



Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích

Moderní slévárenské technologie

Přednášky pro studijní program Strojírenství

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

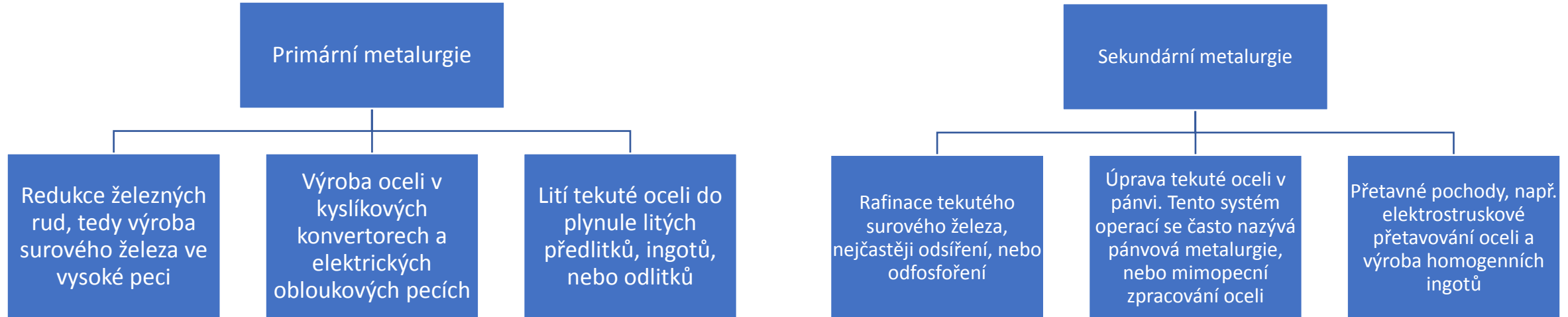


Zpracování oceli na zařízeních sekundární metalurgie

Přednáška č. 4

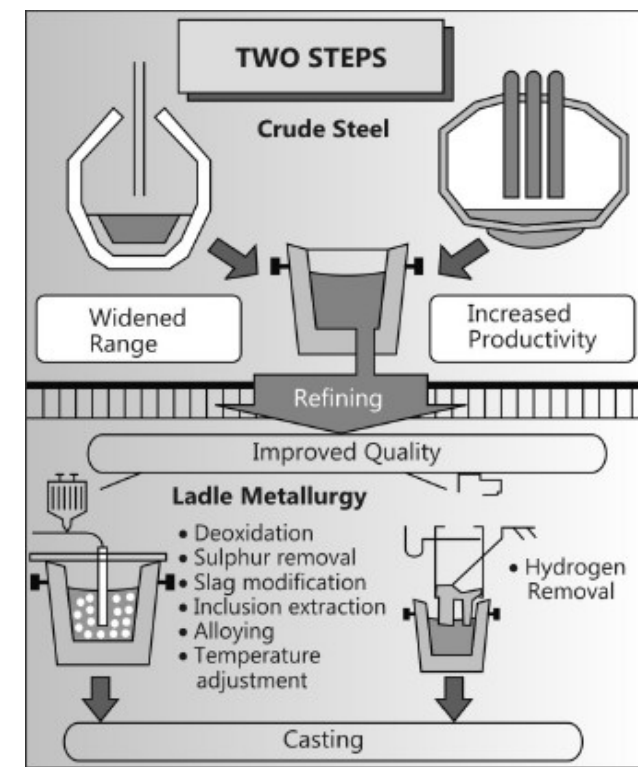
Sekundární metalurgie

- ✓ Ve 2. polovině 20. století rostla snaha o snižování materiálové a energetické náročnosti výroby oceli
- ✓ Zároveň rostly nároky na kvalitu oceli
- ✓ Limitujícím faktorem se stala délka dohotovovací fáze tavby po roztavení vsázky v primárních agregátech (kyslíkový konvertor, elektrická oblouková pec)
- ✓ Proto byla vyvinuta řešení umožňující přenést některé operace mimo primární agregáty
- ✓ Tyto nově vzniklé technologie se souhrnně označují jako sekundární metalurgie



Sekundární metalurgie

- ✓ Přesunutí rafinačních operací z primární do sekundární metalurgie 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
- ✓ Zvyšovat jakost vyráběné oceli na úroveň nedosažitelnou v pecním agregátu:
 - Vyšší teplotní i chemická homogenita lázně
 - Snížení obsahu rozpuštěných plynů (H, N)
 - Snížení obsahu vměstků v tekuté oceli a možnost modifikace jejich tvaru a velikosti
 - Hluboké oduhličení, odfosfoření, odsíření, nebo naopak řízení obsahu síry v oceli
 - Dobrá dezoxidace
 - Přesné legování i na spodní hranici rozmezí
- ✓ Připravit tekutou ocel pro plynulé lití na ZPO (zařízení pro plynulé odlévání) s přesnou licí teplotou a řízenou chemickou i metalografickou čistotou



Sekundární metalurgie

Postup SM	Popis	Označení	Přínos
Dmýchání inertních plynů	Dmýchání Ar (nebo N ₂), případně dmýchání pod aktivní struskou	AP	Teplotní a chemická homogenizace, částečná rafinace, odsíření
Přidávání (injektáž) přísad do tekuté oceli	Dmýchání prachových přísad (CaO, Ca apod.)	SL, TN, IP	Snížení obsahu O a S, modifikace vměstků, zvýšení mikročistoty, částečné legování
	Zavádění speciálních plněných profilů	SCAT	
Ohřev oceli pod aktivní struskou	Kov je ohříván a promícháván inertním plynem s aktivní struskou	LF	Teplotní a chemická homogenizace, snížení obsahu S, modifikace vměstků, legování
Vakuové zpracování oceli	V komoře	RH, DH	Rychlé oduhličení, snížení obsahu H
	V proudu během odpichu, nebo během lití		Snížení obsahu H, případně N, omezení sekundární oxidace
	S přihřevem pod aktivní struskou	ASEA-SKF, VAD	Hluboké odsíření, snížení obsahu vměstků a jejich modifikace, teplotní a chemická homogenizace, legování
Oxidační vakuování	V pánvi	VOD	Hluboké oduhličení (použití u Cr ocelí) snížení obsahu H, N, hluboké odsíření, legování
Oxidace směsí Ar – O	V konvertoru	AOD	
Oxidace směsí H ₂ O – O	V konvertoru	CLU	

Příklady pochodů sekundární metalurgie

Sekundární metalurgie

- ✓ V současnosti existuje celá řada různých technologických prvků sekundární metalurgie, zahrnující více než 50 způsobů mimopecní rafinace oceli
- ✓ Žádný z prvků sekundární metalurgie není zcela univerzální, ale je vhodný zpravidla pouze pro některé metalurgické aplikace
- ✓ Pro určité výrobní zadání se proto vytváří soubor postupů sekundární metalurgie
- ✓ Sekundární metalurgie je základním předpokladem pro zvyšování výrobnosti primárních agregátů a umožňuje výrobu takových ocelí, které jsou klasickými postupy výroby těžko, případně zcela nevyrobitelné



Transport oceli z EOP do pánvové pece

Sekundární metalurgie

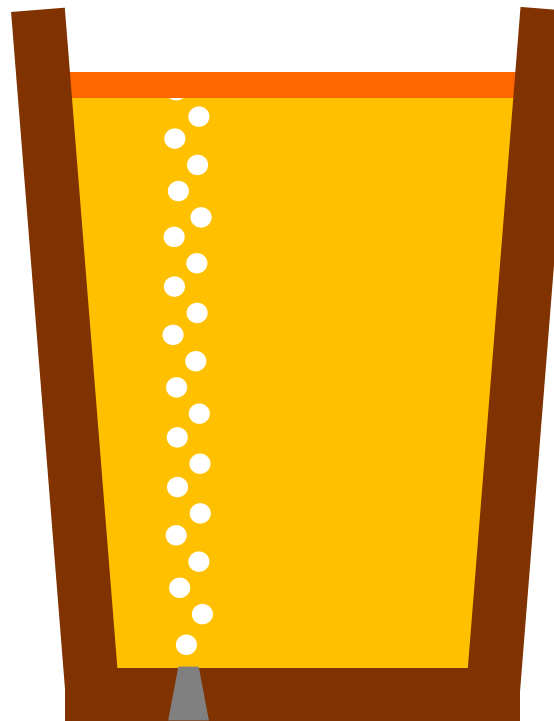
- ✓ Základní způsoby mimopecního zpracování oceli (sekundární metalurgie):
 - *Dmýchání inertních plynů*
 - *Injektáž prachových látek nebo plněných profilů*
 - *Přihřev oceli v pánvi*
 - *Vakuové zpracování oceli*
- ✓ Jednotlivé metody zpracování oceli v rámci sekundární metalurgie umožňují dosáhnout odlišné metalurgické (rafinační) schopnosti
- ✓ Charakteristickým znakem moderní metalurgie je její rozmanitost, kdy jednotlivé ocelárny využívají sekundární metalurgii v komplexní podobě a volí takovou kombinaci zařízení a metod, které zabezpečí potřebnou kvalitu oceli odpovídající zvyšujícím se užitným vlastnostem výrobků



Pánvová pec

Dmýchání inertních plynů

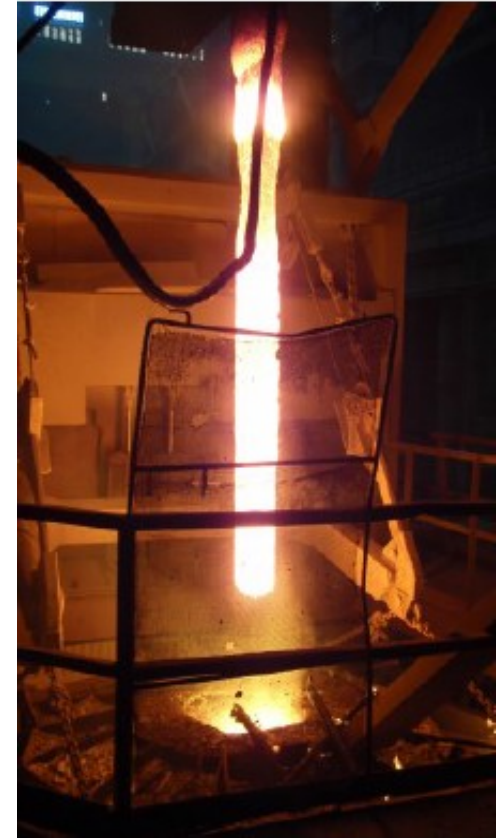
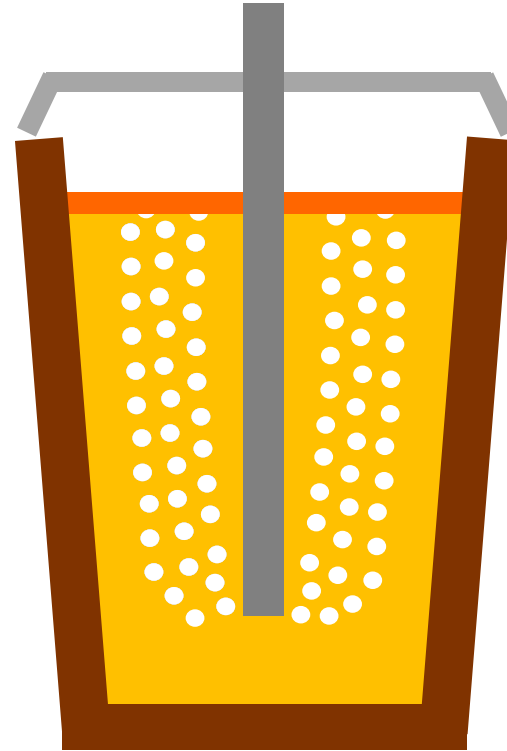
- ✓ Jednoduchá metoda rafinace s nízkými investičními náklady na zavedení a s vysokou návratností
- ✓ K rafinaci oceli se nejčastěji používá argon, existují i metody, kdy se používá dusík, nebo oxid uhličitý, tyto plyny se za daných podmínek považují za inertní
- ✓ **Dosahované účinky:**
 - *Homogenizace oceli – teplotní i chemická*
 - *Vyplouvání vměstků jednak usměrněným prouděním oceli a jednak flotací*
 - *Snižování 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)*



Dmýchání pŕdní dmyšnou

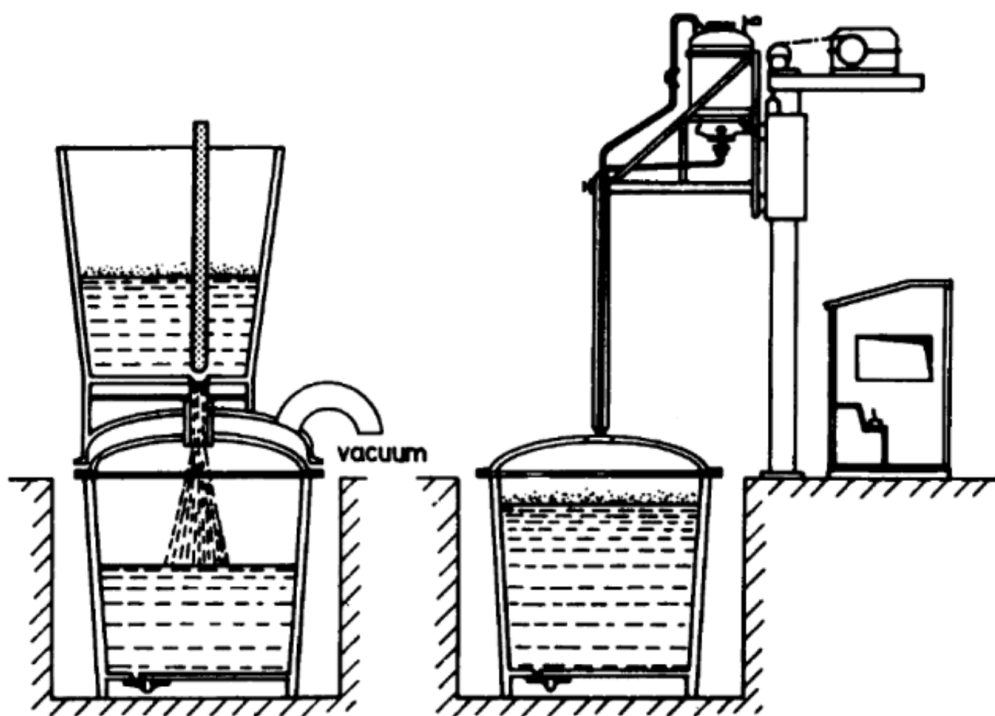
Dmýchání inertních plynů

- ✓ Je nutnou součástí všech ostatních metod mimopecní rafinace oceli
- ✓ Je minimální podmínkou úspěšného odlévání na ZPO
- ✓ **Možnosti dmýchání inertního plynu do lázně:**
 - *Ponornou tryskou (ocelovou trubicí chráněnou keramickým pláštěm)*
 - *Půdní dmyšnou (porézní žárovzdornou tvárnici umístěnou ve dně pánve)*

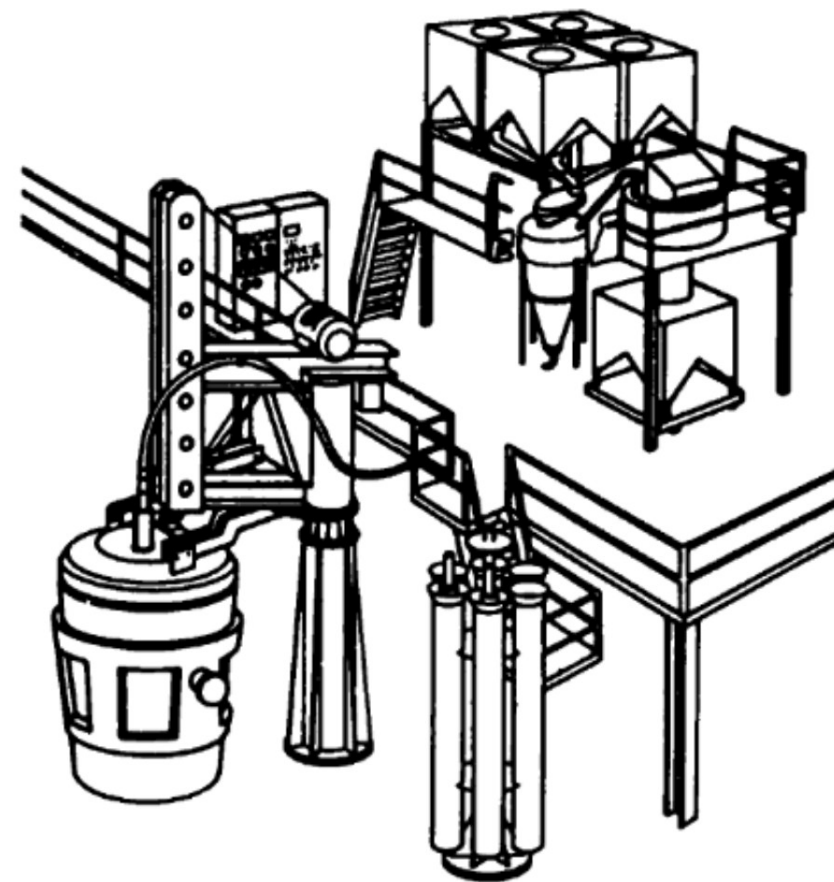


Dmýchání ponornou tryskou

Injektáž prachových látek

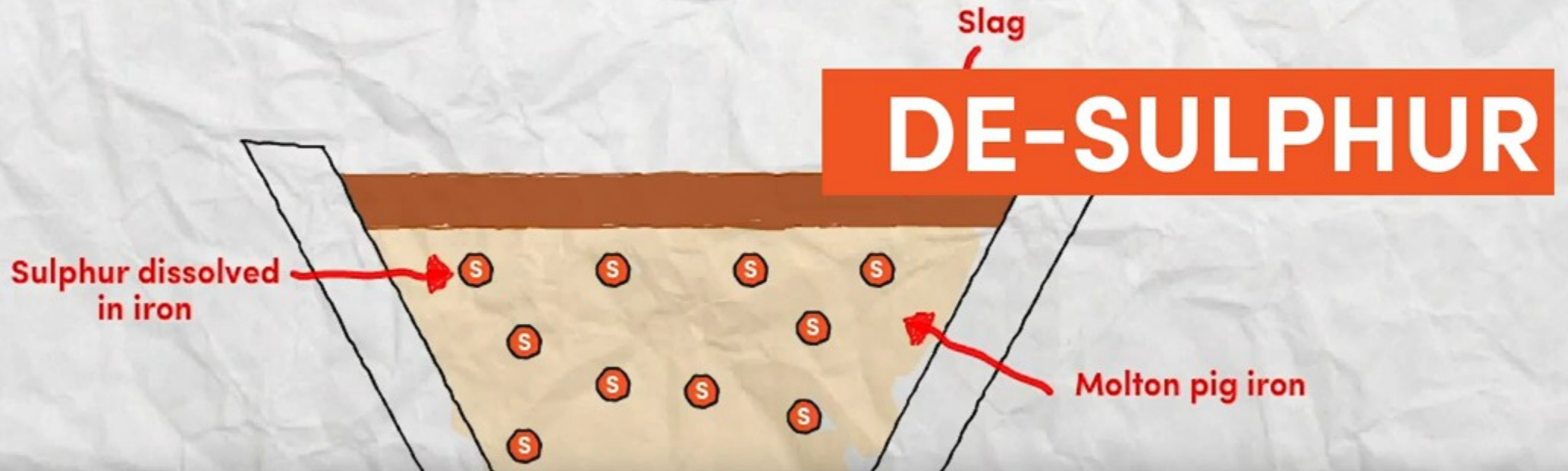


Zařízení Thyssen Niederrhein



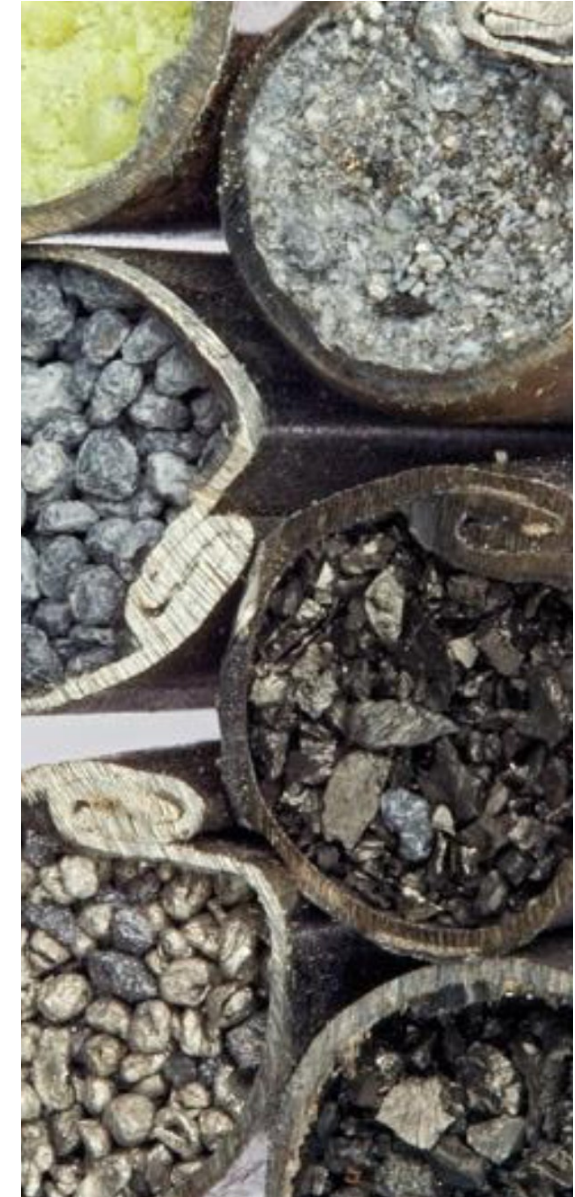
Zařízení Scandinavian Lancers

De-Sulphur



Injektáž plněných profilů

- ✓ Plněný profil je tenkostěnná trubička z ocelového plechu o průměru 6 – 18 mm, vyplněná prachovou náplní (mletými feroslitinami)
- ✓ Profil je během injektáže postupně odvíjen z cívky a podavačem zaváděn do pánve
- ✓ Rychlost odvíjení profilu musí být taková, aby se plášť profilu roztavil až u dna pánve. Pokud je zvolena vyšší rychlost, láme se profil o dno a vyplouvá do strusky, naopak při nízké rychlosti dochází k rozpuštění v malé hloubce, což vede k nižšímu využití některých přísad
- ✓ Nejčastější použití plněných profilů je k modifikaci sulfidických vměstků pomocí SiCa, stejné zařízení se používá při injektáži hliníku do oceli, kdy je používán hliníkový drát
- ✓ Při korekci chemického složení pomocí plněného profilu je nutné současně dmýchat inertní plyn (argon) pro chemickou homogenizaci lázně
- ✓ Spojení dmýchání argonu s injektáží plněného profilu umožňuje dosáhnout velice úzkého rozmezí obsahu legovaných prvků
- ✓ Výhodou oproti injektáži prachových látek je i nižší tepelná ztráta



Ukázka plněných profilů

Injektáž plněných profilů



Podavač plněných profilů



Schéma zařízení pro injektáž plněných profilů

Ohřev oceli v pánvi

- ✓ Zpracování kovu v pánvové peci je častým prvkem sekundární metalurgie využívaným ve slévárnách
- ✓ Zavedení ohřevu kovu v pánvi předpokládá plně vytíženou tavírnu s rovnoměrným odběrem kovu
- ✓ **Výhody pánvových pecí jsou:**
 - *Snížení odpichové teploty oceli*
 - *Snížení opotřebení vyzdívky pece*
 - *Zvýšení výrobnosti pece převedením rafinačního údobí primárního agregátu na pánvovou pec*
 - *Synchronizace pecního agregátu se zařízením plynulého odlévání*
 - *Přesné licí teploty pro ZPO v rozsahu $\pm 2,5$ až 5 °C*
 - *Intenzivní rafinační účinek – intenzivní hluboké odsíření*
 - *Struska má stejnou nebo vyšší teplotu než ocel v pánvové peci (nižší viskozita strusky, lepší odsíření oceli)*
- ✓ **Pánvové pece lze rozdělit dle způsobu ohřevu:**
 - *Elektrickým obloukem – pec LF (Ladle Furnace)*
 - *Chemickým přihřevem pomocí Al, Si – zařízení IR-UT (Injection Refining-up Temperature), CAS-OB (Composition Adjustment by Sealed argon bubbling-Oxygen Blowing)*



200t pánvová pec

Ohřev oceli v pánvi elektrickým obloukem

- ✓ Příhřev elektrickým obloukem v pánvové peci LF funguje na stejném principu jako v případě EOP, přičemž požadavky na výkon transformátoru jsou cca 6x nižší
- ✓ Ponorné grafitové elektrody jsou umístěny ve víku pánve
- ✓ Pomocí elektrického oblouku je udržována teplota oceli na stabilní úrovni, nebo může být zvýšena dle požadavku technologie
- ✓ V průběhu zpracování je běžně prováděno míchání oceli pomocí argonu dmýchaného skrz porézní tvárnici dnem pánve pro zajištění homogenizace
- ✓ Pánvová pec umožňuje dolegování nebo mikrolegování oceli pomocí zásobníků s násypkami nebo podavačů plněných profilů
- ✓ Jedním z hlavních úkolů pánvové pece je hluboké odsíření oceli pomocí rafinační strusky



Schéma pánvové pece



Pánvová pec v chodu

Ohřev oceli v pánvi chemickým přihřevem

- ✓ Pánvová pec IR-UT nebo CAS-OB je standardně vybavena tryskou, pomocí které je dmýchán kyslík na hladinu lázně spolu se zařízením pro přidávání granulovaného Al nebo FeSi do reakční oblasti
- ✓ Reakční oblast je ohraničena tzv. snorkelem (železobetonová skruž) spuštěným do oka lázně, které je vytvořeno dmýcháním argonu dnem pánve
- ✓ V reakční oblasti je dmýchán kyslík a přidáván Al nebo FeSi přímo na hladinu lázně, struska je oddělena snorkelem
- ✓ Reakce hliníku nebo křemíku s kyslíkem jsou silně exotermické a uvolněné teplo umožňuje ohřev lázně až o $13\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$



Snorkel během provozu



Schéma zařízení IR-UT

CAS - OB

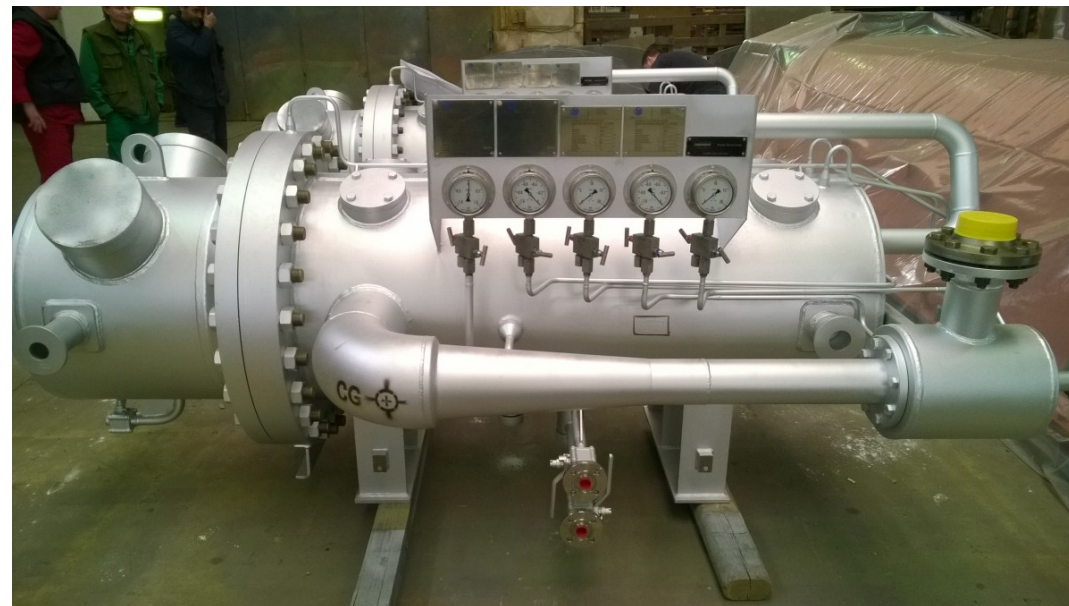


CAS-OB



Vakuové zpracování oceli

- ✓ Procesy probíhající za sníženého tlaku jsou v současnosti nejvýznamnější cestou zvyšování jakosti vyráběných ocelí
- ✓ Mimopecní vakuové zpracování umožňuje provádět podstatnou část dohotovení tavby mimo výrobní pec
- ✓ **Dosahované účinky:**
 - *Snížení obsahu vodíku a dusíku*
 - *Hluboké oduhličení oceli*
 - *Dezoxidace oceli*
 - *Dolegování na požadovanou značku*
 - *Modifikace nekovových vměstků*
- ✓ Příznivé účinky vakuování oceli spočívají především ve snížení obsahu plynů rozpuštěných v oceli a v ovlivňování průběhu uhlíkové reakce, jejíž zplodinou je oxid uhelnatý
- ✓ Mezi základní způsoby vakuové rafinace oceli patří:
 - *Vakuování v pánvi umístěné v kesonu – VD (Vacuum Degassing)*
 - *Vakuování v komoře zdvižným způsobem – DH (Dortmund-Hüttenunion)*
 - *Vakuování v komoře oběžným způsobem – RH (Ruhrstahl-Heraeus)*



Paroproudá vývěva pro tvorbu vakua

Vakuování oceli v pánvi umístěné v kesonu - VD

- ✓ Jedná se o jeden z nejstarších a zároveň nejjednodušších pochodů sekundární metalurgie
- ✓ Kov v pánvi se zavází do vakuovaného prostoru – kesonu
- ✓ Po zavezení se keson uzavírá hermeticky utěsněným víkem a pomocí paroproudých vývěv se vytváří vakuum (2 – 4 kPa po dobu 10 – 15 min)
- ✓ Vlivem snížení tlaku probíhá uhlíková reakce mezi uhlíkem a kyslíkem rozpuštěným v tavenině i kyslíkem vázaným v oxidických vměstcích
- ✓ Dochází k hluboké dezoxidaci kovu uhlíkem a současně i snížení obsahu vodíku a dusíku
- ✓ Pro zvýšení účinnosti odplynění a oduhličení a homogenizaci oceli se během celé úpravy kovu dmýchá inertní plyn (argon)
- ✓ Po dezoxidaci je možné ocel dolegovat pomocí přísad uložených v zásobnících umístěných nad kesonem přes speciální tlakotěsný zvon
- ✓ Během vakuování je možné provést hluboké odsíření, což je usnadněno vysokým stupněm dezoxidace oceli

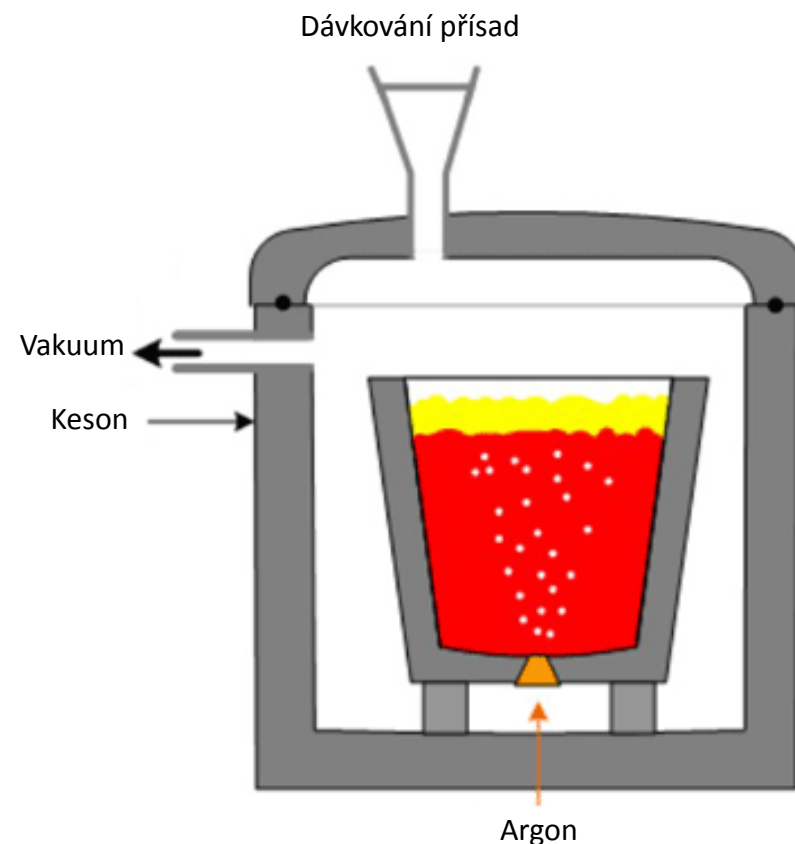


Schéma vakuového odplynění v pánvi



Pánev v kesonu

Vakuování oceli v komoře zdvižným způsobem - DH

- ✓ Tekutá ocel je z lící pánve nasávána do zvláštní vakuové komory
- ✓ Vlivem rozdílného tlaku mezi vakuovou komorou a okolní atmosférou se v sacím hrdle vytvoří sloupec tekuté oceli
- ✓ 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
- ✓ Stupeň odplynění oceli zdvižným způsobem je výrazně ovlivňován počtem zdvihů, který je dán poměrem doby vakuování a doby setrvání jedné dávky v komoře
- ✓ Odplyňování oceli způsobem DH umožňuje nejen snížit obsah plynů, ale také obsah uhlíku, homogenizovat taveninu, včetně dezoxidace a legování za podtlaku

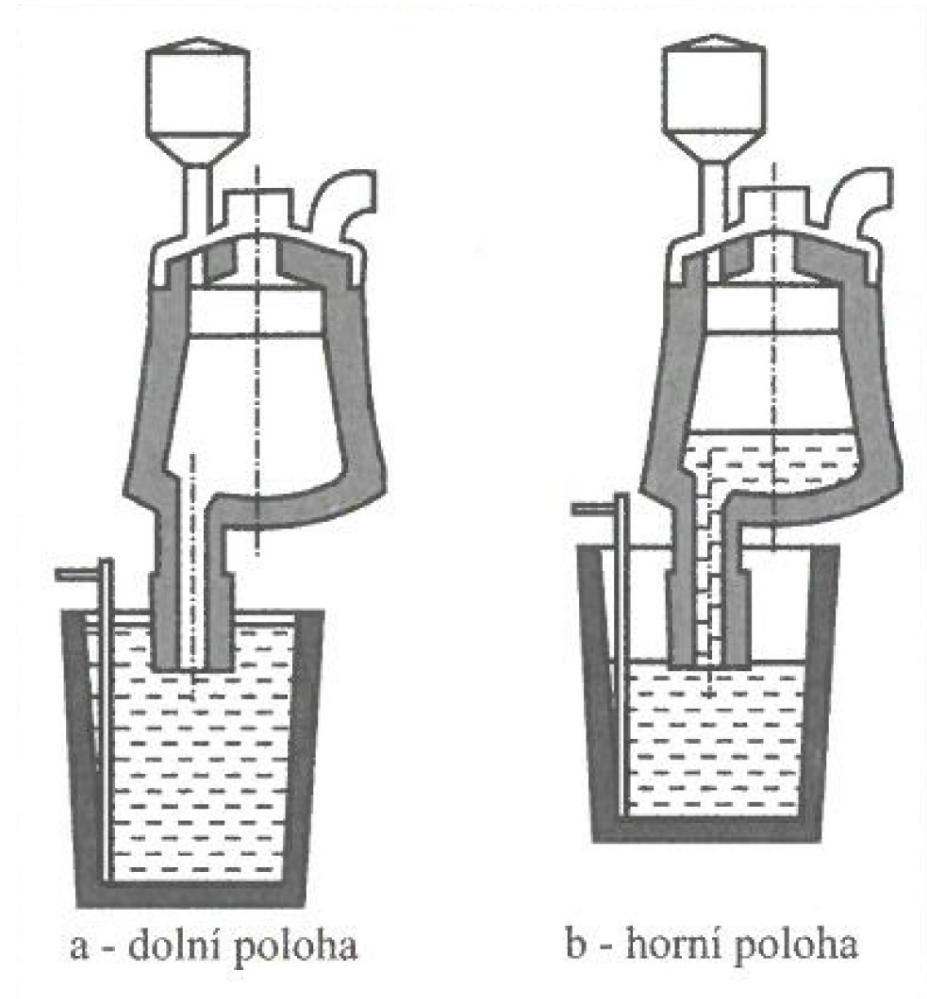


Schéma zařízení DH



Vakuování oceli v komoře oběžným způsobem - RH

- ✓ Tavenina je průběžně odplyňována ve vakuové komoře, do níž se ocel dopravuje přívodním potrubím z pánve
- ✓ Přivádění inertního plynu zvyšuje rychlost nasávání roztaveného kovu do nasávacího hrdla, zároveň vzniká směs kovu a plynu o menší hustotě, takže tato směs vstupuje do vakuové komory
- ✓ Ve vakuové komoře dochází k odplynění a někdy i oduhličení taveniny
- ✓ Přidávaný inertní plyn udržuje taveninu v neustálém turbulentním pohybu, což umožňuje uvolňování plynů a oduhličení z jednotlivých kapek taveniny i ze vzdušného povrchu taveniny
- ✓ Nasávání a výtok oceli je plynulý, odplyněná ocel vytéká výstupní trubicí zpět do pánve
- ✓ Takto je celý objem tekutého kovu několikrát nasát do vakuové komory
- ✓ Vakuová komora je odsávána pomocí několikastupňových paroproudých vývěv
- ✓ Zařízení je určeno pro vakuování velkých objemů kovů

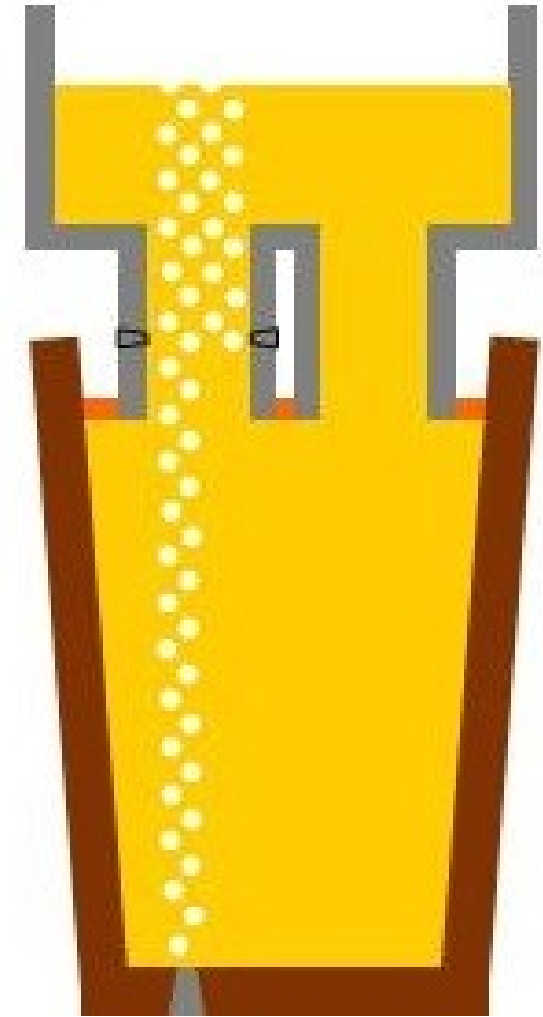


Schéma zařízení RH

RH De-gasser

metal
materials and manufacturing training

RH DE-GASSER



Swansea University
Prifysgol Abertawe





Ocel po úpravě v zařízení RH

Sekundární metalurgie

✓ Uvedené metody sekundární metalurgie umožňují dosáhnout odlišné rafinační účinnosti

Technologie sekundární metalurgie	Změna obsahu prvku				Legování	ΔT (°C)	Modifikace vměstků
	ΔS (%)	ΔH (ppm)	ΔN (ppm)	ΔO (%)			
Dmýchání Ar	-50/-60	+3/+4	0/+20	-50	Ohraničené	-10/-15	ne
Injektáž prachových látek	-50/-80	+2/+5	+20/+40	-50	Velký propal	-40/-60	ano
Injektáž plněných profilů	-50/-80	0/+2	0/+20	+/-	Vynikající	-10/-15	ano
Pánvová pec LF	-50	+	+	-50	Vynikající	+/-	ne
Vakuovací stanice VD	-70/-90	-60	-50	-50	Ohraničené	-50	ne
Vakuovací stanice RH	xxx	-80	-30	-50	vynikající	-50	ne

Metalurgické schopnosti jednotlivých zařízení sekundární metalurgie





Seznam použité literatury

- ✓ Beránek M., Šebková J., Pedlík M.: *Technologie kovových materiálů. 1. vyd.* Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 1984
- ✓ Čamek L., Fabík R.: *Metalurgické technologie: Studijní opora.* VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2013
- ✓ Iron & Steel [online]. Dostupné z: <https://www.viktormacha.com/galerie/iron-and-steel-11/>
- ✓ Šenberger J., Bůžek Z., Záděra A., Stránský K., Kafka V.: *Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd.* VUTIUM, Brno 2008
- ✓ Michalek K., Socha L., Adolf Z., Bažan J.: *Rafinace a odlévání oceli: Studijní opora.* VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2013
- ✓ RH Vacuum Degassing Technology [online]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/rh-vacuum-degassing-technology/>
- ✓ Adolf Z.: *Mimopecní rafinace oceli. 3. vyd.* VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2002
- ✓ Thelning K. E.: *Steel and its heat treatment. 2. vyd.* Butterworth-Heinemann, Oxford 2000