



Vysoká škola technická a ekonomická
v Českých Budějovicích

Progresivní metody modelování

Doc. Ing. Ladislav SOCHA, Ph.D. a kol.



Vysoká škola technická a ekonomická
v Českých Budějovicích

Úvod do metod fyzikálního modelování proudění a jejich aplikace v technologiích výroby slitin kovů

Seminář č. 3



Úvod

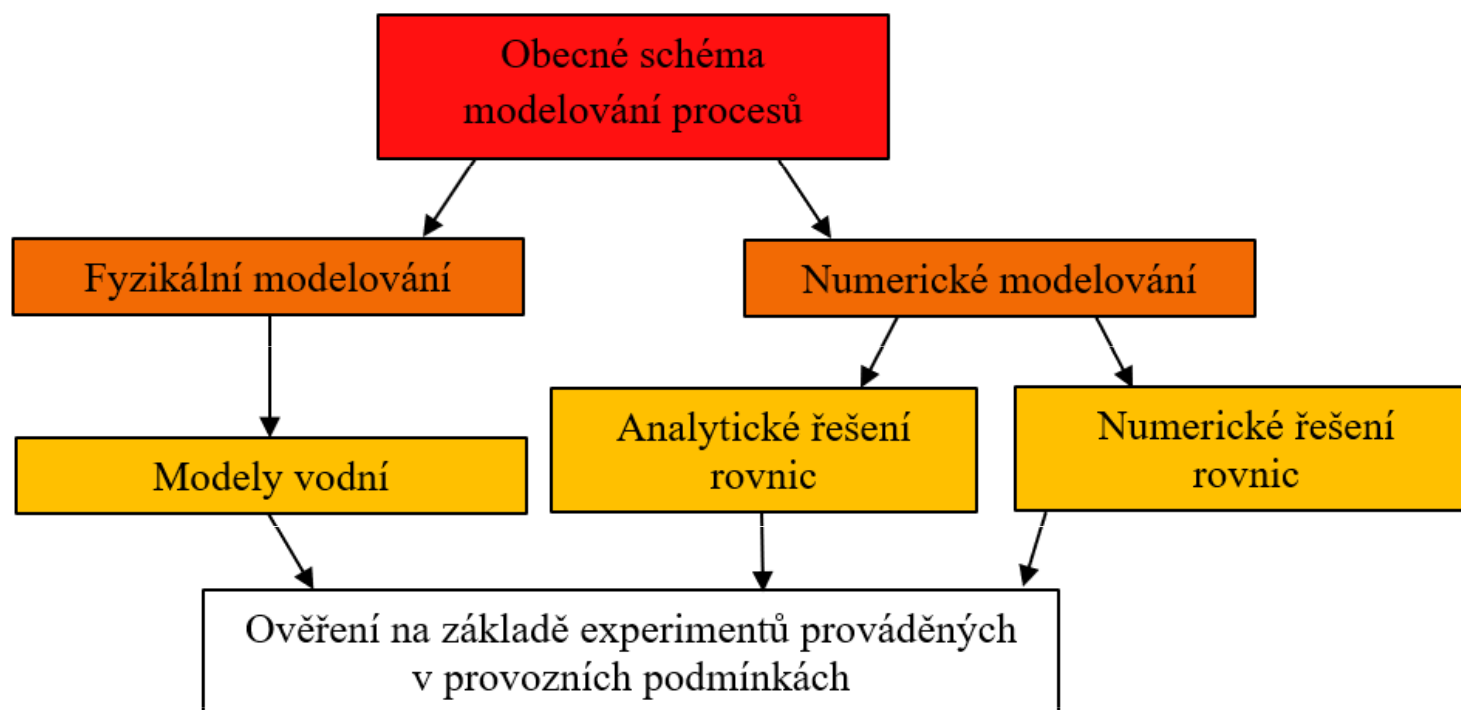
- ✓ **Modelování** probíhajících procesů v systému je metodou, jejíž cílem je co nejméně zachytit chování reálného systému pomocí modelu. Na základě výsledků dosažených na modelu lze pak zpětně předpovídat chování reálného systému při různých změnách procesu.
- ✓ **Model** je vyjádřením podstatných vlastností reálného systému v přijatelné a cílevědomé formě. Musí tedy vyjadřovat vztah mezi příčinou a následkem. Konečným cílem modelování je vytvořit takový model systému, definovaný na objektu, aby chování modelu bylo v jistém smyslu stejné jako u reálného systému za stejných provozních podmínek.



Úvod

- ✓ Obecně lze modelování rozdělit na fyzikální a numerické.
- ✓ Fyzikální modelování umožňuje získat informace o charakteru proudění kovu a také dalších procesů, vyskytujících se při jeho zpracování.
- ✓ Fyzikální modely pokrývají především problematiku hydrodynamiky a jsou konstruovány podle pravidel, vyplývajících z teorie podobnosti, která je realizována prostřednictvím vhodných kritérií podobnosti.
- ✓ Kvůli možnosti pozorování jevů, probíhajících během procesu jsou fyzikální modely vyráběny z transparentních materiálů (např. plexisklo).
- ✓ Průmyslová zařízení jsou stále složitější a provádět experimentální výzkum v průmyslových podmínkách je stále komplikované a často velmi nákladné.
- ✓ Z těchto důvodů se přistupuje k využití fyzikálních modelů.

Schéma modelování procesů





Podstata a základní principy fyzikálního modelování

- ✓ Fyzikální modelování probíhajících procesů v systému je metodou, jejímž cílem je co nejméně zachytit chování reálného systému pomocí **fyzikálního modelu**.
- ✓ Model i dílo má při fyzikálním modelování **stejnou fyzikální podstatu**. Proudění tekutiny je tedy modelováno opět prouděním tekutiny, ale v určitém měřítku délek, rychlostí objemových průtoků, viskozit atd. Podmínkou přenosu výsledků z modelu na dílo je **podobnost procesů** probíhajících v modelu a díle.

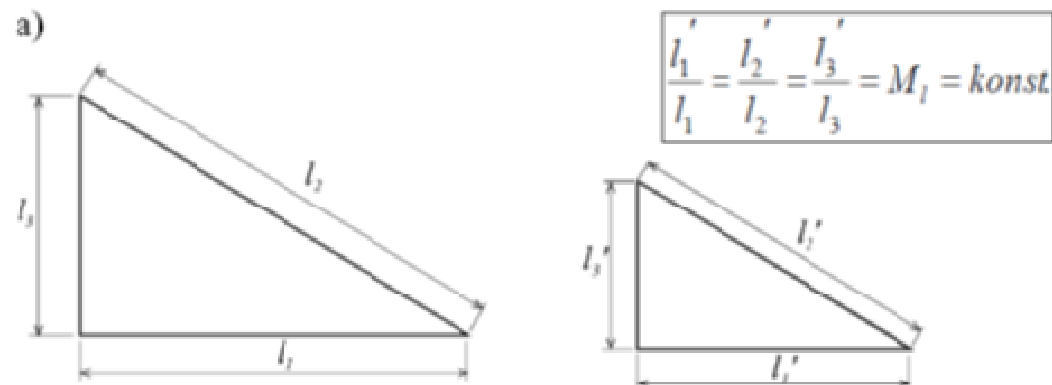
Podobnost dvou systémů

- ✓ Původně byl pojem podobnost zaveden v geometrii jako podobnost plošných a prostorových útvarů. Teorie fyzikálního modelování rozeznává a využívá kromě geometrické podobnosti různé další druhy podobností, které charakterizují podobnost různých fyzikálních jevů a které jsou popsány v následujícím textu. Podobnost dvou systémů pak vyžaduje **podobnost všech relevantních veličin** v celém objemu obou systémů, tzn. v modelu a díle.
- ✓ **Geometrická podobnost** je charakterizována jako podobnost tvaru. Systémy jsou geometricky podobné, když poměr odpovídajících lineárních rozměrů na modelu a díle je stejný. Tento poměr je nazýván *konstantou podobnosti*.

$$M_l = \frac{l'_i}{l_i} = \textit{konst.}$$

Podobnost dvou systémů

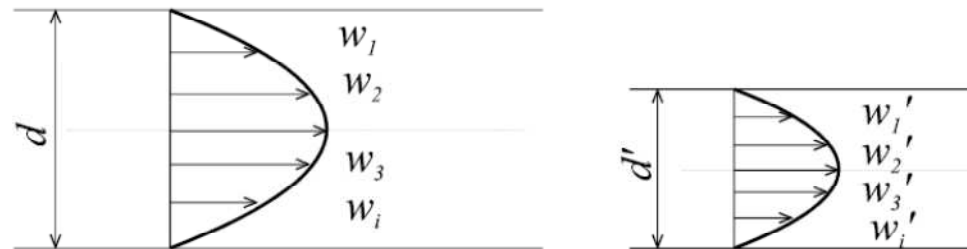
- ✓ V případě, že $M_l=1$, pak jsou oba systémy geometricky shodné. Konstanta podobnosti délek M_l je při vlastním experimentálním modelování rovněž označována jako **délkové měřítko** (scale factor), tzn. měřítko, ve kterém je model fyzicky sestrojen vzhledem k dílu.



Příklad geometricky podobného plošného (a) systému

Podobnost dvou systémů

- ✓ **Kinematická podobnost** vyjadřuje **podobnost pohybu, tj. podobnost rychlostních polí a polí zrychlení**. Kinematická podobnost je v podstatě pozorována mezi dvěma systémy geometricky podobnými, ve kterých je poměr rychlostí (resp. poměr zrychlení) v navzájem odpovídajících místech modelu a díla stálý, přičemž směr rychlosti nebo zrychlení je totožný v obou systémech.

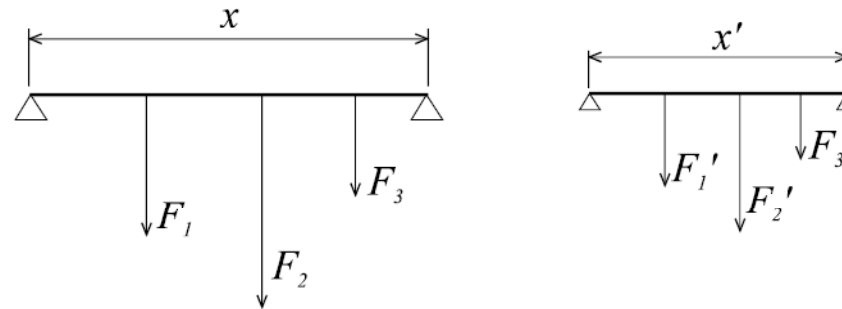


$$\frac{w'_1}{w_1} = \frac{w'_2}{w_2} = \frac{w'_3}{w_3} = \dots = \frac{w'_i}{w_i} = M_w = konst.$$

Kinematická podobnost rychlostních polí při laminárním a ustáleném proudění vazké tekutiny v potrubí různého průměru

Podobnost dvou systémů

- ✓ **Dynamická podobnost** vyjadřuje **podobnost sil** a rovněž je pozorována mezi dvěma geometricky podobnými systémy, ve kterých je poměr sil v navzájem odpovídajících místech a časech stálý a směr jejich působení totožný. U dynamické podobnosti se předpokládá podobnost geometrická i kinematická.



$$\frac{F_1'}{F_1} = \frac{F_2'}{F_2} = \frac{F_3'}{F_3} = M_F = konst.$$

Dynamická podobnost silových polí působících ve dvou geometricky podobných systémech

Podobnost dvou systémů

✓ **Dynamická podobnost při proudění tekutiny** V dynamicky podobných systémech, kde probíhá proudění tekutiny za izotermických podmínek je nutno uvažovat všechny relevantní síly, které mají vliv na výsledný charakter proudění. Základní rozdělení těchto sil: **síly vnější a síly vnitřní**. Síly vnější působí na systém (kapalinu) zvnějšku a síly vnitřní jsou generovány jako důsledek vlastností kapaliny.

	Síla	Vzorec
Vnější	Setrvačná	$F_{inert} = m \cdot a \approx \rho \cdot V \cdot L \cdot a$
	Tíhová	$F_{grav} = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g \approx \rho \cdot L^3 \cdot g$
	Hybnostní	$F_{visk} = \eta \cdot \Delta v = \eta \cdot \frac{v}{L} \cdot \Delta V \approx \eta \cdot \frac{v}{L} \cdot L^3 = \eta \cdot L^2 \cdot v$
Vnitřní	Tlaková	$F_{press} = p \cdot A \approx p \cdot L^2$
	Vazká	$F_{cap} = \sigma \cdot \Delta A \approx \sigma \cdot L^{-1} \cdot L^2 \approx \sigma \cdot L$
	Kapilární	$F_{cap} = \sigma \cdot L$

Kde m – hmotnost, kg

a – zrychlení, $m \cdot s^{-2}$

ρ – hustota, $kg \cdot m^{-3}$

L – charakteristický rozměr, m

w – rychlost, $m \cdot s^{-1}$

g – tíhové zrychlení, $m \cdot s^{-2}$

V – objem, m^3

τ – čas, s

p – tlak, Pa

p_d – dynamický tlak, Pa

η – dynamická viskozita, $Pa \cdot s$

ν – kinematická viskozita, $m^2 \cdot s^{-1}$

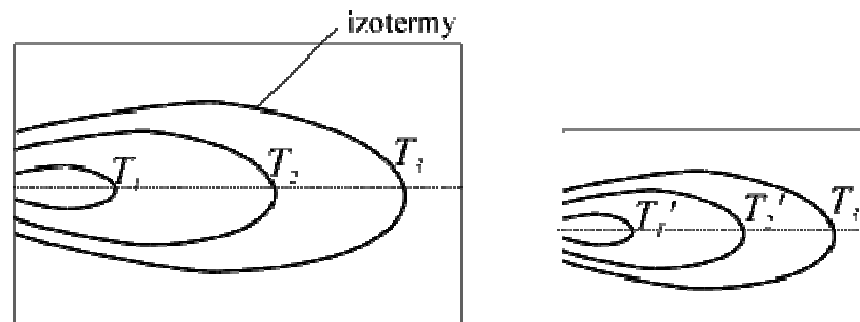
σ – povrchové napětí, $N \cdot m^{-1}$

F – síla, N

Podobnost dvou systémů

- ✓ **Tepelná podobnost** charakterizuje podobnost teplot, teplotních gradientů a tepelných toků v odpovídajících časech procesu a odpovídajících místech geometricky podobných systémů. Tepelnou podobnost je nutno zajistit při modelování neizotermálních procesů.

$$\frac{T_1'}{T_1} = \frac{T_2'}{T_2} = \frac{T_3'}{T_3} = M_T = \text{konst.}$$



Tepelná podobnost teplotních polí ve dvou geometricky podobných systémech



Podobnost dvou systémů

- ✓ **Chemická podobnost** vyjadřuje podobnost koncentrací a koncentračních gradientů v odpovídajících časech procesu a odpovídajících místech geometricky podobných systémů.
- ✓ Obdobným způsobem by bylo možné charakterizovat i další druhy podobností.

Bezrozměrové parametry

- ✓ Vyjádření podobnosti dvou systémů pomocí konstant podobnosti je sice možné, ale z praktického hlediska není příliš rozšířené. Nejčastěji využívaným způsobem vyjádření podobnosti dvou systémů je pomocí tzv. **bezrozměrových parametrů**.
- ✓ Bezrozměrový parametr K_q v základním systému:

$$K_q = \frac{q_i}{q_j}$$

kde: K_q – bezrozměrový parametr veličiny q

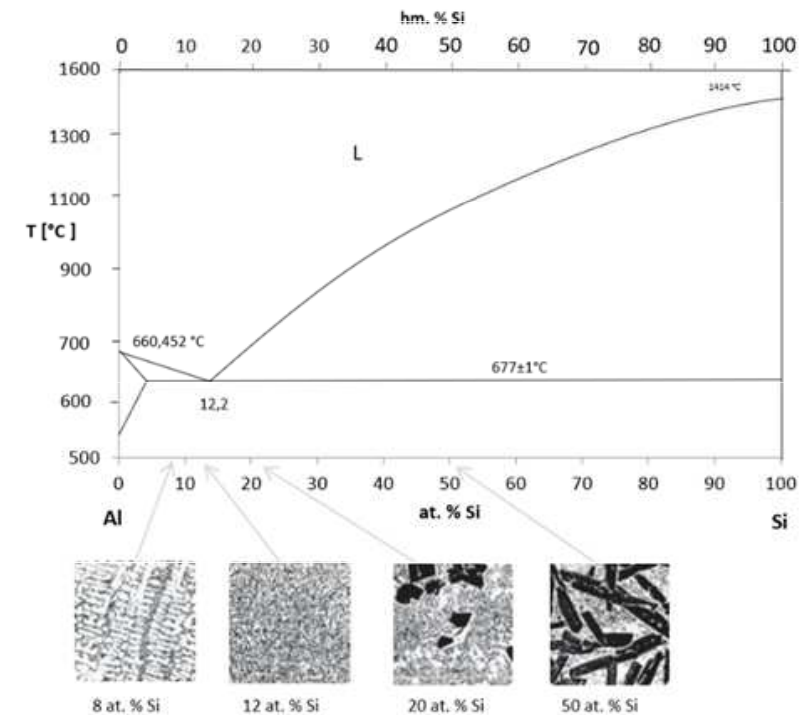
$\frac{q_i}{q_j}$ – poměr dvou libovolně zvolených veličin q v základním systému

(např. poměr l_1/l_2)

Slévárenské slitiny typu Al-Si (tzv. siluminy)

✓ Obsah křemíku jako základní přísady je ve dvou a vícesložkových slitinách typu Al-Si vždy vyšší, než je jeho max. rozpustnost v tuhém roztoku Al. Podle rovnovážného diagramu tvoří pak hliník (fáze α) s křemíkem (fáze β) eutektický systém s omezenou rozpustností Si v Al. Slitiny Al-Si lze rozdělit na:

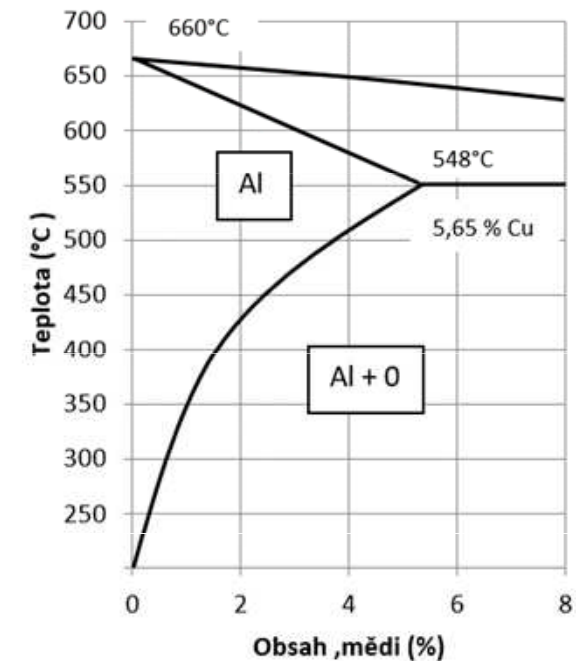
- *podeutektické* – s obsahem Si do 10 % (nejpočetnější skupina),
- *eutektické* – s obsahem Si v oblasti eutektického složení,
- *nadeutektické* – s obsahem Si nad eutektickým složením, hranice není přesně definována.



Rovnovážený diagram Al-Si a typické strukturní složení dle obsahu Si

Slévárenské slitiny typu Al-Cu (tzv. duraly)

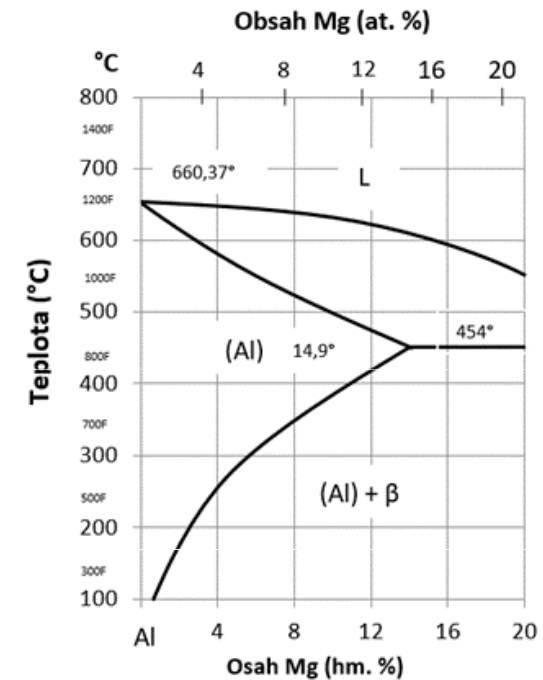
- ✓ Obsahují obvykle 4–5 % Cu.
- ✓ Slitiny s obsahem Cu přesahujícím maximální rozpustnost v Al nemají technický význam.
- ✓ Normalizované slitiny Al-Cu obsahují titan v množství asi 0,3 % pro zjemnění primárního zrna.
- ✓ Dalšími přísadovými prvky bývají hořčík, který zvyšuje pevnost, nebo mangan.
- ✓ 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 však velmi špatné.



Rovnovážný diagram Al-Cu

Slévárenské slitiny typu Al-Cu (tzv. hydronalium)

- ✓ Podle obsahu hořčíku se 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.



Rovnovážný diagram Al-Mg



Slévárenské slitiny hořčíku

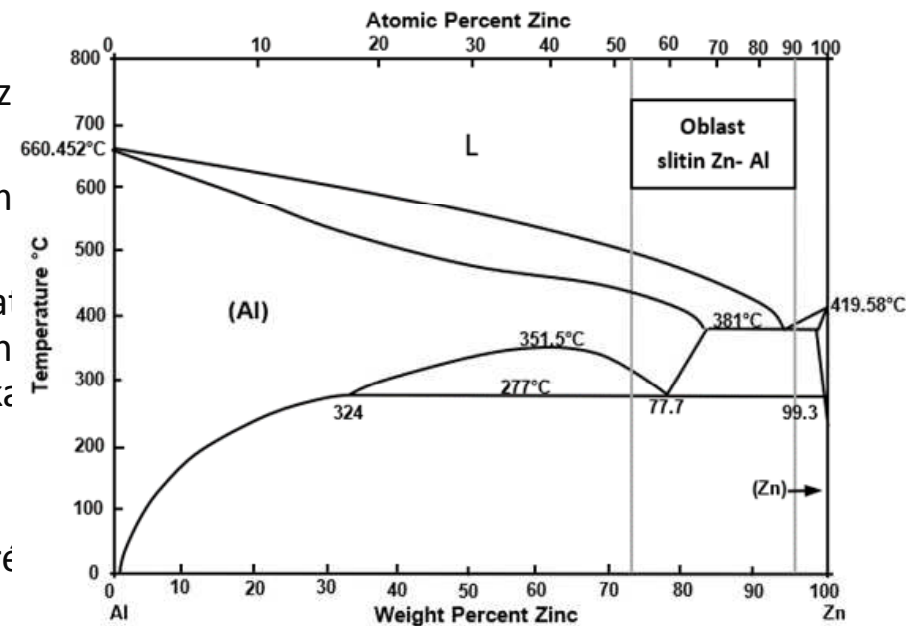
- ✓ V technické praxi se hořčík používá výhradně jako slitiny.
- ✓ Převážná část hořčíkových slitin se zpracovává odléváním.
- ✓ Hlavním přísadovým prvkem je téměř výhradně hliník (jedná se tedy o slitiny Mg-Al).
- ✓ Technicky zajímavé, ale výrobně mimořádně složité jsou superlehké slitiny Mg-Li.
- ✓ Technický význam ostatních typů slitin pro odlévání je zanedbatelný.
- ✓ Obsah hliníku ve slévárenských slitinách se pohybuje v rozmezí od 3 do 9 %Al.

Slévárenské slitiny mědi

- ✓ Měď tvoří základní prvek ve velmi rozmanitém okruhu slitin.
- ✓ U slitin se často využívají jejich specifické mechanické, frikční, fyzikální, antikoroziční a jiné vlastnosti, které u jiných druhů slitin nejsou dosažitelné.
- ✓ Slitiny mědi se podle hlavního přísadového prvku dělí do dvou základních skupin – na bronz a mosazi. 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 kritéria je možno slitiny rozdělit zhruba do 3 skupin:
 - *slitiny s úzkým intervalem tuhnutí do asi 50 K – žluté mosazi, manganový, hliníkový a niklový bronz (slitiny CuZnNiSnPb), chromová měď,*
 - *slitiny s intervalem tuhnutí 50-110 K – 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.*

Slévárenské slitiny zinku

- ✓ Obsahují jako hlavní přísadový prvek hliník.
- ✓ Obsah hliníku v normovaných slitinách se pohybuje v rozmezí 4–27 % Al.
- ✓ 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-Al27 mají již poněkud vyšší lící 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.



Rovnovážný diagram Zn-Al



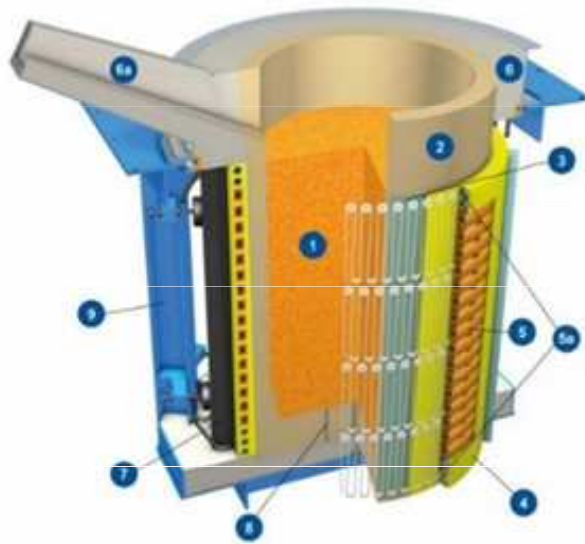
Výroba a metalurgické zpracování slitin neželezných kovů

✓ Slitiny neželezných kovů se vyrábí v **tavicích pecích**, kde se kov ohřívá přibližně na technologickou lici teplotu. Pro 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*. Používané druhy tavicích pecí jsou následující:

- *Kelímkové pece*
- *Komorové pece*
- *Šachtové pece*
- *Vanové pece*



Výroba a metalurgické zpracování slitin neželezných kovů



Kelímková indukční pec

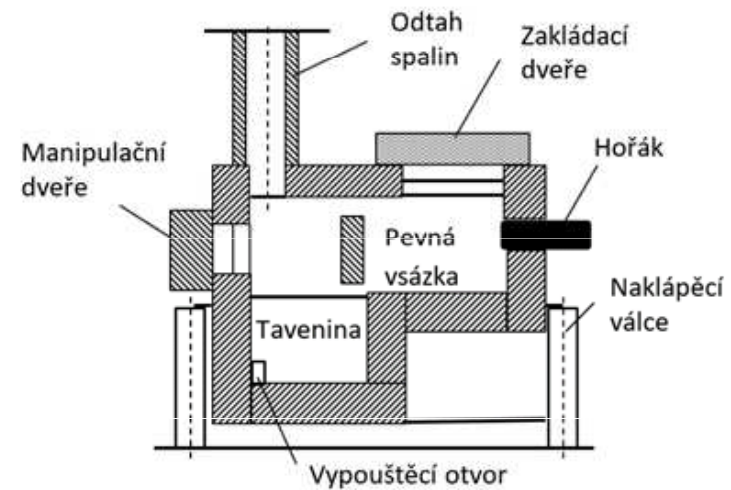


Schéma komorové tavící pece



Výroba a metalurgické zpracování slitin neželezných kovů

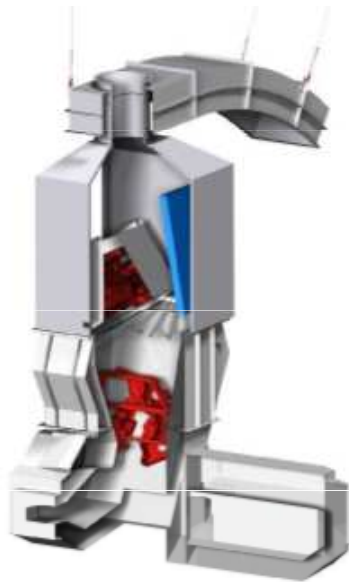


Schéma šachtové pece

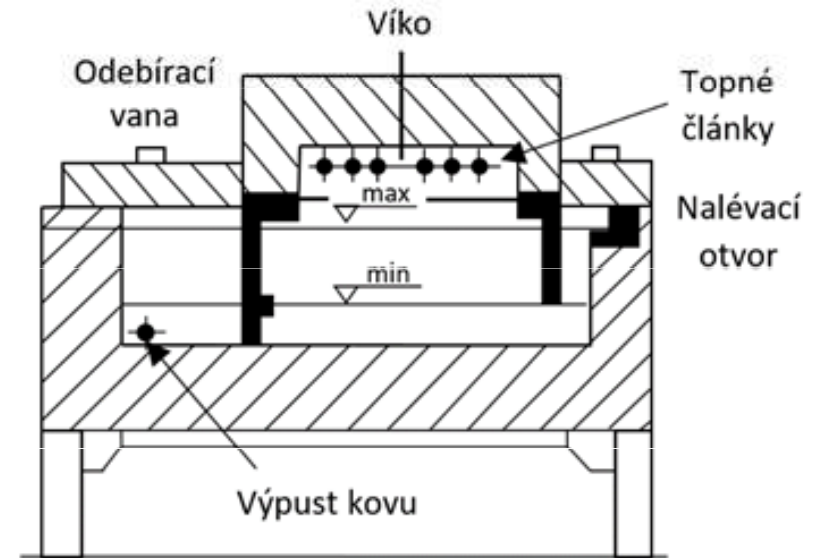


Schéma vanové pece

Výroba a metalurgické zpracování slitin neželezných kovů

- ✓ K udržování teploty taveniny v blízkosti jednotlivých pracovišť nebo licích agregátů slouží především **udržovací pece**. Topný systém umožňuje regulovat teplotu kovu a částečně též tavit pevnou vsázku, přidávanou do roztaveného kovu. V udržovacích pecích se obvykle neprovádí zásadní úprava chemického složení ani větší metalurgické zásahy. Taveninu je často možné očkovat nebo modifikovat.
- ✓ **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. 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.

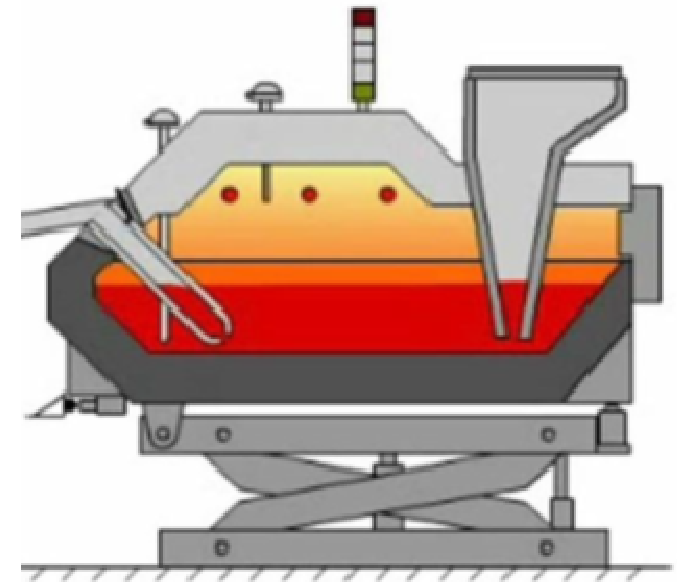


Schéma elektrické dávkovací pece

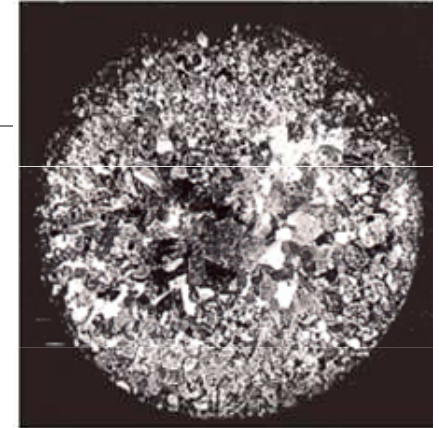


Úprava chemického složení taveniny

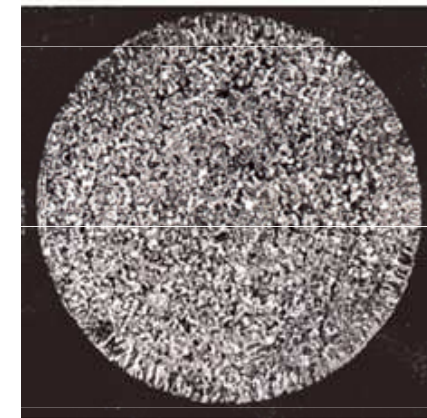
- ✓ Při tavení hliníkových slitin se obvykle vychází ze vsázkových surovin, které svým chemickým složením odpovídají tavené značce.
- ✓ Úpravy chemického složení taveniny proto obvykle mají za cíl pouze drobné korekce obsahu jednotlivých prvků, eventuálně kompenzaci propalu.
- ✓ Úprava chemického složení se provádí po roztavení vsázky a po chemické analýze.
- ✓ Příkladové 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.

Očkování

- ✓ Provádí se za účelem zjemnění zrna a tedy zlepšení mechanických i mnoha technologických vlastností.
- ✓ Provádí se titanem nebo kombinací titanu a bóru.
- ✓ Tyto prvky se do taveniny vnášejí pomocí očkovacích solí, (např. K_2TiF_6 , KBF_4 a dalších), očkovacích tablet nebo v podobě předslitin Al-Ti nebo Al-Ti-B.
- ✓ 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.



Základní neočkovávaná slitina



Po očkování Al-Ti

Modifikace

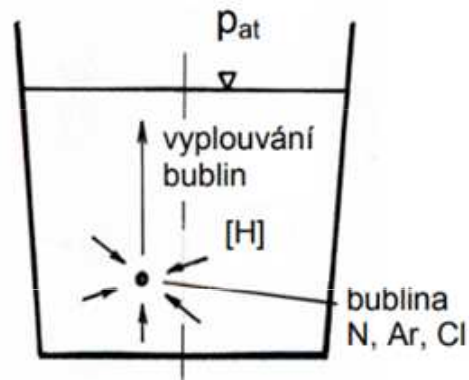
- ✓ Provádí se za účelem změny tvaru křemíku v eutektiku.
- ✓ Křemík se v eutektiku vylučuje ve třech různých morfologických podobách – zrnité, lamelární, modifikované.
- ✓ Nejsilnější modifikační účinek má **sodík**.
- ✓ Sodík se do taveniny přidává ve formě exotermických tablet, jako kovový sodík či modifikační soli. Dalším prvkem, který má dobrou modifikační schopnost, je **stroncium**.
- ✓ Je mnohem méně reaktivní než sodík a dává vysoké a stabilní využití (až 90 %).
- ✓ Používá se jako předslitina s hliníkem (případně s hliníkem a křemíkem).
- ✓ Čím je vyšší teplota taveniny, tím rychleji se předslitina rozpouští a tím rychleji nabíhá modifikační účinek.

Rafinace taveniny

- ✓ Jako rafinace se označuje proces, při kterém se v tavenině snižuje množství vměstků a případně i vodíku. Při rafinaci se využívají zejména následující postupy:
 - **odstátí taveniny** – *separace vměstků na principu jejich vyplouvání,*
 - **rafinace plynovými bublinami** – *difuze vodíku do bublin s nulovým parciálním tlakem vodíku, s nimiž je vynášen na hladinu, nebo s nimi chemicky reaguje.*

- ✓ 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.

Rafinace taveniny



Princip odplyňování neutrálními a aktivními plyn

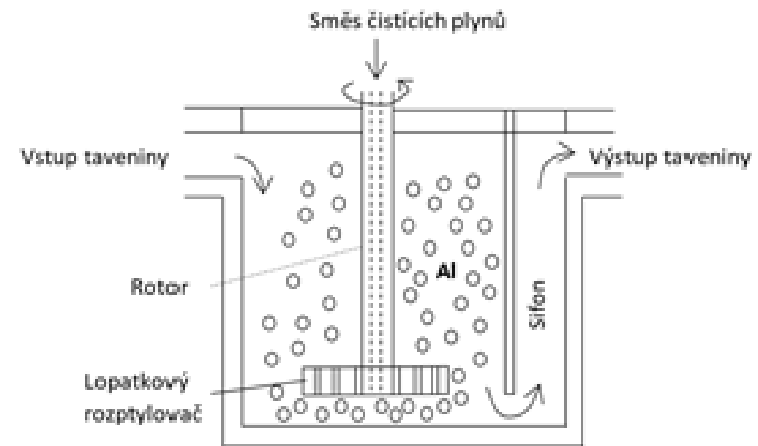


Schéma zařízení pro rafinaci hliníku

- **chemická vazba vměstků pomocí krycích a rafinačních solí** – rozrušení oxidické obálky chemickou reakcí a uvolnění nezreagovaného kovu zpět do lázně, ochrana hladiny před okolní atmosférou,
- **mechanické zachycování vměstků při filtraci taveniny.**

Odlévání slitin hliníku

- ✓ 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. Z hlavních způsobů odlévání hliníkových slitin lze zmínit následující:
 - *Lití do pískových forem*
 - *V-proces*
 - *Lití do skořepinových forem*
 - *Gravitační lití do kovových forem*
 - **Vysokotlaké lití**
 - **Nízkotlaké lití**

Modifikace

- ✓ Provádí se za účelem změny tvaru křemíku v eutektiku.
- ✓ Křemík se v eutektiku vylučuje ve třech různých morfologických podobách – zrnité, lamelární, modifikované.
- ✓ Nejsilnější modifikační účinek má **sodík**.
- ✓ Sodík se do taveniny přidává ve formě exotermických tablet, jako kovový sodík či modifikační soli. Dalším prvkem, který má dobrou modifikační schopnost, je **stroncium**.
- ✓ Je mnohem méně reaktivní než sodík a dává vysoké a stabilní využití (až 90 %).
- ✓ Používá se jako předslitina s hliníkem (případně s hliníkem a křemíkem).
- ✓ Čím je vyšší teplota taveniny, tím rychleji se předslitina rozpouští a tím rychleji nabíhá modifikační účinek.

Vysokotlaké lití

- ✓ Nejdůležitější technologií výroby hliníkových odlitků je **vysokotlaké lití**.
- ✓ 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.
- ✓ Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebrání formy a vytažení volných částí a jader.
- ✓ 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.
- ✓ 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.
- ✓ 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.

Nízkotlaké lití

- ✓ Stroj pro tuto technologii 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.
- ✓ 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.
- ✓ Využití tekutého kovu je při nízkotlakém lití mimořádně vysoké a dosahuje přes 90 %. Kvalita odlitků, vyrobených touto metodou, je velmi vysoká.
- ✓ Nízkotlakým litím je možno vyrábět různorodé hmotnostní kategorie odlitků.
- ✓ Při lití silnostěnných odlitků s dlouhou dobou tuhnutí se však velmi prodlužuje délka výrobního cyklu.

Nízkotlaké lití

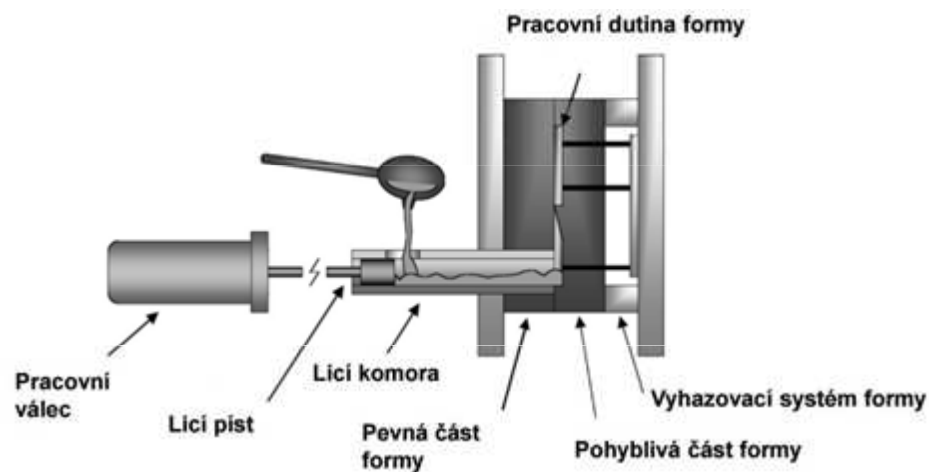


Schéma procesu tlakového lití

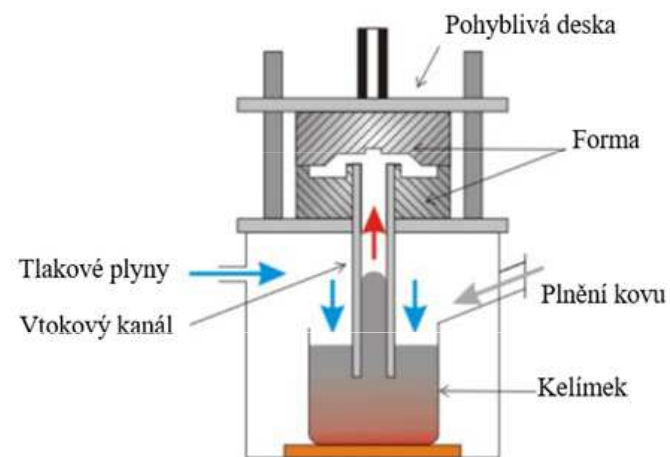


Schéma procesu nízkotlakového lití