



Vysoká škola technická a ekonomická
v Českých Budějovicích

Progresivní metody modelování

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



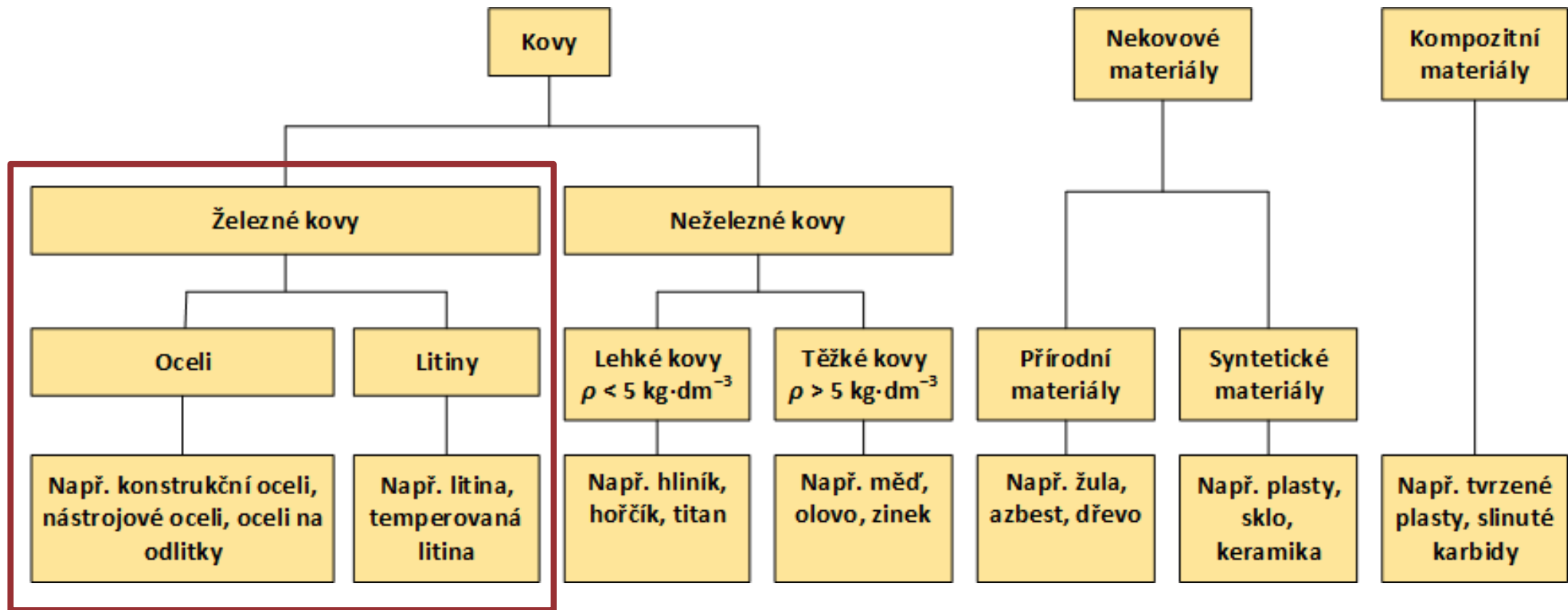
Shrnutí problematiky slévárenských technologií zaměřených na ocelové a litinové odlitky

Seminář č. 1

Úvod do kapitoly

Materiály používané ve strojírenské praxi mají někdy velmi rozdílné vlastnosti a pro určitou součást jsou voleny tak, aby součást mohla dobře a trvale plnit svůj úkol. Správný výběr vhodného materiálu pro součást a správné opracování materiálu je možné pouze při zevrubné znalosti materiálů. Abychom získali přehled o rozmanitosti materiálů, třídíme je do skupin podle složení nebo charakteristických vlastností. Tato kapitola se dále zaměří na shrnutí problematiky slitin železných kovů, tedy ocelí a litin, jak je vyznačeno na obrázku.

Rozdělení materiálů do skupin



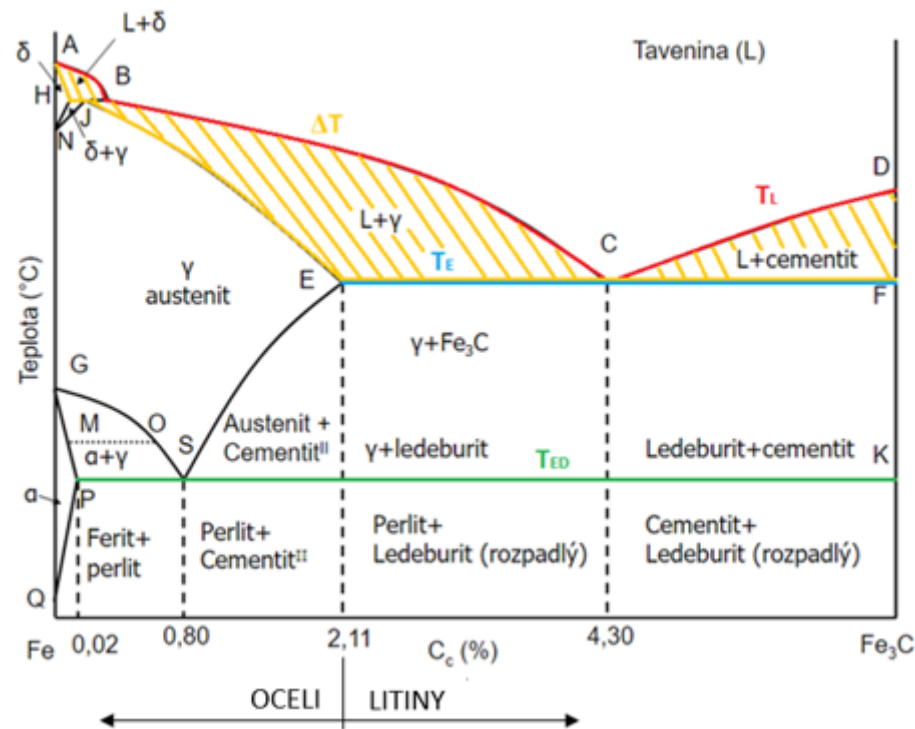
Výroba a zpracování oceli

- ✓ **Oceli** jsou nejčastěji používanými kovovými materiály.
- ✓ Pro své mechanické a technologické vlastnosti je ocel dodnes nejdůležitějším technologickým materiálem.
- ✓ V současné době je vyráběno asi 2500 druhů ocelí.
- ✓ Rozdílným způsobem výroby, legováním a kombinací tepelného a tepelně-mechanického zpracování je možno ovlivnit vlastnosti ocelí v širokém rozmezí, a tak jejich vlastnosti přizpůsobit zamýšlenému použití.
- ✓ V normách (ČSN, DIN atd.) jsou oceli rozděleny do skupin jednak podle chemického složení, jednak podle struktury a mechanický a fyzikálních vlastností.

Výroba a zpracování oceli

- **nelegované oceli:** zvané také uhlíkové oceli. Obsah legujících prvků je nižší, než je maximální tabelovaná hodnota pro daný prvek. Pro většinu prvků je tento maximální hmotnostní podíl kolem 2 %. Mechanické vlastnosti uhlíkových ocelí lze modifikovat tepelným (žíhání, kalení, popouštění), tepelně-mechanickým a tepelně-chemickým zpracováním.
- **nízkolegované oceli:** obsah legujících prvků po odečtení obsahu uhlíku je nižší než 5 %. Mají podobné vlastnosti jako oceli nelegované, ale jsou vhodné pro tepelné zpracování. Tepelným zpracováním je u nich možno ovlivnit mechanické vlastnosti. Se stoupajícím obsahem uhlíku stoupá i tvrdost po kalení. A to až do obsahu 0,85 hm. % C. S vyšším obsahem uhlíku se kalením už tvrdost dále nezvyšuje. Samotný obsah uhlíku má však také vliv na pevnost oceli, čím vyšší obsah, tím je ocel pevnější.
- **vysoce legované oceli:** obsah legujících prvků je vyšší než 5 %. Kombinací legujících prvků se dosahuje potřebných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností.

Charakteristika litin



*Metastabilní soustava Fe-Fe₃C rozdělení
oblasti na oceli a litiny dle obsahu C*

Charakteristika ocelí

- ✓ Ocel je slitina s uhlíkem do 2,14 hm. % a doprovodnými prvky (Mn, Si, P, Cu), které se dostaly do oceli při výrobě.
- ✓ Kromě doprovodných prvků obsahují některé oceli úmyslně přidané prvky (Cr, W, Mo, V, Ni aj.) a plyny (H, N, O).
- ✓ Oceli lze zařadit mezi technické slitiny železa, obsahující celou řadu prvků, které ovlivňují jejich vlastnosti.
- ✓ Z hlediska prvků a jejich působení na vlastnosti ocelí je lze rozdělit následovně:
 - *prospěšné (neškodlivé) prvky – patří zde např. C, Mn, Si, Cr, V, Mo, W, Ti, Al ad. Všechny tyto prvky mohou pozitivně ovlivňovat určitým způsobem vlastnosti oceli, např. její pevnost, houževnatost, tažnost, tvrdost, obrobitelnost, korozivzdornost, žáruvzdornost a mnohé další,*
 - *škodlivé prvky – patří zde fosfor, síra (obecně škodlivé prvky),*
 - *plyny v oceli – patří zde kyslík, dusík a vodík*
 - *stopové neželezné kovy – Cu, Sn, As, Sb, Bi, Zn a Pb. Ve většině případů zhoršují škodlivé prvky technologické a užité vlastnosti oceli, a proto je snahou udržovat jejich obsah v oceli co nejnižší.*

Charakteristika ocelí

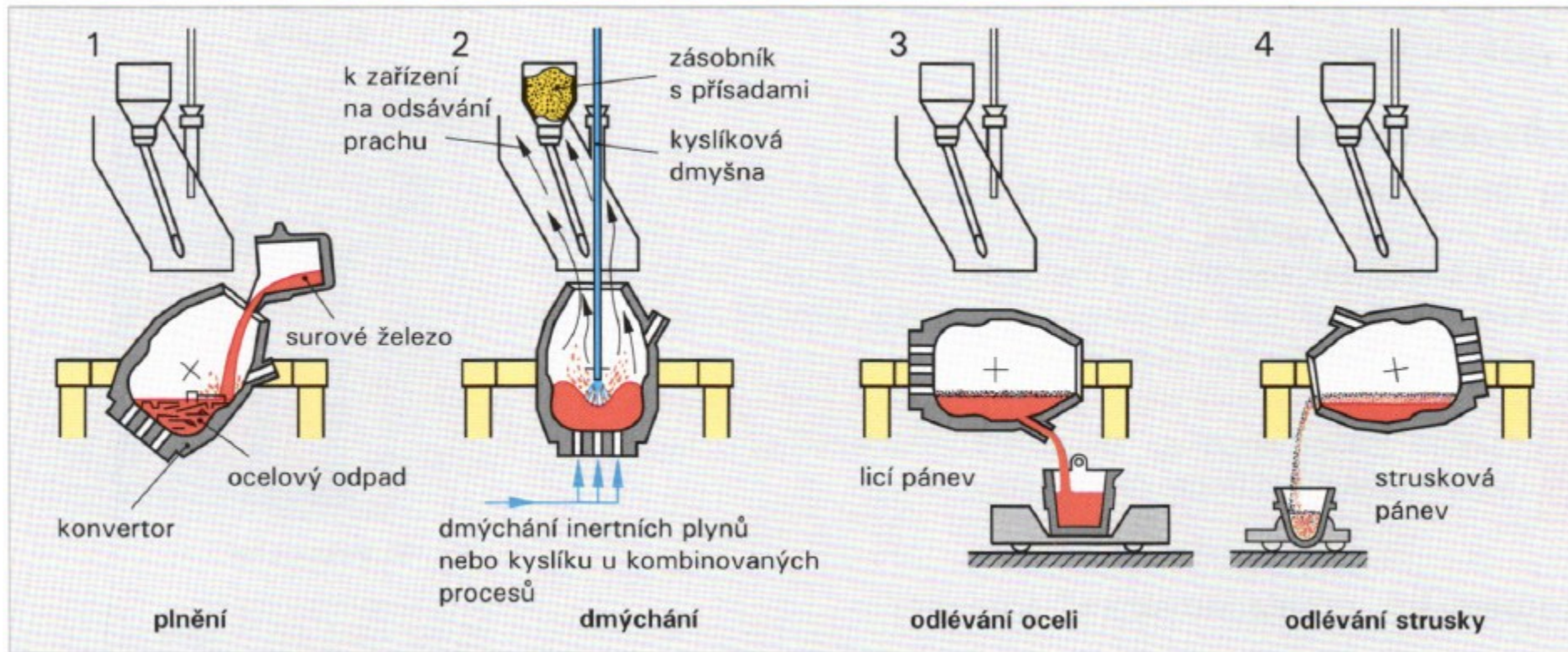
- ✓ Základními surovinami pro výrobu oceli jsou **surové železo a ocelový odpad**.
- ✓ Surové železo má vysoký obsah C (cca 4 %) a některých doprovodných prvků.
- ✓ Při přeměně surového železa a ocelového odpadu na ocel je tedy nutno nejprve snížit obsah uhlíku a téměř zcela vyloučit nežádoucí složky.
- ✓ Tento proces se nazývá zkujňování a představuje oxidaci uhlíku a doprovodných prvků kyslíkem ve vhodném primárním agregátu.
- ✓ Tím vzniká surová ocel o požadovaném chemickém složení.
- ✓ Po zkujňování je tato tavenina podrobena dodatečné úpravě v rámci sekundární metalurgie.

- ✓ Stěžejní primární agregáty pro výrobu surové oceli v dnešní době představují kyslíkové konvertory a elektrické obloukové pece.

Kyslíkový konvertor typu LD

- ✓ Základní vsázku kyslíkového konvertoru tvoří surové železo, kovový odpad a struskotvorná přísada vápno anebo dolomitické vápno.
- ✓ Podstatou pochodu LD je zkujňování surového železa kyslíkem (s min. čistotou 99,5 %), dmýchaným do lázně tekutého kovu shora měděnou, vodou chlazenou tryskou, umístěnou v ose bazicky vyzdřeného konvertoru.
- ✓ Dynamický účinek kyslíkového proudu pro rychlý průběh zkujňovacích reakcí.
- ✓ Výrobní technologie surové oceli se v kyslíkových konvertorech skládá z několika fází:
 - *sázení kovového odpadu a následné nalévání surového železa,*
 - *dmýchání kyslíku a sypání struskotvorných přísad, nauhličovadla aj. ,*
 - *ukončení dmýchání kyslíku, provedení odběru předzkoušky kovu ponorným vzorkovačem a měření teploty oceli,*
 - *při splnění předepsaného chemického složení a požadované teploty se provede odpich oceli do licí pánve a vylití strusky do struskové pánve*
 - *po ukončení odpichu se provádí kontrola vyzdívky s mezeitavbou opravou a příprava na další tavbu.*

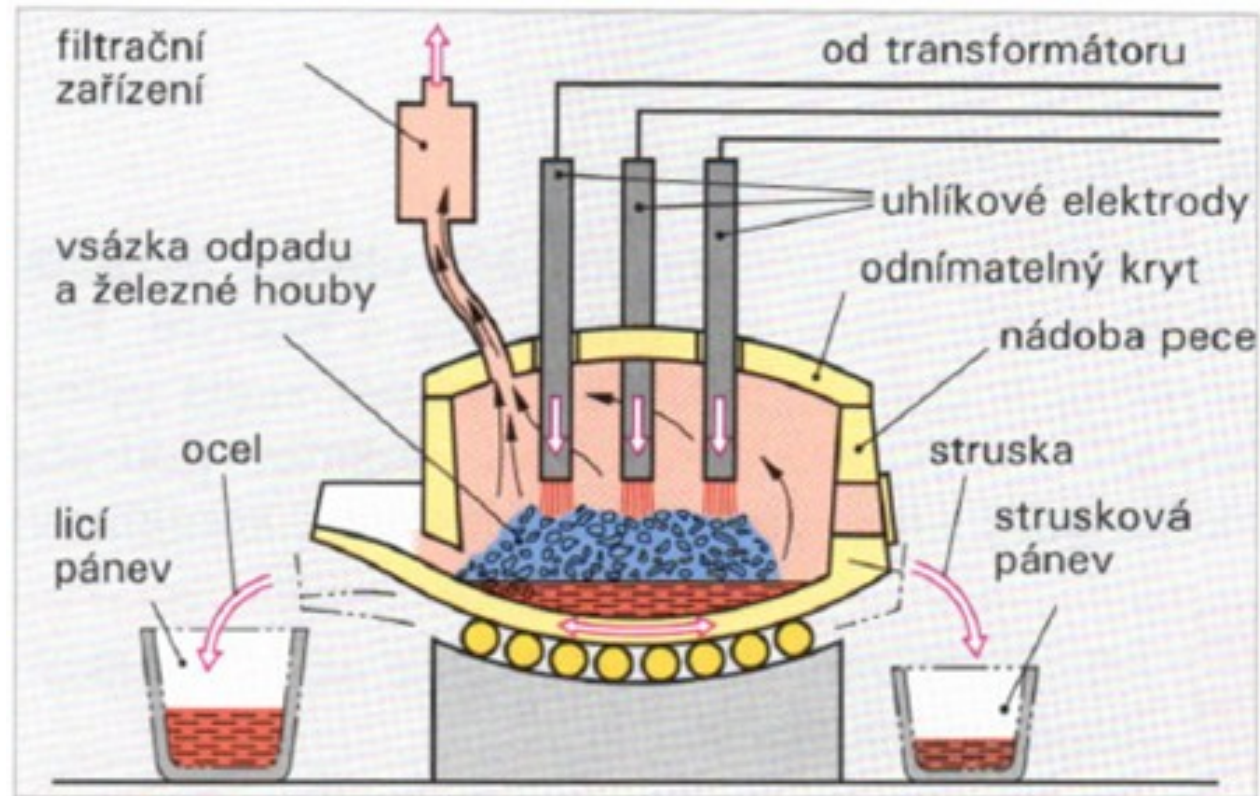
Výroba oceli v konvertoru typu LD



Elektrická oblouková pec

- ✓ Ocel se v elektrické obloukové peci vyrábí z kovového odpadu a dalších kovových a nekovových přísad.
- ✓ Tavení probíhá pomocí tepla uvolňovaného elektrickými oblouky, které vznikají mezi grafitovou elektrodou a kovovou vsázkou.
- ✓ Výroba surové oceli se v elektrických obloukových pecích skládá z několika fází:
 - *sázení vsázky pomocí sázecích košů,*
 - *tavení vsázky na max. příkon oblouků, částečný průběh metalurgických reakcí,*
 - *oxidační údobí (oxidace uhlíku, oxidace dalších doprovodných prvků, oxidace fosforu, snížení obsahů plynů N_2 , H_2 a částečné snížení obsahu síry),*
 - *redukční období (dezoxidace oceli, odsíření oceli, nalegování lázně a konečná úprava chemického složení), dohotovení (konečná úprava chemického složení, úprava teploty lázně na odpichovou teplotu) a odpich,*
 - *po ukončení odpichu se provádí kontrola vyzdívky s mezeitavbou opravou a následně je elektrická oblouková pec opět připravena na další tavbu.*

Elektrická oblouková pec – napájená střídavým proudem (AC)

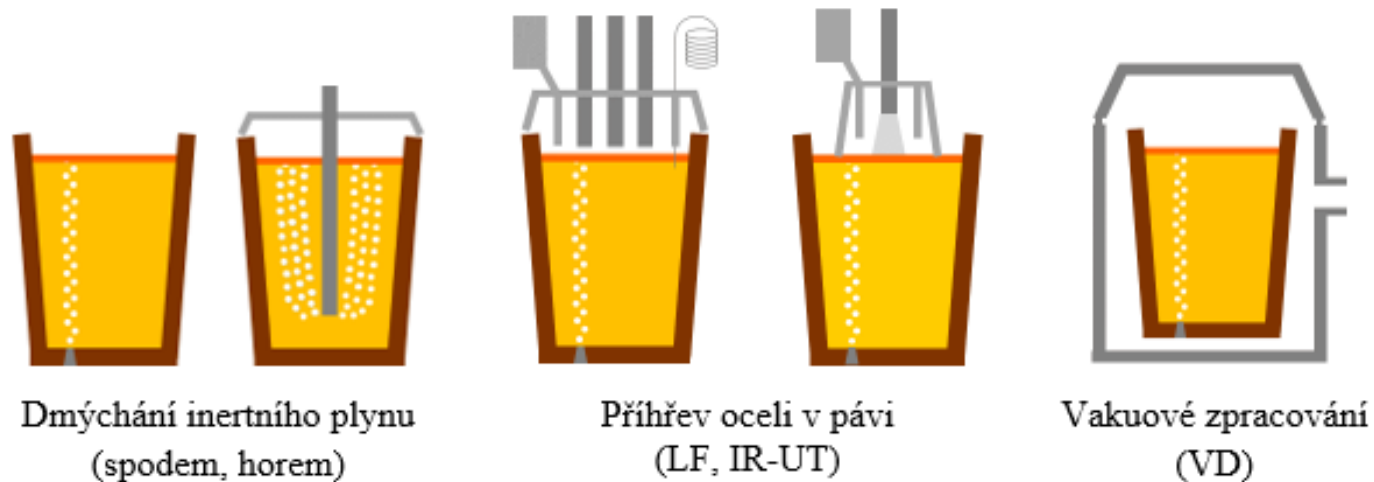


Elektrická oblouková pec

- ✓ Díky specifickým možnostem výroby v elektrických obloukových pecích existuje velmi velký počet modifikací těchto technologií umožňující výrobu: uhlíkových ocelí, legovaných, vysokolegovaných, nástrojových ocelí a ocelí na odlitky.
- ✓ V pracovním prostoru elektrické obloukové pece lze tedy vytvářet jak oxidační podmínky, tak i redukční podmínky.
- ✓ Existuje tedy velký počet modifikací vlastního průběhu výroby, přičemž základní technologie představuje:
 - **dvoustrusková technologie:** *tavba se skládá z údobí tavení vsázky, oxidačního údobí a redukčního údobí,*
 - **jednostrusková technologie:** *tavba má údobí tavení, oxidační a dohotovení. Tavba tedy probíhá bez redukčního údobí,*
 - **přetavba:** *po tavení následuje přímo redukční údobí, chybí oxidační údobí.*

Mimopecní zpracování oceli

- ✓ Surová ocel dále prochází mimopecním zpracováním, kde získá finální požadované vlastnosti.
- ✓ Základní způsoby mimopeního zpracování oceli (sekundární metalurgie) jsou:
 - *dmýchání interního plynu,*
 - *přihřev oceli v páni,*
 - *vakuové zpracování.*



Vybrané možnosti mimopecního zpracování oceli

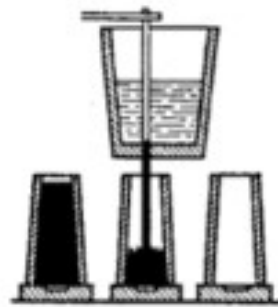
Odlévání oceli

- ✓ Tavenina oceli s požadovaným chemickým složením se dále zpracovává odléváním do podoby polotovaru pro další zpracování, nebo finálního odlitku.
- ✓ **Odlévání oceli** lze rozdělit na následující technologie:
 - *odlíván oceli do kokil – horem nebo spodem,*
 - *odlívání oceli na odlitky,*
 - *odlívání oceli na zařízení plynulého odlévání.*

Odlévání oceli do kokil

- ✓ Provádí se v licí hale ocelárny do licích souprav, které se skládají z litinových forem, tzv. kokil, které jsou umístěny buď na pojízdných vozem, nebo jsou postaveny na licím poli.
- ✓ Ocel se do kokil odlévá přímo z odpichové pánve, která je opatřena uzavíratelnými výlevkami – odlévání horem.
- ✓ Při odlévání spodem se ocel nelije do kokil přímo, ale přes licí kůl a vtokové kanály, rovnoměrně pak stoupá ve všech kokilách současně.
- ✓ Odlévání oceli horem nebo spodem se provádí do licí soupravy.
- ✓ Licí souprava se skládá z následujících základních částí: *licí deska, kokila, kokilová podložka a hlavový nástavec.*

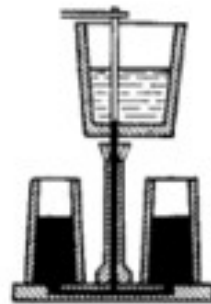
Ukázka principu odlévání oceli do kokil



a) *Schéma odlévání oceli horem*



b) *Provozní odlévání oceli horem*



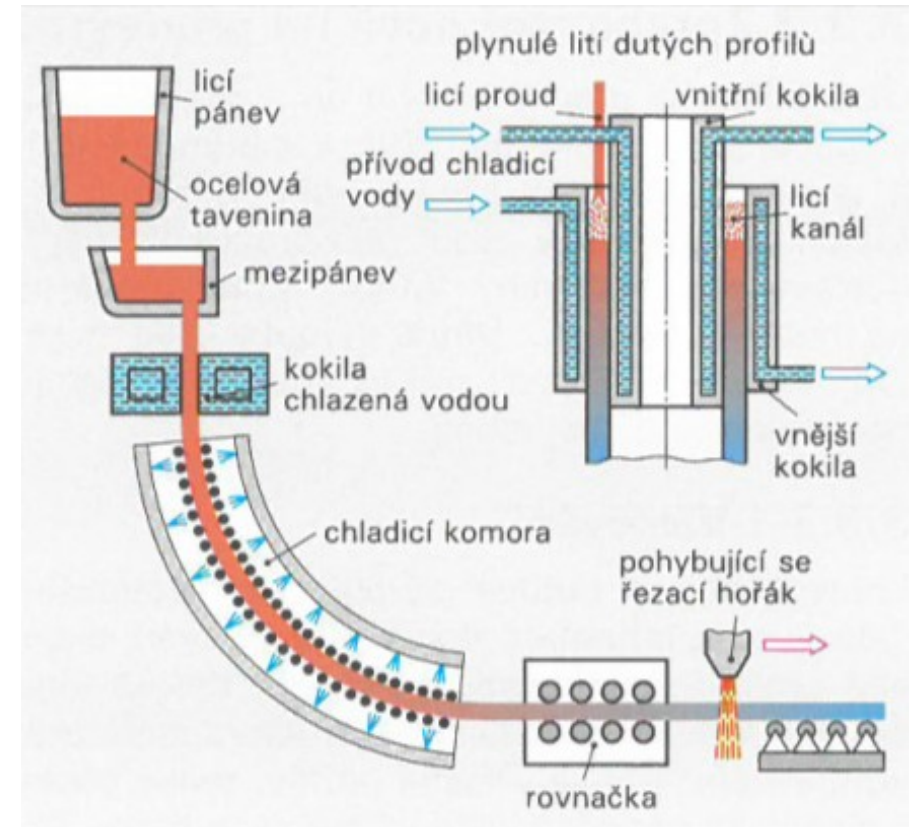
c) *Schéma odlévání oceli spodem*



d) *Provozní odlévání oceli spodem*

Plynulé odlévání oceli

- ✓ Představuje technologii, která nahrazuje stávající postup odlévání oceli ingotovou cestou.
- ✓ Princip plynulého odlévání lze definovat jako technologický postup, při kterém je tekutá ocel na zařízení plynulého odlévání (ZPO) průběžně zpracovávána na předlitek, který může mít různé tvary dle požadavků pro následné tváření.







Zařízení pro plynulé odlévání

Výroba a zpracování litiny

- ✓ **Charakteristika litin:** litina je slitina železa s $C > 2,14\%$ a dalších prvků (Si, Mn, P, S).
- ✓ U litin se výrazně projevuje existence metastabilní a stabilní rovnováhy.
- ✓ Uhlík je v litinách vyloučen ve formě grafitu (grafitické litiny), nebo cementitu (Fe_3C).
- ✓ Většina odlitků se odlévá z tzv. grafitických litin, které mají dobré slévárenské vlastnosti.
- ✓ Litiny, které mají ve struktuře vyloučen cementit, se používají tam, kde odlitek má mít vysokou tvrdost, nebo odolnost proti otěru.
 - **litiny s lupínkovým grafitem** (LLG; EN-GJL-150 až 350),
 - **litiny s kuličkovým grafitem** (LKG; EN-GJS-350-22 až 900-2),
 - **litiny s červíkovitým grafitem** (TLB; EN-GJMW-350-4 až 550-4) a **černým lomem** (TLČ; EN-GJMB-300-6 až 800-1),
 - **bílá litina** (bez volně vyloučeného grafitu s volným cementitem),
 - **legované litiny** pro speciální určení.

Ukázka struktur různých litin

Slitiny železa	Litina		Temperovaná litina s černým lomem	Ocel na odlitky
	S lupínkovým grafitem	S kuličkovým grafitem		
Obraz struktury M 100:1				
Forma uhlíku	Velké ... malé lupínky	Kulička	Vločky	Lamelární cementit
Základní struktura	Grafit + lamelární cementit		Ferit	
Pevnost v tahu MPa	100-350	400-900	300-350	Ferit a perlit 200-840

Výroba a zpracování litiny

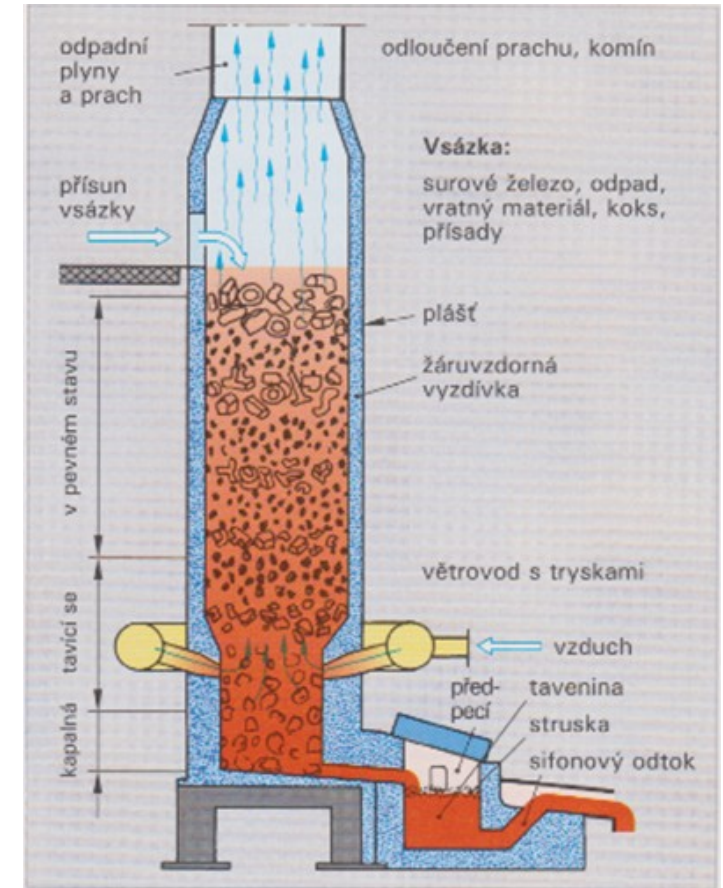
- ✓ **Charakteristika litin:** hlavními prvky v litině jsou mimo Fe a C také Si, Mn, P a S a prvky z očukujících přísad.
- ✓ U legovaných nebo speciálních litin to mohou být prvky Ni, Cu, Mo, Sn, Ti, Cr atd.
- ✓ Poslední skupinu tvoří prvky, jež mohou do litiny přejít z výchozích surovin při druhování a jejich přítomnost je většinou nežádoucí.
- ✓ Každý prvek má specifický vliv na strukturu tuhnoucí fáze, tj. morfologii grafitu, nebo na základní kovovou hmotu (ZKH) a její mikrostrukturu.
- ✓ Většina prvků přítomných v litině může být klasifikována podle jejich vlivu na mikrostrukturu.
- ✓ Rozlišujeme prvky:
 - *primární: C, Si, Mn, P a S,*
 - *legující: Cu, Ni a Mo,*
 - *karbidotvorné a perlitotvorné: As, B, Cr, Sn a V,*
 - *nežádoucí: As, Bi, Pb, Sb atd.,*
 - *plny: H, N, O.*

Výroba a zpracování litiny

- ✓ Základními surovinami pro výrobu litin jsou **surové železo a ocelový odpad**.
- ✓ Dále vratný materiál, legury, nahličovadla, modifikátory a struskotvorné přísady.
- ✓ Tyto materiály se zpracovávají na litinu v některém z k tomu určených agregátů.
- ✓ Nejstarší a nejvíce používané jsou kuplové pece (KP), dále pák elektrické indukční pece (EIP), elektrické obloukové pece (EOP).

Kuplovna

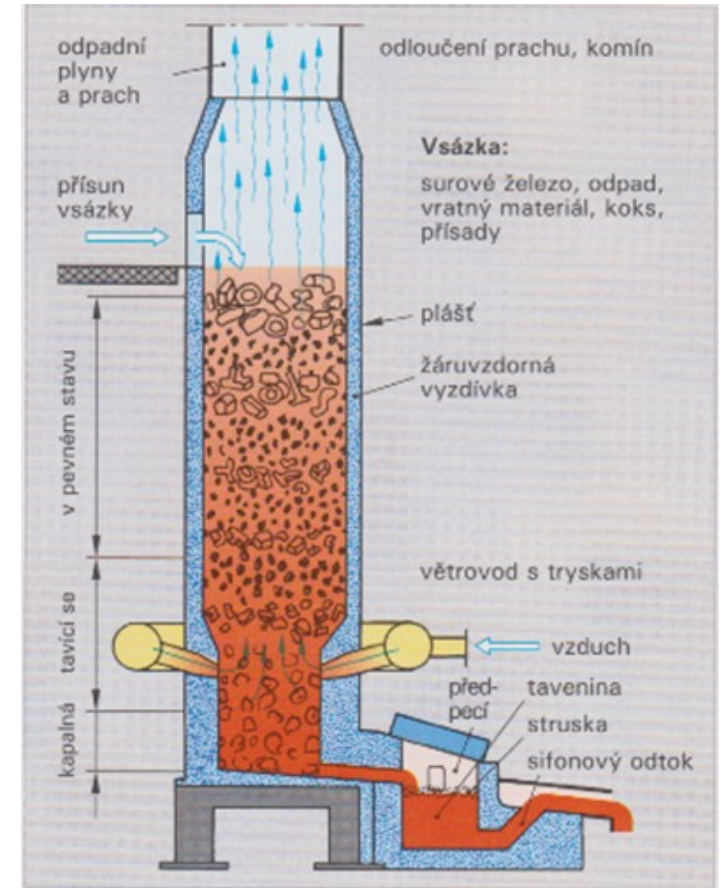
- ✓ Kuplovna je šachtová pec, která funguje jako protiproudý výměník tepla.
- ✓ Zdrojem tepla v kuplovnách je nejčastěji koks.
- ✓ Kuplovna má šachtovitý, žáruvzdorně vyzděný pecní prostor.
- ✓ Spalovací vzduch, „vítr“, je vháněn tryskami a spaluje koks.
- ✓ Stoupající spaliny zahřívají vsázku, která se seshora sesouvá.
- ✓ Nedaleko trysek se vsázka taví a odkapává do nístěje.
- ✓ Kapalná litina vytéká z kuplovny do předpecí, které slouží jako sběrná jímka.
- ✓ Sifonovým odtokem se litina odděluje od lehčí strusky.



Ukázka průřezu kuplovou pecí

Kuplovna

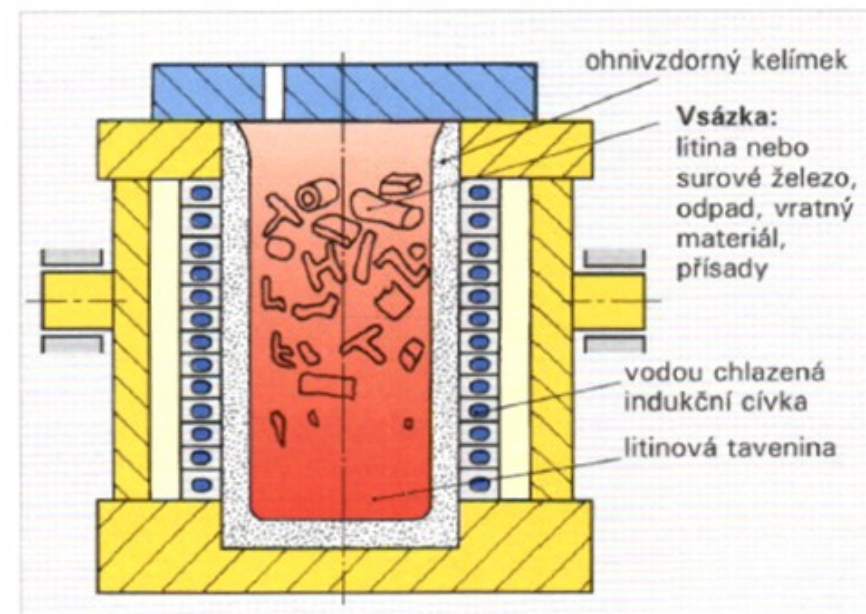
- ✓ Základní metalurgické pochody v kuplové peci lze rozdělit na:
 - *nauhličení litiny,*
 - *propal Si, Mn, Fe,*
 - *změna obsahu P,*
 - *změna obsahu S,*
 - *změna obsahu ostatních prvků.*



Ukázka průřezu kuplovou pecí

Elektrická indukční pec

- ✓ Je kelímková pec vybavená indukční cívkou.
- ✓ Při procesu tavení je elektrická energie přiváděna do vsázky prostřednictvím elektromagnetické indukce.
- ✓ Střídavý proud o vhodné frekvenci přiváděný do primární cívky – induktoru iniciuje v jejím okolí střídavé elektromagnetické pole, které vyvolává ve vsázce uložené v působnosti tohoto pole vznik vířivých proudů, protékajících vsázkou a způsobují její ohřev a tavení.
- ✓ V EIP mimo jiné probíhá také oduhličení či nauhličení taveniny.

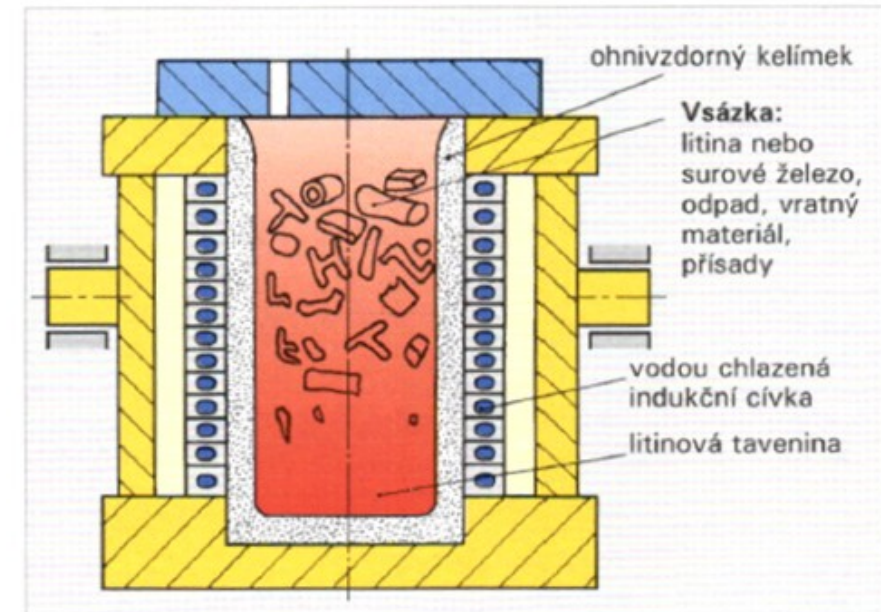


*Ukázka průřezu elektrickou
indukční kelímkovou pecí*

Elektrická indukční pec

✓ Postupy tavení v elektrické indukční peci:

- **syntetický** – ocelový odpad, nauhličovadla, feroslitiny,
- **polysyntetický** (nejobvyklejší způsob) – ocelový odpad, vrat, třísky, surové železo, zlomková litina, nauhličovadla, feroslitiny,
- **přetavování** – bez nauhličování.



Ukázka průřezu elektrickou indukční kelímkovou pecí

Elektrická oblouková pec

- ✓ K tavení litin se mohou použít i elektrické obloukové pece (EOP), jako k tavení oceli.
- ✓ Lze v nich získat taveniny s přesným složením (podílem legujících prvků) a s velkou čistotou.
- ✓ Jakmile je vyrobena tavenina litiny v primárním agregátu, následuje mimopecní zpracování.
- ✓ Účel dalšího zpracování litin spočívá v úpravě jejich finálních vlastností prostřednictvím ovlivnění výsledné struktury materiálu.
- ✓ K tomuto účelu slouží **očkování a modifikace**.

Očkování

- ✓ Vytvoření dostatečného množství grafitizačních zárodků.
- ✓ Větší počet zárodků zjemňuje grafit, zabraňuje vyloučení volného cementitu a tím snižuje sklon k zákalce.
- ✓ Podstatou očkování je heterogenní nukleace, která je podporována vnášením očkovacích látek, obvykle na bázi FeSi do roztavené litiny.
- ✓ Očkování použijeme, chceme-li zvýšit počet cizích grafitizačních zárodků, dosáhnout tak zjemnění vyloučeného grafitu, zabránit vzniku volného cementitu a snížit výskyt zákalky v kritických průřezích odlitku.
- ✓ V současné době se používá řada různých způsobů přidávání očkovačů do roztavené litiny.

Očkování

- ✓ Tak jak se postupně měnily způsoby očkování, měnily se požadavky na typy očkovadel a to:
 - očkování **tekutým očkovadlem** (méně častý způsob),
 - očkování **granulovaným očkovadlem** (nejčastější způsob), rozměr zrn se pohybuje v širokém rozmezí od 0,2 mm až po 8-10 mm,
 - očkování **kompaktními tělísky**, vkládáními buď do licí jamky, nebo do reakční komůrky ve vtokové soustavě,
 - očkování **plněnými profily**.

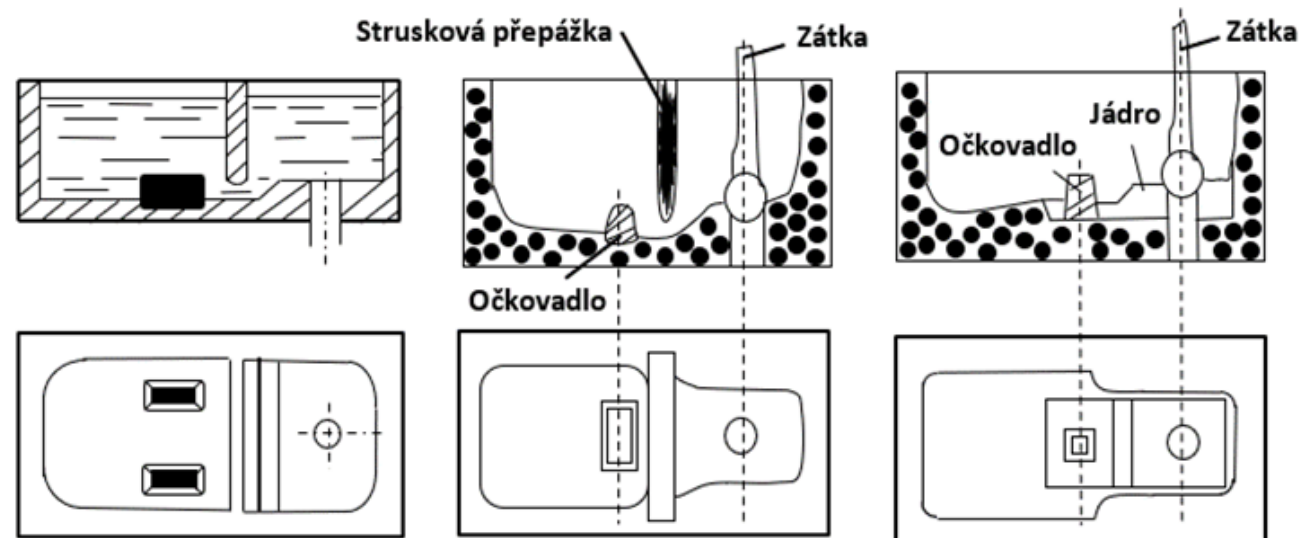


Schéma očkování v licí jamce

Modifikace

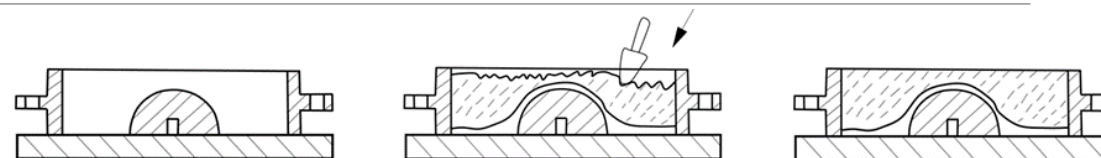
- ✓ Slouží k ovlivnění tvaru grafitu při jeho krystalizaci tak, že lupínkový grafit se mění působením modifikátoru na grafit kuličkový.
- ✓ Tím se podstatně mění užité a fyzikální vlastnosti litiny.
- ✓ V současné době existují různá složení modifikátorů, jejichž volba závisí mimo jiné na způsobu výroby litiny s kuličkovým grafitem.
- ✓ Nejčastěji se jako modifikátor používá hutnicky čistý Mg (99,5 %) nebo předslitiny Mg (s koncentrací od 5 do 35 %).
- ✓ Hlavní metody modifikace jsou následující:
 - *polévací,*
 - *konvertorové,*
 - *ponořovací,*
 - *kontinuální,*
 - *plněnými profily.*

Odlévání odlitků do netrvalých forem

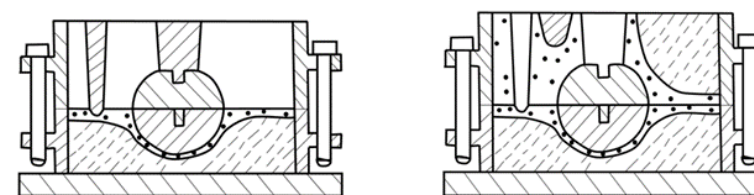
- ✓ Slévárství umožňuje nejrychlejší a často i neekonomičtější způsob, jak dodat kovům a slitinám určitým, často velmi složitý tvar. Je to způsob výroby kovových součástí, při kterém roztavený kov vlijeme do formy, v dutinách tavenina ztuhne a vytvoří surový odlitek. Podle možného množství odlitků vyrobených v jedné formě můžeme formy rozdělit do tří základních skupin:
 - **formy netrvalé** (formy na jedno použití): při vyjímání odlitků se forma rozruší. Jsou vhodné pro jakoukoliv sériovost a téměř pro všechny slitiny. Do tohoto typu forem se odlévá převážná část slévárenské produkce odlitků,
 - **formy polotrvalé**: jedna forma se dá použít pro odlití 10^2 kusů odlitků. Trvanlivost formy závisí na materiálu, z něhož je zhotovena (např. speciální pryže, sádra), tvaru odlitku, možnosti oprav atd. Používají se pro malosériovou výrobu odlitků jednoduchého tvaru odlévaných ze slitin s nízkým bodem tavení,
 - **formy trvalé**: jsou zhotoveny většinou z ocelí, nebo litin. Do jedné kovové formy nebo kokil lze odlít v řádu 10^3 a 10^4 kusů odlitků. Životnost formy závisí především na materiálu odlitků (jejich lící teplotě) a jejich složitosti.

Odlévání odlitků do netrvalých forem

- ✓ Pro výrobu tvarově složitějších odlitků se většinou využívají **netrvalé pískové formy**, vyrobené ze směsi vhodných slévárenských materiálů (pojiva a ostřiva), které formě zajistí požadované vlastnosti. Slévárenské formovací směsi jsou přirozené nebo upravené sypké částice neplastických hornin, většinou křemene, obsahující až 50 % zemitého pojiva, vhodné přímo nebo po úpravě k výrobě slévárenských forem a jader. Musí se vyznačovat: dobrou tvárností, plastičností (schopnost přijímat tvar), vazností za syrova a případně pevností po vytvrzení, prodyšností, chemickou stálostí, žáruvzdorností, rozpadavostí a nízkou cenou.



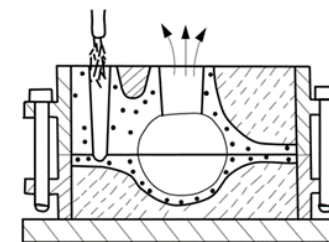
a) Výroba horního dílu formy



b) Výroba dolního dílu formy



c) Rozložení formy a vyjmutí modelu



d) Složení formy a odlévání

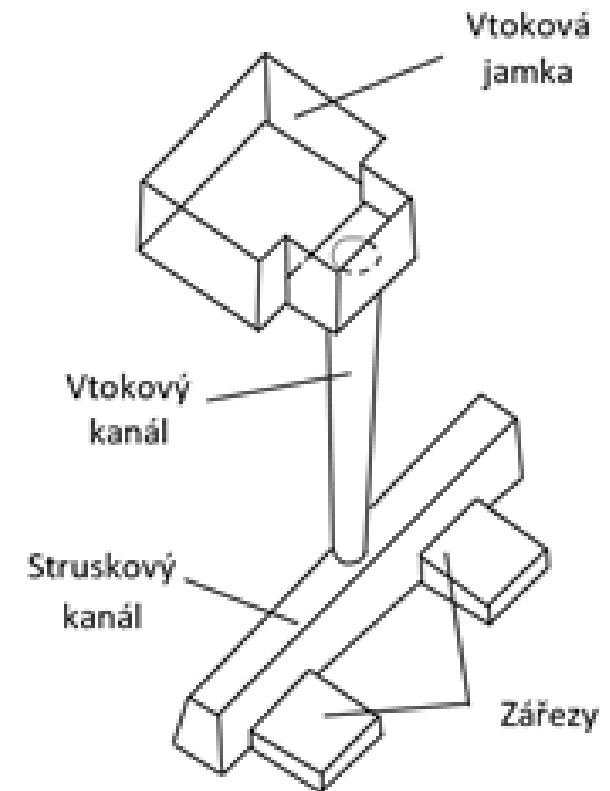
Odlévání odlitků do netrvalých forem

- ✓ Odlitek se formuje za pomoci modelového zařízení, které tvarově odpovídá odlitku (zahrnuje i přídavek kvůli smrštění kovu po utužení). Forma dále obsahuje vtokovou soustavu a další komponenty potřebné pro korektní tužení odlitku, jako jsou nálitky, chladítka, filtry apod.

- ✓ **Vtokovou soustavou:** se rozumí systém a dutin vytvořených ve formě za účelem dopravy roztaveného kovu do všech částí dutiny formy tvořící budoucí odlitek. Vtokových soustav existuje celá řada druhů a uspořádání, které se navzájem liší. Jejich volba závisí na tvaru a velikosti odlitku, druhu odlévaného kovu, lící teplotě, formovacím materiálu a typu formy

Základní části vtokové soustavy

- **Licí jamka:** slouží k nalévání roztaveného kovu z pánve.
- **Licí (vtokový) kůl:** navazuje na vtokovou jamku a slouží k dopravě tekutého kovu k dalším částem vtokové soustavy.
- **Odlučovač strusky:** slouží k rozvedení tekutého kovu od licího kanálku do jednotlivých zářezů, dále slouží k zachycení nečistot.
- **Zářezy:** spojují odlučovač strusky s formou.



Vtoková soustava formy

Vady litinových odlitků

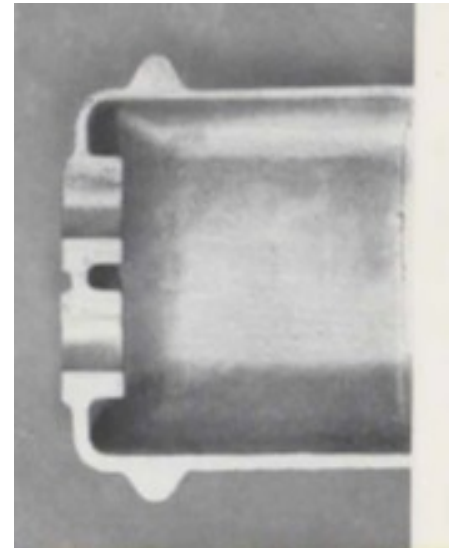
- ✓ Vady odlitků představují konečný důsledek nedokonalých a zastaralých technologií, nekázně i nedodržování příslušných výrobních postupů ve slévárně. Výraz vada odlitku má podmíněný význam, protože rozlišuje následující typy vad:
 - **nepřípustná vada** je odchylka od přípustné normy nebo technických podmínek. Tuto vadu nelze odstranit opravou. Odlitek s nepřípustnou vadou nazýváme zmetek tj. nejakostní výroba.
 - **přípustná vada** je ta, kterou přípustné normy nebo technické podmínky připouštějí, aniž by požadovaly její odstranění výrobcem odlitku.
 - **odstranitelná vada** je odchylka na odlitku od příslušných norem nebo technických podmínek, kterou je dovoleno odstranit.

Klasifikace vad

- ✓ *Odchyšky tvaru, rozměru a hmotnosti*



Přesazení odlitku v dělicí rovině



Nestejně tloušťky stěn odlitku

Vady odlitků

- ✓ *Odchyly vzhledu (povrchové vady)*



Povrchová přípečenina



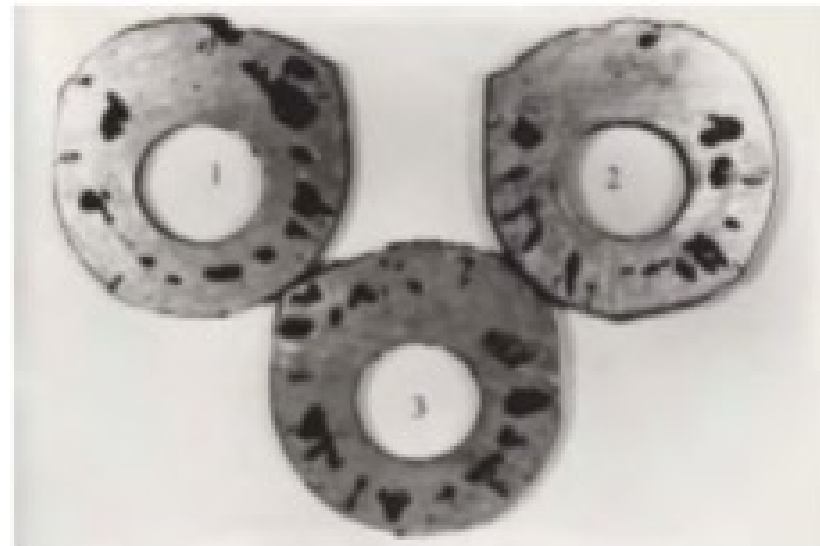
*Dutiny na hrubém odlitku z oceli vyvolané
zálupy ve vršku formy*

Vady odlitků

✓ *Odchyly od celistvosti (porušení souvislosti, dutiny, vměstky)*



Trhlina za tepla



Bubliny ve stěně odlitku

Vady odlitků

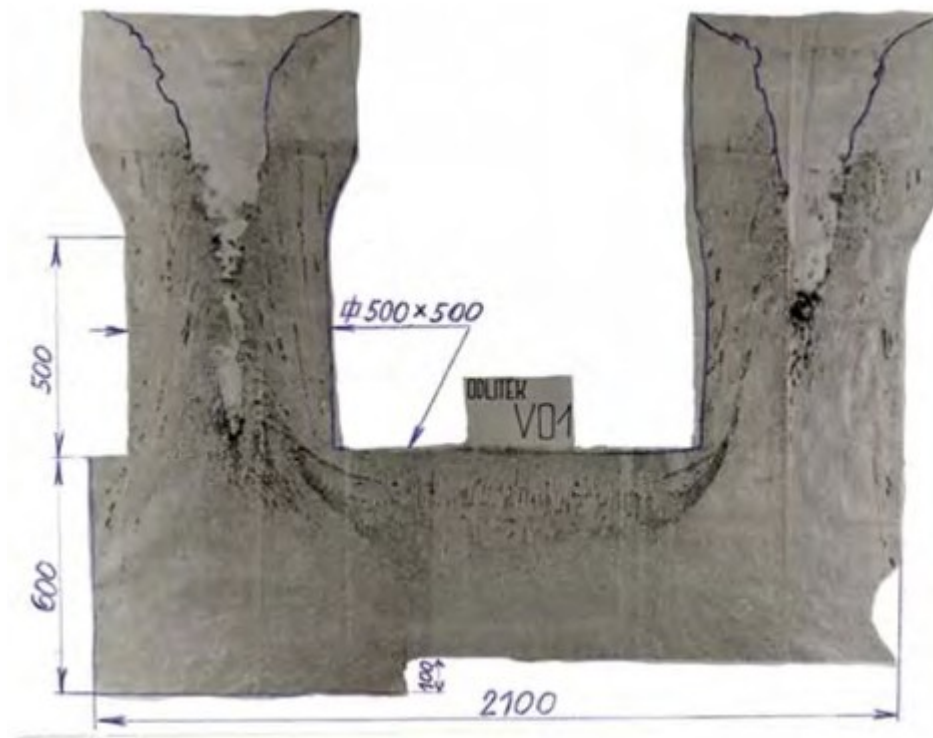
✓ *Odchyly od struktury (makro, mikrostruktura)*



Oxidická plena

Vady odlitků

- ✓ *Odchyly od chemického složení a vlastností odlitku*



Segregace v odlitku