

Výrobní technologie (2VT)

Přednáška č. 3

Slévárenské slitiny a jejich tavení a zpracování, odlévání kovů a slitin, zabíhavost kovů a slitin, lití do trvalých forem – nízkotlaké, vysokotlaké a odstředivé lití, tuhnutí, řízená krystalizace, plyny v kovech smrštění tavenin při tuhnutí, smrštění odlitek

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

VUT v Brně, FSI, Ústav strojírenské technologie, odbor slévárenství

e-mail: zadera@fme.vutbr.cz

Rozdělení slévárenské výroby

Základní rozdělení

- hutní výroba – výroba hutních polotovarů a materiálu
- slévárenská výroba – výroba odlitků

Podle tavených slitin

- slévárny ocelí
- slévárny litin
- slévárny neželezných kovů – slitiny hliníku
 - slitiny zinku
 - slitiny mědi
 - slitiny hořčíku...

Rozdělení slévárenských slitin

Slitiny železa

- oceli – nelegované, nízkolegované, vysocelegované
- litiny – litina s lupínkovým, červíkovitým a kuličkovým grafitem

Neželezné kovy a slitiny

- Slitiny hliníku – AlSi (siluminy), Al-Mg, Al-Cu
- Slitiny zinku – Zn-Al (zamac)
- Slitiny hočíku
- Slitiny mědi – bronz, mosaz, monel
- Slitiny niklu – Nimonic, Hastaloy, Incoloy, Inconel
- Slitiny titanu – Ti-6Al-4V

Rozdělení ocelí

Podle chemické složení

- nelegované (náhrada v max. míře LKG), dobrá svařitelnost
- středně legované (nizkolegované)
- vysokolegované (Cr, Cr-Ni, Mn)

Rozdělení ocelí podle užití

- konstrukční
- nástrojové

Podle specifických vlastností

- korozivzdorné, otěruvzdorné

Podle výroby

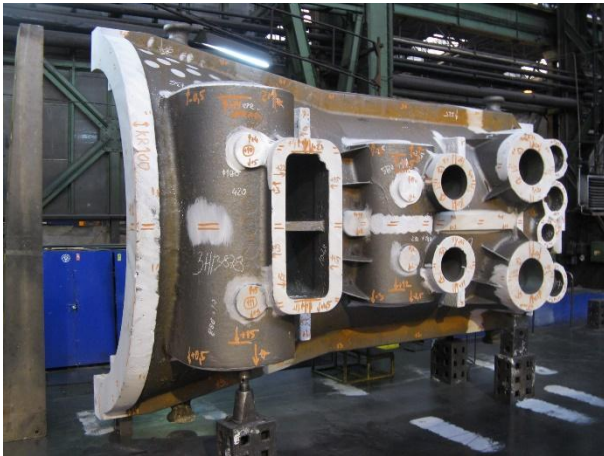
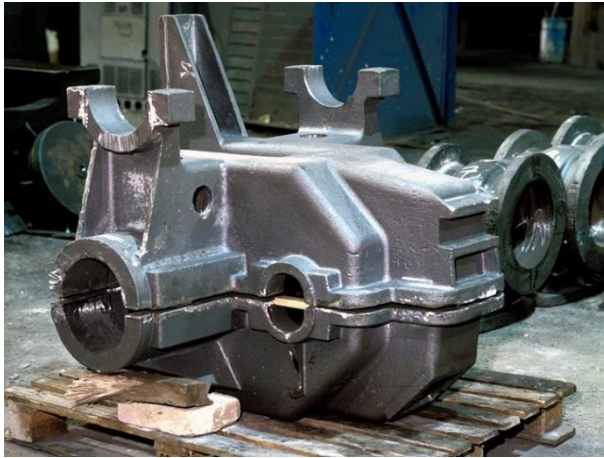
- oceli pro tváření
- oceli na odlitky

Vlastnosti ocelí

- slitina železa a uhlíku ($C < 2.14\%$), obvykle v rozmezí 0- 0,6%
 - vyšší obsah uhlíku = vyšší pevnost, horší technologické vlastnosti (svařitelnost, svažitelnost atp.)
 - po odlití v odlitku zpravidla nevhodná (Widmanstättenova struktura, karbidy či jiné fáze na hranicích zrn atp.) – nutno tepelně zpracovat
 - zlepšení vlastností nelegovaných a nízkolegovaných ocelí žíháním (normalizace) nebo zušlechťováním
 - odlévání oceli do pískových i kovových forem, staticky nebo odstředivě, přesné lití, lití do skořepin
 - vysoká teplota tavení, lící teploty 1600 – 1680 °C
- použití: armatury, ventily, tělesa radiálních čerpadel, lopatky turbín, turbínové skříně, řemenice
- vlastnosti: - velké smrštění při tuhnutí a sklon k tvorbě trhlin - nutno nálitkovat, opatření proti vzniku trhlin

Ocelové odlitky

těleso převodovky



jaderný reaktor

turbínová skříň

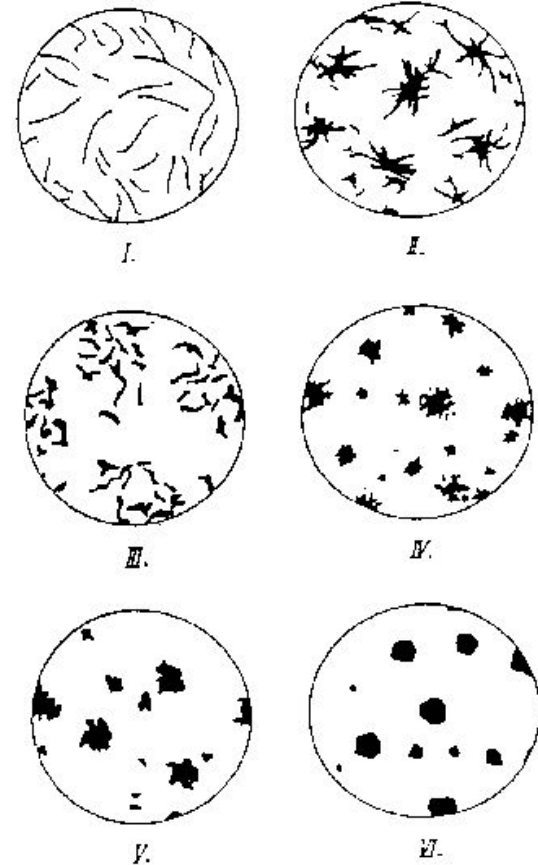
Litiny

Slitina železa, uhlíku a dalších prvků – uhlík ve formě grafitu – grafitické litiny, nebo karbidu (cementitu) – bílé litiny

rozlišuje 4 druhy litin dle tvaru grafitu (2 degenerované formy grafitu)

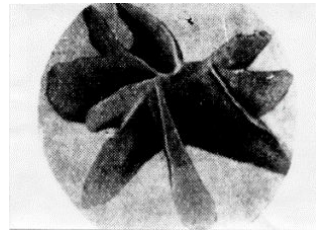
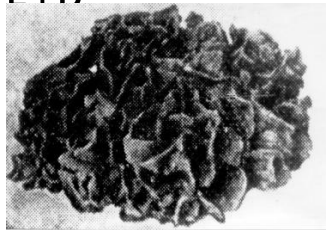
DLE NORMY 6 TŘÍD

- I. Lupínkový grafit
- II. Pavoučkový grafit
- III. Červíkovitý grafit
- IV. Vločkový grafit
- V. Nedokonale kuličkový grafit
- VI. Pravidelně kuličkový grafit

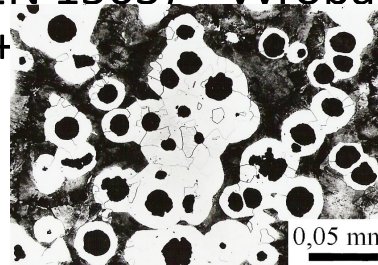
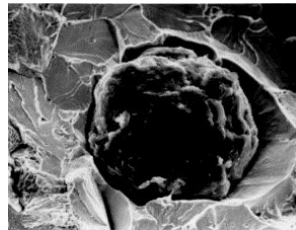
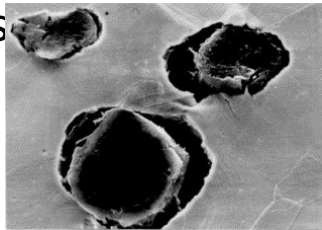


Grafitické litiny

Litina s lupínkovým grafitem (LLG, GJL, GG) – grafit vyloučen ve formě prostorových útvarů podobných hlávkovému salátu, na výbrusu má pak tvar lupínku (norma ČSN EN 1561), struktura ferit (F), perlit (P) nebo F + P

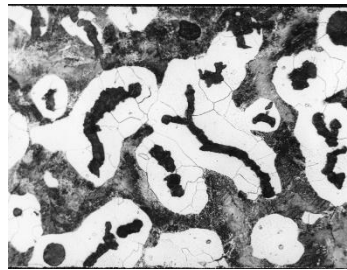
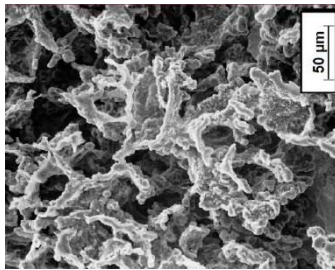


Litina s kuličkovým grafitem (LKG, GJS, GGG) – grafit ve tvaru pravidelných kuliček (norma ČSN EN 1563) – výroba modifikací LLG, s (F), (P) nebo F+.



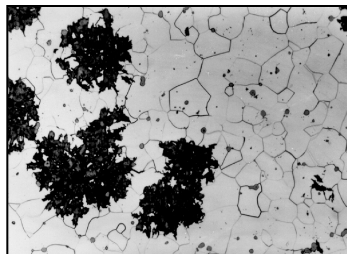
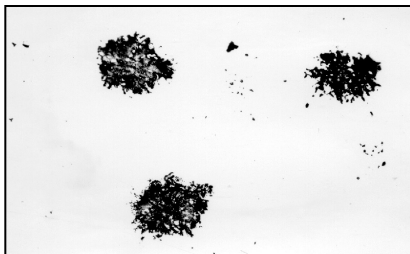
Grafitické litiny

Litina s červíkovitým grafitem (LČG, GJV, GGV) – grafit vyloučen ve formě červíků. Tvar podobný lupínkům, má však zakulacené konce a větší poměr tloušťky k jeho délce, struktura ferit (F), perlit (P) nebo F+P



Temperovaná litina (GJM) – grafit ve formě vloček, struktura F, P, F+P

- s černým lomem GJMB – vzniká žíháním v redukční prostředí
- s bílým lomem GJMW - vzniká žíháním v oxidačním prostředí



Litina s lupínkovým grafitem (šedá)

- velmi dobrá zabíhavost,
- malé smrštění (nálitkování)
- velký útlum vibrací, vysoká tepelná vodivost (46 až 65 W/m.K)
- nízká cena

Pevnost min. 150 – 350 MPa, tažnost pod 1% (neměří se)

Nositelem pevnosti perlit – vyšší pevnost = vyšší podíl perlitu

Čím nižší stupeň eutektičnosti – tím vyšší pevnost horší slévárenské vlastnosti (větší stahování, horší zabíhavost)

Stupeň eutektičnosti

$S_E = 1$ eutektická litina

$S_E > 1$ nadeutektická litina

$S_E < 1$ podeutektická litina

$$S_E = \frac{C}{4,25 - 0,3 \cdot (Si + P)}$$

Litina s kuličkovým grafitem (tvárná)

- zabíhavost dobrá – horší než LLG
- malé smrštění podobně jako LLG
- cca o 40% nižší tepelná vodivost než LLG
- vyšší korozní

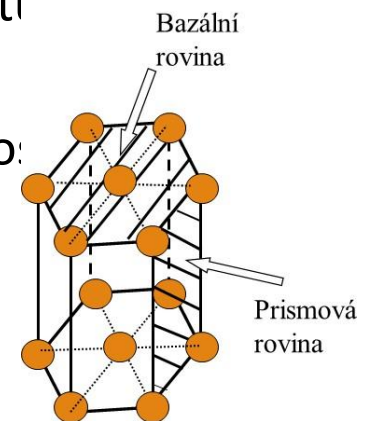
pevnost min. 350 – 800 MPa, tažnost 1% (100%P, $R_m = 800\text{MPa}$) až 25 (100 % F, $R_m = 350\text{MPa}$)

nositelem pevnosti perlit – vyšší pevnost = vyšší podíl perlitu
nositelem tažnosti je ferit

čím dokonaleji je vyloučený kuličkový grafit, tím vyšší tažno:

kuličkového grafitu se dosahuje modifikací litiny Mg

složení GJS přibližně eutektické



Litina s červíkovitým grafitem (vermikulární litina)

- zatím není platná ČSN EN, dle DIN GGK, dle ASTM CGI;
- litina s červíkovitým grafitem je moderní materiál, výroba ve světě roste, použití v automobilovém průmyslu – bloky motorů;
- grafit - červíkovité útvary, vůči lupínkům kratší a tlustší, na koncích zakulacené. Červíkovité útvary působí také menším vrubovým účinkem na kovovou matici jak lupínkový;
- litina s červíkovitým grafitem nazývaná též jako litina vermikulární je z hlediska mechanických, fyzikálních a slévárenských vlastností; přechodovým typem mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem;
- slévárenská technologie se blíží litinám s lupínkovým grafitem a mechanické vlastnosti litinám s kuličkovým grafitem.

Pozn.: podobné mechanické vlastnosti jako LČG má i temperovaná litina(TL), žíhání TL – drahá výroba – je nahrazena LČG a LKG

Litina s červíkovitým grafitem (vermikulární litina)

- zatím není platná ČSN EN, dle DIN GGK, dle ASTM CGI;
- litina s červíkovitým grafitem je moderní materiál, výroba ve světě roste, použití v automobilovém průmyslu – bloky motorů;
- grafit - červíkovité útvary, vůči lupínkům kratší a tlustší, na koncích zakulacené. Červíkovité útvary působí také menším vrubovým účinkem na kovovou matici jak lupínkový;
- litina s červíkovitým grafitem nazývaná též jako litina vermikulární je z hlediska mechanických, fyzikálních a slévárenských vlastností; přechodovým typem mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem;
- slévárenská technologie se blíží litinám s lupínkovým grafitem a mechanické vlastnosti litinám s kuličkovým grafitem.

Pozn.: podobné mechanické vlastnosti jako LČG má i temperovaná litina(TL), žíhání TL – drahá výroba – je nahrazena LČG a LKG

Litínové odlitky - příklady

Řemenové
kolo



Blok motoru Audi
2.7L, 3.0 L V6
diesel [DAWSON, S.
Practical Iron. *Sinter
Cast* [online]]

potrubí výfuku



Kliková hřídel

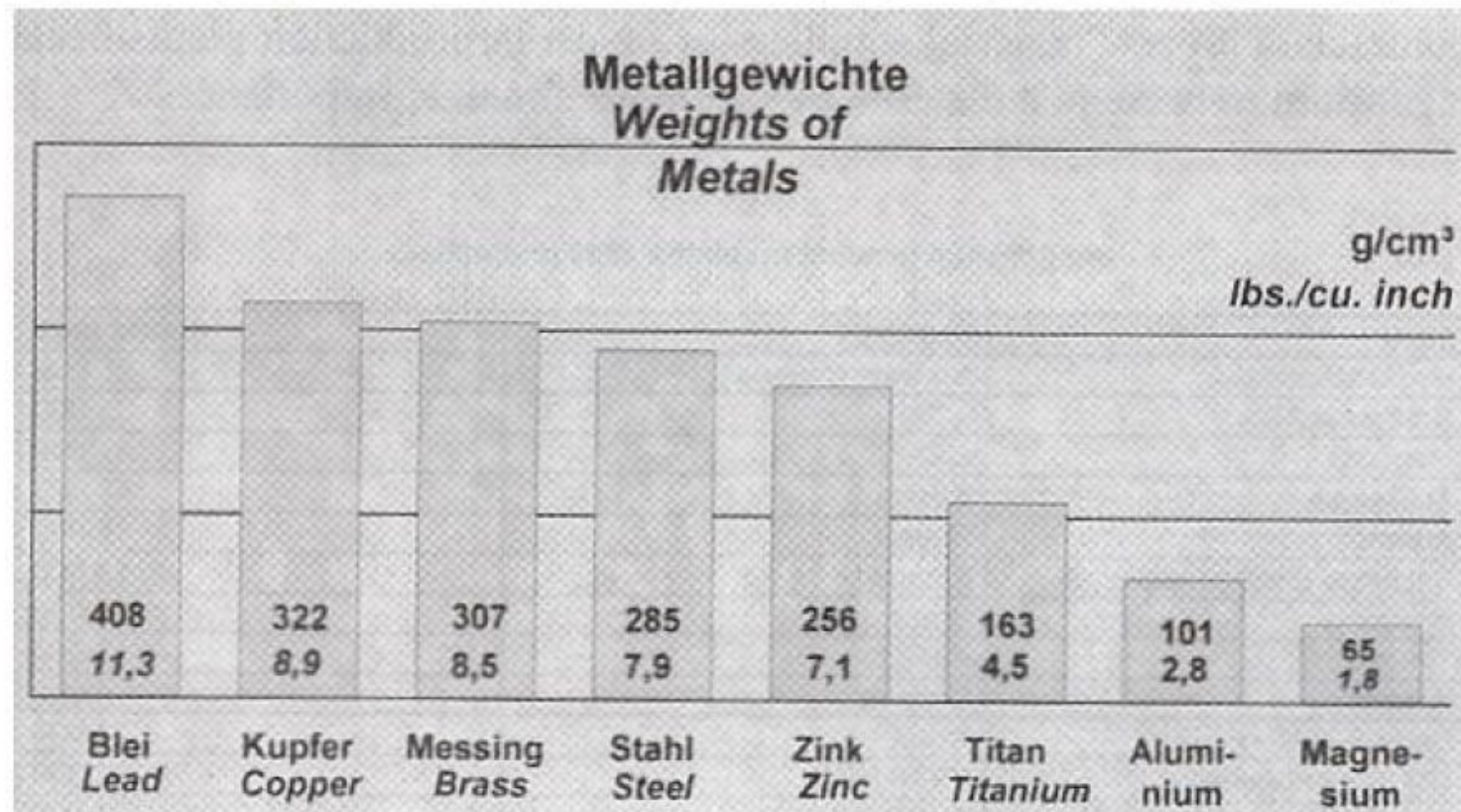


Blok motoru 12L pro nákladní
vozy a lokomotivy [DAWSON, S.
Practical Iron. *Sinter Cast* [online]]

Vačková hřídel



Poměr hustota/pevnost



Slitiny hliníku

Slitiny hliníku a jiného prvku (Si, Cu, Mg, Mn, Zn)

Vlastnosti: + odolnost vůči korozi, pevnost (poměr $R_{p0,2}/R_m$), nízká hustota, nízká teplota tavení, dobrá slévatelnost, kvalitní povrch odlitku

Vlastnosti: - nízká houževnatost, oxidace taveniny během odlévání, Al – Mg špatná slévatelnost a oxidace Mg, Al – Zn – Mg náchylnost k tvorbě trhlin

Použití: pro tvarově složité i tenkostěnné odlitky

Odlévání do pískových forem, kokilové i tlakové lití

Odlitky: tělesa startérů a alternátorů, bloky motorů, chladiče elektroinstalace, písty, ojnice, litá kola automobilů

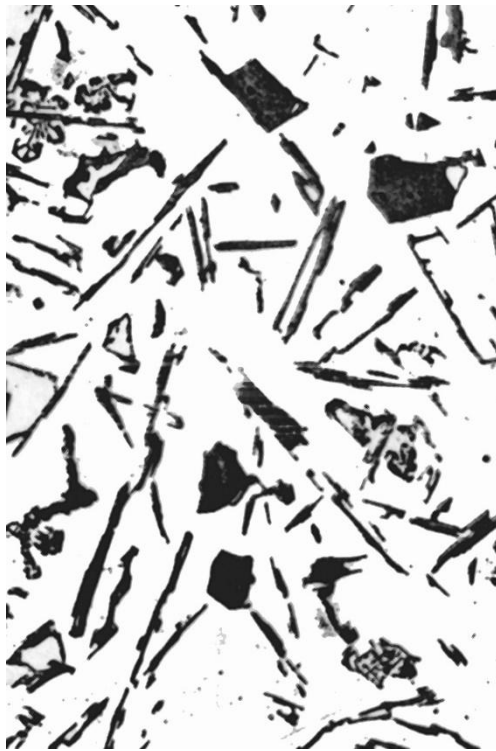
Slitiny hliníku

Hlavní přísadové prvky vymezují typ slitiny. Hlavními přísadovými prvky ve slévárenských slitinách hliníku jsou Si, Cu a Mg podle nichž jsou základní typy obvykle nazývány:

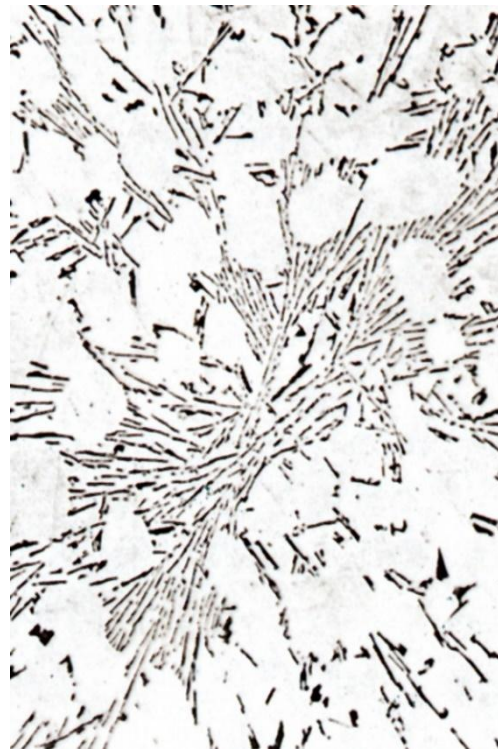
- slitiny Al – Si - siluminy
- slitiny Al – Cu - duralaluminium
- slitiny Al – Mg - hydronalium

Vedlejší přísadové prvky příznivě ovlivňují některé vlastnosti daného typu slitiny – např. zvyšují mechanické vlastnosti, zlepšují obrobiteľnost, ovlivňují strukturu kovu, jsou důležité z hlediska tepelného zpracování, nebo kompenzují nepříznivý účinek některých doprovodných prvků.

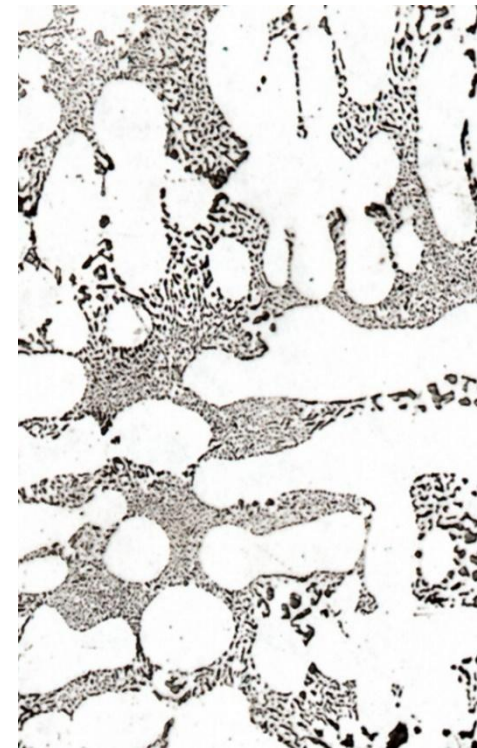
Struktura různých druhů eutektika slitiny Al-Si



zrnité



lamelární



modifikované

Al odlitky - příklady



Píst



Blok spalovacího motoru



Lité kolo



Startér

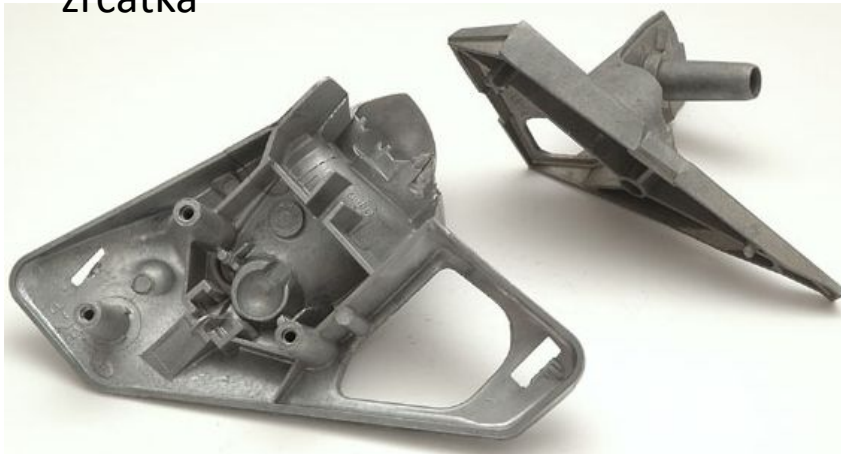
Slitiny zinku

Zn – Cu, Zn – Al, Zn – Mg

Výborná slévatelnost, nízká teplota tavení, odolnost vůči atmosférické korozi a slabým zásadám, těsnost odlitků

Odlévání vysokotlakým litím, odstředivé odlévání

Tělo zpětného
zrcátka



Směšovač
plynů



Slitiny mědi

Bronzy: slitiny mědi a nejčastěji cínu, hliníku nebo olova

Hustota asi $8,6 \text{ kg/dm}^3$, teplota tání asi $1020^\circ\text{C} - 1050^\circ\text{C}$

Vysoká tepelná vodivost, odolnost vůči korozi, dobré kluzné vlastnosti

Pro odlévání oběžných kol čerpadel, armatur, šnekových kol, zvonů, kluzných ložisek, umělecké předměty

Mosaz: slitina mědi a zinku

Hustota $8,4$ až $8,7 \text{ kg/dm}^3$, teplota tání 850 až 920°C

Dobrá elektrická a tepelná vodivost, křehkost, dobrá svařitelnost, je nemagnetická

Pro odlévání ložisek, pouzder ložisek, armatur, částí čerpadel a elektrických přístrojů, hudební nástroje,

Cu odlitky - příklady



Armatury



Šnekové
kolo



Ventil

Lesní roh



Slitiny hořčíku

Mg + Al, Mn, Zn, Si

Mg – Li: velmi lehká slitina, nízká hustota, nahrazování plastů

Tlakové lití v ochranných atmosférách, odlévání ve vakuu

Odlévání tvarově komplikovaných a tenkostěnných odlitků

Vlastnosti: + výborná zabíhavost

- pokles pevnosti za vysokých teplot
- odolnost vůči creepu
- reaktivnost taveniny na vzduchu, nízká korozní odlonost

Výrobky: karoserie automobilů, součásti pohonu, rámy sedadel, kryty na elektroniku, palubní desky, těla přístrojů, převodové skříně, kola aut a motorek

Mg odlitky - příklady

Tělo fotoaparátu



Lité kolo



Notebook



Slitiny niklu

Slitiny Ni s Cr a Mo (Hastalloy, Nimonic), komplexní Cr, Mo, V, Ta, Ti, Al, Zr, W (Inconel, Incoloy)

Pro lití ve vakuu i na vzduchu, lití metodou vytavitelného modelu

Vlastnosti: + vysoká pevnost

- + odolnost vůči vysokým teplotám – žárovevné slitiny

- + odolnost vůči nauhličení, odolnost vůči korozi

- + odolnost vůči kyselině sírové

- nikl je toxický, omezování výroby

Písty motorů, lopatky turbín a kompresorů, oběžná kola turbodmychadel, palivová čerpadla, armatury

Ni odlitky - příklady



Oběžné kolo
turbodmychadla



Palivové
čerpadlo

Rozváděcí kolo
turbíny



Armatury



Slitiny titanu

Obsahují titan a nějaké další prvky, nejrozšířenější Ti – Al (TiAl6V4)

Výhody: velmi vysoká pevnost a tuhost i při vysokých teplotách, poměr pevnost/hustota, odolnost vůči korozi, odolávají vysokým teplotám, chemická odolnost

Nevýhody: vysoké náklady na výrobu, vznik trhlin při tuhnutí

Odlévání nejčastěji do keramických skořepinových forem

Využití v kosmonautice, v leteckém i automobilovém průmyslu a v průmyslu zbrojním

Výrobky: satelity, družice, umělé kloubní a zubní náhražky, ventily, písty, ojnice, žárové části turbín, chemické reaktory, oběžná kola turbodmychadel

Ti odlitky - příklady



Ventily



Oběžné kolo
turbodmychadla



Umělý
kloub



SR – 71
„Blackbird“

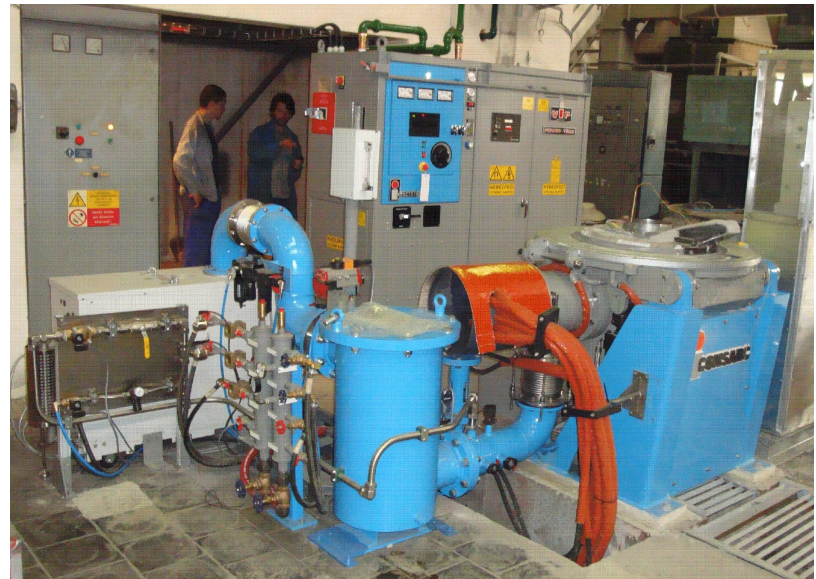


Píst a ojnice

Tavení ocelí

Elektrické obloukové pece- tavení elektrickým obloukem

Elektrické indukční pece – tavení elektromagnetická indukce



Elektrické obloukové pece

Možnost rafinace kovu – snížení obsahu P, S, snížení obsahu plynů

Tavbu na zásadité obloukové peci lze rozdělit:

- na údobí sázení,
- tavení,
- oxidační údobí (odfosfoření, oduhličení, odplynění)
- redukční údobí (odsíření, dezoxidace)

Nejdelší časové údobí je vlastní tavení - cca 60-90min., doba oxidace cca 20min a fáze dohotovení (odsíření, dolegování cca 30min. (přibližně platí pro běžnou nelegovanou ocel)

Elektrické obloukové pece

Pec ČKD, 8 tun (OTO 5), SCB Foundry



Elektrické obloukové pece - hutní



320t EOP (Gebze, Turecko), Tap to tap time 55 min, 812 mm průměr elektrody
Výrobnost: 2,85 mil. t/r 8577 t/den příkon 240+10%MVA
Dodavatel: Siemens VAI

Elektrické indukční pece

Pouze tavení a dolegování – rafinace NE!! (velmi omezená)

Rozdělení elektrických indukčních pecí

Podle konstrukce: - IP kanálkové
- IP kelímkové

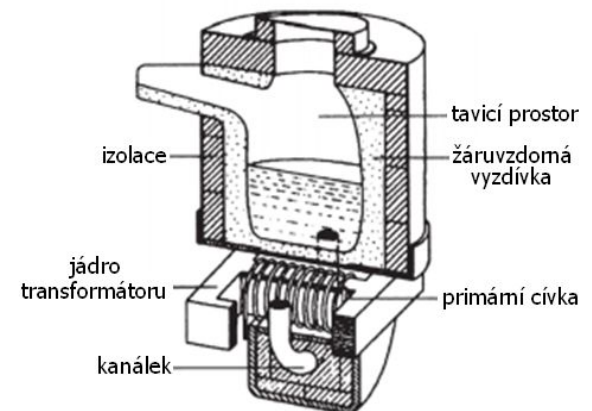
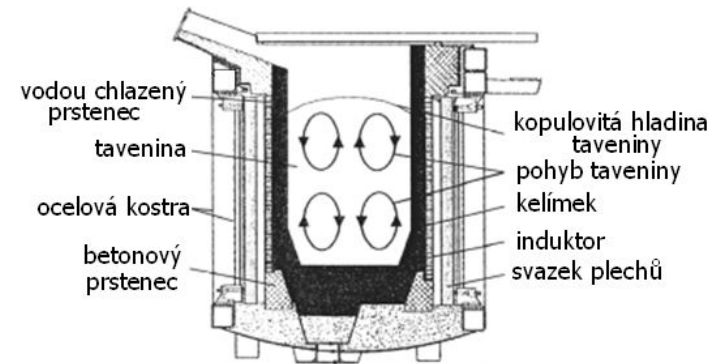
Podle hmotnosti vsázky:

Od kg po $X \cdot 10^1$ t

Podle frekvence: - vysokofrekvenční,

- středofrekvenční,

- na síťovou frekvenci,



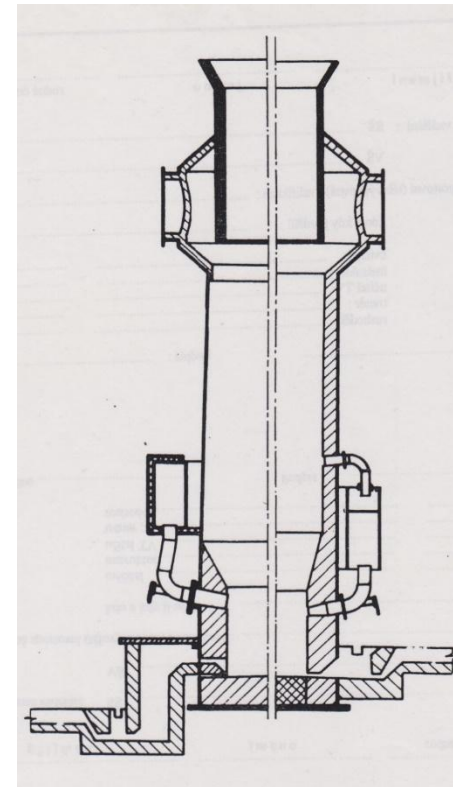
Tavení litin

Tavící agregáty

- Kupolové pece (kuplovny)
- Elektrické indukční pece
- Rotační pece

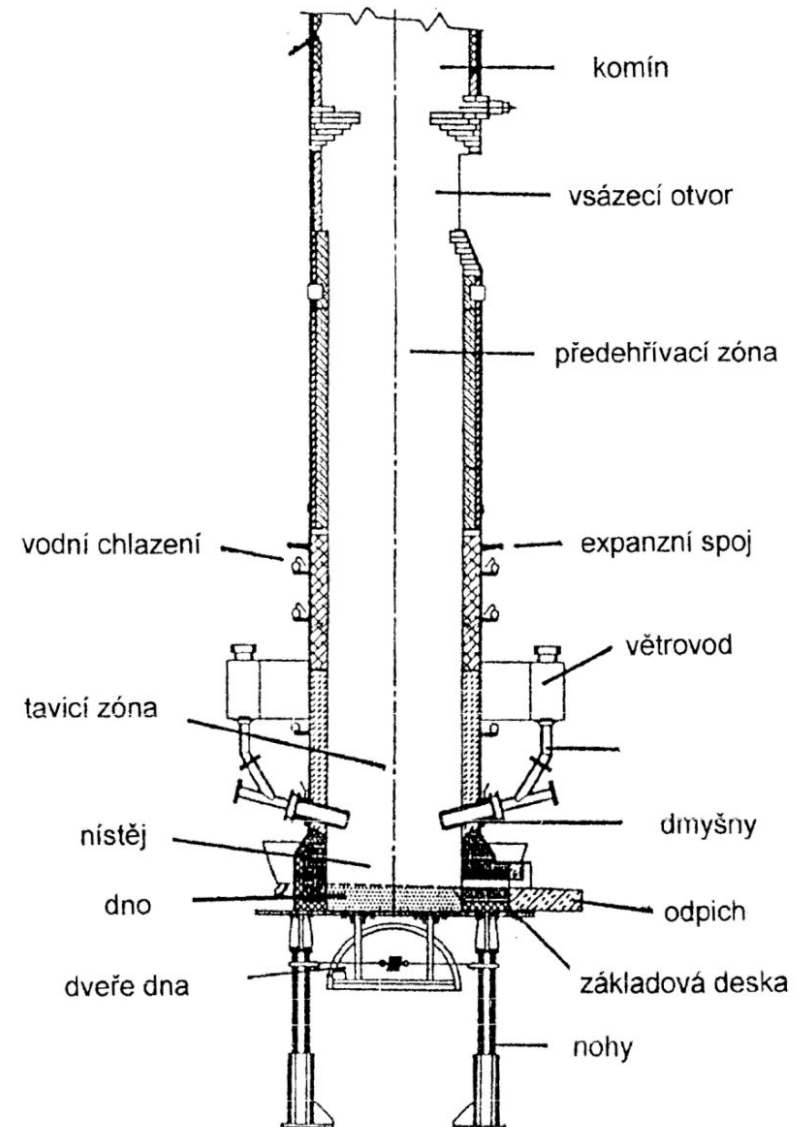
Vsázkové suroviny

- Surové železo
- Vratný materiál
- Ocelový odpad
- Litinový odpad
- Legující přísady (nauhličovadla, FeSi, FeMn)
- Očkovadla, modifikátory



Kupolové pece

- Studenovětrné
- Horkovětrné
- Odpich
- Kontinuální
- periodický
- Provoz
- Periodický
- Kampaňovitý
- Vsázka
- Kovové přísady
- Koks
- Struskotvorné přísady



Tavení neželezných kovů a slitin

eklektické a plynové pece

elektrické odporové a indukční pece (kelímkové pece)

plynové pece – kelímkové, komorové, šachtové



tavicí pece



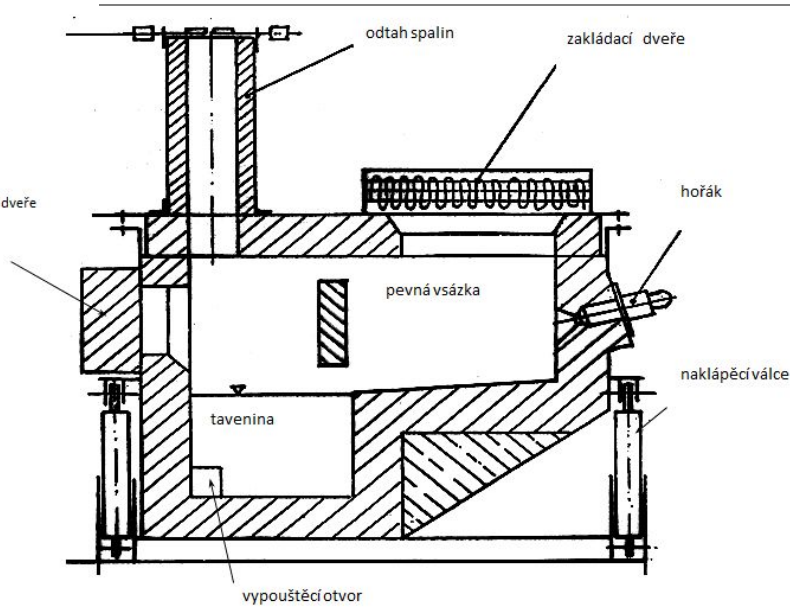
pece s volným
kelímkem

Plynové tavící pece

kelímkové pece



zavázející dveře



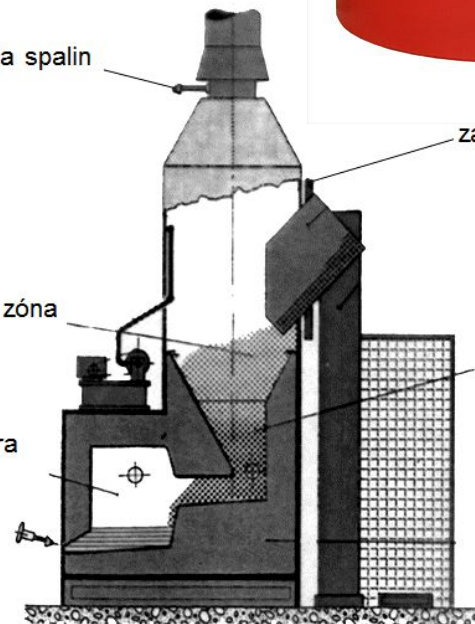
komorové pece

kontrola spalin

předehřívací zóna

udržovací komora

šachtové pece

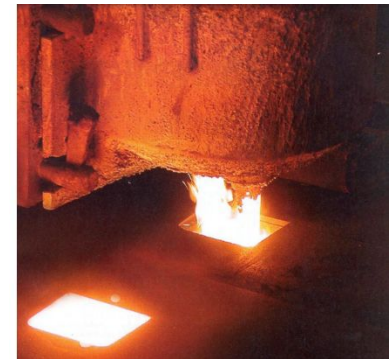
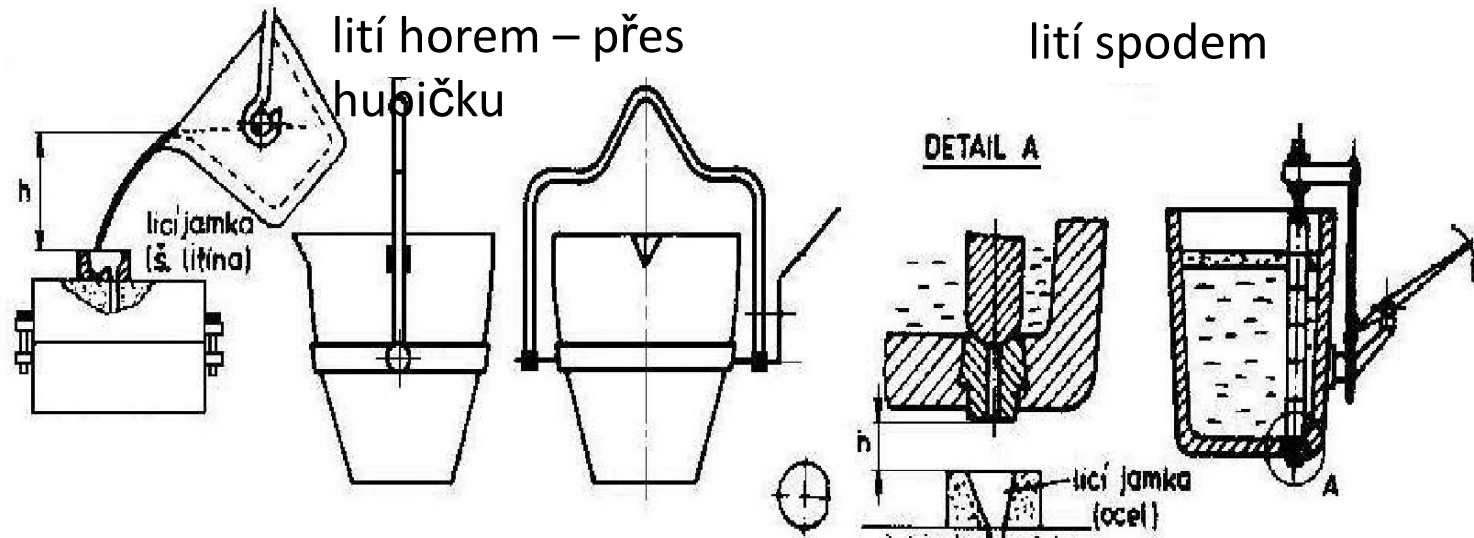


tavicí zóna

Vakuové elektrické indukční pece - slitiny na bázi Ni, Ti, Fe



Odlévání kovů a slitin



Zabíhavost kovů a slitin

Zabíhavost je schopnost kovu vyplnit dutinu formy. Je funkcí:

- kovu – druh slitiny, čistota slitiny, viskozita, licí teplota
- formy – tepelná vodivost, drsnost, atd.
- konstrukce odlitku – tloušťka stěny, tvar odlitku atd.
- podmínek odlévání – rychlost lití, licí výška, tlak plynů ve formě atd.

Zabíhavost snižují

- viskozita
- povrchové napětí kovu
- kapilární tlak a tlaky plynů ve formě
- atd...

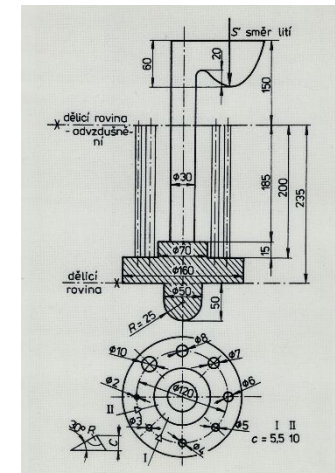
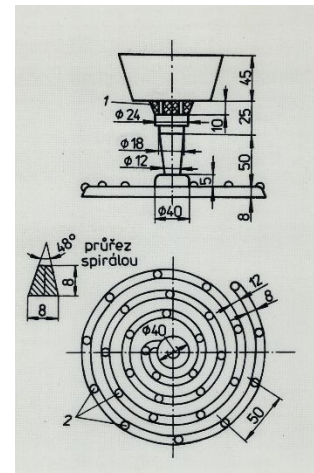
Zabíhavost kovů a slitin

Zabíhavost je schopnost kovu vyplnit dutinu formy. Je funkcí:

- kovu – druh slitiny, čistota slitiny, viskozita, lící teplota
- formy – tepelná vodivost, drsnost, atd.
- konstrukce odlitku – tloušťka stěny, tvar odlitku atd.
- podmínek odlévání – rychlost lití, lící výška, tlak plynů ve formě atd.

Zabíhavost snižují

- Viskozita kovu
- povrchové napětí kovu
- kapilární tlak a tlaky plynů ve formě
- atd...



Odlévání do kovových forem (kokila)

Odlévání:

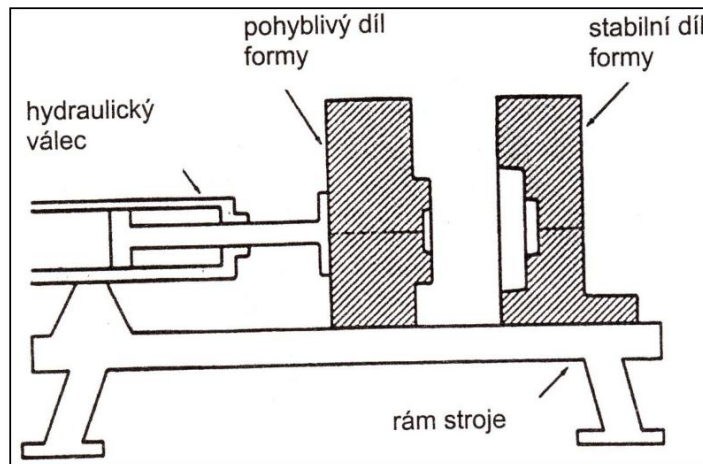
- gravitační
- tlakové lití (studená, teplá komora)
- odstředivé

Specifika

- forma negativ odlitku zvětšená o smrštění odlitku
- kovová forma – zhotovena obráběním
- vysoká rozměrová a tvarová přesnost
- velké série (velkosériová, hromadná) – náklady
- mazání forem

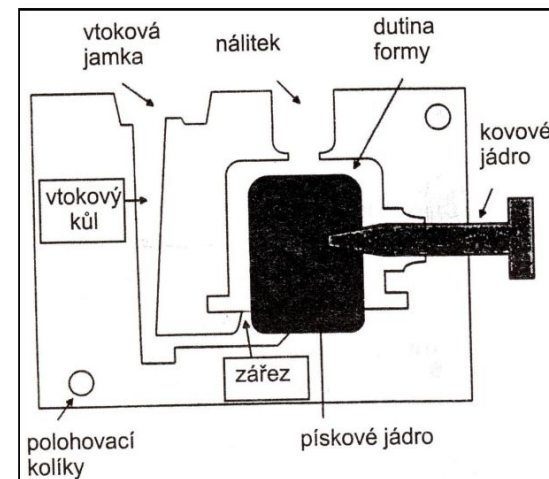
Gravitační odlévání do kokil

- dvoudílná forma – pevná pohyblivá část, jádra kovová (i netrvalá např. solná)
- odlévání ruční, licí stroj



Kovová forma s jádrem
pohled do dělicí roviny

Kokilový stroj s dvoudílnou formou



Tlakové lití

Proces plnění můžeme rozdělit

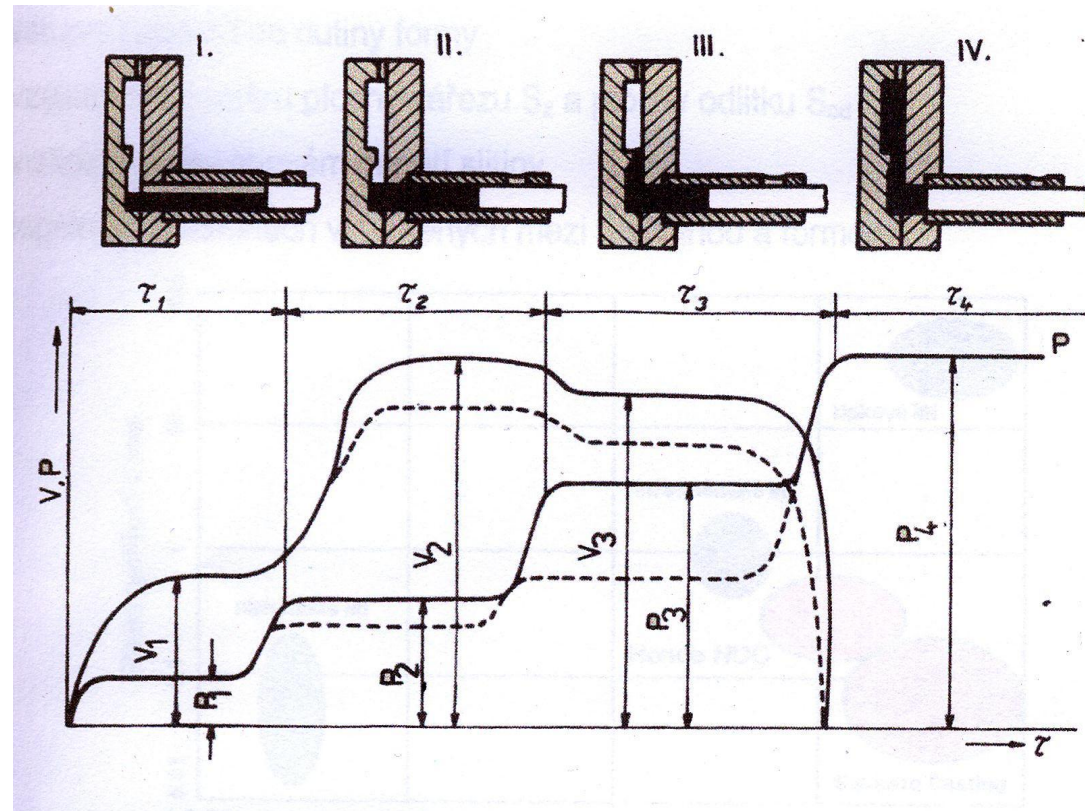
na čtyři etapy:

Etapa T1

Etapa T2

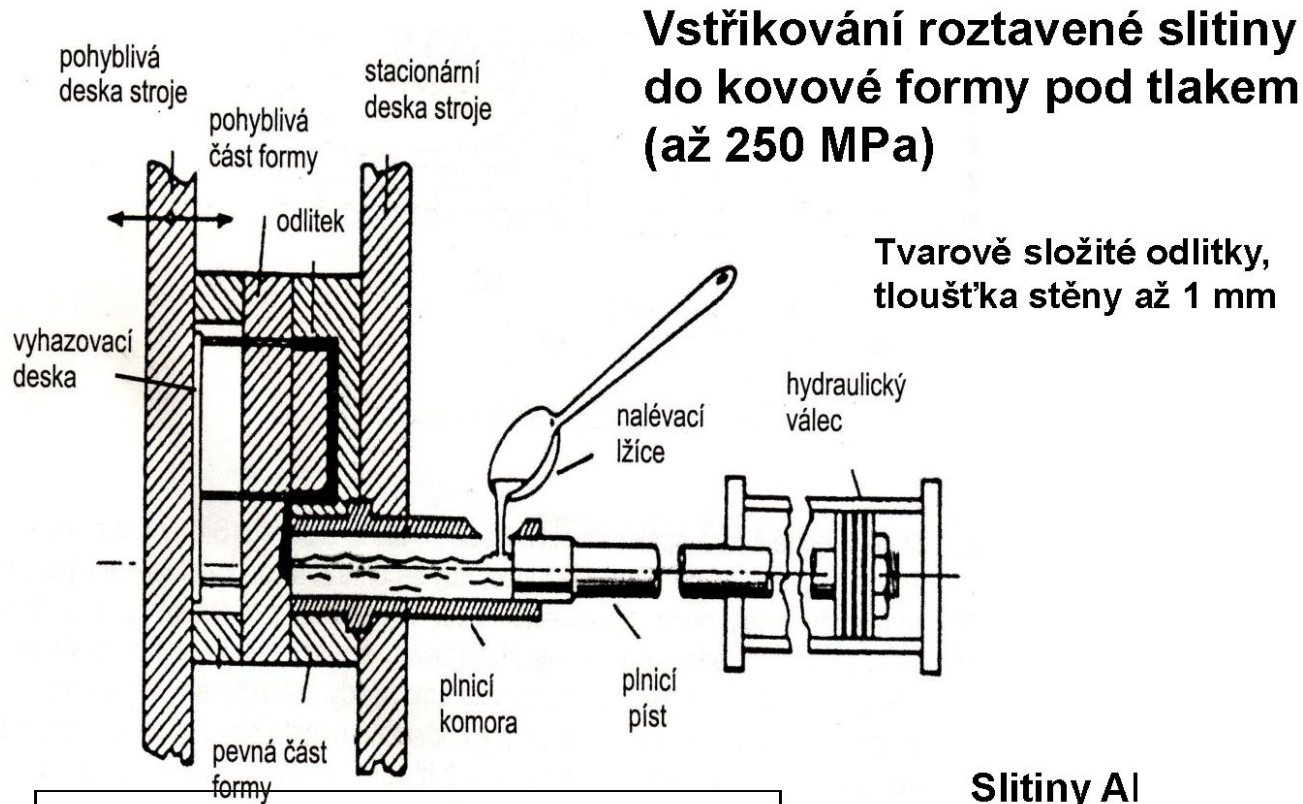
Etapa T3

Etapa T4

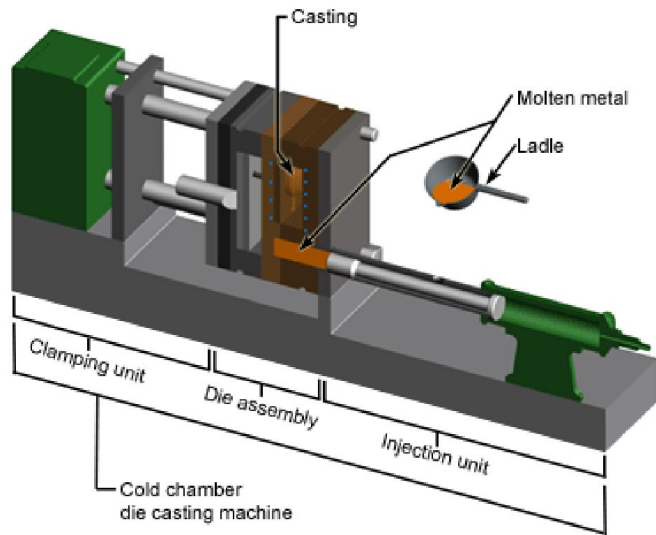


Tlakové lití - studená komora (Al)

- vertikální (Polák), horizontální



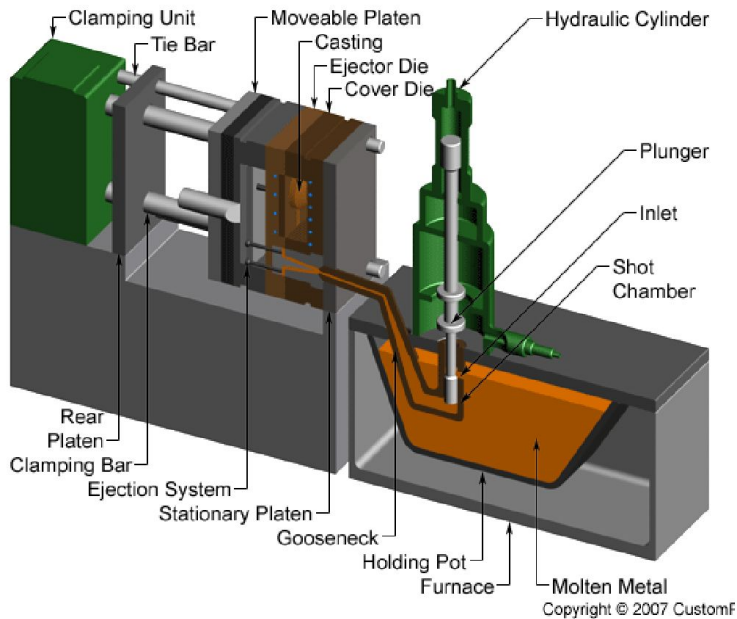
Tlakové lití – studená komora



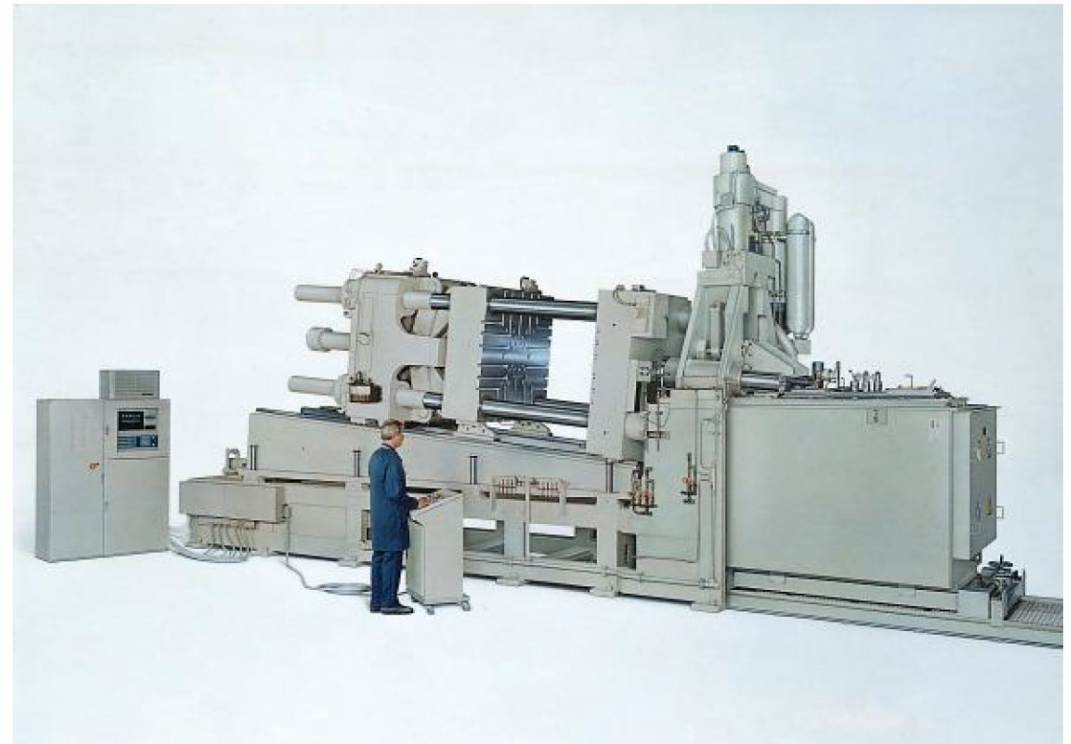
výroba přesných odlitků
produktivita
velikost stroje = uzavírací
síla
strukturální odlitky

Tlakový lici stroj ItalPresse s uzavírací silou 4400 tmm

Tlakové lití – teplá komora (Zn, Mg)

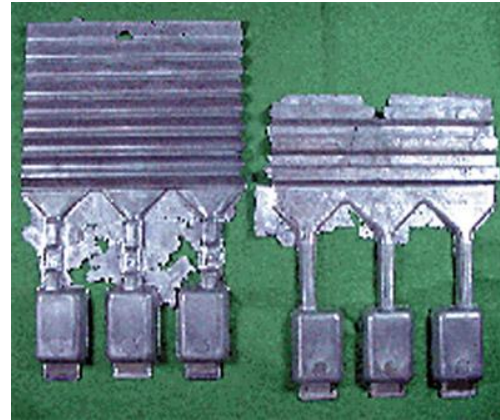


výroba přesných odlitků
produktivita
velikost stroje = uzavírací
síla

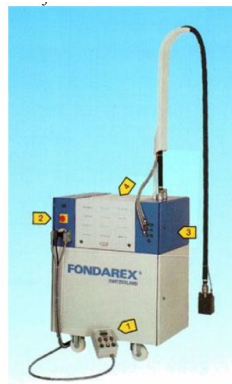


Stroj s teplou komorou FRECH DAM 800

Forma



Zařízení pro vakuování formy firmy ProVac



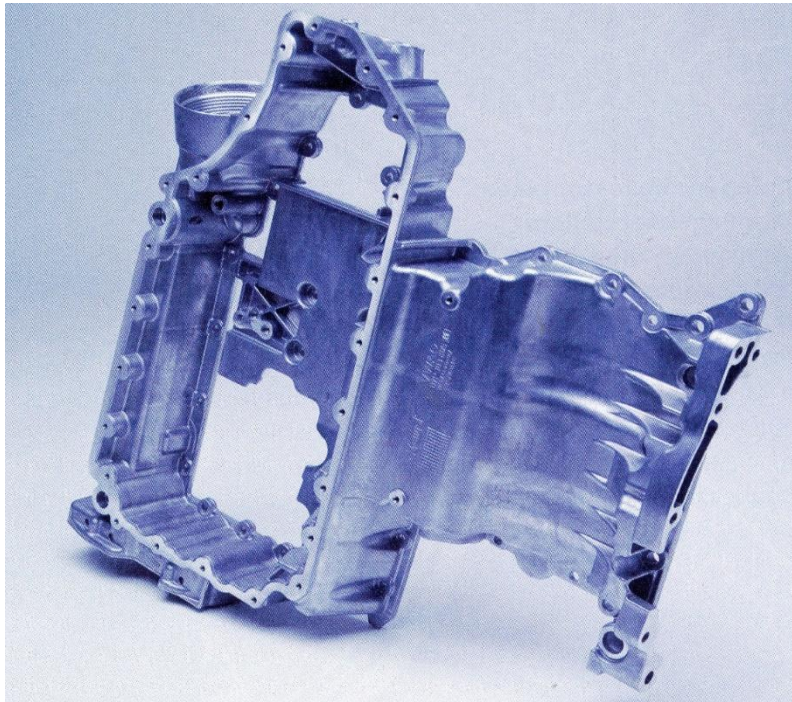
Zařízení pro vakuování formy firmy Fondarex



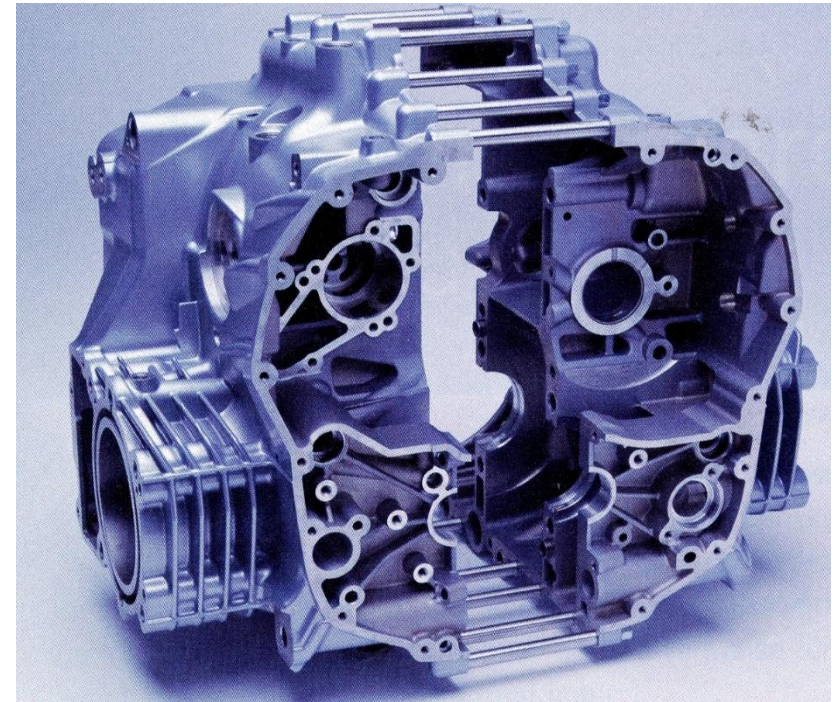
Příklad odlitků – tlakové lití



Příklad odlitků – tlakové lití



Horní část olejové vany pro Audi A8



Odlitek vodou chlazené klikové skříně pro motocykl BMW

Nízkotlaké lití

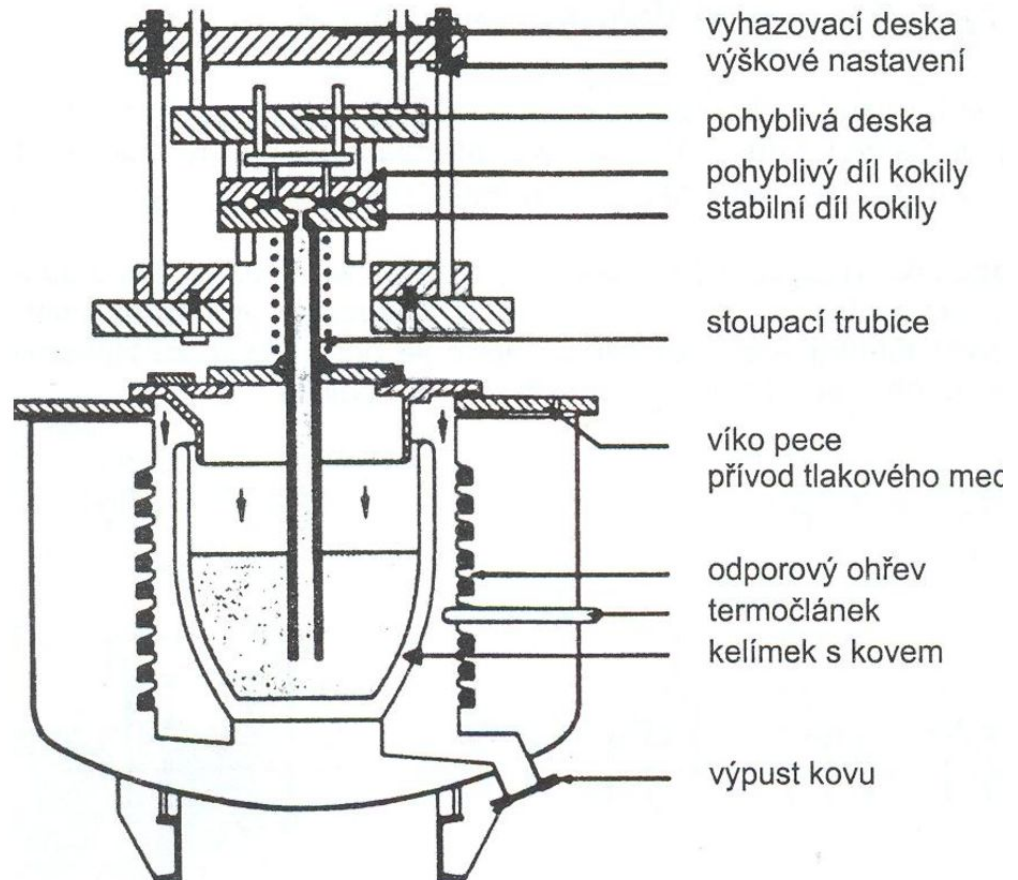
Tlak plynu na hladinu
kovu = vytlačování kovu
do dutiny formy

Kovová forma

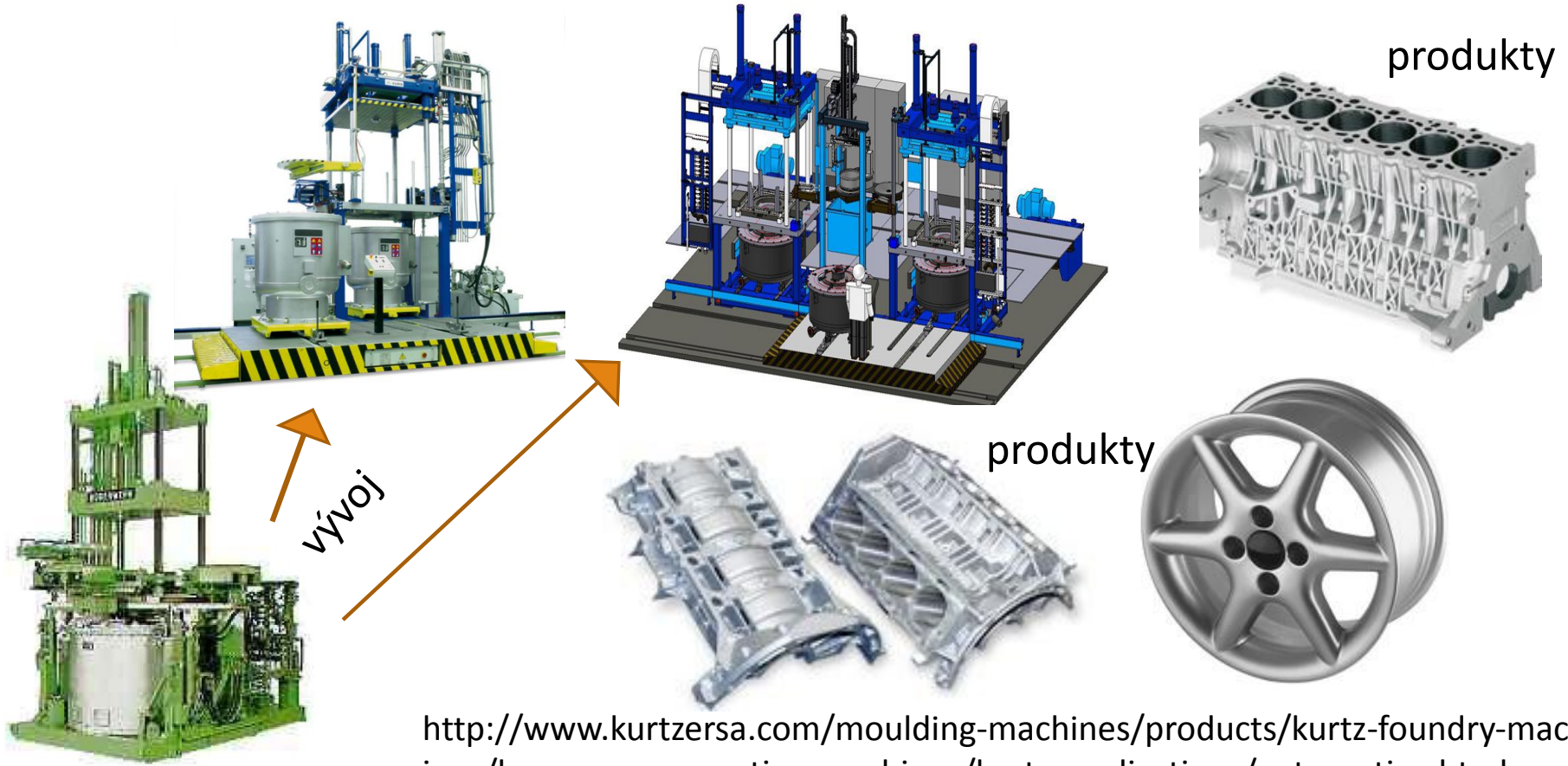
Tlak na hladinu po celou
dobu tuhnutí odlitku

Vysoká homogenita a
jakost odlitku

odlitky turbodmychadel,
litých kol atp.



Nízkotlakové lití



<http://www.kurtzsa.com/moulding-machines/products/kurtz-foundry-machines/low-pressure-casting-machines/kurtz-applications/automotive.html>

Odstředivé lití

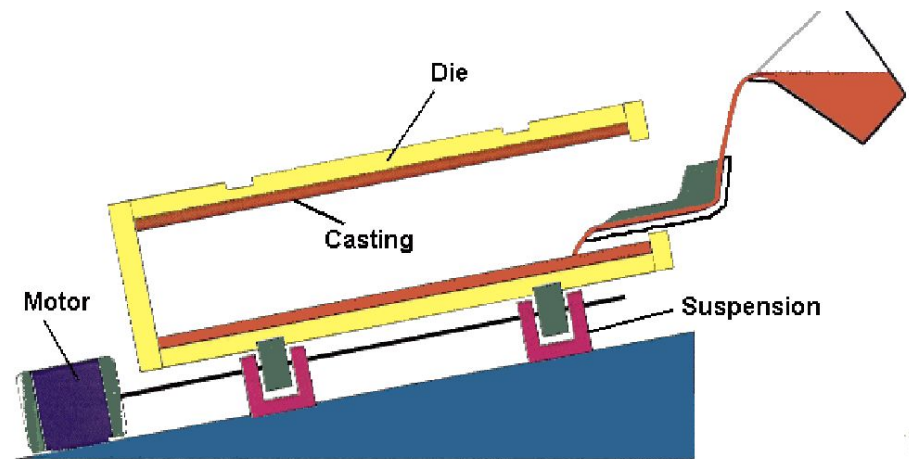
Odlévání do rotující
(kovové, keramické,
silikonové) formy – využití
odstředivé síly

Osa rotace – horizontální
(možnost naklonění)
vertikální

Rychlost rotace dána
typem slitiny a velikostí
odlitku

Vysoká vnitřní jakost,
vysoké využití kovu

Pravé odstředivé lití – osa
rotace = geom. osa odlitku



Odstředivé lití - Tekcast

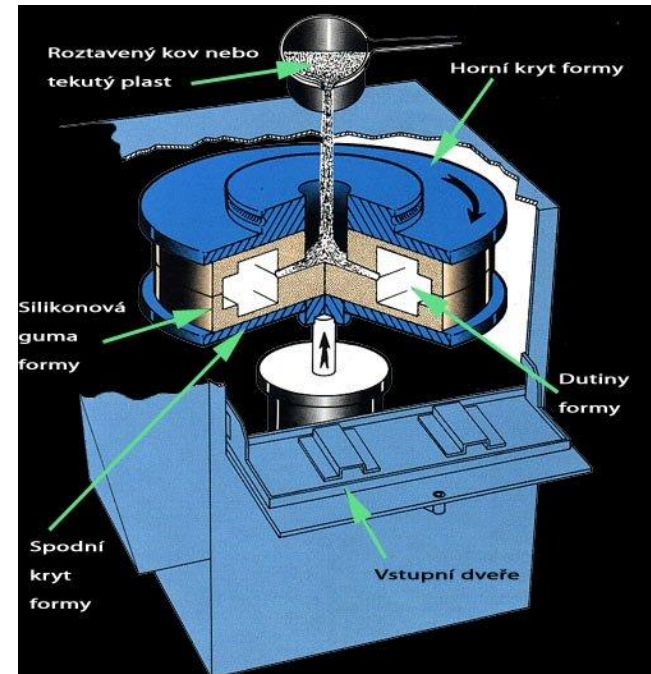
Odlévání nízkotavitelných slitin – Zn, Sn, nebo i plast, vosk...

Silikonová forma

Gravitační odlévání

Vysoká produktivita

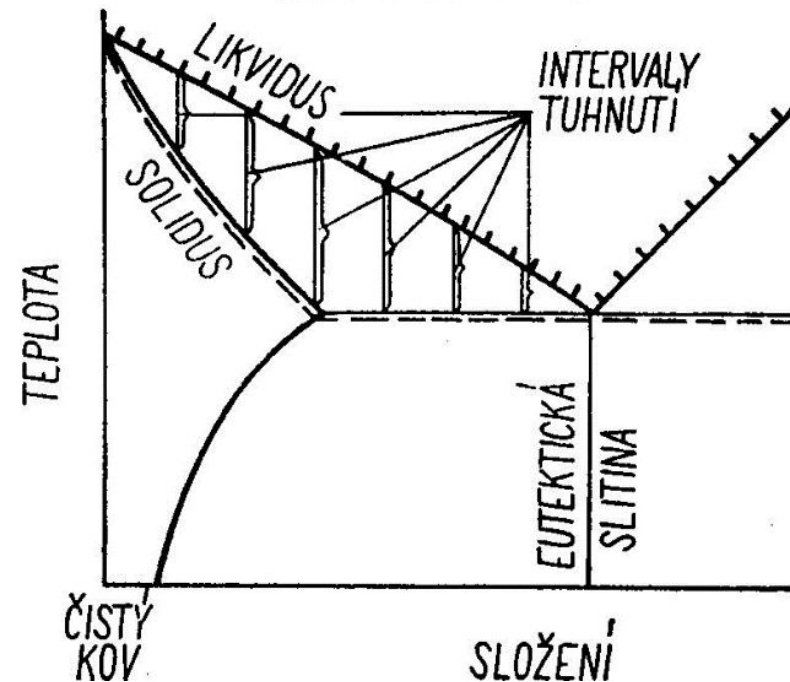
Vysoká povrchová jakost odlitku



Tuhnutí kovů a slitin

Tuhnutí – proces, při kterém dochází vlivem ochlazování kovu ve slévárenské formě, k přechodu tekuté fáze na fázi pevnou.

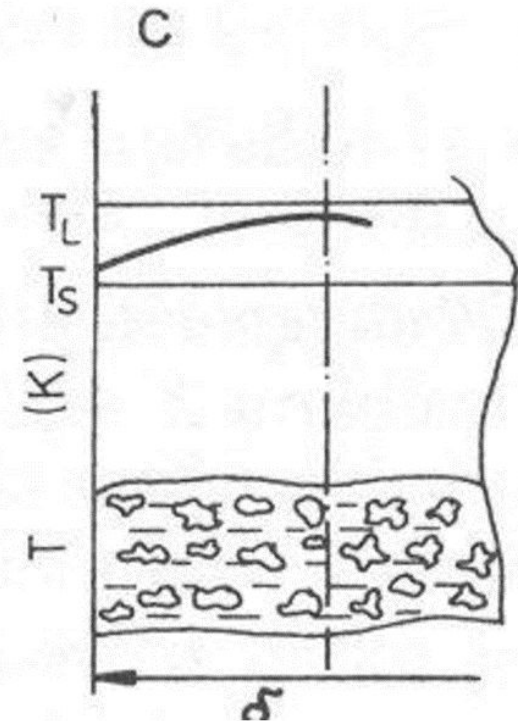
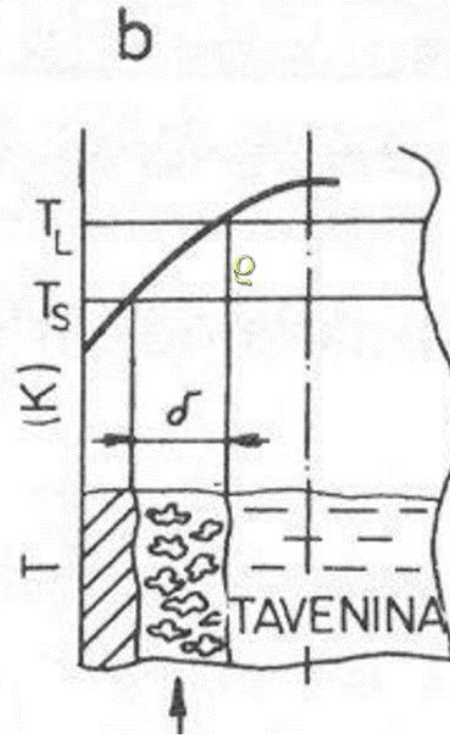
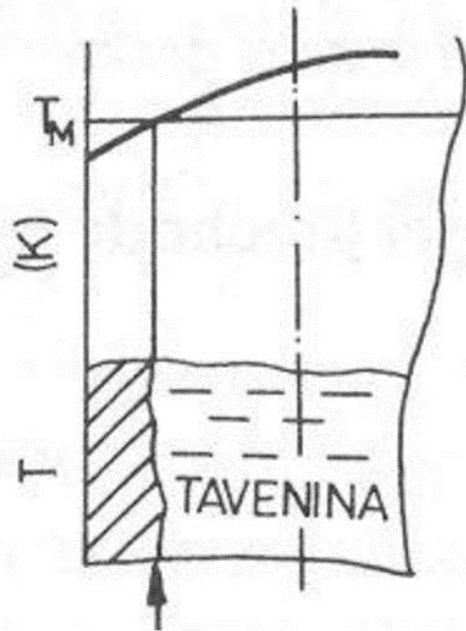
Z hlediska řízení vlastností odlitku a technologie výroby nás zajímá jak dlouho trvá tento pochod (doba tuhnutí) a jaký je postup natuhávání pevné fáze od stěny formy.



Průběh tuhnutí kovů a slitin

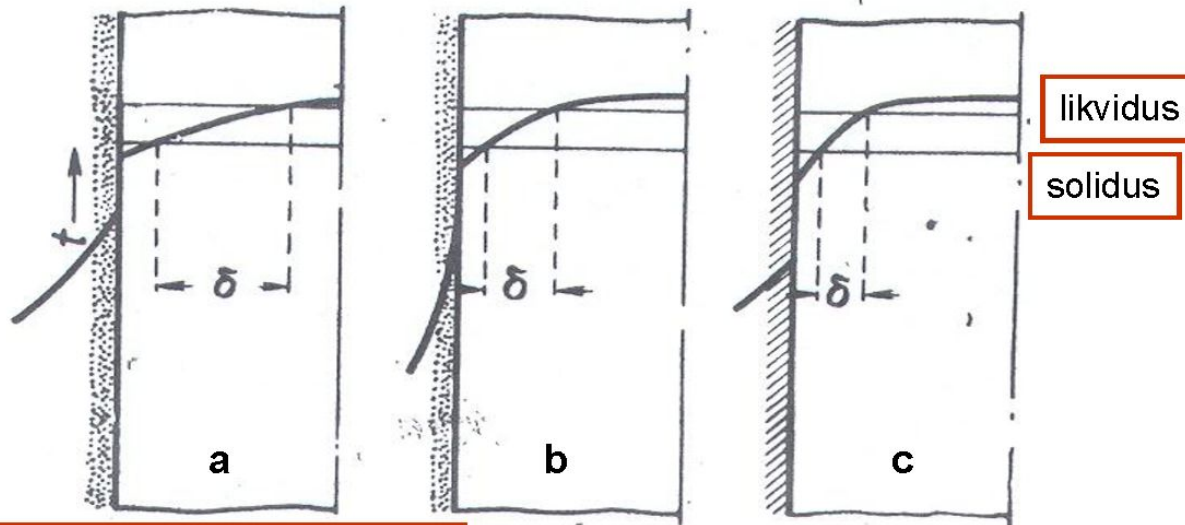
a) exogenní, b) dvoufázové, c) endogenní – objemové (kašovitě)

a Čisté kovy
eutektické slitiny



Rychlost ochlazování – rychlost odvodu tepla (tepelná akumulace formy)

a) sušená forma, b) syrová forma, c) kokila



$$b_f = \sqrt{\lambda_f c_f \zeta_f}$$

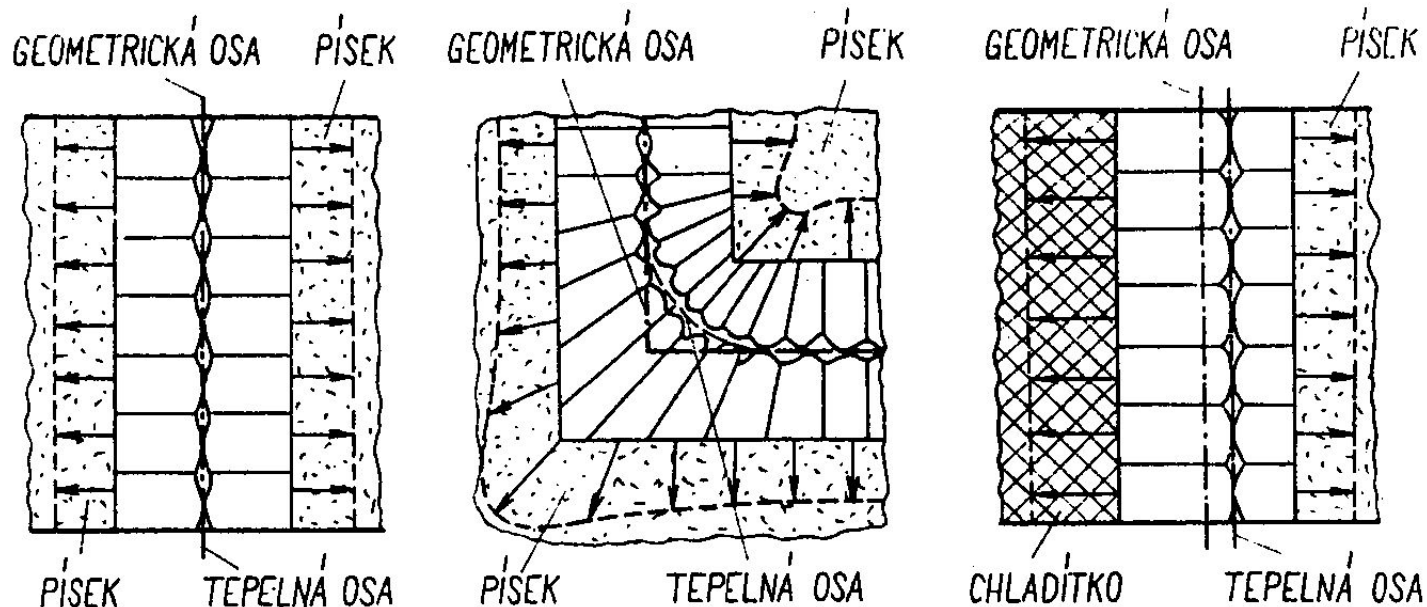
Λ tepelná vodivost, c_f měrné teplo, ζ hustota

Čím je akumulační schopnost formy vyšší, tím je příčný teplotní gradient větší a tím užší je dvoufázové pásmo

Tepelná a geometrická osa odlitku

Množina bodů, s nejvyšší teplotou (poslední místo tuhnutí v odlitku)
Poloha závisí na tvaru a velikosti odlitku.

Tepelná osa se nemusí shodovat s geometrickou osou (odchýlení od geometrické osy ve směru menšího odvodu tepla).



Smršťování kovu při tuhnutí a chladnutí odlitku

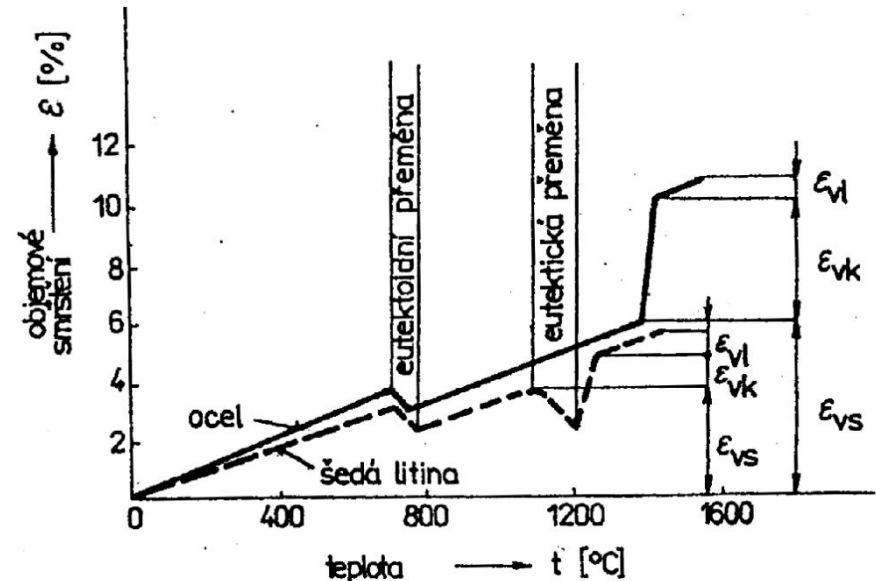
Chladnutí kovu je spojeno se zmenšováním objemu – smršťováním. Tepelná osa se nemusí shodovat s geometrickou osou (odchýlení od geometrické osy ve směru menšího odvodu tepla).

Změna hustoty (růst) s poklesem teploty kovu – důsledek = smrštění (zákon zachování hmoty)

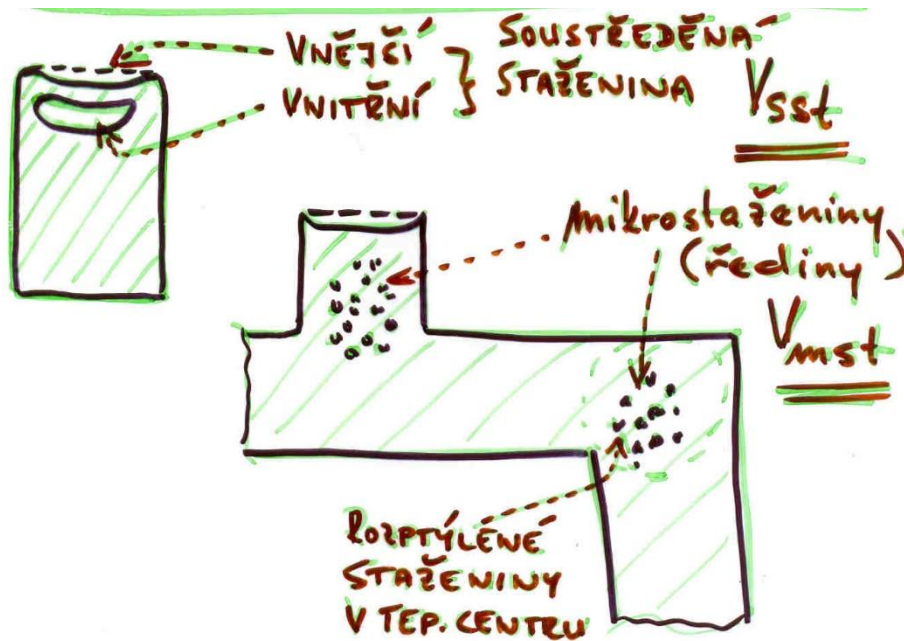
ϵ_{vl} – smršťování roztavené slitiny

ϵ_{vk} – smršťování při tuhnutí

ϵ_{vs} – smršťování v pevném stavu



Důsledky objemových změn při tuhnutí



$$V_{st} = V_{sst} + V_{mst}$$

$$V_{st} = V_{sst} + V_{mst}$$

Důsledek - vznik staženin

- otevřená
- uzavřená

Lokalizace

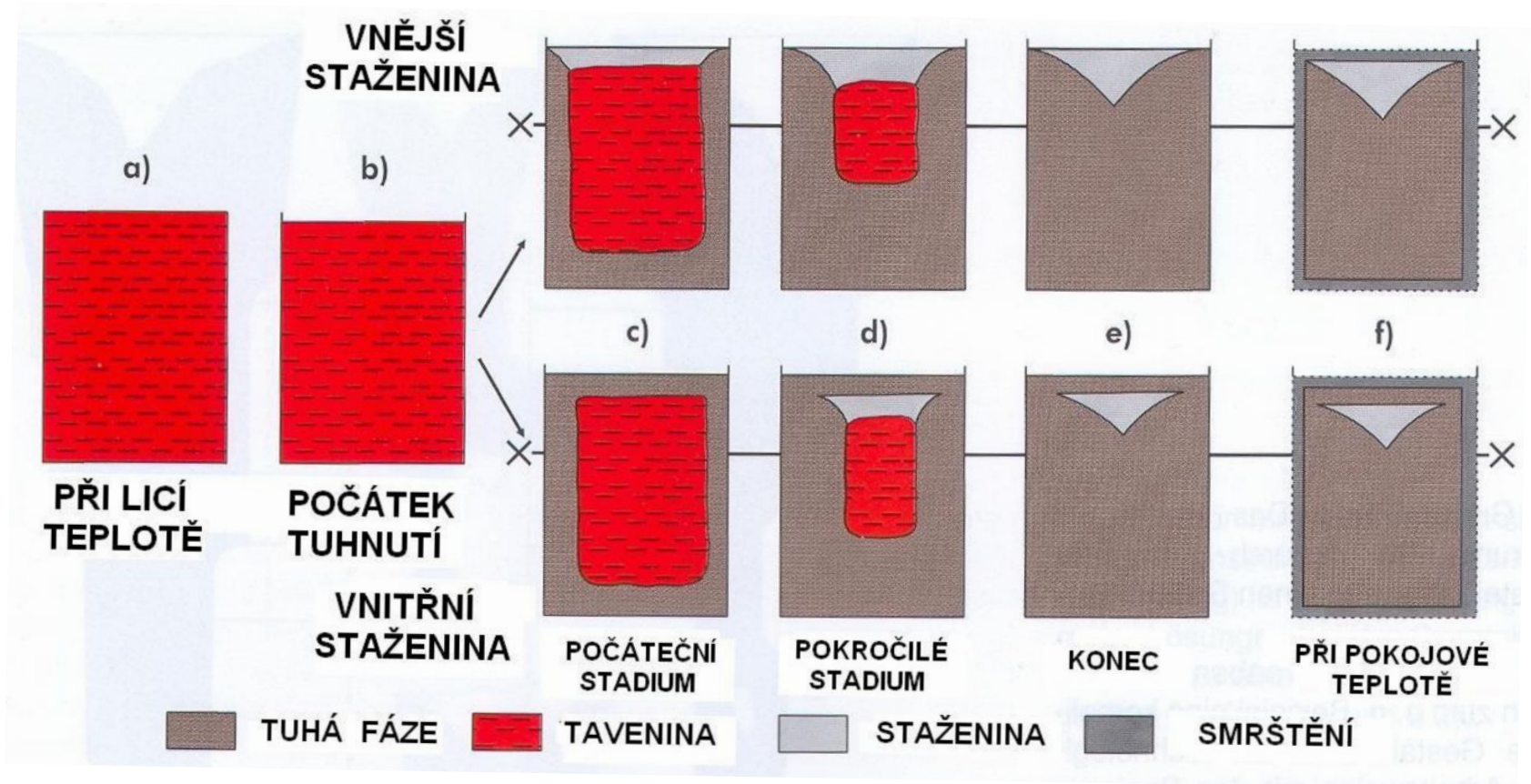
- soustředěná
- rozptýlená

Velikost

- staženina (makro)
- ředina (mikro)

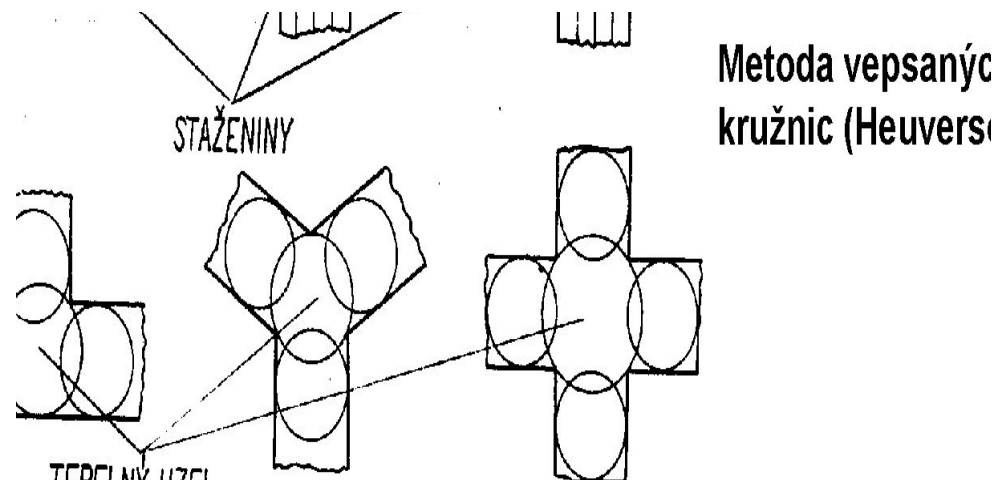


Vznik vnějších a vnitřních staženin



Tepelné uzly a jejich eliminace

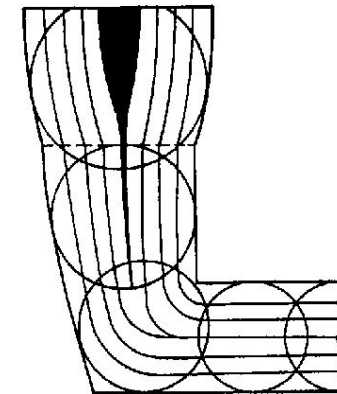
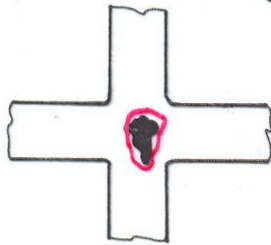
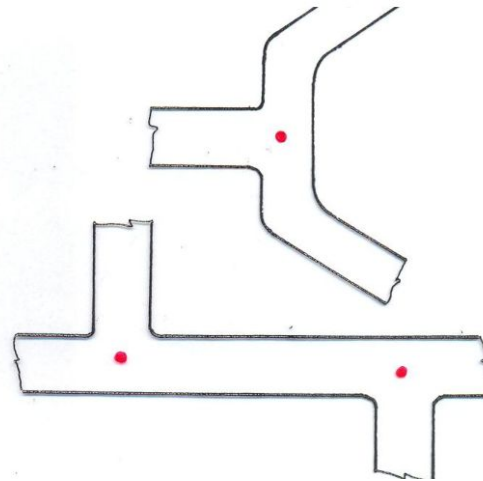
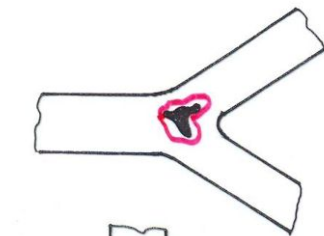
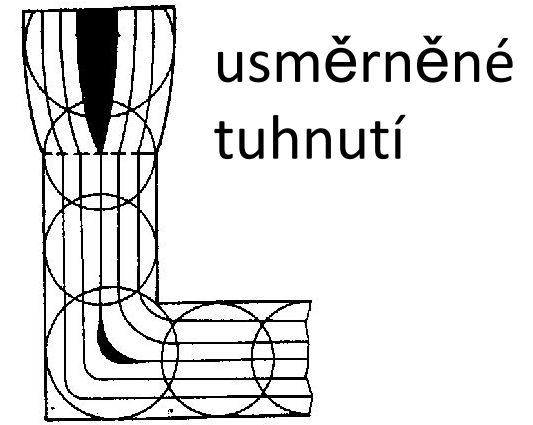
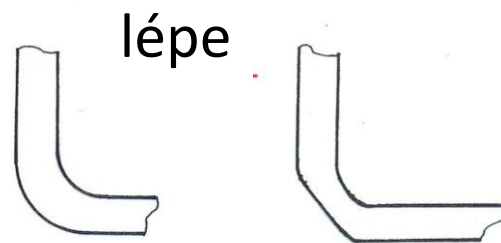
Oddělená místa posledního tuhnutí od nalitkové části – lokální nahromadění nebo přehřátí kovu – tvorba staženin.



Eliminace tepelných uzlů

- změna konstrukce odlitku (úprava tvaru odlitku, technologické přídávky)
- nálitkování
- chlazení – chladítka (vnější, vnitřní)

Konstrukční změny odlitek



Řízená krystalizace odlitků

- řízení krystalizace odlitků s rovnoosými zrny
- řízení krystalizace při výrobě odlitků s orientovanými sloupcovými zrny
- řízení krystalizace při výrobě monokrystalických odlitků



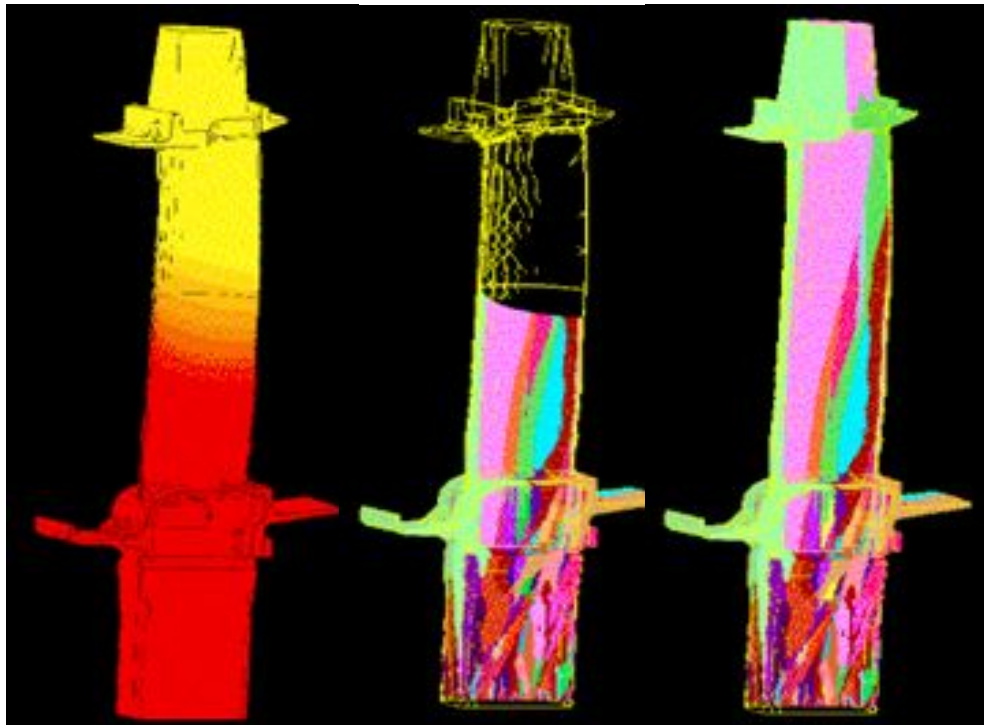
tky s rovnoosou strukturou

mechanické oscilace – roztočení formy -> nalití kovu -> oscilace -> pohyb špiček dendritů -> nové zárodky -> zjemnění struktury

razvuk – vystavení taveniny ultrazvukovým vlnám -> vznik zárodků před tuhnoucí frontou -> zjemnění výsledné struktury odlitku

magnetické pole – V proměnném magnetickém poli vznikají bublinky -> ulamování dendritů -> nové zárodky -> zjemnění struktury

Odlitky se sloupcovými zrny



Simulace tuhnutí a růstu sloupcových zrn

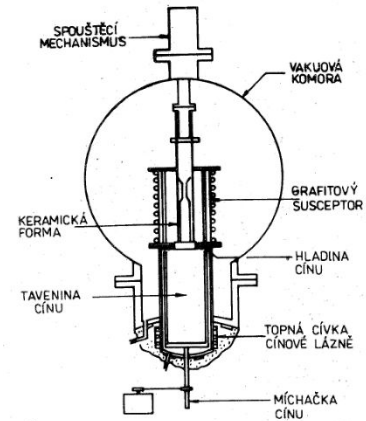


Schéma metody LMC

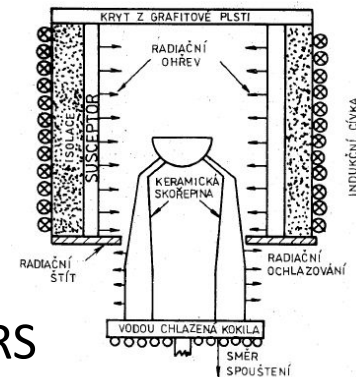
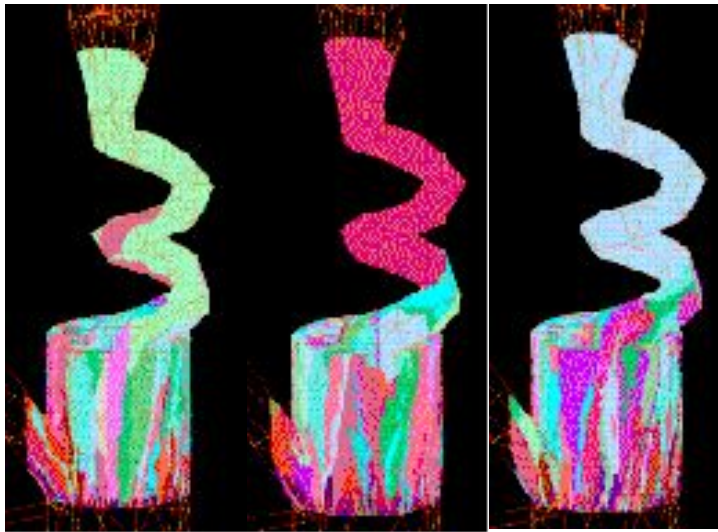
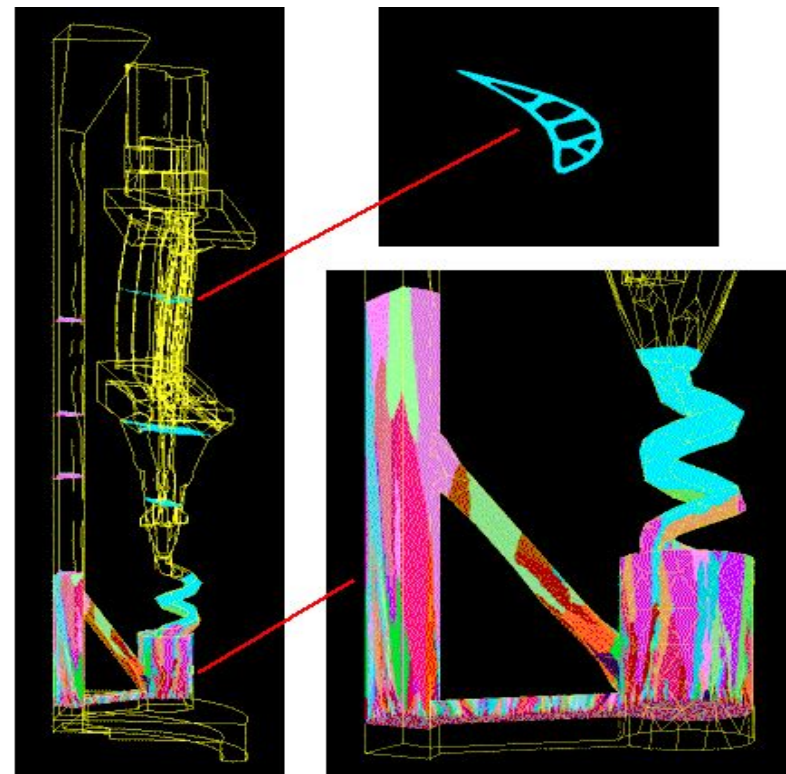


Schéma metody HRS

Monokrystalické odlitky



Simulace růstu a selekce jednoho sloupcového zrna

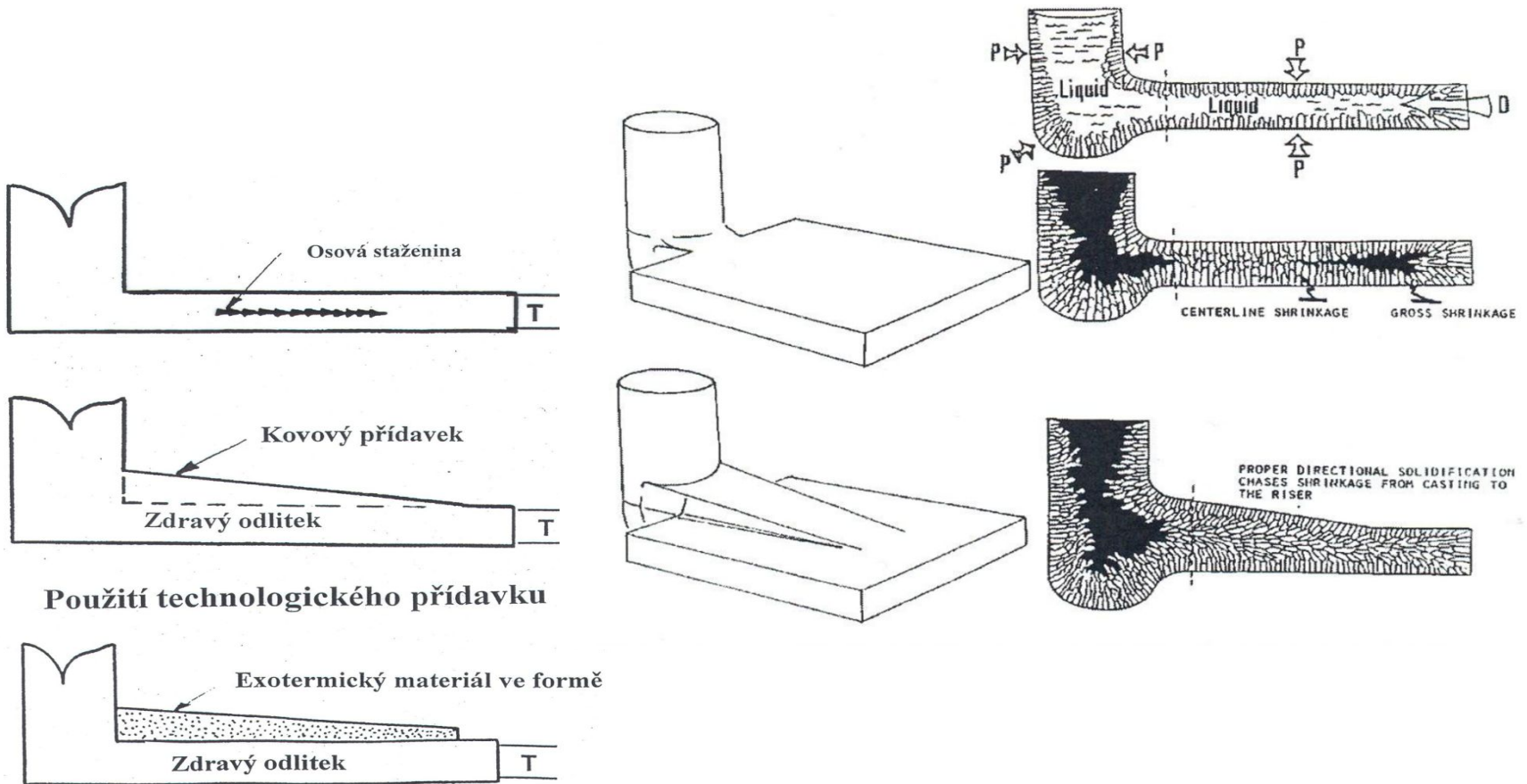


Simulace selekce monokrystalu daného odlitku

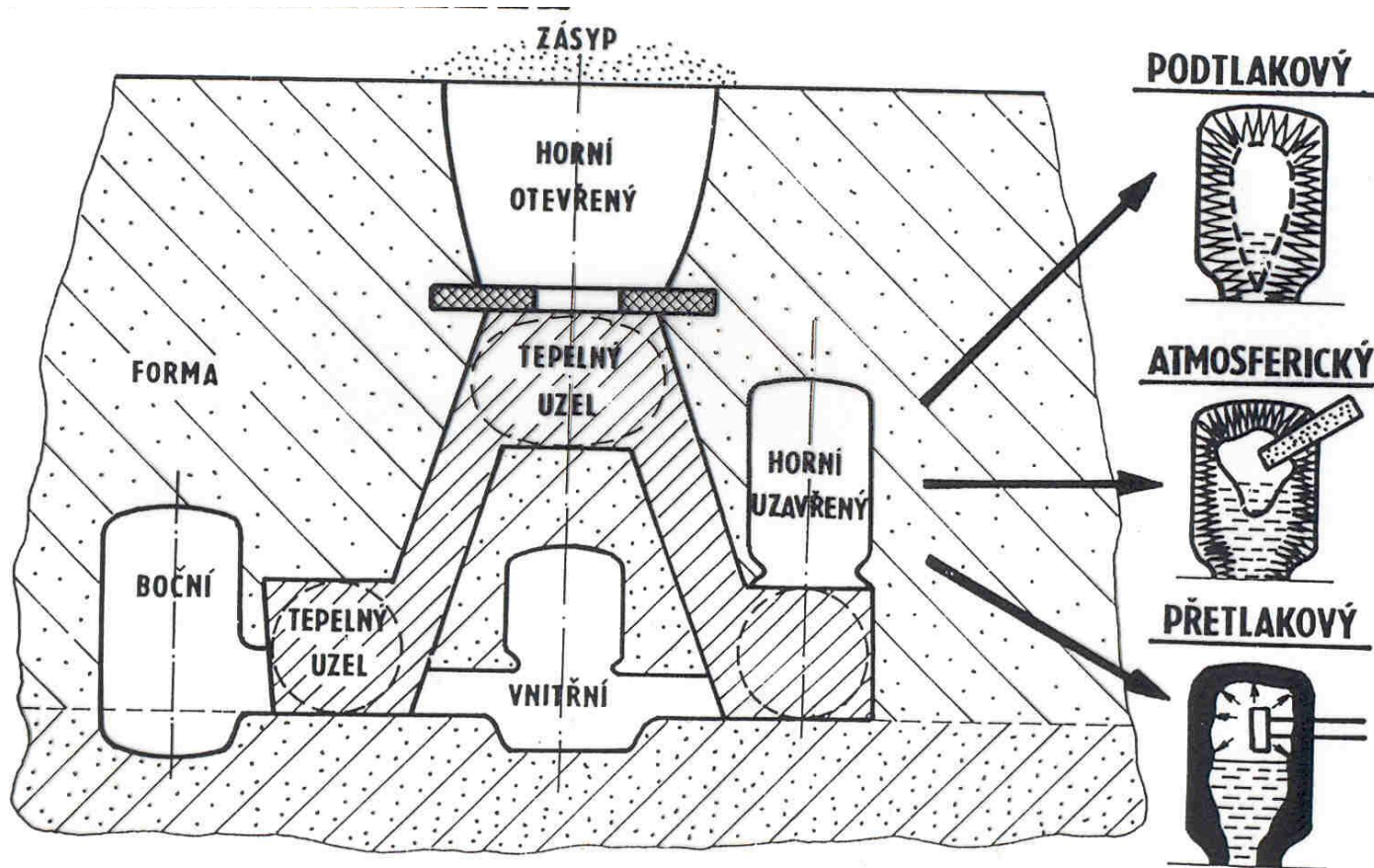
Monokrystalické odlitky



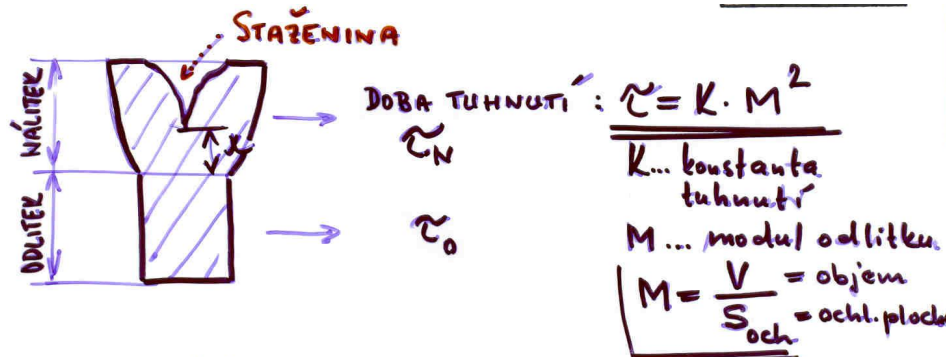
Technologické změny odlitků



Rozdělení nálitků – dle polohy vůči odlitku



Výpočet nálitků



VÝPOČET NÁLITKU:

KRLODAWER:

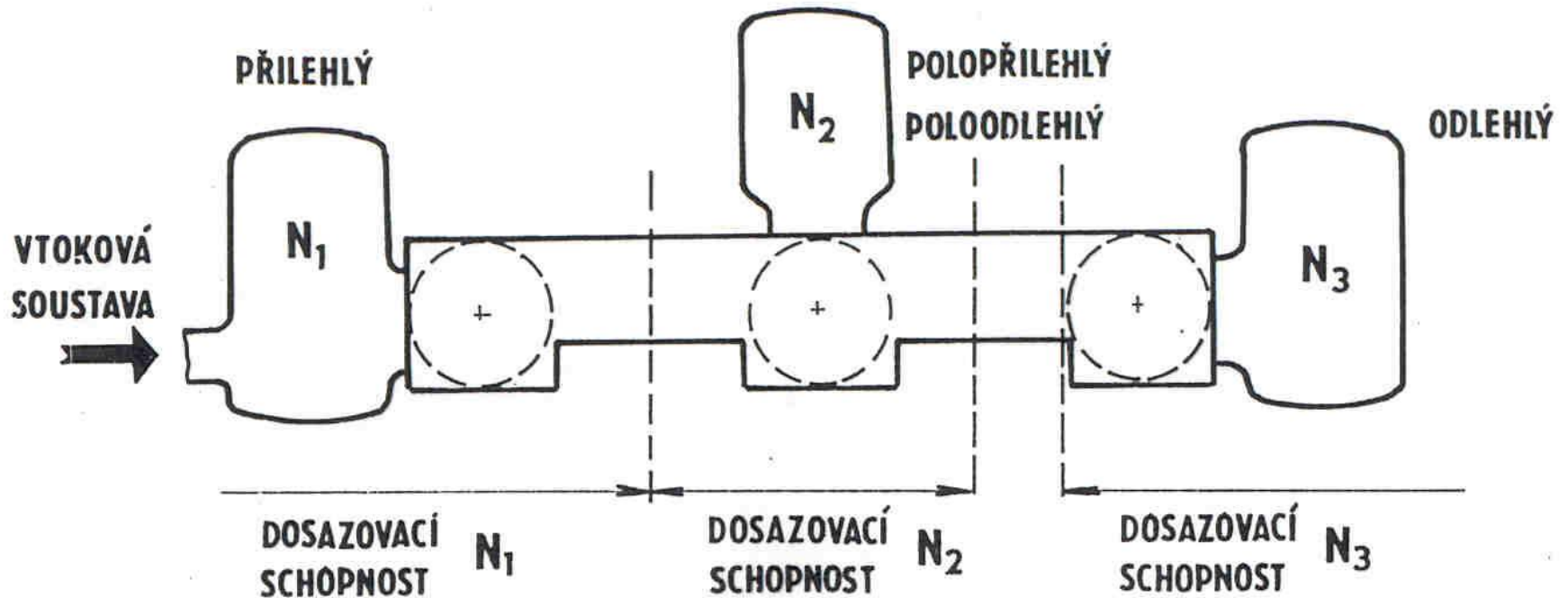
$$\tau_N > \tau_0$$

$$K_N \cdot M_N^2 = 1,4 \cdot K_0 \cdot M_0^2$$

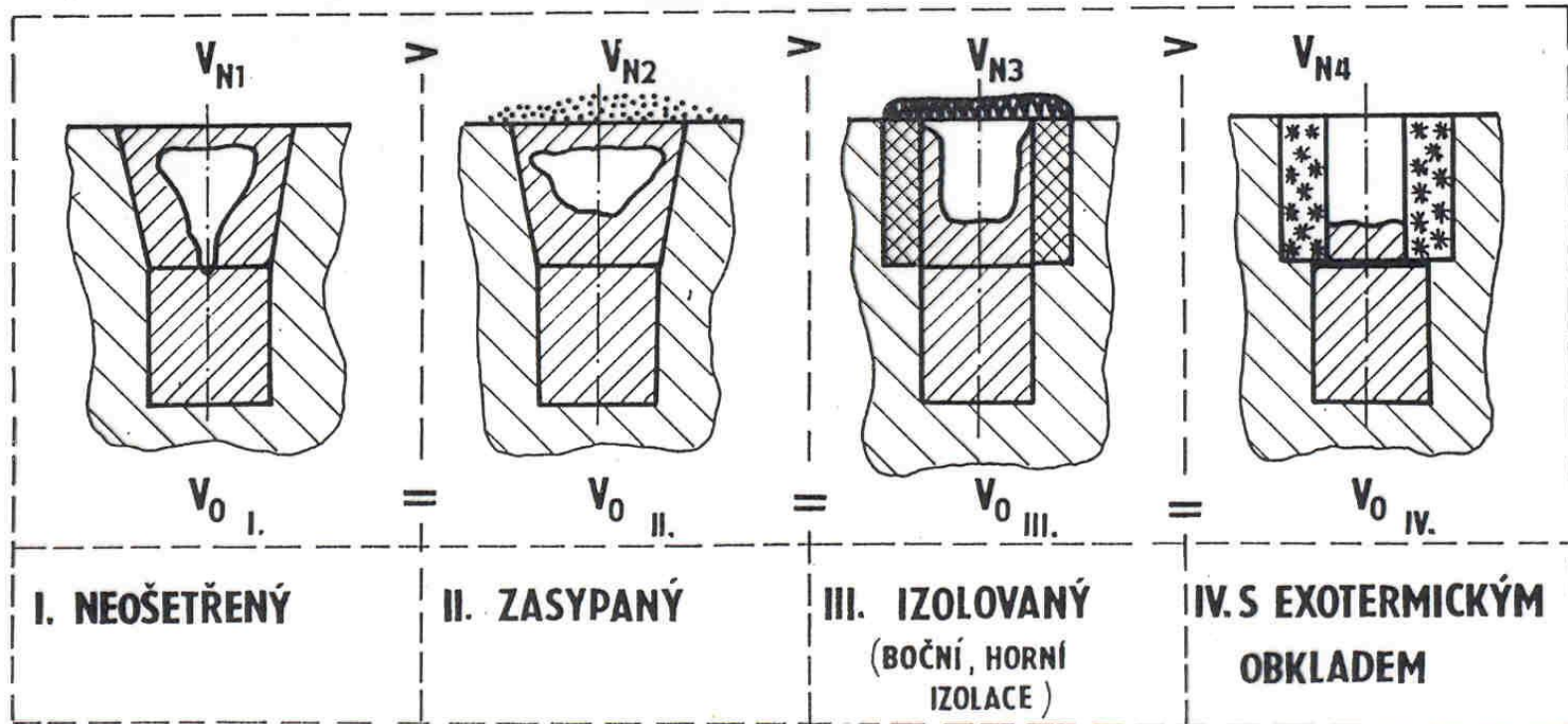
$$\Rightarrow M_N = 1,2 \cdot \sqrt{\frac{K_0}{K_N}} \cdot M_0$$

$$K = f(\sigma, b_f) \quad b_f = \sqrt{\lambda_f \cdot \rho_f \cdot c_f}$$

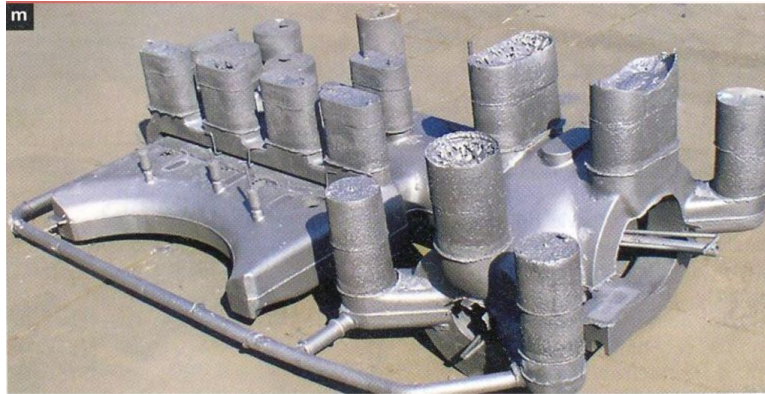
Rozdělení nálitků – dle polohy vůči vtokové soustavě



Rozdělení nálitků dle regulace ochlazování



Příklad použití nálitků



Děkuji za pozornost

