



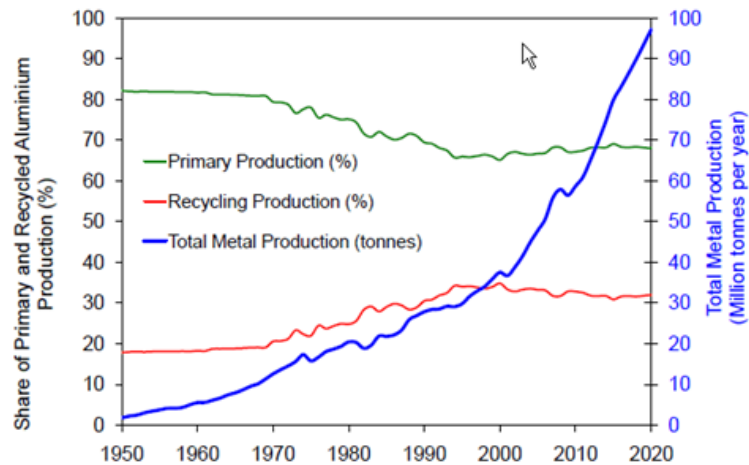
Slévárenské materiály a progresivní technologie

Metalurgie slitin hliníku

?

Hliník a jeho slitiny

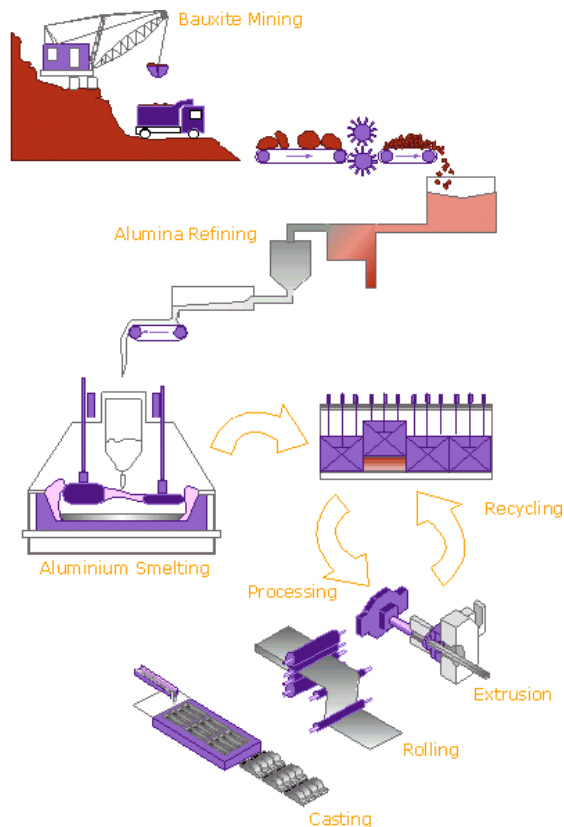
- Hliník - byl objeven až koncem 18. století;
- 1825 - laboratoř
- 1867 - světová výstava v Paříži – tyč 1 kg / 2000 Fr;
- 1886 - elektrolytická výroba patentována Heroldem a Hallem;
- 1888 - průmyslová výroba;
- 1900 - na světě vyrobeno 5,7 tun čistého hliníku;



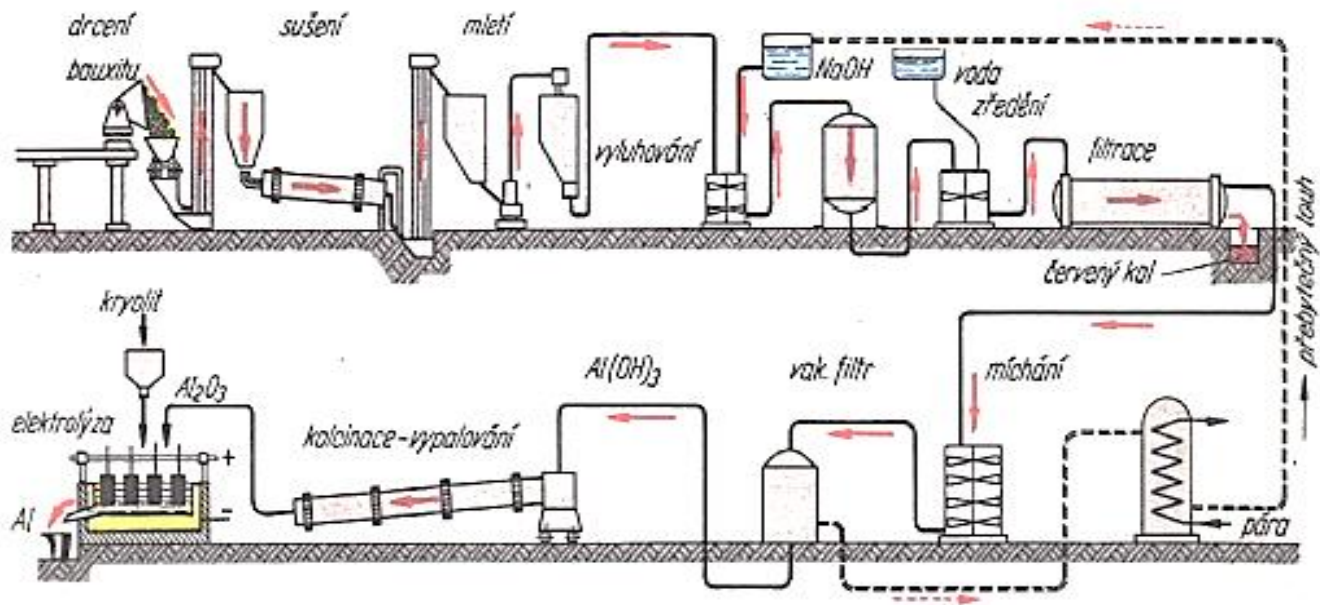
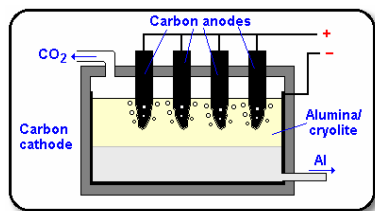
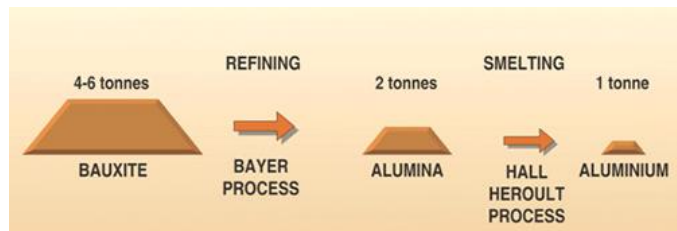
Podíl primární a sekundární výroby hliníku

Hliník a jeho slitiny

- vyskytuje se v zemské kůře (8 %) a svým množstvím zaujímá třetí místo hned za kyslíkem a křemíkem;
- vázán ve sloučeninách bauxitu, kryolitu, korundu, kaolinu...
- používá se bauxit - obsah Al_2O_3 v něm bývá kolem 50 %;
- výroba Al_2O_3 z bauxitu - mletí, chemické zpracování loužením (redukce pomocí vodného roztoku NaOH) a následným žiháním (1200 – 1300°C);
- surový hliník je vyráběn elektrolýzou Al_2O_3 rozpuštěného v roztavených fluoridech (Na_3AlF_6) při teplotě 950-970 °C;
- získaný Al má vysokou čistotu až 99,9 %.
- výroba je energeticky náročná - k výrobě 1 t Al se spotřebuje 4 t bauxitu, cca 20 GJ tepelné energie a 14 MWh elektrické energie;



Hliník a jeho slitiny



Hliník a jeho slitiny

- **Slitiny prvního tavení** – v hutích z čistého Al + legující prvky
- **Slitiny druhého tavení** - cca 3,5x méně energie než na primární výrobu;
 - výkup šrotu, třísek, stěrů;
 - „sekundární slitiny“ – větší množství přísadových prvků (Sn, Pb, V, Cr, Ca, P) a nečistot.
 - třídění, odstředování, sušení, odmagnetování (odstranění Fe),
 - tavení ve sklopných rotačních pecích,
 - přelití do udržovacích pecí – rafinace, odplynění, dolegování,
 - odlévání – licí kolo – bloky.



Hliník a jeho slitiny

- **Slitiny** - binární – základní + hlavní přísadový prvek;
 - ternární – základní + hlavní + 1 vedlejší přísadový prvek;
 - vícesložkové slitiny – základní + hlavní + několik vedlejších přísadových prvků.
- **Volba chemického složení:** posouzení nároků na užité vlastnosti a způsob výroby.
 - technologické vlastnosti,
 - mechanické vlastnosti,
 - chemické vlastnosti,
 - možnost povrchové úpravy,
 - možnost tepelného zpracování, atd.

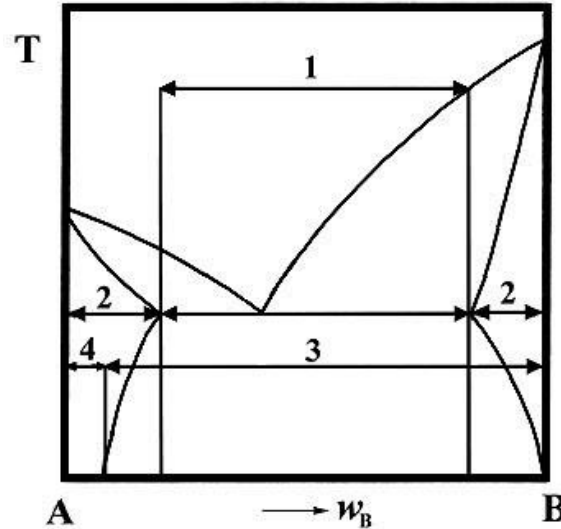
Hliník	
Teplota tání	660 °C
Hustota	2700 kg.m ⁻³
Měrná tepelná kapacita	900 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Skupenské teplo tání	396 000 J.kg ⁻¹
Tepelná vodivost	235 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Pevnost v tahu	≤ 100 MPa
Tvrdost	20 - 30 HB

Hliník a jeho slitiny

- Slitiny = **základní prvek** +
- **hlavní přísadový prvek** – vymezují typ slitiny – Si, Cu, Mg, Zn, Mn;
Al-Si = „siluminy“; Al-Cu = „duraly“; Al-Mg = „hydronalia“.
- **vedlejší přísadové prvek** - např. Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, atd.
 - příznivě ovlivňují některé vlastnosti daného typu slitiny - např. mechanické vlastnosti, obrobitelnost, tepelné zpracování,
 - kompenzují nepříznivý účinek některých doprovodných prvků,
- **doprovodné prvky** - nebyly přidány záměrně = považují se za nečistoty – obsah bývá limitován jejich max. přípustným obsahem (zhoršují mechanické, chemické nebo technologické vlastnosti);
 - nepříznivě ovlivňují vlastnosti základního kovu, ve kterém jsou rozpuštěny, nebo tvoří vlastní fáze.

Hliník a jeho slitiny

- Slitiny - *nevytvrditelné*;
- *vytvrditelné*;
- Slitiny - *pro tváření*;
- *pro odlévání*;

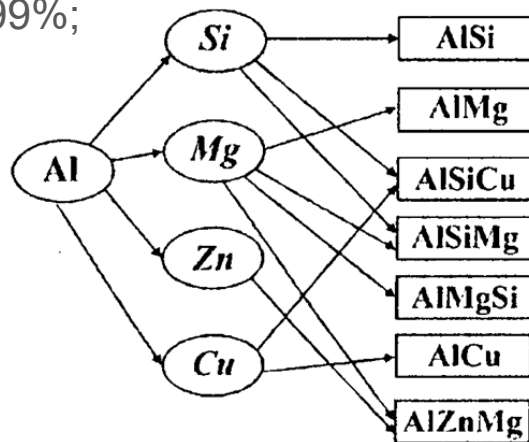


- 1 - slévarenské slitiny;
- 2 - slitiny určené k tváření;
- 3 - vytvrditelné slitiny;
- 4 - nevytvrditelné slitiny.

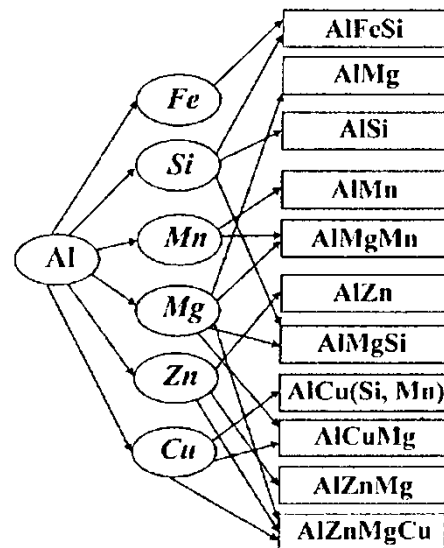
- Slitiny pro odlévání = EN AC-XXXXX = ČSN EN 1706 (číselné, chemickými značkami),
- Slitiny pro tváření = EN AW - XXXX = ČSN EN 573-1 až 3 (číselné, chemickými značkami).

Hliník a jeho slitiny

- 10000 – technicky čistý hliník min. 99%;
- 20000 – slitiny AlCu;
- 30000 – slitiny AlMn;
- 40000 – slitiny AlSi;
- 50000 – slitiny AlMg;
- 60000 – slitiny AlMgSi;
- 70000 – slitiny AlZn;
- 80000 – slitiny Al s různými prvky.



Slévárenské slitiny



Slitiny pro tváření

Slévárenské slitiny:

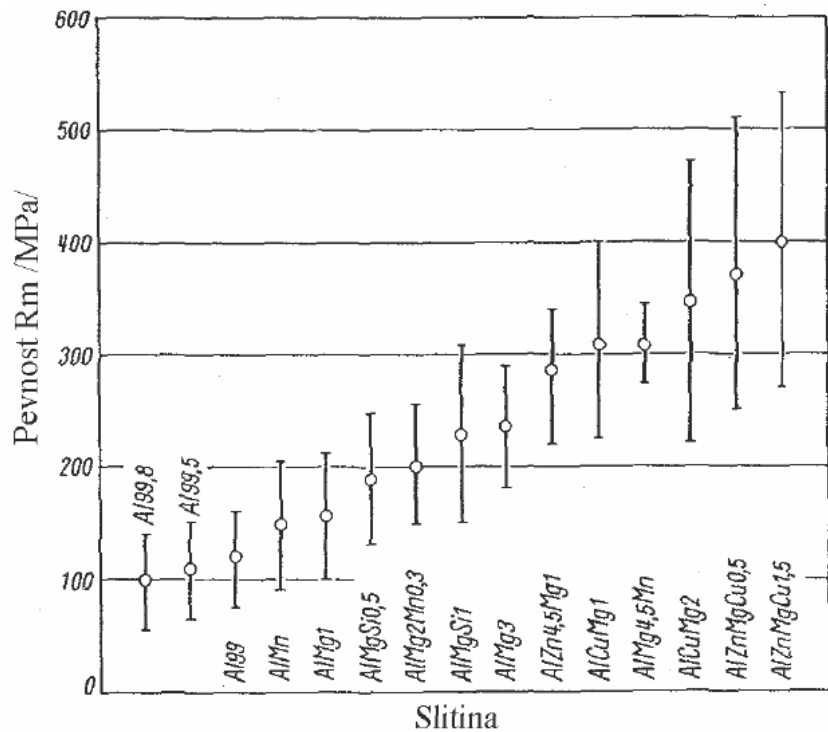
- Al-Si (siluminy),
- Al-Mg (hydronalia),
- Al-Cu (duraly),
- Al-Zn.



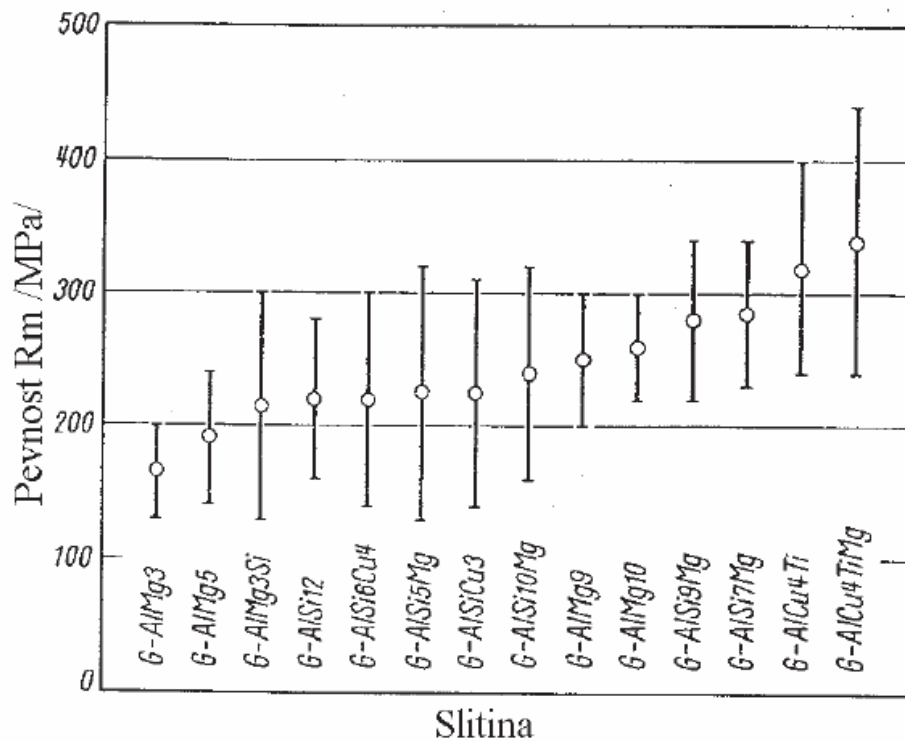
Hliník a jeho slitiny

- **Přísady ovlivňující užité vlastnosti slitin hliníku:** - Cu, Mg, Mn, Zn, Si, Ni, atd.
- **Cu** - do 5 % - zlepšení mechanických vlastností = zvyšuje pevnost a tvrdost (CuAl_2);
 - zlepšení obrobiteľnosti x zhoršuje odolnost korozi a tvárnost;
- **Mg** - do 8 % (AW), do 11 % (AC) - zlepšuje pevnost, vytvrditelnost (Mg_2Si); odolnost korozi;
- **Mn** - do 2 % - zlepšuje pevnost, tvárnost, odolnost korozi,
 - zhoršuje slévatelnost (více smršťují);
- **Si** - do 1 % (AW), až 25 % (AC) - zvyšuje pevnost, odolnost korozi a slévatelnost;
- **Zn** - do 8 % pro tváření a do 6 % pro odlévání - zvyšuje pevnost a snižuje houževnatost;
 - zhoršuje odolnost korozi;
- **Ni** - do 2 % - zvyšuje pevnost, houževnatost i za vyšších teplot;
 - ve slitinách s Cu zvyšuje odolnost korozi;
- **Fe** - příměs hliníku = snižuje houževnatost,
 - slitiny k tváření = do 0,5 % Fe (výjimečně do 1,6 %), slévárenské slitiny do 1 % Fe;

Hliník a jeho slitiny



Porovnání vybraných slitin pro tvářeni z hlediska pevnosti



Porovnání vybraných slitin pro odlévání z hlediska pevnosti

Hliník a jeho slitiny

- ***Mechanické vlastnosti:*** podle typu slitiny, způsobu odlévání a tloušťky stěny:
 - běžné slitiny - v litém stavu mez pevnosti 150 - 250 MPa (vytvrzování vyšší o 30-50 %);
 - tvrdost Al-Mg = 50 HB; Al-Si v lité stavu 60-80 HB a po vytvrzení až 100 HB;
 - tažnost 1 - 4 %, lze zvýšit modifikací (až o 200 %);
 - za zvýšených teplot: - Al-Si = pokles už při teplotách 200 °C;
 - Al-Cu = stabilita do 250 °C;
 - slitiny Al = maximální provozní teplota 350 °C.
- ***Chemické vlastnosti:***
 - odolnost korozi - povětrnostním vlivům - velmi dobrá,
 - vodné roztoky - podle pH elektrolytu (výborná u pH 4,5 – 8,5; u zásad omezeně),
 - na vzduchu a ve vodě od chemicky nejodolnějších k nejméně odolným →
Al; Al-Mn; Al-Mg; Al-Mg-Si; Al-Si, Al-Zn-Mg; Al-Zn-Mg-Cu; Al-Cu-Mg; Al-Cu.

Hliník a jeho slitiny

- ***Technologické vlastnosti:***
 - velmi dobrá tvářitelnost za tepla i za studena;
 - dobrá svařitelnost v ochranných atmosférách;
 - horší obrobiteľnosť = vysoká houževnatost = čistý Al horší než u slitin;
 - slitiny legované Cu, Mg, Zn = dobře obrobiteľné;
 - automatové slitiny - legování Pb, Bi, Sb, Cd → AlMgSiPb, AlCu₄PbMg, AlCu₆BiPb.
 - obtížné leštění – maže se;
 - dobrá slévateľnosť: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Al-Zn;

Slévárenské slitiny hliníku

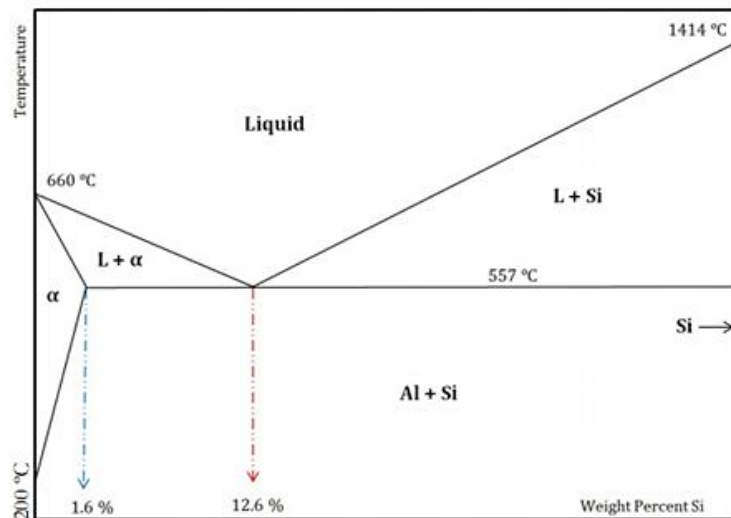
Slévárenské slitiny hliníku dle ČSN EN 1706

Skupina slitin	Označení skupiny slitin	
	Číselné	Chemickými značkami
AlCu	EN AC - 21xxx	EN AC - AlCu4
AlSiMgTi	EN AC - 41000	EN AC - AlSi2MgTi
AlSi7Mg	EN AC - 42xxx	EN AC - AlSi7Mg
AlSi10Mg	EN AC - 43xxx	EN AC - AlSi10Mg
AlSi	EN AC - 44xxx	EN AC - AlSi12
AlSi5Cu	EN AC - 45xxx	EN AC - AlSi6Cu4
AlSi9Cu	EN AC - 46xxx	EN AC - AlSi9Cu3
AlSi(Cu)	EN AC - 47xxx	EN AC - AlSi12(Cu)
AlSiCuNiMg	EN AC - 48xxx	EN AC - AlSi12CuNiMg
AlMg	EN AC - 51xxx	EN AC - AlMg
AlZnSiMg	EN AC - 71100	EN AC - AlZn10Si8Mg

Skupina slitiny	Označení slitin			Stav	Mechanické vlastnosti				Stav	Mechanické vlastnosti			
	Číselné	Chemickými značkami			Rm [MPa]	Rp _{0,2} [MPa]	A [%]	HBW		Rm [MPa]	Rp _{0,2} [MPa]	A [%]	HBW
AlSiMgTi	EN AC - 41000	EN AC - AlSi2MgTi		S, F	140	70	3	50	S, T	240	180	3	85
				K, F	170	70	5	50	K, T	260	180	5	85
AlSi7Mg	EN AC - 42000	EN AC - AlSi7Mg		S, F	140	80	2	50	S, T	240	180	1	75
				K, F	170	90	2,5	55	K, T	240-260	200-220	1.2	80-90
	EN AC - 42100	EN AC - AlSi7Mg0,3							S, T	230	190	2	75
									K, T	250-290	180-210	4.8	80-90
EN AC - 42200	EN AC - AlSi7Mg0,6							S, T	250	210	1	85	
								K, T	290-320	210-240	3.6	90-100	
AlSi10Mg	EN AC - 43000	EN AC - AlSi10Mg (a)	239	S, F	150	80	2	50	S, T	220	180	1	75
				K, F	180	90	2,5	55	K, T	240-260	200-220	1.2	80-90
	EN AC - 43100	EN AC - AlSi10Mg (b)	239	S, F	150	80	2	50	S, T	220	180	1	75
				K, F	180	90	2,5	55	K, T	240-260	200-220	1.2	80-90
	EN AC - 43200	EN AC - AlSi10Mg(Cu)	233	S, F	160	80	1	50	S, T	220	180	1	75
				K, F	180	90	1	55	K, T	240	200	1	80
	EN AC - 43300	EN AC - AlSi9Mg							S, T	230	190	2	75
									K, T	250-290	180-210	4.6	80-90
EN AC - 43400	EN AC - AlSi10Mg(Fe)	239 D	D, F	240	140	1	70						
EN AC - 43500	EN AC - AlSi10MnMg		D, F	250	120	5	65	D, T5	270	150	4	80	
AlSi	EN AC - 44000	EN AC - AlSi11		S, F	150	70	6	45					
				K, F	170	80	7	45					
	EN AC - 44100	EN AC - AlSi12 (b)	230	S, F	150	70	4	50					
				K, F	170	80	5	55					
	EN AC - 44200	EN AC - AlSi12 (a)	230	S, F	150	70	5	50					
				K, F	170	80	6	55					
	EN AC - 44300	EN AC - AlSi12(Fe) (a)	230 D	D, F	240	130	1	60					
				S, F	170	80	4	50					
EN AC - 44400	EN AC - AlSi9		K, F	180	90	5	55						
			D, F	220	120	2	55						
EN AC - 44500	EN AC - AlSi12(Fe) (b)		D, F	240	140	1	60						

Slévárenské slitiny Al-Si

- **Slitiny** - podeutektické = 4,5-10 % Si;
 - eutektické = 10-13 % Si;
 - nadeutektické = nad 13 %.

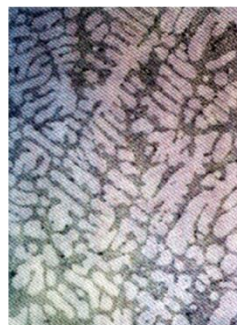


Binární rovnovážný diagram Al-Si

AlSi5Mg



AlSi7Mg



AlSi9Mg



AlSi12Mg



Eutektická fáze (šedá)

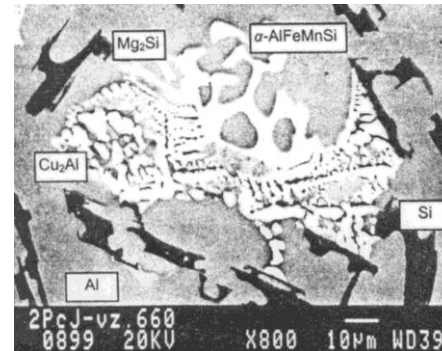
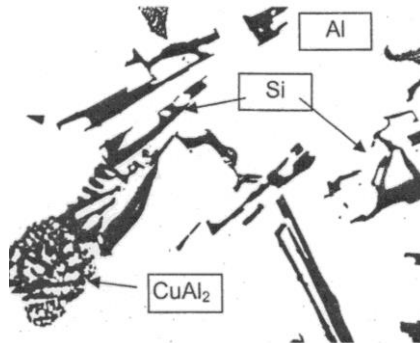


Primární α-fáze (bílá)



Slévárenské slitiny Al-Si

- **Křemík** – zlepšuje slévárenské vlastnosti;
- **Měď** – do 5 % - po vytvrzení zvyšuje pevnost; zlepšuje obrobitelnost,
- částečně zhoršuje slévatelnost, snižuje korozní odolnost,
- **Hořčík** – 0,3 - 0,7 % - po vytvrzení zlepšuje pevnost;
- nemá vliv na slévárenské vlastnosti a nesnižuje korozivzdornost;
- **Zinek** - do 3 % - není typická legura - zlepšuje zabíhavost a obrobitelnost;
- u tlakového lití – snižuje lepení kovu na formu;

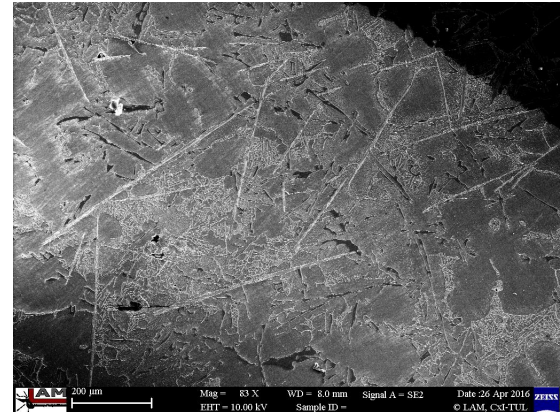
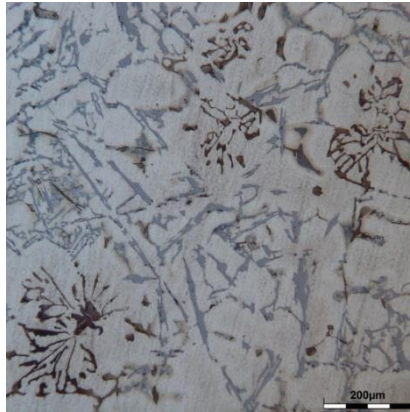
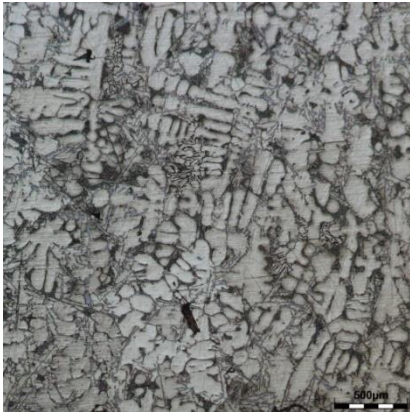


Slévárenské slitiny Al-Si

- **Nikl** - zhoršuje slévárenské vlastnosti, téměř žádný vliv na obrobiteľnosť a odolnosť korozi;
 - tvoří intermetalickou fázi Al_3Ni (640°C);
 - za přítomnosti Cu a Fe = vícesložkové fáze = dobrá tepelná stabilita;
 - 1-2 % Ni = dobré mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot;
 - slitiny s Ni = menší součinitel tepelné roztažnosti (písty a hlavy válců motorů).
- **Mangan** - kompenzace vlivu Fe → obsah Mn = $\frac{1}{2}$ obsahu Fe;
 - netvoří vlastní fáze = vstupuje do fází Fe a mění jejich morfologii.
- **Titan** - v α (Al) je rozpustný do obsahu asi 0,2 %;
 - při vyšším obsahu - tvrdé krystaly Al_3Ti - vylučují se ve shlucích = problémy při obrábění;
 - největší význam = očkovací účinek - Al_3Ti vytváří krystalizační zárodky pro vznik primární α (Al) fáze = dochází ke zjemnění zrna α (Al);
 - slitiny Al se legují titanem cca 0,1 až 0,2 % a je i součástí očkovacích solí a předslitin;

Hliník a jeho slitiny

- **Železo** - obvykle nečistota;
 - nepříznivý účinek na mechanické vlastnosti, snižuje odolnost proti korozi.
 - vysoká rozpustnost Fe v tavenině, v tuhé fázi nemá téměř žádnou rozpustnost = velmi nízký rozdělovací koeficient = už při malém obsahu tvoří intermetalické fáze.
 - jehlicovitá fáze β -AlFeSi (Al_5FeSi) a fáze „čínské písmo“ α -AlFeMnSi ($\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$).
 - max. do 0,6 % Fe, u dynamicky namáhaných max. 0,15 % Fe, nad 0,4 % kompenzace Mn;
 - tlakové lití = 1 % – nižší sklon k nalepování taveniny na líc formy.



Další typy slitin hliníku

- **Al – Cu** = slévárenské slitiny = 4 – 5 % Cu = vytvrditelné;
 - vysokopevné slitiny – R_m až nad 400 MPa; tažnost a houževnatost – 2x vyšší než u AlSi;
 - lze využívat i za vyšších teplot;
 - velmi špatné slévárenské vlastnosti – široký interval tuhnutí;
 - špatná odolnost proti korozi;
- **Al – Mg** - typy slitin 3, 5, 9 % - vyšší Mg = širší pásmo tuhnutí = horší slévárenské vlastnosti;
 - sklon k naplynění;
 - špatné mechanické vlastnosti (R_m nižší než u Al-Si, tažnost vyšší (PF >3 %, KF >5 %));
 - při T nad 100°C zhoršení mechanických vlastností;
 - vynikající obrobiteľnosť a leštitelnost, vysoká odolnosť proti korozi (zásady a mořská voda);
 - nevytvrditelné, pokud obsahují 1% Si = Mg_2Si – vytvrzování.
 - odlévání - gravitační do pískových a kovových forem,
 - slitiny s obsahem 9 % Mg pouze tlakově;

Další typy slitin hliníku

- **Al – Zn** - 5 – 7 % Zn a do 1% Mg;
 - samovolně vytvrditelné za studena,
 - po době 20 - 30 dnů = pevnost 250 MPa, tažnost > 5 %, tvrdost 70 HB.
 - vysoká rozměrová stabilita;
 - dobrá odolnost korozi;
 - dobrá obrobitelnost;
 - slévárenské vlastnosti – špatné = sklon k tvorbě staženin a trhlin.
 - Dle ČSN EN 1706 AlZn10Si8Mg - gravitační odlévání PF a KF - téměř se nepoužívá.
 - Rheinfelden - Unifont-90 (AlZn10Si8Mg) pro gravitační a Unifont-94 (AlZn10Si8Mg) pro tlakové lití.

Metalurgie slitin hliníku

- **Kvalita taveniny** - kvalita vsázkových surovin,
 - typ a konstrukce tavících a udržovacích pecí,
 - způsob vedení metalurgického procesu.
- **Tavenina** - požadované chemické složení,
 - nízký obsah vměstků,
 - nízké naplynění.
- **Vsázka** - housky slitiny (1. nebo 2. tavení) a vratný materiál (vtoky, zmetky, nálitky),
 - důležitý je jeho tvar a znečištění - vhodné - malý povrch vůči objemu (oxidy).



Tavení slitin hliníku

Zásady:

- nové vyzdívky a kelímky dobře vysušené,
- vyčištěné pece,
- suchá vsázka (zbavená mastnoty a hrubých nečistot),
- vsázka skladována v suchu (vysušení a předehtání),
- ošetření náradí,
- rychlé natavení (zbytečně nepřehřívat),
- suché tavící a rafinační soli,
- rafinace a odplynění taveniny,



Metalurgie slitin hliníku

- **Energetická náročnost tavení:** $Q = m \cdot [(c_S \cdot (T_S - T_{20}) + L_{KR} + c_L \cdot (T_{lití} - T_L)]$

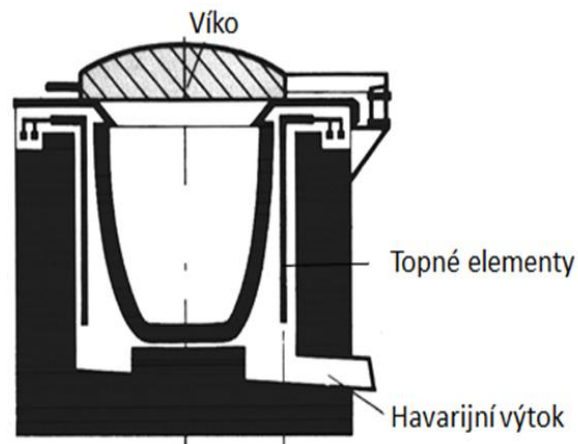
Materiál	Teplota tání [°C]	Měrná tepelná kapacita [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]		Skupenské teplo tání [kJ.kg ⁻¹]
		v tuhém stavu	v tekutém stavu	
Al	660	1,05	1,09	396
Mg	650	1,17	1,32	372
Si	1410	0,84	2,1	1411
Cu	1083	0,42	0,5	210
Pb	327	0,12	0,15	25
Zn	420	0,38	0,46	100
Sn	232	0,21	0,25	61
Fe	1539	0,67	0,71	277

Kov - slitina	Teplota [°C]	Tepelný obsah [kJ.kg ⁻¹]
Al	750	1150
AlSi9	750	1260
AlSi12	750	1325
Mg	750	1090
Cu	1150	690
Zn	450	270
ocel	1500	1400
litina	1400	1300

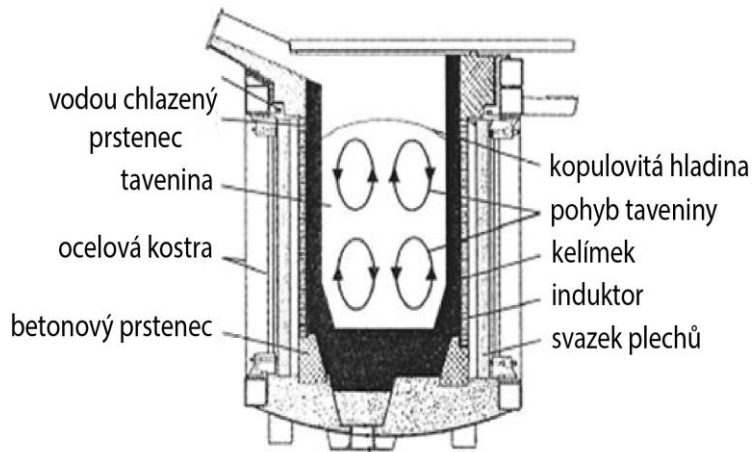
- **Tavící pece** – ohřev materiálu na lící teplotu, úprava chemického složení, rafinace, odplynění.
- **Udržovací pece** – udržování teploty taveniny - požadavky: - malá oxidace a naplynění taveniny a zamezení místnímu přehřívání taveniny.

Tavení slitin hliníku

- *Al - teoretická spotřeba pro roztavení a přehřátí o 100 °C ~ 1,06 MJ/kg.*
- *Elektrické pece - odporové ~ 470 kW/t materiálu, malý výkon (75 - 300 kg Al/h),
- indukční ~ 500 kW/t materiálu (400 – 3000 kg Al/h).*



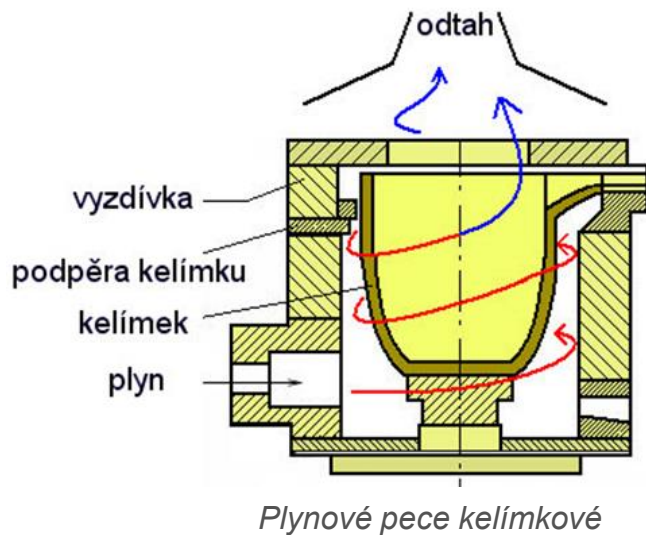
Odporové pece kelímkové



Indukční pece kelímkové

Tavení slitin hliníku

- **Plynové pece** – kelímkové ~ 170 m³/t materiálu, šachtové ~ 100 m³/t materiálu



Plynové pece šachtové

Slévárenské slitiny hliníku

- Slitiny hliníku – specifické fyzikální a chemické vlastnosti



- *sklon ke vzniku nekovových vměstků*
- *vysoká rozpustnost vodíku v tavenině*



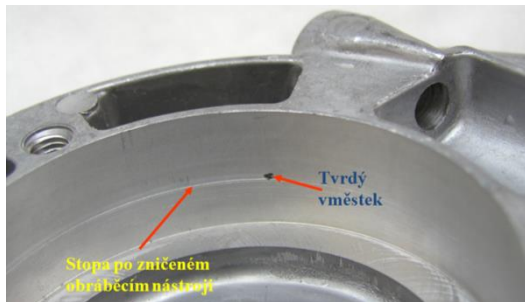
Vměstky

- **Kovové vměstky** – nedokonalým rozpuštěním kovových přísad nebo rozstříkem kovu,
- **Nekovové vměstky** – nekovové částice - vneseny nebo se vytvořily chemickými reakcemi,
- **Intermetalické fáze** - chemické reakce kovových složek nebo vícesložková eutektika.

- **Vměstky** - snížení tekutosti a dosazovací schopnosti,
 - snížení mechanických vlastností odlitků,
 - zvýšení plynové porézity,
 - zhoršení těsnosti odlitků,
 - zhoršení obrobitelnosti,
 - zhoršení korozivzdornosti.

Nekovové vměstky

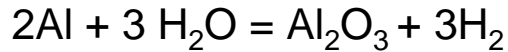
- **Velikost** – od několika μm až po jednotky mm.
- **Exogenní** – vnášeny z vnějšku - znečištění vsázky, poškozené vyzdívky, zbytky nezreagovaných rafinačních solí atd.
- **Endogenní** – chemické reakce prvků, reakce s prostředím, metalurgické přípravky = oxidy, karbidy, chloridy, boridy atd.
- Shluky vměstků na hladině taveniny – stěr.
- Vměstky v tavenině - tvar - **film**, **částice** nebo **shluky**.



Vměstky viditelné na obrobené ploše

Nekovové vměstky - oxidy

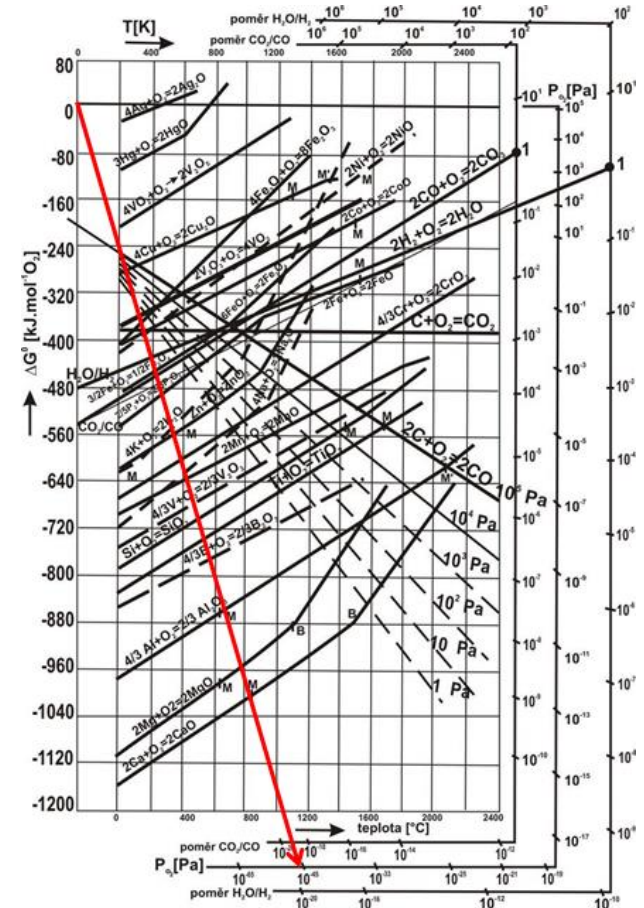
- Vysoká afinita hliníku ke kyslíku → Al_2O_3 ,
- zdrojem kyslíku - atmosférický kyslík a vlhkost.



- Po roztavení Al vzniká:



- Slitiny Al nepřehřívát nad teplotu nad 780°C!
- Al_2O_3 – teplota tání 2050°C → v tavenině v tuhém stavu.



Nekovové vměstky - oxidy

- **Legury** - významný vliv na množství oxidů a složení oxidické vrstvy.
- **Prvky s nízkou afinitou ke kyslíku** (např.: Cu, Fe, Zn atd.) - neoxidují selektivně - zůstávají ve struktuře oxidů Al_2O_3 ;
- **Prvky s vysokou afinitou ke kyslíku** (např.: Na, Sr, Ca atd.) - selektivní oxidace = tvoří vlastní sloučeniny nebo komplexní oxidy s hliníkem - vážou se do strusky nebo v plynné formě unikají z taveniny.
- Rychlost a množství oxidů vzrůstá s teplotou.
- Prvky s vyšší afinitou ke kyslíku než má hliník – propal.

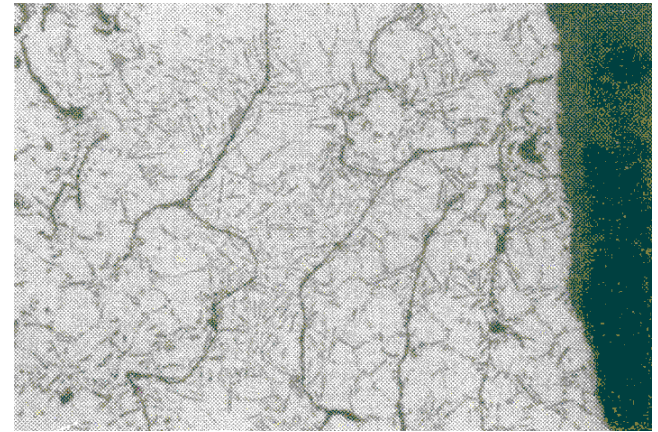
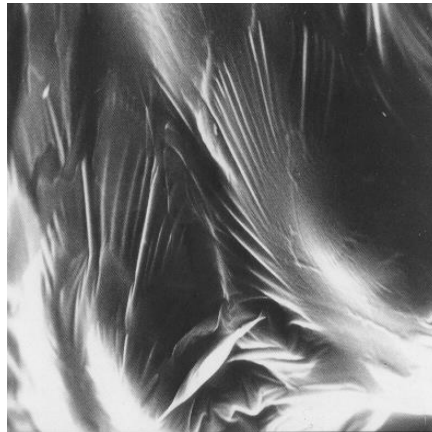
Cu – Pb – Ni – Sn – Fe - Zn – Na – Mn – Si – Ti – **Al** – Li – Mg – Be – Ca



Rostoucí afinita ke kyslíku za teploty 700°C.
(podle velikosti volné entalpie oxidace)

Nekovové vměstky - oxidy

- Souvislá vrstva oxidů taveninu chrání - Pilling-Betworthův poměr > 1 .
- Porušení souvislé vrstvy - turbulence během přelévání tekutého kovu, plnění dutiny formy = oxidace pokračuje.



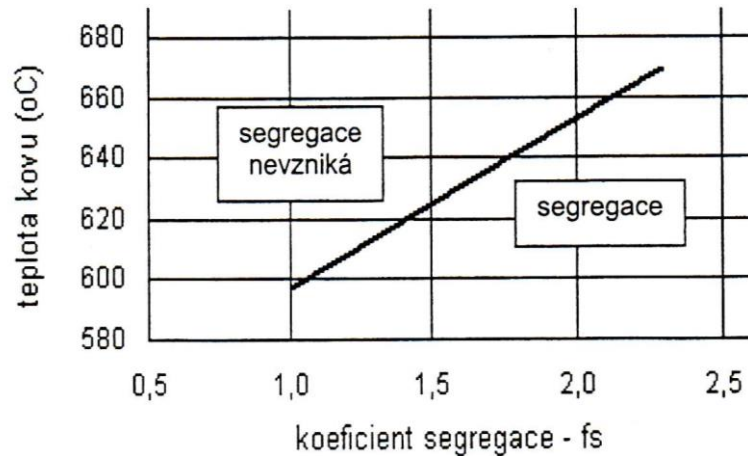
Oxidické blány (pleny)

Nekovové vměstky – neoxidické vměstky

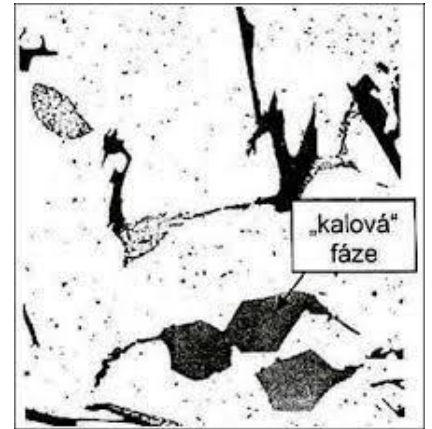
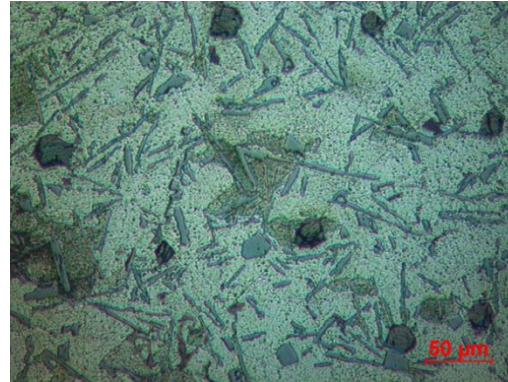
- **Karbidy** - reakcí hliníku s uhlíkem = vytváří jemné kompaktní částice, které u běžných odlitků nemají tak negativní vliv jako oxidy.
 - Zdrojem karbidů hliníku - primární hliník, reakce taveniny s nátěry, mastnotou nebo jinými organickými sloučeninami ze znečištěné vsázky, nebo při odlévání reakcí s postříky forem.
- **Chloridy, fluoridy** - pokud se při tavení používají prostředky obsahující chlor nebo fluor.
 - Jedná se o nezreagované podíly rafinačních solí nebo o nedokonale stáhnuté produkty rafinačních reakcí.

Nekovové vměstky – „kal“

- **Intermetalické fáze – „kal“** – vylučuje se v tavenině - slitiny s vyšším obsahem Fe, Mn a Cr při nízkých udržovacích teplotách.
 - vysoká hustota – $3500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ – sedimentují,
 - extrémně vysoká tvrdost 800 až 1000 HV – zhoršení obrobiteľnosti,
 - nelze znovu roztavit - zamezit jeho vzniku nebo filtrace při přelévání,

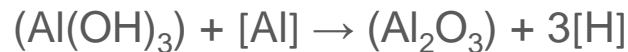
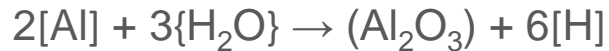


$$f_s = \%Fe + 2 \cdot \%Mn + 3 \cdot \%Cr$$



Naplynění taveniny

- **Kyslík** - téměř se nerozpouští – stykem s taveninou $\rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$,
- **Dusík** - v důsledku pevnosti vazby v molekule N_2 – nízká rozpustnost ve většině kovů,
 - v hliníku se nerozpouští - při teplotě kolem 900°C s ním tvoří nitrid AlN \rightarrow v tavenině je jako tuhý vměstek,
 - při teplotách $700 - 750^\circ\text{C}$ je dusík vůči hliníku netečný = inertní plyn.
- **Vodík** - jediný plyn, jehož rozpustnost v tavenině hliníku je technicky významná,
 - zdroj – vlhkost (pecní atmosféra, vsázka, vyzdívky, rafinační soli, atd.).



- Vodní pára - reaguje s kovovým Al, nikoliv s oxidy \rightarrow neporušená vrstva oxidů – poměrně dobře chrání taveninu před dalším naplyněním do teploty cca 900°C .

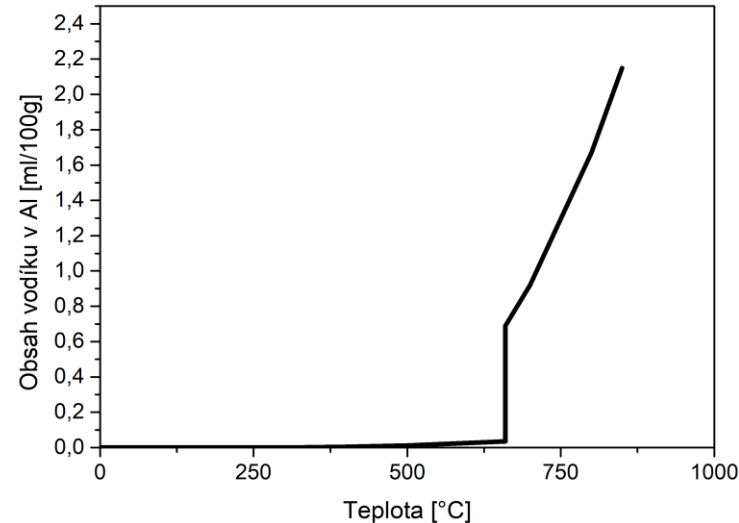
Rozpustnost vodíku

- **Množství rozpuštěného vodíku:** - obvykle se určuje v cm^3 vodíku na 100 g kovu ~ to přibližně odpovídá koncentraci vodíku v ppm: $1 \text{ cm}^3/100\text{g} = 0,9 \text{ ppm}$
- **Rozpustnost vodíku v hliníku:** - změna skokem = z $0,036 \text{ cm}^3/100\text{g}$ na $0,77 \text{ cm}^3/100\text{g}$,
- Sievertsův zákon (pro dvouatomový plyn):

$$S = k \cdot \sqrt{p_{H_2}}$$

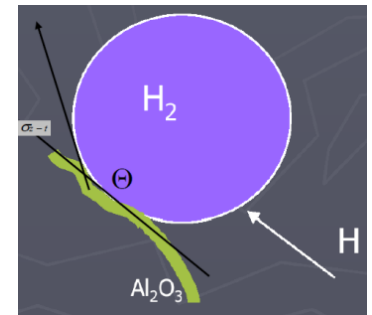
- Legující prvky - Si, Zn, Cu, Mn – rozpustnost snižují,
- Mg, Na, Ca, Li, Ti – zvyšují.
- Pro danou slitinu je maximální rozpustnost vodíku při určité teplotě a tlaku:

$$\log S = \frac{1}{2} \log p_{H_2} - \frac{A}{T} + B$$



Vznik plynových dutin v odlitcích

- Tavenina = obsah vodíku maximálně dle křivky rozpustnosti,
- Při ochlazování rozpustnost klesá = při překročení meze rozpustnosti – vodík uniká buď difuzí nebo tvoří plynové dutiny (bubliny),
- Při nerovnovážných podmínkách (např. rychlé ochlazování) – může být rozpuštěno větší množství vodíku, než odpovídá rovnovážné hodnotě rozpustnosti → přesycený tuhý roztok.
- **Nukleace bublin - heterogenní nukleace** - krystalizačním zárodkem je cizí tuhá částice,
- vhodné nukleační zárodky = **nesmáčivé** taveninou → oxidy, méně účinné boridy, nitridy a karbidy = **bublinatost je spojena s přítomností oxidických vměstků!**
- uplatňují se i lokální tlakové poměry – např. v místech mikrostažení vzniká podtlak → místně se sníží rozpustnost vodíku.

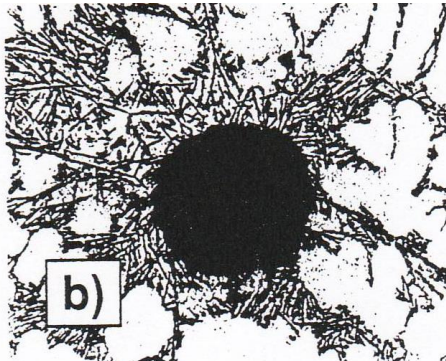


Porezita odlitků

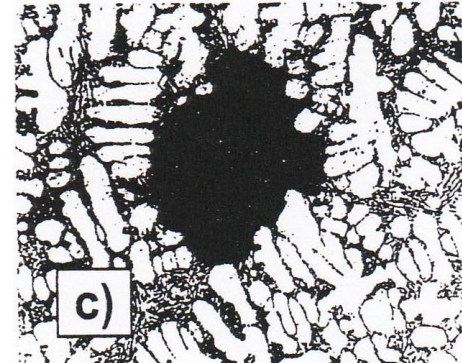
- kombinace tvorby mikrostaženin a bublin,
- čisté bubliny nebo čisté mikrostaženiny – zřídka;
- čisté bubliny - až při obsahu vodíku vyšším než $0,4 \text{ cm}^3/100\text{g Al}$.
- ***Tvar a poloha pórů ve struktuře*** - závisí na - morfologii tuhé fáze;
 - obsahu plynů;
 - rychlosti tuhnutí.



mikrostaženina



plynová bublina



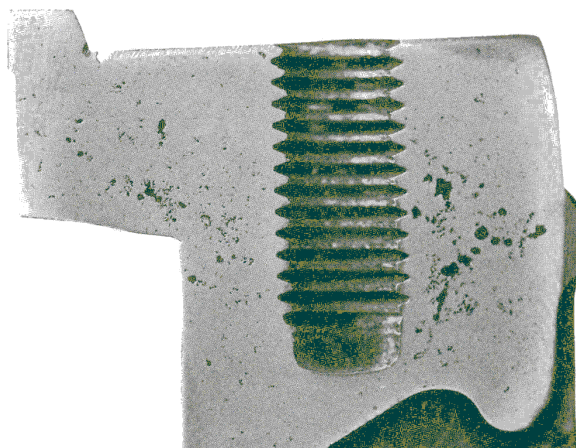
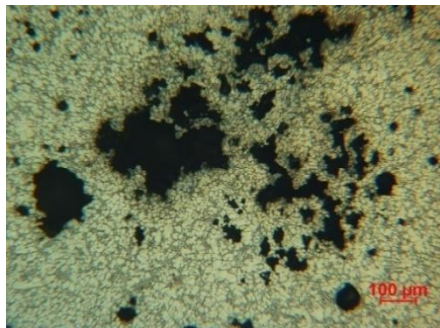
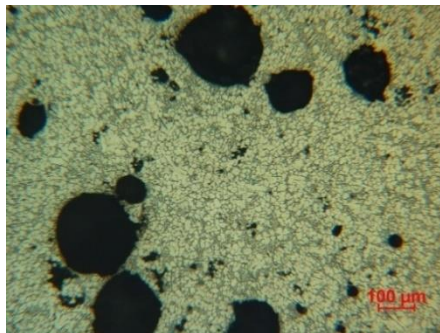
plyn + mikrostaženina

Porezita odlitků

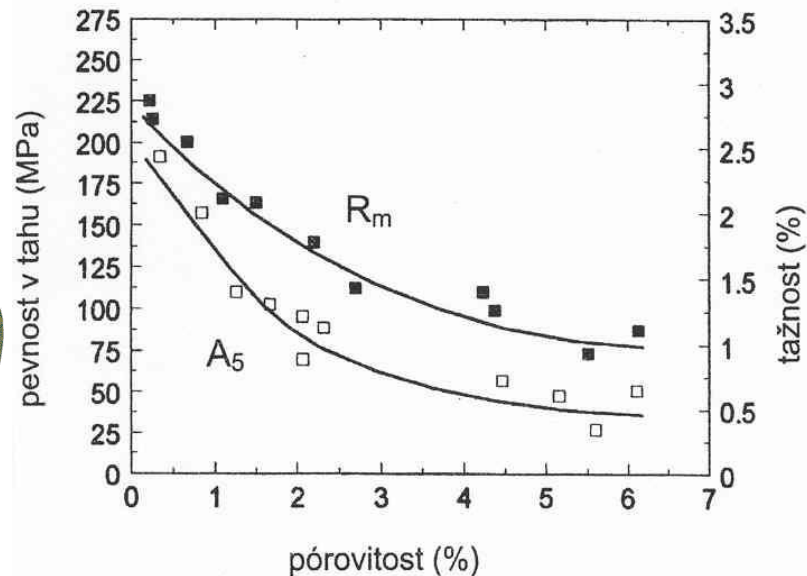
- ***Pomalé tuhnutí*** - velké bubliny - vodík difunduje na poměrně velké vzdálenosti - nemají téměř žádnou vazbu na krystalickou strukturu;
- ***Rychlé tuhnutí*** - malé kulovité nebo protáhlé bubliny uzavřené v mezidendritických prostorech = bubliny se brzy obalí vrstvou tuhého kovu - difuzí vodíku nemůže dojít k jejímu dalšímu růstu.
- ***Reálná rychlost tuhnutí*** - nedojde ke snížení obsahu vodíku až na rovnovážnou hodnotu,
 - část vodíku zůstává v kovu - přesycený tuhý roztok,
 - čím rychlejší ochlazování → větší přesycení tuhého kovu vodíkem = vyloučí se méně plynného vodíku = menší pórovitost.
- ***Ke vzniku bublin jsou náchylnější:*** - silnostěnné odlitky, než tenkostěnné;
 - odlitky lité do pískových forem než do kovových.

Porezita odlitků

- nejrozšířenější vada ve slévárnách hliníku;
- vady způsobené plynovými dutinami jsou obvykle neodstranitelné!!



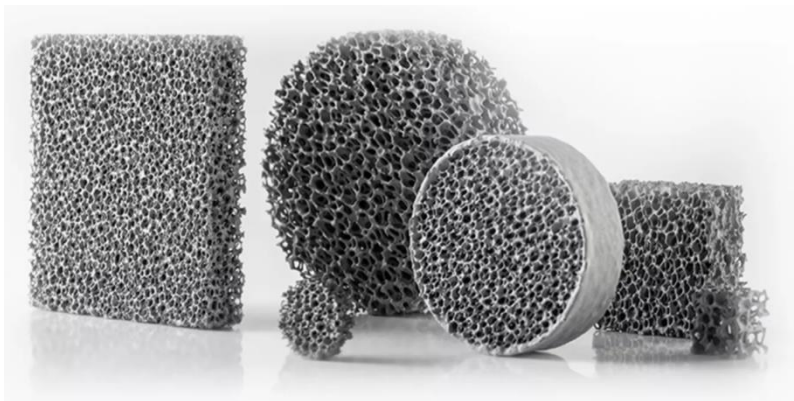
Porezita ve stěně odlitku



Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti slitiny AlSi6Cu4

Rafinace a odplynění

- Po natavení - metalurgickému ošetření taveniny - **snížení množství vměstků** (rafinace),
- **snížení naplynění**.
- **Snížení množství vměstků = rafinace:**
 - Odstátí taveniny – vyplouvání vměstků - postup zdlouhavý a málo účinný,
 - Filtrace - mechanické zachycování vměstků - při přelévání taveniny, ve vtokové soustavě,
- ploché tkaninové filtry, kovová sítká, keramické filtry.



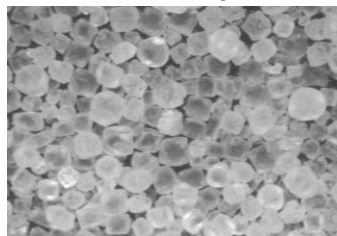
Rafinace

- vynášení vměstků plynovými bublinami - viz odplyňování,
- chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí,

Rafinační soli - odstranit oxidické vměstky z taveniny,

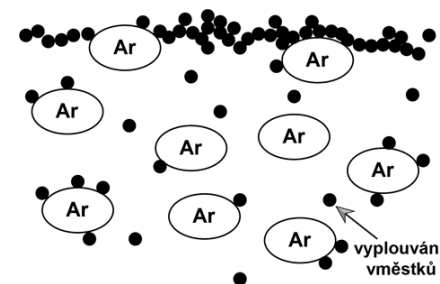
- snížit ztráty kovového hliníku;
- snížit obsah některých nežádoucích prvků.

- směs chloridových a fluoridových solí,
- prášek, granulát, tablety.



Krycí přípravky - zabránění vzniku vměstků,

- zabránit přímému kontaktu taveniny s atmosférickým kyslíkem a s vlhkostí,
- na hladině taveniny tvoří tekutou ochrannou vrstvu strusky.

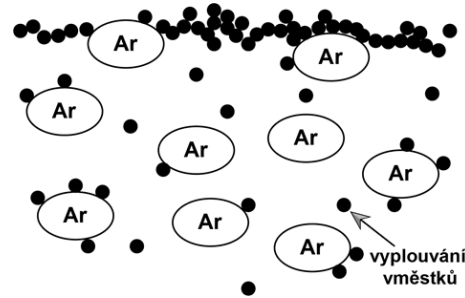
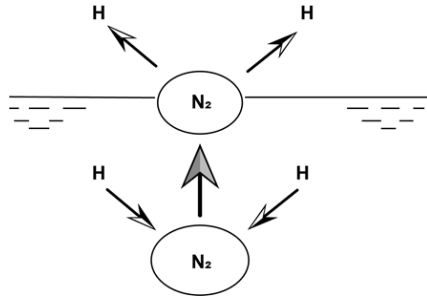


Odplyňování

- Snížení obsahu vodíku na úroveň, aby při jejím tuhnutí nedošlo k vyloučení bublin.
- Přípustný obsah vodíku v tavenině - **typ odlitku, tloušťka stěny a technologie odlévání**.
- čím pomalejší tuhnutí = nutné dokonalejší odplynění - korelace mezi naplyněním a stahováním (velmi silně odplyněná tavenina = silný sklon k tvorbě soustředěných staženin).
- **Odplyňování taveniny vakuováním** - snížení tlaku atmosféry nad hladinou taveniny = za daného podtlaku je maximální rozpustnost vodíku menší = tavenina je přesyceným roztokem → vodík uniká v podobě drobných bublin.
 - praxe - vakuovací zařízení - pokles tlaku na cca 5 kPa (rozpustnost klesne asi 4,5 krát).
 - intenzitu odplynění lze zvýšit i dmýcháním inertního plynu,
 - tato metoda není v průmyslové praxi příliš využívána.

Odplyňování

- **Probublávání taveniny plyny** – inertní x aktivní plyny,
- **Inertní plyny** - difuze vodíku do bublin plynu s nulovým parciálním tlakem vodíku - Ar, N₂,



- **Aktivní plyny** – chemicky reaguje – vznik chemické sloučeniny s vodíkem, např. Cl = stupeň odplynění je vyšší – striktní ekologické předpisy = používání je omezované.
- Pro co nejvyšší účinnost odplynění - homogenita taveniny, co největší styčná plocha (nejjemnější bubliny plynu) a co nejdelší dobu působení = co nejdelší dráha vyplouvání.

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

ρ – hustota [kg.m⁻³];

η – dynamická viskozita [N.s.m⁻²];

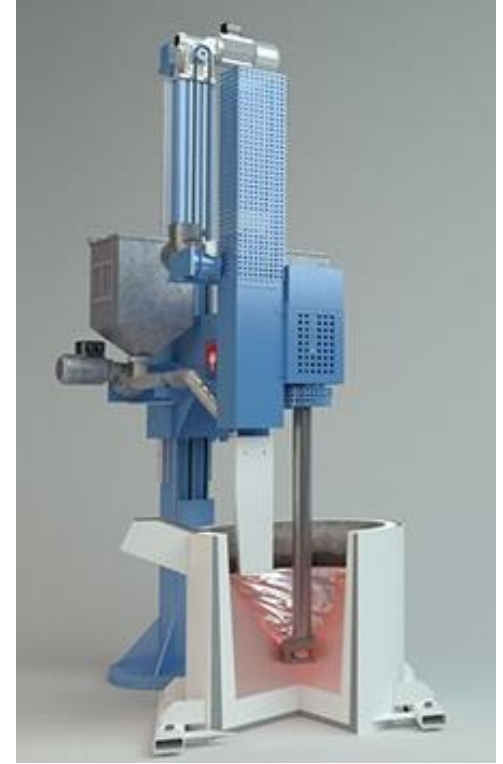
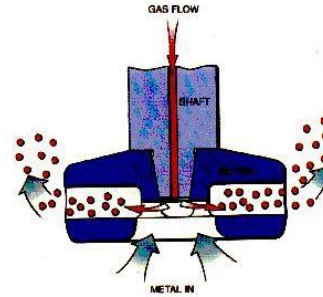
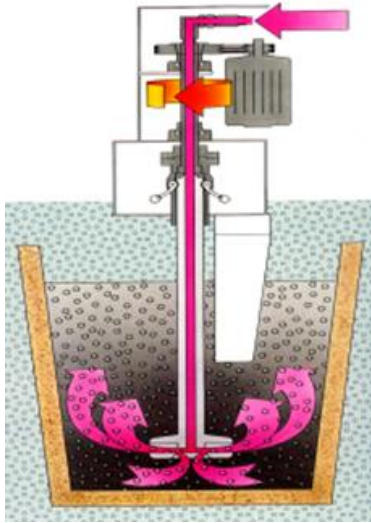
r – poloměr bubliny [m].

Odplyňování

- **Odplyňovací přípravky** - v tavenině se rozkládají = plynný dusík, chlor nebo fluor.
- Chlor - reaguje s hliníkem za vzniku chloridu hlinitého AlCl_3 (plynná forma),
$$2\text{Al} + 3\text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{AlCl}_3$$
- Vodík pak difunduje do bublin chloridu hlinitého a chemicky s ním reaguje:
$$3\text{H}_2 + 2\text{AlCl}_3 \rightarrow 2\text{Al} + 6\text{HCl}$$
- Při průchodu plynného AlCl_3 taveninou - reakce s dalšími prvky, které mají vyšší afinitu ke chloru, než má hliník = snížení jejich obsahu v tavenině = při teplotě 700 – 800 °C se selektivně odstraňují prvky jako Sr, Na, Ca, Mg.
- Přípravky, které chlor uvolňují = koncentrace, aby v tavenině zcela zreagoval.
- V plynné formě = pouze ve směsích s inertními plyny v koncentracích max. do 15 %.

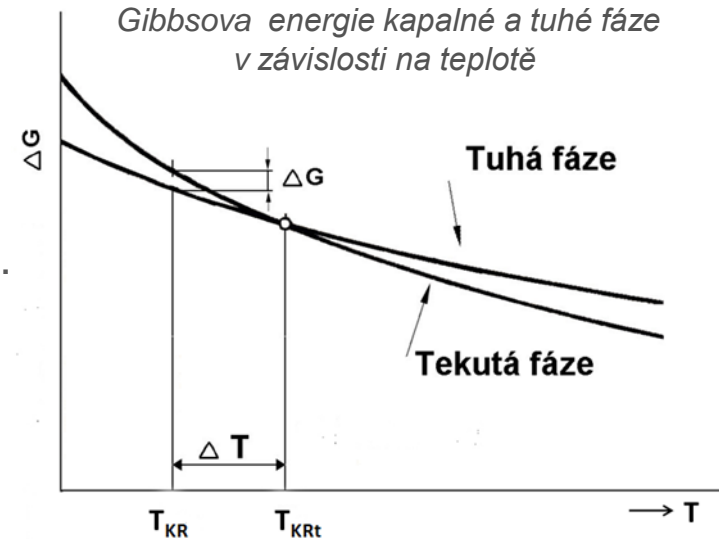
Odplyňování

- *Odplyňování plyny* – ponorná trubice, porézní tvárnice, atd.
- Rotorová odplyňovací zařízení



Krystalizace kovů a slitin

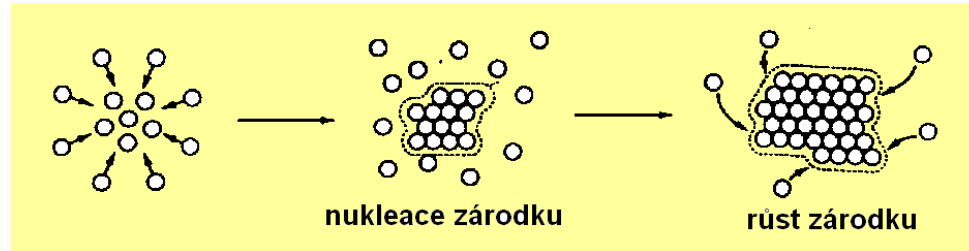
- **Odlitek** - požadujeme - mechanické a fyzikální vlastnosti → tvar, velikost a fázové složení krystalů.
- **Krystalizace kovů a slitin** - fázová přeměna = vzniká fáze tuhá, krystalického charakteru,
 - je doprovázena změnou objemu za současného uvolňování latentního skupenského tepla krystalizace,
 - příčina - při změně vnějších podmínek = stabilní stav,
 - podmínka - vznikající krystalická fáze musí být termodynamicky stabilní → $G_S < G_L$;
 - z termodynamického hlediska - pro průběh děje - podmínka = Gibbsova energie musí klesat, nebo $\Delta G < 0$.
 - u slitin kovů - stanovení změny Gibbsovy energie = složitější o podíl různých fází, tuhých roztoků atd.



Krystalizace kovů a slitin

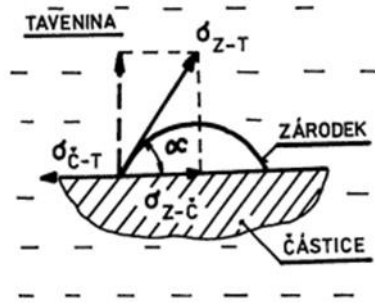
Průběh krystalizace - podle G. Tammanna je řízen vztahem mezi:

- spontánní krystalizační schopností (počet zárodků vznikajících v jednotce objemu za jednotku času),
- lineární rychlostí růstu krystalů.
- Velká rychlost tvorby zárodků a malá lineární rychlosti růstu krystalů = jemnozrnná struktura.
- Malá rychlost tvorby zárodků a velká lineární rychlosti růstu = hrubá zrna.



Krystalizace kovů a slitin

Tvorba zárodků - homogenní nukleace – v praxi se téměř nevyskytuje - podchlazení = $0,2 \cdot T_{KR}$.
 - heterogenní nukleace – běžně - menší přechlazení - cizí částice;



- krystalizační zárodky se tvoří na cizí částici;
- cizí částice - vyšší teplota tání než tavenina;
- příbuzná krystalická mřížka;
- vysoká smáčivost;
- stejná hustota částice a taveniny.

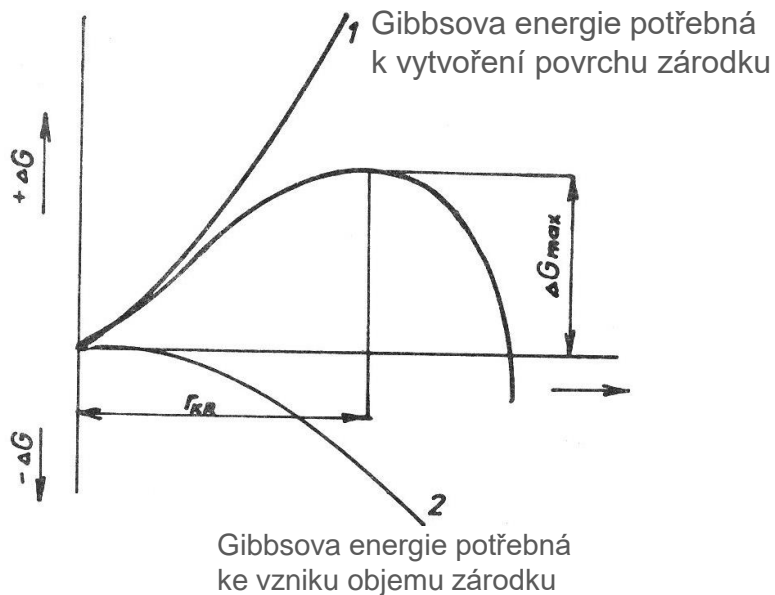
Tvorba zárodků - podchlazení taveniny ΔT :

- čistota taveniny - tavenina obsahující plyny nebo vměstky nepotřebuje velké ΔT ,
- pohyb taveniny - neklid taveniny (proudění, chvění) snižuje nutné ΔT ,
- tlak působící na taveninu - snižuje kritickou velikost zárodků.

Krystalizace kovů a slitin

• Změna Gibbsovy energie pro vznik krystalizačního zárodku ΔG_Z :

Schématické znázornění energetických poměrů při tvorbě zárodku



$$\Delta G_Z = V_Z \cdot \Delta G_V + S_Z \cdot \sigma_{t-z} \cdot \sin \alpha$$

V_Z - objem zárodku [m^3];

ΔG_V - změna Gibbsovy energie na vytvoření objemu zárodku [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$];

S_Z - povrch zárodku [m^2];

σ_{t-z} - povrchové napětí na rozhraní tavenina – krystalický zárodek [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$];

α - úhel smáčení mezi taveninou a zárodkem [$^\circ$];

r_{KR} - kritická velikost zárodku [m];

K - konstantu [1];

ΔT - podchlazení = $T_{KRt} - T_{KR}$ [$^\circ\text{C}, \text{K}$].

Kritická velikost zárodku r_{KR} :

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0 \rightarrow r_{KR} = k \cdot \frac{\sigma}{\Delta T} \cdot \sin \alpha$$

Krystalizace kovů a slitin

V praxi - požadavek - co nejmenší r_{KR} - velké podchlazení – tepelná akumulace formy;
 - očkování taveniny,
 - mechanické ovlivnění krystalizace – např. tlak, vibrace.

- **Působící tlak** - je možné zmenšit celkový objem při stejné teplotě do takové míry, že proběhne přeměna taveniny na krystalickou fázi.

- Vliv tlaku na teplotu likvidu a solidu: Clausiusova - Clampeyronova rovnice:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_L - V_S)}{\Delta H_{L,S}^0}$$

$\Delta H_{L,S}^0$ - změna entalpie při krystalizaci (molové teplo tavení) [J.mol⁻¹];

$(V_L - V_S)$ - rozdíl molových objemů v kapalném a tuhém stavu [m³.mol⁻¹];

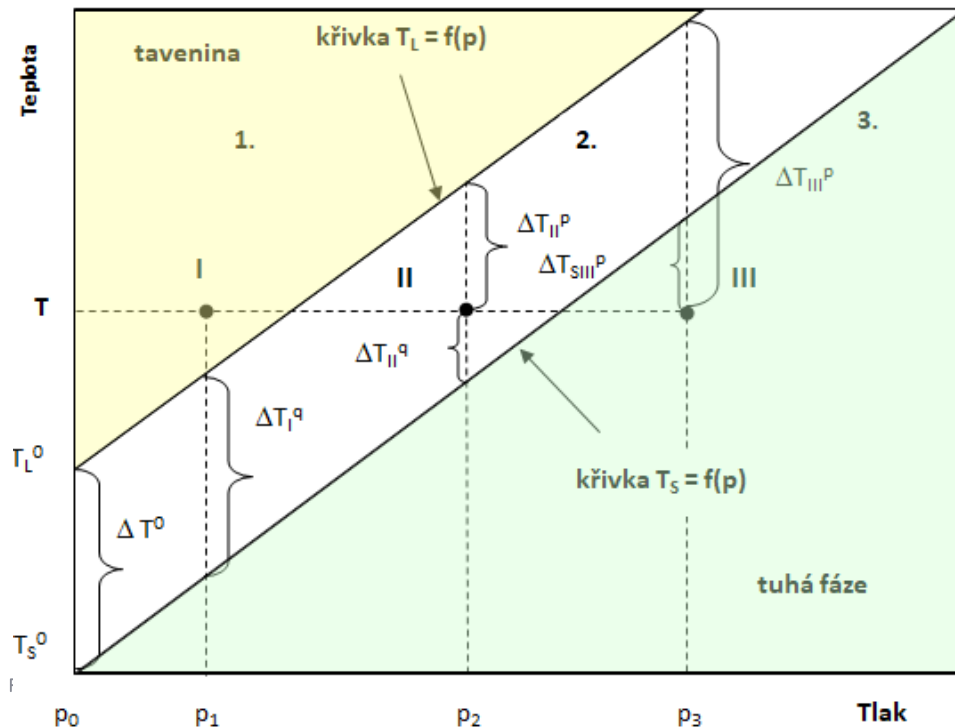
T - teplota krystalizace [K];

dT/dp - diferenciální koeficient = změna teploty krystalizace v závislosti na tlaku.

- U kovů zpravidla platí, že teplota krystalizace s rostoucím tlakem roste.
- Menší kritická velikost krystalizačního zárodku.
- S tlakem roste počet zárodků.

Krystalizace kovů a slitin

- Vliv teplotně-tlakového stavu taveniny na vznik atermického podchlazení



Oblast 1. :

- Ke krystalizaci taveniny dochází jen v důsledku silného podchlazení.

Oblast 2. :

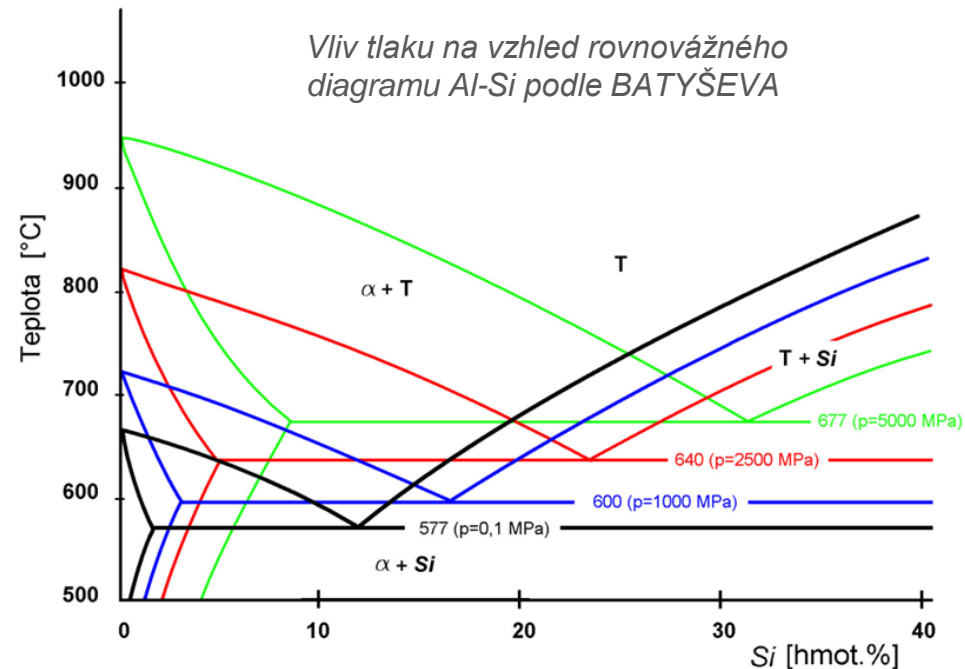
- Podchlazení vznikající v důsledku působení tlaku je nedostatečné pro zajištění krystalizace. Rozhodujícím faktorem pro krystalizaci je dodatečné podchlazení.

Oblast 3. :

- Krystalizaci zajišťuje podchlazení v důsledku tlaku.

Krystalizace kovů a slitin

- **Vliv tlaku na krystalizaci Al-Si**
 - Zvýšená teplota tání Al a teplota eutektické krystalizace.
 - Bod eutektické krystalizace se posouvá k vyššímu obsahu Si.
 - Maximální rozpustnost Si v Al roste.
- **Vliv tlaku se projeví :**
 - zvýšením podílu primární α -fáze,
 - snížením podílu eutektika,
 - nárůstem obsahu Si v eutektiku,
 - zjemnění struktury (100 do 150 MPa),
 - sferoidizaci dendritů tuhého roztoku α ,
 - stejný vliv jako jejich modifikace.

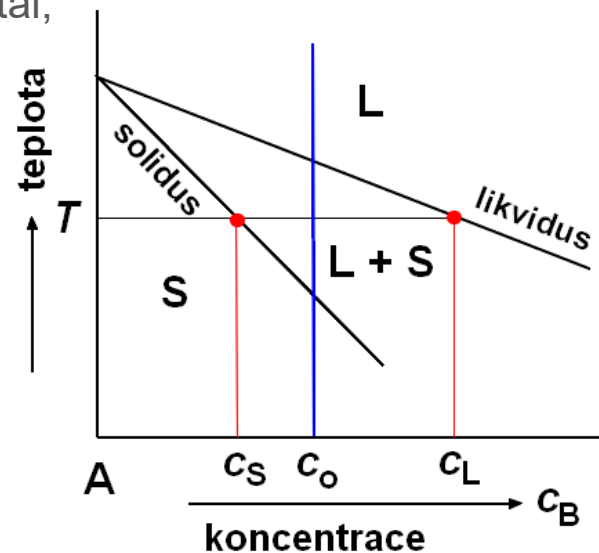


Krystalizace kovů a slitin

Mechanismus krystalizace

- Za předpokladu - teplota taveniny v celém průřezu je konstantní:
 - čistý kov - z každého zárodku s kritickou velikostí roste krystal,
 - uvolňované L_{KR} – rovnoměrné rozložení krystalů
- Za skutečných podmínek – krystalizace postupuje od stěny.
 - Slitiny - odlišuje se - z homogenní taveniny = několik fází;
 - krystalizace – interval teplot,
 - krystalická fáze = jiné chemické složení než tavenina,
 - rozložení prvků v průběhu tuhnutí – rovnovážný diagram,
 - rozdělovací koeficient:

$$k_o = \frac{c_S}{c_L}$$

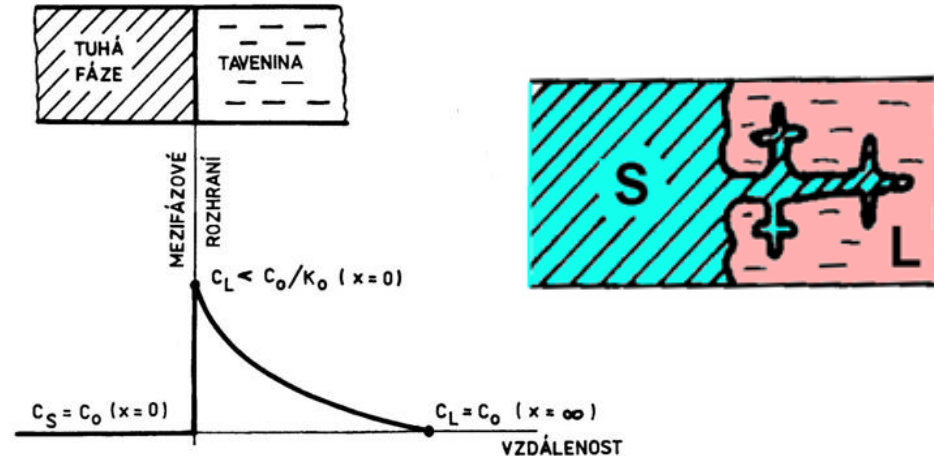


- T_L se s obsahem přísady snižuje = $k_o < 1$; tj. $C_S < C_L$
- T_L se s obsahem přísady zvyšuje = $k_o > 1$; tj. $C_S > C_L$

Krystalizace kovů a slitin

- Většina přísad v Al $\rightarrow k_0 < 1$ – během tuhnutí se přísada koncentruje ve zbylé tavenině;
- Čím menší hodnota $k_0 \rightarrow$ dochází k větší segregaci.
- Reálné podmínky - malá účinnost difuze = tavenina není chemicky homogenní.
- Před krystalizační frontou = pásmo taveniny obohacené přísadovým prvkem = snížení T_L před krystalizační frontou \rightarrow **koncentrační podchlazení**.

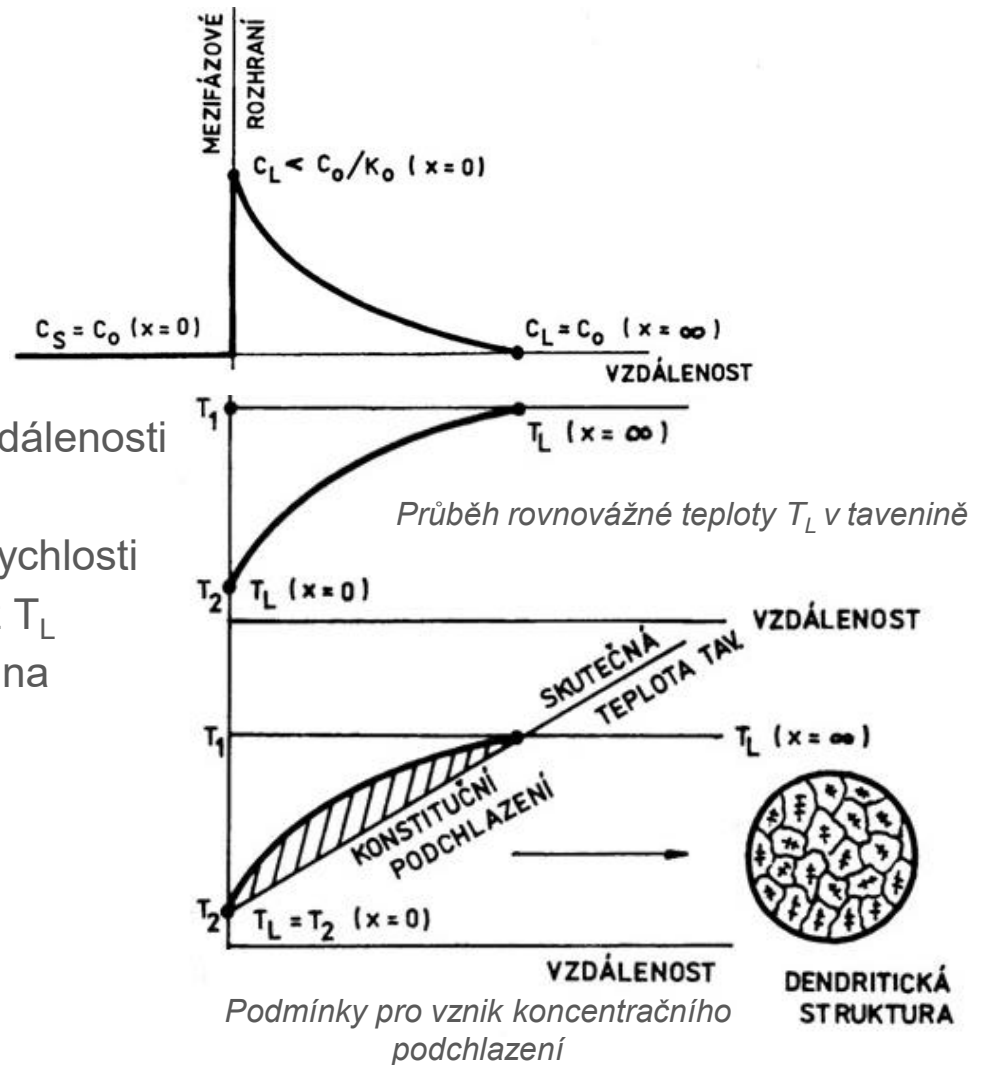
Průběh koncentračního gradientu příměsi v tavenině



Krystalizace kovů a slitin

- Koncentrace přísady v tavenině od mezifázového rozhraní klesá.
- Změna teploty likvidu v závislosti na vzdálenosti od rozhraní.
- Skutečná teplota taveniny = závisí na rychlosti chladnutí → v určité oblasti je nižší než T_L vyvolaná změnou koncentrace = tavenina je v této oblasti podchlazená

↓
koncentrační podchlazení.

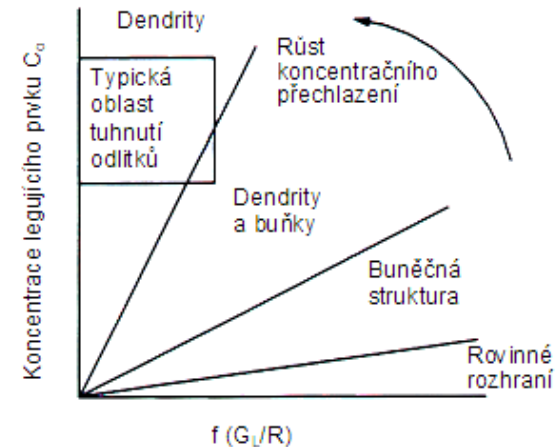


Tuhnutí odlitek

- **Vznik a velikost koncentračního podchlazení** má vliv na výslednou **primární strukturu**.
 - Způsob růstu krystalů závisí na:
 - obsahu přísady;
 - velikosti koncentračního podchlazení.

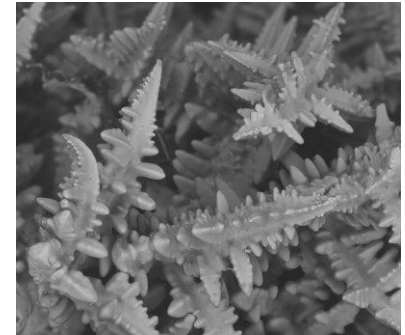
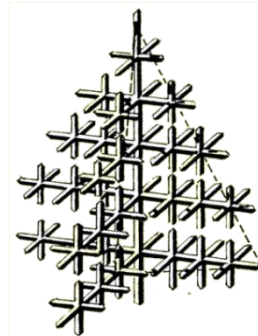
- **Velikost koncentračního podchlazení** závisí na:
 - koncentrační gradient na rozhraní,
 - teplotní spád v tavenině,
 - rychlost růstu primární fáze.

Souvislost morfologie primární fáze a velikosti koncentračního podchlazení



Tuhnutí odlitek

- **Rovinné rozhraní** - speciální případy - výroba monokrystalů.
 - velmi malé koncentrační přechlazení a velký teplotní spád,
 - růst zrn - pohybem rozhraní do taveniny,
 - nehomogenita chemického složení před krystalizační frontou – vyrovnání difuzí.
- **Buněčné tuhnutí**
 - malé koncentrační přechlazení a malá intenzita ochlazování (např. tepelná osa).
- **Dendritické tuhnutí**
 - poměrně velké koncentrační přechlazení → chemické nehomogenity se nemohou vyrovnat mechanismem buněčného tuhnutí.
 - **Dendrity** - vytváří složitý systém - primární, sekundární, popř. terciální větve;
 - přísada - do taveniny před frontu tuhnutí a do mezidendritických prostor.



Tuhnutí odlitků

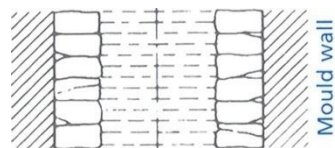
- **Důsledkem těchto podmínek** - liší se morfologie různých slitin,
 - morfologie téže slitiny tuhnoucí různou rychlostí,

→

 - struktura odlitků v pískových a kovových formách,
 - struktura tenkostěnných a tlustostěnných odlitků,
 - povrchová vrstva a oblast tepelné osy odlitku.
- **Exogenním** - roste kompaktní ztuhlá vrstva = směrem od povrchu odlitku do tepelné osy.
- **Endogenní tuhnutí** - tuhnoucí krystaly vznikají i v objemu kovu před krystalizační frontou, popř. má tavenina tendenci tuhnout kašovitě v celém objemu.
- **Způsob tuhnutí** - vliv na dosazování kovu během tuhnutí,
 - ideální – exogenní s rovinným mezifázovým rozhraním – soustředěné stažení;
 - nepříznivé – exogenní buněčné a endogenní objemové tuhnutí = není možné dosazování – mikrostažení, malá účinnost nálitků.

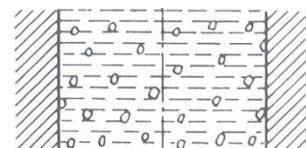
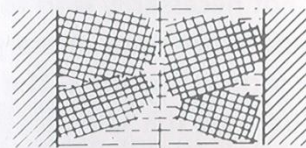
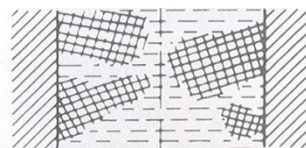
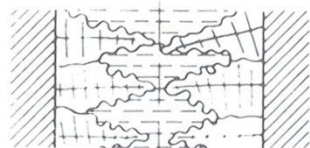
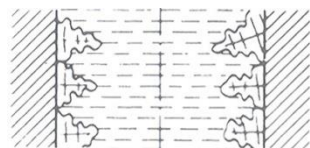
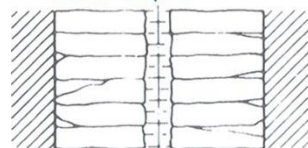
Tuhnutí odlitků

Exogenní typy tuhnutí



Mould wall

Solid Liquid



Endogenní typy tuhnutí

Rovinné mezifázové
rozhraní

Dendritické

Buněčné

Objemové

Vrstevné

- **Odlitek** - povrchové vrstvy odlitků – exogenní tuhnutí s hladkým rozhraním,
- centrální části odlitku – endogenní objemové tuhnutí,
- **Slitiny** - úzké pásmo tuhnutí - exogenní tuhnutí s hladkým rozhraním,
- široké pásmo tuhnutí - exogenní buněčné nebo endogenní tuhnutí.

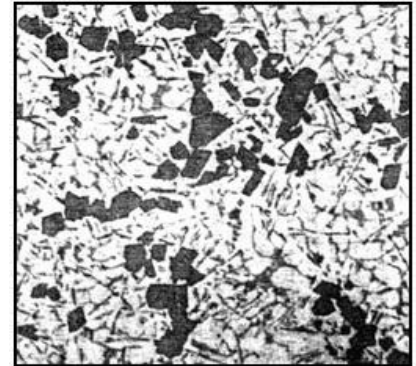
Ovlivnění mikrostruktury

Očkování:

- zjemnění primární fáze,
- vnášení nukleačních zárodků,
- vlastnosti slitin - účinek je menší než účinek rychlého ochlazování,
- Přínos - zvýšení pevnosti a tažnosti,
 - zvýšení chemické a strukturní homogenity,
 - snížení sklonu slitiny ke vzniku trhlin,
 - vyšší sklon k tvorbě mikrostaženin
 - menší pórovitost - vyšší těsnost odlitků
 - lepší obrobiteľnosť;



neočkováno



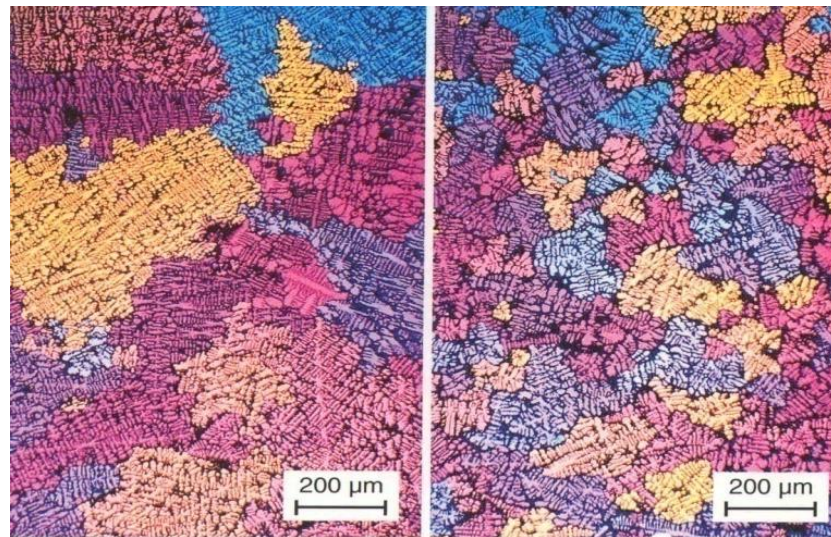
očkováno

Očkování

- Zjemnění primárně vyloučené fáze: - podeutektické slitiny → α -fáze;
- nadeutektické slitiny → β -fáze.

Podeutektické slitiny:

- Očkovadla - titan, kombinace titan-bór,
- 0,1 – 0,4 % hmotnosti taveniny,
- fáze TiAl_3 (v tavenině 0,02 – 0,1% Ti),
- efektivní účinek – cca 30 - 45 min,
- očkovací sůl, tablety – např. K_2TiF_6 , KBF_4 , atd.
- předslitiny – Al-Ti, Al-Ti-B.



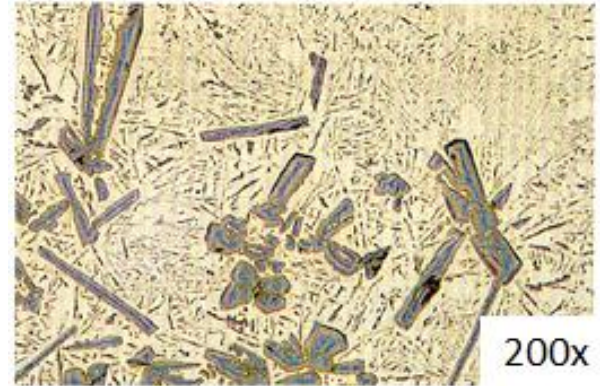
Bez zjemnění

Zjemněno

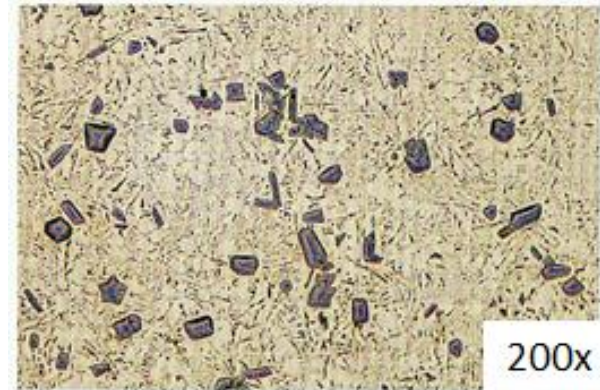
Očkování

Nadeutektické slitiny:

- Očkovadla - fosfor;
- nukleační zárodky – AIP,
- přidaný P – optimálně 30 – 60 ppm,
- dlouhodobý odeznívací účinek 3-5 h,
- očkovací sůl – např. PCl_5 , atd.
- předslitiny – CuP10, Ni-P.



Velké primární krystaly křemíku



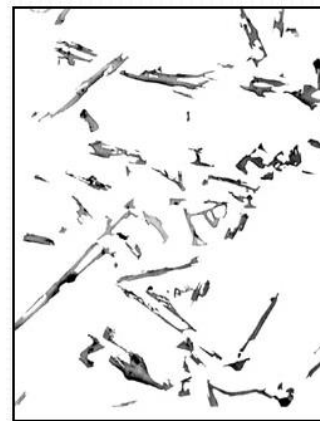
Zjemněno fosforem

Ovlivnění mikrostruktury

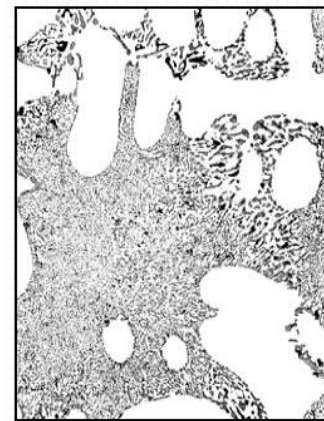
- **Křemík** - vylučuje se prakticky jako čistý prvek (částice o velikosti $< 1 \mu\text{m}$ až více než 2mm),
 - tvar částic křemíku \rightarrow typ eutektika;
 - mechanismus krystalizace eutektika \rightarrow krystalizační zárodek Si = částice AIP (P – nečistota ze vsázky, vyzdívek, přípravků) \rightarrow vytvoření dostatečného množství zárodků = několik ppm P);

Modifikace

- ovlivnění morfologie eutektika - tvar jemných vláken,
- účinek menší než účinek rychlého ochlazování.
- Přínos - zvýšení mechanických vlastností - nezvyšuje se příliš pevnost v tahu, zvyšuje se tažnost.
 - snížení sklonu slitiny ke vzniku trhlin;
 - zvýšení sklonu ke vzniku mikrostaženin.



Nemodifikováno



Modifikováno

Modifikace

- **Zrnité eutektikum**
 - Při obsahu nad 5 -10 ppm P – eutektický Si se vylučuje ve tvaru polyedrických zrn nebo hrubých lamel,
 - obvyklá forma eutektika – u slitin běžné technické čistoty,
 - krystalizace málo energeticky náročná – při poměrně malém podchlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotu (1 – 2 K).
- **Lamelární eutektikum**
 - Ve slitinách s nízkým obsahem Na a 1-2 ppm P,
 - růst částic Si – podobný mechanismus jako u zrnitého eutektika,
 - méně příznivé podmínky (méně P = méně zárodků) → při větším podchlazení pod rovnovážnou teplotu (2 – 5 K),
 - Si – jemné lamely uspořádané vedle sebe (menší zrna).



Zrnité



Lamelární

Modifikace

- **Modifikované eutektikum**

- Za přítomnosti modifikačních prvků Na, Sr,
- zcela jiný mechanismus krystalizace Si = modifikátory snižují rychlost difuze Si - blokují růstové stupně na rozhraní krystalů Si a taveniny a tím podporují dvojčatění útvarů Si,
- částice křemíku = tvar jemných vláken – na výbrusu tečka.
- Stupeň modifikace - záleží i na rychlosti ochlazování (vysoká rychlost ochlazování = stačí slabší modifikátor).

- **Struktura eutektika při rychlém ochlazování**

- vláknitá modifikovaná struktura – opticky vypadá jako při použití chemické modifikace,
- elektronová mikroskopie – velmi jemně vyloučený nemodifikovaný Si,
- dostatečně vysoká rychlost tuhnutí (rychlost postupu krystalizační fronty 400 – 1000 $\mu\text{m/s}$),



Modifikované - Sr

Modifikace

- Za přítomnosti modifikačních prvků Na, Sr - zejména u slitin Al-Si o obsahu 7 až 12 % Si.
- **Modifikace - Na:** - nejsilnější modifikátor,
 - průměrný obsah sodíku od 40 - 100 ppm v závislosti na typu odlitku,
 - kovový sodík; modifikační soli nebo tablety - směs chloridů a fluoridů NaCl+KCl+NaF,
 - z taveniny se vypařuje - odeznívání modifikačního účinku (15 až 20 minut),
 - snížení obsahu Na i při odplyňování = modifikace až po odplyňování.
- **Modifikace - Sr:**
 - průměrný obsah stroncia 150 až 200 ppm, u eutektických slitin až do 400 ppm,
 - ve formě předslitiny AlSr (3,5 až 10 % Sr),
 - účinek slabší než Na - nutná vyšší rychlost ochlazování,
 - náběh účinku - inkubační doba 5 až 10 minut,
 - účinek trvá 3 - 6 h.

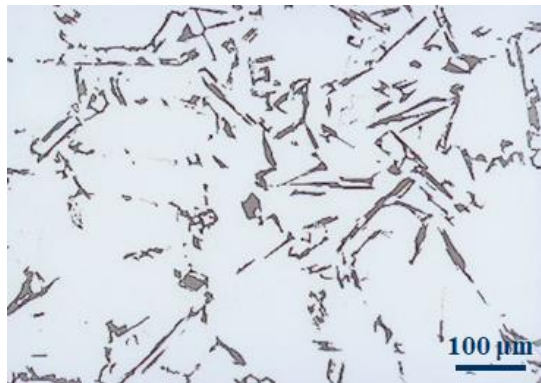


Nemodifikováno

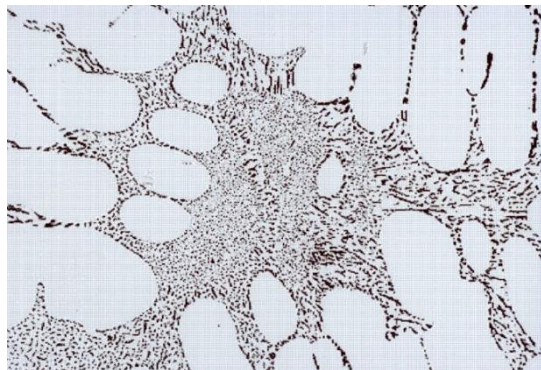
Modifikováno

Eutektická fáze slévárenské slitiny Al-Si

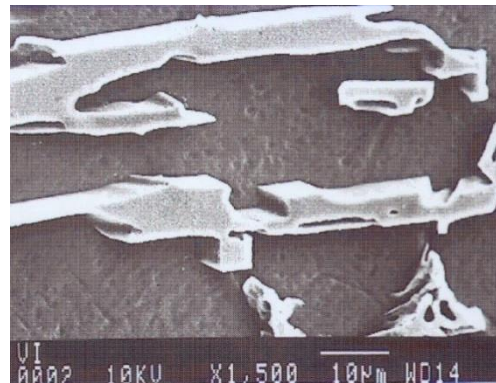
*Slitina AlSi7Mg -
nemodifikováno -
písková forma*



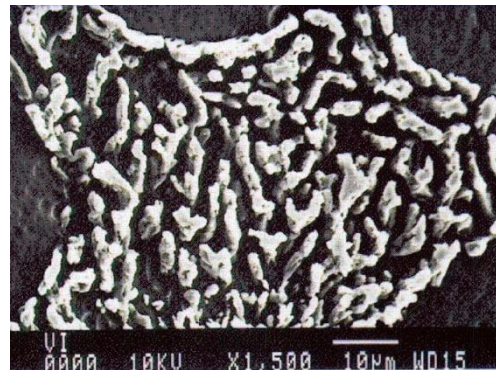
*Slitina AlSi7Mg -
modifikováno Na -
písková forma*



*Desky křemíku slitiny
AlSi7Mg -
nemodifikováno*



*Tvorba křemíku
AlSi7Mg -
modifikováno Na*

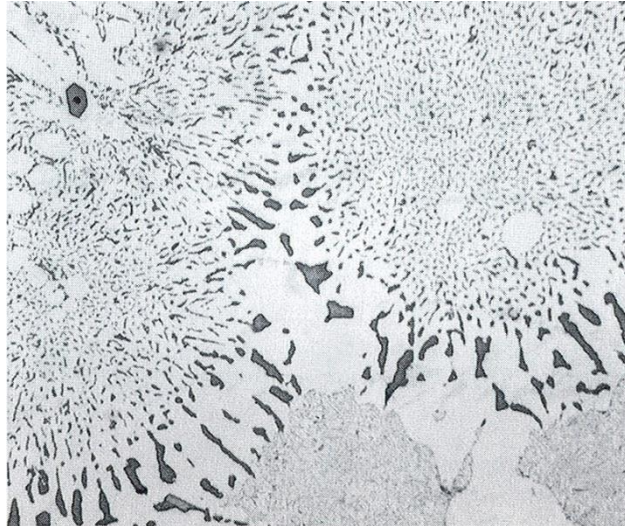


Modifikace

Přemodifikování - hrubé útvary křemíku na hranicích zrn,

- pokles mechanických vlastností - hlavně tažnosti,
- v důsledku odmíšení přebytečného modifikátoru na hranici zrn vzniká intermetalická fáze AlSiNa , Al_4SrSi_2 ,
- sodík - obsah nad cca 180 – 200 ppm.

*Přemodifikovaná struktura
- pásy s hrubě vyloučeným
křemíkem.*



Provozní kontrola taveniny

- **Kontrola chemického složení** – kontrola vstupních surovin, taveniny.
- **Kontrola teploty** - v tavících a udržovacích pecích, v pánvích při metalurgickém zpracování.
 - termočlánky NiCr-Ni



- **Kontrola obsahu vměstků a naplynění** – Index hustoty (Dichte index).
- **Kontrola úrovně očkování a modifikace** – spektroskopie, termální analýza.

Provozní kontrola čistoty taveniny

- standardně po metalurgickém ošetření,
- **Metoda dvojího vážení** - komplexně hodnotí obsah plynů i přítomnost vměstků.
 - porovnání hustoty vzorku, který ztuhl při atmosférickém tlaku se vzorkem, který ztuhl za podtlaku,
 - využívá platnosti Sievertsova zákona - v kovu je za podtlaku nižší rozpustnost vodíku = při tuhnutí se vyloučí více vodíkových bublin než při tlaku atmosférickém - bubliny zůstávají v kovu uzavřeny a tím snižují jeho hustotu,
 - vměstky vhodným nukleačním zárodkem pro tvorbu bublin = index hustoty vyjadřuje **souhrnný vliv obsahu plynů a oxidických vměstků**.

Provozní kontrola čistoty taveniny

- Tavenina se odlije do dvou předeřtých zkušebních kelímků s objemem asi 40 – 80 ml,
- Vzorek ztuhne při atmosférickém tlaku a druhý při podtlaku (standardně 80 mbar).
- Index hustoty (DI) je stanoven z hustot těchto vzorků.

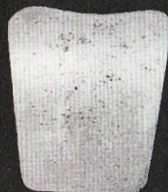
$$DI = \frac{(\rho_{atm} - \rho_{80mbar})}{\rho_{atm}} \cdot 100$$



Provozní kontrola čistoty taveniny

Erstarrung bei
Ortsdruck

*Freezing in
atmosphere*



Dichteindex

Density index

0.15

2.2

6

9.4

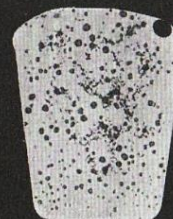
12.1

14.8

16.7

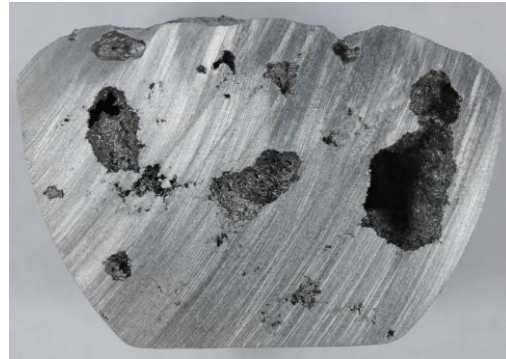
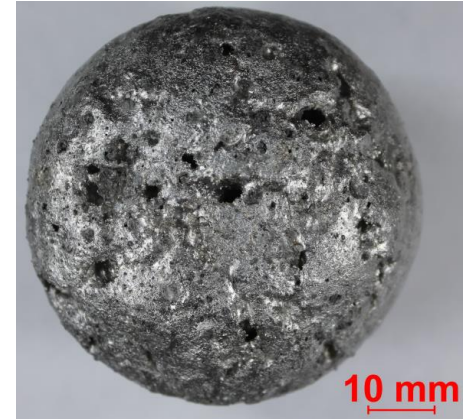
Erstarrung bei
80 mbar

*Freezing under
vacuum 80 mbar*



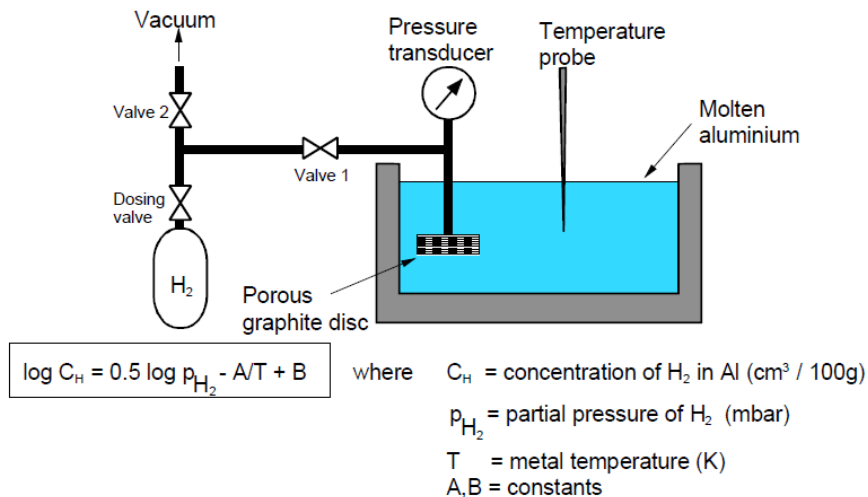
Provozní kontrola čistoty taveniny

- **Dross test** - stanovení obsahu vměstků v tavenině.
 - Zkouška je pouze kvalitativní, výsledek nelze vyjádřit číselně,
 - absolutní tlak nižší než 1 mbar – nečistoty na povrchu.
- **Straube–Pfeifferův test**
 - absolutní tlaku 30 – 50 mbarů - plocha řezu.



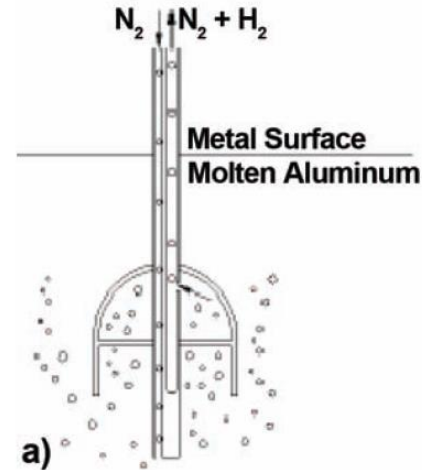
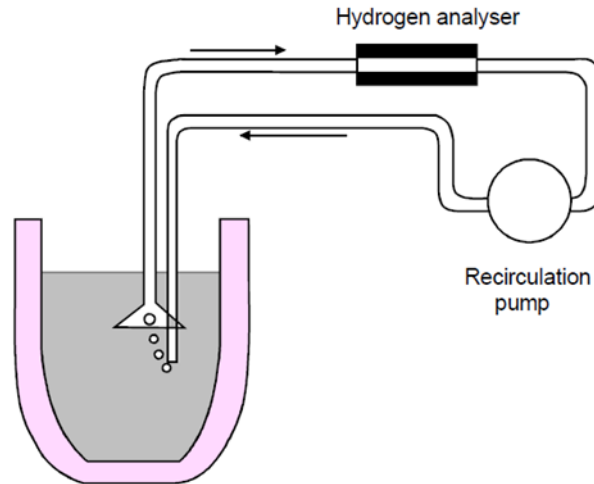
Provozní kontrola čistoty taveniny

- **Kontrola naplynění** – přímé měření obsahu rozpuštěného vodíku = skutečný obsah rozpuštěného vodíku bez vlivu znečištění směsky,
- **Metoda Chapel** - vakuová pumpa s recipientem, tlakoměr, sonda z porézního grafitu,
 - sonda a recipient se nejprve evakuují, při měření vodík z taveniny difunduje sondou do recipientu - v něm se postupně ustálí rovnovážný tlak = odpovídá parciálnímu tlaku vodíku.



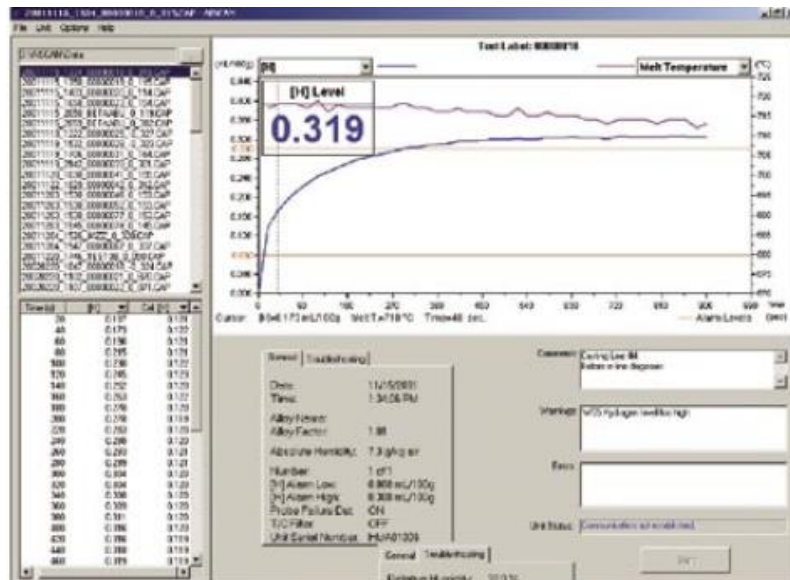
Provozní kontrola čistoty taveniny

- **Metoda Telegas** - cirkulace dusíku přes taveninu (porézní keramická nebo grafitová zátka);
 - při průchodu bublin dusíku taveninou = vodík difunduje do bublin dusíku → tlak v bublině se vyrovná parciálnímu tlaku vodíku v tavenině,
 - měřící sonda má porézní keramickou membránu = směs prostupuje do měřící části přístroje,
 - měření tepelné vodivosti plyné směsi vodíku a dusíku → parciální tlak vodíku.



Provozní kontrola čistoty taveniny

- Metoda Alscan** - argon se vhání pouze do keramické prodyšné sondy → sondou vodík difunduje do bublin argonu a s ním je odsáván do měřící části.



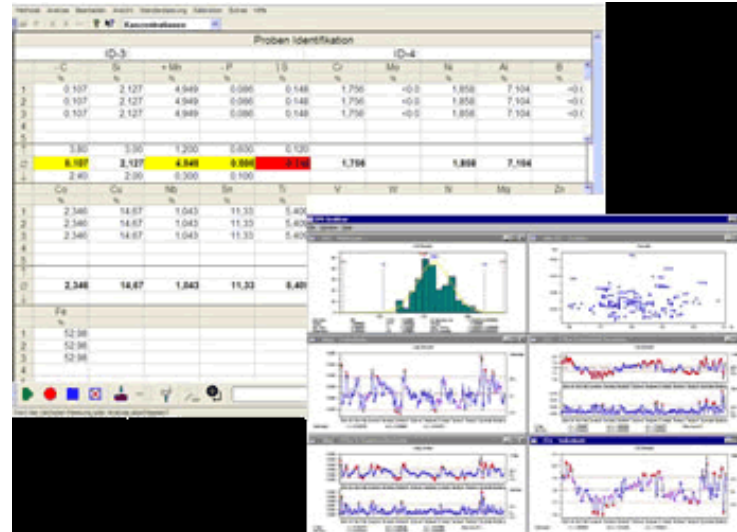
Provozní kontrola úrovně očkování a modifikace

- **Kontrola chemického složení** = spektrální analýza - spektrometry - stolní, ruční.
- Spektrometrie - Optická emisní (OES) - obloukové a jiskrové buzení - kovové materiály.
 - Energo-dispersní rentgenová fluorescenční (ED-XRF) - všechna skupenství.
- Slévárny - **optická emisní spektrometrie** – nejčastěji jiskrový výboj (v atmosféře Ar).
- kvalitativní i kvantitativní složení látek podle jejich emisního spektra v plazmatickém stavu,
- spektrum = výsledek přechodů elektronů z hladin s vyšší energií na hladiny s nižší.
- Vzorky - odlévání do kovové formy = homogenní, jemnozrnná struktura bez vad a segregací.
- Příprava vzorků – frézování nebo broušení.



Provozní kontrola úrovně očkování a modifikace

- **chemického složení;**
- **úrovně modifikace** = celkové množství modifikačního prvku – aktivního i vázaného v krystalizačně neúčinných chemických vazbách – jednoznačně nevypovídá o úrovni očkování a modifikace = extrémně nízký obsah modifikačních prvků – velká chyba.



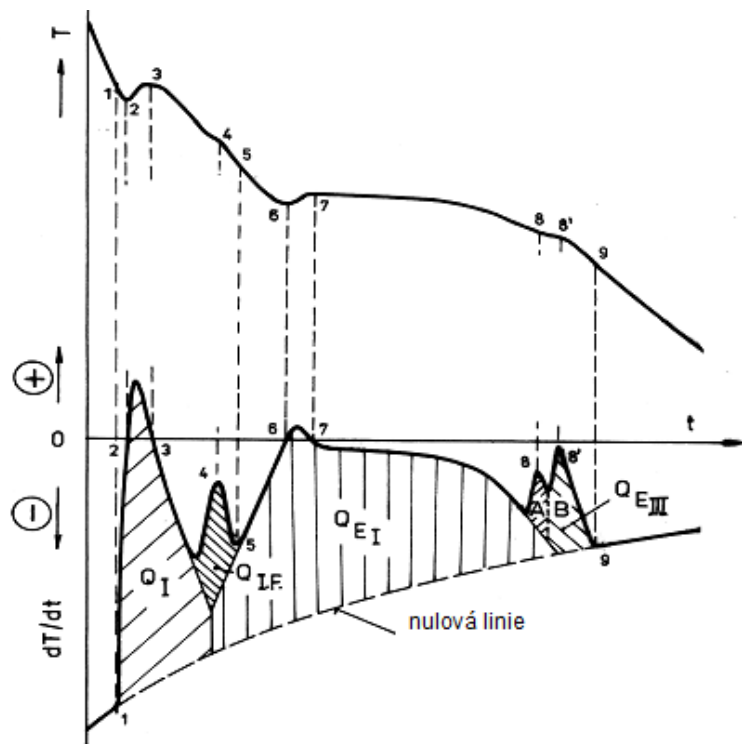
Provozní kontrola úrovně očkování a modifikace

- v provozu provádí na základě chemického složení a termální analýzy,
- **Termální analýza** - vyhodnocování průběhu křivky chladnutí v intervalu krystalizace.
- Lze hodnotit **disperzitu primární fáze** (očkovací účinek), **morfologii eutektické fáze** (stupeň modifikace) a vznik **intermetalických** fází a **vícesložkových eutektik**.
- Průběh křivky tuhnutí – závislý na intenzitě odvodu tepla ze vzorku a průběhu uvolňování L_{kr} .
- Kelímky - kovové, pískové, keramické
 - objem taveniny = čas tuhnutí 4-5 min,
 - termočlánek NiCr-Ni - ochrana.



Provozní kontrola úrovně očkování a modifikace

- **Termální analýza** - vyhodnocování průběhu křivky chladnutí - derivace.

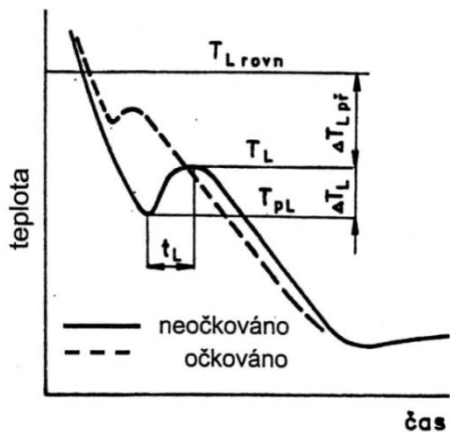


- 1 - teplota nukleace primární fáze - T_{NL}
- 2 - teplota přechlazení na likvidu - T_{PL}
- 3 - teplota likvidu - T_L
- 4 - teplota tuhnutí primární intermetalické fáze
- 5 - teplota nukleace eutektika - T_{NE}
- 6 - teplota přechlazení na eutektické teplotě - T_{PE}
- 7 - teplota tuhnutí eutektika - 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

Provozní kontrola úrovně očkování a modifikace

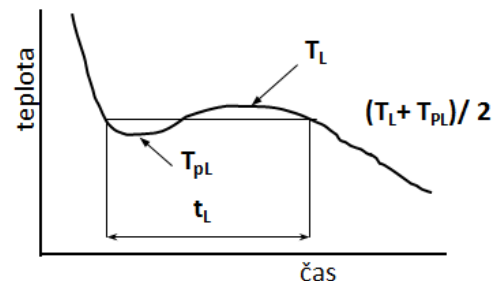
- **Kontrola úrovně očkování** - hodnocení křivky v oblasti teploty likvidu.
 - Vyhodnocuje přechlazení pod rovnovážnou teplotu likvidu $\Delta T_{LPŘ}$ a velikost rekalescence (rozdíl mezi příslušnou maximální a minimální teplotou) ΔT_L .
 - Rovnovážné teploty nelze změřit - stanovují se výpočtem z chemického složení.
 - Lepší stav krystalizačních zárodků pro primární fázi = menší je hodnota přechlazení pod rovnovážnou teplotu a menší rekalescence.



Zjemnění zrna – KF číslo (Kornfeinung)

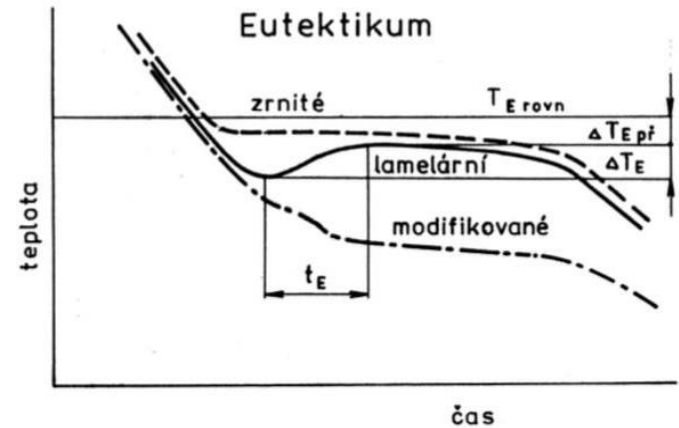
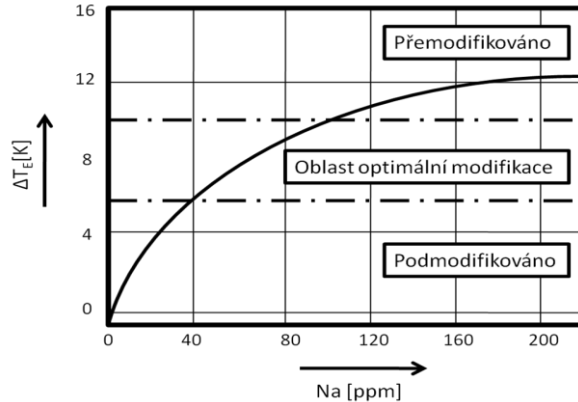
- střední teplota a doba prodlevy,
- vyšší KF = jemnější struktura,
- koeficienty - dle zařízení,

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



Provozní kontrola úrovně očkování a modifikace

- **Kontrola úrovně modifikace** - snížení eutektické teploty.
 - zrnité eutektikum - podchlazení 1-2 K + minimální rekalescenci,
 - lamelární eutektikum - větší přechlazení 2-4 K,
 - snížení eutektické teploty - podle typu slitiny + typu modifikátoru,
 - modifikace Na - optimální - pokles o 6 -10K,
 - modifikace Sr - optimální - pokles o 5 - 7 K.
 - Množství modifikátoru a snížení eutektické teploty.



Použitá literatura

- [1] ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [2] ČSN EN 1706. Hliník a slitiny hliníku – odlitky – chemické složení a mechanické vlastnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [3] Foseco [online]. [vid. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/technology-leader/foseco/>.
- [4] MICHNA, Š. Encyklopedie hliníku. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [5] BOLIBRUCHOVÁ, D. a E. TILLOVÁ. Zlievarenské zliatiny Al-Si. Žilina: Žilinská univerzita, 2005. ISBN 80-8070-485-6.
- [6] STUNOVÁ, B. Hliník a jeho slitiny z pohledu historie, současnosti a budoucnosti. Slévárenství, Brno: Svaz sléváren ČR, 2018, LXVI (3-4), 91-95. ISSN 0037-6825.
- [7] NOVÁ, I. Teorie slévání. 2. díl, Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-185-5
- [8] Šebesta [online]. [vid. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://sebesta.webflow.io/podsluzby/kontrola-kvality-taveniny-mk-industrievertretungen>.
- [9] MK-GmbH [online]. [vid. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://www.mk-gmbh.de/alle-geraetetypen-und-ersatzteile/sind-sie-zufrieden-mit-ihrer-al-schmelze-reinheit.html>.
- [10] MK-GmbH [online]. [vid. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://www.mk-gmbh.de/alle-geraetetypen-und-ersatzteile/gueteueberwachung-von-aisi-schmelzen-hinsichtlich-der-kornf.html>.



Děkuji za pozornost