



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství**



# **RAFINACE A ODLÉVÁNÍ OCELI**

**studijní opora**

**Karel MICHALEK**

**Ladislav SOCHA**

**Zdeněk ADOLF**

**Jiří BAŽAN**

**Ostrava 2013**

Recenzent: Ing. Karel Gryc, Ph.D.

Název: Rafinace a odlévání oceli  
Autor: prof. Ing. Karel MICHALEK, CSc.  
Ing. Ladislav SOCHA, Ph.D.  
prof. Ing. Zdeněk ADOLF, CSc.  
prof. Ing. Jiří BAŽAN, CSc.  
Vydání: první, 2013  
Počet stran: 89

Studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství.

Jazyková korektura: nebyla provedena.

**Studijní opora vznikla v rámci projektu OP VK:**

Název: ModIn - Modulární inovace bakalářských a navazujících magisterských programů na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství VŠB - TU Ostrava

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/28.0304

© Karel MICHALEK

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3351-4

## POKYNY KE STUDIUI

### Rafinace a odlévání oceli

Pro předmět Rafinace a odlévání oceli 5. semestru studijního oboru Moderní metalurgické technologie jste obdrželi studijní balík obsahující integrované skriptum pro kombinované studium obsahující i pokyny ke studiu.

#### 1. Cílem předmětu a výstupy z učení

Cíle předmětu je předat studentům základní teoretické a praktické znalosti postupů sekundární metalurgie, tzn. postupů mimopecního zpracování tekuté oceli, a rovněž poznatky z oblasti odlévání oceli, a to jak klasickým způsobem do ingotů, tak zejména progresivním postupem pomocí kontinuálního odlévání.

Po prostudování předmětu by měl student být schopen:

výstupy znalostí:

- *student bude umět charakterizovat technologie sekundární metalurgie a jejich teoretickou podstatu;*
- *student bude umět charakterizovat základní děje při tuhnutí oceli a jednotlivé technologie odlévání oceli.*

výstupy dovedností:

- *student bude umět využít svých znalostí k popisu základů teorie a praxe sekundárního zpracování oceli a odlévání oceli;*
- *student bude umět rozvíjet své teoretické i praktické poznatky dalším studiem.*

#### Pro koho je předmět určen

Předmět je zařazen do bakalářského studia oboru Moderní metalurgické technologie studijního programu Metalurgické inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Studijní opora se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

#### Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup

Studijní oporu, která je rozčleněna na kapitoly, je potřeba nejprve pročíst jako celek. Teprve poté je vhodné ji začít studovat po jednotlivých kapitolách. Po prostudování odpovězte na otázky, zadané za každou kapitolou.

#### Způsob komunikace s vyučujícími

V rámci tohoto předmětu bude úkolem studentů vypracování semestrálního projektu na zadané téma:

- *z oblasti základů sekundárního zpracování oceli;*
- *základů odlévání oceli klasickým způsobem do ingotů nebo technologií plynulého odlévání oceli.*

Semestrální projekt bude kontrolován vyučujícím do 14 dnů po odevzdání a výsledky budou studentům zaslány e-mailem prostřednictvím IS. Dále student absolvuje zápočtový test, jehož výsledky budou studentům sděleny po jeho absolvování.

Na začátku semestru budou studentům zadána jednotlivé témata semestrálního projektu. Podrobnější pokyny studenti obdrží na počátku výuky. Dotazy k zadanému tématu je možné konzultovat s vyučujícím (prof. Karel MICHALEK, CSc.):

- *v rámci vypsanych konzultačních hodin;*
- *na telefonním čísle 597 325 213;*
- *pomocí e-mailu: [karel.michalek@vsb.cz](mailto:karel.michalek@vsb.cz).*

## 1. Metody sekundární metalurgie



**Čas ke studiu:** 20 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- uvést příčiny rozvoje sekundární metalurgie
- charakterizovat výhody a přínosy zpracování oceli pomocí metod sekundární metalurgie
- definovat základní metody a zařízení sekundární metalurgie

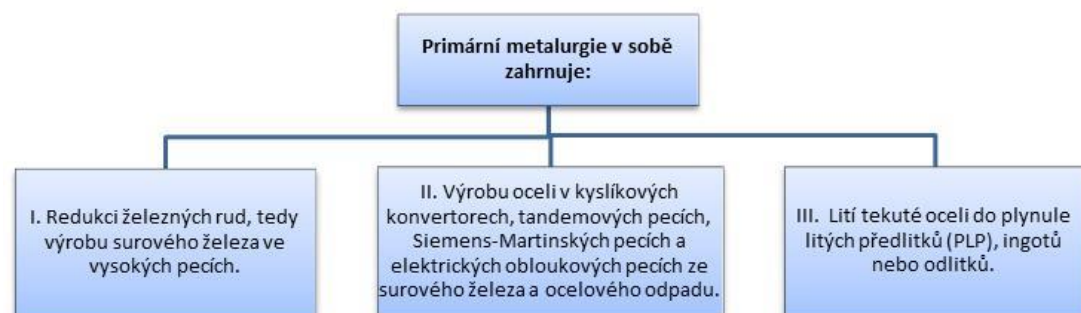


**Výklad**

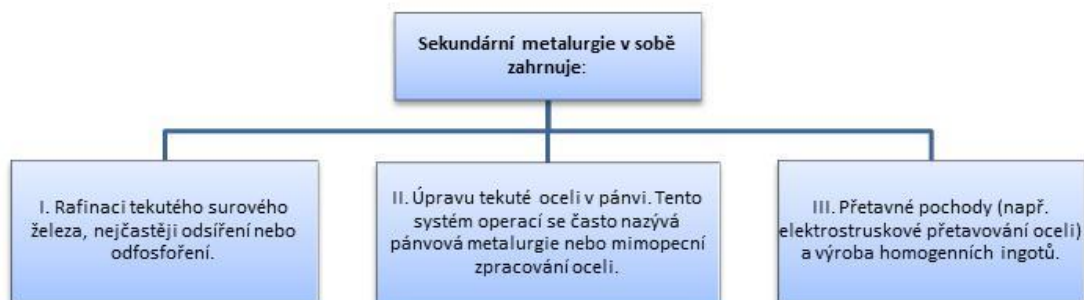
### □ Příčiny rozvoje metod sekundární metalurgie

Druhá polovina 20. století je v ocelářské výrobě charakterizována výraznou snahou snižovat materiálovou a energetickou náročnost. Současně se zvyšují nároky uživatelů na kvalitu oceli představující zvyšování užitečných vlastností výrobků. Limitujícím faktorem dalšího zvyšování produktivity primárních agregátů (kyslíkových konvertorů nebo elektrických obloukových pecí) se stala délka dohovací fáze tavby po roztavení vsázky. Zákonnitě se proto objevila technická řešení umožňující přenést některé technologické operace mimo primární agregát. To vedlo ke vzniku nových ocelářských technologií souhrnně označovaných jako sekundární metalurgie.

Metalurgie železa a oceli představuje systém operací a zařízení, které lze rozdělit do dvou souborů uvedených na **obr. 1.1**.



a) charakteristika primární metalurgie



b) charakteristika sekundární metalurgie

**Obr. 1.1:** Schématické rozdělení primární a sekundární metalurgie

Přesunutí rafinačních operací z výrobního reaktoru do pánve umožňuje:

- *snižovat výrobní náklady na jednu tunu vyráběné oceli - pokles výrobních nákladů spočívá ve zkrácení doby tavby na pecním agregátu a z toho vyplývá:*
  - *zvýšení výrobnosti pecního agregátu,*
  - *snížení opotřebení vyzdívky,*
  - *pokles tepelných ztrát,*
  - *možnost automatizovat zjednodušené technologie výroby.*
- *zvýšovat jakost vyráběné oceli na úroveň nedosažitelnou v pecním agregátu:*
  - *vyšší teplotní i chemickou homogenitou lázně,*
  - *snížením obsahu rozpuštěných plynů ( $[H]$ ,  $[N]$ ),*
  - *snížením obsahu vměstků v tekuté oceli a možností jejich modifikace tvaru a velikosti,*
  - *hlubokým odsířením nebo naopak řízením obsahu síry v oceli,*
  - *přesným legováním i na spodní hranici rozmezí.*
- *připravit tekutou ocel pro plynulé lití na ZPO s přesnou lící teplotou a řízenou chemickou i metalografickou čistotou:*
  - *přesnou lící teplotu v nízkém rozmezí 3 °C až 5 °C lze zajistit na pánvi s přihřevem oceli v pánvové peci.*

Zvládnutí výše uvedených rafinačních metod umožňuje zavádět nové jakosti oceli.

Základní způsoby mimopecního zpracování oceli (sekundární metalurgie) a jejich účinky lze shrnout do následujících bodů:

- *dmýchání inertních plynů:*
  - *pouhé dmýchání (vyplouvání vměstků, teplotní a chemická homogenizace oceli),*
  - *dmýchání pod aktivní struskou (reakce mezi struskou a kovem; odsíření oceli),*
- *injektáž přísad:*
  - *dmýchání prachových látek pomocí inertního plynu (odsíření oceli, modifikace vměstků+ dezoxidace oceli, legování oceli, nauhličování oceli),*
  - *vhánění přísad ve formě plněného ocelového profilu (přesné a úsporné legování oceli, modifikace vměstků),*
  - *zavádění hliníkového drátu (řízená hluboká dezoxidace oceli),*
- *rafinace oceli syntetickou struskou (dezoxidace oceli, řízené odsíření, pohlcování nekovových vměstků),*
- *vakuové zpracování oceli:*
  - *odplynění v pánvi,*
  - *odplynění v proudu,*
  - *odplynění v komoře (oběžné RH, zdvižné DH),*
  - *(snížení obsahu  $H_2$  a  $N_2$ , vakuová uhlíková dezoxidace, dolegování oceli),*
  - *oxidační vakuování oceli – VOD (výroba korozivzdorných ocelí – hluboké oduhličení chromem vysoce legovaných ocelí),*
- *rafinace oceli plynou směsí  $O_2 - Ar$ , resp.  $O_2 - H_2O$  v konvertoru – AOD, CLU, K-OBM-S (výroba korozivzdorných ocelí – hluboké oduhličení za atmosférického tlaku)*
- *přihřev oceli v pánvi:*
  - *elektrickým obloukem za atmosférického tlaku,*
  - *elektrickým obloukem s možností vakuování oceli – ASEA, VAD,*
  - *chemický přihřev – oxidací Al nebo FeSi za atmosférického tlaku – IR-UT, CAS-OB,*
  - *chemický přihřev – oxidací Al nebo FeSi ve vakuu – ISSM.*



## Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

[1] Adolf, Z.: Mimopecní rafinace oceli, VŠB-TU Ostrava, 1991, 133 s.

- [2] Ghosh, A.: Secondary Steelmaking - Principles and Applications. New York, 2001, 322 p.  
[3] Stolte, G.: Secondary Metallurgy - Fundamentals Processes Applications. Düsseldorf, 2002, 216 p.



### **Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)**

- **příčiny rozvoje sekundární metalurgie**
- **výhody a přínosy metod sekundární metalurgie**
- **rozdělení metod a zařízení sekundární metalurgie**



### **Otázky k probranému učivu**

1. Uveďte rozdělení metalurgie a uveďte příčiny rozvoje sekundární metalurgie.
2. Charakterizujte rafinační operace sekundární metalurgie přesunutě z primárních agregátů do pánve.
3. Uveďte základní metody sekundární metalurgie.

## 2. Prvky v oceli a jejich chování při rafinaci



**Čas ke studiu:** 40 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat základní rozdělení prvků v oceli
- charakterizovat chování prvků při rafinaci oceli



**Výklad**

### □ Rozdělení prvků v oceli dle základních kritérií

Jedním ze základních úkolů sekundární metalurgie je snížení obsahu nežádoucích prvků a nečistot, které se v oceli nacházejí. Z hlediska čistoty je posuzován obsah a působení prvků, které se v oceli vyskytují. Prvky v oceli lze z tohoto hlediska rozdělit na:

- *prvky přísadové – slouží zejména k legování oceli a lze je tedy považovat za užitečné,*
- *prvky doprovodné („stopové“) - považujeme je převážně za škodlivé.*

Jednoznačná hranice mezi přísadovými a doprovodnými prvky však neexistuje, neboť pro různé značky oceli mohou být i různá kritéria pro jejich dělení. Jako příklad je možno uvést doprovodné prvky S, N, Cu, které jsou obecně považovány za škodlivé. V určitých značkách ocelí (automatové, nerezavějící) však mohou jednotlivě přispívat ke zlepšení některých jejich vlastností, a proto je musíme zařadit u těchto ocelí mezi prvky přísadové.

Kritérium pro zařazení prvku do jedné ze zmiňovaných skupin závisí rovněž na jejich absolutním obsahu v oceli. Nízké obsahy některých doprovodných prvků mohou být žádoucí (např. u mikrolegovaných ocelí), lze je tedy považovat za přísadové, kdežto pokud překročí určitý kritický obsah, stávají se tyto prvky škodlivými.

### □ Chování prvků při rafinaci oceli

S ohledem na výše uvedenou složitost působení prvků v oceli lze přísadové a doprovodné prvky dělit podle různých kritérií, jako např.:

- *z hlediska možnosti odstranění při ocelářských pochodech na prvky:*
  - *kteřé mohou být v důsledku své vysoké afinity ke kyslíku odstraněny jako oxidy,*
  - *kteřé mohou být z oceli odstraněny částečně,*
  - *prvky s vysokou tenzí par při teplotách ocelářských pochodů,*
- *z hlediska působení na vlastnosti oceli:*
  - *prospěšné (neškodlivé) prvky,*
  - *škodlivé prvky.*

### Rozdělení prvků z hlediska možnosti odstranění při ocelářských pochodech

Prvky, které mohou být v důsledku své vysoké afinity ke kyslíku odstraněny jako oxidy a převedeny v této formě do strusky v plném rozsahu. Jsou to zejména: Ca, Mg, Ti, Al, Zr, B, V, Ba, Nb, čili prvky, které jsou v afinitní řadě nalevo od železa.

Odstraňování prvků první skupiny nečiní zvláštní potíže u všech běžných ocelářských pochodů. V průběhu oxidace se tyto prvky z lázně odstraní, a to i za normálního tlaku i v podmínkách vakua.



Prvky, které mohou být z oceli odstraněny částečně, a to jako oxidy nebo v jiné vazbě, např. Cr, Mn, S a P. Mezi částečně odstranitelné prvky patří rovněž plyny v oceli - N a H.

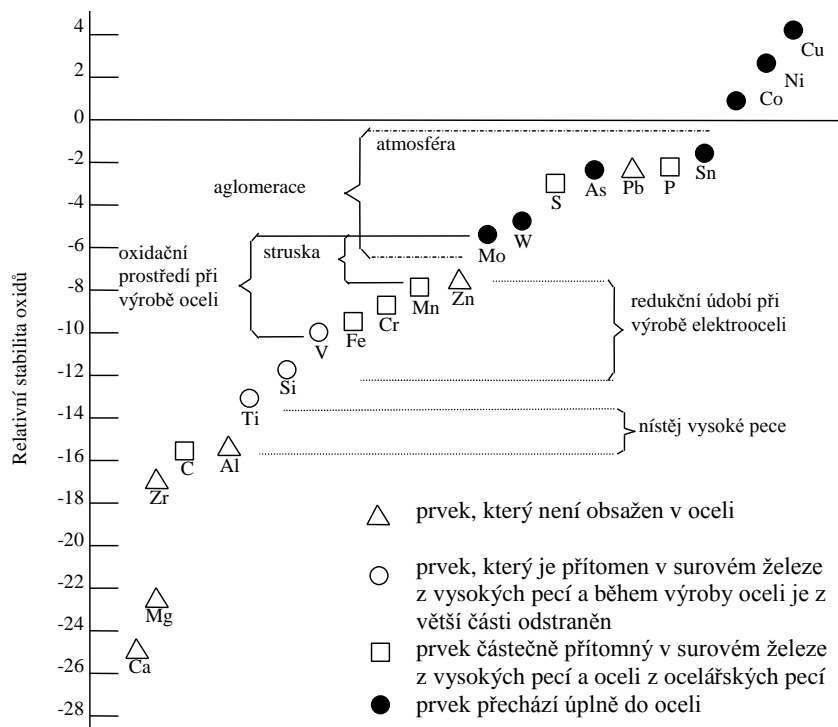
Při odstraňování uvedených prvků mohou vzniknout určité technologické problémy. Týká se to manganu a zejména chromu. Vyšší obsah  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ve strusce výrazně ovlivňuje její vlastnosti, především viskozitu a aktivitu jednotlivých složek strusky (např.  $a_{\text{CaO}}$ ) a tím i rychlost a úplnost některých důležitých metalurgických reakcí, např. odfosfoření a odsíření.

Prvky s vysokou tenzí par při teplotách ocelářských pochodů (cca 1600°C). Mezi tyto prvky patří zejména Zn, Pb, Cd, Ag. (var: tlak nasycené páry dosáhne vnějšího tlaku, vypařování je endotermický proces, tzn., že tlak nasycených par stoupá s teplotou).

Prvky třetí skupiny vyžadují specifický přístup k jejich odstraňování z oceli. Je nutno především posoudit, jaký je kritický obsah jednotlivých prvků z hlediska požadovaných vlastností vyráběných ocelí. Z prvků třetí skupiny mají zinek i olovo značně negativní vliv na vlastnosti oceli, a to i při velmi nízkých koncentracích. Již obsah nad 10 ppm Pb (tj. 0,001%) je jednoznačně nežádoucí a způsobuje prudké snížení tvařitelnosti oceli.

Prvky s nízkou afinitou ke kyslíku a vysokou metalurgickou stabilitou v oceli, tj. zejména Mo, W, Sn, Ni, Co, Cu, As, Sb. Odstranění těchto prvků představuje velký metalurgický problém, a to zejména u Sn, Cu, As, Sb, které mají současně i velmi nepříznivý vliv na vlastnosti oceli, a to zejména při jejich společném působení.

O tom, zda a v jakém množství přechází nějaký prvek ze vsázky nebo z pecní atmosféry do oceli, rozhoduje jeho afinita ke kyslíku, stabilita jeho oxidů při teplotách v ocelářských pecích a stupeň oxidačního působení jednotlivých údobí při výrobě oceli. Schéma uspořádání prvků podle stability jejich oxidů je uvedeno na **obr. 2.1**.



**Obr. 2.1:** Uspořádání prvků podle stability jejich oxidů s vyznačením stupně oxidačního působení prostředí v metalurgických agregátech

Podle afinity ke kyslíku je možno doprovodné prvky v oceli seřadit do tzv. afinitní řady. Vlevo v řadě jsou prvky s největší afinitou ke kyslíku, vpravo s afinitou nejmenší. Podle relativní stability oxidů při různých výrobních pochodech jsou doprovodné prvky uspořádány v **obr. 2.1**, kde je stupeň oxidačního

působení čistého kyslíku rovný nule; oxidační působení atmosféry v níže vysoké pece je podle této stupnice mínus 15.

Prvky označené trojúhelníkem se v oceli nevyskytují, protože se odstraňují již ze surového železa ve vysoké peci i v ocelářské peci (Ca, Mg, Zr, Al). Prvky označené kroužkem jsou částečně redukovány ve vysoké peci a přecházejí do surového železa, odstraňují se však v oxidačním prostředí ocelářských pecí (Ti, Si, V). Prvky označené čtverečkem se rovněž redukují ve vysoké peci a jsou obsaženy v surovém železe, avšak v ocelářské peci se z kovové lázně odstraňují jen částečně (C, Cr, Mn, S, Pb, P). Prvky označené černými plnými body odolávají zcela oxidaci během výroby oceli a přecházejí proto úplně do vyrobené oceli (Mo, W, As, Sn, Co, Ni, Cu).

Všechny prvky ležící v afinitní řadě vpravo od železa se během výroby z oceli odstranit nedají. Výjimkou je zinek, který při teplotách v ocelářské peci sublimuje, a olovo, které je v železe nerozpustné; ve vysoké peci se shromažďuje v níže pece, v ocelářské peci při malých množstvích se vypařuje, při větších množstvích uniká do pudy pece.

### Dělení prvků z hlediska působení na vlastnosti oceli

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, tzv. obecně škodlivé prvky, plyny v ocelích, tzn. kyslík, dusík a vodík, stopové neželezné kovy – měď, cín, arsen, antimon, bismut, (zinek, olovo).



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Stolte, G.: Secondary Metallurgy - Fundamentals Processes Applications. Düsseldorf, 2002, 216 p.  
 [2] Fruehan, R. J.: The Making, Shaping and Treating of Steel, AISE Steel Foundation, 1998, 767 p.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- rozdělení prvků v oceli
- chování prvků při rafinaci oceli



### Otázky k probranému učivu

1. Charakterizujte základní rozdělení prvků v oceli.
2. Uveďte možnosti rozdělení prvků dle různých kritérií.
3. Popište chování prvků při rafinaci oceli.

### 3. Rafinace oceli inertními plyny



**Čas ke studiu:** 50 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- popsat princip rafinace oceli inertními plyny
- charakterizovat vyplouvání vměstků při dmýchání inertního plynu
- definovat způsoby zavádění inertního plynu do oceli v pánvi



**Výklad**

#### □ Rafinace oceli inertními plyny

K rafinaci oceli se nejčastěji používá argon. Stejnou funkci však plní i bublinky oxidu uhličitého při probíhající reakci uhlíku s kyslíkem. Jedná se o jednoduchou metodu rafinace s nízkými investičními náklady na zavedení a s vysokou návratností. Dosahované účinky jsou uvedeny níže:

- *homogenizace oceli – teplotní i koncentrační,*
- *vyplouvání vměstků jednak usměrněným prouděním oceli a jednak flotací,*
- *snížování obsahu vodíku a ve vakuu i dusíku,*
- *podpora průběhu uhlíkové reakce (snížení obsahu uhlíku a kyslíku),*
- *zajištění průběhu reakcí mezi struskou a kovem obnovováním reakčního povrchu (především odsíření oceli).*

Je nutnou součástí všech ostatních metod mimopecní rafinace oceli. Je minimální podmínkou úspěšného odlévání na ZPO. Bez homogenizace oceli v pánvi to není možné. Plynný argon je dostupný jako vedlejší produkt kyslíkáren.

#### □ Mechanismus homogenizace oceli v pánvi

K míchání a homogenizaci taveniny se využívá vznášivá energie vyplouvajících plynných bublin.

$$\varepsilon = 14,23 \left( \frac{V \cdot T}{M} \right) \cdot \log \left( \frac{1+H}{1,48 P_0} \right) \quad (3.1)$$

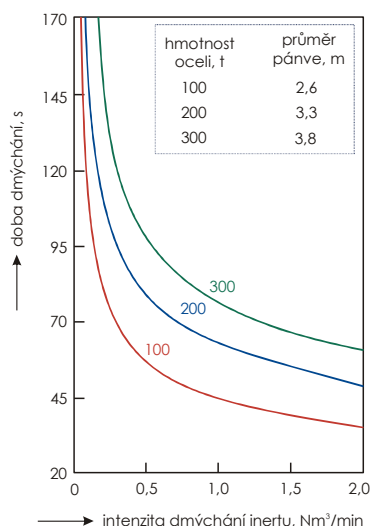
kde  $\varepsilon$  je energie míchání,  $W \cdot t^{-1}$   
 $V$  - intenzita dmýchání plynu,  $Nm^3 \cdot \min^{-1}$   
 $T$  - teplota taveniny, K  
 $M$  - hmotnost taveniny, t  
 $H$  - hloubka injektáže, m  
 $P_0$  - tlak na povrchu taveniny, atm.

Čas potřebný k dosažení 95 % homogenizace taveniny s ohledem na průměr pánve a hloubku injektáže odvodili Mazumdar a Guthrie:

$$\tau = 116 \cdot \varepsilon^{-1/3} \cdot (D^{5/3} \cdot H^{-1}) \quad (3.2)$$

kde  $\tau$  je čas 95 % homogenizace taveniny, s  
 $D$  - průměr pánve, m.

Na následujícím **obr. 3.1** je uveden vypočtený čas homogenizace pro 100, 200 a 300 tunovou tavbu.



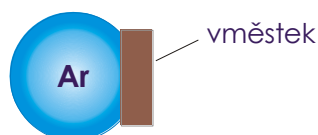
**Obr. 3.1:** Vypočtený čas homogenizace pro 100, 200 a 300 tunovou tavbu v závislosti na intenzitě dmychání plynu

### □ Vyplování vměstků při dmychání inertního plynu a jejich pohlcování struskou

Nekovové vměstky jsou vynášeny z tekuté oceli tokem oceli směrem k fázovému rozhraní se struskou, kde jsou zachyceny a následně tekutou struskou absorbovány. Tento proces vyžaduje laminární tok taveniny, který nestrhává částice strusky do oceli, a zápornou hodnotu Gibbsovy energie procesu absorpce vměstku struskou. Pro pohlcení vměstku struskou lze odvodit vztah:

$$\Delta G = \sigma_{v-s} \cdot S_{v-s} - \sigma_{v-l} \cdot S_{v-l} \quad (3.3)$$

kde  $\Delta G$  je Gibbsova energie absorpce vměstku struskou, J  
 $\sigma_{v-s}$  - mezifázové napětí vměstek-struska,  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$   
 $\sigma_{v-l}$  - mezifázové napětí vměstek-kov,  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$   
 $S_{v-s}$  - plocha mezifázového povrchu vměstek-struska,  $\text{m}^2$   
 $S_{v-l}$  - plocha mezifázového povrchu vměstek-kov,  $\text{m}^2$



**Obr. 3.2:** Schematické znázornění vměstku po spojení s bublinou Ar

Proces probíhá samovolně, jestliže  $\Delta G < 0$ . Tato podmínka je splněna, jestliže  $\sigma_{v-s}$  je minimální a  $\sigma_{v-l}$  je maximální. Je-li chemické složení vměstku a strusky podobné, pak  $\sigma_{v-s} \rightarrow 0$  a vměstek není smáčen kovem, pak  $\sigma_{v-l} > 0$ . Za těchto podmínek je  $\Delta G < 0$  a pohlcování vměstků struskou úspěšně probíhá. Flotace vměstků spočívá v přilnutí vměstku k povrchu

bubliny dmychaného inertu a v jejich následném vyplutí do strusky, jak je uvedeno na **obr. 3.2**.

Pevnost spojení vměstku s bublinou lze popsat pomocí adhézní práce, která je nutná k odtržení vměstku od bubliny.

$$W_A = S_{v-g} \cdot \sigma_{l-g} (1 - \cos\theta) \quad (3.4)$$

kde  $W_A$  je adhézní práce – pevnost spojení soustavy bublina Ar-vměstek, J  
 $S_{v-g}$  - plocha spojení bublina Ar-vměstek,  $\text{m}^2$   
 $\sigma_{l-g}$  - povrchové napětí oceli,  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$   
 $\theta$  - úhel smáčení materiálu vměstku ocelí

Pevnost spojení vměstku s bublinou a tudíž pravděpodobnost flotace vměstků je závislá na smáčení vměstku ocelí, povrchovém napětí oceli a ploše spojení vměstek-bublina, jak je uvedeno v **tab. 3.1**.

**Tab. 3.1:** Výpočet adhézní práce podle rovnice

Jestliže	$\theta \rightarrow 0$	$\cos \theta \rightarrow 1$	$W_A \rightarrow 0$
	$\theta = 90^\circ$	$\cos \theta \rightarrow 0$	$W_A \rightarrow S_{v-g} \cdot \sigma_{l-g}$
	$\theta = 180^\circ$	$\cos \theta \rightarrow -1$	$W_A \rightarrow 2 S_{v-g} \cdot \sigma_{l-g} = (W_A)_{\max}$

Povrchové napětí kovu  $\sigma_{l-g}$  je maximální, jestliže ocel má minimalizován obsah povrchově aktivních látek (především [S] a [O]). Význam plochy spojení vměstku  $S_{v-g}$  s bublinou roste, jestliže velikost bublinky se „blíží“ velikosti vměstku. To znamená, že flotace vměstků vyžaduje bublinkový režim dmýchání inertu – čerání oceli.

Z toho vyplývá, že při dmýchání argonu do oceli lze snížit především obsah vměstků majících vůči oceli vysoké mezifázové napětí. Jedná se především o stabilní vměstky tvořené oxidem hlinitým. Ocel by měla být hluboko dezoxidovaná a odsířená a argonem pouze čerána.

#### □ Způsoby zavádění argonu do oceli v pánvi

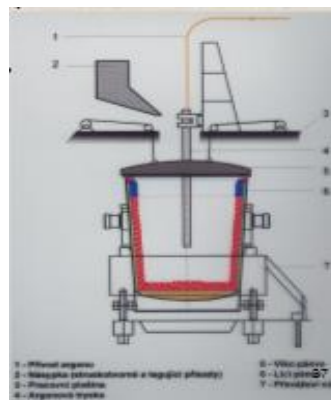
Dmýchání inertního plynu do lázně lze rozdělit do následujících bodů:

- *tryskou (ocelovou trubicí chráněnou keramickým pláštěm),*
- *ocelovou trubicí zakončenou porézni keramickou zátkou (tvárnici),*
- *porézni žárovzdornou tvárnici umístěnou ve dně pánve.*

Schematické znázornění dmýchání inertu ponořenou tryskou je uvedeno na **obr. 3.3**.



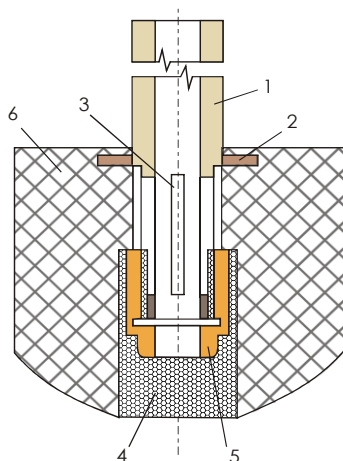
a) dmýchání inertního plynu tryskou do pánve



b) rafinace oceli inertním plynem

**Obr. 3.3:** Ukázka možností dmýchání inertního plynu do pánve

Upevnění keramické zátky k nosné ocelové trubici je patrné z **obr. 3.4**.

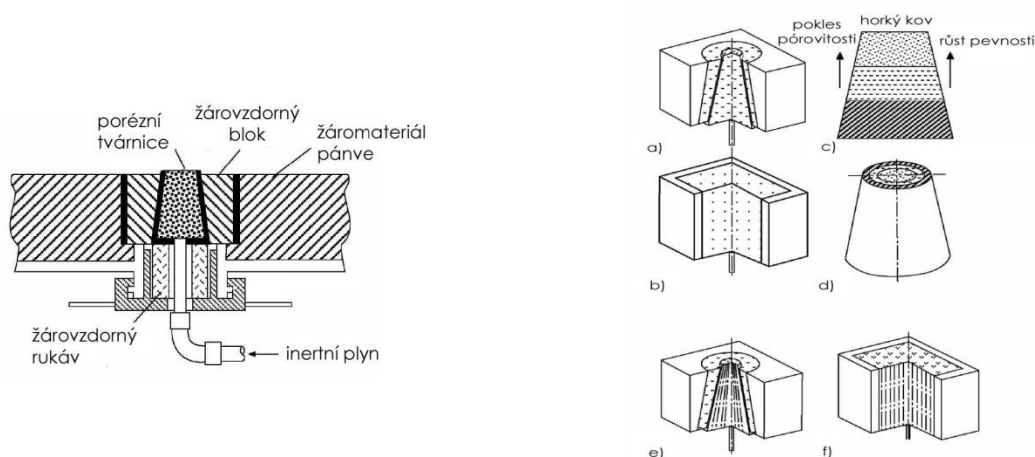


- Legenda: 1 – přívod argonu,  
 2 – zpevňující kovový kruh,  
 3 – otvor v kruhu pro vývod argonu,  
 4 – dutina zaplněná žárovzdorným materiálem,  
 5 – matrice upevňující keramický blok,  
 6 – keramický pórovitý blok.

**Obr. 3.4:** Schéma upevnění keramického bloku k nosné kovové trubce

- *výhody dmýchání inertního plynu ponořenou tryskou:*
  - *jednoduchost provedení,*
  - *dobrý kontakt strusky s kovem, dobré odsíření oceli,*
  - *nižší investiční i provozní náklady oproti elektromagnetickému míchání oceli,*
- *nevýhody dmýchání inertního plynu ponořenou tryskou:*
  - *omezená možnost řídit intenzitu dmýchání,*
  - *za atmosférického tlaku nelze ocel odplynit,*
  - *vyšší ztráty legur jejich oxidací na povrchu lázně,*
  - *omezená možnost zvyšovat metalografickou čistotu oceli – odstraňovat vměstky flotací, ocel není míchána v celém objemu pánve (existují významné „ mrtvé “ zóny).*

Další možnost dmýchání inertního plynu do pánve představuje žárovzdorná tvárnice umístěná ve dně pánve. Způsob vestavění keramické tvárnice do dna pánve je patrný z **obr. 3.5**. Používané tvary dmýchacích tvárnic a jejich charakteristika jsou znázorněny na **obr. 3.6**.



**Obr. 3.5:** Umístění porézní tvárnice do dna pánve      **Obr. 3.6:** Tvary dmýchacích tvárníc

- *výhody dmýchání inertního plynu dmyšným elementem ve dně pánve:*
  - *rovnoměrné míchání lázně,*
  - *minimální oblasti, kde nedochází k cirkulaci,*
  - *možnost řízení dmýchání argonu od „bublinkovitého“ režimu až po vysoké intenzity dmýchání,*
  - *vynikající kontakt strusky s kovem (odsíření oceli) a nižší teplotní gradient mezi kovem a struskou,*
  - *možnost mírného odplynění a oduhličení oceli,*
  - *nižší investiční a provozní náklady oproti elektromagnetickému míchání oceli,*
- *nevýhody dmýchání inertního plynu dmyšným elementem ve dně pánve:*
  - *zvýšené opotřebení vyzdívky pánve,*
  - *zvýšené nebezpečí průvalu.*



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Adolf, Z.: MIMOPECNÍ RAFINACE OCELI, VŠB-TU Ostrava, 1991, 133 s.
- [2] Ghosh, A.: Secondary Steelmaking - Principles and Applications. New York, 2001, 322 p.
- [3] Stolte, G.: Secondary Metallurgy - Fundamentals Processes Applications. Düsseldorf, 2002, 216 p.
- [4] Fruehan, R. J.: The Making, Shaping and Treating of Steel, AISE Steel Foundation, 1998, 767 p.



## **Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)**

- **princip rařinace oceli inertními plyny**
- **mechanismus vyplouvání nekovových vměstků při dmýchání inertního plynu**
- **základní metody zavádění inertního plynu do oceli v pánvi**



## **Otázky k probranému učivu**

1. Uveďte princip rařinace oceli inertními plyny.
2. Charakterizujte mechanismus homogenizace oceli v pánvi pomocí dmýchání inertního plynu.
3. Uveďte způsoby zavádění argonu do oceli v pánvi.

## 4. Odplynění oceli



**Čas ke studiu:** 100 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat průběh odplynění oceli
- popsat vakuovou rafinaci oceli
- charakterizovat základní technologie vakuování oceli



**Výklad**

### □ Snížení obsahu plynů rozpuštěných v oceli

Rozpuštění plynů v roztavených kovech a jejich vydělování z kovů jsou protichůdné pochody. Atomární rozpouštění plynů v kovech, jakož i jejich odstraňování z kovů, lze popsat obecnou rovnicí



Mechanismus procesu absorpce (pohlcování) atomárně rozpouštěného plynu v roztaveném kovu lze pak vyjádřit pomocí několika následných dějů:

- difúze molekul plynu z atmosféry k povrchu kovu,
- adsorpce molekul plynu na povrchu kovu a jejich disociace na atomy,
- desorpce a difúze atomů plynu z povrchu do objemu kovu.

Na druhé straně vydělování plynu z roztaveného kovu je spojeno s molekularizací atomů plynu v povrchu kovu před difúzí takto vzniklých molekul do atmosféry.

Rovnováha fázové soustavy roztavený kov-plyn je závislá na obsahu plynu v kovu  $[X]$ , jeho parciálním tlaku  $p_{x_2}$  a teplotě  $T$ . Pro atomární roztok plynu v roztaveném kovu při konstantní teplotě, vzhledem k rovnici (4.1), platí:

$$[X] = \frac{K_X}{f_X} \sqrt{(p_{x_2})_r} \quad (4.2)$$

přičemž

$$(p_{x_2})_r = \frac{p_{x_2}}{p_{x_2}^0} \quad (4.3)$$

kde  $K_X$  je rovnovážná konstanta Sievertsova zákona, hm. %, ppm  
 $p_{x_2}$  - relativní parciální tlak plynu nad kovem, l  
 $p_{x_2}$  - parciální tlak plynu nad kovem, Pa  
 $p_{x_2}^0$  - 101 325 Pa – parciální tlak plynu ve standardním stavu, Pa  
 $[X]$  - rovnovážný obsah atomárně rozpuštěného plynu v kovu, hm. %, ppm

Rovnice (4.2) je matematickým vyjádřením Sievertsova zákona. Sievertův zákon je krajním případem obecnějšího zákona Henryho, který popisuje molekulární rozpouštění plynů v roztocích. Jestliže



rozpuštění plynů v kovech není zcela atomární povahy, pak mocnitél tlaku v rovnici (4.2) dosahuje hodnotu od 0,5 do 1,0. Za předpokladu, že  $p_{x_2r} = 1$  a  $f_x = 1$ , platí  $[X]_{\max.} = K_x$

Hodnota  $K_x$  tudíž odpovídá rozpustnosti plynu v tavenině železa nebo nízkolegované oceli ( $f_x \rightarrow 1$ ).

Rovnovážné koncentrace v kovu rozpuštěného plynu při zadaných hodnotách  $p$  a  $T$  charakterizují absorpční schopnost daného plynu a tudíž rozpustnost plynu při zvolených termodynamických podmínkách. Rozpustnost se vyjadřuje v hmotnostních procentech, ppm nebo krychlových centimetrech plynu ve 100 g kovu.

Teplotní závislost obsahu atomárně rozpuštěného plynu v roztaveném kovu lze za konstantního tlaku vyjádřit rovnicí:

$$\ln[X] = -\frac{\Delta H}{2RT} + \ln C \quad (4.4)$$

kde  $\Delta H$  je rozpouštěcí teplo 1 molu plynu,  $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$

$C$  - konstanta závislá na druhu plynu a kovu, hm. %

součinitel 2 ve jmenovateli ukazuje, že se plyn rozpouští i v disociovaném stavu.

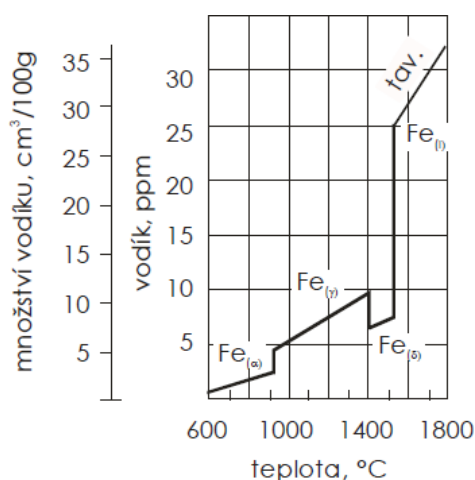
Rozpouštěcí teplo je tvořeno adsorpčním teplem  $\Delta H_A$ , disociačním teplem  $\Delta H_D$  a v případě, že plyn s kovem chemicky reaguje, i reakčním teplem  $\Delta H_R$ .

$$\Delta H = \Delta H_A + \Delta H_D + \Delta H_R \quad (4.5)$$

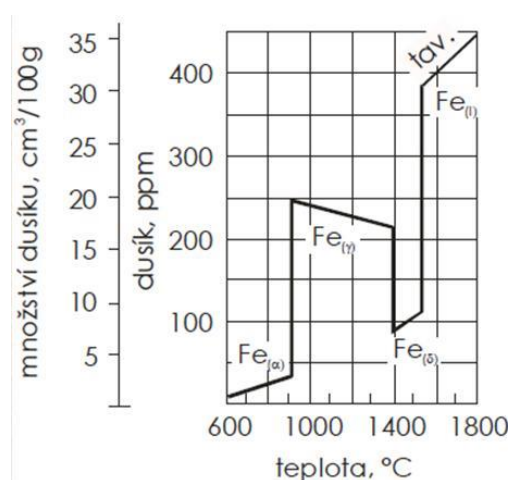
Zatímco disociace molekul plynu na atomy je vždy endotermický děj  $\Delta H_D > 0$ , adsorpce plynu v povrchu kovu a jeho chemická reakce s kovem jsou obvykle exotermické děje  $\Delta H_A < 0$  a  $\Delta H_R < 0$ . U plynů, které se vyznačují malou rozpustností v kovech, je výsledný tepelný efekt rozpouštění endotermický  $\Delta H > 0$ , protože teplo spotřebované na disociaci molekul plynu převyšuje hodnotu adsorpčního tepla, přičemž  $\Delta H_R = 0$ . Proto například rozpustnost vodíku v  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  i roztaveném železe s teplotou narůstá, zatímco rozpustnost dusíku v  $\gamma$  železe s teplotou klesá vzhledem k exotermickému efektu reakce  $\gamma$  železa s dusíkem za vzniku nitridů  $|\Delta H_R| + |\Delta H_A| > |\Delta H_D|$ .

Rozpouštění vodíku a dusíku v čistém roztaveném železe se řídí Sievertsovým zákonem. Oba plyny se rozpouštějí v tavenině železa atomárně a vzhledem k převážně endotermickému charakteru procesu rozpouštění s rostoucí teplotou jejich rozpustnost narůstá.

Vypočtené hodnoty rozpustnosti vodíku a dusíku v  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  a tekutém železe jsou znázorněny na **obr. 4.1** a **obr. 4.2**.



**Obr. 4.1:** Vliv teploty na rozpustnost vodíku v železe při tlaku 0,1 MPa



**Obr. 4.2:** Vliv teploty na rozpustnost dusíku v železe při tlaku 0,1 MPa

Uvedené rozpustnosti vodíku a dusíku na **obr. 4.1** a **obr. 4.2** odpovídají rovnováze čistého železa s plynnou fází obsahující pouze vodík nebo dusík při tlaku 0,1 MPa. V praktických podmínkách

mimopecní rafinace odplyňujeme ocel obsahující celou řadu rozpuštěných prvků, přičemž atmosféra nad kovem, resp. plynná bublina vyplouvající z kovu, obsahuje i další druhy plynů.

Rozpustnost vodíku a dusíku v tavenině železa obsahující třetí prvek je určována silami vzájemného působení mezi rozpouštědlem (železem) a rozpuštěnou látkou (vodíkem či dusíkem) a legujícím prvkem ( $R_i$ ).

Hydridotvorné prvky (Zr, Ti, Nb, V, Ce) zvyšují rozpustnost vodíku. Prvky, které netvoří hydridy (Cr, Ni, Mn, Co, Mo, W), rozpustnost vodíku ovlivňují málo. Skupina prvků (C, Si, S, P a další) snižuje rozpustnost vodíku vzhledem k jejich schopnosti tvořit se železem karbidy, silicidy, sulfidy, fosfidy a tudíž snižovat termodynamickou aktivitu železa.

Legující prvky z hlediska jejich vlivu na rozpustnost dusíku v roztaveném železe je možno rozdělit do několika skupin:

- *Ti, Zr, V, Nb a další prvky tvoří s dusíkem stabilní nitridy a tudíž s růstem jejich koncentrace rozpustnost dusíku v železe roste.*
- *Cr, Mn, Mo mají vysokou afinitu k dusíku, a proto zvyšují jeho rozpustnost v tekutém železe, i když při běžných koncentracích v roztavené oceli nitridy netvoří.*
- *C, P, Ni, Cu snižují rozpustnost dusíku v roztaveném železe, protože zvyšují aktivitu rozpuštěného dusíku.*
- *Si a Al jsou sice nitridotvornými prvky, avšak křemík snižuje a hliník téměř nemění rozpustnost dusíku v železe.*
- *O a S mají na rozpustnost dusíku v železe malý vliv.*

#### □ Termodynamické podmínky odplynění oceli

Základní termodynamickou podmínkou pro odplynění oceli je nižší parciální tlak vodíku a dusíku v plynné fázi (v atmosféře nad lázní nebo plynné bublině v lázni kovu) než je rovnovážný tlak těchto plynů odpovídající jejich obsahu v oceli.

$$p_{X_2} < p_{X_2,r} \quad (4.6)$$

kde  $p_{X_2}$  je parciální tlak vodíku či dusíku v plynné fázi, Pa

$p_{X_2,r}$  - rovnovážný parciální tlak vodíku či dusíku v oceli podle Sievertsova zákona, Pa

Pro odplynění kovu povrchem hladiny nepokryté struskou platí, že parciální tlak vodíku či dusíku v atmosféře závisí na vnějším tlaku a obsahu daného plynu v atmosféře nad lázní

$$p_{X_2} = p_v \frac{\{X_2\}}{100} \quad (4.7)$$

Při odplynění kovu difúzí vodíku nebo dusíku do bublin inertu nebo CO v objemu lázně je parciální tlak uvedených plynů v bublině argonu závislý na celkovém tlaku v bublině

$$p_{X_2} = P \frac{\{X_2\}}{100} \quad (4.8)$$

přičemž celkový tlak v bublině je dán součtem tlaku vnějšího, ferostatického a kapilárního

$$P = p_v + p_f + p_\sigma \quad (4.9)$$

kde  $P$  je celkový tlak plynu v bublině, Pa

$p_v$  - tlak plynu nad lázní, Pa

$p_f$  - ferostatický tlak sloupce kovu nad bublinou, Pa

$p_\sigma$  - kapilární tlak, Pa

$[X_2]$  - obsah vodíku či dusíku nad lázní nebo v bublině, hm. %

Odpovídající obsahy vodíku nebo dusíku v kovu lze vyjádřit ze Sievertsova zákona

$$[X] = \frac{K_X}{f_X} \sqrt{p_v \frac{\{X_2\}}{100}} \quad (4.10)$$

$$[X] = \frac{K_X}{f_X} \sqrt{P \frac{\{X_2\}}{100}} \quad (4.11)$$

Z rovnic (4.10) a (4.11) vyplývá, že dosažitelný obsah vodíku v kovu bude tím nižší, čím bude nižší celkový tlak nad lázní, resp. v bublině plynu. Protože na celkovém tlaku v bublině plynu se zvláště při vakuových procesech podstatnou měrou podílejí ferostatický a kapilární tlak (jestliže  $p_v \rightarrow 0$ , pak  $P = p_f + p_\sigma$ ), bude dosažitelný obsah vodíku v kovu vypočtený podle rovnice (4.10) nižší, než podle rovnice (4.11). Stejný závěr platí i pro dusík. Z tohoto důvodu je převážná část vodíku a dusíku při vakuování oceli odstraňována přes hladinu kovu, a pokud tyto plyny přecházejí do bublin, pak převážně v blízkosti hladiny kovu.

#### □ Podmínky dosažení rovnováhy v soustavě [C] - [O] - CO(g) při dmýchání argonu do oceli ve vakuu

Kyslík je v oceli obsažen jednak jako atomárně rozpuštěný plyn a jednak ve formě oxidických vměstků. Z toho vyplývají i dva způsoby, jak snížit jeho obsah v oceli v průběhu dmýchání inertu. První způsob spočívá ve vytvoření podmínek pro průběh uhlíkové reakce, zatímco obsah oxidických vměstků lze snížit zlepšením podmínek pro jejich vyplouvání jednak usměrněným prouděním oceli a jednak flotací.

Uhlíková reakce je výrazně závislá na tlaku a jeho snížením při vakuování a argonování oceli (v bublině argonu je  $p_{CO} \rightarrow 0$ ) lze ocel úspěšně dezoxidovat, aniž by vznikaly tuhé nebo tekuté oxidické vměstky. Úbytky obsahu uhlíku a kyslíku v průběhu reakce (4.12)



lze vyjádřit v molárních jednotkách

$$-d[C \text{ hm. \%}] = -\frac{12}{16} d[O \text{ hm. \%}] = -\frac{3}{4} d[O \text{ hm. \%}] \quad (4.13)$$

Rovnici (4.13) lze integrovat a upravit na tvar

$$[C] - [C]_r = \frac{3}{4} ([O] - [O]_r) \quad (4.14)$$

kde [C], [O] je počáteční obsah uhlíku a kyslíku v oceli, hm. %  
[C]<sub>r</sub>, [O]<sub>r</sub> - rovnovážný obsah uhlíku a kyslíku v oceli, hm. % (při teplotě oceli  $t$  a vnějším tlaku  $p_V$ , resp. tlaku v bublině argonu  $P$ ).

Rovnováhu mezi obsahem uhlíku a kyslíku lze popsat pomocí rovnovážné konstanty reakce (4.12)  $K_C$  a parciálního tlaku CO nad hladinou lázně nebo v bublině CO,  $p_{CO}$ . Pro  $f_C = 1$  a  $f_O = 1$  platí

$$[C]_r = \frac{(p_{CO})_r}{K_C \cdot [O]_r} \quad (4.15)$$

Hodnoty  $K_C$  lze počítat z její teplotní závislosti

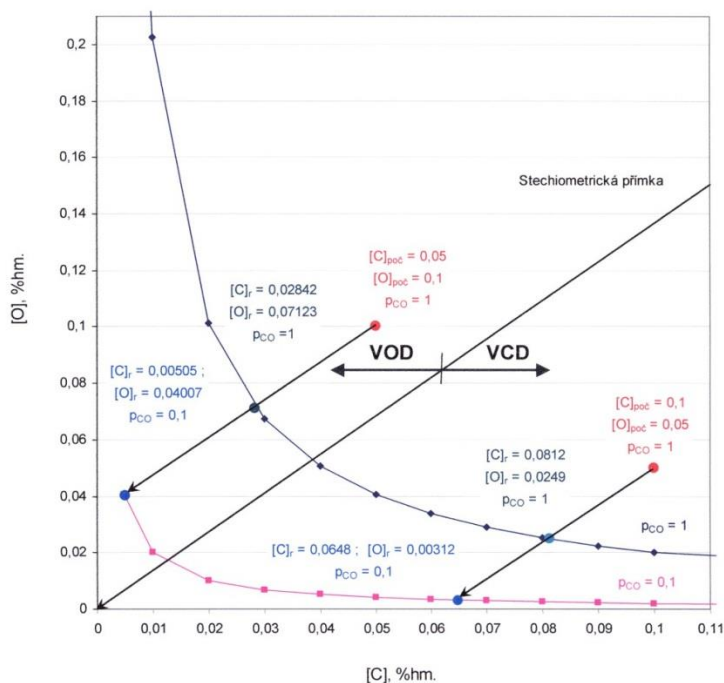
$$\log K_C = \frac{1160}{T} + 2,07 \quad (4.16)$$

Pro teplotu 1 600 °C  $K_C = 494$ . Rovnici (4.15) lze taktéž upravit na tvar (4.17)

$$[O]_r = \frac{p_{CO}}{494 \cdot [C]_r} \quad (4.17)$$

Na **obr. 4.3** je znázorněn:

- průběh uhlíkové reakce z výchozího obsahu  $[C]_{poč.} = 0,1 \text{ hm. } \%$  a  $[O]_{poč.} = 0,05 \text{ hm. } \%$  do rovnovážného obsahu uhlíku a kyslíku jednak při  $p_{CO} = 1$  a jednak při  $p_{CO} = 0,1$  v případě vakuové uhlíkové dezoxidace oceli VCD.
- průběh uhlíkové reakce z výchozího obsahu  $[C]_{poč.} = 0,05 \text{ hm. } \%$  a  $[O]_{poč.} = 0,1 \text{ hm. } \%$  do rovnovážného obsahu uhlíku a kyslíku jednak při  $p_{CO} = 1$  a jednak při  $p_{CO} = 0,1$  v případě oxidačního vakuování oceli VOD.



**Obr. 4.3:** Rovnováha mezi obsahem uhlíku a kyslíku v tavenině oceli při teplotě  $t = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativním tlaku  $p_{CO} = 1$  a  $p_{CO} = 0,1$  ( $K_C = 494$ )

#### □ Vakuová rafinace oceli

V současnosti nejvýznamnější cestou jak zvýšit jakost vyráběných ocelí je mimopecní vakuová rafinace oceli. Mimopecní vakuové zpracování oceli umožňuje provádět podstatnou část dohotovení tavby mimo výrobní pec. Konkrétně v tekuté oceli umožňuje:

- snížit obsah vodíku a dusíku,
- hluboko ocel oduhličít,
- dezoxidovat ocel pomocí VCD,
- ocel dolegovat na požadovanou značku,
- modifikovat nekovové vměstky v oceli.

**Fyzikálně-chemické základy pochodů probíhajících při vakuování oceli:** příznivé účinky vakuování oceli spočívají především ve snížení obsahu plynů rozpuštěných v oceli a v ovlivňování průběhu uhlíkové reakce, jejíž zplodinou je plynná fáze – oxid uhelnatý. Průběh odplynění oceli ve vakuu se uskutečňuje dvěma mechanismy:

- vznik plynných bublin v tavenině, jejich růst a vylučování z objemu taveniny. V případě odplyňování liciho proudu dochází z tohoto důvodu k rozpadu proudu oceli na samostatné kapky, v případě odplyňování v pánvi, vakuové komoře apod. nastává tímto účinkem var lázně. Pro tuto formu odplynění oceli má rozhodující význam uhlíková reakce.
- odplynění kovů difúzí atomů rozpuštěných plynů k povrchu taveniny a jejich přechodem do vnější atmosféry. V případě odplyňování liciho proudu se jedná o difúzi k povrchu kapek rozpadlého liciho proudu, v případě odplyňování hladinou lázně jde o difúzi plynů k povrchu této hladiny, resp. k povrchu bublin CO vzniklých v důsledku současně probíhající uhlíkové

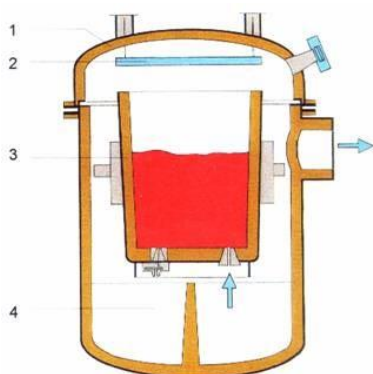
*reakce nebo k povrchu bublin do lázně dmýchaného argonu. Tato forma odplynění je typická pro snižování obsahu vodíku a dusíku v tavenině.*

#### □ Technologie rafinace oceli ve vakuu

Ke snížení obsahu vodíku a dusíku při vakuovém odplynění oceli v pánvi dochází především vylučováním těchto plynů z povrchu lázně a částečně i jejich difúzí do plynných bublin dmýchaného argonu nebo bublin oxidu uhelnatého v blízkosti hladiny kovu. K poklesu obsahu kyslíku, resp. uhlíku, dochází jak nukleací bublin CO v pórech vyzdívky pánve i na povrchu existujících nekovových vměstků, tak i vylučováním CO do plynné fáze nad hladinou lázně nebo do bublin dmýchaného argonu. Mezi základní způsoby rafinace oceli působením vakua patří:

- vakuování oceli v tavicí peci (EOP, indukční pec),
- vakuování oceli v pánvi umístěné v kesonu,
- vakuování v proudu oceli při jejím přelévání z pánve do pánve v kesonu nebo při liti oceli do kokily (v kesonu),
- vakuování oceli v komoře,
  - zdvižným způsobem DH (Dortmund-Hüttenunion),
  - oběžným způsobem RH (Ruhrstahl-Heraeus).

**Vakuové odplynění oceli v pánvi:** předností tohoto způsobu je jeho provozní jednoduchost. Základní zařízení pro odplynění oceli v pánvi se skládá z podtlakové komory a odsávacího systému. Podtlakovou komoru (keson) tvoří válcový plášť se dnem a víkem, viz **obr. 4.4**. Aby se mohla sledovat hladina kovu během vakuování, jsou ve víku umístěny pozorovací otvory a někdy i napojení na dávkovače ferostlavin. Ke snížení tlaku v podtlakové komoře slouží odsávací systém, který se skládá z těchto hlavních částí: vývěva, chladicí a čistící zařízení, spojovací potrubí, pomocná zařízení a měřicí přístroje. Nejdůležitější součástí odsávacího zařízení jsou vývěvy. Nejvíce se používají paroproudé ejektorové vývěvy. Pochod vakuování v pánvi je provázen intenzivním varem ocelí, a proto tlak v komoře musí být snižován pozvolna. Celková doba vakuování bývá 10 až 15 minut. Ocel pro vakuové zpracování v pánvi musí být přehřáta. Velikost tohoto přehřátí závisí především na hmotnosti tavby, chemickém složení vakuované oceli, době vakuování, při dezoxidaci a legování oceli v pánvi i na množství přidávaných legovacích přísad. Intenzita pohybu roztavené oceli se zvyšuje pomocí argonu přiváděného většinou prodyšnou tvárnici, která je umístěna ve dně pánve. Intenzitu pohybu oceli v pánvi lze zvýšit i pomocí indukčního míchání.

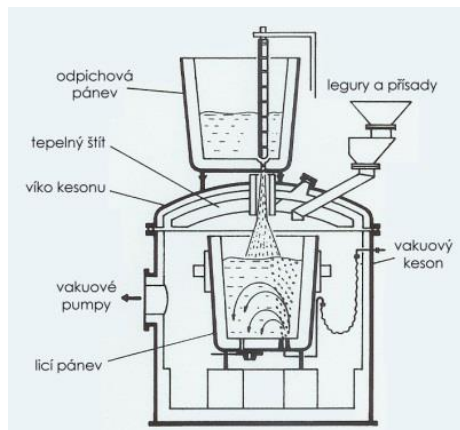


*Legenda: 1 – víko vakuového systému,  
2 – tepelný štít,  
3 – rafinační pánve,  
4 – vakuový keson.*

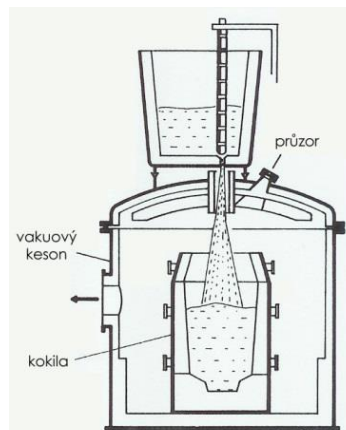
**Obr. 4.4:** Vakuové odplynění oceli v pánvi

**Vakuové odplynění oceli v proudu:** způsob vakuového zpracování ocelí v proudu je výhodný především při odlévání kovárenských ingotů. Při odplynění oceli v proudu je v kesonu umístěna buď kokila anebo licí pánve. Jakmile vnikne proud kovu do evakuovaného prostoru, dostává tvar kuželu, který se skládá z velkého množství kapek. Toto velké zvětšení povrchové plochy vakuovaného kovu umožňuje účinné odplynění za současného zintenzivnění průběhu povrchových reakcí. Příčinou rozstříku licího proudu na kapky je nukleace bublin CO ihned po proniknutí oceli do vakua. Pravděpodobnost nukleace bublin CO výrazně narůstá vzhledem k nulové hodnotě ferostatického tlaku po proniknutí proudu oceli do vakua.

Odlévá-li se vakuovaná ocel do pánve, je stupeň odplynění oceli zvyšován ještě v důsledku odplynění přes hladinu lázně a do bublin argonu. Při odlévání vakuovaného kovu přímo do kokily je sekundární odplynění oceli podstatně menší. Je omezeno jednak malou plochou taveniny v kokile, jednak chladicím účinkem stěn kokily. Zařízení pro vakuové zpracování oceli v proudu je ve svých základních částech v podstatě stejné jako zařízení pro odplynění v pánvi, viz **obr. 4.5** a **obr. 4.6**.



**Obr. 4.5:** Odplynění oceli v proudu systém pánve – pánve



**Obr. 4.6:** Odplynění oceli v proudu systém pánve – kokila

Při vakuovém zpracování oceli v proudu způsobem pánve – pánve je licí pánev postavena do kesonu, na jehož víku se nachází mezipánve a jejíž licí otvor je utěsněn hliníkovým kotoučem. Po uložení víka a mezipánve se z kesonu odčerpá vzduch až na hodnotu pracovního tlaku a tím je zařízení připraveno k lití. Při dalším postupu se ocel z odpichové pánve nalévá do mezipánve a po dosažení určité výšky se otevře její otvor, načech proud tekuté oceli protaví hliníkovou zátku (kotouč) ve výlevce a vtéká do licí pánve postavené do kesonu. Rychlost odtékání oceli z odpichové pánve do mezipánve je třeba řídit tak, aby hladina oceli v mezipánvi byla stále dostatečně vysoko, tj. asi dvě třetiny výšky mezipánve. Tento požadavek je odůvodněn tím, že během lití je prostor kesonu oddělen od vnější atmosféry toliko vrstvou tekuté oceli v mezipánvi. Protože v mezipánvi („pony“ pánve) dochází k sekundární oxidaci i naplynění oceli, často se v soustavě pánve – pánve, resp. pánve – kokila, mezipánve vynechává. Před zrušením podtlaku se doporučuje propláchnout keson inertním plynem ( $N_2$ , Ar), aby se vyloučila možnost explozivní reakce zbytkového CO a  $H_2$  se vzdušným kyslíkem. Obdobně se postupuje i při způsobu pánve – kokila. Jakmile dosáhne hladina oceli hlavový nástavec, přerušuje se vakuování a v průběhu odlévání hlavové části ingotu se do kesonu připouští vzduch, aby se zmenšila licí rychlost. Po ukončení odlévání a zrušení podtlaku se ponechá kokila s ingotem v kesonu až do úplného ztuhnutí oceli, což se často pokládá za zásadní nevýhodu této metody.

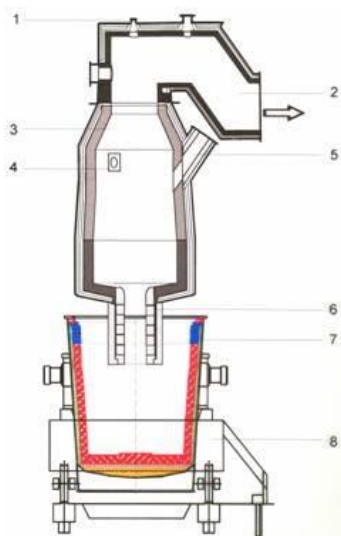
**Vakuové odplynění oceli zdvižným způsobem – DH proces:** při vakuovém odplynění oceli zdvižným způsobem, označovaným často dle místa svého vzniku jako DH proces (Dortmund – Hüttenunion), je tekutá ocel nasávána z licí pánve do zvláštní vakuové komory, viz **obr. 4.7**.

Vlivem rozdílu tlaku mezi vakuovou komorou a okolní atmosférou se v sacím hrdle vytvoří sloupec tekuté oceli, dosahující výšky okolo 150 cm. Část tekuté oceli vlivem vnějšího tlaku vnikne do vakuové komory, kde probíhá vlastní proces odplynění. Po odplynění nasátého množství oceli se vakuová komora zvedne (nebo pánve sníží) a odplyněná ocel přeteče zpět do pánve. Pro dokonalé odplynění oceli musí obsah pánve projít ponorným hrdlem nejméně třikrát až pětkrát (oběhové číslo), přičemž celková doba vakuování se pohybuje zpravidla v rozmezí 15 až 20 minut. Součástí zařízení, kromě vakuové komory, tvoří paroproudé vývěvy, chladicí a čisticí systém, spojovací potrubí, pomocné mechanismy včetně zdvižného, jakož i měřicí a regulační přístroje.

Stupeň odplynění oceli zdvižným způsobem je výrazně ovlivňován počtem zdvihů, který je dán poměrem doby vakuování a doby setrvání jedné dávky v komoře. Příznivý vliv má poměr hmotnosti dávky k celkové hmotnosti oceli v pánvi. Odplyňování oceli způsobem DH umožňuje nejen snížit obsah plynů, ale také obsah uhlíku, homogenizovat taveninu, včetně dezoxidace a legování za



podtlaku. Pro přísazování legujících přísad do komory slouží zásobníky opatřené vibračními podavači, vážicím systémem a příslušnými uzavíracími mechanismy a skluzy.

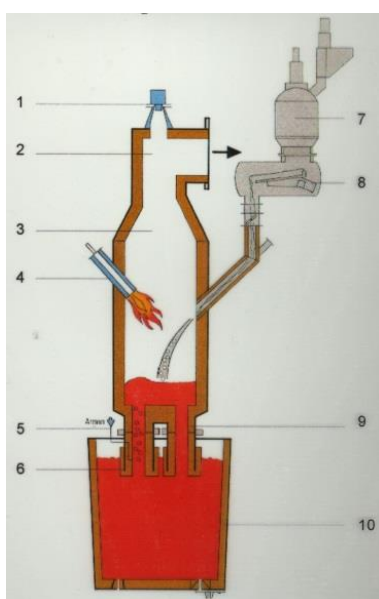


- Legenda:*
- 1 – průřez,
  - 2 – odsávání komory (vakuový systém),
  - 3 – vakuová komora (ponorná),
  - 4 – ohřev komory,
  - 5 – přísady legur,
  - 6 – hrdlo komory (násoska) pro vtok a výtok oceli,
  - 7 – lící pánev,
  - 8 – převážecí vůz.

**Obr. 4.7:** Vakuové odplynění oceli procesem DH

**Vakuové odplynění oceli oběžným způsobem – RH proces:** při vakuovém odplynění oceli zdvižným způsobem, označovaným jako RH proces (Ruhrstahl – Heraeus), je tavenina průběžně odplyňována ve vakuové ponorné komoře, do níž se ocel dopravuje sací rourou, viz **obr. 4.8**.

Přiváděním inertního plynu do nasávacího hrdla vzniká směs kovu a plynu o menší měrné hmotnosti, takže tato stoupá do vakuové komory. Dmýcháním inertu je ocel neustále v turbulentním pohybu. Plyny obsažené v oceli se uvolňují z jednotlivých kapek i ze vzdušného povrchu hladiny kovu. Průběh nasávání oceli a její odtok z vakuovací komory je plynulý. Odplyněná ocel odtéká výtakovou trubicí zpět do pánve. Má-li se dosáhnout snížení obsahu vodíku v oceli o padesát a více procent, potom obsah pánve musí projít tři až pětkrát vakuovací komorou. Před ponořením sacího a výtakového hrdla do pánve musí být obě hrdla chráněna plechem, který nedovolí, aby struska vnikla do vakuové komory. Ochranné kryty se po ponoření do oceli roztaví a umožní stoupání oceli do komory. Průběh tepelných ztrát je obdobný jako u DH procesu. Vakuová komora má samostatný, obvykle odporový ohřev.



- Legenda:*
- 1 – průmyslová kamera,
  - 2 – vakuový systém,
  - 3 – RH komora,
  - 4 – komorový přehřev,
  - 5 – přívod argonu,
  - 6 – ponorná vtoková trubice,
  - 7 – blokovácí vakuový systém pro přívod legur,
  - 8 – plnicí systém legur,
  - 9 – ponorná výtaková trubice,
  - 10 – rafinační pánev.

**Obr. 4.8:** Vakuové odplynění oceli procesem RH



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [4] Adolf, Z.: Mimopecní rafinace oceli, VŠB-TU Ostrava, 1991, 133 s.
- [5] Ghosh, A.: Secondary Steelmaking - Principles and Applications. New York, 2001, 322 p.
- [6] Fruehan, R. J.: The Making, Shaping and Treating of Steel, AISE Steel Foundation, 1998, 767 p.
- [7] Stolte, G.: Secondary Metallurgy - Fundamentals Processes Applications. Düsseldorf, 2002, 216 p.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- charakteristika průběhu odplynění oceli
- podmínky odplynění oceli
- vakuová rafinace oceli



### Otázky k probranému učivu

1. Popište průběh odplynění oceli.
2. Charakterizujte podmínky odplynění oceli.
3. Uveďte metody vakuování oceli.



## 5. Rafinace oceli syntetickými struskami



**Čas ke studiu:** 70 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- charakterizovat syntetické strusky
- popsat průběh odsíření oceli tekutou pánvovou struskou
- definovat mechanismus odsíření oceli



**Výklad**

### □ Charakteristika syntetických strusek

Syntetické strusky ovlivňují vlastnosti pánvové strusky nejen svým chemickým složením, ale i fázovým složením a zrnitostí, což se projeví na rychlosti tvorby pánvové strusky. Chemické a fázové složení, způsob přípravy, výroba a zrnitost uvedených syntetických strusek jsou však rozdílné. V současnosti jsou syntetické strusky vyráběny nejen z přírodních surovin, ale i různých druhotných surovin, a to buď přetavováním, sintrováním, peletizováním, briketováním nebo pouhým smícháním jednotlivých složek. Vlastní výroba však souvisí s účelem použití syntetické strusky, dále pak se surovinovými zdroji, ze kterých se struska vyrábí. Požadavky na syntetické strusky lze shrnout do následujících bodů:

- *nízká teplota tání i dobrá tekutost díky rychlému roztavení v tekuté oceli podporující rafinační reakce,*
- *opakující se přesné chemické složení, které umožňuje optimalizaci rafinačních procesů,*
- *vysoká homogenita složení,*
- *minimální množství prvků znečišťujících ocel, jako je: dusík, vodík, síra atd.,*
- *schopnost pohlcovat nekovové vměstky,*
- *minimální opotřebení žárovzdorných materiálů lící pánve,*
- *neohrožování zdraví, životního prostředí z hlediska bezpečnosti práce,*
- *čistota emisí (neuvolňování škodlivých a toxických látek).*

Syntetické strusky obsahují obvykle  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  a naopak minimum  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$  a síry. Úkolem syntetických strusek přidávaných do pánve je zlepšit fyzikální a chemické vlastnosti pánvových strusek, přičemž uvedené požadavky ovlivňují zásaditost, viskozitu strusky a mezifázové napětí. Tyto vlastnosti jsou však také závislé na chemickém složení syntetické strusky a na její teplotě tavení. Vyráběné syntetické strusky lze rozdělit do následujících skupin:

- *přetavené nebo sintrované syntetické strusky - patří mezi nejučinnější strusky, které mají obsah  $\text{CaO}$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v poměru blízkém 1:1. Jako vstupní surovina jsou používány přírodní suroviny (např. bauxit, vápenec, dolomit atd.). Tyto syntetické strusky se díky vzniklému eutektiku taví již při teplotách  $1362^\circ\text{C}$  a jsou rychle asimilovány vzniklou struskou po odpichu, přičemž tak snižují její viskozitu. Vysoká kvalita je však spojena s relativně vysokou cenou.*
- *peletizované nebo briketované syntetické strusky - vznikají peletizací nebo briketací za studena a na trhu se objevují z důvodu vysoké ceny přetavených a sintrovaných strusek. Vstupní surovinou jsou v těchto případech různé druhotné suroviny představující prachové zbytky z hliníkových stěrů, strusky z výroby vanadu, katalyzátory s vysokým obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a jiné hlinitanové materiály v kombinaci s hašeným vápnem nebo dolomitickým vápencem. Pelety vzniklé touto technologií výroby obsahují nežádoucí chemicky vázanou vodu a jejich pevnost*

není vždy dostatečná, což způsobuje problémy s prašností při manipulaci. Tento problém je odstraněn u briketovaných strusek, které však vykazují větší rozměry, což se projevuje pomalejším rozpouštěním.

- práškové směsi syntetické strusky – představují práškové směsi balené v sáčcích a jsou asi nejširší skupinou syntetických strusek. Jedná se převážně o odsířovací a rafinační směsi. Hlavní nevýhodou těchto směsí je prašnost při aplikaci a nemožnost strojního dávkování, pokud jsou baleny v sáčcích. Výhodou je absence nežádoucích látek obsažených v některých pojivech, možnost použití páleného vápna ve směsích a vysoká rychlost rozpouštění.

Všechny výše uvedené typy syntetických strusek lze tedy aplikovat v provozních podmínkách s určitými omezeními vyplývajícími z použitých surovin, technologie výroby a jejich chemického složení. Výběr vhodné syntetické strusky závisí na jakosti vyráběné oceli, technologii výroby a je tedy vhodné stanovit:

- zařízení, kde má být struska použita (LF, IR-UT, RH, DH, VD, VOD atd.),
- charakterizovat vlastnosti, které má ocel splňovat (pevnost, tažnost atd.),
- druh oceli, na kterou má být syntetická struska použita, např.:
- ocel dezoxidovaná: - křemíkem,  
- hliníkem,  
- hliníkem i křemíkem,
- ocel: - odsířená,  
- s řízeným obsahem síry,  
- vysoce křemičitá,
- množství a složení pecní strusky přetečené do pánve,
- typ žárovzdorného materiálu použitého jako vyzdívka lící pánve.

Výše uvedené parametry určují oblasti chemického a fázového složení, které by měly mít syntetické strusky při výrobě dané oceli. V následující **tab. 5.1** jsou uvedeny příklady syntetických strusek používaných jako přísady do rafinačních pánvových strusek.

**Tab. 5.1:** Chemické složení vybraných syntetických strusek (hm. %)

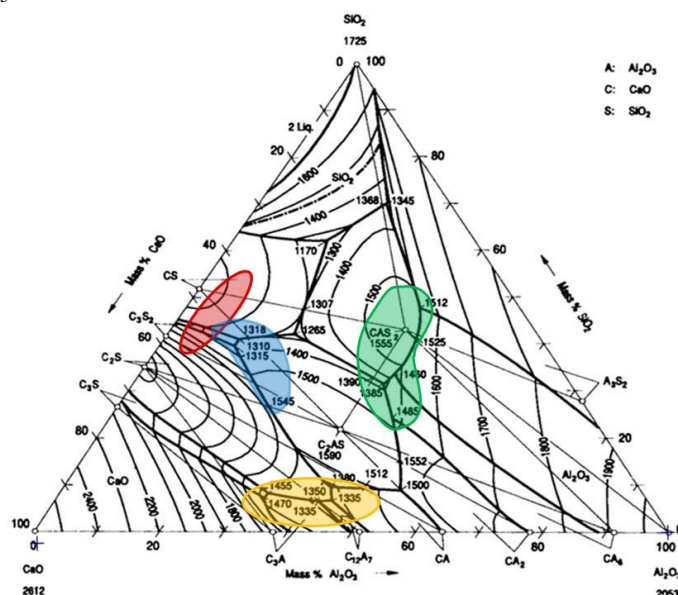
Syntetická struska	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	C	TiO <sub>2</sub>	Poznámka
CALUMET 60	31,0	4,0	57,0	8,0	0,2	0,8	0,4	xxx	xxx	přetavená
CALUMET 70	23,0	0,5	72,0	2,5	0,2	1,5	0,03	0,1	xxx	přetavená
Lafarge LSDF	50,7	3,5	40,6	1,0	1,4	0,1	0,04	0,05	1,45	přetavená
CAS 55	42,5	1,0	52,3	0,3	1,6	0,02	0,05	0,07	xxx	xxx
JAP	37,9	7,5	44,3	2,2	0,2	0,02	0,10	0,49	xxx	xxx
Antrakal	8,0	3,6	75,3	5,9	1,6	1,80	0,01	0,40	0,1	xxx
Miluflux	4,0	1,0	75,0	12,0	0,6	5,2	0,01	0,20	0,2	xxx
	5,0	2,0		18,0	1,1	3,40		0,08	0,4	xxx
Wollastonit	38,1	37,9	6,9	3,6	3,4	xxx	xxx	2,6	0,5	xxx
Reflux	48,0	4,0	44,0	1,0	1,0	xxx	xxx	0,1	0,2	sintrovaná
Slagmag 90	3,0	0,7	-	88,0	7,8	xxx	xxx	xxx	xxx	
Almagen	12,0	5,0	55,0	10,0	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	Al <sub>kov</sub> ~ 10%
Alkaten	12,0	5,0	65,0	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	Al <sub>kov</sub> ~ 10%

Syntetické strusky jsou sázeny při odpichu oceli do pánve nebo do pánvové pece a obvykle mají jako hlavní cíl urychlit tvorbu tekuté pánvové strusky. Syntetické strusky představují multi-komponentní systémy CaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – MgO – (SiO<sub>2</sub>) s minimálními obsahy ostatních složek. V současnosti jsou nejpoužívanější zásadité pánvové strusky, které zkracují a prohlubují proces odsíření oceli. Naopak

snížení zásaditosti pánvové strusky a zvýšení její viskozity (snížení tekutosti) je vyžadováno při rafinaci oceli s řízeným (to znamená zvýšeným) obsahem síry.

Příklady různých typů rafinačních strusek vytvářených pomocí struskotvorných přísad (vápno, vápenec,  $\text{CaC}_2$  a syntetické strusky) jsou uvedeny v ternárním diagramu na **obr. 5.1** a jejich vlastní charakteristika je uvedena níže:

- oblast I (žlutá) – představuje rafinační strusku aplikovanou při výrobě čisté oceli o velmi nízkých obsazích Al, který byl modifikován (ošetřen) Ca. Uvedená pánvová struska umožňuje odsíření.
- oblast II (červená) – představuje wollastonitovou strusku aplikovanou při výrobě drátů (určených pro tváření za studena, např. kordové oceli) nebo při výrobě automatových ocelí (ocelí s vysokým obsahem síry).
- oblast III (zelená) – představuje pánvovou strusku aplikovanou při výrobě oceli určené na výrobky s vysokými požadavky na povrchovou jakost (obruby ložisek, hydraulické cylindry, papírenské válce). Tato pánvová struska neumožňuje odsíření oceli, ale je charakteristická vysokou absorpcí vměstků  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- oblast IV (modrá) – představuje pánvovou strusku určenou pro výrobu ložisek s nízkým obsahem C a Si bez přídavku Al a s modifikací Ca. Tato struska vykazuje vysokou absorpci vměstků  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Obr. 5.1:** Příklady různých typů pánvových strusek – oblast I (žlutá barva), oblast II (červená barva), oblast III (zelená barva) a oblast IV (modrá barva)

#### □ Odsíření oceli tekutou pánvovou struskou

Hlavní úlohou pánvové strusky při rafinaci oceli v pánvi je odsíření pomocí reakcí probíhajících mezi ocelí a struskou. Obsah síry v oceli je v průběhu zpracování na zařízeních sekundární metalurgie závislý na následujících faktorech:

- na aktivitě kyslíku v oceli, která je většinou určována obsahem hliníku v oceli (prvkem s nejvyšší afinitou ke kyslíku),
- na chemickém složení strusky, především na obsahu  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , ale také  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{MgO}$  a hmotnosti strusky,
- na počátečním obsahu síry v oceli odpíchnuté z primárního agregátu (elektrická oblouková pec atd.),
- intenzitě míchání, aby se obnovovalo mezifázové rozhraní ocel – struska a systém se co nejvíce přiblížil rovnováze,
- na teplotě.

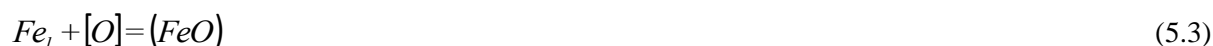
Řízení obsahu síry lze úspěšně realizovat vývojem aktivity kyslíku v oceli a řízením zásaditosti a také tekutosti strusky, tzn. řízením chemického složení a teploty systému ocel – struska. Hlavní odsiřující složkou pánvových strusek je oxid vápenatý a proces odsíření oceli lze popsat reakcí:



Slučovací volná entalpie CaO je zápornější než slučovací volná entalpie CaS a tudíž k odsíření podle rovnice (5.1) může dojít pouze za předpokladu, že uvolněný kyslík bude vázán na stabilní sloučeninu, a tak odváděn z reakční soustavy. Z rovnovážné konstanty reakce (5.1) lze obsah síry vyjádřit vztahem:

$$[S] = \frac{1}{K_S} \cdot \frac{a_{[O]}}{f_{[S]}} \cdot \frac{a_{(CaS)}}{a_{(CaO)}} \quad (5.2)$$

Dosažení nízkých obsahů síry je možné pouze v podmínkách hluboko dezoxidovaných ocelí při rafinaci struskou s vysokou aktivitou oxidu vápenatého, respektive nízkým poměrem  $a_{(CaO)}/a_{(CaS)}$ . Pokud by ocel neobsahovala prvky s vyšší afinitou ke kyslíku, než má železo, obsah kyslíku v oceli určuje obsah FeO ve strusce, dle reakce:



Proces odsíření limitovaný obsahem FeO ve strusce lze vyjádřit pomocí rovnic (5.1) a (5.3).



Dosažitelný obsah síry je funkcí aktivity FeO ve strusce, aktivity CaO a CaS ve strusce a teploty.

$$[S] = \frac{a_{(CaS)} \cdot a_{(FeO)}}{K_S^{FeO} \cdot f_S \cdot a_{(CaO)}} \quad (5.5)$$

Z této rovnice (5.5) vyplývá, že nízké obsahy síry v oceli lze dosáhnout pouze pod struskou s velmi nízkým obsahem FeO (max. 1 až 2 hm. %). Další podmínkou je vysoká aktivita CaO (obsah min. 45 až 55 hm. %) a nízký poměr  $a_{(CaO)}/a_{(CaS)}$  stejně jako u rovnice (5.2). Vysoká aktivita CaO ve strusce vyžaduje i nízký obsah kyselého oxidu SiO<sub>2</sub> tak, aby zásaditost strusky byla minimálně 3,0 až 3,5.

V případě, že je ocel odsiřovaná v pánvi struskou se sníženým obsahem kyslíku po předchozí dezoxidaci, není obsah kyslíku v oceli určován obsahem FeO ve strusce, nýbrž obsahem dezoxidujícího prvku s nejvyšší afinitou ke kyslíku v oceli. Z prvků běžně používaných k dezoxidaci (Mn, Si, Al) je to hliník. Při dezoxidaci oceli hliníkem dochází k následující reakci:



Proces odsíření oceli za přítomnosti dezoxidálního hliníku lze pak vyjádřit kombinací rovnic (5.1) a (5.6)



Rovnovážný obsah síry v oceli dezoxidované hliníkem lze z rovnice (5.7) odvodit:

$$[S] = \frac{a_{(CaS)} \cdot a_{(Al_2O_3)}^{1/3}}{K_{S-Al} \cdot a_{(CaO)} \cdot f_{[S]} \cdot f_{Al}^{2/3} \cdot [Al]^{2/3}} \quad (5.8)$$

V uvedené rovnici (5.8) je vztah mezi sírou a kyslíkem v oceli vyjádřen prostřednictvím obsahu hliníku v oceli. Zatímco hodnoty aktivitních součinitelů lze vypočítat pomocí interakčních koeficientů, poměr aktivit CaS, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a CaO je nutno pro konkrétní značku oceli stanovit empiricky.

## □ Mechanismus a kinetika odsíření

Přechod síry z oceli do roztavené strusky se skládá z následujících dílčích článků:

- difúze atomů síry z objemu kovu k mezifázové hranici kov – tekutá struska a současná difúze aniontů  $O^{2-}$  k tomuto mezifázovému rozhraní,
- adsorpce síry na mezifázovém rozhraní následovaná elektrochemickou reakcí s přítomnými anionty kyslíku:



- difúze aniontů  $S^{2-}$  vrstvou strusky obsahující zplodinu odsíření  $CaS$  k volným kationtům  $Ca^{2+}$  ve strusce. Současně probíhá i difúze kyslíku z mezifázového rozhraní do objemu kovu,
- rovnovážná reakce aniontů síry s kationty vápníku v tekuté strusce.



Volné anionty kyslíku, které doprovázejí přechod síry z kovu do strusky, jsou ve strusce přítomny v důsledku disociace oxidu vápenatého.



Limitujícím článkem procesu odsíření kovu tekutou struskou je difúze aniontů  $S^{2-}$  ve struskové fázi, která má o 1 až 2 řády vyšší viskozitu než tekutá ocel. Protože nejpomaleji probíhá difúze síry z povrchu do objemu struskové fáze, obsah síry v povrchu strusky je trvale v rovnováze a obsahem síry v objemu kovu.

Dalším významným činitelem, který působí na rychlost odsíření tekutou syntetickou struskou, je velikost měrného povrchu mezi struskovou a kovovou fází a viskozita strusky. Vysoce účinným způsobem zvětšení měrného povrchu je emulgace strusky při dopadu kovu vytékajícího z pece na roztavenou strusku v pánvi. Emulze strusky má tvar kulových kapek, přičemž emulgace strusky a kovu patří mezi nejvýznamnější činitele urychlující rafinaci oceli syntetickou struskou. Zmenší-li se poloměr kapky strusky např. 10krát, vzroste měrný povrch strusky 10 000krát.

## □ Charakteristika rafinační strusky

Za optimální rafinační strusku pro ocel dezoxidovanou hliníkem a určenou pro sekundární metalurgii se považuje vápenato – hlinitanová struska, která by měla obsahovat následující podíly oxidů: 55 až 60 %  $CaO$ , více než 25 %  $Al_2O_3$ , méně než 6 %  $SiO_2$ , cca 3 až 8 %  $MgO$  a méně než 1 %  $FeO$ . Pro dosažení hlubokého odsíření oceli pomocí rafinační strusky vytvořené ze syntetických strusek:

- pro dosažení vysokého stupně odsíření je nutno zajistit minimální obsahy  $FeO$ ,  $MnO$ ,  $Fe_2O_3$  a  $P_2O_5$  (pod 3 hm. %) oxidů ve strusce, což úzce souvisí se zabezpečením minimálního průniku pecní strusky do pánve s následnou redukcí.
- vyšší přídavek struskotvorných přísad ( $CaC_2$  a syntetické strusky) a dezoxidačních přísad ( $Al$ ) do lící pánve během odpichu.
- stupeň odsíření souvisí i s množstvím použité odsiřovací směsi. Je však nutné mít na zřeteli případné ochlazovací účinky této směsi na lázeň.
- stupeň odsíření závisí na použitém typu vyzdívky pánve. Nejlepších výsledků je dosahováno na bazických či vysoce hlinitých žárovzdorných vyzdívkách.
- pro dosažení hlubokého odsíření je nutno z kinetického hlediska zajistit dokonalý styk mezi kovem a rafinační směsí a vysokou měrnou reakční plochu mezi struskou a kovem (mícháním inertním plynem) a požadovanou teplotu rafinační strusky.
- rozdělovací součinitel síry je silně ovlivňován bazicitou strusky a teplotou, a proto je nutno zajistit pro co nejhlubší odsíření dostatečně vysokou teplotu a bazicitu ( $B > 4,5$ ) strusky.
- předpokladem pro dosažení hlubokého odsíření oceli je hluboká dezoxidace oceli a tedy zajištění nízké aktivity kyslíku v oceli, která by se měla pohybovat pod 4 ppm pro zajištění nízkého obsahu síry v kovu.

- *pro komplexní charakteristiku strusky se jeví výhodné využívat tzv. sulfidickou kapacitu strusek.*
- *snižení tlaku v prostoru nad zpracovávanou ocelí významně zvyšuje účinnost odsíření.*



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [8] Adolf, Z.: Mímopecní rafinace oceli, VŠB-TU Ostrava, 1991, 133 s.
- [9] Ghosh, A.: Secondary Steelmaking - Principles and Applications. New York, 2001, 322 p.
- [10] Fruehan, R. J.: The Making, Shaping and Treating of Steel, AISE Steel Foundation, 1998, 767 p.
- [11] Stolte, G.: Secondary Metallurgy - Fundamentals Processes Applications. Düsseldorf, 2002, 216 p.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- charakteristika syntetických strusek
- odsíření oceli tekutou pánvovou struskou
- mechanismus a kinetika odsíření



### Otázky k probranému učivu

1. Charakterizujte vlastnosti a základní typy syntetických strusek.
2. Popište průběh odsíření oceli tekutou pánvovou struskou.
3. Uveďte mechanismus průběhu odsíření oceli.

## 6. Pánvové pece a zavádění plněných profilů do oceli



**Čas ke studiu:** 40 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat rozdělení pánvových pecí
- popsat základní typy pánvových pecí LF, CAS-OB
- charakterizovat princip zavádění plněných profilů



**Výklad**

### □ Rozdělení pánvových pecí

Rozvoj pánvových pecí souvisí s rozvojem a cíli sekundární metalurgie. V současnosti jsou pánvové pece již nedílnou součástí vybavení všech moderních oceláren. Pánvové pece lze rozdělit dle několika kritérií:

- dle způsobu přehřevu oceli:
  - obloukovým přehřevem - elektrický oblouk,
  - s chemickým přehřevem pomocí Al, Si,
- dle pracovního tlaku:
  - atmosférický tlak (pánvová pec LF),
  - vakuum (pánvová pec ASEA),
- dle způsobu míchání oceli:
  - dmýchání Ar porézni tvárnici ve dně pánve,
  - indukční míchání oceli.

Výhody pánvových pecí lze shrnout do následujících bodů:

- umožňují snížit odpichovou teplotu oceli,
- snížení opotřebení vyzdívky pece,
- zvýšení výrobnosti pece převedením rafinačního údobí primárního agregátu na pánvovou pec,
- umožňují synchronizovat pecní agregát se ZPO,
- intenzivní rafinační účinek - intenzivní hluboké odsíření,
- struska má stejnou nebo vyšší teplotu než ocel v pánvové peci (nižší viskózní strusky, lepší odsíření oceli),
- zajišťuje přesné lící teploty pro ZPO v rozsahu  $\pm 2,5$  až  $5$  °C.

### □ Pánvová pec - LF

Pánvová pec LF (*Ladle Furnace*) představuje základní agregát pánvové metalurgie s přehřevem pomocí elektrického oblouku. Přehřev elektrickým obloukem funguje na stejném principu jako v případě elektrické obloukové pece, přičemž požadavky na výkon transformátoru jsou cca 6krát nižší. Ohřevem pomocí elektrického oblouku je udržována teplota oceli na stabilní úrovni nebo může být mírně zvýšena dle požadavku technologie výroby a jakosti vyráběné oceli.

V průběhu zpracování oceli na pánvové peci LF je běžně prováděno míchání oceli pomocí argonu dmýchaného skrz porézni tvárnici dnem pánve pro zajištění homogenizace (od minimálního po maximální průtok). Pánvová pec LF umožňuje kromě přehřevu oceli a homogenizace provést



dolegování nebo mikrolegování oceli, a to pomocí zásobníků s násypkami nebo podavačů plněných profilů představujících pomocné zařízení.

Jedním z hlavních úkolů pánvové pece je hluboké odsíření oceli pomocí rafinační strusky. Pro splnění uvedeného požadavku je pánvová struska vytvořena ze struskotvorných přísad přidávaných během odpichu a struskotvorných přísad přidaných v průběhu zpracování oceli na pánvové peci LF. Pánvová struska neslouží pouze k odsíření oceli, ale také umožňuje překrytí elektrických oblouků a zvyšuje životnost vyzdívky před působením sálavého tepla. Na **obr. 6.1** je uvedena ukázka základních částí pánvové pece LF.



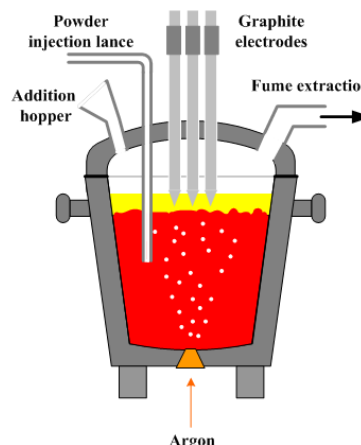
a) grafitové elektrody



b) otevřená dvířka pánvové pece



c) pánvová pec LF v provozu



d) základní schéma pánvové pece LF

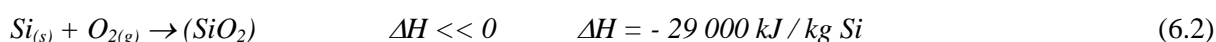
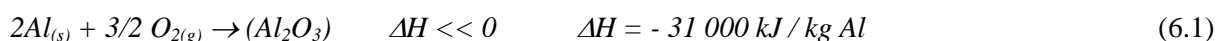
**Obr. 6.1:** Ukázka základních částí pánvové pece LF

#### □ Pánvová pec s chemickým přihřevem – IR-UT, CAS-OB

Alternativou k pánvovým pecím LF jsou pánvové pece s chemickým přihřevem a kyslíkovou tryskou CAS-OB (*Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling-Oxygen Blowing*) nebo IR-UT (*Injection Refining with Temperature Raising Capability*).

Pánvová pec CAS-OB nebo IR-UT je standardně vybavena kyslíkovou tryskou, pomocí které je dmýchán  $O_2$  na hladinu lázně spolu se zařízením pro přidávání granulovaného Al nebo FeSi do reakční oblasti. Reakční oblast představuje oko lázně, které ohraničuje tzv. snorkel (železobetonová skruž). Tato skruž se spustí na hladinu po vytvoření oka lázně, a to pomocí dmýchání argonu. Následně se začne dmýchat  $O_2$  a přidávat Al nebo FeSi. Vlastní oddělení strusky od kovu pomocí tzv. snorkelu probíhá v průběhu ohřevu, přičemž ohřev se provádí jen na počátku zpracování oceli. Také v tomto případě je v průběhu zpracování oceli dmýchán argon, a to jak porézní tvárnici ve dně pánve, tak i horem pomocí trysky.

Ohřev oceli přidavky Al nebo FeSi probíhá dle následujících rovnic:



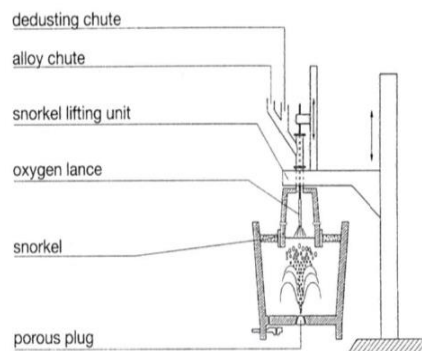


Z rovnic (6.1) a (6.2) vyplývá, že se jedná o silně exotermická reakce, přičemž přidáním 1 kg Al na 1t oceli a objemu  $0,6 \text{ m}^3 \text{ O}_2$  se ocel ohřeje o  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . V případě přidání 1 kg Si na 1t oceli a objemu  $0,8 \text{ m}^3 \text{ O}_2$  se ocel ohřeje o  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Na **obr. 6.2** je uvedena ukázka základních částí pánvové pece CAS-OB.



a) snorkel pánvové pece CAS-OB v provozu



b) základní schéma pánvové pece CAS-OB

**Obr. 6.2:** Ukázka základních částí pánvové pece CAS-OBLF

#### □ Zavádění plněných profilů do oceli

Zavádění plněných profilů do oceli představuje metodu, jejímž cílem je:

- řízená a hloubková dezoxidace oceli,
- definovaný propal Al = 98% pro dezoxidaci,
- přesné, úsporné legování na spodní hranici předpisu zavedením plněných profilů,
- modifikace vměstků Ca – Si, Ca – Fe,
- odsíření.

Metoda zavádění Al drátu do oceli spočívá v:

- Al drát (o tloušťce 3 až 10 mm) se odvíjí z bubnu a následně je zaváděn (vstřelován) rychlostí  $2,5$  až  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  přes strusku do oceli v pánvi, a to takovou rychlostí, aby k jeho rozpuštění došlo u dna (nebo nad dnem) pánve. Veškerý Al je použit k oxidaci Fe, přičemž je dosaženo minimálního propalu,
- v průběhu zpracování oceli je dmýchán inertní plyn a zavádění Al drátu nesmí být prováděno v místě proti proudu dmýchaného inertního plynu, aby nedošlo k propalu do strusky. Zavádění Al je tedy prováděno do klesajícího proudu dmýchaného inertního plynu,
- v průběhu zpracování oceli je používán manipulátor na měření teploty oceli a aktivity kyslíku, aby bylo dosaženo homogenní oceli pro stanovení množství zaváděného Al, přičemž je změřena teplota a aktivita kyslíku a následně je na základě zjištěných parametrů stanoveno množství např. Al jako dezoxidovadla pro snížení aktivity kyslíku na požadovanou úroveň. Využití Al drátu dosahuje 98 % a jedná se o úsporné dezoxidování s minimálním a konstantním propalem.

Metoda plněných profilů do oceli spočívá v:

- plněný profil je plněný legujícími přísadami – feroslitiny FeTi, FeV atd.) nebo přísadami pro modifikaci nekovových vměstků (CaSi, CaFe, CaAl atd.).
- vlastní zavádění (vstřelování) plněných profilů probíhá po snížení aktivity kyslíku na požadovanou úroveň (dezoxidaci). V tom případě je plněný profil zaváděn do oceli rychlostí

*0,3 až 2 m·s<sup>-1</sup> přes strusku do oceli v pánvi. Veškerý plněný profil je použit k legování nebo modifikaci vměstků, přičemž je dosaženo 10 %,*

- *v průběhu zpracování oceli je dmýchán inertní plyn a zavádění plněného profilu nesmí být prováděno v místě proti proudu dmýchaného inertního plynu, ale do klesajícího proudu dmýchaného inertního plynu,*
- *volbou, množstvím, typem nebo kombinací plněného profilu lze vytvářet vměstky požadovaného složení (např. tekuté),*

Na **obr. 6.3** je uvedena ukázka zařízení pro zavádění Al drátu a plněných profilů.



**Obr. 6.3:** Ukázka zařízení pro zavádění Al drátu a plněných profilů



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Adolf, Z.: MIMOPECNÍ rafinace oceli, VŠB-TU Ostrava, 1991, 133 s.
- [2] Ghosh, A.: Secondary Steelmaking - Principles and Applications. New York, 2001, 322 p.
- [3] Stolte, G.: Secondary Metallurgy - Fundamentals Processes Applications. Düsseldorf, 2002, 216 p.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- rozdělení pánvových pecí
- charakteristika pánvových pecí LF a CAS-OB
- princip vlivu zavádění plněných profilů do oceli



### Otázky k probranému učivu

1. Charakterizujte základní typy pánvových pecí.
2. Popište pánvové pece LF a CAS-OB.
3. Uveďte princip zavádění plněných profilů do oceli
4. Definujte úkoly plnicí zaváděné plněné profily do oceli.

## 7. Základní charakteristika odlévání oceli



**Čas ke studiu:** 60 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- charakterizovat základní způsoby odlévání oceli
- popsat odlévání oceli do kokil (horem a spodem)
- definovat odlévání oceli na zařízení plynulého odlévání



**Výklad**

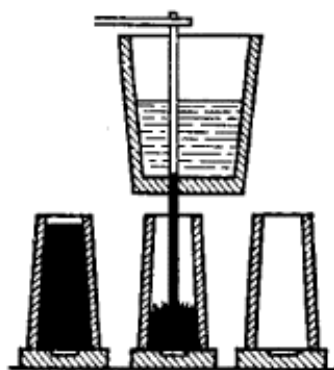
### □ Základní rozdělení odlévání oceli

Odlévání oceli představuje důležitou součást výrobního procesu. Převážná část vyrobené oceli je v současné době odlévána na zařízeních plynulého lití (90 %) a menší část je odlévána do kokil na ingoty (9 %). Tradiční postup odlévání oceli do kokil činí cca 8,5 % a oceli na odlitky cca 1,5 %. Podíl odlité oceli na zařízení pro plynulé odlévání (ZPO) činí ve vyspělých státech téměř 100 %. Odlévání oceli lze tedy rozdělit na následující technologie:

- odlévání oceli do kokil – horem nebo spodem,
- odlévání oceli na odlitky,
- odlévání oceli na zařízení plynulého odlévání.

### □ Odlévání oceli do kokil

Provádí se v licí hale ocelárny do licích souprav, které se skládají z litinové formy, tzv. kokily, které jsou umístěny buď na pojízdných vozech, nebo jsou postaveny na licím poli. Ocel se do kokil odlévá buď přímo z odpichové pánve, která je opatřena uzavíratelnými výlevkami. V tomto případě se jedná o **odlívání horem**, což je pro představu uvedeno na **obr. 7.1**.



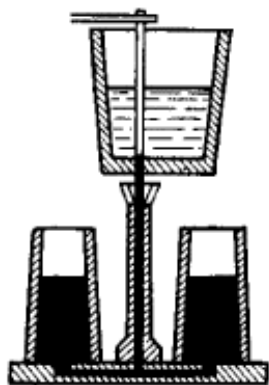
a) schéma odlévání oceli horem



b) ukázka odlévání horem

**Obr. 7.1:** Příklad odlévání oceli horem

Při **odlívání spodem** se ocel nelije do kokil přímo, ale přes licí kůl a vtokové kanály, rovnoměrně pak stoupá ve všech kokilách současně. Kokily u tohoto způsobu odlévání mohou být rovněž umístěny na licích vozech nebo v licích jámách. Tvar kokil se řídí požadavkem válcoven. Schéma lití oceli spodem je uvedeno na **obr. 7.2**.



a) schéma odlévání oceli spodem



b) ukázka odlévání spodem

**Obr. 7.2:** Příklad odlévání oceli spodem

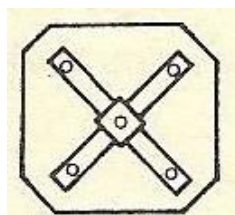
Z předností lití horem ve srovnání s litím spodem je možno jmenovat menší pracnost a spotřebu žárovzdorných materiálů při přípravě lící soupravy (odpadá vybourávání starých a vyzdívání nových lících systémů v lících deskách apod.), menší ztráty oceli (jedná se zejména o ztráty vznikající při lití spodem ztuhnutím oceli v lícím systému – tzv. „kosti“), vhodnější uložení tepelného centra tuhnucího ingotu v jeho horní části, menší možný stupeň dodatečného znečištění oceli stykem s lící keramikou, menší pokles teploty oceli mezi pánví a kokilou aj.

Z nevýhod lití horem ve srovnání s litím spodem je možno jmenovat větší možnost vzniku některých vad, jako např. šupin, větší časový interval pro odlití pánve, větší počet uzavření pánve a tím i větší opotřebením keramiky uzavíracího mechanismu, horší sledování a regulace lící rychlosti, větší opotřebením kokil aj.

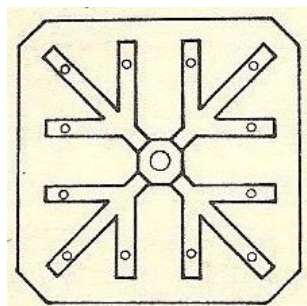
Odlévání oceli horem nebo spodem se provádí do lící soupravy. Pokud se ocel odlévá horem, je zapotřebí lící podložka, na níž je postavená kokila, která se volí podle druhu odlévané oceli. Za dob, kdy se ještě odlévala neuklidněná ocel, by se soustava skládala pouze z těchto částí, ale pokud se odlévá ocel uklidněná, musí se do soustavy ještě zařadit hlavový nástavec. Lící souprava se skládá z následujících základních částí:

- lící deska,
- kokila,
- kokilové podložky,
- hlavový nástavec.

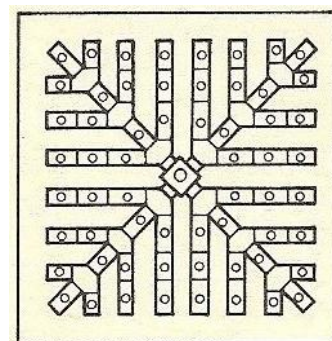
**Lící deska** se používá jako základna pro odlévání. Pokud jsou odlévány těžké kovářské ingoty, tak jsou lící desky umístěny v lící jámě. Jestliže se odlévají menší ingoty, může být lící deska umístěna na speciálním voze, ale dnes se většinou lící desky umísťují do lících jam, kde ingoty chladnou v kokilách na vzduchu.



a) lící deska pro 4 kokily



b) lící deska pro 12 kokil



c) lící deska pro 60 kokil

**Obr. 7.3:** Ukázka různých lících desek pro odlévání spodem

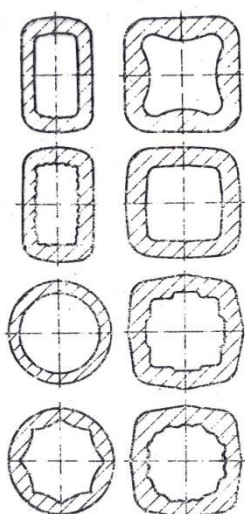


Na **obr. 7.3** jsou uvedeny licí desky pro odlévání 4 kokil, 12 kokil a dokonce až 60 kokil. Pokud se odlévá těžký kovářský ingot, je v licí desce pouze jeden otvor pro přívod oceli do kokily. Dále na **obr. 7.3** lze vidět ve středu licích desek tzv. hvězdicí a licí kanálky. Do hvězdice je přiváděna horem tekutá ocel, která je poté rovnoměrně odváděná průtokovými otvory do licích kanálků.

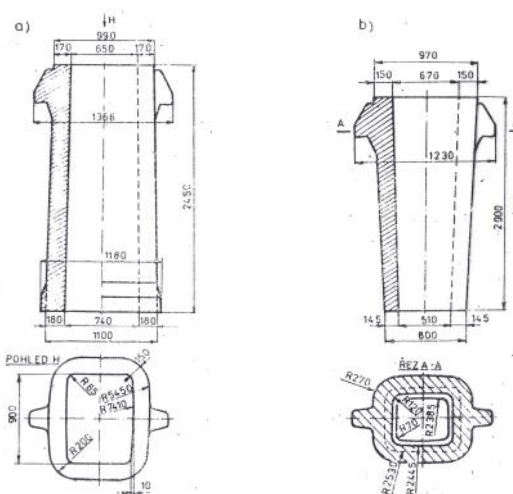
**Kokila** je litinová forma kruhového, čtvercového, obdélníkového nebo mnohoúhelníkového průřezu, v níž tekutá ocel ztuhne v žádaný tvar, aby mohla být jako ocelový ingot zpracována válcováním nebo kováním. Na **obr. 7.4** jsou uvedeny nejčastěji používané průřezy kokil.

Materiál k výrobě kokil představuje šedá litina s lupínkovým grafitem (3,3 ÷ 4,0 % C, 0,4 ÷ 0,9 % Mn; 1,2 ÷ 2,2 % Si; max. 0,2 % P; max. 0,05 % S), tvárná litina nebo železo prvního tavení s úpravou.

Dle tvaru rozdělujeme kokily, a to na kokily typu A k odlévání neuklidněné oceli a kokily typu V k odlévání uklidněné oceli. Na **obr. 7.5** jsou uvedeny oba typy kokil.



**Obr. 7.4:** Běžně používané průřezy kokil

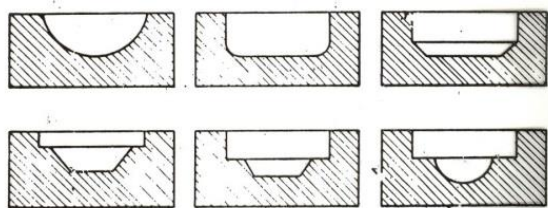


a) kokila typu A

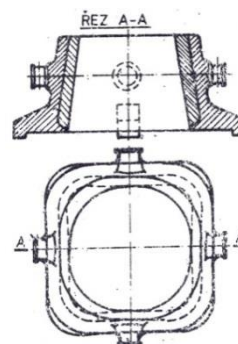
b) kokila typu V

**Obr. 7.5:** Konstruktivní řešení kokil

**Kokilové podložky** jsou nedílnou součástí kokily. Umisťují se pod vlastní kokilu. Vyrábějí se ze stejného materiálu jako kokily. Jsou intenzivně namáhány zejména při odlévání kovem v prvních okamžicích od začátku lití. K zamezení rozstříku kovu jsou kokilové podložky tvarovány. Příklady různých kokilových podložek jsou uvedeny na **obr. 7.6**.



**Obr. 7.6:** Ukázka různých kokilových podložek



**Obr. 7.7:** Kokilový hlavový nástavec

**Hlavové nástavce** se používají při odlévání uklidněných ocelí a mají za účel soustředit staženinu v hlavové části ingotu. Plášť kokilového nástavce se zhotovuje většinou z ocelové litiny a tento se vyzdívá či pěchuje žárovzdorným materiálem, jehož malá vodivost umožňuje udržení oceli v hlavové části co nejdéle v tekutém stavu. Někdy se používá, zvláště při odlévání ingotů o velké hmotnosti, exotermického obložení. Na **obr. 7.7** je znázorněno uspořádání kokilového nástavce.

## □ Odlévání na zařízení plynulého odlévání

Rozeznáváme dva druhy konstrukcí zařízení pro plynulé odlévání oceli:

- zařízení plynulého odlévání vertikální (běžně používané v ocelárnách),
- zařízení plynulého odlévání horizontální (používá se spíše při odlévání neželezných kovů).

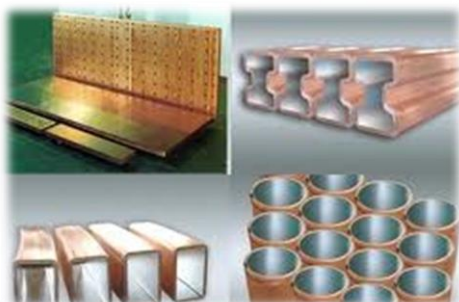
Vertikální zařízení pro plynulé odlévání sestává z mezipánve, krystalizátoru, sekundárního chlazení s vodicími válečky a dělicího zařízení. Toto zařízení doznalo v průběhu let mnoho konstrukčních změn. V současné době jsou nejpoužívanější vertikální zařízení ZPO s ohybem nebo s ohybem a se zakřiveným krystalizátorem, viz **obr. 7.8**.



a) licí stojan



b) mezipánve



c) různé typy vložek krystalizátoru



d) sekundární zóna chlazení



e) dělení předlitků



f) terciární zóna chlazení (vychlazovací lože)

**Obr. 7.8:** Ukázka základních částí zařízení plynulého odlévání

O zařízení plynulého odlévání bude detailně pojednáno v dalších **kapitolách 10 až 14**. V porovnání s konvenčním způsobem odlévání oceli do kokil můžeme výhody plynulého odlévání oceli shrnout do několika bodů:

- vyšší výtěžnost kovu,
- úspora energie,
- nižší pracovní náklady,
- nižší investiční náklady.

Nižší zpracovací náklady u ZPO jsou dány především menším počtem provozních operací v porovnání s konvenčním odléváním do ingotů a válcováním bram. Ingotová cesta kromě lití vyžaduje ještě další operace jako stripování, kontrolu a povrchovou úpravu, ohřev v hlubinné peci a válcování. Následující manipulace, úprava a skladování bram jsou prakticky identické u obou technologií. Menší počet provozních operací u ZPO přináší následující úspory:

- *ingotová cesta je náročnější na energii,*
- *ingotová cesta je náročnější na údržbu,*
- *ingotová cesta je náročnější na výši odpisů,*
- *ingotová cesta je náročnější na mzdové prostředky.*



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Šmrha, L.: Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů. SNTL Praha, 1983, 305 s.
- [2] Parma, V.: Ocelářství III. Skripta, VŠB Ostrava, 1991, 192 s.
- [3] Böhm, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. SNTL Praha, 1992, 443 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [4] Dolejší, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. Poradenská příručka č. 42. TEVÚH Praha, 1987, 383 s.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- charakteristika základních způsobů odlévání oceli
- odlévání oceli horem a spodem
- popis jednotlivých částí lící soupravy
- základní charakteristika zařízení plynulého odlévání



### Otázky k probranému učivu

1. Definujte odlévání oceli do kokil na ingoty, a to při odlévání horem a spodem.
2. Charakterizujte základní části lící soupravy.
3. Popište zařízení plynulého odlévání a uveďte jeho jednotlivé části.

## 8. Krystalizace, tuhnutí a struktura odlévané oceli



**Čas ke studiu:** 80 min



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat průběh krystalizace oceli
- charakterizovat segregační děje v oceli
- popsat strukturu ingoty uklidněné oceli

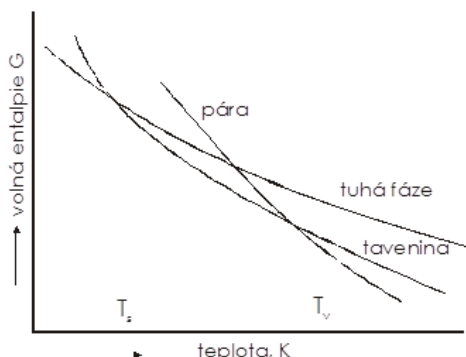


**Výklad**

### □ Krystalizace oceli

Tekutá ocel, vyrobená v ocelářských agregátech, je po odpichu, dezoxidaci a dalším mimopecním zpracování odlévána (odlisky, ingoty nebo plynule lité předlitky) a dále zpracovávána ve válcovnách či kovárnách. Po nalití oceli do kokily, resp. krystalizátoru, dochází k bezprostřednímu styku tekutého kovu s chladnou stěnou kokily anebo krystalizátoru, což má za následek pokles teploty oceli a počátek její krystalizace.

**Proces nukleace:** o stabilitě plynné, kapalné nebo tuhé fáze rozhodují termodynamické podmínky. Na **obr. 8.1** je znázorněna závislost volné entalpie na teplotě ( $T_s$  je teplota tavení a  $T_v$  teplota varu). Nad



**Obr. 8.1:** Závislost volné entalpie na teplotě při změně skupenství

teplotou varu má plynná fáze vyšší hodnotu volné entalpie než tavenina a pod teplotou bodu tuhnutí má tuhá fáze menší volnou entalpii než tavenina. Čím nižší je hodnota volné entalpie, tím je soustava stabilnější, to znamená, že pod teplotou  $T_s$  bude stabilní tuhá fáze a pod teplotou  $T_v$  bude stabilní fází tavenina.

Změna volné entalpie  $\Delta G$  při přechodu z taveniny do tuhé fáze je hnací silou, která určuje směr změny skupenství. Tato základní termodynamická podmínka změny skupenství není dostačující, protože o vlastním začátku fázové změny rozhoduje kinetický faktor. Není-li v tavenině přítomen zárodek tuhé fáze, je možno dosáhnout vysoké hodnoty přechlazení taveniny, aniž by došlo ke krystalizaci.

**Homogenní nukleace:** změnu volné entalpie soustavy při vzniku krystalizačních zárodků tuhé fáze v tavenině určuje obecná rovnice a jde-li o zárodek krychlového tvaru, pak:

$$\Delta G = l^3 \cdot \frac{\rho}{M} (G_s^0 - G_l^0) + 6l^2 \sigma \quad (8.1)$$

kde  $G_l^0$  je je molární volná entalpie taveniny,  
 $G_s^0$  - molární volná entalpie tuhé fáze,  
 $\rho$  a  $M$  - hustota a molekulová (atomová) hmotnost krystalického zárodku,  
 $l$  - délka hrany krychle krychlového krystalického zárodku,  
 $\sigma$  - mezifázové napětí mezi krystalickým zárodkem a taveninou.

Pro kritickou velikost zárodku  $l_{krit}$  vyjádřenou délkou hrany základní krychle zárodku, odvodíme

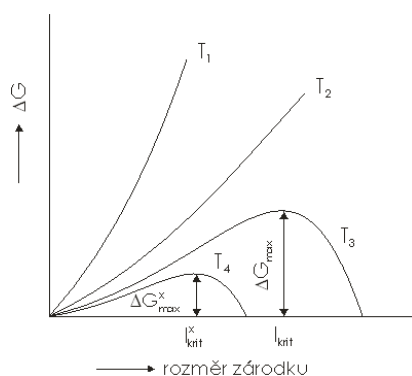


$$l_{krit} = \frac{4\sigma M}{(G_l^0 - G_s^0)\rho} \quad (8.2)$$

Úpravou tohoto vztahu můžeme rovněž odvodit rovnici:

$$l_{krit} = \frac{4\sigma T_{tá} \cdot M}{\Delta H_{tá}^0 (T_{tá} - T)\rho} = \frac{4\sigma T_{tá} \cdot M}{\Delta H_{tá}^0 \Delta T \cdot \rho} \quad (8.3)$$

Rovnice ukazují, že při daném  $T_{tá}$ ,  $\rho$  a  $M$  je kritický rozměr zárodku tím menší, čím větší je molární teplo tání a stupeň přechlazení  $\Delta T$  taveniny (respektive stupeň přesycení taveniny zárodka nové fáze) a čím menší je mezifázové napětí. Tyto závěry platí i tehdy, vzniká-li krystalizační zárodek kulovitého tvaru. Závislost změny volné entalpie soustavy podle předcházející rovnice na velikosti vznikajících zárodků znázorňuje **obr. 8.2**.

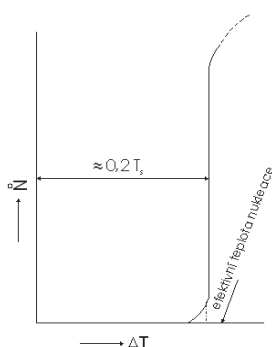


**Obr. 8.2:** Změna volné entalpie při tvorbě krystalizačních zárodků

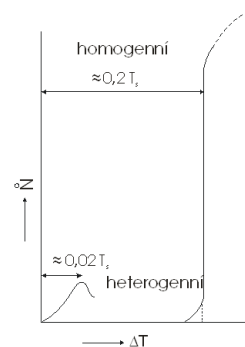
Při teplotě  $T_1$ ,  $> T_{tá}$ , je  $G_l^0 > G_s^0$  a hodnota  $\Delta G$  roste monotónně s velikostí zárodka. Při zmenšování přehřátí, tj. bude-li se teplota blížit  $T_{tá}$ , bude rozdíl  $G_l^0$  a  $G_s^0$  menší, a i když funkční závislost  $\Delta G = f(l)$  bude povlnější, bude nadále monotónně vzrůstat (křivka  $T_2$ ). Vznikají-li krystalizační zárodky v přechlazené tavenině, tj. je-li  $T_3 < T_{tá}$ , bude  $G_l^0 < G_s^0$  a na funkční závislosti  $\Delta G = f(l)$  se objeví maximum odpovídající kritické velikosti zárodka  $l_{krit}$ . Rozdíl v průběhu křivky  $T_3$  a  $T_4$  je v souvislosti s vyšším stupněm přechlazení a nižší hodnotou mezifázového napětí v posléze uvedeném případě (křivka  $T_4$ ). Z uvedeného vyplývá, mají-li být krystalizační

zárodky nové fáze stabilní a mají-li mít možnost dalšího růstu, musí vykazovat větší rozměr, než je rozměr kritický  $l_{krit}$ . Všechny krystalizační zárodky s menším rozměrem než kritickým se v tavenině znovu rozpouštějí.

Na **obr. 8.3** je uvedena závislost rychlosti růstu zárodků ( $\dot{N}$ ) na stupni přechlazení – pro podmínky homogenní nukleace.



**Obr. 8.3:** Počátek růstu homogenního zárodka v závislosti na přechlazení



**Obr. 8.4:** Závislost růstu homogenního a heterogenního zárodka na přechlazení

Z **obr. 8.3** je zřejmé, že v tomto případě je třeba dosáhnout přechlazení  $0,2 T_s$ , což v praktických podmínkách znamená 250 až 300 °C. Takovýto stupeň přechlazení je v praktických podmínkách nedosažitelný.

**Heterogenní nukleace:** zárodky krystalů se tvoří na tuhých částicích, které byly přítomny v tavenině před dosažením jejího kritického přechlazení.

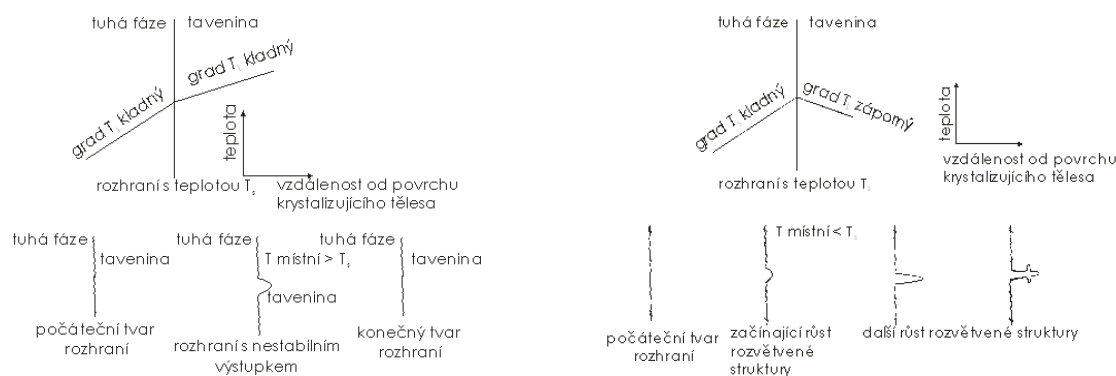
Při krystalizaci ocelových ingotů jde vždy o heterogenní nukleaci, viz **obr. 8.4**. Příčinou je přítomnost velkého počtu cizích částic (endogenní a exogenní vměstky). Heterogenní nukleace je snazší a nastává při mnohem menší hodnotě přechlazení, rovnající se přibližně  $0,02 T_s$ , tedy asi desetkrát menší než u nukleace homogenní. Vzniku zárodků napomáhají kromě toho nerovnosti na povrchu kokily, které se z hlediska nukleace chovají podobně jako cizí částice v tavenině.

Při existenci heterogenních částic v tavenině nebo nerovností vnitřního povrchu kokily je energie potřebná pro vznik zárodků nižší vlivem mezifázových napětí mezi taveninou, cizí částicí a vznikajícím zárodkem.

**Dendritický růst krystalů:** ocel krystalizuje dendriticky. Dendritická struktura vzniká v případě, jestliže tavenina v blízkosti fázového rozhraní má záporný teplotní gradient. Rychlost růstu dendritů závisí na stupni přechlazení. Ve směru podélném rostou dendrity až stokrát rychleji než ve směru příčném. Růst dendritů se přerušuje při spojení s jiným dendritem.

U kovů nastává dendritický růst, je-li rychlost krystalizace  $v \approx 5 \text{ cm.s}^{-1}$  při heterogenní nukleaci a  $v \approx 5\,000 \text{ cm.s}^{-1}$  při homogenní nukleaci. Charakteristickým jevem při dendritické krystalizaci je vysoká krystalizační rychlost  $v$ . Na následných schématech je znázorněn tvar mezifázového rozhraní tuhá fáze – tekutá fáze při kladném a záporném teplotním gradientu.

Na následujícím schématu **obr. 8.5** je uvedena závislost stupně přechlazení na tvar rozhraní mezi krystaly a taveninou. Je zřejmé, že po malých stupních přechlazení vzniká rovinná, následně pak buněčná struktura. Dendrity vznikají až při vysokých stupních přechlazení.



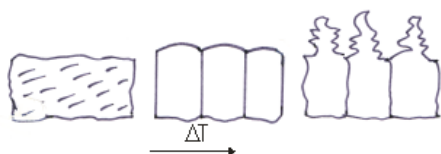
**Obr. 8.5:** Schéma postupu izotermické roviny v čistém kovu (bez příměsí)

**Obr. 8.6:** Vliv rozvětvené struktury následkem vytvoření záporného teplotního gradientu před rovinu krystalizace

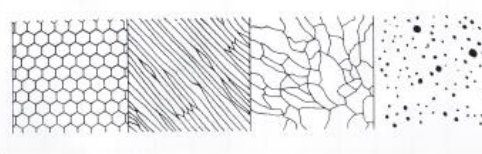
Na dalším schématu, viz **obr. 8.6**, je uvedena závislost typu rozvětvení struktury na obsahu příměsí, teplotním gradientu a rychlosti krystalizace a také tvar různých stupňů přechodu od hladké roviny tuhnutí až ke vzniku buněčné struktury.

Je zřejmé, že po malých stupních přechlazení vzniká rovinná, následně pak buněčná struktura. Dendrity vznikají až při vysokých stupních přechlazení, jak je patrné z **obr. 8.7**.

Na dalším schématu, viz **obr. 8.8**, je uvedena závislost typu rozvětvení struktury na obsahu příměsí, teplotním gradientu a rychlosti krystalizace a také tvar různých stupňů přechodu od hladké roviny tuhnutí až ke vzniku buněčné struktury.



**Obr. 8.7:** Schematické znázornění rozhraní mezi krystaly a taveninou



**Obr. 8.8:** Tvar různých stupňů přechodu od hladké roviny tuhnutí až ke vzniku buněčné struktury

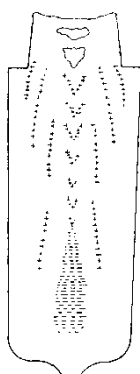
## □ Segregace v oceli

**Mikrosegregace oceli:** ocelový ingot má vnitřní nečistosti, obsahuje nekovové částice různého chemického složení a velikosti a místa s rozdílným chemickým složením oceli. Rozdíly chemického složení kovu vznikají omezenou rozpustností doprovodných a slitinových prvků v oceli během tuhnutí. Podle toho mají zákonitě vzniklé krystaly odlišnou koncentraci příměsí než původní tavenina, z níž vznikly.

Popsaný jev se všeobecně nazývá segregací, a protože se týká mikroobjemů, říkáme mu mikrosegregace. Ocel tuhne vždy dendriticky, a proto se často setkáváme s výrazem dendritická segregace oceli, což znamená totéž jako mikrosegregace. Studium mikrosegregace je základem pro vysvětlení rozdílu chemického složení oceli v makroskopických objemech, o němž byla zmínka na počátku a které můžeme analogicky nazvat makrosegregací.

Mikrosegregace má velký vliv na jakost lité i tvářené oceli. Je to základní proces vzniku nestejnorodosti oceli, který lze do jisté míry ovlivňovat metalurgicky vhodnou skladbou základních vsázkových surovin (např. omezením koncentrace doprovodných prvků), technologií výroby a odléváním, avšak dokonalé stejnorodosti ocelového výrobku dosáhnout nemůžeme.

**Makrosegregace oceli:** chemická nestejnorodost v rozsahu, který převyšuje rozměry dendritů a primárního zrna, se nazývá makrosegregací. Zdrojem vzniku větších oblastí s rozdílným obsahem



**Obr. 8.10:** Schéma segregací v uklidněném ingotu

primárního zrna, se nazývá makrosegregací. Zdrojem vzniku větších oblastí s rozdílným obsahem příměsí je proces mikrosegregace. Protože se během tuhnutí ingotů a odlitků tvoří typické oblasti, které mají v porovnání s tavebním chemickým rozbořem nižší nebo vyšší obsah jednotlivých prvků, hovoříme o negativní a pozitivní odchylce, nebo záporné a kladné segregaci. Na příkladu ocelového ingotu si uvedeme důsledky makrosegregačních jevů. O segregacích v plynule litých předlitcích bude zmínka v **kapitole 13**.

Oblast záporné segregace je v dolní části ingotu a podle podmínek tuhnutí může být různě rozsáhlá. V horní části ingotu je obvykle oblast kladné segregace, jejíž maximum se vyskytuje u ingotů z neuklidněné oceli ve vzdálenosti odpovídající asi 80 % výšky ingotu. Ingoty z uklidněných ocelí mají nejvyšší obsah příměsí v hlavové části.

Pro ingoty a odlitky jsou rovněž typické shluky utuhlé příměsí obohacené o taveniny mezi dendrity, kterým říkáme vycezeniny. V podstatě zůstávají podle jeho roztřídění dva základní druhy vycezenin, a to mezerové (V – segregace) a stvolové (A – segregace).

Kladné segregace se vyskytují především v horních a středových částech ingotu a mají tvar A či V. Záporné segregace se vyskytují v dolní (patní části) a mají tvar kužele, jak je vidět na **obr. 8.10**.

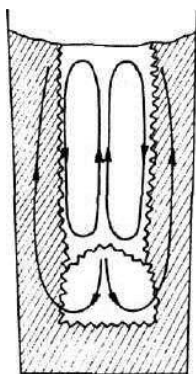
**Negativní segregace:** během tuhnutí ingotu dochází ke snižování teplotního gradientu, a tím i ke zmenšování množství odvedeného tepla a snižování rychlosti tuhnutí. Hodnota efektivního rozdělovacího koeficientu se bude snižovat, čím bude rychlost tuhnutí menší. Před rovinou tuhnutí se tak začnou tvořit krystaly, které mají nižší koncentraci příměsí než okolní tavenina. Krystaly pronikají postupně do střední části ingotu a po dosažení určité velikosti klesají.

**Kladná segregace** (tedy i vycezeniny) jsou způsobeny prouděním taveniny ve dvoufázovém krystalizačním pásmu, v němž probíhá objemové smrštění při tuhnutí a dále tepelné smrštění. Proudění je vyvoláno rozdílnou hustotou taveniny, která vzniká jako důsledek mikrosegregace příměsí a doprovodných prvků. Poznatkem je zjištění, že v závislosti na výchozím chemickém složení se může hustota taveniny během tuhnutí s klesající teplotou snižovat. V tomto případě bude chladnější tavenina z dolní části ingotu na základě přirozené konvekce stoupat vzhůru.

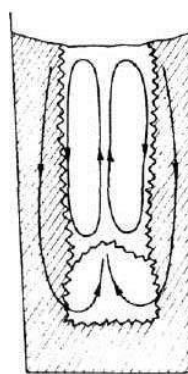
**Mechanismus vzniku A vycezenin:** na **obr. 8.11** je znázorněn vzestupný proud taveniny ve dvoufázovém pásmu krystalizace, umožňující vznik kanálků, vyvolaný poklesem hustoty obohacené

taveniny v patní části. Naopak při zvyšování hustoty taveniny s klesající teplotou vznikají sestupné proudy a v tomto případě ke vzniku stvolových vycezenin nedochází:

- *segregaci uhlíku a síry dochází postupně ke snižování povrchového napětí obohacené taveniny,*
- *rozdíl povrchových napětí základní a obohacené taveniny bude velký a bude se zvětšovat v průběhu tuhnutí,*
- *obohacením taveniny S a C, ale i V se sniží hustota taveniny a začnou se vytvářet nemísitelné fáze ve tvaru kuliček stoupajících do horních částí ingotu,*
- *při brzdění mřížovým dendritů se dráha obohacené taveniny odkloní směrem dovnitř ingotu,*
- *prvky s atomovým číslem vyšším než železo (Ni, Mo, W) výskyt segregací snižují.*



a) model proudění taveniny u slitiny, u níž hustota taveniny s klesající teplotou klesá



b) model proudění taveniny u slitiny, u níž hustota taveniny s klesající teplotou stoupá

**Obr. 8.11:** Mechanismus vzniku vycezenin A s uvedením proudění taveniny

**Mechanismus vzniku V vycezenin:** tento typ vycezenin vzniká v osové části ingotů a odlitků a má charakteristický tvar písmene V. Vycezeniny jsou větší ve spodní části ingotu. Při malém úkosu kokily nebo vysoké štíhlosti dané poměrem H/D ingotu mohou být velmi vyvinuté i v horní části ingotu. Charakteristickým znakem je, že okolí V-vycezenin má nižší obsah příměsí. To dokazuje, že vznik V-segregace nastává ve středním pásmu ingotu až tehdy, kdy obsah tuhé fáze stoupne na 20 až 40 % hmotnostních, takže tavenina nemůže plynule proudit v dendritické síti. Smršťováním vznikají trhliny, které se vyplňují taveninou obohacenou příměsími stékajícími šikmo z míst ingotu vzdálenějších od jeho osy. Příčinou vzniku trhlin, jak bylo již uvedeno, jsou síly vyvolané účinkem gravitace a smršťování během tuhnutí a chladnutí ingotu.

#### □ **Struktura ingotu z uklidněné oceli**

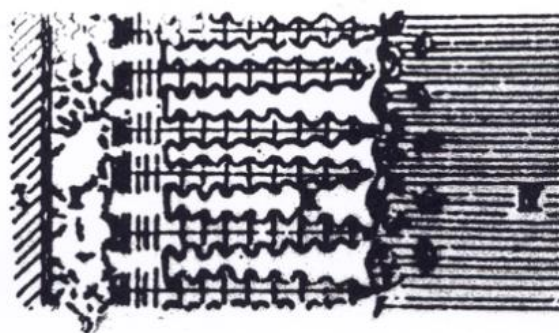
Na **obr. 8.12** je uvedena vnitřní struktura uklidněného ingotu. Na počátku krystalizace, vlivem prudkého ochlazení kovu stykem s kokilou, vzniká licí kůra. Jsou to drobné krystalky, vzniklé při vysokých rychlostech chladnutí, při velkém počtu samovolně vzniklých center, která nemají čas se vyvinout. S rostoucí tloušťkou této vrstvy a současným ohřevu stěn kokily se mění podmínky odvádění tepla – vznikají geolitické krystaly.

Rychlost ochlazování klesá, stále je však dostatečně intenzivní k tomu, aby vznikaly sloupkovité (kolumnární krystaly). Růst těchto krystalů probíhá tak dlouho, dokud teplotní gradient tekuté části ingotu na hranici tuhnutí oceli nedosáhne minimální hodnoty. Pak se růst sloupkovitých krystalů zastaví.

Následuje pásmo, ve kterém krystaly vlivem snižujícího se teplotního gradientu a vybavujícího se latentního tepla krystalizace rostou všemi směry.



a) struktura ingotu z uklidněné oceli



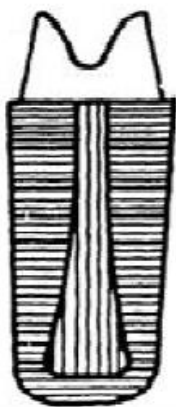
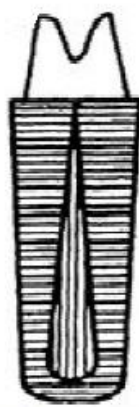
b) struktura krystalizačního procesu ingotu

**Obr. 8.12:** Ukázka struktury ingotu z uklidněné oceli

Na průběh tuhnutí ingotu i na vnitřní nečistosti má vliv celá řada faktorů:

- tvar kokily (ingotu)
- rychlost ochlazování (tuhnutí)
- velikost ingotu
- rychlost odlévání a teplota oceli
- chemické složení oceli

**Tvar kokily (ingotu):** zcela nevhodný je tvar kokily nahoru se zužující, neboť oblast ředin zasahuje velmi hluboko, často až do dolní části, viz **obr. 8.13**. Obdobně se chovají i ingoty s vysokou štíhlostí. Na štíhlosti závisí velikost sraženiny, osová pórovitost, rozložení segregací, poměr mezi vertikální i horizontální rychlostí tuhnutí, viz **obr. 8.13**. Z obrázku je zřejmé, že při hodnotách  $H/D = 2,6$  dosahuje výška porézní zóny až 60 % výšky těla ingotu. V případě velkých ingotů – při  $H/D = 1,2$  – činí tato výška cca 40 % celkové výšky těla ingotu.

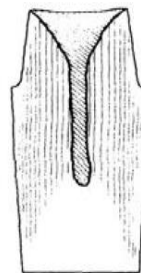
a)  $H/D < \text{kritická hodnota}$ b)  $H/D = \text{kritické hodnotě}$ c)  $H/D > \text{kritická hodnota}$ **Obr. 8.13:** Průběh krystalizace ingotu v závislosti na poměru  $H/D$ 

**Rychlost ochlazování (tuhnutí):** vliv rychlosti ochlazování je zřejmý z **obr. 8.14**. Názorně byl tento vliv sledován srovnáváním vycezenin u ingotů litéch do kokily a do šamotové formy. U ingotu litého do šamotové formy probíhalo tuhnutí značně déle, i když šlo o ingot střední velikosti, množství a rozsah stvolových vycezenin odpovídal vycezeninám ve velkém ingotu.

**Velikost ingotu:** se zvětšováním hmotnosti ingotu z uklidněné oceli roste množství i velikost stvolových (A) vycezenin. Se zvětšováním průřezu ingotu se prodlužuje doba tuhnutí ingotu, a tím je podporován vznik nesterodnosti ingotu, především intenzita vyloučení stvolových vycezenin A. Zároveň se zvyšují rozdíly v chemickém složení mezi hlavou a patní částí ingotu.



a) při lití do kokily



b) při lití do pískové formy

**Obr. 8.14:** Vliv rychlosti ochlazování na tuhnutí ingotu

**Rychlost odlévání a teplota oceli:** vliv teploty oceli a rychlosti odlévání na vznik vycezenin je jednoznačný. Čím vyšší je teplota oceli a rychlosti odlévání, tím je rozsah a velikost vycezenin v ingotu větší. Teplota se projevuje i vlivem na druh vyloučených vycezenin. Při vyšší teplotě jsou výraznější středové mezerové vycezeniny typu V, při nižší teplotě stvolové vycezeniny typu A. Podobný vliv jako teplota má i rychlost odlévání.

**Chemické složení oceli:** podle toho, jaké je chemické složení oceli, kolik ocel obsahuje plynů a také podle způsobu výroby je ocel různě náchylná ke vzniku vycezenin. Se zvětšující se koncentrací prvku v oceli se zvětšuje i sklon tohoto prvku k vyloučení ve vycezeninách. Intenzita segregace daného prvku při ostatních neměnných podmínkách závisí na intervalu tuhnutí. Na prvním místě jak z hlediska intenzity vyloučení, tak i z hlediska škodlivosti jsou fosfor a síra. Segregace síry a fosforu ve vycezeninách může dosahovat až 300 %, podle některých údajů až 400 %. Proto snížení obsahu těchto prvků v oceli je hlavním úkolem při omezování vycezenin. Na rozsah a intenzitu vycezenin má vliv i celkové chemické složení oceli, které ovlivňuje oblast mezi teplotou likvidu a solidu, jejím rozsahem a tím i s tzv. místní dobou tuhnutí. Čím je tato doba kratší (menší než interval  $T_l - T_s$ ), tím je výskyt segregací menší.



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Šmrha, L.: Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů. SNTL Praha, 1983, 305 s.
- [2] Parma, V.: Ocelářství III. Skripta, VŠB Ostrava, 1991, 192 s.
- [3] Chvojka, J.: Vady ingotů. SNTL Praha, 1968, 254 s.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- krystalizace oceli
- segregáční děje
- struktura ingotu z uklidněné oceli



### Otázky k probranému učivu

1. Charakterizujte průběh krystalizace oceli a vysvětlete mechanismus homogenní a heterogenní nukleace.
2. Vysvětlete mechanismus segregace a uveďte, jaké segregace znáte.
3. Popište strukturu z uklidněné oceli a uveďte možnosti ovlivnění vnitřní struktury.

## 9. Vady ingotů odlévaných do kokil



**Čas ke studiu:** 70 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat povrchové vady
- popsat vnitřní vady
- charakterizovat tvarové vady



**Výklad**

### □ Rozdělení vad odlévaných ingotů

V průběhu odlévání oceli do kokil může docházet ke vzniku vad ingotů, které lze rozdělit do následujících skupin:

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>vady povrchové (vnější):</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>vnější šupiny (pleny),</i></li> <li>- <i>trhliny podélné,</i></li> <li>- <i>trhliny příčné a šikmé, ev. klikaté,</i></li> <li>- <i>praskliny,</i></li> <li>- <i>zavaleniny,</i></li> <li>- <i>podpovrchové bubliny,</i></li> <li>- <i>strusková a písková hnízda na povrchu.</i></li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>vady vnitřní:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>staženiny a řediny v těle ingotu,</i></li> <li>- <i>vycezeniny,</i></li> <li>- <i>vločky,</i></li> <li>- <i>vměstky exogenní a endogenní.</i></li> </ul> </li> </ul> |
|--|--|

### □ Vady povrchové (vnější)

**Vnější šupiny (plevy)** odlévání ingotu horem je doprovázeno rozstříkem dopadajícího proudu oceli. Velikost rozstříku je dána kinetickou energií dopadajícího proudu oceli, tvarem proudu oceli a tvarem spodní části kokily. Kapky oceli, které ulpívají na stěně kokily, rychle tuhnou a jejich povrch se může zoxidovat. Část kapek vznikajících rozstříkem, která je nejbližší hladině oceli, nemá čas se za krátkou dobu letu oxyličit a opět se v oceli rozpouští. Množství těchto kapek je tím menší, čím pomalejší je stoupání hladiny oceli. S větší rychlostí lití sice vzrůstá množství těchto rozpuštěných kapek, zvyšuje se však zároveň i rozstřík oceli.

Při odlévání spodem mohou na rozdíl od lití horem vznikat šupiny pouze při zalití ingotu. Takto utuhlá a částečně zoxidovaná ocel se s tekutou fází nespojí. Čím je velikost ingotu větší, tím je nebezpečí vzniku takovýchto plen (zálitků) menší. Faktory ovlivňující vznik šupin:

- *necentrické lití,*
- *tvar kokily – větší pravděpodobnost u štihlejších kokil,*
- *výška kokily, což souvisí s velikostí kinetické energie dopadající oceli (u vyšších kokil – větší),*
- *stav stěn kokily,*
- *stav výlevky,*
- *nesprávná regulace lití,*
- *u lití spodem – vlhké licí kanály.*

Možnosti omezení výskytu šupin:



- *pomalé zalití,*
- *zmenšení poměru H/D,*
- *nátěry stěn kokily,*
- *používání kokilových podložek,*
- *kvalitní výlevka s možností regulace průtoku oceli,*
- *u lití spodem – dokonalé vysušení licí soupravy.*

**Trhliny** patří k vadám velmi rozšířeným a také k takovým, které mohou být často příčinou znehodnocení celého ingotu:

- *v první skupině jsou nejrozšířenější trhliny, které vznikají při teplotách blízkých teplotám solidu, to znamená během tuhnutí ingotu nebo krátce po jeho ztuhnutí,*
- *ve druhé skupině jsou trhliny vznikající při nižších teplotách, než jsou teploty oceli v plastickém stavu, a trhliny vznikající především při fázových přeměnách. Tyto trhliny se přesněji nazývají praskliny,*
- *do třetí skupiny lze zařadit mikrotrhliny vznikající u legovaných a vysokolegovaných ocelí při teplotách 1200 až 1300 °C a při nižších teplotách. Podle tvaru, směru a polohy lze trhliny dělit na podélné, příčné, různě orientované a vnitřní.*

Základní předpoklad pro vznik trhliny je tahové nebo stříhové napětí, které zejména při vysokých teplotách snadno převýší pevnost oceli po vyčerpání její plasticity. Je-li volné smršťování ingotu brzděno mechanicky nebo tepelně, nebo nastává-li nestejně rozdělení pnutí anebo tečení, ať již v celém ingotu nebo jen místně, jsou vytvořeny podmínky pro vznik trhlin. Trhliny se vyskytují prakticky u všech ocelí a způsobů výroby oceli, většinou v doprovodu vycezenin a pásů feritu, často v souvislosti s výskytem sulfidických vměstků.

Vnitřní napětí vznikají mechanickým brzděním volného smršťování, změnou objemu fázovými přeměnami nebo nestejně intenzitou ochlazování jednotlivých míst, vyvolávající nerovnoměrné smršťování. Ingoty z uklidněné oceli se svou vysloveně orientovanou krystalizací jsou nejvíce náchylné ke vzniku trhlin. Mnohem méně náchylné ke vzniku trhlin jsou ingoty z polouklidněné a zejména neuklidněné oceli.

**Trhliny vznikající během tuhnutí ingotu** po naplnění kokily ocelí se vytváří stykem tekuté oceli s povrchem kokily povrchová kůra ingotu. Pevnost oceli krátce po ztuhnutí je velmi nízká, stejně jako kontrakce.

Překročí-li pnutí při brzděném smršťování alespoň na okamžik pevnost oceli nebo vyskytne-li se iniciace způsobená vměstkami, vycezeninami nebo vnitřními trhlinami (jako vrubový účinek), vznikají trhliny prakticky bez plastické deformace.

Vznik trhlin v tomto údobí souvisí také úzce se vznikem spáry mezi tuhnoucím ingotem a kokilou. Mechanismus vzniku spáry mezi ingotem a kokilou ovlivňují tyto faktory:

- *chemické složení oceli,*
- *koeficient smrštění oceli,*
- *velikost ingotu,*
- *tvar ingotu,*
- *rychlost odlévání a způsob odlévání,*
- *teplota oceli,*
- *stav vnitřního povrchu kokily.*

Při dotyku tekuté oceli se stěnou kokily začíná krystalizace povrchové kůry ingotu. Smršťování povrchové části tuhnoucího ingotu je v prvních fázích tuhnutí kompenzováno plastickou deformací oceli. Toto období krystalizace ingotu se vyznačuje tím, že kůra ingotu se vlivem ferostatického tlaku roztahuje zároveň s kokilou, což v tomto období souvisí s vysokou plastickou deformací. S dalším snižováním teploty se plastické vlastnosti oceli snižují, síly vzájemného působení se v tuhnoucí části ingotu zvyšují; pevnost kůry ingotu převyšuje plastickou deformaci kůry a začíná vznikat spára mezi

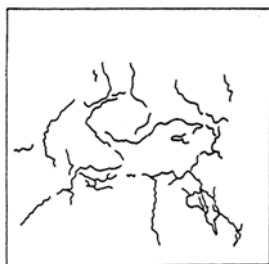


kokilou a ingotem. V tomto období, kdy je pevnost kůry ingotu ještě nízká, avšak kůra ingotu se již nedotýká kokily, jsou nejvýhodnější podmínky pro tvorbu trhlin.

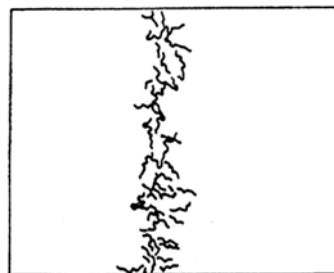
**Trhliny vznikající během chladnutí ingotu (praskliny)** vznikají při nižších teplotách – během chladnutí ingotu – jsou méně časté, avšak vyskytnou-li se, znamenají téměř vždy znehodnocení celého ingotu. Praskliny probíhají nejrůzněji celou délkou ingotu a zasahují hluboko do ingotu. Vyskytují se jak na vnějším povrchu ingotu, tak i uvnitř. Praskliny vznikají až při teplotách pod 400 °C, často až po zchladnutí ingotu.

Teplota vnějších vrstev ingotu je při jeho ochlazování vždy nižší než teplota vnitřní části ingotu. Proto během poklesu teploty ingotu probíhá v různých vrstvách ingotu rozpad austenitu nerovnoměrně. V období, kdy již ve vnější vrstvě ingotu je rozpad austenitu zcela ukončen, v přiléhajících vnitřních vrstvách ingotu teprve probíhá a je doprovázen zvětšováním objemu, zatímco se chladnoucí vnější vrstva smršťuje, což vede ke vzniku tahových pnutí ve vnější vrstvě. Je-li rozdíl teplot mezi vnějšími a vnitřními vrstvami velký a ocel není úměrně vznikajícím pnutím dostatečně plastická, vznikají v povrchové části ingotu praskliny.

**Vnitřní mezikrystalické trhliny** vznikají při chladnutí ingotů z legovaných ocelí, především nízkouhlíkových chromniklových, chromniklmolybdenových a chromnikl-wolframových ocelí. Mohou se vyskytovat v různých částech ingotu. Buď jsou pavoukovitě rozmístěny ve vnitřní části ingotu bez přesnějšího místního určení, viz **obr. 9.1**, nebo častěji vznikají přímo v osové části ingotu, viz **obr. 9.2**.



**Obr. 9.1:** Trhliny po hranici zrn v místě vyloučení sulfidických obalů



**Obr. 9.2:** Mezikrystalické trhliny v ose ingotu z oceli typu CrNiV

Vznikají krátce po ztuhnutí vnitřní části ingotu, tj. při teplotách asi 1200 až 1400 °C. Na jejich vzniku se podílí pnutí vznikající rychlým tuhnutím vnitřní části ingotu a zvýšená koncentrace nežádoucích prvků na hranicích zrn.

Tyto trhliny se rovněž někdy označují jako submikrotrhliny či vnitrodendritické trhliny. Jejich tvoření je vysvětlováno tak, že se při tuhnutí dendritu mezi jeho osami uzavírá tavenina s nižší teplotou tavení a vlivem smršťování vzniká pór – ostrý výběžek. Na konci tuhnutí se smršťují i jednotlivé dendrity. Není-li úbytek objemu mezi dendrity nahrazován taveninou, tvoří se mezi dendrity řediny, přecházející v trhliny.

**Zavaleniny** patří k hlavním vadám ingotů z uklidněné oceli, většinou odlévaných spodem, nazývané také převal, přelitek, převal, převalok, přelitá licí kůže, přelitá licí kůra, studený svar apod.

Při běžném postupu odlévání uklidněné oceli spodem se na hladině oceli v kokile vytváří oxidický povlak související s průběhem fyzikálně chemických procesů na styku tekuté oceli se stěnou kokily a plynnou atmosférou nad tekutým kovem. Hladina oceli v kokile v místě styku se stěnou kokily vytváří vypouklý meniskus, jehož výška a tvar závisí na příslušných mezifázových a povrchových napětích a na velikosti úhlu mezi tekutou ocelí a stěnou kokily.

Vznik zavaleniny začíná tím, že se na ohnuté části menisku vytvoří kůrka z tuhající oceli a oxidů. Během odlévání se tloušťka a plocha této kůrky zvětšuje, při dalším stoupání hladiny oceli v kokile se tlak na meniskus zvyšuje, až tlak tekuté oceli vytvořenou kůrku protrhne a tekutá ocel ji přelévá. Kůrka vytvořená na menisku se vytvořila zatím tak tlustá a pevná, že se již neohne zpět směrem ke kokile a její ztuhlý povrch, znečištěný oxidy, se s tekutou ocelí nesvaří. Často je zavalenina

doprovázena přítomností pískovitých a struskovitých míst a vznikem příčných trhlin nebo i sekundárních staženin.

**Strusková a písková místa na povrchu** při nedbalém vyzdění licí desky a nedostatečném profoukání kanálků stlačeným vzduchem, dále při špatné kvalitě materiálu kanálkových cihel strhává ocel žárovzdorný materiál s sebou. Ten pak v kokile vyplouvává na povrch a může se usadit u stěny kokily, kde se zalije ocelí. Výsledkem jsou porůznu se vyskytující strusková a písková hnízda na povrchu ingotů.

**Podpovrchové bubliny** jsou důsledkem přítomnosti plynů v oceli:

- *kyslík,*
- *dusík,*
- *vodík,*
- *oxid uhelnatý.*

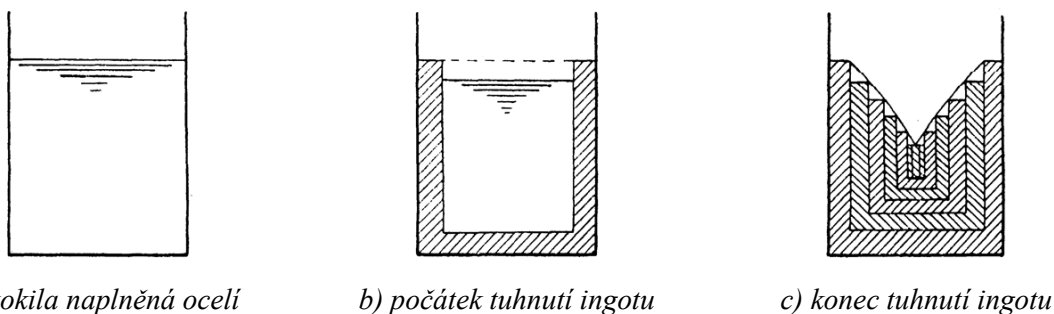
Příčiny vzniku bublin:

- *vlhká vyzdívka, kanálky, vyzdívka hlavového nástavce,*
- *vadný vnitřní povrch kokily a jeho úprava,*
- *nesprávný postup lití,*
- *vysoký obsah plynů po mimopecním zpracování (především vodík),*
- *málo dezoxidovaná ocel.*

#### □ Vady vnitřní

**Staženiny a řediny v těle ingotu** vznik staženiny souvisí úzce se zmenšováním objemu oceli již při snižování teploty z licí teploty na teplotu likvidu, a především v intervalu tuhnutí v oblasti mezi likvidem a solidem.

Mechanismus vzniku staženiny, viz **obr. 9.3**, bývá schematicky znázorněn jako postup, který předpokládá chladicí vliv pouze stěn kokily a průběh tuhnutí se znázorňuje v jednotlivých časových úsecích, po kterých se vždy hladina zbývajícího kovu sníží, až vznikne dutina přibližně kuželovitého tvaru.



**Obr. 9.3:** Schematicky znázorněný vznik staženin

Staženina v ingotu vzniká vždy v místě, kde se kov udržuje nejdéle tekutý. Nejdéle se tekutá ocel udržuje v tzv. tepelném centru ingotu a z tohoto místa se tekutá ocel jako ze zásobníku dodává do míst, kde při tuhnutí nastal úbytek objemu. Tepelné centrum ingotu leží obvykle v horní části ingotu.

Staženina a řediny v ingotu zaujímají u uhlíkové oceli průměrně 3,0 až 3,5 %, tedy méně, než je skutečné smrštění oceli. Část zmenšení objemu oceli smrštěním připadá na celkové smrštění ingotu a část také na vznikající mezidendritické mikro dutiny. Kolem staženiny a především v jejím pokračování v ose ingotu při neovlivněném tuhnutí ingotu vznikají řediny a pórovitost. Řediny pod staženinou vznikají podobně jako staženina při tuhnutí posledních zbytků oceli, kdy se již nedostává dosti tekuté oceli k vyplnění vnitřních dutin.

Příčiny vzniku staženin v těle ingotu:

- *nepříznivý tvar kokily - nutný tvar V,*
- *štíhlost kokily – výhodnější menší poměr H/D,*
- *malý úkos kokily,*
- *nesprávná lící teplota a rychlost lití,*
- *malá velikost a nepříznivý tvar hlavového nástavce,*
- *izolace hlavového nástavce a krycí izolační struska,*
- *nepříznivý způsob odlévání,*
- *vadná lící souprava,*
- *nedostatečná doba odstání ingotu v kokile.*

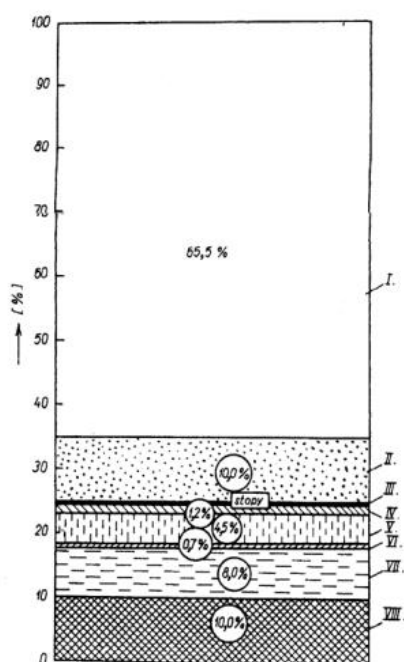
**Vločky** pod pojmem „vločky“ rozumíme příčné trhliny uprostřed tvářených výrobků, projevující se na lomu jako okrouhlé skvrny s lesklým krystalickým povrchem. Jejich příčinou je zvýšený obsah vodíku nad určitou mez, která činí cca  $2 \text{ cm}^3 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$  oceli.

Při takovýchto obsazích se vodík nevyučuje v podobě bublin, ale je rozpuštěn v oceli v atomárním stavu. S klesající teplotou, kdy klesá jeho rozpustnost, přechází atomární vodík na molekulární a při nízkých teplotách (zpravidla  $< 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ), kdy již není možná plastická deformace, vznikají penízkovité trhliny s lesklým povrchem. K zamezení tvorby vloček patří opatření totožná s opatřeními zaměřenými na snížení obsahu vodíku, případně je nutné provádět protivločková žíhání.

**Nekovové vměstky** vznikají jako zplodiny reakcí jak během výroby, tak i během lití, nebo se dostávají do oceli zvenčí a způsobují poruchy zhoršující mechanické hodnoty, nebo znamenají přímo vadu.

Podle původu se vměstky rozdělují na exogenní a endogenní. Exogenní vměstky vznikají buď korozivním, nebo erozivním působením oceli na žárovzdorný materiál, s nímž přichází ocel do styku během výroby, tj. v peci, žlabu, pánvi, nálevkách, kanálcích atd. Jsou to částice žárovzdorného materiálu, písku, strusky nebo nahodilých nečistot.

Vznikají-li nekovové vměstky při fyzikálně chemických reakcích v tekuté nebo tuhé oceli, nazýváme je endogenní. Tvoří je především sulfidy, oxidy, nitridy, karbidy a komplexní vměstky. Grafické znázornění kvantitativního podílu exo- a endogenních nekovových vměstků v oceli odlévané spodem je uvedeno na **obr 9.4**.



*Legenda: I - endogenní nekovové vměstky, původ exogenních nekovových vměstků:  
II - licí kanálky (šamotové),  
III - izolační zásyp,  
IV - hmota vyzdivek hlav,  
V - vyzdívka pánvi,  
VI - odpichový žlab,  
VII - hmota z odpichového otvoru,  
VIII - stržená pecní struska.*

**Obr. 9.4:** Grafické znázornění podílu endogenních a exogenních nekovových vměstků v oceli



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Šmrha, L.: Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů. SNTL Praha, 1983, 305 s.
- [2] Parma, V.: Ocelářství III. Skripta, VŠB Ostrava, 1991, 192 s.
- [3] Chvojka, J.: Vady ingotů. SNTL Praha, 1968, 254 s.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- rozdělení a charakteristika vad vznikajících při odlévání oceli do kokil
- charakteristika vad povrchových (vnějších) a vnitřních
- definování příčiny vzniku povrchových (vnějších) a vnitřních vad



### Otázky k probranému učivu

1. Definujte rozdělení vad vznikajících při odlévání oceli do kokil.
2. Charakterizujte a popište princip vzniku povrchových (vnějších) vad ingotů.
3. Uveďte způsob vzniku a rozdělení vnitřních vad ingotů.

## 10. Plynulé odlévání oceli - ZPO



**Čas ke studiu:** 80 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- charakterizovat princip plynulého odlévání oceli
- popsat rozdělení jednotlivých typů ZPO
- definovat základní části radiálního (obloukového) ZPO

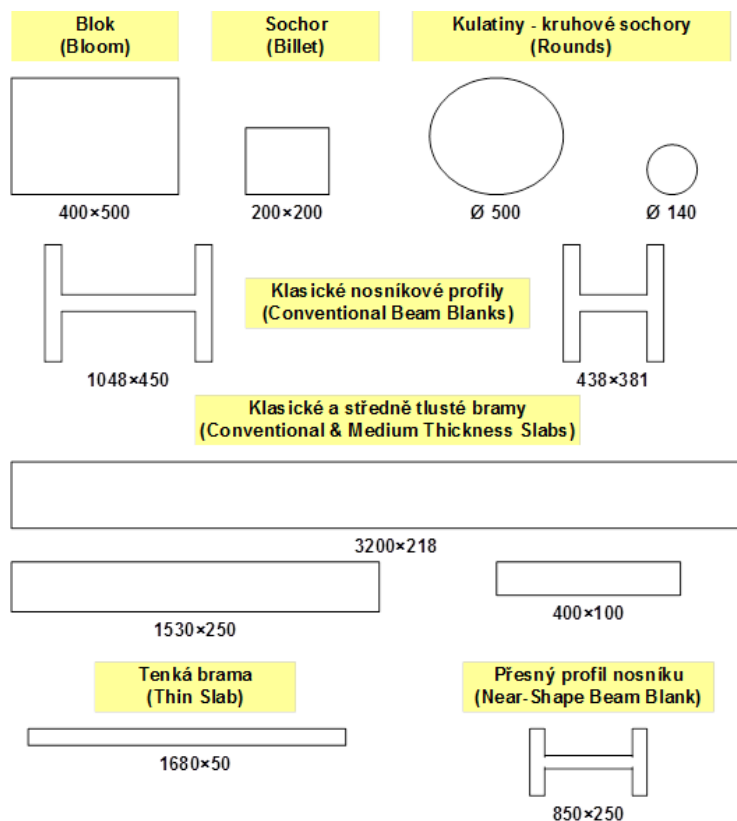


**Výklad**

### □ Princip plynulého odlévání oceli

Plynulé odlévání oceli, nebo-li zařízení plynulého odlévání (ZPO), představuje technologii, která nahrazuje stávající postup odlévání oceli ingotovou cestou. Rozšíření této technologie je způsobeno nejen neustále se zvyšujícími požadavky na kvalitu vyráběné oceli, ale také ekonomickými a výrobními ukazateli.

Princip plynulého odlévání lze definovat jako technologický postup, při kterém je tekutá ocel (lze říci s finálními parametry) průběžně zpracovávána na předlitku, který může mít různé tvary dle požadavků pro následné tváření. Různé tvary předlitků a jejich názvosloví jsou uvedeny na **obr. 10.1**.



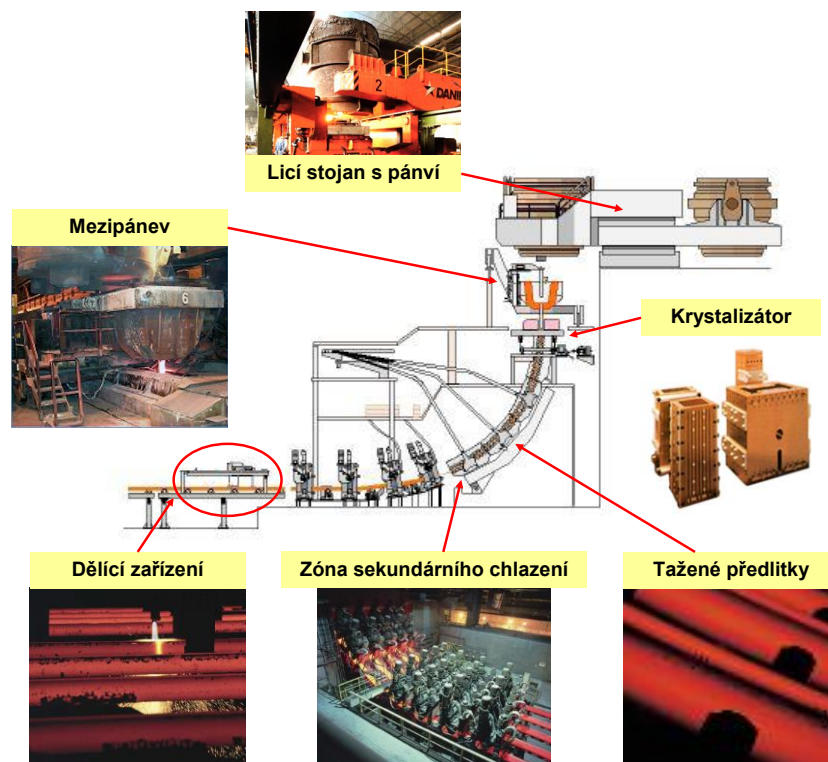
**Obr. 10.1:** Příklady různých typů předlitků a jejich názvosloví

Při odlévání oceli na ZPO je nejprve zpracovaná ocel přivezena v licí pánvi ze zařízení sekundární metalurgie a umístěna na ZPO do licího stojanu, který umožňuje manipulaci s licími pánvemi za účelem nepřetržitého doplňování mezipánve. Mezipánev je další částí ZPO a slouží pro rozdělení oceli na jednotlivé licí proudy, které přivádějí tekutou ocel do krystalizátoru, jenž představuje primární zóny chlazení.

Krystalizátor je tvořen měděným pláštěm, který je ochlazován vodou. Tím dochází ke vzniku licí kůry, která tvoří plášť tekutého jádra předlitku. To znamená, že předlitek po výstupu z krystalizátoru je po průřezu tvořen licí kůrou na okrajích, zatímco ve středu zůstává tekuté jádro. Takto utuhlý předlitek v krystalizátoru je průběžně z krystalizátoru tažen, a proto musí být licí kůra dostatečně silná a pevná, aby nedošlo k průniku tekutého jádra licí kůrou.

Po výstupu z krystalizátoru se předlitek dostává do zóny sekundárního chlazení, kde je ochlazován takovou intenzitou, aby byl na konci této zóny utuhlý po celém průřezu. Předposlední technologický krok představuje dělení předlitku na konci sekundární zóny chlazení na požadované délky pro následné zpracování na válcovně. Na závěr se předlitek dostává na vychlazovací lože, tzv. terciární zónu chlazení, kde dochází k chlazení okolní atmosférou.

Ukázka schématu nejpoužívanějšího radiálního (obloukového) ZPO doplněná o obrázky jednotlivých částí je uvedena na **obr. 10.2**.



**Obr. 10.2:** Schéma radiálního (sochorového) ZPO

Při porovnání procesu plynulého odlévání s klasickou technologií odlévání oceli do kokil lze výhody plynulého odlévání shrnout do následujících bodů:

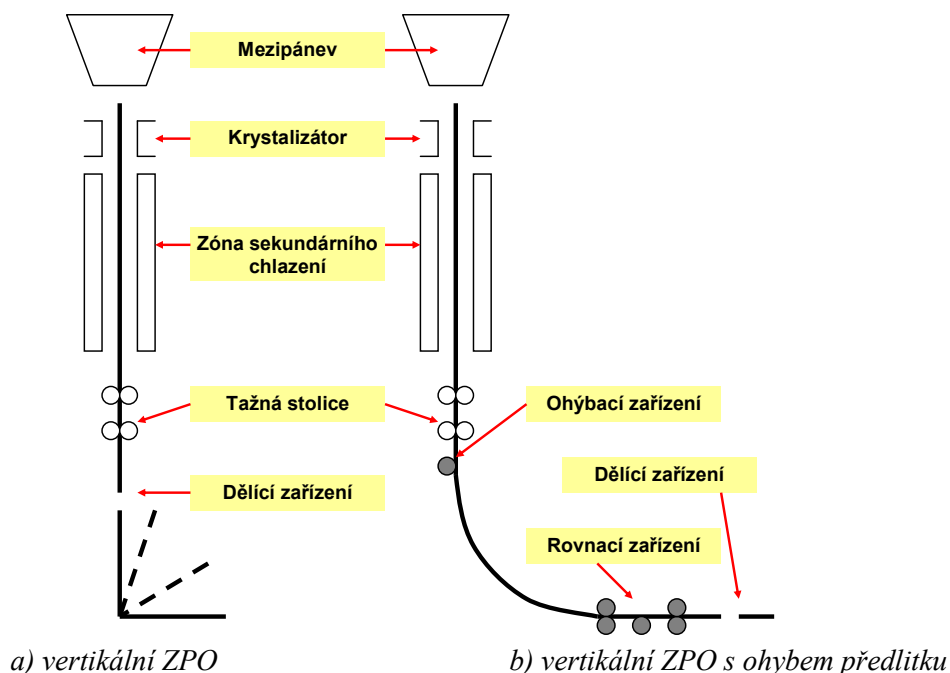
- vysoká efektivnost výroby - způsobena výrazným zvýšením výtěžku oceli na finální výrobek a úsporou energie,
- racionalizace živé práce - vypuštěním výrobních mezioperací - snížení nákladů,
- vyšší úroveň kultury práce - snížením podílu fyzicky namáhavé práce a zvýšením úrovně bezpečnosti práce,
- zlepšení podmínek pro zvyšování kvality - vyloučením subjektivních vlivů na jakost výroby a dosažení vyšší homogenity a jakosti předlitků.

## □ Princip plynulého odlévání oceli

Zařízení plynulého odlévání lze dle jejich konstrukčního vývoje rozdělit do několika skupin. První skupinu tvoří vertikální ZPO. Vývoj této základní konstrukce vertikálního ZPO vedl k její modifikaci za vzniku radiálního (obloukového) ZPO. Tento typ ZPO představuje novou skupinu, která byla dále konstrukčně rozvíjena a v současnosti tvoří převládající typ ZPO používaného na celém světě včetně ČR. Specifické požadavky malých oceláren a výroby jakostních ocelí vedly ke vzniku další konstrukční skupiny, tzv. horizontálního ZPO. Toto ZPO není příliš rozšířeno v ocelářském průmyslu a v současnosti lze konstatovat, že je spíše na ústupu.

## □ Vertikální zařízení plynulého odlévání

Klasické vertikální ZPO uvedené na **obr. 10.3** je charakteristické uspořádáním hlavních částí liciho stroje tvořeného krystalizátorem, vodícími válci, sekundárním chlazením atd. svisle pod sebou. U tohoto typu ZPO dochází k počátku tuhnutí předlitku v rovném vertikálním krystalizátoru, dále probíhá na sestupné vertikální dráze, na níž na předlitek působí sekundární chlazení. Ztuhnutí předlitku v celém průřezu je ukončeno na vertikální dráze. Poté dochází k délkovému dělení předlitku na dopravitelné kusy. Toto dělení probíhá při vertikálním sestupném pohybu předlitku, a proto je dělicí zařízení umístěno pod tažnou stolicí.



**Obr. 10.3:** Základní schémata obou typů vertikálního ZPO

Modifikací tohoto typu bylo vyvinuto vertikální ZPO s ohybem předlitku již ve ztuhlém stavu. V tomto případě je ZPO doplněno o ohýbací válec nebo o sekci ohýbacích válců, které předlitek ohýbají během jeho plynulého odlévání. Účelem tohoto typu ZPO bylo snížení celkové výšky ZPO a také zajištění výhodnějších podmínek pro dělení materiálu, kdy předlitek je dělen až při pohybu ve vodorovném směru, čímž je docíleno i jednoduššího zařízení pro odběr předlitků.

Tyto vertikální typy ZPO se stavěly ojedinele již v 70. letech minulého století, a to pouze v případě výroby oceli o vysoké čistotě nebo ocelí se sklonem k segregaci při tuhnutí, což představují např. trubky pro plynovody v arktických oblastech nebo valivá tělesa ložisek.

### ○ výhody vertikálního ZPO:

- relativně menší nároky na čistotu tekuté oceli,
- snadnější dosažení mikročistoty materiálu v důsledku snadnějšího vyplouvání vměstků svislým tekutým jádrem předlitku,
- předlitek nevyžaduje rovnání (u klasického typu),

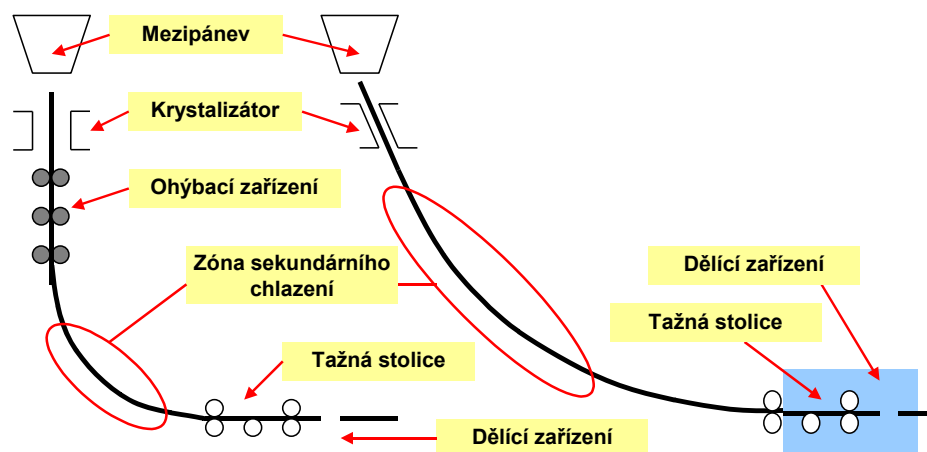
- *menší plošné nároky pro instalaci ZPO (menší zastavěná plocha v ocelárně),*
- *snadnější výroba a renovace měděných desek nebo trubkových vložek krystalizátorů,*
- *nižší měrné náklady na měď pro používání deskových krystalizátorů.*
- *nevýhody vertikálního ZPO:*
  - *omezení licí rychlosti a zvyšování licích výkonů,*
  - *velké nároky na stavební výšku a vyšší investiční náklady,*
  - *složité a ne moc spolehlivé strojní zařízení pro zavádění, spojování a rozpojování startovacích tyčí.*

#### □ Radiální (obloukové) zařízení plynulého odlévání

Radiální ZPO je charakteristické umístěním hlavních částí licího stroje podél tzv. licího oblouku, ve kterém je veden předlitok. U tohoto typu ZPO začíná tuhnutí předlitku v krystalizátoru, dále probíhá na sestupné, tedy zakřivené, dráze, kdy na předlitok působí systém sekundárního chlazení, přičemž úplné ztuhnutí předlitku po celém průřezu je dle použitých podmínek vedení procesu lité ukončeno buď ještě na zakřivené dráze, nebo až v horizontální dráze předlitku. Proto probíhá rovnání předlitku buď při zcela ztuhlém průřezu, nebo s předlitkem obsahujícím tekuté jádro v průřezu.

Tento typ radiálního ZPO lze rozdělit na dva základní typy, které byly dále vyvíjeny dle požadavků a možností jednotlivých oceláren, přičemž oba typy jsou uvedeny na **obr. 10.4**. První typ představuje radiální (obloukové) ZPO s rovným krystalizátorem. Tento typ ZPO je charakteristický tím, že tuhnutí předlitku začíná v rovném krystalizátoru, poté pokračuje do navazující vertikální části, kde získá dostatečně silnou tloušťku stěn, a následně postupuje do ohýbací zóny, kde je deformován do zakřiveného tvaru. Další tvarová deformace předlitku, nebo-li rovnání, nastává při přechodu do horizontální části dráhy.

Druhý typ představuje radiální (obloukové) ZPO se zakřiveným krystalizátorem. V tomto případě dochází k počátku tuhnutí předlitku v zakřiveném krystalizátoru, přičemž v navazující části sestupné dráhy o shodném poloměru nepodléhá předlitok tvarové deformaci, která nastává až při přechodu do horizontální části dráhy.



a) radiální ZPO s rovným krystalizátorem

b) radiální ZPO se zakřiveným krystalizátorem

**Obr. 10.4:** Základní schémata obou typů radiálního (obloukového) ZPO

U radiálního ZPO je metalurgická délka (tedy délka tekutého jádra předlitku) různě rozdělena, a to mezi sestupnou zakřivenou dráhou a horizontální dráhou dle modifikace radiálního ZPO. Tohoto parametru se využívá pro zvyšování licích výkonů, a to zvýšením licích rychlostí.

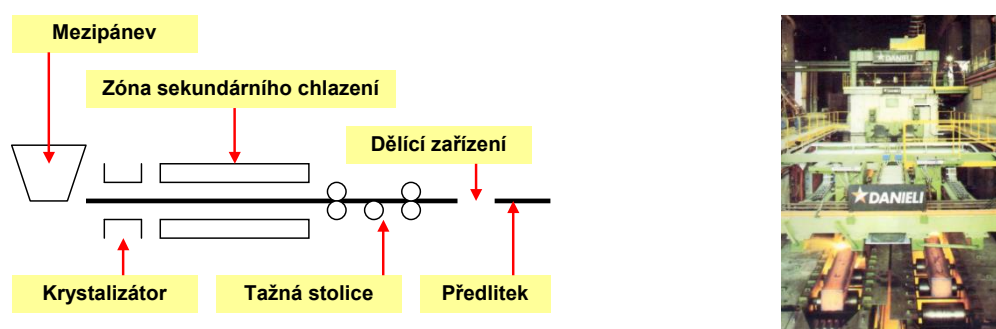
- *výhody radiálního ZPO:*
  - *možnost vysokých licích výkonů s využitím velkých metalurgických délek (velká délka tekutého jádra s vyšší rychlostí lité),*
  - *menší stavební výška a nižší investiční náklady na stavbu oproti vertikálním ZPO,*



- jednodušší strojní zařízení pro dělení a dopravu předlitku,
- nižší poruchovost, snadnější obsluha a údržba zařízení (plošné uspořádání).
- nevýhody radiálního ZPO:
  - relativně vyšší nároky na čistotu tekuté oceli (požadavek na sekundární metalurgii),
  - vyšší plošné nároky pro instalaci ZPO v ocelárně (větší zastavovaná plocha),
  - dražší výrobní zařízení (pro výrobu měděných desek a měděných trubkových vložek krystalizátorů) u ZPO se zakřiveným krystalizátorem,
  - vyšší náklady na měď (při používání deskových krystalizátorů zakřiveného typu).

#### □ Horizontální zařízení plynulého odlévání

Horizontální ZPO je určeno především pro menší ocelárny se širokým sortimentem vysoce jakostních ocelí. Základní schéma tohoto zařízení se vyznačuje uspořádáním jednotlivých částí v horizontálním směru a je uvedeno pro představu na **obr. 10.5**. Toto zařízení bylo postaveno v 80. letech v ocelárně v Hrádku u Rokycan, ale v současnosti již není v provozu. Tento typ ZPO se v ocelářském průmyslu příliš nerozšířil a je spíše na ústupu. Využívá se také při odlévání neželezných kovů, kde se uplatňuje v důsledku rozdílných provozních parametrů a podmínek.



**Obr. 10.5:** Základní schéma horizontálního ZPO a ukázka provozních podmínek

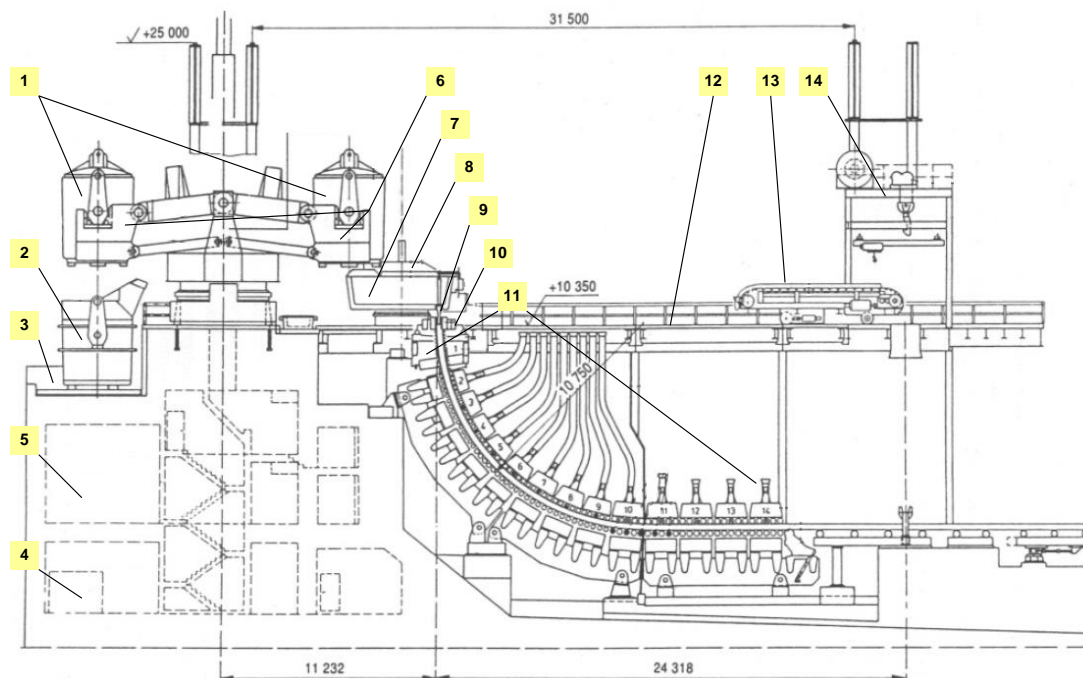
- výhody horizontálního ZPO:
  - malé nároky na stavební výšku, z čehož plynou i nižší investiční náklady,
  - přímé spojení mezipánve s krystalizátorem a malý ferostatický tlak,
  - snadný přístup k zařízení (údržba a obsluha).
- nevýhody horizontálního ZPO:
  - vysoké provozní náklady (speciální keramika),
  - nízká životnost krystalizátorů,
  - technicky náročný reverzní oscilační pohyb odlévaných sochorů včetně pálicího stroje,
  - nemožnost odlévání licích formátů větších průměrů.

#### □ Základní části zařízení plynulého odlévání

V ČR jsou provozovány výhradně radiální (obloukové) ZPO, a proto zde bude detailně popsán pouze tento typ. Zařízení plynulého odlévání se skládá z několika konstrukčních celků, které na sebe navazují a plní rozdílné funkce. Tyto jednotlivé konstrukční celky, nebo také uzly, se skládají z:

- odlévací (licí) pánve s otočným nebo pevným stojanem,
- mezipánve s mezipánvovým vozem,
- krystalizátoru s oscilací a primárním okruhem chlazení,
- elektromagnetického míchače – modifikační zařízení aplikovatelné dle potřeby,
- sekundárního chlazení s vodícími systémy,
- terciárního chlazení s vodícími systémy,
- tažné stolice s rovnacím zařízením,
- dělicího zařízení,
- značkovacích systémů,
- výběhu pro odsun předlitků s chladníkem atd.

Jako příklad zde uvádíme **obr. 10.6**, který představuje řez bramovým radiálním (obloukovým) ZPO pro získání představy o umístění jednotlivých konstrukčních celků.



**Obr. 10.6:** Ukázka průřezu bramovým radiálním (obloukovým) ZPO - *legenda: 1) lící pánve, 2) rezervní lící pánve, 3) havarijní prostor, 4) hydraulická stanice, 5) čerpací stanice ZPO, 6) otočný lící stojan, 7) mezipánve, 8) víko mezipánve, 9) ponorná výlevka, 10) krystalizátor, 11) segmenty 1 až 14 - chladicí, vodící sekce a rovnací stolice, 12) odlévací plošina, 13) vůz se startovacími tyčemi, 14) jeřáb startovacích tyčí.*

**Lící stojan** - otočný lící stojan slouží k manipulacím s lícími pánvemi nad lící plošinou ZPO za účelem doplňování oceli do mezipánve z periodicky přivážených lících pánví.

**Mezipánve** - je zařazována mezi lící pánví a krystalizátorem. Na ZPO slouží mezipánve jako zásobník pro rozdělení oceli do jednotlivých lících proudů a umožňuje výměnu lící pánve, neboť poskytuje dostatek času, aniž by došlo k předčasnému přerušení lícího proudu oceli do krystalizátoru.

**Krystalizátor** – primární zóna chlazení zajišťuje prvotní chlazení tekuté oceli. Tento proces je spojený se vznikem pevné vnější kůry, přičemž ve středu předlitku se nachází tekuté jádro. Právě proto musí být vzniklá vnější kůra předlitku dostatečně silná, aby odolala působení ferostatického tlaku, mechanickým napětím a deformacím po výstupu z krystalizátoru.

**Sekundární oblast chlazení** – nachází se mezi krystalizátorem a terciární zónou chlazení. V této zóně představuje hlavní chladicí médium voda, kterou je předlitek ostříkovan. Správný způsob chlazení v sekundární oblasti je velmi důležitý, neboť ovlivňuje kvalitu předlitku z hlediska vzniku vnitřních i povrchových vad a středové segregace.

**Dělicí zařízení** – plynule odlévané předlitky, jako jsou sochory, bloky a bramy, je nutno dělit na délky, které odpovídají požadavkům navazujících provozů. V současné době se používají převážně dva způsoby dělení, a to řezání plamenem nebo stříhání.

**Terciární zóna chlazení** – konec technického a technologického celku ZPO tvoří terciární oblast chlazení předlitků. Jejimi základními technologickými jednotkami jsou tažný systém s vodící dráhou, u radiálního (obloukového) ZPO rovnací stolice a dále pak dělicí zařízení. Do této zóny chlazení lze také zahrnout odsuvné zařízení včetně chladicího systému. Bez ohledu na konkrétně používaný typ ZPO je v terciární oblasti prakticky ukončen přímý nástřik vody nebo vodovzdušné směsi na povrch předlitku a chlazení se v podstatě realizuje vlivem okolní atmosféry.

Pro ukázkou je v **tab. 10.1** uveden také přehled používaných ZPO v ČR s uvedením jednotlivých uživatelů a typu ZPO.

**Tab. 10.1:** Přehled provozovaných ZPO v ČR

Podnik	Třinecké železářny, a.s.		ArcelorMittal Ostrava, a.s.			Evraz Vítkovice Steel, a.s.
	Blokové radiální	Sochorové radiální	Sochorové radiální	Bramové radiální	Sochorové radiální	
Typ ZPO	Blokové radiální	Sochorové radiální	Sochorové radiální	Bramové radiální	Sochorové radiální	Bramové radiální
Výrobce	CLESIM	CONCAST	MANNESMANN DEMAG	VAI	CONCAST	CLESIM
Uvedení do provozu	1990	1994	12 / 1993	11 / 1997	8 / 1999	6 / 1995
Počet proudů	5	8	6	1	6	1
Kapacita * (t/rok)	800 000	1 200 000	1 100 000	1 100 000	960 000	720 000

\* uváděná kapacita je vztažena k uvedení do provozu



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Böhm, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. SNTL Praha, 1992, 443 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [2] Dolejší, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. Poradenská příručka č. 42. TEVÚH Praha, 1987, 383 s.
- [3] Irving, W. R.: Continuous Casting of Steel. The University Press, Cambridge, 1993, 207 p., ISBN 0-901716-53-7.
- [4] Schwerdtfeger, K.: Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahl Eisen GmbH. Düsseldorf, 1992, 640 p. ISBN 3-514-00350-5.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- princip plynulého odlévání oceli
- konstrukční rozdělení jednotlivých typů plynulého odlévání oceli
- základní části plynulého odlévání
- charakteristika provozovaných ZPO v ČR



### Otázky k probranému učivu

1. Definujte princip plynulého odlévání.
2. Uveďte základní názvosloví a rozdělení různých typů předlitků.
2. Charakterizujte vertikální, radiální a horizontální ZPO.
3. Popište základní části radiálního (obloukového) ZPO.
4. Uveďte a popište provozované ZPO v ČR.

## 11. Mezipánvová metalurgie



**Čas ke studiu:** 100 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

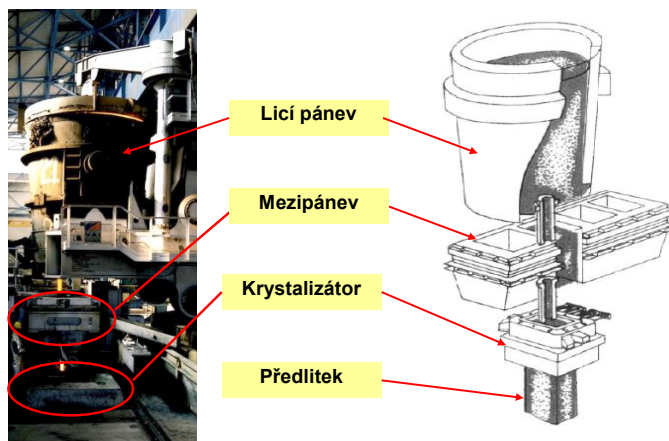
- definovat mezipánvovou metalurgii
- charakterizovat jednotlivé funkce a úkoly mezipánve
- popsat a charakterizovat jednotlivé metody mezipánvové metalurgie



**Výklad**

### □ Konstrukční řešení mezipánve

Mezipánev představuje jeden z nejdůležitějších technologických uzlů zařízení plynulého odlévání a je zařazena mezi lící pánví a krystalizátorem **obr. 11.1**. Vlastní mezipánev je tvořena svařeným ocelovým pláštěm s vnitřní vícevrstvou žárovzdornou vyzdívkou a obvykle také prvky ovlivňujícími proudění oceli v mezipánvi (jako jsou dopadové desky, hrázky, přepážky atd.). Dále se pro zmenšení tepelných ztrát tekuté oceli a zlepšení tepelné bilance mezipánve vybavují rovněž víky. Součástí mezipánve je také regulace vytékající oceli, která je řešena systémem zátkových tyčí nebo šoupátkových uzávěrů. Jak je patrné z **obr. 11.2** a výčtu vybavení, existuje celá řada různých konstrukčních řešení mezipánví.



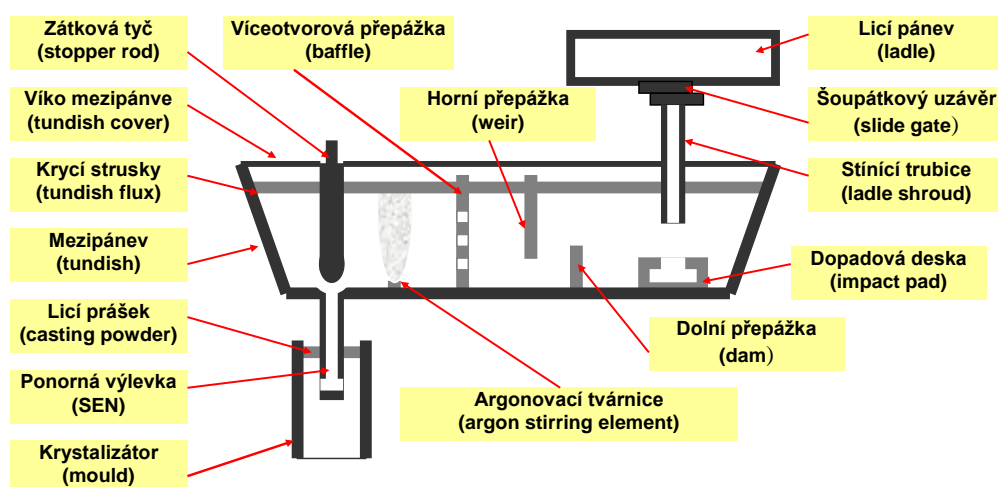
**Obr. 11.1:** Schéma zařazení mezipánve na ZPO



**Obr. 11.2:** Ukázka vybavení mezipánve

Jak je patrné z **obr. 11.3** mezipánve se neskládá pouze z vlastní nádoby, ale je opatřena celou řadou dalších zařízení a vyzdívek, mezi které patří:

- *stínící trubice (ladle shroud),*
- *víko mezipánve (tundish shroud),*
- *pracovní a trvalá vyzdívka mezipánve (tundish refractory),*
- *dopadová deska (impact pad),*
- *přepážky a hrázky (weir a dam),*
- *víceotvorové přepážky (baffle),*
- *argonovací tvárnice ve dně mezipánve (argon stirring element),*
- *monoblokové zátkové tyče (stopper rod),*
- *výlevky mezipánve (tundish nozzle),*
- *šoupátkové uzávěry (slide gate),*
- *ponorné výlevky (SEN).*



**Obr. 11.3:** Schéma zařazení jednotlivých prvků v bramové mezipánvi

Konečný způsob využití a zařazení jednotlivých použitých prvků závisí vždy na daných provozních podmínkách a potřebách jednotlivých provozů oceláren. Z konstrukčního hlediska lze mezipánve rozdělit dle následujících základních kritérií:

- *dle tvaru mezipánve:*
  - *obdélníkové,*
  - *klínové,*
  - *deltové,*
  - *tvaru T,*
  - *tvaru C,*
  - *tvaru H,*
  - *tvaru L,*
  - *tvaru X atd.*
- *dle objemu mezipánve:*
  - *malé (do 20 tun),*
  - *střední (od 20 do 40 tun),*
  - *velkoobjemové (nad 40 tun).*
- *dle typu ZPO:*
  - *sochorové,*
  - *blokové,*
  - *bramové,*
  - *pro odlévání profilů,*
  - *pro odlévání pásů,*
  - *pro horizontální ZPO.*
- *dle symetrie mezipánve:*
  - *symetrické,*
  - *asymetrické,*

Při plynulém odlévání slouží mezipánve jako zásobník pro rozdělení oceli do jednotlivých lících proudů a umožňuje výměnu lící pánve, neboť poskytuje dostatek času, aniž by došlo k předčasnému přerušení lícího proudu oceli do krystalizátoru. Z technologického a metalurgického hlediska zajišťuje tedy mezipánve kromě již uvedených také další důležité funkce, které podstatně ovlivňují stabilitu procesu liti a kvalitu předlitku:



- umožňuje regulaci hmotnostního toku tekuté oceli do krystalizátoru,
- snižuje ferostatický tlak tekutého kovu,
- zrovnoměrně rychlost lícího proudu,
- minimalizuje rozstřík oceli,
- zrovnoměrně teplotu odlévané oceli,
- odstraňuje turbulenci lícího proudu,
- odděluje ocel od strusky.

#### □ Mezipánvová metalurgie

Mezipánev představuje z metalurgického hlediska jednu z posledních možností, kde lze podstatně ovlivnit výslednou čistotu oceli, protože představuje poslední článek při zpracování tekuté oceli. Pokud má mezipánev sloužit jako rafinační nádoba, musí být odstraněny nebo eliminovány zdroje znečištění oceli. Vlastnosti plynule odlévané oceli můžeme tedy ovlivňovat různými způsoby, které se však souhrnně nazývají mezipánvová metalurgie. Mezi nejpoužívanější metody mezipánvové metalurgie patří:

- ochrana lícího proudu pomocí:
  - stínících trubíc,
  - ponorných výlevků,
- mezipánvové strusky:
  - krycí,
  - rafinační,
- úprava proudění oceli v mezipánvi pomocí:
  - dopadových desek,
  - přepážek,
  - víceotvorových přepážek,
- filtrace oceli pomocí:
  - pěnových filtrů,
  - cedítkových filtrů,
- dmýchání inertních plynů do mezipánve:
  - argonovací tvárnici.

#### □ Stínící trubice

Stínící trubice slouží k ochraně lícího proudu oceli z pánve do mezipánve a zabraňují reoxidaci oceli. Na **obr. 11.4** jsou uvedeny příklady různých typů stínících trubíc. Stínící trubice jsou uchyceny k výlevce šoupátkového uzávěru pánve a jejich konec je ponořen do oceli, jak je uvedeno na **obr. 11.5**. Ve stínící trubici však vlivem podtlaku dochází při odlévání k nasávání okolní atmosféry. Aby se tomu zamezilo, dmýchá se do proudu oceli ve stínící trubici inertní plyn.



**Obr. 11.4:** Ukázka různých typů stínících trubíc    **Obr. 11.5:** Nasazování stínící trubice v provozu

Existuje celá řada způsobů ochrany lícího proudu oceli, které představují různé typy stínících trubíc, do kterých je dmýchán inertní plyn. Porovnáním rozdílných způsobů ochrany lícího proudu v **tab. 11.1** bylo prokázáno, že nejučinnější ochranou lícího proudu je použití stínících trubíc

s injektáží argonu. Pozitivní účinky vlivu stínících trubice se projeví ochranou oceli před reoxidací a tím zamezením znečišťování oceli exogenními nekovovými vměstkami. Při dokonalém ponoření zabraňují i strhávání strusky proudem oceli z hladiny mezipánve do krystalizátoru.

**Tab. 11.1:** Rozdílné způsoby ochrany licího proudu a hodnoty obsahu dusíku v oceli

Způsob ochrany	Vzestup obsahu dusíku v oceli (ppm)
Bez ochrany	14
Argon	7
Dusík	17
Stínící trubice	10
Stínící trubice + injektáž argonem	5
Stínící trubice + obalový plyn + argon	5

### □ Strusky mezipánve

Použitím krycích strusek dochází k asimilaci nekovových vměstků, které během setrvání oceli v mezipánvi vyplouvají k mezifázovému rozhraní kov-struska, čímž umožňují zvyšovat čistotu oceli v mezipánvi. Kromě toho krycí struska rovněž působí jako tepelná izolace povrchu oceli a napomáhá i k zamezení sekundární reoxidace.

Jsou rozlišovány dva základní druhy krycích strusek. První představuje krycí struska na bázi tuhého sypkého materiálu, která příznivě působí na tepelnou izolaci lázně, tzv. rýžové plevy. Tyto strusky však mají znatelně horší vlastnosti, co se týče pohlcování nekovových vměstků a zamezování reoxidací. Proto byly vyvinuty krycí strusky rafinační, které jsou využívány jako prostředek pro pohlcování vměstků a také mají vhodné vlastnosti pro zamezení sekundární reoxidace. Dnes se proto používají na hladině oceli v mezipánvi vícevrstvé (dvouvrstvé) strusky, které se skládají jak ze strusky krycí (izolační) tak ze strusky rafinační.

Účinky působení krycích strusek na jakost plynule odlévané oceli jsou závislé na fyzikálně chemických vlastnostech. Mezi nejsledovanější parametry krycích strusek patří:

- chemické složení,
- sypná hmotnost,
- granulometrické složení,
- teplota počátku a konce tavení,
- povrchové napětí,
- rychlost tavení.

Základními složkami krycích strusek jsou oxidy CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O. Dále se přidávají ztekucovací přísady, jako je soda, kazivec, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>. Struska může také obsahovat uhlík, který je přidáván ve formě grafitu v množství 3 až 40 % hmotnosti strusky. S chemickým složením krycí strusky úzce souvisí parametr, který určuje bazicitu strusky. Bazicita strusky bývá velmi nízká a pohybuje se v rozmezí 0,01 až 1.

### □ Optimalizace proudění oceli v mezipánvi

V mezipánvi probíhá celá řada dějů, které ovlivňují výslednou čistotu oceli. Proto je v mezipánvi důležité vytvořit takový typ proudění, aby vlastnosti oceli na jednotlivých licích proudech byly shodné, tj. aby ocel měla stejnou teplotu, stejné chemické složení, stejnou čistotu z hlediska obsahu nekovových vměstků a stejné dynamické chování. Z těchto důvodů je nutné, aby každá částice oceli setrvala v mezipánvi zhruba stejnou dobu a v této době prošla stejnými oblastmi proudění. Důležitou informací o proudění oceli v mezipánvi je doba, kterou určitá část oceli setrvá v mezipánvi, tzv. „retenční čas“. Teoretický průměrný retenční čas oceli v mezipánvi byl vypočítán ze vztahu:

$$\bar{\tau} = \frac{V}{Q_v} \quad (11.1)$$

kde  $\bar{\tau}$  je teoretický průměrný retenční čas, s  
 $V$  - objem oceli v mezipánvi, m<sup>3</sup>  
 $Q_v$  - objemový průtok oceli, m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Pro analýzu proudění oceli v mezipánvi se používá hypotetický model, ve kterém je objem oceli v mezipánvi rozdělen na tři části:

- *promíchávaný objem,*
- *objem s pístovým tokem,*
- *mrtvý objem.*

Promíchávaný objem úzce souvisí s její vtokovou částí, kde kinetická energie lícího proudu z pánve zajišťuje intenzivní promíchávání oceli. Na promíchávaný objem navazuje oblast proudění oceli s pístovým tokem. Důležitou vlastností pístového toku je rovnoměrný průtok lázně, při němž žádný element taveniny nepředbíhá jiný element. V této oblasti má již proudění oceli laminární charakter a jsou vytvářeny podmínky pro vyplouvání vměstků. V mezipánvi jsou i oblasti, ve kterých ocel proudí velmi pomalu. Tato oblast představuje tzv. mrtvý objem mezipánve. V oblastech mrtvého objemu existuje největší nebezpečí pro lokální tuhnutí oceli. Proto je důležité velikost mrtvého objemu v mezipánvi minimalizovat.

Obvykle je tok oceli v mezipánvi spojen s rozptylem retenčních časů, tzn. že některý element taveniny setrvává v mezipánvi delší a některý kratší dobu, než je průměrný retenční čas. Charakter proudění oceli v mezipánvi by měl proto splňovat:

- *minimální rozptyl retenčních časů oceli na jednotlivých výlevkách,*
- *dostatečné absolutní hodnoty retenčních časů,*
- *minimální výskyt mrtvých objemů,*
- *zamezení zkratového proudění,*
- *zachování určitého podílu promíchávaného objemu oceli v mezipánvi,*
- *zajištění dostatečného podílu objemu oceli proudící pístovým tokem.*

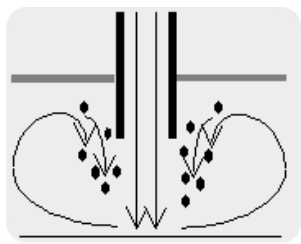
Při provozování mezipánve je nutné dodržovat určitou minimální hladinu oceli, aby v oblasti výlevek nemohlo dojít ke vzniku vírů, a tím ke strhávání vměstků a strusky do vytékající oceli. Proudění oceli k jednotlivým výlevkám je možno ovlivnit instalací vhodných přepážek, přitom je však třeba vzít v úvahu, že tyto přepážky mohou zvyšovat podíl mrtvých objemů a při použití nedostatečně kvalitních materiálů být zdrojem dalšího znečištění oceli.

Proudění lázně v mezipánvi lze podstatně ovlivnit několika způsoby. Je možné optimalizovat celý tvar mezipánve, což je někdy s technických důvodů značně komplikované. Jednoduchým a často používaným způsobem je úprava vnitřního uspořádání mezipánve, kdy jsou do objemu mezipánve vkládány různé objekty (přepážky, hrázky, víceotvorové přepážky atd.), které vhodným způsobem zlepšují charakter proudění v celé mezipánvi.

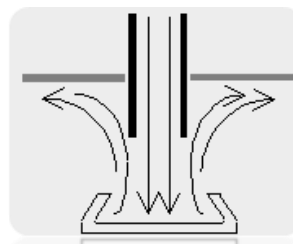
#### □ Dopadové desky

Dopadové desky se umísťují do mezipánve v oblasti pod stínicí trubici. Zamezují možnosti rozstříku oceli během plnění mezipánve, snižují turbulenci proudění lázně v mezipánvi a vytváří vhodnější typ ustáleného proudění, jak je uvedeno na **obr. 11.6**. V současnosti představují dopadové desky jednoduchou náhradu složitých a pracně instalovaných horních a dolních přepážek (weir a dam). Vhodně tvarovanou dopadovou deskou umístěnou na dně mezipánve pod stínicí trubici lze tedy dosáhnout optimálního proudění oceli, jak je vidět na obrázku.





a) bez použití dopadové desky



b) při použití dopadové desky

**Obr. 11.6:** Charakter proudění oceli v mezipánvi

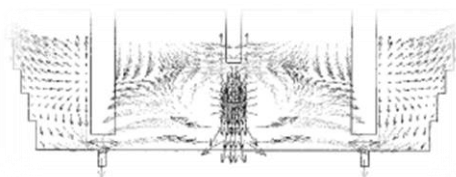
Účinky použití dopadových desek použitých v mezipánvi lze tedy shrnout do následujících bodů:

- zvýšení čistoty odlévaného kovu,
- zjednodušení konstrukce mezipánve (odstranění hrázek a přepážek),
- prodloužení sekvence,
- zvýšení produktivity,
- zlepšení kvality předlitků.

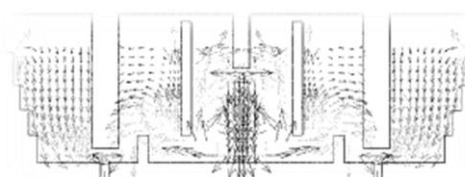
Dopadové desky mohou mít různou konfiguraci, ale mají několik společných detailů. Stěny dopadových desek bývají v horní části překlopeny dovnitř, což způsobuje, že proud z pánve rozptýlený podél lící podložky je usměrňován zpět do středu tohoto proudu. Dopadové desky mohou vystupovat pod různými obchodními názvy, jako např. Turbostop (FOSECO), Preventur Pad (COMAT), Cushion Pad (Advent), Impact Pad (RHI) atd.

#### □ Přepážky a hrázky

Pro úpravu charakteru proudění oceli v mezipánvi jsou často používány přepážky, které jsou také jinak označovány jako hrázky a jízky, nebo je vhodné používat anglické výrazy dam (spodní přepážka) a weir (horní přepážka). Jejich úkolem je zrovnoměnit proudění, eliminovat mrtvé oblasti a zejména eliminovat zkratová proudění, což je patrné z **obr. 11.7**. Přiblížení k tomuto stavu vede k vytvoření podmínek pro lepší odstraňování nekovových vměstků a zlepšení teplotní a koncentrační homogenity lázně v mezipánvi. Jejich vliv na proudění je uveden na schématu.



a) mezipánve bez přepážek



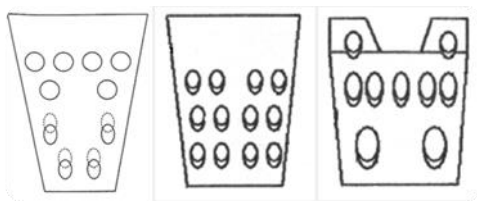
b) mezipánve s přepážkami

**Obr. 11.7:** Ukázka vlivu přepážek na proudění oceli v mezipánvi pomocí rychlostních vektorů

Důležitou podmínkou, kterou je nutno brát v úvahu, je, aby optimální varianty tvaru a uspořádání přepážek byly navrhovány na základě modelového výzkumu. Optimální varianta pro daný typ mezipánve nemusí být optimální pro jiné provedení mezipánve.

#### □ Víceotvorové přepážky

Víceotvorové přepážky (baffle) představují různé typy svisle umístěných přepážek v mezipánvi, které přesahují výšku lázně, mají různé tloušťky a jsou vyrobeny z různého žárovzdorného materiálu. Základní charakteristikou přepážek je to, že obsahují větší počet otvorů různého průměru, tvaru a sklonu, přes které během odlévání proudí ocel k jednotlivým výlevkám v mezipánvi, což je patrné z **obr. 11.8**.



**Obr. 11.8:** Ukázka víceotvorových přepážek

Navrhnout optimální variantu víceotvorových přepážek je úkol poměrně složitý, protože závisí na tvaru mezipánve, výšce lázně, průtoku přes přepážku (a tedy na lici rychlosti) a dalších parametrech. Při návrhu je nutno optimalizovat umístění přepážek, jejich tloušťku a hlavně parametry otvorů (průměr, tvar, počet, sklon).

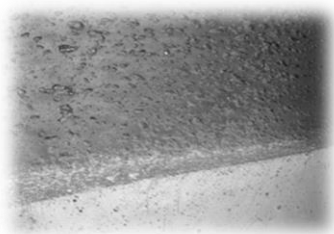
#### □ Keramické filtry

Filtrace oceli je jedním ze způsobů, kterým můžeme výrazně ovlivnit kvalitu odlévané oceli. Filtry musí mít schopnost zachytit nekovové vměstky a jiné nečistoty a nesmí klást příliš velký odpor proudění taveniny. Protože mezipánve je velký zásobník tekuté oceli, musí mít keramické filtry vysokou odolnost proti tepelným šokům a mechanickou pevnost za tepla, jakož i odolnost proti působení kovu a strusky. Pro filtraci oceli v mezipánvi je používáno několik druhů keramických filtrů.

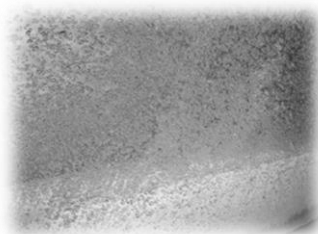
Nejčastěji se v podmínkách mezipánve používají filtry pěnové či víceotvorové (cedítkové), jež se umísťují ve vertikálních přepážkách, ve kterých je umístěno 5 až 20 pěnových filtrů, a tyto přepážky oddělují dopadové místo mezipánve (tzn. místo vtoku oceli z lici pánve) od oblasti jednotlivých výlevek.

#### □ Dmýchání inertních plynů do mezipánve

Inertní plyn je přiváděn do lázně pomocí porézních tvárnice, které jsou umístěny většinou ve dně mezipánve. Na tyto tvárnice jsou kladeny zvýšené požadavky, protože by měly zachovávat funkčnost během celého odlévání, což v praktických podmínkách představuje odlišný počet taveb v jediné sekvenci. Ukázka vlivu dmýchání inertního plynu pro vytvoření pro stěny bublinek je uvedena na **obr. 11.9**.



a) intenzita dmýchání plynu -  $5 \text{ l.min}^{-1}$



b) intenzita dmýchání plynu -  $30 \text{ l.min}^{-1}$

**Obr. 11.9:** Ukázka vlivu intenzity dmýchání plynu na vytvoření stěny bublinek

Vystupující plyn z tvárnice tedy působí jako přepážka umístěná ve dně mezipánve a směřuje proud oceli k mezifázovému rozhraní struska-kov. Vyšší stupeň odstranění nekovových vměstků je výsledkem tří navzájem působících mechanismů:

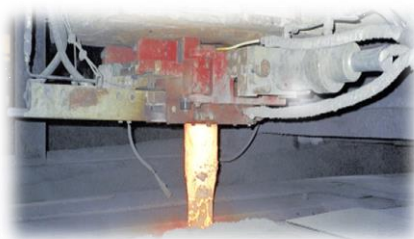
- usměrnění proudění lázně směrem ke hladině mezipánve,
- lepší koalescence vměstků, následkem čehož se zvyšuje i rychlost jejich vyplouvání,
- zachycení vměstků na povrchu bublin dmýchaného plynu, které vyplouvají ke hladině oceli a procházejí přes vrstvu strusky, v níž se vměstky zachycují.

#### □ Ponorné výlevky

Ponorné výlevky (trubice) plní v zásadě stejné úlohy jako stínící trubice, avšak přivádějí proud oceli z mezipánve do krystalizátoru. Mezi důležité funkce, které ponorné výlevky plní, patří:

- ochrana licího proudu před naplyněním (tzv. reoxidaci oceli),
- zamezení rozstříkávání kovu,
- přivádění oceli do krystalizátoru laminárním proudem, čímž se zrovnoměňuje rozdělení kovu po průřezu krystalizátoru,
- zabránění strhávání licího prášku a nekovových částic z hladiny do krystalizátoru,
- usnadnění vyplavování vměstků.

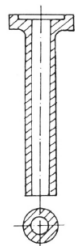
Ukázka různých typů ponorných výlevek je uvedena na **obr. 11.10** a na **obr. 11.11** je ukázka provozní aplikace ponorné výlevky.



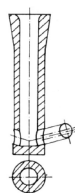
**Obr. 11.10:** Ukázka různých typů ponorných výlevek

**Obr. 11.11:** Ukázka ponorné výlevky v provozních podmínkách

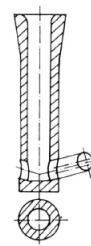
Tvar ponorné výlevky (trubice) výrazně ovlivňuje kvalitu předlitků. Podle tvaru krystalizátoru mohou mít ponorné výlevky různé tvary, jako např. kruhové, oválné, s náporovým a beznáporovým vyústěním konce. Ukázka jednotlivých ponorných výlevek s různými tvary je uvedena na **obr. 11.12**.



a) kruhová náporová



b) kruhová beznáporová

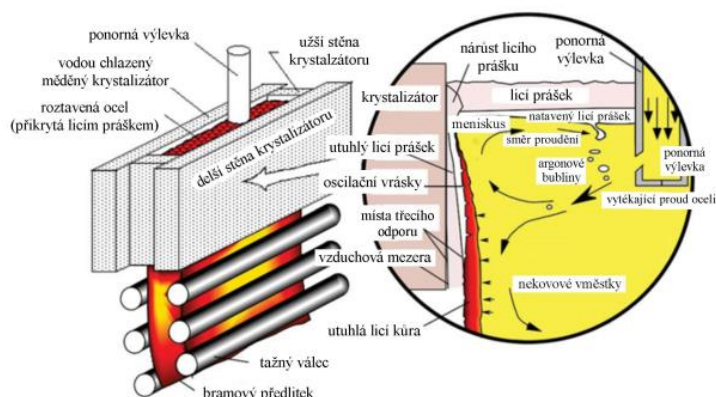


c) oválná beznáporová

**Obr. 11.12:** Ukázka různých typů ponorných výlevek

Při používání ponorných výlevek (trubic) je do prostoru ponorné výlevky také dmýchán inertní plyn. Cílem injektáže inertního plynu je prevence proti sekundární oxidaci a naplynění oceli vytékající z mezipánve do krystalizátoru. Existuje řada způsobů ochrany lité oceli, které představují různé typy ponorných výlevek, trubic a dmýchacích elementů ochranného plynu. Ponorné výlevky však zajišťují nejen ochranu oceli před naplyněním.

Ponorné výlevky (trubice) mají také vliv na proudění oceli v krystalizátoru a tím ovlivňují čistotu plynule lité oceli. Mezi parametry ovlivňující čistotu patří velikost, tvar a úhel sklonu výtokových kanálků s beznáporovým ukončením, ale také velikost průřezu trubice na vstupu a výstupu. Kromě těchto parametrů má vliv také hloubka ponoření ponorné výlevky do oceli v krystalizátoru. Všechny tyto uvedené parametry ovlivňují proudění oceli v krystalizátoru a tím i chování licího prášku na hladině, jeho možné strhávání nebo vyplouvání nekovových vměstků a jejich zachytávání, ovlivňují ale také tvorbu vznikající licí kůry. Ukázka vlivu ponorné výlevky na proudění oceli v krystalizátoru je uvedena na **obr. 11.13**.



**Obr. 11.13:** Ukázka vlivu ponorné výlevky na proudění oceli v bramovém krystalizátoru

Lze provádět také odlévání oceli bez ponorných výlevek (trubic), tzv. otevřené lití, které je provázeno vyšším nebezpečím reoxidace při volném výtoku oceli do prostoru, protože proud oceli nebývá celistvý. Tento způsob odlévání se používá především u ocelí nižších jakostí, u kterých nejsou tak přísné požadavky na obsahy plynů v ocelích a rovněž i při použití krystalizátorů malých průřezů.



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Böhms, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. SNTL Praha, 1992, 443 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [2] Dolejší, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. Poradenská příručka č. 42. TEVÚH Praha, 1987, 383 s.
- [3] Irving, W. R.: Continuous Casting of Steel. The University Press, Cambridge, 1993, 207 p., ISBN 0-901716-53-7.
- [4] Schwerdtfeger, K.: Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahl Eisen GmbH. Düsseldorf, 1992, 640 p. ISBN 3-514-00350-5.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- konstrukční řešení mezipánve
- úloha mezipánve při plynulém odlévání oceli
- princip mezipánvové metalurgie
- vliv proudění oceli v mezipánvi
- metody mezipánvové metalurgie



### Otázky k probranému učivu

1. Definujte základní úlohy mezipánve při plynulém odlévání oceli.
2. Charakterizujte mezipánvovou metalurgii.
3. Popište vliv proudění oceli v mezipánvi na čistotu odlévané oceli.
4. Uveďte a popište jednu z metod mezipánvové metalurgie.

## 12. Tuhnutí a krystalizace předlitku při plynulém odlévání



**Čas ke studiu:** 100 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat jednotlivé zóny chlazení předlitku
- charakterizovat primární zónu chlazení – krystalizátor
- vysvětlit vliv elektromagnetického míchání na odlévaný předlitek
- popsat sekundární zónu chlazení
- definovat používané dělicí zařízení na ZPO
- charakterizovat terciární zónu chlazení



**Výklad**

### □ Charakteristika chlazení předlitku na ZPO

Na rozdíl od klasického odlévání ingotů se při plynulém odlévání předlitek pohybuje, a to po zakřivené dráze a prochází třemi zónami chlazení, ve kterých jsou z předlitku odváděny následující množství tepla:

- *primární zóna chlazení - krystalizátor (odváděné množství tepla 20 až 45 % - nižší hodnota se vztahuje na Bramové předlitky),*
- *sekundární zóna chlazení – zóna mezi krystalizátorem a terciární zónou chlazení (odváděné množství tepla 40 až 55 %),*
- *terciární chlazení – vychlazovací lože představující konec technologického celku ZPO (odváděné množství tepla 20 až 30 %).*

### □ Primární zóna chlazení - krystalizátor

Krystalizátor představuje důležitou část ZPO. Zajišťuje prvotní chlazení tekuté oceli. Tento proces je spojený se vznikem pevné vnější kůry, přičemž ve středu předlitku se nachází tekuté jádro. Právě proto musí být vzniklá vnější kůra předlitku dostatečně silná, aby odolala působení ferostatického tlaku, mechanickým napětím a deformacím po výstupu z krystalizátoru. Krystalizátor odvádí 20 až 45 % veškerého tepla vznikajícího předlitku, takže rovnoměrnost odvodu tepla ovlivňuje nejen teplotní napětí v krystalizátoru, ale i v předlitku.

Hlavní materiál pro výrobu krystalizátoru tvoří měď, protože tento materiál vykazuje vysokou tepelnou vodivost. Jsou využívány i slitiny mědi na bázi např. Cu-Ag, Cu-Cr, Cu-Zr atd. Tyto slitiny vykazují vyšší životnost než krystalizátory z čisté mědi.

Dle konstrukce lze krystalizátory rozdělit na tři základní typy, a to na blokové, trubkové a deskové, přičemž nelze opomenout zvláštní skupinu tzv. zakřivených krystalizátorů, které umožňují podstatně snížit výšku ZPO.





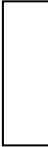
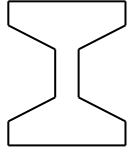
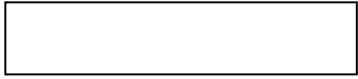
První typ představují blokové krystalizátory, které jsou vyrobeny z výkovku, přičemž jsou v nich vyvrtány otvory pro průchod chladicí vody. Tento typ není příliš používán, protože při jeho výrobě je spotřebováno velké množství mědi. Zbylé dva typy krystalizátorů (trubkové a deskové) se skládají ze dvou částí, vnitřní měděné části a vnější ocelové konstrukce, do které je měděná část vkládána. Trubkové krystalizátory se tedy skládají z měděné bezešvé trubky, která je vložena a upevněna do ocelové skříně. Tyto krystalizátory jsou charakteristické snadnou regulací teploty (změnou průtoků

vody), dobrou tepelnou účinností a jednoduchou konstrukcí. Jsou používány pro malé kruhové a čtvercové průřezy zhruba do 200 mm. Poslední typ představují deskové krystalizátory, které se skládají ze čtyř desek spojených v ocelovém rámu. V současnosti se prosazuje úprava těchto krystalizátorů, tzv. nastavitelných deskových krystalizátorů, které umožňují změnu průřezu. Ukázky jednotlivých typů krystalizátorů jsou uvedeny na **obr. 12.1**.



**Obr. 12.1:** Ukázka vybraných typů krystalizátorů

Trubkové a deskové krystalizátory se také rozdělují dle jejich tvaru a velikosti v průřezu. Existuje jich celá řada, přičemž jejich základní rozdělení je uvedeno na **obr. 12.2**.

Krystalizátory						
Trubkové (mm)				Deskové (mm)		
						
50 až 200	<130 × <200	180 až 290	100 až 260	200 až 450 × 200 až 650	210 až 400 × 350 až 780	100 až 350 × 300 až 2640

**Obr. 12.2:** Rozdělení trubkových a deskových krystalizátorů dle jejich průřezu

Důležitým parametrem krystalizátorů je tzv. konicita, která představuje zúžení průřezu krystalizátoru po jeho délce. Je nutné si uvědomit, že v průběhu tuhnutí oceli v krystalizátoru dochází ke vzniku utuhlé vrstvy, která se však smršťuje. Případná ztráta kontaktu utuhlé vrstvy se stěnou krystalizátoru může vést k poruchám odvodu tepla a nestabilitě lití.

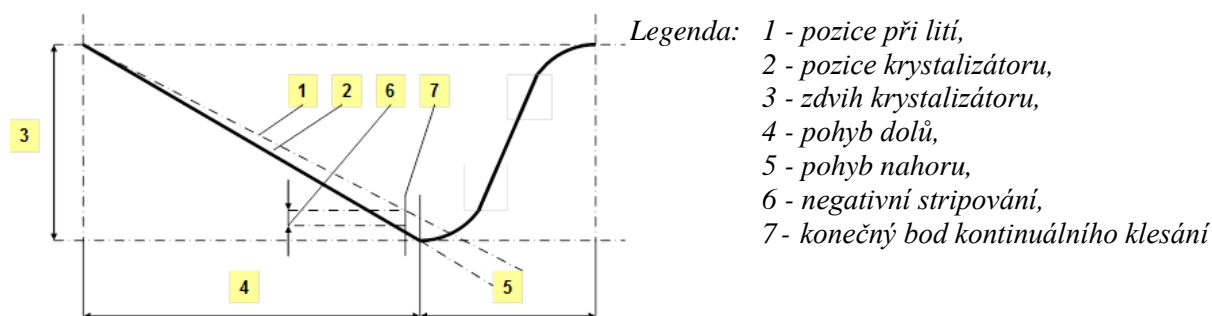
Smršťování je ovlivněno především chemickým složením oceli (hlavně obsahem C), a proto krystalizátor o určitém vnitřním tvaru (konicitě) není vhodný pro více značek ocelí, což ovlivňuje i jeho životnost. Protože by měl krystalizátor podepírat licí kůru v celé délce a hlavně v oblasti menisku a těsně pod ní, měla by se konicita maximálně přizpůsobovat křivce smršťování po celé jeho délce.

Dalším důležitým parametrem, podle kterého jsou krystalizátory děleny, představuje způsob uložení krystalizátoru v ZPO. Dříve se používalo uložení stacionární, kdy docházelo k pohybu předlitku vůči pevně uchycenému krystalizátoru, což snadno vedlo k přetržení licí kůry. Proto byly vyvinuty krystalizátory pohyblivé, jako např. pružinové vačkové nebo hydraulické, kdy se krystalizátor pohybuje - osciluje a tím umožňuje odtržení utuhlé licí kůry předlitku od stěn krystalizátoru s minimalizací nebezpečí přetržení licí kůry a vzniku výronu tekutého jádra. Tato technika, nebo-li pohyb krystalizátoru, se nazývá oscilace. Z hlediska tvaru křivky rozeznáváme následující typy oscilace:



- sinusová – rychlost krystalizátoru směrem dolů a nahoru je stejná,
- rychlost krystalizátoru směrem dolů je pomalejší než nahoru,
- rychlost krystalizátoru směrem dolů je rychlejší než nahoru.

Na **obr. 12.3** je znázorněn druhý případ. Pohyb krystalizátoru směrem dolů je o něco rychlejší než rychlost vytahování předlitku, čímž vzniká tzv. negativní stripování. Následuje pohyb krystalizátoru směrem nahoru, přičemž jeho rychlost je asi třikrát vyšší než rychlost pohybu směrem dolů.



**Obr. 12.3:** Ukázka principu oscilace

Také v případě pohyblivého – oscilačního uložení krystalizátoru může vlivem tření docházet k přetržení licí kůry, což se minimalizuje použitím licích prášků nebo mazáním olejem. Licí prášek tvoří suchý, tepelně izolující jemnozrný materiál s definovanou teplotou tavení, přičemž plní následující funkce:

- ochrana kovu před reoxidací oceli v krystalizátoru,
- tepelná izolace a ochrana před tuhnutím oceli na povrchu,
- pohlcování a rozpouštění vměstků,
- mazání a odvod tepla na styku mezi ocelí a krystalizátorem.

Účinky působení licích prášků pro plnění uvedených funkcí jsou závislé na fyzikálně chemických vlastnostech. Licí prášky se užívají při lití předlitků větších rozměrů, přičemž při lití menších předlitků je licí prášek zanášen do krystalizátoru, což ovlivňuje výslednou čistotu oceli. Proto jsou používány u menších předlitků mazací oleje, tedy rostlinné oleje, např. řepkový olej apod. Mazací olej je přiváděn do horní části krystalizátoru, přičemž část shoří nad hladinou, čímž zabrání přístupu vzduchu k tekuté oceli. Další část se vypaří mezi tekutou ocelí a stěnou krystalizátoru, čímž zabrání smáčení stěn, a poslední část snižuje tření mezi utuhlou vrstvou předlitku a stěnou krystalizátoru.

S ohledem na charakter chlazení lze krystalizátor rozdělit po jeho délce na:

- úsek bezprostředního styku kovu se stěnou krystalizátoru,
- úsek, v němž se vlivem smršťování vytváří mezi stěnou krystalizátoru a předlitkem mezera (tento úsek je rozhodující, protože v něm přechází 80 až 90 % tepla odebraného krystalizátoru do chladicí vody).

Průchod tepla od povrchu předlitku do chladicí vody v případě tvorby mezery se skládá z následujících článků:

- přenos tepla plynovou mezerou v krystalizátoru,
- vedení tepla měděnou deskou krystalizátoru,
- přenos tepla od stěny krystalizátoru do chladicí vody.

Zásadní vliv na přenos tepla v krystalizátoru má tedy tvorba a charakter plynové mezery. Mechanismus tuhnutí a tvorby licí kůry v oblasti menisku bude ovlivňován jednak přímým kontaktem tekuté fáze se stěnou krystalizátoru, jednak bude probíhat v oblasti už zatuhlého a různými vlivy formovaného menisku. Nebude to tedy struktura typická pro přímý a usměrněný odvod tepla stěnou krystalizátoru, ale dendritická struktura typická pro tuhnutí na volné ploše. Prokazuje se tím, že začátek tuhnutí oceli probíhá v oblasti ovlivněné povrchovými jevy, tedy v oblasti menisku. Zde lze



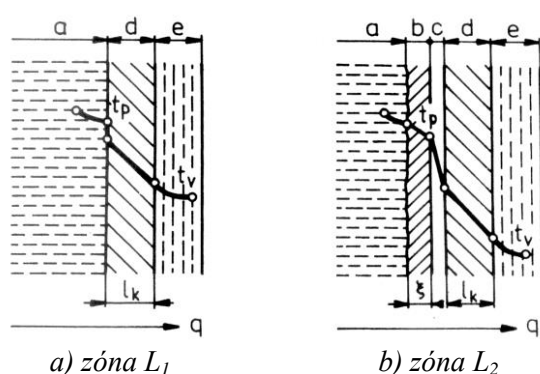
hledat příčinu vzniku oscilačních vrásek a také zárodků příštích vad jak povrchových, tak i podpovrchových.

Porovnáním hustoty tepelného toku v krystalizátoru lze ukázat průběh přestupu tepla v krystalizátoru. Je patrné, že hustota tepelného toku v místě hladiny a nad ní je nízká s následným silným vzestupem v čase 2 sekundy od začátku tuhnutí, což odpovídá místu 3 až 10 cm pod meniskem oceli při běžných licích rychlostech. Pak hustota tepelného toku postupně klesá k nízké hodnotě v okolí spodního okraje krystalizátoru. Tento průběh změn hustoty tepelného toku lze charakterizovat následně:

- o na začátku je kontakt oceli s krystalizátorem omezený v poměrně malém místě, které se rychle zvětšuje s tvorbou ztuhlé licí kůry,
- o pozorované maximum hustoty tepelného toku je způsobeno dobrým tepelně vodivým kontaktem licí kůry, která je tlačena proti stěně krystalizátoru interním ferostatickým tlakem,
- o následně, co se licí kůra stane v dostatečné míře samonosná, vytvoří se mezi ní a stěnou krystalizátoru plynová mezera. Tento jev spolu se zvětšující se tloušťkou utužlé licí kůry snižuje hustotu tepelného toku.

Z hlediska způsobu sdílení tepla mezi tuhoucím kovem a krystalizátorem lze tedy krystalizátor po výšce rozdělit na tři zóny, jak je vidět na **obr. 12.4**:

- o zóna  $L_1$  – zde dochází k nejintenzivnějšímu odvádění tepla vedením, je zde přímý styk odlévaného kovu se stěnou krystalizátoru, úzká vrstva licí kůry,
- o zóna  $L_2$  – zde dochází k intenzivnímu proudění oceli, vytváří se již částečně vzduchová mezera, která je však nestabilní - je zde již větší tloušťka licí kůry,
- o zóna  $L_3$  – silná tloušťka licí kůry, která by již měla odolat ferostatickému tlaku, vytváří se zde stabilní plynová mezera - odvod tepla se snižuje až pětkrát.



Legenda: a - tekutá ocel,  
b - utužlá kůra předlitky,  
c - mezera,  
d - stěna krystalizátoru,  
e - chladicí voda,  
 $t_p$  - teplota předlitky,  
 $t_v$  - teplota vody,  
 $q$  - hustota tepelného toku,  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

**Obr. 12.4:** Schéma přestupu tepla v primární oblasti chlazení

V zóně  $L_1$ , která charakterizuje vrchní část krystalizátoru, kde je tekutá ocel v přímém styku se stěnou krystalizátoru, se pohybuje hodnota  $q_1$  v rozmezí  $2300 \div 2900 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

V zóně  $L_2$  (přechodová zóna), která se nachází pod zónou  $L_1$  a kde se již přechodně realizuje tvorba tuhnutí kůry, se hodnota  $q_1$  snižuje a pohybuje se v rozmezí  $1500 \div 1800 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

V zóně  $L_3$ , která charakterizuje spodní část krystalizátoru, kde se již vytváří stálá mezera mezi utužlou kůrou oceli a vnitřním povrchem krystalizátoru, se odvod tepla dále snižuje a hustota tepelného toku  $q_1$  se pohybuje v rozmezí  $800 \div 1400 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Pro hustotu tepelného toku v primární oblasti chlazení, mezi tuhoucím předlitkem a chladicí vodou proudící v krystalizátoru, byla odvozena rovnice

$$q_1 = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \cdot (t_p - t_v) = k_1 \cdot (t_p - t_v) \quad (12.1)$$

kde:  $q_1$  je hustota tepelného toku ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),

- $\alpha_1$  – součinitel přestupu tepla z povrchu předlitku na vnitřní povrch krystalizátoru ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $s_k$  – tloušťka stěny měděného krystalizátoru (m),  
 $\lambda_k$  – měrná tepelná vodivost měděného krystalizátoru ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $\alpha_2$  – součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu krystalizátoru do proudu chladicí vody v krystalizátoru ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $t_p$  – povrchová teplota předlitku ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $t_v$  – teplota chladicí vody v krystalizátoru ( $^{\circ}\text{C}$ ).

V rovnici (13.1) je uvedena veličina,

$$k_I = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (12.2)$$

kde:  $k_I$  je součinitel prostupu tepla z povrchu předlitku do chladicí vody, proudící v kanálcích krystalizátoru ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Tento součinitel je platný pro případ, kdy je stěna krystalizátoru přímo ve styku s tekutou ocelí a přestup tepla je realizován přes měděnou stěnu krystalizátoru. Tento případ je však v praxi případem ideálním, možným pouze v tekutém menisku oceli **obr. 12.4a**.

V případě, kdy je již mezi krystalizátorem a tekutou ocelí vytvořena licí kůra, přítomen utuhlý licí prášek, respektive přítomna plynová mezera, je přestup tepla nutno upravit v souladu s rovnicí (12.3) **obr. 12.4b**.

$$k_{II} = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\xi}{\lambda_{k\ddot{u}ry}} + \frac{\Delta}{\lambda_{ox}} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (12.3)$$

- kde:  $k_{II}$  je součinitel prostupu tepla přes jednotlivé vrstvy ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $\xi$  – tloušťka licí kůry (m),  
 $\Delta$  – tloušťka strusky (m),  
 $\delta_m$  – tloušťka plynové mezery (m),  
 $s_k$  – tloušťka stěny krystalizátoru (m),  
 $\lambda_{k\ddot{u}ry}$  – měrná tepelná vodivost utuhlé kůry ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $\lambda_{ox}$  – měrná tepelná vodivost strusky ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $\lambda_m$  – měrná tepelná vodivost plyné směsi v mezeře ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $\lambda_k$  – měrná tepelná vodivost měděného krystalizátoru ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $\alpha_1$  – součinitel přestupu tepla z povrchu předlitku na vnitřní povrch krystalizátoru, ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  
 $\alpha_2$  – součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu krystalizátoru do proudu chladicí vody v krystalizátoru ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

V plynové mezeře mezi utuhlou struskou a povrchem krystalizátoru se však uskutečňuje přenos tepla nejen vedením, ale i sáláním. Sálání má však zanedbatelný vliv na součinitel přestupu tepla, je-li  $\delta_m$  menší než  $5\cdot 10^{-2}$  mm. Pro větší hodnoty  $\delta_m$  vliv sálání narůstá, a to zejména pro vyšší povrchovou teplotu předlitku. Na intenzitu sdílení tepla přes plynovou mezeru má převažující vliv přenos tepla vedením (75 %) nad přenosem tepla sáláním (25 %).

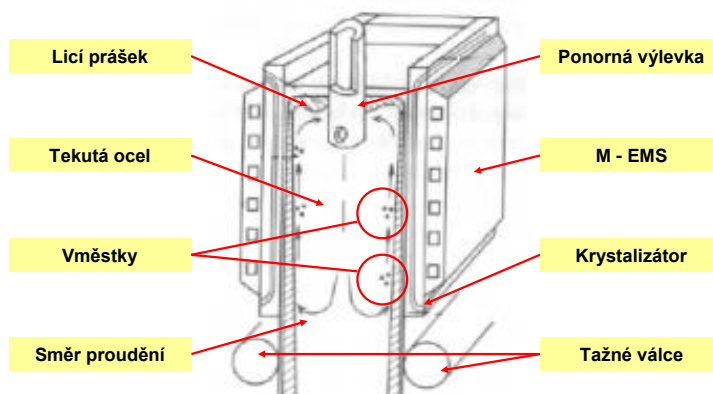
Přenos tepla vedením je ovlivňován velikostí plynové mezery  $\delta_m$  a dále zejména hodnotou  $\lambda_m$ . Pro hodnotu součinitele  $\lambda_m$  je určující obsah vodíku v plynové směsi, neboť ten má asi 8× větší tepelnou vodivost než ostatní složky plynové směsi.

Velikost mezery mezi předlitkem a stěnou krystalizátoru kolísá v závislostech na vzdálenosti po délce krystalizátoru, na charakteru pohybu krystalizátoru, na rychlosti lití atd. Velikost plynové mezery mezi

předlitkem a stěnou krystalizátoru není stálá a její hodnota byla zjištěná experimentálně a pohybuje se v rozmezí 0,2 až 2,5 mm.

### □ Elektromagnetické míchání

Elektromagnetické míchání představuje jednu z možných technologií, kterou lze zvýšit vnitřní kvalitu předlitku. Princip této technologie spočívá v zajištění elektromagnetického pole v celém objemu kovu. Jeho vlivem dochází k míchání, což zabezpečuje tepelnou a chemickou homogenitu, dále usměrnění proudění a vyplouvání vměstků a také zabránění vzniku vnitřních vad předlitku. Schéma umístění a vlivu míchání v krystalizátoru (M-EMS) je uvedeno na **obr. 12.5**.

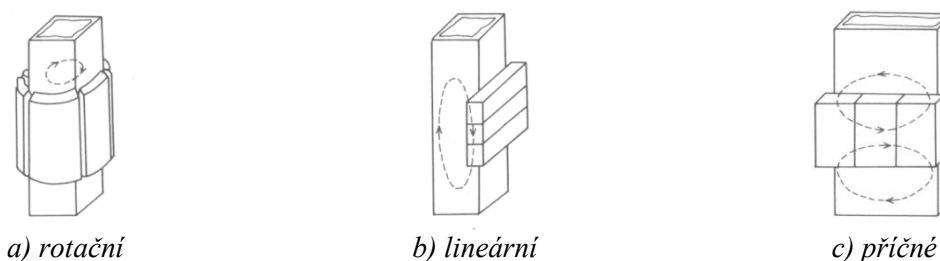


**Obr. 12.5:** Účinek míchání v krystalizátoru (M-EMS)

Aplikace zařízení elektromagnetického míchání je u zařízení plynulého odlévání řešeno ve čtyřech různých úrovních:

- v krystalizátoru,
- v těsné blízkosti pod krystalizátorem,
- v zóně sekundárního chlazení,
- na konci sekce sekundárního chlazení.

Důležitým parametrem ovlivňujícím účinnosti této technologie je zvolení vhodného směru míchání. Používají se různá magnetická pole jako rotační, lineární a příčné, jak je patrné z **obr. 12.6**. Vhodným výběrem z těchto typů magnetických polí lze zajistit zamezení licích prášků a nekovových vměstků.



**Obr. 12.6:** Způsoby elektromagnetického míchání

Pro míchání v krystalizátoru jsou používány míchače rotačního typu, které příznivě působí na vyplouvání částic stržených z licích prášků. Pro míchání v těsné blízkosti pod krystalizátorem se používají míchače lineárního typu. Jejich aplikace omezuje tvorbu vnitřních trhlin, dochází ke zlepšení struktury předlitku a zamezuje tvorbě osových segregací. Na konci sekce sekundárního chlazení se využívají míchače rotačního typu, které omezují tvorbu tzv. V segregací.

Efekt působení elektromagnetického míchání můžeme spatřovat především v:

- dosažení lepší vnitřní struktury předlitků,
- omezení středových segregací, jak je patrné z **obr. 12.6**,
- zlepšení rozložení nekovových vměstků.



a) osová struktura bez M-EMS

b) osová struktura s M-EMS

**Obr. 12.6:** Vliv M-EMS na omezení středových segregací u sochorových předlitků

### □ Sekundární zóna chlazení

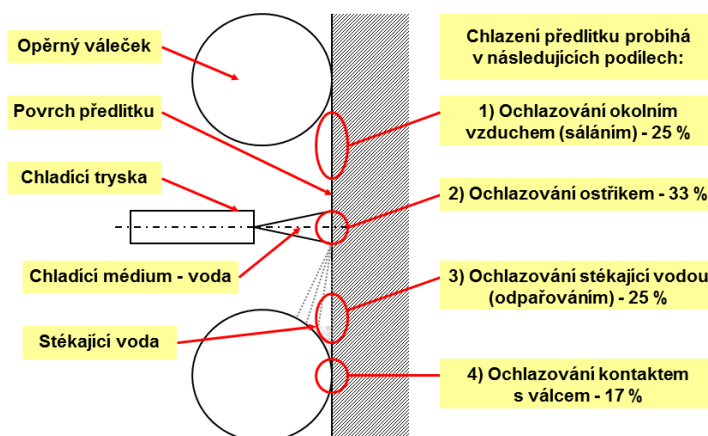
Sekundární oblast chlazení se nachází mezi krystalizátorem a terciární zónou chlazení. V této zóně představuje hlavní chladicí médium voda, kterou je předlitek ostříkován. Správný způsob chlazení v sekundární oblasti je velmi důležitý, neboť ovlivňuje kvalitu předlitku z hlediska vzniku vnitřních i povrchových vad a středové segregace.

Předlitek, který vzniká v krystalizátoru, je charakteristický postupnou tvorbou povrchové kůry, přičemž opouští krystalizátor s tekutým jádrem. Po opuštění krystalizátoru je namáhán vlivem ferostatického tlaku s kombinací tažné, ohýbací a gravitační síly, což vyvolává mechanická napětí a deformace, které mohou vést ke vzniku trhlin. Optimální a účinné sekundární chlazení musí splňovat následující požadavky:

- rovnoměrnost chlazení povrchu předlitku,
- intenzivní chlazení,
- krátká doba kontaktu neodpařené vody s předlitkem,
- regulovatelnost intenzity ostříku.

V sekundární zóně chlazení se na ZPO používají dva základní typy chladicích systémů, a to jednosložkové nebo dvousložkové.

Způsob chlazení, kdy je k ostříku předlitku jako chladicí médium používána voda, představují **jednosložkové chladicí systémy**. Chladicí kapalina je v tomto systému mechanicky nebo tlakově rozstříkována ve formě malých kapek na povrch předlitku. Trysky používané k rozstříku vody se mezi sebou odlišují tvarem, čímž lze dosáhnout toho, že povrch předlitku ostříkové plochy může mít různý tvar, jako např. eliptický, kruhový, plochý, nebo ve tvaru mezikruží. Právě tímto tvarem ostříkové plochy lze ovlivnit chlazení povrchu předlitku. V zóně sekundárního chlazení jsou zařazeny také tažné válce, které způsobují zpětný ohřev chlazeného předlitku a tím zabraňují v tomto jednosložkovém systému dosažení rovnoměrného chlazení po celé ploše předlitku, jak je patrné z **obr. 12.7**.

**Obr. 12.7:** Ukázka průběhu chlazení jednosložkovými chladicími systémy

Druhý systém chlazení představují dvousložkové chladicí systémy, kdy chlazení nastává směřováním vzduchu a vody v různých poměrech těchto složek dle potřeb. Směs vzduchu a vody se vytváří uvnitř trysky a vychází přes otvory trysek, které jsou jako v předchozím případě různě konstruované pro dosažení požadované ostříkové plochy předlitku. Vodní paprsek ve formě mikroskopických kapiček je veden kolmo na povrch chlazeného předlitku. Dochází k odpaření kapaliny a na povrchu nenastává nekontrolovatelné stékání neodpařené vody. Systém vodovzdušného chlazení odstraňuje nedostatky dosud používaných jednosložkových trysek a k dalším přednostem a výhodám patří:

- rovnoměrnost chlazení povrchu předlitku po šířce,
- krátká doba setrvání vody na povrchu předlitku.

#### □ Dělicí zařízení

Plynule odlévané předlitky je nutno dělit na délky, které odpovídají požadavkům navazujících provozů. V současné době se používají převážně dva způsoby dělení, a to řezání plamenem nebo stříhání.

U víceprůduchých ZPO velkých kapacit jsou používány automatické stroje pro **řezání plamenem**. Z technických plynů se používá především pomalu hořících plynů jako svítiplyn, propan a zemní plyn. Dělení předlitků řezáním plamenem je často výhodné již proto, že předlitek vystupuje z lícího zařízení poměrně malou rychlostí a jelikož při řezání horkého materiálu se docílí 3,5 až 4x větší rychlosti řezání než u studeného materiálu. Moderní řezací hořáky umožňují dělit nejenom menší předlitky, ale i silné bramy. V případě dělení tlustých bram jsou ale použity pro jeden řez i dva hořáky. Ukázka různých způsobů dělení předlitků je uvedena na **obr. 12.8**.



a) dělení předlitku pomocí hořáku



b) dělení předlitku pomocí dvou hořáků

**Obr. 12.8:** Ukázka různých způsobů dělení předlitků pomocí řezání plamenem

Druhý z uvedených způsobů dělení představují **dělicí nůžky**. Ty se používají především při dělení ušlechtilých a vysokolegovaných ocelí. Tento způsob dělení umožňuje snížení materiálových ztrát a zkrácení časů dělení, avšak tlakem nůžek dochází k deformaci průřezu předlitku v místě dělení. Dělení stříháním je řešeno použitím pevných nůžek s pohyblivým stříhacím systémem nebo použitím pojízdných nůžek, které se pohybují společně s předlitkem.

#### □ Terciární zóna chlazení

Konec technického a technologického celku ZPO tvoří terciární oblast chlazení předlitků. Jejimi základními technologickými jednotkami jsou tažný systém s vodicí dráhou, u radiálního (obloukového) ZPO rovnací stolice a dále pak dělicí zařízení. Lze zde také zahrnout odsuvné zařízení včetně chladicího systému. Teplo obsažené v předlitku je tedy odváděno do okolního vzduchu převážně sáláním a v menší míře přirozenou konvekcí, dále pak vedením do vodicích, tažných, rovnacích válců a chladicího lože.



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Böhm, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. SNTL Praha, 1992, 443 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [2] Dolejší, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. Poradenská příručka č. 42. TEVÚH Praha, 1987, 383 s.
- [3] Irving, W. R.: Continuous Casting of Steel. The University Press, Cambridge, 1993, 207 p., ISBN 0-901716-53-7.
- [4] Schwerdtfeger, K.: Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahl Eisen GmbH. Düsseldorf, 1992, 640 p. ISBN 3-514-00350-5.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- konstrukční řešení jednotlivých zón chlazení na ZPO
- primární zóna chlazení - krystalizátor
- elektromagnetické míchání
- sekundární zóna chlazení
- dělicí zařízení
- terciární zóna chlazení



### Otázky k probranému učivu

1. Charakterizujte základní zóny chlazení při plynulém odlévání oceli.
2. Definujte průběh tuhnutí a krystalizace oceli v primární zóně chlazení představující krystalizátor.
3. Uveďte vliv elektromagnetického míchání na strukturu plynule litého předlitku.
4. Vysvětlete princip obou systémů chlazení používaných v sekundární zóně.
5. Charakterizujte způsoby dělení plynule litých předlitků.
6. Uveďte úkoly a funkce, které plní terciární zóna chlazení.

### 13. Vady plynule litých předlitků



**Čas ke studiu:** 90 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- definovat povrchové vady
- popsat vnitřní vady
- charakterizovat tvarové vady



**Výklad**

#### □ Rozdělení vad plynule litých předlitků

V průběhu odlévání oceli na zařízení plynulého odlévání může docházet ke vzniku vad předlitků, které lze rozdělit do následujících skupin:

- *povrchové vady předlitků:*
  - *podélná trhlina na hraně předlitků,*
  - *podélná trhlina na ploše a blízko středu,*
  - *podélná trhlina na čele blízko hrany s doprovodným podélným zmáčknutím,*
  - *příčné trhliny na hranách,*
  - *příčné čelní trhliny,*
  - *příčné prohloubení povrchu,*
  - *výronek, průnik tekuté oceli,*
  - *žebrování*
  - *přeplátování,*
  - *oscilační vrásky,*
  - *dvojitá stěna (přebal),*
  - *diskontinuita tuhnoucí kůry,*
  - *studený spoj,*
  - *broky (rozstřík),*
  - *hřeben,*
  - *stopy po vedení předlitků,*
  - *místní horké smrštění,*
  - *podpovrchové bubliny,*
  - *bodliny.*
- *vnitřní vady předlitků:*
  - *podpovrchové vnitřní trhliny,*
  - *hvězdicové trhliny,*
  - *diagonální trhliny,*
  - *trhliny v polovině průřezu (mezitrhliny),*
  - *trhliny způsobené tažnými válci,*
  - *středová porezita,*
  - *středová segregace.*
- *tvarové vady předlitků:*
  - *deformace do tvaru kosodélníku,*
  - *deformace do tvaru oválu,*
  - *vyboulení, vydutí,*
  - *povrchové vady.*

#### □ Povrchové vady

**Podélné trhliny** vznikají v době, kdy povrch předlitku již ztratil styk s krystalizátorem, avšak pevnost vnější kůry předlitku je menší než napětí ve ztuhlé vnější kůře. Výskyt podélných trhlin převládá mezi vnějšími vadami především při odlévání nízkouhlíkových uklidněných ocelí Bramového tvaru.

Podélné trhliny vznikají z metalurgického důvodu a jejich vzniku napomáhá zvýšená teplota a nadměrně vysoká rychlost lití. Značný vliv na výskyt těchto trhlin má složení a čistota oceli a rovněž správná dezoxidace. U některých značek ocelí, zvláště pro odlévání předlitků kruhového průřezu



a velkých bram, má význam i teplota stěn krystalizátoru. Čistě mechanickým zdrojem výskytu podélných trhlin je nesprávné vyrovnání krystalizátoru vzhledem k metalurgické ose ZPO a ke směru tažení předlitku. Je třeba věnovat rovněž pozornost centrování licí výlevky a ponorné trubice vzhledem ke krystalizátoru.

Pokud jde o odlévání různých profilů, je třeba brát v úvahu, že u předlitků čtvercového průřezu vznikají podélné trhliny buď na zaoblených rozích nebo zkosených hranách či v jejich bezprostřední blízkosti.

Náchylnější k tvorbě trhlin je kruhový průřez. Poměrně malý povrch vzhledem k objemu způsobuje delší dobu tuhnutí jádra předlitku. Rychle ztuhlá povrchová kůra brání smršťování vnitřních vrstev a vytvářejí se podmínky příznivé pro vznik trhlin. Někdy vznikají ještě v krystalizátoru na předlitku teplejší pásy v místě, kde se již vytvořila plynová mezera mezi předlitkem a krystalizátorem, na rozdíl od podstatně chladnějších míst v ploše styku předlitku s krystalizátorem. Na teplejších místech povrchu předlitku s menší pevností povrchové kůry pak vznikají přímé nebo spirálové trhliny. Náchylnost k tvorbě podélných trhlin se také zvyšuje s vyšší tažnou rychlostí a s vyšší teplotou. Tvorbu trhlin na kruhových předlitcích lze zabránit, podobně jako u jiných tvarů, vhodně volenou optimální teplotou oceli a optimální tažnou rychlostí a také úpravou krystalizátoru s vhodnou konicitou.

Na bramách, stejně jako u čtvercových předlitků, se trhliny na hranách mohou objevit v těch případech, kdy je poloměr zaoblení krystalizátoru příliš velký, a naopak trhliny v bezprostřední blízkosti hran svědčí o tom, že poloměr zaoblení je příliš malý. Způsob odstranění vady je v takovém případě především ve správné volbě poloměru zkosení hran a volbě odpovídající konicity krystalizátoru.

**Podélné trhliny na ploše předlitku**, které nejsou v zaoblené nebo zkosené části průřezu a jsou ve směru osy předlitku, dělíme na trhliny blízko středu a blízko hrany. Oba druhy jsou zobrazeny na **obr. 13.1** a **obr. 13.2**. Uvedený druh trhlin může být způsoben nerovnoměrným chlazením v krystalizátoru nebo nerovnoměrným ochlazováním předlitků v sekundární sekci.



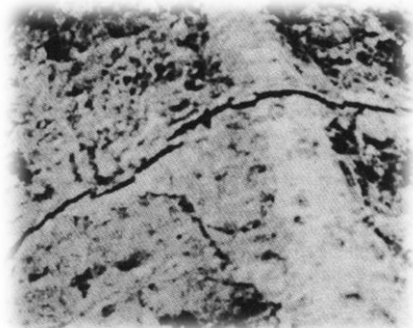
**Obr. 13.1:** Podélné trhliny na hranách čtvercového předlitku

**Obr. 13.2:** Podélné trhliny na předlitcích v blízkosti středu a v blízkosti hrany

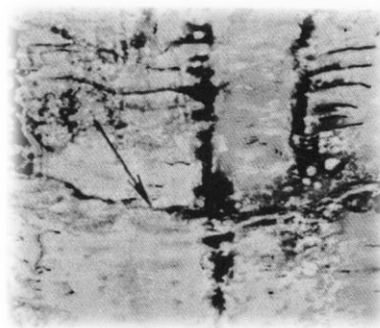
Vznik podélných trhlin také ovlivňuje jakost použitého licího prášku, především pak viskozita. Když je viskozita taveniny licího prášku (nebo licí syntetické strusky) nízká, dochází při oscilaci krystalizátoru (při pohybu vzhůru) k místnímu vtoku roztavené strusky. V těchto oblastech pak následkem zkoncentrování tahového napětí opožděným vyvinutím ztuhlé kůry předlitku dochází až k podélnému roztržení.

**Příčné trhliny** mohou vznikat zejména při nesouladu mezi rychlostí lití a teplotou stěn krystalizátoru. Na tvorbu těchto trhlin má vliv kromě vlastního procesu lití i celkový obsah uhlíku a síry v oceli. Rovněž volba příliš malých poloměrů ohýbání u strojů s horizontálním výběhem předlitků může vést k tvorbě trhlin při ohýbání a následném rovnání předlitků. Výskyt těchto trhlin podporují různé

povrchové vady předlitků, např. vrásky, závaly, struskové vměstky apod., které se vytvořily již v krystalizátoru. Rovněž nadměrné znečištění oceli škodlivými příměsemi, jako jsou cín, síra apod., mohou vyvolávat výskyt trhlin na povrchu předlitku při jeho ohýbání nebo opětovném rovnání. Ukázka příčných trhlin je uvedena na **obr. 13.3** a **obr. 13.4**.



**Obr. 13.3:** Příčná trhlina na hraně čtvercového předlitku



**Obr. 13.4:** Příčná čelní trhlina u čtvercového předlitku

**Příčné rohové trhliny** jsou způsobeny přílišnou deformací při ohybu, která vzniká při odchylce tažné stolice oproti metalurgické ose. Výrazného snížení výskytu příčných rohových trhlin se dá dosáhnout důsledným seřizováním a kontrolou úrovně tažných válců.

**Příčné čelní trhliny**, které nejsou v zaoblené nebo zkosené části v průřezu, jsou způsobeny přilepením ke krystalizátoru, nebo v případě velkých průřezů prudkým ochlazováním v krystalizátoru či v sekundárním chlazení.



**Obr. 13.5:** Příčné prohloubení povrchu u bramy mající za následek protržení kůry

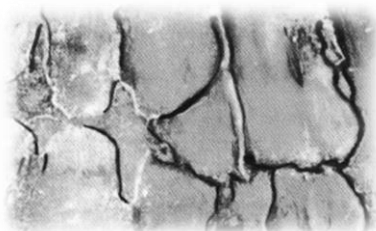
**Příčné prohloubení** je lokálním prohloubením povrchu kolmo k ose. Často se vyskytuje v pravidelných intervalech podél předlitku. Je způsobeno nedostatečným dotykem se stěnou krystalizátoru, který může být vyvolán vysokou ochlazovací rychlostí nebo kolísáním hladiny oceli v krystalizátoru. Výsledkem je ztenčení kůry, což může vést k příčným čelním trhlinám, výronkům nebo v extrémním případě k protržení kůry.

Příčné prohloubeniny vznikají také v důsledku příliš velkého vtékání roztaveného licího prášku, čímž se opožďuje vývoj ztuhlé kůry a krystalizátor při pohybu dolů kůru naruší.

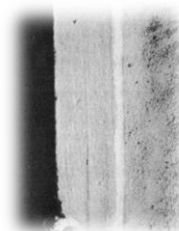
Příčné prohloubeniny mohou být zcela odstraněny kvalitou a dávkováním licích prášků. Ukázka příčného prohloubení je uvedena na **obr. 13.5**.

**Výronek** je průnik tekutého kovu trhlinou v kůře předlitku. Jestliže však není průniku oceli účinkem chlazení v krystalizátoru nebo v oblasti těsně pod krystalizátorem (přímým ostřikem) včas zabráněno, dochází k úplnému protržení licí kůry a tzv. „průvalu“. Ukázka výronku je uvedena na **obr. 13.6**.

**Žebrování** (jinak též zvané „kapsa“) je záhyb kůry předlitku způsobený obtékáním tekutého kovu proti již ztuhlé vrstvě v krystalizátoru. Ukázka žebrování je uvedena na **obr. 13.7**.



a) výronek u bramy (tato část předlitku je ještě v krystalizátoru)

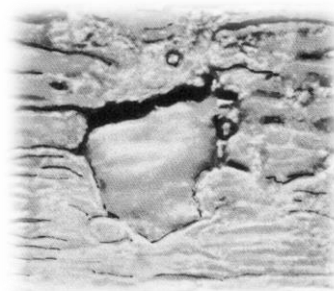


b) výronek u bramy spojený s podélnou trhlinou na hraně (tzv. rohový průval)

**Obr. 13.6:** Výronek představující průnik tekutého kovu u bramy



**Obr. 13.7:** Žebrování (tzv. „kapsa“) způsobená obtékáním tekutého kovu proti již ztuhlé vrstvě

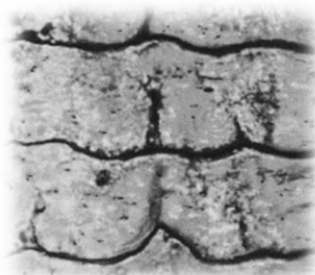


**Obr. 13.8:** Překlátování na povrchu předlitku

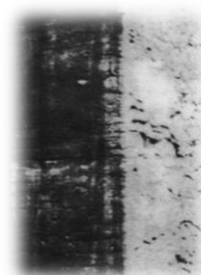
**Překlátování** vzniká tak, že kov ztuhlý na hladině je odtlačen ke stěnám krystalizátoru a postupně je tam vtahován. Ukázka překlátování je uvedena na **obr. 13.8**.

**Oscilační vrásky** jsou příčné stopy obvykle umístěné ve vzdálenostech odpovídajících dráze, která proběhla během jednoho oscilačního cyklu. Účinnost tohoto jevu závisí na licím prášku, licí teplotě a oscilačním systému. Vrásky tedy vznikají na povrchu předlitku při pohybu krystalizátoru vzhůru následkem narušení horní vrstvy právě vzniklé kůry. Ukázka oscilačních vrásek je uvedena na **obr. 13.9**.

Vznik vrásek způsobuje, kromě nedostatečného mazání stěn krystalizátoru, také turbulence tekutého kovu v krystalizátoru a rovněž příliš nízká nebo naopak příliš vysoká teplota stěn krystalizátoru. Vrásky vyvolávají výskyt vážných vad při tváření náročných značek oceli za tepla.



**Obr. 13.9:** Oscilační vrásky u kruhového předlitku ukazující tvorbu stahování kůry



**Obr. 13.10:** Dvojitá stěna u čtvercového předlitku

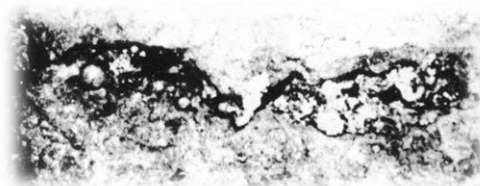
**Dvojitá stěna** je zřetelné oddělení povrchu předlitku po celém obvodu způsobené oddělením kůry od klesajícího předlitku. Ukázka dvojitě stěny je uvedena na **obr. 13.10**.

**Diskontinuita tuhnutí kůry** se projevuje pouze při odlévání nedostatečně uklidněných ocelí jako povrchová nerovnoměrnost po celém obvodu. Změna v intenzitě uklidňování vede ke zhroucení

hladiny oceli. Vytváří se kůra, která je během lití postupně obalována. Ukázka diskontinuity tuhnoucí kůry je uvedena na **obr. 13.11**.



**Obr. 13.11:** Diskontinuita tuhnoucí kůry u bramy

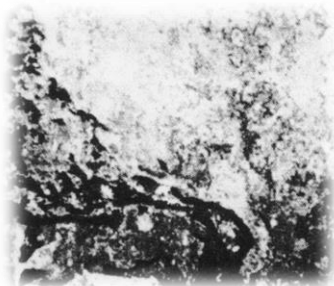


**Obr. 13.12:** Zachycené produkty na povrchu předlitku

Do povrchových vad patří též tzv. **broky**, což jsou zoxidované částičky oceli zachycené po rozstříku mezi kůru předlitku a stěnu krystalizátoru. Částice dříve ztuhlého kovu zachycené pod povrchem předlitku vzniknou např. z rozstříku turbulentního proudu. Mohou ulpívat na deskách krystalizátoru v horní části, tento povlak může padat a být vtahován do krystalizátoru. Zachycené produkty mohou zůstat na hladině a po ztuhnutí tvořit ohraničené útvary na povrchu předlitku. Rovněž částice z licích prášků mohou být vměstnány do nepravidelných útvarů, jež jsou podobného charakteru. Ukázka zachycených produktů na povrchu předlitku je uvedena na **obr. 13.12**.

Mezi povrchové vady předlitků patří také tzv. **hřeben**, který vzniká při používání deskových krystalizátorů. Příčinou je zde pronikání kovu do štěrbin spojů mezi deskami v rozích litého průřezu. Stopy po vedení předlitku mohou být způsobeny mechanickým poškozením nebo nedokonalým tvarem opěrných vodicích elementů, ohýbacích nebo rovnačích válců nebo jejich nesouosostí.

Rovněž **místní smršťování za tepla** (tzv. horké) na povrchu předlitku představuje v podstatě tvorbu lokálních trhlin běžně spojených s vyššími obsahy neželezných kovů na hranicích zrn. Ukázka horkého smršťování předlitku je uvedena na **obr. 13.13**.



**Obr. 13.13:** Horké smršťování u čtvercového předlitku



**Obr. 13.14:** Bodliny u čtvercového průřezu, povrch předlitku

**Bodliny** jsou malé dutiny podobné podpovrchovým bublinám nacházející se blízko povrchu a často ve větších shlucích. Bodliny mívají průměr 1 až 2 mm, avšak někdy dosahují i průměru 4 až 5 mm. Jejich příčinou je nedostatečná dezoxidace nebo reoxidace během odlévání. Ukázka bodlin na povrchu předlitku je uvedena na **obr. 13.14**.

#### □ Vnitřní vady

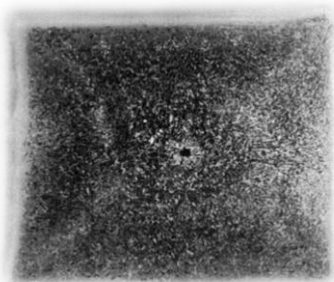
Vnitřními vadami se rozumí takové defekty struktury, které ve většině případů nepronikají na povrch předlitku. Z tohoto hlediska jsou tedy obtížněji zjištělné. Příčiny vzniku vnitřních vad mohou být dány již výrobou oceli.

Z hlediska plynulého odlévání oceli mají velký vliv na výskyt vnitřních vad fázové přeměny, při níž nastává změna kapalně fáze ve fázi tuhou.

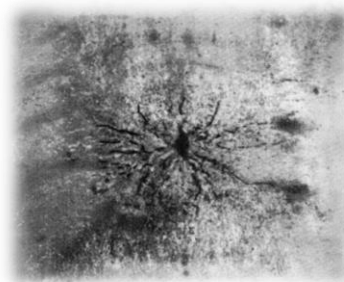
Výskyt **vnitřních trhlin** je způsoben mechanickým a tepelným pnutím vyvolaným fázovými přeměnami v oceli. Trhliny se tvoří hlavně v případě, kdy se překročí kritická hodnota tažných nebo kompresních sil na hranici mezi tekutou a tuhou fází. Téměř všechny vnitřní trhliny se tvoří v pásmu teplot odpovídajících tzv. „lámavosti za tepla“ těsně pod teplotou solidu. Citlivost oceli na tvoření trhlin se zvyšuje spolu se zvýšením obsahu některých legovacích prvků, zejména chromu, rovněž při vyšším obsahu dalších příměsí, jako je fosfor, síra, cín, měď a antimon.

Protože pnutí vznikající na rozhraní mezi tekutou a tuhou fází jsou závislá na rychlosti lití, rozměrech vyráběného předlitku a na poloměru jeho ohýbání, je zřejmé, že je možno zabránit výskytu trhlin vytvořením odpovídajících podmínek pro každý konkrétní případ. Příliš vysoký tlak válečků na předlitek může být rovněž příčinou výskytu vnitřních trhlin. V pásmech sekundárního ochlazování se trhliny u ochlazování tvoří v těch případech, kdy se překročí stanovená intenzita ochlazování předlitku.

**Podpovrchové vnitřní trhliny** vznikají hned pod povrchem předlitku. Vyskytují se v místech 6 až 20 mm pod povrchem a jejich délka bývá 10 až 30 mm. Tyto trhliny jsou nazývané též „trhliny na poloviční cestě“. K jejich tvorbě dochází těsně pod krystalizatorem. Bývají vyvolány buď tím, že na spodním okraji krystalizátoru, kde je ztuhlá kůra dosud tenká, dojde k vyboulení, nebo špatným seřizením vedení v sekundární zóně. Ukázka podpovrchových vnitřních trhlin je uvedena na **obr. 13.15**.



**Obr. 13.15:** Podpovrchové vnitřní trhliny



**Obr. 13.16:** Hvězdicové trhliny u čtvercového předlitku

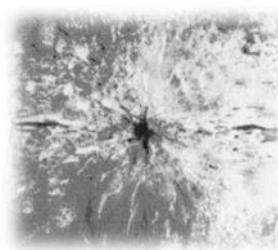
**Hvězdicové trhliny** jsou radiální trhliny ve tvaru hvězdy, začínající ve středu předlitku a jsou způsobené příliš intenzivním sekundárním ochlazením. Ukázka hvězdicových trhlin je uvedena na **obr. 13.16**. Příčinou je vysoká rychlost krystalizace v centru tuhnutí způsobená neodpovídajícím sekundárním chlazením. Vnitřní osové trhliny vznikají v centru předlitku po úplném ztuhnutí a jeví se jako následek nepravidelného chlazení předlitku.

**Diagonální trhliny** jsou zřetelné trhliny sledující vnitřní rozhraní dvou různých rovin krystalizace. U čtvercových předlitků mohou být diagonální trhliny vedeny od jednoho rohu k druhému. Jsou způsobeny nerovnoměrným chlazením v sekundárním pásmu a jsou často doprovázeny kosoúhlým zborcením. Tyto trhliny jsou způsobeny tepelným namáháním, jež je nutno přičíst příliš intenzivnímu nebo nerovnoměrnému sekundárnímu chlazení. Ukázka hvězdicových trhlin je uvedena na **obr. 13.17**.

**Trhliny způsobené tažnými válci** jsou příčné trhliny kolmé k osám válců způsobené redukcí předlitku, je-li střed ještě v polotuhém stavu. Jsou způsobeny nadměrnými přitlaky válců tažných stolic. Ukázka trhlin způsobených tažnými válci je uvedena na **obr. 13.18**.

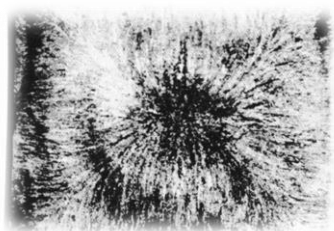


**Obr. 13.17:** Diagonální trhliny u blokového předlitku

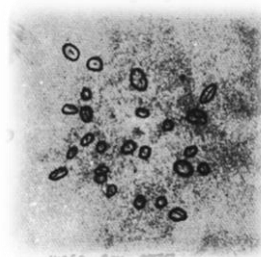


**Obr. 13.18:** Trhliny u blokového předlitku způsobené tažnými válci

**Osová středová pórovitost** je pro bramový čtvercový předlitek zobrazena na **obr. 13.19**.



**Obr. 13.19:** Osová středová pórovitost u bramového předlitku

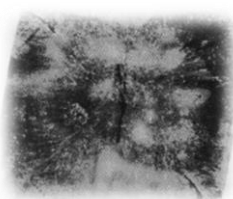


**Obr. 13.20:** Vločkovitost u blokového předlitku

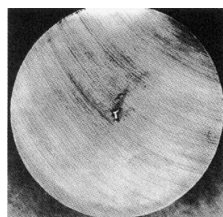
**Vločkovitost** je způsobena tím, že vodík je zachycován do porezit, jakožto molekulární vodík. To znamená, že ke snížení precipitace molekulárního vodíku nestačí jen snížení obsahu vodíku, ale je třeba snížit i porezitu odlitku. Ukázka vločkovitosti je uvedena na **obr. 13.20**.

#### □ Vady tvaru

Porušení pravidelného tvaru předlitku nebývá zpravidla důvodem k vyřazení a zmetkování, avšak pro změněnou hmotnost jednotlivých kusů vzniká větší odpad při dalším zpracování. U kruhového a čtvercového průřezu mohou nastat obtíže při jeho dalším tváření. Ukázka jednotlivých vad tvaru je uvedena na **obr. 13.21**.



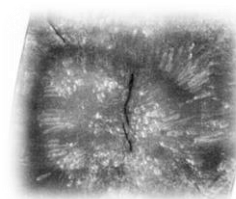
*a) zkosení čtvercového průřezu*



*b) oválnost u kruhového průřezu*



*c) vydutí u bramového předlitku*



*d) konkávnost u čtvercového předlitku*

**Obr. 13.21:** Ukázka jednotlivých typů vad tvaru

U čtvercových předlitků může nastat deformace na **kosočtverečný tvar**. Tato deformace se zvětšuje s rychlostí lítí a mění se po délce předlitku.

**Oválnost** představuje porušení kruhového průřezu.

**Vydutí** představuje deformaci předlitku čtvercového nebo obdélníkového průřezu způsobenou nedostatečnou podporou kůry proti účinkům ferostatického tlaku.

**Konkávnost** je deformací předlitku čtvercového nebo obdélníkového průřezu. Příčina vady se přičítá nesprávnému způsobu sekundárního chlazení.



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Böhms, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. SNTL Praha, 1992, 443 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [2] Dolejší, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. Poradenská příručka č. 42. TEVÚH Praha, 1987, 383 s.
- [3] Irving, W. R.: Continuous Casting of Steel. The University Press, Cambridge, 1993, 207 p., ISBN 0-901716-53-7.
- [4] Schwerdtfeger, K.: Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahl Eisen GmbH. Düsseldorf, 1992, 640 p. ISBN 3-514-00350-5.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- rozdělení a charakteristika plynule litých vad
- charakteristika povrchových, vnitřních a tvarových vad
- definování příčiny vzniku povrchových, vnitřních a tvarových vad



### Otázky k probranému učivu

1. Definujte rozdělení vad vznikajících při plynulém odlévání oceli.
2. Charakterizujte a popište princip vzniku povrchových vad předlitků.
3. Popište princip a rozdělení vnitřních vad předlitků.
4. Uveďte způsob vzniku a rozdělení tvarových vad předlitků.



## 14. Nové směry ve vývoji plynulého odlévání oceli



**Čas ke studiu:** 70 min



**Cíl:** Po prostudování této kapitoly budete umět

- charakterizovat moderní technologie odlévání
- definovat rozdíl mezi běžnou technologií ZPO a technologií odlévání předlitků tvarů blízkých tvarům výrobků, tenkých bram, pásů a plechů
- popsat vybranou technologii: NNSC, CPS, ISP, CASTRIP atd.



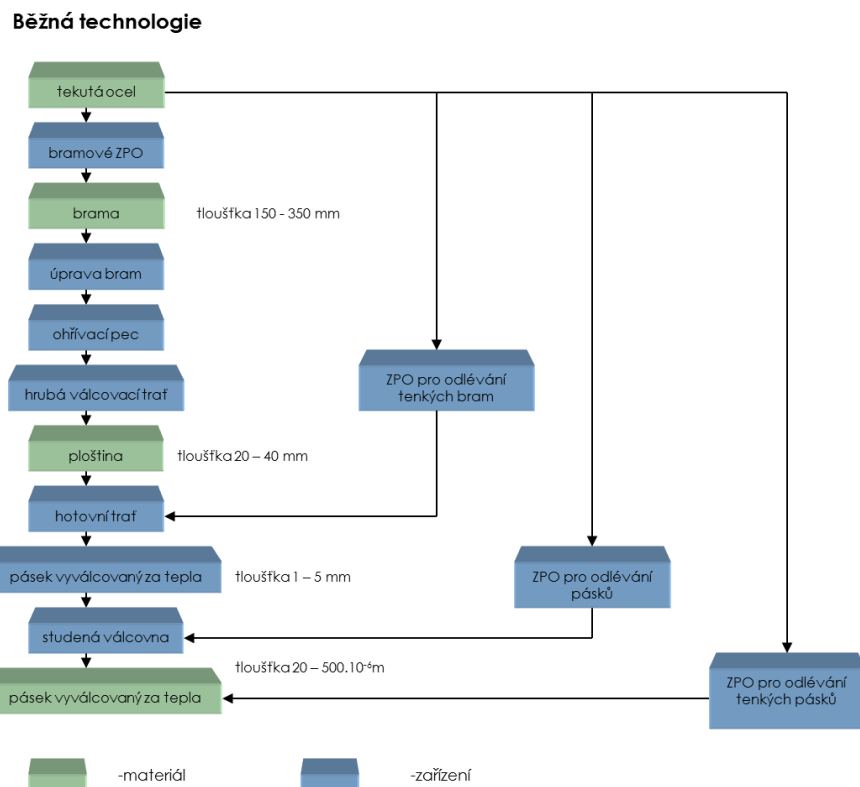
**Výklad**

### □ Vývojové trendy ZPO

V oblasti ZPO je vývoj zaměřen u klasických a stávajících ZPO na zvyšování výkonu, snižování nákladů a energií. Tyto technologie vedou ke snížení nároků na následné přetváření, snižují investiční náklady, provozní náklady a zlepšují kvalitu odlitku. Jedná se především o následující technologie:

- odlévání tvarů blízkých tvarům výrobků (technologie NNSC),
- odlévání tenkých bram (technologie CSP a ISP),
- přímé odlévání pásů či plechů (technologie CASTRIP).

Porovnání běžné technologie na ZPO s moderními technologiemi odlévání je uvedeno na **obr. 14.1**.



**Obr. 14.1:** Ukázka porovnání běžné technologie ZPO s moderními technologiemi odlévání

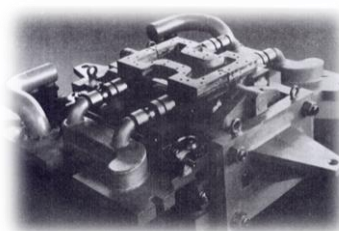
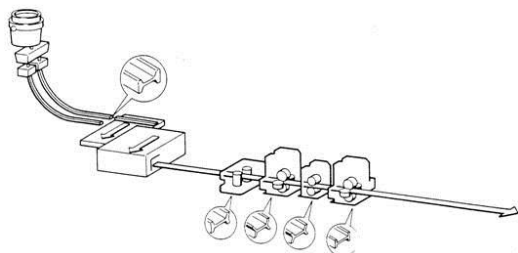
Jak vyplývá z obrázku, zařízení pro odlévání tenkých bram, pásů a tenkých pásků přinesou další značné úspory energie v důsledku vyloučení technologických operací používaných při běžné technologii, jako je chlazení bram i jejich úprava, ohřev a předválcování. Umožní výrobu menších hmotností různých jakostí oceli. Sníží se rovněž výrobní náklady, investice a nároky na prostor.

#### □ Odlévání tvarů blízkých výrobkům

Uvedenou technologii představuje NNSC (Near Net Shape Continuous Casting) a lze ji charakterizovat jako odlévání tvarů blízkých konečným výrobkům:

- *beam blank (také dog bone, psí kost) pro výrobu nosníků,*
- *kruhové tvary různých průměrů pro výrobu trub a kruhových výrobků – kroužky, kola.*

Na **obr. 14.2** je uvedeno schéma zařízení NNSC a na **obr. 14.3** je ukázka krystalizátoru pro předlitky nosníkového tvaru.



**Obr. 14.2:** Schéma zařízení NNSC s ukázkou průběhu zpracování předlitku      **Obr. 14.3:** Sestava deskového krystalizátoru beam blank – nosníkového průřezu

Z uvedených schémat vyplývají základní výhody tohoto zařízení

- *minimalizace korekce tvarů odlitku na válcovnách,*
- *zvýšení výkonu zařízení,*
- *snížení nákladovosti.*

#### □ Odlévání tenkých bram

Odlévání tenkých bram, teplých pásů a plechů s přímým válcováním se obvykle dělí podle tloušťky odlévaných předlitku, a to na:

- *tenké bramy s tloušťkou 20 až 60 mm a šířkou 1 500 až 2 000 mm,*
- *pásky nebo tenký plech s tloušťkou 1 až 6 mm a šířkou 1 200 až 1 500 mm,*
- *tenký pás nebo fólie s tloušťkou asi 0,02 až 0,5 mm do šířky 300 mm.*

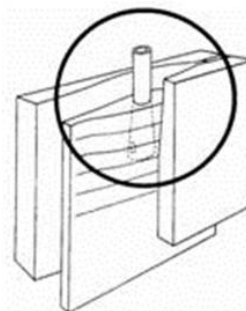
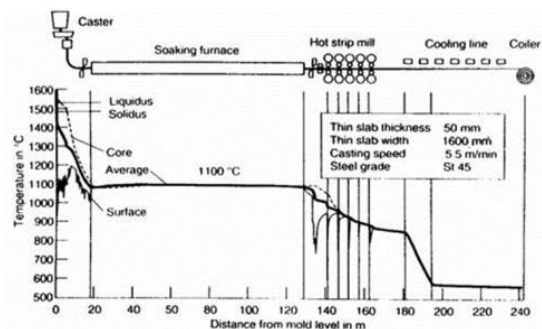
Dále se dělí plynulé odlévání tenkých bram do dvou podskupin podle rychlosti lití:

- *běžné lití rychlostí 3 až 7 m.min<sup>-1</sup> při tloušťce bramy 40 až 80 mm,*
- *vysokovýkonné odlévání rychlostí 15 m.min<sup>-1</sup> při tloušťce bramy 40 až 60 mm.*

Pásky jsou charakterizovány tloušťkou 2 až 8 mm a lici rychlostí 30 až 60 m.min<sup>-1</sup>.

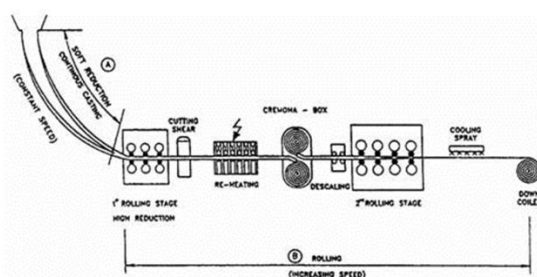
Technologii odlévání tenkých bram s přímým válcováním představují metody CSP (Compact Strip Production) a ISP (In-line Strip Production).

**Metoda CSP** představuje proces s tvarovaným krystalizátorem a tloušťkou bramy pod krystalizátorem 50 – 70 mm. Schéma zařízení CSP je uvedeno na **obr. 14.4** a ukázka krystalizátoru zařízení CSP je uvedena na **obr. 14.5**.



**Obr. 14.4:** Schéma zařízení CSP s ukázkou průběhu zpracování předlitku **Obr. 14.5:** Ukázka krystalizátoru zařízení CSP

**Metoda ISP** představuje proces s redukcí tloušťky pod krystalizátorem a tloušťka bramy po redukcí má rozměr 15 – 25 mm. Schéma zařízení ISP je uvedeno na **obr. 14.6**.



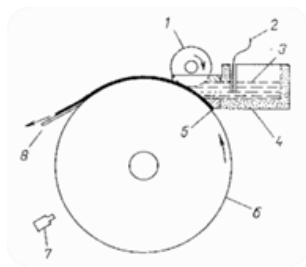
**Obr. 14.6:** Schéma zařízení ISP s ukázkou průběhu zpracování předlitku

### □ Přímé odlévání pásů

Mezi hlavní licí techniky, které se využívají pro odlévání tenkých ocelových pásů, patří systémy:

- *plynulého lití na jeden válec,*
- *mezi dva rotující válce,*
- *mezi pás a válec,*
- *odlívání rozstříkem,*
- *lití mezi dva rotující pásy.*

U systémů **plynulého lití na jeden válec** je mezipánev s taveninou umístěna „na válci“ (boční lití), přičemž válec „vytahuje“ tekutý kov rotačním pohybem ven z mezipánve, nebo může mezipánev zaujímat vertikální pozici. Tento typ lití je poněkud problematický, což především souvisí s velikostí stykové plochy chlazeného válce a taveniny. Schéma zařízení je uvedeno na **obr. 14.7**. Systém lití na jeden válec je charakterizován licími rychlostmi pohybujícími se mezi 20 až 40 metry za minutu a tloušťkou dolitého produktu mezi 0,3 až 3 mm.



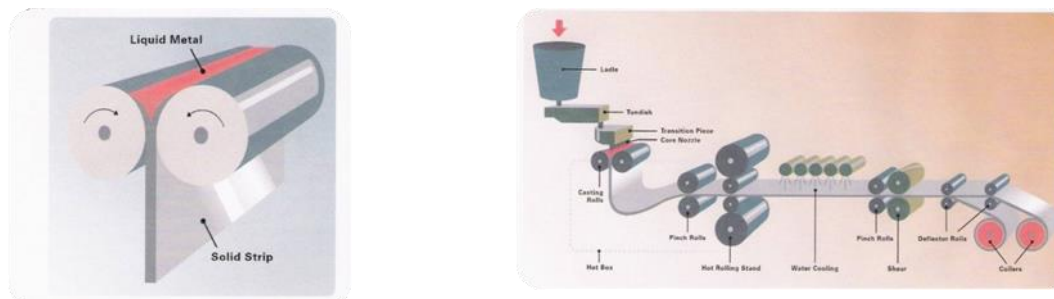
- Legenda:*
- 1 – horní unášecí válec,
  - 2 – přívod tekutého kovu,
  - 3 – tekutá ocel,
  - 4 – speciální mezipánev,
  - 5 – tuhnoucí kov tvořící předlitek,
  - 6 – spodní unášecí válec,
  - 7 – kontrolní čidlo,
  - 8 – výběhová část pro předlitek.

**Obr. 14.7:** ZPO na principu unášení kovu válcem

Mezi hlavní přednosti tohoto jednoválcového odlévacího zařízení je možno zařadit jednoduchost stroje a variabilitu šířky pásu, mezi nevýhody kritickou kvalitou horního povrchu odlitého pásu, závislost

vnitřní kvality a tloušťky odlitého pásu na procesních podmínkách, těžkosti s prodloužením kontaktní délky mezi odlévaným pásem a válcem za účelem lepší kontroly solidifikačního procesu, i menší výrobní rozsah zařízení.

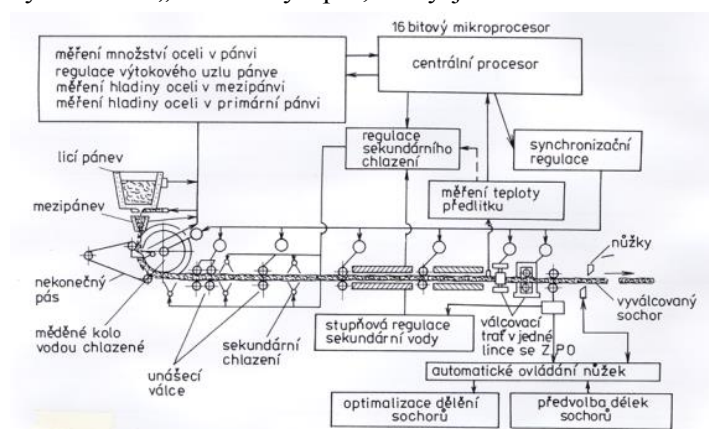
Schéma odlévání oceli **mezi dva rotující válce** představuje **obr. 14.8**. Zařízení tvoří měděné chlazené válce a nazývá se **CASTRIP**.



**Obr. 14.8:** Příklad zařízení – CASTRIP

Ocel se vyrábí v elektrické obloukové peci a je dále zpracována na pánvové peci. Ocel vytéká z pánve přes mezipánve do přechodového kusu vedoucího do výlevky. Výlevkou teče tekutá ocel mezi dva, proti sobě umístěné válce o průměru 500 mm. Obvyklá rychlost odlévání činí 80 m/min. Utuhlý ocelový pás (obvykle o šířce 1345 mm, která může být až 2000 mm) je veden mezi dva podpůrné válce. Pás je dále veden do válcovací stolice, kde se jeho tloušťka redukuje o cca 40 %. Výsledná tloušťka je pak v rozmezí 0,7 – 2,0 mm. Přes chlazení je pak pás veden k nůžkám a navijáčce.

Podstata systému **plynulého lítí mezi pás a válec** spočívá v dopravování taveniny z mezipánve přes výlevku na „nekonečný“ pás, který je intenzivně ochlazován. Vrchní strana odlitého pásu tuhne v



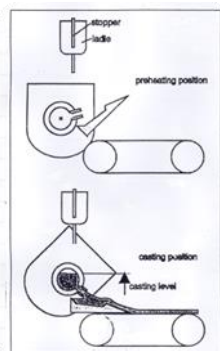
kontaktu s horním válcem, spodní strana je ve styku s chlazeným pásem, který zároveň umožňuje oporu předlitku bez tření na velké ploše. Po opuštění chladicí zóny liciho stroje utuhlý pás prochází přes unášecí válce směrem k tvářecí jednotce. Lici rychlosti se pohybují mezi 30 až 60 metry za minutu, tloušťka odlitého produktu je mezi 5 až 10 mm. Schéma zařízení je uvedeno na následujícím **obr. 14.9**.

**Obr. 14.9:** Schéma rotačního ZPO s přímým válcováním

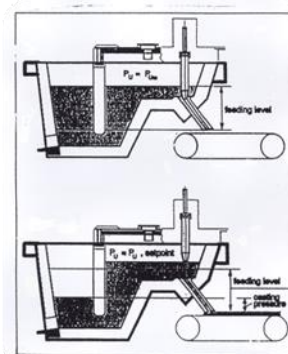
odlitý pás není vystaven žádným ohybovým napětím, použitelnost metody jak pro uhlíkové, tak i pro nerezavějící oceli, vysoká flexibilita lici rychlosti i tloušťky odlévaného pásu.

Nemožnost úpravy šířky litého pásu během odlévání, komplikovaná kontrola procesu i okolní atmosféry a komplikovanost systému nalévání oceli na pás patří mezi hlavní nevýhody tohoto konceptu liti tenkých ocelových pásů.

Modifikací této technologie je i **odlévání oceli z mezipánve na „nekonečný“ pás**, jak uvádějí následující **obr. 14.10** a **obr. 14.11**. Je zde znázorněn jednak trubkový plnicí systém, jednak podtlakový plnicí systém, zabezpečující konstantní rychlost a množství vytékající oceli z mezipánve.

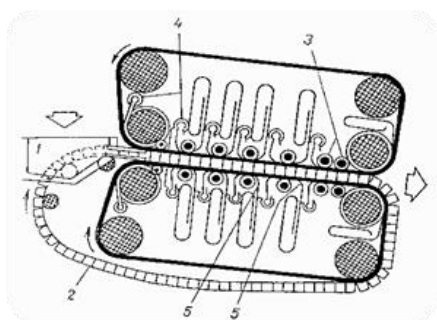


Obr. 14.10: Trubkový plnicí systém (TFS)



Obr. 14.11: Podtlakový systém (LPS)

Podstata systému **lití mezi dva pohyblivé ocelové pásy** je zřejmá z následujícího obr. 14.12. Na tomto licím stroji je odlévána tekutá ocel plynule z mezipánve do krystalizátoru tvořeného dvěma paralelními pohyblivými ocelovými pásy s tloušťkou 0,5 až 0,15 mm. Mezi těmito dvěma pásy se pohybují kovové bloky připevněné k nekonečným pásům a vytvářející boční stěny krystalizátoru. Ochlazování a tuhnutí oceli se dosahuje nepřetržitým přívodem chladicí vody, která je vedena vysokou rychlostí na pohybující se pásy. Aby se udržely správné rozměry licího průřezu krystalizátoru, jsou pásy ze zadní strany podporovány určitým počtem diskových válečků. Výhodou tohoto procesu je možnost dosažení vysokého výkonu a dobré jakosti povrchu.



Obr. 14.12: Licí stroj typu Hazelett

*Legenda:* 1 – mezipánve,  
2 – boční stěny z kovových bloků,  
3 – podpěrné válečky,  
4 – trysky pro přívod chladicí vody,  
5 – sběrače vody.



### Použitá literatura, kterou lze čerpat k dalšímu studiu

- [1] Böhm, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. SNTL Praha, 1992, 443 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [2] Dolejší, Z.; a kol.: Plynulé odlévání oceli. Poradenská příručka č. 42. TEVÚH Praha, 1987, 383 s.
- [3] Irving, W. R.: Continuous Casting of Steel. The University Press, Cambridge, 1993, 207 p., ISBN 0-901716-53-7.
- [4] Schwerdtfeger, K.: Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahl Eisen GmbH. Düsseldorf, 1992, 640 p. ISBN 3-514-00350-5.
- [5] Pastrňák, Z., Pekárek, L.: Nové směry plynulého odlévání předlitků malých rozměrů. Hutník č. 8-9, 1987, s. 294-301.



### Shrnutí pojmů kapitoly (podkapitoly)

- charakteristika vývojových trendů ZPO
- princip odlévání tvarů blízkých výrobků
- princip odlévání tenkých brám

- princip odlévání pásů nebo plechů
- charakteristika technologií - NNSC, CPI, ISP, plynulého lití na jeden válec, mezi dva rotující válce - CASTRIP, mezi pás a válec, odlévání rozstřikem a lití mezi dva rotující pásy



### Otázky k probranému učivu

1. Definujte výhody nových směrů odlévání předlitků vůči klasickému ZPO.
2. Charakterizujte technologii odlévání tvarů blízkých výrobkům.
3. Popište princip odlévání tenkých bram.
4. Uveďte způsob přímého odlévání pásů či plechů.