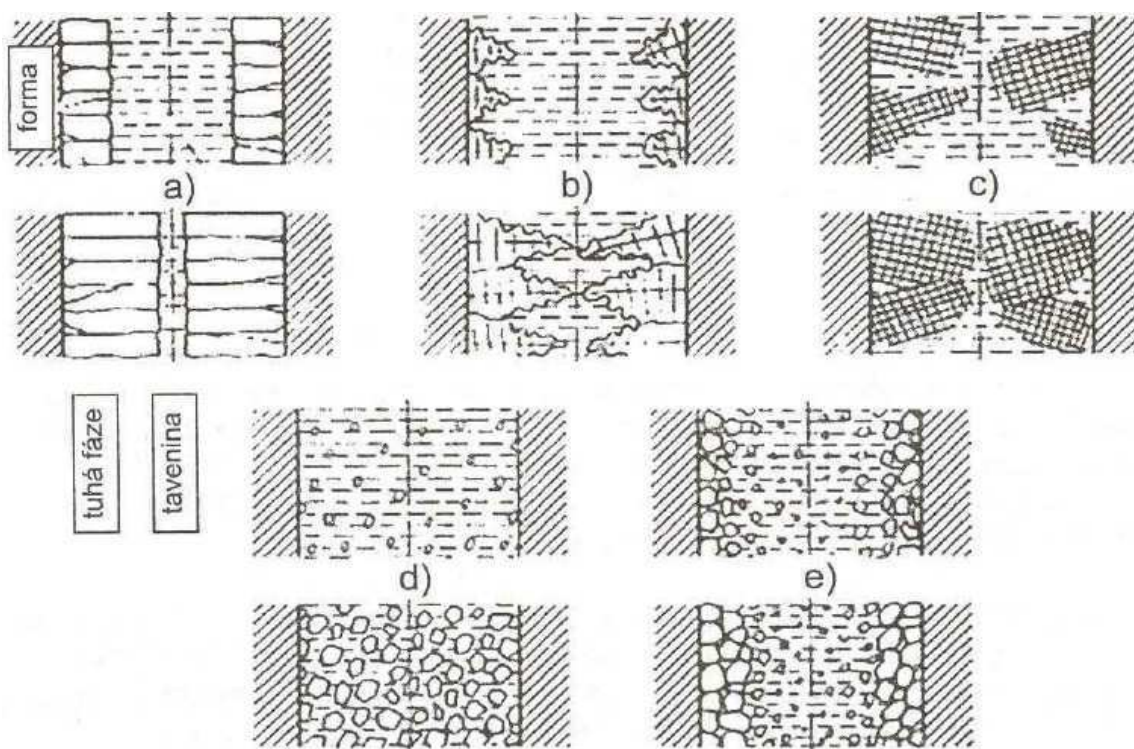
1.4 Krystalizace slitin Al-Si

Tato kapitola se bude zabývat vlivem prvků na krystalizaci eutektika – očkovaním a modifikací, především s ohledem na vznik a tvorbu staženin a porezity.

1.4.1 Růst primární fáze – vliv intenzity tuhnutí

Po nukleaci zárodků dochází k jejich růstu do volné taveniny. Na růst krystalů má výrazný vliv intenzita chladnutí. Z tohoto důvodu může být výrazně rozdílná struktura odlitků, které jsou odlévány do kovových a pískových forem a také struktura tenkostěnných a tlustostěnných odlitků se liší. Zde je velký rozdíl ve struktuře způsobený rozdílnou rychlostí tuhnutí části odlitku u stěny formy a v tepelné ose odlitku. Podle způsobů narůstání ztuhlé vrstvy se tuhnutí dělí na exogenní a endogenní (obr. 1.4.1) [1].

- **exogenní tuhnutí** - kompaktní ztuhlá vrstva roste směrem od povrchu odlitku k tepelné ose.
- **endogenní tuhnutí** - tuhnoucí krystaly vznikají i v tavenině před krystalizační frontou, nebo má slitina tendenci tuhnout kašovitě.



Tuhnutí exogenní - a) s rovinným fázovým rozhraním, b) dendritické, c) buněčné

Tuhnutí endogenní - d) objemové, e) vrstevné

Obr. 1.4.1 Typy tuhnutí [1]

Slitiny s úzkým intervalem tuhnutí krystalizují spíše exogenně s úzkým intervalem tuhnutí. Ztuhlá fáze nebrání pohybu kovu a je možné dosazování z nálitků. Taková slitina vytváří kompaktní staženiny a jen minimum mikrostaženin. Pokud však tuhá fáze vytváří tuhé útvary, mezi kterými zůstávají uzavřeny oblasti tekutého kovu, není možná dosazování a v odlitku vznikají mikrostaženiny. Zde je velmi obtížné nálitkování, odlitky jsou pórovité a mají špatnou těsnost. Takto lze charakterizovat endogenní objemové a exogenní buněčné tuhnutí. Na způsob tuhnutí má velký vliv očkování a modifikace. Očkování podporuje spíše endogenní objemové tuhnutí, zatímco modifikace endogenní vrstevné tuhnutí nebo tuhnutí exogenní s rovinným rozhraním. Typy tuhnutí některých slitin udává tabulka 1.4.1 [1].

Slitina	typ tuhnutí	
	kovové formy	pískové formy
AlSi5	buňečné/objemové	endogenní - objemové
AlSi9	buňečné/objemové	endogenní - objemové
AlSi12 - nemodifikovaná	endogenní - vrstevné	endogenní - vrstevné
AlSi12 - modifikovaná	s rovinným rozhraním	s rovinným rozhraním

Tab. 1.4.1 Typy tuhnutí slitin Al-Si [1]

1.4.2 Očkování slitin hliníku

Slitiny hliníku, stejně jako slitiny většiny lehkých kovů, tvoří během tuhnutí hrubá rovnoosá a sloupcová zrna. Míra hrubosti nebo délka sloupcových krystalů je závislá především na lici teplotě, teplotních gradientech uvnitř formy a dalších vlastnostech odlévaného i formovacího materiálu. Velikost primárního zrna na mechanické vlastnosti slitiny je tím větší, čím více obsahuje slitina základního prvku. Jedná se tedy především od slitiny s nižším obsahem křemíku [2].

Při odlévání do pískových forem nedochází k velkému ochlazení taveniny pod rovnovážnou teplotu krystalizace a z toho důvodu se neaktivují méně příznivé nukleační zárodky. Výsledkem bývá hrubá struktura s nevhodnými mechanickými vlastnostmi. V těchto případech lze dosáhnout jemnější struktury pouze zjemněním primárního zrna. Zjemnění primárního zrna se provádí očkováním. Zjemnění primárního zrna se projeví zvýšením pevnosti a tažnosti, menší pórovitostí odlitku atd.

Očkování je proces vnášení vhodných prvků a jejich slitin do taveniny s cílem zvýšit počet krystalizačních zárodků. Potencionálně aktivní zárodek musí mít vyšší teplotu tavení než daná slitina, musí mít stejný typ krystalické mřížky a blízký parametr mřížky, aby došlo k plynulému růstu zárodků. Očkování ovlivňuje především velikost zrn a tím i jejich počet [5]. Rozdíl ve struktuře očkované a neočkované slitiny je jasně patrný z obrázku 1.4.2

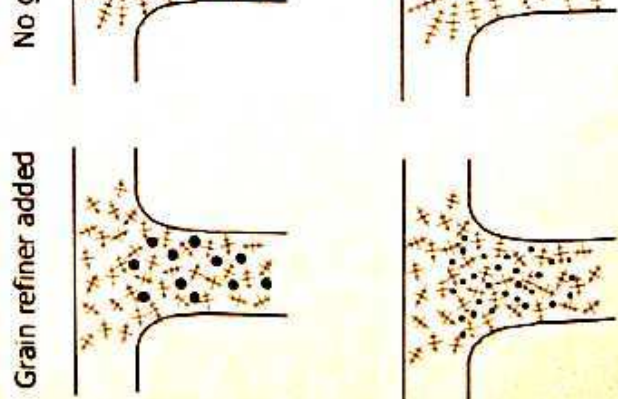


(nahore: neočkováno, dole: očkováno 10 ppm B přidaného 5Ti-1B předslitinou)

Obr. 1.4.2 Struktura zrn v odlitku [7].

Mechanismus zjemnění zrn je dán reakcí titanu s hliníkem za vzniku TiAl_3 . Zároveň titan zvyšuje bod tavení hliníku na 665°C (z původních 660°C). Kolem částice TiAl_3 se začíná tvořit obálka tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ na které dále pokračuje růst dendritů hliníku [7].

Nejpoužívanějším očkovačem pro hliníkové slitiny je titan a bor. Tyto prvky se do taveniny vnášejí v předslitinami AlTiB (například AlTi5B1 , AlTi3B1). V praxi se nejčastěji používají slitiny se stechiometrickým koeficientem $\text{Ti:B} = 5:1$ [6].



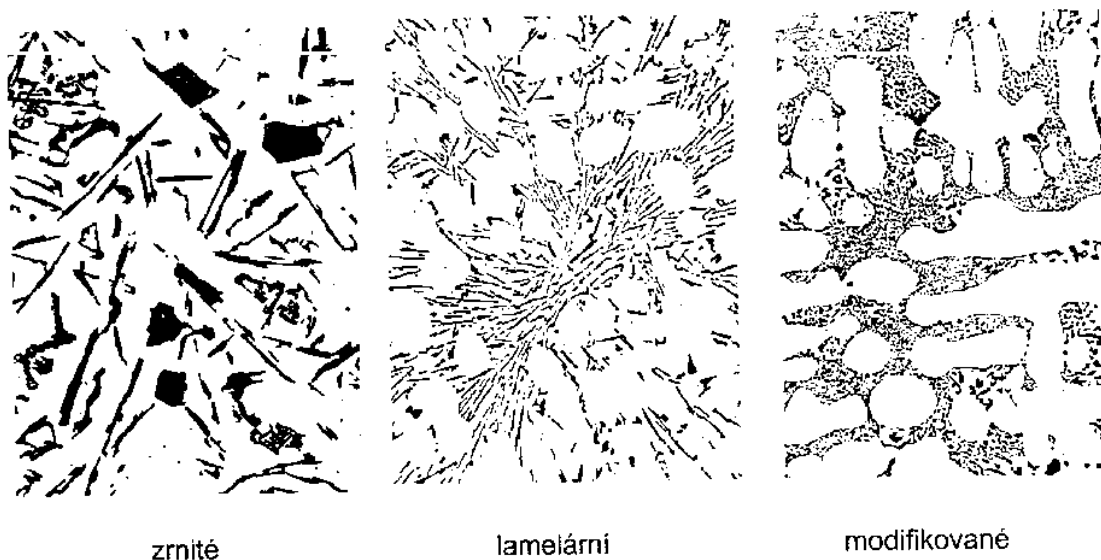
Obr. 1.4.3 Schem. znázornění vlivu TiB

Podle literatury [6] se očkování doporučuje nevíce u slitin, které obsahují do 5% Si. Při vyšším obsahu Si je nutno zvýšit dávkování očkovačů. Výrazný vliv má očkování a modifikace i při obsahu Si blízkému eutektické koncentraci. Dle Taylora [8] má očkování TiB vliv na distribuci ředin u eutektických slitin. Porovnávány byly slitiny

s různým obsahem záměrně přidaného očkovadla. Očkování TiB způsobilo významnou změnu formace staženin a porezity. Velké staženiny, které u neočkovaných vzorků vznikaly v teplených uzlech se po přidání TiB rovnoměrně rozptýlily v celém objemu a došlo ke vzniku menších staženin. Schématické znázornění výsledků je na obrázku 1.4.3.

1.4.3 Modifikace eutektika ve slitinách Al-Si

Křemík se ve slitinách Al-Si vylučuje jako prvek s minimálním obsahem příměsí. Podle morfologie částic křemíku se dělí eutektikum na zrnité, lamelární a modifikované. První dva tvary nejsou příliš výhodné, protože dochází k výraznému narušení struktury a zhoršení mechanických vlastností slitiny. Pro odlévání do pískových forem se vždy přidávají modifikační prvky, které mají vliv na tvar vyloučeného eutektika (obr. 1.4.4).



Obr. 1.4.4 Morfologie eutektika ve slitinách Al-Si [1]

Modifikací rozumíme proces, při kterém dochází k úpravě taveniny různými prvky nebo jejich předslitinami. Modifikováním se mění velikost a tvar krystalů křemíku. Pro slitiny s obsahem menším než 5% Si nebo odlévaných do kovových forem není modifikační účinek tak výrazný. Jako modifikační prvky se nejčastěji používají sodík, stroncium a antimon.

Sodík

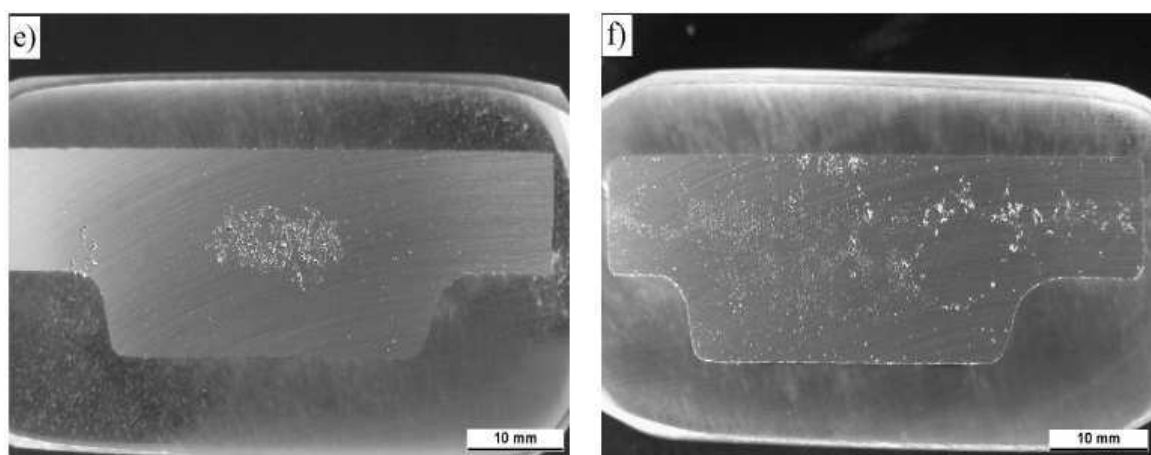
Je povrchově aktivní prvek, který modifikuje eutektický křemík především v podeutektických a eutektických slitinách. Na účinnost sodíku má vliv přítomnost fosforu ve slitině, který ruší vliv sodíku. Kritická hodnota fosforu je závislá na tloušťce stěny odlitku. Nevýhody modifikace sodíkem spočívají v jeho krátkodobé účinnosti, dochází k vypařování z hladiny. Modifikační účinek sodíku tak odezní za 20-30 minut. Při překročení této doby je nutné znovu domodifikovat menší dávkou.

Další nevýhody sodíku jsou především ve snížení dosazování a hlavně ve zvýšení stupně naplynění taveniny, protože se sodík rychle odpařuje a při tom vzniká silné bublání. Modifikování sodíkem také zvyšuje koeficient objemového smrštění a může proto docházet ke zvýšenému výskytu rozptýlené porezity [6].

Stroncium

Stroncium je momentálně nejprogresivnějším modifikátorem pro slitiny Al-Si. Je mnohem méně reaktivní než sodík, v tavenině se rozpouští bez bouřlivých reakcí. Pro lepší rozpustnost se však musí docházet k míchání taveniny, buď indukčními proudy, nebo mechanicky. Účinek stroncia je slabší než u sodíku, avšak při výrobě tenkostěnných odlitků postačuje. Oproti sodíku je při použití stroncia nutné počítat s delším náběhem modifikačního účinku, optimální účinnost se projeví až po jedné hodině od přidání předslitiny [6].

Vliv stroncia na vznik porezity v odlitku byl zkoumán v [10] porovnáním vzorků s různým obsahem křemíku. Vyhodnocení porezity v tepelném uzlu odlitku ukázala vliv stroncia na typ tuhnutí a vznik porezity. Na obrázku vlevo je vzorek s 11% Si nemodifikovaný, v pravé části je tatáž slitina modifikovaná stronciem. Z obrázku 1.4.5 je zřejmé, že po modifikaci došlo ke zmenšení velikosti porezity, útvary jsou více kulaté a rozptýlení do celého objemu vzorku.



Obr. 1.4.5 Vliv stroncia na porezitu

Antimon

Přidáváním antimonu vzniká struktura s jemným lamelárním křemíkem. Antimon je do hliníkových housek přidáván již v hutích, jeho účinek neodeznívá a je trvalý. Nevýhodou antimonu je rušení vlivu sodíku a stroncia.

Dále se jako modifikátory používají další prvky, jako je například vápník, bariem a tellur. Všechny tyto prvky mají většinou podobný vliv jako prvky výše uvedené.

1.5 Plyny ve slitinách hliníku

Kapalné kovy vstřebávají za určitých podmínek značné množství plynů. Během tavení je kov obklopený atmosférou s určitou vzdušnou vlhkostí, v některých případech se k tomu přidávají i plyny z hořícího paliva. Jediným plynem, který má v hliníku významnou rozpustnost je **vodík**.

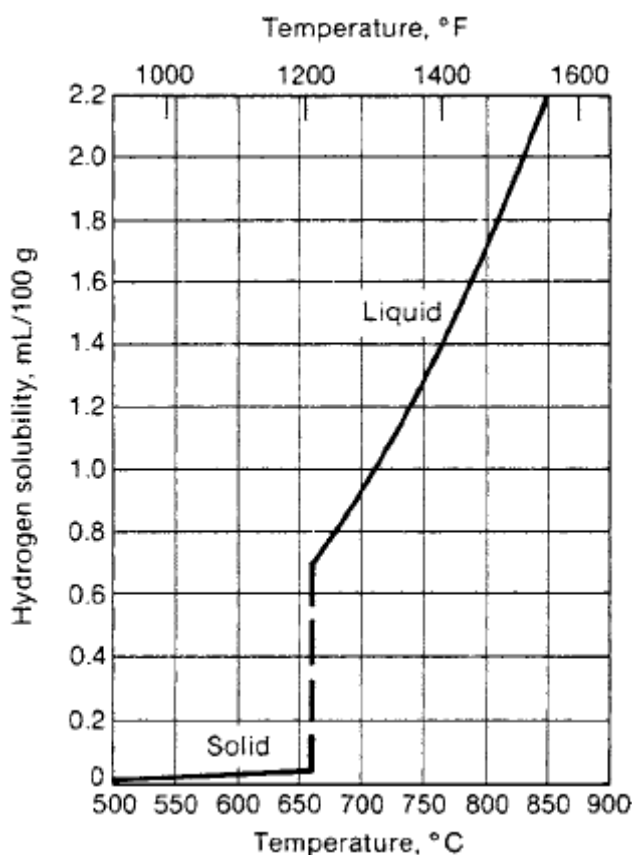
1.5.1 Rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku

Rozpustnost vodíku je definována jako maximální množství vodíku, které se za rovnovážných podmínek (při určité teplotě a tlaku) rozpustí v kovu daného chemického složení. Rozpustnost je charakterizována vztahem:

$$\log S = \frac{1}{2} \cdot \log p_{H_2} - \frac{A}{T} + B \quad (1.5.1)$$

kde: S – rozpustnost vodíku v tavenině [$\text{cm}^3 \cdot 100\text{g}^{-1}$]
 p_{H_2} – parciální tlak vodíku v okolní atmosféře [kPa]
 T – teplota kovu [K]
 A, B – konstanty pro daný kov

Slitiny hliníku mají velký rozdíl rozpustnosti v tekutém a tuhém stavu (obr. 1.5.1). Snížení rozpustnosti vodíku ($0,7 \text{ cm}^3/100\text{g}$ v tekutém a $0,04 \text{ cm}^3/100\text{g}$ v tuhém stavu) je



příčina vzniku plynových dutin ve slitinách hliníku. Skutečné množství plynu, které je rozpuštěno v tavenině může být menší, než je jeho rovnovážná koncentrace. Zde se však musí použít způsoby tavení, které omezují kontakt taveniny s jakoukoliv vlhkostí, případně použít dodatečné odplynění. Naopak může také dojít ke zvýšení obsahu vodíku než je dáno rozpustností, pak dochází k vylučování plynu difuzí nebo tvořením bublin. Při nerovnovážných podmínkách ochlazování (vysoká rychlost ochlazování) zůstává vodík rozpuštěn v matici. Takový stav nazýváme přesycený tuhý roztok.

Obr. 1.5.1 Závislost rozpustnosti vodíku na teplotě v Al [2]

Zvyšování teploty taveniny vždy vede ke zvýšení naplynění taveniny, protože dochází ke zvyšování rozpustnosti vodíku v tekutém kovu. Rozpustnost vodíku je při dané teplotě závislá na parciálním tlaku vodíku v okolní atmosféře. Tato závislost je vyjádřena Sievertsovým zákonem:

$$S = K \cdot \sqrt{p_{H_2}} \quad (1.5.2)$$

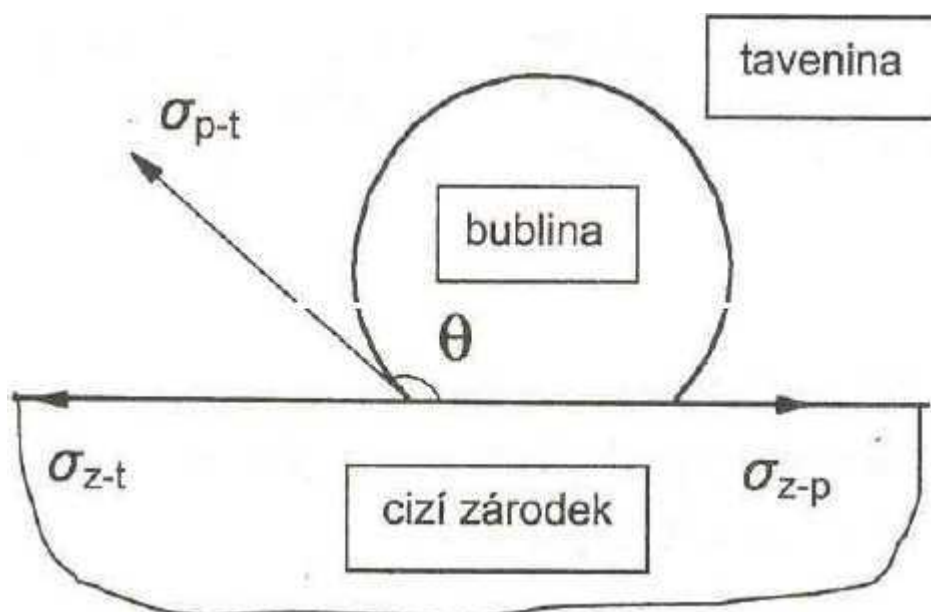
kde K je konstanta. Vliv tlaku na propustnost vodíku se v praxi často používá pro měření naplynění taveniny a další metalurgické operace (např. odplyňování).

1.5.2 Vznik plynových dutin v odlitcích

Příčinou vzniku bublin je velká změna rozpustnosti vodíku při tuhnutí. Při ochlazování se snižuje rozpustnost vodíku a dochází jeho unikání z taveniny, buďto mechanismem difuze, nebo tvorbou plynových bublin. Tvorba bublin probíhá mechanismem heterogenní nukleace, kdy jako zárodek slouží cizí tuhá částice (**obr. 1.5.2**). Energetická náročnost heterogenní nukleace jen nižší a podmínky pro nukleaci bubliny na cizím zárodku jsou určeny velikostí úhlu smáčení (vliv povrchového napětí mezi taveninou, cizí částicí a plynem):

$$\cos \Theta = \frac{\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p}}{\sigma_{p-t}} \quad (1.5.3)$$

kde značí : σ_{z-t} - povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou
 σ_{z-p} - povrchové napětí mezi zárodkem a plynem
 σ_{p-t} - povrchové napětí mezi plynem a taveninou



Obr. 1.5.2 Tvorba bublin na cizím zárodku [1]

Jako vhodné zárodky pro nukleaci bublin jsou především ty, které nejsou smáčené taveninou. Tuto podmínku splňují zejména oxidy, čímž se vysvětluje proč je porezita významně spojena s přítomností oxidických vměstků v tavenině.

Zdrojem vodíku je především vlhkost v pecní atmosféře, rafinačních solích, vyzdívkách, špatně vysušených kelímcích a na vlhkém nářadí [1].

1.5.3 Mechanizmy vzniku porezity

Porezita ve slitinách hliníku vzniká jednou ze tří cest. Může to být během tuhnutí vlivem změny rozpustnosti vodíku, objemovou změnou během tuhnutí a nebo, což je nejčastější případ, je to kombinací obou těchto procesů.

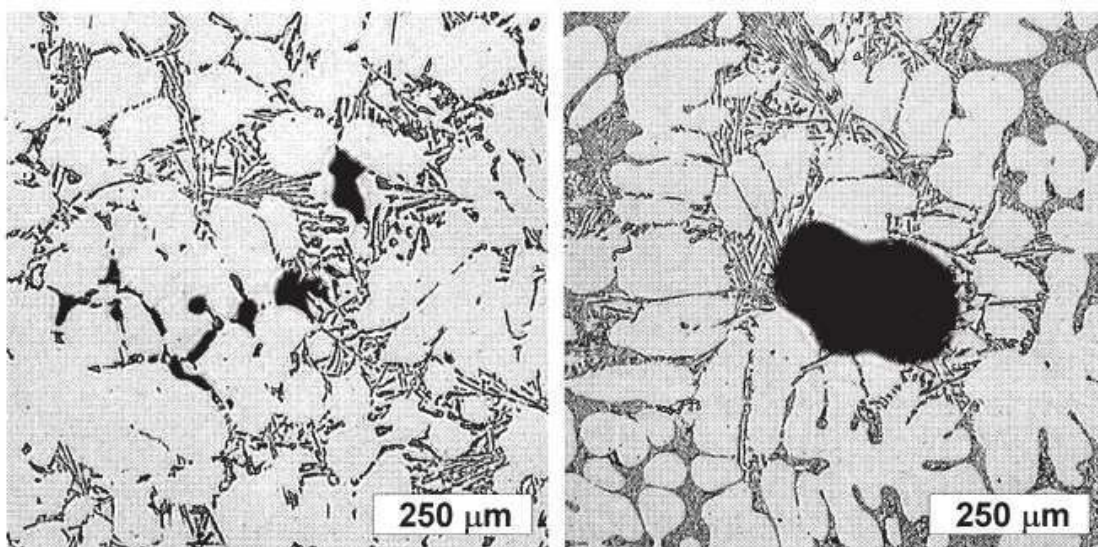
Dle výzkumů vzniku porezity [11] byly stanoveny pravidla, které popisují vznik vodíkové porezity.

- Bez ohledu na složení slitiny a podmínky tuhnutí musí být překročena kritická hodnota obsahu vodíku (dána rovnovážnou koncentrací), aby došlo ke vzniku porezity.
- Každé rychlosti chlazení odpovídá obsah vodíku, který nezpůsobí porezitu.
- Pro každou specifickou rychlost tuhnutí dochází při snížení obsahu vodíku ke zmenšení objemu a plochy porezity.
- Pro danou slitinu a obsah vodíku, dojde při zvýšení ochlazovací rychlosti ke snížení objemu porezity.

Kritická hodnoty vodíkové koncentrace závisí na tlaku. Při zvýšení tlaku při tuhnutí dochází ke zvýšení mezních hodnot, naopak při odlévání pod vakuem se mezní hodnoty snižují.

Mechanismus tvorby porezity je také silně provázán se staženinami v odlitku. Při nukleaci plynových bublin se významně uplatňují i lokální tlakové poměry. Při krystalizaci tuhé fáze dojde k uzavření mikroobjemů taveniny, do nichž následně nedochází k dosazování tekutého kovu. V těchto místech vzniká lokální podtlak (dle Sievertsova zákona (1.5.2)) a vznikají příznivé podmínky pro vznik plynových dutin. Mikrostaženiny tak jsou vhodným místem pro vznik dutin.

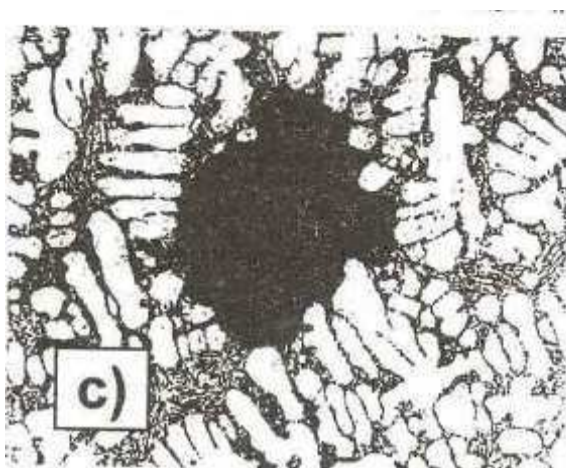
Porezita bývá kombinací vzniku bublin a tvorby mikrostaženin. Čistě plynové bubliny nebo čisté mikrostaženiny se jako vady v odlitcích vyskytují poměrně zřídka. Typy dutin lze rozeznat podle tvaru. Plynové dutiny mají vždy kulatý tvar, naopak pouze staženiny mají členitý tvar a kopírují dendritickou strukturu kovu. Porezita je kombinací nejen mechanismu vzniku, ale i tvaru obou dutin, tzn. že dutiny jsou zakulacené s okraji kopírujícími dendritickou strukturu. Tvary dutin jsou znázorněny na obrázku 1.5.3 a 1.5.4.



vlevo: mikrostaženina – dutina je obklopena primárními dendrity (bílá) a eutektickou fází (šedá barva)

vpravo: plynová bublina – dutina má zakulacený tvar bez výstupků do struktury

Obr. 1.5.3 Tvar pórů ve slitinách Al [12]



Tvar a poloha pórů ve struktuře kovu závisí na morfologii tuhé fáze, na obsahu plynu v tavenině (především vodíku) a na rychlosti tuhnutí. Při pomalém tuhnutí je čas na difuzi vodíku z matrice i na poměrně velké vzdálenosti a dochází tak ke vzniku velkých plynových bublin.

Obr. 1.5.4 Tvar porezity – kombinace plynové dutiny a mikrostaženiny [1]

Při vysoké rychlosti ochlazování dochází k velkému přesycení kovu vodíkem. Část vodíku zůstává při chladnutí v matrici a dochází ke vzniku přesyceného tuhého roztoku. Vzniklé dutiny se obalí vrstvou tekutého kovu, je výrazně zkrácen čas tuhnutí a dochází k difuzi pouze na krátké vzdálenosti. Takto nedochází k růstu bublin a výsledkem jsou malé kulové nebo protáhlé dutiny v mezidendritických prostorách, častěji nazývané mikrostaženiny (řediny).

Pokud tavenina obsahuje příliš vysoké procento vodíku, dochází k častějšímu vzniku velkých kulových bublin.

Obsah vodíku v hliníkových slitinách se nejčastěji stanoví pomocí tzv. metody dvojího vážení, kdy zjišťujeme index hustoty (častěji známý pod pojmem Dichte index). Odlévají se dva vzorky, jeden ztuhne ve vakuu a druhý

za atmosférického tlaku. Oba vzory se následně zváží, vždy na vzduchu a ve vodě. Z poměru hustot obou vzorků se stanoví dichte index. Dobře odplyněné vzorky mají DI = 1-3%, středně odplyněné DI = 4-7% a naplyněné DI = 8% a více. Další metody hodnocení naplynění (např. metoda první bubliny) jsou značně subjektivní, proto se příliš nepoužívají.

1.5.4 Odplyňování hliníkových slitin

Odplynění taveniny je proces odstranění plynů rozpuštěných v tavenině, které by se při tuhnutí odlitku mohly vyloučit ve formě endogenních bublin. Cílem odplynění není úplně odstranit rozpuštěný vodík, ale snížit jeho obsah na úroveň, kdy nehrozí vyloučení bublin. Dle [1] je tato kritická koncentrace 0,02 cm³/100g Al, v případě pomalého tuhnutí slitin i méně.

Dříve velmi účinnou metodou odplynění bývalo profukování taveniny chlórem, což je dnes nemyslitelné vzhledem k ekologickým normám. Současnou nejčastější metodou odplyňování je promývání taveniny inertními nebo aktivními plyny. Jako média se nejčastěji používá 99,99% dusík a nebo argon. Odplynění je založeno na difuzi vodíku do dusíkových bublin, kde je nulový parciální tlak vodíku:

$$[H] \leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot \{H_2\} \quad (1.5.4)$$

V bublinách dusíku je nulový tlak vodíku, v tavenině je tlak vodíku vyšší. Dochází tak k difuzi vodíku do dusíkových bulin. Dusík je do taveniny vháněn v blízkosti dna pánve a takovým způsobem, aby vznikly co nejmenší bubliny. Intenzita odplynění je závislá na rychlosti vyplouvání bublin a na velikosti povrchu taveniny. Rychlost vyplouvání bublin je dána Stokusovým zákonem:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot (\rho_{kovu} - \rho_{plynu})}{\eta} \cdot r^2 \quad (1.5.5)$$

kde značí: ρ – hustota kovu nebo plynu [kg.m⁻³]

η – dynamická viskozita [kg.s⁻¹.m⁻¹]

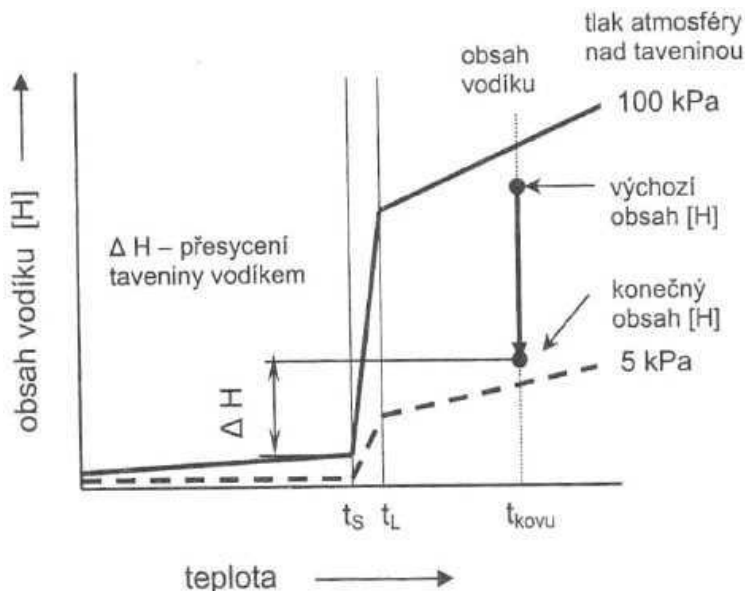
r – poloměr bubliny [m]

Cílem je probublávání co nejmenšímu bublinami (mají velkou plochu povrchu – usnadnění difuze), malá rychlost vyplouvání bublin a co nejdelší dráhu – je nutné použití hluboké a úzké pánve. Odplyňování se provádí před modifikací, aby nedošlo k vynášení sodíku z taveniny a tím ztráty modifikačního účinku. Zároveň při dobrém odplynění vzrůstá sklon k tvorbě staženin, proto je nutné zabezpečit dostatečné nálitkování.

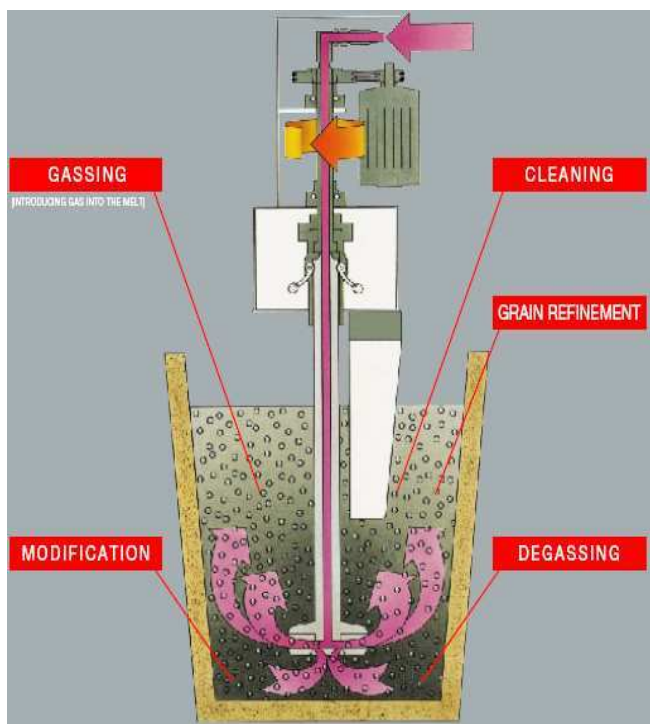
1.5.5 Způsoby odplyňování

Odstátí taveniny nemá výrazný vliv na snížení obsahu plynů nebo vměstků v tavenině, proto se nepoužívá.

Vakuování spočívá ve snížení tlaku atmosféry nad hladinou (**obr. 1.5.5**). Dle Sievertsova zákona (1.5.2) se sníží rozpustnost vodíku v tavenině. Lze kombinovat probubláváním inertními plyny, dosahuje se tak zvýšení účinnosti.



Obr. 1.5.5 Princip odplyňování ve vakuu [%]

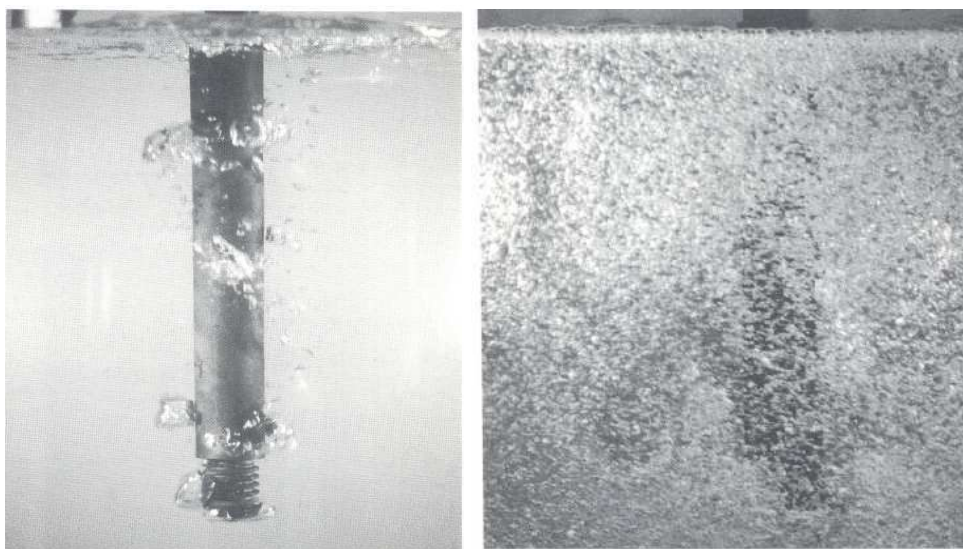


Obr. 1.5.6 Schéma odplyňovací jednotky fy Foseco (FDU) [14]

Probublávání neutrálními plyny je nejpoužívanější technologie. Princip je založen na difuzi vodíku do bublin inertního plynu. Pro vhánění plynu se používají tři mechanismy [1]:

- **odplyňovací trubice** – použití keramické, grafitové nebo kovové trubky s porézní zátkou. Používají se pro menší velikosti kelímků.
- **porézní tvárnice ve dně pánve** – jsou zabudovány do dna pánve, mají stejný účinek jako trubice.
- **rotorová zařízení** – stabilní nebo přenosná odplyňovací zařízení, do nichž se plyn vhání grafitovým rotorem (**obr. 1.5.6**). Vznikají velmi drobné bublinky plynu a je zajištěno míchání

taveniny. Další výhodou tohoto systému je možnost přívodu rafinačních a očkovacích prostředků přímo do taveniny. Při porovnání velikosti bublin (**obr. 1.5.7**) je zřejmé, že velikost bublin z rotorového zařízení je výrazně menší a v důsledku výše zmíněného dochází k vyšší účinnosti odplynění.



Obr. 1.5.7 Velikost bublin inertního plynu z otevřené trubky a FDU [2]

1.5.6 Rafinace hliníkových slitin

Kvalitní odplynění a vyčištění hliníkových slitin je základní podmínkou pro výrobu kvalitních odlitků. Rafinací označujeme úkony, které vedou ke snížení vměstků v tavenině. Odplyněním je snižován obsah rozpuštěného vodíku.

Při styku kovově čisté hladiny hliníku nebo jeho slitin s okolní atmosférou se hladina okamžitě pokrývá vrstvou oxidů. Největší podíl vzhledem k chemickému složení slitin a k afinitě kyslíku a hliníku má oxid hlinitý. Oxidace probíhá během tavení v peci, a to především během modifikace slitiny, kdy dochází k bublání taveniny a rozrušení vrstvy oxidů na hladině. Takto se na hladině vytváří stále nová vrstva oxidů a ty stávající pohlcuje tavenina. K dalšímu oxidování dochází během manipulace s taveninou a při odlévání taveniny, kdy dochází k porušení oxidického filmu, který taveninu chrání [13].

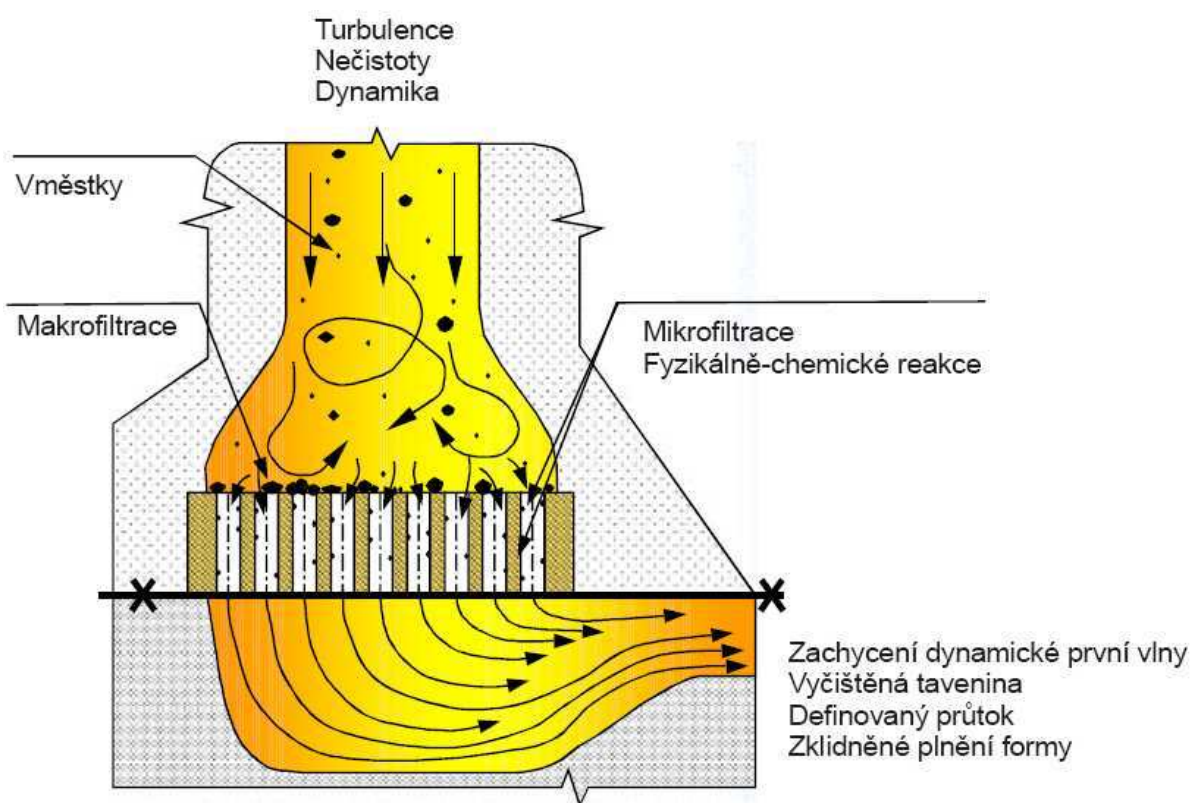
Používání krycích přípravků pomáhá zabránit přímému kontaktu hladiny s okolní atmosférou a vlhkostí. Rafinace se provádí nejčastěji rafinačními solemi. To jsou směsi chloridů a fluoridů (NaCl , KCl) s přísadou aktivních komponent. Přidáním rafinačních solí dochází ke změně povrchového napětí mezi kovem, oxidy, vměstky a dalšími nečistotami, které jsou poté vynášeny k hladině a tvoří strusku. Před odlitím se musí struska a nečistoty z hladiny odstranit.

1.5.7 Filtrace hliníkových slitin

Oxidické vměstky a nečistoty vznikají i při odlévání hliníkových slitin. Dochází k víření kovu, při kterém je porušen tenký oxidický film na hladině a nečistoty jsou strhávány do proudu taveniny. Takto vzniklé částice lze z taveniny odstranit pouze mechanicky, tj. separačním procesem, který zachytí tuhé částice a kapalina pokračuje v pohybu. Tento proces se nazývá filtrací a jako nástroje se používají licí sítky (cedítka) a filtry.

Keramické a pěnové filtry se používají ke zvýšení kvality odlitku. Jejich použitím dochází ke snížení vměstků a tím i ke snížení porezity v odlitku, zlepšuje se očištění odlitku a klesají náklady na opravy. Další nespornou výhodou je i zlepšení mechanických vlastností a zlepšení obrobitelnosti odlitku [15].

Filtry dokáží odloučit jak exogenní vměstky (nečistoty které vznikají vně systému), zabráněním jejich vniku do dutiny formy, tak dokáží regulovat proudění ve vtokovém systému a tím zabraňují víření kovu a reoxidaci kovu uvnitř vtokové soustavy. Schématické znázornění vlivu filtru ve vtokové soustavě je na obrázku 1.5.8.



Obr. 1.5.8 Schématické znázornění činnosti filtru [16]

Při použití lisovaných keramických filtrů se uplatňují tři mechanismy filtrace [16]:

- 1) Filtrace "**cezením**", spočívající v zachycování částic větších než je velikost otvorů na vstupní straně filtru.

- 2) Filtrace vytvářením "**filtračního koláče**", který se tvoří postupným zachycováním částic na vstupní straně filtru, přičemž filtrační koláč zachycuje i vměstky, které jsou menší, než je velikost původních otvorů filtru.
- 3) **Filtrace hloubková**, probíhající v otvorech a kanálech v celém objemu filtru, jejíž základní princip spočívá v adhezi částic na stěnách otvorů a kanálů keramického filtru.

Typy filtrů se rozlišují podle systému filtrace. Jedná se především o filtry s definovanými hydraulickými profily – lisované keramické a extrudované keramické filtry a filtry bez definovaného hydraulického průřezu – pěnové filtry (**obr 1.5.9**). Výběr filtrů vždy závisí na konkrétních podmínkách při odlévání, každý z daných typů filtrů má svoje přednosti a nedostatky.



Obr. 1.5.9 Typy filtrů [17]

1.6 Odlévání rozlehlých tenkostěnných odlitků

Pro odlévání rozlehlých tenkostěnných odlitků z hliníkových slitin je vhodná pouze jediná metoda a tou je odlévání do pískových forem. Ostatní metody jsou i přes svoje nesporné výhody krajně nevhodné a to především kvůli limitům v maximálních rozměrech formy nebo vysokých nákladů na výrobu těchto forem, pokud se nejedná o velkosériovou výrobu. Z těchto důvodů se při výrobě forem používá spíše ruční formování, což v sobě přináší riziko kvality formy. Dále se nejčastěji používají bentonitové směsi, případně lze použít směsi s chemickými pojivy.

Při odlévání do pískových forem je nutné dodržovat určité konstrukční požadavky, dané vlastnostmi směsi. Především se jedná o tloušťky stěn odlitku. Tloušťky stěn by měly být ve všech průřezích podobné, aby se zabránilo vzniku tepelných uzlů. Dále jsou vhodnější slabší stěny, z důvodu rychlejší chladnutí stěny a tím dosažení lepších mechanických vlastností odlitků. Doporučené minimální tloušťky hliníkových odlitků se pohybují mezi 3-5 mm [18] a zásadně by neměly překračovat tloušťky 30 mm, kdy je téměř nemožné dodržet předepsané vlastnosti odlitku [1]. Zvýšení pevnosti hliníkových odlitků se dosahuje především uhodně umístěnými žebry, které mají příznivý vliv na výslednou pevnost odlitku, zabraňují borcení stěn a při správním umístění žeber podporují usměrněné tuhnutí.

1.6.1 Formovací směsi

Jak již bylo výše zmíněno, nejčastější technologií bývá ruční formování do bentonitových směsí, známé také jako směsi na syrovo. Dále se také s výhodou využívali kopané písky, které obsahovaly přirozený obsah jílu. Ložiska těchto písků jsou již vytěženy, proto se používají jen ve slévárnách, které mají kopaného písku dostatečné zásoby. Pro hliníkové odlitky nejsou kladeny na ostřívo takové nároky, jako při odlévání slitin s vyššími teplotami tavení. Směs nemusí odvádět tolik vneseného tepla, dochází k menšímu vývinu plynů, jsou kladeny menší nároky na pevnost a žárovečnost formovací směsi.

Pro odlévání slitin Al-Si se používá monofrakční křemenné ostřívo, s hodnotou středního průměru zrna $d_{50} = 0,1$ až $0,3$ mm. Jemnější ostřívo má pozitivní vliv na hladkost povrchu odlitku.

Jako pojivo je nejčastěji používán montmorillonitický jíl – bentonit. Jeho dávkování je dáno konkrétními provozními podmínkami v každé slévárně, nejčastěji však jde o 6-8 hm.%. Dávka vody bývá polovina obsahu bentonitu.

Pro výrobu jader lze použít směs s jakýmkoliv známým pojivovým systémem, rozhodující je dobrá kvalita jader. Jádrová směs musí mít, především kvůli nízké tepelné expozici, dobrou rozpadavost, dále pak dobré mechanické vlastnosti. Jako jádrová směs se může použít bentonitová směs, CT směs, Hot-Box a další. V současné době je nástup anorganických pojivových systémů pro jádra, které mají dobrou rozpadavost a jsou ekologicky šetrnější (GM Bond, Rudal).

Pro výrobu kvalitní tenkostěnných odlitků je velmi důležitá schopnost směsi odvádět teplo. Čím vyšší je odvod tepla, tím rychleji tuhne kov a vzniká odlitek s homogennější strukturou, který je daleko méně porézní.

1.6.2 Interakce tekutého kovu s formou

Jak už bylo výše zmíněno, výrazný vliv na kvalitu odlitku z hliníkových slitin má především schopnost formy odvádět teplo, které je taveninou vnesené do formy. Odvod tepla kovu formou je nestacionární pochod – teplota jednotlivých bodů v soustavě odlitek-forma se s časem mění. Při těchto nestacionárních pochodech se vždy mění tepelný obsah tělesa, který je přímo úměrný jeho tepelné vodivosti a nepřímo úměrný tepelné akumulační schopnosti. Pro přestup tepla z tekutého kovu do formy platí Newtonův vztah [19]:

$$dQ = \alpha \cdot (t_t - t_f) \cdot dF \quad (1.6.1)$$

kde značí: α – součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

F – plocha styku kovu s formou [m^2]

$(t_t - t_f)$ – rozdíl teplot kovu a formy [K]

Tento vztah udává množství tepla přestupujícího za jednotku času jednotkou povrchu při spádu 1°C , mezi teplotou kovu a teplotou formy. Převrácená hodnota součinitele α se nazývá tepelným odporem přestupu tepla. Rychlost tepelného děje je při nestacionárním průtoku tepla závislá na teplotní vodivosti [19]:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1.6.2)$$

kde značí: a – teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$]

ρ – hustota kovu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

c – měrné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

λ – tepelná vodivost [$\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Tepelná vodivost formovací směsi závisí na tepelné vodivosti ostřiva a vzduchu v dutinách mezi zrny. Z toho důvodu má na tepelnou vodivost zrnitost a typ ostřiva, hustotě spěchování. Při větší hustotě spěchování dojde ke zmenšení vzduchových mezer mezi zrny a tím ke zvýšení tepelné vodivosti. Další významnou roli hraje vlhkost písku, neboť zrna ostřiva jsou obaleny vodou a při ohřevu formovací směsi dojde k migraci vlhkosti. Tepelná vodivost se s narůstající vlhkostí zvyšuje, ale pouze do teploty 100°C , kdy dochází k vypařování vody. Zvyšování tepelné vodivosti směsi mechanismem zvyšování vlhkosti není příliš účinné.

Důležitou termofyzikální hodnotou z pohledu slévárenství je součinitel tepelné akumulace formy b_f . Tento součinitel určuje rychlost pohlcování tepla formou a tím rychlost tuhnutí odlitku [19]:

$$b_f = \sqrt{\lambda_f \cdot c_f \cdot \rho_f} \quad (1.6.2)$$

kde značí: b_f – součinitel tepelné akumulace formy [W.s^{1/2}.K⁻¹.m⁻²]

ρ_f – hustota formovací směsi [kg.m⁻³]

c_f – měrné teplo [J.kg⁻¹.K⁻¹]

λ_f – tepelná vodivost [J.kg⁻¹.K⁻¹]

Rychlost tuhnutí odlitku ve formě lze zvýšit zvýšením hodnoty součinitele tepelné akumulace, například přidáním kovových broků do formy, nebo změnou druhu ostřiva (chromit, zirkon).

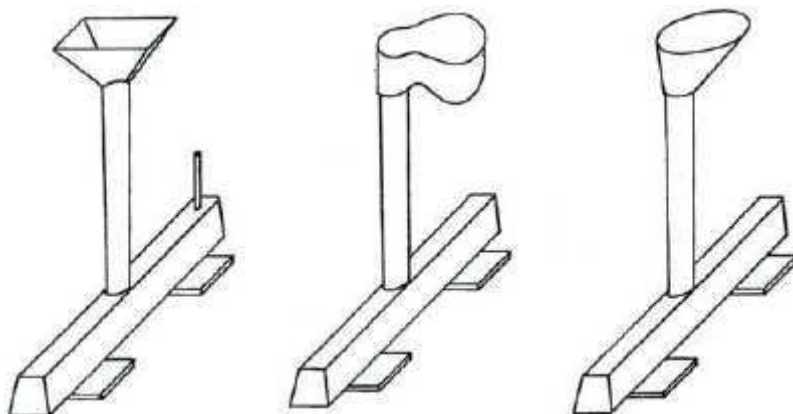
1.6.3 Vtokové soustavy pro slitiny Al-Si

Při výrobě kvalitního odlitku je také důležité správné navržení vtokové soustavy, její velikost a umístění nálitků. Vtoková soustava musí zajistit zaplnění dutiny formy v optimálním čase. Při proudění nesmí dojít k velkému víření taveniny a musí dojít k zachycení co největšího počtu cizorodých částí. Navrhovaná vtoková soustava by měla splňovat několik základních zásad, souhrn požadavků je definován ve [2]:

- roztavený kov by měl vtokovou soustavou protéci s co nejmenší turbulencí, aby nedošlo k poškození oxidického povlaku taveniny, a tím pohlčení dalších plynů
- roztavený kov by měl do dutiny formy vstupovat v takovém smyslu, aby docházelo k usměrněnému tuhnutí
- vtoková soustava by měla být navržena tak, aby bylo možné rychle a rovnoměrně plnit vtokový kůl
- vtoková soustava by měla být navržena tak, aby se zabránilo nezaběhnutí a studeným spojům
- vtoková soustava by měla být navržena ekonomicky s ohledem na využití tekutého kovu
- vtoková soustava by měla být navržena tak, aby jí bylo možno snadno oddělit od odlitku

Základními prvky vtokové soustavy jsou licí jamka, vtokový kůl, struskovací kanál, zářezy. Pro slitiny hliníku se nejčastěji používá tzv. přetlaková vtoková soustava, která vždy zaručí úplné zaplnění celého vtokového systému. Nedochází ke vzniku vzduchových kapes a je tak minimalizováno riziko pohlcování plynů taveninou. Tvar licí jamky je volen tak, aby při odlévání docházelo k odloučení strusky a oxidů. Umístění struskového

kanálu a zářezů by mělo být voleno tak, aby se oxidické pleny a nečistoty zachytávaly ve struskováku. Základní typy vtokových soustav včetně umístění zářezů jsou zobrazeny na obrázku **1.6.1**. Za zářezy by měly vždy být umístěny na spodní straně struskovému, přičemž je vhodnější umístit zářezy z boku struskového kanálu, neboť tak nedochází k víření taveniny a je zaručeno klidnější plnění. U hliníkových slitin se používají spíše ploché zářezy s obdélníkovým průřezem, které zachycují oxidické pleny.



Obr. 1.6.1 Základní typy vtokových soustav [13]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je zaměřena na zkoumání vlivu různých typů formy na vliv vzniku porezity v tenkostěnných odlitcích z hliníkových slitin. Byly zkoumány tři vybrané druhy slitin a tři různé typy formovacích směsí. Odlito bylo celkem devět kusů vzorku, do jednoho typu směsi vždy všechny tři slitiny. Vždy byl proveden rozbor chemického složení taveniny, termální analýza pro kontrolu modifikace slitiny a kontrola naplynění. Poté došlo k vyhodnocení tvaru a velikosti porezity v odlitku.

2.1 Představení slévárny

Vzorky byly odlévány ve slévárně Unitherm, s. r. o. v Jablonci nad Nisou. Slévárna disponuje plynovými tavíci a elektrickými udržovacími pecemi, ruční formovnou pro odlitky do hmotnosti 200kg a maximálních rozměrech rámu 1300x1300 mm pro kusovou a malosériovou výrobu. Dále se zde nachází strojní formovna.

2.2 Odlévané slitiny

2.2.1 Slitina DIN 226

Na odlévání vzorků byly vybrány tři druhy slitin Al-Si. Výběr byl limitován značkami slitin, které se ve slévárně Unitherm běžně používají. První slitinou (označení vzorku písmenem **A**) je ve slévárně nejčastěji odlévaný typ slitiny **DIN 226 - AlSi8Cu3**. Tento typ slitiny se dosud běžně používal pro výrobu forem pro rotační tváření.

Stručná charakteristika slitiny [1]: Jde o univerzální slitinu s velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, malý sklon k vnitřním i vnějším staženinám, velmi dobře obrobitelná. Odlévá se do kokil a do pískových forem. Tato slitina má široké využití, je rovněž vhodná pro složité a tenkostěnné odlitky. Chemické složení a mechanické vlastnosti slitiny jsou uvedeny v tabulce 2.2.1.

DIN 226 - AlSi8Cu3											Příměsy		Al
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Každý	Celk.	
7,5-9,5	0,8	2,0-0,5	0,15-0,65	0,05-0,55		0,35	1,2	0,25	0,15	0,25	0,05	0,25	zb.
Mechanické vlastnosti - v odlitém stavu, písková forma													
Rm (Mpa)				Rp0,2 (Mpa)			A50 (%)			HBS			
150				90			1			60			

Tab. 2.2.1 Chemické složení a vlastnosti slitiny DIN 226 [20]

2.2.2 Slitina ČSN 424331

Druhou odlévanou slitinou je **ČSN 424331 – AlSi10Mg**, která byla vybrána na základě zkušeností s výrobou forem pro rotační tváření. Vzorky jsou označeny písmenem **B**.

Stručná charakteristika slitiny [1]: Jde o slitinu, která má vzhledem k vyššímu obsahu křemíku výborné slévárenské vlastnosti, dále pak dobrou odolnost proti vzniku trhlin, vysokou chemickou odolnost a dobrou obrobitelnost. Vhodná pro všechny technologie odlévání, netvoří vnitřní staženiny. Slitina je vhodná pro tenkostěnné, tvarově složité odlitky s vysokými nároky na pevnost a houževnatost. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce **2.2.2**.

ČSN 424331 - AlSi10Mg											Příměsy		Al
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Každý	Celkem	
9,0-11,0	0,6	0,05	0,45	0,20-0,45		0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	zb.
Mechanické vlastnosti - v odlitém stavu, písková forma													
Rm (Mpa)				Rp0,2 (Mpa)			A50 (%)			HBS			
150				80			2			50			

Tab. 2.2.2 Chemické složení a vlastnosti slitiny ČSN 424331 [20]

2.2.3 Slitina DIN 231

Třetí odlévanou slitinou je **DIN 231 – AlSi12(Cu)**. Tato slitina byla vybrána pro složení blízké eutektickému bodu. Vzorky jsou označeny písmenem **C**.

Stručná charakteristika slitiny [1]: Jde o slitinu s vynikajícími slévárenskými vlastnostmi i technologickými vlastnostmi, velmi dobrou odolností proti korozi a dobrou obrobitelností. Vhodná pro všechny technologie odlévání, má větší sklon ke vzniku staženin v silnějších stěnách, než předchozí typy slitin. Požívá se pro tenkostěnné odlitky s vysokou houževnatostí. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce **2.2.3**.

DIN 231 - AlSi12(Cu)											Příměsy		Al
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Každý	Celkem	
10,5-13,5	0,8	1,0	0,05-0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20	0,05	0,25	zb.
Mechanické vlastnosti - v odlitém stavu, písková forma													
Rm (Mpa)				Rp0,2 (Mpa)			A50 (%)			HBS			
150				80			1			50			

Tab. 2.2.3 Chemické složení a vlastnosti slitiny DIN 231 [20]

2.3 Postup při výrobě odlitků

Volba tvaru odlitku byla provedena na základě předchozích zkušeností, kdy byly vyrobeny dva kusy toho typu odlitku a u obou byly výrazné problémy s kvalitou odlitku. Další důvody pro tuto volbu byly relativně malé rozměry odlitku, ale dostatečná tvarová složitost a již zmíněné problémy při předchozí výrobě. Těmito problémy byla především makroporozita, která se po začištění odlitku objevila na povrchu. Poloha porozity a detail postiženého místa je na obrázku 2.3.1.



Obr. 2.3.1 Porezita na povrchu odlitku

2.3.1 Výroba formy

Modelové zařízení, znázorněné na obrázku 2.3.2, bylo vyrobeno jako volný model s podložkou. Poloha ve formě byla zvolena do vršku, především pro to,



Obr. 2.3.2 Modelové zařízení

aby vnitřní funkční plochy byly orientovány dolů a při odlévání bylo zaručeno klidně spodní plnění dutiny formy. Základní rozměry odlitku byly 500x250x100mm. Tloušťka stěny odlitku většinou 13mm, pouze v lemu (dělicí rovině) bylo voleno 20mm, z důvodu opracování v dělicí rovině, která slouží jako styková plocha obou polovin formy.

Formování se provádělo, vzhledem k požadavkům polohy odlitku, nejprve do vršku formy, poté došlo k otočení formy, vyjmutí modelové podložky a zaformování spodní části formy. Proti přesazení byly do dělicí roviny vloženy tzv. francouzské známky. Na obrázku 2.3.3 je znázorněn postup formování do bentonitové směsi. Po vyjmutí modelu a opravení

drobných nepřesností, došlo k ošetření formy povrchovým tvrdidlem PTL 85, které zlepšuje povrchovou tvrdost formy. Následovalo vyfouknání formy stlačeným vzduchem a odlití.



a) horní polovina formy



b) spodní polovina formy

Obr. 2.3.3 Postup při formování

2.3.2 Formovací směsi

Formovací směsi byly voleny s ohledem na možnosti slévárny a dále vlivem směsi na rychlost tuhnutí odlitku a kvalitu povrchu. Z dostupných materiálů byla zvolena standardní bentonitová směs, především pro porovnání vlivů různých typů slitiny na kvalitu odlitku a dále byla pak na vnitřní funkční plochy použita jádrová CT směs a směs s chromitovým ostřivem, vytvrzovaná CO_2 .

Bentonitová směs

Bentonitová směs je v slévárně používána s křemenným ostřivem o velikosti středního zrna $d_{50} = 0,14 \pm 0,03\text{mm}$ od společnosti Sklopísek Střeleč a.s. Pojivem je bentonit SABENIL plus s vyššími užitnými vlastnostmi, dodává firma Keramost a.s. Směs je mísená v poměru: 100 hm.d. ostřiva, 6-8 hm.d. bentonitu a 2,5-3,5 hm.d. vody. Pevnosti směsi v tlaku je 0,7 až 1,4 MPa. Směs byla nastříkána tvrdidlem PTL 85. Formování do bentonitové směsi je znázorněno na obrázku 2.3.3. Použitá směs je na vzorcích značena číslicí 1.

**Obr. 2.3.4** Formování CT směsi

CT směs

Jde o jádrovou směs ve slévárně běžně používanou, pojenou vodním sklem, která se vytvrzuje profukováním CO_2 . Ostřivo pro jádrovou směs je křemenné o velikosti středního zrna $d_{50} = 0,27 \pm 0,03\text{mm}$ od společnosti Sklopísek Střeleč a.s. Dávkování vodního skla bylo 3,6 hm.d. vodního skla na 100 hm.d. ostřiva. Tato směs byla při formování použita jako nepravé jádro vnitřního povrchu formy, ostatní směs je bentonitová. Doba profukování směsi

CO₂ byla 120 vteřin. Způsob formování vnitřních funkčních ploch CT směsí je znázorněn na obrázku 2.3.4. Po zaformování a vyjmutí modelu se povrch CT směsi natřel lihovým nátěrem a zapálil. Došlo tak k vytvrzení povrchové části formy. Použitá směs je na vzorcích značena číslicí 2. Hotová spodní polovina formy je na obrázku 2.3.5.



Obr. 2.3.5 Nepravé jádro z CT směsi ve spodní polovině formy

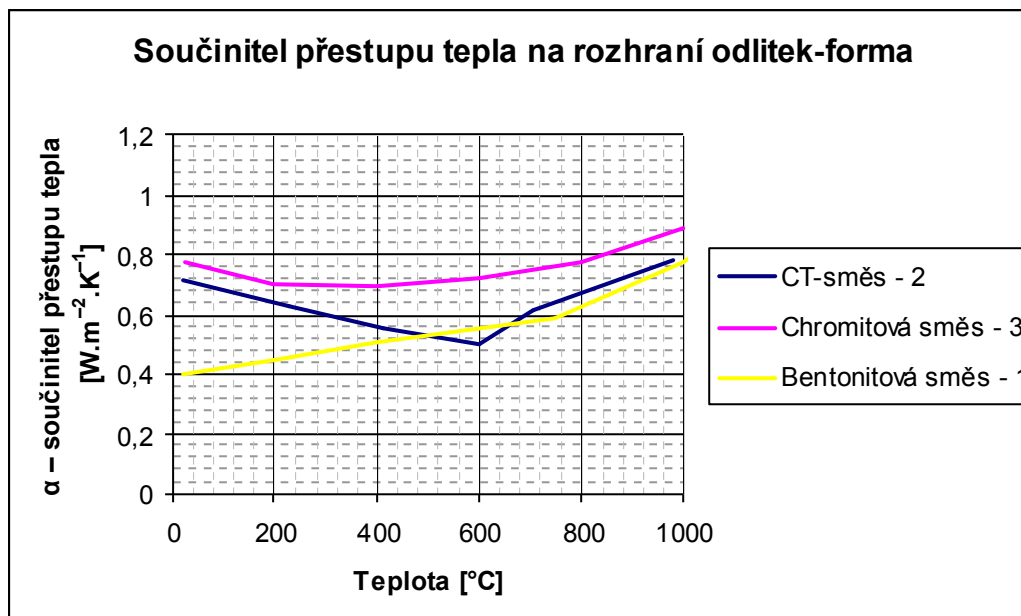
Chromitová směs

Byla použita formovací směs s chromitovým ostřivem, jako pojivo sloužil Carbophen. Chromitové písky jsou základním materiálem ze skupiny spinelů chromových – FeCr₂O₄ (FeO.Cr₂O₃). Z pohledu chemického složení je zde největší zastoupení Cr₂O₃ – 46%, Fe₂O₃ – 26%, Al₂O₃ – 13% a MgO – 10%. Chromit je žáruvzdorné ostřivo pro formovací a jádrové tepelně namáhané směsi. Chromitové směsi mají vysokou odolnost proti zapékání a vyšší ochlazovací účinek. Cílem použití chromitu v tomto experimentu bylo **zvýšení tepelné akumulace formy**. Zvýšení tepelné akumulace má za následek vyšší odvod tepla formou, a tím rychlejší ochlazování odlitku. Zde se použila chromitová směs výhradně na vnitřní plochy odlitku, stejně jako v předešlém případě se jednalo o nepravé jádro. Použitá směs je značena číslicí 3. Vlastnosti chromitového ostřiva jsou uvedeny v tabulce 2.3.1.

Vlastnosti chromitového ostřiva	
Sřední zrno d ₅₀ :	0,29-0,35 mm
Specifická hmotnost:	4500 kg.m ⁻³
Sypná hmotnost:	2900 kg.m ⁻³
Žáruvzdornost:	> 1800°C
Hodnota pH:	max. 8,5

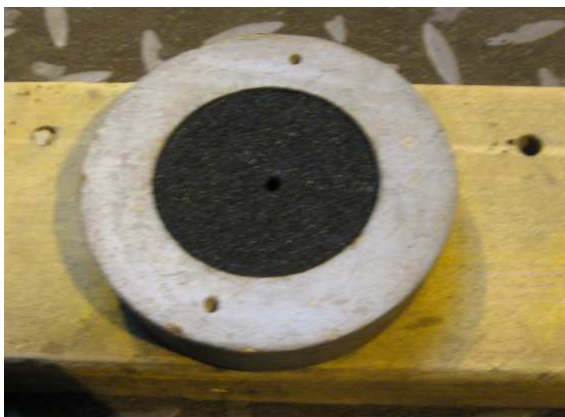
Tab. 2.3.1 Vlastnosti chromitového ostřiva [21]

Použité směsi měly rozdílné akumulční schopnosti, což zapříčinilo rozdílné chladnutí odlitku. Z obrázku 2.3.6 je zřejmé, že nejvyšší součinitel přestupu tepla α (podle vzorce 1.6.1 zvyšující se součinitel α má za následek zvýšením odvodu tepla a tím i s rychlejší tuhnutí odlitku) má chromitová směs. Součinitel přestupu tepla bentonitové a CT směsi se dle grafu liší v uvažovaných teplotách 450-750°C pouze minimálně.



Obr. 2.3.6 Součinitel přestupu tepla na rozhraní odlitek forma [22]

Vzhledem k tomu, že se chromitová směs ve slévárně nepoužívá, bylo nutné nejdříve vyzkoušet vhodné dávkování pojiva, pro dosažení dostatečné pevnosti. Zde je nutno podotknout, že slévárna neměla vybavení na zkoušení



Obr. 2.3.7 Zkušební vzorek

pevnosti formovacích směsí, bylo proto nutné lehce improvizovat. Zkušební vzorky byly formovány do modelu nálitku, který je na obrázku 2.3.7. Do spodní desky byl vyvrtán otvor, aby bylo zabezpečeno dobré profukování plynem. Zkoušky pevnosti probíhaly vzhledem k nemožnosti použití měřících přístrojů značně subjektivně. V podstatě se jednalo o rozlomení vzorku pouze pomocí lidské síly na dvě poloviny. Zkoušené pojivo bylo vodní sklo a Carbophen 6240 od firmy HÜTTENES-ALBERTUS. Dávkování

pojiva bylo voleno 1,0%, 1,5% a 2,0%. Směsi s vodním sklem neměly po vytvrzení CO₂ dostatečnou pevnost, většinou došlo k destrukci zkušební vzorku již při vyjímání z modelu. Při použití Carbophenu 6240 dosáhl největší subjektivní pevnosti vzorek s 2 % pojiva.



Při mísení směsi bylo proto dodržováno toto dávkování. Mísení chromitové směsi probíhalo v lopatkovém mísiči se svislou osou, nazývaném také S-mísič (**obr. 2.3.8**) a vážení komponent na tenzometrických vahách Formatic 4. Pro výrobu nepravého jádra se použilo 22 kg ostřiva, což je objemově zhruba 8 litrů. Dávka pojiva Carbophen 6240 byla 2 hm. díly. Mísení probíhalo po dobu pěti minut.

Obr. 2.3.8 Lopatkový mísič

Po zaformování nepravého jádra byla chromitová směs pro zvýšení pevnosti povrchu nastříkána lihovým nátěrem a zapálena. Hotová spodní polovina formy je na obrázku **2.3.9**.

Při výrobě nepravých jader došlo ke komplikacím při snímání modelu z formy. Model byl navržen a vyroben pro formování na syrovo, kdy se počítalo s rozklepáním modelu pro snazší vyjmutí. Proto byly na modelu zhotoveny menší úkosity, než je běžné při formování do chemicky pojených směsí. Další záporným vlivem byla špatná přístupnost CO_2 do hlubokých dutin. Při snímání modelu z formy (nepravého jádra) proto došlo k poškození tří jader, kdy došlo k prasknutí vyvýšené části jádra. Vzhledem k provozním důvodům ve slévárně a vysokým finančním nákladům nemohly být vyrobeny nové formy, takže byla jádra opravena. Vada jádra je na obrázku **2.3.9** vyznačena červenou barvou.



Obr. 2.3.9 Nepravé jádro z chromitu ve spodní polovině formy

2.3.3 Úprava taveniny

Před odléváním byla provedena kontrola očkování, modifikace a naplynění taveniny. Předslitiny v podobě housek jsou dodávány s garantovaným chemickým složením. Předslitiny jsou již z hutí dolegovány přísadovými prvky tak, aby se ve slévárně nemuselo výrazně dolegovávat. Slitiny byly natavovány v plynových pecích, vždy byl proveden rozbor chemického složení. Rozbor chemického složení je v **příloze 1**. Po natavení byla tavenina přelita do udržovacích elektrických pecí, kde docházelo ke konečné úpravě taveniny. Postup konečné úpravy taveniny byl následující:

a) očkování

Pro očkování hliníkových slitin se ve slévárně použila předslitina FINALLOY 31/100 od firmy Foseco, s chemickým složením 3%Ti-1%B-zbytek Al. Předslitina je dodávána ve formě prutů. Předslitina obsahuje boridy titanu (TiB_2), které se po roztavení rozptýlí v tavenině. Boridy vytváří během tuhnutí jemně zrnitou strukturu.

b) čištění a odplyňování



Obr. 2.3.10 Aplikace čistících tablet



Obr. 2.3.11 Reakce při čištění taveniny

Čištění a odplyňování slitin hliníku bylo prováděno čistícími a odplyňovacími tabletami NITRAL C 19 od firmy Foseco. Jde o účinné a čistící odplyňovací činidlo, které se používá pro úpravu hliníkových tavenin. Během reakce se v tavenině uvolní rozptýlený dusík, který vyplavuje nekovové částice a odstraňuje i vodík, absorbovaný povrchem těchto částic. Tablety byly před po taveniny aplikovány pomocí čistého děrovaného zvonu, jak je patrné z obrázku **2.3.10**. Po ponoření tablet do taveniny docházelo k bouřlivé reakci, jak je patrné z obrázku **2.3.11**. Po dokončení reakce se z hladiny taveniny sěr opatrně odstraní.

c) rafinace

Pro rafinaci a vytavování se použila rafinační a vytavující sůl pro hliníkové slitiny COVERAL* GR 2410 od firmy Foseco.. Působením soli se vytavují oxidy hliníku a jiné nekovové nečistoty do stěru. Při použití FDU tvoří výsledný stěr suchá popelová struska s nízkým obsahem kovu. Promývání taveniny dusíkem pomocí jednotky FDU trvalo 3,5 minuty. Na obrázku **2.3.12** je znázorněno promývání taveniny jednotkou FDU Mini degasser od firmy Foseco.



Obr. 2.3.12 Odplynování FDU

d) modifikace

Modifikace taveniny byla prováděna modifikačními tabletami pro slitiny AISi SIMODAL 97 od firmy Foseco. Tyto tablety uvolňují při exotermické reakci sodík, který se rovnoměrně rozptýlí v tavenině. Přiměřené množství přípravku se nadává na povrch taveniny a ponoří se pomocí děrovaného zvonu. Po ukončení reakce je potřeba odstranit stěr a zbytky tablet. Ve slévárně se tablety před vložením do taveniny předehřívají, aby nedošlo ke vnášení vlhkosti do taveniny.

2.3.4 Kontrola taveniny

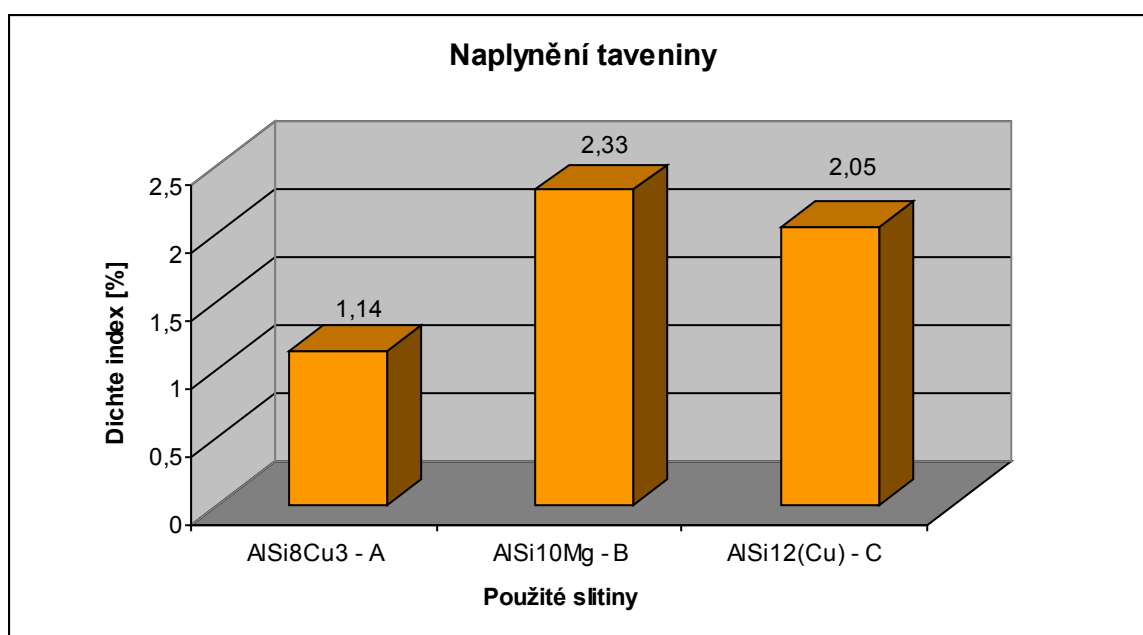
Před odléváním byla provedena kontrola naplynění, očkování a modifikace taveniny.

Kontrola naplynění byla prováděna ztuhnutím dvou vzorků, jednoho za podtlaku a druhého za atmosférického tlaku. Na vytvoření podtlaku byl použit laboratorní přístroj Vakuum density tester (**obr. 2.3.13**), zapůjčený z laboratoří VUT FSI, odbor slévárenská technologie. Vakuování probíhalo při



Obr. 2.3.13 Přístroj na vytvoření podtlaku

tlaku 80 mbar po dobu pěti minut. Oba vzorky byly následně zváženy ve vzduchu a v kapalině, z hmotností vzorků byl vypočítán index hustoty - Dichte index. Takto byly naměřeny všechny tři typy odlévaných slitin. Naměřené hodnoty naplynění taveniny u odlévaných vzorků jsou na obrázku **2.3.14**. Naplynění nebylo měřeno pouze u vzorku s označením A1, který byl dodán jako běžná zakázka.



Obr. 2.3.14 Naplynění taveniny u odlévaných vzorků

Kontrola očkování a modifikace byla prováděna pomocí termické analýzy na přístroji THERMO-ANALYSE TA-752 od firmy Ideco (**obr. 2.3.15**). Vzorek slitiny byl odlit do předeřátého kelímku, ve kterém následně



docházelo k tuhnutí taveniny. Následné vyhodnocení termické analýzy prokázalo dostatečnou modifikaci slitin. Grafy termické analýzy jsou uvedeny v **příloze 2**.

Obr. 2.3.15 Přístroj na termickou analýzu

2.3.5 Odlévání

Odlévání probíhalo z ručních pánví. Před odlitím byla změřena teplota taveniny termometrem GTH 1150 od firmy Greisinger. Termometr byl osazen termočlánekem typu K - NiCr-Ni s rozsahem teplot $-50/+1150^{\circ}\text{C}$. Teploty taveniny v momentě odebrání z pece se pohybovaly v rozmezí $730-735^{\circ}\text{C}$. Doba lití odlitků se pohybovala mezi 14-20 sec. Hotový odlitek, včetně vtoku a

nálitků, je na obrázku **2.3.16**. Po vychladnutí byly odlitky vytlučeny z formy a očištěny od zbytků formovací směsi. Během apretace byly odstraněny vtoky a nálitky a došlo začištění zateklin. Odlitky dále nebyly pískovány, nedošlo ani k žádnému teplenému zpracování.



Obr. 2.3.16 Surový odlitek s vtokovou soustavou a nálitky

2.3.6 RTG zkoušky

Po apretaci odlitků byly zhotoveny RTG snímky daného kritického místa každého odlitku. Rentgenování se provádělo přístrojem SEIFERT MX 200 (**obr. 2.3.17**). Podmínky při rentgenových zkouškách jsou uvedeny v tabulce **2.3.2**. Vždy byl zhotoven jeden snímek od každého odlitku, se zaměřením na stejné místo ze kterého byly vyřezány vzorky (viz. obr. 2.4.1).



Obr. 2.3.17 Rentgenové zkoušky odlitku

Nastavení RTG přístroje	
Film	Foma R5 - 18 x 24 mm
Ohnisková vzdálenost FFD	900 mm
Energie - napětí	80 kV
Proud	4 mA
Čas expozice	0,7 min

Tab. 2.3.2 Nastavení RTG přístroje

Největší vada se projevila na materiálu AlSi8Cu3 odlévaném do bentonitové směsi, kde došlo k výskytu velkého množství ředin. Řediny tvořily velký kompaktní útvar umístěný pod nálitkem, který zasahoval do celého průřezu stěny. Příčinou této vady byl nejspíše špatný technologický postup při výrobě. Ostatní odlitky byly bez výraznějších vad, většinou se jednalo o řediny, které byly pravidelně rozmístěny v celém průřezu odlitku. Největší počet ředin vykazoval materiál AlSi10Mg odlitý do bentonitové směsi a dále pak tentýž materiál odlitý do chromitové směsi. V **příloze 3** jsou uvedeny RTG snímky všech odlitků, které vykazovaly vady a pro porovnání také jeden kus, kde žádné vady nebyly.

2.4 Metalografické výbrusy vzorků

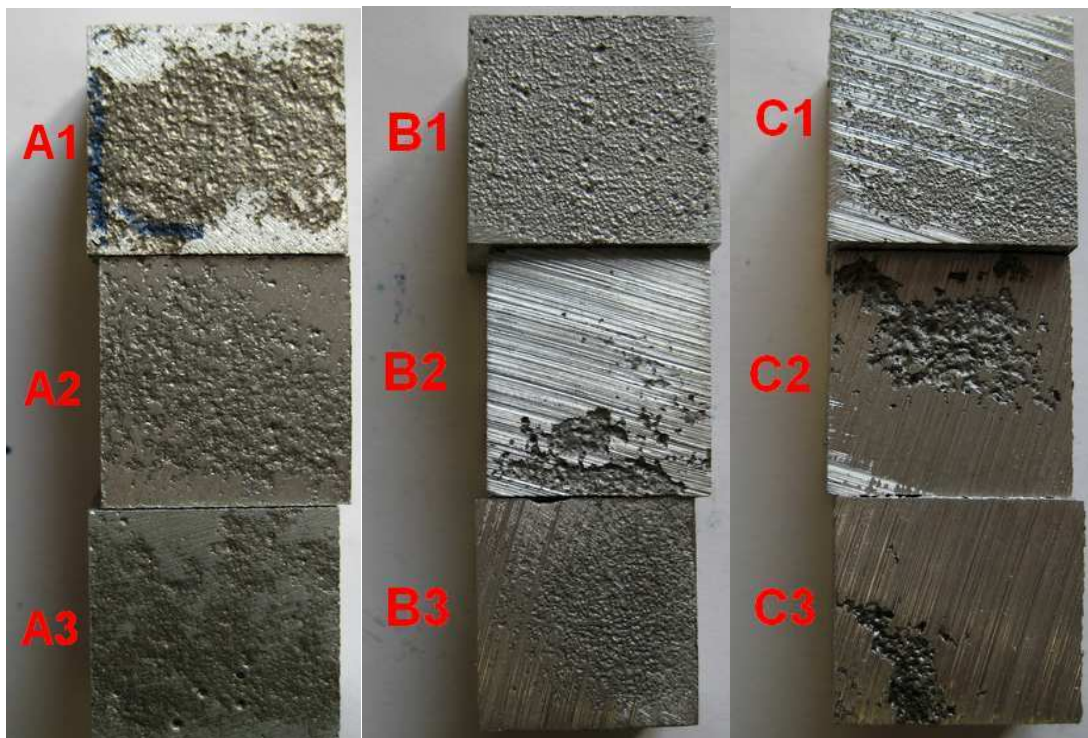
2.4.1 Vyřezávání vzorků

Místo vyřezání vzorků pro metalografické výbrusy bylo voleno s ohledem na předchozí špatnou kvalitu odlitků. Jedná se o nejhlubší část odlitku, která je zároveň nejvyšší bod spodní poloviny formy. Vzorky byly odebrány v místě na odlitku, které je znázorněné na obrázku 2.4.1. Vzorky byly odvrtány a na požadovaný rozměr nařezány na pásové pile na kov s chlazením.



Obr. 2.4.1 Místo odběru vzorků a vyhodnocení kvality povrchu odlitku

Na obrázku 2.4.2 jsou znázorněny vzorky připravené na metalografický výbrus. Jedná se o vzorky na hodnocení vnitřní funkční plochy (povrchu). Na třech vzorcích (B2, C2, C3) jsou již na první pohled patrné vady, které vznikly zatečením kovu do prasklého jádra.



Značení vzorků: **A** – materiál AlSi8Cu3 , **B** – materiál AlSi10Mg , **C** – materiál AlSi12(Cu)
 1 – bentonitová směs, 2 – CT směs, 3 – chromitová směs

Obr. 2.4.2 Vzorky připravené na metalografické výbrusy – vnitřní povrch

Druhá sada vzorků byla odebrána ze stejného místa, ale jako vyhodnocovaná část bude řez stěnou odlitku. Tyto vzorky mají stejný způsob označování materiálu a směsi, pro odlišení je za tyto dva znaky přidáno písmeno X.

2.4.2 Metalografické výbrusy

Po vyříznutí se vzorky pro metalografické výbrusy preparovali metodou lisování za tepla. Vzorek byl umístěn do vyhřívaného lisu, pečlivě se odměřilo přesné množství práškového Dentacrylu, který se nasypal do tlakové komůrky. Vzorek byl zpracováván za zvýšené teploty 180°C při tlaku 20kN. Následovalo ochlazení zalitého vzorku a vyjmutí z lisu. Příprava jednoho vzorku trvala asi 12 minut. Zalisování se provádělo na přístroji STERUS LaboPress-3 (obr. 2.4.3). Poté následovalo broušení zalisovaných vzorků brusnými papíry o hrubosti 280, 600, 1200 a pro jemné doleštění se použil brusný papír o hrubosti 4000. Dalším krokem po vybroušení vzorků bylo leštění. Nejprve se leštilo 3-mikronovou diamantovou pastou, poté následovalo chemodoleštění přípravkem OPS. Broušení a leštění vzorků se provádělo na laboratorních přístrojích Dap-7 s rotační upínací hlavou Pedemin-2 od firmy Struers (obr. 2.4.4). Lisování a broušení vzorků se provádělo v laboratořích Ústavu materiálových věd a inženýrství fakulty strojní VUT v Brně.



Obr. 2.4.3 Lisování vzorků



Obr. 2.4.4 Broušení vzorků

Bezprostředně po vybroušení následovalo fotografování mikrostruktury pod mikroskopem. Obraz z mikroskopu byl přenášán do počítače pomocí fotoaparátu Olympus E-510 a programu pro záznam a vyhodnocování digitálního obrazu z mikroskopu QuickPHOTO Industrial 2.2.

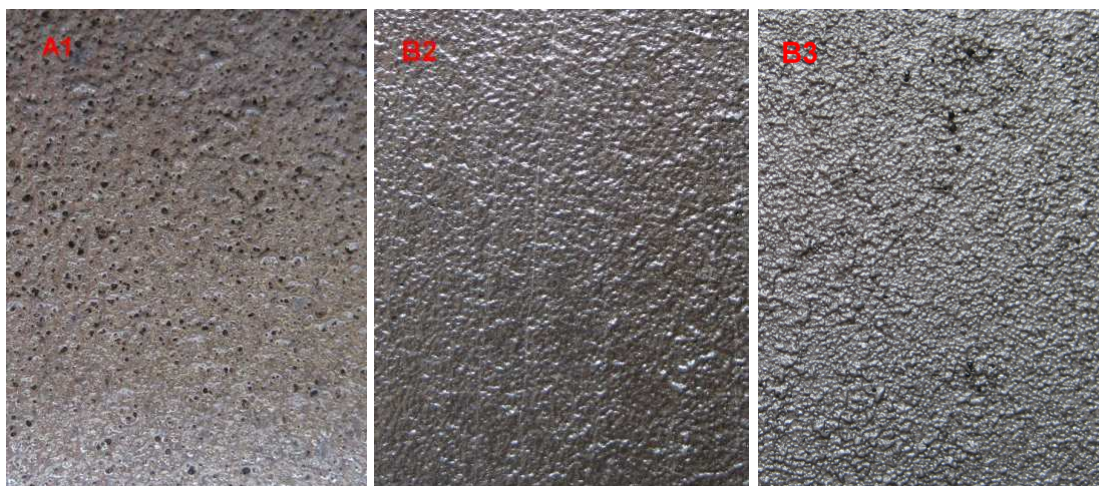
2.5 Vyhodnocení vzorků

Vyhodnocování vzorků probíhalo v několika etapách. První částí bylo vyhodnocení kvality vnitřního povrchu odlitku, dále pak vyhodnocení poretivity vnitřního povrchu odlitku na výbrusech a jako poslední byly vyhodnoceny vzorky řezem materiálu s ohledem na tvar a velikost dutin ve struktuře.

2.5.1 Hodnocení kvality povrchu odlitku

Hodnocení kvality povrchu probíhalo přímo na hrubě opracovaných odlitcích. Vzhledem k výše zmíněným problémům s jádry se vždy jednalo o plochu, která byla na vnitřní straně odlitku, ale nešlo o stejnou plochu, ze které byly odebrány vzorky na výbrusy (viz. **obr. 2.4.1**). Vyhodnocení kvality povrchu bylo pouze porovnáním jednotlivých povrchů. Povrchy byly nafoceny v makrorežimu digitálního fotoaparátu Canon IXUS 70.

Nejlepší povrch vykazovaly odlitky odlité do CT směsi, kde byl u všech typů materiálů lesklý povrch s nízkou drsností a malým procentem vad povrchu. U dalších typů směsí již není výsledek tak jednoznačný. Povrchy z chromitové směsi obsahovaly méně povrchových vad, ale drsnost povrchu se lišila použitou slitinou. Slitiny AlSi8Cu3 – A3 a AlSi12(Cu) – C3 vykazovaly nízkou drsnost, ovšem vzorek z materiálu AlSi10Mg – B3 byl výrazně matný s hrubým povrchem. Vzorky odlévané do bentonitové směsi vykazovaly, kromě poměrně dobrého povrchu materiálu AlSi12(Cu) – C1, větší počet povrchových vad. Jednoznačně nejhorší byl vzorek z materiálu AlSi8Cu3 – A1, odlitý do bentonitu. Zde byl povrch velmi drsný s velkým výskytem vad. Vybrané povrchy jsou na obrázku **2.5.1**. Fotografie všech povrchů jsou v **příloze 4**.



Obr. 2.5.1 Vybrané povrchy odlitků

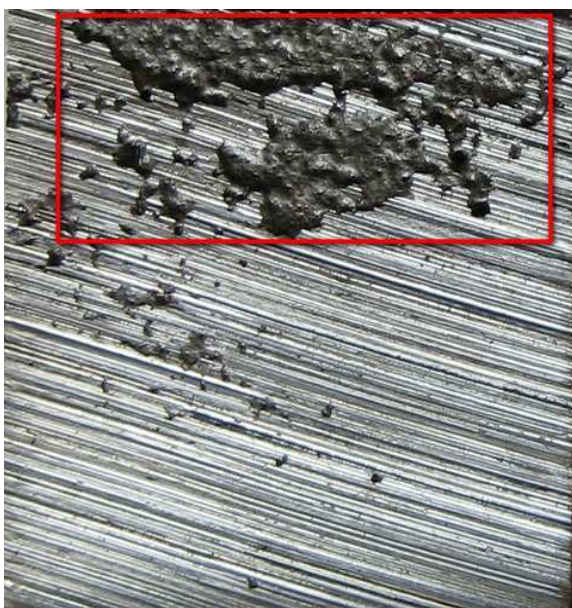
Z výše uvedeného je zřejmé, že se kvalita povrchu liší nejen danou formovací směsí, ale také záleží na materiálu. Dále nebyl potvrzen předpoklad vzniku nejlepšího povrchu u směsi s vyšším koeficientem odvodu tepla. Při použití bentonitové směsi se potvrdil vznik povrchu s nízkou drsností, ovšem došlo k většímu počtu vad, ať už v podobě bublin, nebo zapečených zrněk písku. Zde je důležitá kvalita formovací směsi a její vlhkost, což se projevilo u odlitků do CT směsi, do které se nepřidává voda a navíc dochází k vysušení volně vázané vody zapálením nátěru. Povrchy z CT směsi byly nejkvalitnější.

2.5.2 Hodnocení porezity povrchu odlitku

Hodnocení porezity na povrchu odlitku probíhalo na vzorcích s označením bez písmene X, tj. funkční plocha vzorku byla v kontaktu s formovací směsí. Vybroušené vzorky byly naskenovány do formátu tiff, který umožňuje vysoké rozlišení a zachovává rozměry. Po naskenování vzorků došlo k jejich úpravě v grafickém programu, vzorky byly oříznuty tak, aby byla vyhodnocována pouze plocha materiálu a předešlo se vnášení nepřesností z rozhraní mezi materiálem a dentacrylem. Vyhodnocování porezity probíhalo v programu QuickPHOTO Industrial 2.2.

Měření porezity probíhalo pomocí tzv. grafických filtrů, které jsou schopny rozlišit jednotlivé odstíny barev. Program převedl obraz vzorku do modro-červeného spektra, přičemž došlo ke zvýraznění porů. Poté bylo nutné nastavit citlivost barevných filtrů tak, aby jeden z filtrů nezasahoval do detekčního rozsahu druhého filtru a aby nebylo žádné barevné pásmo vynecháno. Správnost nastavení se ověřovala z výsledků měření, kdy procentuální součet obou barev filtrů musel dávat 100%. Přesné nastavení citlivosti filtru tak zaručovalo, že červenou barvou budou zvýrazněny pouze dutiny. Při příliš nízkém rozsahu by byly označovány jako póry i jednotlivé fáze, což by výrazně zhoršilo nepřesnost.

Vysoká nepřesnost měření byla u těch vzorků, kde došlo k prasknutí jádra již při formování. Zateklý kov tak vytvořil dutiny, které byly poměrně hluboké, takže na vzorcích zůstali i po vybroušení dutiny. Porovnání jednoho vzorku s prasklým jádrem je na **obr. 2.5.2**. U těchto třech vzorků však byla většina vad zjevně pouze od jádra, protože jak je zřejmé z **obr. 2.5.2b**, při vybroušení zůstaly na vzorku pouze velmi hluboké vady. Naskenované vzorky jsou v **příloze 5**.



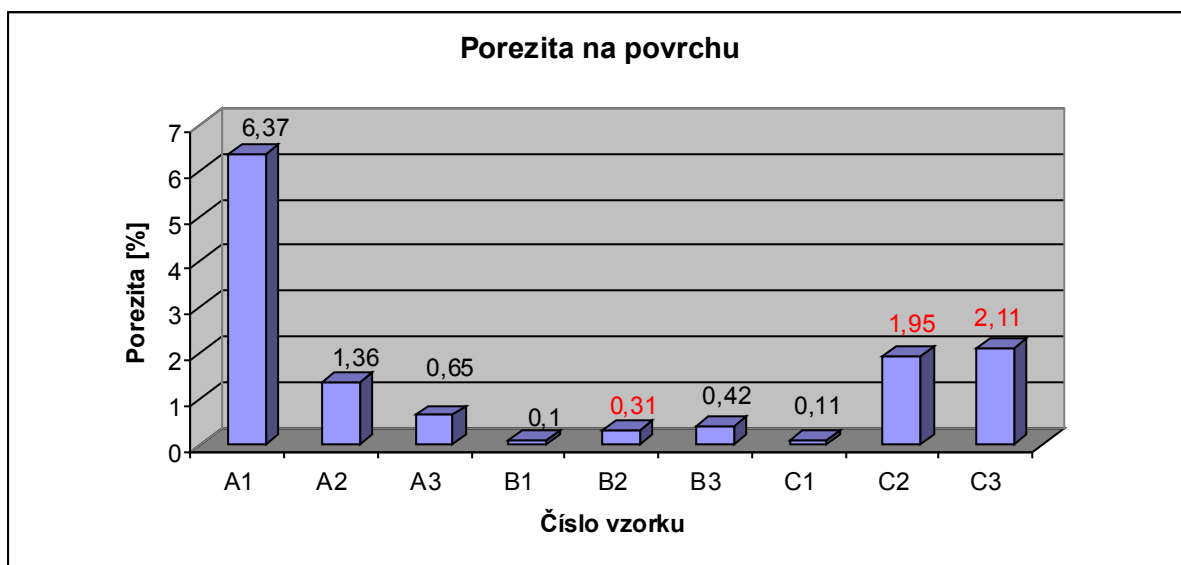
a) vyříznutý vzorek z odlitku - B2



b) vybroušený vzorek - B2

Obr. 2.5.2 Vady od prasklého jádra na vzorku B2

Grafické výsledky měření porezity jsou na obrázku 2.5.3. U vzorků, označených červenou barvou, došlo ke zkreslení výsledků poškozením jádra. Z grafu je zřejmé, že odlitek dodaný jako běžná zakázka vykazoval vysokou poréznost. Dle RTG zkoušky se však tato vada projevila pouze ve vyhodnocovaném místě. Vzhledem k poloze vady lze předpokládat, že byla způsobena technologickou chybou při výrobě. Dále z grafu jasně vyplývá že materiál AlSi8Cu3 vykazoval největší porezitu ve všech vzorcích. U ostatních dvou materiálů je porezita na povrchu nižší, nepřesahuje 0,42%. Lze předpokládat, že vzorky které byly postiženy vadou jádra, by nepřesáhly tuto hranici porezity. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce 2.5.1.



Obr. 2.5.3 Vyhodnocení porezity na povrchu odlitku

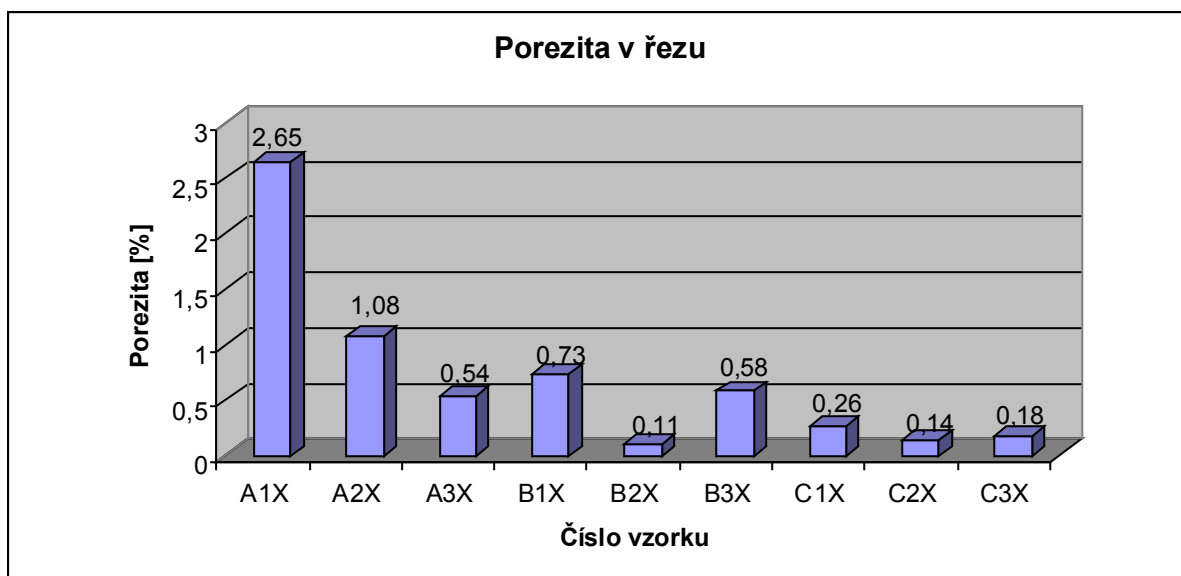
číslo vzorku	plocha pórů [%]	plocha materiálu [%]
A1	6,37	93,63
A2	1,36	98,64
A3	0,65	99,35
B1	0,1	99,9
B2	0,31	99,69
B3	0,42	99,58
C1	0,11	99,89
C2	1,95	98,05
C3	2,11	97,89

Tab. 2.5.1 Výsledky měření porezity na povrchu

2.5.3 Hodnocení porezity v řezu stěnou odlitku

Vyhodnocování probíhalo na stejném zařízení a stejným postupem jako v kapitole 2.5.2. Oproti tomuto měření je však zaručena vyšší přesnost, neboť u těchto vzorků nedošlo k ovlivnění pórovitosti popraskanými jádry. Do měření

porezity jsou zahrnuty i staženiny. Grafické výsledky měření porezity jsou na obrázku 2.5.4.



Obr. 2.5.4 Vyhodnocení porezity v řezu stěnou odlitku

Nejhorší výsledky vykazuje vzorek číslo A1X, u kterého se jedná o stejný problém, jako byl u vzorku A1. Celkově lze říci, že materiál AISi8Cu3 má nejhorší výsledky, co se týče poréznosti u obou typů vzorků. Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce 2.5.2.

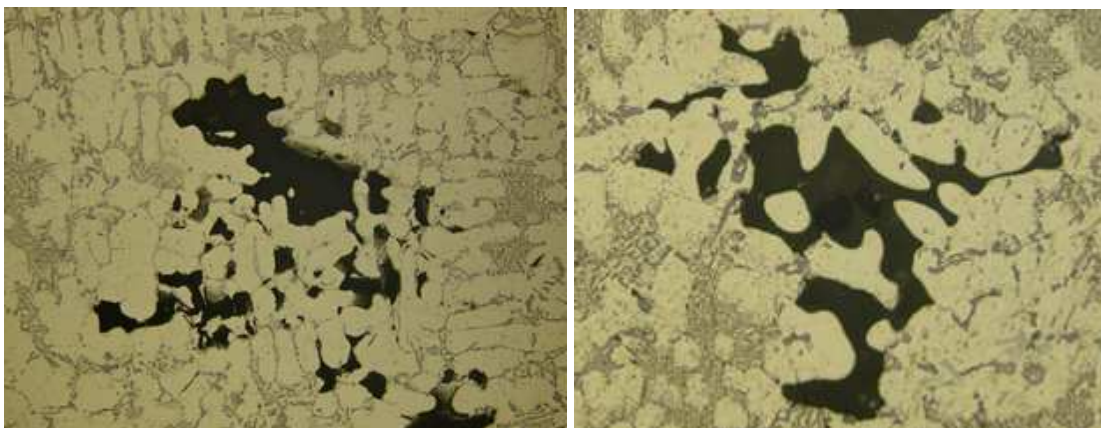
číslo vzorku	plocha pórů [%]	plocha materiálu [%]
A1X	2,65	97,35
A2X	1,08	98,92
A3X	0,54	99,46
B1X	0,73	99,27
B2X	0,11	99,89
B3X	0,58	99,42
C1X	0,26	99,74
C2X	0,14	99,86
C3X	0,18	99,82

Tab. 2.5.2 Výsledky měření povrchu v řezu stěnou odlitku

Dále pak je zvýšená porezita (oproti porezitě plošné) u vzorků B1X a B3X. Při detailnějším zkoumání metalografických výbrusů (viz. kapitola 2.5.4) vyšlo najevo, že tento rozdíl lze přičítat většímu vzniku staženin v odlitku. Metalografické výbrusy uvedených vzorků jsou na obrázku 2.5.5.

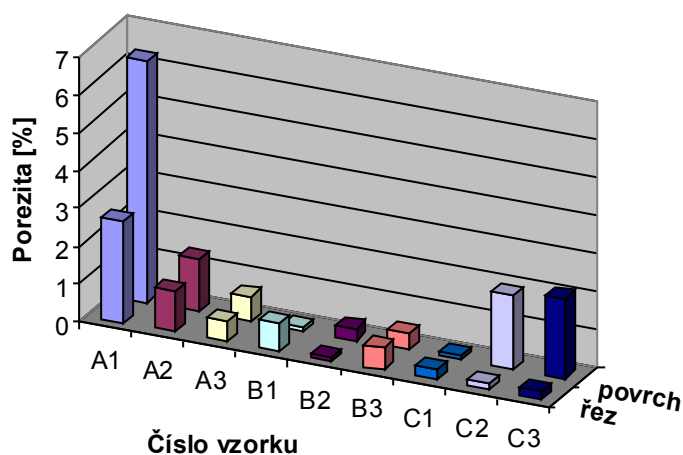
Při porovnání výsledků měření ze dvou ploch stejného vzorku, je zřejmé, že procento povrchové porezity u třech vzorků ovlivněných prasklým jádrem je právě kvůli tomuto problému výrazně nepřesné. Lze proto očekávat, že by porezita při nepoškození jader dosahovala výrazně menších hodnot. Porovnání porezity u obou typů vzorků je na obrázku 2.5.6. Z grafu je zřejmý

výrazný rozdíl především u vzorků C2 – C2X, C3 – C3X u kterých došlo k největšímu poškození jader.



a) vzorek B1X

b) Vzorek B3X

Obr. 2.5.5 Metalografické výbrusy**Porovnání porezity****Obr. 2.5.6** Porovnání porezity

2.5.4 Analýza kulatosti pórů

Při obrazové analýze byl hodnocen tvar (kulatost a ovalitiy) a velikost porezity u vzorků s označením písmenem **X** (řez stěnou). Analýza byla prováděna na programu AnalySIS.

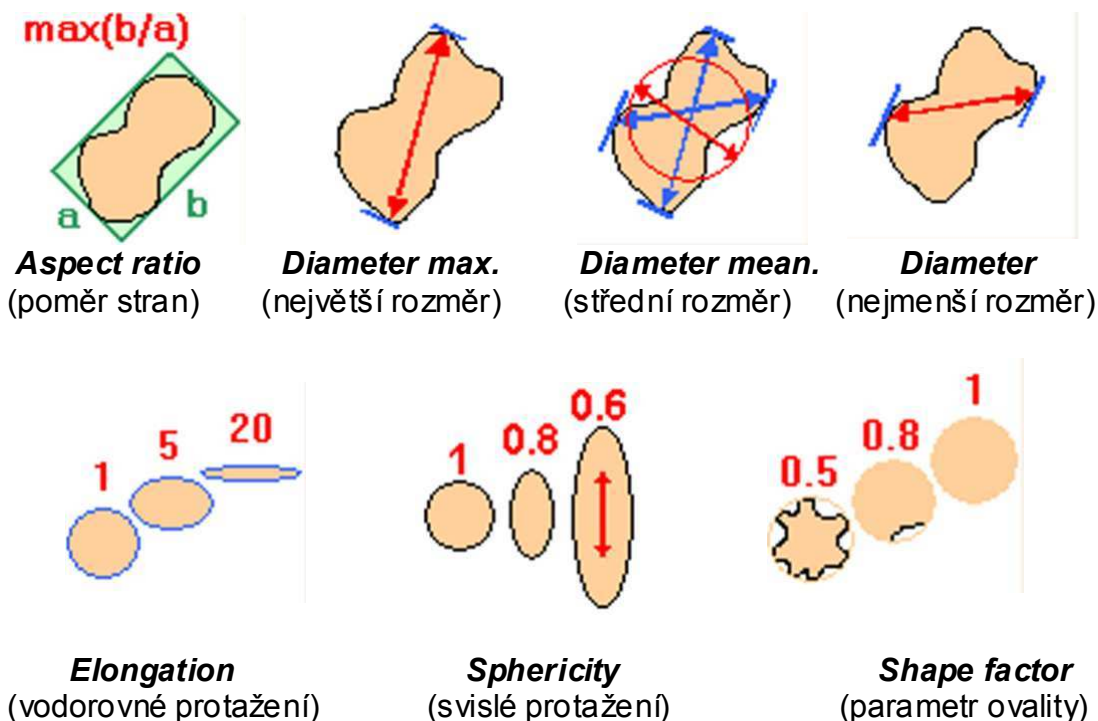
Postup měření parametrů pórů byl podobný se zjišťováním samotné porezity – fotografie metalografických byly převedeny do černobílé barvy, pro snadnější nastavení barevných filtrů. Bylo však také zapotřebí zvolit některé „mantinely“ výzkumu, tj. nadefinovat mezní (minimální a maximální) hodnoty některých hodnocených faktorů – jako elongation a sphericity. Tím došlo k eliminaci některých faktorů, které by mohly zkreslit výsledek – např. rýha přes hodnocený metalografický výbrus může být po kontrastním zbarvení hodnocena počítačovým programem jednoduše jako porezita. Tím, že se

nastavily maximální hodnoty např. protažení pórů (třeba poměr stran póru 1:10) nebo jejich rozměr (např. 4 mm), bude hodnotící program veškeré objekty nad tyto limity ignorovat.

Program AnalySIS analyzuje v zadaných obrázcích objekty, které se barevně odlišují od svého okolí a splňují rozměrové a tvarové mezní podmínky. Spočítá obvod a plochu každého póru a podle známých měřítek obrázku (podle zadaného zvětšení - 50x, 100x apod.) dopočítá i vlastní rozměry póru. Výsledky všech hodnocených objektů ve vzorku se poté ukládají do tabulek. Program pracuje s těmito parametry:

- *aspect ratio* (poměr stran objektu)
- *diameter max.* (největší rozměr objektu)
- *diameter mean.* (střední rozměr objektu)
- *diameter min.* (nejmenší rozměr objektu)
- *elongation* (vodorovné protažení)
- *sphericity* (svislé protažení)
- *shape factor* (parametr ovality)

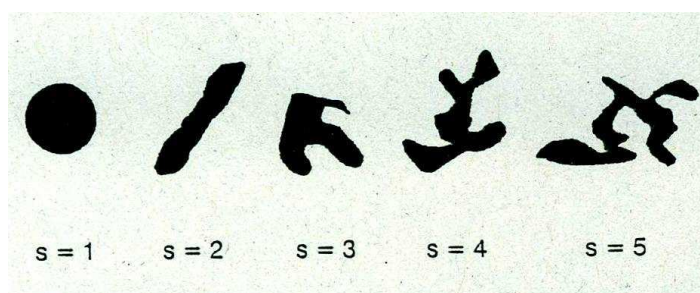
Na obrázku 2.5.7 jsou schématicky zobrazeny zmíněné parametry porezity.



Obr. 2.5.7 Schémata programem hodnocených parametrů porezity

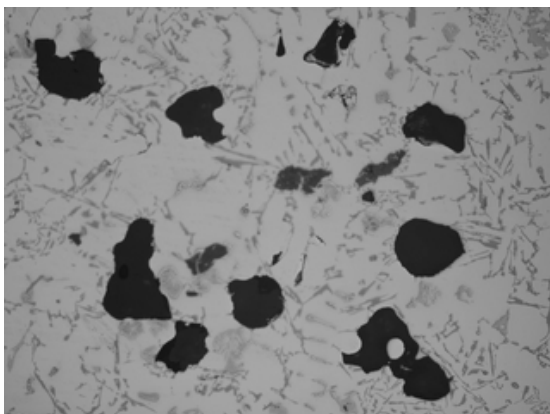
Ohledně parametru ovality je podstatné vědět, že v programu AnalySIS (jak je vidět i na schématických obrázcích) má hodnotu tzv. tvarového faktoru,

který je obrácenou hodnotou parametru kulatosti. Zobrazení hodnot parametru kulatosti je na obrázku 2.5.8.

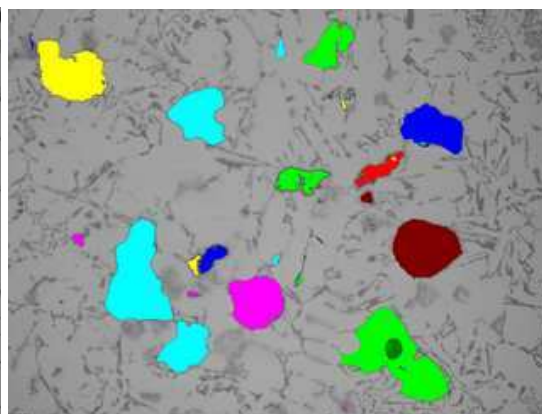


Obr. 2.5.8 Parametr kulatosti

Princip měření spočíval v detekování tmavých míst (dutin), jejich následnému zabarvení (každé dutině příslušela různá barva) a vyhodnocení výše uvedených parametrů (obr. 2.5.9). Z každého vybroušeného vzorku byly nafoceny fotografie tak, aby byla pokryta veškerá porezita ve vzorku. Měření se provádělo pro každou fotografii a výsledky měření pro daný vzorek zprůměrnovány.



a) vybroušený vzorek

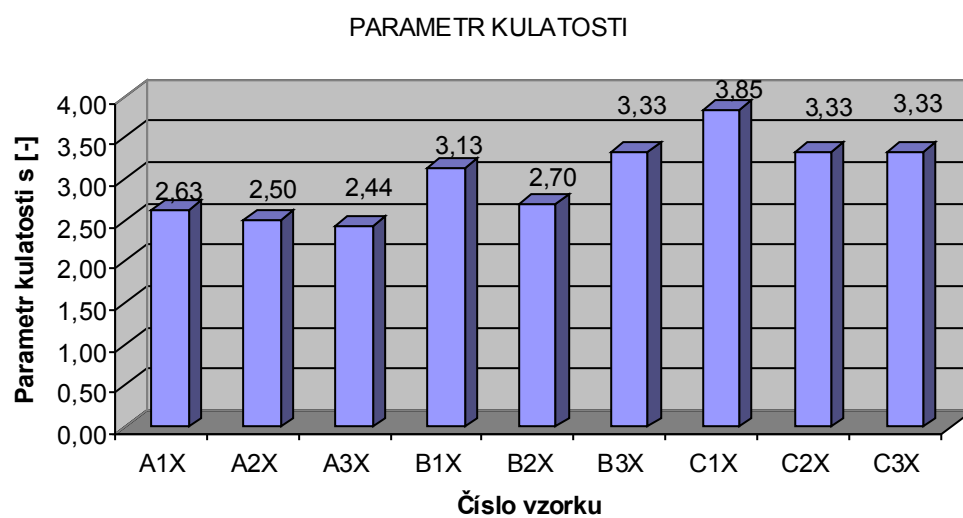


b) vyhodnocený vzorek

Obr. 2.5.9 Postup vyhodnocování vzorku

Vyhodnocení parametru kulatosti je vhodné ke zjištění typu pórů. Kulaté dutiny, které vznikají vysokým naplyněním taveniny, mají parametr kulatosti blížících se hodnotě 1. Dutiny vzniklé stahováním taveniny mají tento parametr blíže k hodnotě 5.

Z obrázku 2.5.11 je patrné, že se parametr kulatosti dutin ve vyhodnocovaných vzorcích pohybuje v rozmezí 2,44 – 3,85. Dutiny u všech vzorků slitiny AlSi8Cu3 (vzorky A) měli spíše kulatější tvar, proto lze usuzovat, že se jedná spíše o plynové bubliny. U vzorků s parametrem kulatosti nad 3 se jedná o kombinovaný charakter, lze tedy mluvit o porezitě (kombinace plynových dutin a staženin). Dále z výsledků nelze jednoznačně stanovit přímý vliv druhu formy na tvar porezity. Při posuzování je však nutno brát v úvahu velký rozdíl mezi procentem porezity v jednotlivých vzorcích, neboť u vzorků s nízkým výskytem vad, je toto měření více nepřesné. Tabulka naměřených výsledků je v příloze 6.



Obr. 2.5.10 Vyhodnocení kulatosti pórů

Závěr

Pro stanovování podmínek pro výrobu rozměrných tenkostěnných odlitků z hliníkových slitin s dobrou kvalitou povrchu bylo odlito devět kusů vzorků (odlitků). Vzorky byly odlévány ze třech slitin, vždy každá slitina do třech typů formovací směsi – bentonitové, CT směsi a chromitové směsi.

Rentgenové snímky kritických míst v odlitcích neprokázaly žádné výrazné vady. Nejčastěji se jednalo o řediny, které byly rovnoměrně rozptýleny v celém průřezu odlitků. Nejvýraznější řediny se vyskytovali v materiálu AlSi10Mg odlitého do bentonitové směsi a jemnější řediny také vykazoval tentýž materiál při odlití do chromité směsi. Řediny se vyskytovaly pouze uvnitř materiálu, takže neměli vliv na výslednou kvalitu povrchu.

Kvalita povrchu odlitku byla jednoznačně nejlepší při použití CT směsi. Povrchy vzorků odlitých do této směsi jsou lesklé s nízkou drsností povrchu a minimálním výskytem vad. Kvalita povrchu při použití ostatních směsí byla závislá na použitém materiálu. Nebyl potvrzen předpoklad vzniku nejvyššího povrchu u vzorků odlévaných do chromitové směsi.

Hodnocení porezity povrchu bylo ovlivněno tvarovou složitostí odlitku a následnými problémy při výrobě jader. Přesto je z výsledků zřejmé, že nejvyšší počet vad vykazovaly odlitky z materiálu AlSi8Cu3. U ostatních slitin bylo procento porezity na povrchu nízké, avšak nebyl zaznamenán zřejmý vliv typu formovací směsi na povrchovou porezitu. Při vyhodnocení tvaru pórů vyšlo najevo, že se ve většině případů jednalo o kombinaci plynových dutin a staženin. Pouze u vzorků, které vykazovaly vyšší procento porezity se jednalo spíše o plynové dutiny.

Z výsledků vyplývá, že použití chromitové směsi s vyšší tepelnou akumulací neprokázalo předpokládané zvýšení kvality odlitků. Podle předpokladu však vykazovali dobré povrchy slitiny s obsahem křemíku blízkým k eutektickému složení. Další experimenty pro zlepšení jakosti povrchu odlitku by mohly být směřovány do zkoumání interakce taveniny s povrchem formy a jejími náterů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
2. ZALENSAS, DL. *Aluminium Casting technology*. 2nd ed. Des Plaines, Illinois: AFS, 1993. 423 p. ISBN 0-87433-157-9.
3. Prezentace a propagační materiály firmy CZ PLAST s.r.o., dostupné na www: <http://www.czplast.cz/> [cit. 2008-02-18].
4. *40th Census of World Casting Production*, Modern casting, December 2006.
5. Roční výkaz slévárenství za rok 2004. *Slévárenská ročenka 2006*. 1.vyd: Blansko: Reprocentrum, 2006. 176 s. ISBN 80-02-01780-3
6. BOLIBRUCHOVÁ, D., TILLOVÁ, E. *Zlívarenské Zlatiny Al-Si*. 1.vyd. Žilina: EDIS, 2005. 180 s. ISBN 80-8070-485-6.
7. SIGWORTH, G., KUHN, T. *Grain Regime of Aluminum Casting Alloys*. Illinois: AFS Transactions 2007, paper 07-067.
8. TAYLOR, J., GRAHAM, D. *Redistribution of Shrinkage Porosity in Eutectic Al-Si Alloy by Addition of Ti-B Grain Refiner*. Illinois: AFS Transactions 1999, page 189-196.
9. DINNIS, C.M., TAYLOR, J.A. *Porosity Formation and Eutectic Growth in Al-Si-Cu-Mg Alloys Containing Iron and Manganese*. Materials forum volume 28 – Published 2004.
10. DINNIS, C.M., OTTE, M.O. *The Influence of Strontium on Porosity Formation in Al-Si Alloys*. Metallurgical and Materials Transaction, November 2004.
11. ROOY, E.L. *Mechanism of porosity formation in aluminum*. Modern casting, September 1992.
12. ANSON, J.P., GRUZLESKI, J.M. *The Quantitative Discrimination between Shrinkage and Gas Microporosity in Cast Aluminum Alloys Using Spatial Data Analysis*. Material Characterization, Volume 43, November 1999.
13. MICHNA, S. aj. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd.. Prešov: Adin, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
14. Firemní materiály firmy Foseco. Dostupné na www: http://www.foseco-at-gifa.com/gifa/download/brochures_en/FDUbrochure.pdf [cit. 2008-03-02].

15. SHOWMAN, R.E. *Choosing the Best Ceramic Filter to Improve Aluminum Casting Properties*. Illinois: AFS Transactions 2007, paper 07-094.
16. LEV, P. *Filtrace taveniny pomocí keramických filtrů*. Dostupné na www: http://www.keramtech.cz/knihovna/filtrace_tavenin_pomoci_lisovanych_keramickych_filtru.pdf [cit. 2008-03-03].
17. Propagační materiály firmy Igor Lánik – Techservis Boskovice. Dostupné na www: <http://www.lanik.cz/principyfiltrace.php> [cit. 2008-03-05].
18. TOMOVIC, M. *Designing Thin Section*. Modern Casting, May 2003.
19. RUSÍN, K. *Interakce tekutého kovu se slévárenskou formou*. Přednášky z předmětu Formovací materiály a ekologie, 2006.
20. Firemní materiály firmy Unitherm, s.r.o. Dostupné na www: <http://www.unitherm.cz/> [cit. 2008-04-02].
21. Charakteristika chromitového ostříva. Katalogový list firmy Sandteam spol. s r.o. Dostupné na www: <http://www.sandteam.cz/chromit.html> [cit. 2008-04-22].
22. Data simulačního software PAM-QUICKCAST, se svolením společnosti MECAS ESI s.r.o. pobočka Brno.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
R _m	MPa	mez pevnosti v tahu
A	%	tažnost
HB	-	tvrdost
S	cm ³ .100g ⁻¹	rozpustnost plynu v tavenině
p _{H2}	kPa	parciální tlak vodíku v atmosféře
T	K	absolutní teplota
A,B,K	-	konstanty závislé na materiálu
θ	°	úhel smáčení
v	m.s ⁻¹	rychlost vyplování vměstků
ρ _{kovu}	kg.m ⁻³	hustota kovu
ρ _{plynu}	kg.m ⁻³	hustota plynu
η	kg.s ⁻¹ .m ⁻¹	dynamická viskozita
r	m	poloměr bubliny
g	m.s ⁻²	gravitační zrychlení
α	W.m ⁻² .K ⁻¹	součinitel přestupu tepla
F	m ²	plocha styku kovu a formy
a	m ⁻² .h ⁻¹	teplotní vodivost
c	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	měrné teplo
λ	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	tepelná vodivost
b _f	W.s ^{1/2} .K ⁻¹ .m ⁻¹	tepelná akumulace formy

Seznam příloh

Příloha 1	Rozbor chemického složení
Příloha 2	Grafy termické analýzy
Příloha 3	RTG snímky odlitků
Příloha 4	Povrchy odlitků
Příloha 5	Naskenované vzorky odlitků – porezita povrchu
Příloha 6	Tabulka naměřených hodnot analýzy kulatosti pórů

Příloha 1 – Rozbor chemického složení

AL-01	Al-Slitiny globalni program 12725/00					13/03/08 06:11			
Vzorek cis P01-101108					Jakost	EN-ALSi8Cu3			
Tavba cis. U-624					Jmeno	dd			
Prumer z 3 jiskreni									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
min	7.50		2.000	0.15	0.15				
X	9.43	0.548	3.314	0.20	0.38	0.570	0.03	0.029	0.053
max	9.50	0.800	3.500	0.65	0.55	1.200	0.35	0.050	0.250
	Sn	Ti	Ca	Na	Sr	Zr	Al		
min									
X	0.026	0.045	0.0011	0.0015	0.001	0.002	85.27		
max	0.150	0.250	0.0500	0.0500	0.050	0.050			

AL-01	Al-Slitiny globalni program 12725/00					13/03/08 06:14			
Vzorek cis P02-101108					Jakost	EN-ALSi10Mn			
Tavba cis. 25-2-68					Jmeno	dd			
Prumer z 3 jiskreni									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
min	9.00				0.20				
X	10.87	0.305	0.038	0.14	0.33	0.031	0.01	0.005	<0.002
max	11.00	0.550	0.050	0.45	0.45	0.100	0.05	0.050	0.050
	Sn	Ti	Ca	Na	Sr	Zr	Al		
min									
X	<0.005	0.040	0.0020	0.0022	<0.001	<0.001	88.23		
max	0.050	0.150	0.0500	0.0500	0.050	0.050			

AL-01	Al-Slitiny globalni program 12725/00					13/03/08 06:18			
Vzorek cis P03-101108					Jakost	EN-ALSi12Cu			
Tavba cis. 25-2-91					Jmeno	dd			
Prumer z 3 jiskreni									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
min	10.50			0.05					
X	11.62	0.515	0.771	0.25	0.29	0.383	0.01	0.018	0.028
max	13.50	0.800	1.000	0.55	0.35	0.550	0.30	0.100	0.200
	Sn	Ti	Ca	Na	Sr	Zr	Al		
min									
X	0.012	0.035	0.0016	0.0028	<0.001	0.002	86.05		
max	0.100	0.200	0.0050	0.0500	0.050	0.050			

Příloha 2 – Grafy termické analýzy

1. Termická analýza slitiny AlSi8Cu3 - A

UNITHERM, S.R.O.
CR-46604 JABLONEC

THERMO-ANALYSE

IDECO-SYSTEM

13.03.2008

T H E R M O - A N A L Y S E

DRUH : 226

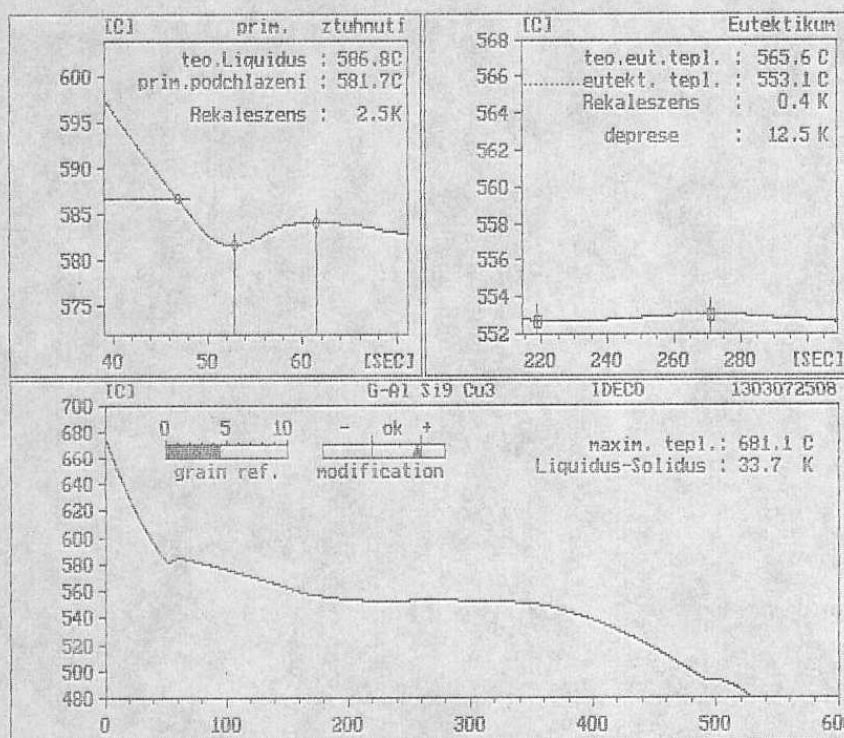
ZÁKAZNÍK :

SMĚNA : 1
PEC :

DATUM : 13.03.2008
ČAS : 07.25

226

G-AL Si9 Cu3



zpracování

VAC-TEST

analýza

A :

Liquidus : 586.8

V :

modification : 7.7

hi:

grain ref. : 4.5

2. Termická analýza slitiny AlSi10Mg - B

UNITHERM, S.R.O.
CR-46604 JABLONEC

THERMO-ANALYSE

IDECO-SYSTEM

13.03.2008

T H E R M O - A N A L Y S E

DRUH : 424331

ZÁKAZNÍK :

SMĚNA : 1

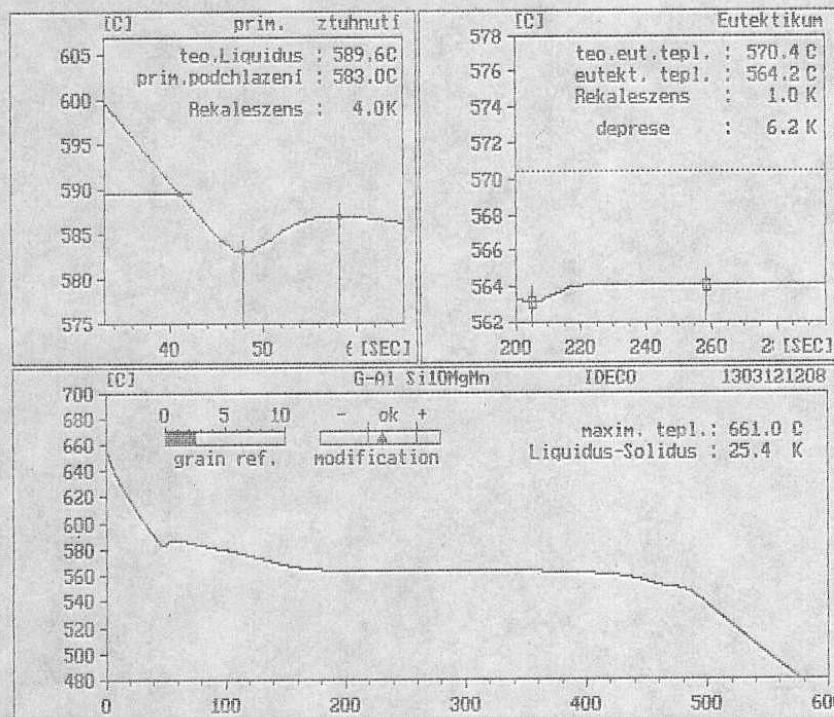
DATUM : 13.03.2008

PEC :

ČAS : 12.12

ČSN 42 4331

G-AL Si10MgMn



zpracování

VAC-TEST

analýza

A :

Liquidus : 589.6

V :

modification : 5.2

hi:

grain ref. : 2.5

3. Termická analýza slitiny AlSi12(Cu) - C

UNITHERM, S.R.O.
CR-46604 JABLONEC

THERMO-ANALYSE

IDECO-SYSTEM

13.03.2008

T H E R M O - A N A L Y S E

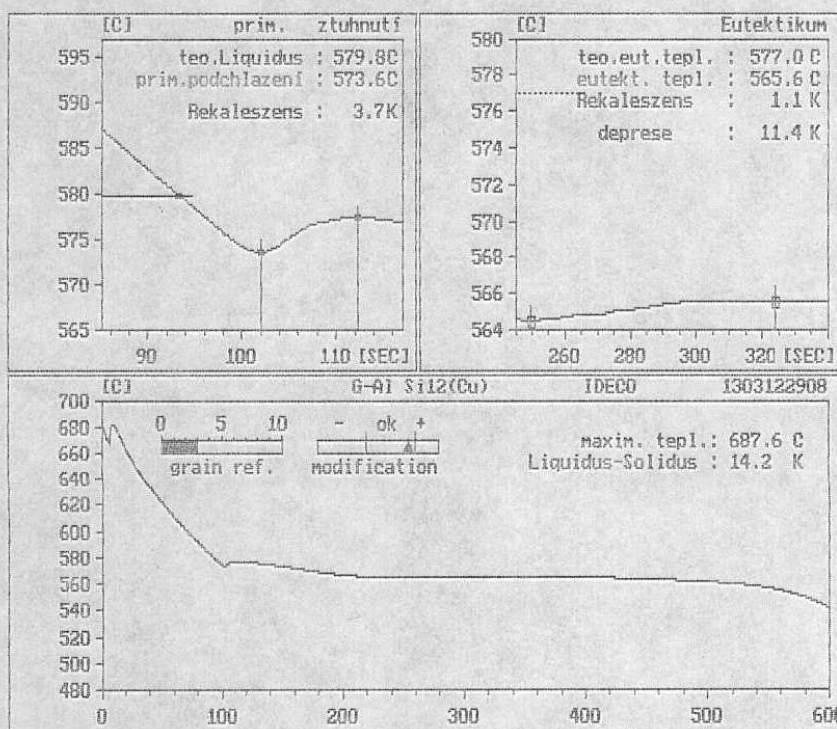
DRUH : 231

ZÁKAZNÍK :

SMĚNA : 1
PEC :DATUM : 13.03.2008
ČAS : 12.29

231

G-AL Si12(Cu)



zpracování

VAC-TEST

analýza

A :

Liquidus : 579.8

V :

modification : 7.5

hi:

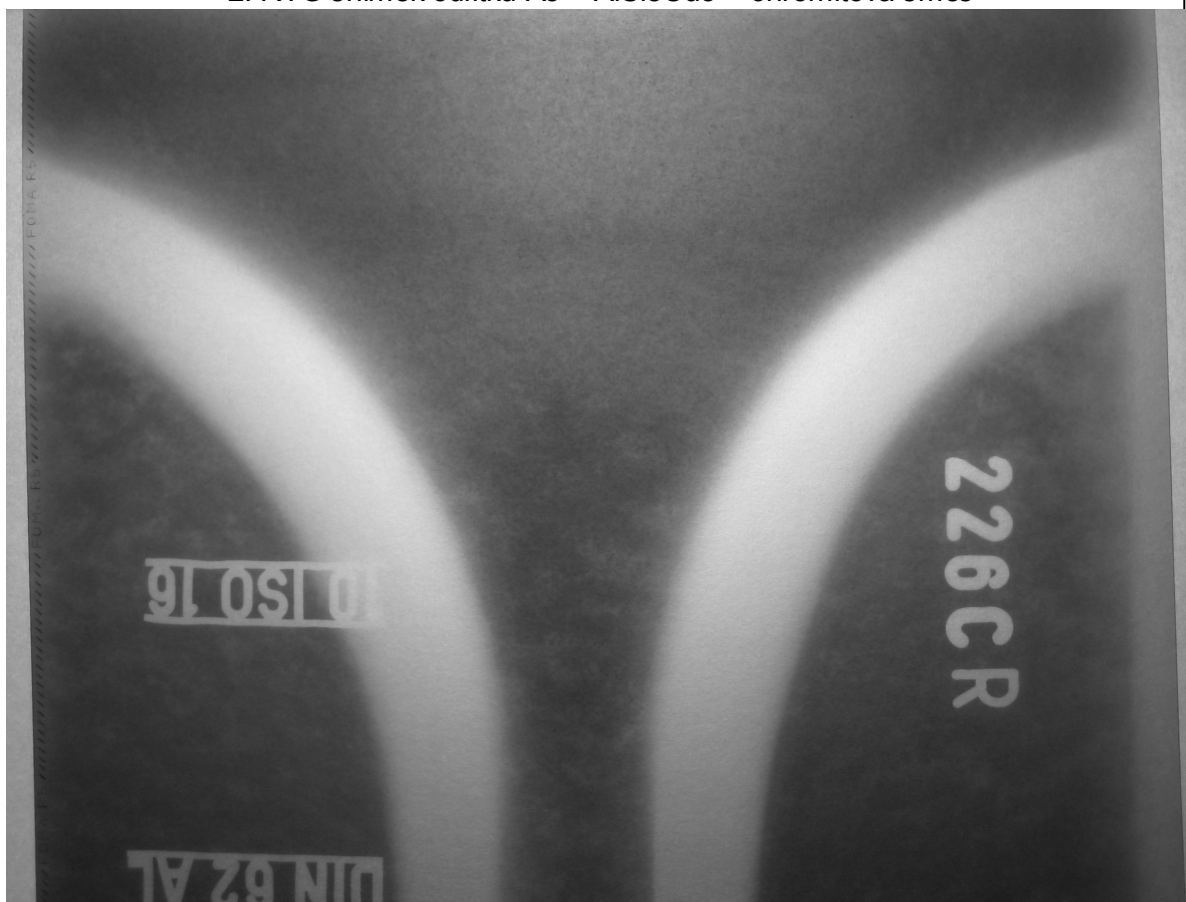
grain ref. : 3.0

Příloha 3 – RTG snímky odlitků

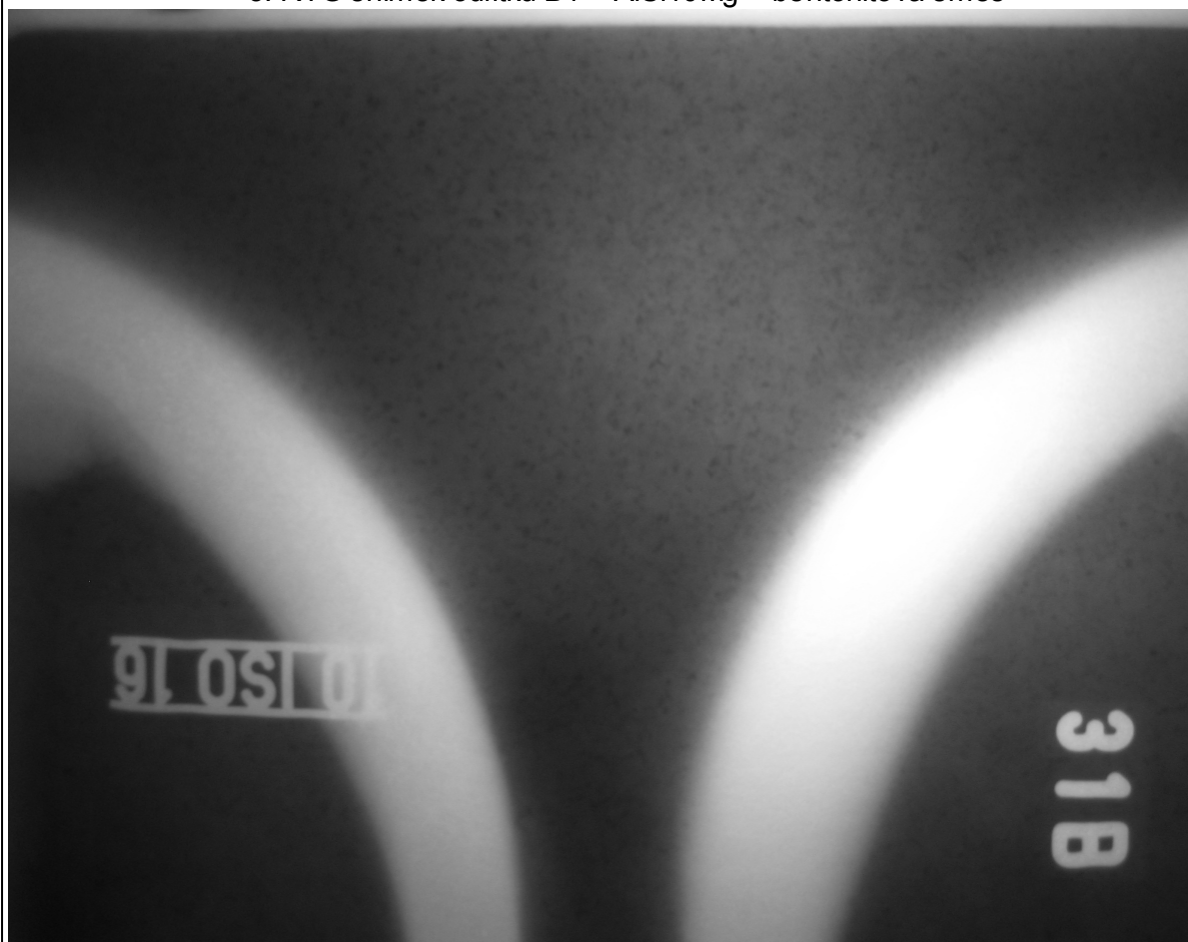
1. RTG snímek odlitku A1 – AlSi8Cu3 + bentonitová směs



2. RTG snímek odlitku A3 – AlSi8Cu3 + chromitová směs



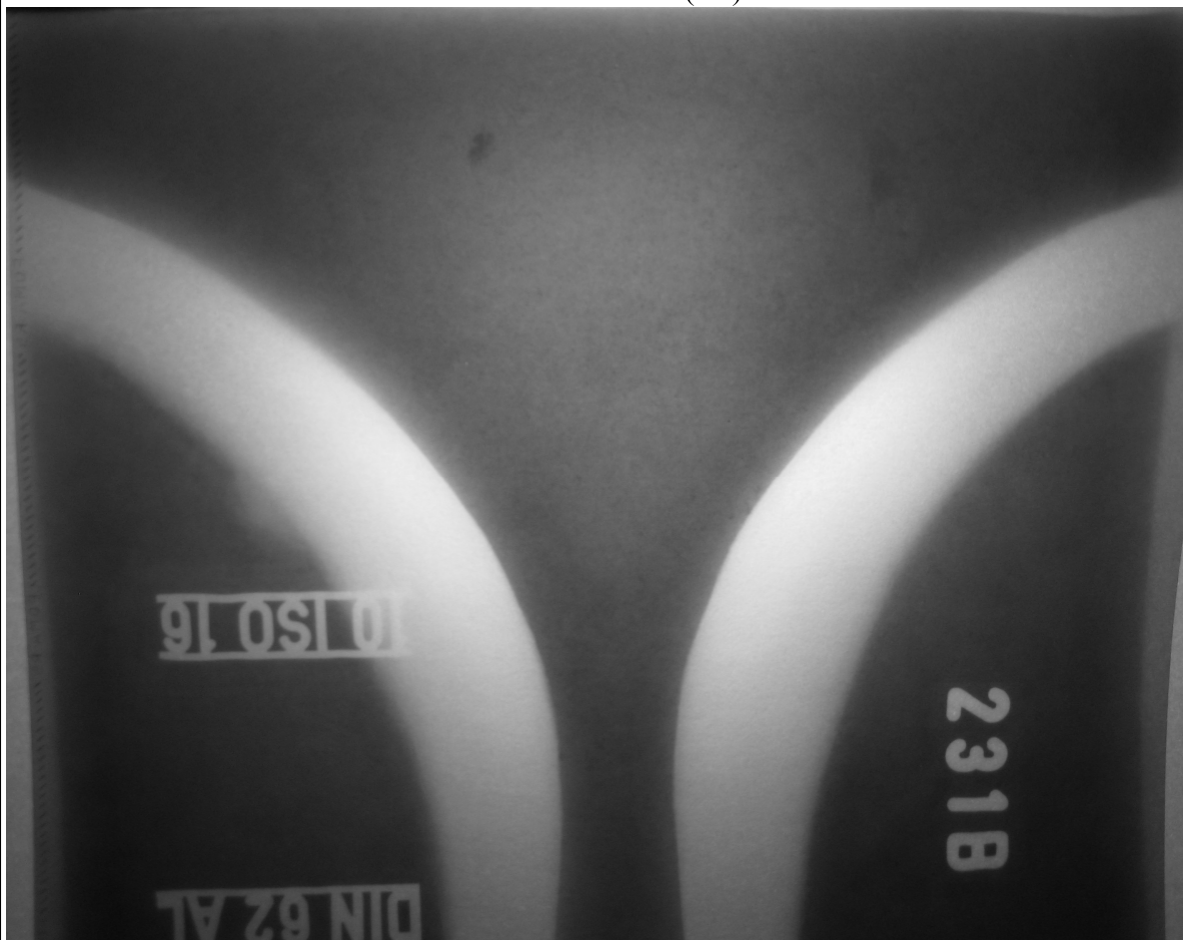
3. RTG snímek odlitku B1 – AlSi10Mg + bentonitová směs

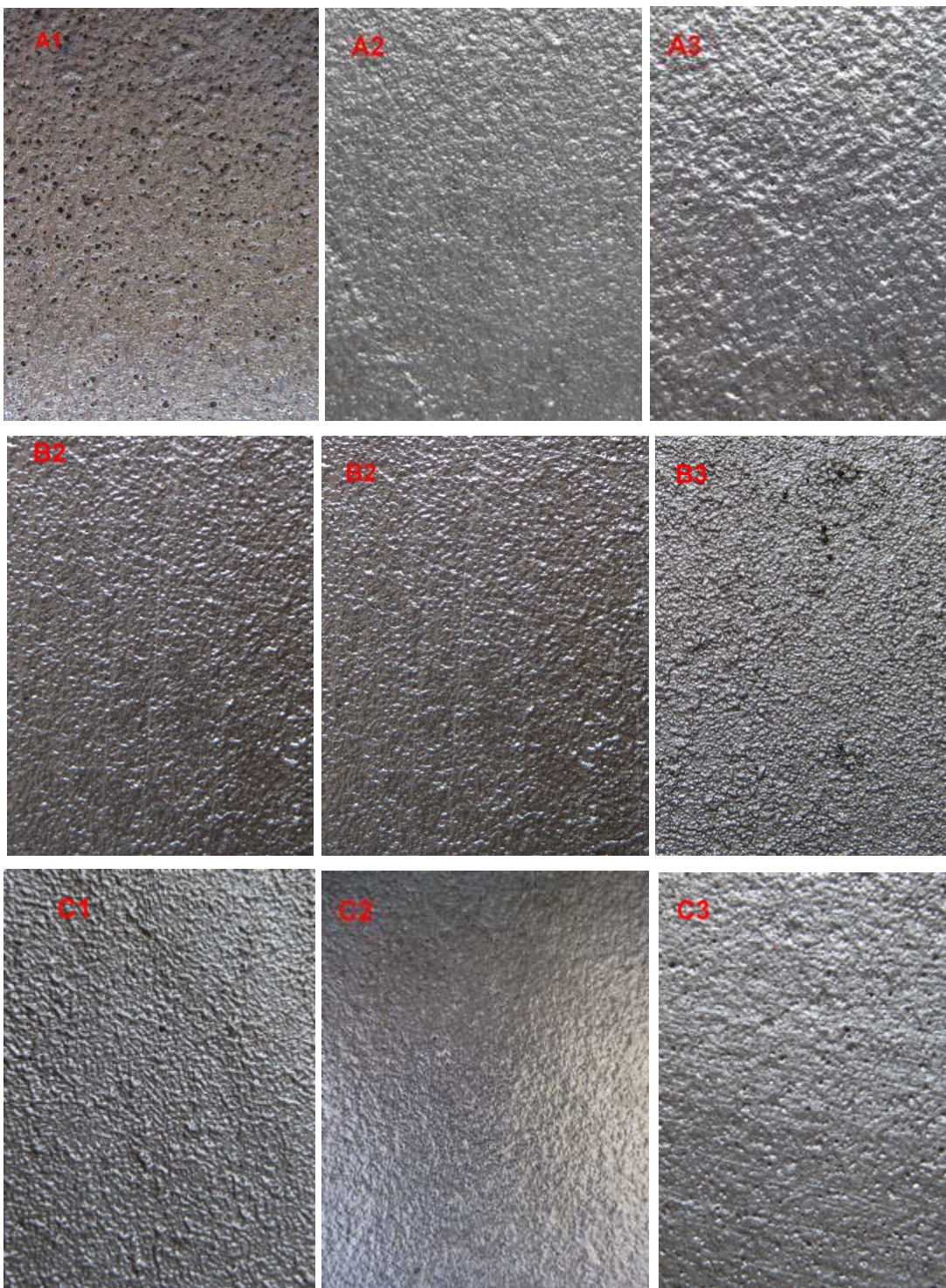


4. RTG snímek odlitku B3 – AlSi10Mg + chromitová směs

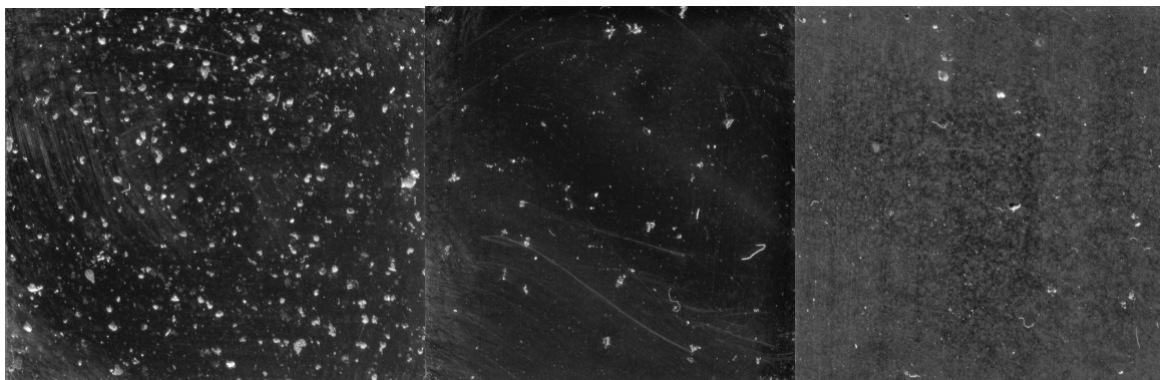


5. RTG snímek odlitku C1 – AlSi12(Cu) + bentonitová směs



Příloha 4 – Povrchy odlitků

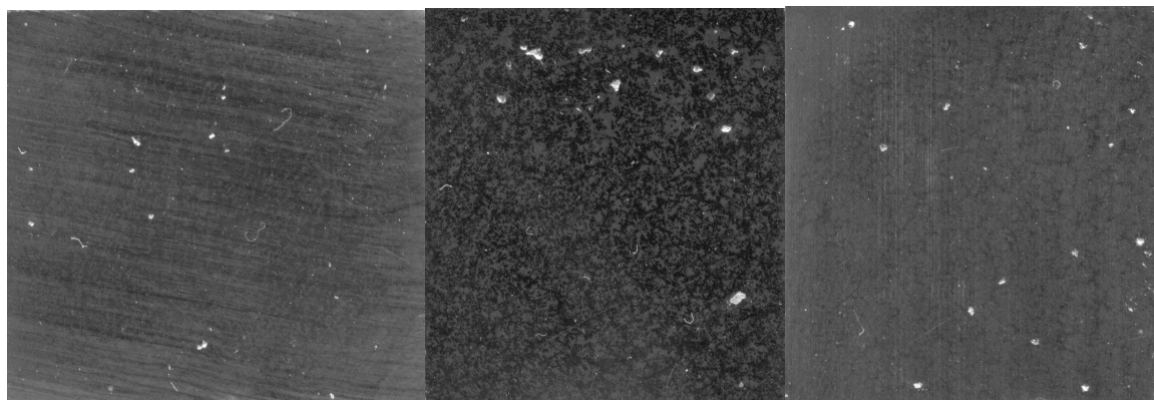
Značení vzorků: **A** – materiál AlSi8Cu3, **B** – materiál AlSi10Mg, **C** – materiál AlSi12(Cu)
1 – bentonitová směs, 2 – CT směs, 3 – chromitová směs

Příloha 5 – Naskenované vzorky – porezita povrchu

A1

A2

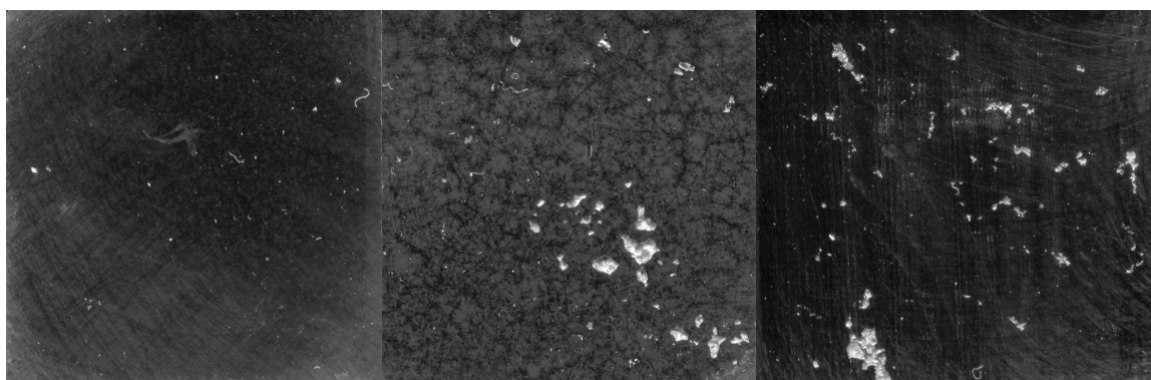
A3



B1

B2

B3



C1

C2

C3

Příloha 4 – Tabulka naměřených hodnot analýzy kulatosti pórů

číslo vzorku	max. průměr	střední průměr	min. průměr	tvarový faktor	poměr stran	prodloužení	ovalita	parametr kulatosti s
A1X	1082,21	88,21	10,14	0,38	1,82	2,01	0,36	2,63
A2X	1265,71	70,26	10,08	0,40	2,05	2,35	0,32	2,50
A3X	649,29	82,25	10,01	0,41	2,43	2,86	0,30	2,44
B1X	1488,35	79,32	10,01	0,32	1,94	2,22	0,31	3,13
B2X	302,34	43,05	10,01	0,37	1,99	2,29	0,35	2,70
B3X	581,00	104,04	10,14	0,30	1,91	2,14	0,34	3,33
C1X	462,67	4,86	10,01	0,26	1,96	2,25	0,35	3,85
C2X	381,64	55,38	10,18	0,30	1,87	2,17	0,34	3,33
C3X	328,10	46,52	10,19	0,30	2,68	3,67	0,38	3,33