

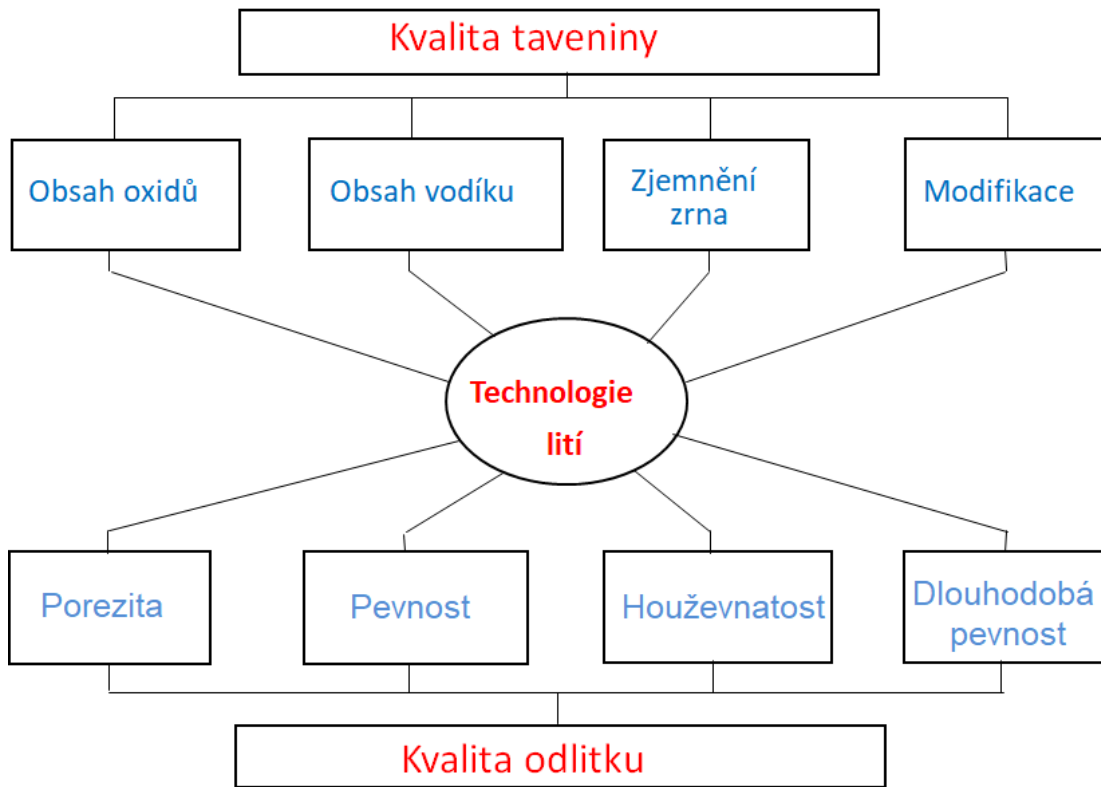


# Slévárenské materiály a progresivní technologie

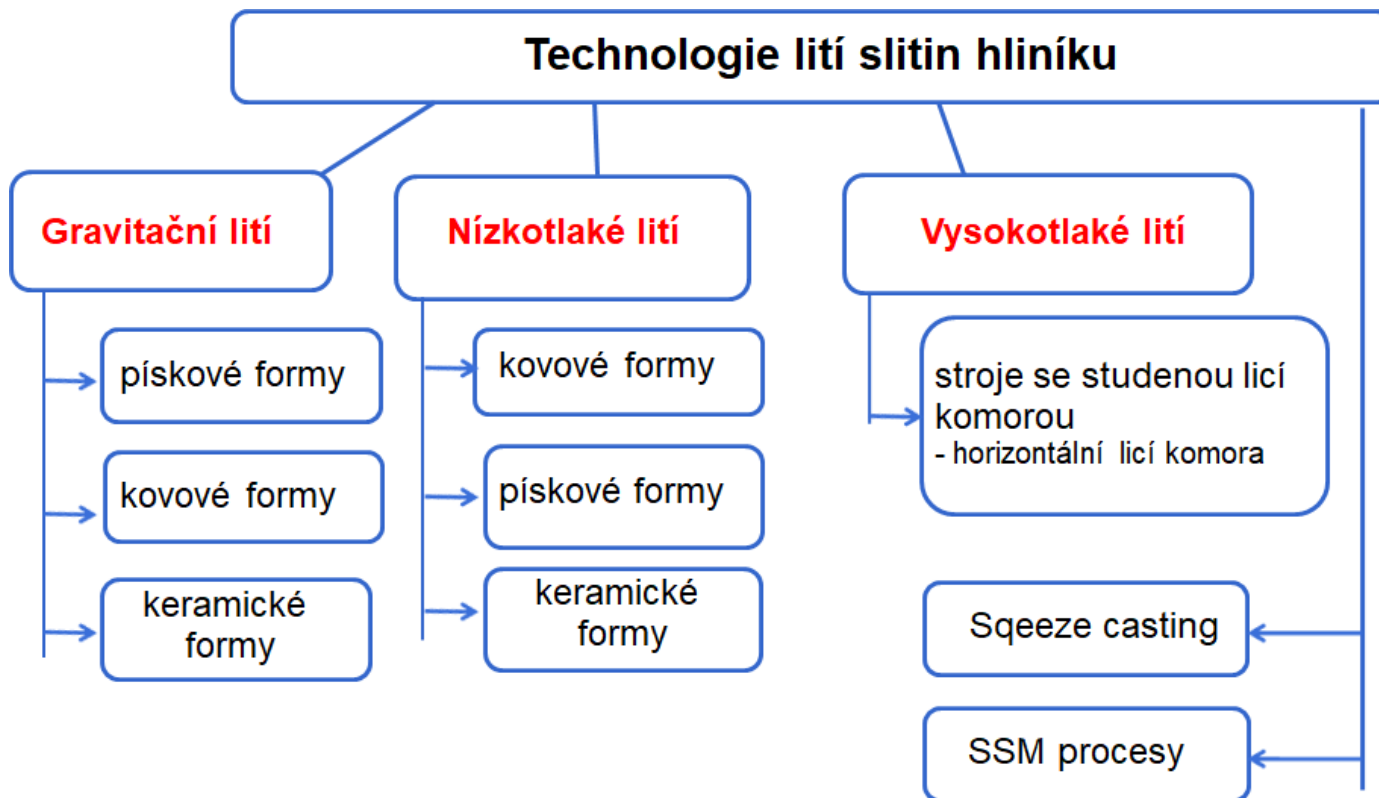
# Technologie výroby odlitků ze slitin hliníku

?

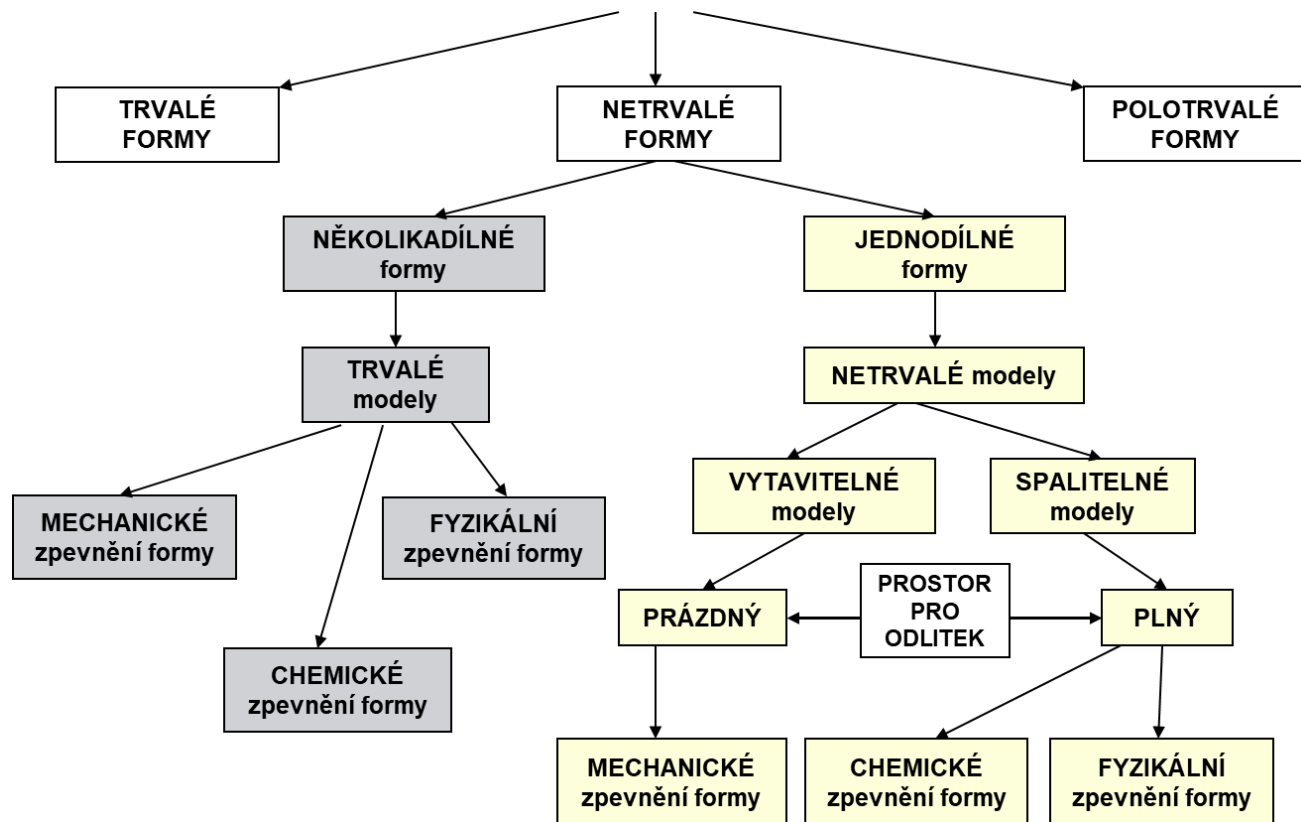
# Technologie výroby odlitků ze slitin hliníku



# Technologie výroby odlitků ze slitin hliníku



# Metody výroby odlitků



# Metody výroby odlitků

Doporučované hodnoty minimálních tloušťek stěn odlitků [mm]						
Slitina	Pískové formy odlitky			Kovové formy odlévané		Metoda vytavitelného modelu
	drobné	střední	velké	gravitačně	tlakově	
Ocel	6 - 10	10 - 12	15 - 40	8		0,5 - 2
LLG	3 - 6	6 - 10	10 - 25	4		
Bílá litina	3 - 6	6 - 9				
LKG	4 - 6	7 - 12	10 - 25			0,5 - 2
Temperovaná litina	1,5 - 3	3 - 5				
Slitiny Cu	3 - 6	5 - 8	12 - 30	3 - 6	1,5 - 4	0,3 - 1,5
Slitiny Al	3 - 5	5 - 8	8 - 17	2,5 - 4	0,8 - 2,5	
Slitiny Mg	4	6		2,5 - 5	0,8 - 3	
Slitiny Zn	1,5 - 3			2	0,5 - 2	
Slitiny Sn a Pb					0,5 - 2	

Minimální průměry odlévaných otvorů [mm]							
Materiál odlitku	Pískové formy			Kovové formy		Keramické formy	
	výjimečně	běžně malé odlitky	běžně velké odlitky	gravitační lití	tlakové lití	výjimečně	běžně
Ocel	15 - 20	50	80 - 100			1,5	2,5
Grafitické litiny	10 - 15	20	40	15			
Temperovaná litina	5	10	30				
Slitiny Cu	12	20	30	12	2,5 - 3		
Slitiny Al	5	20	30	6 - 8	1 - 1,5		
Slitiny Mg	5	20	30	6 - 8	1 - 1,5		
Slitiny Zn	5	20	30	6	10		

# Gravitační lití do netrvalých forem – pískové formy

- lze vyrobit jakýkoliv odlitek bez ohledu na složitost, tvar, rozměry, hmotnost a materiál;
- min. tloušťka stěny 3 až 4 mm, max. neomezena = z hlediska vlastností odlitku nejsou vhodné stěny nad cca 30 mm;
- Nevýhodou: - přesnost, jakost povrchu;  
- relativně vysoké náklady na obrábění.

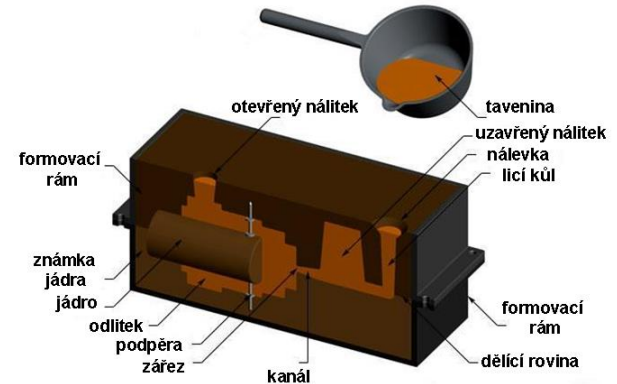
## ○ **Vtoková soustava** – klidné plnění dutiny formy;

- minimální výška dopadu proudu taveniny;
- zadržení všech nečistot;
- spodní zaústění zářezů;
- většinou podtlaková soustava = nejmenší průřez je spodní průřez svislého kanálu:

$$S_K : S_R : S_Z = 1 : 2 : 4$$

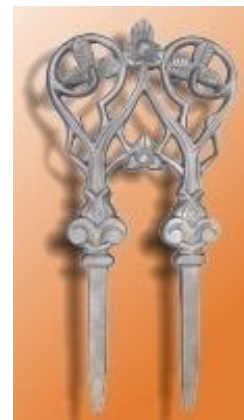
$$S_K : S_R : S_Z = 1 : 3 : 6$$

- Slitiny hliníku – objemové změny - tepelné uzly - nálitky, chladítka (usměrněné tuhnutí).



# Gravitační lití do netrvalých forem – pískové formy

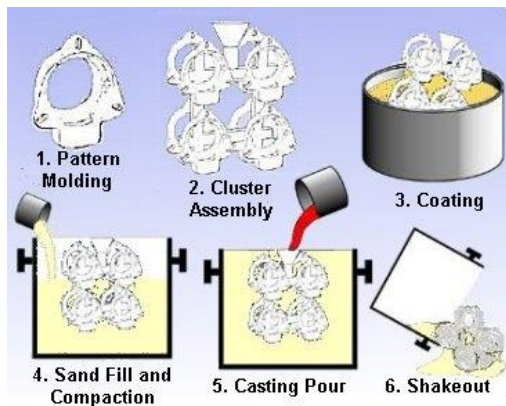
- **Pískové formy** – odlitky ze slitin hliníku - ostřivo nejčastěji  $\text{SiO}_2$ ;
  - relativně nízká teplota lití 720 až 750°C – nejsou vysoké požadavky na žáruvzdornost FS;
  - granulometrická skladba ostřiva = hladkost povrchu odlitku –  $d_{50} = 0,1$  až 0,2 mm;
- **Odlitky vyráběné odléváním do pískových forem** - příruby, převodové skříně, řemenice, části ventilátorů, ruční kola, kryty, umělecké odlitky.



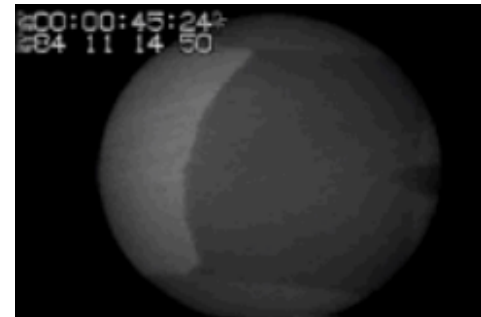
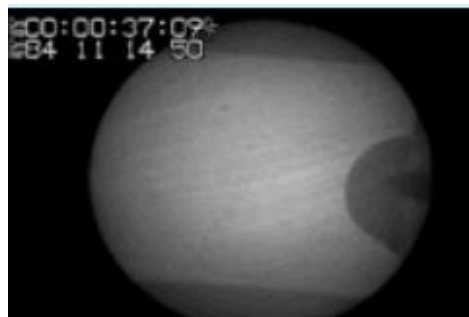


# Gravitační lití do netrvalých forem - na spalitelný model

- **Lost foam** = model - sestava, včetně vtokové soustavy - nanášení keramického povlaku - zasypaní ostřivem - odlévání - rozbití formy a vyjmutí odlitku.



*Plnění formy – nevhodně  
připravený model*



*Plnění formy – vhodně připravený model*

# Gravitační lití do netrvalých forem – vytavitelný model

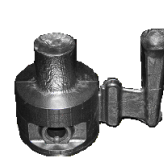
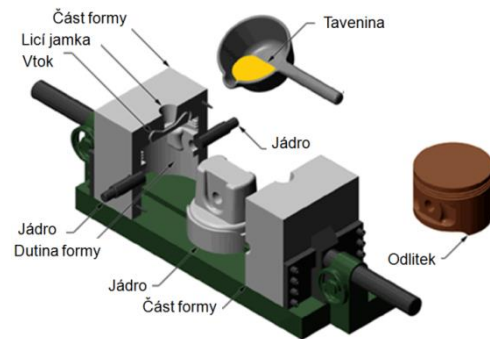
- **Přesné lití** - skořepiny – tvarově komplikované odlitky;
  - vysoká přesnost a kvalita povrchu;
  - min. tloušťka stěny 0,5 mm, běžně 2-3 mm (kritická tloušťka roste s rozměry);
  - nejběžnější AlSi7Mg , AlSi10Mg, AlCu4Ti , AlSi12 – zabíhavost, mechanické vlastnosti;
  - samonosné skořepiny – přehřev 200 – 300°C.



# Gravitační lití do trvalých forem – kovové formy

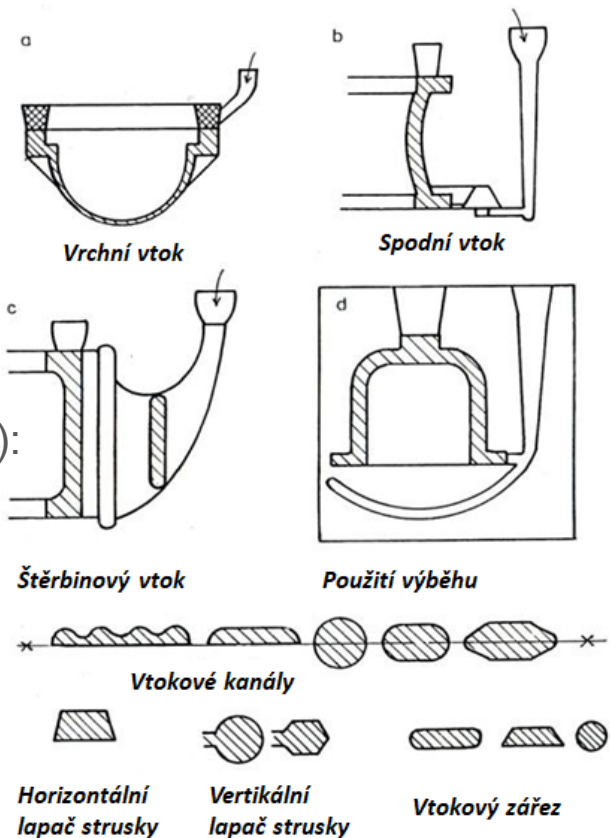
- ***Ve srovnání s pískovými formami***

- vyšší ochlazovací účinek formy – jemnější struktura odlitku – vyšší mechanické vlastnosti;
- vyšší přesnost odlitků – snížení tolerancí rozměrů;
- vyšší kvalita povrchu;
- vyšší produktivita práce.
- zvýšené náklady na výrobu formy;
- forma není prodyšná – odvzdušnění.
- forma – ošetření, temperace,
- větší odpor při smršťování odlitku v době jeho tuhnutí a chladnutí.
- slitiny s úzkým intervalem tuhnutí → podeutektické a eutektické slitiny,
- hmotnost odlitků od několika gramů do cca 20 – 30 kg i více;
- limit rozměrů odlitků – podle licích strojů;
- minimální tloušťka stěny 4-5 mm, obvykle větší; úkosy 2 - 3°.



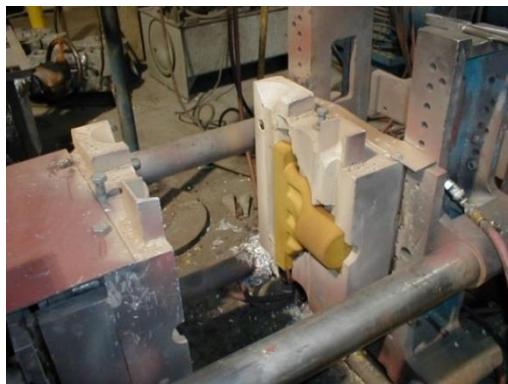
# Gravitační lití do trvalých forem – kovové formy

- **Kovová forma** - dle parametrů licího stroje:
  - dělicí rovina – horizontální nebo vertikální (výhodnější).
- **Vertikální dělicí rovina - vtoková soustava**
  - licí nálevka, svislý licí kůl, rozváděcí kanál a zářez.
  - s ohledem na minimalizaci vírů – zaústění zářezu do nejnižšího místa formy;
  - **Podtlaková soustava** (průřezy se směrem k odlitku zvětšují):
    - $S_K:S_R:S_Z = 1:2:3$  malé a střední odlitky;
    - $S_K:S_R:S_Z = 1:3:6$  velké a složité odlitky;



# Gravitační lití do trvalých forem – kovové formy

- **Formy v provozu** – mechanické, cyklické tepelné a chemické namáhání.
  - Materiál - LLG (životnost 15 až 30 000 nalití), LKG, konstrukční ocel 11 573, 11 700;  
- legovaná ocel (2,8 % Cr; 1,2 % Ni), vysokolegovaná ocel - vložky, jádra.
  - Předehřev cca 150 až 200 °C (v některých oblastech i více);
  - Odvzdušnění dutiny formy: - odvzdušňovací kanálky v dělicí rovině, odvzdušňovací zátky.
  - Ošetření líce formy - ochranný nátěr, postřik - zabránit lepení odlitku na formu;  
- regulace podmínek odvodu tepla.



# Gravitační lití do trvalých forem – kovové formy

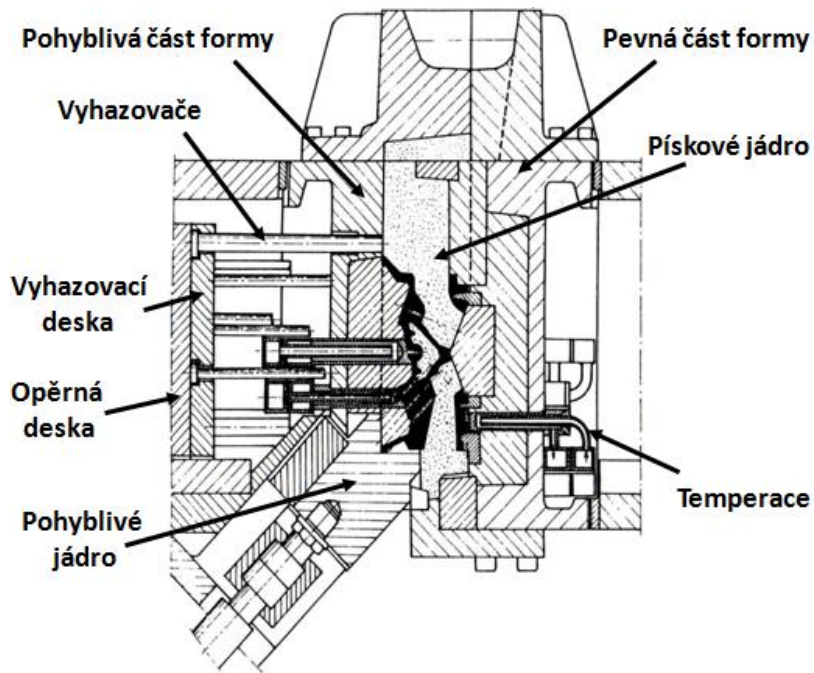
- **Jádra:**
  - úkosity jader pro slitiny Al - 2 až 3°;
  - kovová – příslušné hydraulické tahače;
  - písková – jaderník, vhodná formovací směs.



*Naklápěcí ložisko*



*Rameno nápravy*



*Kovová forma pro odlévání hlav válců*

# Gravitační lití do trvalých forem – kovové formy

- **Pracovní cyklus:**

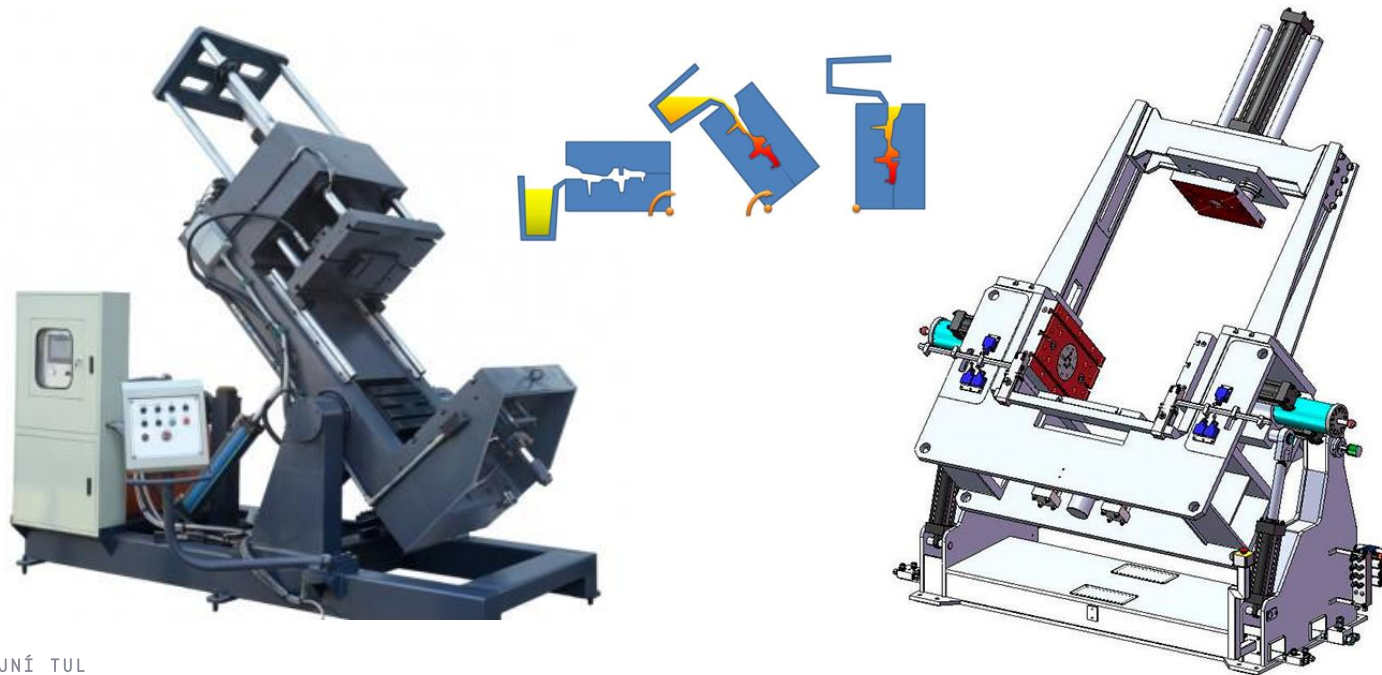
- Příprava formy na odlévání (předehřev, ochlazení, čištění);
- založení jader;
- zavření formy;
- odlévání;
- tuhnutí odlitku;
- otevření formy;
- vyjmutí odlitku.



Gravitační licí stroje

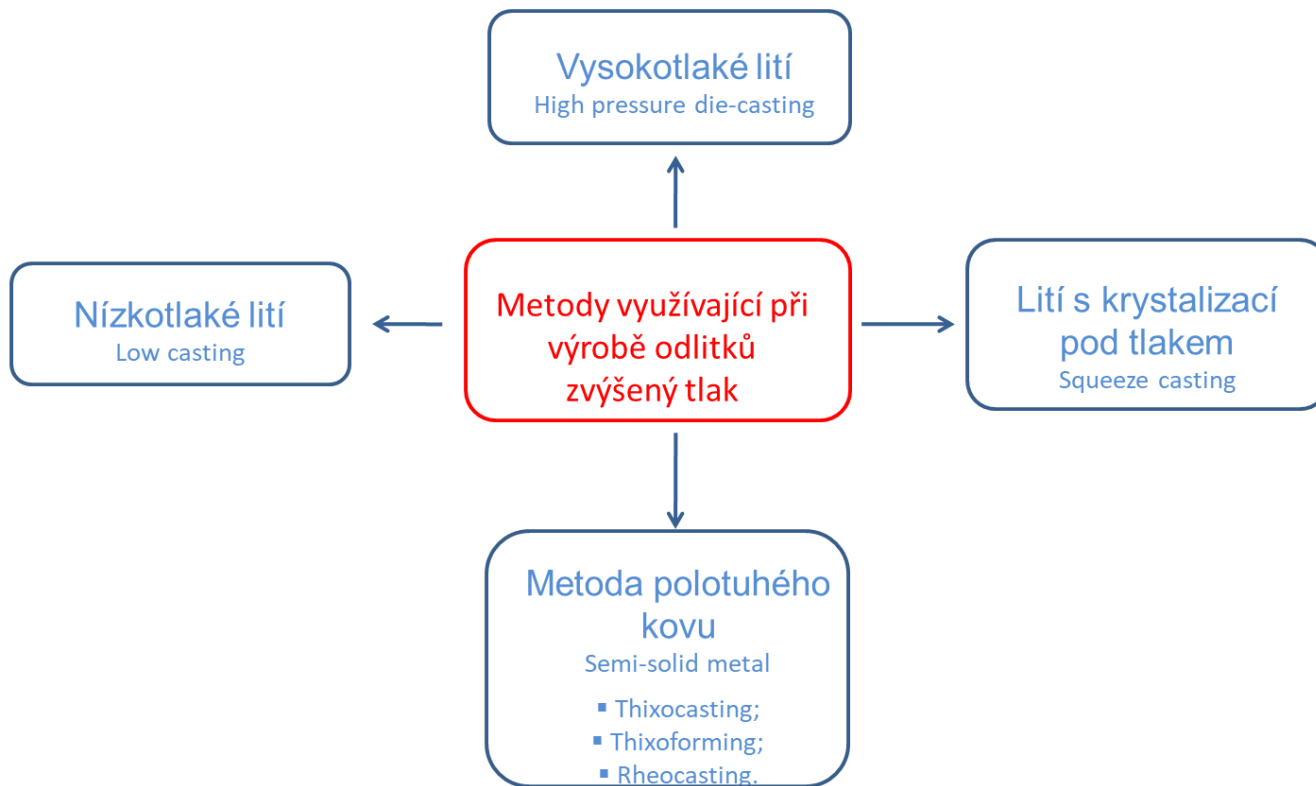
# Gravitační lití do netrvalých forem – kovové formy

- **Sklopné lití** - forma se začíná plnit v šikmé poloze a během lití se forma sklápí do vodorovné polohy = klidné a rovnoměrné proudění kovu.



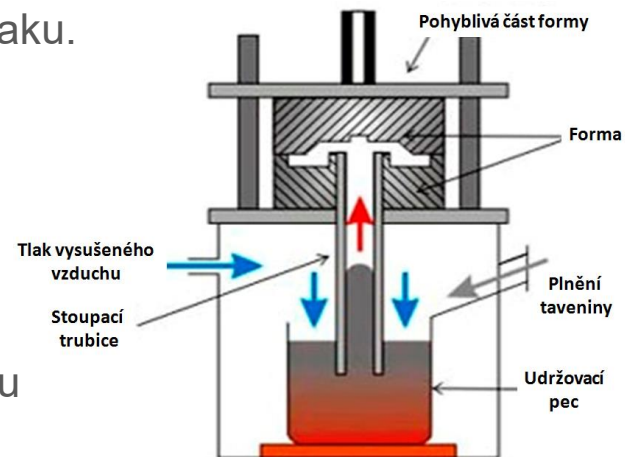


# Výroba odlitků s využitím zvýšeného tlaku



# Nízkotlaké lití

- **Princip:** - tavenina je z udržovací pece plněna do dutiny formy přetlakem vysušeného vzduchu (0,03 až 0,04 MPa), odlitek tuhne za působení tlaku.
- **Použití:** - odlitky z lehkých neželezných slitin,
  - nejčastěji odlitky symetrické kolem osy rotace,
  - nejčastěji tloušťka stěny odlitku od 8 do 30 mm.
- **Výhody:**
  - Vysoké využití kovu 90 – 95%;
  - vysoká kvalita odlitků (tavenina není během cyklu ve styku s okolní atmosférou; proudění během plnění je klidné → dobrá kompaktnost odlitku bez porezity).
- **Zvláštnost:** Odlitek musí usměrněně tuhnout odshora směrem dolů → tloušťka stěn odlitku se musí zvětšovat odshora směrem dolů k trubici = usměrněně tuhnutí zcela opačným směrem než u gravitačního lití!



Princip nízkotlakého lití

# Nízkotlaké lití



Zařízení pro nízkotlaké lití

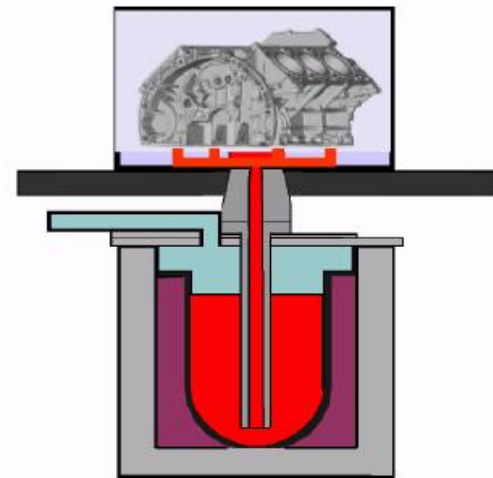
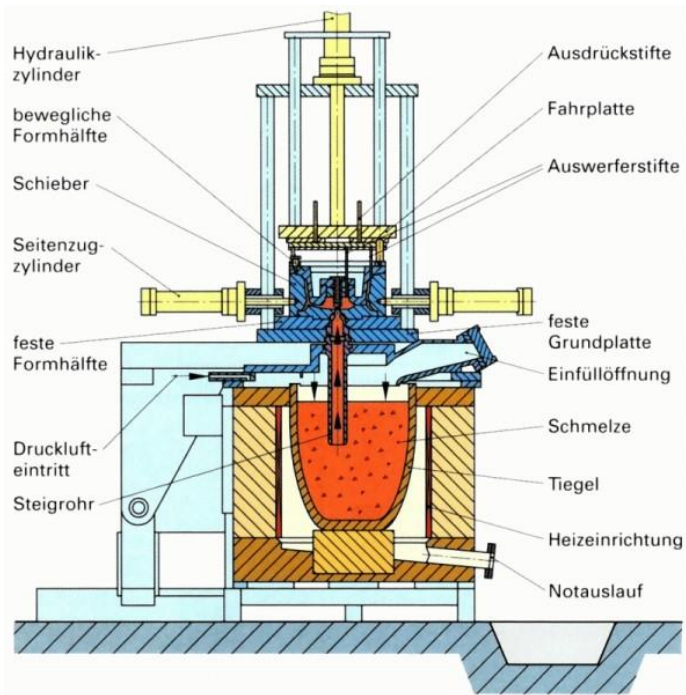
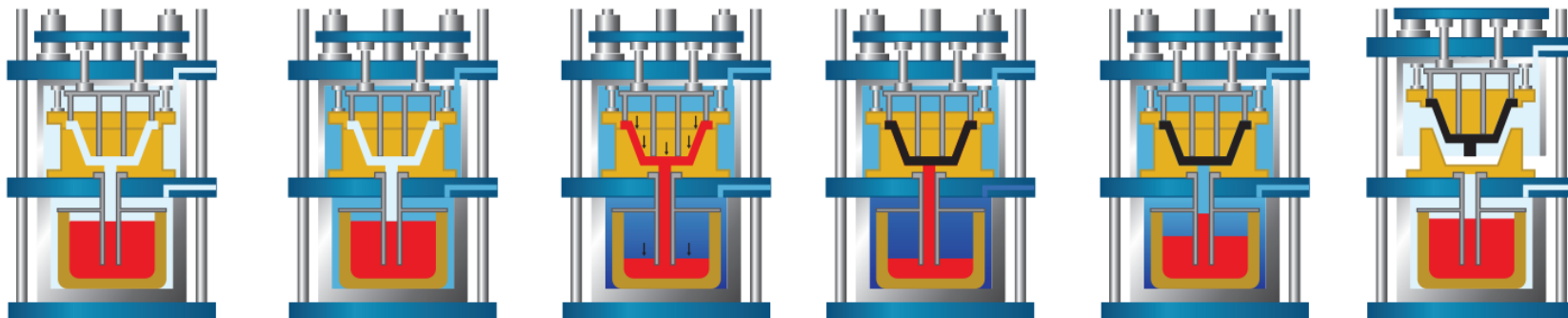


Schéma vícebodové vtokové soustavy



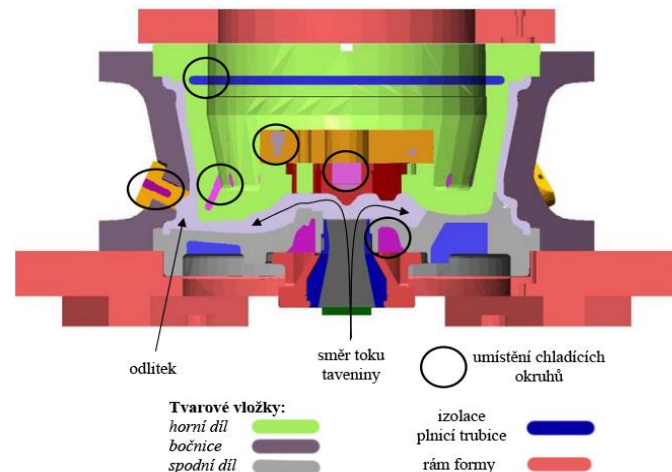
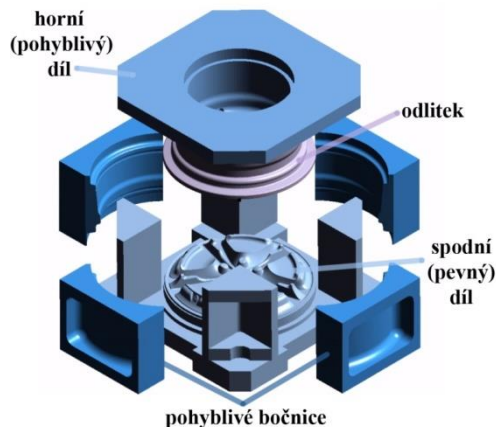
# Nízkotlaké lití

- **CPC proces** - lití do protitlaku;
  - v počátku působí přetlak plynů i na straně formy,
  - odlití snižováním tlaku ve formě,
  - v systému celkově vyšší tlak než při klasickém NT,
  - omezení vzniku ředin a plynových bublin.
  - Použití – odlitky s větší tloušťkou stěn.



# Nízkotlaké lití

- **Forma** - vodorovná dělící rovina,
  - několik typů konstrukce - nejjednodušší - dvoudílné (spodní = pevný a horní = pohyblivý díl),
    - čtyřdílné - spodní, horní díl a 2 pohyblivé boční části,
    - šestdílná - spodní, horní díl a 4 pohyblivé boční části.
- materiál LLG, LKG, oceli třídy 11, 14 a 19.
- lze vkládat - písková jádra.



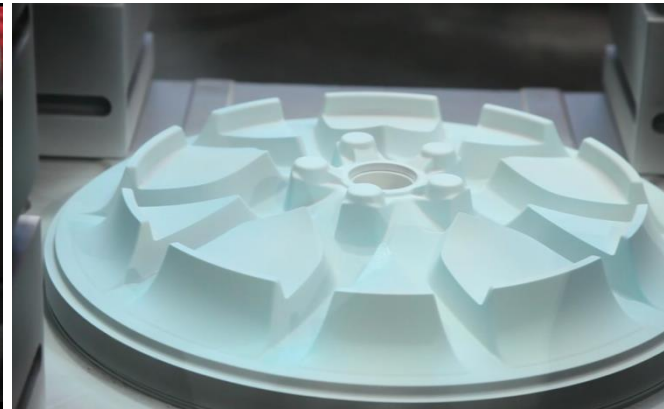
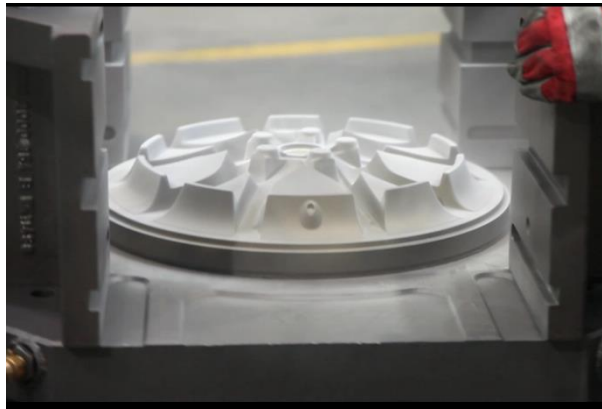
# Nízkotlaké lití

- **Temperace formy** - temperační systém - pracovní teplota forem mezi 250 až 450 °C,
  - temperační médium - nejčastěji vzduch o teplotě 20 – 30 °C (tenkostěnné odlitky),
    - voda o cca 20°C (přehřívající se části) nebo případně kombinace.
- **Odvzdušnění formy** - použitím průduchu se štěrbínovými drážkami, štěrbínami v dělicí rovině, vůlí vyhazovačů a štěrbínami provedenými ve vložkách.



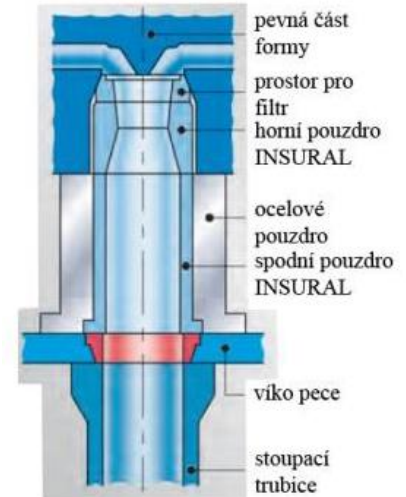
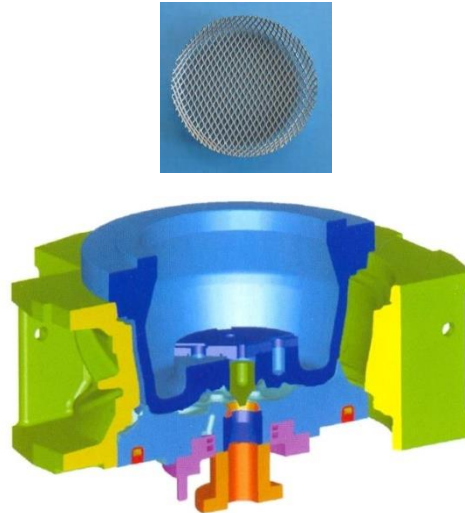
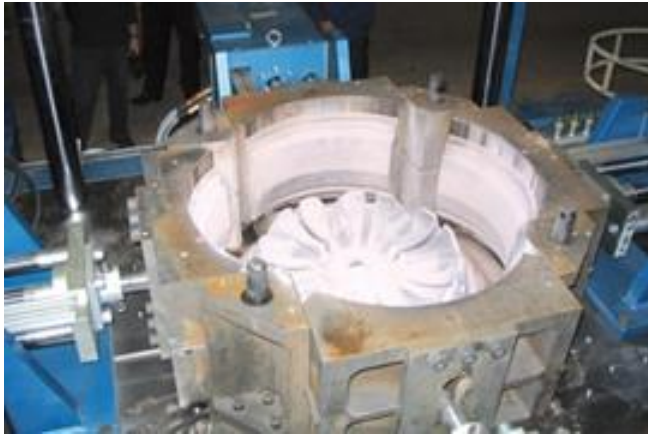
# Nízkotlaké lití

- **Ošetření líce formy** - ochrana tvaru kovové formy před erozivními účinky proudící taveniny,
  - vytvoření vrstvy bránící nalepení taveniny na líc formy – vliv na odformování,
  - regulace přestupu tepla z taveniny do formy - ovlivnění toku taveniny,
  - Separátory – izolační (nálitky, vtokové soustavy, tenkostěnné odlitky), polovodivé (tvarové plochy formy) a vodivé (tepelné uzly).



# Nízkotlaké lití

- **Stoupací trubice** - z grafitu, nebo z keramických materiálů (korund),
- zaústění plnicí trubice do formy = kovové sítko - nutné odříznout a separovat od vratu,
- zaústění plnicí trubice vede do spodní (pevné) části formy,
- v horní části - trubice vyhřívána, aby nedocházelo k jejímu ochlazení od chladicího systému spodní části formy nebo pouzdra z vysoce žáruvzdorného materiálu,





# Nízkotlaké lití

- **Vtoková soustava** – tavenina musí plnit dutinu formy klidně a bez zbytečného víření,
  - podmínkou – laminární prodění ve stoupací trubici – aby to bylo splněno =  $Re < 2100$ ,
  - rychlosti taveniny v plnící trubici = úpravou Bernoulliho rovnice:

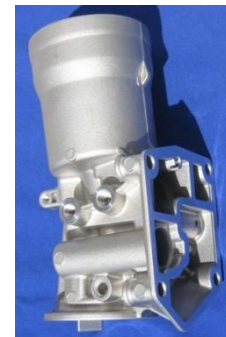
$$v = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} - H \right)}$$

$p_1$  – tlak plynu působící na hladinu taveniny v kelímku udržovací pece [Pa],  
 $p_2$  – tlak nad hladinou taveniny ve stoupací trubici [Pa],  
 $H$  – výšku taveniny ve stoupací trubici nad úrovní hladiny v peci [m],  
 $\rho$  – hustotu odlévané slitiny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  
 $g$  – gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  
 $\mu$  – součinitel hydraulických ztrát ( $\mu = 1,0$  až  $1,5$ ).

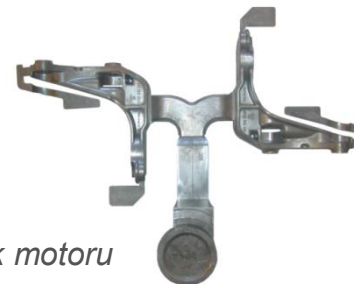
- rychlost pohybu taveniny je ovlivněna změnou tlaku a v průběhu lití se mění,
- pro slitiny hliníku by hodnota rychlosti plnění neměla překročit  $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

# Vysokotlaké lití

- **Princip:** vyplnění dutiny kovové formy taveninou v krátkém čase, kde následně tuhne za působení vysokého tlaku, tzv. dotlaku;
  - jedinou operací je tavenina v několika sekundách přeměněna v odlitek.
  - tvarově členité tenkostěnné odlitky (cca 1 - 2 mm);
  - vysoká tvarová a rozměrová přesnost (až 0,3 – 0,5 %);
  - velmi dobré mechanické vlastnosti a kvalita povrchu;
  - vysoká produktivita práce;
  - vysoké náklady na pořízení tlakového licího stroje – omezuje maximální velikost dílů;
  - vysoké náklady na zhotovení tlakové licí formy;
  - **vnitřní poretita odlitků.**



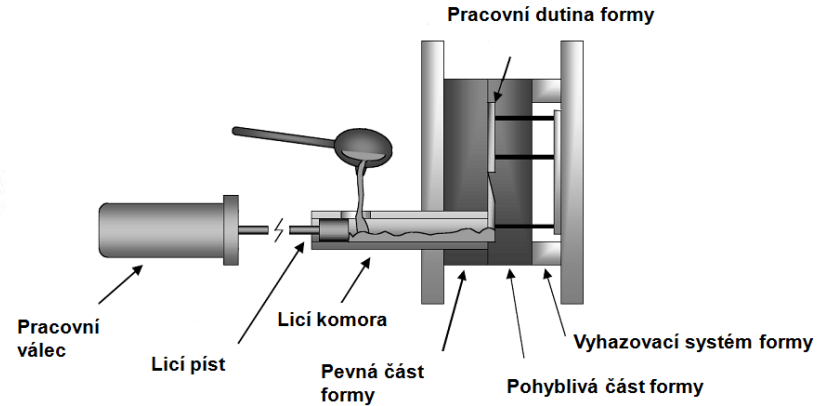
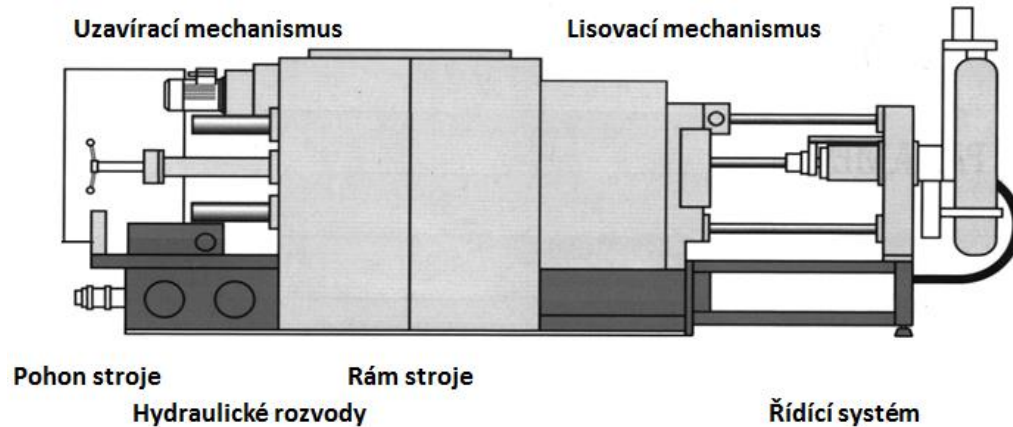
*Olejový filtr*



*Držák motoru*

# Vysokotlaké lití

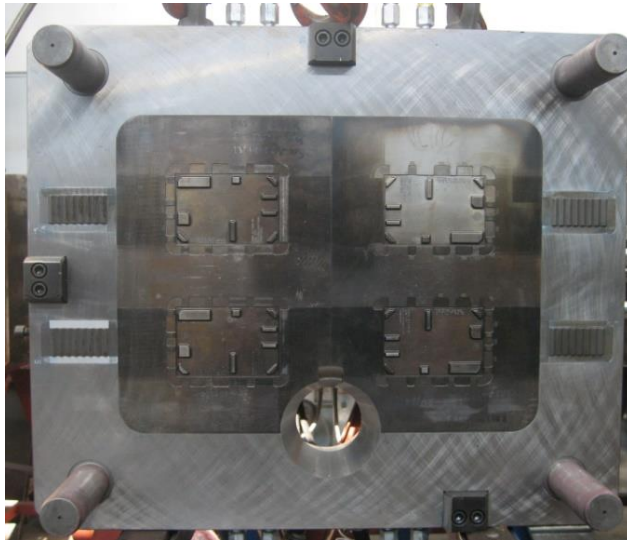
- *Tlakové lití slitin hliníku: - stroje se studenou horizontální licí komorou.*



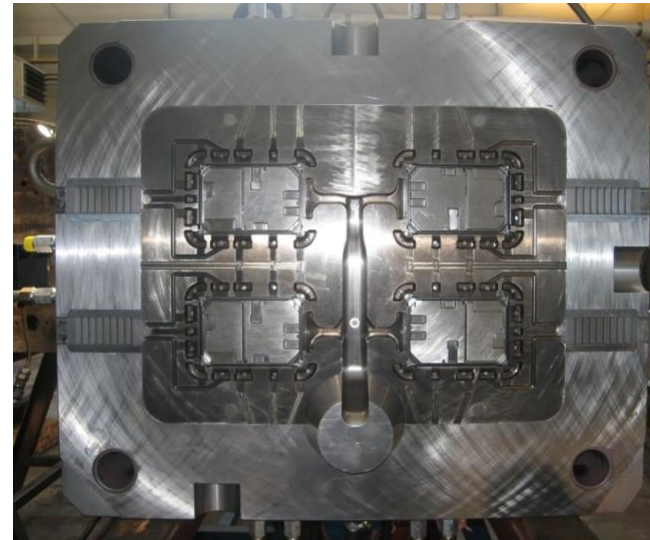
*Tlakový licí stroj s horizontální studenou komorou*

# Vysokotlaké lití

- **Forma** – rám + tvarové vložky + jádra,
  - Méně namáhané části formy: konstrukční legovaná ocel (Cr-Mo-V); např.: 1.2311;
  - Tvarové vložky: nástrojové legované oceli = vysokolegované oceli určené pro práci za tepla (Cr-V-W-Mo); např.: 1.2343, 1.2344.



Pevná část tlakové licí formy

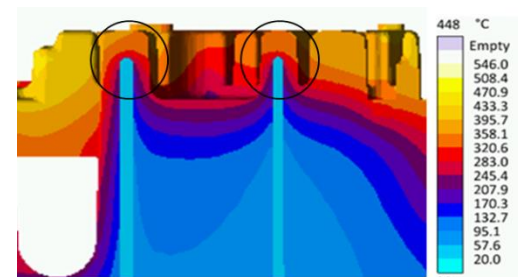
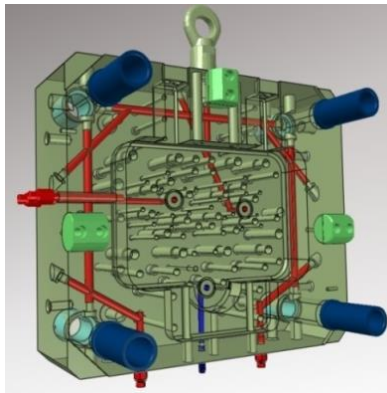
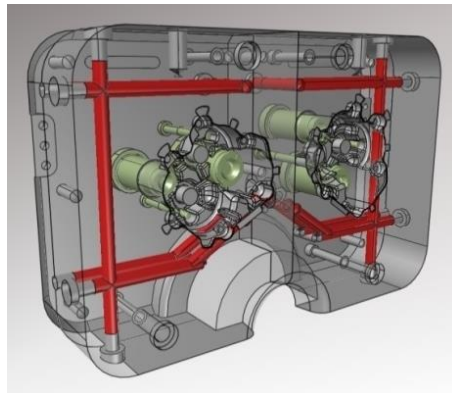


Pohyblivá část tlakové licí formy

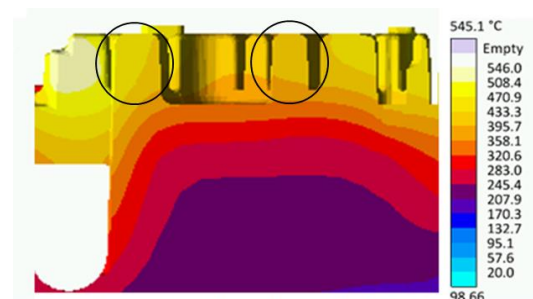
# Vysokotlaké lití

- **Temperační systém:**

- zajištění optimálních teplotních podmínek v průběhu licího cyklu;
- Temperace - soustava průtokových kanálů (okruhy) + termoregulační zařízení - médium (olej, voda).
- Chlazení - kanály + připojení chladící vody.
- Doporučená teplota líce formy pro slitiny Al: 180 – 300°C.



Dutina formy - chlazení tvarových výstupků



Dutina formy - bez chlazení tvarových výstupků

# Vysokotlaké lití

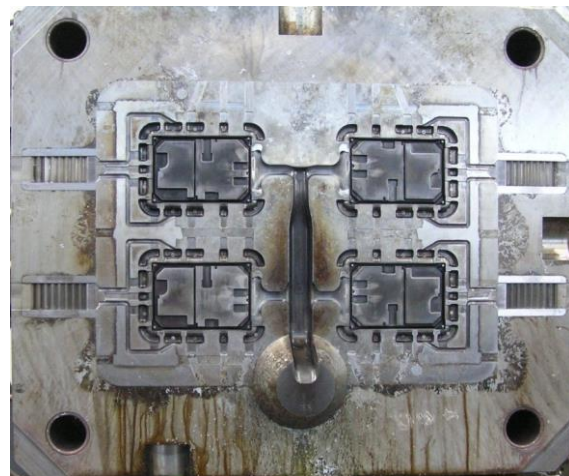
- **Odvzdušnění formy** - v dělicí rovině;
  - v pohyblivé části formy - 3 až 6 mm od tvaru dutiny - soustava přetoků (ledvinek),
  - vzduch z pracovní dutiny formy - odvzdušňovací kanály - pásy;
    - vlnovce - větší intenzita odvzdušnění.



*Pohyblivá část formy*

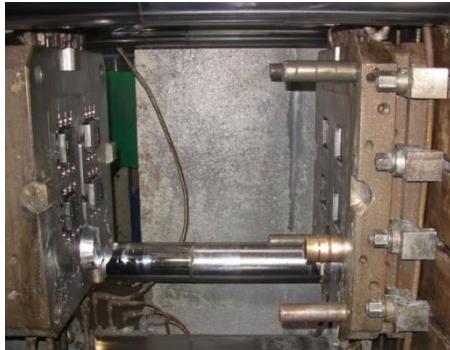


*Pevná část formy*

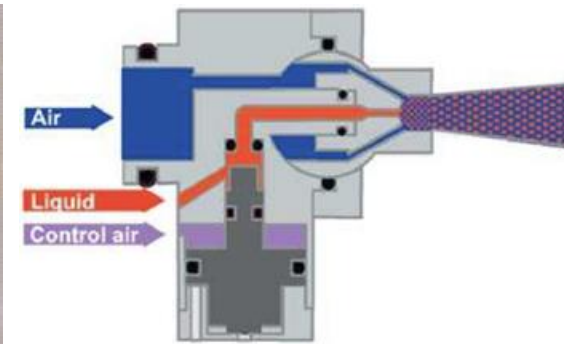


# Vysokotlaké lití

- **Ošetření líce formy**
  - zamezení přímého styku taveniny a líce formy,
  - usnadnění uvolňování jader z odlitku a odlitku z formy.
  - Nástríky – nejběžnější - kapalně - vodou ředitelné separátory,
    - separátory na bázi oleje nebo práškové separátory.
  - Nanášení – (ruční pistole), roboty, manipulátory s ošetřovací hlavou.
  - Mikropostřík.



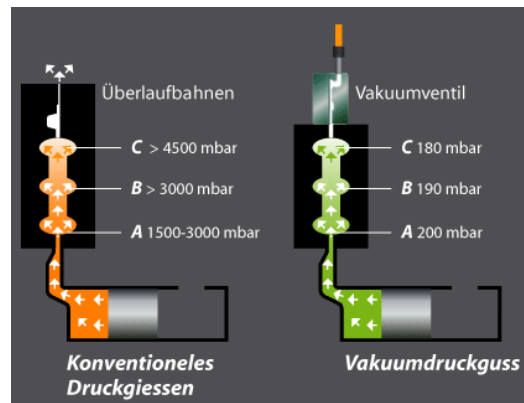
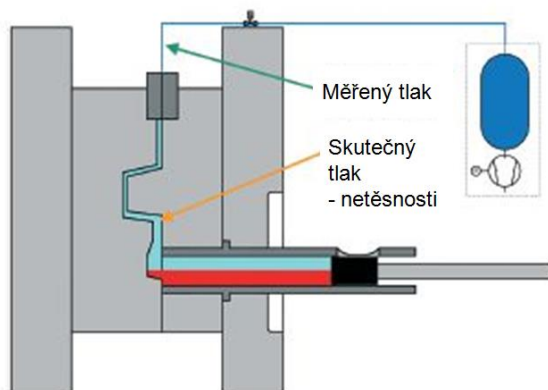
Sestavená ošetřovací hlava



Dýzy s vnějším směřováním

# Vysokotlaké lití

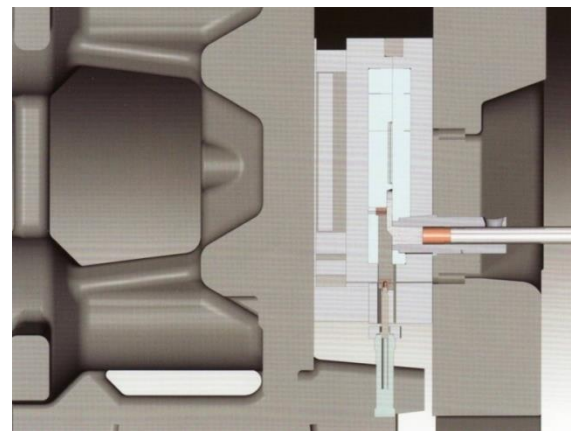
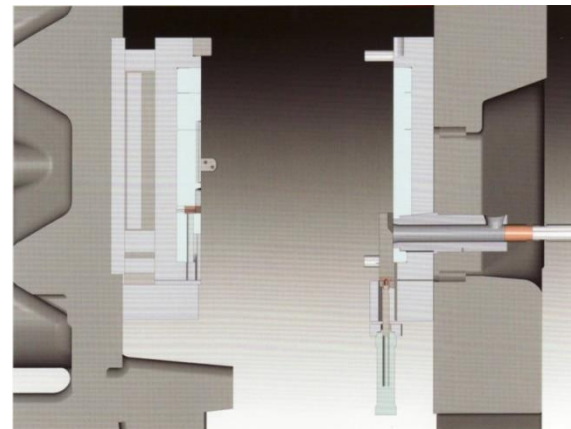
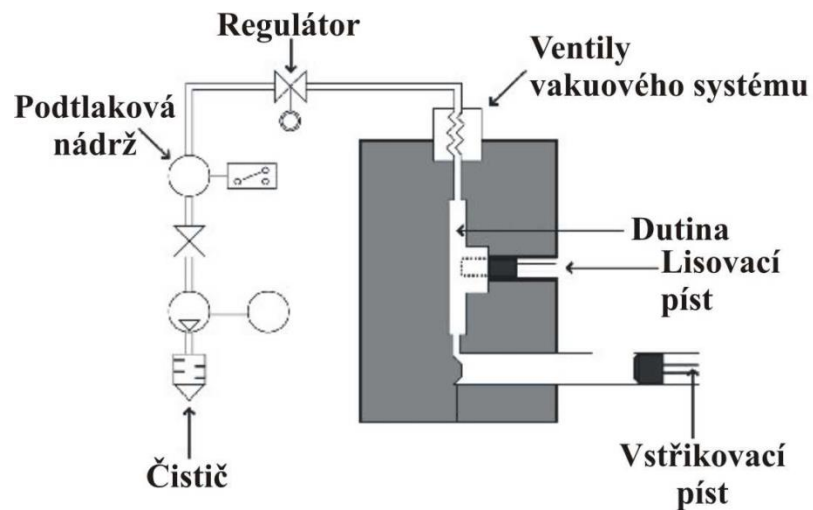
- **Vakuování** - připojeno k odvzdušnění dutiny formy – zakončené ventilem nebo vlnovci,
  - nutné zamezit úniku podtlaku dělicí rovinou a uložením vyhazovačů.
- **Výhody:**
  - snížení množství uzavřeného vzduchu v odlitcích – těsnost odlitků;
  - vyšší kvalita povrchu, vyšší dolitost kontur – lze odlévat slabší stěny,
  - nižší uzavírací síla stroje;
  - nižší lisovací tlaky – prostřík.





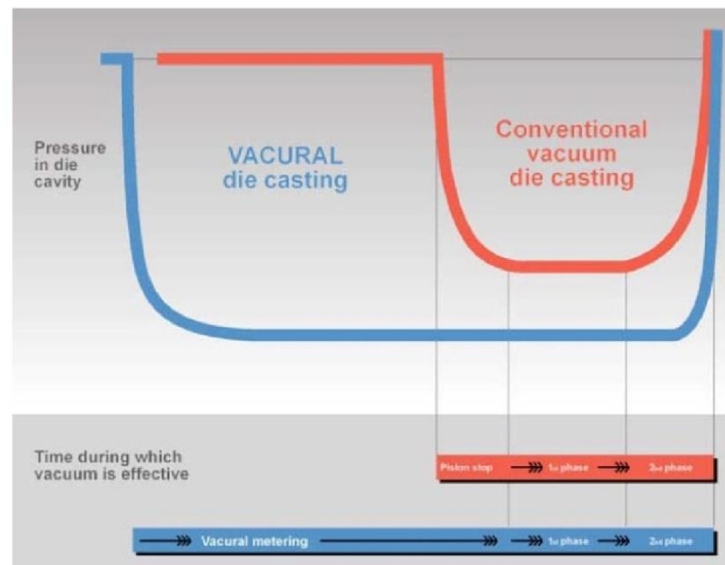
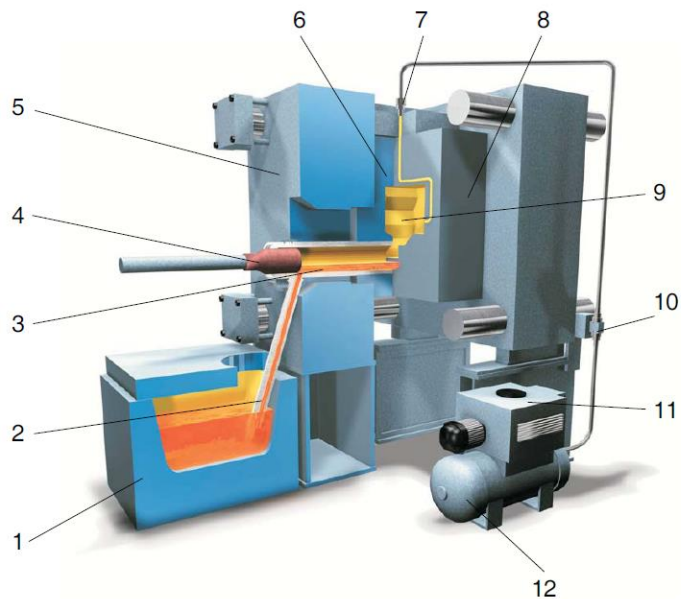
# Vysokotlaké lití

- **Lokální squeeze**
  - snížení staženin – doplnění taveniny;
  - nedochází ke snížení množství uzavřeného vzduchu = pouze jeho komprese.



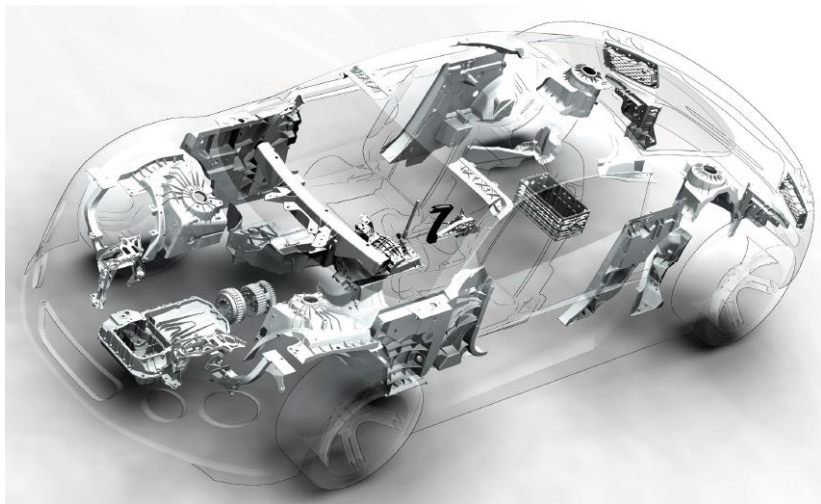
# Vysokotlaké lití

- **Vacural**
  - vyšší vakuum;
  - nižší obsah pórů a vměstků;
  - vyšší cena.



# Vysokotlaké lití

- **Strukturální odlitky** - obvykle tenké stěny (cca 2 mm) a velká plocha = složité tvary,
  - Specifické požadavky: mechanické vlastnosti, svařitelnost, nízký obsah pórů (zaručení mechanických vlastností a svařitelnosti).
  - díly karoserie a podvozku, držáky motoru, deformační zóny, platformy jednotek řízení a náprav, závěsy, výztuhy nárazníků, atd.



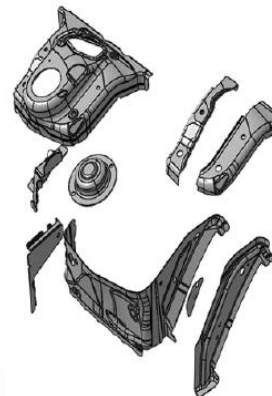
Karoserie Audi A8 – modré – hliníkové profily, zelené – hliníkové výlisky a červené strukturální odlitky

# Vysokotlaké lití

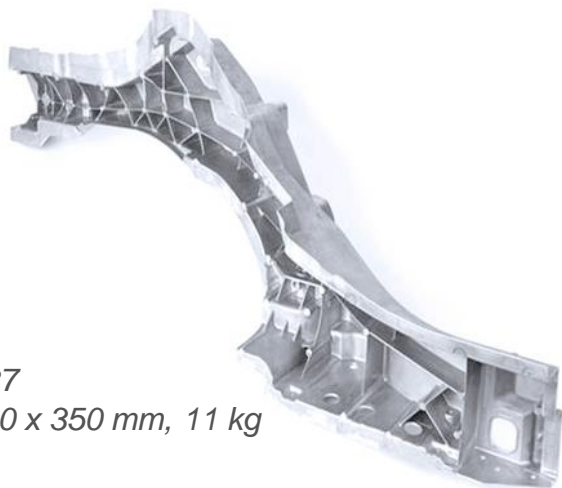
Porovnání mechanických vlastností konvenčních a strukturálních dílů

	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	tažnost A [MPa]
standardní odlitky	$\geq 240$	$\geq 140$	0,5–1,5
deformační díly	$\geq 180$	$\geq 120-150$	$\geq 10$
pevnostní díly	$\geq 215$	$\geq 150-180$	$\geq 7$

**Stahlblech**  
10 Teile



**Aluminium-Druckguss**  
1 Teil



**Castasil-37**  
1400 x 600 x 350 mm, 11 kg



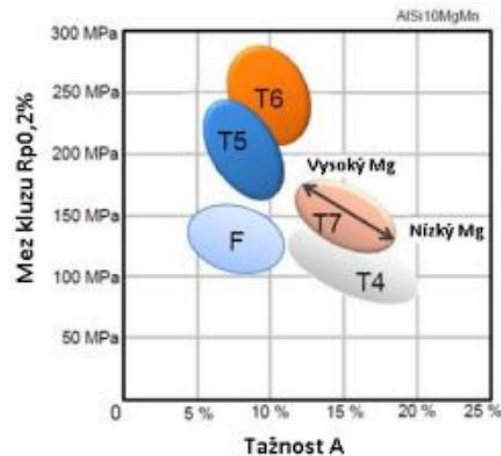
**Výztuha - Silafont 36**  
1020 x 690 x 280 mm,  
10,3 kg

# Vysokotlaké lití

*Mechanické vlastností vybraných slitin pro strukturální díly*

Slitina	složení	stav	mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	mez pevnosti $R_m$ [MPa]	tažnost A [%]	tvrdost [HBW]
Silafont-09	AlSi9	F	120–180	240–280	4–8	55–80
Silafont-3G	AlSi10MnMg	F	120–150	250–290	5–11	75–95
Silafont-3G	AlSi10MnMg	T6	210–280	290–340	7–12	90–110
Silafont-3G	AlSi10MnMg	T5	155–245	275–340	4–9	80–110
Silafont-3G	AlSi10MnMg	T4	95–140	210–260	15–22	60–75
Silafont-3G	AlSi10MnMg	T7	120–170	200–240	15–20	60–75
Silafont-38	AlSi10MnMgZn	F	140–160	270–300	3–7	
Silafont-38	AlSi10MnMgZn	T6 do vody	230–270	300–345	6–9	
Silafont-38	AlSi10MnMgZn	T6 na vzduchu	180–200	250–275	8–10	
Magsimal-59	AlMg5Si2Mn	F	140–220*	220–340*	8–18*	
Aural-2	AlSi10Mg	T7	120	180	10	
Aural-5	AlSi7Mg	T5	135	200	8	
Castasil	AlSi9Mn	F	120	210	7	

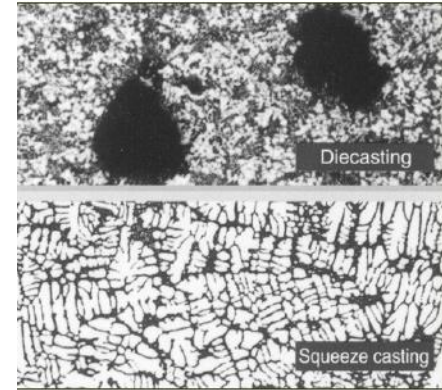
\* dle tloušťky stěny



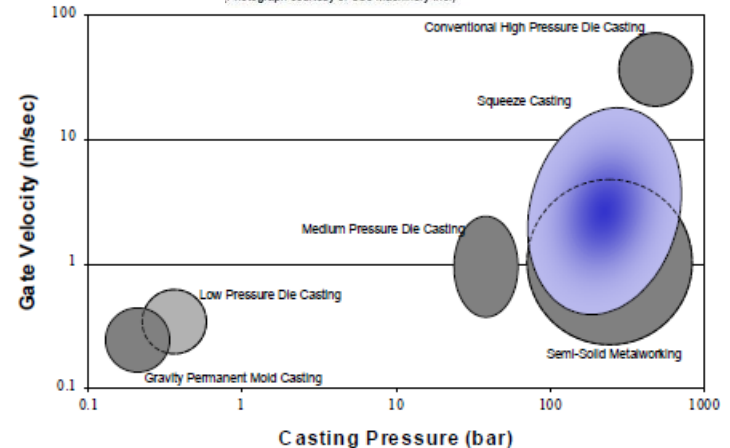
*Uložení tlumiče pro platformu BR253 – DGS Druckguss Systeme s.r.o.*

# Squeeze casting

- **Metoda lití s krystalizací pod tlakem (LKT);**
  - využívá klidné plnění dutiny formy bez turbulencí;
  - vyšší intenzita přestupu tepla - řádově vyšší součinitel přestupu tepla proti gravitačnímu lití = vysoká rychlost tuhnutí - jemnozrná struktura; příznivější morfologie; menší velikost intermetalických fází;
  - velmi dobré mechanické vlastnosti;
  - zvyšuje se přesnost odlitků;
  - téměř se zamezí vzniku mikrostaženin;
  - odlitky neobsahují plynové bubliny;

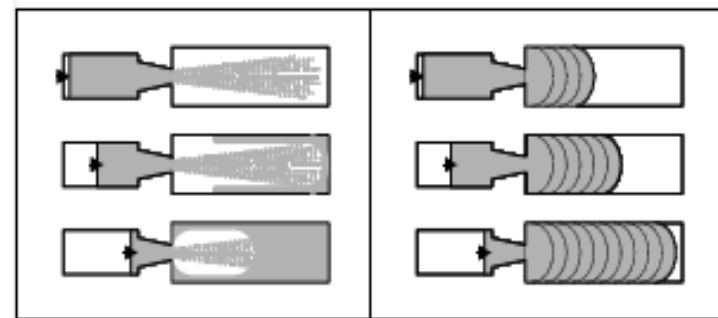
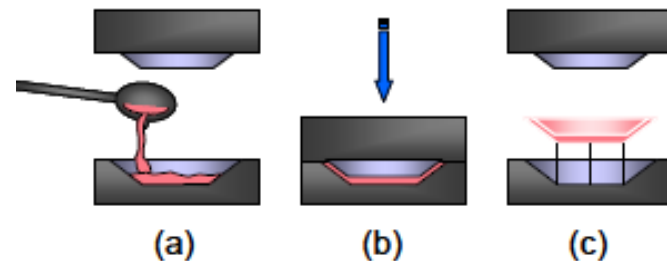


(Photograph courtesy of Ube Machinery Inc.)



# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

- **Lití s krystalizací pod tlakem - přímá metoda:**
  - Dávkování taveniny a její nalití do spodní části formy;
  - uzavření formy, náběh dotlaku, tuhnutí odlitku;
  - rozevření formy – vyhazovače vysunou odlitek.
- **Lití s krystalizací pod tlakem - nepřímá metoda:**
  - podobné klasické vysokotlaké technologii = rozdíly
    - velké plochy naříznutí,
    - menší rychlosti v oblasti naříznutí (cca  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ );
    - delší čas cyklu → laminární plnění dutiny;
    - dotlak 55 až 300 MPa;
    - stroje – vertikální i horizontální.



Klasické TL

LKT



# Výroba odlitků ze slitin hliníku

Porovnání efektivity výroby odlitků ze slitin Al -Si						
Kritérium		Lití do pískové formy vyráběné ručně	Lití do pískové formy vyráběné strojně	Gravitační lití do kovové formy	Nízkotlaké lití	Tlakové lití
Drsnost povrchu Ra	[ $\mu\text{m}$ ]	50 - 200	25 - 100	3,2 - 25	3,2 - 12,5	1,6 - 12,5
Maximální odchylky rozměrů	[%]	3	2	1,5	1	0,5
Běžné přídatky na obrábění	[mm]	3 - 5	2 - 3	1,5 - 2	1 - 2	0,5 - 1
Pevnost v tahu	[MPa]	130	130	160	170	200
Cena modelu či formy (tisíce až milióny)	[Kč]	1000 - 10 000	10 000 - 100 000	> 100 000	100 000 - 1 000 000	> 1 000 000
Životnost modelu či formy (kusy až statisíce kusů)	[ks]	1 - 1000	1000 - 10 000	10 000 - 100 000	10 000 - 100 000	> 100 000
Produktivita (kusy až stovky kusů)	[ks/h]	1 - 10	> 10	> 10	1 - 10	10 - 100



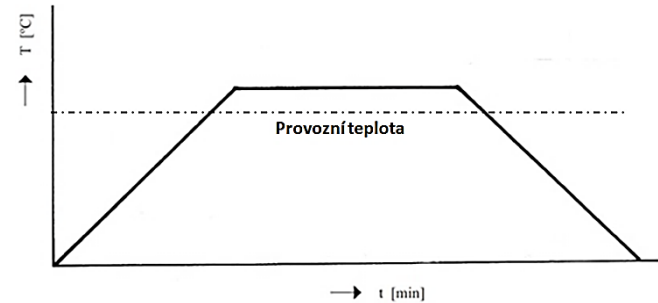
# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

- Mezi tepelným zpracováním slitin pro tváření a pro odlévání není zásadní rozdíl.
- Převážná část odlitků ze slitin hliníku se používá v tepelně nezpracovaném stavu.
- **Tepelné zpracování za účelem** - zvýšení mechanických vlastností;
  - snížení vnitřního pnutí;
  - stabilizaci rozměrů;
  - ovlivnění způsobu rozložení prvků ve struktuře;
  - zlepšení obrobitelnosti;
  - změna technologických vlastností či odolnosti korozi.
- **Žihání** - rekrystalizační – pro za studena tvářené díly;
  - stabilizační;
  - na snížení pnutí;
  - homogenizační.
- **Vytvrzování** – precipitační zpevnění;

# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

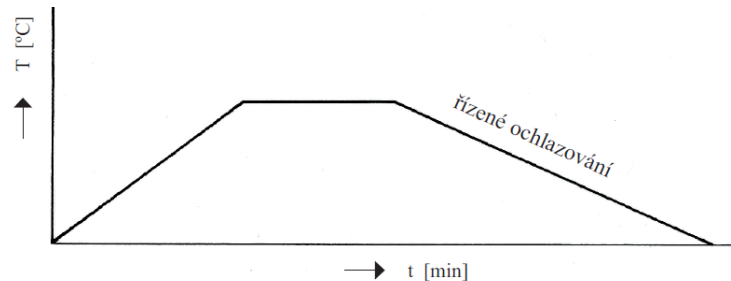
- **Stabilizační žíhání**

- stabilizace struktury, mechanických, fyzikálních a chemických vlastností a rozměrů dílu;
- pokud díl v provozu pracuje za vyšší teploty;
- teplota žíhání je vyšší než provozní (240-350°C, 2-3 h a ochlazování na vzduchu);



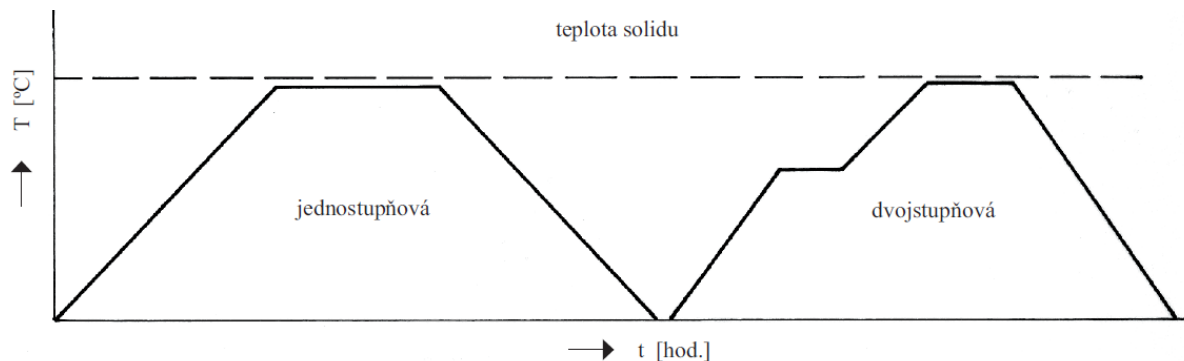
- **Žíhání na snížení pnutí**

- TZ pod rekrystalizační teplotu (300 – 400°C) a řízené ochlazování nejméně do 200°C;
- u odlitků 200-250°C po dobu 6-8 hodin a řízené ochlazování v peci nebo na vzduchu;
- pro dokonalejší snížení pnutí na úkor pevnostních vlastností 250-350°C.



# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

- **Homogenizační žíhání**
  - TZ za účelem odstranění, resp. snížení chemické heterogenity difúzními pochody;
  - délka doby žíhání – podle typu slitiny a struktury;
  - po homogenizaci = lepší tvářitelnost za tepla;
  - odlitky - chemická heterogenita vzniklá během tuhnutí = ohřev na T vyšší než odpovídá křivce změny rozpustnosti přísady v tuhém roztoku;
    - doba dle heterogenity a disperzity struktury = cca 3-15 h;
    - během žíhání = může hrubnout zrno = pokles mechanických vlastností.

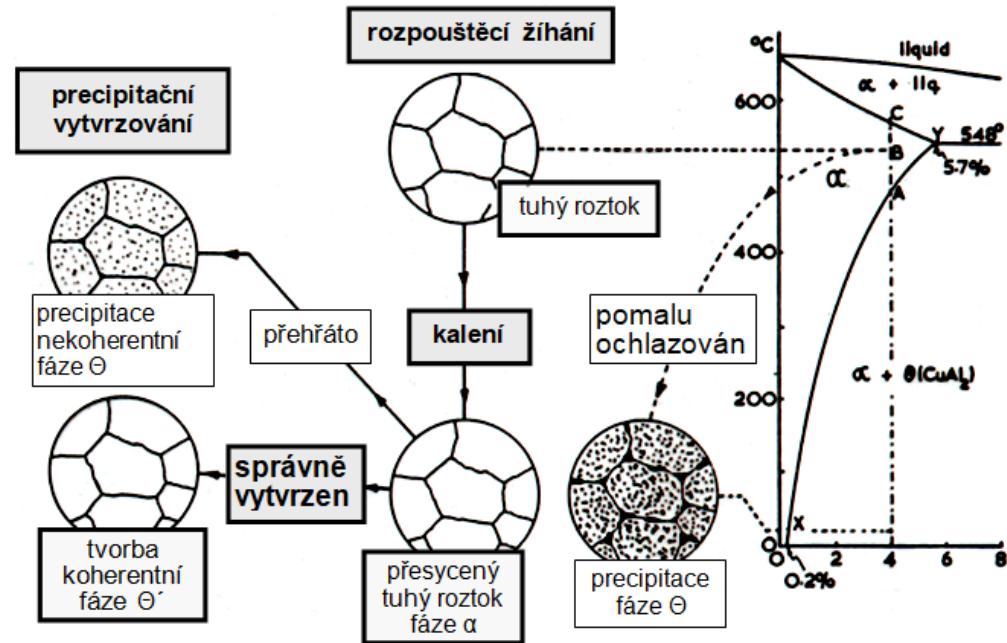


# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

- **Vytvrzování = precipitační zpevnění**
- změna mechanických ( $\uparrow$ pevnost, tvrdost a  $\downarrow$ tažnost), popř. fyzikálních a technologických vlastností;
- Podmínkou je přítomnost přísadového prvku s dostatečně výraznou změnou rozpustnosti v tuhém roztoku (Cu, Mg).

## Etapy:

1. rozpouštěcí žíhání;
2. rychlé ochlazení;
3. precipitační vytvrzování.



# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

## **1. Rozpouštěcí žíhání**

- Ohřev nad křivku změny rozpustnosti – rozpouštění intermetalických fází obsahujících vytvrzující přísadový prvek;
- Teploty žíhání 10-15°C pod eutektickou teplotu ( $\pm 3 - 5K$ );
- Prodleva – dokonalé rozpuštění segregovaných fází = od 3 do 6 h (disperzita struktury).

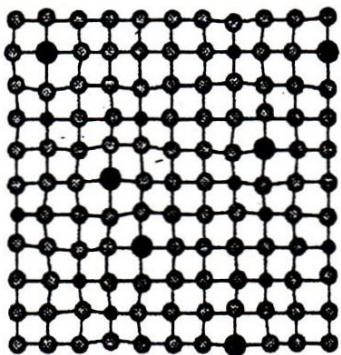
## **2. Ochlazení z homogenizační teploty**

- Zamezit vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku z přesyceného tuhého roztoku;
- velmi rychlé ochlazení (odlitky do max. 150-200°C - studená voda, u tvářených i jiná média);
- po ochlazení = struktura je tvořena přesyceným tuhým roztokem (poměrně měkká a tvárná).

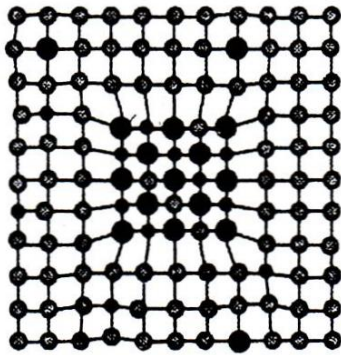
# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

## 3. Precipitační vytvrzování (stárnutí)

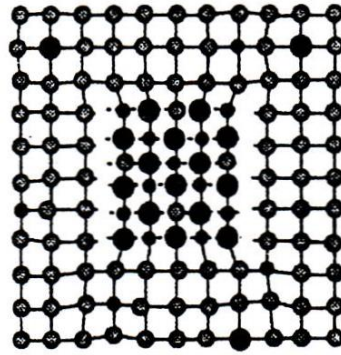
- postupný rozpad přesyceného tuhého roztoku – difuze přísady do mikroskopických oblastí bohatších na tento prvek a nukleace nové fáze (Al-Si-Mg =  $Mg_2Si$ , Al-Si-Cu =  $CuAl_2$ );
- růstem těchto zárodků vznikají koherentní precipitáty (Guinier-Prestonovy zóny);
- koherentnost = oblasti jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku, jeho mřížku deformují a vyvolávají v ní vnitřní pnutí = vede ke zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny.



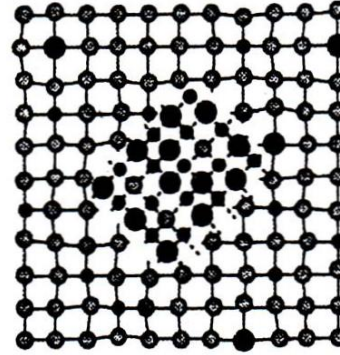
*Tuhý roztok*



*Růst koherentní precipitátů*



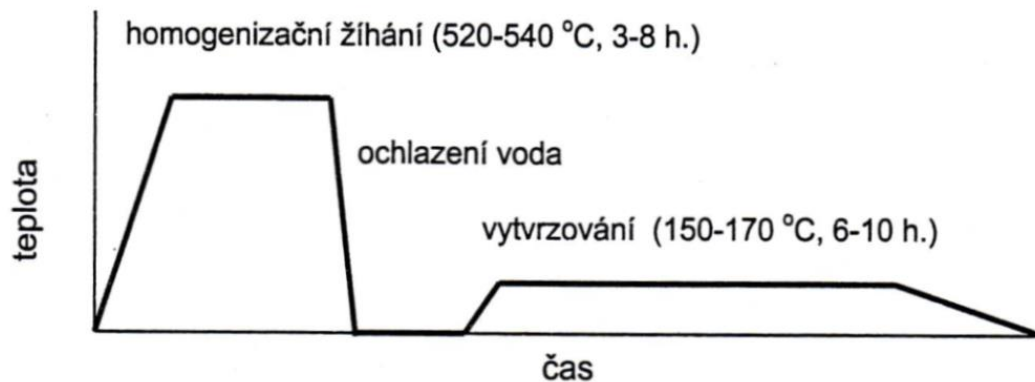
*Postupná ztráta koherence*



*Nekoherentní precipitát*

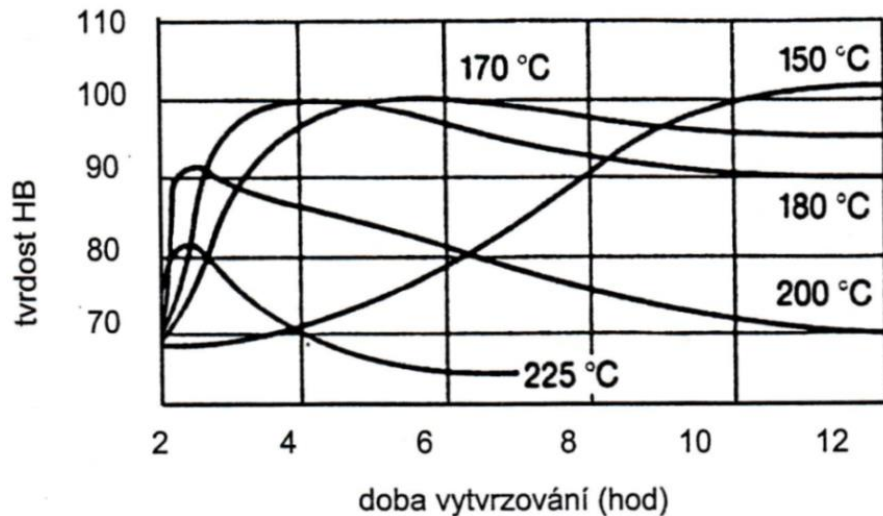
# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

- **Vytvrzování za studena** - pro slitiny Al-Zn-Mg, Al-Cu a Al-Si-Cu;
  - proces stárnutí probíhá pomalu, samovolně;
  - konečné vlastnosti jsou dosaženy za 100 -150 h.
- **Vytvrzování za tepla** - pro slitiny Al-Si-Mg a Al-Mg-Si;
  - teplota dle typu slitiny (140 – 180°C) - doba vytvrzování 3 až 8 h (vyšší teplota = kratší čas);
  - vlastnosti po vytvrzení - teplota, doba, obsah vytvrzujícího prvku.

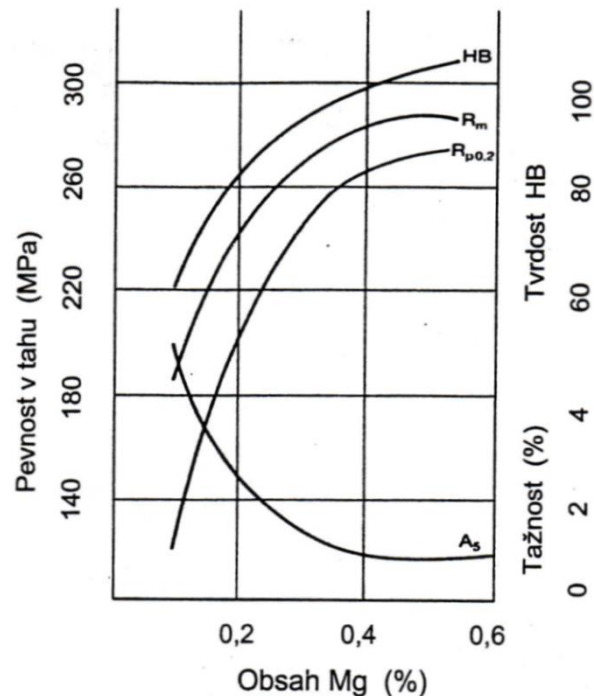


*Tepelné zpracování při vytvrzování za tepla (orientační hodnoty)*

# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku



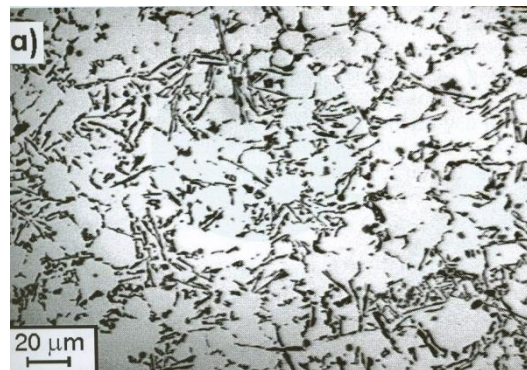
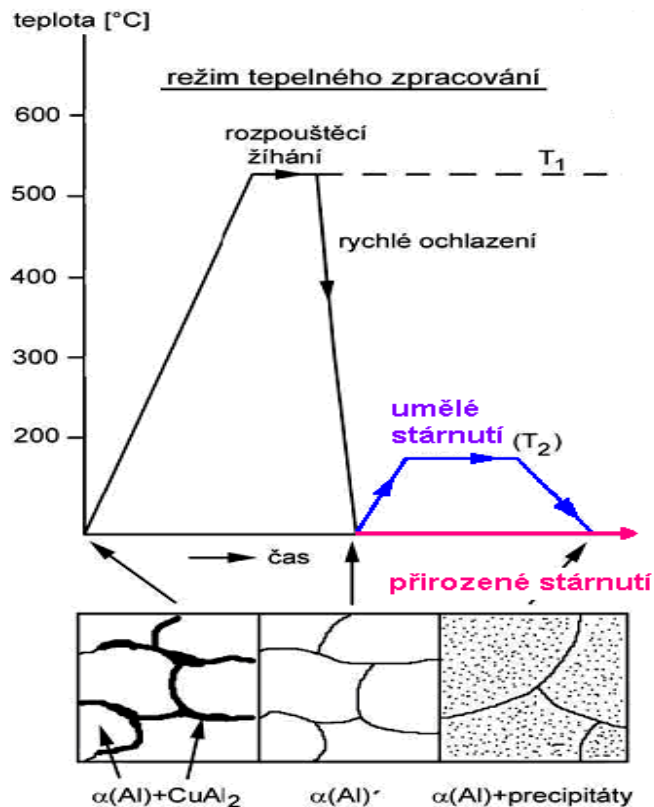
Závislost tvrdosti AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování



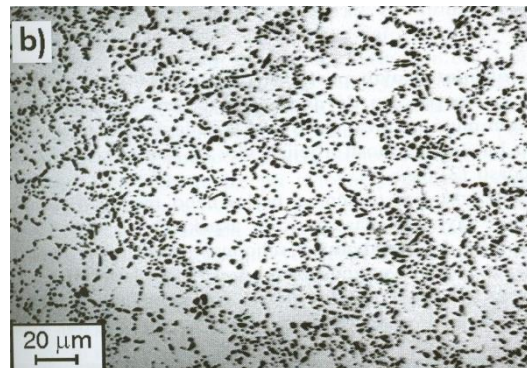
Vliv obsahu hořčíku na mechanické vlastnosti po vytvrzení



# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku



Struktura bez tepelného zpracování



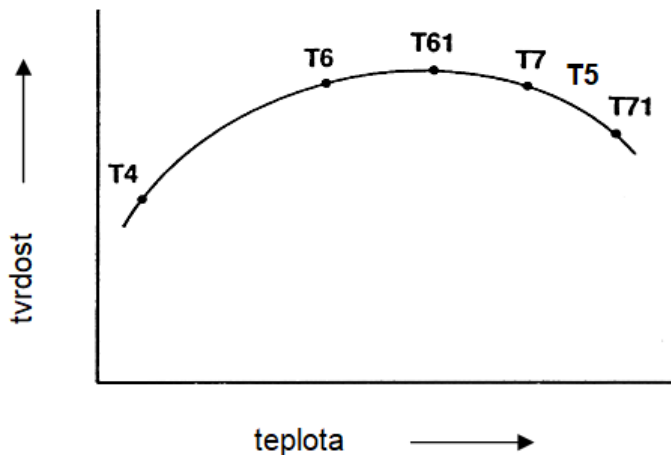
Struktura po precipitačním vytvrzování

# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

- ***Ve slévárenství jsou obvyklé tyto stavy odlitků:***
  - F - v litém stavu.
  - O - žíhání na snížení vnitřních pnutí nebo stabilizační žíhání (teploty do 340°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 snížení vnitřního pnutí (teplota žíhání 205-260°C / 7-10 h).
  - T6 - vytvrzování – homogenizačního žíhání, rychlé ochlazení a precipitační vytvrzení za tepla = používá se pro dosažení optimálně vysoké pevnosti a houževnatosti (teplota vytvrzování 145-160°C / 3-5 h).
  - T7 - vytvrzování jako T6, ale s přestárnutím. Toto tepelné zpracování stabilizuje mechanické vlastnosti a rozměry odlitků, pevnost je poněkud menší a tažnost naopak větší (teplota vytvrzování 190-225°C / 4-6 h).

# Tepelné zpracování odlitků ze slitin hliníku

- Jednotlivé druhy tepelného zpracování = několik podskupin podle preferovaných vlastností,
  - T64 - vytvrzování na maximální houževnatost,
  - T61 - vytvrzování pro dosažení maximální pevnosti a tvrdosti, snižuje se houževnatost (teplota vytvrzování 150-170°C / 6-10 h).
  - T71 - přestárnutí do stabilního stavu, proti T7 se ještě více zvyšuje teplotní stabilita a odolnost proti korozi pod napětím, ale snižuje pevnost (teplota 225-260°C / 6-10 h).



*Závislost tvrdosti slitiny na teplotě žhání  
při zpracování dle T4 až T7*



# Děkuji za pozornost