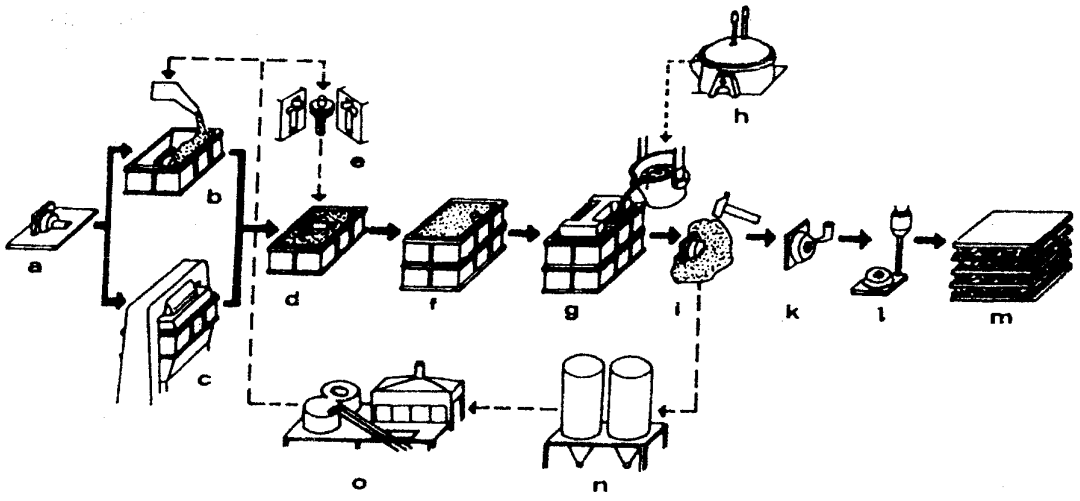
SLÉVÁRENSKÁ TECHNOLOGIE

Slévárenství poskytuje potenciálně nejekonomičtější způsob přeměny výchozí suroviny v žádaný finální nebo polofinální výrobek (určený pro další zpracování). Odlitek má unikátní tvarovou univerzálnost ve srovnání s produkty ostatních technologií a prakticky neomezenou schopnost aplikace z hlediska objemové velikosti

Nejtypičtější možnost zhotovení odlitku tj. výroba odlitku v netrvalých formách je zachycena na obr. . Ze **skladu modelových zařízení** je toto dopraveno do **formovny** buď k ruční výrobě formy **b** nebo častěji ke strojní výrobě **c**. Současně jsou v **jaderně** vyrobena jádra **e**, která se před složením obou polovin formy vloží do spodky **d**. Po složení **f** následuje odlití na **licím poli g**, tekutý kov se dopraví licí pánví z tavírny **h**. Po ztuhnutí odlitku následuje jeho vytlučení **i** a surový odlitek **h** jde do čistírny, kde je odstraněna vtoková soustava, nálitky atd., dále jsou zde odstraněny zbytky formovací směsi (tryskáním apod.) a odbroušeny švy a zatekliny v dělicí rovině. Dále se provede hrubování, tj. první opracování hrubého odlitku **l** a odlitek je připraven k expedici **m**. Formovací směs po vytlučení **i** se vrací k případné regeneraci a po přidání nových podílů ostřiva **n** do přípravny formovacích směsí **o** a odtud opět do formy **b**, **c** a jaderny **e**.



Slévárenské formy

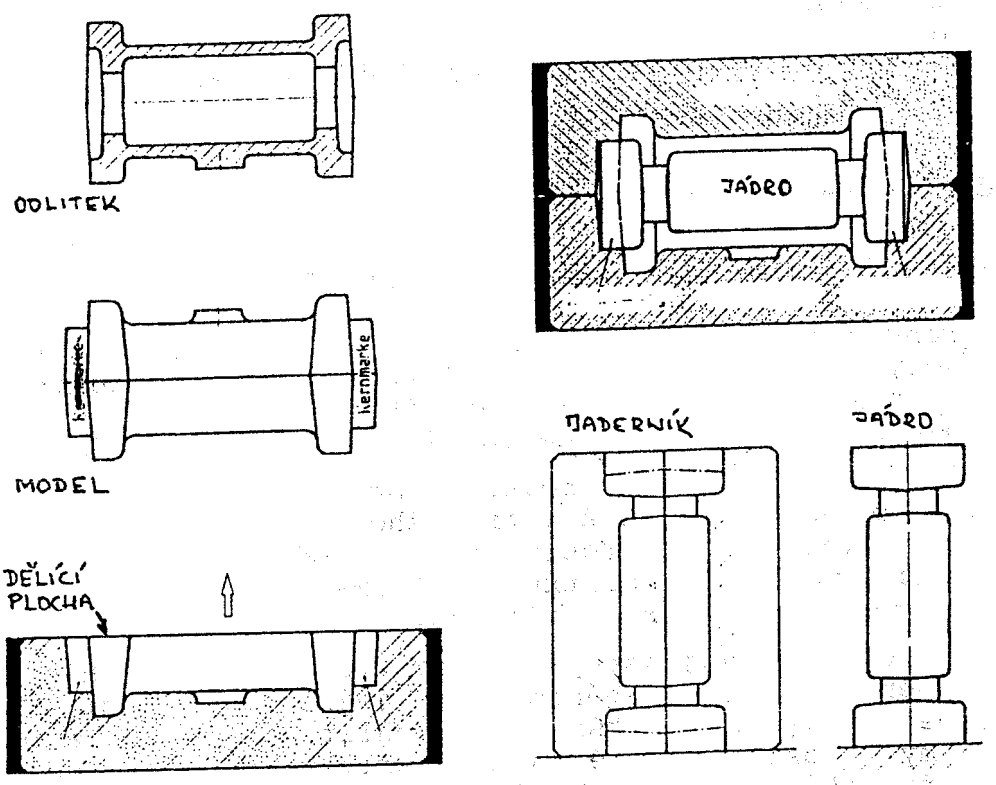
Základní rozdělení slévárenských forem

Slévárenská forma je nástroj, jímž je "vytvarován" tekutý kov do podoby odlitku. Slévárenská forma (přesněji dutina vytvořená ve formě) je negativem budoucího tvaru odlitku. Podle počtu vyrobených odlitků v jedné formě můžeme tyto rozdělit na:

A) **Netrvalé** - zhotovené z formovacích směsí jejich zhutňováním za pomocí modelu (nejčastěji trvalého ze dřeva, kovu aj). V netrvalé formě lze vyrobit pouze 1 odlitek - po odlití a vytlučení zchladlého odlitku se forma zničí. Tímto způsobem se vyrábí asi 80 ÷ 85 % odlitků.

B) **Trvalé** - zhotovené nejčastěji z kovových slitin (v historii užíván kámen) litím, obráběním nebo jejich kombinací. V trvalé formě lze vyrobit větší serie odlitků (záleží na materiály formy - kokily a odlévaném materiálu budoucího odlitku - např. při lití neželezných slitin do ocelových forem - kokil lze dosáhnout až statisícové serie v jedné formě).

Pozn.:
Někdy se pro úplnost uvádí i kategorie forem polotrvalých (zhotovených z formovacích směsí) u nichž lze opravou formy po vytažení zchladlého odlitku dosáhnout opakované výroby do několika kusů (v jednotkách) odlitků (odlitky větší hmotnosti a jednodušších tvarů).

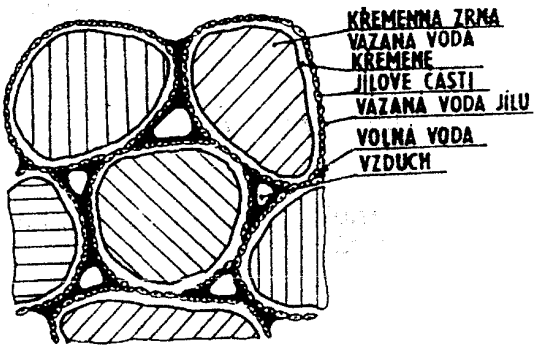


Užití modelového zařízení pro výrobu formy s jádrem

Formovací směsi

Základní složky formovací směsi

Formovací směs, jejíž schema je zachyceno na obr. sestává ze 2 základních komponent:

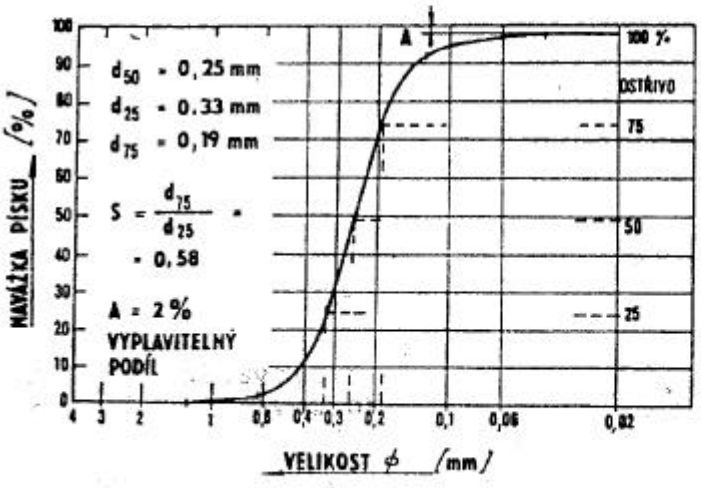


Ostřiva - zrnitý, žáruvzdorný materiál, tvořící až 98 % hmotnosti formovací směsi, s velikostí částic nad 0,02 mm.

Pojiva - látka nebo směs látek organického nebo anorganického původu dávající formovací směsi:

- vaznost - plasticitu (pevnost v syrovém stavu směsi),
- pevnost po vysušení nebo vytvrzení chemickou cestou,
- **pevnost za vysokých teplot** (poddajnost a odpor forem a jader při smršťování odlitku),
- **pevnost po odlití** (tepelné expozici) určuje **rozpadovost** (zbytková pevnost).

Vlastnosti formovacích směsí jsou v nemalé míře ovlivňovány granulometrickou skladbou ostřiva. Ostřivo zbaveno vyplavitelných podílů (< 0,02 mm, jako jsou živce, jíly, prachové neplastické podíly) plavící zkouškou se podrobí sítovému rozboru. Prosévá se sadou sít (velikost ok 0,06; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6; 1,0; 1,5 mm) a jednotlivé podíly na sítech se váží a vyjadřují v %. Výsledky se sestaví do součtové křivky zrnitosti tak, že k hmotnosti ostřiva na určitém sítě (v %) se přičtou všechny podíly ležící na sítech s větší velikostí od

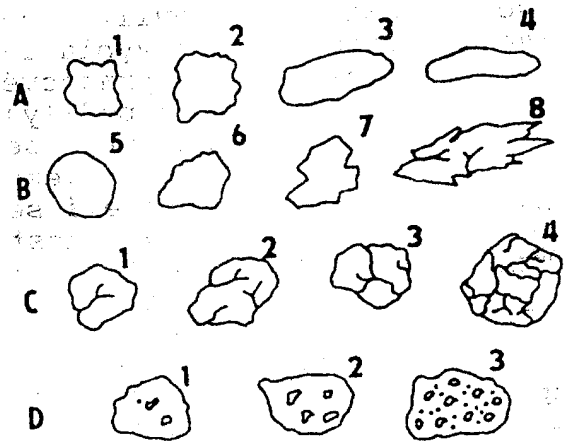


A) **Tvar zrna** - izometrický, protažený krátce, dlouze;

B) **Hrany zrna** - kulaté, hranaté, se zakulacenými hranami, ostrohranné, tříštivé;

C) **Povrch zrna** - hladký, polodrsný, drsný;

D) **Celistvost zrna** - rozpukání silné, slabé, obsah dutin



Požadované vlastnosti formovacích směsí

Každá formovací směs je hodnocena podle jejich fyzikálních, chemických a technologických vlastností přičemž pod výše uvedenými pojmy rozumíme:

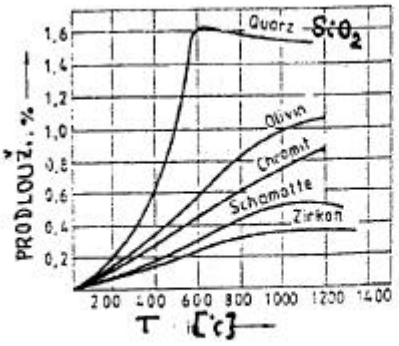
Fyzikální vlastnosti

- **tepelná vodivost** λ_f (schopnost formy odvádět teplo - ovlivňující schopnost odlévané slitiny zaplnit dutinu ve formě - tzv. zabíhavost, a také průběh krystalizace a tím i konečnou strukturu odlitku).
  Tepelená vodivost je ovlivněna především druhem užitého ostřiva a dále stupněm zhuštění formy.
- **měrné teplo** C_f
- **hustota směsi** ϱ_f

Komplexně je schopnost formy odvádět teplot hodnocena tzv. **součinitelem tepelné akumulace** b_f

$$b_f = \sqrt{\lambda_f \cdot \varrho_f \cdot C_f}$$

- **teplotní roztažnost** - charakterizující rozměrové změny s nárustem nebo poklesem teploty ovlivňuje do značené míry konečnou rozměrovou přesnost odlitku a také příp. vznik pnutí v soustavě forma - odlitek v průběhu tuhnutí a chladnutí. Významná je přitom nikoliv pouze absolutní hodnota roztažení / smrštění, ale také jeho průběh, příp. modifikační změny jako je tomu např. u SiO_2 - viz obr.



Teplotní roztažnost ostřiv

Reologické vlastnosti

- tj. jak se bude formovací směs chovat za působení vnějších sil tj. při zhušťování. Většina formovacích směsí vykazuje plasticko-elastické chování, kdy především složka elastická je zdrojem negativních jevů (tzn. snížené přesnosti rozměrů) při formování.

Chemické vlastnosti

- tj. schopnost formy odolávat chemickému působení roztavené slitiny.

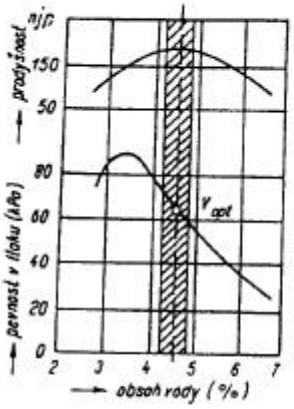
Technologické vlastnosti

Zde patří především:

- **vaznost - plasticita** (pevnost v syrovém stavu směsi)
- **pevnost po vysušení / vytvrzení**
- **pevnost za vysokých teplot** (poddajnost a odpor forem a jader při smršťování odlitku)
- **pevnost po odlití** (tepelné expozici)

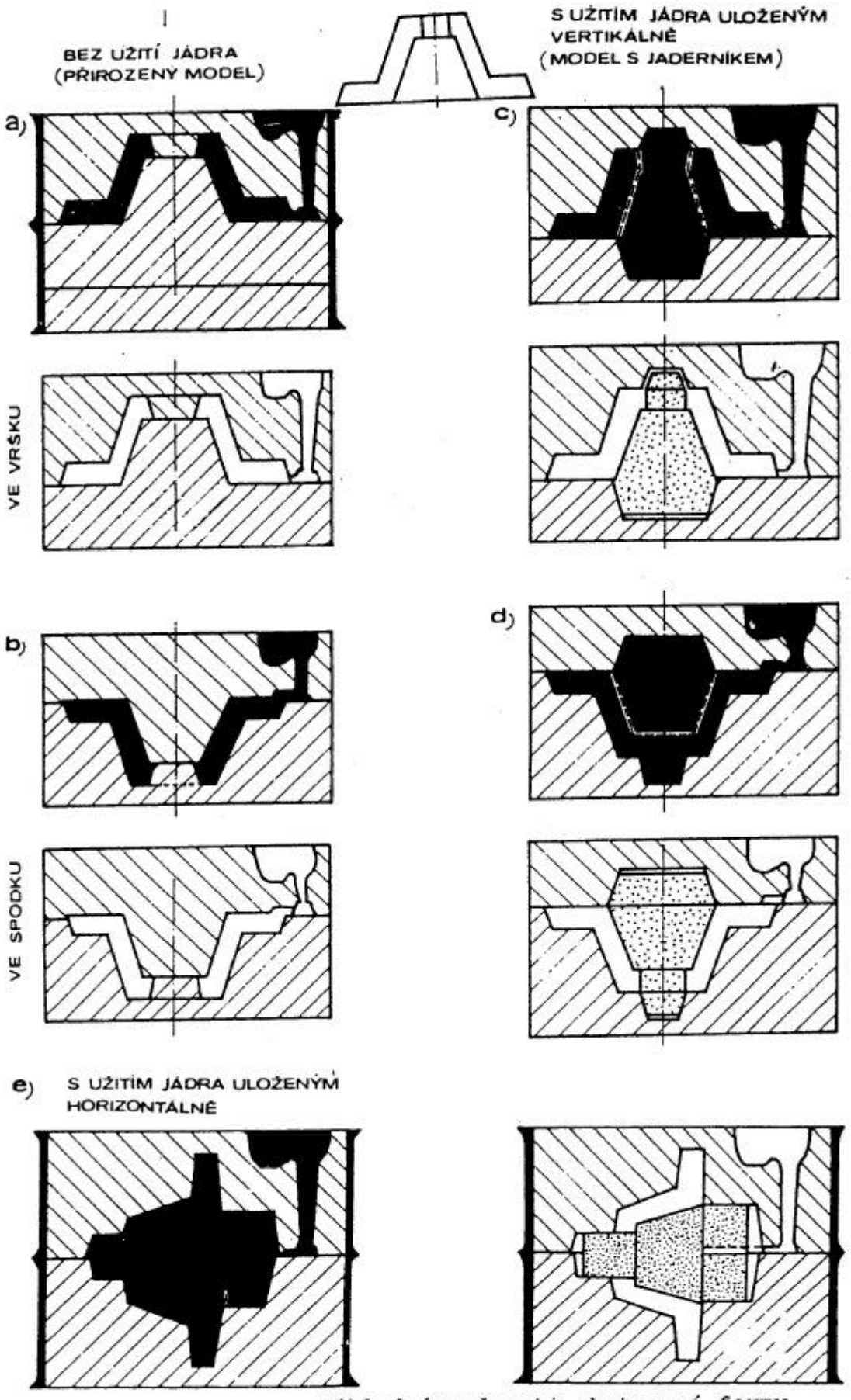
tzv. **rozpadovost** (zbytková pevnost)

- **prodyšnost** (schopnost propouštět plyny)

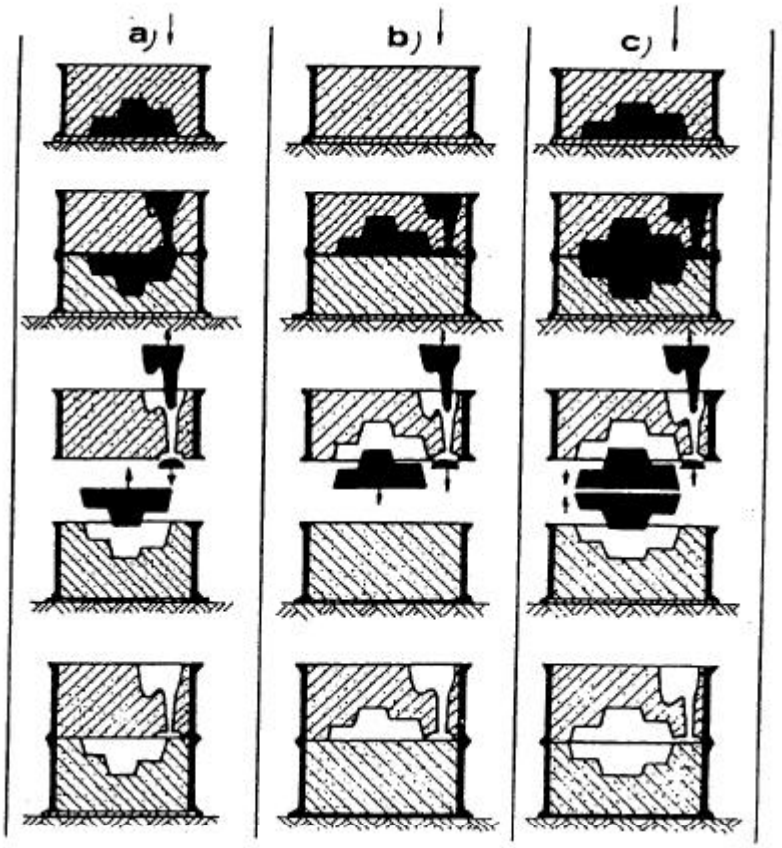


Závislost vaznosti a prodyšnosti form. směsi na vlhkosti

Pozn.:
Složení form. směsi by mělo být voleno tak, aby bylo dosaženo optimálních vlastností. Např. u nejběžněji používané form. směsi s bentonitem (jíl), která se používá "v syrovém stavu" (tj. bez vysušení před litím) je velmi důležitý obsah vody, na kterém závisí hlavní technologické vlastni form. směsi - vaznost a prodyšnost (viz obr.). Volba optimální vlhkosti je odvozena od požadovaných vlastností, v případě bentonitových směsí je prioritním kritériem prodyšnost - optimum vody tedy souhlasí s maximem prodyšnosti i za cenu poněkud snížené hodnoty vaznosti



Základní možnosti zhotovení formy



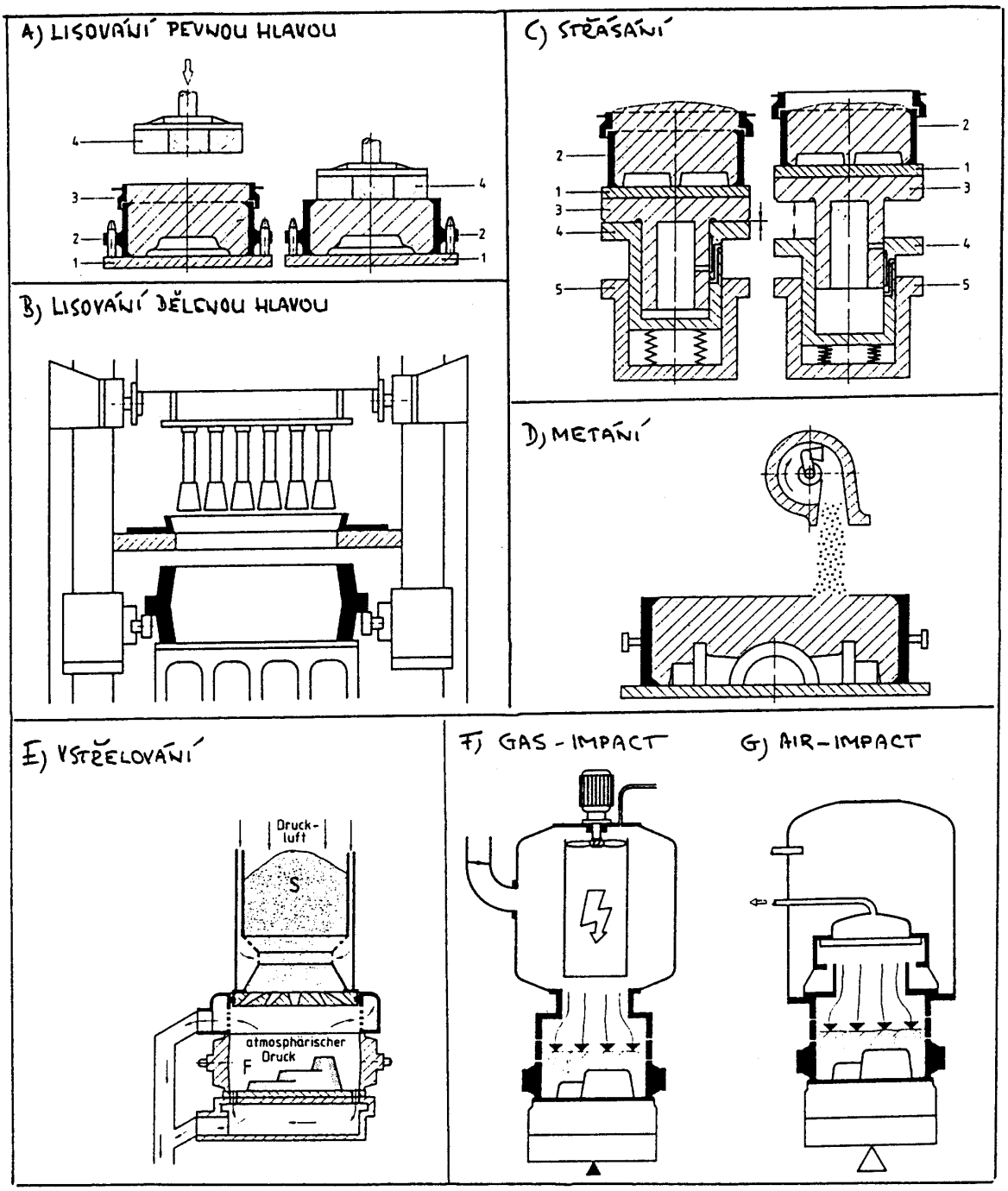
Formování ve dvou rámech podle přirozeného modelu

Zhušťování formovacích směsí

Pomineme-li tradiční, historickou metodu ručního zhušťování - pěchování pomocí pěchovaček (dnes používanou pouze u výroby kusových hmotnějších odlitků) můžeme způsoby "strojního" zhušťování rozdělit do následujících skupin dle schemat - obr.

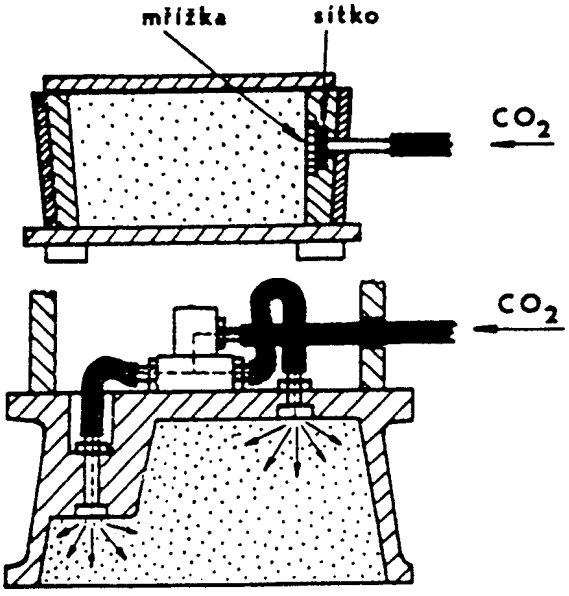
Rozdělení výroby forem a jader dle typu pojiva

Výroba forem a jader prodělala a stále prodělává rychlý rozvoj. Nové výrobní postupy jsou zejména z důvodu patentové a obchodní ochrany označovány často komerčními názvy a rychlá orientace mezi jednotlivými metodami je tak.značně obtížná. Pro přehlednost je proto dobré provést rozdělení výrobních metod podle časového kritéria - tj. kdy postupně metody byly zaváděny. v literatuře se proto vžilo označení "generace" kdy zde ovšem vyšší generace nenahrazuje generaci předchozí jako např. u výpočetní techniky, ale prakticky všechny existují současně a jejich rozšířenost se řídí dle mnoha kritérií (typ odlitku, sériovost, ekonomie a v polední době především ekologie).

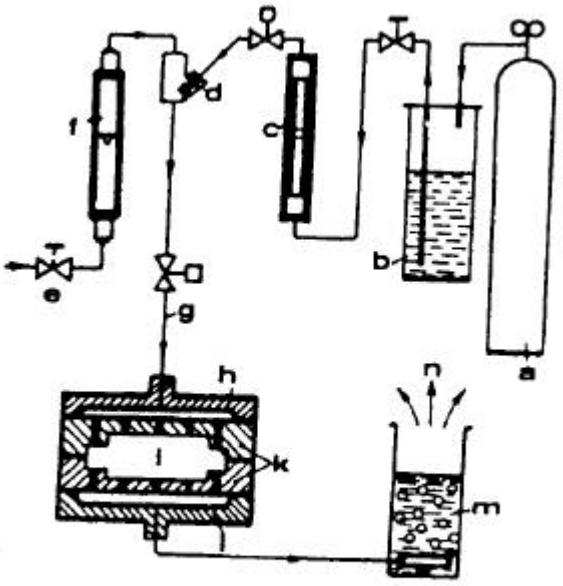


Základní možnosti zhušťování formovacích směsí

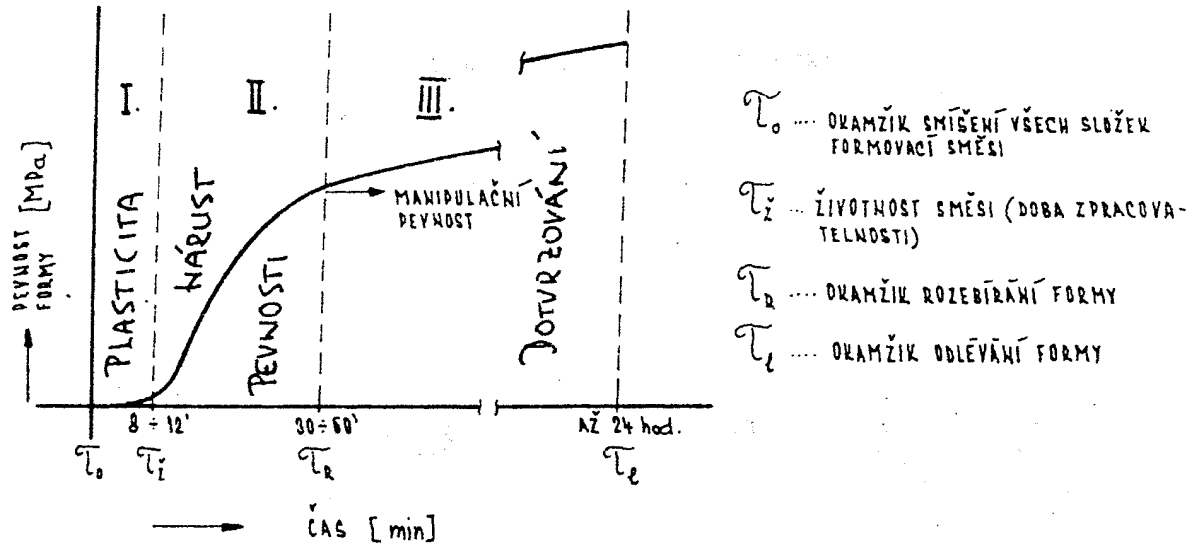
Název technologie	Základní složení formovacích směsí	Charakteristika technologického postupu
Metody I. generace	zrnité ostřivo (nejčastěji křemenný písek, lupek, magnezit) jílové pojivo s obsahem vody (bentonit, illitický jíl, kaolin)	Formy nebo jádra získávají pevnost upěchováním formovací směsi (ručním pěchováním, střásáním, lisováním, metáním), u větších forem či jader musí následovat povrchové přisoušení nebo úplné vysušení formy nebo jádra.
Metody II. generace	zrnité ostřivo (nejčastěji křemenný písek, magnezit, zirkonový písek, mletý korund) pojivo na bázi chemické látky tvrdnoucí na základě chemických reakcí	Mluvíme o chemizaci výroby forem a jader. Formy a jádra musí být ve většině případů upěchovány, avšak jejich pevnosti (manipulační i technologické se dosáhne až chemickou reakcí způsobující ztvrdnutí pojiva. Forma se rozpadá účinkem tepla odlitku.
Metody III.generace	zrnité ostřivo (nejčastěji křemenný písek, magnezit, zirkonový písek, mlety korund, kovové prášky) v suchém stavu pojivo se nepoužívá někdy se používá voda	Mluvíme o fyzikálních metodách výroby forem a jader. Pěchování je zpravidla nahrazeno vibrací ostřiva. Zrna ostřiva jsou pojena účinkem fyzikálních vazeb (magnetické pole, vakuum, účinek teploty pod bodem mrazu apod.). Forma se rozpadá po zrušení účinku silových polí.



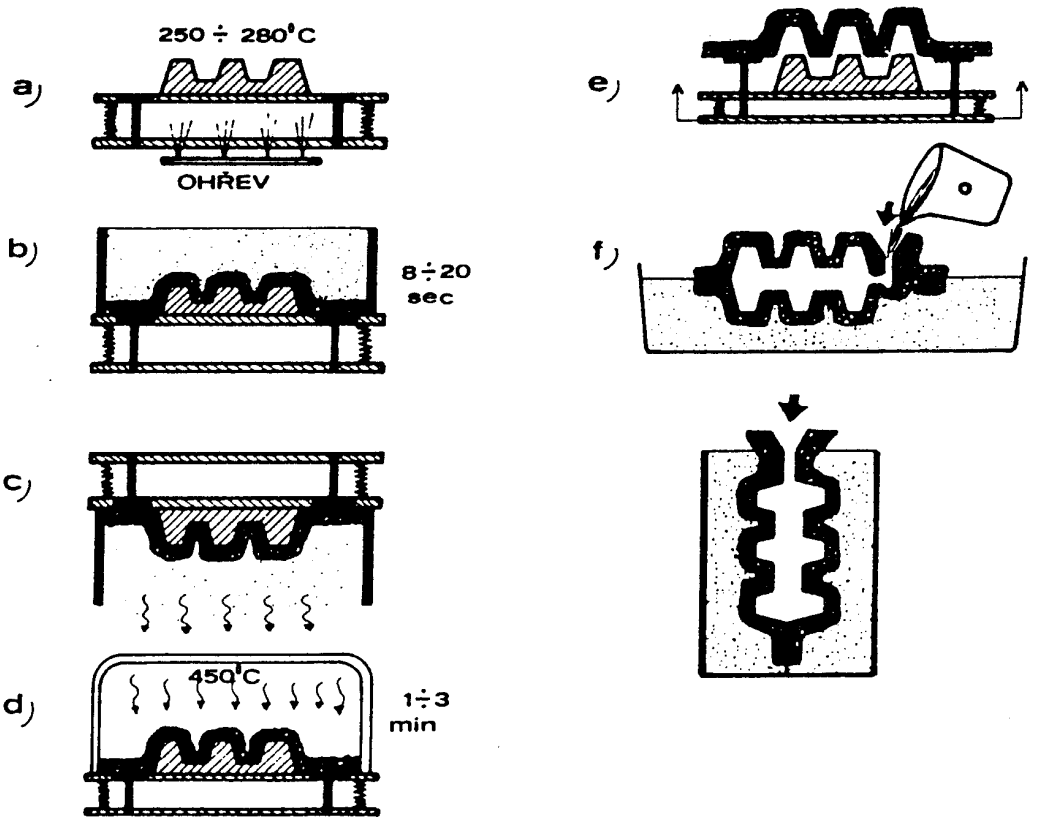
Použití centrálního rozvodu CO_2 pro vytvrzovací jádra



CB proces



Průběh tvrdnutí ST směsí



Croningova metoda

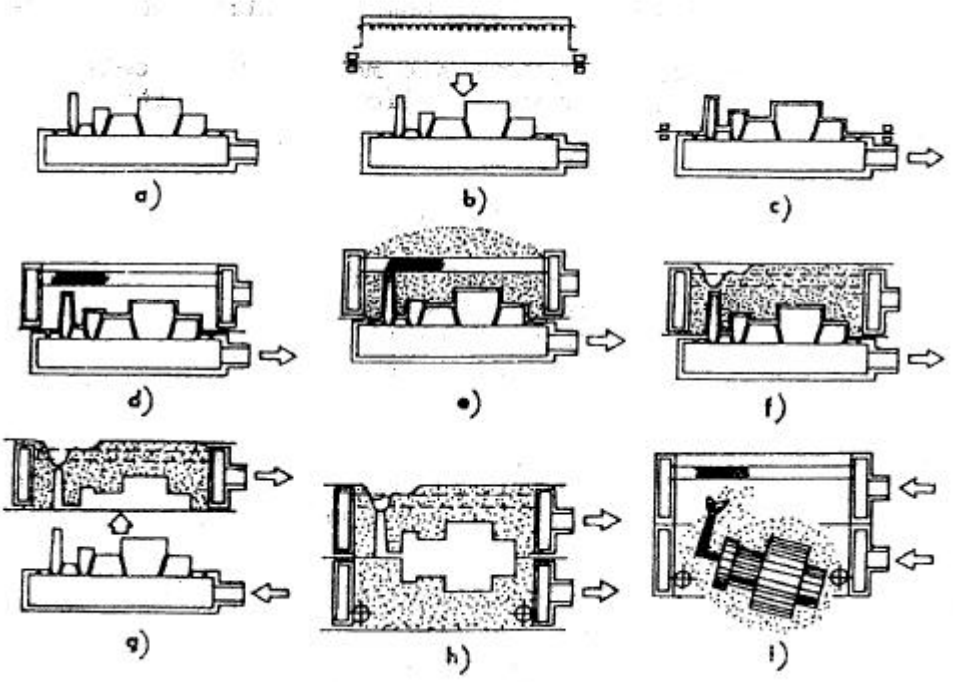
D) **METODY III. GENERACE - fyzikální vazby**

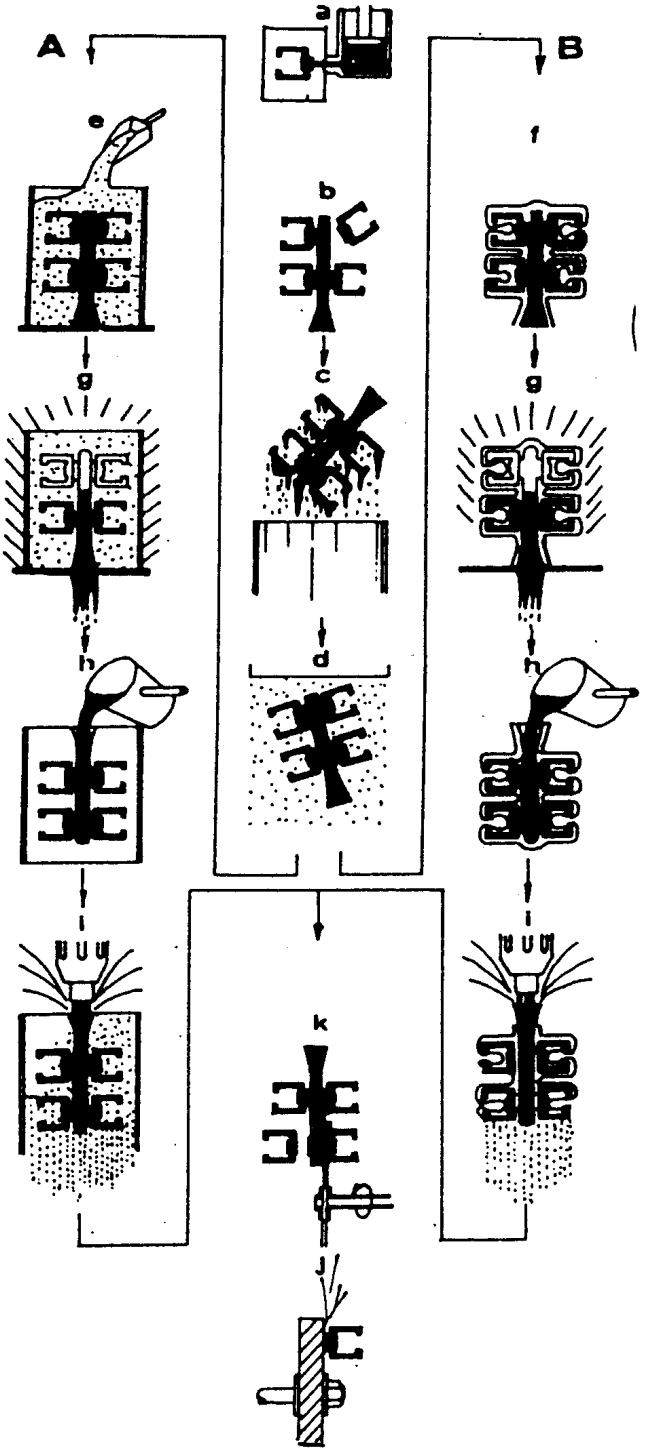
Metody III. generace jsou charakterizovány fyzikálním vazbami mezi zrny ostřiva, "klasické" pojivo známé z metod I. a II. generace zde zcela chybí. v tom spočívá hlavní výhoda metod III. generace, protože z formovací směsi tak odpadá složka, která je většinou nositelem hygienické závadnosti směsi, příp. znesnadňuje vytloukání forem a jader po odlití. K metodám III. generace počítáme hlavně:

1. **Formování v magnetickém poli** - ostřivo: feromagnetický prášek;

2. **Zmrazované formy** - zvlhčené ostřivo s přísadou sacharidů nebo jílů (1,5 ÷ 3 %) - pojivem je led;

3. **Vakuové formování** - "V" proces. Pojivem vakuum, princip zřejmý z obr.





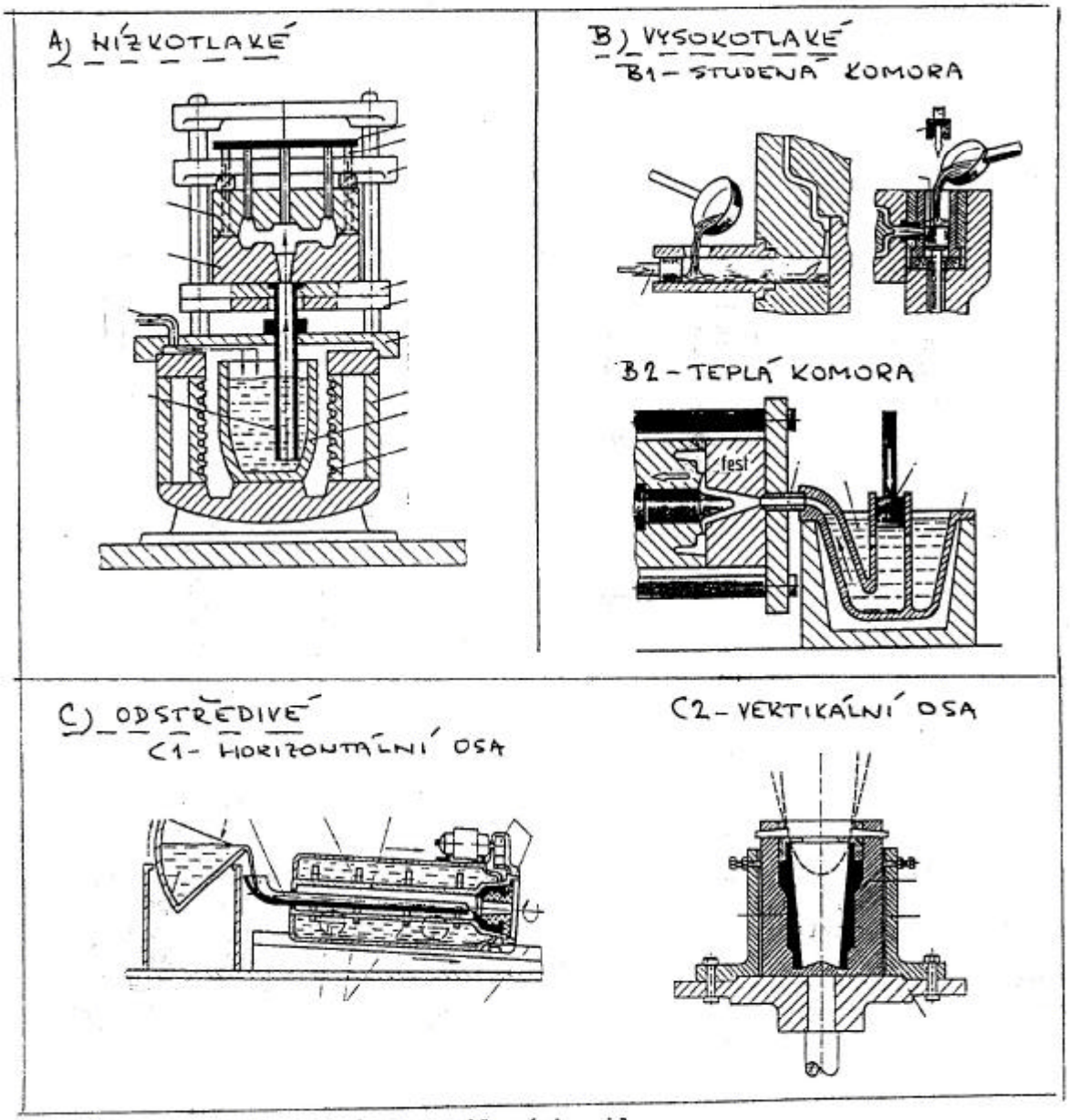
Zhotovení odlitků
pomocí vytavitelného modelu

Odlévání za zvýšených sil

U lití do trvalých forem (kovových) se používá kromě klasického způsobu odlévání (za působení pouze zemské gravitace) také technologie lití kdy na taveninu je vyvozována při plnění dutiny formy určitá síla zabezpečující zlepšené zaplnění a v důsledcích také hutnější "strukturu" odlitku.

Tyto metody můžeme rozdělit na:

1. Lití vysokotlaké (tlak 2 ÷ 500 MPa)
2. Lití nízkotlaké (tlak 0,03 ÷ 02 MPa)
3. Vakuové nasávání
4. Lití odstředivé



Odlévání za zvýšených sil

Metalurgie

Materiál odlitku volí konstruktér podle požadavků na odlitek kladených. Funkčnost odlitku v provozních podmínkách musí být zaručena jeho mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Při volbě materiálu odlitku musí konstruktér zvážit i ekonomické hledisko.

Nejčastěji se odlitky odlévají z těchto materiálů:

1. oceli (nelegované, nízkolegované, vysokolegované)
2. litiny (bílá, šedá, tvárná, vermikulární)
3. slitiny neželezných kovů (hliníku, mědi, titanu, niklu, kobaltu)

Metalurgický proces tj. způsob tavení a odlévání roztavené slitiny předurčuje užitné vlastnosti odlitku. Cílem přípravy tekuté slitiny je připravit taveninu s požadovaným chemickým složením a s minimálním obsahem nežádoucích příměsí a plynů. Kvalitu připravené taveniny ovlivňuje kvalita použitých vsázkových materiálů, typ tavicího agregátu a použitý metalurgický pracovní postup.

Metalurgie oceli

Základním předpokladem dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností ocelí je dodržení předepsaného chemického složení. Značný vliv na požadované vlastnosti ocelí má však i její čistota tj. obsah fosforu a síry, doprovodných a stopových prvků, plynů a nekovových vměstků.

Ve slévárnách se asi 80 % oceli na odlitky taví v **elektrických obloukových pecích** (EOP), zbytek v **elektrických indukčních pecích** (EIP).

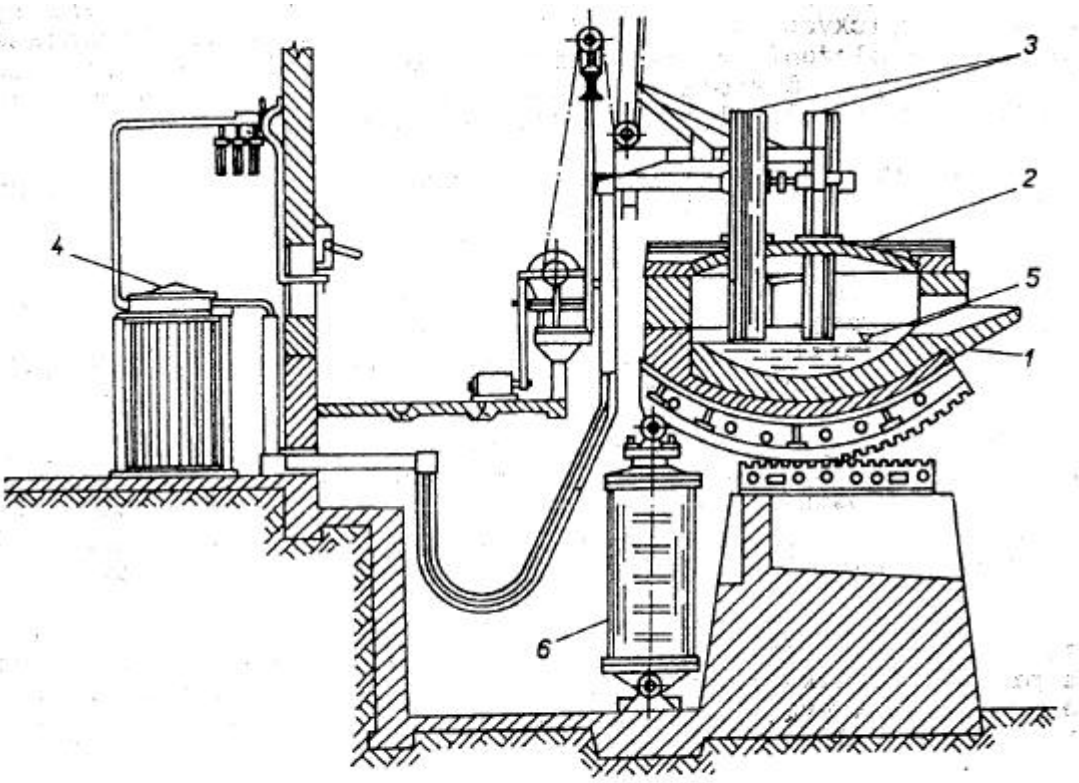
Elektrická oblouková pec (EOP)

V elektrické obloukové peci (dále jen EOP) se mění el. energie v tepelnou v oblouku, který hoří mezi třemi grafitovými elektrodami a vsázkou. Teplo se na vsázku přenáší sáláním

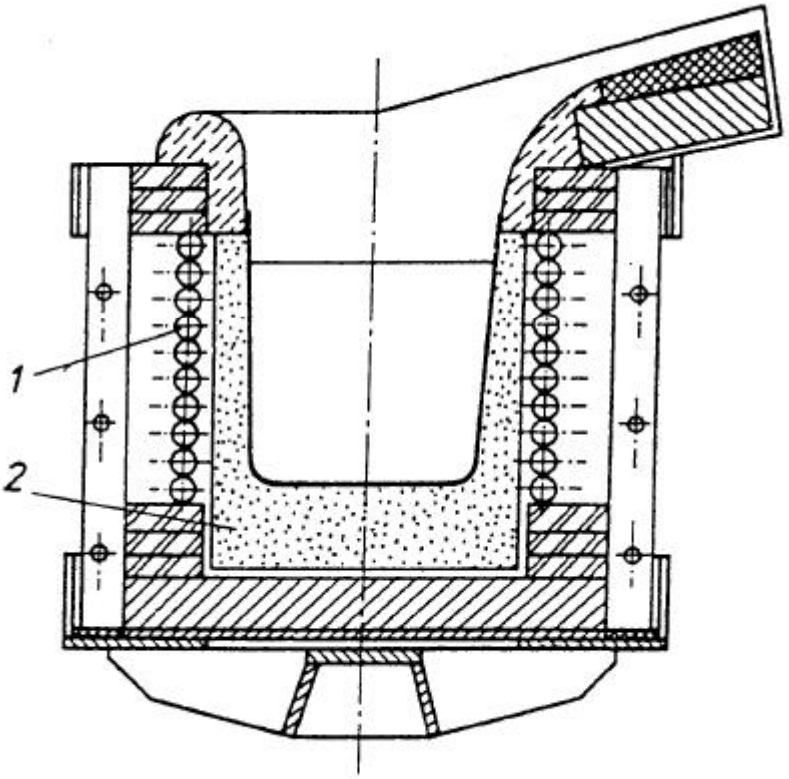
Elektrická indukční pec (EIP)

V těchto pecích se ocel taví v kelímku vytvořeném uvnitř cívky (induktoru). Střídavý proud o frekvenci 5 . 10^2 - 4.10^3 Hz tekoucí primární cívkou (induktorem) - obr. 1.5.5 vytváří kolem ní magnetické pole. Střídavý magnetický tok indukuje v sekundárním okruhu (v kovové vsázce) střídavý proud, který ohřívá vsázku.

Obecně se indukční pec považuje za ideální tavicí zařízení k ekonomickému zpracování vratného materiálu. V porovnání s EOP má však některé nevýhody: omezenou možnost průběhu metalurgických reakcí (odfosfoření, odsíření, uhlíkový var), nižší mikročistotu oceli a vyšší nároky na vsázku.



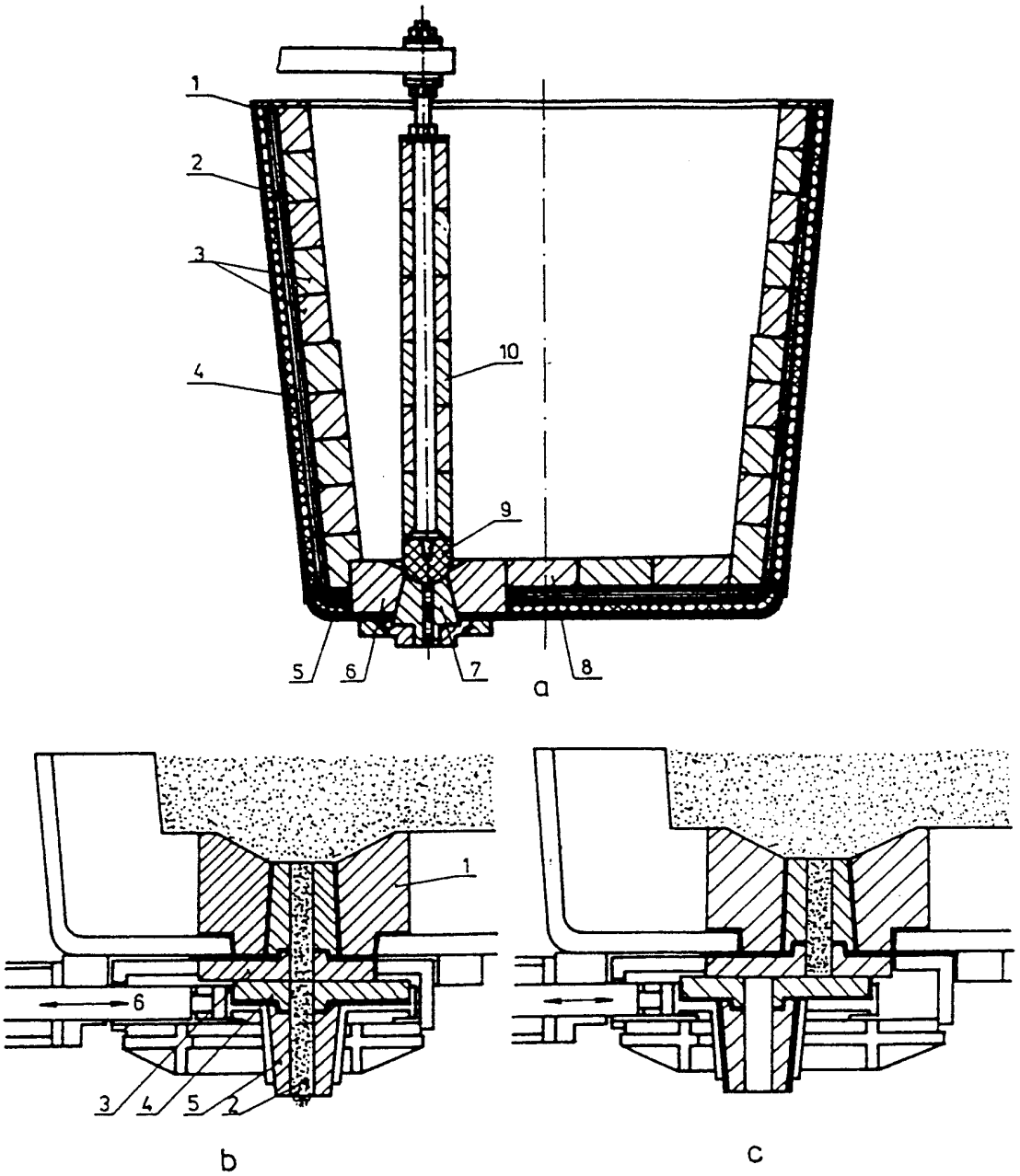
Schema EOP
1 - nístějová část pece, 2 - víko pece, 3 - elektrody, 4 - pecní transformátor, 5 - tavenina, 6 - naklápěcí mechanismus



Schema elektrické indukční pece (EIP)
1 - induktor, 2 - vyzdívka

Po dosažení požadovaného chemického složení a teploty je ocel z EOP či EIP odpíchnuta do **pánve se spodní výpustí**

Struska o nižší hustotě vyplouvá na hladinu a spodem odtéká při odlévání odlitků čistá ocel.

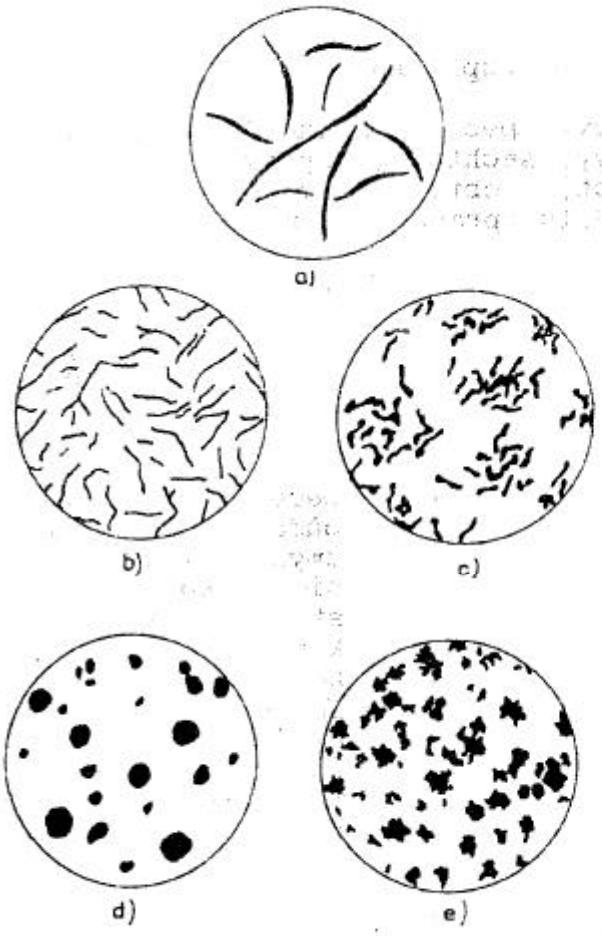


Pánve se spodní výpustí
Zátková pánev a) Pánev se šoupátkovým uzávěrem: otevřeným b) a zavřeným .c)

Metalurgie litin

Litiny jsou slitiny železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími prvky (Mn, P, S aj.) u nichž obsah uhlíku převyšuje jeho mezní rozpustnost v austenitu. Podle chemického složení a podmínek tuhnutí vzniká buď cementitické eutektikum (bílá litina) nebo grafitické eutektikum (litiny s lupínkovým či kuličkovým grafitem). Při dalším ochlazování ztuhlé litiny probíhají fázové přeměny buď podle stabilní (Fe - C) nebo podle metastabilní soustavy (Fe - Fe_3C).

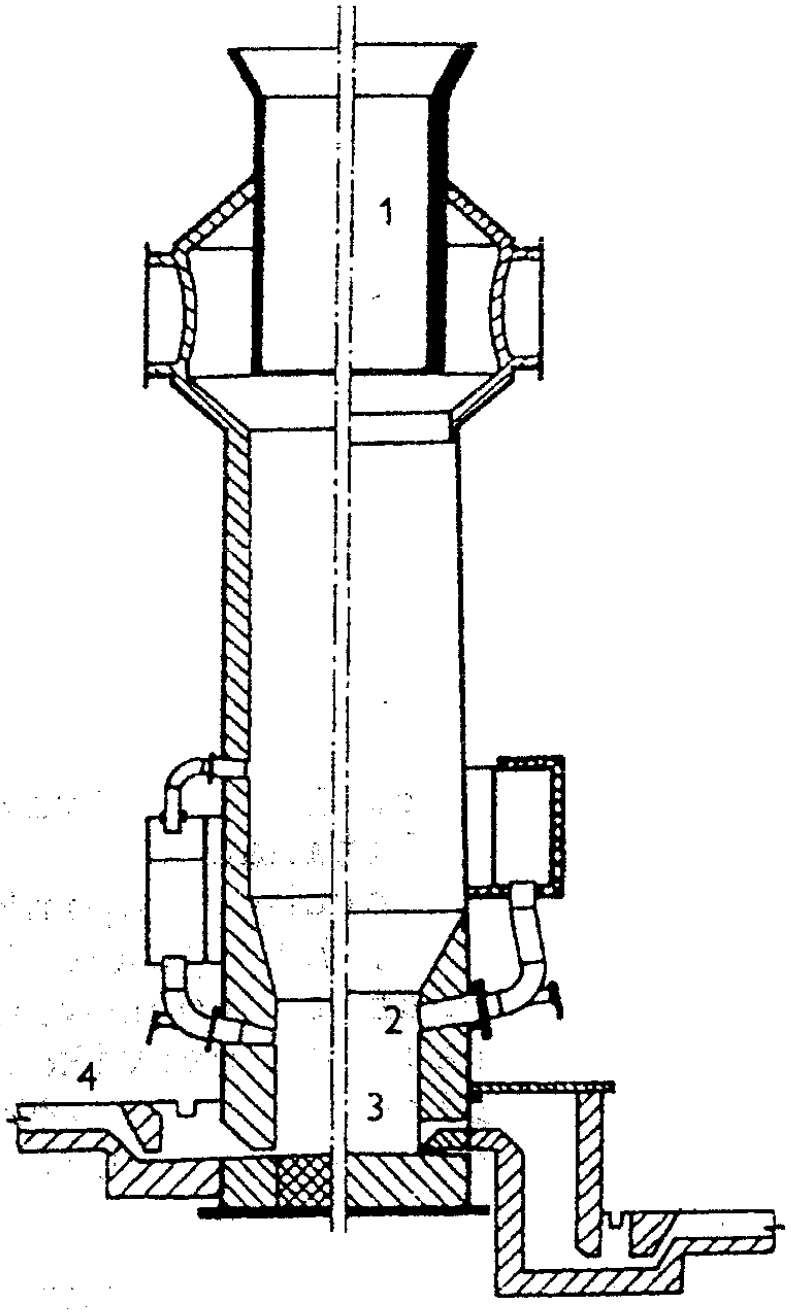
Způsob vyloučení grafitu a struktura základní kovové hmoty jsou ovlivněny zejména chemickým složením, způsobem metalurgického zpracování (očkování, modifikace), rychlostí ochlazování (tloušťka stěny odlitku) a tepelným zpracováním.



Tvar grafitu v litinách
a) hrubý lupínkový grafit, b) jemný lupínkový grafit (očkovaná litina), c) červíkovitý grafit, d) kuličkový grafit, e) vločkový grafit

Tavení litiny v kuplovně

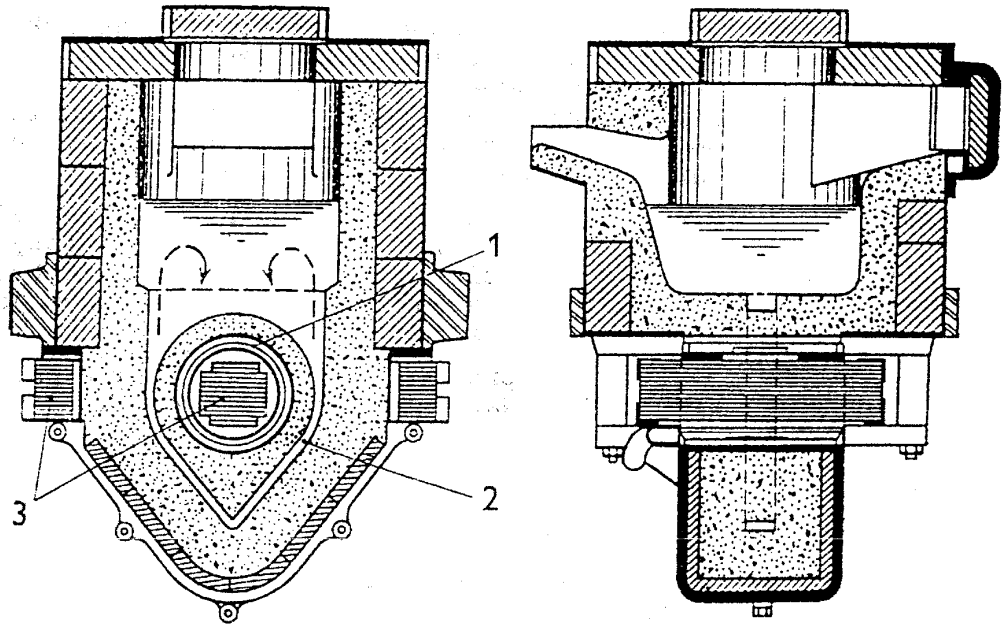
Kuplovna je šachtová pec s kruhovým průřezem - obr. Plášť je ocelový, šachta je zpravidla vyzděna žáruvzdornou vyzdívkou (šamot) - obr. vlevo, může však být i bez vyzdívky - obr. vpravo - s pláštěm v oblasti max. teplot chlazeným vodou.



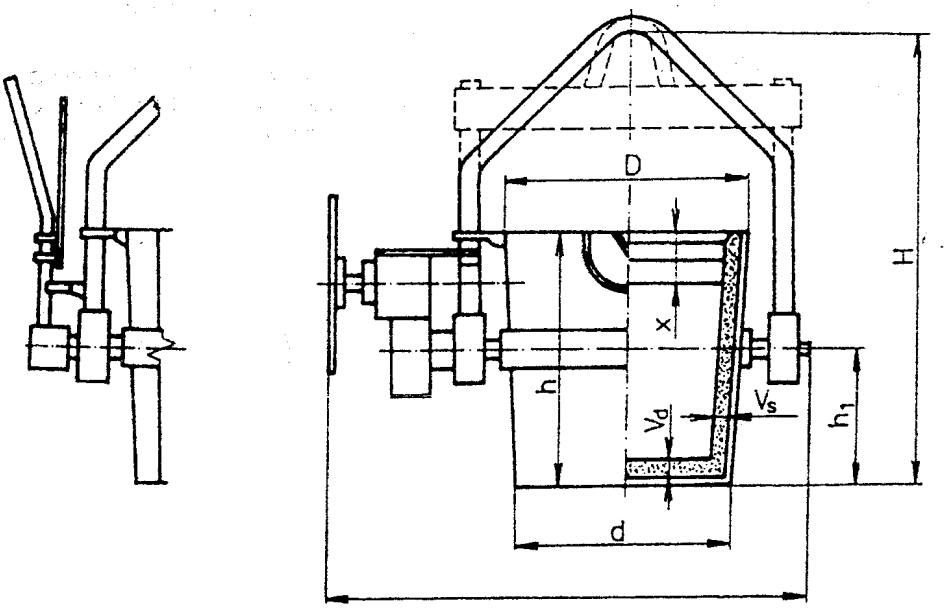
Schema kuplovny

EIP pro tavení litiny se rozdělují podle konstrukce na pece:

1. **Kelímkové** (bezjádrové) pracující se síťovou (50 Hz) i střední frekvencí (500 - 2000 Hz).
2. **Kanálkové** pracující se síťovou frekvencí (50 Hz).



Řez kanálkovou pecí
1 - primární vinutí, 2 - kanálek, 3 - jádro transformátoru

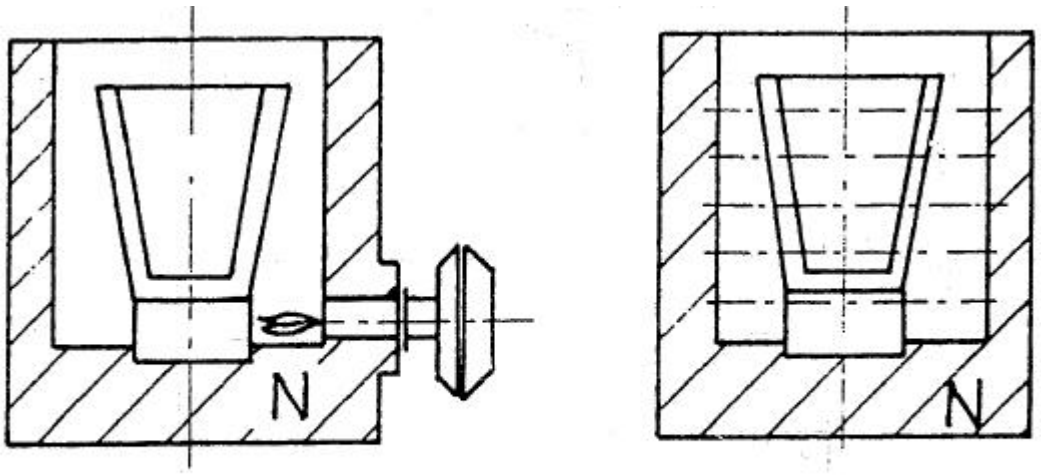


Licí pánev pro litinu

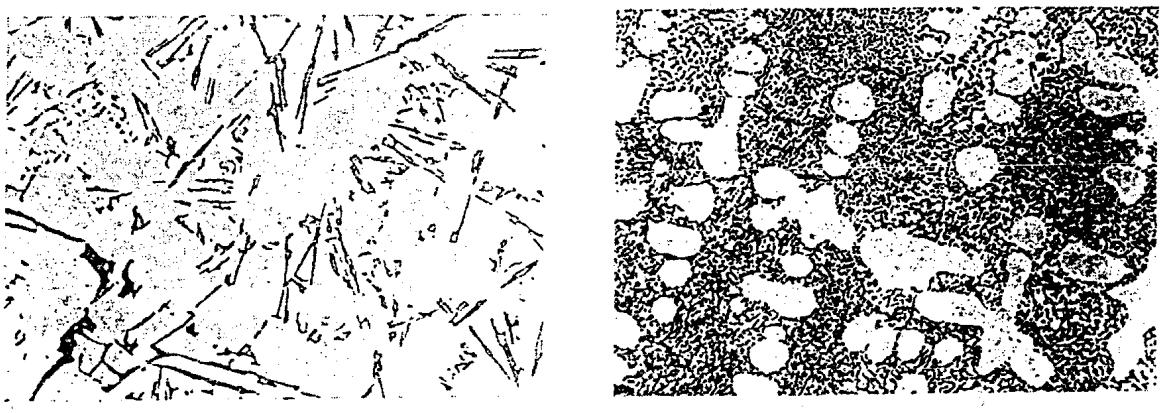
Metalurgie slitin neželezných kovů

Odlitky se nejčastěji odlévají ze slitin hliníku, mědi a hořčíku, méně často ze slitin zinku, cínu a olova.

Ve slévárnách neželezných kovů se zpravidla provádí pouze přetavování hotových slitin a vlastního vratného materiálu. Jako vsázkové materiály se používají hotové slitiny dodané z hutí, čisté kovy a předslitiny na dodatečné legování, vlastní vratný materiál a dodavatelský odpad.



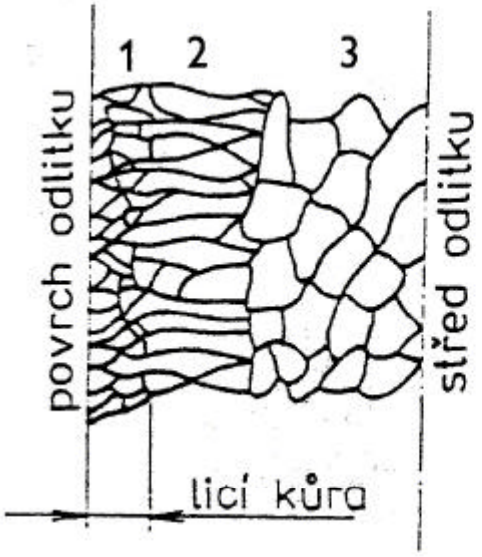
Plynová kelímková pec (vlevo) a elektrická odporová pec (vlevo)



Účinek modifikace slitiny typu Al-Si

Tuhnutí odlitku

1.7.1 Krystalizace odlitku



Makrostruktura příčného řezu stěnou odlitku

Slévárenská technologie je charakteristická tvarováním roztavených slitin prostřednictvím speciálního nástroje - slévárenské formy. Jedním z činitelů, ovlivňujících velmi výrazně výsledné vlastnosti odlitků je průběh přechodu odlitku z tekuté fáze do tuhé - krystalizace. Je to pochopitelné, neboť struktura odlitků má zásadní vliv na řadu materiálových vlastností.

Obvykle lze v makrostruktuře příčného řezu odlitkem pozorovat tři oddělené oblasti

1. **Oblast jemných rovnoosých zrn při stěně formy** (licí kůra)

Tato jemná rovnoosá zrna nukleují na stěně formy, případně v její těsné blízkosti. Jedná se o heterogenní nukleaci, vyvolanou tepelným přechlazením taveniny přiléhající ke stěně formy a účinností stěny formy jako podložky pro heterogenní nukleaci. Zrna v této prvé oblasti jsou zpravidla rovnoosá a vyznačují se náhodnou krystalografickou orientací.

2. **Oblast kolumnárních zrn**

Kolumnární zrna se vyvíjí převážně ze zárodků, vzniklých v první oblasti, přiléhající ke stěně formy. Vykazují přitom silnou přednostní krystalografickou orientaci, která odpovídá přednostní krystalografické orientaci dendritického růstu. Osy kolumnárních zrn jsou obvykle rovnoběžné se směrem maximálního tepelného toku - tzv. **licí textura.**

3. **Středová oblast rovnoosých zrn**

Rovnoosá zrna v této oblasti mají obvykle nahodilou orien-

taci a jsou větší, než zrna v oblasti přiléhající ke stěně formy. Jejich vznik je vysvětlován zejména heterogenní nukleací koncentračně přechlazené taveniny příp. dalším růstem ulomených os dendritů z oblasti kolumnárních zrn (multiplikace dendritů).

Pravděpodobně nejdůležitějším faktorem, určujícím následné vlastnosti odlitku je rozsah oblastí kolumnárních a rovnoosých zrn v odlitku.

Je-li cílem odlitek s izotropními vlastnostmi, je nutné získat jemnozrnnou rovnoosou strukturu. Toho je možné dosáhnout podporováním podmínek, které vedou k omezení kolumnárního růstu a vytváření rovnoosých zrn. Jsou-li na druhé straně požadovány anizotropní vlastnosti (magnety, lopatky spalovacích turbín), je zapotřebí podpořit podmínky, příznivé růstu kolumnárních zrn.

Objemové změny při tuhnutí slévárenských slitin

Smršťování kovů a slitin

Podstatou smršťování jsou objemové změny tekuté a tuhé fáze kovu s poklesem teploty a objemové změny při fázových přeměnách. Projevují se charakteristickými změnami v odlitku, při

nichž se jeho celkové rozměry zmenšují, popř. se v něm vytvářejí staženiny a dochází k vnitřnímu pnutí.

Posuzujeme-li konečný rozměr odlitku z hlediska komplexních vlivů, musíme k základním vlivům počítat nejen dilatace vázané na druh použité slitiny, ale i dilatace formy, do níž se odlévá, a vliv tvaru odlitku.

Důsledky objemových změn při tuhnutí odlitku

Důsledkem objemových změn při tuhnutí většiny slévárenských slitin (zmenšování objemu) je vznik vnitřních nebo vnějších dutin v odlitku tzv. **staženin**, které pak podle způsobu tuhnutí (šířka dvoufázového pásma δ) mohou být dále **soustředěné** nebo **rozptýlené** (v mezidendritických prostorách - široké δ)

Zneškodňování tepelných uzlů

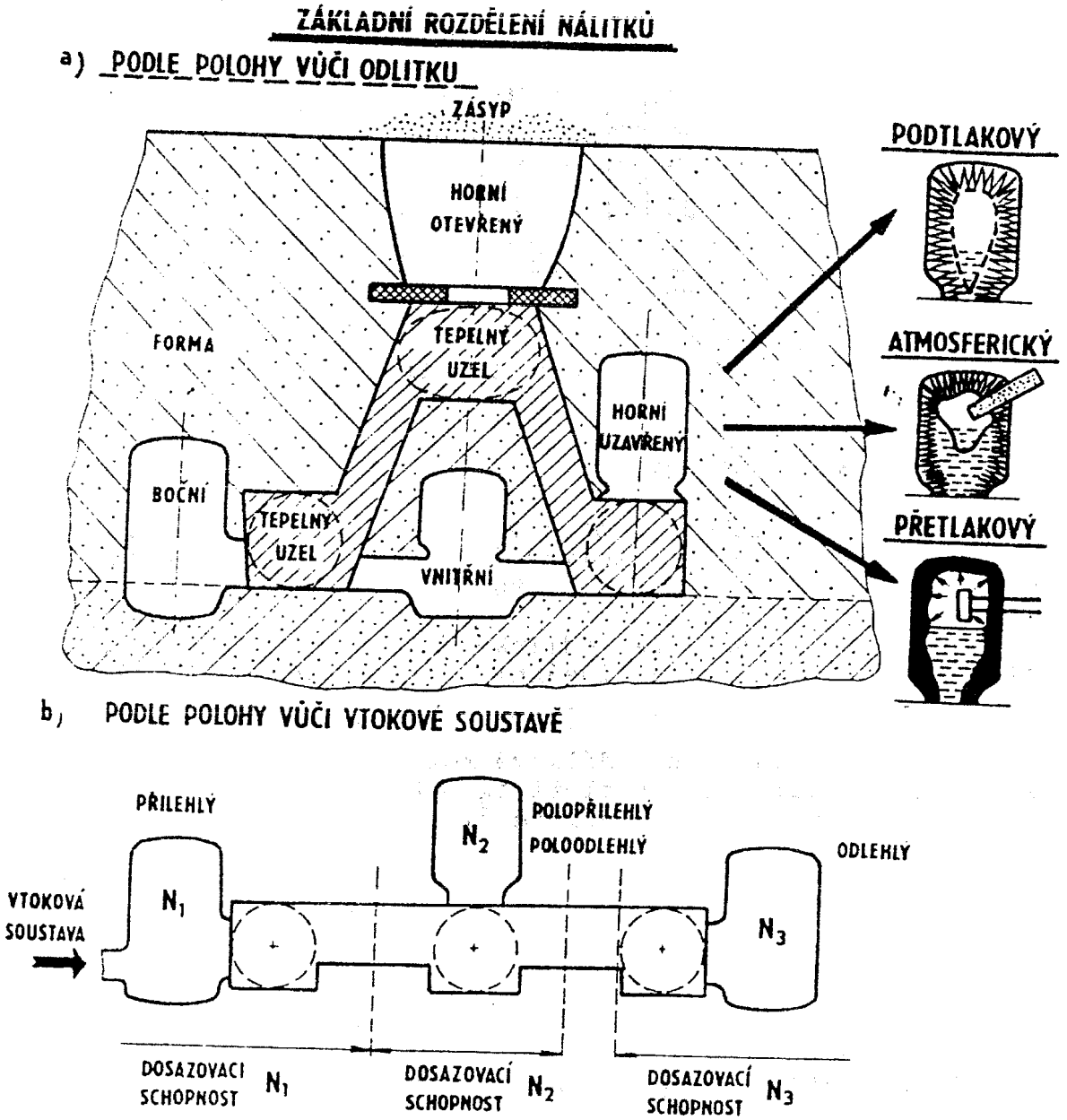
Odstranění nepříznivých důsledků výskytu tepelných uzlů v odlitku, tzn. výskyt **staženin**, příp. **ředin** (mikrostaženin), které jsou samozřejmě slévárenskou vadou je jedním z hlavních úkolů technologa v přípravě výroby. "Zneškodnění" tepelných uzlů, které spočívá ve vytvoření příznivých podmínek pro dosažení **kladně usměrněného tuhnutí** (+ α) je možné v zásadě trojím způsobem:

A) Změnou konstrukce odlitku

B) Nálitkováním

C) Řízenou rychlostí ochlazování

Není-li možno "tepelný uzel" zneškodnit úpravou konstrukce, můžeme použití buď zvýšené rychlosti odvodu tepla z místa tepelného uzlu (chlazení - viz dále), nebo častěji musíme tepelný uzel napojit na zásobník tekutého kovu a to tak, aby probíhalo nepřerušované doplňování objemu smršťující se taveniny v uzlu (odlitku). Jinými slovy: nálitek tvoří "nádrž" tekutého kovu pro doplňování do míst nebezpečných pro tvorbu vnitřních dutin.



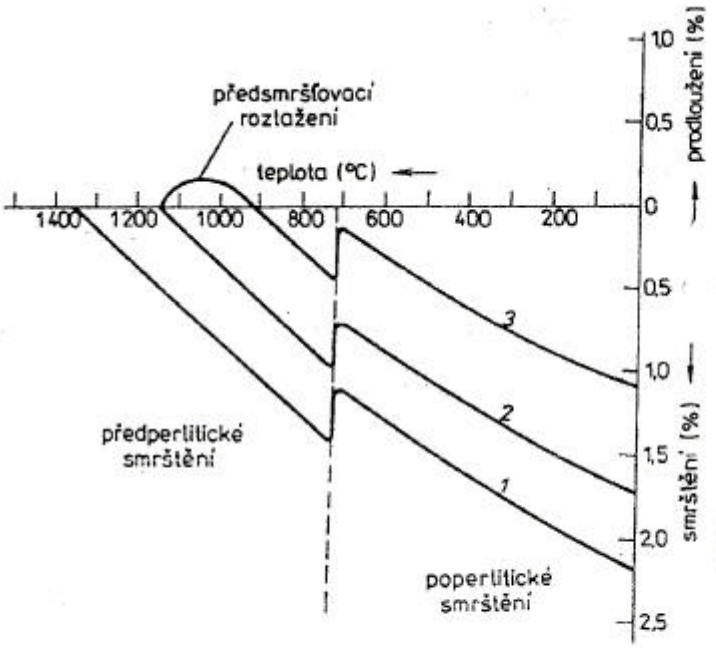
Chladnutí odlitků

Tuhnutí odlitků probíhá v intervalu teplot mezi likvidem a solidem. Pod teplotou solidu (t_s) je již odlitek tuhý a probíhá jeho ochlazování na teplotu okolí (≈ 20 °C).

Souvislá tuhá fáze odlitku začíná dilatovat v okamžiku, kdy se vytvořila. Volná lineární dilatace je dána vztahem:

$$L_1 = L_0 \, [1 + \alpha(t_1 - t_0)]$$

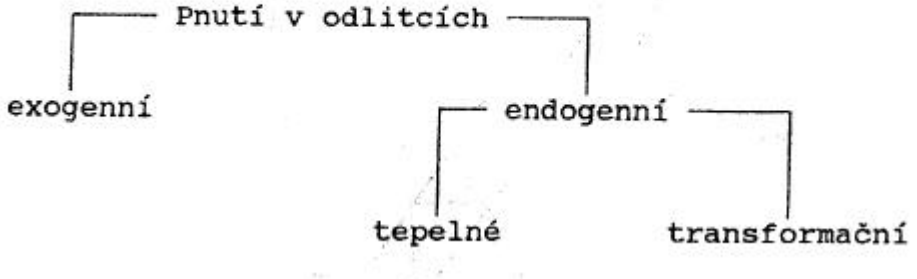
α - teplotní součinitel délkové roztažnosti
L_0 - výchozí délka při teplotě $t_0 = t_s$
L_1 - délka (rozměr) při teplotě t_1

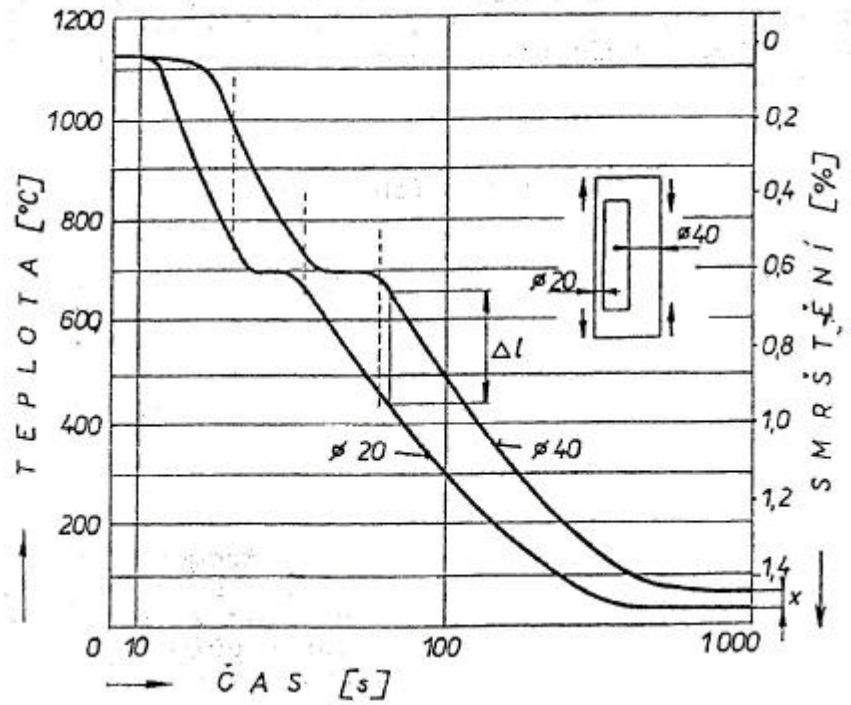


Průběh smršťování ocelí a litin
1 - smrštění oceli, 2 - smrštění bílé litiny, 3 - smrštění šedé a tvárné litiny

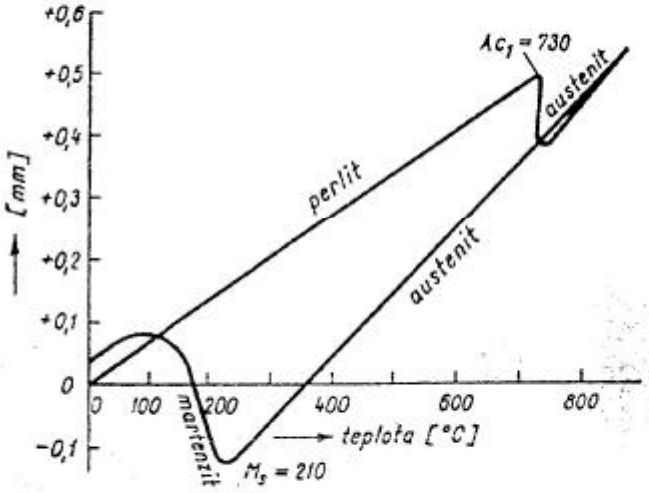
Důsledkem je tzv. smršťování odlitků, tj. zmenšování jejich rozměrů - s tím musí být počítáno při návrhu rozměrů modelového zařízení. Průběh smršťování grafitických litin se liší od ocelí tzv. předsmršťovacím roztažením způsobeným krystalizací grafitu.

Je třeba rozlišovat mezi tepelnými dilatacemi **volnými** (tj. jak chce daná část odlitku volně dilatovat bez vzniku pnutí) a mezi dilatacemi **brzděnými** (tj. jak skutečně část odlitku dilatuje, je-li ovlivněna různými silami). Brzděné dilatace jsou příčinou exogenního a endogenního pnutí v odlitcích.





Průběh ochlazování neizotermické a tuhé konstrukce odlitku



Dilatometrická křivka oceli s obsahem 0,8 % C

Endogenní pnutí jsou důsledkem rozdílného průběhu ochlazování či ohřevu jednotlivých stěn odlitků (zpravidla s rozdílnou tloušťkou)

Vznikají v odlitcích tuhé a neizotermické konstrukce buď jako důsledek rozdílných teplot v daném okamžiku (**pnutí tepelná**) případně doprovázených nesoučasnými fázovými transformacemi (**pnutí transformační**), při kterých vznikající fáze má odlišný molární objem než fáze původní