UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

Vysoké učení technické v Brně **Fakulta strojního inženýrství**

Doc.Ing. Jaromír Roučka, CSc

Metalurgie neželezných slitin

2004

Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno

1 NEŽELEZNÉ KOVY

Pod pojmem neželezné kovy se v technické praxi obvykle rozumí všechny kovy a slitiny, u nichž je základním prvkem jiný kov, než železo. Protože v periodické soustavě je celkem 55 kovových prvků, včetně polovodičů, je zřejmé, že se jedná o velmi širokou a různorodou kategorii materiálů.

V historii používání jednotlivých kovů záviselo nejen na jejich vlastnostech, ale zejména na schopnosti dané společnosti, tyto kovy získat a vyrobit. Proto dějiny hutnictví začínají asi 3000 let př. n.l. dobou bronzovou a teprve mnohem později, ve střední Evropě asi v 7.-8. století př.n.l., přišla doba železná. Stejně tak používání hliníku bylo závislé na technických možnostech tento kov vyrobit a proto se prosadilo až v době poměrně nedávné, na počátku 20. století n.l. Ještě později byla technicky zvládnuta výroba hořčíku, titanu a dalších kovů.

Význam jednotlivých kovů nelze hodnotit jenom objemem jejich výroby nebo cenou, ale také specifickými vlastnostmi, kterými disponují a které často nelze jinými prostředky dosáhnout. Pro aplikace ve strojírenství se používají čisté kovy jen velmi zřídka, neboť mívají špatné mechanické i technologické vlastnosti. Téměř vždy se jedná o slitiny z dvou nebo více prvků. Slitiny mají lepší mechanické a technologické vlastnosti než čisté kovy a vhodnou kombinací prvků lze získat slitiny s velmi rozdílnými vlastnostmi. Některé z nich mají naprosto jedinečné vlastnosti a objem jejich výroby je proto jen velmi malý. Technický význam má však pouze malá část kovových prvků.

Způsoby metalurgického zpracování některých kovů a jejich slitin se budeme v dalších kapitolách podrobněji zabývat.

1.1 Rozdělení slitin neželezných kovů

Neželezné kovy a jejich slitiny se třídí podle různých hledisek, nejčastěji podle základního prvku, dále podle způsobu zpracování, podle hustoty, tavicí teploty, podle chemické reaktivnosti nebo dalších kriterií.

Druhy slitin se rozlišují zejména **podle základního prvku**. Bývá to prvek, jehož obsah ve slitině je nejvyšší, obvykle více než 50 %. Podle něho pak hovoříme např. o slitinách hliníku, hořčíku, slitinách mědi apod.

Podle technologie, která se bude pro zpracování slitin používat, se slitiny neželezných kovů rozdělují na slitiny slévárenské a slitiny pro tváření.

Slitiny pro tváření mají obvykle nižší obsah přísadových prvků. Při teplotách tváření často obsahují pouze homogenní tuhý roztok základního prvku a mají proto dobré plastické vlastnosti. Podle teplot tváření se tyto slitiny dělí na slitiny pro tváření za studena a slitiny pro tváření za tepla.

Slévárenské slitiny mívají zpravidla vyšší obsah přísadových prvků, než slitiny pro tváření. Tyto slitiny mají větší pevnost a tvrdost, obvykle však nižší plastické vlastnosti. Chemické složení musí být takové, aby slitina kromě požadovaných užitných vlastností měla i dobré vlastnosti slévárenské. Za normální teploty mívají slévárenské slitiny většinou heterogenní strukturu.

Podle hustoty se slitiny dělí na slitiny lehkých neželezných kovů a slitiny těžkých neželezných kovů. Jako rozmezí mezi oběma skupinami se přibližně udává hustota 4500 $kg.m^{-3}$. Do skupiny lehkých slévárenských slitin patří především slitiny hliníku a hořčíku, lze

sem zařadit i slitiny titanu. Do skupiny těžkých slitin pak patří především slitiny mědi, niklu, kobaltu, zinku, olova, cínu a dalších kovů.

Podle tavicí teploty se kovy a jejich slitiny obvykle dělí na:
- nízkotavitelné s tavicí teplotou asi do 600 ^{o}C – např. cín, vizmut, kadmium, olovo, zinek
- se střední tavicí teplotou do asi 1500 ^{o}C – např. hořčík, hliník, měď, nikl, kobalt
- s vysokou tavicí teplotou – např. titan, chrom, vanad, niob, molybden a další

Do samostatných skupin se obvykle zařazují ušlechtilé kovy – zejména stříbro, zlato, platina, rhodium, dále tzv. kovy vzácných zemin, kovy radioaktivní a polovodiče.

Podle objemu výroby odlitků z neželezných slitin jsou zdaleka nejpoužívanější slitiny hliníku. Jejich podíl představuje více než 90% hmotnosti všech odlitků z neželezných slitin. Důvodem je výhodný poměr mezi hmotností a mechanickými vlastnostmi, příznivá cena, poměrně snadná technologie výroby a dobré technologické vlastnosti.

Technicky velmi významnou skupinou jsou odlitky z hořčíkových slitin. Jejich produkce se v současné době velmi prudce zvyšuje. Důvodem jejich používání je zejména nízká hmotnost při mechanických vlastnostech, přibližně srovnatelných se slitinami hliníku.

Dalšími významnými materiálovými skupinami jsou slitiny mědi a slitiny zinku, v ČR každý s podílem asi 3 % hmotnosti všech odlitků z neželezných slitin. Technicky velmi významné jsou slitiny niklu s výbornými mechanickými vlastnostmi za vysokých teplot a odolností proti korozi. Používají se zejména v leteckém a automobilovém průmyslu, například pro součásti motorů, dmychadel a spalovacích turbin.

Technicky velmi progresivním materiálem jsou slitiny titanu, které díky svým mimořádným mechanickým vlastnostem za normálních i za vysokých teplot a díky poměrně nízké hustotě, nacházejí uplatnění zvláště v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu.

1.2 Způsob značení slitin neželezných kovů

Slitiny se označují číselně nebo chemickými značkami.

Číselné značení je určeno příslušnými evropskými, národními, podnikovými nebo jinými normami. Z číselného značení obvykle nevyplývá chemické složení slitiny.

Značení chemickými značkami uvádí střední obsah hlavních prvků v procentech. Na první pozici je značka základního prvku, na dalších místech značky přísadových prvků v pořadí jejich obsahu. Číslice za značkou prvku značí jeho střední obsah ve slitině. Při obsahu prvku nižším než 1 % se obvykle množství prvku neuvádí.

Například:
- CuAl9Mn2 označuje hliníkový bronz s obsahem 9% hliníku a 2% manganu
- AlSi10Mg je silumin s 10% křemíku a méně než 1% hořčíku

Materiálové normy obvykle připouští značení slitin oběma způsoby. U některých slitin se někdy používá i jiný způsob značení (např. u mosazí).

Při značení čistých kovů se k chemické značce kovu připojuje číslice, označující obsah základního kovu v procentech. Zbytek tvoří nečistoty. U velmi čistých kovů se zavedlo označení podle počtu devítek v obsahu tohoto prvku. Např. ve slitině s čistotou Al5N číslice před písmenem N značí počet devítek v procentuelním obsahu základního prvku, v tomto případě 99,999% Al. Pak hovoříme o hliníku pětidevítkové čistoty.

0 HLINÍK A JEHO SLITINY

1.3 Historie používání hliníku a jeho slitin

Hliník je v přírodě jedním z nejrozšířenějších kovů. V zemské kůře je obsaženo asi 8 % hliníku, vázaného ve sloučeninách jako jsou bauxit, kryolit, korund, spinely, kaolin atd.

Základní surovinou pro výrobu hliníku je bauxit. Bauxit je hydratovaný oxid hlinitý, s obsahem oxidů železa, křemíku a titanu, v němž obsah Al_2O_3 bývá kolem 50%. Z bauxitu se hliník získává elektrolýzou roztoku oxidu hlinitého v roztavených fluoridech. Celý výrobní proces je poměrně složitý a sestává ze dvou zásadních etap:

- výroby oxidu hlinitého z hlinitanových rud – proces sestává z mletí, chemického zpracování hlinitanových rud loužením a následného žíhání na 1200-1300 ^oC.
- redukce oxidů na kovový hliník elektrolytickým způsobem z elektrolytu, kterým je roztavený kryolit (Na_3AlF_6) a v něm rozpuštěný oxid hlinitý (Al_2O_3), při teplotě 950-970 ^oC.

Výroba hliníku z primárních surovin je energeticky velmi náročná. K výrobě 1 t hliníku se spotřebuje asi 4 t bauxitu, cca 20 GJ tepelné energie a asi 14 MWh elektrické energie. Získaný hliník má vysokou čistotu až 99,9 %.

Historie používání hliníku a jeho slitin je, ve srovnání s ostatními neželeznými kovy, velmi krátká:

- Laboratorně hliník poprvé získal v roce 1825 Dán Christian Oersted chemickou redukcí draslíkem. Technicky významnější množství hliníku vyrobil, díky finanční podpoře císaře Napoleona III., Francouz Saint-Claire Deville a na pařížské světové výstavě předvedl hliníkovou tyč o hmotnosti 1 kg. Její cena tehdy byla 2000 franků.

- V roce 1886 patentovali, nezávisle na sobě, Paul T. Héroult ve Francii a Charles M. Hall v USA metodu elektrolytické výroby hliníku z bauxitu v lázni roztaveného kryolitu. V letech 1887-8 byly postaveny první hutě, které znamenaly začátek prudkého rozvoje průmyslové výroby hliníku. Elektrolytická metoda redukce hliníku z bauxitu se používá dosud.

- V roce 1897 byl použit hliníkový plech při stavbě vzducholodí.

- Od roku 1903 začaly pokusy s využitím hliníku v konstrukci motorů, zejména pro výrobu pístů.

- Do roku 1906 se datují snahy o výrobu slitin hliníku se zvýšenou pevností a tvrdostí tepelným zpracováním. Tak bylo objeveno tzv. vytvrzování, kterým se u slitiny AlCu4Mg podařilo dosáhnout tvrdosti až 110 HB.

- V roce 1921 objevil Pacz metodu zjemnění eutektika slitin Al-Si modifikací sodíkem. To vedlo k výraznému zlepšení mechanických vlastností, zvláště zvýšení tažnosti.

- Velký rozvoj ve výrobě a používání hliníkových slitin přinesly obě světové války, kdy se začaly hliníkové slitiny masivně používat při stavbě letadel.

- Ve 20. a 30. letech se začala věnovat pozornost rovněž recyklaci hliníkových slitin a v souvislosti s tím byly vyvinuty slitiny typu AlSiCu, později označované jako slitiny druhého tavení.

K prudkému nárůstu výroby hliníkových odlitků došlo po 2. světové válce rozšířením technologie odlévání do kovových forem, a to zvláště tlakovým litím. V současné době se tlakovým litím vyrábí přibližně 50 % z celkové tonáže hliníkových odlitků, gravitačním a nízkotlakým litím dohromady rovněž asi 50 %. Podíl hliníkových odlitků, litých do pískových

forem je poměrně malý (kolem 5 %). Rozhodujícím odběratelem tlakově litých odlitků je automobilový průmysl. Hliníkové odlitky v osobních automobilech tvoří asi 10 % z celkové hmotnosti automobilu a jejich podíl se stále zvyšuje. Dalšími významnými odběrateli hliníkových odlitků jsou zvláště elektrotechnický a spotřební průmysl.

1.4 Vlastnosti hliníku

Fyzikální vlastnosti hliníku

hustota	2700 $kg.m^{-3}$
teplota tání	660 ^oC
teplota vypařování	2520 ^oC
krystalická mřížka	kubická plošně centrovaná
mřížková konstanta	$a = 4{,}05.10^{-10}$ m
atomové číslo	13
atomová hmotnost	26,98

Významnými fyzikálními vlastnostmi hliníku jsou vysoká tepelná a také elektrická vodivost. Tepelná vodivost čistého hliníku při teplotě 20^{o}C dosahuje 235 $W.m^{-1}.K^{-1}$.
Součinitel elektrické vodivosti hliníku s čistotou 99,99% je při normální teplotě $2{,}6.10^{-8}$ Ω.m, to je asi 60% elektrické vodivosti mědi. Vlivem přísadových prvků se však výrazně snižuje.
Součinitel tepelné roztažnosti za normální teploty je přibližně 23.10^{-6} K^{-1}.

Chemické vlastnosti - hliník tvoří s kyslíkem velmi stabilní oxid Al_2O_3. Tloušťka oxidické vrstvy na povrchu součástí má za normální teploty tloušťku asi do 10 nm. Oxidická vrstva brání hloubkové oxidaci a zajišťuje velmi dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům. Chemická odolnost ve vodných roztocích velmi závisí na pH elektrolytu. V rozmezí pH 4,5-8,5 je chemická odolnost hliníku výborná, v zásaditém prostředí jen omezená.

Obsahuje-li slitina hořčík v množství již několika setin procenta, je oxidická vrstva tvořena spinely Al_2O_3.MgO a ochranný účinek vrstvy se snižuje. Hliník a řada jeho slitin se používá v potravinářském průmyslu. Slitiny pro potravinářství však nesmí obsahovat měď.

Mechanické vlastnosti čistého hliníku jsou špatné - pevnost v tahu pod 100 MPa, tvrdost 20-30 HB. Plastické vlastnosti jsou velmi dobré (jako u všech kovů s kubickou plošně centrovanou mřížkou), s tažností nad 20 %. Jako konstrukční materiál je čistý hliník prakticky nepoužitelný. Legováním se mechanické vlastnosti výrazně zvyšují.

Ze slévárenského hlediska je významná poměrně vysoká měrná tepelná kapacita hliníku přibližně 0,9 $kJ.kg.K^{-1}$ a vysoké skupenské teplo tání 396 $kJ.kg^{-1}$. Jejich důsledkem je vysoká energetická náročnost na roztavení hliníkových slitin.

1.5 Slévárenské slitiny hliníku

Vlastnosti čistého hliníku jsou pro konstrukční účely nevyhovující. Proto se pro výrobu odlitků zásadně používají slitiny hliníku. Přísadové prvky zvyšují mechanické a zlepšují technologické vlastnosti. Výsledné vlastnosti slitin jsou dány množstvím a vzájemnou kombinací přísadových prvků.

1.5.1 Chemické složení slitin hliníku

Slitiny obsahují:
- základní prvek
- hlavní přísadový prvek
- vedlejší přísadové prvky
- doprovodné prvky

Základní prvek určuje druh slitiny – v tomto případě je základním prvkem hliník.

Hlavní přísadové prvky jsou takové prvky, které jsou pro určení vlastností slitiny rozhodující. Hlavní přísadové prvky spolu se základními prvky vymezují typ slitiny. Jejich obsah obvykle bývá po základním prvku druhý nejvyšší. Hlavními přísadovými prvky ve slévárenských slitinách hliníku jsou křemík, měď a hořčík, spíše výjimečně také zinek nebo mangan. Podle nich se slitiny hliníku dělí na základní typy s obvyklými názvy:

- slitiny Al – Si - siluminy
- slitiny Al – Cu - duralaluminium
- slitiny Al – Mg - hydronalium

Vedlejší přísadové prvky jsou takové chemické elementy, které příznivě ovlivňují některé vlastnosti daného typu slitiny – např. zvyšují mechanické vlastnosti, zlepšují obrobitelnost, ovlivňují strukturu kovu, jsou důležité z hlediska tepelného zpracování, nebo kompenzují nepříznivý účinek některých doprovodných prvků. Obsah vedlejších přísadových prvkú je obvykle nižší, než obsah hlavního přísadového prvku. Vedlejších prvků může být ve slitině současně několik. Prvek, který nejvýznamněji ovlivňuje slitiny určitého typu, rozděluje slitiny do skupin, např. u siluminů to mohou být skupiny Al-Si-Cu, Al-Si-Mg apod.

Jako **doprovodné prvky** se označují takové prvky, které nebyly do slitiny přidávány záměrně. Při překročení určité koncentrace obvykle zhoršují mechanické, chemické nebo technologické vlastnosti slitiny a jsou pak považovány za nečistoty. Působí tak, že buď nepříznivě ovlivňují vlastnosti základního kovu, v němž jsou rozpuštěny, nebo tvoří vlastní fáze, které mají negativní vliv na vlastnosti slitiny. Obsah doprovodných prvků bývá limitován jejich maximálně přípustným obsahem.

Zdrojem doprovodných prvků jsou zejména vsázkové suroviny, nebo se do slitiny dostávají v průběhu tavení z vyzdívky, z použitých tavicích přípravků nebo nářadí. Velkým zdrojem nečistot bývá zejména přetavovaný šrot. Významným problémem u mnoha doprovodných prvků je obtížný způsob jejich odstranění ze slitiny. Často je v podmínkách sléváren vůbec odstranit nelze a snížit jejich obsah na přípustnou mez je možné pouze ředěním pomocí čistých surovin.

Do některých slitin se záměrně přidávají i takové prvky, které se u jiných slitin považují za nečistotu. Například měď v siluminu zvyšuje pevnostní vlastnosti a zlepšuje obrobitelnost. Proto se pro tyto účely používá jako přísadový prvek. Na druhé straně však měď zhoršuje odolnost proti korozi a je nepřípustná ve slitinách pro potravinářské účely. Podobně železo, které má velmi negativní účinky na mechanické vlastnosti siluminů, má příznivý vliv na snižování sklonu k nalepování odlitku na kovové formy. Proto se do slitin pro tlakové lití železo záměrně přidává.

Podle počtu přísadových prvků (tedy kromě prvků doprovodných) se slitiny rozdělují na:

binární - obsahují pouze základní a hlavní přísadový prvek
ternární – kromě základního a hlavního prvku obsahují jeden vedlejší přísadový prvek
vícesložkové – obsahují několik vedlejších přísadových prvků

1.5.2 Vlastnosti slitin

Volba chemického složení hliníkových slitin vychází z komplexního posouzení nároků na užitné vlastnosti i způsob výroby odlitků. Rozhodující při výběru vhodné slitiny bývají zejména tyto parametry:

- technologické vlastnosti
- mechanické vlastnosti
- možnost tepelného zpracování

Technologickými vlastnostmi jsou takové vlastnosti slitin, které souvisí se způsobem výroby součástí. Nejdůležitějšími technologickými vlastnostmi jsou slévárenské vlastnosti, obrobitelnost, odolnost proti korozi, svařitelnost, těsnost, někdy rovněž speciální vlastnosti, jako např. leštitelnost, možnost povrchové úpravy a pod.

1.5.2.1 Slévárenské vlastnosti

Pod pojmem **slévárenské vlastnosti** se rozumí takové vlastnosti, které souvisí s procesem odlévání. Jsou to především:

- zabíhavost slitiny
- sklon ke vzniku soustředěných staženin nebo ředin
- sklon k naplynění taveniny a ke vzniku plynových dutin v odlitcích
- sklon ke vzniku trhlin

Slévárenské vlastnosti úzce souvisí se šířkou intervalu tuhnutí dané slitiny. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, tj. s chemickým složením, které se blíží buď čistému kovu nebo ke složení eutektickému. Naopak slitiny se širokým intervalem tuhnutí mívají slévárenské vlastnosti špatné. Tyto slitiny mívají horší zabíhavost a zejména mají sklon ke vzniku rozptýlených staženin a mikrostaženin. Jejich nálitkování je málo účinné, nálitky mají krátkou dosazovací vzdálenost. Důsledkem je netěsnost odlitků.

Zabíhavost je technologická vlastnost, která udává schopnost tekutého kovu zaplňovat dutinu formy. Při posuzování schopnosti odlévání slitiny je nutno rozlišovat mezi tekutostí a zabíhavostí. Tekutost je fyzikální vlastnost, která je charakterizována viskozitou tekutého kovu a se zabíhavostí souvisí pouze částečně. Zabíhavost je závislá na šířce intervalu tuhnutí dané slitiny. Slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, jako jsou eutektické slitiny, mají dobrou zabíhavost, naopak slitiny se širokým dvoufázovým pásmem mají zabíhavost špatnou. Přítomnost oxidických vměstků v tavenině zabíhavost výrazně snižuje. Na zabíhavosti se také uplatňuje vliv povrchového napětí, smáčivosti formy, modifikace taveniny apod. Zabíhavost, jako technologická vlastnost určuje, jak tenkostěnné odlitky je možno odlévat a jak přesně bude kov kopírovat dutinu formy.

Sklon ke vzniku staženin charakterizuje objemový úbytek kovu během tuhnutí a tendenci ke vzniku soustředěných (vnitřních nebo vnějších) staženin, nebo rozptýlených staženin a ředin. Slitiny se sklonem ke vzniku soustředěných staženin lze dobře nálitkovat, odlitky mají dobrou těsnost. Takto tuhnou zejména slitiny s chemickým složením blízkým složení eutektickému. Slitiny se širokým dvoufázovým intervalem mají naopak sklon ke vzniku rozptýlených staženin a obtížně se nálitkují. Takové odlitky mívají horší těsnost.

Sklon k naplynění je charakterizován rozpustností plynů v tekutém stavu. Některé prvky naplynění zvyšují, jiné naopak snižují. Úroveň naplynění taveniny rozhoduje o tvorbě plynových bublin v odlitku.

Odolnost proti vzniku trhlin a prasklin je schopnost odolávat napětí, které vzniká vlivem smršťování v oblasti teplot tuhnutí a během ochlazování. Tato vlastnost je velmi důležitá zvláště u odlitků s nerovnoměrnými tloušťkami stěn, tvarově složitých odlitků, odlitků s tuhou konstrukcí a v případech, kdy je smršťování brzděno tuhou formou.

1.5.2.2 Důležité technologické vlastnosti

Obrobitelnost je daná kombinací velikosti obráběcích sil, charakteru třísek, kvality obrobeného povrchu a životnosti ostří obráběcích nástrojů. U slitin hliníku je typickým prvkem, který zlepšuje obrobitelnost měď. Slitiny s mědí dávají krátkou třísku a hladký obrobený povrch. Obrobitelnost zhoršují zvláště tvrdé fáze, které vznikají jako intermetalické sloučeniny přísadových prvků nebo nečistot – typický je nepříznivý vliv železa.

Odolnost proti korozi indikuje schopnost odolávat chemickému působení plynných nebo kapalných prostředí. Elektrochemická koroze způsobuje povrchové nebo hloubkové reakce mezi některými fázemi slitiny a korozním mediem, eventuelně rozpouštění některých složek slitiny v korozním prostředí. Slitiny Al-Si mají poměrně dobrou odolnost proti korozi. Prvkem, který jejich korozní odolnost zhoršuje je zvláště měď. Výbornou odolnost proti korozi mají slitiny Al-Mg.

Svařitelnost je schopnost spojování různými technologiemi svařování a dosažitelnost pevnosti a kvality spojů.

Leštitelnost a možnost povrchových úprav charakterizuje schopnost povrchového zpracování odlitků. Velmi častou metodou zpracování povrchu je u slitin hliníku anodická oxidace.

Nepropustnost je schopnost bránit pronikání tlakového media – plynu nebo kapaliny skrze stěny odlitku. Těsnost odlitků souvisí zejména s výskytem mikrostaženin nebo prasklin. Rovněž přítomnost oxidických vměstků v kovu těsnost odlitků významně zhoršuje. Nepropustnost se zjišťuje tlakovými zkouškami.

1.5.2.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti slitin jsou závislé zejména na druhu a vlastnostech základní kovové hmoty, na disperzitě strukturních složek, na přítomnosti a tvaru intermetalických fází a na tepelném zpracování. **Jemnozrnná struktura jednoznačně zlepšuje všechny mechanické a také řadu technologických vlastností slitin.** Citlivost vlastností hliníkových slitin na rychlost tuhnutí je velmi vysoká, proto se **při jejich odlévání preferují takové metody, které zajišťují vysokou rychlost ochlazování při tuhnutí.**

Z mechanických vlastností se obvykle sleduje zejména pevnost v tahu při normální teplotě, mez kluzu (mez $R_{p0,2}$), tažnost a tvrdost. V některých případech jsou důležité vlastnosti za zvýšených teplot, únavové vlastnosti nebo rozměrová stabilita. Protože na mechanické vlastnosti má velký vliv rychlost chladnutí, musí se hodnotit na vzorcích, tuhnoucích za srovnatelných podmínek, jako odlitek (tj. v pískové nebo kovové formě). Pevnostní vlastnosti i tvrdost jsou při lití do kovových forem oproti lití do písku vyšší o 20 i více procent, při tlakovém lití je tento rozdíl ještě větší.

Mez pevnosti běžných hliníkových slitin se v litém stavu (podle slitiny, způsobu lití a tloušťky stěny) pohybuje v rozmezí asi 150-250 MPa. Pevnostní vlastnosti se velmi podstatně zvyšují vytvrzováním. Vytvrditelné slitiny obsahují obvykle hořčík nebo měď a jedná se o slitiny typu Al-Si-Mg, Al-Si-Cu nebo Al-Cu. Vytvrzením se zvyšuje mez pevnosti R_m a tvrdost oproti litému stavu o 30 až 50 %, mez $R_{p0,2}$ se zvyšuje až o 80 %. Po vytvrzení lze u slitin Al-Si-Mg dosáhnout pevnosti až kolem 330 MPa.

Mezi vysokopevné slitiny patří zejména slitiny typu Al-Cu. Tyto slitiny dosahují po vytvrzení meze pevnosti v tahu až 350 MPa při vysoké tažnosti. Nevýhodou těchto slitin však jsou velmi nepříznivé slévárenské vlastnosti a z tohoto důvodu se používají jen zřídka.

Tažnost běžných hliníkových slitin je řádu 1-4 %. Značného zvýšení tažnosti slitin Al-Si lze dosáhnout modifikací eutektika. Pevnostní vlastnosti se modifikací zvyšují jen poměrně málo – maximálně asi o 50 %, ale tažnost roste až o 200 %.

Tvrdost slitin typu Al-Si v litém stavu se pohybuje obvykle v rozmezí 60-80 HB. Vytvrzováním lze dosáhnout zvýšení tvrdosti na hodnoty kolem 100 HB. Tvrdost slitin Al-Mg je nižší, obvykle kolem 50 HB.

Za zvýšených teplot se mechanické vlastnosti poměrně rychle snižují. U slitin typu Al-Si a Al-Si-Mg dochází k výraznějšímu poklesu již při teplotách nad asi 200 ^{o}C. Vytvrzené slitiny za těchto teplot svoje vlastnosti rychle ztrácejí a pod působícím napětím dochází k tečení. Teplotní stabilita slitin Al-Si se zvyšuje přísadou mědi, niklu, případně kobaltu nebo dalších stopových prvků. Slitiny Al-Cu si udržují stabilitu vlastností do asi 250 ^{o}C. Za nejvyšší možnou provozní teplotu se u hliníkových slitin považuje 350 ^{o}C.

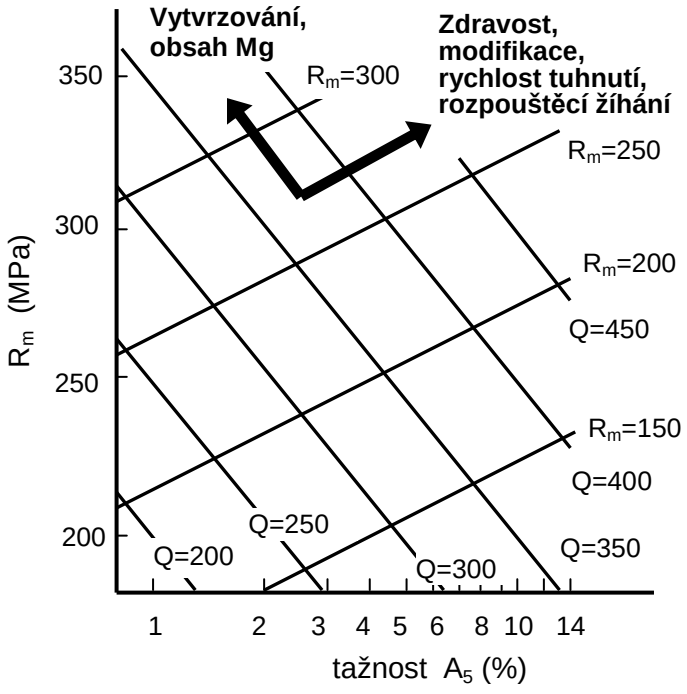
Vlastnosti za nízkých teplot se díky plošně centrované kubické mřížce hliníku téměř nemění. S poklesem teplot pevnost dokonce mírně vzrůstá, tažnost zůstává prakticky stejná. Proto jsou všechny typy hliníkových slitin vhodné pro použití pro použití za nízkých i kryogenních teplot.

Index kvality

Mechanické vlastnosti se někdy komplexně hodnotí pomocí tzv. indexu kvality. Index kvality se určuje z pevnosti v tahu a tažnosti slitiny a je definován vztahem.

$$\mathbf{Q = R_m + k \,.\, \log A_5 \quad (MPa)}$$

kde: k – je koeficient, platný pro danou slitinu, např. pro vysokopevnou slitinu AlSi7Mg se používá hodnota k = 150.



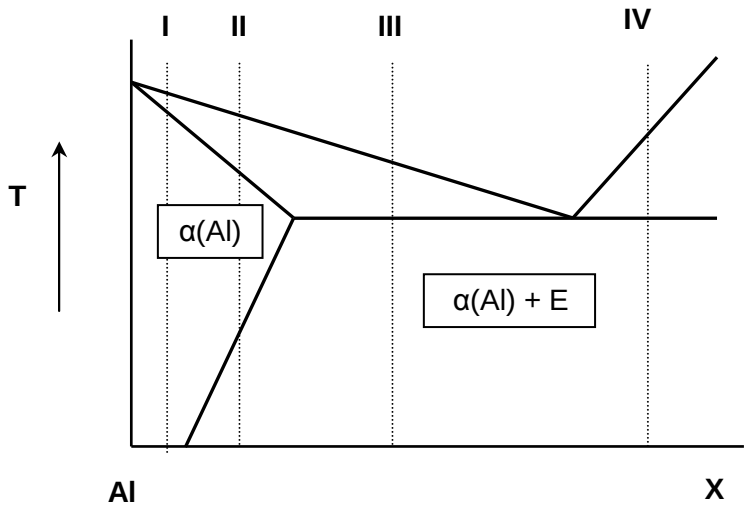
Podle tohoto indexu např. slitina s pevností R_m=290 MPa a tažností A_5=5,5 % má index kvality Q=400, stejně tak, jako slitina s pevností R_m=265 MPa a tažností A_5=8 %. Mechanické vlastnosti různých slitin nebo po různém metalurgickém zpracování se porovnávají polohou indexu kvality v diagramu obr. 1. Odlitky s vysokou rychlostí chladnutí (tenkostěnné, lité do kovových forem) mají výrazně vyšší index kvality než odlitky tuhnoucí pomalu (silnostěnné, lité do pískových forem).

Obr. 1: Index kvality pro slitinu AlSi7Mg

1 KRYSTALIZACE SLITIN HLINÍKU

1.6 Strukturní složky ve slitinách hliníku

Struktura slitin je určena tvarem rovnovážných diagramů hliníku s příslušnými přísadovými prvky. V oblasti obvyklých koncentrací tvoří hliník s přísadovými prvky podobné rovnovážné diagramy s omezenou rozpustností přísadového prvku v hliníku a se vznikem eutektika – obr.2. Ve slitinách hliníku bývají přítomny následující strukturní složky:



Obr.2: Obecný tvar rovnovážných diagramů hliníku

Homogenní tuhý roztok hliníku, označuje jako α(Al). Jde o substituční tuhý roztok, v němž atomy přísadového prvku nahrazují v kubické plošně centrované mřížce hliníku jeden nebo více atomů Al. Přísadové prvky mají jinou velikost atomů než hliník, proto způsobují deformaci původní mřížky. To má za následek nárůst pevnosti slitiny, současně však snížení plastických vlastností. Rozpustnost přísadových prvků v hliníku je nejvyšší při eutektické teplotě a při ochlazování se snižuje. V důsledku snižování rozpustnosti se může během ochlazování vylučovat fáze přísadového prvku. Snižování rozpustnosti přísadových prvků při chladnutí ztuhlého kovu je vlastností, která umožňuje provádět nejdůležitější způsob tepelného zpracování hliníkových slitin - tzv. vytvrzování. Vytvrzujícím prvkem může být jak hlavní, tak vedlejší přísadový prvek. Podle schopnosti vytvrzování se slévárenské slitiny hliníku dělí na:

- vytvrditelné
- nevytvrditelné

Eutektikum je tvořeno fází α(Al) a čistým přísadovým prvkem, nebo jeho sloučeninou (intermetalickou fází). Vzniká u slitin, u nichž množství některého z přísadových prvků je vyšší, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti v α(Al) při teplotě tuhnutí. Tuto podmínku splňují všechny slévárenské slitiny Al-Si, neboť jejich obsah křemíku je vždy vyšší, než hodnota maximální rozpustnosti křemíku v hliníku 1,65 %Si. U jiných typů slitin hliníku (Al-Cu, Al-Mg) bývá obsah přísadového prvku nižší, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti. Přesto zde může vznikat eutektikum v důsledku segregace tohoto prvku během tuhnutí. Množství eutektika a jeho morfologie rozhoduje o mechanických i slévárenských vlastnostech slitiny.

Primární fáze přísadového prvku - při vyšším obsahu přísadového prvku, než odpovídá eutektickému složení začíná tuhnutí vylučováním primární fáze přísadového prvku. Po dosažení eutektické teploty tuhnutí pokračuje krystalizací eutektika. Tato fáze se vyskytuje prakticky pouze u nadeutektických slitin Al-Si.

Intermetalické fáze jsou strukturní složky s vlastní krystalickou strukturou. Jedná se o chemické sloučeniny, které vznikají z přítomných přísadových a doprovodných prvků, když jejich obsah přesáhne jejich rozpustnost v základním kovu. Intermetalické fáze vznikají v různých etapách krystalizace a to:

- krystalizací z taveniny během tuhnutí slitiny
- peritektickou reakcí
- rozpadem tuhého roztoku (precipitací)

Podle krystalické struktury se intermetalické fáze dělí na valenční, elektronové a intersticiální. Druh intermetalických fází a jejich morfologie závisí na obsahu a kombinaci přítomných prvků a na podmínkách tuhnutí a chladnutí slitiny. Intermetalické fáze jsou tvrdé a křehké a proto mají na mechanické vlastnosti slitin obvykle velmi nepříznivé účinky.

- Valenční sloučeniny vznikají iontovou vazbou, zejména mezi silně elektropozitivními a silně elektronegativními kovy. Mají velkou pevnost a tvrdost a vysokou teplotu tání. Takovou fází je v hliníkových slitinách např. sloučenina Mg_2Si.

- V elektronových sloučeninách se poměr atomů neřídí počtem valenčních elektronů, ale tzv. elektronovou koncentrací. To je poměr počtu valenčních elektronů k počtu atomů. Takto vznikají 3 typy elektronových sloučenin s poměrem

$$\frac{počet\ valenčních\ elektronů}{počet\ atomů} = \frac{3}{2}, \frac{21}{13}\ nebo\ \frac{7}{4}$$

Každému z uvedených poměrů odpovídá určitá krystalografická mřížka. Elektronové sloučeniny jsou ve srovnání s valenčními méně stabilní a mají nižší tavicí teplotu. Elektronovými sloučeninami jsou např. Al_2Cu nebo Al_3Ni.

- Intersticiální sloučeniny vznikají, jestliže se atomové poloměry složek liší o více než 15 %. Na rozdíl od intersticiálního roztoku mají intersticiální sloučeniny svoji vlastní krystalovou mřížku s pravidelným uspořádáním intersticiálního prvku. V hliníkových slitinách se běžně vyskytují např. intersticiální sloučeniny AlB_2, Al_4C_3 nebo AlN. Všechny tyto sloučeniny mají vysoký bod tání.

Slévárenské slitiny hliníku mají téměř vždy heterogenní strukturu. To znamená, že vedle primární fáze (obvykle α(Al)) je ve struktuře rovněž eutektikum nebo/a některé intermetalické fáze. Slitiny s homogenní strukturou se používají pro elektrotechnické účely a při zpracování tvářením.

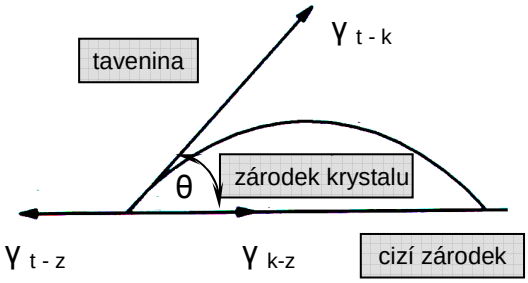
Podle obsahu přísadových prvků se slitiny rozdělují na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Převážná většina slitin hliníku má podeutektické až eutektické složení. Nadeutektické slitiny hliníku se používají poměrně zřídka (prakticky výhradně se jedná o některé slitiny typu Al-Si).

1.7 Krystalizace primární fáze α(Al)

Převážná většina slévárenských slitin hliníku má podeutektické složení a jejich krystalizace proto začíná vznikem primární fáze α(Al). Podmínky a průběh vzniku a růstu této fáze jsou společné pro všechny druhy podeutektických slitin. Specifika, související s tuhnutím eutektika, budou zmíněny při popisu krystalizace jednotlivých typů slitin.

1.7.1 Nukleace primární fáze α(Al)

V technických slitinách dochází ke krystalizaci této fáze mechanizmem heterogenní nukleace na cizích zárodcích. Jako krystalizační zárodky mohou působit zejména oxidy a spinely, případně jiné částice, které jsou v tavenině běžně přítomné. ale rovněž stěna formy. Jako krystalizační zárodky však nepůsobí všechny cizí částice.



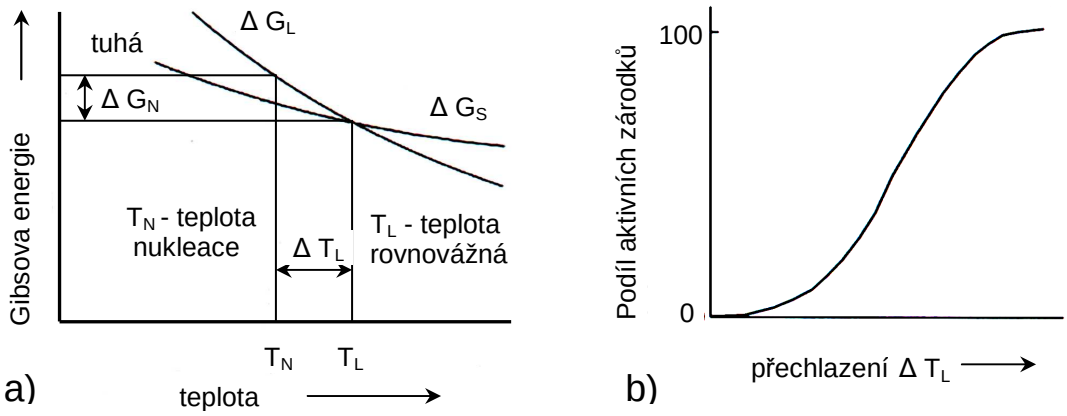
γ_{t-z} – povrchové napětí tavenina – cizí zárodek
γ_{t-k} - povrchové napětí tavenina – zárodek krystalu
γ_{k-z} - povrchové napětí zárodek krystalu – cizí zárodek

Aby částice mohla působit jako zárodek je nutné, aby mezi ní a tuhnoucí fází byla co nejmenší mezifázová energie, tj. aby zárodek byl tuhnoucí fází smáčivý. Měřítkem smáčivosti je kontaktní úhel Θ mezi krystalizačním zárodkem a tuhnoucí fází – obr. 3. Čím je tento úhel menší, tím lepší je smáčivost komponent.

Obr. 3: Smáčivost tuhnoucí fáze a krystalizačního zárodku

Dobré smáčivosti je obvykle dosaženo, když jsou obě složky alespoň některými atomovými rovinami krystalograficky podobné. Čím větší je podobnost strukturní stavby mezi cizí částicí a hliníkem, tím efektivněji částice působí jako zárodek pro krystalizaci hliníku a tím menší je potřebná aktivační energie pro růst zárodku.

Aktivační energie ΔG_N pro vznik zárodků je přímo úměrná hodnotě přechlazení pod rovnovážnou teplotu tuhnutí ΔT_L – obr. 4a. Při větší aktivační energii se aktivují se i energeticky méně výhodné zárodky Proto **čím větší je přechlazení, tím se zvětšuje množství aktivních zárodků.** – obr. 4b.



Obr. 4: Aktivační energie pro nukleaci aktivních zárodků a vliv přechlazení na jejich počet

K nukleaci krystalů α-Al na krystalizačně vhodných částicích může docházet již při malém přechlazení, naopak u krystalizačně méně vhodných zárodcích je nutné přechlazení větší. Z tohoto důvodu se při pomalém chladnutí krystalizačně málo vhodné zárodky vůbec neaktivují a vzniká hrubozrnná struktura.

Zvýšení počtu vhodných krystalizačních zárodků se provádí očkováním taveniny nebo rychlým ochlazováním. Princip působení těchto zásahů se však podstatně liší:

- **při očkování** se zvyšuje množství vhodných zárodků pomocí očkovacích přípravků, k nukleaci dochází při malém přechlazení

- **při rychlém ochlazování** slitiny dochází k velkému přechlazení pod rovnovážnou teplotu, kdy se v tavenině aktivují i zárodky energeticky méně výhodné.

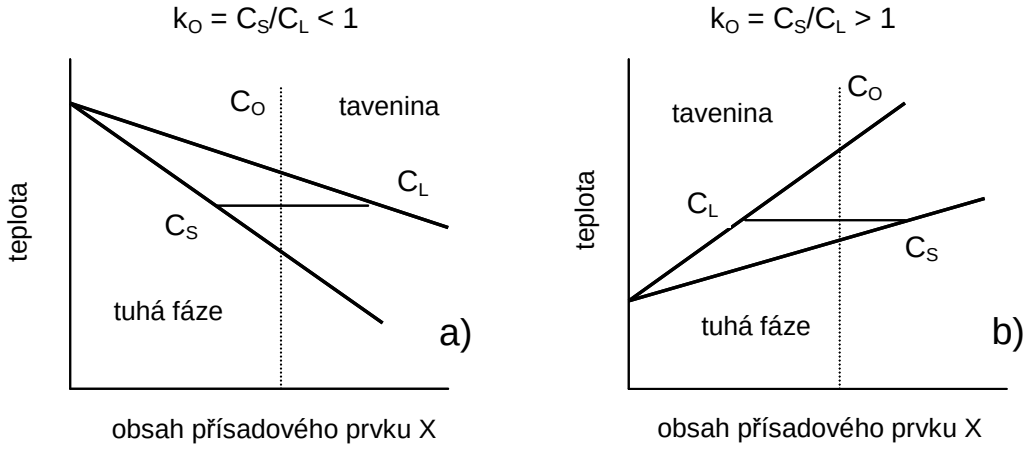
1.7.2 Chemické složení fází – segregace prvků

1.7.2.1 Rozdělovací koeficient

Rozložení prvků ve slitině v průběhu tuhnutí určuje rovnovážný diagram. Poměr koncentrací přísadového prvku v tuhé a ve zbývající tekuté fázi určuje tzv. rozdělovací koeficient – k_O, který je definován jako podíl koncentrací přísadového prvku v tuhé fázi - C_S a v tekuté fázi C_L:

$$k_O = C_S / C_L$$

Jestliže se teploty tuhnutí s rostoucím obsahem přísadového prvku snižují, je $C_S < C_L$ a $k_o < 1$ (obr. 5 a), pokud se teplota tuhnutí zvyšuje, je $C_S > C_L$ a $k_o > 1$ (obr. 5 b).



Obr. 5: Stanovení hodnoty rozdělovacího koeficientu

Převážná většina přísadových a doprovodných prvků v hliníku má hodnotu $k_o < 1$. V praxi to znamená, že se během tuhnutí přísadový prvek koncentruje ve zbývající tekuté fázi, v níž mohou potom vznikat strukturní složky, odpovídající mnohem vyššímu obsahu přísadového prvku. **Čím menší je hodnota rozdělovacího koeficientu, tím k větší segregaci dochází** – znamená to, že již při malém obsahu prvku v tavenině mohou při tuhnutí vznikat oblasti, v nichž je koncentrace tohoto prvku velmi vysoká.

Jestliže k_O > 1, koncentruje se přísadový prvek ve vznikající tuhé fázi a tavenina se jím postupně ochuzuje. Typickým prvkem s tímto charakterem je ve slitinách hliníku titan. V tab.1 jsou uvedeny hodnoty rozdělovacího koeficientu některých běžných prvků v hliníku.

Tab:1: Hodnoty rozdělovacího koeficientu některých prvků v hliníku

X	k_{ox}^{Al}	X	k_{ox}^{Al}	X	k_{ox}^{Al}	X	k_{ox}^{Al}
Ti	8,35	Li	0,73	Sb	0,086	P	< 0,01
Cr	1,73	Mn	0,72	Si	0,082	Sr	< 0,01
		Zn	0,44	Fe	0,053	Na	0,0014
		Mg	0,30	Ca	0,048		
		Cu	0,15				
		Pb	0,12				
		Be	0,10				

1.7.2.2 Mechanismy distribuce prvků během tuhnutí

Rozdělovací koeficient, tak, jak byl definován výše, předpokládá rovnovážný průběh tuhnutí s dokonalou difuzí přísadového prvku „X“ v tekutém i v tuhém stavu. Tento model ovšem v praxi většinou neplatí, neboť v reálných podmínkách probíhá difuse v tuhé fázi jen velmi omezenou rychlostí a také tavenina není chemicky homogenní.

Rychlost **difuse v tuhém stavu** je závislá na mechanismu difuse a na teplotě. Difuse malých atomů (např. H,N,C aj.) intersticiálním mechanismem je 100 až 1000 krát rychlejší, než difuse větších atomů pohybem vakancí.

V tekutém stavu probíhá difuse 10 až 1000 krát rychleji, než v tuhém stavu. Kromě difuse může v tavenině docházet k homogenizaci chemického složení rovněž konvekcí. Proto modely distribuce prvků v tekuté a v tuhé fázi obvykle vychází z následujících předpokladů:

a) Nedochází k difusi prvku X v pevné fázi - dokonalá homogenizace v tekuté fázi.
Pro koncentraci přísadového prvku v tuhnoucí fázi (obr. 6a) platí Scheilova rovnice:

$$C_s = k_o.C_o\ (1 - f_s)^{\,ko-1}$$

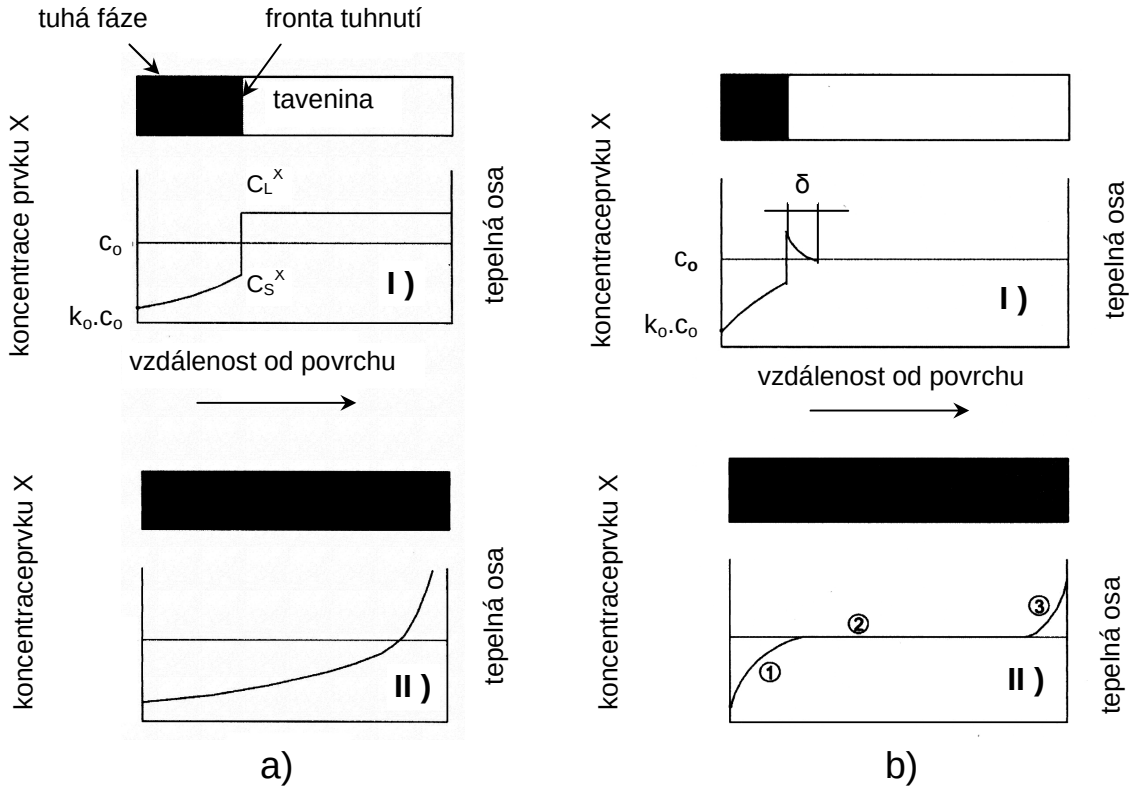
kde: C_s – koncentrace prvku X v tuhé fázi
C_o – průměrná koncentrace prvku X ve slitině
f_s - podíl tuhé fáze

b) Nedochází k difusi prvku B v pevné fázi - omezená difuse v tekuté fázi.
Před krystalizační frontou vzniká pásmo, v němž je tavenina obohacena prvkem B. Toto pásmo se nazývá **difusní vrstva**. Vlivem difuse se koncentrace prvku B v difusní vrstvě směrem do taveniny postupně snižuje na průměrnou hodnotu C_o – obr.6b. Tloušťka difusní vrstvy δ závisí na součiniteli difuse prvku B v tavenině – D_L^B a na rychlosti postupu krystalizační fronty – R podle vztahu

$$\delta = D_L^B / k_o' \,.\, R$$

V tomto případě je rovnovážný rozdělovací koeficient k_O v Scheilově rovnici nahrazen efektivním rozdělovacím koeficientem k_O', který je rovněž závislý na rychlosti tuhnutí R a součiniteli difuse D_L^B: Tento model je pro většinu případů reálnější.

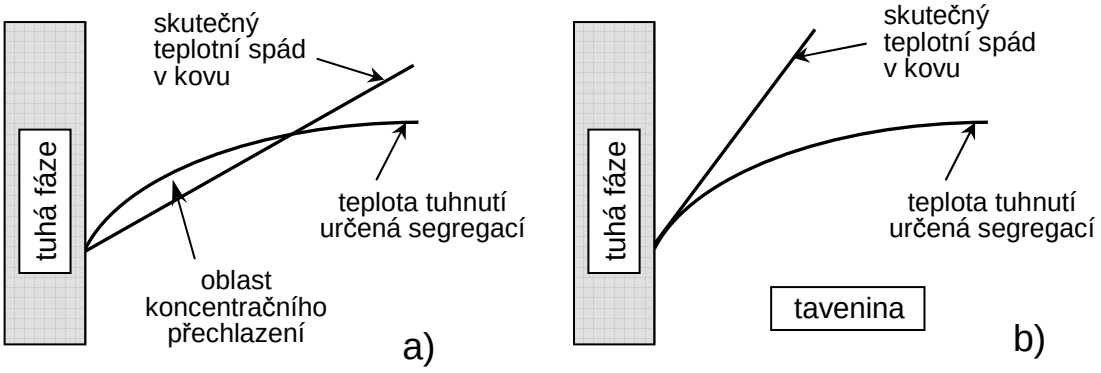
$$k_O' = k_O / [\, k_O + (1 - k_O) \,.\, \exp -(R.\delta / D_L^B)]$$



Obr.6: Rozložení přísadového prvku X v tekuté a v tuhé fázi:
a) nedochází k difusi v tuhé fázi – dokonalá difuse v tavenině
b) nedochází k difusi v tuhé fázi – omezená difuse v tavenině
I) situace během tuhnutí
II situace po ztuhnutí

1.7.2.3 Koncentrační přechlazení

Důsledkem obohacení taveniny přísadovým prvkem X v difusní vrstvě je snížení teploty tuhnutí kovu před krystalizační frontou (podle příslušného rovnovážného diagramu) – podle křivky na obr. 7. Předpokládejme, že průběh teploty od mezifázového rozhraní směrem do taveniny má lineární průběh – přímka v obr. 7.

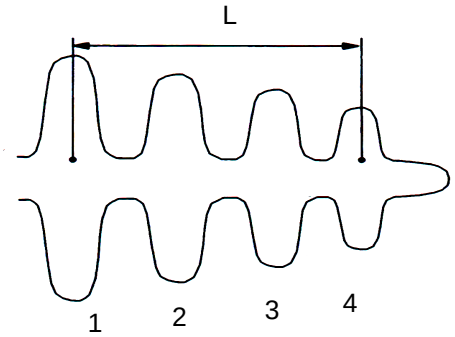


Obr.7: Vznik koncentračního přechlazení

Při malém teplotním gradientu (tj. při málo intenzivním ochlazování) – obr. 7a, jsou skutečné teploty kovu před krystalizační frontou nižší, než rovnovážné krystalizační teploty, odpovídající místní koncentraci prvku X. **Rozdíl mezi skutečnou teplotou kovu a teplotou, která odpovídá místnímu chemickému složení se nazývá koncentrační (nebo také konstituční) přechlazení.** Při velkém teplotním gradientu (tj. při intenzivním ochlazování) – obr.7b, neprotíná čára skutečných teplot čáru rovnovážných teplot – koncentrační přechlazení nevzniká.

Vznik a velikost koncentračního přechlazení má vliv na morfologii mezifázového rozhraní. Když se zvětšuje koncentrační přechlazení, mění se mezifázové rozhraní z rovinného (planárního), přes buněčné na dendritické. Vznikem koncentračního přechlazení lze vysvětlit zásadní strukturní rozdíly mezi odlitky tenkostěnnými a tlustostěnnými a mezi odlitky litými do pískových a do kovových forem. Vyplývá z něho, že čím menší je teplotní gradient v tavenině před frontou tuhnutí (viz obr. 7b), tím větší je tendence k dendritickému tuhnutí (protože vzniká větší koncentrační přechlazení). Při rychlém ochlazování je koncentračnímu přechlazení malé, eventuelně k němu nedochází (viz obr.5a).

Primární osy dendritů rostou vždy ve směru teplotního gradientu (proti směru odvodu tepla). Větvení dendritů je pravidelné a dochází k němu ve směru konkrétních krystalizačních směrů – u slitin s kubickou mřížkou ve směrech <100>, u hexagonální mřížky ve směru <10-10>. Hustota sekundárních a vyšších větví dendritů je závislá zejména na době tuhnutí v daném místě a na složení slitiny.

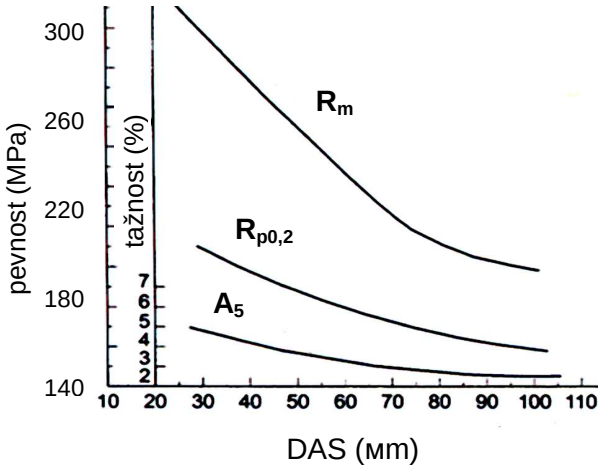


$$DAS = L / (n - 1)$$

n – počet sekundárních os

Obr.8: Metodika měření DAS

Pro popis dendritické struktury je nejdůležitějším kriteriem vzdálenost sekundárních os dendritů, označovaná jako DAS (dendrite arm spacing). Hodnoty DAS lze zjistit metalograficky. Na vhodném dendritu se na metalografickém výbrusu změří vzdálenost přes několik sekundárních větví a vydělí počtem mezer – obr. 8. Zatímco velikost primárních zrn α(Al) ve slévárenských slitinách bývá v rozmezí 1-10 mm, hodnoty DAS bývají nejčastěji v rozmezí 10-150 μm.



Obr.9: Závislost mechanických

S velikostí DAS souvisí i řada dalších strukturních jevů. Čím **jemnější je struktura** (tj. menší hodnota DAS), tím **menší** jsou segregační vzdálenosti. Při menším rozsahu segregací proto vznikají menší **částice intermetalických vměstků**. Nečistoty se vylučují jako oddělené částice v mezidendritických prostorech a netvoří síťoví. Chemické složení slitiny je více homogenní, **příznivěji je rozložena mikroporezita**. Proto čím menší je hodnota DAS, tím **vyšší jsou mechanické vlastnosti** – obr. 9. (Kromě toho se při rychlém ochlazování zvětšuje množství prvků, které zůstávají v kovové matrici rozpuštěny v přesyceném tuhém roztoku α(Al), to znamená, že se jich méně vyloučí jako intermetalické fáze.)

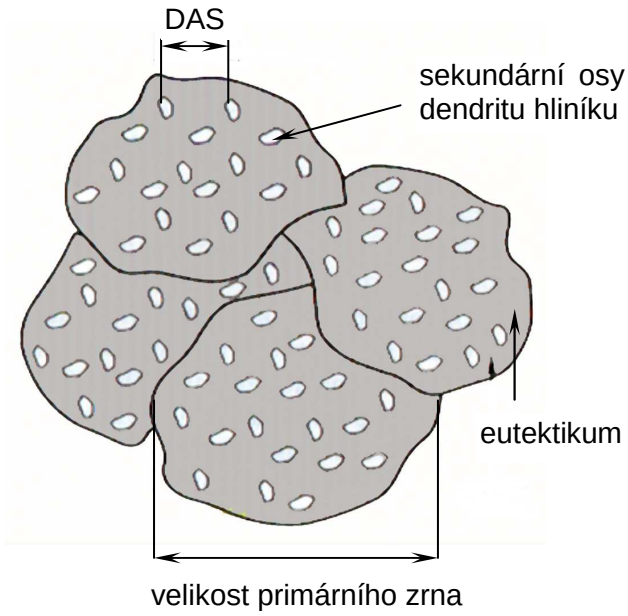
vlastností slitin na DAS

Hodnota DAS nezávisí na velikosti primárních zrn, nezávisí tedy na stavu krystalizačních zárodků ani na vlivu očkování, nýbrž **pouze na rychlosti chladnutí v intervalu tuhnutí** – čím kratší doba tuhnutí, tím menší DAS. Tato závislost se obecně popisuje vztahem:

$$DAS = a \cdot t_f^n$$

kde je: a – konstanta, závislá na slitině
n – konstanta, jejíž hodnota je v rozmezí <0,3; 0,5>
t_f – místní doba tuhnutí

Místní doba tuhnutí je definována jako čas, v němž teplota v daném místě klesne z teploty likvidu na teplotu solidu. Lze ji snadno zjistit z křivek ochlazování nebo simulací tuhnutí.



Z uvedeného vyplývá, že čím menší je velikost primárních zrn a vzdálenost sekundárních os (DAS), tím lepší je chemická a strukturní homogenita slitiny a tím lepších vlastností dosahuje.

Základní elementy struktury jsou znázorněny na obr. 10.

Jak již bylo uvedeno, lze zjemnění primární fáze při tuhnutí dosáhnout buď rychlým ochlazováním, nebo očkováním.

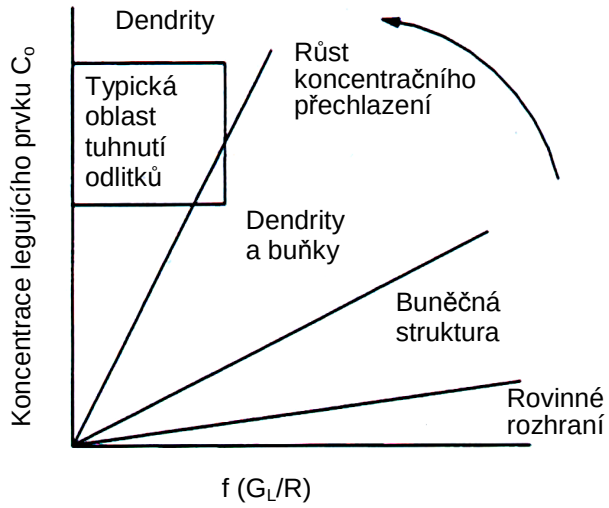
Obr. 10: Základní strukturní elementy v podeutektické slitině Al-Si

1.7.3 Růst primární fáze - morfologie tuhnutí

Po nukleaci krystalizačních zárodků dochází k jejich růstu do volné taveniny. Růst probíhá do doby, než je omezen sousedními krystaly. **Oblast struktury, která vznikla z jednoho krystalizačního zárodku se nazývá primární zrno.** Množství a velikost zrn závisí na počtu aktivních zárodků. Jestliže při tuhnutí dojde k aktivaci pouze malého počtu zárodků, je výsledkem hrubozrnná struktura. Slitiny s velkým množství vhodných zárodků proto tuhnou jako jemnozrnné.

Způsob růstu primárních krystalů hliníku je závislý na obsahu přísadového prvku - $\mathbf{C_o}$, na vzniku a na velikosti koncentračního přechlazení. Velikost koncentračního přechlazení závisí na koncentračním gradientu přísadového prvku na mezifázovém rozhraní - $\mathbf{(dC_L/dx)_{x=0}}$, na teplotním spádu v tekuté fázi na krystalizační frontě -$\mathbf{G_L}$ a na rychlosti růstu primární fáze - **R**.

Morfologie struktury znamená popis tvaru strukturních složek. Souvislost morfologie primární fáze a velikosti koncentračního přechlazení je schematicky znázorněna na obr. 8. (Funkce (G_L/R) není přesně specifikována a nemusí být lineární.)



V podmínkách, kdy je koncentrační přechlazení velmi malé, viz obr. 7a teplotní spád velký (rychlé ochlazování), vzniká **rovinné** (planární) **rozhraní** mezi tuhou a tekutou fází. K růstu zrn dochází pohybem tohoto rozhraní směrem do zbývající taveniny. Nehomogenita chemického složení před krystalizační frontou se vyrovnává difuzí. K tomuto typu tuhnutí dochází pouze ve speciálních případech, např. při výrobě monokrystalů, v technické praxi jen výjimečně.

Obr.11: Souvislost morfologie tuhé fáze s velikostí koncentračního přechlazení

Pokud je koncentrační přechlazení malé a dosahuje pouze několika Kelvinů a intenzita ochlazování je rovněž malá (např. v blízkosti tepelné osy), dochází k **buněčnému tuhnutí**. Podle velikosti koncentračního přechlazení tvoří tuhnoucí fáze dvourozměrné, případně až pravidelné hexagonální buňky. Morfologie (tvar částic) pevné fáze se mění vždy tak, aby co nejlépe umožňovala redistribuci nehomogenit přísadového prvku.

Tuhnutí odlitků probíhá obvykle v podmínkách, kdy velikost koncentračního přechlazení je poměrně velká a chemické nehomogenity se nemohou vyrovnat mechanismem buněčného tuhnutí. V tomto případě dochází k tuhnutí **mechanismem růstu dendritů**. Dendrity vytváří složitý systém, tvořený primárními, sekundárními případně terciálními větvemi. Přísadový prvek se vytlačuje jednak do taveniny před frontou tuhnutí, jak tomu bylo při planárním mechanismu, jednak do mezidendritických prostor.

Důsledkem všech těchto podmínek je, že se liší nejen morfologie různých slitin, ale i struktura téže slitiny, tuhnoucí různou rychlostí. Vliv intenzity rychlosti chladnutí je velmi významný. Proto se liší struktura odlitků, odlévaných do kovových a do pískových forem a také struktura tenkostěnných a tlustostěnných odlitků. Povrchová vrstva odlitku, v níž je ochlazování intenzivní, má jinou strukturu, než partie blíže k tepelné ose.

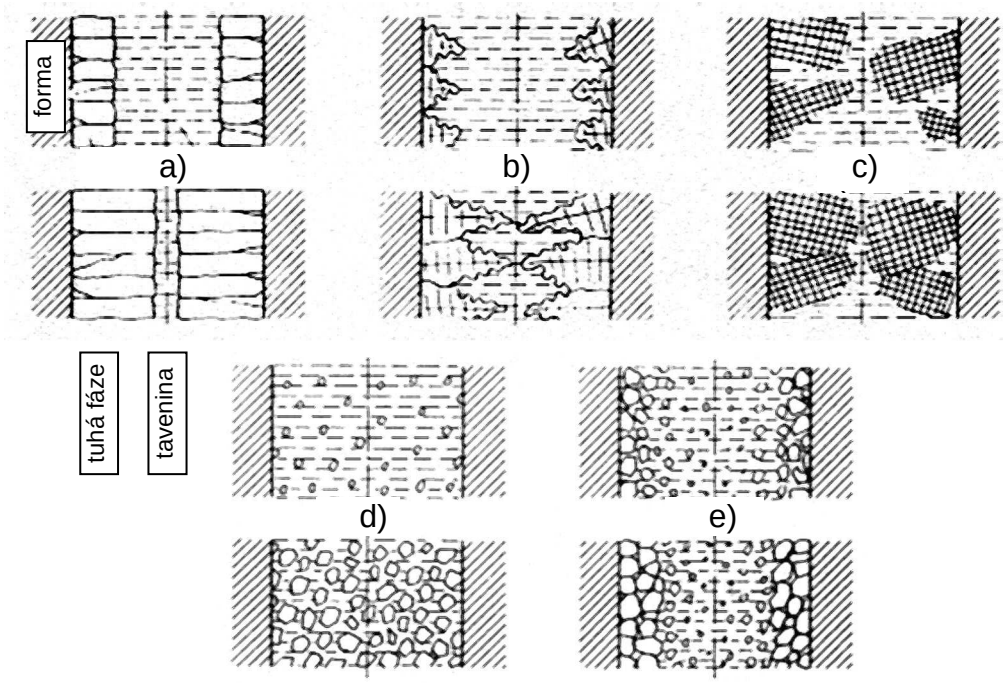
Podle způsobu, jak narůstá tuhá vrstva se tuhnutí dělí na exogenní a endogenní. Při **exogenním tuhnutí** roste víceméně kompaktní ztuhlá vrstva, která postupuje směrem od povrchu odlitku do tepelné osy. Jednotlivé případy se vzájemně liší kompaktností ztuhlé vrstvy. Při **tuhnutí endogenním** vznikají tuhnoucí krystaly i v objemu kovu před krystalizační frontou, případně má slitina tendenci tuhnout kašovitě v celém objemu.

V povrchových vrstvách odlitků je tendence k exogennímu tuhnutí s hladkým rozhraním, v centrálních částech dochází spíše k tuhnutí objemovému. Slitiny s úzkým intervalem tuhnutí krystalizují spíše exogenně s hladkým rozhraním, slitiny se širokým intervalem převážně buněčným způsobem nebo endogenně. Rovněž vliv očkování a modifikace na postup tuhnutí je značný. Očkování podporuje endogenní objemové tuhnutí, modifikace endogenní vrstevné nebo exogenní s rovinným rozhraním.

Způsob tuhnutí a tvar krystalizační fronty má vliv zejména na možnost dosazování kovu během tuhnutí. V případech, kdy ztuhlá fáze nebrání pohybu kovu, je možné dosazování z nálitků. Taková slitina má sklon vytvářet kompaktní staženiny a jen minimum

mikrostaženin. Ideálním případem je tuhnutí s rovným mezifázovým rozhraním. Naopak jestliže tuhá fáze vytváří málo kompaktní útvary, mezi nimiž zůstávají uzavřeny oblasti tekutého kovu, není možné dosazování a v odlitku vznikají mikrostaženiny. Účinnost nálitkování je v těchto případech malá, odlitky jsou pórovité a mají špatnou těsnost. Takovými nepříznivými typy jsou zejména exogenní – buněčné tuhnutí a endogenní objemové tuhnutí.

Rozdělení typů tuhnutí podle způsobu růstu tuhnoucí vrstvy je znázorněn na obr. 12. Způsob tuhnutí některých slitin je uveden v tab.2.



Obr. 12: Typy tuhnutí: exogenní: a) – s rovinným mezifázovým rozhraním
b) - dendritické
c) - buněčné
endogenní: d) - objemové
e) - vrstevné

Tab. 2: Typy tuhnutí některých slitin hliníku

slitina	typ tuhnutí	
	kovové formy	pískové formy
Al 99,99	s rovinným rozhraním	s rovinným rozhraním
Al 99,5	s rovinným rozhraním	buněčné
AlMg3	dendritické	buněčné
AlMg10	endogenní - vrstevné	endogenní - objemové
AlCu4	dendritické	endogenní - objemové
AlSi5	buněčné/objemové	endogenní - objemové
AlSi9	buněčné/objemové	endogenní - objemové
AlSi12 nemodifikovaná	endogenní - vrstevné	endogenní - vrstevné
AlSi12 modifikovaná	s rovinným rozhraním	s rovinným rozhraním

1.8 Očkování slitin hliníku

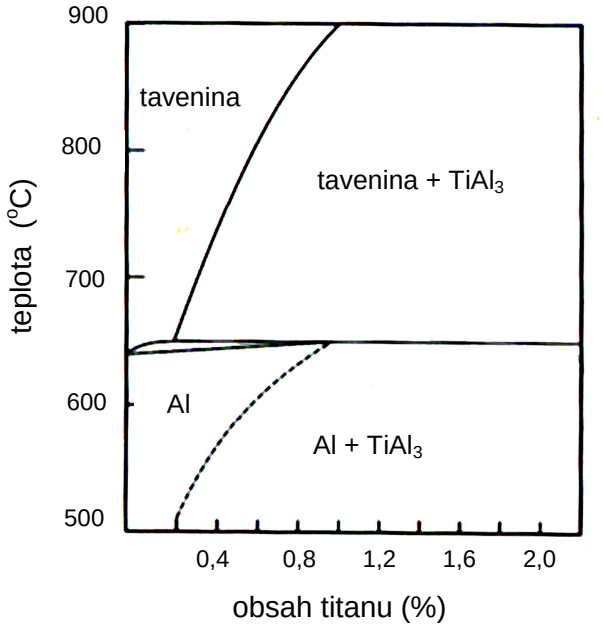
Velikost zrn primární fáze je jedním z důležitých parametrů, které rozhodují o vlastnostech hliníkových slitin. Každé zrno je tvořeno několika dendrity, které rostou z jednoho krystalizačního zárodku. Velikost zrn ve slitinách hliníku se obvykle pohybuje v rozmezí 1-10 mm. Disperzita dendritů (jak bylo uvedeno dříve) je charakterizována hodnotou DAS, která bývá v mezích 10 až 150 μm. Význam velikosti primárního zrna na vlastnosti slitiny je tím větší, čím více je ve slitině primární fáze. Jedná se tedy zejména o slitiny Al-Cu (které obsahují pouze primární fázi) a slitiny Al-Si s nižším obsahem křemíku. S rostoucím obsahem křemíku se zvyšuje obsah eutektika, proto převažuje vliv tvaru eutektického křemíku a vliv disperzity primární fáze je menší.

Při intenzivním ochlazování dochází k velkému přechlazení taveniny pod rovnovážnou teplotu krystalizace, při němž se aktivují i méně příznivé nukleační zárodky. Výsledkem je získání jemnozrnné struktury bez jakýchkoliv metalurgických zásahů. Tento mechanizmus zjemnění zrna je typický pro tenkostěnné odlitky a odlitky lité do kovových forem. Při odlévání odlitků s většími tloušťkami stěn a zejména při odlévání do pískových forem je intenzita chladnutí podstatně menší a proto má slitina hrubozrnnou strukturu. V těchto případech se zjemnění primárního zrna dosahuje očkováním. V této kapitole se budeme zabývat pouze očkováním primární fáze α-Al, která je vedoucí fází krystalizace většiny hliníkových slitin. Očkování nadeutektických siluminů je uvedeno v samostatné kapitole.

1.8.1 Princip očkování podeutektických slitin hliníku

Účelem očkování je zjemnění primární fáze vnášením nukleačních zárodků, resp. látek, z nichž se nukleační zárodky tvoří. Protože se očkováním nemění intenzita ochlazování, nemění se v podstatě ani hodnota DAS**. Proto je účinek očkování na vlastnosti slitin menší, než účinek rychlého chladnutí.**

Očkování podeutektických slitin hliníku se provádí titanem nebo kombinací titanu a bóru. Tyto prvky se do taveniny vnáší pomocí očkovacích solí, (např. K_2TiF_6, KBF_4 a dalších), očkovacích tablet nebo v podobě předslitin Al-Ti nebo Al-Ti-B.

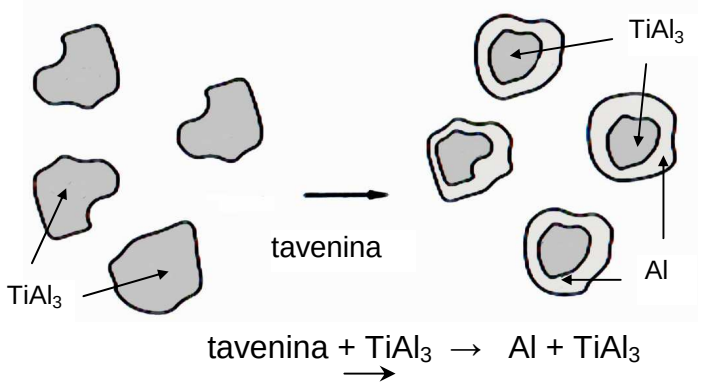


Při očkování přípravky s titanem reaguje titan s hliníkem za vzniku intermetalické fáze $TiAl_3$. Tato fáze má, stejně jako hliník, kubickou plošně centrovanou mřížku s parametrem blízkým mřížce hliníku a je proto téměř ideálním krystalizačním zárodkem. Fáze $TiAl_3$ reaguje s taveninou hliníku při peritektické reakci na teplotě 665 °C (obr.13) podle rovnice

$$\text{tavenina} + TiAl_3 \rightarrow \alpha(Al) + \text{tavenina}$$

Obr. 13: Rovnovážný diagram Al-Ti

Kolem částice $TiAl_3$ se tvoří obálka tuhého roztoku α(Al) a na ní pak pokračuje další růst dendritů hliníku - obr. 14. Částice $TiAl_3$ tvoří poměrně hrubé útvary s velikostí až 100 μm.



Obr. 14: Nukleace zárodků $TiAl_3$ při peritektické reakci v systému Al-Ti

Očkovací tablety obsahují směs očkovacích solí v různých kombinacích a koncentracích tak, aby jejich účinek byl optimální pro určitý typ slitin. Dávkují se obvykle v množství 0,1-0,4 % hmotnosti taveniny.

V očkovacích předslitinách Al-Ti bývá obsah titanu obvykle do 5 %. Titan je v nich již přítomen jako intermetalická fáze $TiAl_3$. Čím jemnější je disperzita $TiAl_3$, tím účinnější je očkovací účinek předslitiny. Pro efektivní zjemnění primární fáze α-Al je nutno do taveniny vnést asi 0,02-0,1 %Ti.

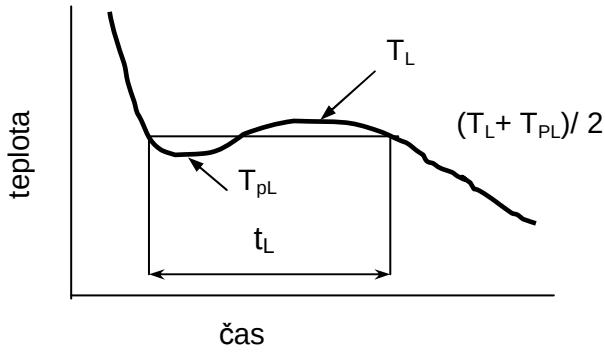
Zárodky $TiAl_3$ se v naočkované tavenině postupně rozpouští a očkovací účinek s časem odeznívá. Efektivní očkovací účinek předslitin Al-Ti obvykle trvá kolem 30-45 minut.

Dalšího zlepšení očkovacího účinku se dosahuje očkovadly s obsahem Ti a B. **Předslitiny s Ti a B obvykle obsahují do 5 % Ti a do 1 % B** v různých poměrech. Bór sám nepůsobí jako očkovadlo, vždy pouze v kombinaci s titanem. S hliníkem a titanem tvoří bór intermetalické fáze AlB_2, TiB_2 nebo $(Al,Ti)B_2$ s velikostí 0,5-2 μm, tedy mnohem menší, než samotný $TiAl_3$. Tyto částice pak slouží jako krystalizační zárodky. Zejména AlB_2 má očkovací účinek již při velmi malém přechlazení pod rovnovážnou teplotou likvidu a proto působí i při pomalém ochlazování (např. při lití do písku nebo silnostěnných odlitků do kokil). Účinek očkovacích slitin souvisí s morfologií těchto intermetalických částic. Je závislý na koncentraci obou prvků v předslitině a na způsobu její výroby. Vlivem bóru se dosti významně zpomaluje rychlost odeznívání a očkovací účinek dokonce trvá i po přetavení. Ukázalo se, že optimálního účinku se dosahuje použitím očkovadel s poměrem TI:B<2,2:1 (což je stechiometrický poměr těchto prvků ve fázi TiB_2). Např. norská fy. Hydelko vyvinula očkovací předslitinu Al-1,7%B-1,7%Ti s názvem Tibloy. Při očkování touto předslitinou se udává účinné zjemnění primárního zrna, dlouhá doba odeznívání a podstatně lepší zabíhavost slitiny.

Obsah bóru ve slitině **by neměl být vyšší, než asi 0,004 %B** (to odpovídá max. dávkování asi 0,2% očkovadla). Při vyšším obsahu bóru dochází k vytváření shluků boridů a k jejich sedimentaci. To způsobuje jednak vytváření nárostů v peci a také vytváření tvrdých shluků sedimentů na odlitcích.

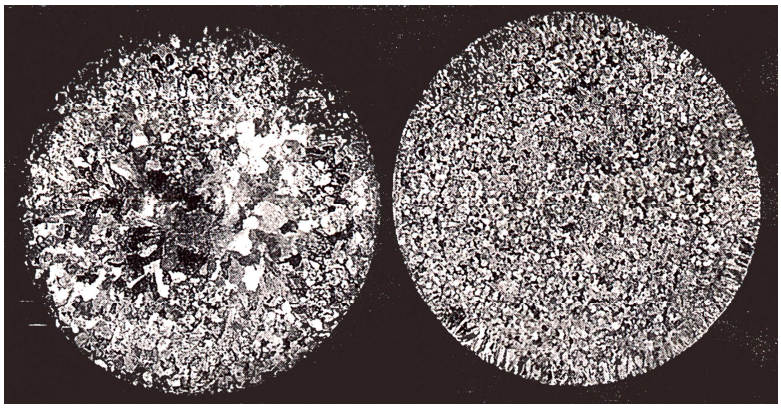
Zjemnění primárního zrna se hodnotí porovnáním zkušebních vzorků s etalony, nebo vyhodnocením tzv. **KF čísla** (KF – Kornfeinung) ze záznamu termické analýzy. K tomu se využívá střední teploty a doby prodlevy na křivce chladnutí v oblasti primární nukleace
- obr. 15. Disperzita primární fáze se vypočítá např. podle vztahu

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



(Čím vyšší je číslo KF, tím jemnější je struktura. Hodnoty koeficientů v uvedeném vztahu závisí na použitém zkušebním zařízení.) Příklad zjemnění struktury očkováním je na obr. 16.

Obr. 15: Vyhodnocení disperzity primárního zrna KF



Obr. 16: Vliv očkování na velikost zrna slitiny Al-Si7

1.8.2 Očkovací prostředky

Očkovací slitiny se dodávají nejčastěji jako tyče s určitou hmotností (obvykle s rozměry ϕ10 mm, délka asi 500 mm). Jejich dávkování je velmi snadné - množství očkovadla se taviči zadá jako počet očkovacích tyčí na určitou hmotnost kovu. Očkovadlo se přidává ponořením pod hladinu roztavené slitiny, taveninu je pak nutno promíchat. Očkovací účinek se dosáhne velmi rychle a obvykle je možno odlévat bezprostředně po naočkování.

Očkovací soli se přidávají na hladinu taveniny v množství, doporučeném výrobcem (obvykle asi 1%), zvonem se ponoří ke dnu lázně a promíchají s taveninou. Soli musí být dobře vysušené, aby se jimi do taveniny nevnášela vlhkost.

1.8.3 Vliv očkování na vlastnosti slitin

Zjemnění zrna se projeví zlepšením mechanických i mnoha technologických vlastností:

- zvýšením pevnosti a tažnosti,
- snížením sklonu slitiny ke vzniku trhlin,
- menší pórovitostí odlitků,
- zvýšením těsnosti odlitků,
- lepší obrobitelností

- zlepšením kvality povrchu po anodické oxidaci
- zvýšením vlastností po tepelném zpracování

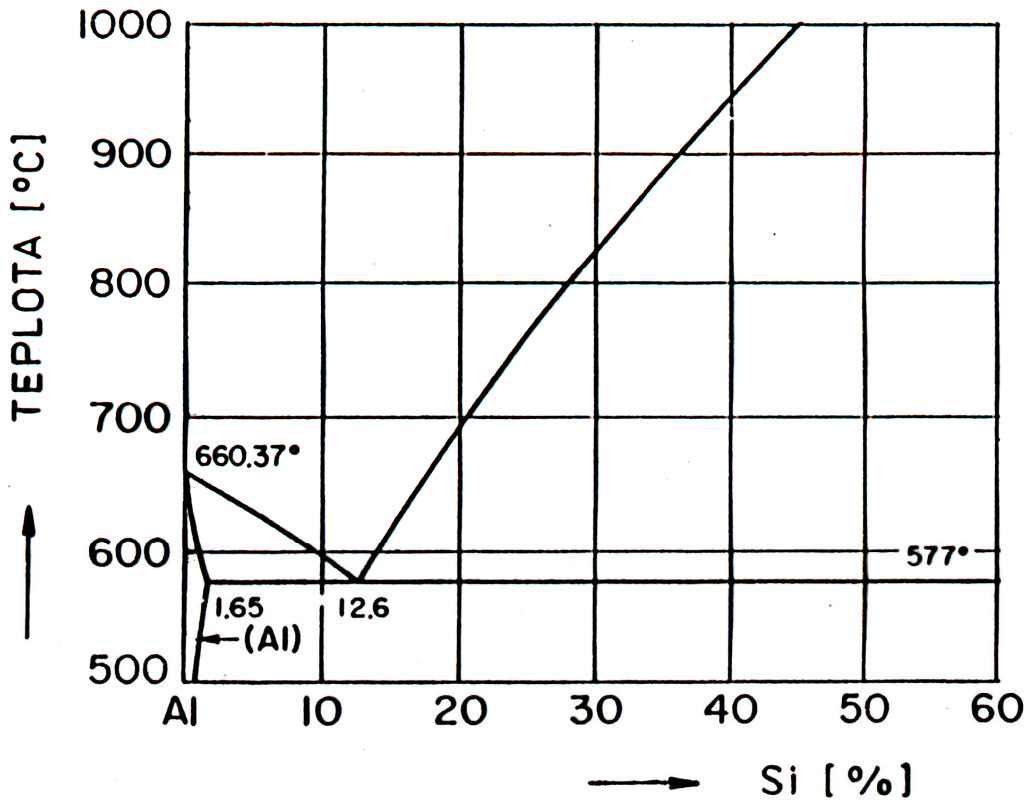
Téměř všechny tyto účinky jsou spojeny se zvýšením chemické a strukturní homogenity a s menším rozsahem segregací jednotlivých prvků. Snížení sklonu ke vzniku trhlin bylo podrobně zkoumáno u slitin Al-Cu. Za významný účinek se považuje, že pevnost vznikající tuhé fáze v očkované slitině pod teplotou krystalizace vzrůstá rychleji, než ve slitině neočkované.

Zjemnění zrna má vliv na rozložení staženin, resp. mikrostaženin. Zatímco neočkované slitiny mají sklon tvořit spíše soustředěné staženiny nebo oblasti s vysokou koncentrací ředin, v očkovaných slitinách vznikají spíše rozptýlené mikrostaženiny a řediny, které jsou poměrně rovnoměrně rozloženy v celém objemu kovu. Charakter rozložení staženin má následně vliv na těsnost odlitků – odlitky s rovnoměrně rozptýlenými malými staženinami mají lepší odolnost proti pronikání tlakových medií.

1.9 Krystalizace eutektika ve slitinách Al - Si

Slitiny Al-Si, běžně nazývané jako siluminy, jsou nejdůležitějším typem slévárenských slitin hliníku a představují drtivou většinu produkce hliníkových odlitků.

Křemík má v hliníku jen velmi omezenou rozpustnost. Při eutektické teplotě je rozpustnost pouze 1,65 %Si a při poklesu teploty se dále snižuje – např. při teplotě 300 °C je rozpustnost jenom kolem 0,22 %. Ve slévárenských slitinách je obsah křemíku vždy vyšší, než je maximální rozpustnost v tuhém roztoku α(Al), proto **vždy obsahují eutektikum α(Al)-Si. Eutektická koncentrace křemíku je 12,5 %Si** (podle některých pramenů jen 11,7 %Si), **eutektická teplota je 577 °C**. Rovnovážný diagram Al-Si je uveden na obr.17



Obr. 17: Rovnovážný diagram Al – Si

Podle obsahu křemíku se siluminy dělí na:
- podeutektické
- eutektické
- nadeutektické

Struktura podeutektických siluminů je tvořena sítí primárních dendritů fáze α(Al) a eutektikem, které se vylučuje v mezidendritických prostorech. S rostoucím obsahem křemíku se zvyšuje obsah eutektika. Podeutektické siluminy obsahují vždy více než 5 %Si, nejčastěji mezi 7 a 11 %Si.

Eutektické slitiny obsahují přibližně 11,5-13 %Si. Jejich struktura je tvořena pouze eutektikem, někdy (zejména u modifikovaných slitin) se však vyskytují i jednotlivé krystaly fáze α(Al).

Nadeutektické siluminy obsahují částice primárního křemíku, uložení v eutektické matrici. Obvyklý obsah křemíku v nadeutektických siluminech je kolem 14-17 %Si, vyjímečně až asi do 25 %Si.

1.9.1 Morfologie eutektika ve slitinách hliník – křemík

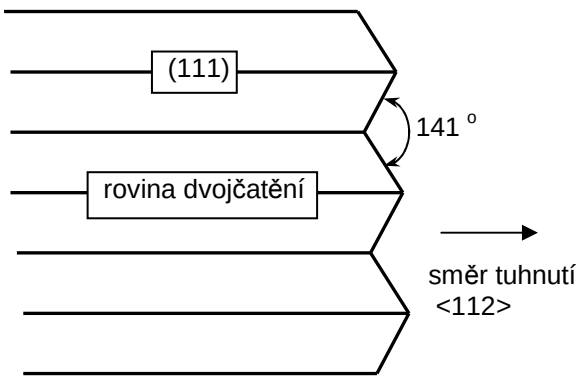
Křemík se ve slitinách Al-Si vylučuje prakticky jako čistý prvek s minimálním obsahem jiných příměsí. Velikost částic eutektického křemíku může být v rozmezí od méně než 1 μm až po více než 2 mm. V eutektiku se může vylučovat ve třech různých morfologických podobách. Podle tvaru částic křemíku se nazývá i typ eutektika, které může být:

- zrnité
- lamelární
- modifikované

Druh eutektika souvisí s mechanismem krystalizace eutektického křemíku. Jako krystalizační zárodky křemíku slouží částice fosfidu hlinitého AlP. Fosfor se do taveniny dostává jako nečistota zejména ze vsázkových surovin, ale také z použitých metalurgických přípravků a solí, nebo z vyzdívkových materiálů. Zdrojem fosforu může být rovněž šrot z nadeutektických slitin, u nichž se fosfor používá k očkování. K vytvoření dostatečného množství zárodků stačí jeho obsah v tavenině již řádově několika jednotek ppm fosforu (1 ppm = 0,0001 %).

Zrnité eutektikum – vzniká při obsahu nad asi 5-10 ppm P tvorbou krystalizačních zárodků AlP. Eutektický křemík se vylučuje ve tvaru polyedrických zrn nebo hrubých lamel. Je to obvyklá forma eutektika, která vzniká ve slitinách běžné technické čistoty.

Částice, které vyrůstají z jednoho zárodku tvoří eutektické zrno. Růst zrna křemíku se uskutečňuje především v krystalografickém směru <112>. Důležité je, že v krystalu snadno dochází ke dvojčatění podle roviny (111) s úhlem rovin dvojčatění 141^{o} – obr.18. Roviny dvojčat vždy vystupují před tuhnoucí povrch a tak mají stálý přísun atomů krystalizujícího křemíku. Krystalizace dendritů hliníku se zpožďuje za křemíkem, obě fáze rostou relativně nezávisle na sobě. Tento mechanizmus růstu je příznivý pro tvorbu nevětvených destičkových částic křemíku – lamel, případně zrn. Krystalizace zrnitého eutektika je energeticky málo náročná a dochází k němu při poměrně malém přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou asi 1-2 K.



Obr. 18: Schéma růstu zrnitého křemíku

Lamelární eutektikum je typem eutektika, které vzniká v čistých slitinách s velmi nízkým obsahem sodíku a obsahem fosforu pouze asi 1-2 ppm. K růstu částic Si dochází podobným mechanismem jako u eutektika zrnitého. Protože podmínky pro nukleaci lamelárního křemíku jsou méně příznivé (menší obsah fosforu dává menší počet zárodků), krystalizuje lamelární eutektikum při větším přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotou – asi 2-5 K. Křemík tvoří jemné lamely, uspořádané vedle sebe víceméně paralelně. Eutektická zrna jsou podstatně menší, než u eutektika zrnitého. Lamelární eutektikum vzniká rovněž ve slitinách modifikovaných prvky, jako jsou arsen, antimon, selen nebo kadmium. Z nich se prakticky používá pouze antimon.

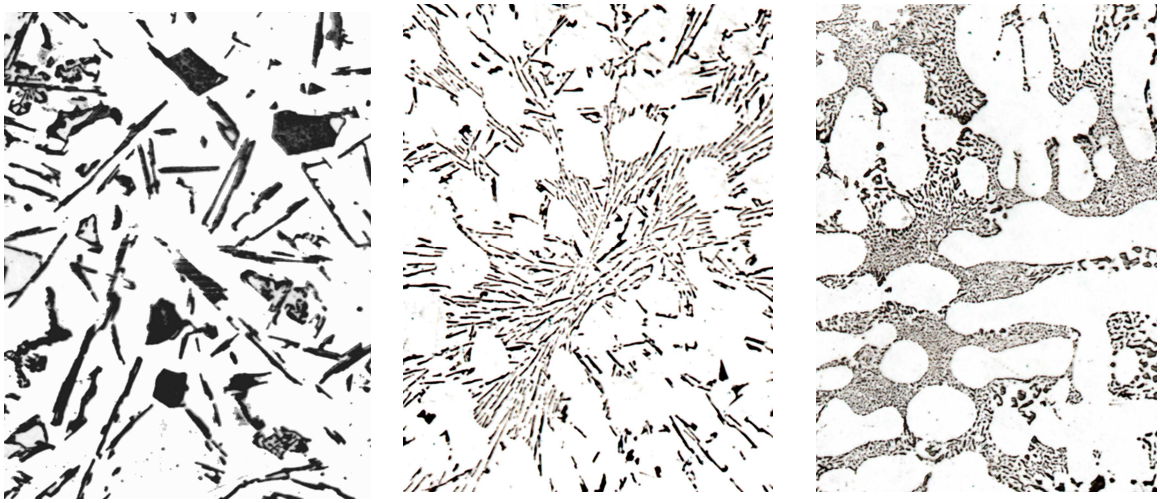
Modifikované eutektikum vzniká za přítomnosti modifikačních prvků, kterými jsou zejména sodík a stroncium. (Slabší modifikační účinek má i řada dalších prvků skupiny IA, IIA a kovů vzácných zemin, např. Ba, Ca a Yb, ale prakticky se nepoužívají.) Nejsilnější modifikační účinek má sodík.

Sodík neutralizuje krystalizační zárodky AlP tak, že váže fosfor do krystalizačně neaktivních sloučenin podle rovnice:

$$AlP + 3\ Na \rightarrow Al + Na_3P$$

Ke krystalizaci křemíku v modifikovaném eutektiku dochází zcela jiným mechanismem růstu, než u eutektika zrnitého. Modifikační prvky snižují rychlost difuze křemíku v tavenině. Mají velmi nízký rozdělovací součinitel, proto jsou vytlačovány z tuhnoucích částic hliníku před frontu tuhnutí. Jsou povrchově aktivní. Atomy modifikačního prvku blokují růstové stupně na rozhraní krystalů křemíku a taveniny a tím podporují dvojčatění útvarů křemíku.

Efektivita účinku modifikátoru závisí na hustotě dvojčat v částicích křemíku. Ze známých prvků, které mají modifikační účinek, dává zdaleka nejmenší vzdálenost rovin dvojčatění sodík a právě proto je modifikační účinek sodíku nejsilnější – tab.3. Povrch krystalů křemíku v modifikované slitině je v důsledku mnoha rovin dvojčatění hrubý. Částice křemíku jsou krystalicky nedokonalé a každá krystalická vada je potenciálním místem pro další větvení.



zrnité lamelární modifikované

Obr.19: Struktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si

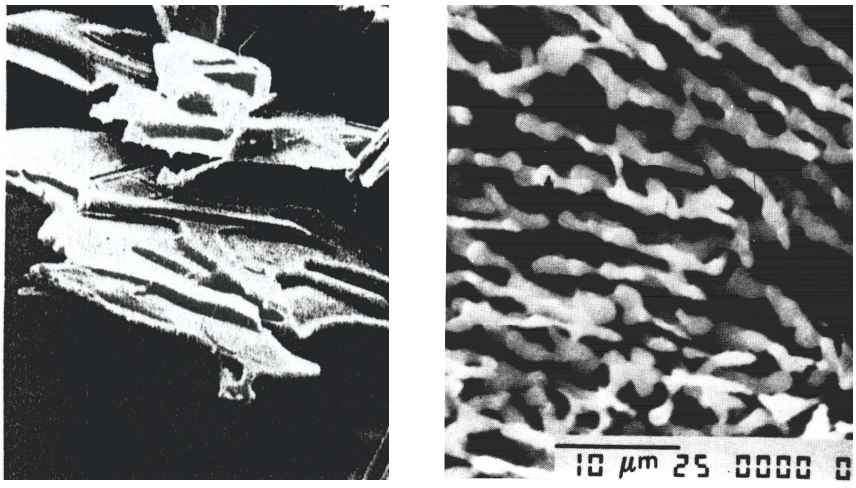
Tab. 3: Vliv modifikátoru na dvojčatění křemíku za stejných podmínek ochlazování

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

Částice křemíku v modifikovaném eutektiku mají tvar jemných vláken – na metalografickém výbrusu mají tvar tečky. Metalurgická operace, která vede ke vzniku tohoto typu eutektika se nazývá modifikace. Modifikací se výrazně zvyšují mechanické vlastnosti, zejména tažnost.

Morfologie jednotlivých typů eutektika Al-Si je znázorněna na obr.19, při velkém zvětšení pomocí elektronového mikroskopu na obr. 20.

Stupeň modifikace závisí rovněž na rychlosti ochlazování. Při vysokých rychlostech ochlazování odlitků je snadnější získat jemnou, dobře modifikovanou strukturu i při použití slabších modifikačních prvků (obvykle stroncia). Naopak při pomalém ochlazování, např. silnostěnných odlitků, odlévaných do pískových forem jsou účinné pouze silné modifikátory, tj. zejména sodík.



Obr. 20: Struktura křemíku v nemodifikovaném (vlevo) a v modifikovaném (vpravo) eutektiku

Struktura eutektika při rychlém ochlazování

Vláknitá modifikovaná struktura může vzniknout nejen vlivem chemických modifikátorů ale rovněž při velmi rychlém tuhnutí s rychlostí postupu krystalizační fronty 400 až 1000 µm/s. Ačkoliv opticky vypadá takové eutektikum stejně jako po chemické modifikaci, elektronovou mikroskopií bylo zjištěno, že tato struktura odpovídá spíše velmi jemně vyloučené nemodifikované formě křemíku. Rychlosti tuhnutí dostatečně vysoké pro tento typ modifikace

se prakticky dosahuje pouze při tlakovém lití. Ačkoliv oba mechanismy modifikace jsou principielně jiné, oba vedou ke zjemnění struktury.

1.9.2 Modifikace eutektika slitin Al-Si

Z prvků, které mají modifikační účinek se pro modifikaci slévárenských slitin Al-Si prakticky používá pouze sodíku a stroncia. Modifikací se mírně zvyšují pevnostní vlastnosti, velmi výrazně však vlastnosti plastické, tažnost a houževnatost. Modifikované slitiny dosahují tažnosti i vyšší než 8 % oproti běžným 2-3 % u slitin nemodifikovaných.

1.9.2.1 Modifikace sodíkem

Sodík je nejsilnějším modifikačním prvkem. Modifikační účinek působí spolehlivě i při pomalém ochlazování, např. při odlévání silnostěnných odlitků do pískových forem.

Pro získání plně modifikované struktury musí slitina obsahovat přibližně 50-100 ppm sodíku. Čím větší je obsah křemíku ve slitině (tj. více eutektika), tím vyšší musí být obsah Na. Stejně tak čím pomalejší je tuhnutí, tím vyšší je dávkování sodíku. Sodík (podobně také antimon) zvyšuje sklon k oxidaci taveniny a zhoršuje zabíhavost.

Sodík je velmi reaktivním prvkem s vysokou afinitou ke kyslíku, intenzivně reaguje s vodou a s jakoukoliv formou vlhkosti. (Kovový sodík se udržuje pod petrolejem.) Tavicí teplota je 98 ^{o}C. V roztaveném hliníku se sodík rozpouští prakticky okamžitě. V důsledku vysoké tenze par (asi 20 kPa při teplotě 730 ^{o}C) se sodík vypařuje a uniká z taveniny. Páry sodíku způsobují bouřlivý var. Využití sodíku pro modifikaci je proto nízké – obvykle pouze 10-20 % z přidaného množství. Čím vyšší je modifikační teplota, tím nižší je využití.

Modifikační prostředky se sodíkem

Pro modifikaci se používá buď sodík kovový, v podobě solí a v poslední době **především jako exotermické modifikační tablety.**

Kovový sodík se vzhledem k vysoké reaktivnosti aplikuje téměř výhradně ve vakuovaných patronách. Patrony jsou vyrobeny z tenkého hliníkového plechu, rychle se roztaví a chemicky nevnášejí do taveniny žádný cizí prvek. Vyrábí se v několika velikostech s různým obsahem sodíku, což usnadňuje dávkování podle hmotnosti modifikovaného kovu. Patrony se zvonem ponoří ke dnu lázně a drží se tam do ukončení reakce. Sodík se dávkuje obvykle v množství 0,05-0,1 %Na.

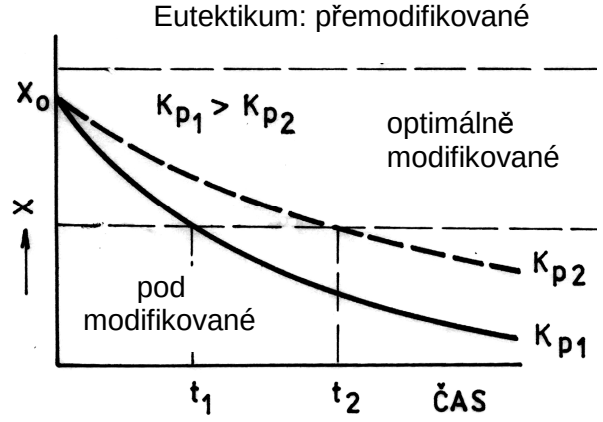
Modifikační soli jsou směsí chloridů a fluoridů (typická kombinace je NaCl+KCl+NaF – např. tzv. sůl T3), které se dodávají s práškové podobě, nebo častěji jako tablety. Modifikační sůl nebo tableta se zvonem ponoří ke dnu lázně. Po odeznění reakce se lázeň zamíchá, produkty reakce se nechají vyplavat na hladinu a pečlivě stáhnou. Za 5-10 minut je tavenina připravena k lití. Dávkování sypkých přípravků bývá kolem 0,8-1,0 % na hmotnost taveniny.

Exotermické modifikační tablety využívají exotermický efekt, který je dán buď hořením hliníkové krupičky za přítomnosti oxidovadla (starší typ) nebo hořčíkovými třískami (nepotřebují oxidovadlo). Při vysokých teplotách, způsobených hořením exosměsi, dochází k tepelné destrukci a ze skeletu tablet se uvolňuje sodík ve formě par. Do taveniny přejde jen určitá část Na (max.asi 30 %), zbytek vyhořívá na hladině. Tablety zaručují poměrně vysoké využití sodíku a reprodukovatelnost modifikace. Dávkování při lití do kokil je 0,02-0,12 %, při lití do písku 0,10-0,20%.

Odeznívání modifikačního účinku sodíku

Po ukončení modifikační reakce se sodík vypařuje z hladiny taveniny a jeho obsah v lázni se postupně snižuje. To je příčinou postupného slábnutí modifikačního účinku až jeho zániku. Tomuto jevu se říká odeznívání modifikace. Během odeznívání se struktura slitiny postupně vrací zpět do stavu před modifikací. Rychlost odeznívání závisí na řadě vlivů, zejména na teplotě kovu, na velikosti povrchu hladiny vůči objemu kovu a na pohybu kovové lázně po modifikaci – obr.21. **Při modifikaci sodíkem lze obvykle počítat s dobou modifikačního účinku 15-20 minut,** maximálně do 30 min. Jestliže je doba mezi modifikací a odléváním delší, musí se tavenina domodifikovat menší dávkou modifikačního prostředku.

Aby se dosáhlo **prodloužení modifikačního účinku** v udržovacích pecích, používají se modifikační **tablety s pomalým rozpouštěním** v lázni. Hustota tablet je přibližně stejná, jako hustota taveniny, tzn. že se v lázni vznáší, pomalu se rozkládají a postupně nahrazují ztráty sodíku.



Obr. 21: Odeznívání modifikačního účinku (X– obsah modifikačního prvku)

Ke ztrátám sodíku dochází rovněž při odplyňování taveniny. Při probublávání kovu jakýmkoliv druhem plynu sodík difunduje do bublin a s nimi uniká z taveniny. Sodík má vysokou afinitu ke chloru a fluoru, proto **nelze modifikovanou slitinu v žádném případě odplyňovat přípravky, které obsahují chlor nebo fluor.** I krátké probublání taveniny chlorem zcela zruší modifikační účinek sodíku. **Modifikace proto musí následovat až po odplynění.**

1.9.2.2 Modifikace stronciem

Stroncium je lehký kov s tavicí teplotou 770 ^{o}C. Je mnohem méně reaktivní, než sodík a dává vysoké a stabilní využití. Používá se jako **předslitina s hliníkem s obsahem obvykle 3,5 až 10 %Sr.** V těchto předslitinách je struktura tvořena čistým hliníkem a intermetalickou fází Al_4Sr. Stroncium se do taveniny dostává rozpouštěním, přičemž čím vyšší je teplota taveniny, tím rychleji se předslitina rozpouští a tím rychleji nabíhá modifikační účinek. Kromě tohoto typu předslitiny se používá rovněž předslitina se složením AlSr10Si14, která je tvořena eutektikem Al-Si a velkými částicemi intermetalické fáze Al_2Sr_2Si. Tato předslitina se však rozpouští jen asi poloviční rychlostí.

U nás spíše výjimečné je používání předslitin s vysokým obsahem stroncia typu Sr90Al10. Tyto předslitiny se rozpouštějí mechanismem tzv. reaktivního rozpouštění, při němž je mezistupněm tvoření intermetalických fází, jako $SrAl_2Si_2$ a má vysoce exotermický charakter. Rozpouštění probíhá rychle zejména při nízkých teplotách kovu kolem 650 ^{o}C.

Aplikace předslitin stroncia do taveniny je velmi snadná. Modifikační předslitiny se obvykle dodávají jako tyče o průměru asi 10 mm s délkou kolem 0,5 m. Dávkování se provádí určením počtu tyčí na určitou hmotnost taveniny. Tyče se jednoduše ponoří do roztaveného kovu. Pro rychlejší náběh modifikačního účinku je výhodné, když dochází k pohybu taveniny, např. indukčním mícháním. Jestliže tavicí agregát nezajišťuje pohyb taveniny, je nutné lázeň homogenizovat občasným mechanickým mícháním.

Dávkování stroncia - Modifikace stronciem se používá zejména u podeutektických siluminů. Pro dosažení dobrého modifikačního účinku je **nutno dávkovat obvykle 150-200 ppm Sr, u eutektických slitin až do 400 ppm Sr. Účinek stroncia je vždy slabší, než účinek sodíku**. Při lití do kovových forem, nebo tenkostěnných odlitků do písku se dosahuje dobré úrovně modifikace, **pro silnostěnné odlitky lité do písku však bývá účinek stroncia nedostatečný a je nutno buď modifikovat sodíkem, nebo oba prvky kombinovat.** Při dávkování lze počítat asi s 90 % využitím Sr.

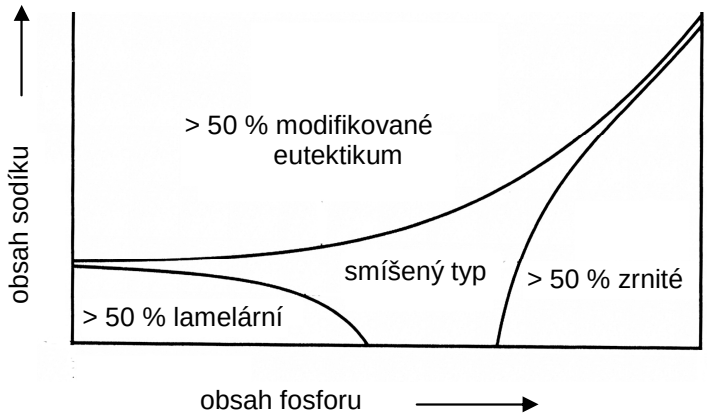
Zatímco ke změně struktury po modifikaci sodíkem dochází prakticky okamžitě, je u stroncia nutno respektovat určitou **„inkubační periodu", po kterou dochází k náběhu modifikačního účinku.** Délka inkubační periody závisí na použité modifikační předslitině, teplotě a na pohybu lázně, Před litím má být prodleva alespoň 5-10 min. Úroveň modifikace se však obvykle postupně zlepšuje po dobu několika desítek minut. Z tohoto důvodu **je vhodné neodlévat bezprostředně po modifikaci stronciem (na rozdíl od modifikace sodíkem).** Čím vyšší je teplota kovu, tím rychlejší je rozpouštění stroncia a rychlejší náběh modifikačního účinku.

Odeznívání modifikačního účinku stroncia

Ke ztrátám stroncia z taveniny dochází především oxidací. Ztráty vypařováním jsou nevýznamné. Odeznívání modifikačního účinku stroncia v tavenině je velmi pozvolné a dostatečný **modifikační účinek trvá několik hodin (běžně 3-6 hod.)** – proto se hovoří o polotrvalé modifikaci. Stroncium dokonce „přežije" i přetavbu slitiny, proto se někdy housky siluminů dodávají již v modifikovaném stavu. **Modifikaci stronciem, podobně jako modifikaci sodíkem, lze zrušit použitím přípravků, obsahujících chlor nebo fluor**, s kterými stroncium reaguje za vzniku $SrCl_2$ nebo dalších sloučenin. **Současná modifikace sodíkem a stronciem je možná** a nečiní žádné problémy.

Vliv nečistot na modifikaci sodíkem a stronciem

Podmínkou dobrého modifikačního účinku sodíku a stroncia je, aby ve slitině nebyly přítomny prvky, které jejich modifikační účinek ruší. Negativní vliv má zejména **fosfor** a to již při obsahu několika málo ppm. Na obr. 22 je zřejmé, že při vyšším obsahu fosforu je pro dosažení modifikované struktury nutný vysoký obsah sodíku (podobně i stroncia). Čím pomalejší je ochlazování (je delší doba tuhnutí slitiny), tím více škodlivý je účinek fosforu. Kontrola obsahu fosforu se považuje za klíčový předpoklad zajištění spolehlivé modifikace. Prvkem, který ruší modifikační účinek sodíku a stroncia je také antimon.



Obr. 22: Závislost struktury eutektika na obsahu P a Na

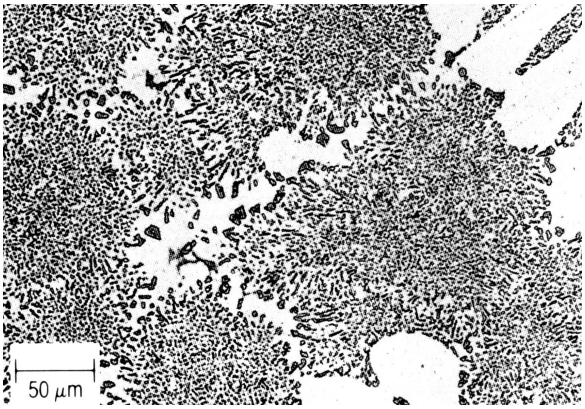
1.9.2.3 Modifikace antimonem

S označením „modifikace antimonem“ se někdy literárních pramenech i v praxi setkáme, i když se v tomto případě nejedná o modifikaci v pravém slova smyslu. Účinkem Sb vzniká pouze struktura s jemným, lamelárním křemíkem. **Antimon** se přidává do housek již v hutích **v množství 0,1-0,3 %. Účinek modifikace antimonem neodeznívá a je trvalý.**

Antimon ruší účinek sodíku a stroncia tím, že tvoří krystalizačně neaktivní sloučeniny – např. se sodíkem vzniká Na_3Sb_2. Z důvodu nebezpečí kontaminace se slitinami s Na a Sr vsázkovými materiály a vratným materiálem **se výslovně nedoporučuje ve slévárnách současně používat slitiny, modifikované sodíkem a slitiny, modifikované antimonem**. V našich slévárnách se modifikace antimonem prakticky nepoužívá.

1.9.2.4 Přemodifikování slitiny

Při překročení optimálního obsahu modifikačního prvku dochází k tzv. „přemodifikování“ slitiny. K přemodifikování sodíkem dochází při jeho obsahu nad asi 180 až 200 ppm. **Přemodifikovaná struktura je typická výskytem hrubých útvarů křemíku na hranici zrn – obr.23.** V důsledku odmíšení přebytečného sodíku vzniká na hranici zrn intermetalická fáze AlSiNa, která slouží jako krystalizační zárodky pro částice zrnitého křemíku.



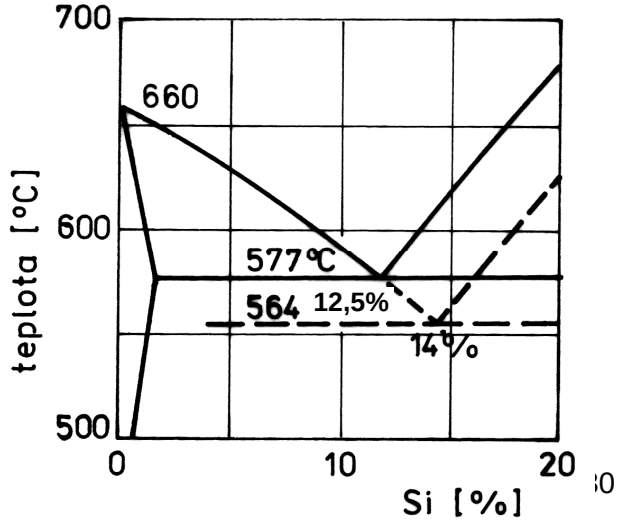
K podobnému jevu dochází při přemodifikování stronciem, kdy ve struktuře vznikají hrubší částice fáze Al_4SrSi_2. Důsledkem přemodifikování je pokles mechanických vlastností, zejména tažnosti.

Obr. 23: Přemodifikovaná struktura Al-Si

1.9.3 Kontrola úrovně modifikace

Vzhledem k tomu, že využití modifikačního prostředku, případně interakce s doprovodnými prvky, mohou být tavbu od tavby rozdílné, je vhodné před litím ověřit stupeň modifikace. Zvláště při modifikaci sodíkem musí být tato zkouška velmi rychlá. **Kontrola se provádí na základě chemického rozboru, termické analýzy, nebo změny elektrické vodivosti.** Laboratorně lze provádět **metalografické hodnocení**, obvykle porovnáním se vzorovými metalografickými etalony.

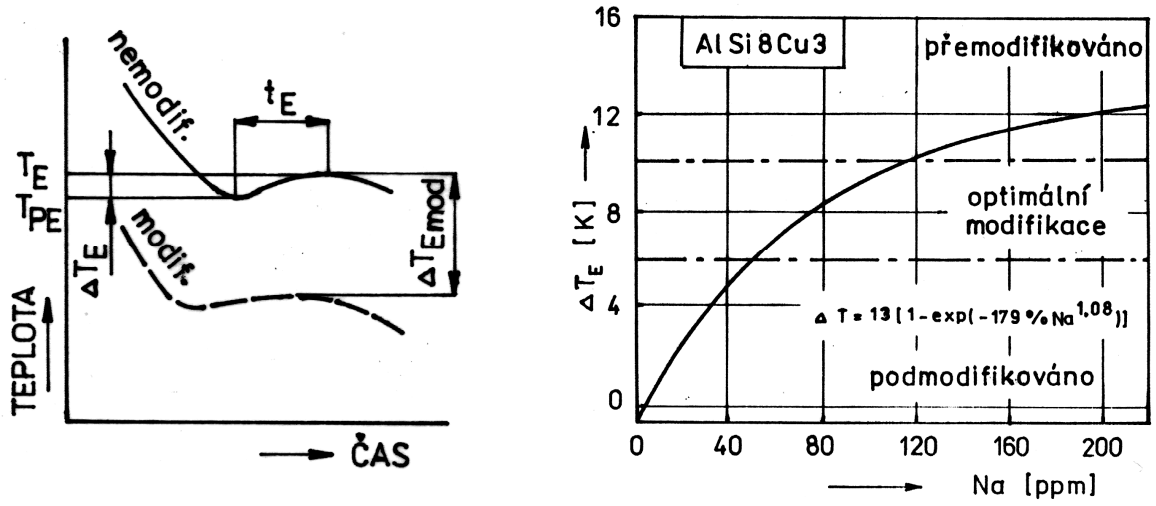
Chemický rozbor, provedený spektrálními přístroji, určuje celkové množství modifikačního prvku, tj. aktivního i vázaného v krystalizačně neúčinných chemických vazbách. Obsah, zjištěný spektrální analýzou proto nevypovídá jednoznačně o úrovni modifikace. Vzhledem k extrémně nízkým obsahům modifikačních prvků může být výsledek zatížen značně velkou chybou.



Spolehlivou metodou určení stupně modifikace je termická analýza. Možnost jejího použití vychází principielně ze skutečnosti, že **vlivem modifikace dochází ke snížení eutektické teploty v rovnovážném diagramu Al-Si** – obr. 24, v binárním systému z 577 °C teoreticky až o 13 K na hodnotu 564 °C.

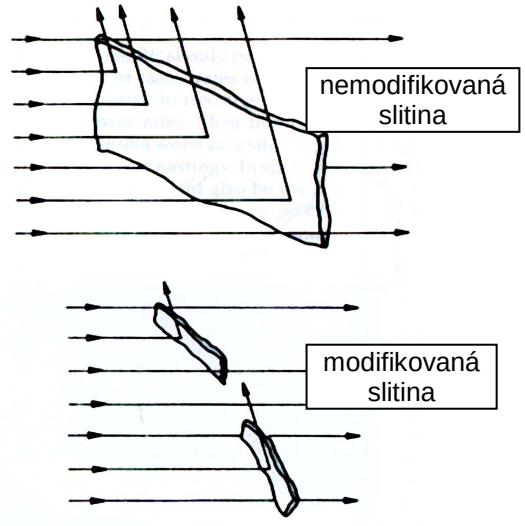
Obr.24: Posun eutektického bodu při modifikaci

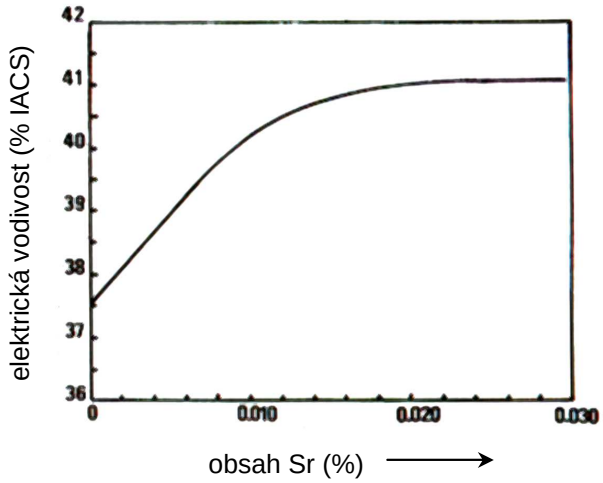
Mírou úrovně modifikace je snížení eutektické teploty oproti nemodifikované slitině. Při modifikaci sodíkem se eutektická teplota při optimální modifikaci snižuje asi o 6-10 K, při modifikaci stronciem asi o 5-7 K (podle druhu slitiny). Mezi množstvím modifikačního prvku ve slitině a snížením eutektické teploty je přibližně parabolická závislost, která vymezuje oblasti podmodifikované, správně modifikované, případně přemodifikované struktury – obr. 25. Hodnoty deprese eutektické teploty, které vymezují hranice mezi oblastmi, závisí na typu



slitiny a na modifikačním prvku.
Obr. 25: Hodnocení stupně modifikace podle snížení eutektické teploty

Metoda kontroly elektrické vodivosti využívá souvislosti elektrické vodivosti s morfologií eutektického křemíku. Velké útvary lamelárního křemíku představují větší elektrický odpor, než křemík modifikovaný (obr. 26) – **vlivem modifikace se tedy elektrická vodivost zvyšuje** (obr. 27). Vodivost se hodnotí v jednotkách relativní vodivosti mědi - % IACS. Používání této metody hodnocení eutektika však není příliš obvyklé.





Obr. 26: Princip účinku křemíku na elektrickou vodivost

Obr. 27: Závislost elektrické vodivosti na stupni modifikace

Elektrochemická metoda měření úrovně modifikace je založena na vzniku elektrického potenciálu mezi referenční elektrodou a taveninou hliníkové slitiny, modifikované sodíkem. Úroveň modifikace se měří kontinuálně pomocí sondy, ponořené do lázně. Takové zařízení bylo vyvinuto např. u fy. Foseco pod názvem COSMA (**Co**ntrolled addition of **S**odium **M**odifier to **A**luminium).

1.9.4 Vliv modifikace na vlastnosti hliníkových slitin

Mechanické vlastnosti se modifikací zvyšují v takové míře, jak se liší struktury nemodifikované a modifikované slitiny. To např. znamená, že při lití do pískových forem, u nichž se modifikací výrazně zjemní struktura oproti slitině nemodifikované, bude nárůst mechanických vlastností vlivem modifikace velký. Při lití do kovových forem pod tlakem se struktury v modifikovaném a nemodifikovaném stavu příliš neliší a proto i mechanické vlastnosti budou přibližně stejné. **Vliv modifikace nezáleží na přítomnosti modifikačního prvku, ale na dosažené struktuře.**

Modifikací se obecně příliš nezvyšuje pevnost v tahu. **Hlavní účinek modifikace se projevuje výrazným zvýšením tažnosti na hodnoty až nad 10 %.** Zvláště v kombinaci s následným tepelným zpracováním, se také, až o několik set procent, **zvyšuje houževnatost a rázová pevnost. Únavová pevnost se však téměř nemění.**

Zajímavé je srovnání mechanických vlastností vzorků slitiny A356 (AlSi7Mg0,3) s různou úrovní modifikace sodíkem, chladnoucích různou rychlostí a jejich vnitřní homogenita dle normy ASTM, hodnocená prozařováním (Gruzleski, Closset: The Treatment of Liquid Al-Si Alloys), které jsou uvedeny v tab. 4. Hodnoty potvrzují, že rychlost chladnutí má u hliníkových slitin klíčový význam. Modifikací lze index kvality dosti zvýšit. Ukazuje se však, že vlivem modifikace se, zejména u pomalu chladnoucích vzorků, prudce zhoršila vnitřní homogenita, částečně i pevnost.

Tab. 4: Vliv modifikace a rychlosti chladnutí na mechanické vlastnosti a homogenitu

Obsah Na (ppm)	Rychlost chladnutí											
	1230 °C/min				110 °C/min				17 °C/min			
	Rm	A5	Q	ASTM	Rm	A5	Q	ASTM	Rm	A5	Q	ASTM
0	292	5,7	405	0-1	263	2,5	322	1	242	1,4	263	1
40	281	10,1	431	1	260	5,5	371	3	216	2,0	261	5-6
120	271	11,1	427	1	251	5,7	364	3	213	3,4	292	6

Vliv modifikace na slévárenské vlastnosti:

- Zabíhavost se, podle většiny autorů, modifikací mírně zhoršuje. Tento vliv ale není jednoznačný a není příliš výrazný.
- Sklon ke vzniku trhlin se modifikací snižuje

- Celkový sklon ke stahování se modifikací nemění. Snižuje se však sklon ke vzniku soustředěných staženin a zvyšuje se rozsah ředin a mikrostaženin
- Modifikace částečně kompenzuje negativní vliv mikroporezity.

1.10 Krystalizace nadeutektických siluminů

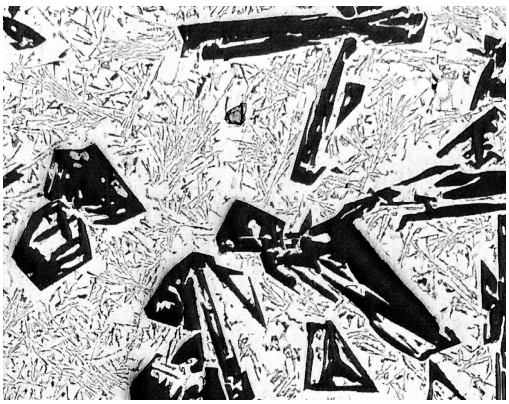
Podle rovnovážného diagramu Al-Si jsou nadeutektickými siluminy takové slitiny, které obsahují více než 12,5 % křemíku. Obvyklé nadeutektické komerční slitiny mívají do 14 % Si, vyrábí se však i slitiny s obsahem asi 18, ale i 22 % Si. S růstem obsahu křemíku se výrazně rozšiřuje pásmo tuhnutí. Obsah nad 20 % Si bývá výjimečný. Dalšími přísadovými prvky bývá měď, hořčík, mangan a nikl.

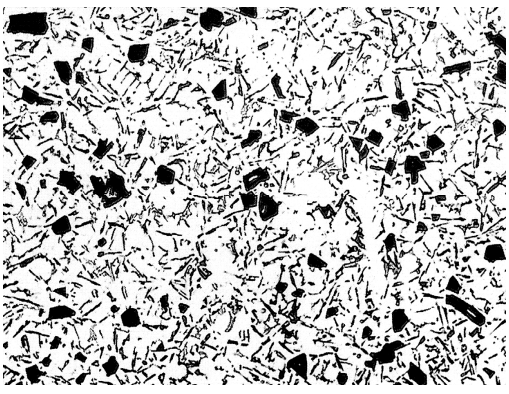
1.10.1 Struktura nadeutektických siluminů

Krystalizace nadeutektického siluminu začíná vznikem primárního křemíku. **Nukleačními zárodky jsou téměř výlučně částice fosfidu hlinitého AlP.** Vzhledem k běžnému obsahu fosforu pouze řádově několik ppm, je v základní slitině relativní nedostatek vhodných krystalizačních zárodků. Proto k zahájení krystalizace dochází při značném přechlazení pod rovnovážnou teplotou likvidu až několik desítek Kelvinů. Malý počet aktivních zárodků způsobuje, že vznikají velké krystaly křemíku s rozměry 20-120 μm. V závislosti na podmínkách tuhnutí mají částice křemíku hvězdicový, polyedrický tvar nebo podobu dendritů. **Velké částice tvrdého křemíku** sice zajišťují slitině výbornou odolnost proti opotřebení, současně však velmi **zhoršují obrobitelnost a brání dosazování kovu při tuhnutí.**

Tuhnutí je zakončeno krystalizací eutektika které, vzhledem k přítomnosti určitého množství fosforu, má zrnitý charakter. Byly zkoušeny možnosti zjemnění, resp. modifikace eutektika, avšak bez praktického uplatnění.

V mírně nadeutektických slitinách se můžeme setkat s odchylkami, kdy se ve struktuře mohou vyskytovat dendrity primární fáze α(Al), případně jak primární α(Al), tak primární křemík. Příčinou toho je, že průběh tuhnutí je dynamický děj, který neprobíhá přesně podle rovnovážného diagramu a uplatňuje se rovněž vliv dalších prvků. Podobně jako vlivem modifikace (viz.obr. 24) se při reálných rychlostech ochlazování eutektický bod posouvá k vyššímu obsahu křemíku a k nižším teplotám. Z tohoto důvodu lze ve slitinách s obsahem 12-14 % Si někdy pozorovat vedle primárního Si a eutektika i dendrity primárního hliníku. Mírnou modifikací stronciem je možno získat strukturu modifikovaného eutektika.





1.10.2 Očkování nadeutektických siluminů

Zjemnění hrubých útvarů primárního křemíku se dosahuje očkováním. Očkovacím prostředkem je fosfor, který reaguje s tekutým hliníkem za vzniku velkého množství zárodků AlP, na nichž krystalizují podstatně menší útvary primárního křemíku, než tomu bylo u neočkované slitiny. Fosfor se do lázně vnáší v podobě solí – zejména PCl_5, nebo předslitin

CuP10 nebo slitinou Ni-P. (Je možné také očkovat červeným fosforem.)

Obr. 28: Struktura nadeutektické slitiny Al-Si:
neočkované (nahoře)
očkované (dole)

Optimální množství přidaného fosforu je v rozmezí asi 30-60 ppm, někdy se však dávkuje i více než 100 ppm. **Čím je ve slitině vyšší obsah křemíku, tím vyšší musí být dávkování fosforu.**

Při očkování se kovová očkovadla ponoří do taveniny a zamíchají, očkovací soli se přidávají na hladinu a zvonem ponoří ke dnu lázně. Soli se dávkují v množství asi 1 % hmotnosti taveniny. K odeznívání očkovacího účinku dochází pravděpodobně aglomerací částic AlP, která vede ke snížení počtu zárodků. Odeznívání však probíhá pomalu a očkovací účinek je dlouhodobý – bez problémů lze uvažovat s dobou 3-5 hod. Naočkovanou slitinu je možné i přetavit.

Vlivem naočkování se výrazně zmenší přechlazení na počátku krystalizace primárního křemíku. Velikost částic primárního křemíku se sníží na přibližně 10-30 μm. **Zjemnění struktury se projeví především zlepšením obrobitelnosti, snadnějším dosazováním kovu během tuhnutí a zvýšením mechanických vlastností,** zvláště u slitin s vysokým obsahem Si. Odolnost proti otěru se prakticky nemění.
.

1.11 Přísadové prvky a nečistoty ve slitinách Al-Si

Křemík

Křemík je ve slitinách Al-Si základním přísadovým prvkem. Ve slévárenských slitinách vyšší obsah křemíku zúžuje interval tuhnutí a **zlepšuje téměř všechny slévárenské technologické vlastnost**i. Mechanické vlastnosti se zvyšují legováním malými obsahy Cu, Mg a Ni. **Slitiny s nižšími obsahy křemíku (menší podíl eutektika) je vhodné očkovat, slitiny s velkým podílem eutektika modifikovat** (obě metalurgické metody lze rovněž spolu kombinovat).

S rostoucím obsahem křemíku se mění zejména následující vlastnosti slitin:

- zvyšuje se zabíhavost
- zmenšuje se součinitel stahování během tuhnutí a zejména sklon ke vzniku mikrostaženin
- snižuje se nebezpečí trhlin (za tepla) a prasklin (za studena)
- pevnost a tažnost binárních slitin Al-Si je jen střední a s obsahem křemíku se příliš nemění
- zlepšují se kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru
- zmenšuje se tepelná roztažnost
- zvyšuje se korozní odolnost

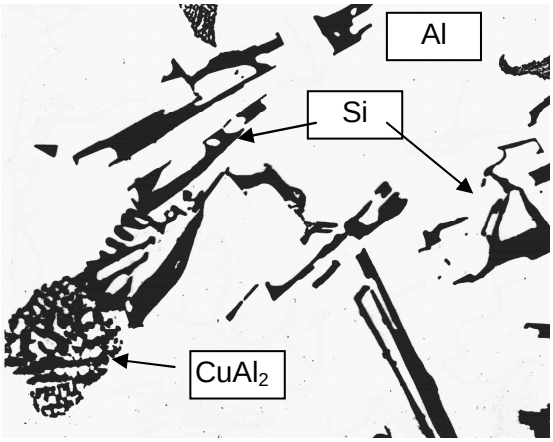
Nevýhodou slitin s vysokým obsahem Si je jejich poněkud vyšší cena.

Měď

Měď je nejběžnější přísadový prvek. **Obsah mědi v siluminech** se pohybuje do **5 %Cu**. V tuhém roztoku α(Al) má měď omezenou rozpustnost, takže již při obsahu kolem 1 %Cu se ve struktuře objevuje potrojné eutektikum Al-Si-$CuAl_2$ s rovnovážnou teplotou tuhnutí 524 ^{o}C.

Intermetalická fáze $CuAl_2$ má typický vzhled, zřetelný na obr. 29. Při tuhnutí měď značně **rozšiřuje interval tuhnutí** siluminů a tím může podporovat vznik ředin a trhlin za tepla.

Za přítomnosti hořčíku tvoří měď vícesložková eutektika, zejména eutektikum Al-Si-$CuAl_2$-$Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ s rovnovážnou teplotou tuhnutí 507 °C, které však při reálné rychlosti ochlazování tuhne až při teplotě kolem 480 °C.



Obr. 29: Eutektická fáze mědi

Do slitiny se měď dostává především ze vsázkových surovin, zejména šrotu, znečištěného mědí. Pro legování se používají předslitiny AlCu. Ze slitin nelze měď běžnými metalurgickými postupy odstranit.

Měď v siluminech **zvyšuje pevnost a tvrdost, snižuje tažnost a zhoršuje korozní odolnost**. Ve slitinách s nároky na vysokou korozní odolnost a ve slitinách **pro potravinářské účely je obsah Cu limitován velmi nízkými hodnotami** (až na max. 0,05%Cu). Měď významně **zlepšuje obrobitelnost**. Při obrábění vzniká krátká, snadno lámavá tříska, obráběný povrch je kvalitní, hladký.

Hořčík

Hořčík je ve slitinách Al-Si velmi důležitým prvkem, který **umožňuje provádět vytvrzování** za tepla. Přidává se **v množství 0,3 – 0,7 %.** V litém stavu má hořčík na pevnost jen malý vliv, snižuje však tažnost. V množství, které bývá do slitiny přidáváno, nemá hořčík praktický vliv na změnu slévárenských vlastností ani na odolnost proti korozi. Ve vytvrzeném stavu však je obsah hořčíku významný - čím vyšší je obsah Mg, tím vyšších pevností se dosahuje.

V litém stavu tvoří hořčík intermetalickou fázi Mg_2Si, která tvoří eutektikum Al-Si-Mg_2Si s teplotou tuhnutí asi 555 °C. Toto eutektikum tvoří ve struktuře drobné kostrovité útvary. Vzhledem k tomu, že za vysokých teplot je rozpustnost Mg v Al značně vysoká, při homogenizačním žíhání se částice fáze Mg_2Si v matrici hliníku zcela rozpouští.

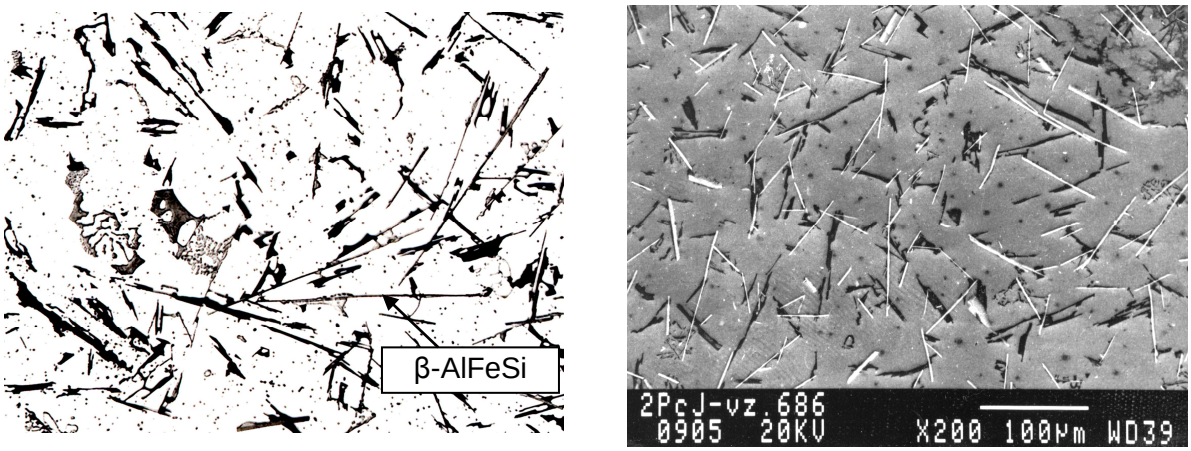
Jak již bylo uvedeno, za přítomnosti mědi tvoří hořčík přednostně fáze s mědí. Ve slitinách bez mědi však reaguje se železem a tvoří eutektikum Al-Si-Mg_2Si-$Al_8Mg_3FeSi_6$ s teplotou tuhnutí 554 °C. Tato fáze dosti výrazně snižuje tažnost slitiny.

Železo

Železo je prvkem, který se obvykle považuje za nečistotu. Jeho vliv se spojuje zejména **s nepříznivým účinkem na mechanické vlastnosti**. Do siluminů se dostává ze vsázkových surovin nebo rozpouštěním železa z nenatřeného tavírenského nářadí, z kovových forem, zalitých kovových sítek apod. Rozpouštění železa v tekutém hliníku je poměrně intenzivní – nejedná se ale o tavení.

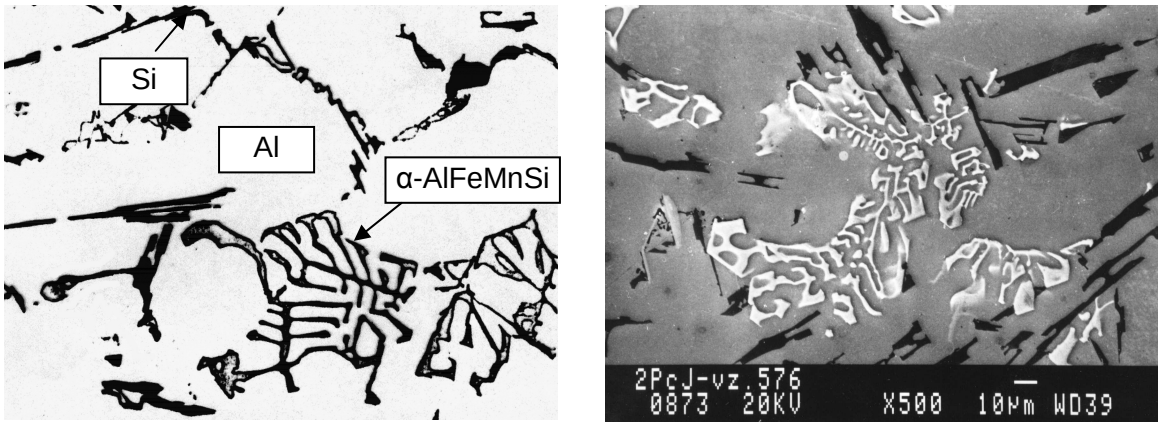
V tuhém hliníku nemá železo téměř žádnou rozpustnost (má velmi nízký rozdělovací koeficient – viz tab. 1) a proto **již při malém obsahu tvoří různé intermetalické sloučeniny**. Nejdůležitějšími jsou **jehlicová** fáze Al_5FeSi, označovaná jako fáze **β-AlFeSi** a **tvarově více kompaktní fáze** $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, označovaná jako **α-AlFeMnSi** a podle tvaru jako **„čínské písmo“ nebo také „rybí kost“.**

Fáze β-AlFeSi vzniká v rozmezí intervalu tuhnutí při teplotách kolem 580 ^{o}C, tj. před vyloučením lamel křemíku. Má monoklinickou mřížku a tvoří hrubé deskovité útvary (na výbrusu viditelné jako jehlice), které porušují strukturu siluminu a **výrazně zhoršují jeho vlastnosti** – obr.30.



Obr.30: Jehlicová fáze železa: - vlevo optická, vpravo elektronová metalografie

Fáze α-AlFeMnSi má hexagonální mřížku a **vzniká zejména za přítomnosti manganu**, který částečně nahrazuje atomy železa, při teplotě přibližně kolem 590 ^{o}C. (Teploty vzniku všech intermetalických fází se v závislosti na obsahu prvků, jejich kombinaci a na rychlosti tuhnutí pohybují v poměrně širokých rozmezích.) Struktura čínského písma je na obr. 31.



Obr. 31: Fáze typu čínské písmo

Vliv železa na mechanické vlastnosti velmi závisí na morfologii a disperzitě vznikajících intermetalických fází. **Hrubé částice** fází železa, které vznikají zejména při pomalém ochlazování při lití do pískových forem, mají **velmi nepříznivý vliv na tažnost a dynamické vlastnosti slitin. Drobnější částice, které se vylučují při rychlém ochlazování při lití do kovových forem jsou mnohem méně škodlivé**. Rovněž tvarově kompaktní částice α-fáze mají podstatně méně škodlivý účinek na mechanické vlastnosti, než jehlicová β-fáze.

U běžných odlitků se obvykle připouští obsah železa **do 0,6 %.** Pro **vysokopevné,** dynamicky namáhané odlitky však bývá limitován i **pod 0,15 %Fe**. Při rychlém chladnutí je negativní účinek Fe na vlastnosti méně výrazný. **Při obsahu nad asi 0,4 % se doporučuje,**

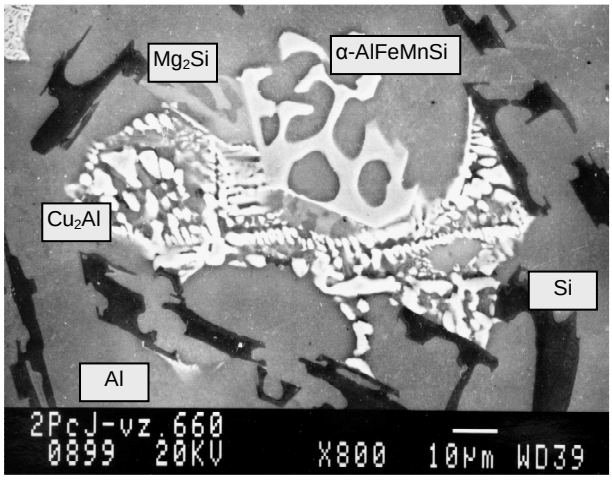
aby se škodlivý vliv železa kompenzoval přidáním manganu. Za přítomnosti dalších prvků se mění druhy a tvar fází železa a tvoří se vícesložkové fáze. Vlivem modifikace sodíkem nebo stronciem se obvykle zvětšuje sklon ke vzniku jehlicové fáze.

Slévárenské vlastnosti – železo v malém množství nemá na slévárenské vlastnosti prakticky žádný vliv. Při vyšších obsazích se však zvětšuje sklon ke vzniku trhlin za tepla a možnost tvorby tzv.„vpadlin“ na povrchu odlitků. Hrubé fáze železa, které krystalizují v teplotním intervalu mezi likvidem a eutektickou teplotou mohou bránit dosazování tekutého kovu při tuhnutí a tak podporují tvorbu ředin**. Při tlakovém lití se vlivem železa snižuje lepení kovu na formu,** což usnadňuje vyjímání odlitků a podstatně zvětšuje životnost forem a jader. Proto **slitiny pro tlakové lití běžně obsahují kolem 1 % Fe**.

Obrobitelnost – do obsahu asi 1,2 % Fe nemá železo podstatný vliv na obrobitelnost. Při vyšším obsahu se obrobitelnost zhoršuje.

Odolnost proti korozi – se vlivem železa mírně zhoršuje. Slitiny do korozního prostředí mají mít snížený obsah železa.

Mangan



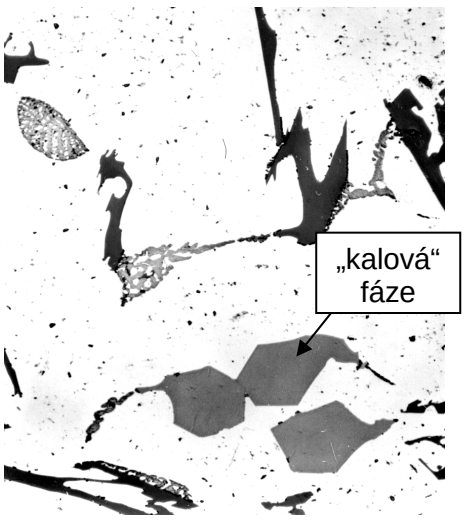
Hlavním úlohou manganu ve slitinách Al-Si je **kompenzace nepříznivého vlivu železa.** Mangan v hliníku má rozdělovací koeficient k_0=0,72, proto má jen malou segregaci a netvoří vlastní fáze. Vstupuje ale do fází železa a mění jejich morfologii. Za přítomnosti Mn se velmi škodlivá jehlicová fáze β-AlFeSi mění na kompaktní částice α-AlFeMnSi. **Obsah manganu by měl být roven asi ½ obsahu železa.**

Obr. 32: Komplexní intermetalická fáze

V obvyklém množství nemá mangan na slévárenské vlastnosti siluminů vliv. Díky kompenzačnímu účinku na vznik nepříznivých fází železa se zvyšují mechanické vlastnosti, zejména se snižuje křehkost slitin.

Ve slitinách, které současně obsahují více z uvedených prvků, vzniká celá řada různých intermetalických fází, které tvoří někdy dosti bizardní útvary. Takový příklad je znázorněn na obr. 32.

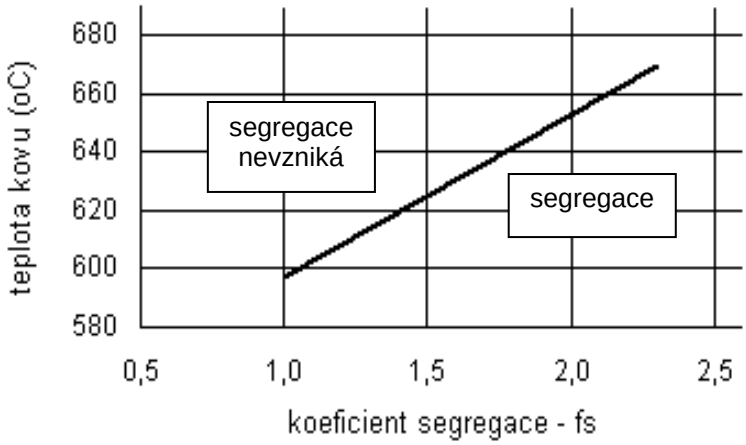
Tvrdé fáze (kalové fáze, sludge)



Tzv. „kal“ je intermetalická fáze, která vzniká **u slitin s vyšším obsahem železa, manganu a chromu** při udržování taveniny na poměrně nízké teplotě. Je to polyedrická fáze, chemicky v podstatě fáze α-AlFeMnSi, která vzniká peritektickou přeměnou. Částice (viz obr. 33) mají hustotu kolem 3500 kg.m^{-3}, proto v tavicích agregátech (někdy i v masivnějších odlitcích s dlouhou dobou tuhnutí) sedimentují a tvoří na dně kelímku a v kanálcích indukčních pecí těžko odstranitelné nárosty. Kalové fáze zvyšují opotřebení

licích strojů a kovových forem, snižují tekutost kovu, výrazně zhoršují obrobitelnost odlitků. Teplota vzniku „kalové“ fáze závisí na komplexním vlivu Fe,Mn a Cr, který se vyjadřuje tzv. koeficientem segregace – f_s.

f_s = %Fe + 2. %Mn + 3. %Cr



Obr.33: „Kalové“ fáze v siluminu

Kal vzniká, jestliže teplota taveniny je nižší, než odpovídá přímce na obr. 34 (Konkrétní poloha přímky závisí na typu slitiny.) Kalové fáze nelze zvýšením teploty znovu roztavit, proto je nutno preventivně zamezit jejich vzniku udržováním taveniny na dostatečně vysoké teplotě.

Obr.34: Teplota vzniku „kalu“

Nikl

Maximální rozpustnost niklu v hliníku při eutektické teplotě je pouze asi 0,05 % Ni, při normální teplotě méně než 0,01 %. **Nikl tvoří ve slitině intermetalickou fázi Al_3Ni** s teplotou tuhnutí 640 ^oC. Za přítomnosti mědi a železa vznikají vícesložkové fáze, např. $(Ni,Cu)_2FeAl_7$. Tyto fáze mají dobrou tepelnou stabilitu, proto slitiny s obsahem 1-2 % Ni si zachovávají **dobré mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot**. Slitiny s niklem mají i poněkud menší součinitel teplotní roztažnosti. Z tohoto důvodu se používají zejména pro písty a hlavy válců motorů.

Slévárenské vlastnosti se s obsahem niklu zhoršují. Vyloučení velmi jemné intermetalické fáze niklu nemá prakticky žádný vliv na obrobitelnost ani na odolnost proti korozi. Obdobné účinky jako nikl má i kobalt.

Zinek

Zinek nepatří mezi typické legury. V množství 1-3 % bývá obsažen v některých slitinách typu Al-Si-Cu. Zinek zvyšuje tekutost slitin a jejich zabíhavost, rovněž zlepšuje obrobitelnost. Při tlakovém lití se snižuje lepení kovu na formy. Při obsahu do 2-3 %Zn dochází k mírnému zvýšení mechanických vlastností. Při vyšším obsahu však roste sklon ke vzniku trhlin. Ve slitinách pro lití do písku bývá obsah zinku < 1%.

Titan

Ve slitinách hliníku je titan rozpustný v α(Al) do obsahu asi 0,2 % Ti. Při vyšším obsahu vznikají ve struktuře tvrdé krystaly Al_3Ti nebo TiC, které se vylučují ve shlucích a činí problémy při obrábění, leštění a při anodické oxidaci. **Nejvýznamnějším vlivem titanu ve slitinách hliníku je jeho očkovací účinek.** Sloučenina Al_3Ti tvoří krystalizační zárodky pro nukleaci primární α(Al) fáze a způsobuje zjemnění zrna. Očkovací účinek titanu se zvyšuje

za přítomnosti bóru, s nímž tvoři fázi TiB_2. Titan se v mnoha slitinách leguje v množství 0,1-0,2 %Ti, je rovněž součástí očkovacích solí a předslitin.

Vlivy titanu na další vlastnosti souvisí nepřímo s jeho zjemňujícím účinkem. Díky zjemnění primárního zrna se mírně zlepšuje obrobitelnost, odolnost proti korozi i možnosti povrchové úpravy odlitků.

Další přísadové prvky a nečistoty ve slitinách Al-Si

Vápník je doprovodný prvek, který se do siluminů dostává obvykle s křemíkem. Jeho obsah bývá řádově v tisících procenta. Při obsahu nad asi 50 ppm má vápník slabý modifikační účinek, který se však prakticky nevyužívá. Snadno reaguje s kyslíkem a vlhkostí a tím významně **zvyšuje sklon k naplynění a tvorbě mikrostaženin**. Je považován za nežádoucí prvek. Maximální obsah bývá limitován hodnotou 150 ppm Ca.

Berylium – u hliníkových slitin (stejně jako u dalších typů slitin) v množství již několika setin procenta vytváří na hladině taveniny ochrannou vrstvu, která **výborně slitinu chrání před další oxidací.** Rovněž příznivě ovlivňuje morfologii intermetalických fází železa a tím zlepšuje mechanické vlastnosti. Přísada berylia se však používá zcela výjimečně.

Vanad, chrom, bór zirkonium – tyto prvky se někdy využívají pro zjemnění primárního zrna. Do určité míry rovněž stabilizují precipitáty, vzniklé při vytvrzování.

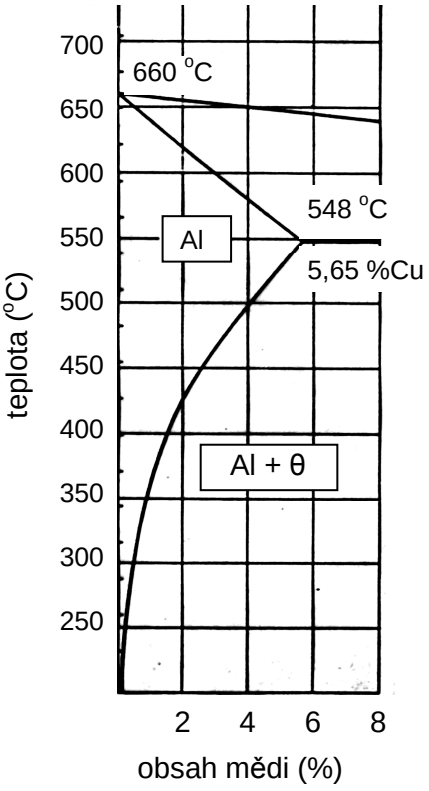
Olovo, kadmium, vizmut – považují se za prvky s velmi nepříznivým vlivem na houževnatost odlitků.

Lithium – je kovem s velmi nízkou hustotou (<1 $g.cm^{-3}$ – je lehčí, než voda) a s mimořádně velkou reaktivností. Používá se ve slitinách s hliníkem nebo i hořčíkem v množství do asi 5 %Li, za účelem snížení jejich hustoty. Tyto slitiny se používají pro součástky v letectví a kosmonautice. Metalurgické a technologické problémy jsou extrémně velké a rozsah jejich používání proto velmi omezený.

Stříbro – i když je legování stříbrem velmi výjimečné, je vhodné zmínit jeho mimořádně příznivý účinek na vytvrzovací pochody. Slitiny s obsahem 0,5-1 % Ag dosahují po vytvrzení pevnosti v tahu až 400-500 MPa.

Kobalt – má podobné účinky jako nikl. Kompenzuje nepříznivý vliv železa.

1.12 Slitiny Al - Cu



Měď tvoří s hliníkem slitiny s omezenou rozpustností v tuhém roztoku α(Al) a s eutektikem, které je tvořeno fázemi α(Al) a intermetalickou fází Al_2Cu, označovanou jako fáze θ. Eutektická teplota je 548 °C, eutektická koncentrace 33,2 % Cu. Rozpustnost mědi v hliníku při eutektické teplotě je maximálně 5,7 % a při ochlazování se snižuje (při 300°C je již pouze 0,45 %Cu a při nižších teplotách dále klesá). Snižující se rozpustnost Cu umožňuje provádět vytvrzování. **Vytvrzování** se provádí **za tepla i za studena**.

Slévárenské slitiny obsahují obvykle 4-5 % Cu. Slitiny s obsahem mědi, přesahující maximální rozpustnost v Al nemají technický význam.

Oblast rovnovážného diagramu, odpovídající používaným prakticky slitinám těchto slitin je znázorněna na obr. 35.

Normalizované slitiny Al-Cu obsahují titan v množství do asi 0,3 % Ti pro zjemnění primárního zrna. Dalšími přísadovými prvky bývají hořčík do 0,35 %Mg, který zvyšuje pevnost, nebo mangan do 0,5%Mn.

Obr. 35.: Rovnovážný diagram Al - Cu

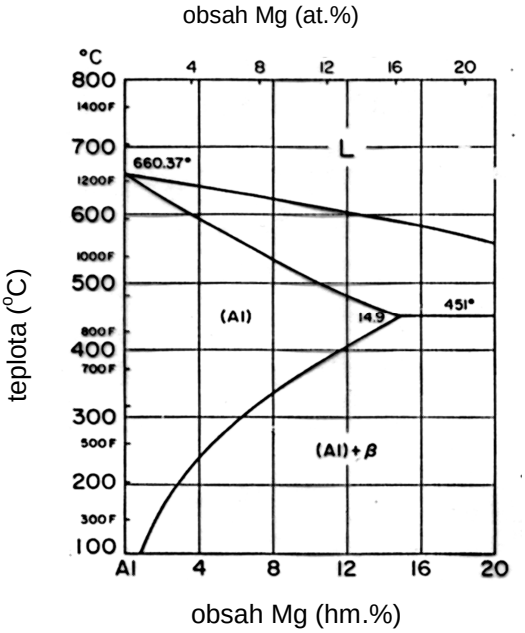
Přísada dalších prvků zajišťuje u slitin Al-Cu některé jejich velmi zajímavé vlastnosti.

- Pro použití za zvýšených teplot mohou slitiny obsahovat asi 2 % Ni a asi 1,5 % Mg. Při vytvrzování těchto slitin vzniká precipitát fáze $NiAl_3$. Tyto slitiny mají dobrou pevnost a tvrdost při vyšších teplotách. (Slitiny s obsahem Ni nejsou normovány podle ČSN EN 1706.)
- Přísada 0,4-1 %Ag zajišťuje slitině po vytvrzování mimořádně vysoké mechanické vlastnosti při normální i zvýšené teplotě. (Pevnost v tahu při normální teplotě až 450 MPa, tažnost kolem 15 %.) Tyto slitiny mají rovněž velmi dobrou odolnost proti korozi pod napětím.

Slitiny Al-Cu patří k tzv. vysokopevným slitinám hliníku. Vyznačují se vysokou pevností až nad 400 MPa. Tažnost a lomová houževnatost jsou až dvojnásobné oproti slitinám Al-Si. Odlitky z těchto slitin jsou vhodné pro použití za zvýšených teplot.

Slévárenské vlastnosti slitin Al-Cu jsou **velmi špatné**. V důsledku širokého intervalu tuhnutí jsou slitiny **obtížně nálitkovatelné**. Pro zajištění vnitřní homogenity je nutné, aby probíhalo tuhnutí bylo usměrněné s velkým teplotním gradientem. Slévárenské vlastnosti se zlepšují přísadou křemíku, ovšem za cenu podstatného snížení pevnostních vlastností. Proto slitiny s křemíkem nejsou v normách EN ČSN uváděny. Z důvodu špatných slévárenských vlastností se použití těchto slitin omezuje a stále častěji se nahrazují slévárensky příznivějšími slitinami typu Al-Si.

1.13 Slitiny Al - Mg



Hořčík tvoří s hliníkem slitiny s maximální rozpustností 17,4 %Mg při eutektické teplotě 450 °C. S poklesem teploty se rozpustnost rychle snižuje (při teplotě 300 °C je asi 5,3 %, při 200 °C 2,9 %. Vlivem přísadových prvků se rozpustnost Mg dále snižuje. Eutektikum je tvořeno fázemi α(Al) a Al_8Mg_5, označované jako fáze β. Eutektická koncentrace je 34,5 %Mg – obr.36. Pokud je ve slitině obsažen křemík v množství cca 1 %, váže se hořčík především do sloučeniny Mg_2Si. Ta se vylučuje jako intermetalická fáze, která umožňuje provádět vytvrzování. Vytvrzování umožňuje rovněž měď a zinek, obvykle se však odlitky používají ve stavu tepelně nezpracovaném.

Obr. 36.: Rovnovážný diagram Al – Mg

Podle obsahu hořčíku se slévárenské slitiny Al-Mg dělí na typy se 3, 5 a 9 % Mg. Čím **vyšší je obsah hořčíku,** tím širší je dvoufázové pásmo tuhnutí a tím **horší** jsou **slévárenské vlastnosti**. Slévárenské vlastnosti, zabíhavost, sklon ke vzniku rozptýlených staženin, trhlin, možnost nálitkování, se však u slitin Al-Mg všeobecně hodnotí jako špatné. Určitého zlepšení slévárenských vlastností je možno dosáhnout přísadou malého množství Si (podle druhu slitiny od 0,5 do 2,5 %Si). Křemík ale snižuje tažnost a z tohoto hlediska se doporučuje udržovat jeho obsah co nejnižší.

Slitiny mají velký sklon k naplynění. V důsledku vzniku plynových bublin a přítomnosti rozptýlených staženin lze jen obtížně dosáhnout nepropustnosti odlitků. Při tavení se kov nemá zbytečně přehřívat, neboť naplynění s teplotou výrazně vzrůstá. Rovněž dochází ke zhrubnutí zrna. Sklon k naplynění se velmi účinně snižuje malou přísadou berylia (10-30 ppm). Berylium snižuje sklon hořčíku k oxidaci a tím rovněž zlepšuje tekutost a zabíhavost slitiny.

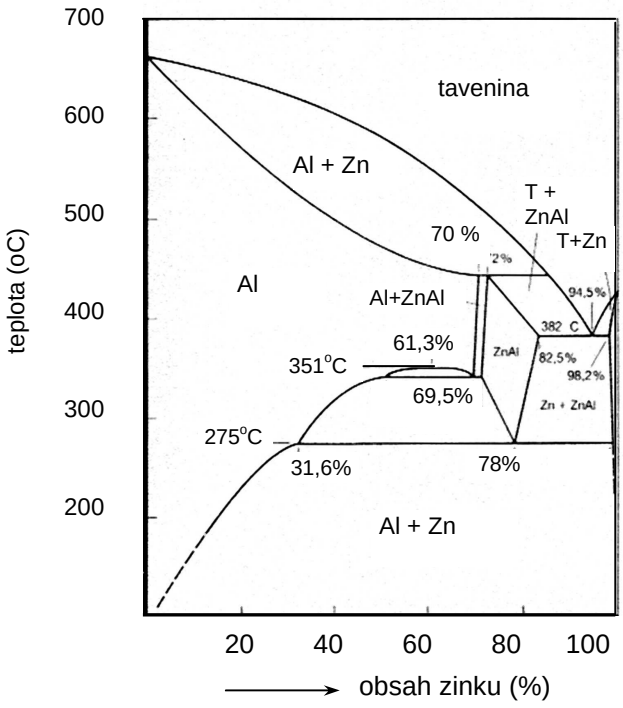
S rostoucím obsahem hořčíku se zvyšuje tvorba oxidů **MgO**. Ty, na rozdíl od Al_2O_3 u siluminů, **nechrání hladinu před další oxidací**. S hořčíkem také vzrůstá reaktivita slitiny vůči atmosféře i vůči materiálu forem.

Slitiny Al-Mg se obvykle odlévají gravitačně do pískových forem nebo do kovových forem. Při lití do pískových forem dochází k reakci kovu s formou. Proto se doporučuje přidávat do formovací směsi kyselinu boritou. Slitina s 9 %Mg má v důsledku mimořádně širokého pásma tuhnutí velmi špatné slévárenské vlastnosti a používá se pouze pro tlakové lití.

Mechanické vlastnosti slitin Al-Mg jsou poměrně špatné. Pevnosti s obsahem hořčíku rostou, zůstávají však pod pevnostmi běžných siluminů. Tažnosti jsou však poněkud vyšší (při odlévání do písku $A_5 > 3$ %, do kovových forem > 5 %). Při teplotách nad asi 100 °C se mechanické vlastnosti zhoršují. Příznivou vlastností tohoto typu slitin je **vynikající obrobitelnost a leštitelnost** (asi nejlepší ze všech slitin hliníku).

Slitiny Al-Mg se používají v případech, kdy se vyžaduje **vysoká odolnost proti korozi**, zvláště proti mírně alkalickému prostředí a proti mořské vodě, např. při stavbě lodí, v chemickém průmyslu, potravinářství apod. Přítomnost mědi a zinku ve slitině korozní odolnost snižují. Slitiny jsou **dobře leštitelné a výborně se eloxují**.

Možnost povrchové úpravy je jednou z mála vysoce ceněných vlastností slitin Al-Mg. Do obsahu asi 4 % Mg (při vyšším obsahu po homogenizačním žíhání) je možno provádět anodickou oxidaci a odlitky leštit. Z tohoto důvodu jsou **velmi vhodné pro dekorativní účely**. Leštitelnost je tím lepší, čím nižší je obsah křemíku. Eloxováním se dále zlepšuje odolnost slitiny proti korozi.



Rozsah výroby odlitků ze slitin Al-Mg je celkově velmi malý a důvodem pro jejich volbu jsou pouze korozní odolnost a možnost dosažení výborného vzhledu povrchu, ceněného u dekorativních předmětů. V jiných případech se raději volí slitiny typu Al-Si.

1.14 Slitiny Al – Zn

Hliník tvoří se zinkem eutektický systém s eutektickou teplotou 382 °C a obsahem zinku 94,5 %. V oblasti vysokých teplot je rozpustnost zinku v α(Al) až asi 70 %, s poklesem teploty se snižuje až na 2% při pokojové teplotě – obr.37. Za přítomnosti mědi se zvyšuje rozpustnost zinku na 5,5 %Zn, proto v technických slitinách zůstává zinek v tuhém roztoku.

Při současném obsahu zinku a hořčíku se rozpustnost Zn velmi snižuje a vznikají intermetalické fáze $MgZn_2$+$Al_2Zn_3Mg_3$, které umožňují vytvrzování. Jestliže je však v takové slitině současně přítomen i křemík, váže se na něj hořčík ve sloučenině Mg_2Si a Zn zůstává rozpuštěn v tuhém roztoku α(Al).

Obr. 37: Rovnovážný diagram Al-Zn

Technické slitiny obsahují **obvykle 5-7 % Zn a do 1 % Mg**. Tyto slitiny se **samovolně vytvrzují za studena** a po době 20-30 dní dosahují pevnost v tahu kolem 250 MPa při tažnosti přes 5 %, tvrdost je přibližně 70 HB. Z technologických vlastností je důležitá **vysoká rozměrová stabilita, dobrá odolnost proti korozi a dobrá obrobitelnost. Kvalita povrchu po obrobení, případně po eloxování je vynikající. Součástky lze výborně pájet.** Nevýhodnou vlastností těchto materiálů je náchylnost ke korozi pod napětím.

Slévárenské vlastnosti jsou střední až špatné. Slitiny mají značný sklon ke vzniku staženin a zejména **velký sklon k praskání za tepla**. Také těsnost odlitků nebývá příliš dobrá. Vzhledem ostatním dobrým vlastnostem je tato skupina slitin stále předmětem zájmu a snaha se zaměřuje na snížení sklonu k praskání za tepla. Předpokládá se, že kombinací vhodných legur je reálné dosažení pevností až kolem 500 MPa.

V normě ČSN EN 1706 je pod označením EN AC-71000 uvedena 1 slitina typu AlZn5Mg, určená pro lití do pískových nebo kovových forem gravitačně. Používá se ve stavu žíhaném na odstranění vnitřního pnutí při teplotách kolem 340^{o}C – 2 hod., s ochlazením na vzduchu. V našich slévárnách se tato slitina téměř nepoužívá.

2 PŘEHLED SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU

1.15 Značení slitin hliníku na odlitky

Slévárenské slitiny hliníku jsou v ČR od roku 2000 normovány podle evropské normy ČSN EN 1706, která nahradila dřívější normu ČSN 4243xx a 4245xx. V českých slévárnách se velmi často používá značení podle původní německé normy DIN 1725 a toto značení používá rovněž „Vereinigung Deutscher Schmelzhütten – VDS. Méně často se v ČR používá značení podle amerických norem ASTM nebo jiných systémů norem.

Podle ČSN EN 1706 se slitiny značí buď číselně, nebo chemickými značkami.

Číselné značení slitin

Číselně se slitina označuje písmeny EN AC a pětimístným číslem, ve tvaru

EN AC-XXXXX

První číslice charakterizuje hlavní přísadový prvek a to:

2 – slitiny Al – Cu
4 - slitiny Al - Si
5 - slitiny Al – Mg
7 - slitiny Al - Zn

Druhá číslice udává skupinu slitin a prakticky se využívá pouze u slitin Al-Si.
Třetí číslice je pořadové číslo ve skupině.
Čtvrté a páté číslice jsou 0.

Označení slitin chemickými značkami

Za úvodním EN AC-Al se uvádí další přísadové prvky a to v pořadí od hlavního přísadového prvku k vedlejším prvkům. Ty jsou seřazeny podle obsahu v sestupném pořadí. Při množství legury nad 1% se procentuelní množství udává číslem za značkou příslušného prvku. Při obsahu prvku < 1% se číslo za značku prvku nepíše.

V tab.5 jsou uvedeny jednotlivé skupiny slitin hliníku a jejich číselné značení a značení chemickými značkami. (Pokud je ve skupině více slitin, jsou v této tabulce u číselného označení na 3. až 5. místě uvedeny křížky. U značení chemickými značkami jsou v závorkách uvedeny další obsahy daného prvku v různých slitinách této skupiny.)

Tab. 5: Způsob značení slitin hliníku dle ČSN EN 1706

skupina slitin	označení slitiny	
	číselné	chemickými značkami
AlCu	EN AC-21xxx	EN AC-Al Cu4
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi
AlSi7Mg	EN AC-42xxx	EN AC-Al Si7Mg 0,3(0,6)
AlSi10Mg	EN AC-43xxx	EN AC-Al Si10(9)Mg
AlSi	EN AC-44xxx	EN AC-Al Si12(11)
AlSi5Cu	EN AC-45xxx	EN AC-Al Si6(5)Cu4(3,1)
AlSi9Cu	EN AC-46xxx	EN AC-Al Si9(7,11)Cu3(2,1)
AlSi(Cu)	EN AC-47xxx	EN AC-Al Si12Cu
AlSiCuNiMg	EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg
AlMg	EN AC-51xxx	EN AC-Al Mg3(5,9)
AlZnMg	EN AC-71000	EN AC-Al Zn5Mg

Ze všech druhů slitin hliníku je zdaleka největší skupina Al–Si. Siluminy se podle hlavních prvků dělí do několika základních typů.

1.16 Charakteristika používaných typů slitin hliníku

1.16.1 Binární slitiny Al – Si

Binární slitiny Al-Si se obvykle používají jako podeutektické až eutektické. Kromě základních prvků hliníku a křemíku obsahují řádově v desetinách procenta železo a mangan. Obsah ostatních doprovodných prvků je omezen na velmi nízké hodnoty, převážně pod 0,1 %. Při vysokých nárocích na korozivzdornost, zvláště při použití odlitků v potravinářství, se obsah mědi limituje pod 0,05 %. Titan v množství 0,1-0,2 % zjemňuje primární zrno α(Al).

Binární siluminy mají dobré slévárenské vlastnosti, odlitky mají dobrou těsnost vůči plynům i kapalinám, dobrou svařitelnost a odolnost proti korozi. Obrobitelnost je pouze střední. Čím vyšší je obsah Si, tím lepší jsou slévárenské vlastnosti. Normalizované slitiny obsahují obvykle 10-13 %Si. Tyto slitiny se používají pro odlévání do pískových nebo kovových forem i pro tlakové lití. Slitiny s vyšším obsahem křemíku je při gravitačním lití vhodné modifikovat sodíkem nebo stronciem.

Vlastnosti binárních slitin

Slévárenské vlastnosti - Rostoucí obsah křemíku až do eutektického obsahu zmenšuje interval tuhnutí a díky tomu se zlepšuje většina slévárenských vlastností, zlepšuje se zabíhavost a zmenšuje se objem staženin. Příznivý vliv na stahování je způsoben tím, že křemík, na rozdíl od jiných prvků, během tuhnutí zvětšuje svůj objem a tím kompenzuje stahování hliníkové matrice.Tak např. eutektický silumin, modifikovaný Na, má objemový úbytek při tuhnutí asi 3 %, oproti 6,5 % u čistého hliníku. Rovněž se zmenšuje smrštění slitiny v intervalu mezi teplotou tuhnutí a normální teplotou.

Mechanické vlastnosti – mechanické vlastnosti binárních slitin jsou jen střední. Zvýšení pevnosti se dosahuje až přísadou prvků s vyšší rozpustností v tuhém roztoku α(Al), zvláště Cu a Mg. Tažnost závisí především na morfologii eutektického křemíku. Vlivem modifikace se tažnost slitin podstatně zvyšuje.

Obrobitelnost binárních slitin je jen střední. Modifikací se obrobitelnost poněkud zlepšuje.

Odolnost proti korozi je jen průměrná. Ve vlhké atmosféře slitina dostává šedé matné zabarvení. Binární slévárenské siluminy se proto příliš nehodí pro dekorativní účely.

Povrchová úprava – Výrobky z binárních slitin Al-Si lze brousit a leštit, kvalita povrchů však není příliš dobrá. Rovněž po anodické oxidaci mají slitiny černo-šedé zabarvení. Slitiny je možno galvanicky pokovovat (chromováním, niklováním).

1.16.2 Slitiny Al–Si-Cu

Tato skupina **je nejvíce používaným typem slitin hliníku**. Tvoří asi ½ celkové produkce hliníkových odlitků a je dominantním typem ve výrobě automobilních odlitků. Jedná se o podeutektické (výjimečně až eutektické) slitiny s obsahem 6-13 %Si a 1-5 %Cu. **Typickým představitelem je slitina typu AlSi8Cu3.** Díky mědi má slitina dobré mechanické vlastnosti a výbornou obrobitelnost. Měď snižuje odolnost proti korozi, ta však pro použití v automobilovém průmyslu obvykle dostačuje. Slitina má malý sklon ke vzniku trhlin a vzniku staženin. Pro tyto vlastnosti je výhodné udržování obsahu křemíku v horním pásmu tolerance pro danou slitinu. U slitin s vyšším obsahem křemíku se zvyšuje zabíhavost. Pro zlepšení vlastností se doporučuje provádět zjemnění primárního zrna očkováním.

Odlitky ze slitin Al-Si-Cu se používají v tepelně nezpracovaném stavu. Díky přítomnosti mědi případně i zinku však dochází k určitému stupni samovolného vytvrzování odlitků. Efekt samovolného vytvrzení je tím silnější, čím rychleji se odlitek ochlazoval při tuhnutí a tím vznikl více přesycený tuhý roztok α(Al). Samovolné vytvrzování probíhá po dobu několika dnů.

Slitiny Al-Si-Cu jsou vhodné pro výrobu složitých odlitků gravitačním odléváním do kovových forem a zejména pro lití pod tlakem.

Rovněž nadeutektické slitiny, používané zejména pro odlévání pístů spalovacích motorů a bloků motorů patří do typu Al-Si-Cu, obvykle obsahují kolem 14-17 %Si, 4 %Cu a dále asi 0,5 %Mg, případně do 2 %Ni.

Vlastnosti slitin Al-Si-Cu

Slévárenské vlastnosti – Přísada mědi ve slitinách Al-Si poněkud zmenšuje stahování kovu při tuhnutí a zlepšuje nepropustnost odlitků. Uvádí se rovněž, že se mírně zmenšuje naplynění taveniny. Měď tvoří ve slitině ternární eutektikum, které tuhne až v závěru tuhnutí. Za přítomnosti mědi a hořčíku vznikají různá vícesložková eutektika s teplotami tuhnutí až pod 500 ^{o}C.

Mechanické vlastnosti – přísada mědi vždy významně zvyšuje pevnost a tvrdost slitin Al-Si v litém stavu, snižují se však plastické vlastnosti. Tento vliv se dále zvětšuje za přítomnosti hořčíku a zinku. Vlivem samovolného vytvrzování odlitky získávají svoje konečné mechanické vlastnosti až po několika dnech.

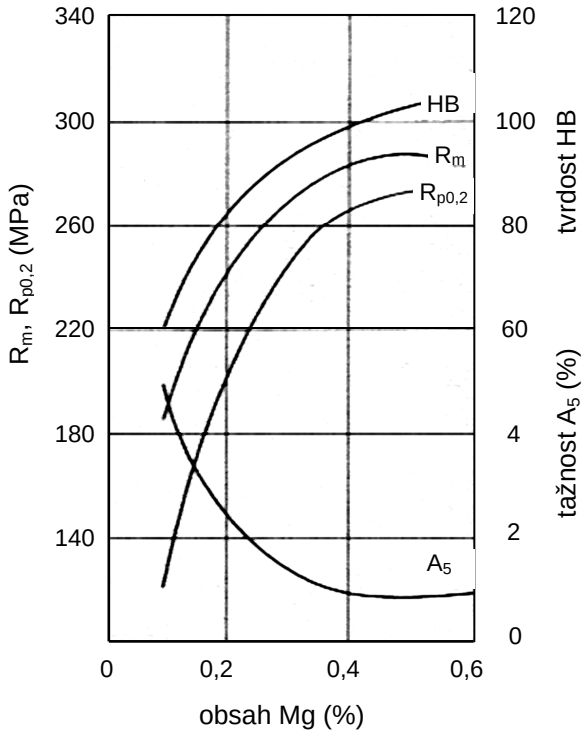
Obrobitelnost – se přísadou mědi velmi významně zlepšuje. Třísky jsou dobře lámavé a dosahuje se kvalitního povrchu.

Odolnost proti korozi – měď má negativní vliv na odolnost proti korozi v kyselinách, alkalických roztocích a v mořské vodě. V množství několika desetin procenta se korozní odolnost v atmosferických podmínkách ještě příliš nezhoršuje, při obsahu nad asi 2 % Cu je již poměrně špatná a doporučuje se používat nějaký způsob povrchové ochrany, např. nátěry. Pro většinu automobilních odlitků však korozní odolnost těchto slitin vyhovuje.

Povrchová úprava – vlivem mědi se zlepšuje kvalita povrchu po broušení a leštění. Při obsahu nad 0,5 % měď zhoršuje možnost anodické oxidace, neboť se zmenšuje tloušťka a hutnost ochranné vrstvy. Povrch je matný a má nestejnoměrný vzhled. Pro účely zvýšení odolnosti proti otěru je však anodickou oxidaci možno použít.

1.16.3 Slitiny Al-Si-Mg

Tyto slitiny jsou charakteristické obsahem hořčíku v množství 0,25-0,45% (u některých slitin až 0,7%), který umožňuje provádět vytvrzování za tepla. Při běžné rychlosti ochlazování se hořčík ve slitině vylučuje jako fáze Mg_2Si. V litém stavu mají tyto slitiny jen průměrné vlastnosti, **vysoké mechanické vlastnosti získávají až vytvrzováním**. Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické a podle obsahu křemíku se dělí do 2 typů, a to AlSi7Mg a AlSi10Mg. Slitiny s vyšším obsahem Si mají lepší slévárenské vlastnosti a rovněž lepší svařitelnost. Obsah dalších doprovodných prvků je limitován na velmi nízké hodnoty podobně jako u skupiny Al-Si. **Odlévají se jak do pískových, tak do kovových forem gravitačně i pod tlakem.**



Obr.38: Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti slitiny Al-Si 9 po vytvrzení

Odlitky ze slitin AlSiMg se používají **pro vysoce namáhané výrobky**, velmi často v leteckém a v automobilním průmyslu. Po vytvrzení tyto slitiny dosahují vysoké mechanické vlastnosti R_m, $R_{p0,2}$ a HB, vytvrzováním se však oproti litému stavu mírně snižuje tažnost. V souvislosti se zvýšením tvrdosti matrice zlepšuje hořčík i obrobitelnost. Na obr. 38 je znázorněn vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti vytvrzené slitiny AlSi 9, lité do pískové formy.

1.16.4 Charakteristické oblasti použití některých slitin Al-Si

AlSi7Mg0,3

Charakteristika: - Typ vysokopevných slitin s dobrou tažností a houževnatostí. Obsahuje

minimální množství příměsí a nečistot. Vyznačuje se velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, obrobitelností a svařitelností.

Odlévání: - Odlévá se do pískových nebo kovových forem gravitačně nebo nízkotlakým litím. Má malý sklon ke vzniku staženin. Je vhodné provádět zjemnění primárního zrna očkováním přípravky na bázi Ti a B a modifikaci eutektika.

Tepelné zpracování: - Vytvrditelná slitina. Používá se ve stavu T6 – vytvrzeném, (rozpouštěcí žíhání 530-535^{o}C–12 hod/ochlazení do teplé vody/ precipitace 150-160 ^{o}C – 3-5 hod.) nebo T7 – vytvrzení a stabilizace (200-250^{o}C – 2-5 hod)

Použití: - Typická aplikace jsou součástky pro letecký a raketový průmysl, motorové díly, součástky podvozků, rámy a jiné odlitky, které vyžadují vysokou pevnost a houževnatost.

AlSi7Mg0,6

Charakteristika: - Slitina vlastnostmi podobná předchozímu typu, avšak s ještě vyšší pevností. (Jedná se o slitinu s nejvyššími mechanickými vlastnostmi typu Al-Si.) Vynikající odolnost proti vzniku trlin a nepropustnost. Obrobitelnost poměrně špatná.

Použití: - Používá se pro odlitky s vysokými nároky na pevnost a houževnatost, zejména v leteckém průmyslu, vysoce namáhané motorové součástky, vysokorychlostní dmychadla, ventilátory apod.

AlSi10Mg

Charakteristika: - Mírně podeutektické slitiny s nízkým obsahem doprovodných prvků a nečistot, s výbornými slévárenskými a technologickými vlastnostmi. Velmi dobrá obrobitelnost a odolnost proti korozi.

Odlévání: - Slitiny tohoto typu jsou vhodné pro všechny technologie odlévání. Při lití do pískových forem je nutné provést modifikaci sodíkem, při lití do kovových forem je modifikace rovněž prospěšná. Při tuhnutí netvoří vnitřní staženiny.

Tepelné zpracování - Používá se ve stavu vytvrzeném – T6, rozpouštěcí žíhání 510-525 ^{o}C – 3-6 hod./ ochlazení ve vodě/precipitační žíhání 150-175 ^{o}C – 5-15 hod.

Použití: - Tenkostěnné, tvarově složité odlitky s vysokými nároky na pevnost a houževnatost, např. vysoce namáhané strojní součástky, díly motorů, klikové skříně, brzdové čelisti, rychloběžné součástky, např. pro ventilátory.

AlSi12

Charakteristika: - Eutektické slitiny s vynikajícími slévárenskými i technologickými vlastnostmi, velmi dobrou odolností proti korozi a s dobrou obrobitelností. Pevnost jen střední.

Odlévání: - Slitina je vhodná pro všechny technologie odlévání, obvykle se ale odlévá do pískových forem nebo do kovových forem gravitačně nebo pod

nízkým tlakem. Má poněkud větší sklon ke vzniku staženin v silnějších stěnách, než předchozí typ slitin. Při lití do pískových forem je nutná modifikace sodíkem, při lití do kovových forem je modifikace sodíkem nebo stronciem rovněž velmi vhodná, zvláště u odlitků se značně rozdílnou tloušťkou stěn.

Tepelné zpracování: - Slitina není vytvrditelná. Používá se v litém stavu. Pro zlepšení tažnosti se provádí rozpouštěcí žíhání s následným ochlazením do vody.

Použití: - Pro tenkostěnné, nepropustné odlitky s vysokou houževnatostí při velmi dobré odolnosti proti korozi, např. lopatky, žebrovaná tělesa, různé skříňovité odlitky, tělesa pump apod.

AlSi5Cu

Charakteristika: - Univerzální slitina s velmi dobrou obrobitelností a pevností za zvýšených teplot. Za normální teploty je pevnost střední, odolnost proti korozi dosti špatná, s výhodou se používá v suchu nebo v mastném prostředí.

Odlévání: - Odlévá se zejména gravitačně do pískových nebo kovových forem. Doporučuje se provádět očkování, při lití do pískových forem i modifikaci eutektika. Má sklon ke vzniku trhlin. Čím vyšší je obsah Si, tím lepší jsou slévárenské vlastnosti.

Tepelné zpracování: - Obvykle se používá v tepelně nezpracovaném stavu. Slitina má sklon k samovolnému vytvrzování za studena a to tím větší, čím je vyšší obsah Mg. Příliš vysoký obsah Mg vede ke křehnutí.

Použití: - Strojní díly a motorové odlitky pro osobní automobily (např. hlavy válců), odlitky pro elektrotechniku a pro součásti pracující za zvýšených teplot.

AlSi9Cu

Charakteristika: - Jedna z nejčastěji používaných slitin, vhodná pro univerzální účely, zejména však pro tlakové lití. Má střední mechanické vlastnosti, dobrou pevnost za vyšších teplot, je dobře obrobitelná. Odolnost proti korozi je střední. Sklon ke vzniku trhlin je menší, než u slitin AlSi5Cu.

Odlévání: - Slitina má dobrou zabíhavost, má malý sklon ke vzniku soustředěných staženin. Doporučuje se provádět očkování, při lití do pískových forem rovněž modifikaci. Slévárenské vlastnosti se zlepšují s rostoucím obsahem křemíku.

Tepelné zpracování: - Obvykle se používá v litém stavu. U odlitků, litých do kovových forem dochází k samovolnému vytvrzování za studena. Tento trend se zvětšuje s rostoucím obsahem Mg.

Použití: - Typická slitina pro automobilní odlitky, skříně, bloky, víka, hlavy válců atd. Rovněž pro elektrotechnický průmysl, díly elektromotorů, díly pro domácí spotřebiče. Je vhodná i pro výrobu tenkostěnných, tvarově komplikovaných odlitků.

1.16.5 Nadeutektické siluminy

Podle rovnovážného diagramu Al-Si jsou nadeutektickými siluminy takové slitiny, které obsahují nadeutektické siluminy více než 12,5 % křemíku. Obvyklé nadeutektické komerční slitiny mívají obvykle do 14 % Si, v poslední době i slitiny s obsahem kolem 17-18 % Si. S růstem obsahu křemíku se výrazně rozšiřuje pásmo tuhnutí. Obsah nad 20 %Si bývá proto výjimečný. Dalšími přísadovými prvky v nadeutektických siluminech jsou měď, hořčík, mangan a nikl.

Podíl nadeutektických siluminů z celkového objemu slitin typu Al-Si je poměrně nízký. Důvodem pro jejich používání je především vysoká tvrdost primárního křemíku, který těmto slitinám dodává vysokou odolnost proti opotřebení a také asi o 15 % menší součinitel tepelné roztažnosti, než mají podeutektické slitiny. Slitiny mají vcelku dobré mechanické vlastnosti, houževnatost je však malá. Slévárenské vlastnosti jsou dobré. Typickým výrobkem z nadeutektického siluminu jsou písty do spalovacích motorů, hlavy válců, kompresory, pumpy a součásti brzdových systémů. U mnoha odlitků se využívá dobré zabíhavosti, která je daná vysokou hodnotou krystalizačního tepla křemíku a tím poměrně dlouhou dobou tekutosti slitiny v intervalu tuhnutí.

Progresivním materiálem, především pro výrobu bloků motorů pro osobní auta, je nadeutektický silumin AlSi17Cu4Mg. Tento materiál je vhodný pro lití do pískových forem a pro gravitační lití do kovových forem. Oproti podeutektickým slitinám se vyznačuje vysokými mechanickými vlastnostmi, malou tepelnou roztažností a velkou tepelnou vodivostí. Tyto vlastnosti jsou velmi důležité u tenkostěnných odlitků pro moderní motory s vysokými měrnými výkony. Pro srovnání jsou v tab. 6 uvedeny některé význačné vlastnosti.

Tab. 6: Srovnání vlastností slitiny AlSi17Cu4 s podeutektickými slitinami

	slitina				
	AlSi9Cu3		AlSi6Cu4		AlSi17Cu4
Metoda lití	P/K	T	P/K	T	P/K
Stav	F	F	F	F	T6
Rp0,2 (MPa)	90-100	140	90-100	150	190-320
Rm (MPa)	150-170	240	150-170	220	220-360
A5 (%)	1	1	1	1	0,5
Tvrdost HB	60-75	80	60-75		90-150
Součinitel tepelné roztaž. (20-200 ^{o}C (10^{-6}/K)	22	22	22	22	18
Součinitel tepel. vodivosti (W/m.K)	100-110	100-110	110-120	110-120	117-134

Metody lití: P – do písku, K – gravitačně do kovových forem, T – tlakové lití

1.16.6 Slitiny Al-Cu

Charakteristika: - Slitiny s vysokou pevností za normální teploty, vysokou tažností a houževnatostí a s dobrou pevností za zvýšených teplot. Mají vynikající obrobitelnost, poměrně špatnou odolnost proti korozi a pouze podmíněnou svařitelnost.

Odlévání: - Slitiny jsou určeny pro gravitační lití do pískových, kovových nebo

skořepinových forem. Mají velmi špatné slévárenské vlastnosti – sklon ke vzniku rozptýlených staženin, sklon k praskání. Slévárenské vlastnosti se poněkud zlepšují zjemněním zrna očkováním. Slitina je citlivá na kontaminaci křemíkem, jehož obsah obvykle nepřesahuje 0,2 %.

Tepelné zpracování: - Rozpouštěcí žíhání při cca 530 ^{o}C asi 8 hod./ochlazování do teplé vody. Vytvrzování za studena na stav T4: min. 5 dní, nebo kombinovat s vytvrzováním za tepla při 160 ^{o}C asi 0,5-1 hod. Vytvrzování na stav T6 – za studena -12-24 hod., pak 155 ^{o}C 20 hod.

Použití: - Odlitky s vysokými nároky na pevnost – převodové skříně, pro práci za vyšších teplot – hlavy válců, turbiny, součásti přehřívačů a pod. Vzhledem ke špatným slévárenským vlastnostem je snaha převádět odlitky z těchto slitin na slitiny typu Al-Si.

1.16.7 Slitiny Al-Mg

Charakteristika: - Slitiny s velmi dobrou korozní odolností zvláště proti mořské vodě a ve slabě alkalickém prostředí, s výbornou obrobitelností, leštitelností a možností povrchové úpravy eloxováním.
Mechanické vlastnosti jsou poměrně špatné.
Při teplotách nad 100 ^{o}C již dochází k poklesu mechanických vlastností.

Odlévání: - Všechny slitiny tohoto typu mají špatné slévárenské vlastnosti. Slitiny jsou náchylné ke tvorbě oxidů a naplynění. Taveninu nepřehřívat nad 750 ^{o}C. Před odléváním je nutno pečlivě očistit hladinu kovu a taveninu odplynit. Je nutno provést zjemnění zrna, neboť jinak má slitina po anodické oxidaci sklon ke vzniku povrchově vady „ledové květy“.
Slitiny s hrubým zrnem mají velký sklon ke vzniku trhlin.
Sklon k tvorbě rozptýlených staženin a propadlin na povrchu odlitků.
Obtížné nálitkování, velmi krátké dosazovací vzdálenosti, nutné používání vnějších chladítek.
Vzhledem ke sklonu ke vzniku trhlin, volit pokud možno vysokou teplotu kokil, doporučuje se používat tepelně-izolační nátěry.
Licí teploty co nejnižší, pokud možno v rozmezí 680-730 ^{o}C.
Slitiny se 3 a 5 %Mg se odlévají gravitačně do pískových nebo kovových forem, slitiny s 9 %Mg pod tlakem.

Tepelné zpracování: - Slitiny normované podle ČSN EN 1706 se používají v tepelně nezpracovaném stavu

Použití: - Dekorativní předměty pro interiéry i exteriéry, lodní kování, ozdobné díly aut, chemický a potravinářský průmysl, optické přístroje.

1.17 Vlastnosti a použití - výběr z norem ČSN EN 1706

Podle způsobu použití se slitiny hliníku dělí na:
- slitiny pro všeobecné použití
- slitiny pro lití pod tlakem
- slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi
- slitiny pro specielní použití

Výpis nejdůležitějších slitin z normy ČSN EN 1706 je v tab.7, jejich mechanické vlastnosti v tab.8, technologické vlastnosti v tab.9 a příklady použití v tab.10.

Tab. 7 : Slitiny hliníku na odlitky – chemické složení

Označení slitiny			Chemické složení (%)											Obsah nečistot (%)	
VDS	číselné	chemické	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Jeden prvek	celkem
Slitiny pro lití pod tlakem															
239 D	EN AC-43400	EN AC-AlSi10Mg(Fe)	9,0-11,0	1,0	0,10	0,55	0,2-0,5		0,15	0,15	0,15	0,05	0,20	0,05	0,15
230 D	EN AC-44300	EN AC-AlSi12(Fe)	10,5-13,5	1,0	0,10	0,55				0,15			0,15	0,05	0,25
226 D	EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)	8,0-11,0	1,3	2,0-4,0	0,55	0,05-0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,25	0,25	0,05	0,25
226/3	EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)(Zn)	8,0-11,0	1,3	2,0-4,0	0,55	0,05-0,55	0,15	0,55	3,0	0,35	0,25	0,25	0,05	0,25
231 D	EN AC-47100	EN AC-AlSi12Cu1(Fe)	10,5-13,5	1,3	0,7-1,2	0,55	0,35	0,10	0,30	0,55	0,20	0,10	0,20	0,05	0,25
349	EN AC-51200	EN AC-AlMg9	2,5	1,0	0,10	0,55	8,0-10,5		0,10	0,25	0,10	0,10	0,20	0,05	0,15
Slitiny pro všeobecné použití															
239	EN AC-43000	EN AC-AlSi10Mg(a)	9,0-11,0	0,55	0,05	0,45	0,20-0,45		0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15
239	EN AC-43100	EN AC-AlSi10Mg(b)	9,0-11,0	0,55	0,10	0,45	0,20-0,45		0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15
233	EN AC-43200	EN AC-lSi10Mg(Cu)	9,0-11,0	0,65	0,35	0,55	0,20-0,45		0,15	0,35	0,10		0,20	0,05	0,15
230	EN AC-44100	EN AC-AlSi12(b)	10,5-13,5	0,65	0,15	0,55	0,10		0,10	0,15	0,10		0,20	0,05	0,15
230	EN AC-44200	EN AC-AlSi12(a)	10,5-13,5	0,55	0,05	0,35				0,10			0,15	0,05	0,15
225	EN AC-45000	EN AC-AlSi6Cu4	5,0-7,0	1,0	3,0-5,0	0,2-0,65	0,55	0,15	0,45	2,0	0,30	0,15	0,25	0,05	0,35
226	EN AC-46200	EN AC-AlSi8Cu3	7,5-9,5	0,8	2,0-3,5	0,15-0,65	0,05-0,55		0,35	1,2	0,25	0,15	0,25	0,05	0,25
231	EN AC-47000	EN AC-AlSi12(Cu)	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
Slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi															
	EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi	0,20	0,35	4,2-5,0	0,10	0,15-0,35		0,05	0,10	0,05	0,05	0,15-0,30	0,03	0,10
	EN AC-21100	EN AC-AlCu4Ti	0,18	0,19	4,2-5,0	0,55				0,07			0,15-0,30	0,03	0,10
	EN AC-42100	EN AC-AlSi7Mg0,3	6,5-7,5	0,19	0,05	0,10	0,25-0,45			0,07			0,08-0,25	0,03	0,10
	EN AC-4220	EN AC-AlSi7Mg0,6	6,5-7,5	0,19	0,05	0,10	0,45-0,70			0,07			0,08-0,25	0,03	0,10
	EN AC-4330	EN AC-AlSi9Mg	9,0-10,0	0,19	0,05	0,10	0,25-0,45			0,07			0,15	0,03	0,10
	EN AC-44400	EN AC-AlSi11	10,0-11,8	0,19	0,05	0,10	0,45			0,07			0,15	0,03	0,10
Slitiny pro specielní použití															
260	EN AC-48000	EN AC-AlSi12CuNiMg	10,5-13,5	0,7	0,8-1,5	0,35	0,8-1,5		0,7-1,3	0,35			0,25	0,05	0,15
242	EN AC-51000	EN AC-AlMg3(b)	0,55	0,55	0,10	0,45	2,5-3,5			0,10			0,20	0,05	0,15
242	EN AC-51100	EN AC-AlMg3(a)	0,55	0,55	0,05	0,45	2,5-3,5			0,10			0,20	0,05	0,15
244	EN AC-51300	EN AC-AlMg5	0,55	0,55	0,10	0,45	4,5-6,5			0,10			0,20	0,05	0,15
245	EN AC-51400	EN AC-AlMg5Si	1,5	0,55	0,05	0,45	4,5-6,5			0,10			0,20	0,05	0,15

Tab. 8 : Mechanické vlastnosti na odděleně litých zkušebních kusech

Označení slitiny			Mechanické vlastnosti									
VDS	číselné	chemické	Stav slitiny	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{50} (%)	HBS	Stav slitiny	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{50} (%)	HBS
Slitiny pro lití pod tlakem												
239 D	EN AC-43400	EN AC-AlSi10Mg(Fe)	Pod tlakem Litý stav	240	140	1	70					
230 D	EN AC-44300	EN AC-AlSi12(Fe)		240	130	1	60					
226 D	EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)		240	140	< 1	80					
226/3	EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)(Zn)		240	140	< 1	80					
231 D	EN AC-47100	EN AC-AlSi12Cu1(Fe)		240	140	1	70					
349	EN AC-51200	EN AC-AlMg9		200	130	1	70					
Slitiny pro všeobecké použití												
239	EN AC-43000	EN AC-AlSi10Mg(a)	Kovová forma	L T6 T64	180 260 240	90 220 200	2,5 1 2	55 90 80	Písková forma	L T6	150 220	80 180	2 1	50 75
239	EN AC-43100	EN AC-AlSi10Mg(b)		L T6 T64	180 260 240	90 220 200	2,5 1 2	55 90 80		L T6	150 220	80 180	2 1	50 75
233	EN AC-43200	EN AC-lSi10Mg(Cu)		L T6	180 240	90 200	1	55 80		L T6	160 220	80 180	1 1	50 75
230	EN AC-44100	EN AC-AlSi12(b)		L	170	80	1	55		L	150	70	4	50
230	EN AC-44200	EN AC-AlSi12(a)		L	170	80	5	55		L	150	70	5	50
225	EN AC-45000	EN AC-AlSi6Cu4		L	170	100	6	75		L	150	90	1	60
226	EN AC-46200	EN AC-AlSi8Cu3		L	170	100	1	75		L	150	90	1	60
231	EN AC-47000	EN AC-AlSi12(Cu)		L	170	90	12	55		L	150	80	1	50

L – v litém stavu, T4-vytvrzeno za studena, T6-vytvrzování na optimální pevnost a tažnost, T64-vytvrzeno na optimální tažnost

Tab. 8 – pokrač. : Mechanické vlastnosti na odděleně litých zkušebních kusech – pokračování

Označení slitiny			Mechanické vlastnosti									
VDS	číselné	chemické	Stav slitiny	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{50} (%)	HBS	Stav slitiny	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{50} (%)	HBS
Slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi												
	EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi	Kovová forma	T4	320	200	8	95	Písková forma	T4	300	200	5	90
	EN AC-21100	EN AC-AlCu4Ti		T6 T64	330 320	220 180	7 8	95 90		T6 T64	300 280	200 180	3 5	95 85
	EN AC-42100	EN AC-AlSi7Mg0,3		T6 T64	290 250	210 180	4 8	90 80		T6	230	190	2	75
	EN AC-4220	EN AC-AlSi7Mg0,6		T6 T64	320 290	240 210	3 6	100 90		T6	250	210	1	85
	EN AC-4330	EN AC-AlSi9Mg		T6 T64	290 250	210 180	4 6	90 80		T6	230	190	2	75
	EN AC-44400	EN AC-AlSi11		L	170	80	7	45		L	150	70	6	45
Slitiny pro specielní použití														
260	EN AC-48000	EN AC-AlSi12CuNiMg	Kovová forma	T5 T6	200 280	185 240	< 1 < 1	90 100	Písková forma					
242	EN AC-51000	EN AC-AlMg3(b)		L	150	70	5	50		L	140	70	3	50
242	EN AC-51100	EN AC-AlMg3(a)		L	150	70	5	50		L	140	70	3	50
244	EN AC-51300	EN AC-AlMg5		L	180	100	4	60		L	160	90	3	55
245	EN AC-51400	EN AC-AlMg5Si		L	180	110	3	65		L	160	100	3	60

Tab. 9 : Technologické vlastnosti

Označení slitiny			Slévárenské vlastnosti				Technologické vlastnosti				Typické vlastnosti
VDS	číselné	chemické	interval tuhnutí (oC)	zabíhavost	odolnost proti vzniku trhlin	nepropustnost	obrobitelnost	svařitelnost	odolnost proti korozi	anodická oxidace	
Slitiny pro lití od tlakem											
239 D	EN AC-43400	EN AC-AlSi10Mg(Fe)	600-550	A	A	C	B	D	C	E	Výborné slévárenské vlastnosti, dobrá odolnost proti vzniku trhlin, obrobitelnost, chemická odolnost
230 D	EN AC-44300	EN AC-AlSi12(Fe)	580-570	A	A	C	C	D	C	E	Vynikající zabíhavost a slévárenské vlastnosti, odolnost proti vzniku trhlin, chemická odolnost
226 D	EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)	600-490	B	B	C	B	F	B	E	Univerzální slitina s dobrými slévárenskými vlastnostmi, malý sklon k vnitřním a povrchovým staženinám, výborná obrobitelnost
226/3	EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3(Fe,Zn)	600-490	B	B	B	B	F	D	E	Univerzální slitina s dobrými slévárenskými vlastnostmi, malý sklon k vnitřním a povrchovým staženinám, výborná obrobitelnost
231/D	EN AC-47100	EN AC-AlSi12Cu1(Fe)	580-530	A	A	C	C	F	C	E	Vynikající zabíhavost, slévárenské vlastnosti, odolnost proti vzniku trhlin
349	EN AC-51200	EN AC-AlMg9	620-530	C	D	D	A	C	A	B	Dobrá leštitelnost, vhodná pro anodickou oxidaci, ne pro dekorativní účely
Slitiny pro všeobecné použití											
239	EN AC-43000	EN AC-AlSi10Mg(a)	600-550	A	A	B	B	A	B	E	Vynikající slévárenské vlastnosti, dobrá odolnost proti vzniku trhlin, dobrá obrobitelnost, vysoká chemická odolnost
239	EN AC-43100	EN AC-AlSi10Mg(b)	600-550	A	A	B	B	A	B	E	Vynikající slévárenské vlastnosti, dobrá odolnost proti vzniku trhlin, dobrá obrobitelnost, vysoká chemická odolnost
233	EN AC-43200	EN AC-AlSi10Mg(Cu)	600-530	A	A	B	B	A	C	E	Vynikající slévárenské vlastnosti, dobrá odolnost proti vzniku trhlin, dobrá obrobitelnost
230	EN AC-44100	EN AC-AlSi12(b)	580-570	A	A	A	C	A	B/C	E	Vynikající slévárenské vlastnosti vysoká odolnost proti vzniku trhlin a chemická odolnost
230	EN AC-44200	EN AC-AlSi12(a)	580-570	A	A	A	C	A	B	E	Vynikající slévárenské vlastnosti vysoká odolnost proti vzniku trhlin a chemická odolnost
225	EN AC-45000	EN AC-AlSi6Cu4	620-490	B	B	B	B	C	D	D	Univerzální slitina s dobrými slévárenskými vlastnostmi, velmi dobře obrobitelná
226	EN AC-46200	EN AC-AlSi8Cu3	600-490	B	B		B	B	D	E	Univerzální slitina s velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, velmi malý sklon k vnitřním a vnějším staženinám, velmi dobrá obrobitelnost
231	EN AC-47000	EN AC-AlSi12(Cu)	580-530	A	A	A	C	A	C	E	Vynikající zabíhavost a slévárenské vlastnosti, vysoká odolnost proti vzniku trhlin

Tab. 9: Technologické vlastnosti - pokračování

Označení slitiny			Slévárenské vlastnosti				Technologické vlastnosti				Typické vlastnosti
VDS	číselné	chemické	interval tuhnutí (oC)	zabíhavost	Odolnost proti vzniku trhlin	nepropustnost	obrobitelnost	svařitelnost	Odolnost proti korozi	Anodická oxidace	
Slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi											
	EN AC-21000	EN AC-AlCu4MgTi		C	D	D	A	D	D	C	
	EN AC-21100	EN AC-AlCu4Ti		C	D	D	A	D	D	C	
	EN AC-42100	EN AC-AlSi7Mg0,3		B	A	B	B	B	B	D	
	EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6		B	A	B	B	B	B	D	
	EN AC-43300	EN AC-AlSi9Mg		A	A	B	B	A	B	E	
	EN AC-44400	EN AC-AlSi11 ???		A	A	C	C	D	C	E	
Slitiny pro specielní použití											
260	EN AC-48000	EN AC-AlSi12CuNiMg		A	A	A	B	A	C	E	
242	EN AC-51000	EN AC-AlMg3(b)	650-600	C	D	D	A	C	A	A	Vynikající leštitelnost, vhodné pro anodickou oxidaci. Slévárenské vlastnosti jsou špatné.
242	EN AC-51100	EN AC-AlMg3(a)	650-600	C	D	D	A	C	A	A	Vynikající leštitelnost, vhodné pro anodickou oxidaci. Slévárenské vlastnosti jsou špatné.
244	EN AC-51300	EN AC-AlMg5	640-560	C	D	D	A	C	A	A	Vynikající leštitelnost, vhodné pro anodickou oxidaci.
245	EN AC-51400	EN AC-AlMg5Si	630-550	C	D	D	A	C	A	B	Vynikající leštitelnost. Horší kvalita povrchu po anodické oxidaci. V důsledku vyššího obsahu Si má lepší slévárenské vlastnosti.

Označení vlastností: A – výborné, B – velmi dobré, C – dobré, D – nízké, E – nedoporučené, F - nevhodné

Tab. 10 : Příklady použití některých slitin hliníku

Označení slitiny			Oblasti použití	Příklady odlitků	Tepelné zpracování
VDS	číselné	chemické			
Slitiny pro lití od tlakem					
239 D	EN AC-43400	EN AC-AlSi10Mg(Fe)	Pro tvarově složité, tenkostěnné odlitky s vysokou pevností po vytvrzení a výbornou korozní odolností	Strojní součásti s vysokými nároky, jako hlavy válců, klikové skříně, brzdové čelisti, vibrující, rychloběžné součástky např. pro motory, ventilátory a jiné	
230 D	EN AC-44300	EN AC-AlSi12(Fe)	Jako 231 pro více namáhané odlitky odolné proti korozi a odolností proti vzniku prasklin	Odlitky namáhané rázy, se složitými napěťovými poměry, hlavy a bloky motorů, klikové skříně, tělesa pump, lopatková kola, žebrovaná tělesa, tenkostěnné skříně	Nevytvrditelná slitina
226 D	EN AC-46000	EN AC-AlSi9Cu3(Fe)	Slitina pro všeobecné použití, rovněž pro tvarově složité odlitky	Složité strojní součásti, odlitky pro automobilní průmysl, klikové skříně, součástky pro elektrotechniku, ložiskové skříně a víka, kryty atd.	Obvykle se nevytvrzuje
226/3	EN AC-46500	EN AC-AlSi9Cu3(Fe,Zn)	Slitina pro všeobecné použití, rovněž pro tvarově složité odlitky	Složité strojní součásti, odlitky pro automobilní průmysl, klikové skříně, součástky pro elektrotechniku, ložiskové skříně a víka, kryty atd.	Obvykle se nevytvrzuje
231/D	EN AC-47100	EN AC-AlSi12Cu1(Fe)	Pro tvarově složité, tenkostěnné odlitky	Odlitky namáhané rázy, se složitými napěťovými poměry, hlavy a bloky motorů, klikové skříně, tělesa pump, lopatková kola, žebrovaná tělesa, tenkostěnné skříně	Obvykle se nevytvrzuje
349	EN AC-51200	EN AC-AlMg9	Pro odlitky s vysokými nároky na korozní odolnost, vzhled povrchu, vhodné pro anodizaci	Součástky pro kancelářské stroje, zařízení pro domácnost, optické přístroje, kování, ozdobné předměty, potravinářský průmysl	
Slitiny pro všeobecné použití					
239	EN AC-43000	EN AC-AlSi10Mg(a)	Jako 230, avšak s vyšší pevností po tepelném zpracování	Strojní součásti s vysokými nároky, jako hlavy válců, klikové skříně, brzdové čelisti, vibrující, rychloběžné součástky např. pro motory, ventilátory a jiné	Rozpouštěcí žíhání 520-530 °C – 3-6 hod. chlazení ve vodě vytvrzování 150-170 °C – 5-15 hod.
239	EN AC-43100	EN AC-AlSi10Mg(b)	Jako 230, avšak s vyšší pevností po tepelném zpracování	Strojní součásti s vysokými nároky, jako hlavy válců, klikové skříně, brzdové čelisti, vibrující, rychloběžné součástky např. pro motory, ventilátory a jiné	Rozpouštěcí žíhání 520-530 °C – 3-6 hod. chlazení ve vodě vytvrzování 150-170 °C – 5-15 hod.
233	EN AC-43200	EN AC-AlSi10Mg(Cu)	Jako 239 avšak s nižší tažností a korozní odolností	Strojní součásti s vysokými nároky, jako hlavy válců, klikové skříně, brzdové čelisti, vibrující, rychloběžné součástky např. pro motory, ventilátory a jiné	Rozpouštěcí žíhání 520-530 °C – 3-6 hod. chlazení ve vodě vytvrzování 150-170 °C – 5-15 hod.
230	EN AC-44100	EN AC-AlSi12(b)	Pro tvarově složité, tenkostěnné a tlakově těsné odlitky, odolné proti praskání a s vysokou korozní odolností	Odlitky namáhané rázy, se složitými napěťovými poměry, hlavy a bloky motorů, klikové skříně, tělesa pump, lopatková kola, žebrovaná tělesa, tenkostěnné skříně	Nevytvrditelná slitina Žíhání: 520-53O °C – 3-5 hod. - voda
230	EN AC-44200	EN AC-AlSi12(a)	Pro tvarově složité, tenkostěnné a tlakově těsné odlitky, odolné proti praskání a s vysokou korozní odolností	Odlitky namáhané rázy, se složitými napěťovými poměry, hlavy a bloky motorů, klikové skříně, tělesa pump, lopatková kola, žebrovaná tělesa, tenkostěnné skříně	Nevytvrditelná slitina Žíhání: 520-53O °C – 3-5 hod. - voda
225	EN AC-45000	EN AC-AlSi6Cu4	Mnohostranně použitelná slitina s pevností za zvýšených teplot	Strojní součástky a díly pro automobilový průmysl, elektrotechniku, důlní průmysl apod.	Obvykle se nevytvrzuje za tepla (dochází k samovolnému vytvrzování)
226	EN AC-46200	EN AC-AlSi8Cu3	Mnohostranně použitelná slitina, také pro tvarově složitější, tenkostěnné odlitky s pevností za zvýšených teplot	Složité strojní součásti, odlitky pro automobilní průmysl, klikové skříně, součástky pro elektrotechniku, ložiskové skříně a víka, kryty atd.	Obvykle se nevytvrzuje za tepla (dochází k samovolnému vytvrzování)
231	EN AC-47000	EN AC-AlSi12(Cu)	Jako 230, avšak s nižší tažností a odolností proti korozi	Odlitky namáhané rázy, se složitými napěťovými poměry, hlavy a bloky motorů, klikové skříně, tělesa pump, lopatková kola, žebrovaná tělesa, tenkostěnné skříně	Nevytvrditelná slitina

3 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ PROCESY PŘI TAVENÍ SLITIN HLINÍKU

Metalurgické postupy při tavení slitin hliníku musí respektovat některé **specifické fyzikální a chemické vlastnosti hliníku**, kterými jsou zejména **sklon ke vzniku nekovových vměstků a vysoká rozpustnost vodíku v tavenině.** Velká část metalurgických problémů při výrobě hliníkových odlitků se týká právě těchto dvou vlastností.

1.18 Vměstky ve slitinách hliníku

Nekovové vměstky jsou částice, které se vyskytují v objemu ztuhlého kovu. Narušují souvislost kovové matrice a svou přítomností snižují mechanické vlastnosti slitiny, **zhoršují slévárenské vlastnosti, chemickou odolnost, těsnost, obrobitelnost, možnost povrchové úpravy a další vlastnosti.** Podle chemického složení se vměstky rozdělují na oxidické a neoxidické (většinou intermetalické fáze). Většina vměstků má vysokou tvrdost. Vliv vměstků je dán především jejich chemickou podstatou a morfologií. Podle tvaru se dělí do třech hlavních typů:

- oxidické blány
- velké, makroskopické vměstky kompaktního tvaru
- jemné, mikroskopické částice, rozložené místně nebo rovnoměrně v objemu kovu

Nejvýznamnější vliv na vlastnosti slitin mají oxidické blány. Chemicky se jedná o oxidy hliníku, které tvoří velké plošné útvary porušující významně souvislost kovové matrice. Kompaktní, drobné oxidické částice jsou relativně méně škodlivé. Z intermetalických fází mají nepříznivý vliv zejména takové, které tvoří tenké deskovité nebo jehlicovité útvary.

1.18.1 Vliv vměstků na vlastnosti hliníkových slitin

Problém nekovových vměstků je snad nejzávažnější v hutích při výrobě polotovarů pro válcování tenkých hliníkových folií. Protože velikost nekovových částic se často blíží jejich tloušťce, z folie se vydrolují, tak vznikají mikropóry a jejich důsledkem je netěsnost fólií.

Ve slévárenských aplikacích bývají nároky na čistotu taveniny obvykle nižší a závisí především na účelu použití odlitků. Přítomnost vměstků v uživatelsky nenáročných odlitcích nemusí být na závadu, u odlitků s vysokými technickými požadavky je však dosažení vysoké čistoty slitiny důležitou podmínkou. Vměstky negativně ovlivňují celou řadu vlastností odlitků.

Mechanické vlastnosti – vměstky způsobují snížení mechanických pevnostních vlastností jak při statickém zatěžování, tak zejména při dynamickém namáhání. Zmenšují nosný průřez kovové matrice a působí svým vrubovým účinkem. Vruby iniciují vznik trhlin a proto mají velmi nepříznivý vliv na rázovou houževnatost a únavovou pevnost. Negativní vliv mají zejména vměstky, které tvoří oxidické blány.

Slévárenské vlastnosti – vměstky, které jsou při licí teplotě v tuhém stavu, představují mechanickou překážku pro pohyb kovu. Z tohoto důvodu při lití snižují zabíhavost taveniny a během tuhnutí brání dosazování kovu. Vměstky jsou tak jednou z příčin vzniku porezity odlitků. Nepříznivě působí zvláště vměstky typu oxidických blan, ale i vliv drobných částic je velmi nepříznivý.

Obrobitelnost - vměstky jsou většinou tvořeny velmi tvrdými částicemi. Tím zhoršují kvalitu obrobených povrchů a výrazně snižují životnost obráběcích nástrojů.

Těsnost se vlivem oxidických vměstků jednoznačně zhoršuje a to několika mechanismy:

- dochází k průniku tlakového media podél velkých oxidických vměstků
- vměstky slouží jako nukleační zárodky pro vznik bublin, které jsou příčinou snížené těsnosti odlitků. Jako zárodky působí jak velké, tak i drobné vměstky
- na vměstky se vážou hlinitanové komplexy, obsahující vodík. Tento vodík se pak podílí na tvorbě bublin

Odstraněním vměstků z taveniny rafinací nebo filtrací se obvykle sníží obsah vodíku a zlepší se těsnost odlitků.

Povrchová úprava – vměstky zhoršují kvalitu povrchových vrstev, možnost leštění a aloxování.

1.18.2 Vznik vměstků

Nekovové vměstky v hliníkových slitinách mají dvojí původ:

Exogenní vměstky jsou částice, které **se do taveniny dostávají zvenčí během tavení a odlévání.** Nejčastěji to jsou částice žáruvzdorných materiálů z vyzdívky tavicích pecí nebo licích pánví. Chemicky se jedná o hlinitany, křemičitany eventuelně o karbid křemíku. Jejich velikost se pohybuje od asi 1 μm do několika milimetrů.

Endogenní vměstky **vznikají** oxidací hliníku a dalších prvků, vzájemnými **chemickými reakcemi mezi jednotlivými prvky v samotné tavenině**, nebo jde o zbytky solí, které byly použity k metalurgickým účelům a jejich reakčních produktů. Tyto vměstky mohou být v roztaveném kovu buď v tekutém nebo v tuhém stavu a mohou mít podobu jednotlivých částic, shluků nebo filmu. V tab. 11 jsou uvedeny nejčastější druhy endogenních vměstků.

Tab. 11: Druhy endogenních vměstků ve slitinách hliníku

Typ	**Původ vměstků**	**Tvar**	**Velikost (μm)**
Al_2O_3	struska	částice, film	0,2 – 30 10 – 5000
MgO	struska	částice, film	0,1 – 5 10 – 5000
$MgAl_2O_4$	struska	částice, film	0,1 – 5 10 – 5000
Chloridy, fluoridy	soli	částice	0,1 – 5
TiC	zjemňující přísady	částice	0,1 – 5
TiB_2, AlB_2	zjemňující přísady	shluky, částice	1 – 30 0,1 - 3
Fe-Cr-Mn	chemická reakce v tavenině při nízké udržovací teplotě	částice	1 - 50

Nejčastějším typem vměsků jsou oxidy hliníku. K oxidaci hliníku dochází v tuhém i tekutém stavu podle rovnice

$2\ Al + 3/2\ O_2 = Al_2O_3 \qquad \Delta\ G^o_{1000\ K} = -\ 644\ kJ/mol\ O_2$

Rovnovážná konstanta této reakce při teplotě 1000 K je ln K = 70,23. Z vysoké hodnoty rovnovážné konstanty vyplývá, že afinita hliníku ke kyslíku je mimořádně vysoká a oxidace probíhá již při parciálním tlaku kyslíku $p_{O2} > 1{,}3.10^{-42}$ Pa. **Pokud slitina obsahuje současně hořčík v množství již řádově desetin procenta, vzniká oxidací spinel – $Al_2O_3.2MgO$.**

Zdrojem kyslíku pro tvorbu oxidů jsou především atmosferický kyslík a vlhkost. Voda se ve styku s roztaveným hliníkem rozkládá podle rovnice

$\{H_2O\} = 2\,[H] + (O)$

Vodík se rozpouští v tavenině a kyslík okamžitě reaguje s hliníkem podle výše uvedené rovnice.

Zdrojem vlhkosti jsou např. plynné spaliny v tavicích pecích, nedokonale vysušené tavicí kelímky, vyzdívka pecí a licích pánví, vlhké nářadí, vlhká nebo zoxidovaná vsázka, nátěry forem a zejména vlhké rafinační soli. U rafinačních solí a přípravků je nutno počítat jak s volnou, tak i chemicky vázanou vodou, která se uvolňuje až při vyšších teplotách. Při lití do syrových forem pak kov reaguje i s vlhkostí ve formovací směsi.

Působením vzdušného kyslíku vzniká na povrchu slitin hliníku v tuhém i v kapalném stavu velmi rychle oxidická vrstva tvořená poměrně měkkým amorfním Al_2O_3, která obsahuje i oxidy přísadových prvků a nečistot. Rychlost zvětšování tloušťky této vrstvy se u většiny slitin postupně snižuje až prakticky zastaví na tloušťce 2-10 nm. Tato vrstva obvykle dobře chrání materiál proti další oxidaci. Na vlhkém vzduchu se na tenké vrstvě bez pórů vytváří silnější, pórovitá vrstva, která obsahuje rovněž aniont $(OH)^-$ a její tloušťka dosahuje až 0,1 μm.

Dynamika oxidace je určena možností pronikání kyslíku přes vzniklou oxidickou vrstvu dále do objemu kovu. **Pro mechanismus pokračování oxidace má klíčový význam poměr hustoty taveniny ρ_{Al} k hustotě vzniklého oxidu ρ_{Al2O3}.** Tento poměr se nazývá Pilling-Bedworthův poměr a označuje se P.B.

$P.B. = \rho_{Al} / \rho_{Al2O3}$

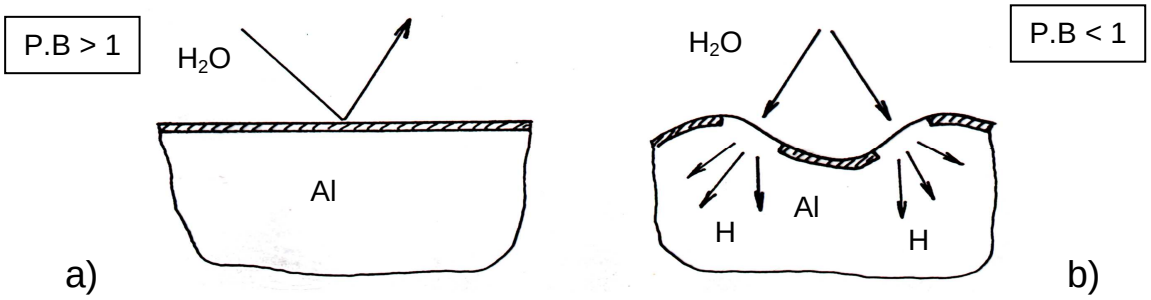
Pokud je hodnota **P.B. > 1**, mají oxidy větší objem než kov, z něhož vznikly a vytváří na povrchu kovu nepropustnou souvislou vrstvu, která brání dalšímu pronikání kyslíku. **Pokračování oxidace je možné pouze difuzí kyslíku přes vrstvu oxidů**. Protože prostup kyslíku difusí je velmi pomalý, je hliník před další oxidací poměrně dobře chráněn. Tento jev je příčinou velmi dobré korozní odolnosti hliníkových výrobků a je velmi důležitý také při ochraně hladiny roztaveného kovu. Hodnota P.B. u čistého hliníku a rovněž u většiny slitin Al-Si je mírně větší, než 1 ($P.B_{Al}$=1,27), proto **jsou tyto slitiny dobře odolné proti korozi**.

Prvky, jejichž koeficient **P.B < 1**, jako např. Mg, Ca nebo Na, netvoří na hladině souvislou vrstvu (objem oxidů je menší, než objem kovu ze kterého vznikly). **Další oxidace** proto není omezena difuzí přes oxidickou vrstvu a **je řízena rychlostí rozpouštění kyslíku v kovu**. **Oxidy** v tomto případě **nemají ochranný účinek** a oxidace stále pokračuje prakticky konstantní rychlostí. Čím více těchto prvků je ve slitině hliníku obsaženo, tím horší je ochranný účinek povrchové oxidické vrstvy. Princip ochranného účinku oxidické vrstvy je znázorněn na obr. 39.

Po roztavení hliníkové slitiny **se mění amorfní oxid na spinell** γ-Al_2O_3, krystalickou fázi s hustotou 3,42-3,96 $g.cm^{-3}$ a s měrným povrchem kolem 400 $m^2.g^{-1}$. **Spinell** je teplotně nestabilní a při teplotách nad 700 °C (ale zvláště nad asi 770 °C) **se postupně transformuje na termicky stabilní korund α-Al_2O_3** s hustotou 3,95 až 4,1 $g.cm^{-3}$ a měrným povrchem pouze asi 10 $m^2.g^{-1}$. **Korund** je velmi tvrdý a **je hlavní příčinou zhoršení obrobitelnosti** slitiny. Zatímco **spinell** díky menší hustotě a velkému měrnému povrchu **zůstává rozptýlen** v objemu taveniny, **korund má sklon k sedimentaci**. Při přeměně spinellu na korund se zmenšuje měrný objem a v oxidické vrstvě vznikají trhliny, které

umožňují další přístup kyslíku a pokračující oxidaci. Teplota přehřátí kovu a udržovací teplota by proto neměla překročit teplotu této transformace, **slitiny hliníku by se zásadně neměly přehřívat nad teplotu 780 ^{o}C.**

Tloušťka oxidické vrstvy na hladině roztaveného kovu závisí na teplotě a na čase. Při teplotách blízkých teplotě tavení je maximálně tlustá asi 0,2 μm, po 10 hod. dosahuje tloušťky asi 1 μm. Při vyšších teplotách se však tloušťka oxidů zvyšuje rychleji a dosahuje větších hodnot. Oxid hlinitý má tavicí teplotu 2050 ^{o}C to znamená, že v tavenině hliníku je vždy v tuhém stavu.



Obr. 39: a) vytvoření ochranné vrstvy oxidů
b) vliv víření kovu a vliv P.B < 1

U vícesložkových slitin hliníku závisí korozní odolnost na afinitě přísadových prvků ke kyslíku. Legury mají významný vliv na množství oxidů a na složení oxidické vrstvy. Prvky, které mají vysokou afinitu ke kyslíku oxidují selektivně (např. Na, Sr, Ca) a tvoří vlastní sloučeniny, nebo tvoří komplexní oxidy s hliníkem. Většinou se vážou do struskových částic, nebo v plynné formě unikají z taveniny. **U prvků s vyšší afinitou ke kyslíku, než má hliník, dochází k jejich propalu.** Rychlost vzniku a celkové množství oxidů vzrůstá s teplotou. Prvky, které neoxidují selektivně (jako Cu, Fe nebo Zn) zůstávají ve struktuře oxidů Al_2O_3 a korozivzdornost slitiny ovlivňují jen málo.

Podle růstu afinity ke kyslíku za teploty 700 ^{o}C lze běžné prvky seřadit do následující řady (afinita vzrůstá směrem zleva doprava):

Cu - Pb - Ni - Sn - Fe - Zn – Na - Mn - Si - Ti - Al - Li - Mg - Be - Ca

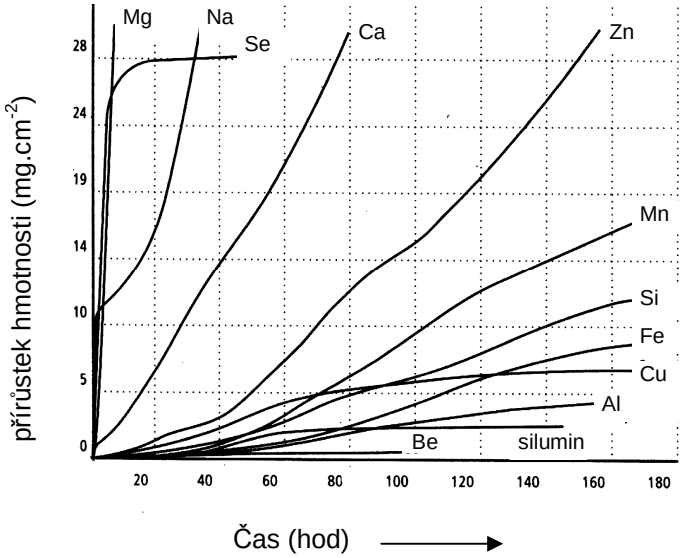
rostoucí afinita prvku ke kyslíku ⟶

Experimentálně bylo zjištěno, že při teplotě 700 ^{o}C prvky Na,Ca a Mg oxidaci výrazně zvyšují, Si, Fe, Zn, Cu a Mn nemají prakticky žádný vliv. Při zvýšení udržovací teploty na 800 ^{o}C rychlost oxidace vlivem přísadových prvků rychle vzrůstá v pořadí (viz obr. 40):
Cu, Fe, Si, Mn, Zn, Ca, Na, Se a Mg.

Zvláštní pozici mezi prvky má berylium, které má vysokou afinitu ke kyslíku, ale již při obsahu několika ppm Be se tvoří nepropustná vrstva spinellu $BeO.Al_2O_3$, která velmi účinně brání další oxidaci.

Z uvedeného vyplývá, že při práci se slitinami hliníku je nutno co nejpečlivěji **zachovávat celistvost oxidické vrstvy na hladině kovu** při tavení, ošetřování taveniny a při manipulaci s tekutým kovem. Rovněž při odlévání je nutno dbát, aby se oxidická vrstva vířením kovu netrhala, je nutno **zabránit rozstřikování taveniny**. **Každé porušení souvislosti ochranné oxidické vrstvy znamená okamžitou oxidaci dalšího kovu.** Vzhledem k hustotě oxidů,

která je blízká hustotě tekutého hliníku a k jejich velkému měrnému povrchu, oxidy jen obtížně vyplouvají z objemu taveniny a jejich účinné odstranění je možné pouze specielními metalurgickými postupy.



Obr. 40: Rychlost oxidace prvků při teplotě 800 ^{o}C

1.18.3 Vměstky tvořené intermetalickými fázemi

Většina intermetalických fází, s nimiž se setkáme ve slitinách hliníku, se z taveniny vylučuje až v intervalu krystalizace. V roztaveném kovu se tedy nevyskytují. Výjimkou je fáze, která se označuje jako „kal“ nebo „písek“ (angl. se označuje jako „sludge“). Jak bylo uvedeno v kap. 3.6, vzniká tato fáze ve slitinách s vyšším obsahem železa, manganu a chromu při nízkých teplotách. Nebezpečí vzniku kalu vzrůstá s rostoucím koeficientem segregace f_s

$$f_s = \% \text{ Fe} + 2. \% \text{ Mn} + 3. \% \text{ Cr}$$

Při hodnotách $f_s < 1$ se obvykle kalové fáze netvoří.

„Kalová“ fáze vzniká:

- postupně při dlouhodobém udržování tekutého kovu při teplotách, které jsou nižší, než je uvedeno na obr. 34
- při vsázení studeného materiálu do roztaveného kovu nebo při přelévání taveniny do studené pánve, kdy se tekutý kov náhle ochladí
- v dávkovacím a licím zařízení, když došlo k celkovému nebo místnímu ochlazení kovu

Škodlivost kalových fází v odlitcích souvisí především s jejich vysokou tvrdostí 800-1000 HV. Zvyšují opotřebení kovových forem, licí komory a pístu licího stroje při lití pod tlakem. Zhoršují zabíhavost kovu, mohou ucpávat nařínutí vtoku v kovových formách. U odlitků zhoršují obrobitelnost a významně zvětšují opotřebení řezných nástrojů.

U slitin s vyšším obsahem Fe, Mn nebo Cr je prakticky jedinou možností, jak zabránit vyloučení této fáze, udržování kovu na teplotách vyšších, než odpovídá teplotě jejich vzniku. Doporučuje se také snížit obsah manganu. Fázi, která se již v tavicím zařízení vyloučila, není možno odstranit následným zvýšením teploty kovu ani rafinací. Odstranění částic z taveniny je možné filtrací při přelévání z tavicí pece nebo při odlévání.

1.19 Rafinace taveniny

Jako rafinace se označuje proces, při kterém se v tavenině snižuje množství vměstků. Při rafinaci se využívají zejména následující postupy:

- odstátí taveniny
- vynášení vměstků plynovými bublinami
- chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí
- mechanické zachycování vměstků při filtraci taveniny

Principem **odstátí** je separace vměstků na principu jejich vyplouvání. Vzhledem k téměř stejným hustotám kovu a většiny vměstků je však tento způsob časově náročný a málo efektivní. Doba odstátí se musí pohybovat v řádu několika desítek minut až hodiny, účinnost je však stejně nízká. Odstátí může být použito také jako „předstupeň“ další rafinace.

Při rafinaci **profukováním plyny** se využívá pohybu plynových bublin k vynášení vměstků na hladinu. K tomuto způsobu rafinace dochází také při odplyňování taveniny a bude o něm pojednáno dále.

Používání krycích a rafinačních solí je jednak metodou zabránění vzniku vměstků, jednak jejich odstranění z taveniny.

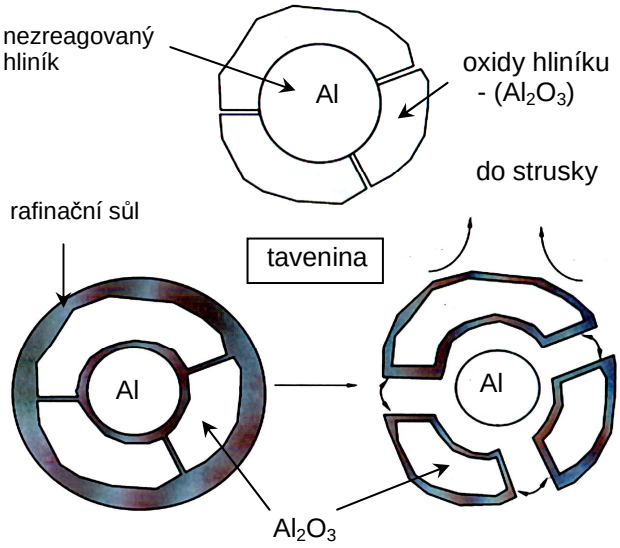
1.19.1 Krycí přípravky

Krycí soli jsou směsí především chloridů a fluoridů alkalických kovů, zejména NaCl, KCl, Na_3AlF_6 (kryolit), NaF, KF, $CaCl_2$ a dalších. Jejich účelem je **bránit přímému kontaktu taveniny s atmosferickým kyslíkem a s vlhkostí**. Složení přípravků se volí tak, aby jejich teplota tavení byla nižší, než je tavicí teplota slitiny, tj. na tavenině tvoří tekutou ochrannou vrstvu strusky. Přidávají se již do pevné vsázky nebo po natavení na hladinu kovu. Dávkování solí má být takové, aby byla zakryta celá hladina, obvykle dostačuje množství kolem 1% z hmotnosti vsázky. Soli s výhradně krycím účinkem se při tavení siluminů používají spíše výjimečně. (U slitin s obsahem nad 2% Mg nelze používat krycí soli obsahující sodík, neboť by došlo k reakci: sůl Na + Mg → sůl Mg + Na. Tím by došlo ke ztrátám hořčíku vazbou do strusky a naopak k uvolnění sodíku do kovu. To může mět nepříznivý účinek na mechanické vlastnosti slitiny.)

1.19.2 Rafinační přípravky

Účelem rafinačních solí je **odstranit z taveniny oxidické vměstky, snížit ztráty kovového hliníku, případně snížit obsah některých nežádoucích prvků.** Chemicky se opět jedná o směs chloridových a fluoridových solí s přísadou dalších aktivních komponent, které s nimi reagují a ovlivňují povrchové napětí mezi kovem a oxidy. Některé složky rafinačních solí umožňují selektivní odstranění nežádoucích prvků.

Oxidické vměstky v tavenině vytvářejí obálku kolem částic nezreagovaného hliníku. Tyto částice oxidů s kovem vyplouvají nebo jsou jinak vynášeny na hladinu kovu, kde tvoří strusku. Struska, která se odstraňuje z hladiny v tavicích a udržovacích pecích tvoří tzv. „stěry“. **Stěry kromě oxidů a různých vměstků obsahují i značné množství kovové fáze, která pro slévárnu znamená ztrátu kovu.** Stěry se ve větších slévárnách shromažďují a dodávají k hutnímu zpracování. Cílem rafinace je pomocí rafinačních přípravků rozrušit oxidickou obálku a tak uvolnit nezreagovaný kov zpět do lázně. Princip tohoto rafinačního účinku je znázorněn na obr. 41. Aktivní sloučeninou v rafinačních přípravcích je např. fluorosilikát sodný Na_2SiF_6. Ten proniká podél hranice mezi oxidickou obálkou a kovem, obaluje oxidické částice a tvoří s nimi „suchou strusku“ s malým obsahem kovového hliníku.



Rafinační přípravky se používají obvykle až v závěru tavby. Pomocí ponorného zvonu se potopí ke dnu lázně. Soli je nutno v lázni dokonale promíchat v celém objemu taveniny. Velmi účinná je injektáž rafinačních solí do taveniny dmýcháním neutrálního plynu. Po aplikaci rafinační soli je nutno nechat taveninu „odstát“, tj. zařadit prodlevu (alespoň 5-10 min.) během níž reakční zplodiny vyplavou na hladinu.

Obr. 41:

Rozrušení oxidických obálek při rafinaci působením Na_2SiF_6

Odstranění oxidických vměstků je obecným problémem všech sléváren hliníku. V některých specielních případech se však požaduje i odstranění (nebo snížení obsahu) prvků, které jsou v dané slitině nežádoucí. Jedná se zejména o odstranění sodíku, vápníku nebo hořčíku. V tom případě rafinační přípravky obsahují i složky se selektivní vazbou na tyto prvky, zejména $MnCl_2$ a AlF_3, které reagují podle rovnic:

$2\ Na + MnCl_2 \rightarrow 2\ NaCl + Mn$
$3\ Ca + 2\ AlF_3 \rightarrow 3\ CaF_2 + 2\ Al$
$3\ Mg + 2\ AlF_3 \rightarrow 3\ MgF_2 + 2\ Al$

1.19.3 Filtrace

Filtrace je účinný způsob zachycování vměstků. K tomuto účelu se používají ploché tkaninové filtry, kovová sítka nebo keramické filtry. Filtrace se provádí při přelévání taveniny z tavicích pecí do transportních pánví, v udržovacích pecích nebo přímo ve formách. Filtrací plochými filtry se výborně odstraní především vměstky typu oxidických blan. Pomocí keramických filtrů se účinně zachycují i velmi drobné nekovové vměstky.

Snižování množství vměstků v tavenině je především úkolem správného vedení tavby.

Hlavními zásadami pro omezení vzniku vměstků je:

- nepoužívat znečištěný nebo mastný vratný materiál, nepoužívat třísky
- do roztaveného kovu přidávat pouze dobře předehřátou pevnou vsázku
- tavit rychle – největší množství vměstků vzniká v době, kdy je vsázka ještě v kašovitém stavu a netvoří souvislou hladinu
- používat vysušené soli, čisté a předehřáté nářadí
- omezit víření taveniny v tavicích a udržovacích pecích, omezit počet přelévání, zbytečně taveninou nemíchat (neporušovat ochrannou oxidickou vrstvu)
- nepřehřívat taveninu na zbytečně vysoké teploty (zásadně ne nad 780 ^oC)
- zabránit rozstřikování kovu při přelévání taveniny a při odlévání (odlévat z malé výšky, používat spodní zaústění zářezů)

1.19.4 Kontrola čistoty slitin

Kontrola obsahu vměstků je poměrně obtížná. Laboratorně lze kontrolu provádět např. chemickou analýzou, vysokoteplotní extrakcí, metalograficky nebo posouzením některých fyzikálních vlastností. Většina těchto metod však je časově náročná, vyžaduje specielní drahé zařízení a proto se obvykle nepoužívá.

V provozních podmínkách se uplatňují technologické metody, které posuzují obsah vměstků podle některých vlastností kovu. Takovými metodami jsou např.:

- měření zabíhavosti – vychází z předpokladu, že slitina s větším množstvím vměstků má horší zabíhavost
- lomová zkouška – jednoduchý odlitek se přerazí a vizuálně se hodnotí množství vměstků na lomové ploše
- hodnocení obrobené plochy po opracování diamantem – provádí se vizuálním nebo mikroskopickým vyhodnocením jemně obrobené plochy
- tzv. Drosstest - při něm ve vakuované komoře tuhne vzorek kovu tak, že zkušební kelímek je ochlazován ode dna a vměstky se postupně vytlačují k hladině. Množství vměstků se hodnotí vizuálním posouzením stavu hladiny. K podobným výsledkům se dostáváme při měření stupně naplynění metodami, které využívají tuhnutí za podtlaku. Rovněž tam lze podle vzhledu hladiny hodnotit množství vměstků. Jedná se však vždy o velmi přibližné kvalitativní hodnocení.

Technologické a metalografické metody umožňují posouzení čistoty slitiny až následně po odebrání a zpracování vzorků. Metodou, která je vhodná pro kontiuální hodnocení obsahu vměstků je fyzikální metoda nazvaná LIMCA, která je založena na posouzení změn elektrického odporu hliníkové taveniny při proudění v tenkém kanále. Investiční i provozní náklady této metody jsou však velmi vysoké a je proto vhodná pouze pro velké metalurgické provozy.

Ve slévárenských provozech není provozní hodnocení obsahu vměstků v hliníkových slitinách obvyklé. Běžnější je v hutní produkci hliníku, zvláště u materiálů určených pro válcování.

1.20 Plyny ve slitinách hliníku

Jediným plynem, jehož rozpustnost v tekutém hliníku je technicky významná, je vodík.

1.20.1 Zdroje vodíku

Hlavním zdrojem vodíku je vlhkost v pecní atmosféře, v solích, vyzdívkách, špatně vysušených kelímcích a na vlhkém nářadí.

Při styku roztaveného kovu s vodní parou dochází k disociaci vody. Kyslík reaguje s hliníkem za tvorby oxidu hlinitého, vodík se v roztaveném kovu rozpouští. Reakce probíhá podle rovnice

$$2\,[Al] + 3\,\{H_2O\} \rightarrow (Al_2O_3) + 6\,[H]$$

Krycí a rafinační soli bývají jedním z hlavních nositelů vlhkosti. Soli bývají hygroskopické a snadno absorbují vodu z okolního prostředí. Proto se mají skladovat v suchu, v uzavřených obalech. Před použitím je vhodné soli dobře vysušit při teplotách kolem 200 ^{o}C.

Nové tavicí kelímky a nové vyzdívky musí být před použitím velmi pečlivě vysušeny a předehřáty do červeného žáru. Nelze zapomínat, že i starší kelímky, nepoužívané po několik dnů, mohou znovu absorbovat vlhkost. Používané **kovové nářadí** musí být opatřeno nátěry a pečlivě vysušeno.

Významným zdrojem vodíku může být i **vsázka** v případě, že se přidává do roztaveného kovu bez důkladného předehřátí (nestačí pouhé vysušení). Voda je vázána v pórech na povrchu vsázkových surovin a rovněž v hydroxidech, které se tvoří na zoxidovaném povrchu v podobě $Al(OH)_3$. Z nich se vodík uvolňuje reakcí s hliníkem

$$(Al(OH)_3) + [Al] \rightarrow (Al_2O_3) + 3\,[H]$$

Vodní pára reaguje s kovovým hliníkem, nikoliv s oxidy. Neporušená vrstva oxidů proto taveninu poměrně dobře chrání před dalším naplyněním do teploty maximálně asi 900 ^{o}C. Pokud je tato teplota překročena, rychlost naplynění se prudce zvyšuje.

Zdrojem vodíku mohou být rovněž uhlovodíky a vodní pára ze spalných plynů v tavicích nebo udržovacích pecích, ze znečistěné nebo zamaštěné vsázky apod.

1.20.2 Rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách

Rozpustnost vodíku je maximální množství vodíku, které se může za rovnovážných podmínek rozpustit v kovu určitého chemického složení, při určité teplotě a tlaku. Určuje se podle vztahu:

$$\log S = \frac{1}{2} \log p_{H2} - \frac{A}{T} + B \qquad (5.1)$$

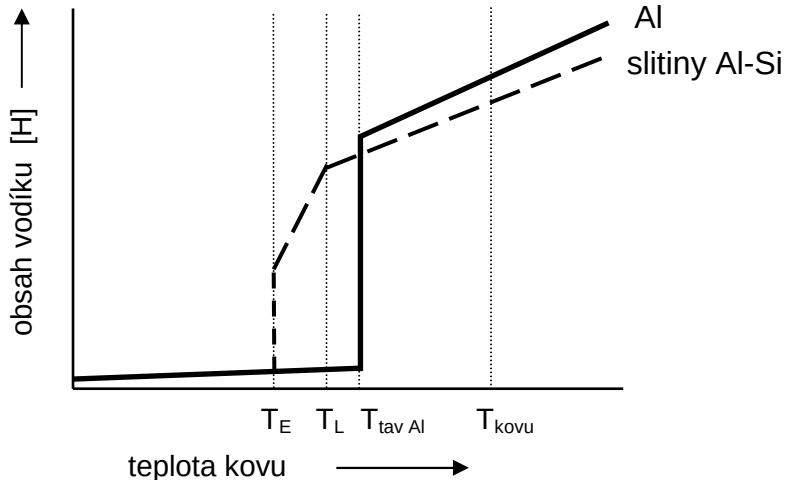
kde značí: S - rozpustnost vodíku v tavenině (cm^3/100 g)
p_{H2} - parciální tlak vodíku v okolní atmosféře (kPa)
T - teplota kovu (K)
A, B – konstanty pro daný kov

Skutečné množství rozpuštěného plynu může být menší, než je jeho rozpustnost (např. při tavení způsobem, který omezuje přístup vlhkosti, nebo po odplynění taveniny). Jestliže naopak je skutečný obsah vyšší, než odpovídá rozpustnosti za dané situace, uniká přebytečný plyn difuzí nebo tvoří bubliny. **Snížení rozpustnosti vodíku během tuhnutí je hlavní příčinou vzniku plynových dutin ve slitinách hliníku.**

Při nerovnovážných podmínkách (např. při rychlém ochlazování) může být v kovu rozpuštěno i větší množství vodíku, než odpovídá rovnovážné hodnotě rozpustnosti. Tento stav se označuje jako **přesycený tuhý roztok**.

Množství rozpuštěného vodíku se obvykle určuje v jednotkách cm^3 vodíku na 100 g kovu. Tato jednotka přibližně odpovídá koncentraci vodíku v ppm (1 cm^3/100 g = 0,9 ppm).

Pro slitiny hliníku je typický **velký rozdíl rozpustnosti vodíku v tuhém a v tekutém stavu.** V tuhém stavu při teplotě 660 °C je rozpustnost vodíku v Al pouze 0,036 cm^3/100g. V roztaveném kovu při stejné teplotě je ale rozpustnost 0,77 cm^3/100g, to je asi 20 x vyšší – obr. 42.



Obr. 42: Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a slitinách Al-Si

Při zvyšování teploty roztaveného kovu se rozpustnost velmi výrazně zvětšuje – každým zvýšením teploty o 110 K se přibližně zdvojnásobuje. Zbytečné přehřívání slitiny proto vede k významnému zvýšení obsahu plynu a ke zvýšení bublinatosti odlitků.

Rozpustnost vodíku při dané teplotě závisí na parciálním tlaku vodíku v okolní atmosféře. Tato závislost je vyjádřena Sievertsovým zákonem, který má pro dvouatomové plyny tvar

$$S = k \,.\sqrt{p_{H2}} \qquad (5.2)$$

Vliv tlaku na rozpustnost vodíku se v metalurgické praxi často využívá při odplyňování.

Pro čistý hliník v tekutém stavu má rovnice (5.1) tvar:

$$\log S = \frac{1}{2}.\log p_{H2} - \frac{2550}{T} + 1{,}62$$

Rozpustnost vodíku ve slitinách hliníku se zachovává stejný charakteristický průběh, jako je tomu u čistého hliníku. Ke změně rozpustnosti dochází v celém intervalu teplot krystalizace mezi teplotami likvidu a solidu (resp. eutektickou teplotou). Většina důležitých

slitinových prvků jako Si, Zn, Cu a Mn rozpustnost vodíku snižuje, naopak Mg, Na, Ca, Li, Ti a některé další rozpustnost zvyšují. V tab 12. jsou uvedeny hodnoty konstant A a B ve vztahu (5.1) pro některé druhy slitin.

Tab. 12: Konstanty pro stanovení rozpustnosti vodíku v některých slitinách hliníku

Slitina	Konstanta **A**	Konstanta **B**
Al	2550	1,62
Al Cu 4	3050	1,94
Al Si 8	3050	1,95
Al Si16	3150	3,00

1.20.3 Vznik plynových dutin v odlitcích

Drobné dutiny, které se vyskytují v odlitcích z hliníkových slitin se obvykle označují termínem „bubliny“ nebo „póry“ a vznikající slévárenská vada jako „bublinatost“ nebo „porezita“. Příčinou vzniku bublin je změna rozpustnosti vodíku při tuhnutí.

V roztaveném kovu může být přítomen vodík maximálně do obsahu, který odpovídá křivce rozpustnosti. Při ochlazování tekutého kovu se jeho rozpustnost snižuje. Při překročení meze rozpustnosti vodík z taveniny uniká buď difuzí, nebo tvoří plynové dutiny.

Snížení obsahu plynu difuzí se využívá při tzv. „odstátí“ taveniny při nízkých teplotách (blízkých teplotě tavicí). Po odstátí se tavenina rychle přehřeje na potřebnou licí teplotu tak, aby nedošlo k opětovnému naplynění. Snížení obsahu vodíku při odstátí probíhá velmi pomalu a je nedokonalé, takže nemá valný praktický význam.

Únik vodíku z roztaveného kovu ve formě bublin je zřetelně vidět např. při odplyňování za sníženého tlaku. Plynové bubliny mohou vznikat mechanizmem homogenní nebo heterogenní nukleace. Podmínkou pro homogenní nukleaci bublin v roztaveném kovu je stav, kdy tlak v bublině p_{H2} je vyšší, než součet tlaků metalostatického $\mathbf{p_{met}}$, atmosferického $\mathbf{p_{atm}}$ a tlaku, vyvolaného povrchovým napětím $\mathbf{p_\sigma}$.

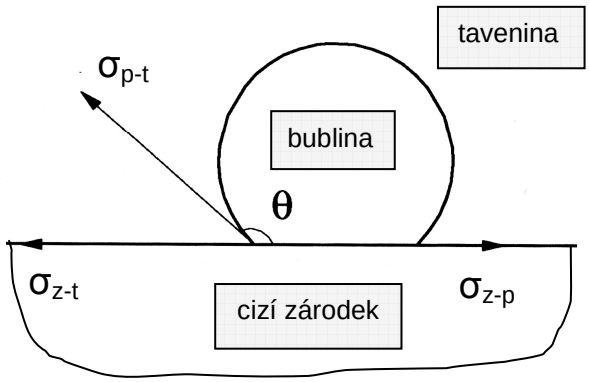
$$p_{H2} > p_{atm} + p_{met} + p_\sigma \qquad (5.3)$$

Z těchto členů je významný zvláště tlak vyvolaný povrchovým pnutím p_σ – pro kulovitou bublinu daný vztahem:

$$p_\nu = \frac{2\ \sigma}{r} \qquad (5.4)$$

kde: σ – povrchové napětí na rozhraní tavenina-bublina
r - poloměr bubliny

Je zřejmé, že hodnota členu p_σ při nukleaci bubliny, kdy $r \rightarrow 0$, se blíží $p_\sigma \rightarrow \infty$. Předpokládá se, že hodnota tlaku, který je ve skutečnosti nutný pro homogenní nukleaci bublin je řádově 3000-5000 MPa. Z tohoto důvodu je vznik bublin mechanismem homogenní nukleace nepravděpodobný a v reálných podmínkách se bubliny tvoří pouze mechanismem heterogenní nukleace.



Při heterogenní nukleaci bublin slouží jako krystalizační zárodek cizí tuhá částice. Energetické podmínky pro nukleaci bubliny na cizím zárodku jsou určeny velikostí povrchového napětí mezi taveninou, cizí částicí a plynem – obr. 43.

Obr. 43: Tvorba bublin na cizím zárodku

Velikost a vzájemný poměr těchto napětí určuje kontaktní úhel θ a tím smáčivost cizího zárodku a bubliny.

$$\cos\Theta = \frac{\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p}}{\sigma_{p-t}}$$

kde značí: $\sigma_{z\text{-}t}$ – povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou
$\sigma_{z\text{-}p}$ – povrchové napětí mezi zárodkem a plynem
$\sigma_{p\text{-}t}$ - povrchové napětí mezi plynem a taveninou

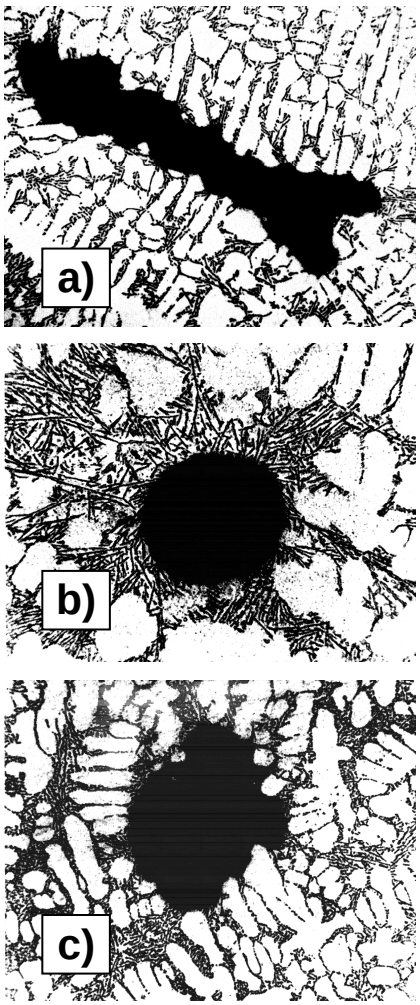
Vhodnými nukleační zárodky bublin jsou takové částice, které **nejsou smáčivé** taveninou, tzn., že hodnota $\sigma_{z\text{-}t}$ je malá a úhel $\theta > 90^o$ (cos θ má zápornou hodnotu). Tuto podmínku splňují zejména **oxidy, které jsou proto obvyklými nukleačními zárodky bublin**. Méně účinné jsou boridy, nitridy nebo karbidy a nejméně účinné jsou běžné očkovací prostředky. Tím se současně vysvětluje, proč je bublinatost tak významně spojena s přítomností oxidických vměstků v tavenině.

Pórovitost, (často nazývaná porezita) jako slévárenská vada, **vzniká během tuhnutí**, kdy se rozpustnost vodíku prudce snižuje. V důsledku malé hodnoty rozdělovacího koeficientu vodíku k_H (pro slitiny hliníku přibližně k_H =0,05), dochází před krystalizační frontou k velkému obohacení zbytkové taveniny vodíkem, což v těchto místech výrazně zvyšuje hodnotu parciálního tlaku vodíku p_{H2} a podporuje nukleaci bublin.

V intervalu tuhnutí se využívá nejen nukleačního potenciálu cizích zárodků, ale i krystalů vlastní tuhé fáze. Situace je podobná, jako na obr. 43, kde cizí zárodek je nahrazen krystalem tuhého kovu. V některých případech není vůbec nutné, aby docházelo k nukleaci nových bublin, neboť se využijí již existující iniciační bubliny, např. ve vměstcích ze žáruvzdorných hmot, z formovacích směsí apod.

Kromě koncentračních poměrů a vlivu cizích zárodků se při nukleaci plynových bublin významně uplatňují i lokální tlakové poměry v oblasti jejich vzniku. Např. při krystalizaci může tuhá fáze uzavřít určité mikroobjemy taveniny, do nichž se nemůže dosazovat tekutý kov. V těchto místech vzniká podtlak (podle Sievertsova zákona se místně sníží rozpustnost vodíku) a zlepšují se tak podmínky pro tvorbu plynových dutin. (Uplatňují se však i další mechanizmy vzniku místního podtlaku.) Mikrostaženiny jsou vždy vhodným místem pro vznik plynových bublin.

Porezita bývá způsobena kombinací tvorby mikrostaženin a bublin. O čistých plynových bublinách a o čistých mikrostaženinách můžeme hovořit jen zřídka. (Udává se, že vznik čistě plynových pórů u slitin hliníku je možný až při obsahu vodíku vyšším, než 0,4 cm^3/100 g Al.) V případě, kdy převažuje mechanizmus vzniku bublin, mají póry více kulovitý tvar, pokud převažuje mechanizmus mikrostaženin, jsou dutiny tvarově členité a kopírují dendritickou



stavbu kovu – obr. 44. Póry se typicky vyskytují v mezidendritických prostorách, které jsou posledním místem odlitku, kde dochází k tuhnutí. Porezita je problémem zejména slitin se širokým intervalem tuhnutí.

1.20.4 Vliv rychlosti ochlazování a metalurgického zpracování kovu na pórovitost

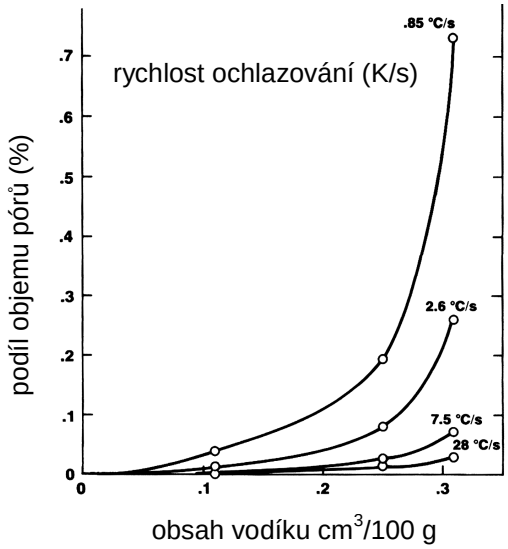
Tvar a poloha pórů ve struktuře kovu závisí zejména na morfologii tuhé fáze, na obsahu plynů a na rychlosti tuhnutí.

Pokud je v tavenině vysoký obsah plynů, tvoří se plynové dutiny převážně kulovitého tvaru již při nízkém podílu ztuhlé fáze. **Při pomalém tuhnutí** difunduje vodík do bublin na poměrně velké vzdálenosti a vznikají tak **velké bubliny**, které nemají téměř žádnou vazbu na krystalickou strukturu kovu.

Při rychlém postupu krystalizační fronty se bubliny brzy obalí vrstvou tuhého kovu, aniž by mohlo difuzí vodíku v tavenině dojít k jejich dalšímu růstu. Výsledkem je vznik malých kulovitých nebo protáhlých bublin, uzavřených v mezidendritických prostorách kovu – tzv. **mikrostaženin**. Čím širší je dvoufázové pásmo, tím více se uplatňuje vznik mikrostaženin.

Obr. 44: Tvar pórů ve slitinách Al:
a) mikrostaženina
b) plynová bublina
c) porezita (plyn a mikrostaženina)

Při reálné rychlosti tuhnutí nedojde ke snížení obsahu vodíku až na rovnovážnou hodnotu rozpustnosti v tuhém stavu. Část vodíku zůstává v kovu v podobě přesyceného tuhého roztoku. **Čím rychlejší je ochlazování**, tím větší je přesycení tuhého kovu, vyloučí se méně plynného vodíku a **tím menší je pórovitost** – obr. 45. Z tohoto důvodu jsou na vznik plynových dutin více náchylné silnostěnné odlitky, lité do pískových forem, než odlitky tenkostěnné a odlitky lité do kovových forem.



Rovněž očkování a modifikace mají vliv na množství a rozložení pórů. Zatímco neočkované a nemodifikované slitiny mívají spíše sklon ke vzniku soustředěných, velkých dutin, vlivem očkování i modifikace se zvětšuje sklon ke vzniku rozptýlených mikrostaženin.

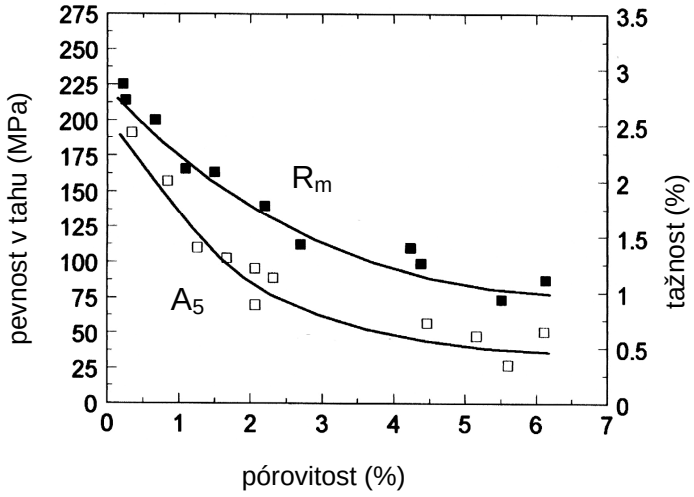
Obr. 45: Vliv obsahu vodíku a rychlosti ochlazování na objem pórů

1.20.5 Důsledky pórovitosti na vlastnosti odlitků

Pórovitost patří ve slévárnách hliníku k nejrozšířenějším vadám. Tomu také odpovídá fakt, že mnoho zásad tavení a metalurgických operací je zaměřeno na dosažení nízkého stupně naplynění taveniny. Porezita zhoršuje celou řadu užitných vlastností hliníkových odlitků, zejména:

- pevnostní vlastnosti – snižuje se pevnost i tažnost – obr. 46
- únavové vlastnosti – póry jsou iniciačními místy pro vznik únavových lomů
- těsnost – pronikání tlakového media stěnou odlitku je častou příčinou zmetkování odlitků
- kvalitu obrobených ploch
- povrchovou úpravu odlitků

Vady způsobené plynovými dutinami jsou obvykle neodstranitelné



Obr.46:
Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti slitiny AlSi6Cu4

1.21 Odplyňování hliníkových slitin

Odplyňování je metalurgická operace jejímž cílem je snížení obsahu vodíku na takovou úroveň, při které nedojde k vyloučení bublin. Obsah vodíku po natavení závisí na druhu tavicí pece, na použitých vsázkových surovinách, vlhkosti použitých solí a na řadě dalších vlivů a obvykle bývá v rozmezí od 0,2 do 0,8 cm^3/100 g Al. **Aby se zamezilo vzniku bublin je nutné obsah vodíku v tavenině snížit pod 0,2, někdy až pod 0,1 cm^3/100 g Al.** Přípustný obsah vodíku závisí na technologii odlévání (do písku, gravitačně do kokil, tlakové lití), na tloušťkách stěn (na rychlosti tuhnutí) a především na účelu použití odlitků. Obecně platí, že **čím pomalejší je tuhnutí**, tím vyšší je sklon ke vzniku bublin a **tím dokonalejší musí být odplynění.** Proto při odlévání do pískových forem a odlévání silnostěnných odlitků jsou nároky na odplynění vyšší, než při lití tenkostěnných odlitků a při lití do kovových forem. Při tlakovém lití odlitků s malými nároky na vnitřní kvalitu se často odplyňování nemusí provádět vůbec.

Z výrobního hlediska je zajímavá **korelace mezi naplyněním a stahováním**. Plynové póry mohou částečně nebo úplně nahrazovat úbytek objemu kovu stahováním při tuhnutí. Velmi **silně odplyněná tavenina má proto i silný sklon k tvorbě soustředěných staženin** – to vyžaduje i intenzivní nálitkování. Pokud je v odlitku přípustný určitý obsah plynových bublin, může rozumný obsah plynu v tavenině požadavky na nálitkování dosti podstatně omezit. Rozhodují ovšem nároky na kvalitu odlitků.

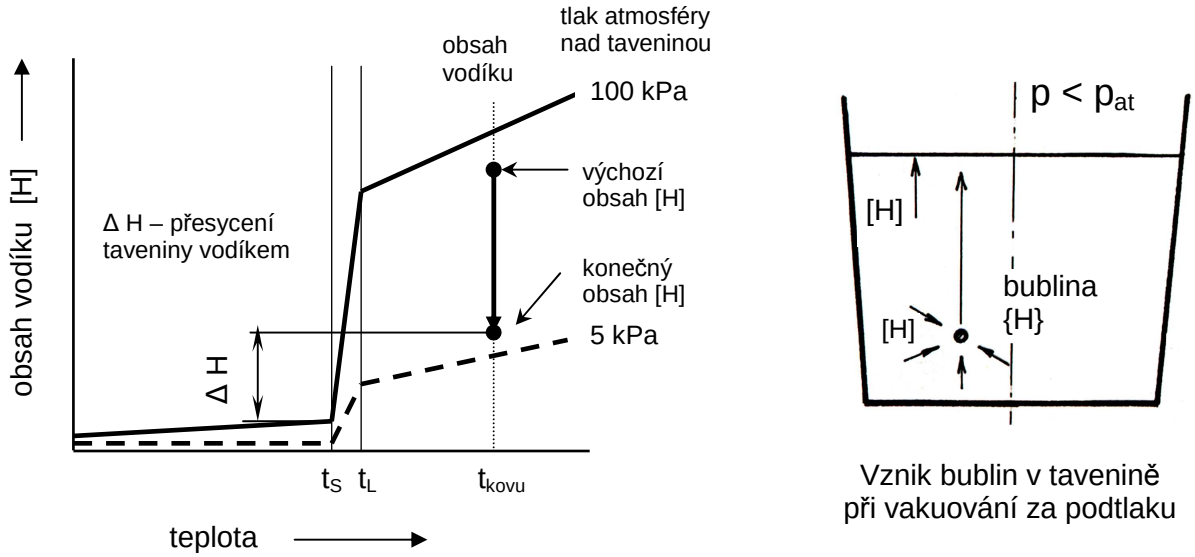
Snížení obsahu plynů v hliníkových slitinách se provádí obvykle:

- vakuováním taveniny
- probubláváním taveniny aktivními nebo neaktivními plyny

Jak již bylo uvedeno, nemá pouhé odstátí taveniny podstatný vliv na snížení obsahu plynů. Odstátí jako metoda odplyňování proto nemá praktický význam.

1.21.1 Princip odplyňování vakuováním

Odplyňování vakuováním spočívá ve **snížení tlaku atmosféry nad hladinou roztaveného kovu.** Snížením parciálního tlaku p_{H2} se sníží podle Sievertsova zákona ($S = k.\sqrt{p_{H2}}$) rozpustnost vodíku v tavenině. Jestliže je maximální rozpustnost vodíku za tohoto podtlaku menší, než je jeho aktuální obsah, stává se tavenina přesyceným roztokem a vodík z ní uniká v podobě drobných bublin – obr. 47.



Obr. 47: Princip odplyňování za sníženého tlaku

V praxi se tento způsob odplynění provádí tak, že **po dosažení požadované teploty kovu se pánev s kovem zaveze do vakuovacího zařízení.** Zařízení se uzavře zvonem a sníží se tlak ve vakuovací komoře. Průhledem ve víku je možno sledovat bouřlivost odplynění a podle toho regulovat tlak v komoře a dobu odplynění. V praxi se snižuje **tlak v odplyňovací komoře** na hodnotu obvykle **asi 5 kPa**. Při snížení tlaku v komoře na 1/20 atmosférického tlaku se sníží rozpustnost vodíku v tavenině asi 4,5 krát. Odplyňování trvá několik minut a lze tak dosáhnout konečného obsahu vodíku až 0,08 ml H_2/100 g Al.

Intenzitu odplynění je možno zvýšit dmýcháním inertního plynu do taveniny pomocí trubice s porézní zátkou nebo porézní tvárnice, instalované ve vyzdívce pánve. V tomto případě nemusí vodík tvořit vlastní bubliny ale difunduje do bublin inertního plynu. Odstraňování vodíku je tak energeticky snašší, probíhá rychleji a dosahuje se nižších konečných hodnot naplynění.

1.21.2 Princip odplyňování probubláváním plyny

Je založeno na difuzi vodíku do bublin s nulovým parciálním tlakem vodíku, s nimiž je vynášen na hladinu, nebo s nimi chemicky reaguje. Podle vzájemné reaktivity vodíku a vháněného plynu hovoříme o **odplyňování inertními plyny nebo aktivními plyny**.

Inertními plyny, používanými pro odplyňování slitin hliníku jsou dusík nebo argon. Tyto plyny se vhání do taveniny (nebo uvolňují z odplyňovacích solí) v blízkosti dna pánve tak, aby tvořily co nejmenší bubliny. Bubliny vyplouvají na hladinu rychlostí **v**, která je dána Stokesovým zákonem

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

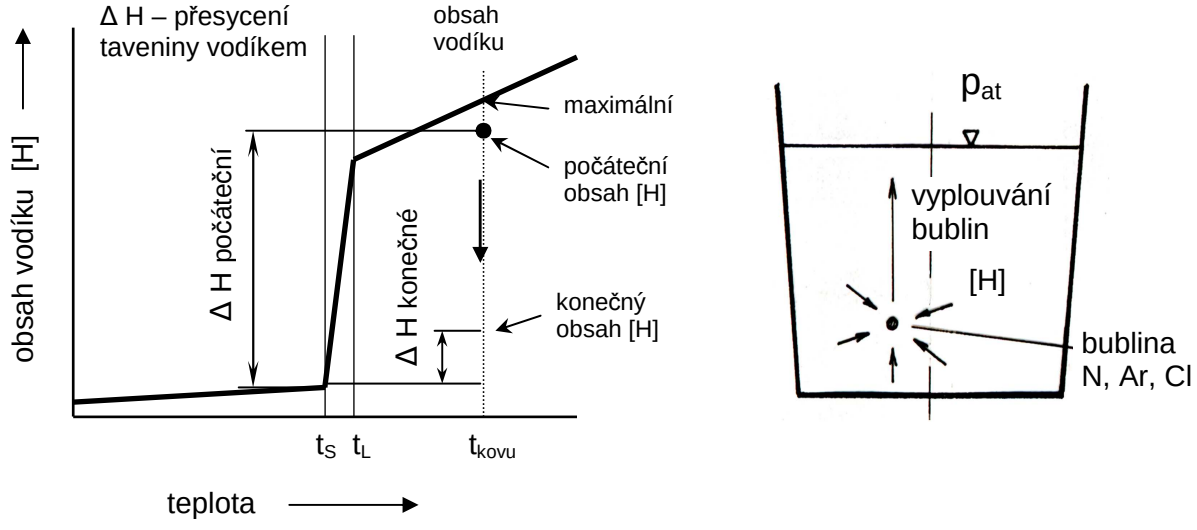
ρ – hustota kovu, resp. plynu (kg/m^3)
η - dynamická viskozita (kg.s^{-1} m^{-1})
r - poloměr bubliny (m)

Do bublin, které mají zpočátku nulový parciální tlak vodíku, difunduje vodík z taveniny podle vztahu

$$[H] \leftrightarrow \tfrac{1}{2} \{H_2\}$$

Vodík je spolu s bublinami vynášen na hladinu – obr. 48. Transport vodíku z taveniny do bublin neutrálního plynu probíhá, dokud se nevyrovná parciální tlak vodíku v bublinách a v lázni. Intenzita odplynění závisí na velikosti styčné plochy obou medií a na době, po kterou bubliny vyplouvají. Z obou těchto důvodů je nutné, aby bubliny plynu byly co nejmenší. Jestliže např. 1 dm^3 plynu vytvoří bubliny o průměru ø 10 mm, jejich celkový povrch je 6 m^2. Při velikosti bublin ø 1 mm je tento povrch již 60 m^2. Současně také 10 krát menší bubliny vyplouvají 100 krát menší rychlostí.

Malá velikost bublin, dostatečně dlouhá dráha (tzn. jejich tvoření u dna dostatečně vysoké pánve) a dobré promíchávání (homogenizace) taveniny, jsou klíčovou podmínkou účinného odplynění. Rovněž je nutné, aby neutrální plyn neobsahoval vlhkost. Z tohoto důvodu je nutno používat vysoce čisté rafinační plyny, v případě dusíku čistoty 99,99 %. Dusík běžné technické čistoty naprosto nevyhovuje, neboť obsahuje značné množství vlhkosti. Účinek odplynění dusíkem a argonem je srovnatelný. Tvrdí se ale, že při argonování vzniká méně strusky.



Obr. 48: Princip odplyňování neutrálními a aktivními plyny

Jako aktivní plyny se označují takové plyny, u nichž dochází ke vzniku chemické sloučeniny s vodíkem. Jako aktivní plyny se používají **chlor nebo fluor** (dříve i freon). Chlor reaguje s roztaveným hliníkem podle rovnice

$2\ [Al] + 3\ \{Cl_2\} \rightarrow 2\ \{AlCl_3\}$

Chlorid hlinitý má teplotu sublimace cca 183 ^{o}C, tzn. že v tavenině hliníku je v plynné formě. Vodík, který difunduje do bublin s chloridem hlinitým s ním chemicky reaguje podle rovnice

$3\ \{H_2\} + 2\ \{AlCl_3\} \rightarrow 2\ Al + 6\ \{HCl\}$

Při průchodu $\{AlCl_3\}$ taveninou dochází k reakci také s dalšími prvky s vyšší afinitou ke chloru, než má hliník (nižší hodnotou Gibsovy energie ΔG) a k jejich selektivnímu odstranění z lázně. Při teplotě 700-800 ^{o}C a výchozí koncentraci 10 ppm se odstraňují prvky v pořadí Sr, Na, Ca, Li, Mg za vzniku chloridů $SrCl_2$, NaCl, $CaCl_2$, LiCl, resp. $MgCl_2$. (Při parciálním tlaku chloridu hlinitého 5.10^{-13} Pa a teplotě 1000 K jsou rovnovážné koncentrace Ca, Na a Li < 0,1 ppm a <10 ppm Mg.

Z uvedeného vyplývá, že **při odplyňování taveniny aktivními plyny se zruší modifikační účinek Na a Sr a podstatně se může snížit obsah Mg. Modifikace se proto musí provádět až po odplyňování.** (Přítomnost těchto prvků však může současně bránit průběhu odplyňování – např. $SrCl_2$ tvoří na povrchu bublin vrstvu, která brání přestupu vodíku z taveniny do bubliny. K odplynění proto dochází až po zreagování stroncia.)

Prvky, které mají hodnotu Gibsovy energie ΔG větší, než $AlCl_3$, se chlorováním z lázně neodstraní. To se týká všech běžných legur a nečistot (Si, Cu, Fe, Mn atd.)

Stupeň odplynění aktivními plyny bývá obvykle vyšší, než odplynění neutrálními plyny. Použití chloru a přípravků, které chlor uvolňují však v současné době naráží na striktní ekologické předpisy. Chlor je jedovatý plyn, působí korozivně a rovněž se podílí na porušování ozónové vrstvy zemské atmosféry. Z tohoto důvodu je používání chlorových přípravků velmi omezováno a pokud možno je nahrazováno neaktivními plyny. Pokud se chloru používá, musí být jeho obsah pouze v takových koncentracích, aby v tavenině zcela zreagoval na chemické sloučeniny. V plynné formě se používá pouze ve směsích s neutrálními plyny, v koncentracích nejvýše do 15 % Cl.

Použití plynů a solí s obsahem fluoru má ve srovnání s chlorem výhodu, že stejných efektů se dosáhne již při nižším parciálním tlaku fluoru. Produkty reakcí se z taveniny snadněji odstraňují a účinnější je rovněž rafinace tuhých vměstků. Vzhledem k větší toxicitě a agresivitě je však používání fluoridových prostředků ve většině zemí zakázáno.

1.21.3 Způsoby odplyňování aktivními a neutrálními plyny

Aktivní nebo neutrální plyny se do taveniny dostávají: - rozkladem odplyňovacích solí
- v plynné formě

Odplyňovací soli jsou směsí sloučenin, které se při teplotě taveniny rozkládají za vzniku plynného dusíku, případně chloru nebo fluoru. Solí, která uvolňuje chlor bývá často hexachlorethan C_2Cl_6. Soli, ve formě prášku, granulátu nebo tablet se ponoří ke dnu tavicího kelímku pomocí ponorného zvonu, nebo se do taveniny dmýchají tryskou dusíkem nebo argonem. Po skončení reakce se vyčká, až reakční zplodiny vyplavou na hladinu a struska

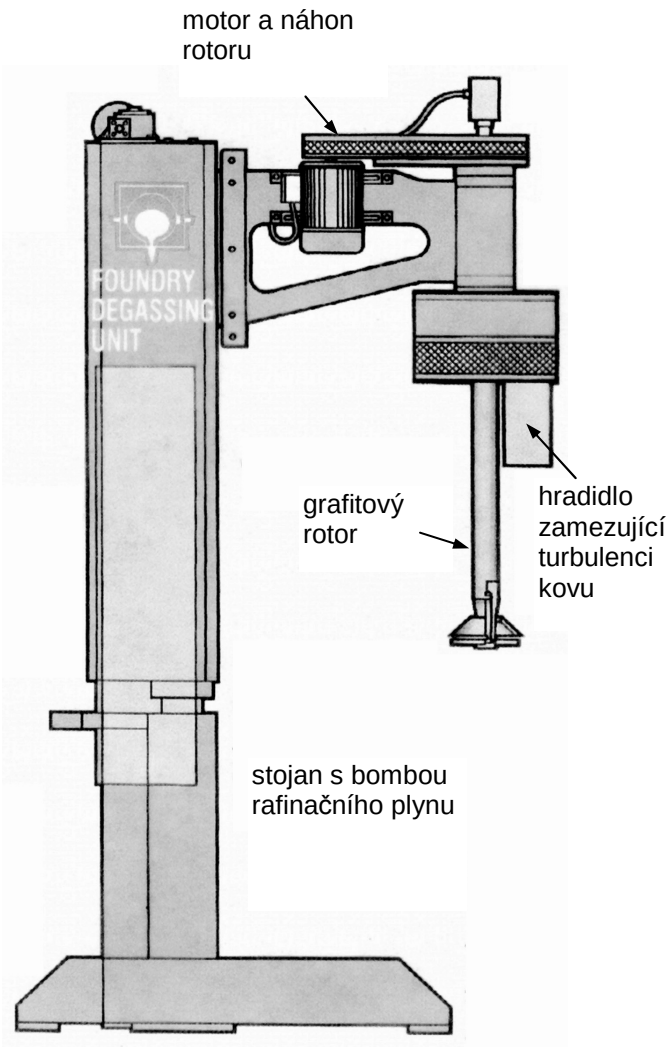
se z hladiny stáhne mimo kelímek. Druh solí se volí podle složení slitiny a teploty kovu. Dávkování zpravidla doporučuje výrobce přípravku (bývá mezi 0,5-1,0 % hmotnosti vsázky).

Aplikace plynných prostředků se má provádět tak, aby byl splněn základní předpoklad dobré účinnosti – tj. dosaženo co nejmenší velikosti bublin. Nosný plyn se vhání do taveniny pomocí trubic, porézních tvárnic nebo pomocí rotačních impelerů.

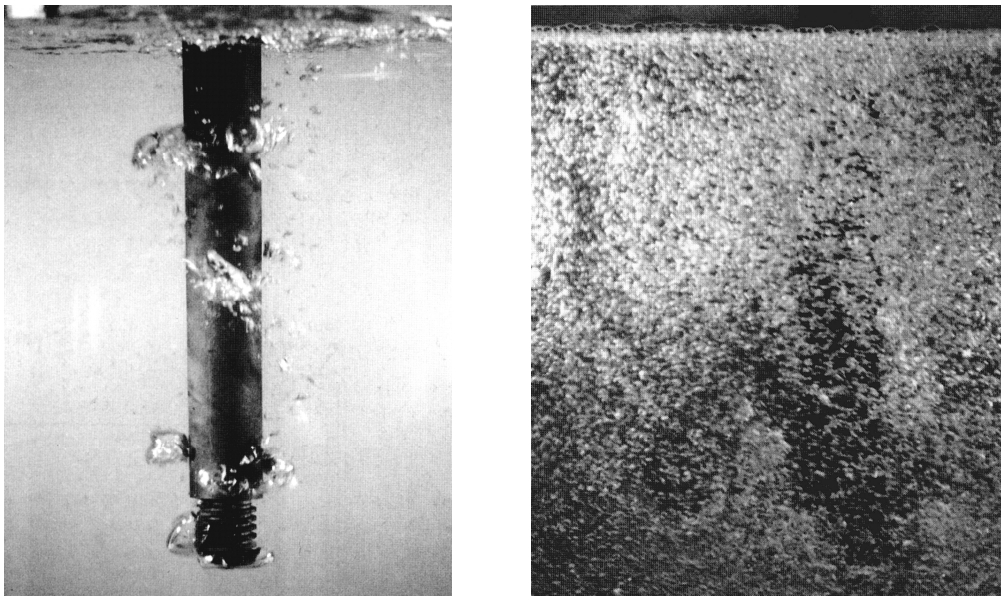
Jako **odplyňovací trubice** může být použita grafitová, keramická nebo kovová trubka, opatřená porézní zátkou. Trubice se ponoří ke dnu kelímku tak, aby dráha plynu v kovu byla co nejdelší. Porézní zátky se vyrábí z porézní keramiky nebo z porézního grafitu. Při použití trubice s otevřeným koncem bez porézní zátky vznikají bubliny velkého průměru (prakticky rovné průměru trubice), které jsou pro odplynění neúčinné. Použití porézních odplyňovacích trubic je vhodné v malých slévárnách pro menší velikosti kelímků.

Porézní tvárnice bývají trvale zabudovány do vyzdívky ve dně tavicí pece nebo specielní odplyňovací pánve. Přívod plynu je veden z vnějšku. Jejich účinek je prakticky stejný, jako u ponorných odplyňovacích trubic. Umístění trubic nebo porézních tvárnic musí být řešeno tak, aby bublinami současně docházelo k míchání lázně.

Rotorová zařízení jsou mobilní nebo stabilní odplyňovací jednotky, v nichž se nosný plyn vhání do taveniny grafitovým rotorem. Taková zařízení dodává např. fy. Foseco pod názvem FDU (Foundry Degassing Unit) (obr.49), fy. StrikoWestofen zařízení DC 2 a další výrobci. Rotor má tvar lopatkového kola a je výměnným způsobem nasazen na dutém hřídeli, který je poháněn elektromotorem. Plyn se do rotoru vhání osou hřídele z tlakových bomb, které jsou součástí zařízení. Rotor se otáčí volitelnou rychlostí, obvykle 300-500 otáček/min. a do taveniny vhání drobné bublinky plynu o průměru kolem 1-3 mm. Jako nosného plynu se používá převážně dusíku, méně často argonu, příp. s malými koncentracemi chloru. Velmi drobné bublinky plynu a intenzivní míchání taveniny zajišťují rychlé a účinné odplynění. Nutná doba odplyňování obvykle nepřesahuje 3 min. Srovnání velikosti bublin, které vznikají z otevřené trubky a z rotačního impeleru je průkazně vidět na obr. 50.



Obr. 49: Rotorové odplyňovací zařízení - FDU



Obr. 50: Velikost bublin z otevřené trubky a z rotačního impeleru

1.21.4 Měření naplynění taveniny

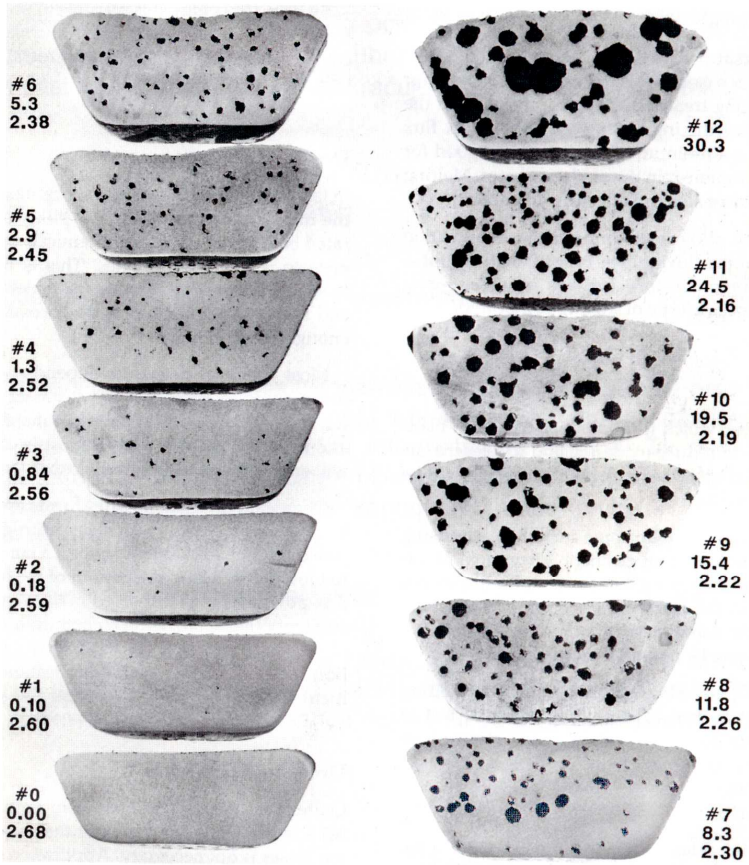
Metody měření obsahu vodíku v tavenině musí umožňovat operativní zjištění výsledku s dostatečnou přesností za provozně přijatelnou dobu. Operativnost je v podmínkách slévárny důležitější, než vysoká přesnost výsledku, neboť na základě tohoto měření se rozhoduje o pokračujícím odplyňování nebo o uvolnění tavby pro lití. Doba, která je pro toto zjištění k dispozici je řádově deset minut.

Z hlediska způsobu zjišťování obsahu plynů lze metody rozdělit na laboratorní a provozní.

Laboratorní metody jsou založeny na principu vakuové extrakce vodíku ze vzorku kovu, připraveného specielním postupem. Extrakce se provádí buď na tuhém vzorku při teplotách asi 50 K pod teplotou tuhnutí, nebo na roztavených vzorcích. Měřicí zařízení je velmi nákladné a samotné měření trvá poměrně dlouho. Při odběru a skladování vzorků je rovněž nutno respektovat velkou difuzní pohyblivost vodíku a vzorky skladovat při teplotách kapalného dusíku. Těchto metod se v provozní praxi neužívá.

Provozní metody jsou určeny pro orientační, převážně pouze kvalitativní hodnocení stupně naplynění taveniny. Jsou obvykle založeny na optickém pozorování a vyhodnocení vzhledu hladiny vzorku kovu, který ztuhl při atmosférickém tlaku nebo za podtlaku. Vodík se při tuhnutí vylučuje z kovu v podobě bublin, které v něm expandují a zůstávají uzavřeny pod tuhnoucí kůrou. Objem bublin kompenzuje objemový úbytek kovu v důsledku stahování při tuhnutí a vznik bublin se tak projeví „růstem“ vzorku. Hladina vzorku s nízkým obsahem vodíku proto má propadlý tvar, hladina naplyněného vzorku má tvar vypuklý. Míra „propadnutí“, nebo „růstu“ hladiny může sloužit jako měřítko stupně naplynění. Tuto tendenci zkušený tavič rozezná i na vzorcích, které tuhnou při atmosférickém tlaku, přesnost takového hodnocení je však velmi nízká. Na tomto principu je založena např. **Gürtlerova zkouška**. Při ní se do pískové formy odlije vzorek o ø 40-60 mm a tloušťce 15-25 mm.

Podstatného zvýšení citlivosti této metody se dosáhne při **tuhnutí vzorku za podtlaku**. Příkladem takové metody je **zkouška Straube-Pfeiffer**. Při ní se vzorek taveniny o hmotnosti 200-230 g naleje do kovového nebo keramického kelímku a nechá se ztuhnout při tlaku 5-10 kPa. Množství vodíku, který se vyloučí je podstatně větší, než při tuhnutí při atmosférickém tlaku a zkouška je mnohem citlivější. Aby byly výsledky vzájemně srovnatelné, je nutné pracovat s konstantním podtlakem a při srovnatelné době tuhnutí (přibližně s konstantním množství kovu). Vznik bublin závisí na přítomnosti nekovových vměstků, které slouží jako nukleační zárodky. Při stejném obsahu vodíku proto v čistém kovu vznikne méně bublin. Výsledek, získaný tímto typem zkoušek, je proto souhrnným posouzením naplynění a obsahu vměstků.



Polokvantitativní vyhodnocení zkoušek tuhnutí za podtlaku lze provést vizuelním srovnáním řezu hodnoceného vzorku se vzorníkem – obr. 51. (Ve vzorníku značí horní číslo pořadí, prostřední číslo procento pórů na řezné ploše, dolní číslo hustotu vzorku.)

Obr. 51:
Vzorník pro posouzení stupně naplynění

Moderní provozní metody se snaží spojovat požadavky na operativnost, reprodukovatelnost a přesnost měření obsahu vodíku.

1.21.4.1 Metoda první bubliny

Principielně tato metody vychází z platnosti rovnice 5.1. Vzorek taveniny se nalije do kelímku a umístí do studeného nebo vyhřívaného "hnízda" zkušebního zařízení. Prostor se uzavře víkem a postupně odsává vakuovou pumpou. Průhledem ve víku obsluha sleduje okamžik, kdy se na hladině kovu objeví první bublina a zaznamená příslušnou teplotu a tlak. Pomocí rovnice 5.1 se určí naplynění. U přístroje s teplým „hnízdem" kelímku je nastavena jeho teplota tak, že nedochází k tuhnutí kovu. V tomto případě **se měří** pouze **tlak při vzniku první bubliny, naplynění se vyhodnocuje na základě platnosti Sievertsova zákona** $[H] = k.\sqrt{p_{H2}}$ **.** (Přístroje tohoto typu jsou označovány jako „Aluschmelztester". Reprodukovatelnost měření je však nízká a velmi záleží na subjektivním hodnocení obsluhou. Proto se v praxi již používají jen zřídka.)

1.21.4.2 Metoda měření hustoty kovu – metoda dvojího vážení

Naplynění se obvykle stanovuje tzv. metodou dvojího vážení. **Principem metody je porovnání hustoty vzorku slitiny, který ztuhl při atmosférickém tlaku se vzorkem, který ztuhl za podtlaku.** Stejně jako v předchozím případě se využívá platnosti Sievertsova zákona, podle něhož je v kovu za podtlaku nižší rozpustnost vodíku a proto se při tuhnutí vyloučí více vodíkových bublin než při atmosférickém tlaku. Bubliny zůstávají v kovu uzavřeny a tím snižují jeho hustotu.

Tavenina hodnocené slitiny se odebere z tavicí pece a nalije do dvou zkušebních kelímků (kovových, keramických nebo z pískových směsí – podle výrobce) s objemem asi 40-80 ml. Jeden vzorek se nechá ztuhnout při atmosférickém tlaku, druhý za definovaného podtlaku ve vakuované komoře.

Hustota vzorku, který ztuhl při atmosférickém tlaku $\rho_{vz\ atm}$ a vzorku, ztuhlého ve vakuu ρ_{vzvak} se zjistí zvážením na vzduchu a po ponoření do kádinky s vodou s využitím principu Archimedova zákona.

Při vážení ve vodě je vzorek zavěšen na závěsném zařízení tak, že váha registruje pouze přírůstek hmotnosti vody, vytlačené objemem ponořeného vzorku – obr. 52. Výpočet hustoty vzorku ztuhlého při atmosférickém tlaku a vzorku ztuhlého za podtlaku se provádí podle následujícího schématu:

objem vzorku $$V_{vz} = \frac{m_{vz\,H2O}}{\rho_{H2O}}$$

hustota vzorku $$\rho_{vz} = \frac{m_{vz\,at}}{V_{vz}} = \frac{m_{vz\,at}}{m_{vz\,H2O}} \cdot \rho_{H2O}$$

kde značí: $m_{vz\ H2O}$ - hmotnost vzorku ponořeného ve vodě (kg)
$m_{vz\ at}$ - hmotnost vzorku na vzduchu (kg)
ρ_{H2O} - hustota vody (kg.m^{-3})
ρ_{vz} - hustota vzorku kovu (kg.m^{-3})

Obsah vyloučeného plynu je roven rozdílu měrných objemů obou vzorků

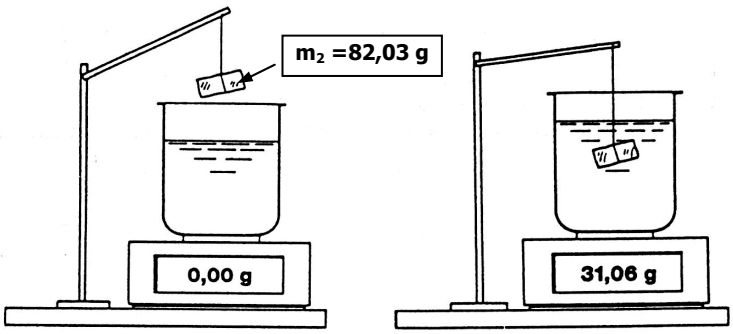
$$V_{H2} = \frac{1}{\rho_{vz\,vak}} - \frac{1}{\rho_{vz\,atm}} \qquad (m^3\ H_2/kg\ Al)$$

Z hustot $\rho_{vz\ atm}$ a $\rho_{vz\ vak}$ se určí tzv. **„index hustoty“** (z německého „Dichte Index“ označovaný jako DI). Některé přístroje počítají index hustoty již automaticky.

$$DI = \frac{(\rho_{vz\,atm} - \rho_{vz\,vak})}{\rho_{vz\,atm}} .100 \qquad (\%)$$

Měřicí zařízení sestává z těchto částí:

- vakuované komory s možností přesného nastavení tlaku. Obvykle se pracuje s tlakem 8 kPa
- přesných vah (požadovaná přesnost 0,01 g), s nádobkou na vodu a závěsem zkušebního vzorku. Je výhodné, když váhy umožňují tárování.



1. fáze: příprava
vzorek zvážit
zavěsit vzorek
vytárovat váhy

2. fáze: určení objemu
ponořit zavěšený vzorek
objem vzorku - V_{vz}:

$$V_{vz} = \frac{m_1}{\rho_{H2O}} = \frac{m_1}{1} = 31{,}06\,cm^3$$

3. fáze: určení hmotnosti vzorku
hustota vzorku - ρ_{vz}:

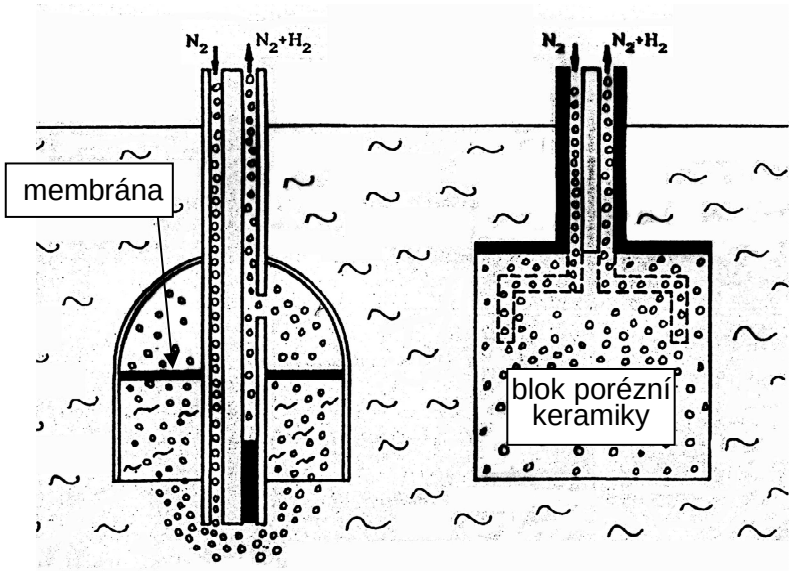
$$\rho_{vz} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{82{,}03}{31{,}06} = 2{,}64\ g.cm^{-3}$$

Obr. 52: Postup měření při metodě dvojího vážení

Metoda dvojího vážení je v současné době ve slévárnách asi nejběžnější, poměrně přesnou metodou. Hodnota indexu hustoty se při běžném lití obvykle pohybuje kolem několika procent. Moderní přístroje, určené pro tuto metodu vyžadují pouze zvážení vzorku na vzduchu a ponořeného do vody. Výpočet hustoty se provádí automaticky.

Protože vznik plynových bublin úzce souvisí s přítomností cizích zárodků, vyjadřuje Index hustoty souhrnný vliv obsahu plynů a oxidických vměstků – tedy skutečný sklon slitiny ke vzniku bublin.

1.21.4.3 Metody přímého měření obsahu vodíku v tavenině (metoda Telegas, Alscan, Chapel a další)



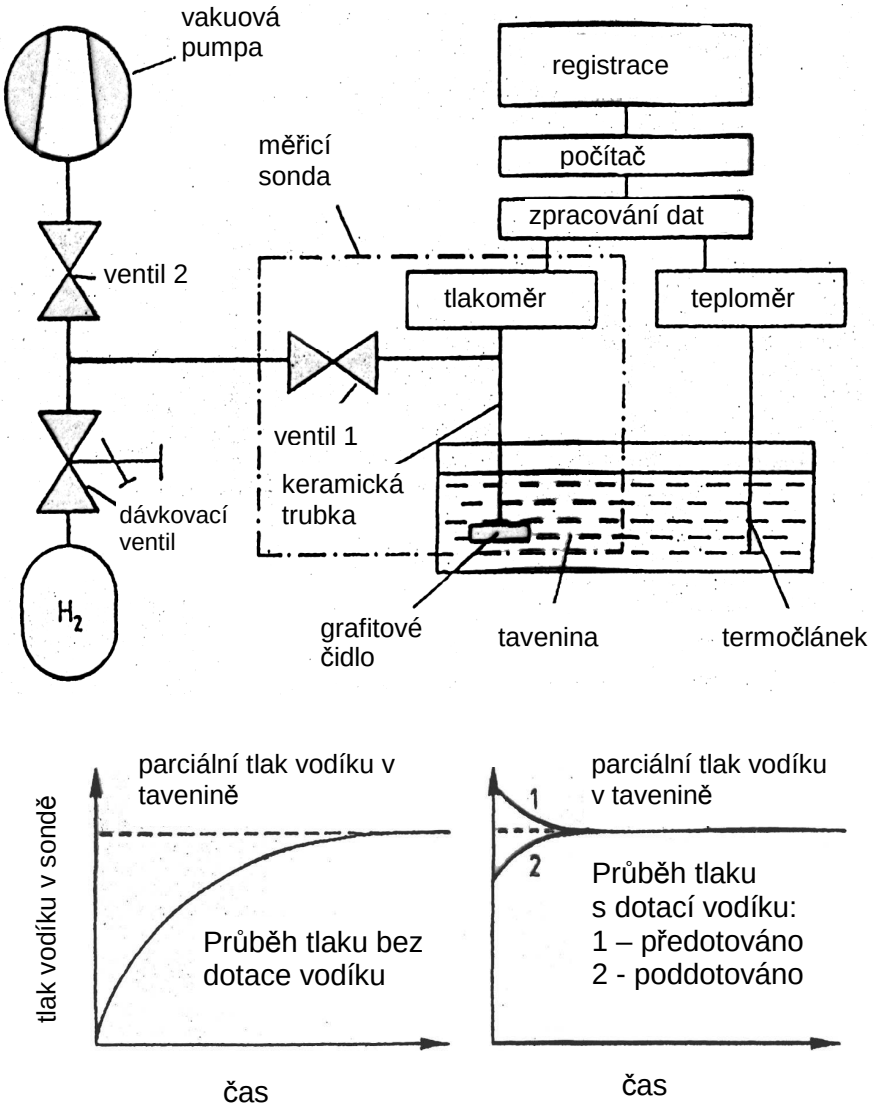
metoda Telegas **metoda Alscan**

Principem měření metodou Telegas je cirkulace malého množství dusíku přes lázeň hliníkové taveniny. Dusík je do taveniny obvykle vháněn specielní porézní keramickou, nebo grafitovou tryskou v podobě malých bublin – obr. 53. Do těchto bublin při průchodu kovem difunduje vodík do doby, až tlak vodíku v bublině se vyrovná parciálnímu tlaku vodíku v tavenině. Měřicí sonda je opatřena porézní keramickou membránou, kterou může směs plynů prostupovat do měřicí části přístroje. Parciální tlak vodíku se zjišťuje měřením tepelné vodivosti plynné směsi vodíku a dusíku.

Obr. 53: Měření obsahu vodíku metodou Telegas a Alscan

U metody Alscan se již nevhání dusík přímo do taveniny, ale pouze do keramické prodyšné sondy. Sondou difunduje vodík do dusíku, s nímž je odsáván do měřicí části. Měření oběma metodami je diskontinuelní a trvá asi 10-15 min. Životnost sond je omezena pouze na několik měření a náklady jsou proto značné.

Metoda Chapel je založena na přímém měření parciálního tlaku vodíku. Přístroj je tvořen vakuovou pumpou s recipientem, přesným tlakoměrem a ponornou sondou z porézního grafitu. Před měřením se sonda a recipient nejprve krátce evakuují. Při měření vodík z taveniny sondou difunduje do recipientu, v němž se postupně ustaví rovnovážný tlak, který odpovídá parciálnímu tlaku vodíku. Tento tlak se měří instalovaným tlakoměrem. Aby se zkrátila doba měření, „dotuje“ se z vodíkové bomby do recipientu určité množství vodíku, přibližně odpovídající předpokládanému parciálnímu tlaku vodíku. Při měření se pak jen vyrovná skutečný parciální tlak vodíku s tlakem „dotovaného“ vodíku, což vede ke zkrácení času měření – obr. 54.



Obr. 54: Princip metody Chapel a vliv dotování vodíku na dobu měření

Metody přímého měření jsou metodami, které zjišťují skutečný obsah rozpuštěného vodíku v tavenině bez vlivu znečištění vměstky. Měření je velmi přesné. Jsou vhodné zejména pro kontinuelní měření obsahu vodíku v hutních provozech nebo ve větších slévárnách.

4 TAVENÍ SLITIN HLINÍKU

Kvalita odlitků nemůže být lepší, než byla kvalita roztaveného kovu. Cílem tavicího procesu proto musí být natavení slitiny s požadovanou kvalitou a to za co možná nejnižších nákladů.

Kvalitní tavenina se vyznačuje především požadovaným chemickým složením, co nejnižším obsahem oxidických i neoxidických vměstků a nízkým naplyněním. O kvalitě kovu rozhodují zejména:

- vsázkové suroviny
- typ a konstrukce tavicích a udržovacích pecí
- způsob vedení metalurgického procesu
- metalurgické zpracování taveniny a způsob lití

Volba vsázkových surovin je typickým kompromisem mezi kvalitou a ekonomií. V praxi by se proto měly používat takové suroviny, které zajistí dosažení požadované kvality kovu při nejnižších nákladech. Náklady ale netvoří pouze cena vsázkových surovin, ale i zpracovací náklady, riziko zmetkovitosti a cena oprav. Použití dražších, ale kvalitních surovin, proto často bývá ekonomicky výhodnější, než zdánlivá úspora při použití levnější, ale nekvalitní vsázky.

Housky slitin, dodávané z hutí, jsou nejkvalitnějším vsázkovým materiálem. Mívají garantované chemické složení, nízký obsah nečistot a rozpuštěných plynů. Cenově jsou však nejdražší vsázkovou surovinou. Rozlišují se tzv. „primární slitiny“ (nebo slitiny prvního tavení), vyrobené hutnickým způsobem z kovových rud a „sekundární slitiny“ (slitiny druhého tavení), vyrobené hutnickým přetavením hliníkového šrotu. Sekundární slitiny pochází z nejrůznějších zdrojů a surovin různorodého složení. Obsahují proto větší množství přísadových prvků a nečistot, než je tomu u slitin primárních. Některé z doprovodných prvků lze metalurgickými postupy alespoň částečně odstranit, některé však odstranit nelze. Slitiny požadovaného chemického složení se z nich připravují pomocí čistých složek a legur. Slitina se potom rafinuje a odlévá do housek.

Vratný materiál (vtoky, nálitky, zmetky) je významnou složkou vsázky. Podle technologie odlévání a podle druhu odlitků může být využití tekutého kovu někdy i menší, než 50%, a téměř vždy vratný materiál představuje značný podíl z nataveného kovu. Využití tekutého kovu je proto důležitým technickým parametrem každé slévárny.

Vratný materiál obsahuje vždy větší množství vměstků, chemických nečistot a rozpuštěných plynů, než bývá v houskách. Jedná se tedy o méně kvalitní vsázkovou surovinu. Z hlediska kvality je důležitý tvar a znečištění vratného materiálu. Na povrchu každého kusu je vrstva oxidů, která se vsázkou vnáší do taveniny a zhoršuje její čistotu. Kompaktní kusy, např. nálitky, vtoky nebo zmetkové odlitky, které mají relativně malý povrch oproti objemu, bývají do vsázky kvalitativně vhodné. Naproti tomu tenkostěnné podíly vratného materiálu, zatekliny nebo dokonce broky, vzniklé rozstřikem kovu, mají velký povrch vůči malému objemu a vnáší do taveniny obrovské množství vměstků.

Podíl vratného materiálu, který se uplatňuje do vsázky závisí na požadované kvalitě kovu – čím vyšší jsou kvalitativní nároky, tím méně se vsází vratného materiálu. Kov pro nejvyšší kvalitativní nároky se doporučuje tavit pouze z housek, kov pro málo náročné odlitky je možno tavit ze 100 % vratu. Podíly kovu s vysokou povrchovostí (rozstřik, zatekliny) se doporučuje do vsázky nedávat vůbec a posílat je na přetavení hutním způsobem.

Hliníkový šrot tvoří hlavně vyřazené součástky a třísky. Z kvalitativního hlediska se jedná o nejméně spolehlivé vsázkové suroviny. Závažnými výhradami vůči jejich použití jsou:

- neznámé nebo nejisté chemické složení
- možné znečištění organickými látkami (olej, mazadla, nátěrové hmoty apod.)
- velké množství oxidických vměstků, chemické znečištění řadou jiných prvků (často v důsledku nedokonalého vytřídění – ložiska, železné součástky, součástky ze slitin mědi atd.)
- vnáší do vsázky vodu, vázanou jako hydroxid na povrchu nebo kapilárními silami v prasklinách a pórech (chemicky a kapilárně vázaná voda se odstraňuje až při teplotách, podstatně vyšších než 100 ^{o}C)

Do slitin s vysokými kvalitativními požadavky by se hliníkový šrot neměl používat. Pokud se jako vsázkový materiál přesto používá, musí být vytříděný, odmaštěný a suchý. Třísky bývají znečištěny řeznými kapalinami, vytváří velké množství oxidických vměstků a do vsázky se vůbec nemají přidávat.

1.22 Energetická náročnost tavení

Celková tepelná energie nutná na výrobu tekutého kovu s potřebnou licí teplotou se skládá z tepla ohřevu vsázky v tuhém stavu, skupenského tepla a tepla přehřátí. Celková entalpie slitiny je určena součtem entalpií jednotlivých prvků ve slitině. Jak vyplývá z následujících tab. 13 a 14, ***je* tepelný obsah roztavených slitin hliníku velmi vysoký** (blíží se tepelnému obsahu slitin železa) – z toho vyplývá **velká energetická náročnost** tavení hliníkových slitin.

Tab.13: Tepelně-fyzikální vlastnosti některých neželezných kovů

prvek	teplota tavení (^{o}C)	střední měrné teplo (kJ/kg.K)		skupenské teplo (kJ/kg)
		v tuhém stavu	v tekutém stavu	
hliník	660	1,05	1,09	396
hořčík	650	1,17	1,32	372
křemík	1410	0,84	2,10	1411
měď	1083	0,42	0,50	210
olovo	327	0,12	0,15	25
zinek	420	0,38	0,46	100
cín	232	0,21	0,25	61
železo	1539	0,67	0,71	277

Tab. 14: Tepelný obsah některých roztavených kovů

kov/slitina	teplota (^{o}C)	tepelný obsah (kJ/kg)
hliník	750	1150
AlSi9	750	1260
AlSi12	750	1325
hořčík	750	1090
měď	1150	690
zinek	450	270
ocel	1500	1400
litina	1400	1300

Skutečná spotřeba energie na roztavení a přehřátí kovu závisí na tepelné účinnosti pece. Ta se pohybuje od asi 15-20 % u plynových nebo olejových pecí bez regenerace tepla spalin, po asi 65-80 % u pecí elektrických.

1.23 Tavicí a udržovací pece

Ve středních a velkých slévárnách je obvyklé, že natavení slitin se provádí v tavicích pecích a kov se rozváží do pecí udržovacích.

V tavicích pecích se kov ohřívá přibližně na technologickou licí teplotu, provede se úprava chemického složení, rafinace a odplynění. Při přelévání z tavicí pece do transportních pánví se často tavenina filtruje keramickými nebo tkanými filtry.

Udržovací pece slouží především k udržování teploty taveniny **v blízkosti jednotlivých pracovišť nebo licích agregátů.** Topný systém umožňuje regulovat teplotu kovu a částečně též tavit pevnou vsázku, přidávanou do roztaveného kovu. (Pece ale nejsou primárně uvažovány jako pece tavicí.) V udržovacích pecích se obvykle neprovádí zásadní úprava chemického složení ani větší metalurgické zásahy. Taveninu je často možné očkovat nebo modifikovat.

Ve větších slévárnách se často používají **velkoobjemové udržovací pece**. Tyto pece slouží jako zásobník kovu, z něhož se tavenina podle potřeby rozváží do menších udržovacích pecí u jednotlivých strojů. V těchto pecích současně dochází k homogenizaci a stabilizaci vlastností taveniny.

Systém jedné pece – se používá v malých provozech, většinou s technologií odlévání do pískových forem. Po natavení kovu se provedou potřebné metalurgické zásahy a odlévá se buď přímo z tavicího kelímku po jeho vyjmutí z pece, nebo se kov přelévá do licích pánví.

1.23.1 Požadavky na tavicí pece

Pro tavicí a udržovací pece platí některé obecné zásady, které by měly být zajištěny:

- malá oxidace a naplynění kovu
- oddělení tekutého kovu od pevné vsázky
- zamezení místního přehřívání taveniny

Rozsah oxidace závisí zejména na chemickém charakteru atmosféry v peci a velmi významně také na způsobu proudění a turbulenci taveniny. Jakýkoliv pohyb kovu, při němž se porušuje kompaktnost oxidické vrstvy na hladině je příčinou další oxidace. Proto je nutné se vyhnout zbytečnému víření, přelévání a míchání kovu. Z tohoto hlediska např. nejsou vhodné některé indukční pece (zvláště vanové), u nichž může za některých okolností docházet k intenzivnímu míchání taveniny. **Důsledkem oxidace je propal**. Hodnota propalu je důležitým technicko-ekonomickým parametrem tavicí pece.

Oxidy, které plavou na hladině nebo jsou vyneseny na hladinu při rafinaci se oddělují od tekutého kovu tvoří tzv. **stěry.** Stěry představují pro slévárnu ztrátu kovu. Ve slévárnách je nelze přímo zpracovat, posílají se na hutní zpracování nebo pro jiné použití. S rozsahem oxidace úzce souvisí i rozsah naplynění.

Naplynění závisí zejména na kontaktu taveniny s jakoukoliv formou vlhkosti. Vliv má i obsah vodní páry v atmosféře pece, např. ve spalných plynech. U spalovacích pecí je proto výhodné, když nedochází k přímému styku kovu se spalinami.

Oddělení tekutého kovu od pevné vsázky je požadavkem, který opět souvisí se snahou zamezit přímému kontaktu taveniny s vlhkostí. Tomuto požadavku vyhovují kelímkové pece, v nichž se taví z pevné vsázky bez dosazování. Pokud je nutno během tavby vsázku doplnit, je nutné přidávat dobře vysušené, předehřáté suroviny. (Čím vyšší je teplota vsázky, tím lépe.) **Je zásadně špatné, když se pec dosazuje vhozením studených vsázkových surovin přímo do lázně roztaveného kovu.** Z tohoto hlediska jsou velmi vhodné šachtové nebo dvoukomorové vanové pece, v nichž je oddělena část předehřívací a tavicí od části, níž se shromažďuje tekutý kov. Kromě metalurgického efektu přináší předehřátí vsázky i značný efekt ekonomický. Vsázka, předehřátá na 300 ^{o}C vnáší do systému asi 20 % celkového tepla roztaveného kovu.

Místní přehřívání kovu má negativní vliv na naplynění, vznik vměstků i na stav krystalizačních zárodů. Dochází k němu při nerovnoměrném, jednostranném ohřevu ve špatně seřízených kelímkových pecích, ale zejména v induktorech kanálkových pecí.

1.23.2 Vytápění pecí

Pro tavení hliníkových slitin se používají pece **plamenné, nebo elektrické**.

U plamenných pecí se jako palivo v současné době používá téměř výhradně zemní plyn. Při výhřevnosti asi 35000 kJ/Nm^3 se na roztavení a přehřátí 100 kg hliníku na teplotu 750^{o}C spotřebuje teoreticky asi 3,6 Nm^3 zemního plynu. Skutečná spotřeba však je asi 8-20 Nm^3. Pro dosažení dobré tepelné účinnosti i příznivých metalurgických poměrů je důležité správné nastavení poměru plynu a vzduchu.

Elektrické pece jsou odporové nebo indukční.

Nevýhodou **odporových pecí** je malý tavicí výkon a málo intenzivní tepelná a chemická homogenizace taveniny, která se téměř nemíchá. To je ale na druhé straně výhodou, neboť dochází jen k minimálnímu propalu a naplynění.

Indukční pece se používají se síťovou frekvenci nebo středofrekvenční. **Pece na síťovou frekvenci** bývají provedeny jako kelímkové, vanové nebo bubnové, obvykle jako kanálkové. Ohřev kovu se děje v induktoru mimo hlavní objem lázně. V pecích dochází k intenzivnímu víření. Výhodou je dobrá tepelná i chemická homogenizace taveniny, intenzivní pohyb kovu však po stránce metalurgické může být na závadu. Kanálkové pece jsou energeticky úsporné a spotřeba se pohybuje kolem 400 kW/t kovu. V peci musí zůstávat technologický zbytek kovu, proto je změna tavené značky slitiny problematická. **Pece středofrekvenční** jsou provedeny jako kelímkové. Mívají větší tavicí výkon, než pece na síťovou frekvenci. Měrná spotřeba proudu bývá v rozmezí 500-550 kW/t. Pece je možné zcela vyprázdnit, proto změna chemického složení následných taveb nečiní problémy.

1.23.3 Druhy pecí

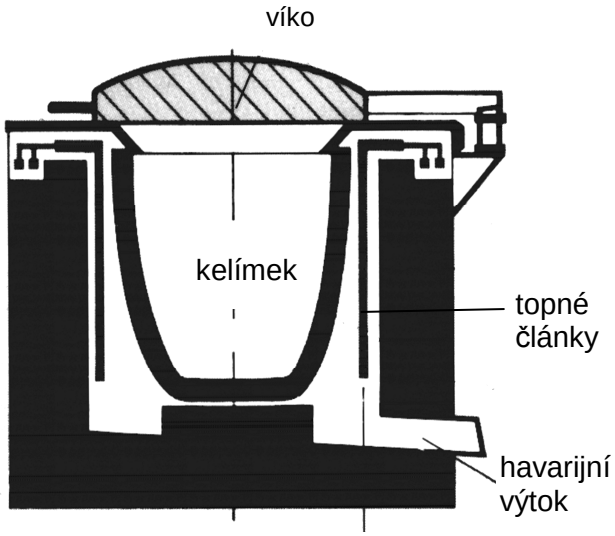
1.23.3.1 Kelímkové pece

Pro natavení menšího množství kovu se používají obvykle pece s jílografitovými kelímky nebo kelímky z SiC. Kelímky se po roztavení kovu z pece vyjmou a slouží pak také jako transportní a licí pánve. Velikost kelímků bývá obvykle do asi 100 až 200 kg hliníkové slitiny. Výhodou kelímků je velká flexibilita tavicího režimu a při změnách druhu slitiny.

Při používání kelímků je nutno pečlivě dodržovat základní pravidla:

- nový kelímek má být dobře vysušen
- ohřev kelímku se nemá provádět tepelným šokem, rovněž ochlazování prázdného kelímku by mělo být pozvolné (na klidném vzduchu, ne v průvanu)

- není dobré tavit kov, který předtím v kelímku ztuhnul – ztuhlý kov se při ohřevu roztahuje a může způsobit prasknutí kelímku
- kelímek má být po skončení tavby dobře vyčištěn a uložen na suchém místě
- při plnění vsázkou by neměly na kelímek působit prudké nárazy
- stav kelímků je nutno po každé tavbě kontrolovat, poškozené a příliš opotřebené kelímky včas nahradit
- v plamenných pecích je nutno dbát na správné seřízení hořáku



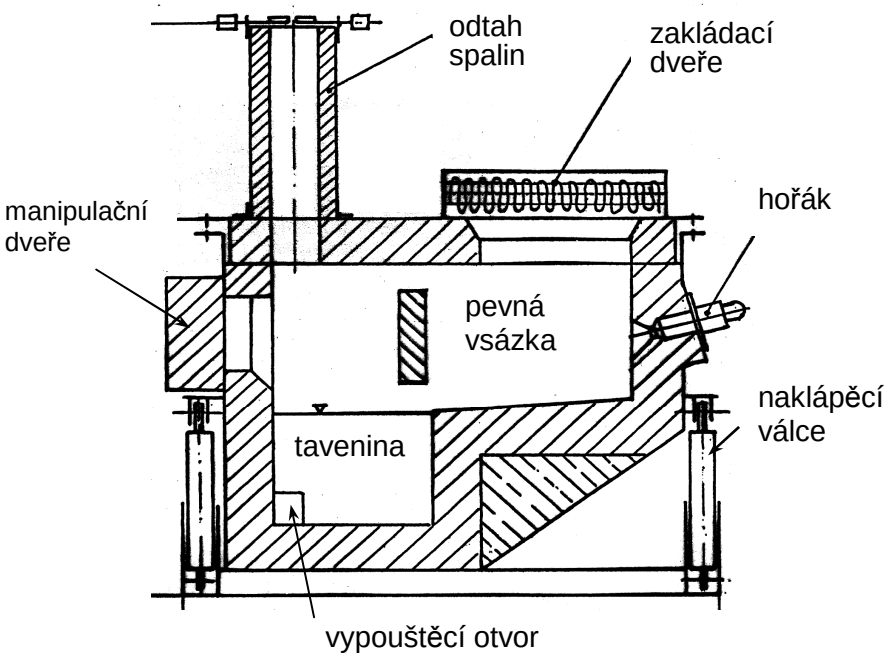
Při správném zacházení je životnost kelímků řádově ve stovkách taveb. Vytápění kelímkových pecí je obvykle plynové nebo elektrické odporové. Výhodou elektrického ohřevu je, že se kov nedostává do styku se spalinami, z nichž by mohl pohlcovat vlhkost. Pec je opatřena víkem, u plynových pecí s odtahem spalin. Schéma odporové kelímkové pece je na obr. 55.

Pro větší tavicí výkony a větší množství kovu se používají sklopné kelímkové pece. Kelímky bývají obvykle vyzděny žáruvzdornou vyzdívkou na bázi Al_2O_3 a SiO_2.

Obr. 55: Elektrická odporová kelímková pec

1.23.3.2 Komorové pece

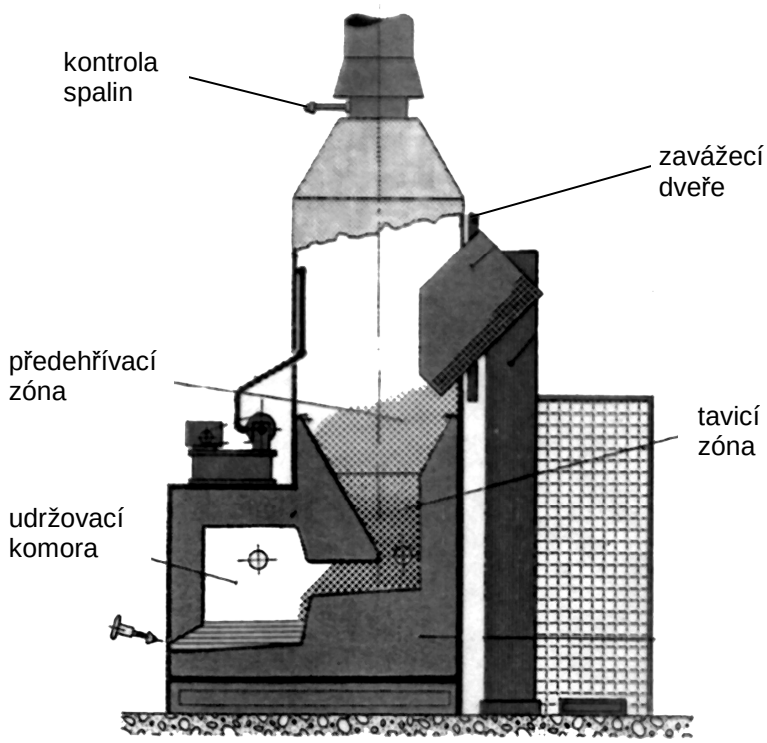
Jde o osvědčený a v našich slévárnách rozšířený typ pecí (např. systém Sklenár), které se skládají z tavicí části a nístějové části – obr. 56. Vsázka je vsázena do tavicí části a nepřichází do přímého styku s taveninou. Na podobném principu fungují i dvoukomorové vanové pece s vertikálním uspořádáním, u nichž se vsázka zaváží do horní tavicí komory a tekutý kov odtéká do spodní komory, která představuje zásobník kovu.



Obr.56: Dvoukomorová plynová pec

1.23.3.3 Šachtové pece

Jsou založeny na principu protiproudého výměníku tepla. U tohoto typu pecí se vsázka dopravuje zavážecím zařízením do šachtice pece. Zde se odpařuje vlhkost a případné organické nečistoty vyhoří. Ve spodní části šachtice je tavicí zóna. Zde se vsázka natavuje a roztavený kov odtéká do udržovací komory. Odtud se odebírá buď po jednotlivých licích dávkách z boční vany, spojené s udržovací komorou sifonem, nebo se vylévá po větších dávkách do transportní pánve. Vyhřívání pece se provádí plynovými nebo olejovými hořáky. Menší pece mohou mít pouze jeden hořák, směrovaný do udržovací komory, u větších pecí je obvyklá konstrukce se 2 samostatně regulovatelnými hořáky, z nichž jeden je v tavicí zóně, druhý v udržovací komoře. Pec je vyzděna žáruvzdornými materiály a vnější izolační vrstvou, která zajišťuje minimální tepelné ztráty. Životnost vyzdívky je několik let.

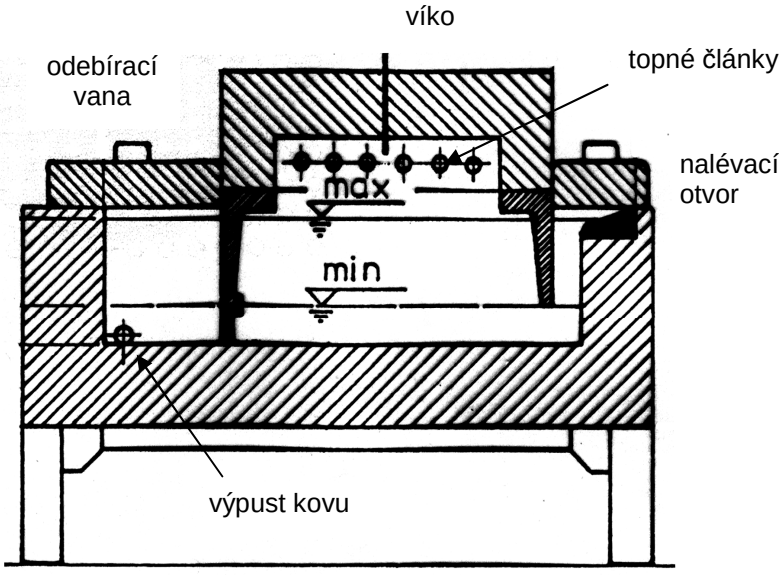


Velkou předností tohoto typu pecí je, že vsázka se postupně předehřívá a v žádném případě se vlhké, nebo znečištěné vsázkové suroviny nemohou dostat přímo do roztaveného kovu. To vede k získání kovu s vysokou čistotou a s nízkým stupněm naplynění. Po otevření bočních manipulačních dveří je kov v udržovací komoře snadno přístupný a je zde možné pomocí metalurgických solí provádět čištění a rafinaci taveniny. Ztráty kovu propalem jsou u těchto pecí velmi nízké, řádově kolem 1-2 %.

Obr. 57:
Šachtová tavicí pec StricoWestofen

1.23.3.4 Vanové pece

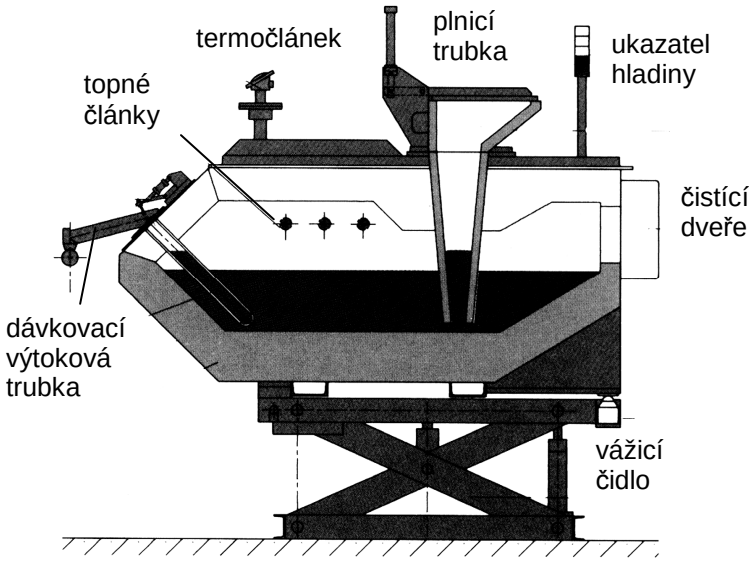
Pec má tvar vany s poměrně malou hloubkou. Podle půdorysného členění mohou být tyto pece jednokomorové až tříkomorové. Obvykle se používají jako udržovací, tzn. vsázkou je tekutý kov, který se nalévá do plnicí komory. Pevné kusy vsázky se přisazují spíše vyjímečně po otevření pracovních dvířek nebo po odklopení víka. Tímto způsobem jsou komory přístupné rovněž pro legování, čištění hladiny nebo jiné metalurgické zásahy. Vytápění je plynové, elektrické odporové nebo indukční kanálkové. Kov se odebírá z odebírací komory, oddělené od hlavní komory sifonem. Na obr. 58 je tříkomorová vanová pec s odporovým topením. Tento typ je výhodný velmi klidnou lázní s minimálním naplyněním a propalem. Tavenina se však špatně teplotně a chemicky homogenizuje .



Obr. 58: Elektrická vanová pec

1.23.3.5 Dávkovací pece

Dávkovací pece jsou určeny k automatickému dávkování tekutého kovu, nejčastěji při odlévání do kovových forem pod tlakem. Kov, natavený v tavicí peci, se plnicím trychtýřem nalije do vany dávkovací pece, která je hermeticky uzavřena. Teplota je obvykle udržována pomocí odporových topných článků SiC nad hladinou kovu. Teplota se měří pomocí termočlánku a udržuje v úzkých tolerancích až ± 1 K. V peci se stále udržuje mírný přetlak tlakového vzduchu nebo ochranného plynu. Dávkování kovu se provádí zvýšením tlaku plynu v komoře pece, který vytlačí kov do dávkovací trubice. Po snížení přetlaku na původní hodnotu se vylévání kovu ukončí. Množství nadávkovaného kovu se řídí automaticky podle nastaveného údaje velikosti přetlaku a času. Volbou tlakového režimu je možné regulovat i rychlost vytékání kovu. Přesnost dávkování bývá obvykle do 0,5 % hmotnosti.



Obr. 59: Dávkovací pec

1.24 Úprava chemického složení taveniny

Při tavení hliníkových slitin se obvykle vychází ze vsázkových surovin, které svým chemickým složením odpovídají tavené značce. Úpravy chemického složení taveniny proto obvykle mají za cíl pouze drobné korekce obsahu jednotlivých prvků, eventuelně kompenzaci propalu. Úprava chemického složení se provádí po roztavení vsázky a po chemické analýze. Prvkem, u něhož je nutné doplňovat ztráty propalem je zejména hořčík – přibližně se jedná o ztrátu asi 0,05 %Mg za tavbu. U jiných prvků se obvykle s propalem nepočítá.

Přísadové prvky a stejně tak i prvky, používané pro očkování a modifikaci, se dodávají **jako předslitiny s hliníkem**. Úprava chemického složení se obvykle týká prvků Si, Cu, Mg, Fe, Mn a Ti. Jednotliví dodavatelé nabízí předslitiny s různými koncentracemi přísadových prvků, obvykle v mezích:

- Al-Si - 25-50 %
- Al-Cu - 20-50 %
- Al-Mg - 25-50 %
- Al-Fe - 20-50 %
- Al-Mn - 10-60 %
- Al-Ti - 5-10 %

Jen zcela výjimečně se používají jiné legury, např. Al-Cr, Al-Ni, Al-V, Al-Zr a další.

Množství předslitiny do vsázky se určí podle vztahu:

$$předslitina = \frac{\Delta X}{X_{předslit}} . 100 \quad (kg\ \ předslitiny / 100 kg\ \ taveniny)$$

kde značí: ΔX – rozdíl mezi požadovaným a aktuálním obsahem prvku X ve slitině (%)
$X_{předslit}$ – koncentrace přísadového prvku v předslitině (%)

Jestliže je nutné obsah některého prvku snížit, provádí se to ředěním taveniny surovinou s nízkým obsahem příslušného prvku. Výjimkou je hořčík, který lze selektivně odstranit pomocí chlorových přípravků.

1.25 Obecné zásady tavení

Při tavení hliníkových slitin se mají dodržovat základní metalurgická pravidla:

- Nová vyzdívka a nové kelímky musí být dobře vysušeny.
- Tavbu začínat s dobře vyčištěnou pecí. Zbytky strusky a oxidů Al_2O_3 mají být odstraněny. Vypouštěcí kanály nebo hubice mají být ošetřeny ochrannými nátěry.
- Vsázkové suroviny musí být suché, zbavené mastnot a hrubých nečistot.
- Vsázkové suroviny se mají skladovat v suchém prostředí, aby se na nich netvořila vrstva oxidů, v níž je chemicky vázaná voda ($Al_2O_3.3\ H_2O$). Takto zoxidovaná vsázka se má předehřát na teplotu několik set stupňů, při níž se vázaná voda uvolní.
- Natavení vsázky má probíhat pokud možno rychle. Z hlediska naplynění a vzniku oxidických vměstků je kritické stadium, kdy je vsázka v polotuhém stavu.
- Tavicí a rafinační soli musí být skladovány na suchém místě, nejlépe při zvýšených teplotách.
- Tavicí a rafinační přípravky je nutno ponořit do lázně a promíchat s kovem. Po dostatečně dlouhém odstátí je nutno pečlivě stáhnout stěry.

- Železné nářadí musí být natřeno ochrannými nátěry a předehřáto. Nátěry slévárny kupují od dodavatelů, případně si samy vyrábí (např. na bázi vodné suspenze kaolinu, mastku a vodního skla).
- Legury, očkovadla a modifikační prostředky se mají přidávat na hladinu v místě, zbaveném strusky.
- Tavenina se nesmí zbytečně přehřívat. Licí teplota pro tlakové lití obvykle bývá v rozmezí 610-650 ^{o}C, při lití do písku většinou dostačuje teplota kovu mezi 700 až 750 ^{o}C. Nadeutektické siluminy se odlévají z teplot 750-780 ^{o}C. Zásadně se nemá tavenina přehřívat nad 800 ^{o}C. Doporučená licí teplota závisí na chemickém složení slitiny, na velikosti a tloušťce stěn odlitku.
- Teplota kovu se během tavení musí kontrolovat ponornými termočlánky.
- Podle typu slitiny a požadavků na kvalitu kovu se provádí odplynění, očkování, případně modifikace taveniny. Pořadí operací se musí volit tak, aby se jejich účinek vzájemně nerušil. Jedná se zvláště o použití odplyňovacích přípravků s obsahem chloru, který ruší modifikační účinek sodíku a stroncia. Odplyňování přípravky s obsahem chloru se musí provádět před modifikací, nikdy ne opačně.

Zvláštnosti tavení slitin Al-Mg

Tyto slitiny mají velký sklon k oxidaci a naplynění vodíkem. Proto je důležité pečlivé vedení tavby a použití krycích a rafinačních přípravků se zvýšeným účinkem, určených pro tento typ slitin.

- Doporučuje se do pevné vsázky přidat asi 0,5 % krycí soli. Po natavení přidat tolik přípravku, aby byla dokonale zakryta celá hladina.
- U slitin do obsahu cca 6 % Mg se doporučuje ke konci tavby roztavenou krycí sůl intenzivně vmíchat do taveniny a po odstátí strusku stáhnout.
- Taveninu odplynit.
- Pokud odplyňovací sůl neobsahuje přísady na zjemnění zrna, je vhodné provést očkováním. Při obsahu nad 3% Mg ve slitině je nutno používat prostředky, které neobsahují sodík.
- Na hladinu nahodit asi 0,5 % nové krycí soli, po roztavení opatrně zamíchat, stáhnout strusku a odlévat.
- Teplota taveniny by neměla překročit 750 ^{o}C.

Slitiny s obsahem hořčíku nad 6% mají velmi silný sklon k oxidaci a naplynění. Ochraně taveniny se proto musí věnovat velká pozornost a používat zvýšená množství krycích a rafinačních přípravků. Doporučuje se provádět zjemnění zrna. Aby se zabránilo zhrubnutí zrna nemá teplota kovu překročit 720 ^{o}C.

5 KONTROLA KVALITY SLITIN

Kontrola jakosti slitin musí probíhat během celého výrobního cyklu, tj. v průběhu tavicího procesu, na zkušebních kusech i na hotových odlitcích. Z hlediska zajištění kvality kovu a její stability jsou důležité zejména provozní zkoušky, kterými je zjistí vlastnosti slitiny ještě před odlitím do forem a případně je možno provádět nutné metalurgické zasahy.

1.26 Provozní kontrola taveniny

Provozní kontrola se provádí při přípravě vsázky, tavicího zařízení k provozu a v průběhu tavení. Použité metody musí být co nejjednodušší, aby je bylo možno provádět přímo v tavírenském provozu a současně musí poskytovat rychlou orientaci o aktuálním stavu, na jejímž základě by bylo možno ještě v průběhu tavby provést potřebné korekce. Proto je přesnost některých provozních metod jen omezená a často se nevyrovná přesnosti následujících zkoušek laboratorních. Dále uvedeme pouze základní provozní zkoušky.

1.26.1 Kontrola chemického složení

Kontrola chemického složení je základní zkouškou, která by měla být ve slévárnách naprostou samozřejmostí. **V převážné většině sléváren se provádí spektrálními nebo rentgenovými analyzátory.** Důležitou podmínkou přesnosti výsledků je pravidelná kalibrace přístrojů.

Vzorky pro chemickou analýzu se získávají odlitím **do kovových forem. Vzorky musí mít homogenní jemnozrnnou strukturu bez vnitřních vad a segregací.** Vzorky jsou obvykle válcové, s průměrem 35-50 mm a výškou do 10 mm. Forma musí být před odlitím vzorku suchá, dobře očištěná.

Odběru vzorku z pece se musí věnovat dostatečná pozornost. Kov je nutno nabírat z čisté hladiny bez oxidů a zbytků solí, vzorkovací lžíce musí být rovněž čistá, pokud se používá lžíce kovová, má být předehřátá. S výhodou se pro odběr vzorků používají lžíce z keramických vláken. Mají výborné tepelně izolační vlastnosti (nehrozí pokles teploty kovu při manipulaci) a neulpívá na nich kov a oxidy. Před odběrem vzorku je nutno zajistit chemickou homogenitu taveniny v celém objemu lázně. Nesprávný způsob odběru vzorků může být příčinou velkých odchylek výsledků.

Pokud se kontroluje chemické složení vsázkových surovin, je nutno odebírat vzorky pro analýzu z míst, kde jsou co nejmenší segregace a kde se nepředpokládá výskyt vnitřních vad. U odlitků, které jsou součástí vsázky (šrot, vratný materiál) to bývají zejména tenké stěny. Vzorky se nemají brát z povrchové kůry součástí, tepelných uzlů a ze znečištěných míst.

1.26.2 Měření teploty

Měření teploty taveniny je u hliníkových slitin velmi důležité zvláště z důvodu naplynění a vzniku oxidických vměstků. Odhad teploty kovu podle barvy je u slitin hliníku velmi nepřesný. Teplota kovu by měla být kontrolována jak v tavicích a udržovacích pecích, tak při všech metalurgických operacích – rafinaci, odplyňování a lití.

Pro měření teplot se používají téměř výhradně **termočlánky NiCr-Ni**, které jsou dostatečně přesné a v teplotní oblasti taveného hliníku mají, při správném používání, vysokou životnost. Při operativní kontrole teploty taveniny se používají ponorná čidla, u nichž je termočlánkový drát instalován ve vhodné rukojeti, často v ochranném plášti. Protože roztavený hliník působí na termočlánky i na ochranné kovové trubice velmi agresivně, je nutné chránit je před přímým stykem s taveninou ochrannými nátěry. Celistvost nátěru je nutno pravidelně kontrolovat a nátěr obnovovat. (Nenatřený termočlánek se zničí v překvapivě krátké době.)

Dlouhodobě se teplota v peci měří termočlánky v ochranných keramických trubicích. Při trvalém ponoření termočlánku do taveniny se používají masivní grafitové, keramické nebo kovové ochranné trubice. Problémem je postupné nabalování vrstev oxidů na teplotní čidlo a nebezpečí jeho poškození při zavážení vsázky, čištění pece a manipulaci. Proto se u moderních pecí instalují termočlánky přímo do vyzdívky kelímků.

1.26.3 Technologické zkoušky slitin

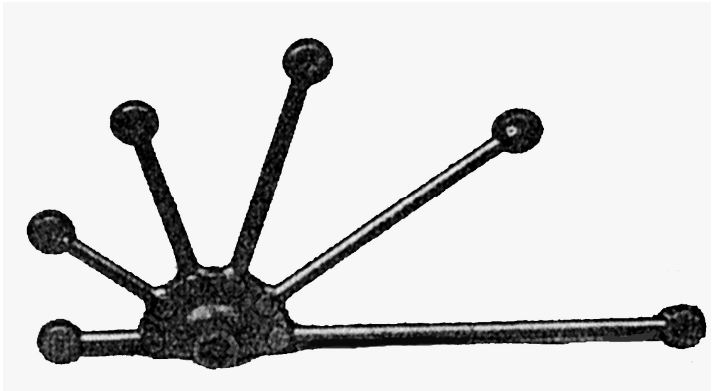
Technologickými zkouškami se zjišťují základní technologické vlastnosti slitiny, jako jsou zabíhavost, stanovení obsahu nekovových vměstků, sklon k praskání za tepla, sklon ke vzniku staženin nebo další vlastnosti. Při běžném provozu se provádí technologické zkoušky jen zřídka.

Zkoušky zabíhavosti charakterizují schopnost zaplnění dutiny formy. Vedle teploty a chemického složení kovu ovlivňuje zabíhavost i přítomnost vměstků. Slitiny s vysokým obsahem oxidických vměstků mívají oproti čistému kovu podstatně sníženou zabíhavost. Zkoušky se provádí na Curryho spirále nebo jiných typech těles pro zkoušky zabíhavosti.

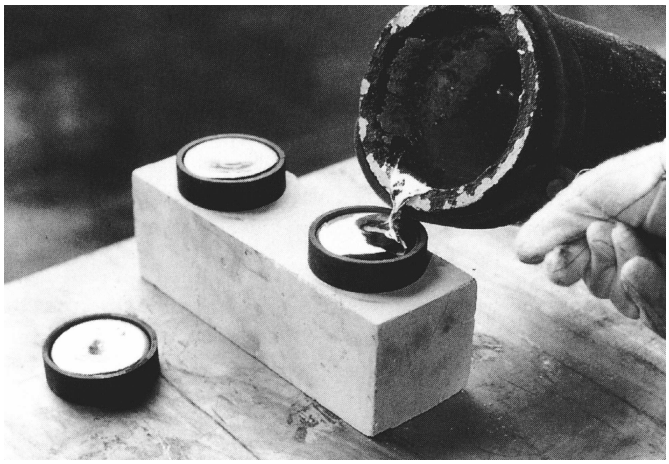
Lomová zkouška rovněž charakterizuje čistotu kovu. Její princip spočívá v tom, že lom se šíří přednostně podél nekovových vměstků. Zkušební těleso, které má tvar tyče nebo válce, se po ztuhnutí přerazí a lomová plocha se vyhodnocuje vizuelně nebo mikroskopicky.

Pro **zjištění množství vměstků** v provozních podmínkách se používá i řada dalších metod, prováděných za normálního i sníženého tlaku. Jednou z takových metod je i „metoda první bubliny“, nebo i „metoda dvojího vážení“, které jsou běžně používány pro stanovení stupně naplynění. (Tyto metody reagují komplexně na obsah plynů i přítomnost vměstků.)

Stanovení sklonu k praskání za tepla se provádí odléváním průměrových vzorků různé délky, opatřených na obou koncích nálitky, které zabraňují smršťování tyčí. Měřítkem sklonu k praskání je délka nejdelší neporušené tyče – obr. 60.



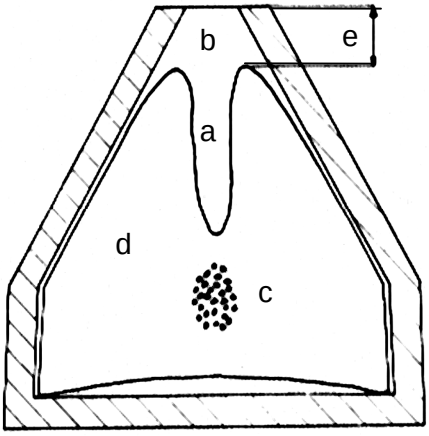
Obr. 60: Odlitek pro zkoušku trhání za tepla v kovové formě



Zkouška velikosti primárního zrna může být provedena v provozních podmínkách velmi jednoduchým způsobem. Test spočívá v tom, že do studeného ocelového kroužku s průměrem asi ø 75 mm a výškou 25 mm, který je položen na izolační keramické podložce (např. z lehčeného šamotu), se nalije vzorek kovu. Tuhnutí postupuje směrem od ocelového kroužku, který simuluje působení formy do středu. Primární zrna jsou na vzorku vidět i v litém stavu (viz. obr. 16).

Obr. 61: Zkouška velikosti primárního zrna

Zkouška stahování slouží ke zjištění sklonu ke tvorbě soustředěných staženin a mikrostaženin. Z různých zkoušek tohoto typu je asi nejznámější těleso dle Tatura – obr. 62. Jedná se o kovovou formu kuželovitého tvaru, v níž v horní části vznikne soustředěná staženina a uvnitř objemu tělesa mikrostaženiny. Poměr obou typů těchto dutin velmi závisí na šířce dvoufázového pásma tuhnutí slitiny. Objem soustředěné staženiny se zjistí titrací.



a – objem makrostaženiny
b – celkový objem staženiny
c – objem mikrostaženin
d – objem odlitku
e – hloubka staženiny

Obr. 62: Taturova zkouška stahování

Měření stupně naplynění

- základní metody byly uvedeny v kap. 5.3.4

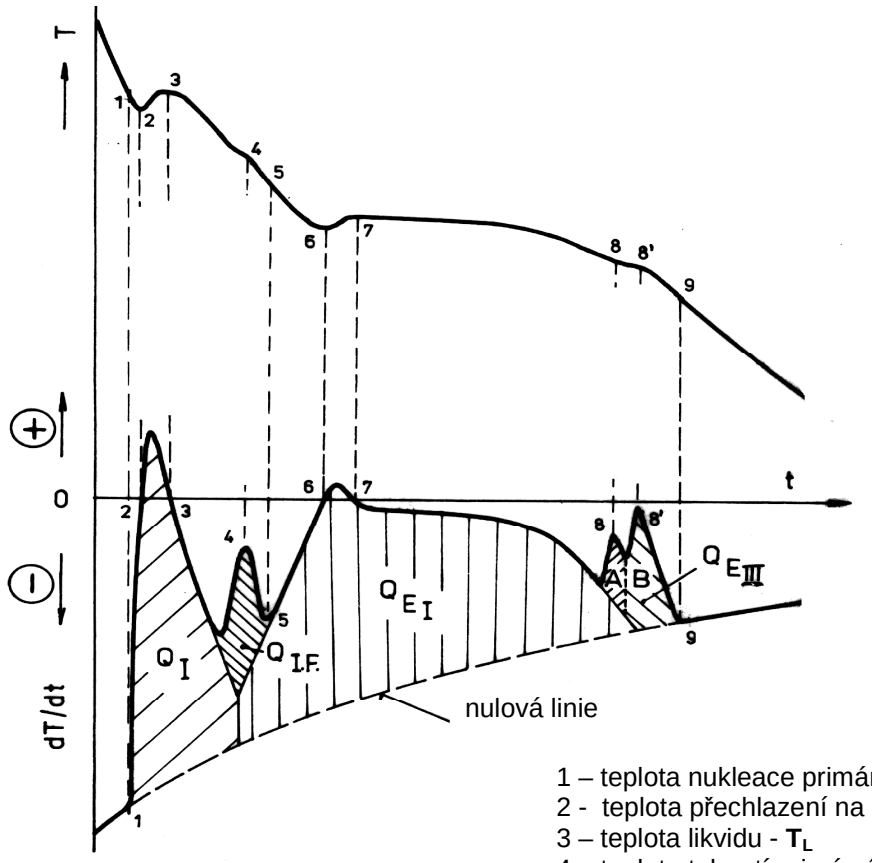
1.26.4 Termická analýza

Termická analýza je metodou provozní kontroly kvality tekutého kovu. V principu jde o **vyhodnocení křivky chladnutí v intervalu krystalizace** a vyvození správných souvislostí mezi tvarem křivky, charakteristickými teplotami a strukturou kovu.

U slitin hliníku se termická analýza používá zejména k hodnocení:

- **velikosti zrna primární fáze a posouzení očkovacího účinku**
- **morfologie eutektické fáze a zjištění stupně modifikace eutektika**
- **vzniku intermetalických fází a vícesložkových eutektik**

Při termické analýze se vzorek roztavené slitiny odlije do zkušebního kelímku a přesným termočlánkem s dostatečnou citlivostí se měří průběh křivky chladnutí. Tvar křivky chladnutí je závislý na intenzitě odvodu tepla ze vzorku kovu do zkušebního kelímku a průběhu uvolňování skupenského tepla krystalizace v různých fázích tuhnutí. Závislost teplota – čas pro obecnou slitinu typu Al-Si-X je znázorněna na horní křivce obr. 63. Pro snadnější vyhodnocení jednotlivých teplotních bodů se využívá křivky derivace teploty, tedy závislosti dT/dt, která je ve spodní části obr.63.



Obr. 63:
Křivka ochlazování a její derivace

1 – teplota nukleace primární fáze - T_{NL}
2 - teplota přechlazení na likvidu - T_{PL}
3 – teplota likvidu - T_L
4 – teplota tuhnutí primární intermetalické fáze
5 – teplota nukleace eutektika - T_{NE}
6 – teplota přechlazení na eutektické teplotě - T_{PE}
7 – teplota tuhnutí eutektika - T_E
8 – teplota tuhnutí vícesložkového eutektika (intermetalické fáze) A, resp. B
9 – konec tuhnutí – teplota solidu - T_S
3-2 – rekalescence na teplotě likvidu - ΔT_L
7-6 - rekalescence na teplotě eutektické - ΔT_E

Křivka derivace fakticky představuje průběh rychlosti chladnutí kovu a znamená, že v místech, kde je:

- dT/dt < 0 – dochází k poklesu teploty vzorku
- dT/dt = 0 - vzniká teplotní prodleva
- dT/dt > 0 – dochází ke zvýšení teploty vzorku – vznik rekalescence

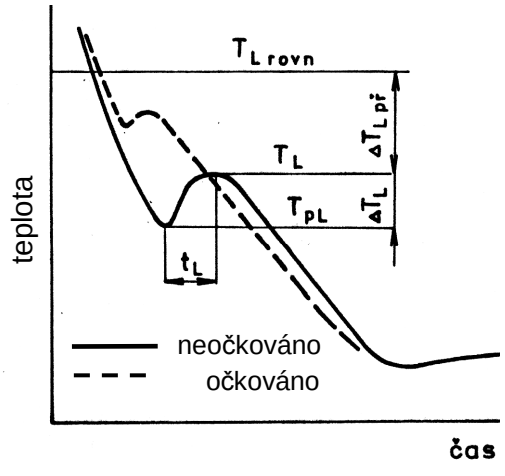
Oblast tuhnutí na křivce derivace je vymezena tvarem křivky derivace a tzv. „nulovou linií". **Nulová linie** je taková rychlost chladnutí, kterou by se vzorek ochlazoval v případě, že by se neuvolňovalo žádné krystalizační teplo. Lze snadno dokázat, že plocha, vymezená těmito dvěma křivkami je úměrná množství krystalizačního tepla. Plochu lze rozdělit do jednotlivých oblastí, odpovídajících různým fázovým složkám a tak i kvantifikovat množství těchto složek.

Každá z etap krystalizace je zahájena nukleací příslušné fáze. Teplota nukleace bývá na křivce chladnutí nezřetelná (často to je inflexní bod), ale snadno se identifikuje na křivkách derivace jako místo změny průběhu křivky (obvykle dosti výrazné). Tuhnutí slitiny tedy začíná nukleací primární fáze v bodě **1**, eutektické fáze v bodě **5** a končí na teplotě solidu v bodě **9**. Mezi těmito základními body může docházet ke krystalizaci různých dalších fázových složek, které vznikají v teplotním intervalu mezi likvidem a solidem – např. mezi body **4** a **5**, nebo jako různá vícesložková eutektika ke konci tuhnutí – oblasti A a B mezi body **8** a **9**.

Při praktickém používání termické analýzy se obvykle na křivkách ochlazování v jednotlivých krystalizačních oblastech vyhodnocují hodnoty **minimální a maximální teploty**. Nejnižší teplota se označuje jako teplota přechlazení (bod **2** – teplota přechlazení na likvidu, nebo **6** – teplota přechlazení eutektika), maximální hodnota jako teplota růstu, nebo prostě jenom jako teplota likvidu – bod **3**, nebo eutektická teplota – bod **7**. Rozdíl mezi příslušnou maximální a minimální teplotou se nazývá **rekalescence**. Velikost přechlazení je při termické analýze důležitým kriteriem.

Ke krystalizaci každé fázové složky dochází při určitém **přechlazení pod rovnovážnou teplotu** příslušné přeměny. Rozdíl rovnovážné teploty a teploty maximální se označuje jako přechlazení primární fáze pod rovnovážnou teplotou – $\Delta T_{L\ přechl}$, nebo přechlazení eutektika pod rovnovážnou teplotou – $\Delta T_{E\ přechl}$. Čím více nerovnovážné jsou podmínky tuhnutí (např. špatný stav krystalizačních zárodků, nebo velká rychlost chladnutí), tím větší jsou tyto hodnoty přechlazení. (Ke zjištění hodnot přechlazení je ovšem nutno znát rovnovážné teploty, ty ovšem nelze změřit a proto se stanovují výpočtem z chemického složení.)

Hodnocení disperzity primární fáze

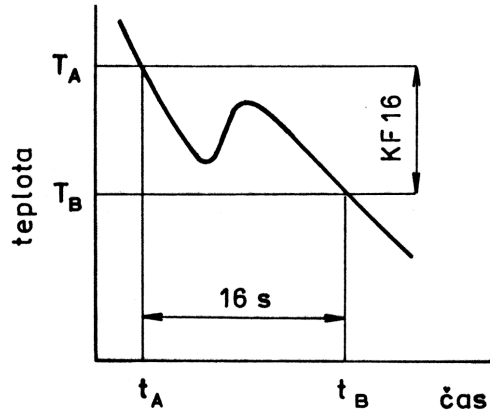


Provádí se analýzou křivky ochlazování v oblasti teplot likvidu. Obvykle se vyhodnocuje přechlazení pod rovnovážnou teplotu likvidu $\Delta T_{L\ přechl}$ a velikost rekalescence ΔT_L – obr.64.

Čím lepší je stav krystalizačních zárodků pro primární fázi, tím menší je hodnota přechlazení pod rovnovážnou teplotou a menší rekalescence. Tímto způsobem se zejména posuzuje účinek očkování.

Obr. 64: Vliv očkování na změnu křivky chladnutí

(Pro kvantifikaci této oblasti ve vztahu s velikostí primárního zrna se někdy používají i jiná kriteria. Na obr. 65 je např. způsob, kterým se stanovuje tzv. hodnota KF16. Kriterium KF16 je definováno jako pokles teploty na křivce chladnutí v oblasti, zahrnující teplotu likvidu, za určitou dobu. Horní referenční bod T_A je definován v čase t_A, kdy hodnota rychlosti chladnutí je poprvé menší, než 2 $K.s^{-1}$ ($dT/dt > -2$ $K.s^{-1}$). Dolní referenční bod pak teplotou T_B, které se dosáhne v čase t_A + 16 s. Hodnocení je používáno pro standardní kelímky fy.Tectip. Protože rychlost ochlazování závisí rovněž na licí teplotě kovu, zavádí se normovaná hodnota, která výsledek koriguje na licí teplotu 700 ^oC.



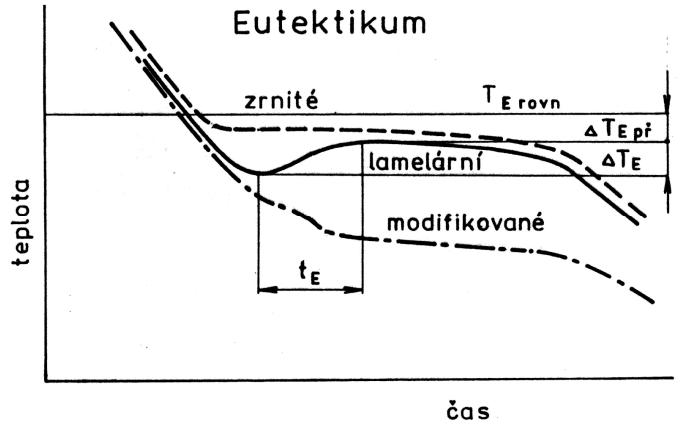
$KF16_{norm} = KF16 + (T_{max}-700) . 0,0956$ (^oC)

Mezi tímto kriteriem $KF16_{norm}$ a velikostí primárního zrna pak byly zjištěny matematické korelace, které umožní automaticky z křivky ochlazování vypočítat velikost primárního zrna.)

Obr. 65: Stanovení hodnoty KF16

Hodnocení morfologie eutektika

Účelem analýzy oblasti eutektické teploty je zejména posouzení úrovně modifikace. Zrnité eutektikum, obvyklé u slitin komerční čistoty, tuhne při podchlazení kolem 1-2 K pod rovnovážnou eutektickou teplotou při minimální rekalescenci. U lamelárního eutektika je přechlazení poněkud větší (asi 2-4 K). Vlivem modifikace dochází ke značnému snížení eutektické teploty a hodnota této, tzv. deprese eutektické teploty, je měřítkem úrovně modifikace slitiny – viz obr. 25. Podle druhu slitiny a použitého modifikačního prostředku deprese teploty dosahuje až asi 10 K (při modifikaci Sr méně).

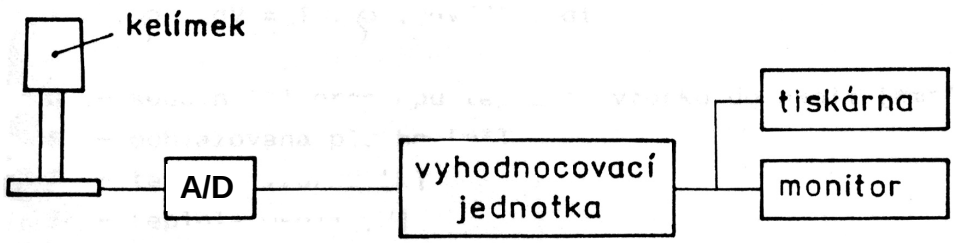


Obr. 66: Křivky ochlazování v oblasti eutektika

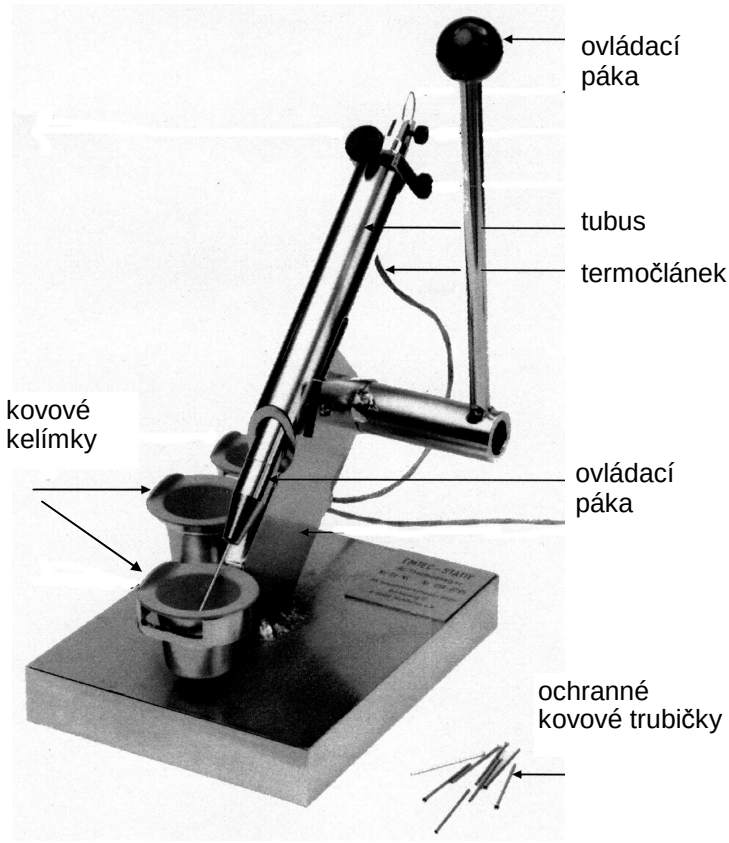
Téměř všechny přísadové prvky a nečistoty snižují rovnovážnou eutektickou teplotu. Pro výpočet se v literatuře doporučují různé korelační vztahy (z důležitých prvků zachycují zejména vliv hořčíku, mědi, železa a manganu), jejich skutečná platnost je však problematická. Pro praktické použití se obvykle vychází **porovnáním eutektických teplot nemodifikované a modifikované slitiny.** Při standardním tavicím postupu a stálé kvalitě surovin lze předpokládat, že eutektická teplota v nemodifikovaném stavu bude konstantní a při hodnocení úrovně modifikace se provede pouze analýza v modifikovaném stavu.

Hodnocení vícesložkových eutektik se provádí obvykle pouze u slitin s mědí, nebo s hořčíkem. U slitin AlSiMg se pík eutektika A-Si-Mg_2Si objevuje v oblasti teplot kolem 545^{o}C, eutektikum mědi (Al-Si-$CuAl_2$) kolem teploty 520^{o}C. Za současného obsahu Cu i Mg vzniká několik typů eutektik při teplotách až do cca 480 ^{o}C. Lze analyzovat i vznik intermetalických fází železa a manganu, situace je však poněkud složitější. Citlivost termické analýzy je vysoká a reaguje na přítomnost jednotlivých prvků při obsahu řádově desetin procenta.

Zařízení pro termickou analýzu se skládá z vzorkovacího kelímku, přesného termočlánku, A/D převodníku a vyhodnocovací jednotky. Výsledky se mohou zobrazovat na monitoru nebo/a vytisknout připojenou tiskárnou. Blokové schéma zařízení je obr. 67.



Obr. 67: Blokové schéma zařízení pro termickou analýzu



Obr. 68: Stojánek pro termickou analýzu

Materiál a konstrukce kelímků bývá u jednotlivých výrobců různá. Kelímky mohou být kovové na opakované měření, nebo jednorázové pískové nebo keramické. Objem kovu je takový, aby tuhnutí bylo ukončeno do asi 4-5 min, aby nedocházelo k odeznívání modifikačního účinku a zkouška byla dostatečně operativní.

Na přesnost a vysokou citlivost termočlánků jsou kladeny mimořádné nároky. Používají se tenké termočlánky NiCr-Ni, jejichž teplý konec je chráněn kovovou nebo keramickou koncovkou. Termočlánky musí být cejchovány. Pro snadnou manipulaci může být termočlánek uchycen na vhodném stojánku – obr. 68.

Vyhodnocení se provádí v provozních podmínkách automaticky. Některá zařízení umožňují provádět i detailní analýzu křivek.

Termickou analýzu lze využít i ke studiu dalších krystalizačních parametrů slitin. Například měřením ve zkušebních kelímcích se dvěma termočlánky lze zjistit dobu, kdy dochází k tzv. dendritické koherenci. To je stav, kdy primární fáze utvoří síť dendritů skrze celý průřez stěny odlitku. Od tohoto okamžiku je zamezeno dosazování z nálitků, začíná vznikat osová porezita, mikrosegregace, zvyšuje se nebezpečí vzniku trhlin atd. Bod dosažení dendritické koherence se vyjadřuje jako procentuelní podíl z doby tuhnutí.

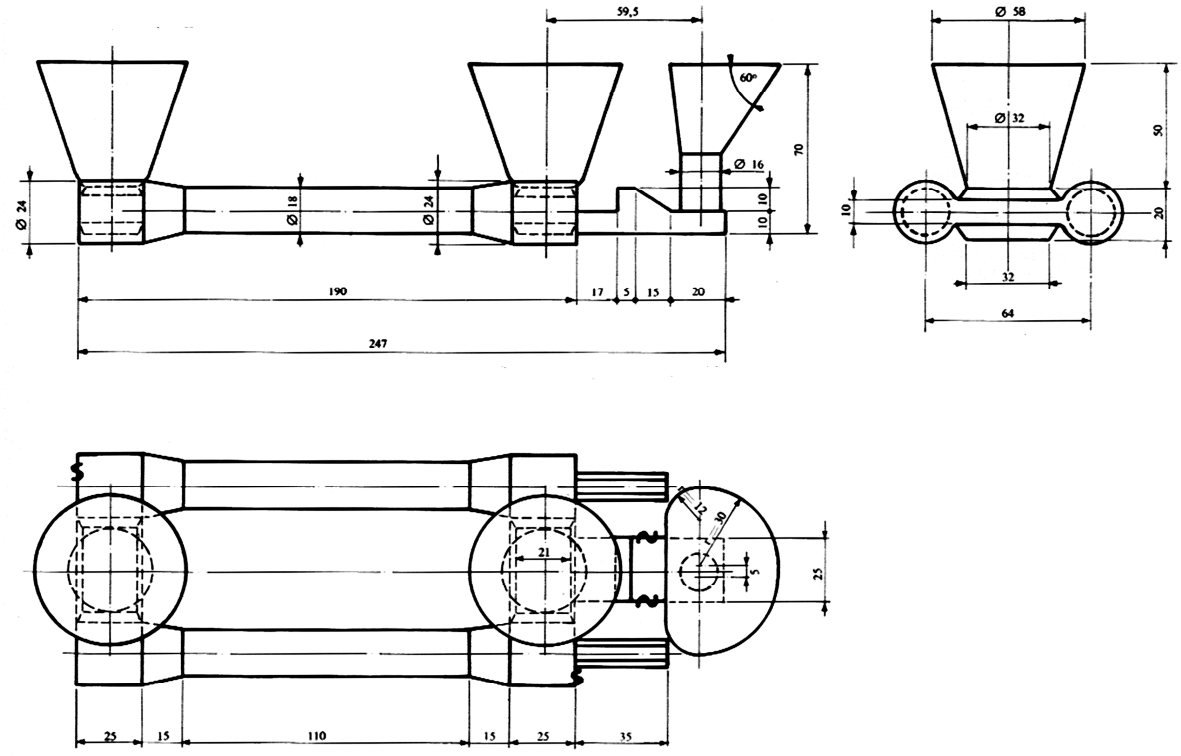
1.27 Laboratorní a přejímací zkoušky

Provádí se obvykle až po odlití tavby na odděleně litých zkušebních kusech, na přilitých zkušebních tělesech nebo na zkušebních tělesech, odebraných přímo z odlitků. Běžně se provádí zkoušky mechanických vlastností a metalografické hodnocení.

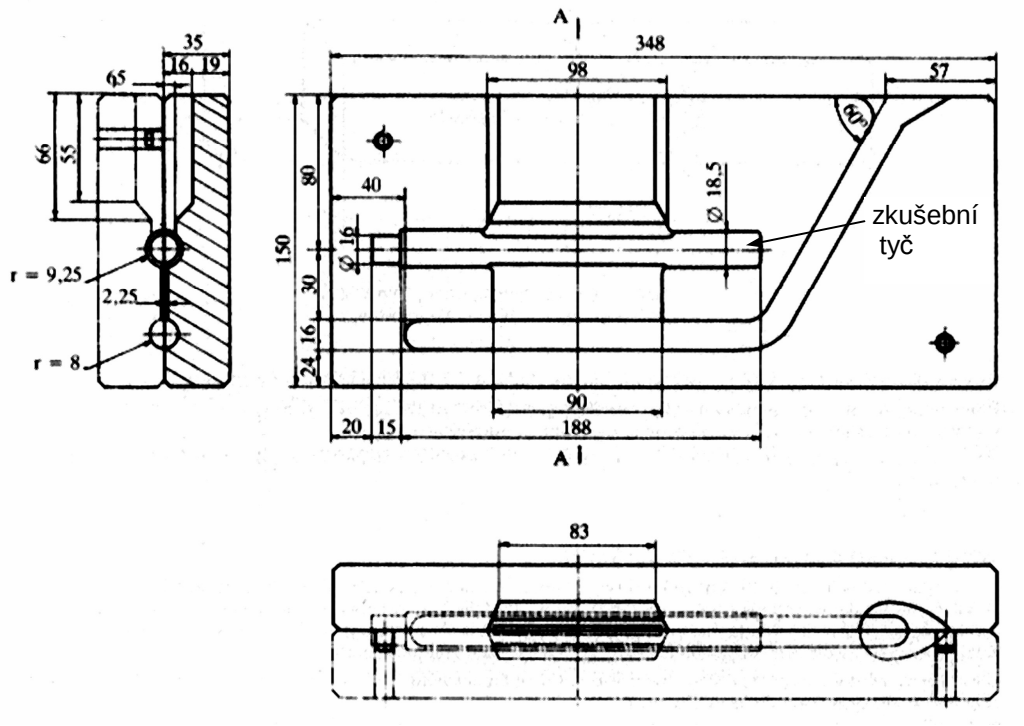
1.27.1 Mechanické zkoušky

Obvyklými mechanickými zkouškami jsou tahová zkouška za normální teploty a měření tvrdosti. Spíše výjimečně se zjišťují mechanické vlastnosti za zvýšených teplot, nebo provádí zkouška rázem v ohybu a únavové zkoušky.

Odděleně lité zkušební kusy pro mechanické zkoušky se vyrábí za takových podmínek ochlazování, které odpovídají tuhnutí příslušných odlitků. Pro lití do písku se rovněž zkušební kusy odlévají do pískové formy, při lití do kovových forem se zkušební tělesa odlévají do kokily. Na obr. 69 je zkušební kus pro lití do pískových forem, na obr. 70 je znázorněna kovová forma. V kovové formě se odlévá spodem, šikmo umístěným vtokovým kůlem. Tahové zkoušky se provádějí na neobrobených nebo obrobených tyčích. Tažnost **A** se podle normy ČSN EN 1706 zjišťuje na měřené délce 50 mm.



Obr. 69: Zkušební kus pro lití do pískových forem



Obr. 70: Kovová forma pro odlévání zkušebních tyčí

Tvrdost hliníkových slitin se hodnotí zkouškou dle Brinella. Zátěžná síla $F= 9,81.10.D^2$ (N), doba zatížení 30 s.

1.27.2 Metalografie

Metalografická analýza se používá pro hodnocení primární fáze, typu a morfologie eutektika a intermetalických fází, pro detailní analýzu strukturních složek a lomových ploch. Z mnoha metalografických metod se zde stručně zmíníme pouze o optické mikroskopii, která je v řadě sléváren snadno proveditelná a dostačuje pro běžné účely.

Při výběru metalografických vzorků je nutno dbát na to, aby vzorky byly odebrány z reprezentativního místa odlitku. Podle velikosti zvětšení a účelu, pro který se metalografické pozorování dělá se rozlišuje hodnocení makroskopické a mikroskopické.

Makroskopické hodnocení

Vzorek se pozoruje v nezvětšeném stavu nebo do zvětšení asi 10x. Používá se pro hodnocení velikosti primárního zrna, přítomnosti nekovových vměstků nebo porezity, velkých částic intermetalických fází a pro vyhodnocení lomů.

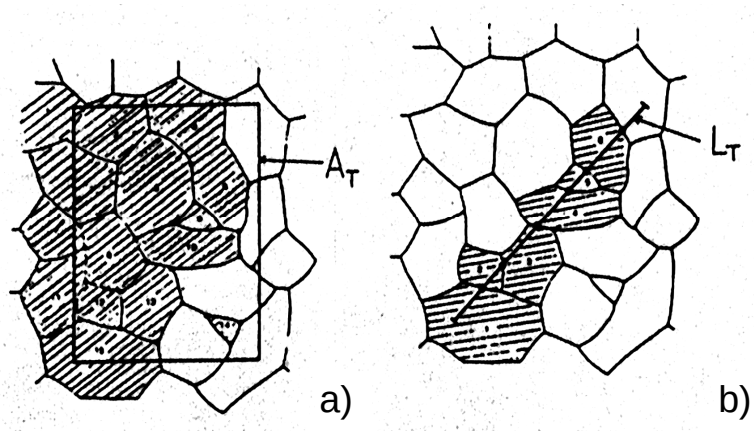
Pro přípravu výbrusů se používají obvyklé metody broušení a leštění. Běžně dostačuje broušení do hrubosti papíru 400. Makroskopické pozorování se často používá pro vyhodnocení velikosti primárního zrna.

Primární zrno slitin Al-Cu a Al-Mg bývá viditelné i v neleptaném stavu, eventuelně je možné mírné leptání 10% vodným roztokem NaOH při teplotách 60-70 ^oC. Při leptání v zásaditých

leptadlem se na slitinách Al-Cu tvoří tmavý povlak, který je nutno odstranit 50% nebo silnějším roztokem HNO_3. Následuje důkladné omytí vodou a sušení.

Ve slitinách Al-Si jsou hranice primárních zrn nezřetelné a leptáním se často velkého zlepšení nedosáhne. Hranice zrn se obvykle zvýrazní leptáním v 10-30% vodném roztoku $CuCl_2$ s několika kapkami HF. Vznikající tmavý povlak je nutno průběžně stírat. Aby se dosáhlo rovnoměrného leptání je vhodné předem vzorek odmastit v roztoku NaOH.
Pro zvýšení kontrastu hranic zrn slitin Al-Si je vhodné použít Poultonovo leptadlo, obsahující 12 dílů HCl konc., 6dílů HNO_3 konc., 1 díl HF 48% a 1 díl vody.
Osvědčené je rovněž leptadlo se složením 3 díly HCl, 1 díl HF, 1 HNO_3 a 1,5 dílu H_2O.

Hodnocení disperzity primárních zrn se provádí zjištěním počtu zrn na stanovené ploše výbrusu – obr. 71a, nebo počtu zrn které protne úsečka stanovené délky - obr. 71b.



Obr. 71: Stanovení velikosti primárních zrn metalografickým způsobem

Mikroskopické hodnocení

Účelem je především posouzení stupně modifikace eutektika Al-Si. Vzorky se brousí na jemnějších papírech než v předchozím případě a leští diamantovými pastami zrnitosti až 1 μm nebo specielními přípravky. Jako mazadlo se doporučuje petrolej nebo propylen. Vzorky se nakonec opět musí pečlivě odmastit, očistit pod tekoucí vodou a osušit.

Vzorky se obvykle leptají ve zředěném roztoku kyseliny fluorovodíkové (1 díl HF na 100-200 dílů H_20). Pro zvýraznění různých intermetalických fází se používají selektivní leptadla na bázi různých kombinací kyselin HNO_3, HCl, H_2SO_4 a HF nebo NaOH.

Příprava a vyhodnocení metalografických vzorků je odborně i časově velmi náročné a výsledky jsou k dispozici až po odlití kovu. Pro provozní hodnocení disperzity struktury a stupně modifikace je proto jednoznačně výhodnější používat termickou analýzu.

6 TECHNOLOGIE VÝROBY ODLITKŮ

Pro výrobu odlitků z hliníkových slitin **se používají téměř všechny známé slévárenské metody.** Vzhledem k poměrně nízké tavicí teplotě není žáruvzdornost formovacích hmot velkým problémem a rovněž při gravitačním lití do kovových forem vyhovují běžné nelegované slitiny železa. Pouze při lití za zvýšených sil je tepelné a mechanické namáhání tak velké, že pro výrobu forem se musí používat vysokolegované oceli.

Vzhledem k menším tepelným dilatacím forem a jejich menším deformacím vlivem metalostatického tlaku se u slitin hliníku dosahuje obvykle vyšší přesnosti odlitků a lepší kvality povrchu, než při odlévání slitin železa. Proto se mohou na odlitcích navrhovat menší přídavky na obrobení a při lití do kovových forem lze často odlévat nahotovo. Lze předlévat poměrně malé otvory a používat i kovová jádra. Pokud mechanické vlastnosti použité hliníkové slitiny v některých částech odlitku nevyhovují, používají se **kovové zálitky**, které se před litím vkládají do forem.

Struktura a vlastnosti slitin hliníku jsou velmi úzce závislé na intenzitě ochlazování při tuhnutí. Při rychlém tuhnutí odlitků dochází k mnoha příznivým efektům:

- vzniká jemnozrnná struktura s podstatně lepšími mechanickými vlastnostmi
- je menší strukturní heterogenita slitiny a nižší výskyt vad typu mikrostaženin a ředin
- omezuje se vylučování rozpuštěných plynů a vznik plynových dutin
- zvyšuje se disperzita intermetalických částic, které pak mají mnohem méně negativní účinek na vlastnosti slitiny, při rychlém tuhnutí je proto ve slitinách obvykle přípustný vyšší obsah doprovodných prvků

Horní hranice rychlosti chladnutí není z krystalizačního hlediska prakticky omezena. Na povrchu odlitků nevzniká licí kůra s podstatně jinými vlastnostmi, než má jádro odlitků, jako je tomu často např. u odlitků ze slitin železa. **Vzhledem ke všeobecně příznivému vlivu rychlého ochlazování by měly být odlitky konstruovány jako tenkostěnné a z výrobních technologií se preferují takové, které rychlé ochlazování podporují – zejména odlévání do kovových forem.**

Při odlévání je vždy nutno respektovat velký **sklon k oxidaci** tekutého kovu. To se musí projevit v provedení vtokových systémů forem tak, aby bylo zajištěno co nejklidnější plnění. Kov ve formě nesmí dopadat z velké výšky. **Preferuje se používání spodních vtoků.** U technologií, u nichž dochází k velké turbulenci a rozstřikování kovu (tlakové lití) je vždy horší homogenita kovu. Pro zachycení vměstků se ve velkém rozsahu používají ploché nebo objemové filtry.

Hliníkové slitiny během tuhnutí stahují a mají značný **sklon k tvorbě soustředěných nebo rozptýlených staženin** (mikrostaženin a ředin). Odlitky je proto nutné nálitkovat, nebo kov během tuhnutí doplňovat jiným způsobem. Poměr obou typů dutin závisí zejména na šířce intervalu tuhnutí slitiny a na rychlosti chladnutí. Slitiny s širokým intervalem tuhnutí mají větší sklon ke tvorbě mikrostaženin, než slitiny eutektické. Vyšší rychlost chladnutí podporuje vznik soustředěných staženin a omezuje vznik mikrostaženin. Modifikované slitiny mívají větší sklon ke tvorbě rozptýlených dutin, než slitiny nemodifikované. Vzhledem k malé hustotě kovu vzniká pod nálitky poměrně malý dosazovací tlak. Pro dosazování proto může být výhodné používat štíhlé, vyšší nálitky.

Míra smrštění hliníkových slitin v tuhém stavu je obvykle **v rozmezí 1,2-1,5%.** S touto hodnotou je nutno počítat při návrhu velikosti modelového zařízení a forem. Smrštění je také příčinou vzniku trhlin, které vznikají obvykle za zvýšených teplot. Nebezpečí vzniku trhlin by mělo být respektováno při konstrukci odlitků. Sklon ke vzniku trhlin je důležitou vlastností každé slitiny.

1.28 Odlévání do netrvalých forem

1.28.1 Lití do pískových forem

Odlévání do pískových forem je velmi flexibilní metodou, která je vhodná pro všechny hmotnostní kategorie odlitků. Používá se především pro kusovou a malosériovou výrobu menších odlitků, pro něž by bylo zhotovení kovových forem neekonomické a pro výrobu všech odlitků vyšších rozměrových a hmotnostních kategorií. Velikost ani hmotnost odlitků prakticky nejsou omezeny.

Pro výrobu forem a jader se používají **všechny běžné technologie a pojivové systémy.** Nároky na jejich pevnost jsou podstatně nižší, než u slitin železa. Vzhledem k menším nárokům na prodyšnost směsí, než je nutná u slitin železa, se mohou používat **jemnější ostřiva.** To podporuje snížení drsnosti odlitků. Nátěry, pokud se používají, mají za cíl omezit reakce kovu s formou a vedou ke zlepšení kvality povrchu odlitků.

Minimální dosažitelná tloušťka stěn závisí na plošných rozměrech stěny a zabíhavosti slitiny. Při běžné výrobě se minimální tloušťka stěn pohybuje mezi 3-4 mm. **Tloušťkám nad 30-40 mm by se konstrukce odlitku měla vyhýbat**, protože mechanické vlastnosti a vnitřní homogenita se výrazně snižují. V takových místech je téměř nemožné dosáhnout vlastností předepsaných normou. Kritické jsou oblasti kolem tepelné osy odlitků a pod nálitky. **Pro silnostěnné odlitky je vhodné v maximální míře používat kovová chladítka.**

1.28.2 V- proces

Je metodou, která se ve světě uplatňuje ve stále větší míře pro výrobu tvarově složitých odlitků s vnitřními dutinami, které by bylo nutno vyrobit komplikovanými jádry. Typické je použití v automobilovém průmyslu pro výrobu hlav válců, výfukového potrubí nebo složitých skříňovitých odlitků.

1.28.3 Lití do skořepinových forem

Metoda lití do skořepinových forem, vyrobených metodou vytavitelného modelu, je pro velmi vhodnou technologií pro menší, tvarově komplikované odlitky z hliníkových slitin. Pro výrobu forem se obvykle používá křemenná keramika. Vzhledem k malému mechanickému a tepelnému namáhání se odlévá do samonosných skořepin, které mají menší počet obalů, než je obvyklé při lití slitin železa nebo niklu. Formy bývají před litím předehřáty asi na 200-300 ^{o}C. Minimální dosažitelná tloušťka stěn je u malých odlitků již od cca 0,5 mm otvory lze předlévat od cca 1,5 mm. Obvyklé jsou však tloušťky větší, kolem 2-3 mm. Odlitky mají vysokou přesnost, řadu rozměrů je možno předlévat „nahotovo“.

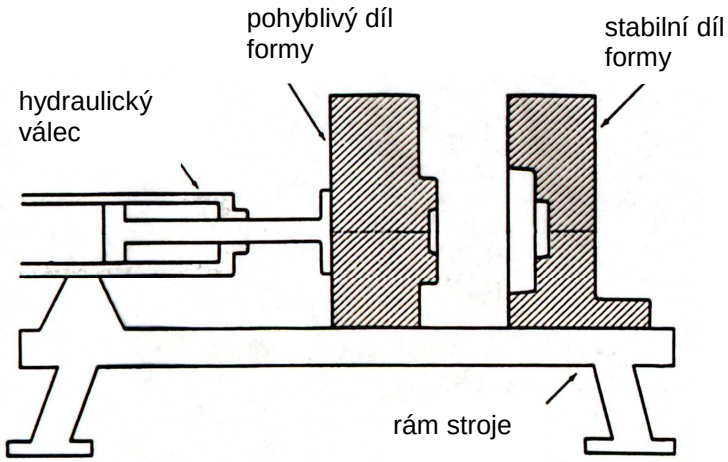
1.29 Odlévání do kovových forem

Do trvalých kovových forem se odlévají především odlitky menších až středních rozměrů. Účelnost použití kovových forem je limitována především náklady na jejich zhotovení. Ty jsou, obzvláště při tlakovém lití, velmi vysoké a ekonomická efektivita je podmíněna vysokou seriovostí výroby.

1.29.1 Gravitační lití do kovových forem

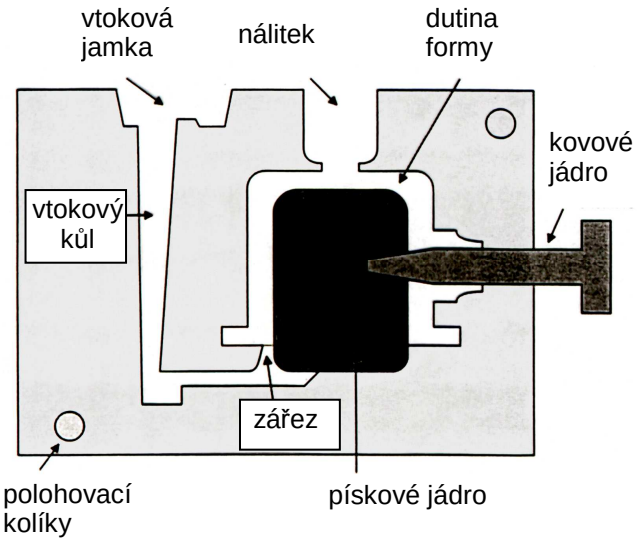
Jedná se o poměrně jednoduchou technologii. **Formy** bývají obvykle zhotoveny odléváním **z litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem.** Dělicí rovina, upínací výstupky a vyhazovací otvory jsou obrobeny, funkční plocha dutiny formy zůstává často v litém stavu. Jsou ovšem možné i jiné technologie výroby a jiné druhy materiálů kovových forem.

Formy jsou dvou- nebo vícedílné. **Jádra mohou být kovová nebo písková**. Písková jádra se používají zejména v těch případech, kdy by kovová jádra nešla z dutiny odlitku vytáhnout. Formy bývají nainstalovány na kokilových strojích, které zajišťují skládání a rozebírání forem, vyhazování odlitků z formy a pomocí vytahovačů mohou manipulovat s jednotlivými volnými částmi forem. Formy bývají většinou řešeny se svislou dělicí rovinou. Na obr. 72 je schematicky znázorněn jednoduchý kokilový stroj, na obr. 73 je kokila s jedním pískovým



jádrem a jedním kovovým jádrem.

Obr.72: Kokilový stroj s dvoudílnou formou



Obr.73: Kovová forma s jádry – pohled do dělicí roviny

Minimální tloušťka stěn odlitků bývá kolem 4-5 mm, obvykle však bývá větší. Hlubší otvory se předlévají od průměrů přibližně nad 10 mm. Na odlitcích musí být úkosy alespoň 2-3^{o}. Hmotnost odlitků je od několika gramů do cca 20-30 kg, výjimečně i více. Kovové formy musí být předehřáty a jejich provozní teplota by se měla pohybovat kolem 200-250 ^{o}C. Chlazení bývá vodní, zalitými chladicími šneky nebo přišroubovanými chladicími deskami. **Povrch forem se periodicky ošetřuje nátěry**, které zamezují lepení odlitků ke kokile a rozpouštění železa. Nálitky mohou být ošetřeny tepelně-izolačními nátěry, event. je možné do nálitků zakládat izolační nebo exotermické vložky.

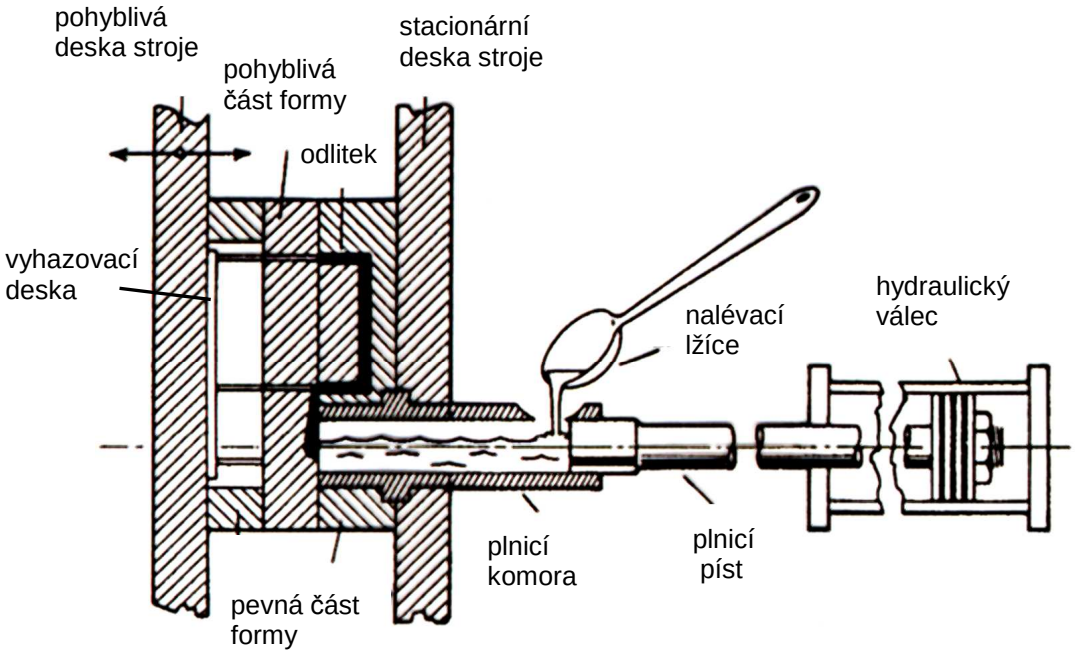
1.29.2 Tlakové lití

Tlakové lití je nejdůležitější technologií výroby hliníkových odlitků. Principem výroby je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem až 250 MPa. Za těchto podmínek je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky **s tloušťkou stěn od přibližně 1-2 mm,** za určitých podmínek a u některých slitin i méně, než 1 mm. Rozměry odlitků jsou velmi přesné – u menších rozměrů lze dosáhnout přesnosti až 0,3-0,5 %. Ve formách lze používat výhradně kovová jádra. **Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebrání formy a vytažení volných částí a jader.** Velká část otvorů se předlévá. Do forem je před litím možno vkládat **kovové zálitky**. Některé formy jsou konstrukčně velmi složité.

Formy jsou vyrobeny nástrojářským způsobem. Obvykle se skládají z rámu a vložek, které tvoří funkční část formy, která je přímo ve styku s kovem. Vzhledem k mimořádným mechanickým a tepelným nárokům se funkční části vyrábí z vysoce legovaných Cr-Mo ocelí a tepelně zpracují. (Méně namáhané části jako rám a další díly se vyrábí z méně ušlechtilých ocelí.) Vzhledem k mimořádně vysokým výrobním nákladům (řádově statisíce až miliony korun) se vyžaduje i vysoká životnost forem. Životnost u menších forem dosahuje až 100.000 i více odlití. Vzhledem k nutnosti amortizace ceny forem je technologie tlakového lití vhodná pouze pro vysokoseriovou a hromadnou výrobu odlitků.

Maximální velikost odlitků, které se na konkrétním stroji dají vyrobit, **je limitována maximální hmotností kovu a uzavírací silou stroje.** Je to hodnota síly, kterou jsou svírány obě poloviny formy. Z uzavírací síly a plnicího tlaku lze vypočítat maximální přípustnou plocha odlitku v dělicí rovině. Velké stroje mají uzavírací sílu až kolem 40 MN, výjimečně i vyšší.

Podle konstrukce se tlakové stroje dělí na **dva základní typy, se studenou a s teplou komorou.** Podle směru pohybu plnicího pístu mohou být stroje se svislou nebo vodorovnou komorou. **Slitiny hliníku se v současné době odlévají téměř výhradně na strojích se studenou horizontální komorou.** Schéma takového stroje je na obr. 74.

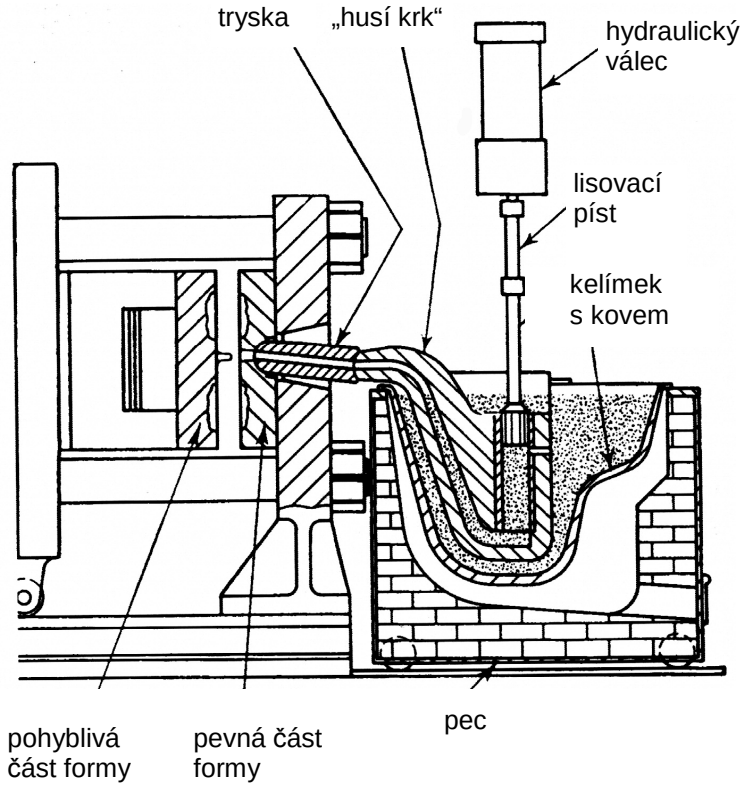


Obr. 74: Horizontální tlakový stroj se studenou komorou.

Dávkování kovu do plnicí trubice se může provádět manuálně, u modernějších zařízení je však dávkování automatické a to buď plnicí lžící nebo pneumatickým dávkovacím zařízením z udržovací nebo dávkovací pece, která bývá součástí každého pracoviště tlakového stroje. Jako dávkovací může být například použita pec, znázorněná na obr. 59 v kap.6.

Po ztuhnutí se odlitek z pohyblivé části formy vytlačí pomocí vyhazovačů a odebírá ručně nebo pomocí robota. Následuje ochlazení odlitku, ostřižení vtoků a přetoků a konečná apretace. Před dalším licím cyklem se forma nastříká separačním prostředkem, který zamezuje nalepování odlitků na formu a usnadňuje jejich vyjímání z formy. V moderních provozech je celý výrobní cyklus automatizován.

Stroje s teplou licí komorou mají plnicí komoru umístěnou pod hladinou kovu v udržovací peci. Jejich výhodou je, že kov se z udržovací do plnicí komory nepřelévá a tak nedochází k jeho oxidaci. Tento typ pecí se pro slitiny hliníku nepoužívá, je však **častý při lití slitin hořčíku a zinku.** Schematicky je znázorněn na obr. 75.



Obr. 75: Tlakový stroj s teplou komorou

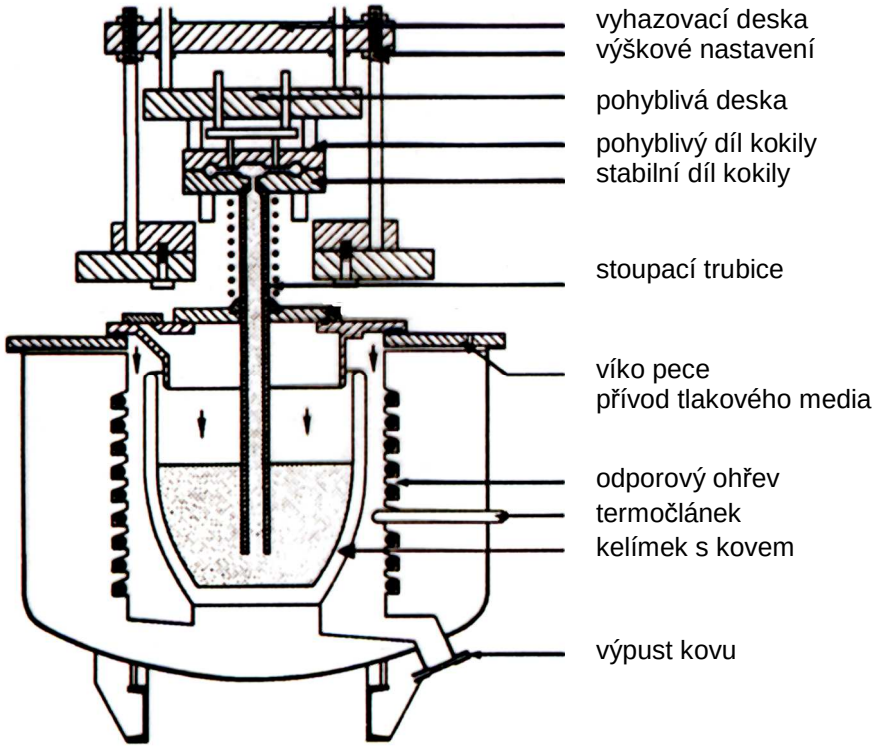
Pro tlakové lití je vhodné široké spektrum slitin Al-Si, Al-Si-Cu a Al-Mg. Slitiny pro tlakové lití mají obsah železa zvýšený na přibližně 1% i více, aby se omezil sklon k nalepování kovu na formy. Kov do udržovacích nebo dávkovacích pecí se rozváží z centrální tavírny. Bývá provedena rafinace, kov je odplyněn, někdy přefiltrován. V udržovacích pecích bývá mezi prostorem zásobníku kovu a odebíracím prostorem někdy zabudován keramický filtr. V udržovacích pecích se obvykle neprovádí žádné podstatné metalurgické zásahy, v určitých časových intervalech se však provádí rafinace a z hladiny se stahuje struska. Slitina se většinou nemodifikuje, neboť, díky rychlému chladnutí, se křemík vylučuje v jemných částicích. **Lící teploty siluminů při tlakovém odlévání bývají v rozmezí 610-650 ^{o}C.**

Tlakově lité odlitky nejsou, co se týče vnitřní homogenity, příliš kvalitními výrobky. Při rozstřikování kovu ve formě dochází k jeho oxidaci a reakci s mazadlem a důsledkem je **vznik velkého množství vměstků**. V některých průřezech může rovněž zůstávat uzavřený vzduch, který je příčinou tvorby bublin. Vyřešení optimálního způsobu plnění je otázkou správné konstrukce formy, vtokové soustavy, odvzdušňovacího systému a režimu plnění. **Výrazného zlepšení situace se dosahuje při lití do vakuovaných forem.** U nich se po uzavření z dutiny formy před litím odsaje vzduch, tím se omezí oxidace kovu a odstraní nebezpečí vzniku bublin.

K zajištění konstantní kvality výroby je nutno udržovat v poměrně úzkém rozmezí teplotu forem. V každé formě je vytvořen systém kanálů, které slouží před zahájením výroby k ohřevu forem, během výroby pak k chlazení. Teplota forem se snímá pomocí termočlánků a regulace se provádí obvykle automaticky a nastavuje se v mezích 180-250 ^{o}C. Odlévání do studených forem má za následek značné snížení jejich životnosti. Kolísání teplotního režimu se zamezuje zejména dodržováním pravidelného licího cyklu během celého pracovního dne.

1.29.3 Nízkotlaké lití

Stroj pro nízkotlaké lití je tvořen tlakotěsnou udržovací pecí, nad kterou je upnuta dělená kovová forma, obvykle s vodorovnou dělicí rovinou. Tavenina v kelímku pece je se spodním dílem formy propojena stoupací trubicí ze žáruvzdorného materiálu tak, že trubice spodním okrajem zasahuje pod hladinu kovu – obr. 76.



Obr.76: Schéma stroje pro nízkotlaké lití

Odlévání se provádí zvýšením tlaku nad hladinou kovu, čímž je kov z kelímku vytlačován stoupací trubicí vzhůru do formy. Protože je ústí stoupací trubice ponořeno pod vrstvu oxidů a nečistot na hladině pece, **vstupuje do formy čistý kov bez vměstků**. Rychlost stoupání kovu je regulována nárůstem tlaku tak, aby plnění bylo naprosto klidné. Působením tlaku se do tuhnoucího odlitku průběžně doplňuje kov, takže vtok působí současně jako nálitek.

Přetlak se v peci udržuje po celou dobu tuhnutí odlitku. Po ztuhnutí se přetlak zruší a kov ze stoupací trubice samovolně vyteče zpět do kelímku pece. Po rozevření formy se odlitek vyhazovači vytlačí z pohyblivé části formy.

Při optimální konstrukci formy, teplotním režimu a načasování operací lze dosáhnout toho, že s odlitkem ztuhne pouze malá část vtokové soustavy. **Využití tekutého kovu** je při nízkotlakém lití **mimořádně vysoké a dosahuje přes 90 %.** Během pracovního cyklu se odlévaný kov prakticky nedostane do styku s okolní atmosférou. Proudění je klidné a proto nedochází oxidaci taveniny. **Kvalita odlitků, vyrobených touto metodou, je velmi vysoká**. V odlitcích je **minimum vměstků i plynových dutin** a vyznačují se proto **vynikající těsností** vůči tlakovým mediím.

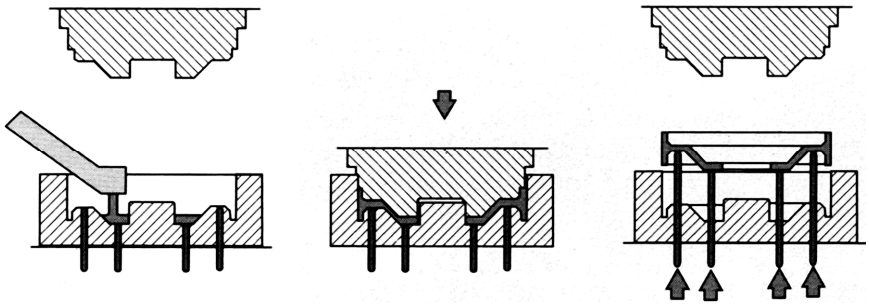
Nízkotlakým litím je možno vyrábět různorodé hmotnostní kategorie odlitků. Při lití silnostěnných odlitků s dlouhou dobou tuhnutí se však velmi prodlužuje délka výrobního cyklu. Objem kelímku stroje musí korespondovat s velikostí odlitků tak, aby intervaly mezi doplňováním kovu z tavicí pece nebyly příliš krátké.

Variantou nízkotlakého lití je metoda **lití s protitlakem**. Zde zpočátku působí přetlak plynů i na straně formy a odlití se dosahuje snižováním tlaku ve formě. V systému je celkově vyšší tlak, než při nízkotlakém lití, což zrychluje odvod tepla z odlitku do formy (zvyšuje se součinitel přestupu tepla) a omezuje se vznik ředin a plynových bublin při tuhnutí. Technologie je vhodná zvláště pro odlitky s větší tloušťkou stěn.

1.29.4 Lití s krystalizací pod tlakem - Squeeze Casting

Metoda je progresivní, dosud málo rozšířenou metodou lití do kovových forem, která v sobě kombinuje výhody pomalého plnění formy a vysokého tlaku během tuhnutí. Podle způsobu provedení se provádí tzv. přímý nebo nepřímý squeeze casting.

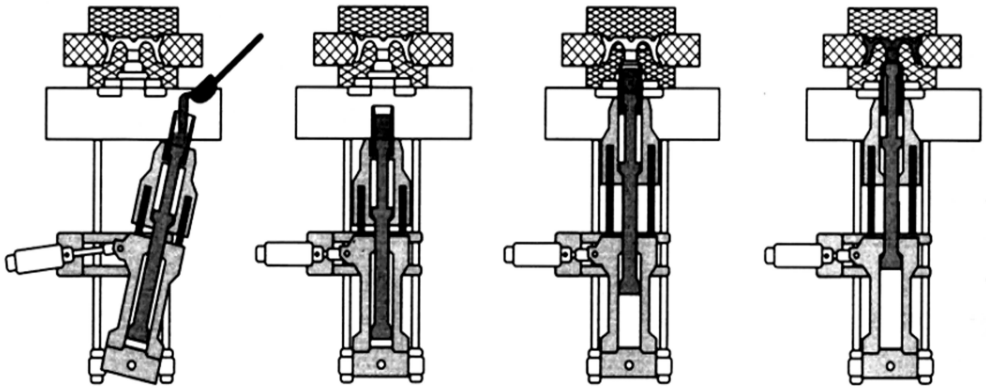
U přímého squeeze castingu se přesně odměřená dávka kovu volně nalije do spodní části kovové formy, připomínající raznici. Kov se uzavře a stlačí horní částí formy (razníkem). Tlak působí po celou dobu tuhnutí – obr. 77. Po ztuhnutí se odlitek pomocí vyhazovačů vytlačí z formy. Metoda je vhodná pro výrobu relativně masivních odlitků.



Obr. 77: Výrobní postup při přímém squeeze castingu

Nepřímý squeeze casting připomíná způsob tlakového lití se studenou komorou. Kov se dávkuje do komory lisu pod vlastní kovovou formou (obvykle je válec s komorou výklopný – viz obr. 78a). Válec se vrátí do pracovní polohy – obr. 78b a kov se velkými zářezy malou rychlostí vytlačuje do formy – obr. 78c. Rychlost proudění kovu je malá, řádově 0,5 m/s (oproti rychlostem kovu v zářezech při tlakovém lití, které jsou řádu několika desítek m/s).

Kov proto proudí laminárně, nedochází k jeho víření a oxidaci. Lisovací tlak až 150 MPa působí během celé doby tuhnutí – obr. 78d.



a) b) c) d)

Obr. 78: Schéma nepřímého squeeze castingu

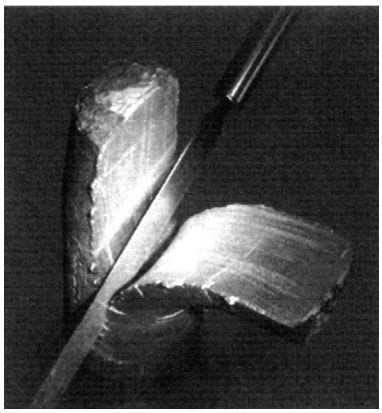
Vedle všech výhod, spojených s klidným plněním forem, dochází u metod lití s krystalizací pod tlakem k dalším významným efektům:

- Výrazně se zvyšuje intenzita přestupu tepla z kovu do formy (zvýšení součinitele přestupu tepla je oproti gravitačnímu lití řádové). Tlak zamezuje vzniku mezery mezi odlitkem a formou, proto je ochlazování intenzivní po celou dobu tuhnutí.
- Vysoká rychlost tuhnutí vede ke vzniku jemnozrnné struktury, zmenšuje se i velikost intermetalických fází. Rovněž morfologie fází bývá příznivější.
- Odlitky neobsahují plynové dutiny
- Téměř se zamezuje vzniku mikrostaženin
- Zvyšuje se přesnost odlitků

Výsledkem těchto příznivých vlivů je zvýšení mechanických vlastností a vnitřní homogenity odlitků. Nevýhodou metody je zejména značná investiční i provozní náročnost. Určitou modifikací této metody je vytvoření místního dotlaku specielním trnem při klasickém tlakovém lití.

Metodu squeeze casting lze použít i při výrobě kompozitních materiálů s obsahem vláknitých nebo zrnitých částic. Prakticky se využívá zejména v automobilovém průmyslu, např. při lití pístů.

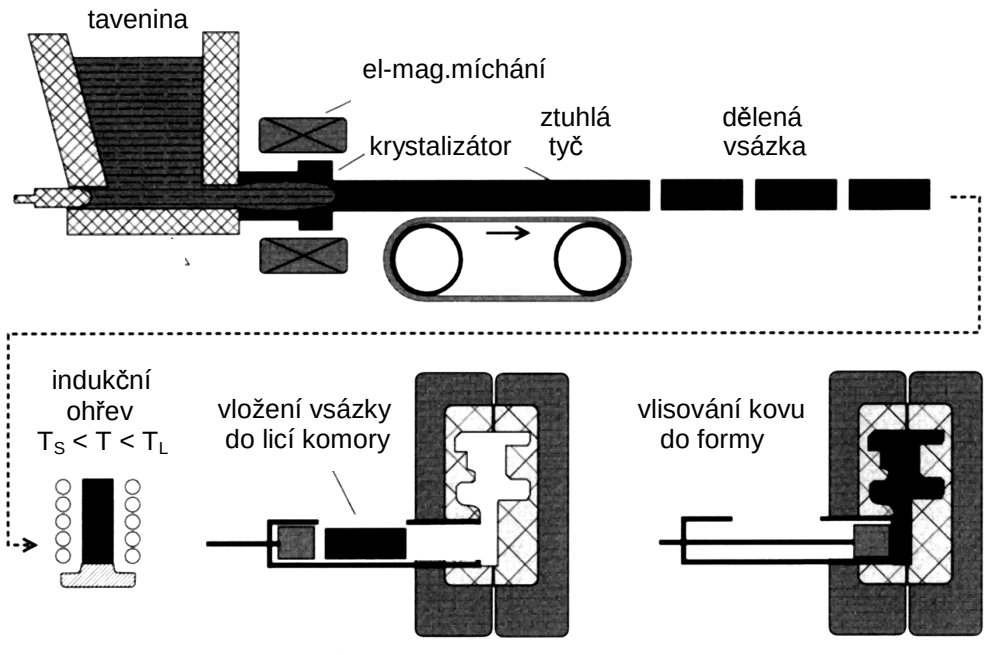
1.29.5 Lisování v polotuhém stavu – Thixocasting



Thixocasting je novou progresivní metodou, která je svým charakterem na pomezí mezi odléváním a lisováním. Thixotropie je schopnost některých polotuhých kovových tavenin, chovat se v nezatíženém stavu jako vysoce viskózní (tj. poměrně tuhé) těleso, za působení střihových sil se však viskozita o několik řádů snižuje, takže slitina má dobrou tekutost. Předpokladem takového chování je, že primární globulitická fáze α(Al) je obklopena dostatečným množstvím tekuté fáze. Optimální množství tekuté fáze je kolem 35 %. Tvárnost takového materiálu je tak vysoká, že je možné ho krájet nožem – obr. 79.

Obr. 79: Tvárnost předehřátého vzorku slitin Al-Si

Principem metody thixocasting je zhotovení výchozích těles vsázky, hmotností odpovídajících konečnému výrobku, ohřev každého takového tělesa do teplotní oblasti mezi solidem a likvidem, následuje vložení do lisovací komory tlakového stroje a vtlačení materiálu do dutiny kovové formy. Schematicky je celý postup znázorněn na obr. 80.



Obr. 80: Výrobní postup při metodě thixocasting

.

Výchozí vsázková tělesa malých průměrů (asi do 50 mm) se vyrábí protlačováním. Pro zhotovení větších průměrů je výhodná výroba kontilitím. Tuhá tyč kovu se mechanicky dělí na potřebné délky. Ohřev se provádí výhradně indukčně tak, že těleso vsázky se vloží do induktoru a s vysokou přesností se ohřeje na požadovanou teplotu. Vsázka se pak rychle přenese do komory tlakového stroje a vtlačí do formy.

Tímto způsobem se odlévají především slitiny typu AlSi7Mg, které mají dostatečně široký interval tuhnutí, který umožní s potřebnou přesností nastavit podíl tekuté fáze. Teplota ohřevu těchto slitin je přibližně 580 ^{o}C. Metodu lze však použít i u jiných slitin, např. AlCu4Mg nebo AlZn6Mg.

Výhodou použití metody thixocasting je minimální stahování kovu a velmi malý výskyt mikrostaženin, dále nízký obsah plynů, takže prakticky nehrozí vznik plynových dutin, jemná, stejnoměrná struktura a velmi dobré mechanické vlastnosti. Požár [8] uvádí srovnávací tabulku mechanických vlastností hliníkových slitin, vyrobených různými technologiemi - tab.15. Ukazuje se, že vlastnosti slitin, vyrobených metodami squeeze casting a thixocasting jsou srovnatelné, ale podstatně vyšší, než při lití do kokil.

Díky nižší licí teplotě jsou při metodě thixocasting kovové formy méně tepelně namáhány a rovněž se zkracuje výrobní takt. Celou operaci je možno automatizovat.

Tab.15: Mechanické vlastnosti hliníkových slitin, vyrobených různými technologiemi

Slitina	Technologie	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	Lomová houževnatost (MPa)
A 356 (AlSi7Mg0,4)	Lití do kokil	250	210	7,0	15,2
	Squeeze cast. (150 MPa)	345	300	9,3	28,5
	Thixocasting	340	285	8,9	26,3
A 2024 (AlCu4Mg1)	Lití do kokil	450	380	4,2	19,6
	Squeeze cast.	460	400	6,3	27,2
	Thixocasting	465	410	6,5	27,0

1.30 Kontrola odlitků a opravy vad

Po ztuhnutí a uvolnění odlitků z forem následují dokončovací operace a kontrola odlitků. Dokončovací operace odlitků, litých do pískových forem, nebo používajících písková jádra obvykle spočívají v odstranění zbytků písku, oddělení vtoků, nálitků a zateklin a obroušení odlitků. Vtoky a nálitky se s výhodou odřezávají pásovými nebo kotoučovými pilami, tenké profily se ulamují. Odlitky lité tlakově mají obvykle na obvodu dělicí roviny formy přetoky a zatekliny. Tyto části se spolu se vtokovou soustavou ostřihují. Ostré hrany a tenké otřepy tlakově litých odlitků se obrušují omíláním.

Během dokončovacích operací se provádí průběžná kontrola odlitků, jejímž cílem je zachycení odlitků se zjevnými vadami a jejich vyřazení z výroby. Optickým pozorováním je možno zjistit řadu běžných povrchových vad, nezaběhnutí, výskyt studených spojů a další defekty a pro řadu odlitků je tento způsob kontroly dostatečný. Další testování jakosti se provádí podle požadavků zákazníka. Provádí se zejména:

- rozměrová kontrola
- zkoušky struktury, mechanických a fyzikálních vlastností
- nedestruktivní kontrola odlitků prozařováním a ultrazvukem
- penetrační zkoušky
- zkoušky těsnosti

Značná část vad odlitků souvisí s typickými problémy slitin hliníku, tj. přítomností oxidických vměstků, staženin a mikrostaženin a plynových dutin. Ty jsou často rozptýleny v celém odlitku, nebo jeho velké části a oprava takových vad by byla buď nemožná, nebo neekonomická. Odlitky s těmito vadami se proto velmi často z výroby vyřazují. Pokud je netěsnost odlitků způsobena výskytem pórovitosti a mikrostaženin, lze provést jejich impregnaci nebo použít izostatické lisování. Netěsnost, způsobenou výskytem prasklin nebo studených spojů opravit nelze. Vady, které jsou lokalizovány do ohraničeného místa odlitku lze odstranit zavařováním.

1.30.1 Impregnace odlitků

V případě, kdy se vyžaduje těsnost odlitků vůči průniku tlakových medií, provádí se zkoušky těsnosti. Těsnost se kontroluje téměř výhradně pomocí přetlaku plynů, neboť stěna odlitků je pro plyny podstatně propustnější, než pro kapaliny. Dutina odlitků se uzavře vhodnými zátkami, odlitky se ponoří do vody a natlakují vzduchem. Průnik plynu je indikován vznikem bublin.

Účelem impregnace je zaplnění pórů a mikrodutin materiálem, který bude vyhovovat účelu a pracovním podmínkám odlitku. Impregnace se provádí vodním sklem, polyestery nebo metakrylátovými těsnícími hmotami.

Utěsnění se provádí vakuovou impregnací za mokra nebo za sucha. Při **impregnaci za mokra** je vnitřní dutina odlitku (např. odlitku skříně, trubky apod.) připojena na vakuovou pumpu a v tlakové nádobě je odlitek ponořen do těsnící kapaliny. Pomocí vysokého podtlaku se z pórů ve stěnách odlitku odsává vzduch a do pórů se nasává těsnící kapalina. V některých případech se ještě zvýší tlak těsnící kapaliny, aby se podpořilo její pronikání do stěny odlitku. Při **impregnaci za sucha** je nejdříve odlitek vakuován, pak je ponořen do těsnící kapaliny a prostor lázně je natlakován.

Po impregnaci se nechá přebytečná kapalina odkapat a odlitek se opláchne. Následuje vytvrzování těsnicí hmoty, obvykle za tepla při teplotách do přibližně 120 ^{o}C. **Vakuování odlitku před impregnací** je velmi důležitou operací, neboť bez tohoto kroku by se při natlakování pouze stlačil vzduch v pórech a zabránil pronikání těsnicí kapaliny. **Odlitky**, které budou obráběny je vhodné **před impregnací ohrubovat**, neboť se tím otevřou dutiny, na surovém odlitku kryté hutnou licí kůrou.

1.30.2 Izostatické lisování

Izostatické lisování za tepla – **HIP** (hot isostatic pressing) se používá k odstranění dutin a zvýšení mechanických a únavových vlastností odlitků. Výsledkem je zvýšení vnitřní homogenity a hustoty slitiny. Odlitky jsou umístěny v tlakové komoře izostatického lisu, ohřáty na teplotu, blízkou teplotě solidu příslušné slitin a tlak v komoře lisu je zvýšen na hodnoty kolem 100 MPa. Za těchto podmínek dochází k plastické deformaci, kterou se odstraní vnitřní porezita. Izostatické lisování je metodou vhodnou zejména pro odlitky s vysokými nároky na kvalitu.

1.30.3 Opravy zavařováním

Zavařováním se odstraňují lokální vady typu dutin, prasklin nebo defekty tvaru (např. podříznutí při odstraňování nálitků nebo místní podbroušení apod.). Podmínkou použití této metody je přípustnost svařování pro daný odlitek. Zavařování je problematické zvláště u odlitků pro vysoká namáhání, případně také u odlitků s povrchovou úpravou anodickou oxidací. V některých případech musí se zavařováním souhlasit zákazník.

Zavařování se provádí obvykle plamenem nebo obloukem v ochranném plynu metodami MIG, WIG, plasmou, proudem elektronů nebo laserem. Ochranným plynem je argon nebo helium (nebo jejich směs). Svařování se provádí za studena, pro omezení vnitřních pnutí lze odlitky předehřát na 70-150 ^{o}C. Svařitelnost slitin závisí na jejich chemickém složení a je jednou z důležitých technologických vlastností.
Místo, v němž se provádí svařování, musí být pečlivě připraveno s dodržením následujících zásad:

- vada musí být dokonale odstraněna do čistého kovu
- povrch drážky musí být čistý
- v místě svaru nemají být ostré rohy
- hloubka drážky nemá být větší, než její šířka

7 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ ZE SLITIN HLINÍKU

Účelem tepelného zpracování hliníkových slitin je zejména zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřní pnutí v odlitcích nebo ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře. Lze rovněž zlepšit obrobitelnost eventuelně dosáhnout změnu i jiných technologických vlastností nebo korozní odolnosti. **Převážná část odlitků z hliníkových slitin se používá v tepelně nezpracovaném stavu.** Častější se používá tepelné zpracování u odlitků litých do pískových forem nebo gravitačně do kovových forem, v nichž při tuhnutí vzniká hrubší struktura se značnými segregacemi přísadových a doprovodných prvků. U tlakově litých odlitků je struktura slitiny více homogenní a efekt tepelného zpracování na změnu vlastností bývá méně výrazný. Proto se **tlakově lité odlitky obvykle používají v litém stavu.**

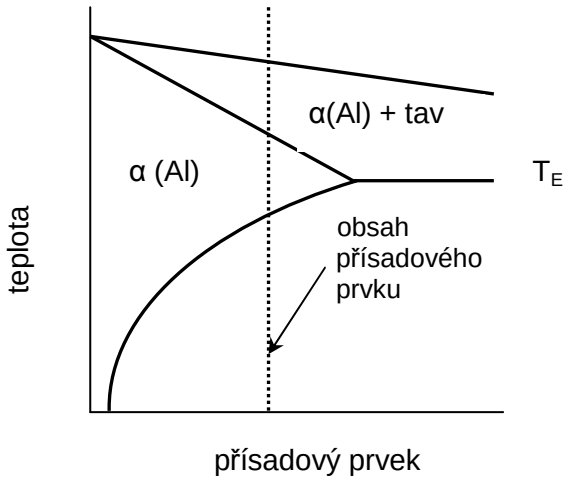
Nejčastějším způsobem tepelného zpracování hliníkových slitin je **vytvrzování**. Při vytvrzování se využívá změny rozpustnosti některých přísadových prvků v tuhém roztoku α(Al) během chladnutí. Podle schopnosti slitiny k tomuto způsobu tepelného zpracování **se hliníkové slitiny dělí na vytvrditelné a nevytvrditelné**.

Méně častým důvodem tepelného zpracování bývá snížení vnitřních pnutí, stabilizace rozměrů odlitků za normálních i zvýšených teplot, homogenizace chemického složení nebo stabilizace struktury.

Teplotní režimy jednotlivých druhů tepelného zpracování jsou poměrně významně závislé na chemickém složení slitiny, disperzitě výchozí struktury a na tloušťkách stěn odlitků. Žíhací teploty je nutno dodržovat v úzkém teplotní rozmezí. Tolerance teplot obvykle nesmí překračovat rozmezí ± 5 K, při homogenizačním žíhání se vyžaduje tolerance až ± 3 K. To vyžaduje používat pece s přesnou teplotní regulací a s vysokou homogenitou rozložení teploty celém objemu pece.

1.31 Vytvrzování

Vytvrzování je nejdůležitějším způsobem tepelného zpracování hliníkových slitin. **Tímto tepelným zpracováním se dosahuje podstatného zvýšení meze pevnosti R_m, meze $R_{p0,2}$ a tvrdosti. Tažnost slitin se obvykle poněkud snižuje.** Vytvrzování se používá zejména u odlitků litých do pískových forem, do kovových forem gravitačně nebo nízkotlakým litím. U tlakově litých odlitků se vytvrzování používá méně často.



Princip vytvrzování

Podmínkou pro vytvrzování je přítomnost přísadového prvku, který má dostatečně výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku α(Al). Takovými prvky jsou **zejména Cu a Mg,** případně Ni nebo Zn. Obsah těchto prvků ve slitině musí být vyšší, než je jejich rozpustnost při normální teplotě ale nižší, než je maximální rozpustnost v α (Al) při eutektické teplotě – obr. 81.

Obr. 81: Změna rozpustnosti přísadového prvku v hliníku

Vytvrzovat je možné buď binární slitiny hliníku s vytvrzujícím prvkem, např. slitiny Al-Cu, nebo vícesložkové slitiny, v nichž vytvrzující prvek je dalším přísadovým prvkem (legurou). Nejčastěji se jedná o slitiny Al-Si-Mg, nebo Al-Si-Cu. (Křemík neslouží jako vytvrzující prvek, neboť s hliníkem netvoří vytvrzující fázi.)

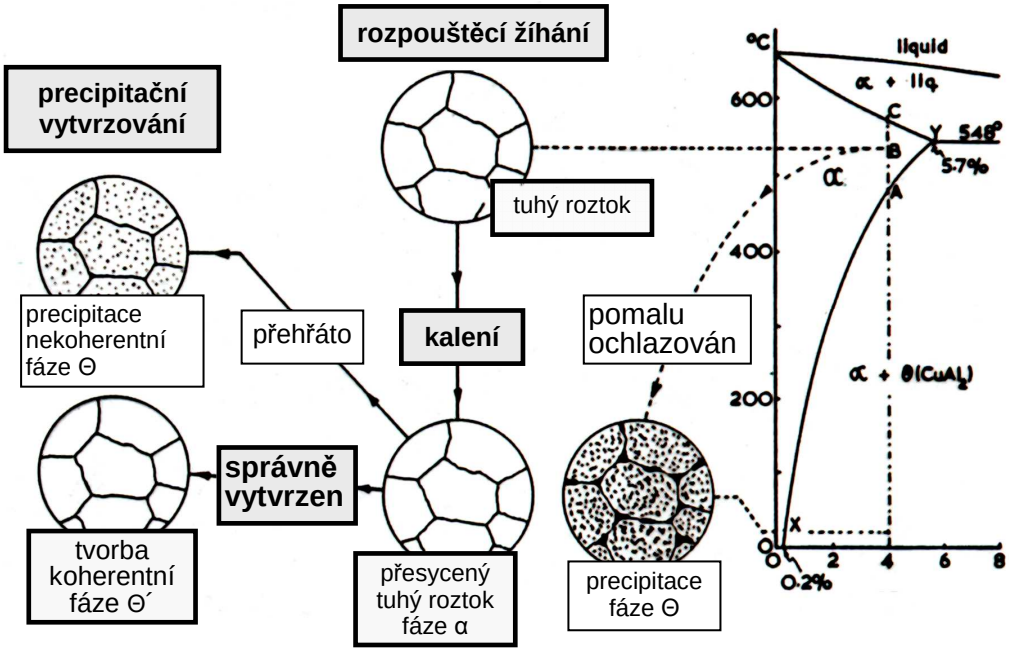
Výchozím polotovarem při vytvrzování je odlitek, který ve formě ztuhl běžným způsobem. Při takovém relativně pomalém ochlazování (ať v pískové nebo v kovové formě) se přísadové prvky vylučují v podobě rovnovážných intermetalických fází např. $CuAl_2$, Mg_2Si, Ni_3Al, $MgZn_2$ event. jiných. Takto vyloučené fáze jsou poměrně hrubé a mají nepříznivý vliv na vlastnosti slitiny – zvláště snižují houževnatost.

Cílem vytvrzování je zpětné rozpuštění intermetalických fází do homogenního roztoku α-Al a jejich následné vyloučení v podobě koherentních nebo semi-koherentních útvarů, které způsobují zpevnění slitiny.

Vytvrzování se skládá z následujících etap:

- rozpouštěcího žíhání – získává se homogenní tuhý roztok α(Al)
- rychlého ochlazení – výsledkem je přesycený tuhý roztok α(Al)
- precipitačního vytvrzování – dochází k tvorbě precipitátu a zpevnění struktury

Teplotní průběh vytvrzování je znázorněn v žíhacím diagramu na obr. 82.



Obr. 82: Teplotní průběh vytvrzování slitiny Al-Cu

Rozpouštěcí žíhání

Rozpouštěcí žíhání se provádí při teplotách nad křivkou změny rozpustnosti a **dochází při něm k rozpuštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísadové prvky.** Zvláště u slitin, u nichž se množství přísadového prvku blíží maximální rozpustnosti ve fázi α(Al) se volí rozpouštěcí teplota co nejvyšší. Překročení optimální teploty však vede k natavení slitiny na hranicích zrn, ke hrubnutí zrna a k tepelnému zborcení odlitku. Naopak odchylka k nižším teplotám způsobuje, že rozpuštění segregátu není dokonalé a vytvrzováním se nedosáhne očekávaných vlastností. V praxi se volí **teploty žíhání 10-15 °C**

pod eutektickou teplotou. (Tyto teploty lze zjistit pomocí diferenciální termické analýzy konkrétní slitiny) Hodnotu žíhací teploty je nutno dodržet v úzkých tolerancích ±3 až max.5 K.

Doba rozpouštěcího žíhání se musí dostatečně dlouhá, aby došlo k dokonalému rozpuštění segregovaných fází vytvrzovacího prvku a závisí zejména na disperzitě výchozí struktury. K homogenizaci jemnozrnné struktury, která vzniká u odlitků litých do kovových forem a u tenkostěnných odlitků do pískových forem, dostačuje kratší doba rozpouštěcího žíhání, než u odlitků silnostěnných litých do kokil a odlitků litých do pískových forem, u nichž je struktura podstatně hrubší. **Prodleva na homogenizační teplotě** se tak může pohybovat v širokých mezích, obvykle ale v intervalu od **asi 3 do 6 hod**. Homogenizační teplota nemá být zbytečně dlouhá, neboť dochází k hrubnutí zrna.

Ochlazení z homogenizační teploty

Cílem ochlazení je zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku z přesyceného roztoku fáze α(Al). (Této operaci se často nesprávně říká kalení.) Ochlazení z homogenizační teploty do teploty maximálně 150-200°C musí být velmi rychlé. Jako ochlazovací medium se proto používá studená voda. **Doba mezi vyjmutím odlitku ze žíhací pece a ponořením do vody musí být co nejkratší – zvláště u tenkostěnných odlitků nemá překročit max.10 s.** Ačkoliv citlivost jednotlivých slitin na délku intervalu zamočení odlitků z homogenizační teploty se liší, neměl by překročit **u běžných odlitků 10-20 s.** Zajištění této podmínky je někdy dosti obtížné. S výhodou se používají specielní žíhací pece s otevíratelným dnem, z nichž odlitky padají přímo do chladicí lázně. Jestliže není ochlazení odlitku po vyjmutí ze žíhací pece dostatečně rychlé, může dojít k částečné segregaci fází přísadového prvku na hranicích zrn a k podstatnému zhoršení konečných vlastností. Zvláště u masivnějších odlitků může při ochlazování místně docházet k varu vody. Vznikající bubliny mají izolační účinek a snižují tak intenzitu chlazení. Proto **se doporučuje zajistit proudění vody v chladicí nádrži, nebo se má košem s odlitky ve vodě pohybovat. Důležité je uložení odlitků v koši tak, aby se zajistilo jejich rovnoměrné ochlazování.**

Po rychlém ochlazení je struktura slitiny tvořena přesyceným tuhým roztokem α(Al). Je tedy poměrně měkká a tvárná. Odlitkům proto obvykle nehrozí vznik napěťových prasklin. **U odlitků silnostěnných a odlitků s velmi rozdílnými tloušťkami stěn se však z důvodu omezení vnitřních pnutí doporučuje ochlazovat do lázně s teplotou 40-80°C** s následným dochlazením ve studené vodě.

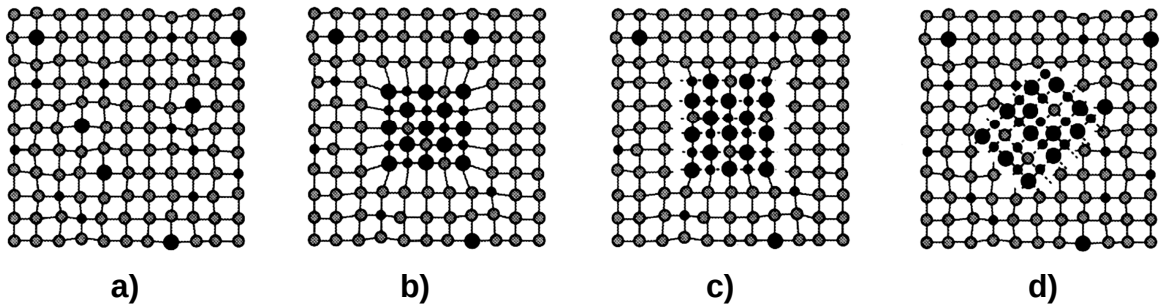
Precipitační vytvrzování

Pod pojmem precipitační vytvrzování (často se nazývá stárnutí) **se rozumí proces, při kterém dochází k postupnému rozpadu přesyceného tuhého roztoku α(Al)** (obr.83a). Při stárnutí dochází k difuzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších tímto prvkem a v nich k nukleaci nové fáze. U slitin Al-Si-Mg je touto fází Mg_2Si, u slitin Al-Cu to je $CuAl_2$, u slitin se zinkem fáze $MgZn_2$, u slitin s niklem fáze $NiAl_3$.

Růstem těchto zárodků vznikají **koherentní precipitáty**, které se označují jako Guinier-Prestonovy zóny (obr.83b). Tyto zóny mají destičkovité uspořádání vytvrzujícího prvku s tloušťkou řádově 10^{-9}–10^{-10} m. Koherentnost znamená, že tyto oblasti jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku jehož mřížku poněkud deformují a vyvolávají v ní vnitřní pnutí. Tato pnutí jsou příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Při zvýšení teploty nad optimální hodnotu a s rostoucím časem se koherentní precipitáty dále zvětšují a jejich počet se snižuje.

V dalším průběhu se koherence postupně ztrácí, to znamená, že tato fáze začíná tvořit samostatné útvary, které přestávají být krystalicky propojeny s původním přesyceným tuhým roztokem. Zpočátku se jedná o tzv. **semikoherentní částice**, ještě částečně spojené

s tuhým roztokem (obr. 83c). Tento proces je ještě doprovázen zvýšením pevnosti a tvrdosti. **Obvykle obsahují slitiny po vytvrzení koherentně až semikoherentně vyloučenou vytvrzující fázi.** Dalším stadiem vytvrzování je postupná ztráta koherence. Nekoherentní vytvrzující fáze nemá již krystalickou vazbu na tuhý roztok α(Al) a dochází ke snižování pevnosti a tvrdosti (obr. 83d). Tento stav se nazývá **přestárnutí** slitiny. Důvodem přestárnutí je příliš vysoká teplota, nebo příliš dlouhá doba vytvrzování. V dalším průběhu by došlo k úplné ztrátě koherence, vyloučení rovnovážných fází přísadového prvku a postupným snížením pevnosti a tvrdosti téměř na původní hodnoty před tepelným zpracováním. Mírně přestárnuté slitiny mají poněkud sníženou pevnost a tvrdost oproti maximu, ale i vyšší tažnost a proto se někdy záměrně používají – tepelné zpracování se označuje jako T64.

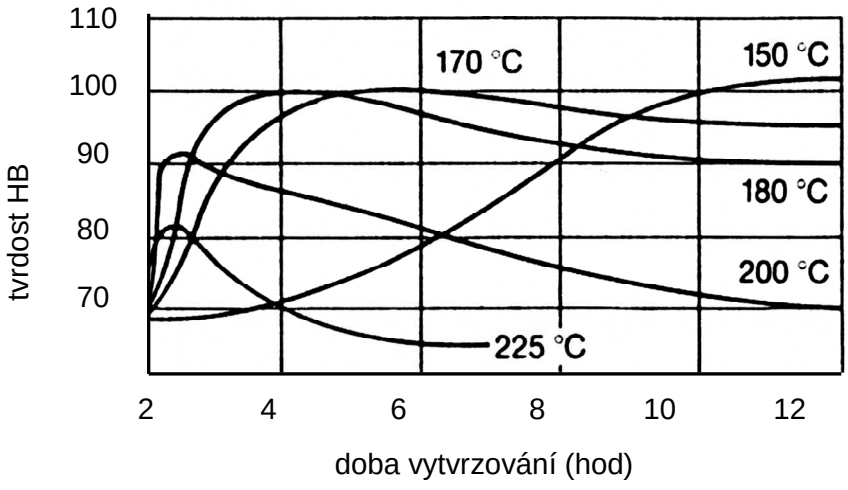


Obr. 83: Vyloučení precipitační fáze:
a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát,
c) částečně koherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát

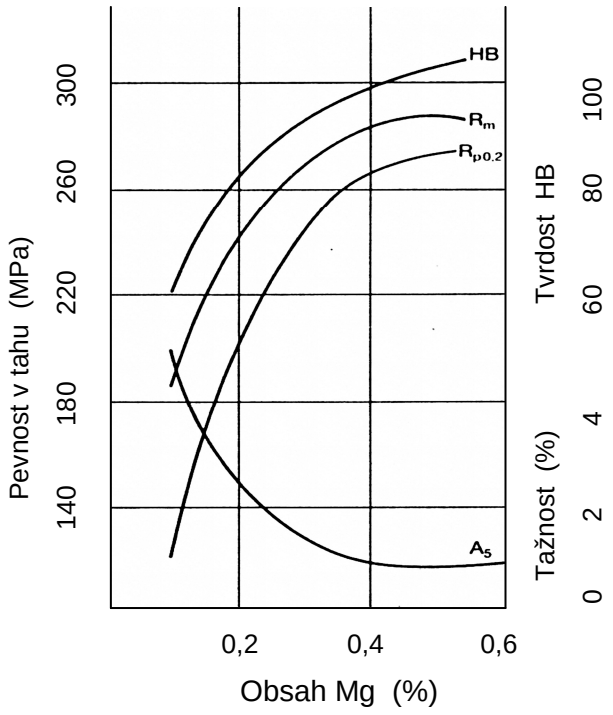
Podle pohyblivosti atomů vytvrzujícího prvku může k precipitačnímu vytvrzování hliníkových slitin docházet již za normální teploty nebo za teplot zvýšených. Podle toho se rozlišuje **vytvrzování za studena a vytvrzování za tepla**.

Vytvrzování za tepla

Slitiny Al-Si-Mg a slitiny Al-Mg se vytvrzují za tepla **Teploty vytvrzování** se volí podle druhu slitiny, **obvykle v rozmezí 140-180 °C** (u některých slitin až přes 200 °C), **doba vytvrzování 3 až 8 hod.** Při zvýšení teploty je nutno zkrátit dobu vytvrzování. Tyto vzájemné kompenzace jsou však možné jen do určité míry. Jak ukazuje obr. 84 pro slitinu AlSi10Mg, **při vysokých teplotách vytvrzování se získávají horší mechanické vlastnosti, než při teplotách optimálních.** Dobu a také čas vytvrzovacího žíhání je nutno dodržovat v úzkých mezích.



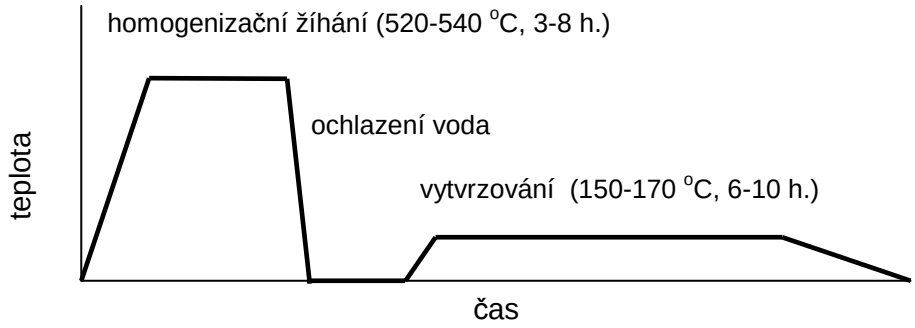
Obr. 84: Závislost tvrdosti slitiny AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování



Obr. 85: Vliv hořčíku na mechanické vlastnosti po vytvrzení

Vlastnosti slitiny po vytvrzení jsou závislé rovněž na obsahu vytvrzujícího prvku. **Obsah hořčíku u běžných vytvrditelných litin Al-Si-Mg bývá** v mezích **0,3-0,45 % Mg, ve vysokopevných slitinách až kolem 0,7 %.** S rostoucím obsahem Mg se zvyšuje pevnost a tvrdost, avšak klesá tažnost – obr. 85.

Vytvrzování je nutno chápat jako komplexní proces, skládající se z několika návazných kroků, z nichž každý má vliv na konečný efekt. Tak např. kromě chemického složení a podmínek vytvrzování závisí výsledné vlastnosti i na teplotě rozpouštěcího žíhání. Obvykle platí, že při vyšší teplotě rozpouštěcího žíhání se dosahuje lepších mechanických hodnot. Orientační časový režim vytvrzování je uveden na obr. 86.



Obr. 86: Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla (orientační hodnoty)

Vytvrzování za studena

Pohyblivost atomů některých vytvrzujících prvků je tak velká, že proces vytvrzování probíhá již při normální teplotě. Po rozpouštěcím žíhání, ale také již při dostatečně rychlém tuhnutí, například při lití do kovových forem, vzniká v těchto slitinách částečně přesycená fáze α-Al a po určité době, při běžné teplotě okolí, dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti odlitků, způsobenému samovolným vytvrzováním.

Za studena se vytvrzují slitiny typu AlZnMg, rovněž slitiny AlCu4 a také slitiny typu AlSiCu s vysokým obsahem mědi (např. AlSi6Cu4 nebo AlSi8Cu3) částečně vytvrzují za studena. Proces „stárnutí“ probíhá pomalu, samovolně a **konečných vlastností výrobek dosáhne za více než 100 až 150 hod.** Z tohoto důvodu u těchto odlitků normy předepisují provádět měření mechanických vlastností až za 8 dní po odlití. Rovněž obrábění se má provádět nejdříve po uplynutí této doby.

1.32 Žíhání

Pod pojem „žíhání“ se zařazují všechny ostatní druhy tepelného zpracování. Některé druhy žíhání jsou vlastně samostatnou částí vytvrzování. Žíhání není příliš běžný způsob tepelného zpracování slitin hliníku. Pojem žíhání a vytvrzování nelze zaměňovat. U odlitků se používají tyto hlavní způsoby žíhání.

1.32.1 Žíhání na odstranění vnitřního pnutí

Vnitřní pnutí u odlitků vzniká následkem nestejně rychlého ochlazování různých průřezů nebo vlivem brzděného smršťování v nepoddajné formě nebo tuhou konstrukcí odlitku. Žíhání se provádí při teplotách 200-250 °C po dobu 6-8 hod. s následujícím pomalým ochlazováním v peci nebo na vzduchu. Pro dokonalé snižení vnitřních pnutí je nutno žíhací teploty zvýšit až na 250-350 °C, přitom však může dojít k určitému poklesu pevnostních charakteristik.

1.32.2 Stabilizační žíhání

Používá se tehdy, když odlitky se v provozu používají za zvýšených teplot, nebo když dochází ke kolísání teplot. Cílem žíhání je rozměrová stabilizace velmi přesných výrobků (např. pro optický průmysl), případně stabilizace mechanických vlastností. Teplota stabilizačního žíhání se volí vyšší, než je maximální provozní teplota, obvykle v rozsahu 240-350 °C, ochlazování na vzduchu.

1.32.3 Žíhání na měkko

Uplatňuje se jen vyjímečně a to u slitin, které byly vytvrzeny a u nichž se má zpětně dosáhnout rovnovážného stavu. Teplota žíhání se volí v rozmezí 350-450 °C, následuje pozvolné ochlazování v peci na teplotu alespoň 200 °C, dále na vzduchu.

1.32.4 Homogenizační žíhání

Provádí se v případech, kdy je nutno odstranit chemickou heterogenitu, která v odlitcích vzniká během tuhnutí. Homogenizační žíhání se provádí za teplot vyšších, než odpovídá křivce změny rozpustnosti přísadového prvku v tuhém roztoku α-Al po dobu, která je závislá na stupni heterogenity složení a na disperzitě struktury, obvykle v rozmezí 3-15 hod. Během žíhání může hrubnout zrno, čímž se zhoršují mechanické vlastnosti. Proto se doba žíhání nemá zbytečně prodlužovat.

Samotné homogenizační žíhání se provádí jen vyjímečně a obvykle bývá součástí vytvrzování.

1.32.5 Označování režimu tepelného zpracování

Způsob tepelného zpracování se značí písmenem **T** a jednou nebo dvěma číslicemi (výjimkou je značení **F a O**). Ve slévárenství jsou obvyklé tyto stavy odlitků:

F - v litém stavu
O - žíhání na odstranění vnitřních pnutí nebo stabilizační žíhání. Typické teploty žíhání do 340 ^{o}C/2-3 h, ochlazování na vzduchu

T4 - rozpouštěcí žíhání a následné vytvrzení za studena

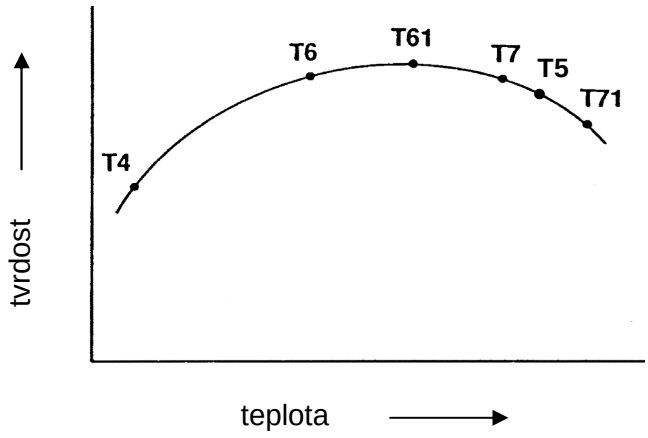
T5 - umělé stárnutí při relativně nízkých teplotách bez předchozího homogenizačního žíhání – používá se pro stabilizaci tvaru a rozměrů, pro zlepšení obrobitelnosti a pro odstranění vnitřního pnutí. Typická teplota žíhání 205-260 ^{o}C/7-10 h.

T6 - vytvrzování – skládá se z homogenizačního žíhání, rychlého ochlazení a precipitačního vytvrzení za tepla. Používá se pro dosažení optimálně vysoké pevnosti a houževnatosti. Typická teplota vytvrzování 145-160 ^{o}C/3-5 hod.

T7 - vytvrzování jako v předešlém případě, ale s přestárnutím. Toto tepelné zpracování stabilizuje mechanické vlastnosti a rozměry odlitků, pevnost je poněkud menší a tažnost naopak větší, než při zpracování dle T6. Typická teplota vytvrzování 190-225 ^{o}C/4-6 hod.

Každé z těchto druhů tepelného zpracování má několik podskupin podle preferovaných vlastností, např.:

T64 - vytvrzování na maximální houževnatost
T61 - vytvrzování pro dosažení maximální pevnost a tvrdost. Snižuje se však houževnatost. Typická teplota vytvrzování 150-170 ^{o}C/6-10 hod).
T71 - přestárnutí do stabilního stavu. Oproti T7 se ještě více zvyšuje teplotní stabilita a odolnost proti korozi pod napětím, ale snižuje se pevnost. Typická teplota - 225-260 ^{o}C/6-10 hod.



Obr. 87: Závislost tvrdosti slitiny na teplotě žíhání při zpracování dle T4 až T7

8 SLITINY HOŘČÍKU

Slitiny hořčíku jsou v současné době materiálovou skupinou s nejrychlejším nárůstem objemu výroby. Důvodem je především nízká hustota, pouze 2/3 hustoty hliníku, kombinovaná s výbornými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, dobrými slévárenskými vlastnostmi, velmi dobrou obrobitelností a s dobrou možností recyklace. K negativním vlastnostem (kromě špatné tvařitelnosti za studena) patří zvláště špatná odolnost proti korozi a poněkud větší tepelná roztažnost, než mají slitiny hliníku.

Hořčík byl objeven v roce 1774 a pojmenován po dávném městě Magnesia. Je šestým nejrozšířenějším prvkem a tvoří 2 % hmoty zemské kůry. Hořčík patří mezi alkalické kovy druhé grupy chemických prvků. Je velmi reaktivní, proto se vyskytuje pouze ve sloučeninách. Pro výrobu kovového hořčíku má význam zejména magnezit $MgCO_3$, dolomit $MgCO_3.CaCO_3$ a karnalit $KCl.MgCl_2.6H_2O$. Významným zdrojem hořčíku je mořská voda, která obsahuje 0,13 % Mg, tj. 1,1 kg hořčíku na m^3 vody.

Z těchto surovin se hořčík vyrábí elektrolyticky (asi 75 %), nebo tepelnou redukcí (asi 25 %). Vztaženo na jednotky hmotnosti je výroba hořčíku energeticky velmi náročná a pohybuje se v rozmezí 40-80 MJ/kg. S ohledem na objem (a mechanické vlastnosti se vždy vztahují na rozměry průřezů) je však energetická spotřeba dokonce nižší, než u jiných běžných kovů.

Historie používání hořčíkových slitin je poměrně krátká a je spojena s rozvojem automobilového průmyslu a letectví. Nejznámějším příkladem je seriové nasazení hořčíkových odlitků při výrobě auta VW-brouk ve 30. létech minulého století. Velký rozvoj výroby byl zaznamenán zejména po začátku 2.světové války v roce 1939. Po válce výroba poměrně dlouho stagnovala a prudký nárůst je zaznamenán až asi od 80.let 20.století. V současné době jsou hořčíkové odlitky standardně používány v konstrukci osobních aut, nářadí, přístrojů a všech výrobků, v nichž se uplatní nízká hmotnost.

Hořčík

Hořčík krystalizuje v těsné hexagonální soustavě, proto jej není za normální teploty možno tvářet. Při mechanickém zatížení se deformuje dvojčatěním. Čistý hořčík a konvenčně lité slitiny hořčíku mají sklon ke vzniku křehkých interkrystalických lomů v rovinách dvojčatění nebo v bazálních rovinách {0001}. Při teplotách nad 225 ^oC vznikají nové bazální roviny {1011} a hořčík se stává dobře tvárným materiálem. V tab. 16 jsou uvedeny některé fyzikální vlastnosti čistého hořčíku.

Tab. 16: Fyzikální vlastnosti čistého hořčíku

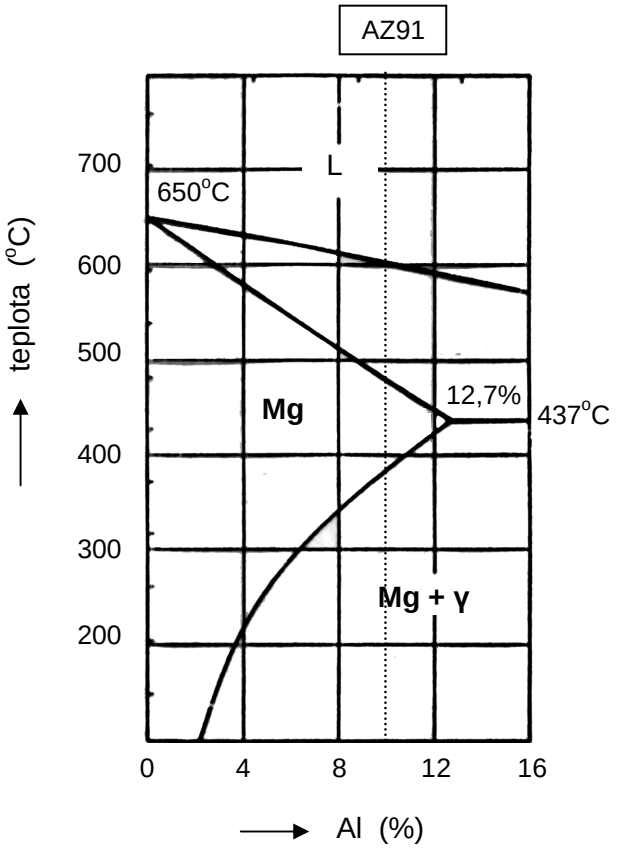
atomová hmotnost	24,31
hustota (při 20 ^oC)	1740 kg/m^3
teplota tavení	650 ^oC
teplota varu	1107 ^oC
skupenské teplo tavení	372 kJ/kg
měrná tepelná kapacita (při 20 ^oC)	1,03 kJ/kg.K
tepelná vodivost (při 20 ^oC)	155 W/m.K
lineární tepelná roztažnost (20-100 ^oC)	26.10^{-6} 1/K
součinitel stahování při tuhnutí	4,2 %
modul pružnosti	45 GPa

1.33 Slévárenské slitiny hořčíku

V technické praxi se hořčík používá výhradně jako slitiny. **Převážná část hořčíkových slitin se zpracovává odléváním. Hlavním přísadovým prvkem je téměř výhradně hliník** (jedná se tedy o slitiny Mg-Al), technicky zajímavé, ale výrobně mimořádně složité jsou superlehké slitiny Mg-Li. Technický význam ostatních typů slitin pro odlévání je zanedbatelný.

Pro označení slitin hořčíku se v technické praxi velmi často používá systém dle americké normy ASTM, která pro jednotlivé slitinové prvky používá následující symboly (pouze výběr):

A – hliník
C – měď
E – kovy vzácných zemin
M – mangan
S – křemík



Obr. 88: Rovnovážný diagram Mg-Al (výřez)

Z – zinek

Obsah hliníku ve slévárenských slitinách se pohybuje v rozmezí od **3 do 9 %Al**. Diagram Mg-Al je typem diagramu s primární fází α(Mg) s omezenou rozpustností hliníku a se vznikem eutektika – obr. 88. Maximální rozpustnost hliníku v hořčíku je 12,7 %Al při eutektické teplotě 437°C (eutektická koncentrace Al je cca 33 %).

Při ochlazování z eutektické teploty se snižuje rozpustnost Mg a z tuhého roztoku precipituje na hranicích dendritických zrn intermetalická fáze $Mg_{17}Al_{12}$, která snižuje tvárné vlastnosti slitiny.

S rostoucím obsahem hliníku se výrazně zvětšuje interval tuhnutí a s tím šířka dvoufázového pásma. Takové slitiny mají při gravitačním lití velký sklon ke tvorbě mikrostaženin a ředin, který je umocněn malým metalo-statickým tlakem slitiny. Proto **obsah Al ve slitinách pro gravitační lití nepřesahuje 5 %.**

Čím je ve slitině vyšší obsah hliníku, tím lepší je zabíhavost. **Nejčastěji používanou slitinou pro tlakové lití je slitina s 9 % Al a 1 % Zn, označovaná jako AZ91.** Má vynikající zabíhavost a umožňuje odlévat tenkostěnné, tvarově velmi komplikované odlitky. Slitina **má vysokou pevnost, ale pouze střední tažnost a rázovou houževnatost.** Mechanické vlastnosti se nad teplotou asi 120 °C poměrně rychle snižují.

Pro aplikace, u nichž se vyžaduje vyšší tažnost a houževnatost, se snižuje obsah hliníku a zinek je nahrazen manganem v množství 0,2-0,6 %Mn – slitina AM20, AM50 a AM60. Tyto materiály se používají pro odlitky s vysokými požadavky na bezpečnost, např. volanty aut, armatury řízení a díly sedadel. Pevnost je nižší, než u předchozí skupiny.

Zvýšení mechanických vlastností za zvýšených teplot a vyšší creepová odolnost se dosahuje u slitin s obsahem 0,5-1,5 %Si – slitiny AS21 a AS41. Toto zvýšení vlastností souvisí s vyloučením intermetalické fáze Mg_2Si, která má dobrou stabilitu za zvýšených teplot.

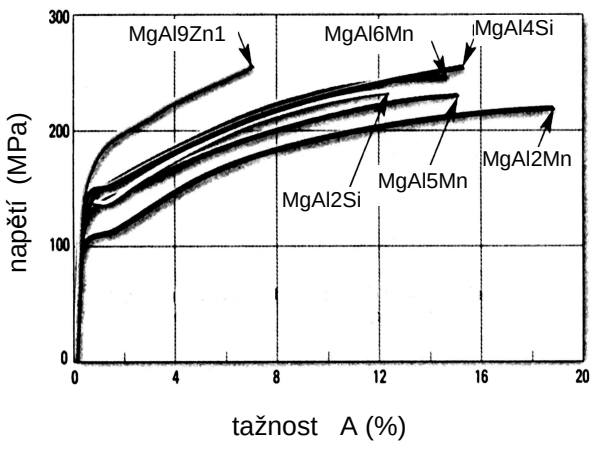
Pro aplikace při teplotách nad 200 °C se používají slitiny legované kovy vzácných zemin. Legujícími prvky jsou Ce, Nd, Pr, Th, Y a dále také Ag, Zr a další. Cílem je zejména zvýšení creepové odolnosti. Tyto slitiny však mívají špatné slévárenské vlastnosti a odlévají se převážně gravitačně do pískových nebo kovových forem (rovněž jejich cena je vysoká). K vytvrzení slitin s KVZ dochází při pomalém ochlazování odlitků. Porovnání tahových křivek některých slitin je na obr. 89 vliv teploty na pevnost v tahu na obr. 90.

Tab. 17: Chemické složení slitin hořčíku pro tlakové lití

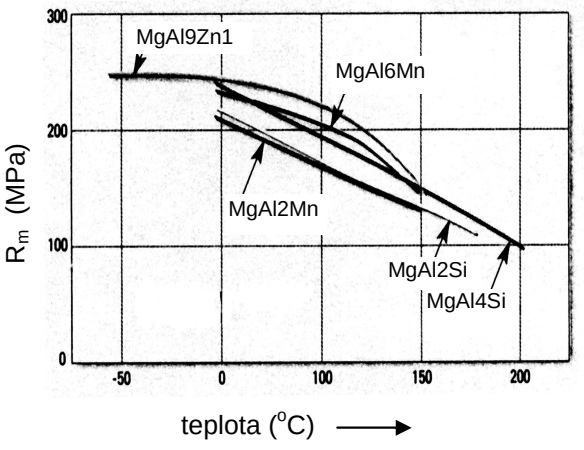
Slitina	Al	Mn	Zn max	Si max	Cu max	Ni max	Fe max	Ostatní max. každý
AZ91	8,3-9,7	0,15-0,50	0,35-1,0	0,10	0,03	0,002	0,005	0,02
AM60	5,5-6,5	0,24-0,60	0,22	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02
AM50	4,4-5,4	0,26-0,60	0,22	0,10	0,01	0,002	0,004	0,02
AM20	1,6-2,6	min.0,1	0,2	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02
AS41	3,5-5,0	0,35-0,70	0,12	0,50-1,5	0,02	0,002	0,0035	0,02
AS21	1,8-2,6	min.0,1	0,2	0,70-1,2	0,01	0,002	0,005	0,02
AE42	3,5-4,5	min.0,1	0,2	0,10	0,02	0,002	0,005	0,02

Tab. 18: Mechanické vlastnosti slitin hořčíku při normální teplotě

vlastnost	AZ91	AM60	AM50	AM20	AS41	AS21	AE42
R_m (MPa)	200-260	190-250	180-230	150-210	240	220	230
$R_{p0,2}$ (MPa)	140-170	120-150	110-130	80-100	140	120	145
A (%)	1-6	4-14	5-15	8-18	15	13	11
nárazová práce (J)	6	17	18	19	16	12	12
tvrdost	65-85	55-70	50-65	40-55			



Obr. 89: Tahový diagram některých slitin Mg



Obr. 90: Pevnost za vyšších teplot

1.34 Tavení slitin hořčíku

Vsázkové suroviny pro tavení slitin hořčíku jsou do sléváren dodávány v podobě housek, s požadovaným chemickým složením. Složení se ve slévárnách běžně neupravuje.

Hlavním problémem tavení a manipulace s tekutým kovem je **mimořádně velká afinita hořčíku ke kyslíku.** Této vlastnosti je přizpůsobena konstrukce pecí, vedení tavicího procesu a trasport taveniny do forem. Tavení probíhá pod vrstvou ochranné strusky nebo v inertní atmosféře. Při dopravě kovu je nutno zabránit kontaktu se vzduchem a zejména s jakoukoliv formou vlhkosti. Důsledkem oxidace je vznik oxidických vměstků, které mají hustotu téměř shodnou s hustotou kovu, proto z taveniny nevyplouvají. Vlhkost se při styku s tekutým kovem rozkládá a hrozí znečištěním taveniny vměstky, případně explozí. Hořčík v přímém kontaktu se vzduchem je hořlavý.

Vsázka, která se přidává do lázně tekutého kovu musí být **předehřáta**. Součástí moderních pecí je předehřívací jednotka. V ní se vsázka předehřívá na teplotu asi 150 ^{o}C a do lázně se přidává automaticky podle úrovně hladiny tekutého kovu v peci.

Tavení se provádí v elektrických odporových nebo indukčních pecích, méně často ve spalovacích pecích s vytápěním plynem nebo topným olejem. Jednoznačně nejvýhodnější jsou pece odporové, v nichž dochází k minimálnímu pohybu taveniny a lze velmi přesně regulovat teplotu. Skutečná spotřeba energie, včetně předehřevu, bývá kolem 400-500 kWh/t taveniny, teoretické minimum je 310 kWh/t.

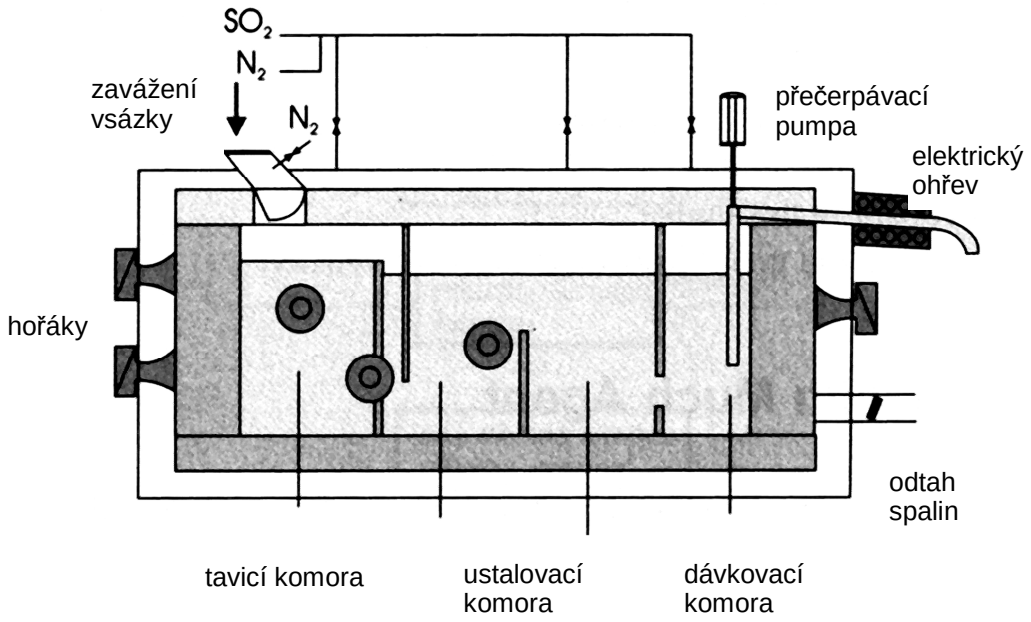
Tavicí kelímky a jejich vyzdívka musí být voleny s ohledem na chemickou reaktivnost hořčíku. Na rozdíl od hliníku nereaguje hořčík se železem. Proto se hořčíkové slitiny často taví **v ocelových kelímcích z uhlíkaté nebo nízkolegované oceli** bez obsahu niklu. V elektrických odporových pecích je vnější strana kelímků tepelně namáhána sáláním topných elementů. Proto se někdy kelímky v vnější strany plátují vrstvou ze žáruvzdorné oceli, případně se volí jiné způsoby ochrany. Stav kelímků je nutno pravidelně kontrolovat.

Pro vyzdívku pece a prostředků pro transport kovu **nelze** v místech, které jsou v přímém kontaktu s kovem, v žádném případě **použít vyzdívkové materiály na bázi křemičitanů.** Používá se keramika na bázi oxidů hořčíku nebo vysokohlinitanové žáruvzdorné hmoty.

Ochrana hladiny kovu proti oxidaci se provádí pomocí rafinačních solí, síry, berylia (5-15 ppm), nebo inertních plynů SO_2, SF_6, CO_2, N_2 a Ar. **Rafinační soli jsou směsí chloridů, event. fluoridů vápníku, hořčíku, sodíku a draslíku** - zejména $CaCl_2$, NaCl, KCl, $MgCl_2$, CaF_2, MgO a $BaCl_2$ v různém poměru. Soli jsou obvykle těžší, než hořčík, proto postupně klesají ke dnu lázně. Některé ze složek soli přitom mají schopnost vázat vměstky a provádí tak rafinaci taveniny. Množství soli je nutno během tavby doplňovat.

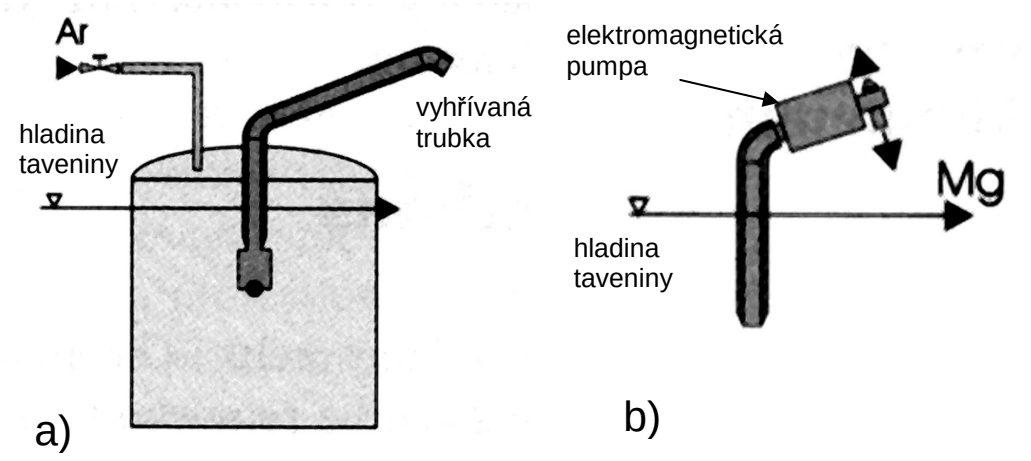
U moderních tavicích agregátu se k ochraně hladiny používá již téměř výhradně plynné atmosféry. Nejčastěji se používá **směs ochranných plynů se vzduchem, obsahující kolem 0,2-0,3 %SF_6 s nebo bez přídavku CO_2.** U dobře těsnících pecí dostačuje i koncentrace 0,1 % SF_6. (Koncentrace CO_2 bývá až kolem 20 %.) Obsah SF_6 ve směsi by v žádném případě neměl překročit 0,5 %, neboť se zvyšuje opotřebení kelímků, při obsahu několika procent SF_6 dochází k bouřlivým chemickým reakcím. Složení atmosféry proto musí být průběžně kontrolováno. Vzduch musí být dobře vysušen, obsah vody nemá překročit 0,1 obj. %H_2O. Ochranný plyn se kontinuelně připouští rozvodem ve víku pece. **Hexafluorid sírový je těžký plyn s hustotou přibližně 6,5 kg/m^3. Proto se udržuje nad hladinou kovu a nemá tendenci samovolně unikat.** Výhrady proti jeho používání vyplývají z toho, že se jedná o jeden z plynů, které přispívají k narušení ozónové vrstvy atmosféry. Použití proto podléhá ekologickým předpisům a je snahou ho nahrazovat jinými plyny.

Tavicí pece bývají konstruovány jako dvou-, případně až tří-komorové, kde jednotlivé komory jsou odděleny sifonem. První komora je tavicí a je do ní zavážena předehřátá vsázka, druhá komora může sloužit jako ustalovací, z poslední se odebírá tavenina. Do každé z komor se přivádí ochranný plyn. Příklad takové větší plynové pece pro tavicí výkon 1,5 t/h je na obr. 91.



Obr. 91: Vícekomorová tavicí pec pro slitiny hořčíku

Doprava tekutého kovu z tavicí pece do licích strojů se opět provádí tak, aby kov nepřišel do styku se vzdušnou atmosférou. K vyčerpání taveniny z pece se používají různé systémy, např. přetlak plynů nad hladinou, elektromagnetické pumpy, ponorné rotační pumpy a jiné způsoby (obr. 92). Přečerpávací pumpa může být rovněž konstruována jako dávkovací zařízení, které slouží k přesnému nadávkování kovu do tlakového stroje. Aby se snížily teplotní ztráty kovu, bývá vypouštěcí trubice tepelně izolována.



Obr. 92: Některé způsoby transportu taveniny hořčíku

1.34.1 Praktické zásady při tavení slitin hořčíku

Během tavení bez použití krycích solí se na hladině vytváří vrstva oxidů. Tato vrstva se musí v určitých intervalech odstraňovat. Frekvence stahování strusky závisí na konstrukci a těsnosti pece a na čistotě vsázkových surovin. Při tavení z čistého blokového materiálu často dostačuje čištění jednou za den, při vsázení vratného materiálu musí být prováděno podstatně častěji. Je nutno počítat s postupným usazováním strusky a intermetalických fází na dně pece a pec v delších periodách celkově vyčistit.

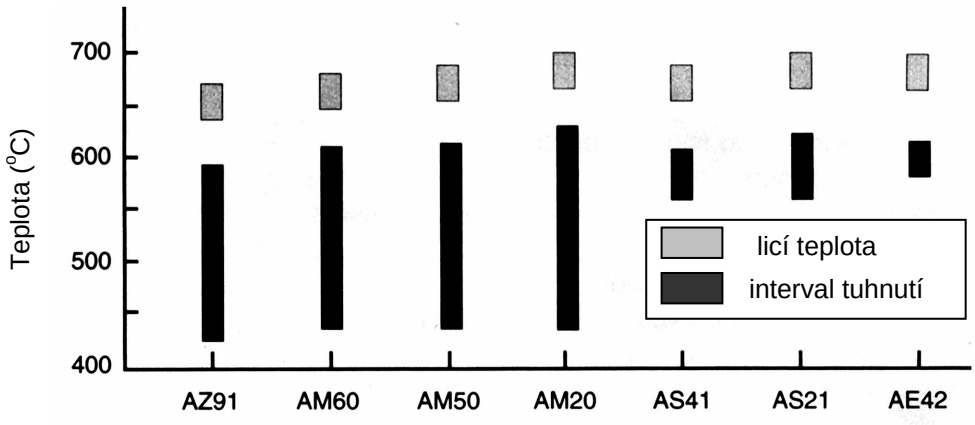
Stažená struska má tendenci hořet a musí se shromažďovat v těsných nádobách bez přístupu vzduchu, případně rovněž použít ochranný plyn. Rovněž zbytky kovu na použitém nářadí jsou hořlavé – nářadí má být očištěno a rovněž zabráněno hoření zbytků. Zbytky hořčíku z nářadí a z transportní trubice mohou být odstraněny 10-ti % vodným roztokem HCl. (Přitom je nutno zajistit intenzivní větrání).

Pokud se tekutý kov v peci udržuje po několik dnů, nemá teplota lázně klesnout pod teplotu likvidu.

Při tavení a manipulaci s kovem je nutno dbát na **zabezpečení proti požáru**. K uhašení se používá naprosto suchý písek nebo krycí soli. **Voda, pěna, CO_2 ani tetrachlór se nesmí použít.**

Tavicí a licí teploty

Tavicí teploty se volí podle typu slitiny a podle velikosti odlitku a tloušťky stěn. Intervaly tavicích a licích teplot pro některé slitiny jsou uvedeny na obr. 93.



Obr. 93: Interval tuhnutí a licí teploty některých slitin hořčíku

Metalurgické zpracování a čistota kovu

Při tlakovém lití se obvykle neprovádí žádné metalurgické zásahy, neboť při rychlém chladnutí vzniká jemná struktura. **Při gravitačním lití do pískových forem vzniká poměrně hrubá struktura slitiny, kterou je nutno zjemnit očkováním.** Aktivní složkou očkovacích přípravků je především **$FeCl_3$**.

Vměstky, které se v odlitcích ze slitin hořčíku vyskytují, jsou tvořeny především oxidickými částicemi, které vznikly reakcí kovu se vzduchem, oxidickým filmem, který se vytvořil na

hladině taveniny reakcí s pecní atmosférou (vzduch-SF_6-aj.), nebo se jedná o zbytky rafinačních solí. Rovněž mohou být přítomny inkluze intermetalických fází, zejména železa. Pro zajištění čistoty je nutné používat čisté vsázkové suroviny a zamezit víření kovu.

1.35 Technologie výroby odlitků

Naprosto převažující technologií výroby hořčíkových odlitků je tlakové lití. Odlitky lité do trvalých forem mají vysokou rozměrovou přesnost a kvalitní povrch. Skutečnost, že hořčík nereaguje s ocelovými formami tak intenzivně jako hliník, zajišťuje vyšší životnost forem a umožňuje dělat formy s menšími úkosy.

K lití se používají stroje s teplou nebo se studenou komorou. Princip obou typů byl uveden na obr. 74 a 75.

Součástí **stroje s teplou komorou** je udržovací pec, v níž je teplá komora ponořena. Kov se při transportu z lázně do stroje prakticky nedostává do styku s atmosférou, což je u slitin hořčíku velmi cenné. Rovněž teplotní ztráty jsou minimální. Charakteristické parametry těchto strojů jsou (přibližně):

- uzavírací síla – do 9 MN (900 t)
- lisovací tlak – 15-20 MPa
- hmotnost dávky kovu – do 5-6 kg
- produktivita – i více než 100 odlití za hodinu
- dosažitelná tloušťka stěn – 1 mm

U strojů se studenou licí komorou je kov do stroje dávkován z externí udržovací pece. Transport kovu se provádí některým ze způsobů, který zamezuje styku kovu s atmosférou. Typické parametry strojů jsou:

- uzavírací síla – do 45 MN (4500 t)
- lisovací tlak – 30-90 MPa
- hmotnost dávky kovu – do 60 kg
- produktivita – nižší než 60 odlití za hodinu
- dosažitelná tloušťka stěn – 1,5-2,5 mm

Velkým problémem při tlakovém lití hořčíkových slitin pod tlakem je velká turbulence a s tím spojená oxidace kovu během lití. Velmi výhodné je **odlévání do vakuovaných forem**. V tomto případě je dutina kovové formy před litím evakuována na úroveň tlaku přibližně 8 kPa. V tomto případě téměř odpadá problém oxidace kovu a problém odvodu plynů z formy během lití. K tomu je však nutné příslušné zařízení a formy jsou složitější – z toho vyplývají i vyšší výrobní náklady.

Odlévání do pískových forem - je technologií, která se používá v podstatně menším měřítku než tlakové lití a to na kusovou a maloseriovou výrobu specielních odlitků. Odlévá se klasickým způsobem, při němž je však **po celou dobu nutno dbát na ochranu kovu před atmosférou. Při lití se musí proud kovu zaprašovat práškovou sírou** (sirný květ – vzniká kondenzací par síry). **Síra se rovněž přidává do formovacích směsí**, aby se zamezilo hoření kovu ve formě. Problémem gravitačního lití je **špatná schopnost dosazování kovu při tuhnutí**, způsobená širokým intervalem tuhnutí a malým dosazovacím tlakem.

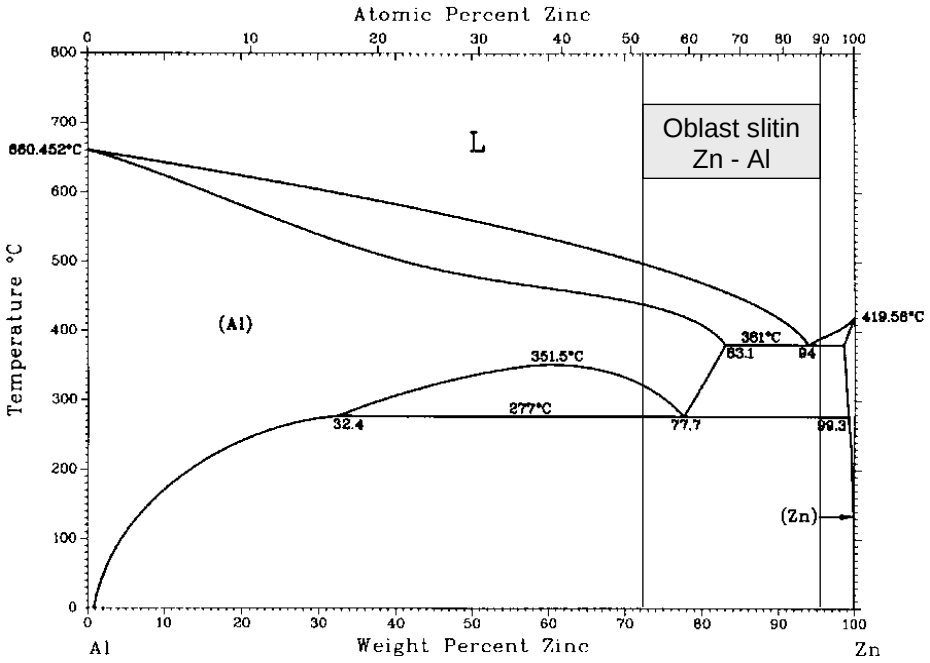
9 SLITINY ZINKU

Zinek je těžký neželezný kov s nízkou tavicí teplotou. Krystalizuje s hexagonální krystalickou mřížkou. Čistý zinek má špatné mechanické vlastnosti a pro výrobu strojních součástek se nepoužívá. Základní fyzikální vlastnosti zinku jsou:

- hustota $\rho_{Zn} = 7130$ kg/m^3
- teplota tavení $t_{tav} = 419$ °C
- teplota varu $t_{varu} = 906$ °C
- molární hmotnost 65,37
- tepelná vodivost $\lambda_{Zn} = 113$ W/m.K
- měrné teplo $c_{20oC} = 0,39$ kJ/kg.K
- latentní teplo tání $L = 100$ kJ/kg

1.36 Slévárenské slitiny zinku

Slévárenské slitiny zinku obsahují jako **hlavní přísadový prvek hliník**. Rovnovážný diagram systému Zn-Al je typem diagramu s primární fází s omezenou rozpustností přísadového prvku a se vznikem eutektika – obr. 94. Eutektikum je tvořeno fází Zn-ZnAl. Eutektická teplota systému Zn-Al je rovna 382°C při koncentraci 5,5 %Al. **Obsah hliníku v normovaných slitinách se pohybuje v rozmezí 4–27 % Al.**



Obr. 94: Rovnovážný diagram Zn-Al

Jak je zřejmé, mají slévárenské slitiny přibližně eutektické až nadeutektické složení a tuhnutí obvykle začíná vylučováním primární fáze α-Al. Nejnižší tavicí teplotu a nejužší interval tuhnutí mají přibližně eutektické slitiny s obsahem kolem 4-5 %Al. Čím vyšší je obsah hliníku, tím vyšší je teplota likvidu a také je širší pásmo tuhnutí. Vedlejšími přísadovými prvky jsou zejména měď a hořčík.

Měď, stejně jako hliník, zmenšuje velikost zrna, zvyšuje mechanické vlastnosti slitin, zvláště pevnost, tažnost a rázovou houževnatost a zlepšuje zabíhavost slitin. Při obsahu nad 0,7 %Cu se zlepšuje odolnost proti korozi. Ve slitinách bývá **obsah mědi v rozmezí 0,5-3 %Cu.**

Hořčík již ve velmi malém množství zvyšuje pevnost a kompenzuje škodlivý vliv cínu, olova a kadmia. **Obsah hořčíku bývá 0,01-0,03 %Mg**. Podle základních prvků se často tyto slitiny označují zkratkou **ZAMAK** (z německého Zink, Magnesium, Kupfer).

Nečistotami jsou zvláště železo, olovo, kadmium a cín. Podporují vznik interkrystalické koroze a jejich obsah nesmí překročit řádově tisíciny procenta. Z tohoto důvodu se při výrobě slitin musí vycházet z velmi čistého základního kovu s obsahem 99,995 %Zn.
Pro výrobu odlitků se používají **zejména slitiny s obsahem 8, 12 a 27 %Al.** Chemické složení je uvedeno v tab.XX. Dříve se pro tlakové lití používala skupina slitin s obsahem asi 4 % Al, označovaná podle obsahu Al, Cu a Mg jako Z400, Z410 a Z430. Tyto slitiny mají poněkud nižší mechanické vlastnosti a rychlejší pokles pevnosti za zvýšených teplot.

Tab.19: Chemické složení slitin Zn–Al

	prvek (%)	Zn-Al 8	Zn-Al 12	Zn-Al 27
přísadové prvky	Al Cu Mg	8,0-8,8 0,8-1,3 0,015-0,03	11,0-11,5 0,5-1,25 0,015-0,03	25,0-28,0 2,0-2,5 0,01-0,02
nečistoty	Fe Pb Cd Sn	<0,10 <0,004 <0,003 <0,002	<0,075 <0,004 <0,003 <0,002	<0,10 <0,004 <0,003 <0,002

Fyzikální a mechanické vlastnosti při gravitačním lití do pískových a do kovových forem a při tlakovém lití jsou v tab.20.

Tab 20: Vlastnosti slitin Zn-Al při teplotě 20 ^{o}C

	Zn-Al 8			Zn-Al 12			Zn-Al 27		
	písek	kokila	tlak.lití tepl.k.	písek	kokila	tlak.lití st.kom.	písek	*písek	tlak.lití st.kom.
R_m (MPa)	248-275	220-255	360-385	275-310	310-345	390-415	400-440	310-325	405-440
$R_{p0,2}$ (MPa)	193-200	190-200	280-300	206-213	213-220	310-330	338-345	255	360-380
A_5 (%)	1-2		5-10	1-3	2-5	4-7	3-6	8-11	1-2
HB	85-90		95-105	105-125		95-105	110-120	90-100	110-120
E (MPa)	85000			82500			75000		
nárazová práce (Nm)	17-24			23-30			34-54	47-74	
hustota (kg/m^3)	6,3			6,0			5,0		
tavicí teplota (^{o}C)	375-404			375-432			375-487		

Pozn.: tlak.lití tepl.k.- tlakové lití s teplou komorou
tlak.lití st.kom. – tlakové lití se studenou komorou
*písek – tepelné zpracování: 3 h-320^{o}C/pomalé ochlazování v peci

Z hodnot v tab. 20 vyplývá, že **slitiny zinku mají výborné mechanické vlastnosti za normální teploty,** lepší, než většina slitin hliníku, mědi a litiny s lupínkovým grafitem. Dynamické vlastnosti jsou rovněž dobré. Díky značné tvrdosti jsou odlitky odolné proti opotřebení. Značnou nevýhodou slitin zinku je prudký **pokles mechanických vlastností při**

vyšších teplotách. Maximální provozní teplota proto nemá přesáhnout asi 120 °C. Také při nízkých teplotách (pod asi –20°C) dochází ke zhoršení mechanických vlastností, zvláště rázové houževnatosti.

1.37 Slévárenské vlastnosti

Slitiny zinku se vyznačují **velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi**. Zvláště slitiny ZnAl8 a ZnAl11 mají úzké pásmo tuhnutí, **nedochází ke vzniku mikrostaženin a pórovitosti** a proto mají odlitky z těchto slitin **vynikající těsnost**. (Slitina s 27 %Al má již poměrně široké pásmo tuhnutí a proto větší sklon ke vzniku pórovitosti.)

Licí teploty slitin jsou (podle typu slitiny a technologie odlévání) asi **455-610°C**. Při těchto teplotách dochází jen k malému tepelnému namáhání forem. V pískových formách vzniká málo plynných složek, proto se nekladou velké požadavky ani na žáruvzdornost, ani na prodyšnost. Kovové formy mají vysokou životnost.

Slitiny zinku mají **vynikající zabíhavost**, díky které lze odlévat tenkostěnné, tvarově komplikované odlitky. Dosažitelná nejmenší tloušťka stěny závisí na velikosti odlitku a na technologii odlévání. **Při tlakovém lití lze u malých odlitků dosáhnout tlouštěk již od 0,3 mm**. Při gravitačním lití obvykle nad asi 1 mm. Slitina výborně kopíruje tvar formy, odlitky mají ostré kontury a hrany. **Tlakovým litím lze předlévat otvory od ø 1 mm**.

Díky nízkým licím teplotám se dosahuje i **vysoké přesnosti odlitků**. **Při tlakovém lití malých odlitků je reálná přesnost od ± 0,03 mm** (IT 10), **u velkých odlitků s rozměry kolem 500 mm přesnost cca ± 0,2 mm** (IT 11). To umožňuje odlévat řadu odlitků na hotovo, případně navrhovat jen **malé přídavky na obrábění**. Odlitky mají v litém stavu kvalitní povrch s malou drsností.

1.38 Tavení

Slitiny je možno tavit v plynových nebo elektrických pecích. Tepelný obsah slitin zinku při licí teplotě je nízký (díky nízkému latentnímu a měrnému teplu) - oproti slitinám hliníku jen asi 25-30%. To znamená, že pro tavení dostačuje poměrně nízký instalovaný výkon pecí a náklady na tavení jsou rovněž nízké.

Při tavení je nutno zamezit možné kontaminaci taveniny škodlivými prvky. Doporučuje se tavit v kelímcích z SiC (nemá se tavit v kovových kelímcích). Kelímek má být používán výhradně pro tavení slitin zinku. Nemají se používat kelímky, dříve použité pro tavení mosazí ani jiných slitin mědi.

Není nutné provádět rafinaci ani odplynění. Nepoužívají se žádné tavicí přípravky. Při tavení a přehřívání na běžné teploty nevzniká kouř ani žádné výpary.

1.39 Technologie odlévání

Slitiny zinku se odlévají všemi běžnými slévárenskými metodami, výrazně však převažuje metoda tlakového lití. Při tlakovém lití slitin s 8, resp. 12 %Al je možno používat stroje s teplou i se studenou tlakovou komorou. Ošetření povrchu forem postřiky se provádí vždy až po několika cyklech. Nehrozí nalepování odlitků nebo reakce kovu s formou. Slitiny Zn-Al 27 mají již poněkud vyšší licí teplotu, při které může docházet ke kontaminaci železem z formy. Proto se doporučuje odlévat na strojích se studenou komorou, u nichž je teplota forem nižší.

Tlakovým litím se vyrábí drobné a středně velké odlitky do rozměrů obvykle 300-400 mm s vysokou seriovostí. **Typické odlitky** jsou skříně (např. plynoměrů), víka, rámy, tělesa tepelných výměníků, výrobky pro elektrické měřicí přístroje a zařízení, domácí spotřebiče, menší ozubená kola, stavební kování, ozdobné předměty a především mnoho výrobků pro automobilový průmysl (karburátory, rámy světlometů atd.).

Lití do pískových forem se používá především pro kusovou výrobu relativně větších odlitků. Lze rovněž odlévat do sádrových forem. Technicky zajímavá a progresivní je metoda lití do pryžových forem, tzv. metoda TEKCAST. Formy se snadno zhotovují lisováním specielní pryžové hmoty na připravené modely a následnou vulkanizací. Výroba je operativní a provádí se přímo ve slévárně. Do vulkanizované formy se ručně vyříznou vtoky, případně odvzdušňovací systém. Odlévá se odstředivě na zařízení se svislou osou rotace. Životnost pryžových forem pro slitiny zinku dosahuje několika set odlití. Metoda je vhodná pro výrobu drobnějších ozdobných nebo funkčních odlitků (přesky, závěsy, nábytkové kování, různé strojní nebo přístrojové díly apod).

1.40 Obrábění a povrchová ochrana

Všechny uvedené slitiny mají vynikající obrobitelnost. Struktura je rovnoměrná bez nehomogenit nebo tvrdých míst. Je proto možné volit vysoké rychlosti obrábění. Obrobené povrchy jsou velmi kvalitní. Mnoho funkčních povrchů však může zůstat v litém stavu. Na hotovo se odlévají např i ozubená kola. Povrchy odlitků lze brousit a leštit.

V suchém prostředí odlitky nekorodují a není nutná povrchová ochrana. Ve vlhkém prostředí vzniká pevný, houževnatý šedý film, který brání další oxidaci. V kyselém prostředí však koroze dále postupuje. Pro použití v korozních podmínkách je proto běžné provádět povrchovou ochranu odlitků. K tomu se bez technických problémů používá galvanizace, chromátování nebo práškové pokovování.

Důležité technologické vlastnosti slitin zinku jsou uvedeny v tab. 21.

Tab. 21: Přehled technologických vlastností slitin zinku

	slévárenské vlastnosti		otěr	obrob.	těsnost	povrch. ochrana	odolnost povrch. rýhy	
	písek	kokily						
Zn-Al 8	D	V	D	V	D	V	V	Nejlepší slitina pro trvalé formy. Nejnižší pevnost ale nejlepší kvalita povrchu
Zn-Al 12	V	V	V	V	V	D	V	Výborné slévárenské vlastnosti při lití do písku a obrobitelnost. Náhrada za mosaz nebo hliníkové slitiny.
Zn-Al 27	D	U	V	V	U	S	N	Náhrada za litinu a slitiny Cu. Nejvyšší pevnost a tažnost. Nejlepší slitina pro teploty do 120^{o}C. Horší těsnost.

Pozn: V – vynikající
D – dobrý
U – uspokojivý
S – špatný
N – nedoporučuje se

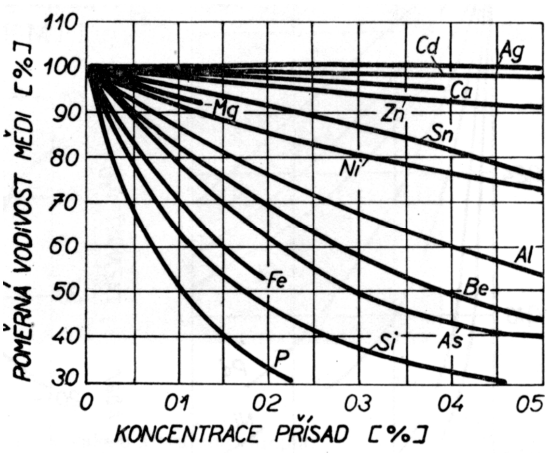
10 SLITINY MĚDI

Měď je těžký neželezný kov se střední teplotou tání. Slitiny mědi začalo lidstvo používat již v 5. tisíciletí před n.l., jako prakticky první ze současných technických slitin. Začátky výroby pochází zejména z oblasti Iránu, Egypta, Mezopotámie a také jihovýchodní Asie a odkud se rozšířila asi ve 2. tisíciletí před n.l. do zemí evropského kontinentu. Bronz se používal zejména k výrobě bronzových nástrojů a zbraní, dále také užitných a ozdobných předmětů. Měď se vyrábí převážně ze sulfidových rud (např. chalkopyritu) aj. s obsahem do asi 3 %Cu hydro- nebo pyrometalurgickými postupy. Čistá měď se získává elektrolytickou rafinací.

V periodické soustavě prvků je měď zařazena v grupě I.B. Ve sloučeninách má oxidační číslo I až III. Důležitými fyzikálními vlastnostmi jsou:

- hustota: 8940 $kg.m^{-3}$
- protonové číslo 29
- atomová hmotnost 63,54
- krystalová mřížka: kubická plošně centrovaná
- teplota tání: 1084,5 ^{o}C
- skupenské teplo tání: 209,3 $kJ.kg^{-1}$
- měrná tepelná kapacita (20 ^{o}C): 0,3843 $kJ.K^{-1}.kg^{-1}$
- tepelná vodivost: 394 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- měrná elektrická vodivost při 20 ^{o}C: 58 $m.\Omega^{-1}.mm^{-2}$

K významným vlastnostem mědi patří zejména **mimořádně vysoká tepelná a elektrická vodivost.** Elektrická vodivost čisté mědi (v rekrystalizačně žíhaném stavu) určuje standart elektrické vodivosti a označuje se jednotkou 100 % IACS (international Anealed Copper Standart). **Přísadové prvky a nečistoty elektrickou vodivost snižují, a to často velmi významně.** Tato skutečnost je důležitá při výrobě odlitků pro elektrotechnické účely, u nichž je nutno omezit množství prvků, snižujících elektrickou vodivost.



Obr. 95: Vliv prvků na elektrickou vodivost mědi

Na obr. 95 je vliv běžných prvků na změnu elektrické vodivosti. Ze slévárenského hlediska je významný zejména **silný vliv fosforu**, který se při tavení slitin mědi používá jako obvyklý desoxidační prvek.

Čistá měď má velmi špatné mechanické vlastnosti, nízkou tvrdost a špatnou obrobitelnost. Proto se pro jiné, než elektrotechnické účely používají téměř výhradně slitiny mědi.

1.41 Slévárenské slitiny mědi

Měď tvoří základní prvek ve velmi rozmanitém okruhu slitin. U slitin se často využívají jejich **specifické mechanické, frikční, fyzikální, antikorozní a jiné vlastnosti**, které u jiných druhů slitin nejsou dosažitelné.

Slitiny mědi se podle hlavního přísadového prvku dělí do dvou základních skupin - na bronzy a mosazi. Některé slitiny se však označují podle názvu hlavních prvků – např. mědinikl, chromová měď, nebo specifickými názvy pro slitiny určitého složení – např. pakfong apod.

Slitina mědi se zinkem se nazývá mosaz. Podle vedlejších přísadových prvků mohou být mosazi manganové, niklové aj. **Většina slitin s ostatními prvky se označuje jako bronzy.**

1.42 Bronzy

Bronzy se podle hlavního přísadového prvku nebo skupiny přísadových prvků dělí do jednotlivých materiálových skupin. Nejvýznamnějšími skupinami jsou bronzy:

- cínové
- cínoolověné
- hliníkové
- olověné

Z dalších typů slitin se v menším rozsahu vyrábí slitiny Cu-Ni, Cu-Cr, Cu-Mn, Cu-Si, Cu-Be eventuelně některé další.

Z hlediska slévárenského je důležitá šířka pásma tuhnutí mezi teplotami likvidu a solidu. Podle tohoto kriteria je možno slitiny rozdělit zhruba do 3 skupin:

- slitiny s úzkým intervalem tuhnutí do asi 50 K. Mezi tyto slitiny patří žluté mosazi, manganový, hliníkový a niklový bronz (slitiny CuZnNiSnPb) a chromová měď
- slitiny s intervalem tuhntutí 50-110 K – do této skupiny patří zejména křemíková mosaz, křemíkový bronz a slitiny Cu-Ni
- slitiny s intervalem tuhnutí nad 110 K (až do asi 170 K) – cínový a cíno-olověný bronz, červený bronz a olověný bronz.

Šířka intervalu tuhnutí má rozhodující **význam pro schopnost dosazování kovu** do tuhnoucího odlitku **a pro makro- a mikrosegregaci přísadových prvků**. Slitiny s úzkým intervalem tuhnutí dobře dosazují kov do velké vzdálenosti. Nevznikají mikrostaženiny a slitina má tendenci ke tvoření velkých soustředěných staženin v nálitcích. Nedochází u nich k segregaci prvků v mikro- ani v makroměřítku.

Slitiny se širokým intervalem tuhnutí vytváří široké dvoufázové pásmo s velkým sklonem k tvorbě mikrostaženin a ředin. Účinnost nálitkování je malá. V odlitcích vzniká velká chemická heterogenita v důsledku odměšování prvků. Prvky s nižší teplotou tuhnutí se koncentrují na hranicích zrn (na okraji zrna může vznikat jiná strukturní složka než v centru zrn – např. vznik fáze δ po hranicích zrn α-fáze u cínového bronzu – tj. mikrosegregace) a také v částech odlitků, které tuhnou jako poslední - makrosegregace.

Slitiny mědi jsou v České republice normalizovány dle evropské normy ČSN EN 1982.

Způsoby odlévání slitin mědi využívají všechny běžné technologie. Převažuje lití do pískových forem, poměrně nízká licí teplota však umožňuje gravitační, nebo odstředivé lití do kovových forem. V hutních provozech je rozšířené kontinuální lití. Tlakové lití se používá jen velmi zřídka. S rostoucí rychlostí ochlazování se zjemňuje struktura, omezují segregace a celkově se dosahuje vyšších mechanických i dalších vlastností.

1.42.1 Cínový bronz

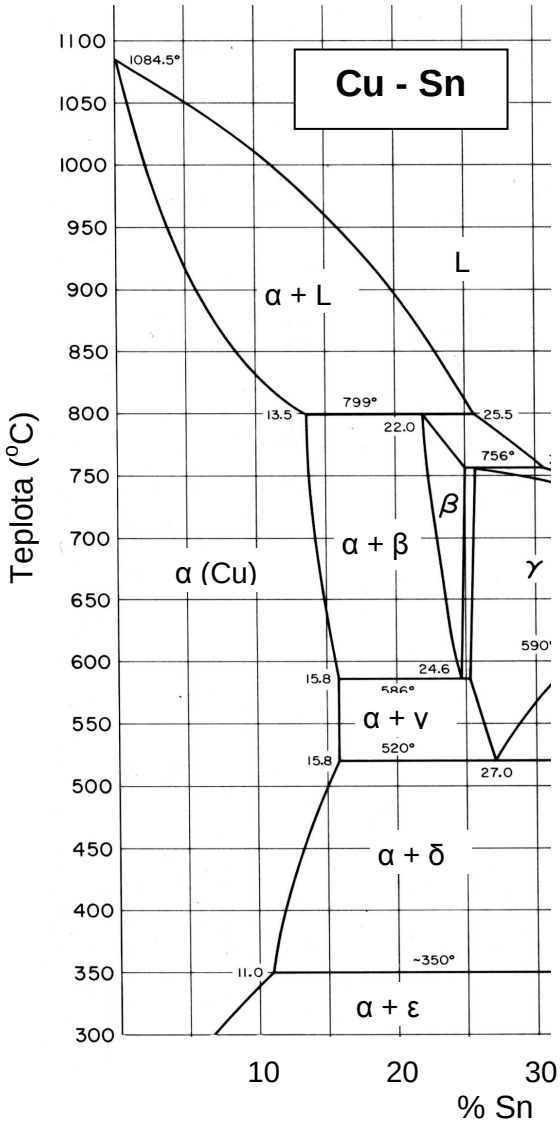
Základním legujícím prvkem je cín v množství 9-13 % Sn. Cínové bronzy někdy obsahují do 2 % Ni a do 0,5 až 1,0 % Pb. Obsah ostatních prvků je limitován nízkými hodnotami.

Nikl vylučuje jako intermetalická sloučenina Ni_3Sn, která zvyšuje pevnostní vlastnosti. Přísadou niklu se také zlepšují slévárenské vlastnosti a odolnost proti korozi.

Olovo je v α-fázi nerozpustné. Ve struktuře se koncentruje na hranicích primárních zrn mědi a v oblasti tepelné osy. Zlepšuje obrobitelnost bronzu a podporuje samomazací schopnost ložisek. Pevnostní a plastické vlastnosti však olovo snižuje.

Bronz s obsahem 5-10 %Sn a do 1 %P se často nazývá jako **fosforový bronz**. Používá se zejména jako ložiskový kov.

Struktura - v závislosti na obsahu cínu, disperzitě struktury a rozsahu segregací prvků se ve struktuře vyskytují následující fáze (viz diagram Cu-Sn na obr. 96):

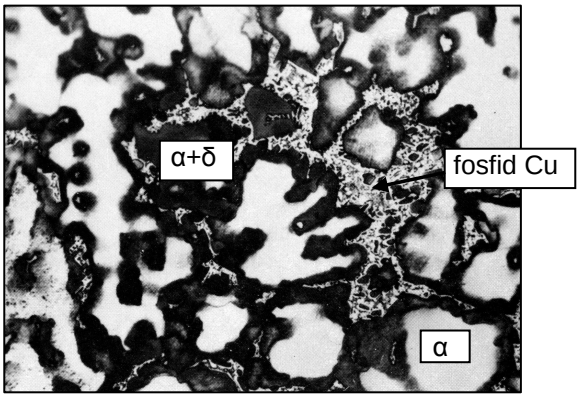


Obr. 97: Diagram Cu - Sn

- **α(Cu)** je substituční tuhý roztok cínu v mědi. Má kubickou plošně centrovanou mřížku a **dobré plastické vlastnosti**. Teoretická maximální rozpustnost cínu v mědi je sice 15,8 %, ale vzhledem k nízké hodnotě rozdělovacího koeficientu Sn v Cu **dochází k velké mikrosegregaci cínu** a ve struktuře se za normální teploty objevuje fáze δ i ve slitinách s podstatně nižším obsahem cínu, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti.

- **Vysokoteplotní fáze β a γ** mají kubickou prostorově centrovanou mřížku a poměrně dobré plastické vlastnosti. Slitiny obsahující β-fázi je **při obsahu asi do 15 % Sn možno tvářet za tepla** v intervalu teplot 650-750 °C. Rychlým ochlazením slitiny je možné β-fázi stabilizovat až do normální teploty.

- **Fáze δ** je elektronová sloučenina $Cu_{31}Sn_8$ se složitou kubickou mřížkou, která vzniká při ochlazování eutektoidní transformací fáze β resp.γ. Vzhledem k velké mikrosegregaci cínu se δ-fáze vylučuje na hranicích zrn fáze α –obr. 97. Tato fáze je tvrdá a křehká a dodává cínovému bronzu dobrou pevnost a **výborné kluzné vlastnosti**. Pod teplotou 450°C při běžných podmínkách ochlazování již nedochází k dalším transformacím a **za normální teploty je struktura slitiny tvořena směsí fáze α a eutektoidní fáze (α+δ).** Čím větší je podíl δ-fáze, tím vyšší je pevnost a tvrdost, avšak nižší houževnatost.



Obr. 97: Struktura slitiny CuSn10, (s 0,5 %P), zv. 500x

Použití: Cínový bronz se používá pro odlitky, u nichž se kromě dobré pevnosti vyžaduje vysoká odolnost proti opotřebení – např. odlitky namáhané kluzným třením, kluzná ložiska, ozubená kola, čepy, armatury, synchronizační kroužky a jiné.

Mechanické vlastnosti:

R_m – 250 – 300 MPa
$R_{p0,5}$ - 140 – 170 MPa
A - 10 – 30 %
HB - 80 – 100

Specielní cínové bronzy

Zvonovina – obsahuje 15-20 % Sn. Vzhledem k vysokému obsahu cínu je tvrdá, má kovově jasný zvuk.

Dělovina – obsahuje 10-12 % Sn. Z této slitiny se dříve odlévaly hlavně děl.

Zrcadlovina – s obsahem 30-33 % Sn se dříve používala na výrobu optických zrcadel pro velmi přesné optické přístroje. Lze ji vyleštit do vysokého lesku.

Bronz pro umělecké lití – používají se buď binární slitiny se 7-12 % Sn, často rovněž červený bronz s obsahem zinku.

1.42.2 Cíno-olověný bronz

Cíno-olověné bronzy se dělí do dvou skupin:
- slitiny mědi s cínem, zinkem a olovem – tzv. červené bronzy a
- slitiny mědi s cínem a olovem

Množství cínu **v červených bronzech** je obvykle sníženo na **4-8 %Sn** a ve slitině je **2-9 % Zn** a **3-8 % Pb** v různých kombinacích (typická je např. slitina s 5 % Sn, 5 %Zn a 5 % Pb).

V cíno-olověných bronzech bývá obsah olova zvýšen na **8-23 % Pb**, cín je v rozmezí **8-11 %Sn** a zinek je omezen na **max. 2 %Zn**.

Použití

Červený bronz bývá považován za levnější variantu cínového bronzu. Odlitky z červených bronzů se používají pro podobné účely, jako odlitky z cínových bronzů, oproti kterým mívají poněkud nižší mechanické vlastnosti a zejména tvrdost. Typickou oblastí použití jsou armaturní odlitky a jiné hydraulické komponenty.
Cíno-olověné bronzy jsou určeny především pro kluzná ložiska pro vysoké namáhání, odlitky těsné za vysokých tlaků, odlitky do prostředí vodní páry, odolné proti korozi atd.

Mechanické vlastnosti: Červené bronzy: R_m –220-260 MPa (při lití do písku),
$R_{p0,2}$ – 110-130 MPa, A – 15-20 %, HB – 60-70

Cíno-olověný bronz: R_m – 180-220 MPa, $R_{p0,2}$ – 90-110 MPa,
HB – 50-70

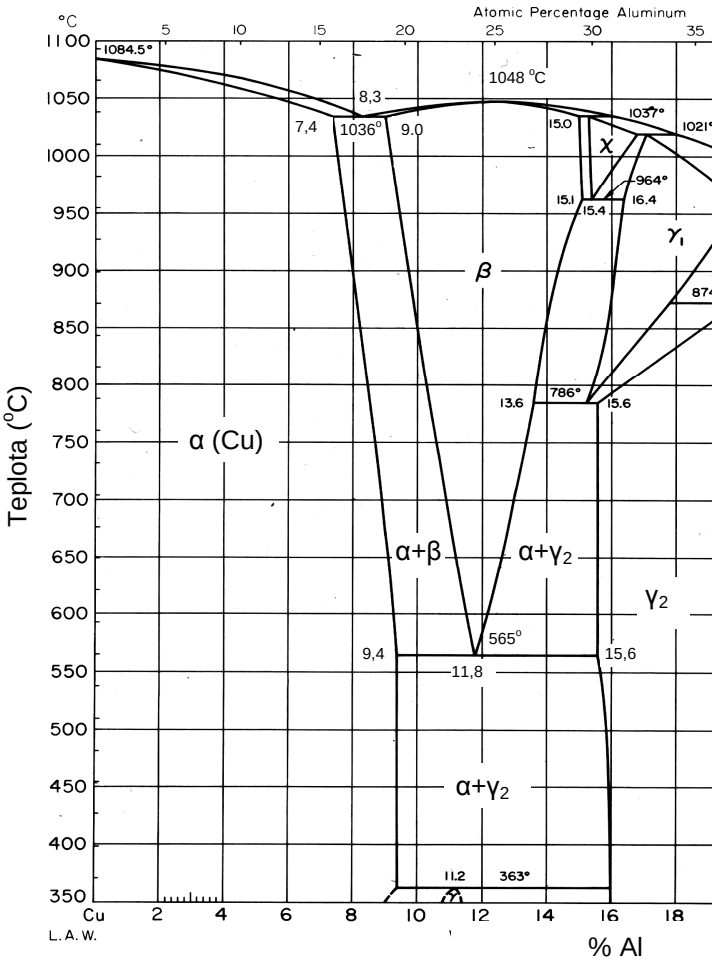
1.42.3 Hliníkový bronz

Hliníkové bronzy patří do skupiny slitin **s výbornými mechanickými vlastnostmi, vysokou odolností proti únavě, opotřebení, korozní odolností a odolností proti kavitaci.** Z hlediska chemického složení mohou být hliníkové bronzy binární nebo polykomponentní. **Hlavními legujícími prvky jsou železo, mangan a nikl.**

Pro binární diagram Cu-Al (obr. 98) je typické **velmi úzké rozmezí mezi teplotami likvidu a solidu** (úzké dvoufázové pásmo). Z toho sice vyplývá velký sklon k tvorbě soustředěných staženin a nutnost velmi masivního nálitkování, na druhou stranu ale zanedbatelný sklon k tvorbě rozptýlených staženin a ředin. Struktura odlitků je hutná a odlitky mají dobrou těsnost.

Maximální rozpustnost hliníku v mědi při eutektické teplotě 1048 ^oC je 7,4 %Al. **Fáze α** je substituční tuhý roztok s kubickou plošně centrovanou mřížkou a tedy **s velmi dobrými plastickými vlastnostmi.**

Při ochlazování se rozpustnost hliníku zvyšuje na maximální hodnotu 9,4 %Al při eutektoidní teplotě 565 °C. Při překročení maximální rozpustnosti vzniká ve struktuře **fáze β**, která se při pomalém ochlazování transformuje při eutektoidním rozpadu na **eutektoid (α+γ_2).** Tento rozpad se někdy označuje jako „perlitická přeměna“, vzhledem k podobnosti struktury eutektoidu s lamelárním perlitem v systému Fe-Fe_3C.



Fáze γ_2 je tvrdá a křehká elektronová sloučenina Cu_9Al_4. Růst tvrdosti slitiny vlivem γ_2 fáze a současný pokles houževnatosti s rostoucím obsahem hliníku nad 10 %Al je velmi strmý, takže již při obsahu kolem 14 %Al je slitina velmi křehká, jen obtížně obrobitelná a pro obvyklé technické účely nepoužitelná.

Při rychlém ochlazení z oblasti homogenní β-fáze dochází k martenzitické transformaci na neuspořádaný martenzit β´.

Následným **popouštěním** z β´-martenzitu precipitují drobné jehlice α-fáze, které spolu s matricí vytváří tzv. **popuštěný β-martenzit.** Tyto fázové změny umožňují provádět tepelné zpracování.

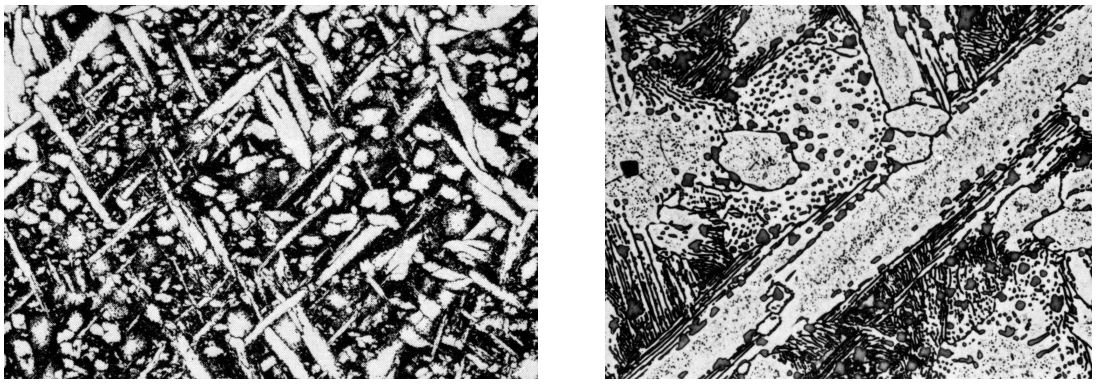
Obr. 98: Rovnovážný diagram Cu-Al

Chemické složení hliníkových bronzů

V normě EN ČSN 1982 je uvedeno 5 druhů hliníkových bronzů. Všechny tyto slitiny mají obsah hliníku v rozmezí **8-11** (max.12) **%Al** a liší se zejména obsahem legur Fe, Mn a Ni. S rostoucím obsahem Al se zvyšují zejména hodnoty $R_{p0,2}$ a HB. Železo do asi **3 % Fe** (výjimečně až do 6, resp. 7 %) zjemňuje strukturu slitiny a precipitačně zpevňuje matrici.
Mangan zúžuje oblast α-fáze a rovněž zvyšuje pevnost. Současně se zlepšuje odolnost proti korozi. Obsah manganu bývá do **max. 3 %Mn**, obvykle však do 2%.
Nikl v rozmezí **1-6 %Ni** zvyšuje mechanické vlastnosti slitiny díky precipitačnímu zpevnění intermetalickou fází CuFeNi, snižuje však houževnatost.

Struktura

Struktura hliníkových bronzů je v litém stavu tvořena **směsí α-fáze a eutektoidu (α+γ_2),** který vznikl rozpadem vysokoteplotní fáze β. **Ve slitinách s obsahem niklu je γ_2 fáze nahrazena vícesložkovou fází κ (kappa),** obsahující Fe, Ni a Al. Na obr. 99 jsou zřejmé světlé, jehlicovité částice α-fáze, uložené v šedé matrici eutektoidu (α+κ). Tato struktura označuje jako Widmanstättenova (díky podobnosti vzhledu s touto strukturou u ocelí).



100x 1000x

Obr. 99: Struktura hliníkového bronzu CuAl10Fe5Ni5

Mechanické vlastnosti

Hliníkové bronzy mají **mimořádně vysoké mechanické vlastnosti**, které jednoznačně převyšují všechny ostatní slitiny mědi (kromě beryliového a snad manganového bronzu).

Orientační hodnoty mechanických vlastností jsou:

R_m = 500-650 (750) MPa, $R_{p0,2}$ = 180-300 (380) MPa, A = 15-30 (6)%, HB = 100-150 (180), E = 100-110 GPa, rázová práce až 37 J (v tepelně zpracovaném stavu). (Čísla v závorkách platí pro slitiny s vysokým obsahem niklu.)

U hliníkových bronzů s obsahem nad asi 10 % Al je možné provádět **tepelné zpracování,** které spočívá z těchto kroků:

- rozpouštěcí žíhání (asi 900^{o}C-2hod., při kterém dojde k rozpuštění α-fáze ve fázi β.
- rychlé ochlazení - vznik neuspořádaného β´-martenzitu
- popouštění 560-620^{o}C-1 hod. – precipitace α-fáze a vznik popuštěného β-martenzitu

Typické oblasti použití

Součástky pro pumpy, třecí ložiska pro nejtěžší namáhání, patní ložiska, ozubená kola, šneková kola, plunžry, součásti do nejiskřivého prostředí, součástky odolné proti mořské vodě, solným roztokům, brakické vodě a organickým kyselinám atd.

1.42.4 Olověný bronz

V kapalném stavu jsou měď a olovo částečně rozpustné, v tuhém stavu téměř nerozpustné, takže strukturu tvoří krystaly téměř čisté mědi a krystaly olova. V důsledku velmi rozdílných teplot tuhnutí a hustoty jsou oba prvky **mimořádně náchylné na segregaci**. To vyžaduje provádět časté míchání roztaveného kovu a provádí se i specielní metalurgické zásahy. Rychlé ochlazování omezuje rozsah segregace.

Olověné bronzy mají dobré kluzné vlastnosti a používají se jako **ložiskový kov**. Obsahují až do 25 %Pb, někdy bez cínu, častěji s obsahem cínu do 10 %Sn. Malé přídavky niklu, cínu, zinku nebo manganu zjemňují strukturu a omezují segregaci olova.

1.42.5 Manganový bronz

V normě EN ČSN 1982 je uvedena 1 slitina s obsahem 8-15 %Mn, 7-9 %Al, 2-4 %Fe a 1,5-4,5 %Ni. Jedná se o materiál s vysokou pevností R_m nad 630 MPa, tažností A > 18 % a s vysokou houževnatostí. Používá se **pro výrobu zbraní, turbin, ložisek** atd.

Vedle této slitiny se někdy používají i materiály s odlišným způsobem legování. Slitiny jsou homogenní do obsahu 20 %Mn, při rychlém ochlazování však zůstávají homogenní i slitiny s vyšším obsahem Mn. Mají dobré mechanické vlastnosti do teplot asi 300 ^oC, dobrou odolnost proti korozi a specifické elektrotechnické vlastnosti. Ve slévárnách se však tento materiál běžně neodlévá.

1.42.6 Křemíkový bronz

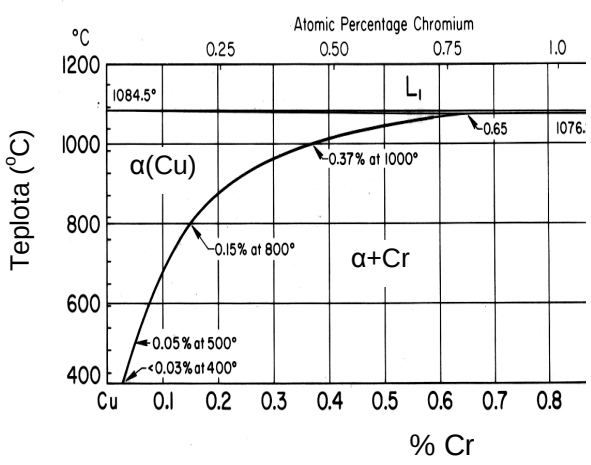
Maximální rozpustnost křemíku v mědi je 5,3 %Si, při vyšším obsahu vznikají křehké fáze, které zamezují technickému využití těchto slitin. Obvyklý obsah křemíku je proto do 3,5 %Si. Slitiny bývají současně legované malými obsahy Mn, Zn, Ni a Sn. Křemíkové bronzy mají dobrou pevnost do asi 250 ^oC, vysokou tažnost a jsou **vhodné pro použití za nízkých teplot** až –180 ^oC. Mají dobrou chemickou odolnost v řadě druhů chemických prostředí. Vyznačují se velmi dobrými třecími vlastnostmi.

1.42.7 Niklový bronz (mědinikl)

Nikl má s mědí dokonalou rozpustnost v tuhém stavu, proto jsou možné jakékoliv kombinace těchto prvků. S rostoucím obsahem Ni se zvyšuje tvrdost a pevnost slitin, klesá však tažnost. Niklové bronzy mají dobrou houževnatost, odolnost proti tečení a výbornou korozní odolnost. Obvykle se používají ternární slitiny Cu-Ni-Zn **(*pakfong*)** s obsahem do 20-25 %Ni, do 10 %Zn, případně rovněž s obsahem Pb a Sn. Slitina s 55-65 %Cu, 18-27 %Zn a cca 18 %Ni je známa jako ***alpaka*.**

1.42.8 Chromová měď

Specifickou oblastí použití chromové mědi jsou odlitky, u nichž se požaduje **dobrá odolnost proti otěru a vysoká elektrická vodivost.** Typickým výrobkem jsou kontakty sběračů pro trolejbusy, komutátorové lamely, elektrody pro odporové svařování, ale i některé neelektrotechnické výrobky, jako např. vodou chlazené dmyšny vysokých pecí a kuploven.



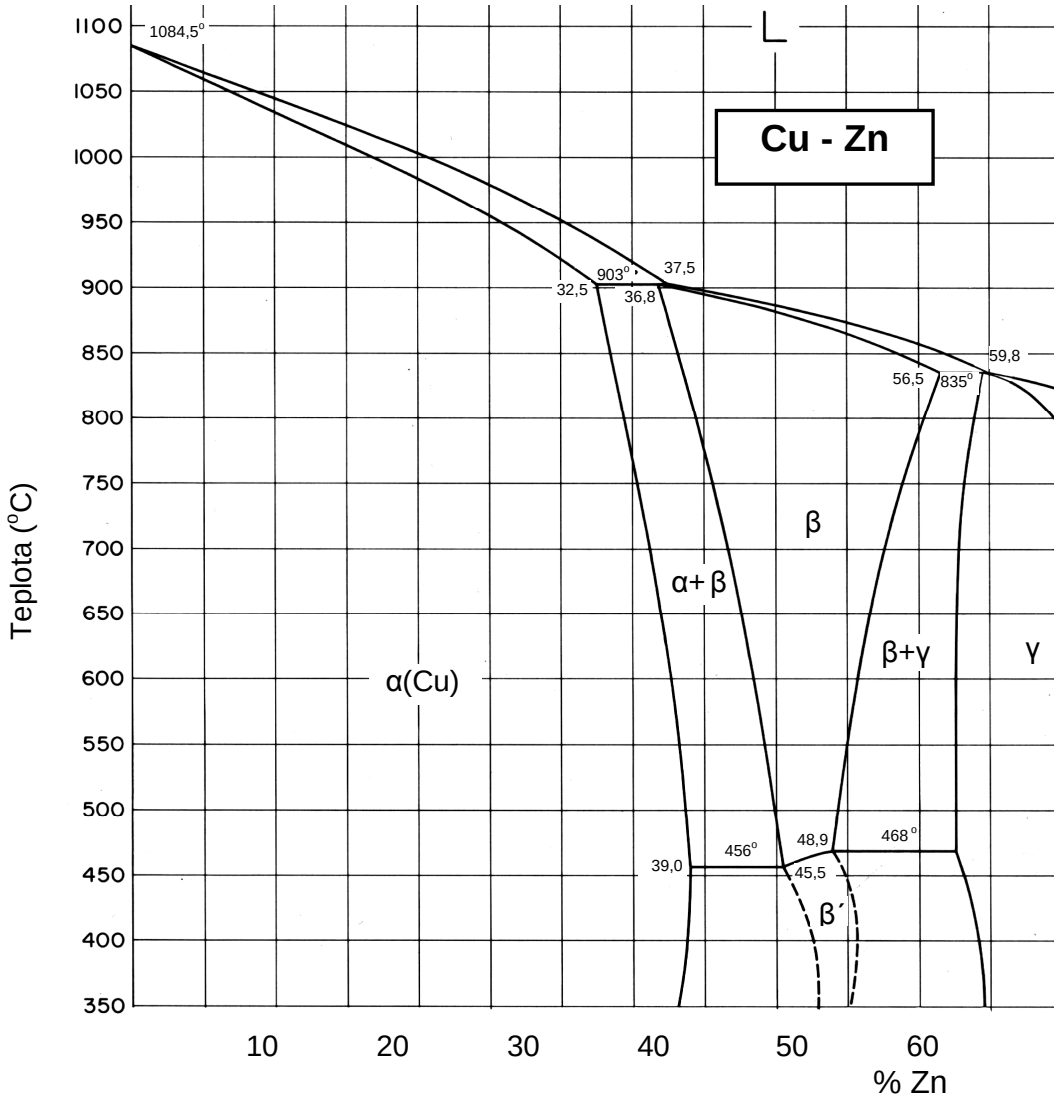
Chrom tvoří s mědí slitinu s omezenou rozpustností a se vznikem eutektika. Eutektická koncentrace je 1,5 %Cr, maximální rozpustnost Cr v Cu při eutektické teplotě je 0,65 %Cr. S poklesem teploty se rozpustnost chromu v mědi snižuje na zanedbatelnou hodnotu –obr.100. Technické slitiny obsahují **0,4-1,2 % Cr** a chemické složení se volí zejména s ohledem na dosažení požadované elektrické vodivosti.

Obr. 100: Rovnovážný diagram Cu-Cr

Odlitky z chromové mědi se mohou tepelně zpracovat rozpouštěcím žíháním na 900-1050 ^{o}C s ochlazením do vody. Nejvyšších mechanických vlastností se dosáhne po následujícím vytvrzení při teplotě 450-500 ^{o}C.

1.43 Mosaz

Mosazi jsou důležitou materiálovou skupinou na bázi prvků mědi a zinku. Zinek tvoří s mědí substituční tuhý roztok α(Cu), s maximální rozpustností 32,5 % Zn při teplotě 903 ^{o}C – obr. 101. S klesající teplotou se zvyšuje rozpustnost zinku na maximální hodnotu 39 %Zn při teplotě 456 ^{o}C. Změna rozpustnosti při dalším snižování teploty se na struktuře již neprojeví. **Fáze α** má kubickou plošně centrovanou mřížku a tedy dobré plastické vlastnosti. Ve slitinách s obsahem více než 38 % Zn se objevuje **fáze β** s kubickou prostorově centrovanou mřížkou. Tato fáze tvoří neuspořádaný tuhý roztok na bázi elektronové sloučeniny CuZn a v teplotním rozmezí 468-456 ^{o}C se transformuje na pravidelně uspořádanou fázi β´. Zatímco **vysokoteplotní fáze β je houževnatá a umožňuje tváření za tepla, je fáze β´ křehká** a způsobuje snížení houževnatosti. Slitiny, tvořené pouze fází β´ jsou technicky neupotřebitelné. Proto je **obsah mědi v mosazích obvykle vyšší, než asi 55 %.**



Obr. 101: Rovnovážný diagram Cu – Zn

Slitiny, které obsahují více, **než asi 80 %Cu** (tedy slitiny s nízkým Zn) se nazývají ***tombak***.

Slévárenské mosazi kromě zinku obsahují řadu přísad a nečistot, které ovlivňují vlastnosti slitiny a mění také tvar (rozsah) oblasti tuhého roztoku α-fáze. Podle typické barvy se slitiny na bázi prvků CuZn(SnPb) nazývají jako „***žlutá mosaz***“, slitiny, obsahující vysoký obsah manganu (10-20 %), jako „***bílá mosaz***“.

Mosazné pájky obsahují 42-54 % Zn a mají tavicí teplotu 840-880 ^{o}C. **Stříbrné pájky** pro elektrotechnické účely obsahují 30-50 %Cu, 25-52 %Zn a 4-45 %Ag

Vliv některých důležitých prvků v mosazích.

Železo – **zjemňuje velikost zrna** (působí jako krystalizační zárodky), zpevňuje matrici. Maximální obsah obvykle do 0,5 %Fe, výjimečně vyšší. Při obsahu nad 0,35 %Fe tvoří ve slitině precipitáty.

Nikl – je rozpustný v α-fázi, **zvyšuje houževnatost a odolnost proti korozi**. Způsobuje hrubnutí zrna. Obvyklý obsah do 1 %Ni, výjimečně vyšší.

Mangan – je rozpustný v α-fázi i v β´ do obsahu 4 %Mn. **Zvyšuje mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi**. Obvyklý obsah do 0,2-0,5 %Mn, v legovaných mosazích až do 5 %.

Cín – velmi intenzivně zúžuje oblast α-fáze. Zvyšuje zabíhavost taveniny, pevnost slitiny, zlepšuje chemickou odolnost (zvláště proti mořské vodě). Obvyklý obsah do 0,5 až 1,0 %Sn.

Hliník – Bývá obsažen ve slitinách pro kokilové lití. **Zvyšuje odolnost proti korozi** armaturních odlitků a zabraňuje zatuhnutí pohyblivých dílů. Antikorozní účinek souvisí s tvorbou vrstvy Al_2O_3 na povrchu výrobků. Obvyklý obsah je 0,15-0,3 %Al, u specielních mosazí do 3 %, výjimečně více. Hliník v důsledku tvorby oxidů zhoršuje slévárenské vlastnosti a způsobuje porezitu odlitků. Při lití do písku bývá jeho obsah limitován pod 0,1 %.

Olovo – je v α-fázi nerozpustné. Snižuje houževnatost, ale **zlepšuje obrobitelnost**. Slitiny s obsahem až do 3 % Pb se nazývají **automatové mosazi**. Běžný obsah je asi do 1 %.

Křemík (až na výjimky), selen, telur, antimon, síra a některé další prvky mají na vlastnosti mosazí **nepříznivý vliv** a jejich obsah bývá limitován nízkými hodnotami, až pod 0,01 %.

1.43.1 Struktura mosazí

Aby bylo možné posoudit vliv jednotlivých prvků na oblast tuhého roztoku α, je zaveden pojem **ekvivalentní obsah zinku**. Jednotlivé prvky mají stanoveny koeficienty, které určují jejich účinek vzhledem k účinku zinku. Pro jednotlivé prvky byly stanoveny následující ekvivalentní koeficienty:

Si – 10, Al – 6, Mn – 0,5, Fe – 0,9, Ni – (-1,3), Pb – 1, Sn – 2, Mg - 2

Podle těchto koeficientů má např. 1 % Al stejný účinek na strukturu jako 6 % Zn. Relativní obsah se stanoví výpočtem pomocí uvedeného příkladu.

***Příklad**: Slitina obsahuje 66 %Cu, 30 %Zn, 1 %Sn a 3 %Al. Jaký je ekvivalent Cu a Zn?*

Relativní množství všech prvků ve slitině je:

66 %Cu + 30 %Zn + (2 x 1)%Sn + (6 X 3) %Al = 66 %Cu + 50 %Zn_{ekv} = 116 %

Relativní množství mědi: $Cu_{ekv} = \frac{66 \,.\, 100}{116} = 56{,}9\ \%$

Relativní množství zinku: $Zn_{ekv} = \frac{50 \,.\, 100}{116} = 43{,}1\ \%$

Struktura uvedené slitiny bude odpovídat struktuře binární slitiny Cu-Zn s 43,1 % Zn. I když podle obsahu samotného zinku má být slitina jednoznačně homogenní, ve skutečnosti, se započtením ekvivalentního vlivu ostatních prvků, bude struktura heterogenní.

Mosaz je snad jedinou slitinou, **pro** jejíž **označení se v technické praxi používá obsah základního prvku – tj. mědi.** Např. označení materiálu Ms 58 znamená, že slitina obsahuje 58 % Cu.

1.43.2 Vlastnosti mosazí

Mechanické vlastnosti mosazí jsou střední. Vzhledem k velké variabilitě typů a složení je i spektrum vlastností velmi široké a dále uvedené hodnoty je nutno považovat pouze za orientační.

- R_m = 200 – 300 MPa (manganová mosaz podstatně více – R_m = 500-750 MPa)
- A = 10 – 20 %,
- HB = 70 – 100 (legované mosazi až 200)

Mechanické vlastnosti citlivě závisí na hodnotě zinkového ekvivalentu, a to zejména v úzkém rozmezí asi 34 – 45 %Zn_{ekv}. V tomto intervalu:

- klesá podíl α-fáze ze 100 % na 0 %
- vzrůstá pevnost v tahu přibližně na dvojnásobek, pak ale pevnost velmi rychle klesá
- tvrdost se zvyšuje asi na dvojnásobek
- tažnost klesá na méně než polovinu

Slévárenské vlastnosti mosazí jsou díky velmi úzkému pásmu tuhnutí **výborné**. Mají dobrou zabíhavost, malý sklon ke vzniku ředin. Určitou nevýhodou je poměrně značné lineární smrštění asi 1,5 %.

Použití mosazí

Typickou oblastí použití slévárenských mosazí je výroba vodovodních armatur, součástí čerpadel, pouzder, součástí, pracujících v prostředí solných roztoků a výroba dalších strojních součástek.

1.44 Tavení slitin mědi

Slitiny mědi se ve slévárnách taví nejčastěji v kelímkových pecích, vytápěných odporově, plynem (výjimečně jinými palivy) nebo v elektrických indukčních pecích.

Jako **vsázkové suroviny** se používají housky slitiny příslušné značky, vratný materiál a tříděný měděný odpad. Mateřské tavby z čistých surovin se ve slévárnách provádí jen zřídka. Pro úpravu chemického složení se používají **čisté přísadové kovy**, těžko tavitelné nebo lehce oxidující kovy se přidávají jako **předslitiny** s mědí. Předslitinami jsou např. – Cu-Al, Cu-Fe, Cu-Ni, Cu-Si, Cu-Mn, Cu-Cr Cu-P a jiné, s různými obsahy legujících prvků. Cín, zinek a olovo se přidávají v čisté formě.

Koncentrace přísad v tavenině se snižuje přidáváním čisté mědi, a to katodové mědi, elektrotechnické mědi, měděných vodičů apod. **Obsah některých prvků v tavenině může být selektivně snížen chemickou cestou** jejich reakcí s příslušnými rafinačními přípravky. Takto se z některých slitin odstraňuje např. hliník nebo křemík. Reakční produkty se obvykle vážou ve strusce.

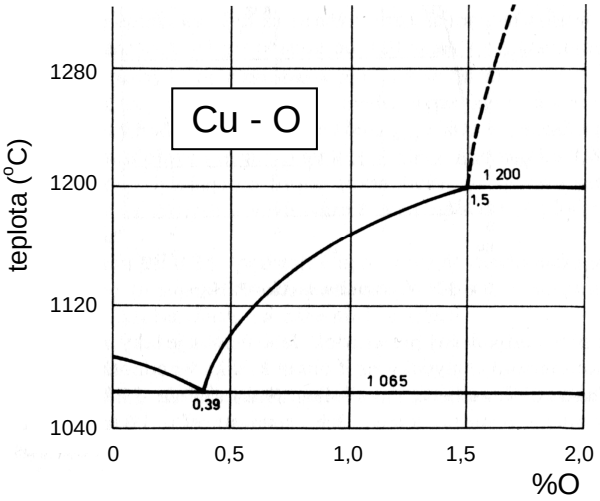
Vsázkové suroviny mohou být významným zdrojem naplynění taveniny. Zejména katodová měď (také katodový nikl a mangan) obsahují velké množství rozpuštěného vodíku. Velkým zdrojem naplynění je vlhká vsázka a vsázka, znečištěná organickými produkty (olej, mazadla apod.).

1.44.1 Plyny ve slitinách mědi

U většiny slitin na bázi mědi dochází při jejich tavení na vzduchu **k oxidaci a k naplynění vodíkem.**

Hlavním zdrojem plynů ve slitinách mědi je vodní pára, spaliny v tavicích pecích a organické nečistoty na vsázkových surovinách. **Vodní pára** pochází ze všech zdrojů vlhkosti – pecní atmosféry, vyzdívky, solí, vlhké vsázky a nářadí, nebo z vlhkosti formy. Při styku s tekutým kovem se H_2O rozkládá na vodík a kyslík, které se rozpouští v tavenině. Ve spalných plynech se kromě vodní páry obvykle vyskytují také oxidy SO_2 a CO, resp. CO_2, které jsou rovněž příčinou naplynění.

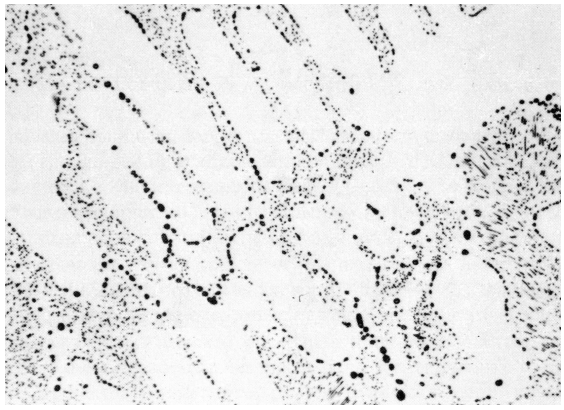
Oxidací vznikají oxidické vměstky, které snižují mechanické vlastnosti odlitků. Vměstky, které se při tavení vyskytují v tekutém nebo v tuhém stavu, se pokud možno vážou do strusky. Pro vytvoření ochranné vrstvy strusky, reakci s vměstky v tavenině a jejich zachycení ve strusce se používají **krycí a rafinační soli.**



Ve slitinách **reaguje kyslík s mědí za vzniku oxidu měďného Cu_2O,** který se rozpouští v tavenině. Soustava Cu-Cu_2O je soustava eutektického typu s eutektickou koncentrací 0,39 %O při teplotě 1065 °C – obr.102. Protože maximální rozpustnost kyslíku v tuhé mědi je pouze 0,008 %O, znamená to, že téměř všechen kyslík je po ztuhnutí vyloučen v oxidu měďném

Obr. 102: Rovnovážný diagram Cu-O

Eutektikum α(Cu)-Cu_2O se vylučuje na hranicích primárních zrn α(Cu) a výrazně snižuje plasticitu mědi. Oxid měďný tvoří metalograficky zřetelnou tmavou fázi – obr.103. Z tohoto důvodu je nutno před odlitím snížit obsah kyslíku v tavenině pod technicky škodlivé množství. Desoxidace se provádí přísadou prvků s vyšší afinitou ke kyslíku, než má měď. Tímto prvkem může být buď prvek, který je složkou slitiny (např. zinek), nebo který se do slitiny pro desoxidaci záměrně přidává. Při volbě desoxidačního prvku je nutno přihlížet na jeho eventuelní vliv na snížení elektrické vodivosti.



1000 x

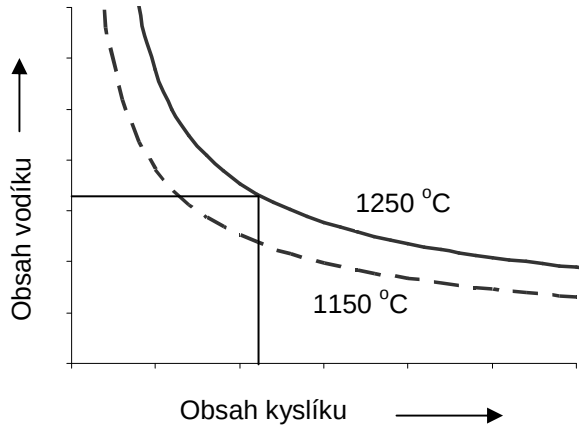
Obr. 103: Eutektikum Cu-Cu_2O v mědi

Rozpustnost vodíku ve slitinách mědi závisí na teplotě kovu a na tlaku. V tekutém stavu je rozpustnost podstatně vyšší, než ve stavu tuhém. Proto během tuhnutí dochází k vylučování vodíkových bublin a **vzniku pórovitosti** (bublinatosti) odlitků. Obsah vodíku v tavenině se obvykle pohybuje v rozmezí 1-20 cm^3 na 100 g taveniny.

Množství rozpuštěného vodíku a kyslíku v tavenině se řídí termodynamickou rovnováhou reakce

$[Cu_2O] + 2\,[H] \rightarrow 2\,Cu + \{H_2O\}$

rovnovážná konstanta $k = \dfrac{p_{H2O}}{[a_H]^2 . [a_{Cu2O}]}$



Ze vztahu pro rovnovážnou konstantu vyplývá, že mezi obsahem kyslíku a vodíku je hyperbolická závislost, tj. že **čím vyšší je obsah vodíku, tím nižší je obsah kyslíku a naopak**. Tato závislost se nazývá jako „Allenův vztah“ a jeho průběh je znázorněn na obr. 104. Hodnota rovnovážné konstanty je závislá na chemickém složení a na teplotě. **Čím vyšší je teplota taveniny, tím vyšší je obsah rozpuštěných plynů.**

Obr.104: Závislost rozpustnosti vodíku a kyslíku

Vzájemné závislosti množství rozpuštěného vodíku a kyslíku se využívá při metalurgickém vedení taveb, které se podle dominantního vlivu dělí na tavby vedené oxidačním nebo redukčním způsobem.

Oxidační vedení tavby

Spočívá v záměrném zvýšení obsahu kyslíku v kovu:

- spalováním paliva s přebytkem vzduchu – oxidační plamen
- solemi a přípravky, které obsahují tzv. nosiče kyslíku. Zdrojem kyslíku bývají snadno rozložitelné oxidy, např. CuO, nebo MnO_2

Do objemu taveniny se kyslík dostává difuzí a mícháním taveniny v peci. **Při oxidačním způsobu tavení je v tavenině nízký obsah rozpuštěného vodíku, nebezpečí vzniku plynových dutin je malé.**

Vysoký obsah kyslíku je nutno před odlitím snížit redukcí pomocí dostatečného množství desoxidačních prostředků.

Redukční vedení tavby

Probíhá v prostředí, v němž se brání kontaktu taveniny s kyslíkem. Redukčního prostředí lze dosáhnout:

- nastavením redukčního plamene (s přebytkem paliva)
- pomocí redukčních krycích prostředků – nejčastěji pokrytím hladiny kovu dřevěným uhlím nebo redukčními přípravky

Nevýhodou redukčního vedení tavby je nekontrolované **naplynění vodíkem**. Naplynění lze částečně omezit dobrým zakrytím hladiny krycí solí (event. dřevěným uhlím), použitím surovin s nízkým obsahem vodíku a vyloučením všech zdrojů vodíku v metalurgickém procesu.

Množství vodíku v tavenině je před odlitím nutno snížit některým způsobem **odplyňování** – např. použitím odplyňovacích solí, probubláváním inertními plyny nebo vakuováním.

Obsah kyslíku v lázni je při redukčním vedení tavby malý a **pro závěrečnou desoxidaci obvykle stačí použít jen menší množství desoxidačních prostředků.**

Kromě kyslíku a vodíku se ve slitinách mědi rozpouští také **oxid siřičitý a oxid uhličitý**. Oba tyto plyny ve svém důsledku vedou k oxidaci taveniny podle vztahů:

$SO_2 + 6\ Cu \leftrightarrow Cu_2S + 2\ Cu_2O$

$2\ Cu + CO_2 \leftrightarrow CO + Cu_2O$ (při teplotě nad 1000 ^oC)

Ochrana taveniny proti naplynění

spočívá zejména v zamezení přímého kontaktu taveniny s okolní atmosférou. K tomu se používají **krycí přípravky**, směsi solí nebo drcené sklo. Krycí a struskotvorné přípravky bývají směsí solí $NaCO_3$, $Na_2B_4O_7$ (borax), Na_3AlF_6 (kryolit), CaF_2 a dalších a jejich složení je koncipováno tak, aby při teplotě roztaveného kovu tvořily tekutou strusku. **Účelem strusky je rovněž vazba vměstků a nečistot, vznikajících v kovu.** Při redukčním vedení tavby je možno hladinu kovu pokrýt vrstvou dřevěného uhlí.

Velmi účinným prostředkem pro ochranu hladiny je berylium. Již při obsahu několik setin procenta berylia vzniká na hladině kovu tenká, ale velmi kompaktní vrstva, která zamezuje reakci kovu s atmosférou.

1.44.2 Desoxidace slitin mědi

Desoxidace se provádí v závěru tavby před litím a jejím účelem je snížení obsahu kyslíku na přípustnou hodnotu. Principem desoxidace je **vazba rozpuštěného kyslíku na prvek s vyšší afinitou, než má měď**. Při volbě desoxidačního prostředku musí být splněna tato kriteria:

- prvek musí mět dostatečnou desoxidační schopnost (afinitu ke kyslíku)
- vznikající zplodiny se musí z taveniny snadno odstraňovat
- vznikající oxid ani nezreagovaný přebytek desoxidovadla nesmí mět škodlivý vliv na slitinu

Desoxidovadla mohou být v tavenině rozpustná nebo nerozpustná.

V **nerozpustných desoxidovadlech** se využívá redukční schopnosti **uhlíku** vůči oxidům mědi. K desoxidaci se používá např. karbid vápníku a reakce probíhá podle vztahu

$5\ Cu_2O + CaC_2 \rightarrow CaO + 2\ CO_2 + 10\ Cu$

V tavenině rozpustné desoxidační prostředky jsou zejména fosfor a dále kovové prvky hořčík, lithium a zinek, méně obvyklé jsou Si, Mn, Al a Be. V mosazích působí jako desoxidační prvek zinek. Při volbě desoxidačního prostředku je důležitým hlediskem rovněž jeho vliv na snížení elektrické vodivosti.

Desoxidační přípravky se do sléváren obvykle dodávají **v podobě patron** o určité hmotnosti, které se aplikují pro dané množství a typ slitiny, **nebo se používají předslitiny** těchto prvků s mědí. Zinek se aplikuje jako čistý kov (Orientační koncentrace jednotlivých prvků v předslitinách bývá: Cu-Mg10, Cu-Si10, Cu-Cr5, Cu-Mn30, Cu-Al50, Cu-B5, Cu-Li5. Konkrétní složení závisí na dodavateli).

Druhy a působení desoxidačních prvků

- Fosfor je obvyklým desoxidačním prvkem pro většinu bronzů. Používá se jako předslitina CuP10**.** Dodává se ve tvaru tabulky „čokolády“, která se na požadované množství dělí lámáním. Dávkování fosforu se volí podle aktuálního obsahu kyslíku, neboť přebytek P se vylučuje na hranicích zrn a snižuje tažnost slitin. **Obvyklé dávkování je 0,2-0,4 % CuP10**. Jak vyplývá z obr. 95, **má fosfor velmi negativní vliv na elektrickou vodivost.** Zbytkový obsah fosforu se po desoxidaci pohybuje nejčastěji v rozmezí 0,01-0,03 %P. Při vyšším obsahu rovněž dochází k chemické reakci mezi kovem a formou. Určitý přebytek fosforu v tavenině eliminuje možné naplynění v době od provedení desoxidace do odlití. Pomocí fosforu je možno kyslík snížit pouze na úroveň asi 0,01 %O.

Desoxidace pomocí fosforu probíhá podle rovnic:

$$5\ Cu_2O + 2\ P \rightarrow \{P_2O_5\} + 10\ Cu$$

$$\{P_2O_5\} + [Cu_2O] \rightarrow 2\ (CuPO_3)$$ (kapalný stav – vyplouvá do strusky)

U slitin s požadavky na vysokou vodivost provádí desoxidace fosforem pouze v nezbytném množství, nebo lépe předslitinami mědi s hořčíkem, bórem, lithiem, křemíkem nebo dalšími prvky, které mají na elektrickou vodivost méně nepříznivý vliv.

- Lithium desoxiduje měď a současně váže i vodík podle vztahu

$$Li + Cu_2O + H \rightarrow LiOH + 2\ Cu$$

Zbytkový obsah 0,005 % Li nezpůsobuje významnější pokles elektrické vodivosti.

- Hořčík je poměrně silným desoxidovadlem. Z taveniny rovněž odstraňuje některé nežádoucí prvky, např. síru a vizmut. Do zbytkového obsahu asi 0,01 %Mg nemá podstatný vliv na snížení elektrické vodivosti.

Vzhledem k velké afinitě Li a Mg ke kyslíku vzniká při desoxidaci taveniny nebezpečí redukce některých nečistot ze strusky zpět do lázně. Proto je nutné **před provedením desoxidace strusku z hladiny kovu pečlivě odstranit.** Pro desoxidaci se používají také specielní přípravky, jejichž složení je předmětem know-how každé dodavatelské firmy.

- Zinek má vyšší afinitu ke kyslíku než měď a může být použita pro desoxidaci slitin mědi, u kterých nejsou vysoké požadavky na elektrickou vodivost. **Slitiny s vyšším obsahem zinku již není nutno desoxidovat jiným způsobem.**

Zinek má teplotu vypařování blízkou teplotě tavení mědi, proto brání rozpouštění vodíku v tavenině – **mosaz proto není nutno odplyňovat**.

- Křemík (také mangan) se doporučuje používat k desoxidaci slitin pro elektrotechnické účely, neboť jen málo snižuje elektrickou vodivost.

Při dolegování některých prvků **a při aplikaci různých desoxidačních prostředků** je nutno respektovat **návaznosti, které vyplývají z různé afinity prvků ke kyslíku.** Před

přidáním Zn, Al, Mn, Sn a některých dalších prvků má být slitina předběžně desoxidována fosforem. Oxidy těchto prvků již nejsou fosforem zpětně redukovatelné.

U slitin s požadavky na vysokou elektrickou vodivost se doporučuje provádět **dvoustupňovou desoxidaci:**

1. stupeň – desoxidace menším množstvím fosforu (odstraní se větší část kyslíku)
2. stupeň – desoxidace přípravky na bázi hořčíku, lithia, kalciumboridu a pod.

Zjišťování obsahu kyslíku

Obsah kyslíku v tavenině se zjišťuje laboratorními nebo provozními zkouškami, v praxi se však často pouze odhaduje.

- **Laboratorní zkoušky** se provádí vysokoteplotní extrakcí, spektrální analýzou nebo metalograficky.
- **Provozní zkoušky** spočívají například:
  - V empirickém posouzení lomových ploch nebo v odlití zkušebního vzorku, u něhož se na obsah rozpuštěných plynů usuzuje podle tvaru hladiny (staženiny) po ztuhnutí.
  - V posouzení vylučování oxidu uhelnatého na grafitové tyči ponořené do taveniny. Při vyšším obsahu kyslíku probíhá reakce $2\ C + O_2 \rightarrow 2\ CO$, kterou je možno zaznamenat pomocí vyplouvajících bublinek CO nebo vibrace grafitové tyče. V tavenině s nízkým obsahem kyslíku je reakce mírná nebo neznatelná.
  - Obsah kyslíku v čisté mědi je možno kontrolovat podle vzhledu a barvy lomu vzorků. Oxidovaná měď má hrubozrnný lom tmavočervené barvy. Desoxidovaná měď má růžovou barvu a lom je jemnozrnný.

1.44.3 Technologie tavení slitin mědi

1.44.3.1 Tavení mědi pro elektrotechnické a ostatní účely

Při odlévání měděných polotovarů pro elektrotechnické účely je primárním požadavkem dodržení vysoké čistoty kovu s minimálním obsahem nežádoucích prvků, nekovových vměstků a plynů. Pro tavení čisté mědi se používají specielní metalurgické postupy a agregáty, zejména tavení ve vakuu, plazmové, elektronové a elektrostruskové tavení. Odlévají se ingoty a předlitky, které se dále zpracovávají tvářením.

Tavení mědi pro výrobu odlitků pro elektrotechnické použití - především slitiny Cu-Cr, výjimečně i jiné (např. Cu-Ag, Cu-Cd).

Postup tavení:

- Tavit v mírně redukční atmosféře pod redukčními krycími solemi.
- Teplota přehřátí asi na 1200-1250 ^{o}C
- Odplynění taveniny
- Dvoustupňová desoxidace:
  1. stupeň: 0,3-0,5 %Zn nebo asi 0,1-0,2 %CuP10
  2. stupeň: přípravky s kalciumboridem, Li, B, Si nebo Mg.
     dávkování (orientačně): 0,7 % CuSi10
     0,1-0,2 % CuB5
     0,05-0,2 %CuLi5
     0,03-0,1 % CuMg20

- Licí teploty: tloušťka stěny < 15 mm: 1250 °C
  15 - 40 mm: 1200 °C
  > 40 mm: 1150 °C

Tavení mědi standardní kvality pro účely, které nevyžadují vysokou elektrickou vodivost

- Nepříznivé slévárenské vlastnosti čisté mědi se zlepšují legováním asi 1%Sn nebo 1-2%Zn.
- Tavení v oxidační atmosféře.
- Desoxidace - 0,3 %CuP10.

1.44.3.2 Tavení bronzů

Cínové bronzy

- Tavit v mírně oxidační atmosféře, nejlépe pod oxidačními tavicími přípravky.
- Desoxidace 0,2-0,3 % CuP10 při teplotě 1100-1200 °C.
- Dolegování cínu se provádí až po předběžné desoxidaci fosforem (jinak vznik SnO_2 a velký propal cínu)
- Odplynění se provádí obvykle odplyňovacími tabletami na bázi dusíku.
- Licí teplota: tloušťka stěny < 15 mm: 1200 °C
  15 - 40 mm: 1170 °C
  > 40 mm: 1130 °C
  Při licí teplotě pod 1130-1150 °C je zvýšené nebezpečí vzniku trhlin, nad 1200 °C vyšší naplynění a nebezpečí pórovitosti.

Červené bronzy

- Tavit v oxidační atmosféře
- Desoxidace asi 0,2 %CuP10, zinek má částečně desoxidační účinek. Při P_{zbyt}> 0,02% dochází ke značné reakci mezi kovem a formou (zejména při vyšším obsahu Pb).
- Dolegování prvků Zn, Pb a Sn provádět po předběžné desoxidaci fosforem při teplotě do 1150 °C
- Přehřátí na licí teplotu, ne však nad 1200 °C
- Obvykle není nutno odplyňovat nebo přípravky na bázi dusíku
- Licí teploty: tloušťka stěny < 15 mm: 1200 °C
  15 - 40 mm: 1140 1170 °C
  > 40 mm: 1100-1120 °C
- Při tavení cínových a červených bronzů ze silně znečištěných surovin je často nutno tavit pod dostatečnou vrstvou rasantně působících rafinačních solí. Pokud je vsázka znečištěna hliníkem (zvláště při lití do pískových forem), je nutno tento prvek selektivně odstranit vhodnými specielními rafinačními prostředky.

Olověné bronzy

- Tavení v mírně oxidačním prostředí
- Problémem je velká segregace – během tavby a zejména před litím je nutno taveninu pečlivě promíchat. K segregaci dochází i během tuhnutí (zvláště u masivních odlitků)
- Používají se tavicí soli (s obsahem síry), které rovněž snižují segregaci olova
- Desoxidace 0,5 %CuMn30, CuSi nebo CuP při asi 1100 °C a následně asi 0,5 %Zn
- Teplota přehřátí až 1400 °C
- Dolegování olova případně cínu
- Licí teplota 1050-1100 °C

.

Hliníkové bronzy

- Taví se v neutrální nebo mírně oxidační atmosféře
- Po roztavení je vhodné použít specielní krycí soli pro tento typ slitin nebo např. směs drceného skla a Na_2CO_3 v poměru 1 : 1
- Pečlivé odplynění neutrálními plyny (Al bronzy jsou velmi náchylné k naplynění vodíkem)
- Zjemnění zrna specielními přípravky (na bázi Ti, Zr, B a dalších prvků)
- Licí teploty: tloušťka stěny < 15 mm: 1250 °C
  15 - 40 mm: 1200 °C
  > 40 mm: 1150 °C

Slitiny Cu – Ni

- Tavení v neutrální nebo mírně oxidační atmosféře pod krycí vrstvou obsahující dřevěné uhlí silikáty a fluorové soli, např. kryolit, nebo pod specielními prostředky. (Při vyšším obsahu niklu však slitina rozpouští uhlík a nelze používat dřevěné uhlí)
- Slitiny Cu-Ni ve zvýšené míře pohlcují vodík a kyslík
- Odplynění odplyňovacími tabletami
- Dobrá desoxidace prostředky s B, Mn, Mg nebo Li
- Licí teploty (závisí zejména na obsahu niklu):

  Slitiny s asi 20 % Ni: tloušťka stěny < 15 mm: 1400 °C
  15 - 40 mm: 1350 °C
  > 40 mm: 1280 °C

  (Slitiny s obsahem Zn, Sn a Pb mají licí teploty o 30-100 K nižší.)

  Slitiny s asi 65 % Ni: tloušťka stěny < 15 mm: 1560 °C
  15 - 40 mm: 1530 °C
  > 40 mm: 1500 °C

1.44.3.3 Tavení mosazi

Způsob tavení mosazí je určen dvěmi základními vlastnostmi zinku:

- **Teplota vypařování zinku je 905 °C**. Vysoká tenze zinkových par v oblasti tavicích teplot mosazi brání rozpouštění vodíku. Proto je možné mosaz tavit v redukční atmosféře bez nebezpečí naplynění vodíkem. **Obvykle není nutno provádět odplyňování.** Při redukčním způsobu tavení dochází k malým ztrátám zinku a ostatních prvků propalem.
- **Zinek má vyšší afinitu ke kyslíku, než měď**, proto se netvoří oxidy mědi. Oxidy zinku, případně hliníku, pokud je ve slitině obsažen, se vážou ve strusce na hladině kovu. Přesto se **většinou** provádí **mírná desoxidace fosforovou mědí nebo přípravky s lithiem.** Touto desoxidací se odstraňují oxidické pleny a zlepšuje zabíhavost.

Při tavení mosazí s obsahem prvků se silnou afinitou ke kyslíku se používají krycí a rafinační prostředky. Jako tavidlo a krycí prostředek může sloužit např. směs 30 % Na_2CO_3, 40 % CaF_2 a 30 % SiO_2., také drcené sklo, tetraboritan sodný $Na_2B_4O_7$ a jiné látky. Častěji se používají komerčně dodávané přípravky. Soli se po přidání na hladinu a roztavení ponoří ponorným zvonem ke dnu kelímku, tavenina se zamíchá a nechá asi 3 min. odstát. Struska se po vyplavání z hladiny stáhne.

Technologie tavení mosazi s hliníkem je jednoduchá. Hliník tvoří na hladině ochrannou vrstvu, která brání oxidaci. Lze tavit bez krycích prostředků, případně se používají krycí prostředky, obsahující kryolit.

U mosazí s vyšším obsahem manganu vzniká velké množství viskózní strusky a vměstků. K jejich odstranění se osvědčuje filtrace taveniny.

Při tavení z čistých komponent se nejdříve nataví měď a teprve po její desoxidaci je možné přidávat legury

Teplota likvidu běžných mosazí se pohybuje kolem 880-900 ^{o}C (tombak má teplotu likvidu asi 920 ^{o}C). Podle složení slitiny a tloušťky stěny odlitků se obvykle odlévá z licích teplot v rozmezí 950 – 1050 ^{o}C. Pro ošetřování taveniny se má používat nářadí z grafitu. Při použití ocelového nářadí dochází snadno k rozpouštění železa.

Literatura:

[1] Gruzleski, J.E., Closset, B.M.: The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys, AFS,Inc., Des Plaines, Illinois, USA, 1999, ISBN 0-87433-121-8

[2] Aluminium Casting Technology, 2nd Edition, AFS,Inc., Des Plaines, Illinois, USA, 1993, ISBN 0-87433-157-9

[3] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, Springer-Verlag, 1998, ISBN 3-540-62706-5

[4] Aluminium-Gusslegierungen, Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1988, ISBN 3-87260-092-3

[5] Bäckerud, L, Chai, G., Tamminen, J.: Solidification Characteristics of Aluminium Alloys, Vol.2, Foundry Alloys, AFS/Skanaluminium, 1990, ISBN 0-87433-119-6

[6] Gruzleski, J.E.: Microstucture Development During Metalcasting, AFS,Inc., Des Plaines, Illinois, USA, 2000, ISBN 0-87433-204-4

[7] Krone, K.: Aluminium-recycling, VDS Düsseldorf, 2000, ISBN 3-00-003839-6

[8] Požár, J.: Moderní metody výroby součástek metodami lití s krystalizací od tlakem a tváření v polotuhém stavu, Slévárenská ročenka 2000, ČSS, ISBN 80-238-5151-9

[9] Tavení, úprava taveniny a lití slévárenských slitin hliníku, Česká slévárenská společnost a nadace prof. Kority, učební texty, 1996

[10] Magnesium Alloys and their Applications, Proceedings sponsored by Volkswagen AG, Wolfsburg, 1998

[11] Kainer, K.U.: Magnesium-Alloys and Technologies, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003, ISBN 3-527-30570-X

[12] Komorová, L., Imriš, I.: Termodynamika v hutnictve, Alfa Bratislava, 1990, ISBN 80-05-00604-7

[13] Zinkberatung e.V, Technische Mitteilungen, Düsseldorf

[14] ASM Handbook

[15] Grígerová,T., Kořený,R., Lukáč,I.: Zlievárenstvo neželezných kovov, SNTL Praha, 1988

[16] Firemní materiály Foseco Austria GmbH

[17] ČSN EN 1982: Slitiny mědi na odlitky

Obsah

1 Neželezné kovy ... 1
1.1 Rozdělení slitin neželezných kovů ... 2
1.2 Způsob značení slitin neželezných kovů ... 3
2 Hliník a jeho slitiny ... 4
2.1 Historie používání hliníku a jeho slitin ... 4
2.2 Vlastnosti hliníku ... 5
2.3 Slévárenské slitiny hliníku ... 5
2.3.1 Chemické složení slitin hliníku ... 6
2.3.2 Vlastnosti slitin ... 7
2.3.2.1 Slévárenské vlastnosti ... 7
2.3.2.2 Důležité technologické vlastnosti ... 8
2.3.2.3 Mechanické vlastnosti ... 8
3 KRystalizace slitin hliníku ... 10
3.1 Strukturní složky ve slitinách hliníku ... 10
3.2 Krystalizace primární fáze α(Al) ... 12
3.2.1 Nukleace primární fáze α(Al) ... 12
3.2.2 Chemické složení fází – segregace prvků ... 13
3.2.2.1 Rozdělovací koeficient ... 13
3.2.2.2 Mechanismy distribuce prvků během tuhnutí ... 14
3.2.2.3 Koncentrační přechlazení ... 15
3.2.3 Růst primární fáze - morfologie tuhnutí ... 17
3.3 Očkování slitin hliníku ... 20
3.3.1 Princip očkování podeutektických slitin hliníku ... 20
3.3.2 Očkovací prostředky ... 22
3.3.3 Vliv očkování na vlastnosti slitin ... 22
3.4 Krystalizace eutektika ve slitinách Al - Si ... 23
3.4.1 Morfologie eutektika ve slitinách hliník – křemík ... 24
3.4.2 Modifikace eutektika slitin Al-Si ... 27
3.4.2.1 Modifikace sodíkem ... 27
3.4.2.2 Modifikace stronciem ... 28
3.4.2.3 Modifikace antimonem ... 29
3.4.2.4 Přemodifikování slitiny ... 30
3.4.3 Kontrola úrovně modifikace ... 30
3.4.4 Vliv modifikace na vlastnosti hliníkových slitin ... 32
3.5 Krystalizace nadeutektických siluminů ... 33
3.5.1 Struktura nadeutektických siluminů ... 33
3.5.2 Očkování nadeutektických siluminů ... 33
3.6 Přísadové prvky a nečistoty ve slitinách Al-Si ... 34
3.7 Slitiny Al - Cu ... 40
3.8 Slitiny Al - Mg ... 41
3.9 Slitiny Al – Zn ... 42
4 přehled slévárenských slitin hliníku ... 43
4.1 Značení slitin hliníku na odlitky ... 43
4.2 Charakteristika používaných typů slitin hliníku ... 44
4.2.1 Binární slitiny Al – Si ... 44
4.2.2 Slitiny Al–Si-Cu ... 45
4.2.3 Slitiny Al-Si-Mg ... 46
4.2.4 Charakteristické oblasti použití některých slitin Al-Si ... 46
4.2.5 Nadeutektické siluminy ... 49
4.2.6 Slitiny Al-Cu ... 49
4.2.7 Slitiny Al-Mg ... 50
4.3 Vlastnosti a použití - výběr z norem ČSN EN 1706 ... 50

5 Fyzikální a chemické procesy při tavení slitin hliníku 56
5.1 Vměstky ve slitinách hliníku 56
5.1.1 Vliv vměstků na vlastnosti hliníkových slitin 56
5.1.2 Vznik vměstků 57
5.1.3 Vměstky tvořené intermetalickými fázemi 60
5.2 Rafinace taveniny 61
5.2.1 Krycí přípravky 61
5.2.2 Rafinační přípravky 61
5.2.3 Filtrace 62
5.2.4 Kontrola čistoty slitin 63
5.3 Plyny ve slitinách hliníku 64
5.3.1 Zdroje vodíku 64
5.3.2 Rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách 64
5.3.3 Vznik plynových dutin v odlitcích 66
5.3.4 Vliv rychlosti ochlazování a metalurgického zpracování kovu na pórovitost 68
5.3.5 Důsledky pórovitosti na vlastnosti odlitků 69
5.4 Odplyňování hliníkových slitin 69
5.4.1 Princip odplyňování vakuováním 70
5.4.2 Princip odplyňování probubláváním plyny 71
5.4.3 Způsoby odplyňování aktivními a neutrálními plyny 72
5.4.4 Měření naplynění taveniny 74
5.4.4.1 Metoda první bubliny 75
5.4.4.2 Metoda měření hustoty kovu – metoda dvojího vážení 76
5.4.4.3 Metody přímého měření obsahu vodíku v tavenině (metoda Telegas, Alscan, Chapel a další) 77
6 Tavení slitin hliníku 79
6.1 Energetická náročnost tavení 80
6.2 Tavicí a udržovací pece 81
6.2.1 Požadavky na tavicí pece 81
6.2.2 Vytápění pecí 82
6.2.3 Druhy pecí 82
6.2.3.1 Kelímkové pece 82
6.2.3.2 Komorové pece 83
6.2.3.3 Šachtové pece 84
6.2.3.4 Vanové pece 84
6.2.3.5 Dávkovací pece 85
6.3 Úprava chemického složení taveniny 86
6.4 Obecné zásady tavení 86
7 Kontrola kvality slitin 88
7.1 Provozní kontrola taveniny 88
7.1.1 Kontrola chemického složení 88
7.1.2 Měření teploty 88
7.1.3 Technologické zkoušky slitin 89
7.1.4 Termická analýza 91
7.2 Laboratorní a přejímací zkoušky 95
7.2.1 Mechanické zkoušky 95
7.2.2 Metalografie 96
8 Technologie výroby odlitků 98
8.1 Odlévání do netrvalých forem 99
8.1.1 Lití do pískových forem 99
8.1.2 V- proces 99
8.1.3 Lití do skořepinových forem 99
8.2 Odlévání do kovových forem 99
8.2.1 Gravitační lití do kovových forem 99
8.2.2 Tlakové lití 101
8.2.3 Nízkotlaké lití 103
8.2.4 Lití s krystalizací pod tlakem - Squeeze Casting 104

8.2.5 Lisování v polotuhém stavu – Thixocasting ... 105
8.3 Kontrola odlitků a opravy vad ... 107
8.3.1 Impregnace odlitků ... 107
8.3.2 Izostatické lisování ... 108
8.3.3 Opravy zavařováním ... 108
9 Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku ... 109
9.1 Vytvrzování ... 109
9.2 Žíhání ... 114
9.2.1 Žíhání na odstranění vnitřního pnutí ... 114
9.2.2 Stabilizační žíhání ... 114
9.2.3 Žíhání na měkko ... 114
9.2.4 Homogenizační žíhání ... 114
9.2.5 Označování režimu tepelného zpracování ... 115
10 Slitiny hořčíku ... 116
10.1 Slévárenské slitiny hořčíku ... 117
10.2 Tavení slitin hořčíku ... 119
10.2.1 Praktické zásady při tavení slitin hořčíku ... 121
10.3 Technologie výroby odlitků ... 122
11 Slitiny zinku ... 123
11.1 Slévárenské slitiny zinku ... 123
11.2 Slévárenské vlastnosti ... 125
11.3 Tavení ... 125
11.4 Technologie odlévání ... 125
11.5 Obrábění a povrchová ochrana ... 126
12 Slitiny mědi ... 127
12.1 Slévárenské slitiny mědi ... 127
12.2 Bronzy ... 128
12.2.1 Cínový bronz ... 128
12.2.2 Cíno-olověný bronz ... 130
12.2.3 Hliníkový bronz ... 130
12.2.4 Olověný bronz ... 132
12.2.5 Manganový bronz ... 133
12.2.6 Křemíkový bronz ... 133
12.2.7 Niklový bronz (mědinikl) ... 133
12.2.8 Chromová měď ... 133
12.3 Mosaz ... 134
12.3.1 Struktura mosazí ... 135
12.3.2 Vlastnosti mosazí ... 136
12.4 Tavení slitin mědi ... 136
12.4.1 Plyny ve slitinách mědi ... 137
12.4.2 Desoxidace slitin mědi ... 139
12.4.3 Technologie tavení slitin mědi ... 141
12.4.3.1 Tavení mědi pro elektrotechnické a ostatní účely ... 141
12.4.3.2 Tavení bronzů ... 142
12.4.3.3 Tavení mosazi ... 143