VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra metalurgie a slévárenství

ELEKTROMETALURGIE A VÝROBA FEROSLITIN

prof. Ing. Karel Michalek, CSc.

2016

Název: ELEKTROMETALURGIE A VÝROBA FEROSLITIN
Autor: prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
Vydání: třetí, 2016
Počet stran: 149

Studijní materiály pro studijní obor Moderní metalurgické technologie (studijní program Metalurgické inženýrství) navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství.

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Tato studijní opora vznikla v rámci rozvojového projektu Tvorba elektronických studijních opor pro studijní programy FMMI v r. 2008.

© prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
© VŠB – Technická univerzita Ostrava

POKYNY KE STUDIU

Název předmětu

ELEKTROMETALURGIE A VÝROBA FEROSLITIN

Pro předmět Elektrometalurgie a výroba feroslitin 2. semestru studijního oboru Moderní metalurgické technologie jste obdrželi studijní balík obsahující integrované opory pro studium obsahující i pokyny ke studiu.

1. Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá úspěšné absolvování bakalářského studia příbuzného zaměření.

2. Cílem předmětu a výstupy z učení

Cílem předmětu je seznámení se předat studentům širší teoretické a praktické znalosti z metalurgie, technologie a tepelně-energetických poměrů výroby oceli v elektrických pecích, zejména pak v obloukových pecích střídavých a stejnosměrných, indukčních, vakuových indukčních a rovněž v hybridních a flexibilních agregátech včetně výroby feroslitin karbotermickým a metalotermickým způsobem.

Po prostudování předmětu by měl student být schopen:

Řešit procesy probíhající při výrobě a rafinaci oceli v souladu s jejich teoretickou podstatou. Komplexně posuzovat metalurgický proces a variantní možnosti jeho průběhu.

získané znalosti:

- charakterizace technologie výroby oceli a feroslitin v elektrických pecích obloukových a indukčních
- formulování základní fyzikálně-chemické děje při výrobě oceli a feroslitin v elektrických pecích.

získané dovednosti:

- využití svých znalostí k rozhodnutí o vhodnosti metalurgických postupů výroby elektrooceli,
- umět využít své teoretické poznatky k návrhům úprav technologie a metalurgie výroby elektrooceli.

Pro koho je předmět určen:

Předmět je zařazen do navazujícího magisterského studia oboru Moderní metalurgické technologie studijního programu Metalurgické inženýrství.

Studijní opora se dělí na kapitoly či tematické bloky, které odpovídají logickému dělení studované látky. Tyto kapitoly nejsou stejně obsáhlé, a tedy předpokládaná doba k jejich studiu se může lišit.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:

Prostudovat každou kapitolu a své znalosti si ověřit pomocí kontrolních otázek, které jsou umístěny na závěr kapitoly.

Způsob komunikace s vyučujícím:

Komunikace s vyučujícím je možná pomocí e-mailu: karel.michalek@vsb.cz nebo telefonicky na čísle: +420 597 325 213.

Osnova předmětu „Elektrometalurgie a výroba feroslitin“

1. Současný stav a perspektivy výroby oceli v elektrických pecích. Rozdělení elektrických pecí. Základy silnoproudé elektrotechniky střídavého proudu.
2. Teorie elektrického oblouku. Elektrický oblouk při stejnosměrném napětí. Elektrický oblouk při střídavém napětí. Stabilizace hoření oblouku.
3. Elektrický a tepelný režim práce EOP. Pracovní elektrická charakteristika EOP. Dynamické a fyzikálně chemické účinky oblouků. UHP a SUHP pece.
4. Další zdroje tepla v EOP. Intenzifikace tavení. Použití plynného kyslíku, kyslíkopalivové hořáky. Napěňovací trysky. Dmýchání inertního plynu dnem EOP. Výrobnost EOP.
5. Základní části konstrukce EOP. Transformátor EOP, tlumivka, kompenzace účiníku, krátká síť EOP, elektrody EOP. Výroba grafitových elektrod.
6. Regulace pohybu elektrod. Statická a dynamická charakteristika regulátoru. Blokové schéma regulátoru. Indukční míchání lázně v EOP. Vyzdívky EOP. Vodní chlazení EOP. Odsávání pecních plynů, čištěni plynů.
7. Technologie výroby oceli v EOP. Dvoustrusková technologie. Jednostrusková technologie. Význam oxidačního a redukčního údobí tavby. Technologie přetaveb.
8. Výroba legovaných a vysokolegovaných ocelí. Termodynamika metalurgických pochodů při oxidační rafinaci lázně. Odfosfoření při výrobě legovaných ocelí. Redukce oxidů legujících prvků ze strusky do lázně. Legování titanem. Výroba oceli v kyselých obloukových pecích. Kombinované pochody EOP-DH, EOP-AOD, EOP-VOD, EOP-VD.
9. Chování vodíku a dusíku v průběhu tavby v EOP. Měření teploty lázně. Určování aktivity kyslíku, obsahu vodíku a dusíku v lázni. Automatizace řízení výroby v EOP.
10. Stejnosměrné obloukové pece. Zvláštnosti a odlišnosti konstrukce pece. Půdní anody. Průběh tavby ve stejnosměrné peci. Přednosti stejnosměrných pecí a srovnání se střídavými pecemi.
11. Nové pochody ve výrobě elektrooceli – Fuchs Shaft Furnace, Verticon, ConSteel, Comelt-VAI, ContiArc.
12. Nové pochody ve výrobě elektrooceli - ConArc, Arcon, Contimet, KES, Danarc.
13. Výroba oceli v indukčních pecích. Princip ohřevu a tavení. Konstrukční provedení indukčních pecí. Základní elektrické charakteristiky indukční pece. Technologie výroby oceli v indukčních pecích. Vakuové indukční pece. Metalurgické pochody probíhající ve vakuu. Elektrostruskové přetavování.
14. Základy termodynamiky výroby feroslitin. Karbotermické, silikotermické a aluminotermické způsoby výroby feroslitin. Výroba hlavních typů feroslitin: FeMn, FeCr, FeSi, FeTi, FeWT.

Použitá a doporučená literatura k dalšímu studiu:

[1] FREMUNT, P., ŠIMON, J.: *Tavení oceli v elektrických pecích*. SNTL Praha, 1984, 242 s.

[2] RADA, J. ad.: *Elektrotepelná technika*. SNTL, Praha, 1985, 344 s.

[3] PLOCKINGER, E., ad.: *Electric Furnace Steel Production*, John Wiley and Sons Ltd., 1985, 650s.

[4] TOULOEVSKI, Y.N., ZINUROV, I.Y. *Innovation in Electric Arc Furnaces*. Springer, 2010. 258 p, ISBN 978-3-642-03800-6.

[5] FRUEHAN, R.J. *The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume*. 11td ed. AISE Steel Foundation, 1998, 767 p. ISBN 0-930767-02-0.

[6] Sborníky z konferencí: *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli*, *METAL*, *Iron and Steelmaking*, *Electric Furnace Conference*.

TÉMATICKÝ BLOK 1

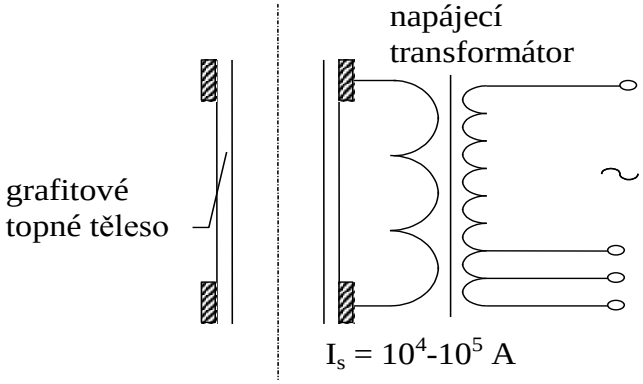
Současný stav a perspektivy výroby oceli v elektrických pecích

- v elektrických pecích se vyrábí cca *40 %* z celkového množství oceli (USA, Kanada více než 45 %)
- ČR – dlouhodobě *7 – 10 %* z celkové výroby cca 6 mil. tun
- pozitivní vliv na ekologii (redukce koksoven, aglomerací)
- možnost zpracování vysokého podílu ocelového odpadu
- rozvoj stejnosměrných EOP, zavádění nových pochodů – využití spalin, flexibilní (hybridní) pochody, intenzifikované pochody
- parametry současné EOP: tavba cca 100 tun, spotřeba elektrické energie cca 300 až 450 $kW \cdot h^{-1}$, spotřeba elektrod 1,9 až 2,9 $kg \cdot t^{-1}$, doba tavby cca 70 minut

Rozdělení elektrických pecí

- elektrické ***obloukové*** pece (EOP) - vsázka se taví vznikajícím elektrickým obloukem
- elektrické ***indukční*** pece (IP) - vsázka se ohřívá a taví vířivými proudy, jejichž vznik souvisí s elektromagnetickou indukcí
- elektrické ***odporové*** pece - teplo vzniká průchodem elektrického proudu přes odporové články

Schéma elektrické odporové pece



- Teplo vzniká průchodem elektrického proudu přes ***odporové články*** (sility - slinuté karbidy křemíku SiC, dvojsilicid molybdenu $MoSi_2$, wolframové topné články, grafitové topné segmenty apod.).
- Tyto pece se používají nejčastěji k ohřevu kovu před jeho ***tepelným zpracováním*** nebo jako pece ***sušící*** či ***vypalovací***, rovněž k tavení ***barevných kovů a slitin*** a taky v laboratorních podmínkách pro výzkumné účely (*Tammannova* pec) apod.

Rozdělení elektrických obloukových pecí (EOP; EAF)

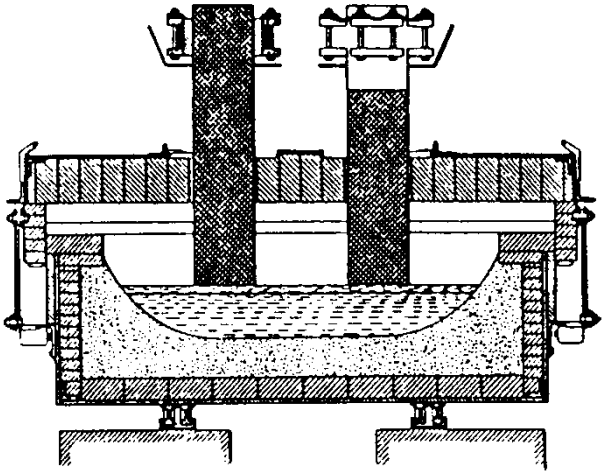
a) napájené střídavým proudem (AC)

- s přímo působícím obloukem
  - obloukové pece s nevodivou nístějí
  - obloukové pece s vodivou nístějí
- s nepřímo působícím obloukem

b) napájené stejnosměrným proudem (DC)

- s půdní elektrodou nebo elektrodami
- obloukové pece s nevodivou nístějí

Původní Héroultova oblouková pec



Součástí tohoto tematického bloku je i prostudování příloh a uvedených na stranách 146 – 148.

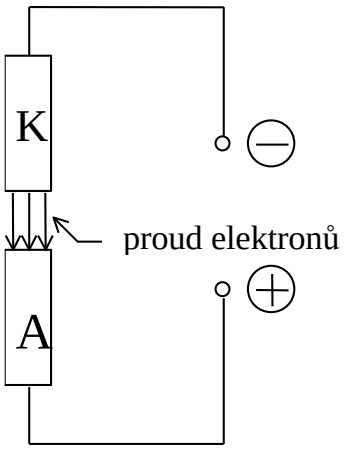
Otázky k probranému učivu

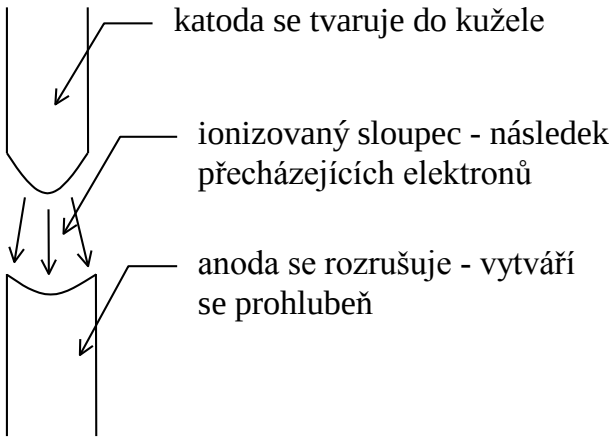
1. Současný podíl výroby oceli v EOP, stav v EU, na celém světě, v ČR, soudobé technické parametry EOP.
2. Rozdělení elektrických pecí.
3. Princip ohřevu v elektrických odporových pecích, využití odporových pecí.
4. Základy silnoproudé elektrotechniky střídavého proudu – obvod s ohmickým odporem, s indukčností, s kapacitou (viz Příloha).
5. Základy silnoproudé elektrotechniky střídavého proudu – rezonance sériová a paralelní, rezonanční kmitočet (viz Příloha).
6. Základy silnoproudé elektrotechniky střídavého proudu – výkon střídavého proudu (viz Příloha).

TÉMATICKÝ BLOK 2

Princip vzniku a složení elektrického oblouku

- termická emise elektronů z katody (zvyšuje se s teplotou)
- srážky elektronů s molekulami a atomy plynů →
  - disociace molekul plynu na atomy,
  - ionizace atomů na ionty a elektrony (resp. i zpětná rekombinace)
- prostor mezi elektrodami se ionizuje a vzniká „vodivá cesta“
- následně vzniká elektrický oblouk - zvláštní stav hmoty - plazmy - vznikajícího mezi elektrodami. **Plazmu** můžeme zjednodušeně považovat za směs ***neutrálních částic, elektronů a iontů plynu*** s velmi vysokou teplotou - dosahuje 5 000 až 15 000 K. Plně ionizovaná plazma je stabilní až při teplotách 10^5 K, kdy srážky mezi částicemi jsou tak intenzivní, že se neutrální částice v plazmatu vůbec neudrží.





složení oblouku:

- katodová oblast vodivého výboje – délka 10^{-4} mm, přiléhá ke katodě, probíhají v ní ionizační procesy, obsahuje katodová skvrnu s velkými proudovými hustotami (až 3000 $A \cdot mm^{-2}$)
- ionizovaný sloupec oblouku – přeměna el. energie v tepelnou
- anodová oblast vodivého výboje – délka 10^{-4} mm, přiléhá k anodě, anodická skvrna v místě dopadu elektronů a iontů na anodu (až 300 $A \cdot mm^{-2}$)

Podmínky hoření elektrického oblouku

Pro průchod proudu obloukem (tzv. *hoření oblouku*) je zapotřebí, aby napětí mezi čely elektrod bylo větší nebo rovno tzv. ***zápalnému napětí U_z***

$$U_o \geq U_z$$

$$U_z = \alpha + \frac{\rho_{S,O}}{k} \cdot l_o = \alpha + \beta \cdot l_o$$

α - úbytek napětí při průchodu proudu *katodovou a anodovou oblastí* vodivého výboje (mezi katodou a sloupcem oblouku a sloupcem oblouku a anodou)

Hodnoty veličiny α pro různé prostředí:

grafit - roztavená ocel	*22 V*
grafit - zásaditá struska	*9 V (Ca je snadno ionizovatelný)*
grafit - kyselá struska	*30 V*

$\rho_{S,0}$ - rezistivita (měrný odpor) sloupce oblouku; $\Omega \cdot m$

k - konstanta úměrnosti; $m^2 \cdot A^{-1}$

β - gradient elektrického potenciálu ve sloupci oblouku; $V \cdot m^{-1}$ oblouku

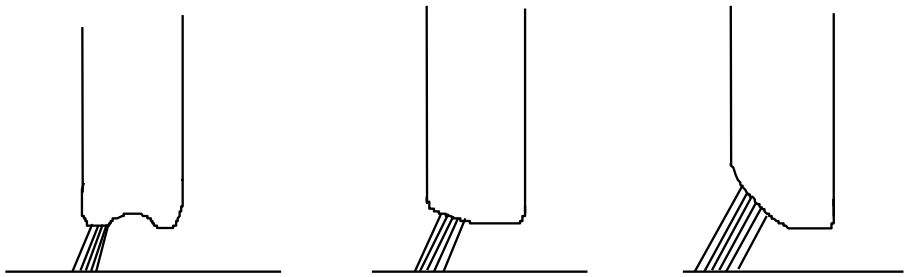
Na hodnotu veličiny β má výrazný vliv stupeň ionizace směsi par a plynů tvořících sloupec oblouku. Čím bude tento stupeň ionizace vyšší, tím bude hodnota β nižší. Stupeň ionizace se zvyšuje s teplotou.

Hodnoty veličiny β v jednotlivých údobích tavby:

tavení	*10000 – 12000 $V \cdot m^1$ oblouku*	*(10 - 12 $V \cdot mm^{-1}$)*
oxidační údobí	*3500 – 4000 $V \cdot m^1$ oblouku*	*(3,5 – 4 $V \cdot mm^{-1}$)*
redukční údobí	*1000 – 1200 $V \cdot m^1$ oblouku*	*(1,0 - 1,2 $V \cdot mm^{-1}$)*

l_o - délka oblouku

Vliv tvaru konce elektrody na délku oblouku - jen u krátkých oblouků je to vzdálenost elektroda-lázeň

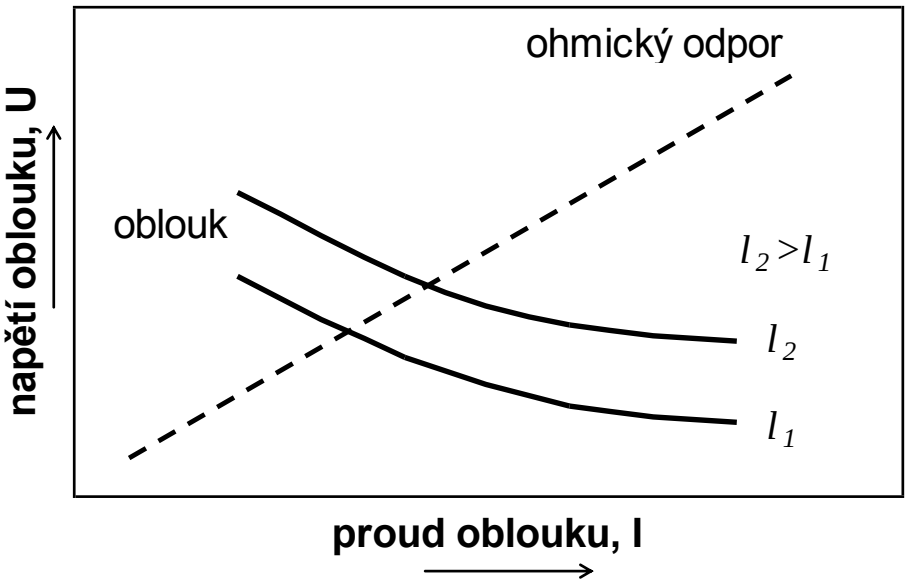


Potřebné napětí na oblouku U_0 pro jeho hoření bude tedy tím nižší

- čím nižší bude ionizační potenciál par a plynů oblouku - α,
- čím kratší bude délka oblouku - l_0
- čím nižší bude hodnota gradientu elektrického potenciálu ve sloupci oblouku - β (tzn. čím nižší bude měrný odpor sloupce oblouku $\rho_{s,o}$).

Voltampérové charakteristiky elektrického oblouku dvou různých délek

- Při hodnocení chování pouze samotného oblouku docházíme k závěru, že *proud oblouku prakticky nezávisí na napětí na oblouku*. Při růstu proudu dochází dokonce i k určitému poklesu potřebného napětí na oblouku, a to v důsledku růstu teploty v pracovním prostoru pece a tím i růstu průměrného stupně ionizace a tedy poklesu $\rho_{S,0}$ a tedy i β.



Voltampérové charakteristiky stejnosměrného elektrického oblouku dvou různých délek *l*

- Při velmi vysokých proudových intenzitách může napětí na oblouku klesnout pod hodnotu U_z, oblouk se pak stane ***nestabilním*** a dojde k jeho zhasínání – proto je nutná jeho stabilizace.

Stabilizace stejnosměrného oblouku

Stabilizace se provádí zařazením rezistoru (odporu) do elektrického obvodu oblouku – zařazený rezistor ***omezí maximální proud oblouku***. Při vzrůstu proudu na oblouku se zvětší úbytek napětí na tomto rezistoru a tím klesne i napětí na oblouku.

Oblouk v obvodu může existovat pouze v případě, jestliže se součet napětí na oblouku a na rezistoru rovná napětí zdroje resp. *napětí na oblouku se musí rovnat rozdílu napětí zdroje a napětí na rezistoru*.

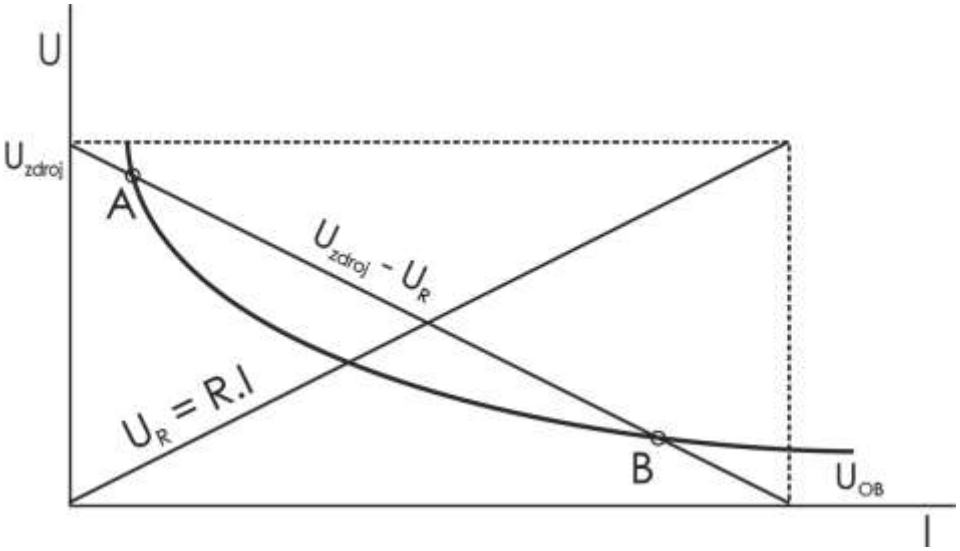
Platí tedy

$$U_{zdroj} = U_O + U_R = U_O + R \cdot I$$

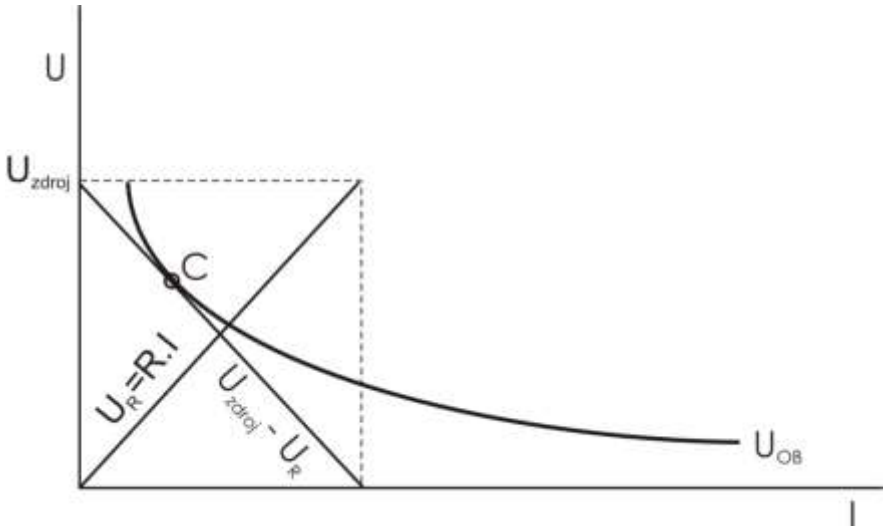
resp.

$$U_O = U_{zdroj} - U_R = U_{zdroj} - R \cdot I$$

Rovnici lze vyřešit graficky tak, že do grafu nakreslíme *charakteristiku oblouku* a tzv. *rozdílovou* přímku U_{zdroj} - U_R. Průsečíky rozdílových přímek s charakteristikou určují proudonapěťové poměry, při kterých může oblouk existovat. Pokud průsečík neexistuje, oblouk *nemůže hořet stabilně.*



Pro hoření oblouku jsou podmínky splněny v bodech A a B. Stabilní hoření oblouku je možné pouze v bodě B. Hoření oblouku v bodě A je labilní a oblouk z něho přechází do bodu B, k vyšším proudovým intenzitám při nižším napětí.



Hoření oblouku v bodě C probíhá na ***mezi stability*** – např. tehdy pokud je hodnota R vysoká a kdy na něm vzniká velký úbytek napětí, tzn., že napětí na oblouku se jen málo odlišuje od zápalného napětí. Při dalším zvýšení R - napětí na elektrodách po zapálení oblouku ihned klesne pod zápalné napětí – oblouk zhasíná nebo se vůbec nevytvoří, tzn.

$$U_O > U_{zdroj} - U_R$$

Naopak při *nízkých hodnotách R* (rozdílová přímka protíná osu x při vyšších hodnotách proudu) je hoření oblouků posunuto k extrémním proudům, což při dostatečně „tvrdém“ zdroji může vést ke zničení elektrod.

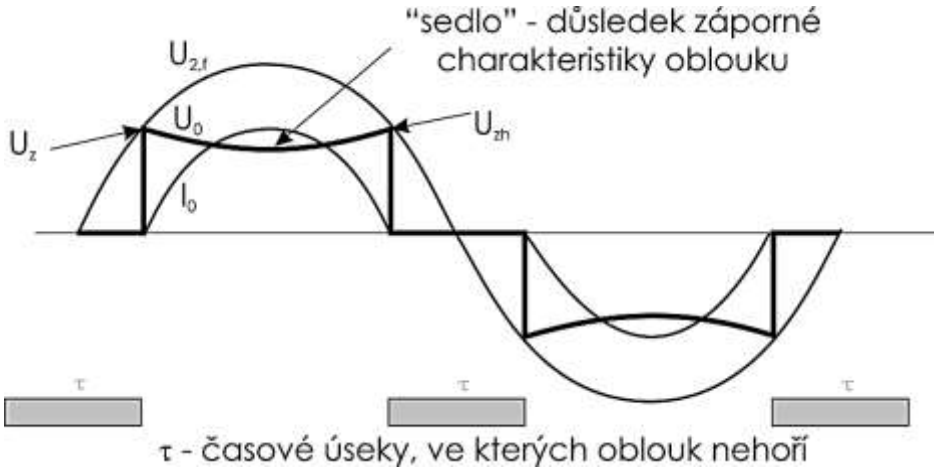
Pokud se proud mění v závislosti na čase, nesleduje obloukové napětí statickou charakteristiku, ale pohybuje se po dynamické charakteristice.

K tomu, aby stejnosměrný oblouk hořel stabilně, musí existovat průsečík rozdílové přímky s charakteristikou oblouku. To můžeme zajistit následujícími způsoby:

- Posunutím charakteristiky oblouku k nižším napětím – zkrácením jeho délky
- Snížením hodnoty odporu R
- Zvýšením napětí zdroje

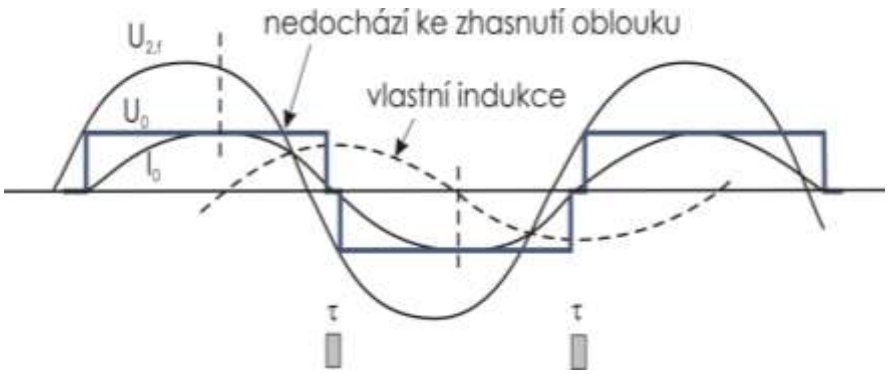
Proudonapěťové poměry u střídavého elektrického oblouku

- Při použití střídavého elektrického proudu, dochází při hoření oblouku k určitým nuceným přestávkám v období, kdy napětí na transformátoru U_{tr} klesne pod hodnotu zhášecího napětí U_{zh}.



- Důsledek přerušovaného hoření oblouku - snížení průměrného *činného výkonu* uvolňovaného obloukem.
- Střídání funkce katody a anody – ztížená termická emise elektronů z chladné vsázky na počátku tavení, vzniká asymetrie proudového zatížení, která vede k nestabilitě hoření oblouků a jeho zhasínání.

Proudonapěťové poměry u střídavého elektrického oblouku stabilizovaného tlumivkou



- Pro stabilizaci se používá např. zařazení *tlumivky* sériově do obvodu k primárnímu vinutí transformátoru – vzniká fázový posun mezi proudem a napětím.
- Kolem tlumivky vzniká střídavé elektromagnetického pole.
- Při poklesu napětí U_{tr} pod U_{zh} oblouk nezhasne, neboť energii pro tvorbu oblouku dodává elektromagnetické pole kolem tlumivky resp. a jeho změna v elektrickou energii (pole zpětně indukuje proud původního směru a tlumivka tak působí jako „akumulátor“ energie, který se snaží udržet proud oblouku na původní velikosti).
- Zlepšují se tím podmínky hoření oblouku - zkracují se časové úseky τ, ve kterých oblouk nehoří.
- Při zařazení takové hodnoty X_L, která vede k dosažení účiníku *cos φ cca 0,85* jsou časové úseky τ, po které oblouky nehoří, téměř nulové a elektrický výkon vnášený do EOP je maximální.
- U velkých pecí nejsou tlumivky potřebné z důvodu značného vlastního induktivního odporu vinutí transformátoru.

Otázky k probranému učivu

1. Rozdělení elektrických obloukových pecí.
2. Podstata vzniku elektrického oblouku, složení ionizovaného sloupce oblouku.
3. Podmínky hoření oblouku, definice zápalného napětí, rozbor jednotlivých činitelů majících vliv na zápalné napětí.
4. Voltampérová charakteristika stejnosměrného oblouku.
5. Bod stabilního hoření oblouku, jeho definice a možnosti stabilizace stejnosměrného oblouku.
6. Proudonapěťové poměry u střídavého elektrického oblouku bez zapojené tlumivky.
7. Proudonapěťové poměry u střídavého elektrického oblouku se zapojenou tlumivkou – stabilizace hoření střídavého oblouku.

TÉMATICKÝ BLOK 3

Elektrický a tepelný režim práce EOP

Charakter rychlosti tavení vsázky a rovněž rychlosti změny teploty lázně po roztavení je v EOP řízen hodnotou příkonu užitečného - $P_{už}$, což je příkon využitý na ohřev vsázky a tavení.

$$\mathbf{P_{už} = P_{př} - P_{od}}$$

kde: $P_{př}$ - příkon přivedený do pracovního prostoru pece

P_{od} - výkon odvedený z pracovního prostoru pece

$$\mathbf{P_{př} = P_{el} + P_{ex}}$$

kde: P_{el} - činný příkon elektrickou energií (zejména oblouky)

P_{ex} - příkon exotermických reakcí.

$$\mathbf{P_{od} = P_{ztráty} + P_{vyzd}}$$

kde: $P_{ztráty}$ - přímé tepelné ztráty (spaliny, sálání, chladící voda)

P_{vyzd} - výkon přenášený z pracovního prostoru pece do vyzdívky (akumulace)

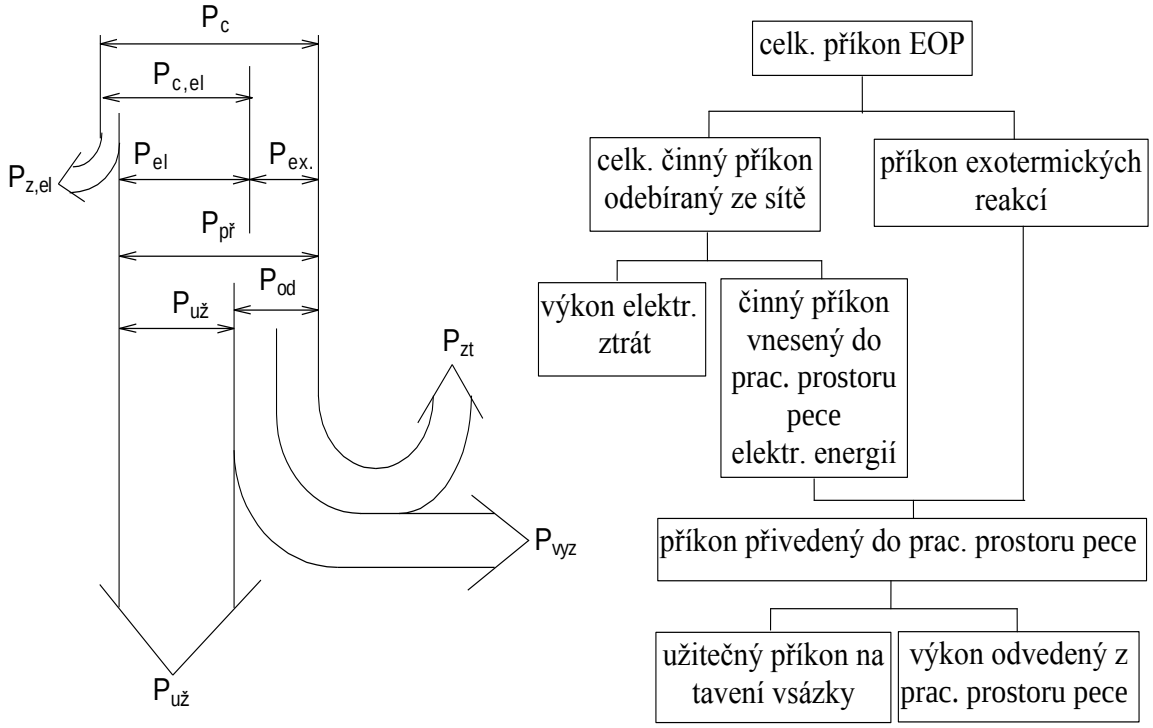
$$\mathbf{P_{el} = P_{c,el} - P_{z,el}}$$

kde: $P_{c,el}$ - celkový činný příkon odebíraný ze sítě

$P_{z,el}$ - výkon elektrických ztrát

Z uvedených vztahů je patrné, že **zvýšení hodnot $P_{už}$** dosáhneme při zvyšování P_{el} a P_{ex} a při snižování $P_{ztráty}$ a P_{vyzd}.

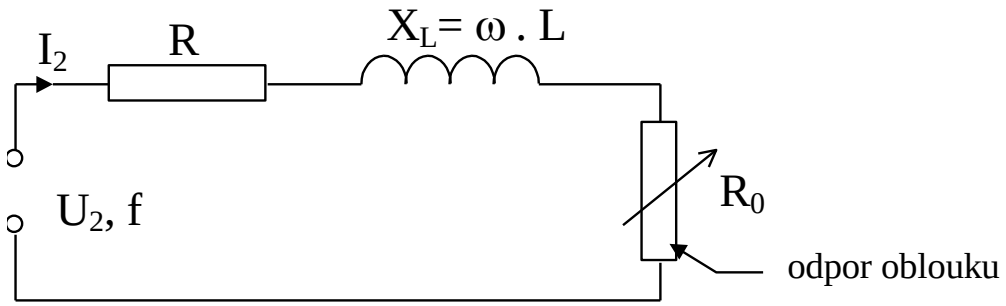
Schematické znázornění toků jednotlivých výkonů v elektrické obloukové peci



Při racionálním řízení energetického režimu obloukové pece je nutno však dosáhnout *optimální* hodnoty příkonu přiváděného do pracovního prostoru pece.

Zjednodušené náhradní schéma obloukové pece

Při řešení se vychází z tzv. *zjednodušeného transformovaného náhradního schématu* obloukové pece, ve kterém se třífázové zapojení nahrazuje náhradním schématem obvodu jedné fáze.



$U_{2,f}$ .. sekundární napětí fázové

R, X_L ... součet příslušných odporů v sekundární části obvodu a transformovaných odporů z primární strany

Elektrický a tepelný režim práce EOP

Hodnota P_{el} je dána rozdílem celkového vnášeného elektrického příkonu a výkonu elektrických ztrát:

$$P_{el} = P_{c,el} - P_{z,el}$$

$$P_{c,el} = P_{zd} \cdot \cos\varphi = 3 . U_{2,f} \cdot I_2 \cdot \cos\varphi$$

$$P_{z,el} = 3 \cdot R \cdot I_2^2$$

$$P_{el} = 3 \cdot U_{2,f} \cdot I_2 . \cos\varphi - 3 \cdot R \cdot I_2^2$$

Proud I_2 je možno vyjádřit pomocí vztahu zahrnujícího impedanci obvodu Z.

$$I_2 = \frac{U_{2,f}}{Z} = \frac{U_{2,f}}{\sqrt{(R+R_0)^2 + X_L^2}}$$

Účiník cos φ je možno vyjádřit poměrem odporu a impedance obvodu

$$\cos\varphi = \frac{R+R_0}{Z} = \frac{R+R_0}{\sqrt{(R+R_0)^2 + X_L^2}}$$

Rozhodující část hodnoty veličiny P_{el} je tvořena příkonem, který je uvolňován vlastními oblouky:

$$P_o \cong P_{el}$$

Výsledný vztah pro příkon uvolňovaný na obloucích:

$$P_o \cong P_{el} = \left(3 \cdot I_2 \cdot \sqrt{U_{2,f}^2 - (\omega \cdot L)^2 \cdot I_2^2} - 3 \cdot R \cdot I_2^2\right)$$

Elektrický a tepelný režim práce EOP

Změnu příkonu vnášeného do pracovního prostoru pece elektrickou energií (tzn. příkonu uvolňovaného na obloucích) lze provádět:

1. ***změnou sekundárního napětí transformátoru $U_{2,f}$***

Provádí se změnou propojení vinutí jednotlivých fází na primární straně transformátoru do „hvězdy“ či do „trojúhelníku“ a přepínáním odboček na primárním vinutí transformátoru.

2. ***změnou proudu oblouku I_2* při daném *$U_{2,f}$*.**

Hodnota proudu procházející obloukem závisí na odporu oblouku R_o.

$$I_2 = \frac{U_{2,f}}{Z} = \frac{U_{2,f}}{\sqrt{(R+R_0)^2 + X_L^2}}$$

Odpor oblouku je přitom možno vyjádřit vztahem:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_2} = \frac{\alpha}{I_2} + \frac{\rho_{S,0} \cdot l_0}{k \cdot I_2}$$

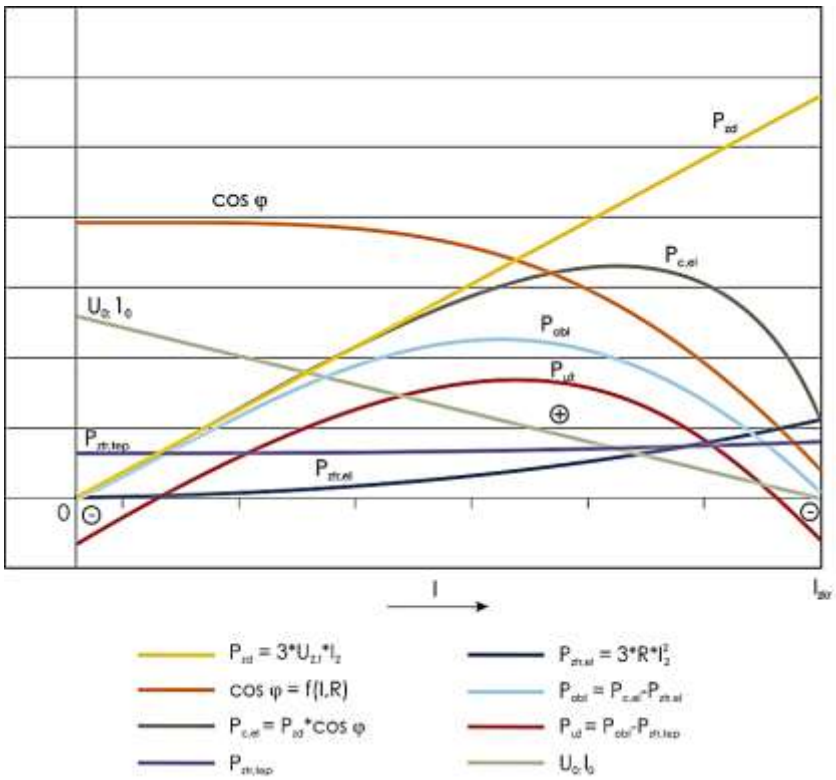
- α - ~ ionizační potenciál par a plynů v oblouku
- $\rho_{S,0}$ - rezistivita oblouku
- k - konstanta úměrnosti
- l_0 - délka oblouku
- I_2 - proud oblouku

Z výrazu je patrné, že odpor oblouku je možné řídit *jeho délkou*.

Zvětšením jeho délky se zvýší napětí na oblouku, tím stoupne jeho odpor, klesne proud a klesne tedy i tepelný výkon oblouku.

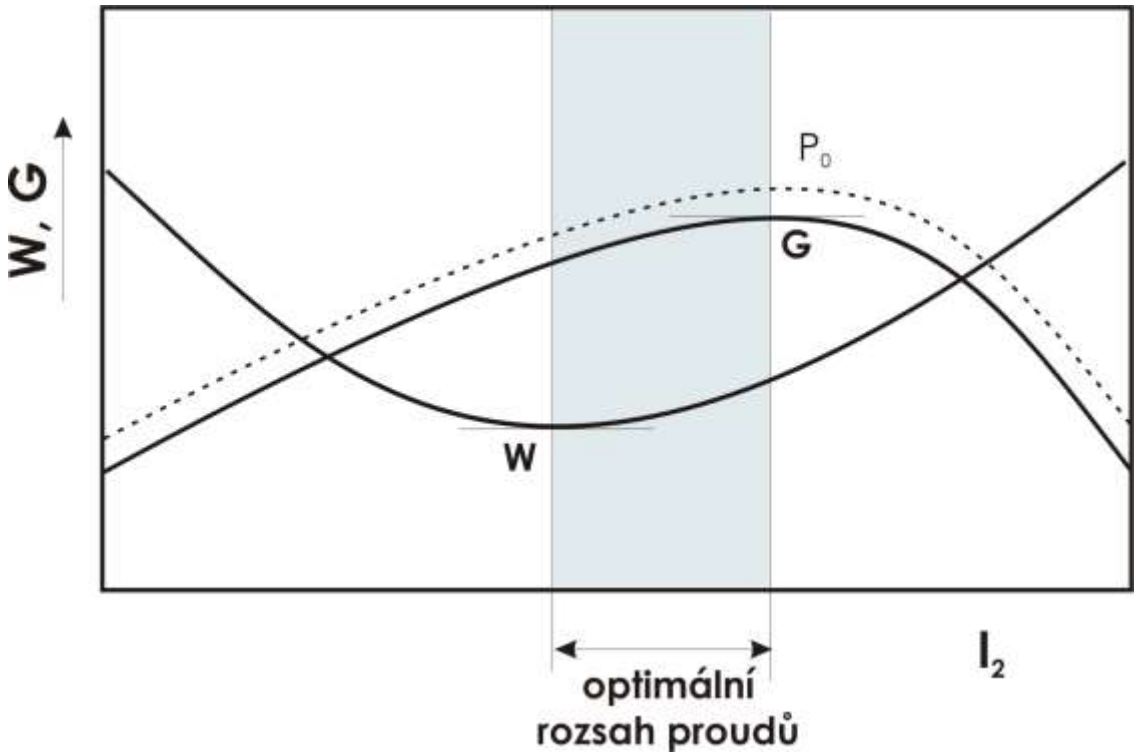
Elektrická charakteristika obloukové pece (sdružená pracovní charakteristika EOP)

- Tyto charakteristiky se nejčastěji sestavují z výsledků měření na skutečné obloukové peci. Naměřené hodnoty se použijí pro další výpočet jednotlivých výkonů. Z charakteristiky lze pak určit *optimální pracovní režim* obloukové pece.
- Při měření měníme proud oblouku pomocí změny délky oblouku (resp. napětí na oblouku) při daném napěťovém stupni.



Při zkratu je R_o *nulové*, ale zůstává ještě ohmický odpor R. Proto $P_{c,el}$ neklesne na nulu, ale na určitou reálnou hodnotu (elektroda se ohřívá ohmickým teplem). P_o je však nulové, protože oblouk nehoří.

Závislost výrobnosti pece (G) a měrné spotřeby elektrické energie (W) na proudu oblouku



Optimální rozsah proudů je ohraničen maximální výrobností G (resp. maximálním výkonem oblouků P_o) a minimální měrnou spotřebou elektrické energie W.

Minimální měrná spotřeba elektrické energie W je při *maximální elektrické účinnosti* η_e , která je vyjádřená vztahem

$$\eta_e = \frac{P_0}{P_{c,el}}$$

Provozování EOP na ***vzestupné*** části výkonové křivky oblouku – delší oblouky, nižší proudy, vyšší účiník, větší namáhání vyzdívky

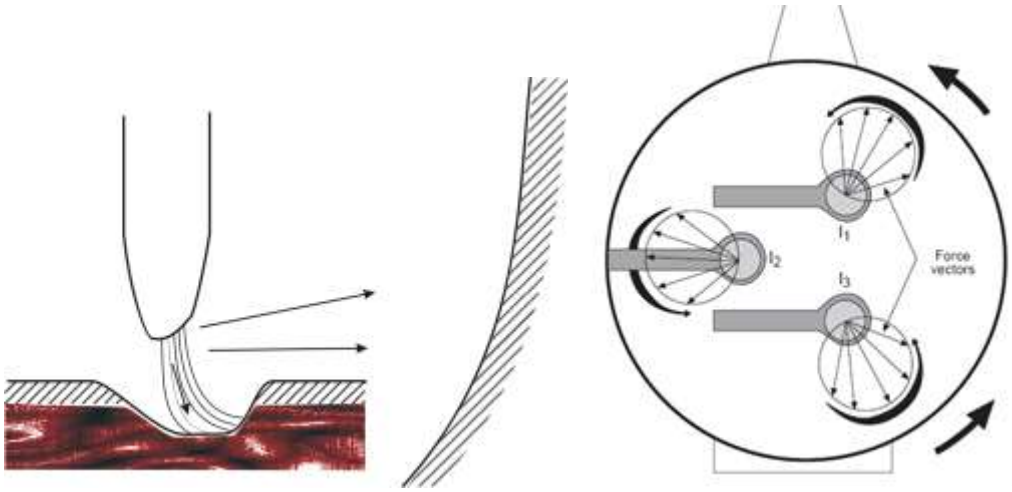
Provozování EOP na ***sestupné*** části výkonové křivky oblouku - kratší oblouky, větší proudy, nižší účiník, menší namáhání stěn, vyšší nároky na transformátor.

Dynamické účinky oblouků v EOP

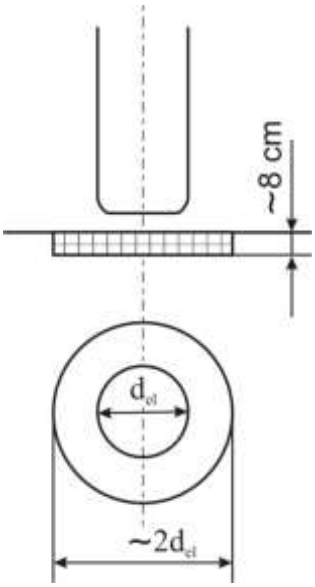
Elektrický oblouk lze považovat za vodič, jehož tvar je silně ovlivněný složitým okolním elektromagnetickým polem vznikajícím nejen působením daného oblouku, ale i oblouků okolních. Tvar oblouků je rovněž ovlivněn okolní kovovou konstrukcí pece.

Důsledek:

- *Vydouvání* oblouků směrem ke stěnám pece – zvyšování tepelného namáhání stěn pece
- Existence *axiálních sil* v oblouku – zahloubení oblouku, vznik „valu“



- *Promíchávání* lázně pod oblouky



Fyzikálně chemické účinky oblouků v EOP

Fyzikálně – chemické účinky:

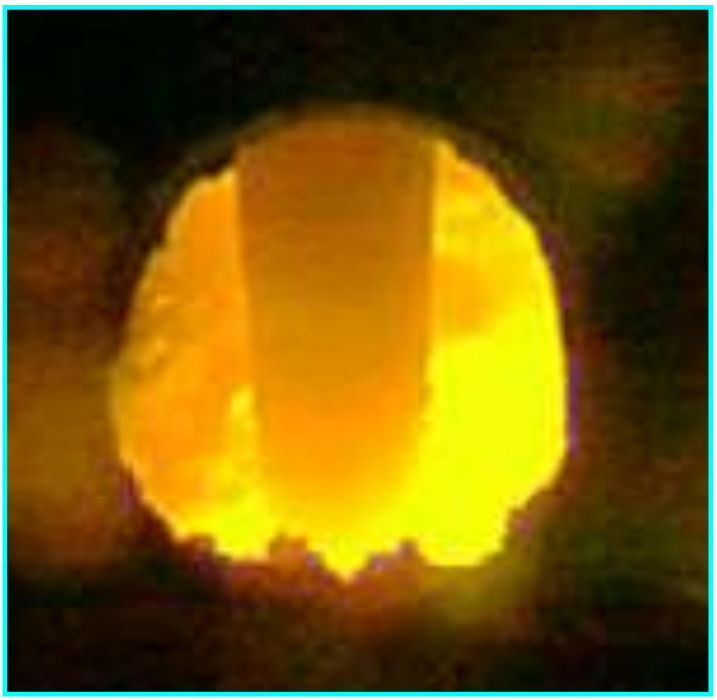
- *přechod vodíku a dusíku* do roztavené lázně – podmínkou je disociace molekul plynů na atomy (oblouk)

- *tvorba karbidu vápníku* – karbidické strusky

  $(CaO) + 3\ C_s \rightarrow (CaC_2) + CO_g$ silně endotermická reakce

- *nauhličování lázně* – z elektrod (lom elektrod, nevhodná regulace elektrod, ad.)

- *odpařování složek lázně* – Ni, Mn (důsledek vysoké tenze par kovů)



UHP pece (Ultra High Productivity)

Rozdělení EOP podle elektrických příkonů:

- běžné výrobnosti RP (regular productivity)
- vysoké výrobnosti HP (high productivity)
- velmi vysoké výrobnosti UHP (ultra high productivity)
- extrémně vysoké výrobnosti SUHP (super ultra high productivity)

Kritéria UHP:

1. Maximální hodnota měrného činného elektrického příkonu $P_{c,el}$ v údobí tavení ($P_{c,el} = P_{zd} \cdot cos\varphi$) musí dosahovat 300-600 kW·t^{-1} tekutého kovu (tzn. P_{zd} transformátoru cca 500 -1000 kVA·t^{-1}).

	do 35 t	*40 – 90 t*	*>100 t*	
pece RP	200 – 350	150 – 300	150 - 250	*kW·t^{-1}*
pece UHP	450 – 550	400 – 500	300 – 400	*kW·t^{-1}*
pece SUHP	600 - 700	550 - 600	500 – 550	*kW·t^{-1}*

2. Poměr průměrného příkonu zapnuté pece k maximálnímu příkonu v průběhu tavení musí být ≥ 0,7.

3. Poměr doby hoření oblouků k celkové délce tavby musí být ≥ 0,7.

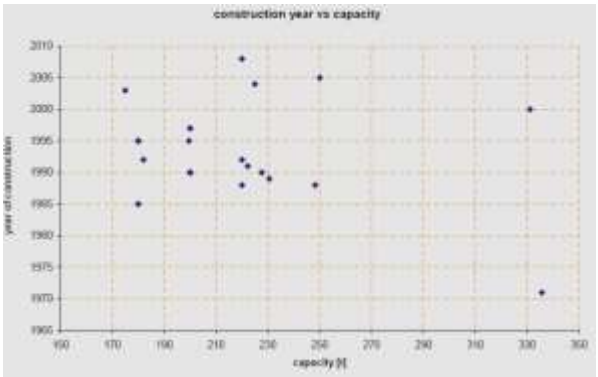
4. Vysoká životnost vyzdívky.

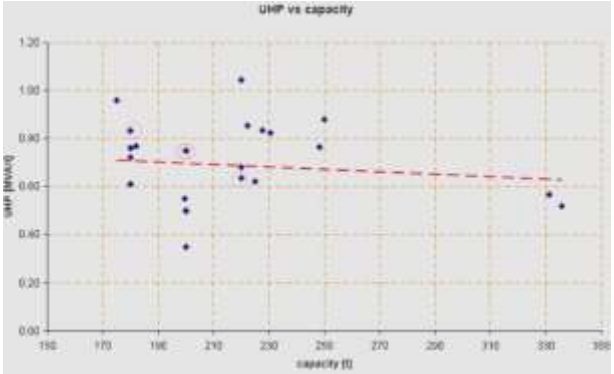
5. Rovnoměrné rozdělení přiváděné energie mezi jednotlivé fáze.

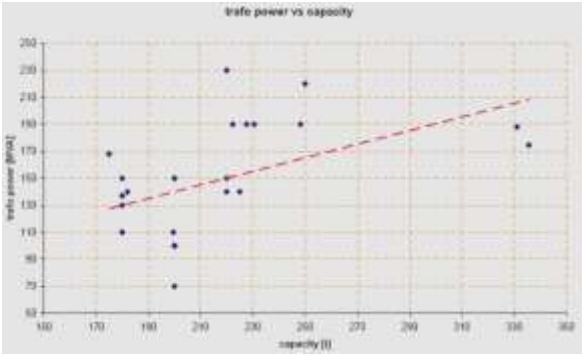
„Ultra High Chemical Power“ pece

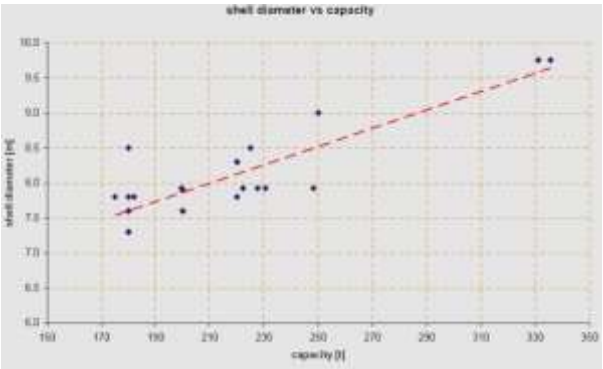
V posledních létech se začínají konstruovat a prosazovat tzv. UHCP-Ultra High Chemical Power pece tzn. pece velmi vysoké výrobnosti s vysokou vkládanou chemickou energií. Hmotnost tavby u těchto pecí dosahuje až 300 t, průměr nístěje až 9 m, jejich výrobnost může značně přesahovat 2 mil. tun·rok^{-1}, doba tavby podle použité technologie od 30 do 45 minut.

Vývoj a technické parametry nově konstruovaných EOP







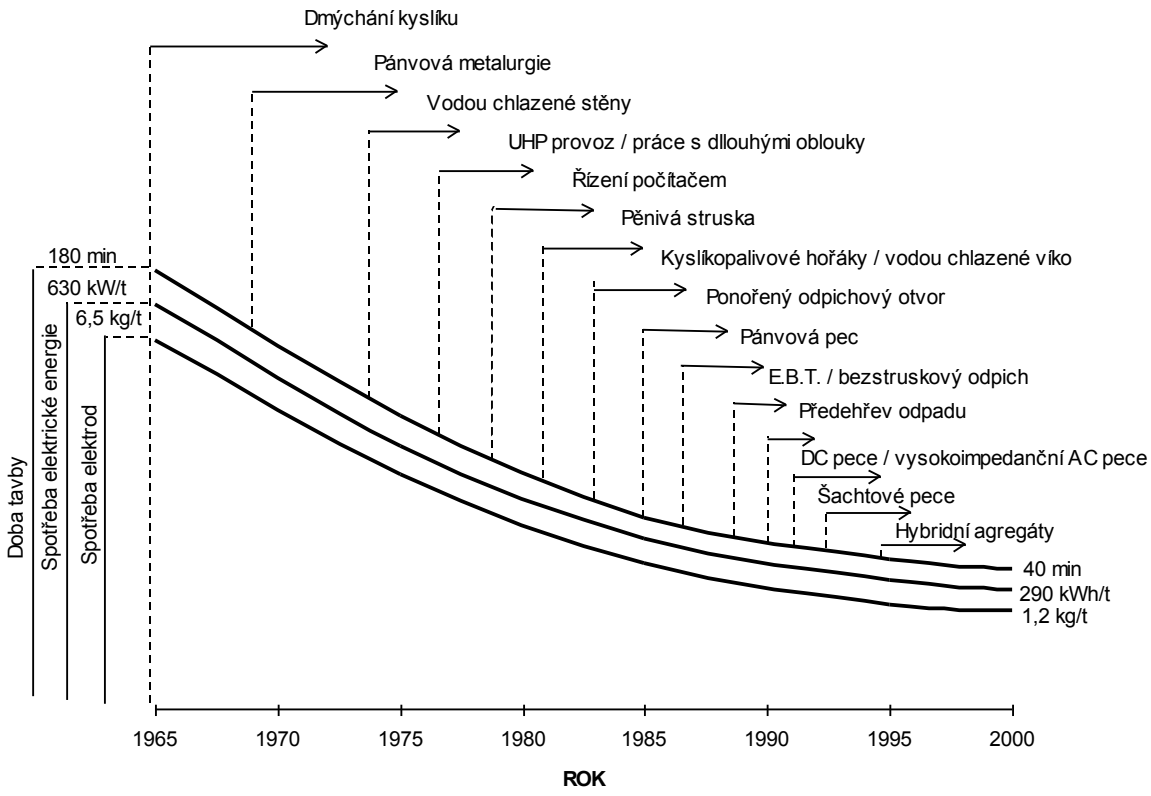


Otázky k probranému učivu

1. Elektrický a tepelný režim práce elektrické obloukové pece – jak lze ovlivnit užitečný příkon vnášený do EOP.
2. Náhradní schéma jedné fáze EOP.
3. Jak lze provádět změnu výkonu uvolňovaného na obloucích.
4. Sdružená pracovní charakteristika EOP – konstrukce.
5. Práce EOP na vzestupné a sestupné větvi charakteristiky, výhody a nevýhody.
6. Měrná spotřeba elektrické energie při tavení v EOP.
7. Dynamické a fyzikálně chemické účinky oblouků v EOP.
8. UHP a SUHP pece, podmínky začlenění EOP mezi UHP pece, UHCP pece.

TÉMATICKÝ BLOK 4

Vývoj technologie výroby oceli v obloukových pecích – intenzifikace tavby



- teoretická spotřeba elektrické energie na roztavení 1 t oceli - 380 kWh·t^{-1}
- skutečná spotřeba - cca 450 až 600 kWh·t^{-1} (přehřátí na teplotu 1600°C, rafinace oceli)
- provozní spotřeby pod tyto hodnoty indikují použití i další energie (kromě elektrické) pro ohřev a tavení vsázky.

Další zdroje tepla v EOP

Tepelný efekt exotermických reakcí

- reakce mezi jednotlivými složkami lázně
- reakce mezi složkami a rafinačním médiem (plynný kyslík)
- reakce při oxidaci pomocných paliv

Použití plynného kyslíku v podmínkách EOP

1. **Natavovací trysky** – „řezání“ větších kusů vsázky

2. **Zkujňovací kyslíkové trysky** – oxidace doprovodných prvků a oxidace C nad rámec uhlíkové reakce (nauhličení lázně), přechod tepla do lázně (téměř 100 %), vznik CO (dospalování)

Tepelný efekt při oxidaci prvků lázně (1 kWh=3600 kJ)

Reakce	-ΔH ; kWh·kg^{-1} Me	-ΔH ; kWh·m^{-3} O_2
$2\ Al + 1{,}5\ O_2 = Al_2O_3$	**8,61**	**13,86**
$Si + O_2 = SiO_2$	**8,70**	**10,92**
$Mn + 0{,}5\ O_2 = MnO$	**1,95**	**9,56**
$2\ Cr + 1{,}5\ O_2 = Cr_2O_3$	**3,05**	**9,44**
$Fe + 0{,}5\ O_2 = FeO$	**1,32**	**6,58**
$C + 0{,}5\ O_2 = CO$	**2,55**	**2,73**
$C + O_2 = CO_2$	**9,10**	**4,88**
$CO + 0{,}5\ O_2 = CO_2$	**2,81**	**7,02**

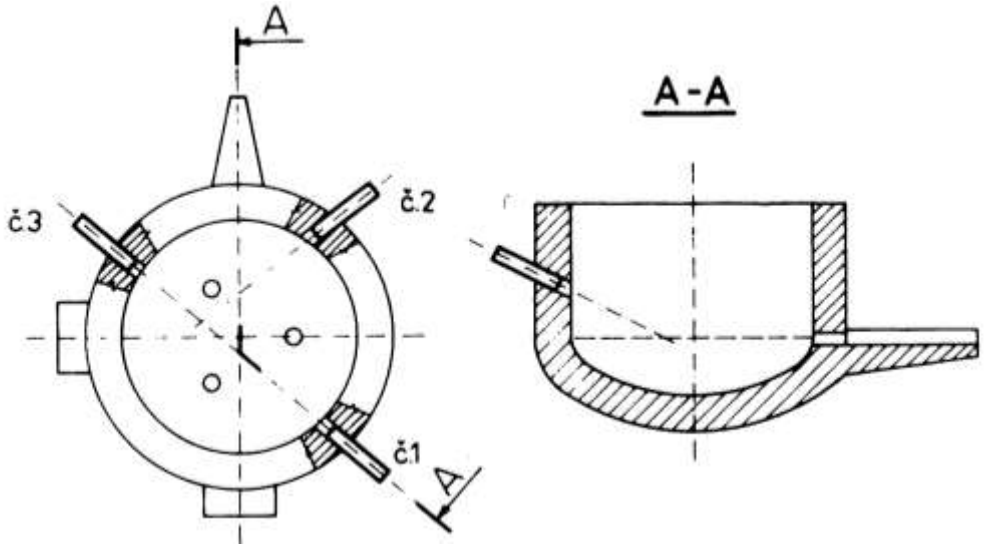
Skutečné hodnoty tepelného efektu dosahované při tavbách v EOP se pohybují v rozmezí 2 až 4,5 kWh.m^{-3} O_2

Předností průběhu exotermických reakcí v tavenině:

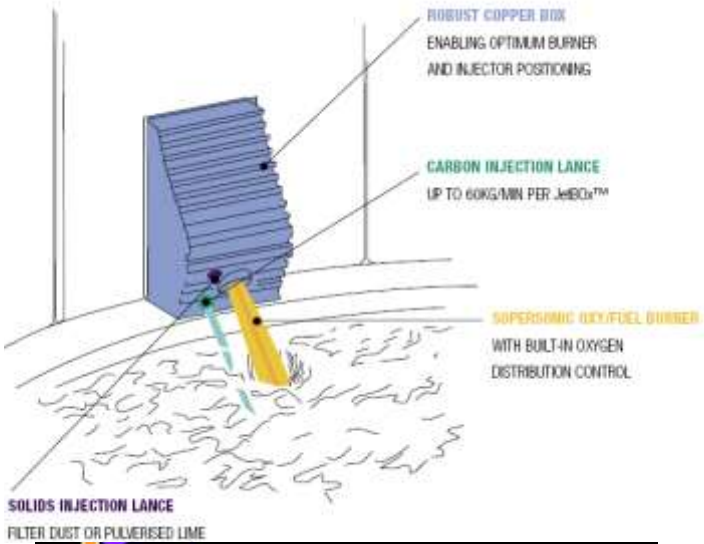
- vznikající teplo prakticky zcela *přechází do vsázky (taveniny)*
- vzniká velké množství oxidu uhelnatého, což představuje dodatečný a z hlediska potenciálního tepelného efektu ještě významnější zdroj energie (tepelný efekt reakce zoxidování uhlíku až do stádia vzniku CO_2 je trojnásobný v porovnání s oxidací pouze na CO).

3. **Kyslíkopalivové hořáky** - zemní plyn+kyslík (1:2), teplota plamene až 2800 °C, výkon 2 až 4 MW (10 MW), využití tepla v průběhu tavby klesá z 80 až na cca 30 %. Výrobci hořáků: např. Air Products, Linde.

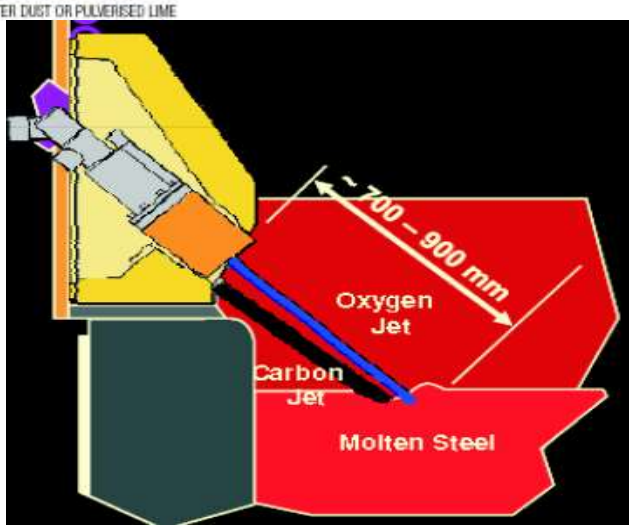
Provedení: mobilní dveřní hořáky, stěnové hořáky (obvykle 3)



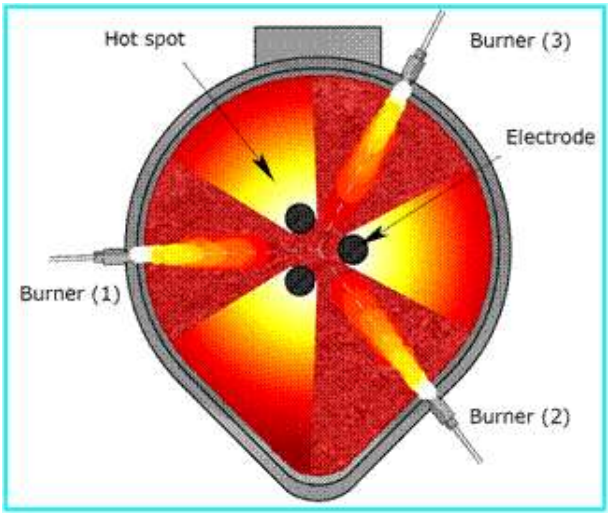
Zkouška dveřního kyslíko - palivového hořáku mimo vlastní pec

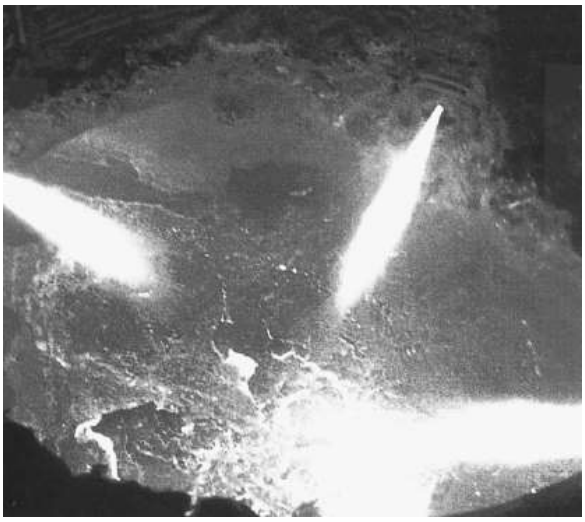


Kyslíkopalivový hořák JetBOx (Air Products) s přívodem práškových uhlíkatých látek



Kyslíkopalivový hořák JetBOx (Air Products) s přívodem práškových uhlíkatých látek





4. Dospalovací trysky – dospalování CO, který vzniká při uhlíkové reakci a spalování doplňkových např. fosilních paliv

- Teoretický limit tepelného efektu při dospalování CO na CO_2 je 7,02 $kWh \cdot N^{-1} \cdot m^{-3}$ kyslíku (při teplotě 1600 °C).
- Úspora elektrické energie může dosahovat až **72 $kWh \cdot t^{-1}$ oceli.**

Technické údaje použití kyslíku a paliv v podmínkách intenzifikovaných EOP

Spotřeba kyslíku: 5 až 30 $m^3 \cdot t^{-1}$ (výhled až 60 $m^3 \cdot t^{-1}$), přičemž 1 m^3 kyslíku/1 t oceli nahrazuje až 5 kWh elektrické energie/1 t oceli.
Spotřeba zemního plynu: 4 do 8 $m^3 \cdot t^{-1}$, přičemž 1 m^3 plynu/1 t oceli nahrazuje cca 8 kWh elektrické energie /1 t oceli.
Spotřeba nauhličovadla: 0÷14 $kg \cdot t^{-1}$.

<u>Energetická bilance moderní obloukové pece</u> (vztaženo na 1 t tekuté oceli):

Vstup		**Výstup**	
Elektrická energie	420 kWh (65 %)	Tekutá ocel	**380** kWh (60 %)
Chem. energie - hořáky	30 kWh (5 %)	Plynné zplodiny	125 kWh (20 %)
Další chem. energie	190 kWh (30 %)	Chladící voda	60 kWh (9 %)
		Struska	60 kWh (9 %)
		Další ztráty	15 kWh (3 %)
Celkem	**640 kWh** (100 %)	**Celkem**	**640 kWh (100 %)**

Problematika čistoty plynného kyslíku používaného v EOP

- Snahou při výrobě oceli je primárně zabránit během celého technologického cyklu potenciálním možnostem „přísunu“ dusíku (a rovněž tak vodíku) ke kovové lázni.
- „***Air-tight***“ *EOP* zabezpečují určitou těsnost celé konstrukce a zabránění přístupu venkovní atmosféry (vysoký parciální tlak dusíku a s nezanedbatelným obsahem vzdušné vlhkosti). Pomocí této technologie a dalších opatření lze v EOP vyrobit „primární“ ocel obsahem dusíku i pod ***40 ppm***.
- Výrazným zdrojem dusíku může být i *čistota* použitého plynného kyslíku. U dříve nebo i současných provozovaných (ale dříve konstruovaných) EOP se používal kyslík s čistotou cca ***90 %***.
- Při dmýchání kyslíku této čistoty je do pracovního prostoru pece vnášeno velké množství dusíku, což vede k tomu, že se zvyšuje jeho ***parciální tlak*** v pracovním

prostoru pece a rovněž i ve vzniklé struskové emulzi a tedy i podmínky pro jeho přechod do oceli.

- Existence vysokoteplotních zdrojů v podobě elektrických oblouků - dochází zde velmi snadno k ***disociaci*** *a* ***ionizaci*** molekul a atomů. Lze očekávat potenciálně vyšší nebezpečí jeho přechodu do kovové lázně a tedy zvyšování jeho obsahu v tekuté oceli, a to i přesto, že v podmínkách EOP existuje poměrně účinný způsob odstraňování dusíku oceli v důsledku průběhu uhlíkové reakce.
- Současné a zejména budoucí požadavky na čistotu plynného kyslíku používaného pro dmýchání do EOP se přibližují nebo jsou prakticky totožné s požadavky na čistotu kyslíku dmýchaného do kyslíkového konvertoru. Řada intenzifikovaných pochodů používá kyslík o čistotě **98 % až 99,5 %.**
- Podrobnými zkouškami bylo prokázáno, že určitý mírný *„**pick-up**“* dusíku (cca 3 ppm) z dmýchaného kyslíku lze ještě očekávat i při jeho obsahu 2000 ppm (0,2 %) v plynném kyslíku. Při vyšších obsazích bude samozřejmě tento *„pick-up“* mnohem výraznější.
- Druhým aspektem, který podporuje nutnost použití plynného kyslíku s vysokou čistotou pro intenzifikaci tavby v UHP EOP je aspekt *ekologický*. Se zvyšováním obsahu dusíku v plynném kyslíku roste potenciální možnost vzniku velmi škodlivých oxidů typu *NOx.*

Napěňovací trysky

Dmýchání kyslíku + rozemleté uhlíkaté látky (koks, uhlí) do strusky

Reakce uhlíku a dmýchaného kyslíku ve strusce s tvorbou bublinek CO, způsobujících napěnění strusky. Možný průběh reakce uhlíku s oxidy železa ve strusce.

Vznik bublinek CO, tvorba pěnivé strusky – stínění dlouhých oblouků.

Přínosy použití pěnivé strusky:

- snižuje se spotřeba vyzdívky a elektrod
- zmenšují se tepelné ztráty stěnami pece
- lepší přestup tepla z oblouku do lázně
- snižuje se hlučnost pece – oblouk je zastíněn

Na pěnivost strusky působí pozitivně

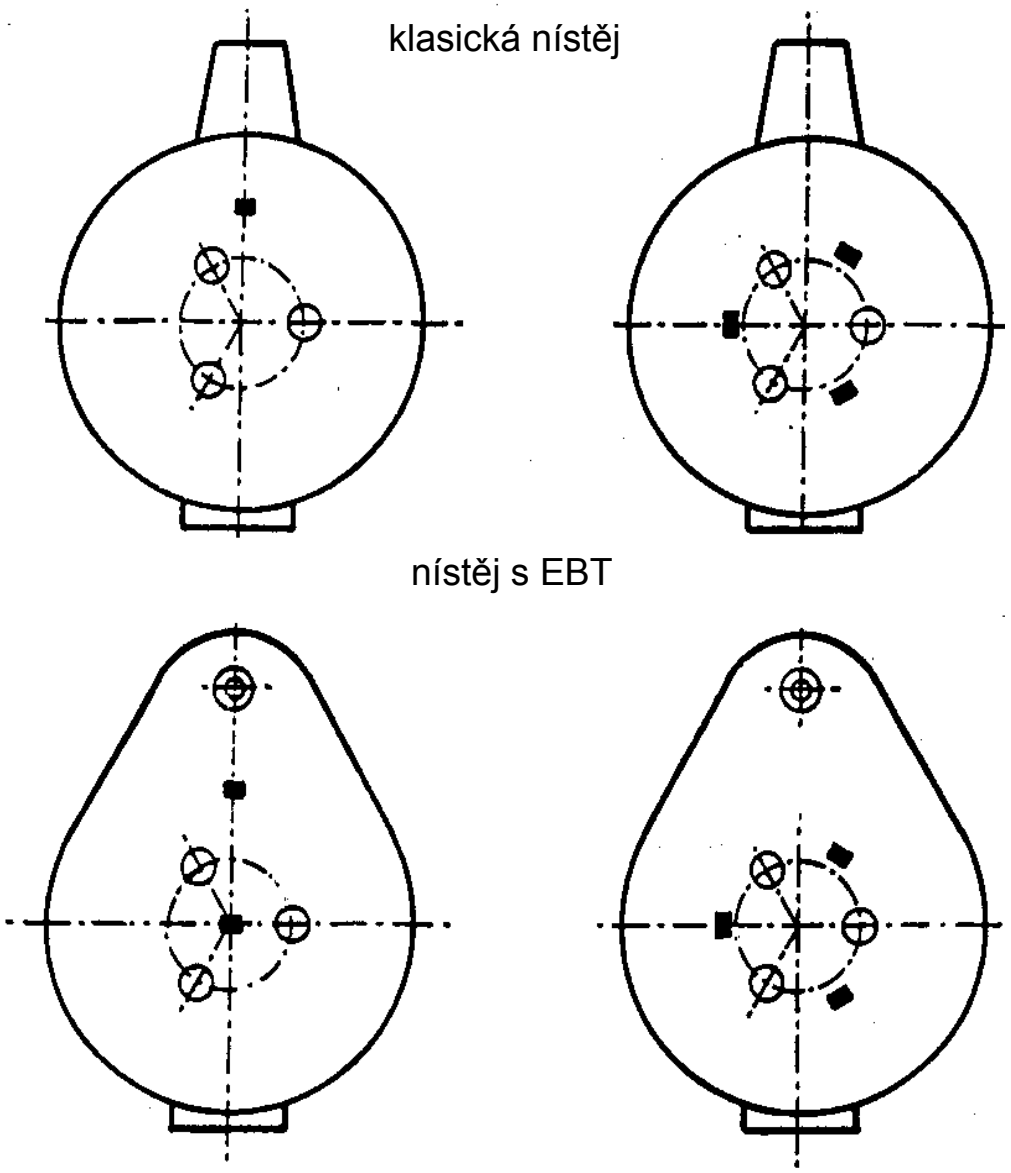
- její zvýšená viskozita (menší tekutost) – stabilizuje pěnu
- snížené povrchové napětí – snižuje se energie nutná k vytvoření bublin
- vyšší bazicita strusky než 2,5
- obsah FeO v rozmezí 15 až 20 %, který udržuje reakci C s FeO

Nevýhoda - vznik velkého množství CO v prostoru pece (tepelné ztráty)

Dmýchání inertního plynu dnem EOP (EAF Bottom Stirring with Inert Gas)

Intenzifikace tavení - teplotní a koncentrační homogenizace lázně, lepší průběh fyzikálně-chemických reakcí

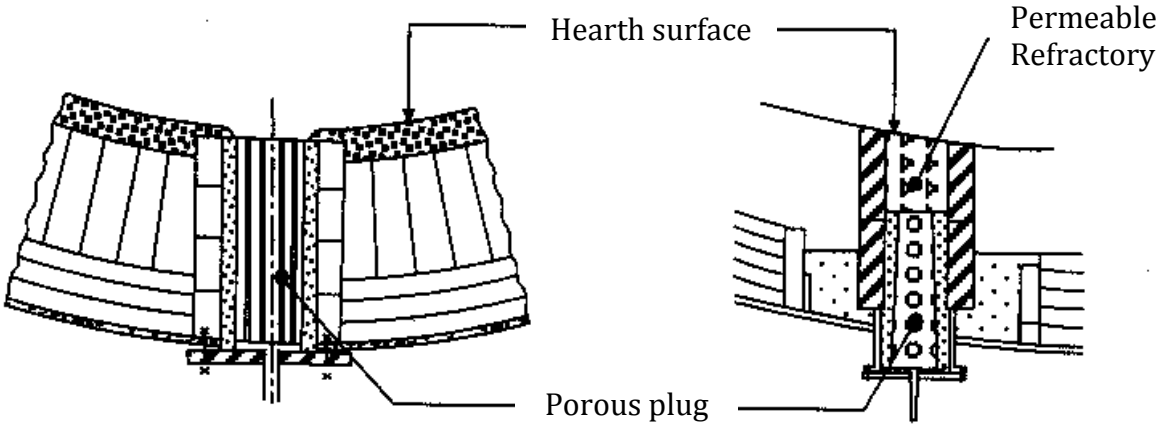
Základní způsoby umístění dmýchacích tvárnic ve dně EOP



Základní provedení dmýchacích tvárnic ve dně EOP

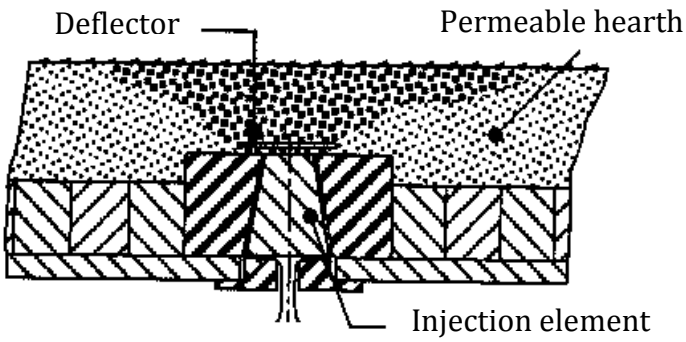
- **jednootvorová tryska** – nevýhodou je „zatékání“ tekutého kovu, trysky musí být pořád pod přetlakem plynu
- **víceotvorová (např. štěrbinová) tvárnice** – usměrněná porezita (DPP - directional porezity plug)
- **porézní tvárnice** – neusměrněná porezita, možnost přerušení dmýchání

Objemové průtoky: 50 až 80 $l \cdot min^{-1}$ (na 1 dmýchací tvárnici)



(a) Radex DPP (contact)

(b) EF-KOA (non-contact)



Metalurgické a ekonomické účinky použití dmýchacích tvárnic ve dně EOP

1. snížení obsahu železa ve strusce o průměrně 4 %
2. lázeň je blíže rovnovážného stavu C-O; nejsou pozorovány tzv. závary
3. nižší obsah uhlíku na konci rafinační fáze (oxidace) – 0,02 %
4. menší ztráty manganu ve strusce (následek nižšího obsahu železa ve strusce), vyšší výtěžky legur
5. dosažení nižších obsahů fosforu, síry a dusíku v oceli (o 20 ppm N)
6. zlepšená teplotní homogenita lázně
7. nižší spotřeba elektrické energie o 10 až 20 $kWh \cdot t^{-1}$ v důsledku rychlejšího tavení odpadu a menších ztrát radiací
8. zkrácení doby tavby průměrně o 2,5 až 5 minut

Výrobnost EOP

Výrobnost EOP je uváděná obvykle v tunách vyrobené oceli za 24 hodin a je jedním ze základních výrobních parametrů EOP.

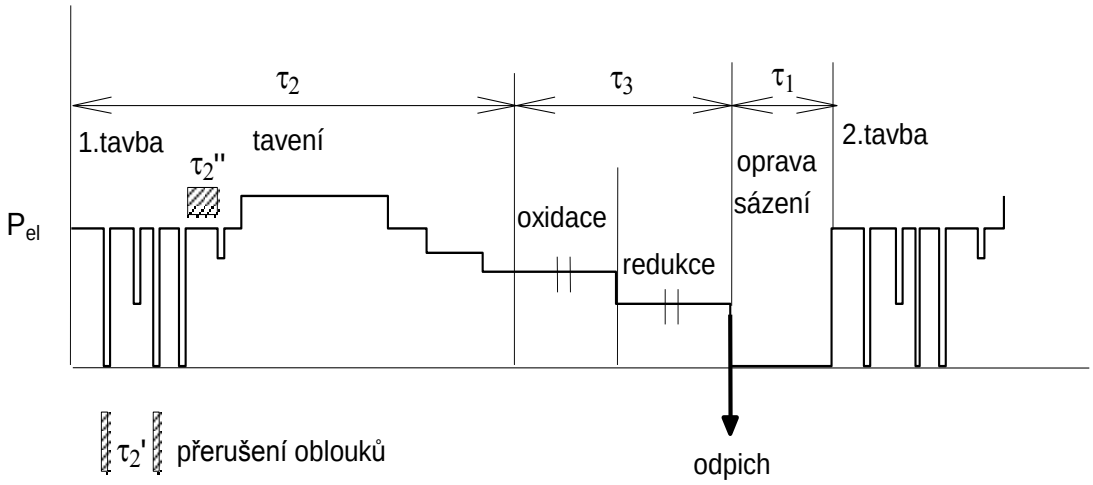
Výrobnost EOP je dána vztahem:

$$G = g_o \cdot n = g_o \cdot \frac{24}{\tau_{celk}} = \frac{24 \cdot g_o}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}$$

kde:

- G - výrobnost pece; *t/24 h*
- g_o - hmotnost tavby; t
- n - počet taveb vyrobených za 24 hodin
- τ_{celk} - celkový čas trvání tavby; *h*
- τ_1 - délka časového intervalu od vypnutí pece při odpichu do zapnutí pece při následující tavbě; *h*
- τ_2 - délka údobí tavení
  přičemž $\tau_2 = \tau'_2 + \tau''_2$
- τ'_2 - součet dob, ve kterých je oblouk přerušen
- τ''_2 - součet dob, ve kterých oblouk hoří
- τ_3 - délka údobí dohotovení tavby

Rozložení výkonu v jednotlivých fázích tavby v EOP



τ_1

V údobí τ_1 není transformátor zatížen - je vypnutý. Délka trvání tohoto intervalu závisí na organizaci práce, náročnosti a rozsahu (resp. délce) mezitavbových oprav, vývoji zakázek apod.

τ'_2

Přerušení oblouků v údobí tavení je vždy nežádoucí a je způsobeno různými faktory. Nejčastěji to bývá špatně uspořádaná vsázka, která se může sesypávat na elektrody s následným vznikem zkratů apod. K potlačení zhasínání oblouků je vhodné během tavení zařadit do obvodu tlumivku (snížení $cos\varphi$). Přerušování hoření oblouků souvisí i s možnostmi transformátoru, který neumožňuje přepínat během zátěže na jiný napěťový stupeň. Hodnota τ'_2 je ovlivněna i dokonalosti elektrického a mechanického vybavení pece (parametry regulace elektrod apod.).

τ''_2

Zkrácení doby, ve které oblouk hoří je možné jen za předpokladu další intenzifikace tavení - je funkcí $P_{už}$, který je závislý na příkonu přivedeném do EOP (UHP pece, kyslíkopalivové hořáky ad.) a na výkonu odvedeném (zejména tepelné ztráty - dokonalá izolace pláště pece). Některé konstrukce pece využívají vodního chlazení pomocí velkoplošných chladičů (tedy větší odvod tepla - ztráty). V tomto případě musí být vytvořeny předpoklady pro zvýšení P_{el} (činného příkonu elektrickou energií) nebo P_{ex} (příkonu exotermickými reakcemi), tak aby došlo ke zkrácení τ''_2.

τ_3

V údobí dohotovení není transformátor plně využíván. Délka trvání tohoto údobí je dána zejména používanou technologií - výrobním programem, vybavením pece, rozsahem mimopecního zpracování oceli na ocelárně apod.

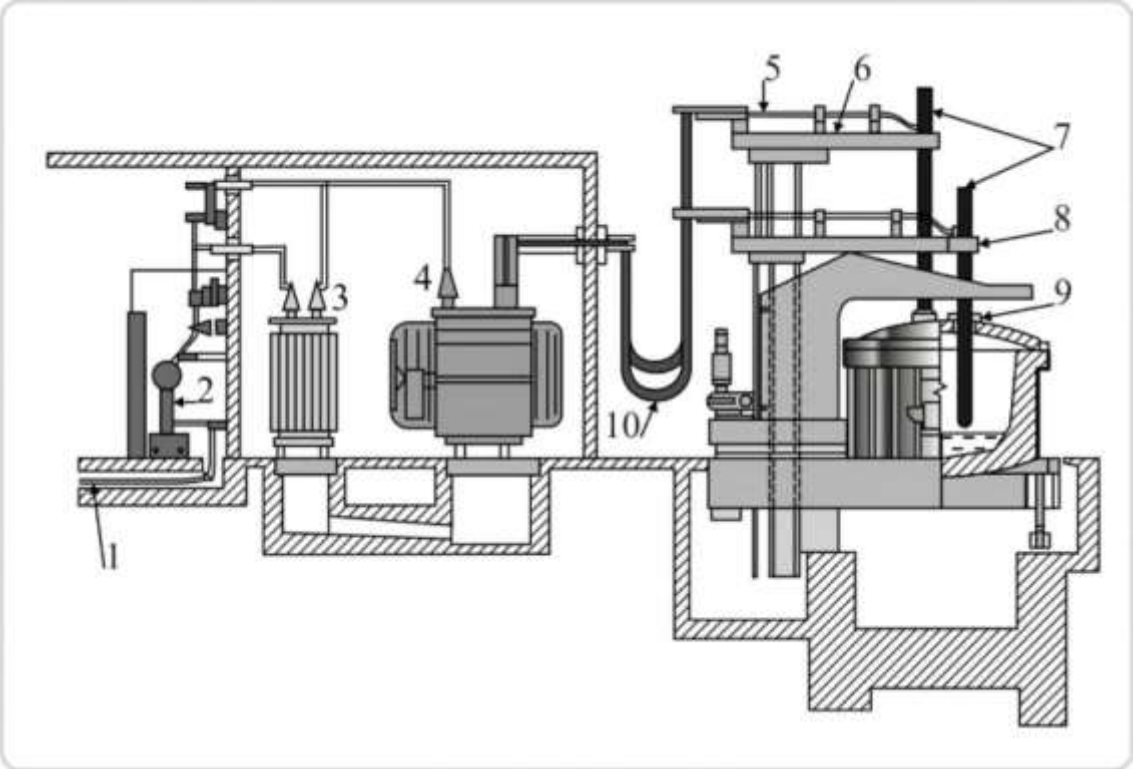
Otázky k probranému učivu

1. Další zdroje tepla při tavbě v EOP, intenzifikace tavení.
2. Vývoj a inovační tendence v oblasti tavení v EOP.
3. Použití plynného kyslíku v EOP – natavovací trysky, zkujňovací trysky.
4. Použití plynného kyslíku v EOP – kyslíkopalivové hořáky, dospalování CO.
5. Tepelné efekty exotermických reakcí rozpuštěných prvků s plynným kyslíkem.
6. Napěňovací trysky – význam, konstrukce, přínosy, pěnivost strusky.
7. Dmýchání inertního plynu dnem EOP – význam, konstrukční provedení, metalurgické účinky.
8. Výrobnost EOP – definice vztahu, možností zvýšení výrobnosti EOP.

TÉMATICKÝ BLOK 5

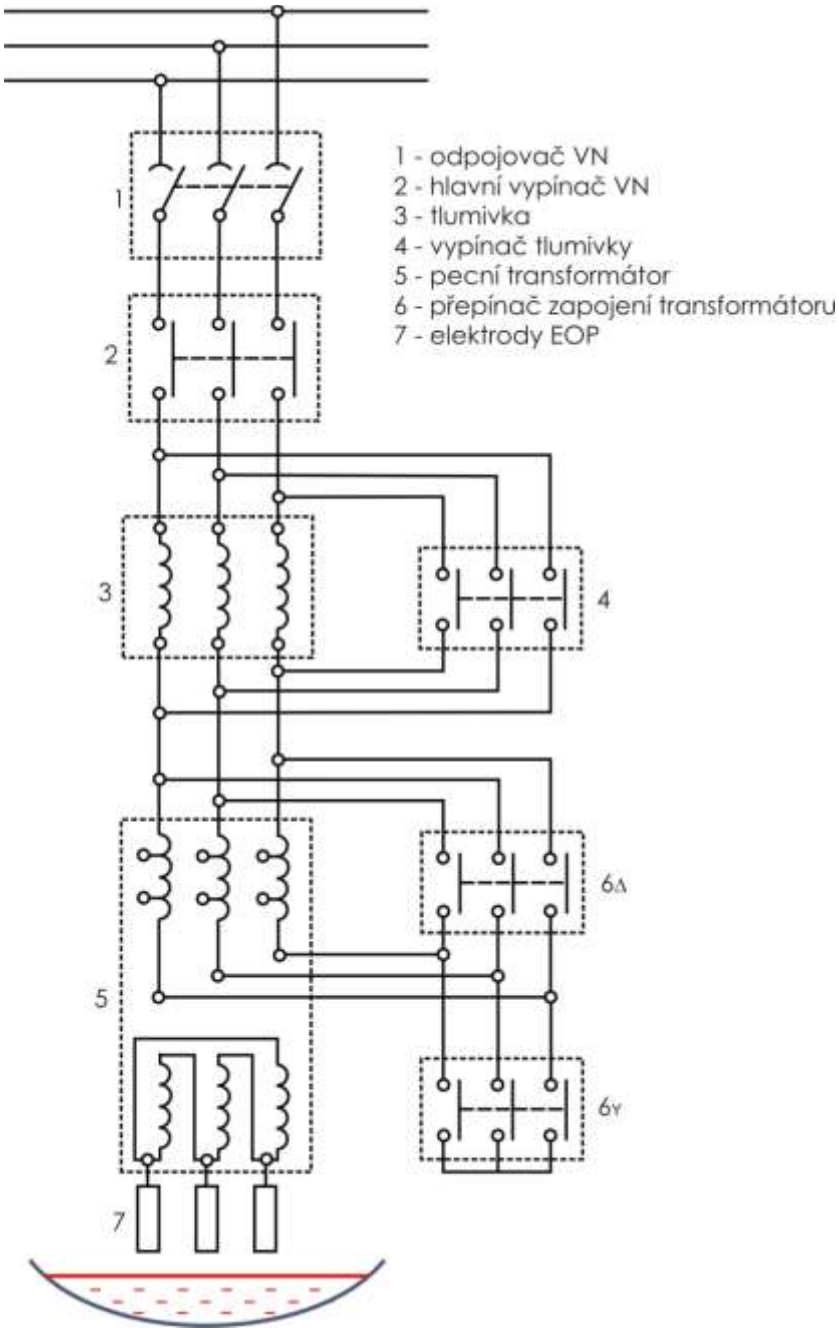
Schéma elektrické obloukové pece

Elektrická oblouková pec je poměrně složitým metalurgickým agregátem, jehož specifická a nejkomplikovanější část souvisí s charakterem dodávání tepla – tedy s elektrickou energií, jejímu rozvodu, transformaci na požadované napětí a udržování elektrických parametrů oblouků, tedy s regulací elektrod. Kromě elektrické části je pak každá EOP vybavena mechanickou částí, která zabezpečuje posun elektrod, posun víka, naklápění pece, sázení pece, atd. a rovněž vybavením pro chlazení pece a odsávání a čištění pecních plynů.

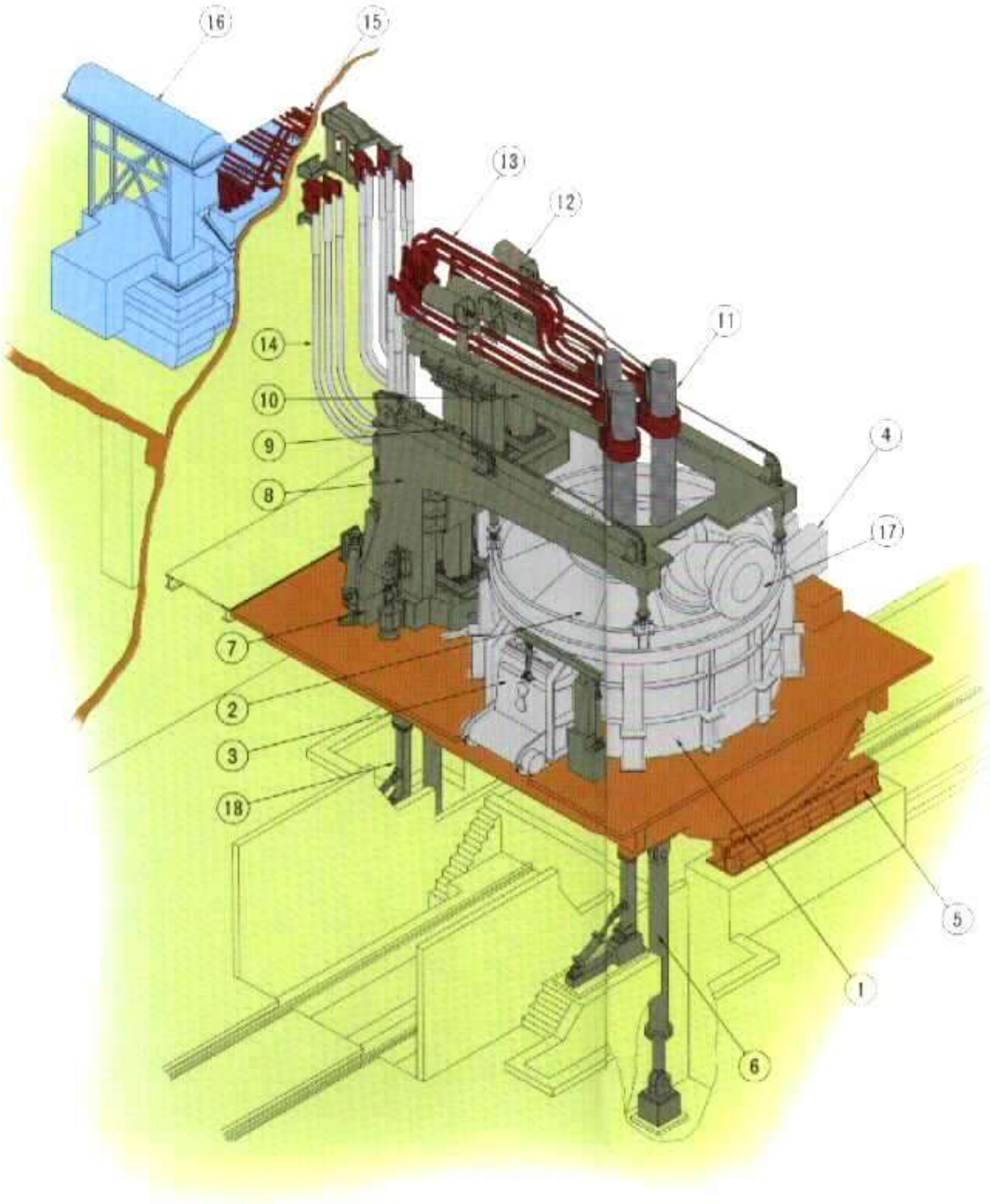


1 – vedení VN
2 – hlavní vypínač
3 – tlumivka
4 – pecní transformátor
5 – pásovina Cu
6 – ramena elektrod
7 – elektrody
8 – držáky elektrod
9 – chladící kroužky
10 – měděná ohebná lana

Elektrické schéma střídavé EOP

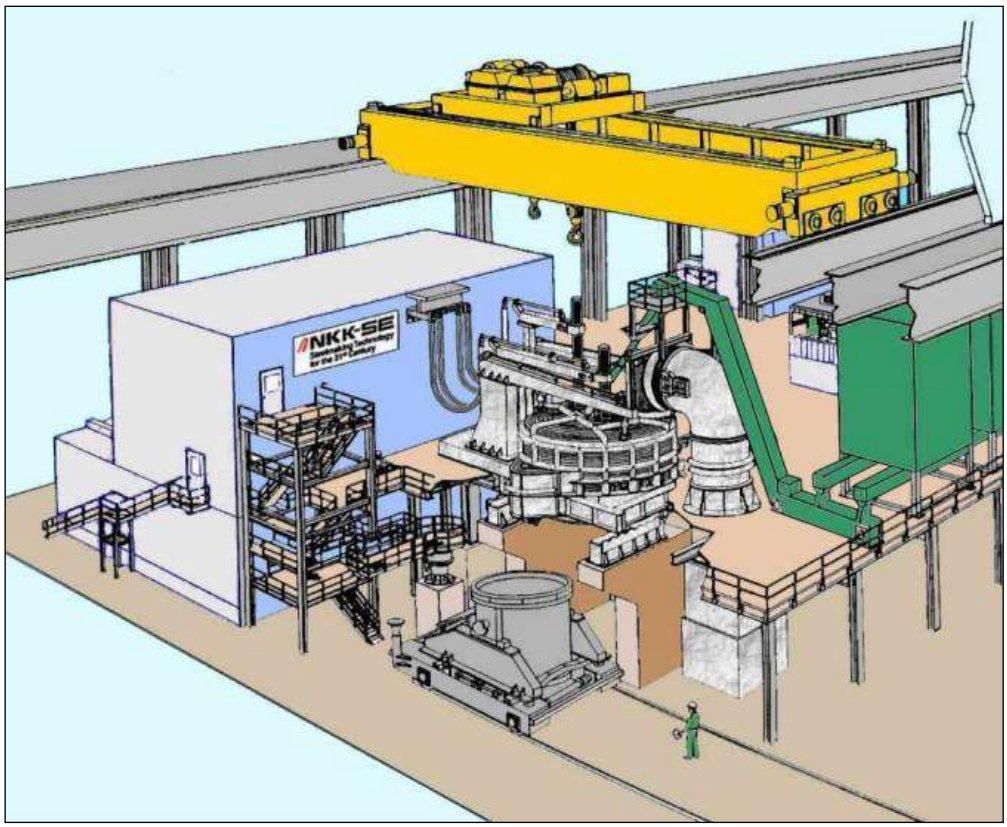


Uspořádání klasické EOP na střídavý proud

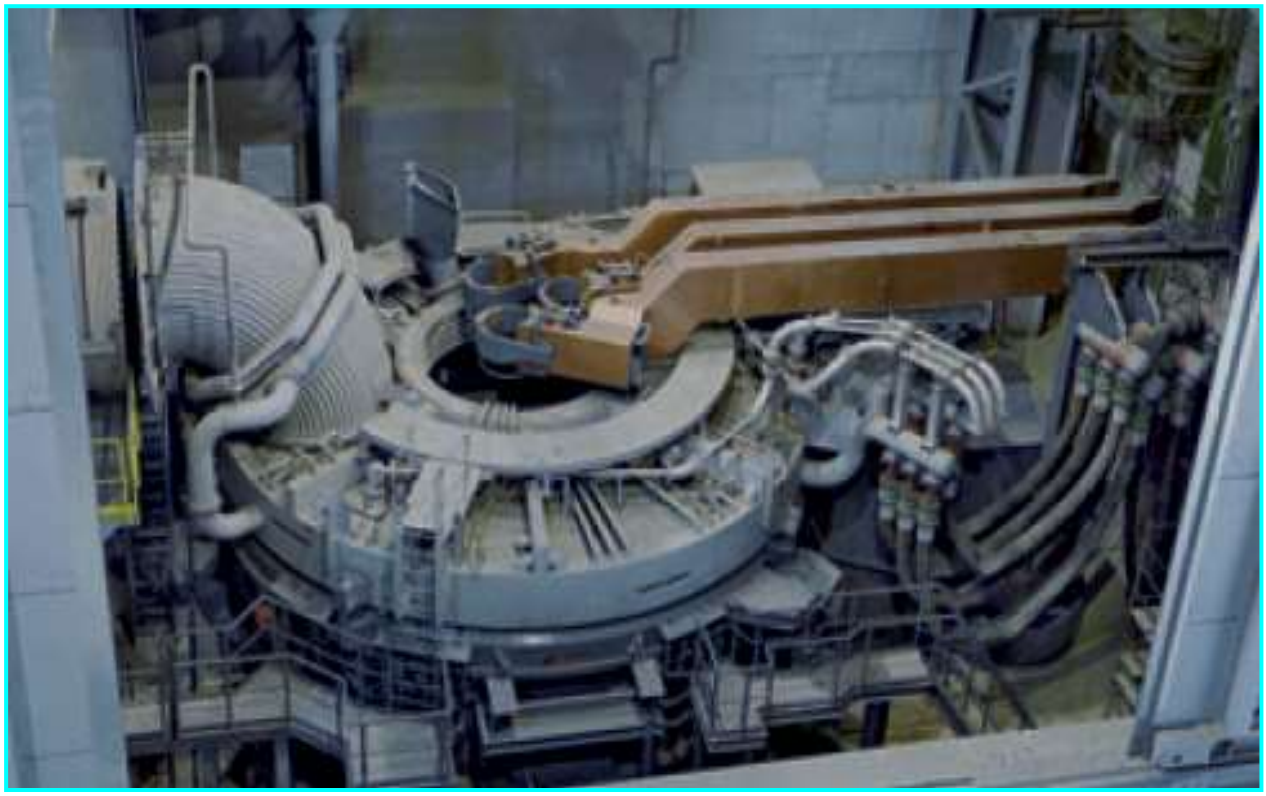


1 - plášť EOP
2 - vodou chlazená klenba EOP
3 - sázecí dvířka
4 - odpichový žlab
5 - naklápění pece
6 - hydraulika naklápění
7 - stojan otočného víka
8 - podpěra
9 - zvedací mechanismus víka
10 - ramena elektrod
11 - elektrody
12 - mechanismus držáků elektrod
13 - vodiče
14 - vodou chlazené kabely
15 - výstup z transformátoru
16 - transformátor
17 - odsávání z EOP

Pohled na halu s instalovanou EOP



Pohled na 180 t EOP fy VAI



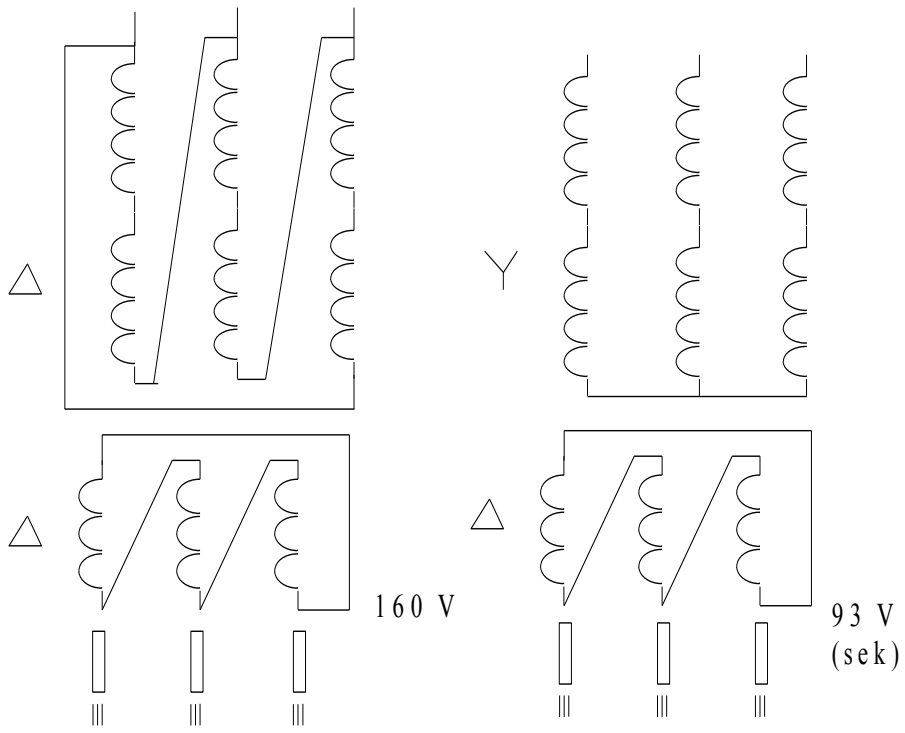
Pecní transformátory EOP

Pecní transformátor snižuje vysoké napětí z elektrorozvodné sítě (6 ÷ 30 kV) na napětí vhodné pro napájení EOP (100 ÷ 1000 V)

Požadavky na pecní transformátory:

- optimální dimenze podle tonáže pece (zdánlivý příkon 0,5 až 1 MVA·t^{-1}, na sek. straně až 120 kA)
- dostatečný počet napěťových stupňů (odbočky, přepínání Y-Δ)
- možnost přepínání pod zátěží (denně až 800 přepnutí)
- odolnost proti zkratovým proudům a přepětí
- odolnost konstrukce proti mechanickým i tepelným účinkům
- induktance všech tří fází musí být shodná

Příklady zapojení transformátoru EOP



- Přepínání napěťových stupňů se provádí na primární straně
- Tavení vsázky probíhá vždy při vyšším napětí (delší oblouk) namáhání vyzdívky je přitom větší (částečně vyzdívku chrání vsázka). V údobí dohotovení se přepíná na nižší sekundární napětí (kratší oblouky - snížení tepelného namáhání vyzdívky (ale zhoršení *cos φ*)).

Pecní transformátory EOP fy ABB

Tlumivka EOP

Tlumivka vyrovnává (zmírňuje, omezuje) prudké změny proudů v elektrickém obvodu EOP, které vznikají např. při zapnutí/vypnutí obvodu, zkratech ap. Změny v elektrickém obvodu vyvolávají změnu magnetického pole kolem cívky a následně se v cívce indukuje elektromotorické napětí působící vždy proti změnám, které je vyvolaly.

Zařazuje se do série s primární stranou pecního transformátoru.

Funkce při tavbě v EOP:

- *tlumí proudové nárazy* při natavování tuhé kovové vsázky
- chrání transformátor před *zkratovými proudy*
- stabilizuje *hoření oblouků*
- *zvyšuje induktanci* (induktivní odpor) elektrického obvodu EOP

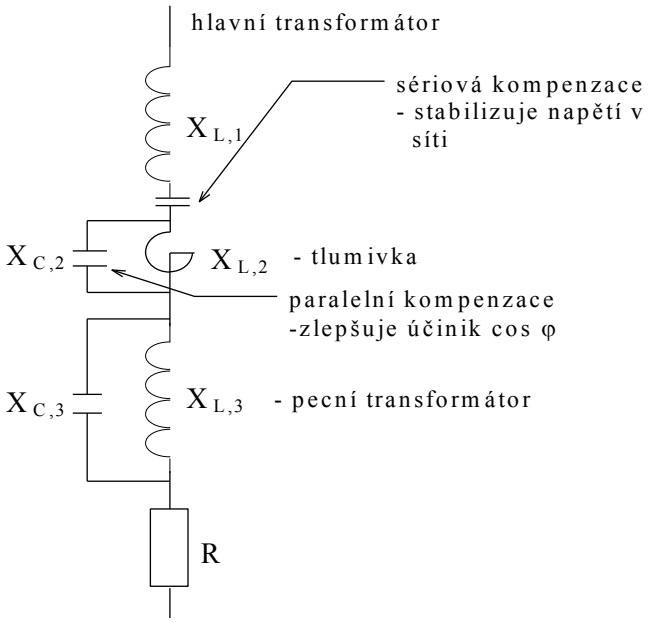
Konstrukce - obdobná jako u transformátoru, tlumivka má však jedno vinutí; magnetický obvod není „uzavřen“ - zvýšení rozptylu magnetického toku – zvýšení indukčnosti. Má minimální ohmický odpor.

Kompenzace účiníku pomocí tlumivky

Tlumivky následkem svého induktivního odporu **snižují *cos φ* sítě - účiník**.

U UHP pecí se v údobí nekrytého hoření oblouků může *cos φ* snížit až na hodnotu 0,71-0,68, což snižuje činný výkon uvolňovaný na obloucích a rovněž snižuje účiník v elektrorozvodné síti. Proto je nutno účiník *kompenzovat* a to tím způsobem, že fázový posuv způsobený indukčností se kompenzuje fázovým posuvem v důsledku vložených kapacit kondenzátorů.

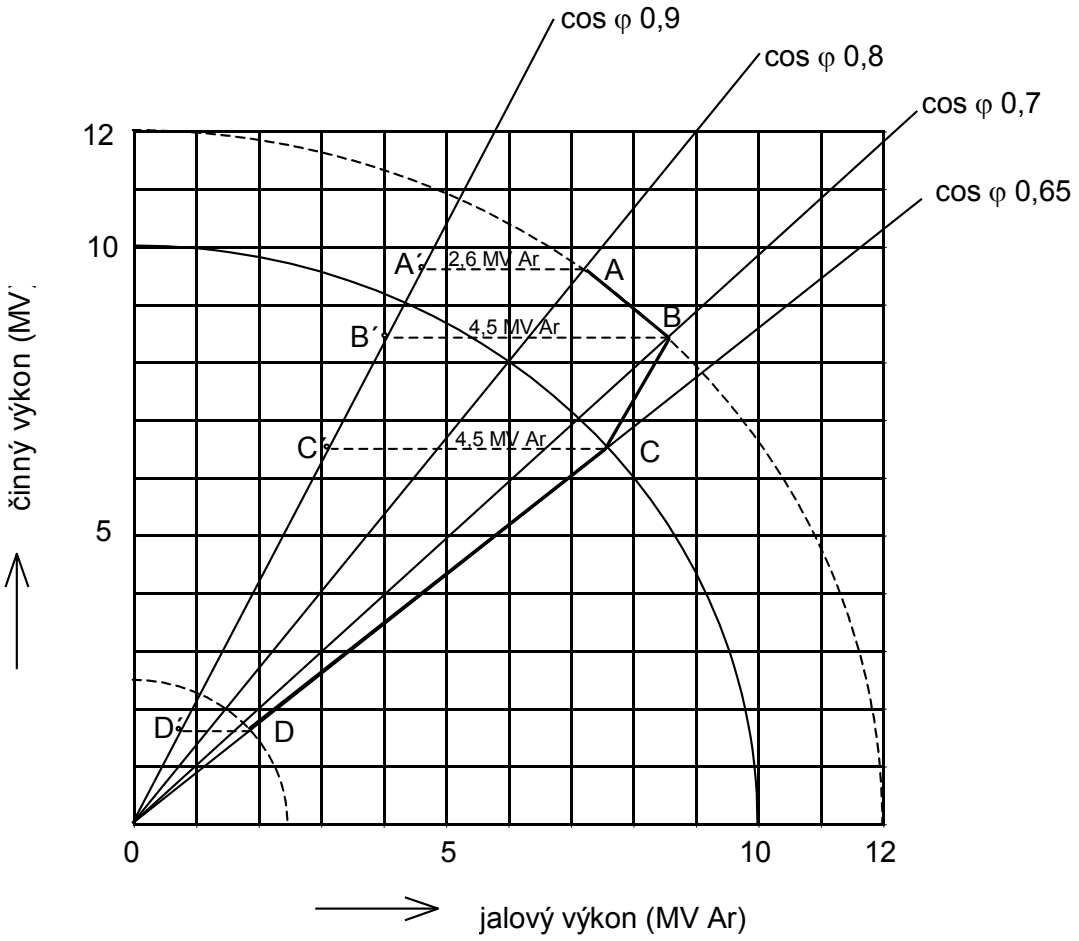
Realizace: použití kondenzátorových baterií, které se spínají podle potřeby pomocí tyristorů tak, aby se dosáhlo požadovaného *cos φ*.



Další úkoly kompenzace:

- vyrovnává asymetrické zatížení sítě v údobí, kdy po krátkou dobu hoří pouze dva oblouky, což běžně vzniká v případě sjíždění elektrod a dotyku se vsázkou.
- zajišťuje i filtraci vyšších harmonických kmitočtů, které vznikají v důsledku rozdílů napětí na oblouku a napájecího napětí, a které by do napájecí sítě vnášely jalovou složku.
- potlačuje kolísání napětí v elektrorozvodné síti, které se projevuje nepříjemným blikáním světla s frekvencí 3–7 (20) Hz. Jedná se o tzv. „flicker“ efekt, který vzniká v důsledku nerovnoměrného odběru proudu a zkratů během natavování vsázky v obloukové peci.

Nomogram pro základní výpočet kompenzace jalového výkonu



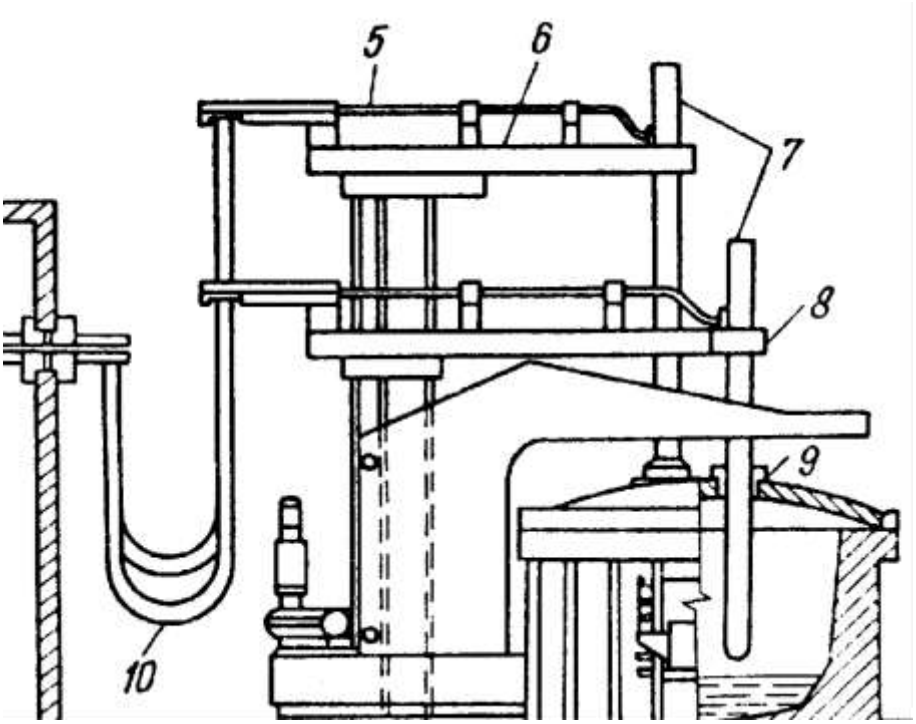
Natavování vsázky: ke zvýšení účiníku z 0,7 resp. 0,8 na **0,9**, je třeba kompenzovat jalovou energii 2,6 až 4,5 MVAr (A-A´, B-B´).

Oxidační údobí tavby: pracuje se s nižším výkonem transformátoru a s horším účiníkem (bod C), pro dosažení cos φ=0,90 je nutno kompenzovat 4,5 MVAr (C-C´).

Dokončování tavby: transformátor zatížen pouze na 25 % (bod D) s účiníkem 0,65, takže je nutno kompenzovat 1,2 MVAr (D-D´).

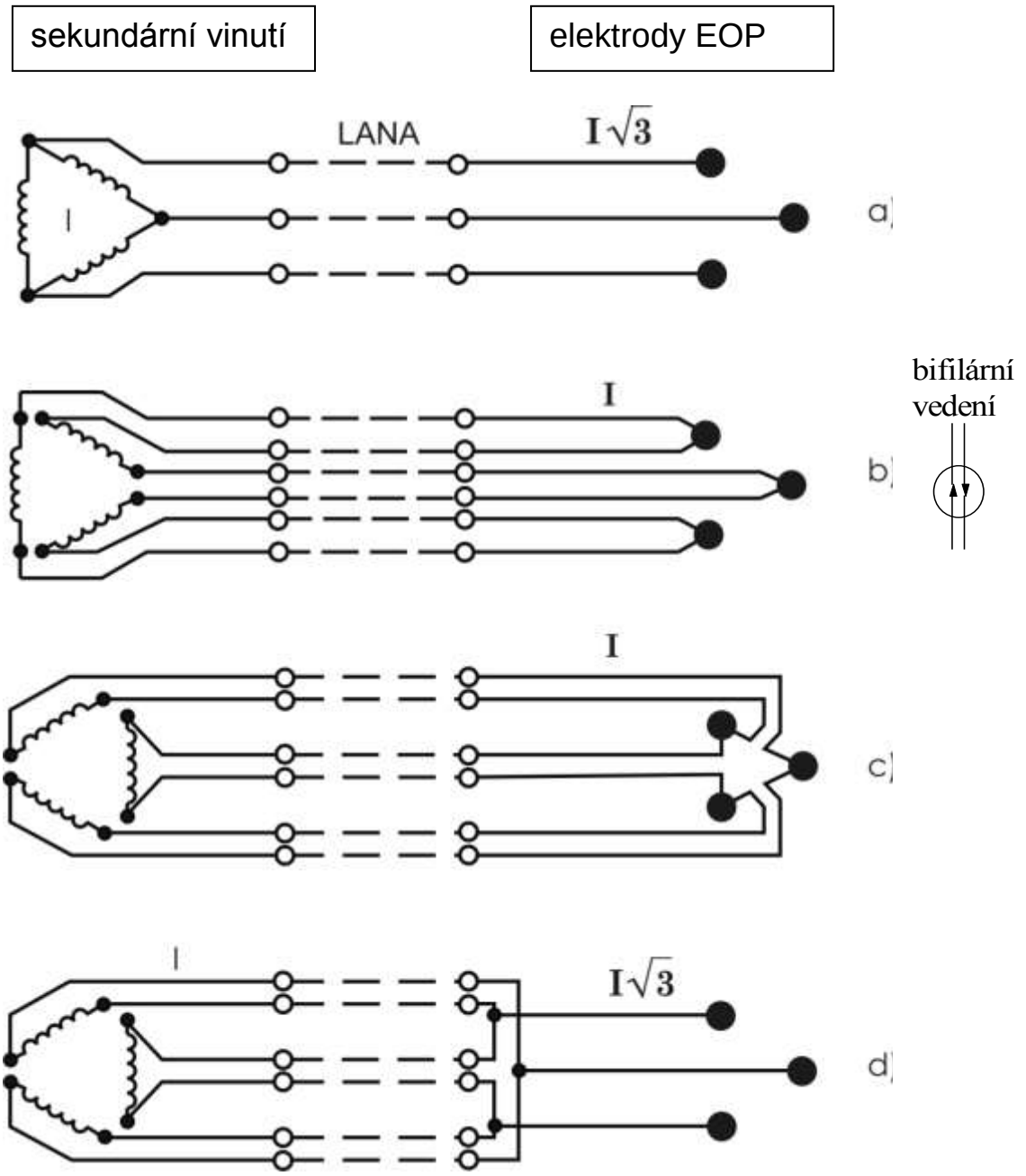
Krátká síť EOP

Elektrické vedení mezi výstupy na sekundární straně transformátoru až po pracovní prostor pece - měděné pásnice, ohebná lana, vodiče na ramenech držáků elektrod, držáky elektrod, elektrody včetně spojníků.



- Vedení má být co nejkratší – proto „krátká síť“.
- Minimalizace přechodových odporů - extrémní proudy – $n \cdot 10^4$ A, ztrátový výkon $\mathbf{P = R \cdot I^2}$ **.**
- Všechny tři přívody by z hlediska elektrických parametrů měly být naprosto stejné.
- Vznik střídavého elektromagnetické pole kolem krátké sítě – vliv na induktanci jednotlivých fází (a následně na reaktanci a výslednou impedanci)
- Odlišná reaktance způsobuje i rozdílný přenos energie přes jednotlivé fáze - vznik tzv. *ostré (wild) a tupé (cold)* fáze.
- Při uspořádání vývodů v rovině - střední fáze má největší výkon.
- *Symetrizace* přívodů - vedení fází uspořádáno do rovnostranného trojúhelníku.
- *Bifilární vedení* od transformátoru k elektrodám - reaktance krátké sítě v jednotlivých skupinách vodičů se kompenzují protichůdnými složkami proudu.

Různá zapojení vedení od transformátoru k elektrodám

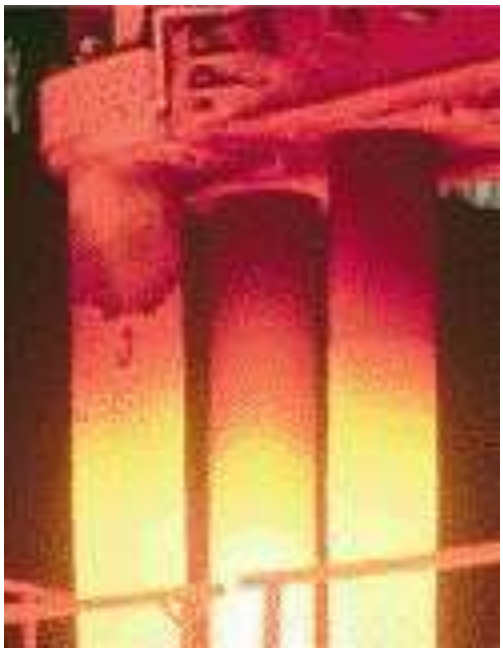


a) spojení vinutí v transformátoru nebo na víku transformátoru

b) c) spojení až na elektrodách – bifilární vedení

d) spojení za ohebnými lany

Elektrody EOP

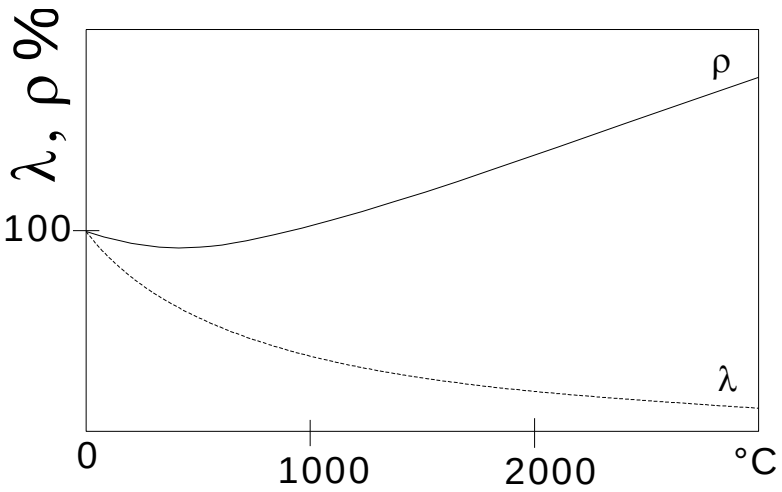


Cena elektrod - cca 40.000 Kč/1t pro RP a HP, až 100.000 Kč/1t pro UHP
Na EOP se většinou používají grafitové elektrody.

Požadavky na grafitové elektrody:

1. Nízký *měrný elektrický odpor* ρ - 8 až 12 $\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$, po průřezu elektrody není konstantní. Jádro elektrody, které je hůře grafitizované, má měrný odpor vyšší.

2. Odpovídající *tepelná vodivost a tepelná roztažnost*



Vliv teploty
na změnu tepelné vodivosti λ
a měrného odporu ρ
grafitových elektrod

Vysoká *zatížitelnost* elektrody – v $A \cdot cm^{-2}$; s růstem průměru elektrody klesá, pro elektrody o průměru ∅ 355 mm se udává zatížitelnost 21 $A \cdot cm^{-2}$ pro UHP až 35 $A \cdot cm^{-2}$

3. Nízká *měrná spotřeba elektrod* - pohybuje se poměrně v širokých mezích – v rozmezí 2 až 6 $kg \cdot t^{-1}$ vyrobené oceli a závisí mj.
   - na technologii výroby oceli (dvoustrusková, jednostrusková, s oxidací plynným kyslíkem, s použitím kyslíkopalivových hořáků atd.),
   - na způsobu výroby (z pevné vsázky, z tekuté vsázky, ..),
   - na tonáži pece,
   - době tavby - zkrácení doby tavby cca o 10 minut přináší snížení spotřeby elektrod o cca 0,3 $kg \cdot t^{-1}$ na kvalitě samotných elektrod ad.

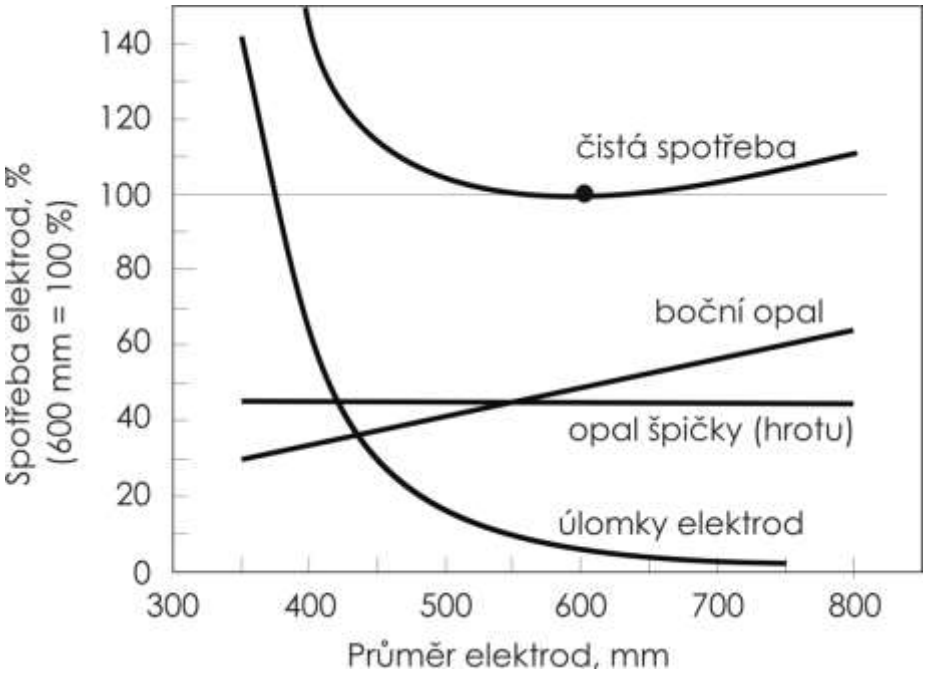
Spotřeba elektrod/1 t vyrobené oceli je důležitý technicko-ekonomický ukazatel provozu EOP.

Spotřeba elektrod EOP

Spotřeba elektrod je důsledkem současného průběhu několika pochodů:

- **Čelní opal** - zvyšuje se s rostoucí hodnotou proudu, vznik horké anodické a rovněž katodické skvrny na elektrodě, vznik pnutí a uvolňování částeček grafitu, rozpouštění grafitu v kapičkách oceli.
- **Boční opal** - stoupá s oxidační schopností okolní plynné fáze a rychlostí jejího proudění, vznik kuželového tvaru elektrod v pracovním prostoru EOP.

  Snížení intenzity bočního opalu – fosforečnanové nátěry (chrání jen asi do 800 °C) nebo alitování elektrod - nanášení speciálního povlaku na bázi Al a SiC na povrch elektrod v tloušťce 0,5 až 0,8 mm (snížení spotřeby elektrod o 8 až 15 %).
- **Lom elektrod** - sesuv vsázky + neuspokojivá regulace elektrod



Další požadavky na elektrody:

- elektrody nesmí obsahovat přísady znečišťující ocel,
- dostatečná pevnost při nízkých i vysokých teplotách (lomy při naklopení pece),
- hladký povrch – nízké přechodové odpory, vyšší odolnost proti oxidaci,
- možnost spojování elektrod – pomocí tzv. spojek, vsuvek - které se našroubují do závitu na čelní straně elektrody. Vsuvky mají většinou lichoběžníkový tvar, spojení musí být pevné, používají se různé tmely.

Výroba grafitových elektrod

Spotřeba energie na výrobu 1 t elektrody je cca 10× větší než spotřeba energie na výrobu 1t oceli (až 8 000 kWh·t^{-1} elektrod).

Postup výroby grafitových elektrod:

- suroviny:
  - základ - antracit, koks, ropný koks, přírodní grafit (používá se málo – má malou pevnost),
  - pojivo - kamenouhelný dehet, produkty dehtu
- *kalcinace* – pražení za účelem zbavení vody a těkavých látek (1400 °C – v elektrické peci)
- úprava základní suroviny – *drcení, třídění* na velikost 2 až 10 mm
- *příprava směsi* s pojivem
- *lisování* pod tlakem 30 až 50 MPa
- *spékání* – do teploty 1300 °C, po dobu 3 týdnů, produktem je křehký, porézní, ale stabilní syntetický uhlík s amorfní strukturou (využití těchto elektrod v redukčních pecích pro výrobu feroslitin)
- *impregnace* (zaplňování pórů a dutinek látkami na bázi černouhelné smoly)
- *grafitizace* – při teplotách 2500 až 3000 °C (konverze amorfního uhlíku v zrna grafitu s šesterečnou mřížkou; začíná při 2200 °C), proces trvá 2 až 3 týdny
- *zpracování obráběním* na požadovaný tvar, včetně spojníků

Grafitové elektrody jsou pevnější než uhlíkové elektrody a mají 4 až 5× nižší měrný elektrický odpor (grafit je vodivější než amorfní uhlík)

Otázky k probranému učivu

1. Základní vybavení elektrické obloukové pece – elektrická a mechanická část.
2. Požadavky kladené na pecní transformátory, zapojení transformátorů.
3. Význam tlumivky v obvodu EOP, konstrukce tlumivky.
4. Kompenzace účiníku, flicker efekt.
5. Krátká síť EOP, reaktance jednotlivých fází, ostrá a tupá fáze, typy bifilárního vedení.
6. Elektrody EOP – požadavky na fyzikálně-teplotní vlastnosti, elektrické vlastnosti, zatížitelnost elektrody, spotřeba elektrod.
7. Opal elektrod - čelní, boční, lom elektrod.
8. Technologie výroby grafitových elektrod – hlavní komponenty, podstata grafitizace.

TÉMATICKÝ BLOK 6

Regulace pohybu elektrod EOP

Úkol automatické regulace elektrod:

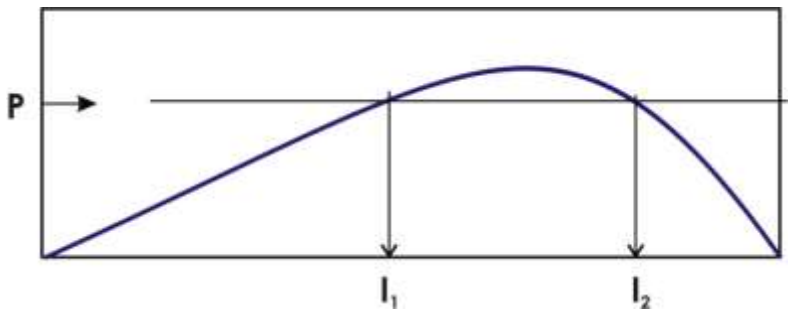
- zachovávat nastavený **činný příkon** přiváděný elektrickými oblouky do pracovního prostoru pece
- zajistit **nastavení pracovního bodu** na sdružené charakteristice pro každé použité napětí

Kromě toho jsou na automatickou regulaci kladeny další požadavky

- zajistit podmínky pro zapálení oblouku
- výjezd elektrody případně odepnutí pece od sítě v případě sesuvu vsázky a vzniku zkratu
- zamezit nauhličení lázně z elektrod v redukčním údobí
- systémy regulace každé z elektrod se nesmí vzájemně ovlivňovat
- musí reagovat i na nestandardní pracovní podmínky, např. na přítomnost nevodivého materiálu ve vsázce
- musí umožnit manuální řízení elektrod – hlavně vyjetí z pece

Výkon oblouku lze regulovat změnou délky oblouku – zkrácením délky se zvýší výkon (vzestupná větev charakteristiky).

Pracovní bod nelze určit výkonem, neboť stejný výkon lze získat při dvou různých hodnotách proudu (I_1, I_2) – výkon nelze použit jako regulovanou veličinu.

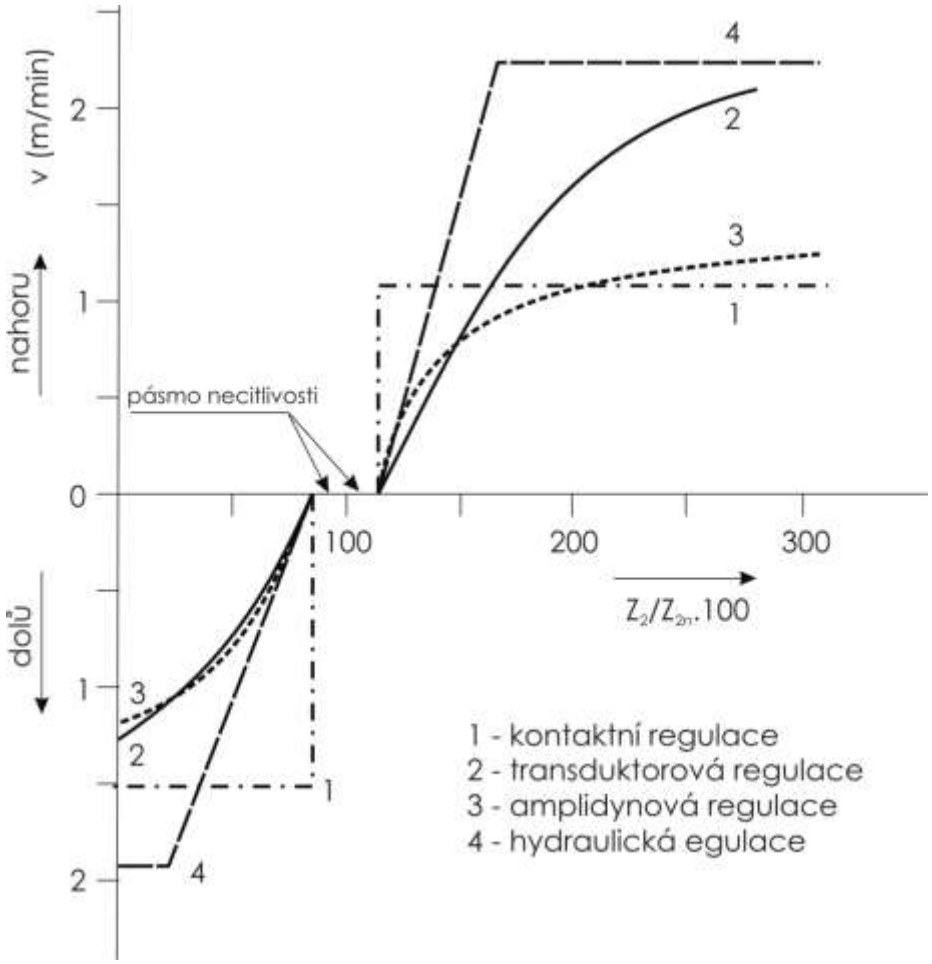


Za regulovanou veličinu lze teoreticky zvolit:

- napětí oblouku – mění se málo, pro regulaci se nepoužívá
- proud oblouku – neschopnost zapálit oblouk při přerušení
- **poměr napětí a proudu oblouku** – proudonapěťová (impedanční, diferenciální).

Statická charakteristika regulátoru elektrod EOP

Závislost rychlosti pohybu elektrod *v* ($m \cdot mm^{-1}$) na velikosti odchylky regulované veličiny (např. impedance oblouku - Z_2)



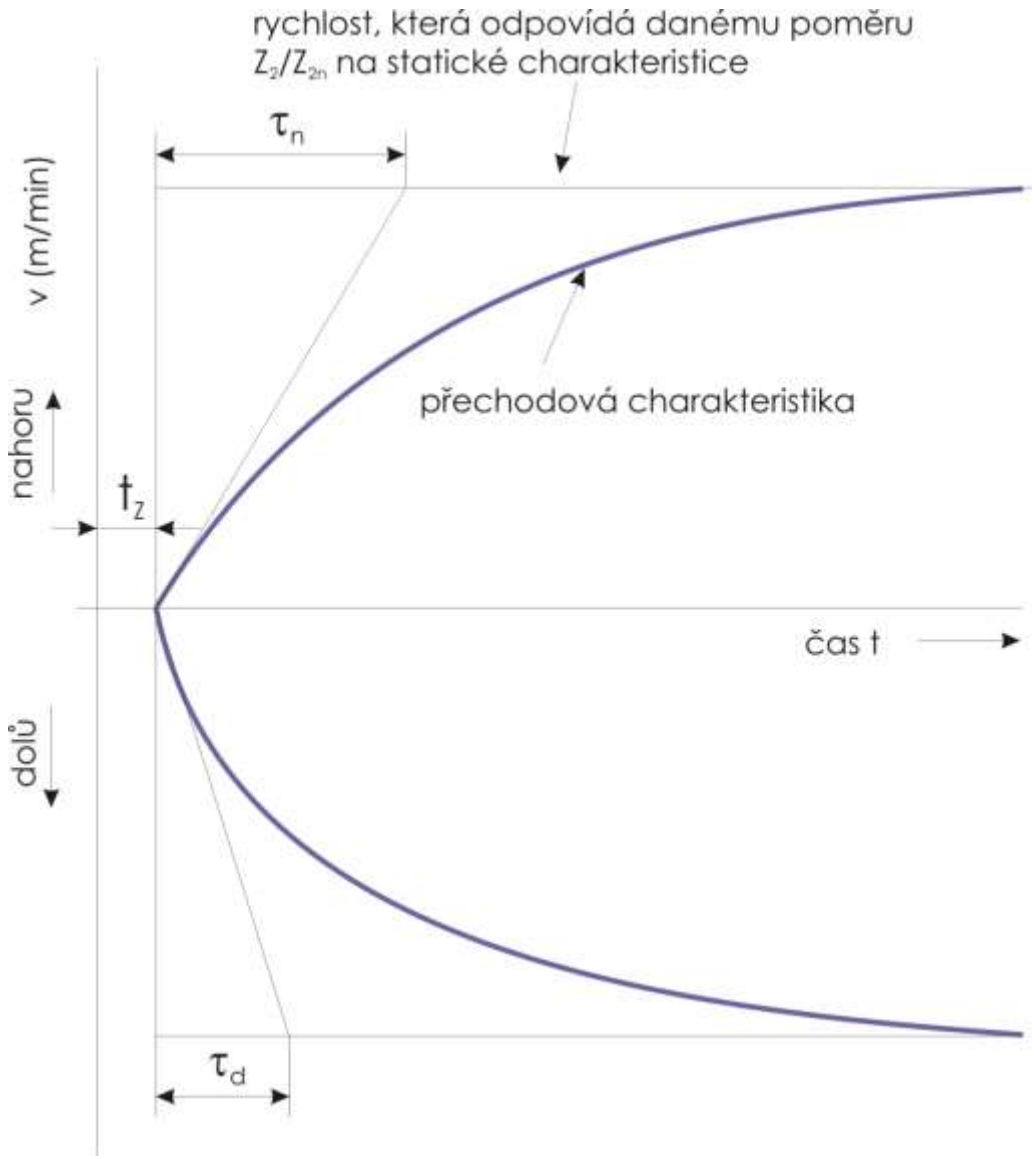
Rozdělení regulace:

- neproporcionální – rychlost pohybu elektrody není závislá na velikosti odchylky regulované veličiny (např. kontaktní regulace)
- proporcionální – rychlost pohybu elektrod je úměrná velikosti odchylky regulované veličiny (např. hydraulický regulátor)

Pásmo necitlivosti - elektroda nereaguje na změnu odchylky regulované veličiny

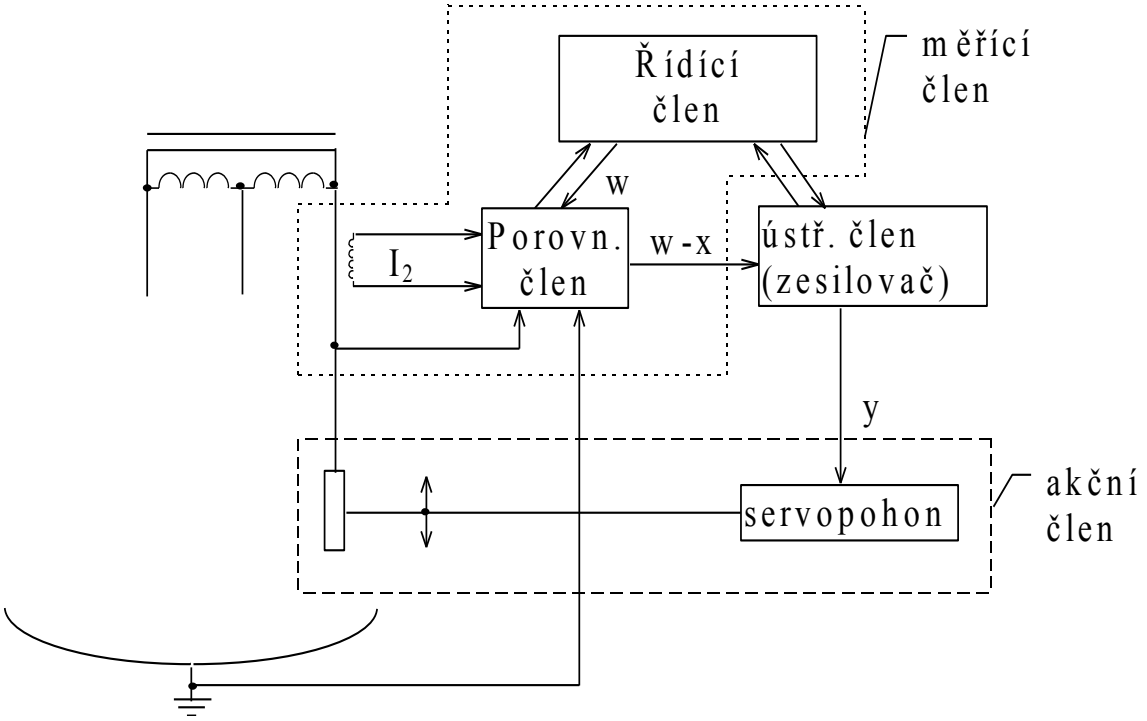
Přechodová charakteristika regulátoru elektrod EOP

Časový průběh rychlosti elektrod od vzniku dané regulační odchylky až do jejího odstranění.



Regulátor bude mít odezvu tím rychlejší, čím bude menší *celkové zpoždění* t_z a čím bude menší *časová konstanta* τ_n *a* τ_d. Velikost časové konstanty je přitom příznivě ovlivněna rychlostí pohybu elektrod.

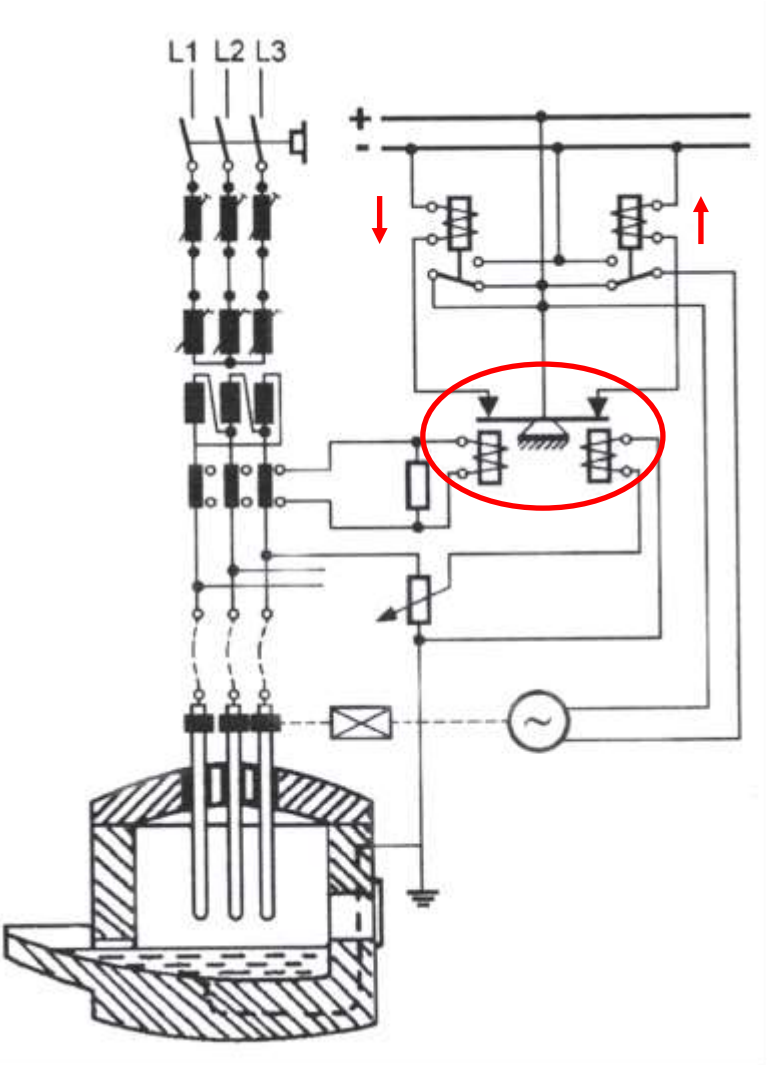
Schéma systému automatické regulace elektrod obloukové pece



- Měřící člen regulátoru provádí měření veličin, jejich porovnání a řízení ústředního členu a obsahuje:
  - řídící člen, který zavádí do porovnávacího členu požadovanou hodnotu sledované veličiny w
  - porovnávací člen, který porovnává naměřenou hodnotu $U_o/I_2 = x$ z hodnotou řídící veličiny w, odchylku w-x zavádí do ústředního členu
- Ústřední člen zesílí odchylku w-x tak, aby mohla přímo ovládat akční člen (např. výkonový zesilovač, magnetický zesilovač, tyristorové, hydraulické zesilovače

- Akční člen vykonává přímo pohyb elektrody pomocí
  - elektromotoru, lanových nebo řetězových převodů
  - hydraulických prvků – sloup elektrody je součástí hydraulického válce

Schéma elektromechanické regulace elektrod EOP pomocí diferenciálního relé

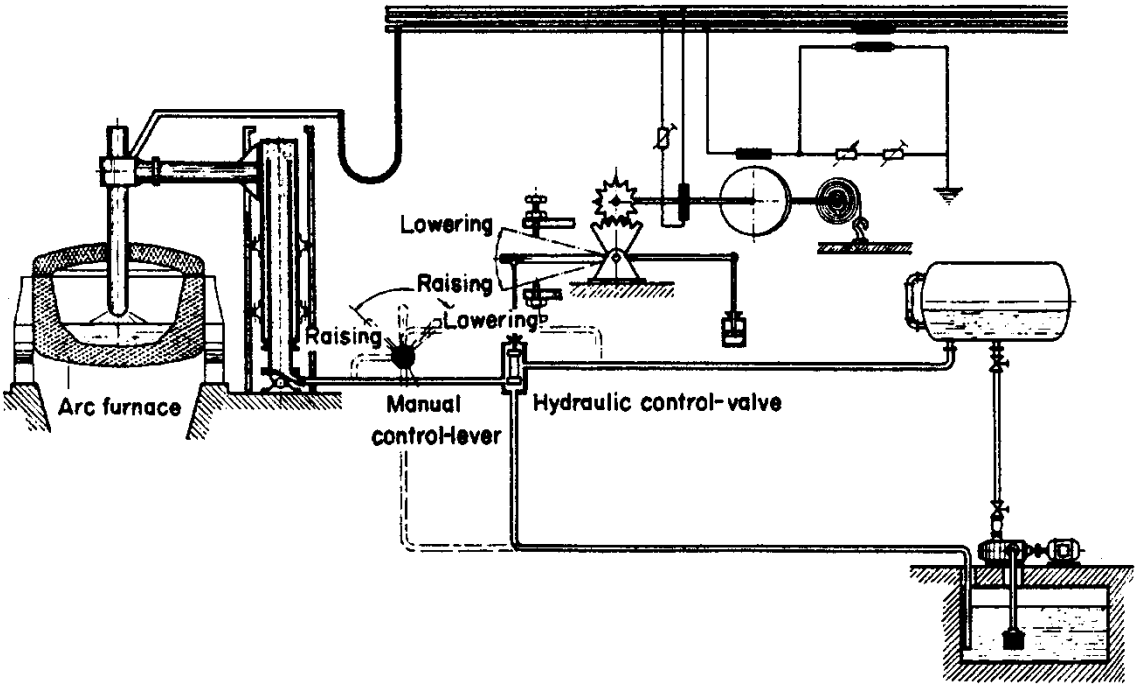


V podstatě se jedná o impedanční regulátor, jehož řídícím členem je **diferenciální relé** (balanční relé), které má dvě vinutí napájené

- napětím elektrody proti zemi a
- napětím z měřícího transformátoru, které je úměrné procházejícímu proudu k elektrodě.

Obě cívky působí na vahadlový systém relé. Pokud se zvýší proud oblouku, vahadlo se vychýlí z rovnovážné polohy a sepne sadu kontaktů stykače elektromotoru, který přes kladkový systém zvedne elektrodu. Pokud se sníží proud v elektrodě, balanční relé sepne kontakty k posuvu elektrody směrem dolů.

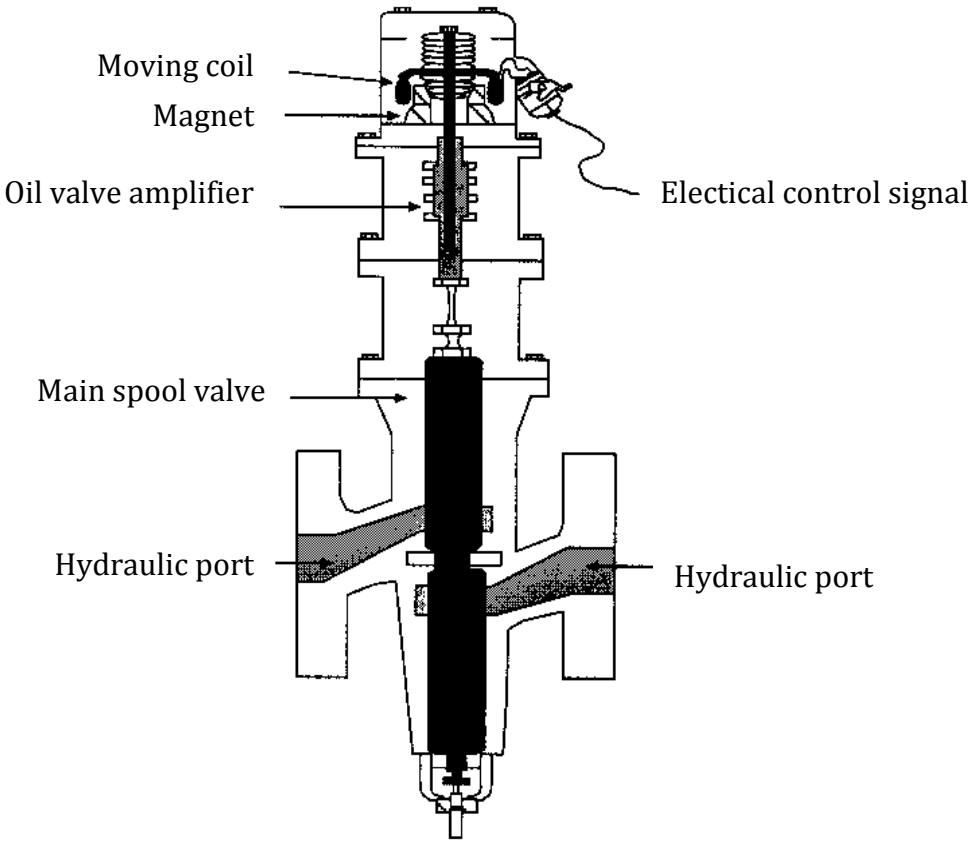
Schéma elektrohydraulické regulace elektrod EOP pomocí Ferrarisova motorku



Ústřední částí tohoto typu regulace je tzv. Ferrarisův motorek, jehož rotor je ve tvaru hliníkového bubínku a stator má dvoufázové vinutí - vinutí budící a vinutí regulační.

Budící vinutí je napájeno napětím z jiných dvou fází, než je fáze regulovaná. Regulační vinutí je diferenciálně zapojeno na dva zdroje střídavého napětí. Jedním z nich je napětí úměrné napětí mezi elektrodou a vsázkou. Druhým zdrojem je napětí, které je vybuzené proudem regulované fáze v měřícím transformátoru. Jsou-li tato dvě napětí amplitudově shodná, neprotéká regulačním vinutím žádný proud, poněvadž oba zdroje mají opačný smysl (fázový posuv 180°). Pokud vznikne rozdíl - např. při zvětšení proudu oblouku a souvisejícím poklesu napětí na elektrodě - protéká regulačním vinutím proud, který vytváří točivé elektromagnetické pole, jehož působením se rotor vychýlí. Točivý moment je úměrný proudu probíhajícímu regulačním vinutím, směr pootočení závisí na tom, zda rovnováha je narušena převahou napětí, které je úměrné proudu oblouku nad napětím snímaným z elektrody či naopak. Je zřejmé, že regulovanou veličinou je vlastně impedance oblouku. Rotor zde vykonává funkci ústředního členu regulátoru. Pootočení rotoru se přenáší přes ozubený segment a raménko na táhlo šoupátka regulačního hydraulického ventilu, který ovládá hydraulický píst s ramenem elektrody.

Schéma hydraulického regulátoru elektrod obloukové pece



Novější pohledy na vlastnosti regulované soustavy EOP

Komplikace a těžkosti regulované soustavy EOP:

Gradient napětí na oblouku ($V \cdot mm^{-1}$) se v závislosti zejména na složení strusky a teplotě mění v průběhu technologického procesu více než řádově, tzn. že

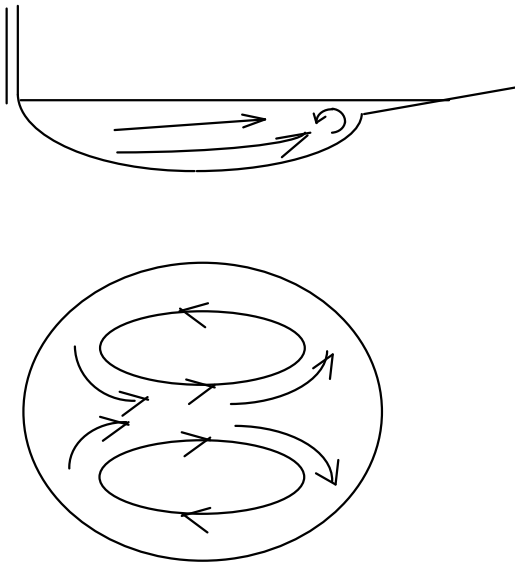
- na určitou hodnotu regulační odchylky (w-x) by měl regulátor reagovat rozdílnou hodnotou akční veličiny (tzn. míry posuvu elektrody) v závislosti na tom, zda gradient napětí na oblouku je malý či velký.

Elektrické parametry jednotlivých oblouků jsou navzájem svázány, neboť elektrický okruh pro proud daného oblouku se musí nutně uzavírat přes oblouky zbývajících elektrod, tzn. že v situaci, kdy u dané elektrody délka oblouku odpovídá požadovanému stavu a není tedy vhodné elektrodou pohybovat, změna proudu u jiné elektrody (třeba i krátkodobá) se nutně projeví změnou proudu i u první elektrody. Je zřejmé, že pokud by se jednalo o krátkodobé narušení, nejlepším východiskem by bylo na tuto odchylku vůbec nereagovat.

Indukční míchání lázně v EOP

- elektromagnetická cívka indukčního míchání je umístěna pod dnem obloukové pece (analogie rozvinutého statoru asynchronního motoru)
- rotorem (s „kotvou nakrátko“) je vlastní lázeň
- cívka se napájí proudem o nízké frekvenci (do 1 Hz).
- plášť dna pece musí být vyroben z nemagnetické oceli
- zdrojem napájecího proudu jsou rotační nebo tyristorové měniče

Prochází-li cívkou proud o nízkém kmitočtu, vyvolává pohyb taveniny podle obrázku.



Přínos indukčního míchání:

- zvyšuje se koncentrační homogenita po legování, zejména těžkými prvky jako je např. wolfram nebo vanad
- zvyšuje se teplotní homogenita lázně
- urychlují se probíhající difúzní pochody mezi struskou a kovem, např. difúzní desoxidace a odsíření
- usnadňuje se vyplouvání vměstků
- ulehčuje se stahování strusky
- používá se v redukčním údobí tavby

Vyzdívky EOP

Půda pece – nístěj

U půdy pece je vyžadována těsnost vůči pronikání oceli a odolnost proti vyplouvání. Půda se podílí na fyzikálně-chemických reakcích, je silně namáhána tepelně i mechanicky (během sázení ocelového odpadu).

Požadovaných vlastností půdy se dosahuje vhodnou kombinací tloušťky a provedení izolační vrstvy, magnezitových cihel a pracovní vrstvy.

Pracovní vrstva je tvořena hutným, objemově stálým a dobře slinutým monolitem. Zhotovuje se z jemně drceného magnezitového slinku (nebo magnezitodolomitového).

Půdní monolit lze zhotovit řadou metod:

- dusáním zrnitých hmot s přídavkem dehtu
- dusáním zrnitých hmot vlhčených vodními roztoky $MgSO_4$, $MgCl_2$
- dusáním zrnitých hmot vlhčených vodním sklem
- pěchováním suchých zrnitých hmot po vrstvách
- zhutňováním suchých zrnitých hmot hloubkovou vibrací za použití jehlových vibrátorů

Suché půdy poskytují řadu výhod - nemusí se sušit, vyznačují se vyšší hustotou a objemovou stálostí. Před první tavbou se půda překryje kusy plechu a sází se lehčí odpad. První tavení probíhá přerušovaně při nižších napěťových stupních.

Při výrobě nerezavějících ocelí oxidační přetavbou jsou půdy namáhané značně vysokými teplotami. Vyhovující životnosti půd bylo dosaženo řadou opatření, majících za následek vznik „chromitové“ garnisáže na styku nístěje s lázní.

Garnisáž vzniká průběhem pochodů mezi původní magnezitovou či dolomitovou nístějí a složkami chromité strusky, složkami vysoce-legované lázně a použitým opravářským materiálem. Hlavní složkou této garnisáže jsou složité spinely $MgO.Cr_2O_3$, $FeO.Cr_2O_3$.

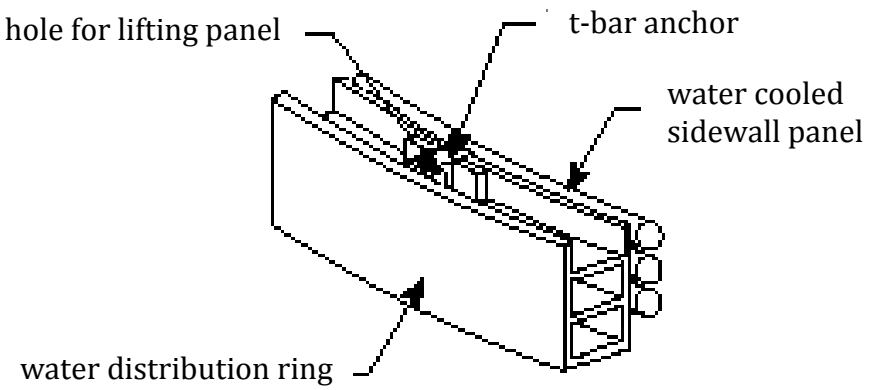
Stěny pece

Vyzdívka stěn pecí je rovněž namáhána změnami teplot v důsledku hoření oblouků, mechanickým pnutím při klopení pece a dalšími faktory.

Provedení stěn EOP a jejich vyzdívání je možno rozdělit do dvou skupin podle způsobu odvodu tepla z pracovního prostoru pece:

- odvod tepla pláštěm pece do jejího okolí, přičemž vlastní magnezitové zdivo je od pláště v různé míře tepelně izolováno
- využití vodních chladičů (velkoplošných), které odvádějí teplo z převážné části pracovního povrchu pece, který je zde tvořen pouze tenkou vyzdívkou případně nástřikem keramické hmoty či garnisáži na chladičích. Použití chladičů umožňuje plné využití výkonu UHP pecí a tedy vyšší výrobnost, menší spotřebu žáruvzdorného materiálu.
- Vodou chlazené panely se konstruují nejčastěji jako trubkové (průměr trubek 70-90 mm), síla stěny je 8 až 10 mm a musí být dostatečně odolná proti mechanickým vlivům (sázení) na druhé straně musí zajišťovat rychlý přestup tepla do chladící vody. Vyrábějí se z oceli s dobrou tepelnou vodivostí (50 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) nebo pro zvlášť exponované oblasti i z mědi (383 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) např. pro zónu blízkou struskové čáře nebo kyslíkopalivovým hořákům apod. Panely nepřicházejí do trvalého přímého styku s tekutým kovem nebo struskou – jsou umisťovány nad struskovou čarou.

Segment vodou chlazeného panelu stěn EOP



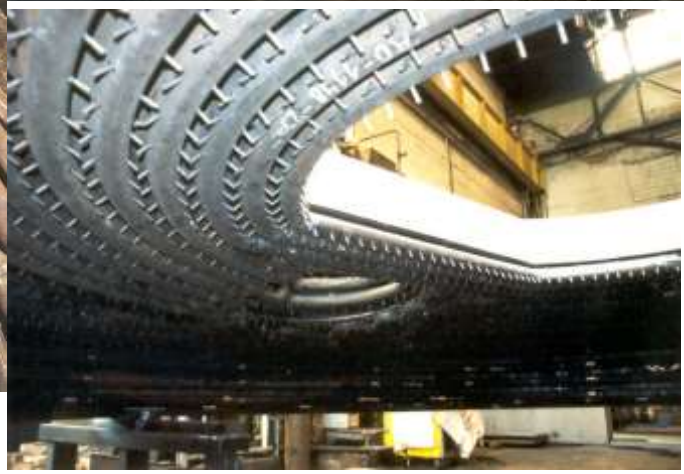
Vodou chlazená víka EOP

Dříve byla víka vyzdívána dinasem, protože má příznivé vlastnosti - nízká hmotnost, nevysoká cena. Avšak i malé překročení nad 1670 °C vedlo k silnému opotřebení.

Moderní EOP používají víka vysocehlinitá, zásaditá nebo vodou chlazená.

- Vysocehlinitá - na bázi Al_2O_3, 75-80 % Al_2O_3
- Zásaditá - magnezitochromová
- Vodou chlazená - chladnice v obvodové části, střed kolem elektrod se zhotovuje zednickým způsobem.

Chladnice jsou provedeny systémem trubka-mezera-trubka, chlazení je rozděleno do více chladících okruhů. Na vnitřní (pecní) straně trubkové konstrukce jsou navařeny trny, které slouží jako držáky žáruvzdorného betonu nanášeného na celý povrch před uvedením do provozu. Hmotnost vodou chlazeného víka je menší než zděného. Průtočné množství vody musí zabezpečit dostatečné chlazení bez vývinu páry – až 200 $m^3 \cdot hod^{-1}$ pro víko o průměru 6 m.



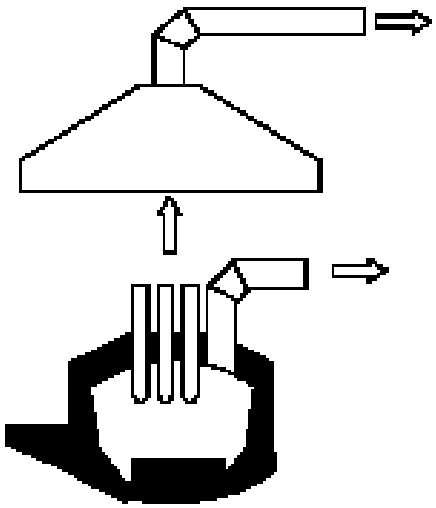
Odsávání pecních plynů z EOP

V průběhu tavby, zvláště u kyslíkem intenzifikovaných technologií, vzniká v obloukové peci velké množství pecních plynů jako produktů oxidačních reakcí. Tyto plyny obsahují prachový podíl, jehož množství dosahuje 14 až 20 $kg \cdot t^{-1}$ oceli při výrobě uhlíkové či nízkolegované oceli a 6 až 15 $kg \cdot t^{-1}$ oceli v případě výroby vysokolegované oceli.

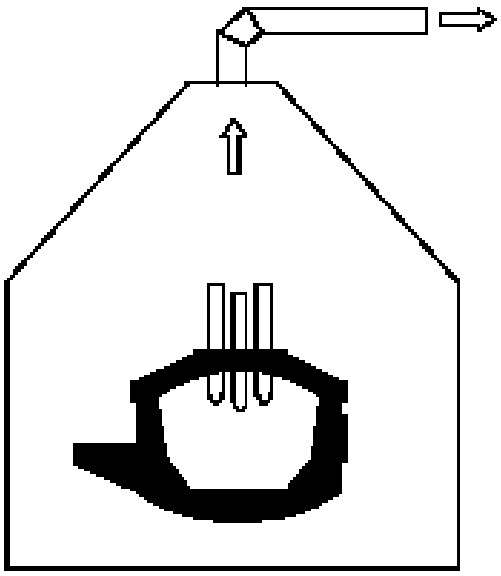
Vznikající pecní plyny musí být během tavby z pecního prostoru odsávány. Pro odsávání se používá různých technologických principů

- odsávání tzv. čtvrtým otvorem ve víku (klenbě) pece příp. druhým otvorem v případě stejnosměrné pece pece
- pomocí odsávacího krytu nad obloukovou pecí
- použitím tzv. dog-house krytu (kapotáž pece), ve kterém je celá EOP umístěna a který se otevírá pouze při sázení a určitých manipulacích (např. odběru vzorků); pozitivním účinkem tohoto principu je rovněž odstínění zdroje hluku a snížení jeho hladiny v průběhu tavby o 10 až 20 dB
- odsávání celé ocelárenské haly

Uvedené postupy se mohou vzájemně kombinovat pro dosažení maximálního efektu a tím i snížení sekundární emise z provozu obloukových pecí.



EOP s 4. otvorem a odsávaným krytem pro odprašování ovzduší v budově



Dog-house elektrické obloukové pece

Chemické složení prachu v pecních plynech

Složka	Prach z výroby uhlíkové a nízkolegované oceli, % hmot.	Prach z výroby vysokolegované a korozivzdorné oceli, % hmot.
Fe celkové	25-50	30-40
SiO_2	1,5-5	7-10
CaO	4 –15	5-17
Al_2O_3	0,3-0,7	1-4
MgO	1-5	2-5
P_2O_5	0,2-0,6	0,01-0,1
MnO	2,5-5,5	3-6
Cr_2O_3	0,2-1	10-20
Na_2O	1,5-1,9	n.d.
K_2O	1,2-1,5	n.d.
Zn	10-35	2-10
Pb	0,8-6	0,5-2
Cd	0,02-0,1	0,01-0,08
Cu	0,15-0,4	0,01-0,3
Ni	0,02-0,04	2-4
V	0,02-0,05	0,1-0,3
Co	0,001-0,002	n.d.
As	0,003-0,08	n.d.
Hg	0,0001-0,001	n.d.
Cl	1,5-4	n.d.
F	0,02-0,9	0,01-0,05
S	0,5-1	0,1-0,3
C	0,5-2	0,5-1
alkalita	2,0-6,5	n.d.
vlhkost	6-16	n.d.

Úprava odsávaných pecních plynů spočívá zejména v jejich čištění pomocí pytlových filtrů (90 % zařízení) nebo pomocí elektrostatických odlučovačů či vodních filtrů. Odloučený prach se v rámci EU ze $^2/_3$ ukládá na skládku, zbývající část se recykluje (prach z výroby AK ocelí) nebo se externě dále využívá.

Údaje o vstupech a výstupech při výrobě uhlíkové oceli v elektrické obloukové peci získané z různých odkazů

VSTUPY			VÝSTUPY		
SUROVINY			**PRODUKTY**		
ocelový odpad	$kg \cdot t^{-1}$	1080 -1130	tekutá ocel	kg	1000 (výtěžek 92,6-88,5 %)
vápno	$kg \cdot t^{-1}$	30-80	**EMISE**		
uhlí	$kg \cdot t^{-1}$	13-15	prach	$g \cdot t^{-1}$	1-780
grafitové elektrody	$kg \cdot t^{-1}$	1,5-4,5	Hg	$mg \cdot t^{-1}$	6-4470
vyzdívka	$kg \cdot t^{-1}$	1,9-25,1 (prům. 8,1)	Pb	$mg \cdot t^{-1}$	16-3600
tekutá tavenina	$kg \cdot t^{-1}$		Cr	$mg \cdot t^{-1}$	8-2500
DRI	$kg \cdot t^{-1}$		Ni	$mg \cdot t^{-1}$	1-1400
surové železo	$kg \cdot t^{-1}$		Zn	$mg \cdot t^{-1}$	280-45600
			Cd	$mg \cdot t^{-1}$	< 1-72
			Cu	$mg \cdot t^{-1}$	<1-460
ENERGIE			HF	$mg \cdot t^{-1}$	<700-4000
celková energie	$MJ \cdot t^{-1}$	2300-2700 (630-750 $kWh \cdot t^{-1}$)	HCl	$mg \cdot t^{-1}$	800-9600
elektřina	$MJ \cdot t^{-1}$	1250-1800 (350-520 $kWh \cdot t^{-1}$)	SO_2	$g \cdot t^{-1}$	24-130
kyslík	$m^3 \cdot t^{-1}$	24-47	NOx	$g \cdot t^{-1}$	120-240
			CO	$g \cdot t^{-1}$	740-3900
voda		uzavřený chladící okruh	TOC	$g\ C \cdot t^{-1}$	16-130
			benzen	$mg \cdot t^{-1}$	170-4400
			chlorbenzeny	$mg \cdot t^{-1}$	3-37
			PAH	$mg \cdot t^{-1}$	3,5-71
			PCBP	$mg \cdot t^{-1}$	1,5-45
			PCDD/F	µg I-TEQ/t	0,07-9
			struska z pece	$kg \cdot t^{-1}$	100-150
			struska z pánve	$kg \cdot t^{-1}$	10-30
			prach	$kg \cdot t^{-1}$	10-20
			žáruvzdorné cihly	$kg \cdot t^{-1}$	2-8
			hluk	DB (A)	90-125

Otázky k probranému učivu

1. Hlavní úkol regulace elektrod.
2. Požadavky na regulaci elektrod.
3. Výhody a nevýhody napěťové, proudové a proudonapěťové regulace.
4. Statická a přechodová charakteristika regulátoru elektrod EOP.
5. Blokové schéma regulace elektrod EOP.
6. Elektromechanická regulace elektrod EOP s diferenciálním relé.
7. Komplikující stavy při regulaci elektrod.
8. Význam a provedení indukčního míchání lázně v EOP.
9. Vyzdívky EOP – klasifikace, garnisáž, provedení víka, vodou chlazené panely.
10. Odsávání pecních plynů z EOP, čištěni plynů.

TÉMATICKÝ BLOK 7

Základní rozdělení technologií vedení taveb v zásadité EOP

Výroba oceli v elektrické obloukové peci se vyznačuje určitými specifickými možnostmi, které vyplývají v podstatě z existence vysokoteplotního, koncentrovaného zdroje tepla (elektrického oblouku), který není vázán na průběh oxidačních (respektive spalovacích) reakcí.

V pracovním prostoru pece lze tedy vytvářet jak *oxidační* podmínky, tak i *redukční* podmínky.

a) **dvoustrusková technologie** - tavba se skládá z údobí tavení vsázky, oxidačního údobí a redukčního údobí

   Tato technologie má dvě podvarianty:

   - se stažením oxidační strusky na konci oxidačního údobí
   - bez stažení oxidační strusky na konci oxidačního údobí

b) **jednostrusková technologie** - tavba má údobí tavení, oxidační a dohotovení - tavba tedy probíhá bez redukčního údobí

c) **přetavba** - po tavení následuje přímo redukční údobí, chybí oxidační údobí

Existuje velmi velký počet modifikací těchto technologií – výroba uhlíkových ocelí, legovaných, vysokolegovaných, nástrojových ocelí, ocelí na odlitky ad.

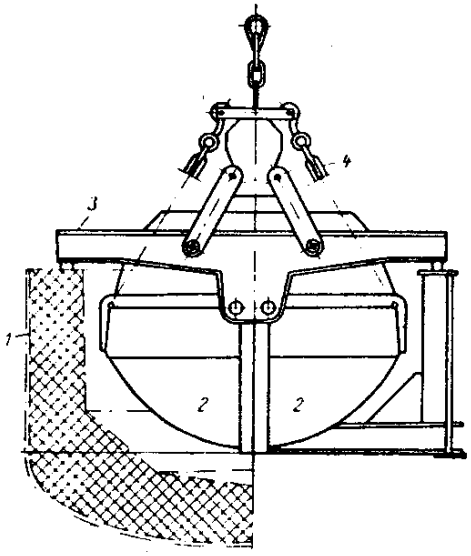
Dvoustrusková technologie

Před nástupem sekundární metalurgie to byla nejpoužívanější technologie. V současné době se využívá na menších jednotkách při výrobě speciálních ocelí.

Přípravné práce před zahájením tavení:

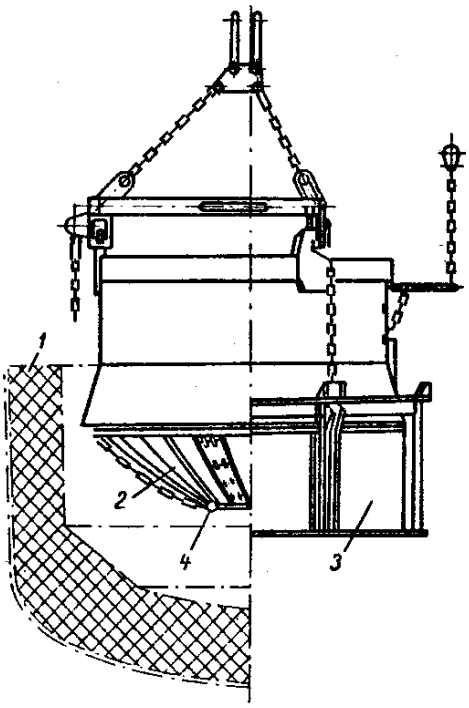
- mezitavbová oprava vyzdívky
- příprava vsázky – zejména třídění z hlediska chemického složení
- sázení vsázky do pece - pomocí sázecích košů nebo sázecích strojů, na dno lehký odpad (tlumí nárazy těžkého odpadu), pak těžký odpad a opět lehký odpad

Nejčastěji používané typy sázecích košů:



Dvoučelisťový sázecí koš

1 – pec; 2 – čelisti; 3 – rám koše;
4 – závěsy rozevírající čelisti



Článkový sázecí koš

1 – pec; 2 – zavřené články;
3 – otevřené články; 4 – uzavírací lano

Sázení vsázky pomocí sázecího koše

Údobí tavení

Jedná se o časový úsek tavby od zapálení oblouků do odběru prvního vzorku po roztavení.

Pro tavení se používá maximální hodnoty sekundárního napětí (delší oblouky stíněné vsázkou), tím se zkracuje doba tavení.

Intenzifikace tavení:

- Dmýchání plynného kyslíku - hlavně se pomáhají natavovat neroztavené kusy vsázky mimo oblast elektrod.
- Použití kyslíkopalivových hořáků - obyčejně na metan a kyslík, vsázku lze předehřívat i mimo pec v sázecích koších, šachtách apod.
- Otáčivá nístěj - nístěj se pootočí o 30 až 40°.

Metalurgické reakce v údobí tavení:

- Oxidační reakce – v menší míře odfosfoření a oxidace Si, Mn, souvisí s tvorbou reaktivní vápenatoželeznaté strusky
- Záměrné nauhličení lázně - přísada koksu, zlomků elektrod nebo surového železa. Nauhličování je nutné, aby mohla následně probíhat uhlíková reakce, která řídí významnou část termodynamických a kinetických podmínek dějů při oxidační rafinaci (např. odfosfoření, odstranění plynů, apod.)

Úplným roztavením vsázky končí údobí tavení, transformátor se přepíná na nižší stupeň sekundárního napětí (kratší oblouky).

Oxidační údobí tavby

Časový úsek od odběru prvního vzorku po roztavení vsázky až do stažení oxidační strusky.

Úkoly oxidačního údobí:

1. Oxidace fosforu (odfosfoření)
2. Oxidace dalších doprovodných prvků (Si a Mn, Cr)
3. Oxidace uhlíku (oduhličení)
4. Snížení obsahů plynů (N_2, H_2)
5. Částečné snížení obsahu síry
6. Snížení obsahu nekovových vměstků

Odfosfoření oceli v EOP

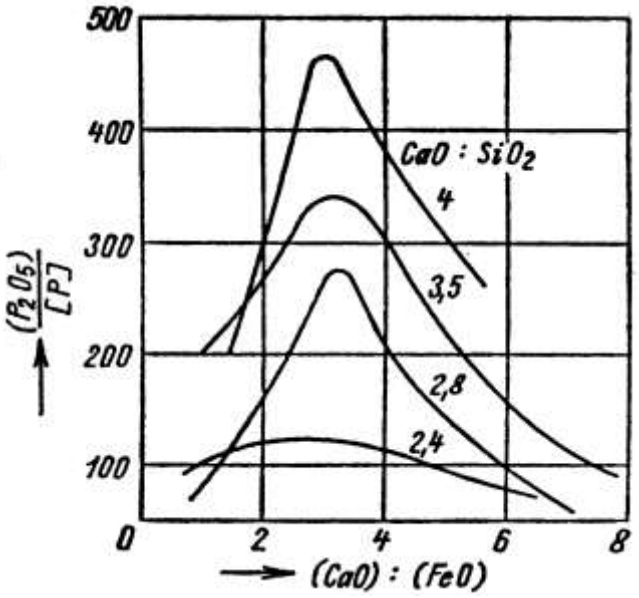
Molekulární teorie:

$$2\,[P] + 5\,(FeO) = (P_2O_5) + 5\,Fe$$
$$(P_2O_5) + 4\,(CaO) = (Ca_4P_2O_9)$$
$$2\,[P] + 5\,(FeO) + 4\,(CaO) = (Ca_4P_2O_9) + 5\,Fe$$

Podmínky pro dosažení nízkého obsahu fosforu v kovu:

- relativně nízká teplota (exotermická reakce) – při vysoké teplotě může docházet ke zpětné redukci fosforu ze strusky do kovu
- nízká aktivita produktu reakce ve strusce - $Ca_4P_2O_9$
- vysoká aktivita CaO a FeO ve strusce – resp. optimální poměr obsahů CaO a FeO ve strusce

Vliv poměru CaO/FeO na rozdělení P mezi kov a strusku



Iontová teorie:

$$[P] + 4\,(O^{2-} + 2{,}5\,(Fe^{2+}) = (PO_4^{3-}) + 2{,}5\,Fe$$

Podmínky pro dosažení nízkého obsahu fosforu v kovu:

- vysoká aktivita iontů O^{2-} a Fe^{2+} - vliv iontových potenciálů
- nízká hodnota součinitele aktivity aniontů PO_4^{3-}

Oxidace uhlíku v EOP

Homogenní uhlíkovou reakci lze vyjádřit rovnicí

$[C] + [O] = CO_g$

Rovnovážná konstanta

$K_{C,O} = p_{CO} / f_C \cdot [C] \,.\, f_O \cdot [O]$

$\log K_{C,O} = (1168/T) + 2{,}07$

$\Delta G = -5343 - 9{,}47 \cdot T$

Oxidace železa v primární zóně

$[Fe] + {}^1/_2\, O_2 = (FeO)$ exo

Přechod kyslíku ze struskové fáze do kovu lze popsat vztahem

$(FeO) = [Fe] + [O]$ endo

V tavenině pak probíhá homogenní uhlíková reakce

$[C] + [O] = CO_g$ exo

Celkový tepelný efekt reakce oxidace uhlíku kyslíkem v tavenině železa se pak formálně rovná průběhu součtové reakce

$[C] + {}^1/_2\, O_2 = CO_g$

Průběh uhlíkové reakce je možný jen při splnění další podmínky (fyzikální) - parciální tlak p_{CO} ve vznikající bublině musí být větší než součet p_{atm}, p_{fer} a p_{kap}.

$$p_{CO} > p_{atm} + p_{fer} + p_{kap}$$

$$p_{CO} > p_{atm} + h.\rho.g + \frac{2\sigma}{r}$$

kde: σ - mezifázové napětí mezi vznikající bublinou CO a taveninou

r - poloměr bubliny CO

Snížení obsahů rozpuštěných plynů (N_2, H_2)

Sievertsův zákon ($[\%N] = k \cdot p_{N2}^{1/2}$).

Při průběhu uhlíkové reakce vznikají bublinky CO, ve kterých je parciální tlak dusíku a vodíku nulový. Atomárně rozpuštěný dusík a vodík difunduje v lázni do těchto bublin CO, a je vynášen ke hladině

Částečné snížení obsahu síry

Termodynamické podmínky jsou nevýhodné – vysoký obsah FeO ve strusce (12 – 15 %). Dobré kinetické podmínky procesu (promíchávání) dovolují částečné snížení obsahu síry.

Snížení obsahu nekovových vměstků

Vlivem promíchávání (uhlíková reakce) dochází ke zvýšení počtu srážek a tím i ke zvýšení koagulace a koalescence vměstků a jejich rychlejší separace do strusky.

Flotační účinek bublin CO – vynášení vměstků do strusky. Podstatou této flotace je snížení celkové povrchové energie systému lázeň-vměstek-bublina CO (viz Sekundární metalurgie).

Redukční údobí tavby

Časový úsek tavby od desoxidace lázně až po odpich.

Úkoly redukčního údobí:

1. Desoxidace oceli
2. Odsíření oceli
3. Nalegování lázně a konečná úprava chemického složení
4. Úprava teploty lázně na odpichovou teplotu
5. Konečná desoxidace oceli a vytvoření optimálního složení strusky

Desoxidace oceli

Předběžná srážecí desoxidace – provádí se po stažení oxidační strusky, a to pomocí SiMn nebo FeMn+FeSi případně i hliníkem v množství 0,5 až 2 kg Al/t, úkolem je vytvořit podmínky pro vytvoření redukční strusky.

Difúzní desoxidace

Podstata:

- ***snížení aktivity (FeO) ve strusce*** - přísadou C, FeSi, FeMn
- výsledkem je narušení ***rovnováhy*** mezi obsahem kyslíku v kovu a ve strusce a zahájení průběhu vlastního ***extrakčního pochodu***

$$[O] \rightarrow (FeO)$$

Rovnováha této reakce je dána *Nernstovým rozdělovacím součinitelem* závislým na teplotě

$$K_O = \frac{a_{(FeO)}}{a_{[O]}}$$

V praxi se často používá rozdělovací součinitel vyjádřený jako poměr obsahů kyslíku ve strusce a v kovu

$$L_O = \frac{(FeO)}{[O]}$$

Tento „ocelářský“ rozdělovací součinitel je však závislý jak na teplotě, tak na chemickém složení strusky a oceli, protože platí

$$L_O = \frac{[f_O]}{(\gamma_O)} \cdot K_O$$

Při snížení $a_{(FeO)}$ resp. (FeO) dochází k porušení rovnováhy a k následnému přechodu kyslíku z kovu do strusky, až do ustavení rovnováhy nové, která je daná vztahem:

$$(FeO) = L_o \cdot [O]$$

Výhoda difúzní desoxidace - produkty desoxidace se tvoří ve strusce, nevznikají vměstky
Nevýhoda - pomalý průběh (difúzní proces).

Difúzní dezoxidace může být prováděna pod *bílou* nebo *karbidickou* struskou.

a) Bílá struska

Bílá struska – směs vápna a kazivce (cca 4:1), po vytvoření tekuté strusky se dodá mletý koks nebo mleté elektrody (zdroj uhlíku).

Probíhá přitom reakce

$(FeO) + C = [Fe] + CO_g$

vzniká CO, který zadýmí pracovní prostor a vznikne redukční atmosféra.

Další desoxidaci můžeme provést pomocí redukční směsi obsahující FeSi (tzn. vápno + CaF_2 + FeSi). Obsah (FeO) se přitom sníží na **0,5 až 1%.**

Bílá struska se po ochlazení rozpadá na bílý prášek (vznik $2CaO \cdot SiO_2$, změna modifikace při poklesu teploty)

Složení bílé strusky:

~50% CaO, ~6% CaF_2, ~13% SiO_2, ~6-10% MgO, ~0,5-1% FeO, <0,5%CaC_2

Použití bílých strusek:

při výrobě nízkouhlíkových a středně uhlíkových ocelí.

b) Karbidická struska

Podíl koksu v redukční směsi je větší, v další dávce se přisazuje pouze CaF_2 a CaO bez FeSi. V podmínkách vysokých teplot pod oblouky probíhá reakce

$3\,C + (CaO) = (CaC_2) + CO_g$ ΔH silně endo

karbid vápníku reaguje s (FeO)

$(CaC_2) + 3(FeO) \rightarrow (CaO) + 2CO_g + 3[Fe]$

desoxidace strusky se zúčastňují dva prvky (Ca, C), což se příznivě projeví na hlubším snížení obsahu (FeO) ve strusce až na hodnoty 0,3-0,5 %. Obsah CaC_2 v karbidické strusce je vyšší - 1 až 2,5 %.

Výhoda použití karbidické strusky:

– vyšší desoxidační schopnost

Nevýhoda

- možnost nauhličení lázně
- vyšší hustota
- menší tekutost (vyšší viskozita)
- nízké mezifázové napětí mezi struskou a ocelí (vysoká smáčivost)

V důsledku uvedených nepříznivých fyzikálních vlastností karbidická struska při odpichu špatně vyplouvá z kovu a může být příčinou velkého množství nekovových vměstků v oceli. Z těchto důvodů se karbidická struska přivádí před odpichem na strusku bílou a to tak, že pec odvětráme (zvedneme víko), přebytečný CaC_2 se zoxiduje a na strusku nahodíme mleté FeSi.

V závěru redukčního údobí dosáhneme obsahu kyslíku v oceli mezi 0,0400 až 0,0800 %.

Odsíření oceli v EOP

Molekulární teorie:

$$(CaO) + [FeS] = (CaS) + (FeO)$$

$$(CaO) + [S] + Fe = (CaS) + (FeO)$$

Iontová teorie:

$$[S] + 2\,e = (S^{2-})$$

$$(O^{2-}) - 2\,e = [O]$$

$$[S] + (O^{2-}) = [O] + (S^{2-})$$

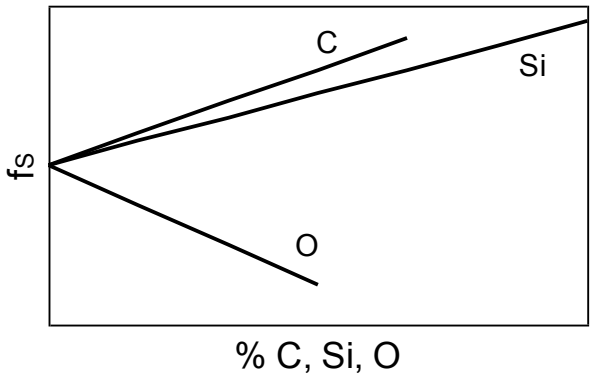
Z hodnoty rovnovážné konstanty K_S lze vyjádřit vztah pro [%S]

$$[\%S] = \frac{f_o \cdot [\%O] \cdot a_{(S^{2-})}}{K_S \cdot a_{(O^{2-})} \cdot f_S}$$

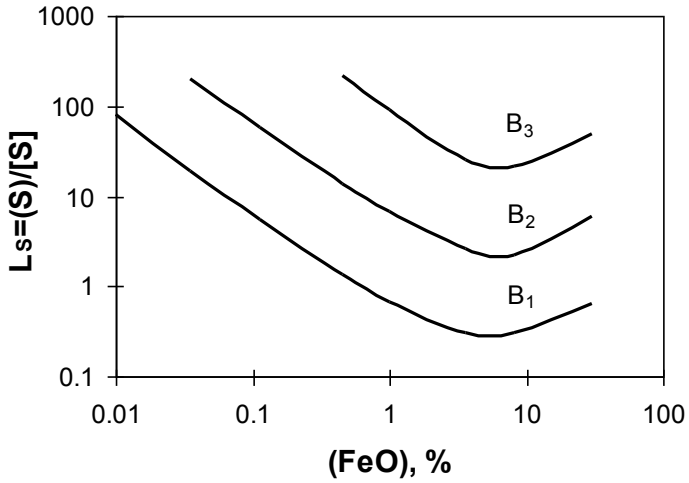
Pro dosažení nízkého obsahu síry v kovu je zapotřebí dosáhnout

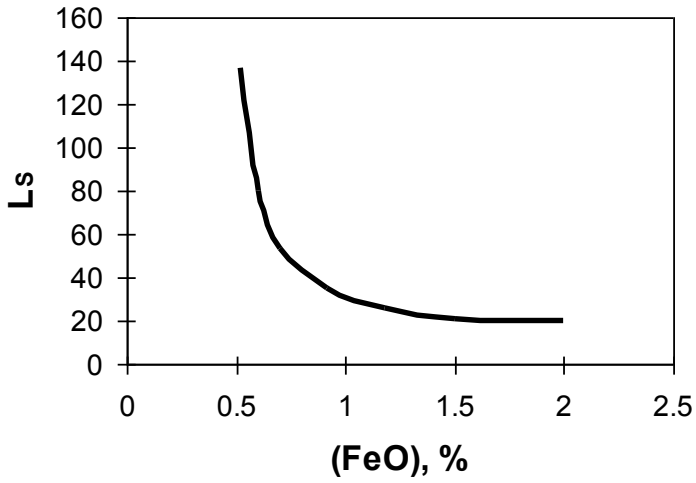
- nízkou aktivitu kyslíku a_o v oceli (nízký obsah rozpuštěného kyslíku a nízká hodnota aktivitního koeficientu f_O)
- nízké aktivity aniontů síry $a_{S^{-2}}$ ve strusce
- vysoké hodnoty K_S - reakce je slabě exotermická, převažuje však vliv kinetiky procesu
- vysoké hodnoty aktivity kyslíkových aniontů $a_{O^{-2}}$ ve strusce (vysoká zásaditost, tzn. vysoký obsah (CaO), nízký (FeO))
- vysoké hodnoty aktivitního koeficientu f_S v oceli (aktivitu síry zvyšují C, Si; podstatně ji snižuje kyslík)

Vliv C, Si, O na koeficient aktivity síry

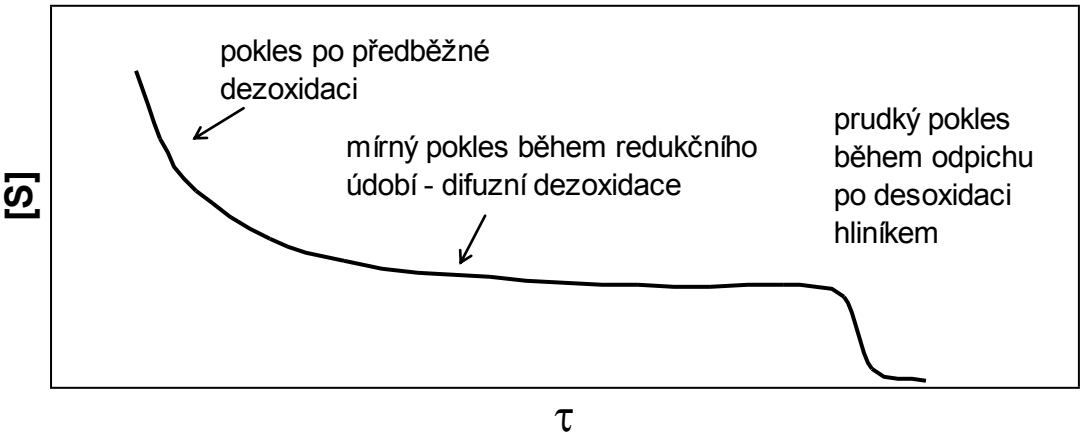


Vliv basicity strusky a obsahu (FeO) na rozdělovací koeficient síry





Chování síry v průběhu redukčního údobí tavby v EOP



Legování lázně a úprava chemického složení

Hlavní zásada legování:

- prvky s vysokou afinitou ke kyslíku (Al, Si, V, Ti) je nutno přidávat na konci tavby, naopak prvky s nízkou afinitou ke kyslíku (např. Ni, Mo) je možno přisazovat již do vsázky nebo na počátku oxidačního údobí.

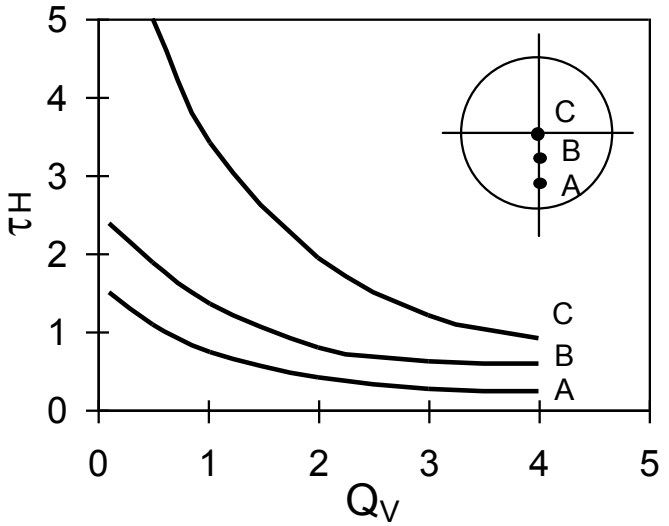
Dále nutno brát v úvahu:

- potřebný stupeň nalegování lázně
- teploty tání přísad
- efektivní hustotu přísad
- obsah plynů v přísadách
- obsah nežádoucích příměsí

K odstranění případné nehomogenity chemického složení lázně je možno využít různých způsobů např.

- indukční promíchávání lázně použitím indukčního míchače
- mechanizované míchání lázně pomocí hřebla
- promíchávání lázně dmýchaným inertním plynem přes porézní tvárnice v nístěji pece či přes ponořenou trysku shora

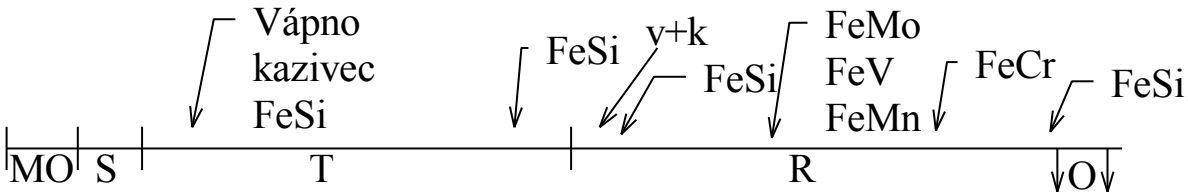
Vliv umístění porézní dmýchací tvárnice ve dně pánve a objemového průtoku argonu na homogenizační časy



Zásadní řešení spočívá však v přenesení legování do zařízení pánvové metalurgie

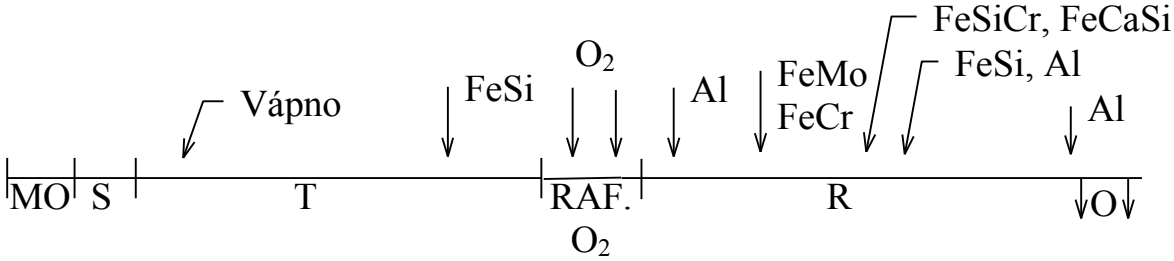
Výroba legovaných ocelí redukční přetavbou

Základní časový snímek:



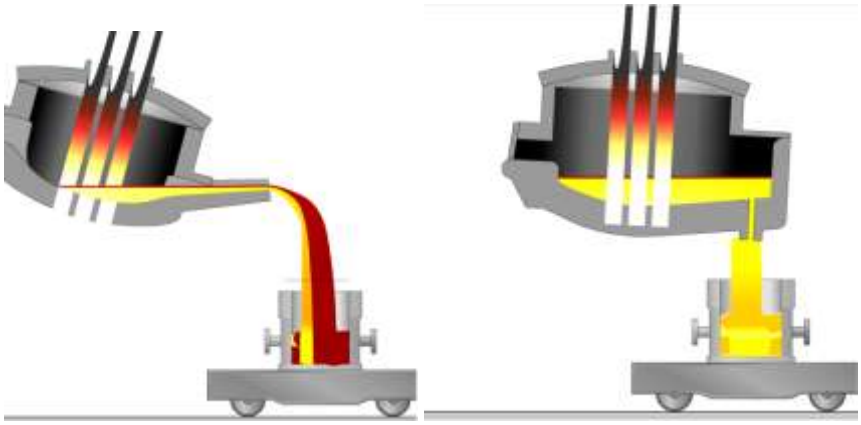
Výroba legovaných ocelí redukční přetavbou s krátkou oxidační rafinací plynným kyslíkem za údobím tavení

Základní časový snímek:



Odpich oceli z EOP

Po dolegování, úpravě teploty a složení strusky je proveden odpich oceli z EOP – klasickým způsobem přes odpichový žlab při náklonu pece nebo s využitím šoupátkových uzávěrů – např. způsobem EBT.



Jednostrusková technologie výroby oceli v EOP

Snaha o zvyšování výrobnosti EOP a snižování měrné spotřeby elektrické energie vedla i ke *zkracování redukčního údobí nebo jeho úplnému vypuštění.*

Vznikla tak celá škála různých technologií, které se liší zejména provedením srážecí desoxidace v závěru oxidační rafinace. Po této desoxidaci již *nenásleduje* klasické redukční údobí. Tyto technologie můžeme tedy označovat jako jednostruskové.

Základní varianta této jednostruskové technologie je charakterizována relativně velkými přísadami hliníku v závěru oxidační rafinace (2-3 kg Al/t oceli). Následuje rozmíchání lázně, přísada vápna, dolegování a odpich.

Jednostruskové technologie nejsou použitelné ve všech případech výroby oceli. Protože u této technologie chybí redukční údobí, ***nelze v peci provádět intenzivní odsíření oceli.*** Pokud není ocelárna vybavena zařízením pro mimopecní odsíření, nelze této technologie použít. Je vhodnější využít intenzifikovaných dvoustruskových technologií.

Určitým problémem této technologie může být i ***zpětný přechod fosforu*** ze strusky do kovu po provedené desoxidaci křemíkem (vznikající produkt desoxidační reakce SiO_2 vytěsňuje P_2O_5 z vazby na CaO, poruší se rovnováha (Si)/[Si] a křemík přechází zpětně do kovu).

Otázky k probranému učivu

1. Základní rozdělení technologie taveb v EOP.
2. Dvoustrusková technologie – charakteristika.
3. Mezitavbová oprava, sázení vsázky, údobí tavení, metalurgické pochody v údobí tavení, elektrický režim.
4. Úkoly oxidačního údobí tavby.
5. Odfosfoření, molekulární a iontová teorie, rozbor podmínek odfosfoření.
6. Oduhličení, homogenní uhlíková reakce, výsledný tepelný efekt, fyzikální podmínky průběhu uhlíkové reakce.
7. Podstata a mechanismu snížení obsahu plynů (vodík, dusík) a nekovových vměstků v oxidačním údobí.
8. Úkoly redukční údobí tavby.
9. Podstata difúzní desoxidace oceli, Nernstův rozdělovací koeficient.
10. Bílá a karbidická struska, chemické složení, výhody a nevýhody.
11. Odsíření oceli v redukčním údobí, molekulární a iontová teorie odsíření, rozbor podmínek odsíření.
12. Legování oceli, hlavní zásady, homogenizace po legování.
13. Jednostrusková technologie, výhody, nevýhody.

TÉMATICKÝ BLOK 8

Termodynamika metalurgických pochodů při oxidační rafinaci vysokochromové taveniny železa

Při oxidaci vysokochromové taveniny železa plynným kyslíkem se oxiduje přítomný uhlík na CO a chrom v tavenině na Cr_3O_4 (případně na Cr_2O_3) podle reakcí:

					ΔG^o_{1873}; cal·mol^{-1}
[C]	**+**	**[O]**	**=**	**CO_g**	–5343 – 9,47·T
$^3/_4$ [Cr]	**+**	**[O]**	**=**	**$^1/_4$ (Cr_3O_4)**	–58047 + 25,48·T

Obě dílčí reakce (oxidace uhlíku a chromu) jsou reakcemi exotermickými. Liší se však teplotní závislostí změny Gibbsovy energie (volné entalpie). Změna ΔG reakce C → CO se vzrůstající teplotou se stává více zápornou (roste afinita) u reakce Cr → Cr_3O_4 se ΔG s teplotou stává kladnější (klesá afinita).

Při určité teplotě probíhá tedy přednostně oxidace uhlíku na CO, uhlík může tedy redukovat i vzniklé oxidy Cr_3O_4 podle výsledné reakce

$$\tfrac{1}{4}(Cr_3O_4) + [C] = \tfrac{3}{4}[Cr] + CO_g \qquad +52704 - 34{,}90\cdot T$$

Rovnovážnou konstantu této reakce lze vyjádřit vztahem

$$K_{C,Cr} = \frac{a_{[Cr]}^{3/4} . a_{CO}}{a_{(Cr_3O_4)}^{1/4} . a_{[C]}}$$

je-li $a_{Cr_3O_4} = 1$, pak další úpravou získáme

$$K_{C,Cr} = \frac{f_{Cr}^{3/4} . [\%Cr]^{3/4} . p_{CO}}{f_C . [\%C]}$$

Z uvedené rovnovážné konstanty lze vyjádřit vztah pro obsah uhlíku v tavenině:

$$[\%C] = \frac{f_{Cr}^{3/4} . [\%Cr]^{3/4} . p_{CO}}{f_C . K_{C,Cr}}$$

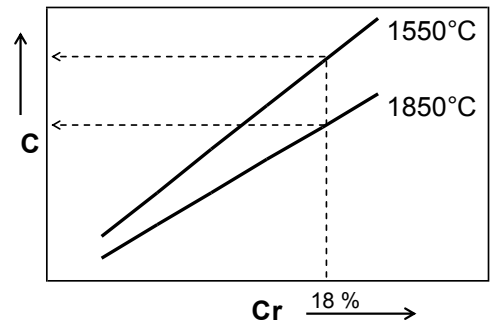
Z tohoto vztahu lze zjednodušeně provést rozbor hlavních termodynamických činitelů ovlivňujících výsledný obsah uhlíku v tavenině při určitém obsahu Cr v tavenině.

Obsah uhlíku po oxidační rafinaci dosáhneme tím nižší, čím bude:

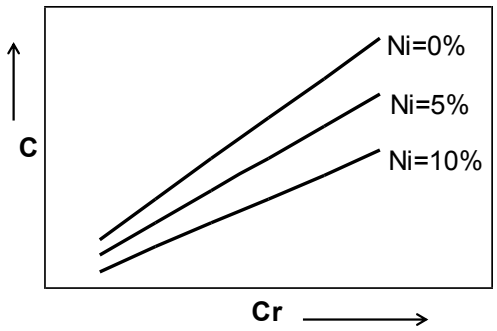
- nižší koeficient aktivity chromu f_{Cr} - aktivitu chromu snižují např. Si, C, zvyšuje např. Ni (e_{Cr}^{Si} = - 0,0043; e_{Cr}^{C} = - 0,12; e_{Cr}^{Ni} = + 0,0002)
- nižší obsah chromu ve výsledné tavenině
- nižší parciální tlak CO v plynné atmosféře
- vyšší koeficient aktivity uhlíku v lázni - aktivitu uhlíku zvyšuje např. Ni, Si, kyslík aktivitu snižuje (e_{C}^{Ni} = + 0,012; e_{C}^{Si} = + 0,08; e_{C}^{O} = - 0,34)
- vyšší hodnota rovnovážné konstanty - jedná se o silně endotermickou reakci, tzn., její vyšší hodnoty dosáhneme při vyšších teplotách.

Vliv teploty, obsahu niklu a p_{CO} na rovnovážné obsahy C a Cr při výrobě vysokolegovaných ocelí

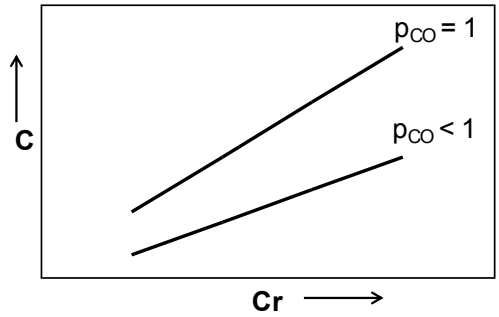
Zákonitosti vyplývající z rovnovážné konstanty lze zobrazit pomocí tzv. Hiltyho-Chipmanových diagramů:



Vliv teploty



Vliv obsahu niklu



Vliv tlaku

Odfosfoření při výrobě vysokolegovaných oceli

Pro odfosfoření vysokochromových tavenin nejsou v podmínkách EOP vytvořeny vhodné podmínky.

Příčiny:

- vysoká teplota při oxidační rafinaci – působí negativně na odfosfoření (zpětná redukce)
- tvorba velmi viskózní chromité strusky - zhoršení kinetiky pochodu
- negativní působení chromu na aktivitu fosforu (e^{Cr}_{P}= -0,044)

Odfosfoření vysokochromových tavenin na principu oxidace fosforu je v EOP silně omezeno. Je proto nutno věnovat zvýšenou pozornost výběru vsázkových surovin.

Redukce oxidů legujících prvků ze strusky do lázně

Redukce Cr_2O_3 (resp. Cr_3O_4) vázaných v těžce tavitelných spinelech chromitých strusek pomocí křemíku lze vyjádřit rovnicí:

$$\mathbf{2\,(Cr_2O_3) + 3[Si] \rightarrow 4[Cr] + 3(SiO_2) \quad \Delta H = -}$$

Vztah pro obsah Cr_2O_3 ve strusce je možno vyjádřit z rovnovážné konstanty reakce:

$$(\%Cr_2O_3) \doteq \left(\frac{a^3_{SiO_2} \cdot a^4_{[Cr]}}{\gamma^2_{Cr_2O_3} \cdot a^3_{[Si]} \cdot K} \right)^{1/2}$$

Obsah Cr_2O_3 ve strusce po provedení redukce bude tím nižší, čím bude

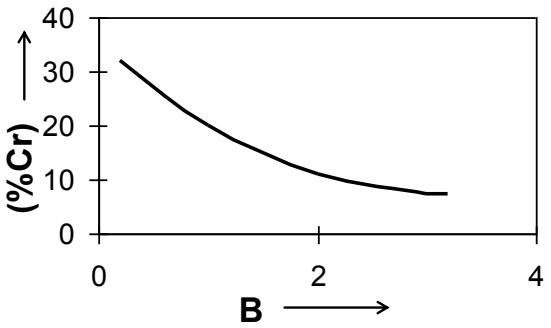
- nižší aktivita SiO_2 ve strusce
- nižší aktivita chromu v kovové fázi
- vyšší hodnota $\gamma_{Cr_2O_3}$
- vyšší aktivita křemíku v lázni
- nižší teplota systému

Přísada redukovadel vede k poklesu obsahu Cr_2O_3, ale i nárůstu obsahu CrO. Příčinou je postupná redukce určitého podílu Cr_2O_3 na CrO. Přitom se tvoří těžce redukovatelná vazba $CrO.SiO_2$:

$$x(CrO) + (SiO_2) \rightarrow (\times CrO.SiO_2)$$

Včasná přísada optimálního množství páleného vápna nejen omezuje tvorbu ($xCrO.SiO_2$), ale snižuje i hodnotu $a_{(SiO_2)}$, což vede k nižším obsahům CrO ve struskách.

Vliv zásaditosti strusky na obsah chromu ve strusce



Legování AK ocelí titanem

„Stabilizované“ AK oceli – přísada Ti na obsah $Ti_{min} = 4 \div 5 \times [\%\ C]$

Působení Ti:

V AK ocelích bez přísady Ti dochází na hranicích zrn k tvorbě karbidů typu $Cr_{23}C_6$. Vznik těchto karbidů je doprovázen snížením obsahu chromu v těsné blízkosti hranic zrn (difúzní proces), což vede ke snížené odolnosti těchto hranic vůči *mezikrystalové korozi*. Přísada titanu vede k tvorbě karbidů titanu TiC, které i při tuhnutí zůstávají rozptýleny poměrně rovnoměrně v matrici, a tedy k zamezení tvorby škodlivých karbidů chromu.

Přísada titanu se provádí v závěru redukčního údobí (26 % FeTi) nebo do pánve v průběhu odpichu (70 % FeTi, s ohledem na tepelnou bilanci).

CrNi nerezavějící ocel stabilizovaná titanem má sklon k tvorbě vad, způsobených zejména shluky (po přetváření řádky) nekovových vměstků, sestávajících nejen z oxidů, ale zejména z karbonitridů $Ti(C_xN_y)$, které se heterogenně vylučují na oxidech Al.

Řešení:

- výroba oceli s podstatně nižšími obsahy uhlíku a dusíku (AOD, VOD).
- stabilizace pomocí Nb
- modifikace vznikajících nekovových vměstků přísadou vápníku -vápník modifikuje oxidy hliníku na vápenatohlinitanové globulární vměstky, na kterých obtížněji probíhá heterogenní nukleace karbonitridů titanu.

Výroba oceli v kyselých obloukových pecích

Kyselé EOP (EOP s kyselou vyzdívkou) ve slévárnách jsou ještě rozšířeny v USA a to zejména u menších pecních jednotek 7 až 8 t. V ČR kyselá pec už není.

Vyzdívka kyselé pece může být zhotovena z dinasových tvárnic. Často se místo dinasové vyzdívky stěny pece dusají na šablonu křemičitým pískem pojeným vodním sklem, případně se do dusací směsi mohou přidávat žáruvzdorné jíly. Stejnou směsí se pec opravuje.

Víka jsou vyzděny z dinasu stejným způsobem jako na zásaditých pecích. Životnost dinasového víka na kyselých pecích je vyšší.

Vyzdívky na bázi oxidu křemičitého reagují s prvky s vyšší afinitou ke kyslíku, než má křemík (Al, Ti a při vyšších teplotách i s uhlíkem). V kyselých pecích po snížení aktivity kyslíku pod hodnotu, která za daných podmínek odpovídá rovnováze s křemíkem, může tedy kyslík přecházet z vyzdívky do oceli. V kyselých pecích nelze proto dosáhnou snížení aktivity kyslíku na hodnoty dosažitelné v zásaditých pecích. Tato skutečnost má vliv na mechanické vlastnosti vyrobené oceli.

Přednosti kyselých obloukových pecí ve srovnání s pecemi zásaditými

- ocel vyrobená v kyselé obloukové peci má nižší obsah plynů (zejména vodíku),
- objem vad odlitků způsobených bublinami a bodlinami je obvykle nižší,
- nižší zpracovací náklady až o 20 %, které jsou způsobeny:
    - nižšími náklady na žáruvzdorný materiál (vyzdívka i materiál na opravy vyzdívky),
    - nižší spotřebou elektrické energie, která je způsobena nižší tepelnou vodivostí kyselé vyzdívky a kratší dobou tavby,
    - nižší spotřebou grafitových elektrod vyplývající z kratší doby tavby,
    - nižšími náklady na nekovové přísady,
    - nižší náklady na odvoz a skládkování strusky, které v kyselých obloukových pecích vzniká menší množství.

Nevýhody kyselých obloukových pecí

- nutnost zpracování vsázky o zaručeném a vyhovujícím obsahu fosforu a síry.
- výrobní sortiment ocelí pro kyselé obloukové pece je omezen na nelegované a nízkolegované značky ocelí - v těchto pecích nelze vyrábět vysokolegované chromové a manganové oceli.

Otázky k probranému učivu

1. Termodynamika metalurgických pochodů při oxidační rafinaci lázně s vysokým obsahem Cr, rozbor podmínek oxidační rafinace.
2. Hiltyho a Chipmanovy diagramy, využití v praxi.
3. Odfosfoření při výrobě vysokolegovaných oceli.
4. Redukce oxidů legujících prvků ze strusky do lázně.
5. Legování titanem, stabilizované oceli, podstata vzniku mezikrystalové koroze.
6. Výroba oceli v kyselých obloukových pecích, přednosti a nedostatky.

TÉMATICKÝ BLOK 9

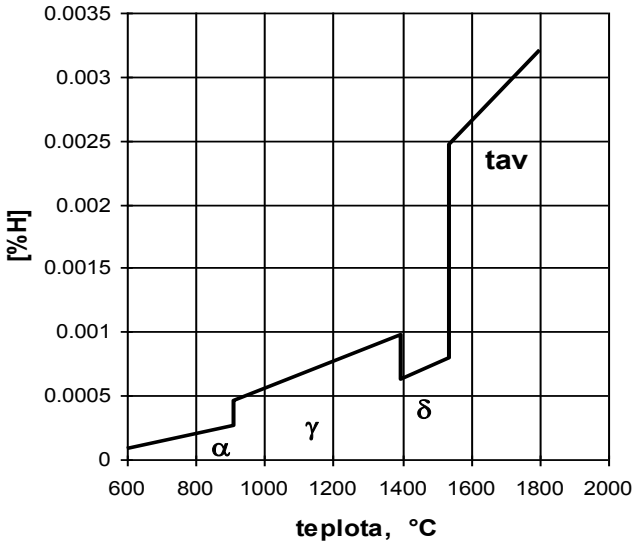
Chování vodíku a dusíku v průběhu tavby v EOP

Negativní působení - vločky, bubliny, vodíkem vyvolané praskání (HIC), vodíková křehkost (HE), stárnutí oceli ad.

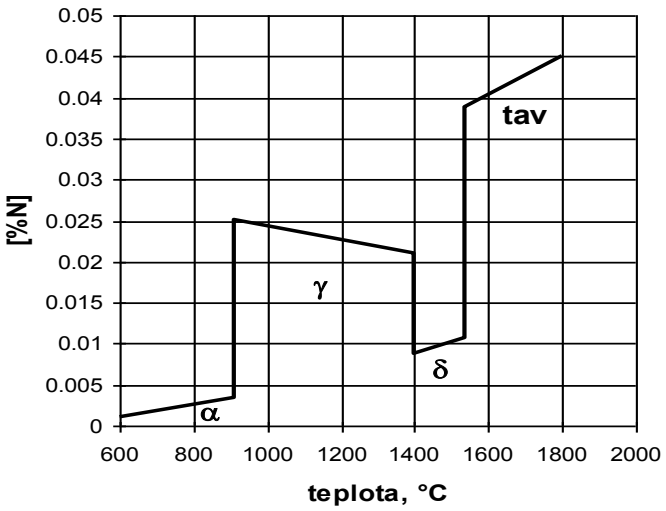
Legování dusíkem – zvýšení pevnosti, žárupevnosti, náhrada Ni (austenitotvorný).

Přechod vodíku a dusíku během tavby v EOP – vliv oblouků, disociace molekul plynů na atomy N a H, rozpouštění v lázni.

Rozpustnost vodíku v železe



Rozpustnost dusíku v železe



Přechod vodíku do oceli přes strusku

Jedná se o významnější mechanismus než přechod vodíku do lázně pod oblouky. Proces lze popsat pomocí dvou následujících dějů.

1. Rozpouštění vodíku ve strusce:

$$\{H_2O\} + (O^{2-}) = 2\,(OH^-)$$

Rovnovážná konstanta reakce:

$$K_{H,O} = \frac{a_{OH^-}^2}{a_{O^{2-}} \cdot p_{\{H_2O\}}}$$

$$a_{OH^-} = \sqrt{K_{H,O} \cdot a_{O^{2-}} \cdot p_{\{H_2O\}}}$$

- zvýšení aktivity kyslíkových aniontů ve strusce vede k lepšímu rozpouštění vodíku ve strusce za tvorby komplexních hydroxylových aniontů OH^-

2. Difúze vodíku do ze strusky do kovové lázně

$$2\,(OH^-) - 2e = 2[O] + 2[H]$$

$$(Fe^{2+}) + 2e = [Fe]$$

$$2\,(OH^-) + (Fe^{2+}) = 2[O] + 2[H] + [Fe]$$

- Chemické složení strusky má nesporný vliv na rozpustnost vodíku, a tím i na jeho obsah v lázni. Nejlépe chrání taveninu kyselé strusky (nízká aktivita O^{-2} následkem vzniku komplexních aniontů SiO_4^{4-}), nejhůře silně vápenaté s nízkým obsahem FeO (vysoká aktivita O^{2-}).
- Vliv na přechod vodíku má i viskozita strusky – vysoká viskozita zhoršuje průběh přechodu.
- Zdroje vodíku – ocel. odpad (vlhkost, rez), struskotvorné přísady, vápno (hygroskopické vlastnosti)

Rozpouštění dusíku v tavenině železa

$$N_2 \rightarrow 2\,[N]$$

$$[N] = \sqrt{\frac{K \cdot p_{N_2}}{f_N^2}}$$

Proces rozpouštění dusíku v tavenině železa bude výraznější:

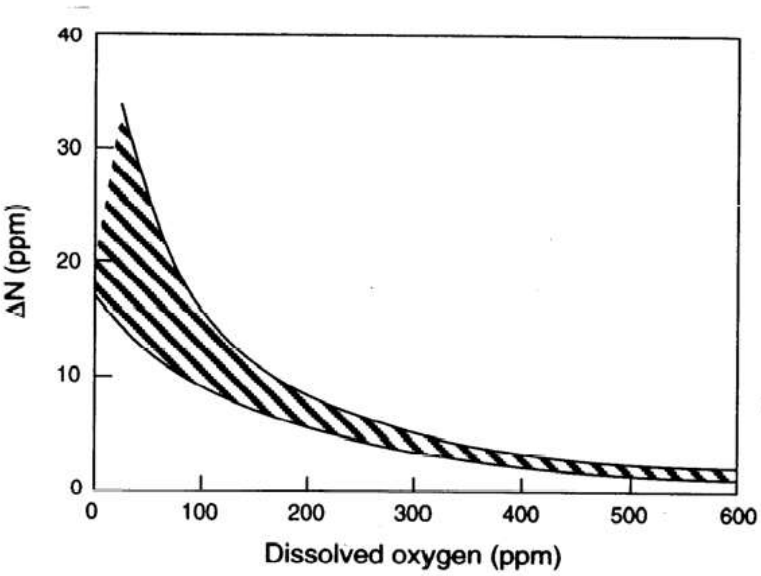
- při vyšších hodnotách p_{N_2},
- při vyšších hodnotách rovnovážné konstanty K (tzn. vyšší teplotou - proces rozpouštění dusíku je endotermického charakteru)
- při menších hodnotách f_N,

Rozpustnost dusíku v čistém železe při 1600 °C je 0,0450 % (450 ppm). Chrom rozpustnost dusíku v železe zvyšuje (e_N^{Cr} = -0,045), nikl ji snižuje (e_P^{Ni} = 0,010). V nerezavějící oceli 18/8 je rozpustnost dusíku značně vyšší (cca 0,250 %).

Intenzitu přenosu dusíku do lázně bude dále ovlivňovat hodnota součinitele difúze dusíku, tloušťka difúzní vrstvy, plocha styku fází a složení kovové lázně. Celkově však ve srovnání s vodíkem je rychlost přenosu dusíku s plynné fáze do kovové lázně 4 až 6 krát nižší, což souvisí s nižšími hodnotami součinitele difúze dusíku v roztaveném železe ve srovnání s vodíkem ($D_N = 5{,}5 \cdot 10^{-9}\ m^2 \cdot s^{-1}$, $D_H = 3{,}5 \cdot 10^{-7}\ m^2 \cdot s^{-1}$).

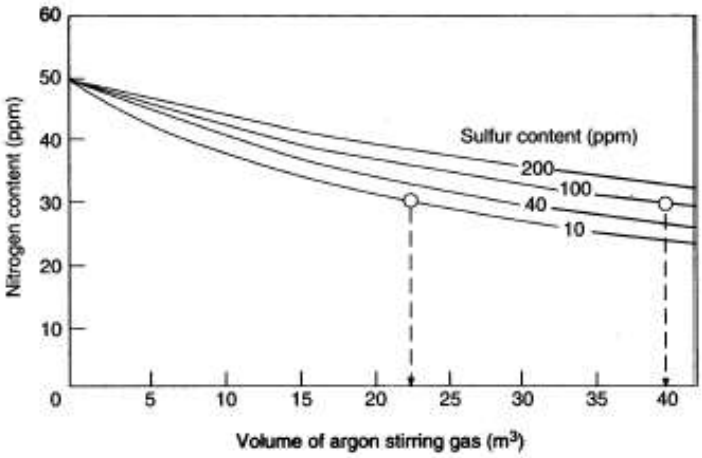
Nutno si však uvědomit, že tato skutečnost současně znesnadňuje odstraňování dusíku z lázně v průběhu jejího vakuování nebo oduhličení.

Vliv obsahu kyslíku v lázni na „pick-up“ dusíku během odpichu



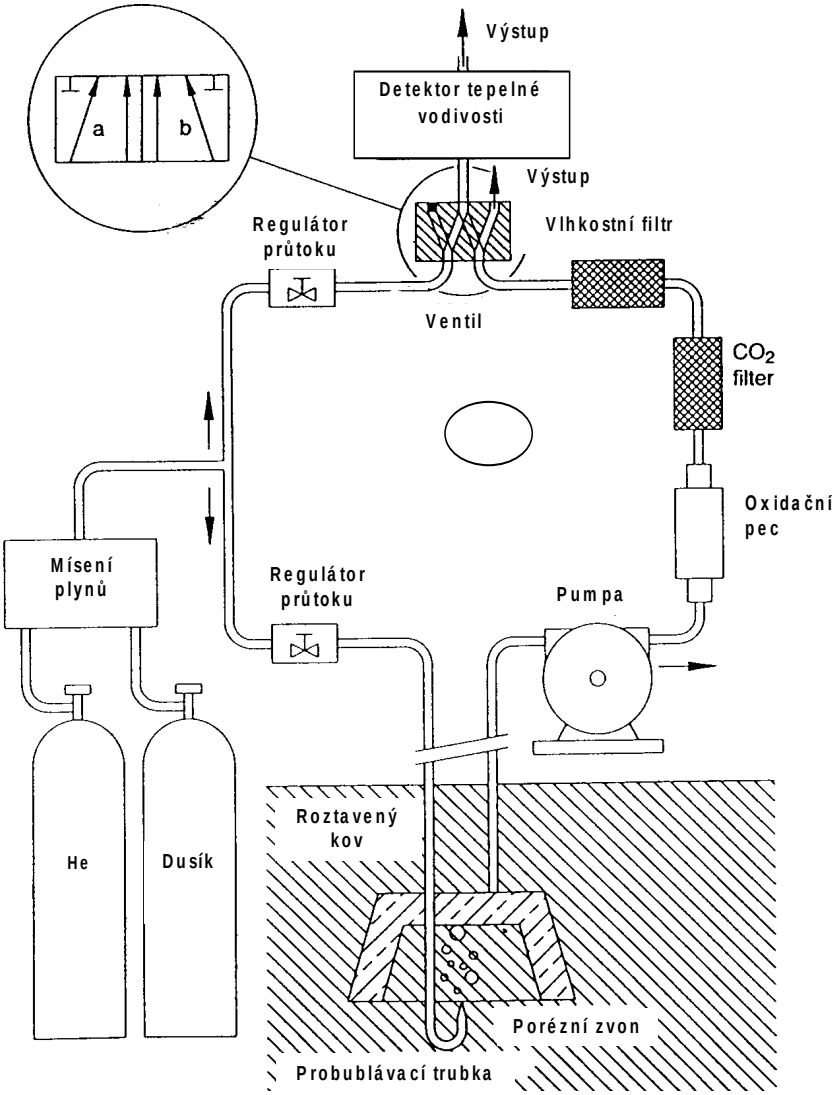
Kyslík a síra jsou (rovněž jako dusík) povrchově aktivní prvky a jejich přítomnost na povrchu taveniny působí při rozpouštění dusíku kineticky retardačně, neboť jejich atomy obsazují reakční místa potřebná pro disociovaný dusík, a tím značně snižují rychlost reakce rozpouštění dusíku v kovu.

Vliv obsahu síry v lázni a objemu dmýchaného Ar během vakuování RH na pokles obsahu dusíku v oceli



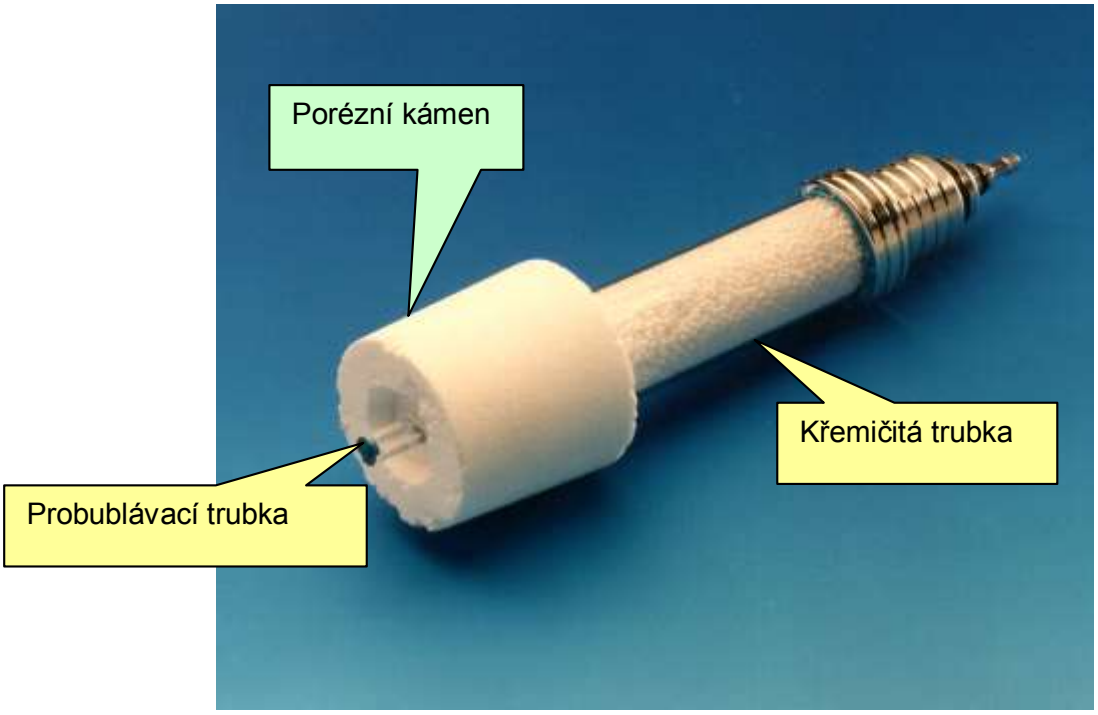
Při nízkých obsazích síry (< 10ppm) a za současného intenzivního míchání oceli, se během vakuování může obsah dusíku snížit velmi výrazně (síra „neblokuje“ přenos dusíku přes mezifázovou hranici kov – plyn).

Schéma zařízení NITRIS na přímé stanovení obsahu dusíku v roztavené oceli



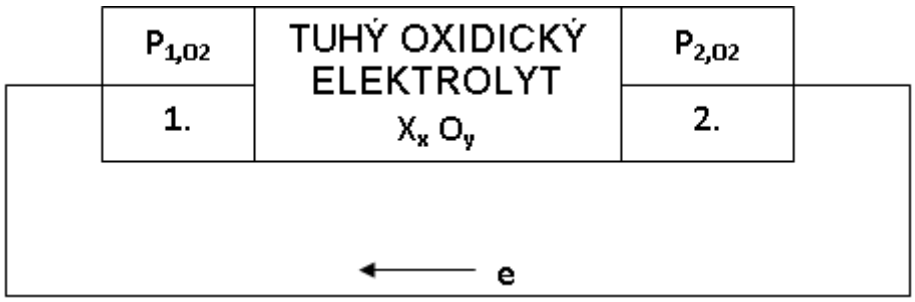
- Do lázně je pomocí porézní tvárnice dmýchán nosný plyn (helium), který průchodem taveninou pohltí určité množství dusíku rozpuštěného v lázni.
- Dmýchané helium s určitým podílem dusíku je po tomto průchodu jímáno speciálním krytem a vedeno do vyhodnocovací jednotky, ve které se měří pomocí detektoru její tepelná vodivost a je vypočteno složení referenční směsi N_2-He, která se v následné fázi měření přivádí do lázně a rovněž do detektoru.
- Na konci této fáze měření se obsah dusíku ve výsledném plynu porovná s obsahem dusíku v referenčním plynu. Je-li rozdíl malý, je tím určen obsah dusíku a celý postup jeho stanovení je ukončen. Pokud tomu tak není, je zapotřebí provést další zpřesňovací propočet složení referenčního plynu pro nové dmýchání.

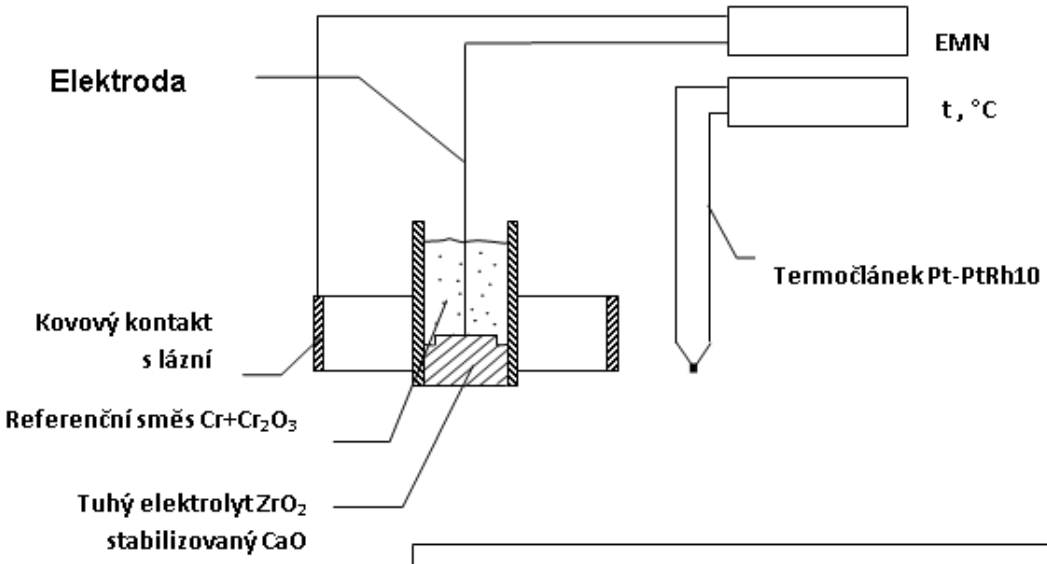
Hlavice sondy HYDRIS (NITRIS) před konečnou montáží do lepenkové trubky



Měření aktivity kyslíku v roztavené oceli

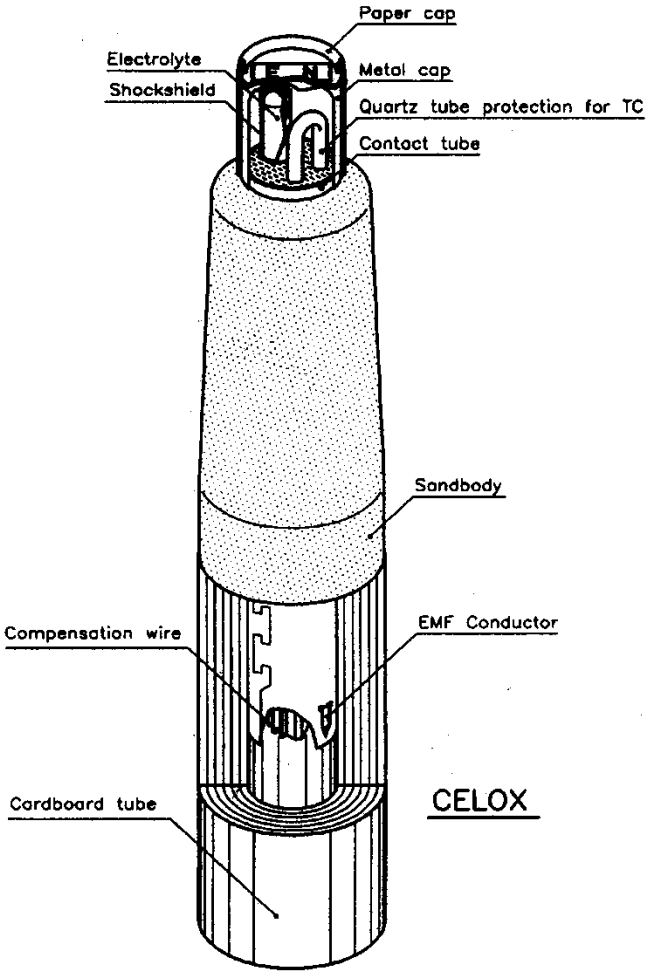
Přímé měření aktivity kyslíku v roztavené oceli je založeno na principu elektrochemického koncentračního článku, který se skládá ze dvou kovových elektrod, umístěných ve dvou prostředcích s různým obsahem kyslíku a oddělených tuhým elektrolytem. Elektrolyt z oxidu nebo tuhého roztoku oxidů o vysokém bodu tání musí v daném rozmezí koncentrací kyslíku vykazovat iontovou vodivost (resp. vodivost aniontů kyslíku). Za těchto podmínek, a jestliže je známa aktivita kyslíku nebo parciální tlak kyslíku referenčního zdroje, lze s využitím Nernstova vztahu stanovit aktivitu kyslíku v měřeném prostředí.





$$\log a_{[O]} = 4{,}51595 - \frac{13272{,}349 - 10079{,}906E}{T}$$

Provedení sondy "CELOX" pro měření aktivity kyslíku v roztavené oceli



Automatizace řízení výroby oceli v EOP

Řízení elektrického příkonu a tepelného režimu

- vytvořit potřebné teplotní podmínky v lázni pro optimální průběh metalurgických pochodů a pro dosažení požadované odpichové teploty.
- řízení energetického režimu v údobí tavení (nejvyšší spotřeba el. energie) - statický model × dynamický model
- Nejjednodušším (ale taky překonaným) je ovládání energetického režimu podle pevně stanoveného časového programu. Další skupina propracovaného způsobu řízení je založena na spotřebování určitého, předem stanového množství elektrické energie. Tyto způsoby nezaručují optimální řízení režimu EOP.

Řízení metalurgického režimu tavby

- optimalizace složení vsázky i stanovení přísad pro desoxidaci a legování pomocí systému bilančních rovnic řešených pomocí výpočetní techniky (PC). Cílem je zajistit požadované složení vyráběné oceli při minimálních nákladech na vsázky a legury.
- automatizace režimu tavby je závislá na dostatku údajů o chemickém složení lázně, její teplotě, složení odcházejících spalin, poměru CO/CO_2 ve spalinách apod. Moderní jednotky mají již zabudovaný systém řízení např. polohování palivokyslíkových hořáků, které se používají pro urychlení natavování vsázky nebo pro řízení přebytku kyslíku u dospalovacích trysek v závislosti na složení spalin apod. Některé firmy využívají rovněž řízení na základě neuronových sítí – tzv. umělé inteligence, které mají samoučicí vlastnosti (např. kanadský systém EFSOP – Expert Furnace System Optimization Process – využívající řízení optimalizace spalování doplňkových paliv v reálném čase). Na druhé straně řada zejména menších a starších jednotek tyto možnosti nevyužívá a hlavním faktorem řízení je zde člověk.

Operativní řízení výroby oceli v elektroocelárně

- je to v podstatě organizační, řídící a koordinační činnost všech pracovišť elektroocelárny s cílem zajistit maximální výkon v požadované kvalitě a při minimálních nákladech.

Otázky k probranému učivu

1. Vodík v tavenině železa, rozpustnost vodíku, vliv vodíku na vlastnosti oceli.
2. Termodynamika přechodu vodíku z pecní atmosféry přes strusku do kovu, rozbor podmínek.
3. Zdroje vodíku a možnosti jeho odstranění z tekuté oceli.
4. Dusík v tavenině železa, rozpustnost dusíku, vliv dusíku na vlastnosti oceli.
5. Přechod dusíku do kovové lázně v podmínkách EOP.
6. „Pick up“ dusíku během odpichu, metalurgické možnosti jeho snížení.
7. Určování dusíku obsahu dusíku v roztavené oceli sondami „NITRIS“, princip měření, využití měření.
8. Měření teploty ponornými termočlánky a měření solidifikační teploty.
9. Princip měření aktivity kyslíku v tekuté oceli, provedení kyslíkových sond.
10. Automatizace řízení výroby oceli v EOP, řízení elektrického příkonu a tepelného režimu, řízení metalurgického režimu tavby, operativní řízení výroby oceli v elektroocelárně.

TÉMATICKÝ BLOK 10

Stejnosměrné obloukové pece

V současné době vedle sebe existují EOP napájené střídavým proudem a rovněž i konstrukčně „mladší“ EOP napájené stejnosměrným proudem. Jejich vývoj a zavádění do provozu započal v 70 až 80. létech minulého století a vyznačují se celou řadou originálních konstrukčních prvků.

Při vývoji stejnosměrných pecí byly využity zejména poznatky:

- z provozování UHP a SUHP pecí
- ze silnoproudé polovodičové techniky nutné pro konstrukci robustních usměrňovačů střídavého proudu na stejnosměrný proud
- z vývoje nových elektricky vodivých žáruvzdorných materiálů vázaných uhlíkem pro výrobu půdních elektrod

Vybavení elektrické části stejnosměrné obloukové pece:

- pecní transformátor
- diodový nebo tyristorový usměrňovač na sekundární straně transformátoru
- tlumivky – na primární i sekundární straně transformátoru
- grafitová elektroda (katoda - připojena na záporný pól usměrňovače)
- půdní elektroda (anoda - připojena na kladný pól usměrňovače)
- regulace elektrody

Stejnosměrná oblouková pec s jednou elektrodou

Pecní transformátor

Je konstruován obdobně jako u střídavých pecí. Jeho úkolem je snížit napětí napájecí sítě na provozní napětí obloukové pece pro požadované proudové zatížení.

Tlumivky

Jsou zařazovány jednak na

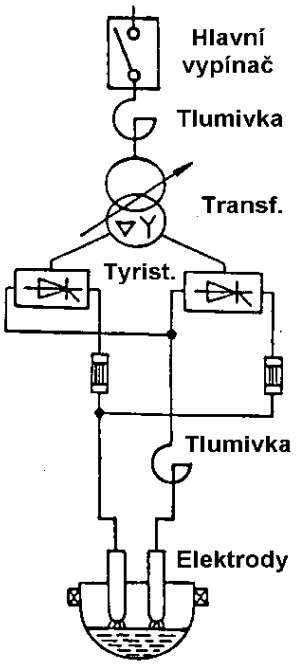
- primární (vysokonapěťové) straně transformátoru - omezuje proudové nárazy do napájecí sítě.
- sekundární straně transformátoru (za usměrňovačem - někdy se označuje jako stejnosměrná tlumivka) - vyhlazuje stejnosměrné napětí a chrání usměrňovací diody (nebo tyristory) proti nadměrným zkratovým proudům.

Usměrňovač střídavého proudu

Je tvořen blokem řádově desítek až stovek chlazených vysokoproudových diod nebo tyristorů, které jsou sériovo-paralelně zapojeny s ohledem na rozložení proudového zatížení, které celkově představuje podle velikosti pece 40 až 140 kA.

Kladný pól usměrňovače je připojen na tzv. půdní elektrodu (půdní anodu), záporný pól (katoda) usměrňovače je připojen na grafitovou elektrodu.

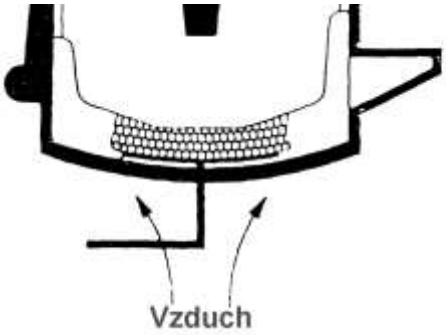
Blokové schéma zapojení stejnosměrné obloukové pece s dvěma elektrodami



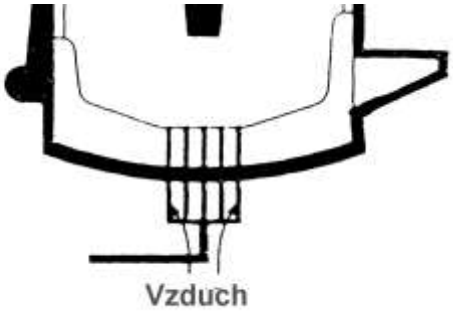
Schematické znázornění jednotlivých typů půdních anod stejnosměrných obloukových pecí

Kladný pól usměrňovače je připojen na půdní elektrodu (půdní anodu)

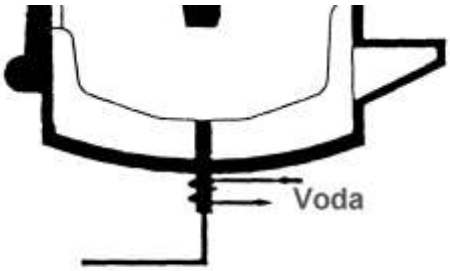
Elektricky vodivá vyzdívka



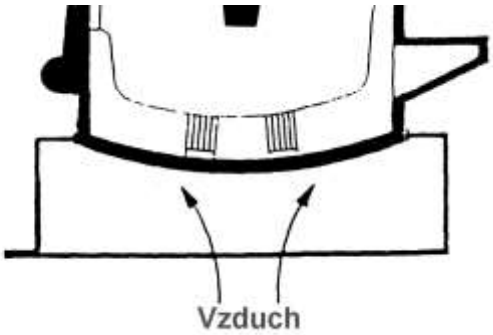
Tyčová půdní anoda



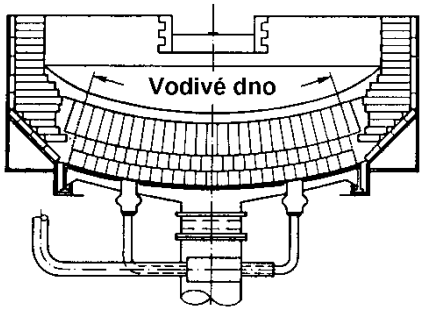
Sochorová půdní anoda



Žebrová půdní anoda

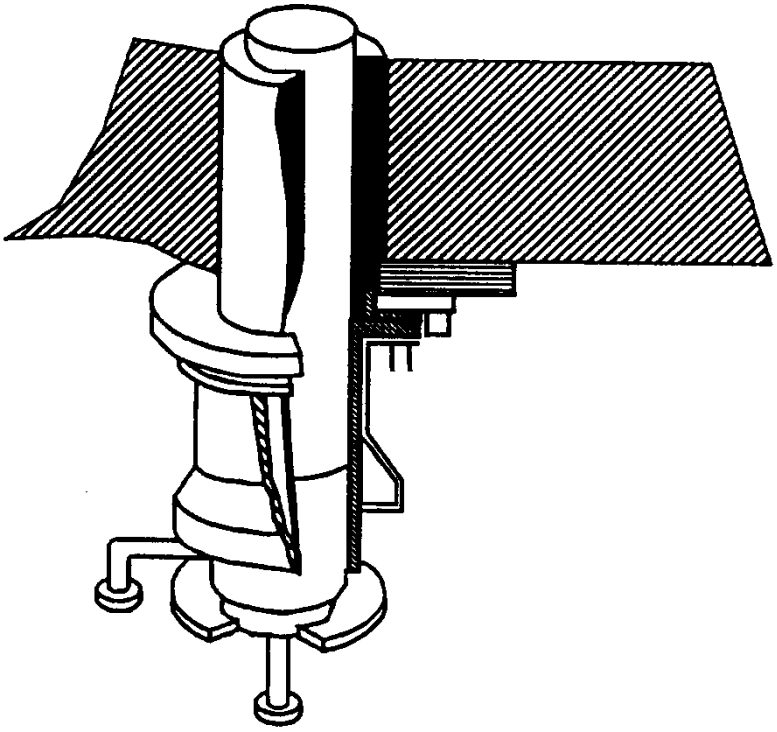


Elektricky vodivá vyzdívka dna ve stejnosměrné obloukové peci



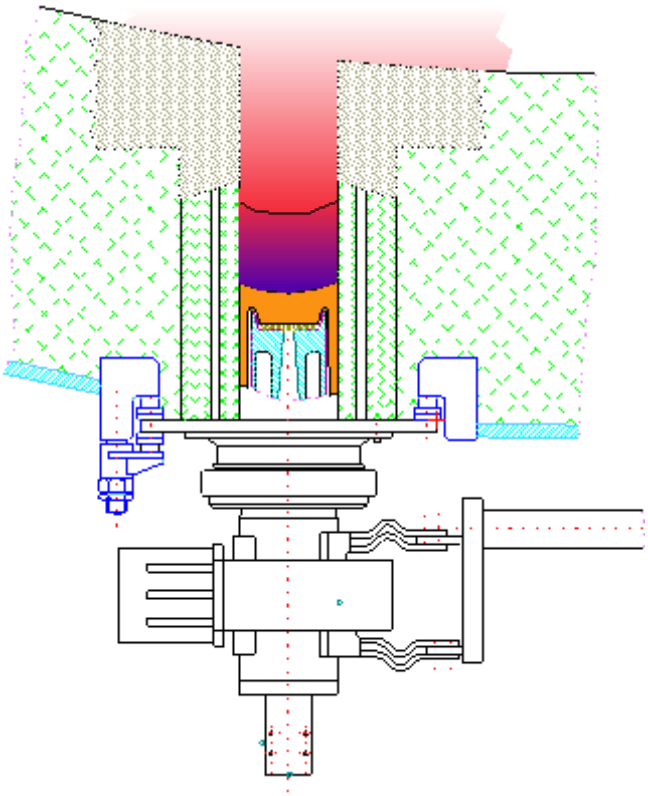
- Žáruvzdorné materiály obsahující uhlík (grafitomagnezit apod.)
- Dostatečně dimenzovaná plocha vodivé vyzdívky
- Při poddimenzované ploše stoupne přechodový odpor a zvýší se celkové elektrické ztráty, které se přemění na ohřev vyzdívky (podle vztahu $P = I^2 \cdot R = U^2/R$) poškození vyzdívky
- Přenos elektrického proudu z vyzdívky - měděná půdní kontaktní deska

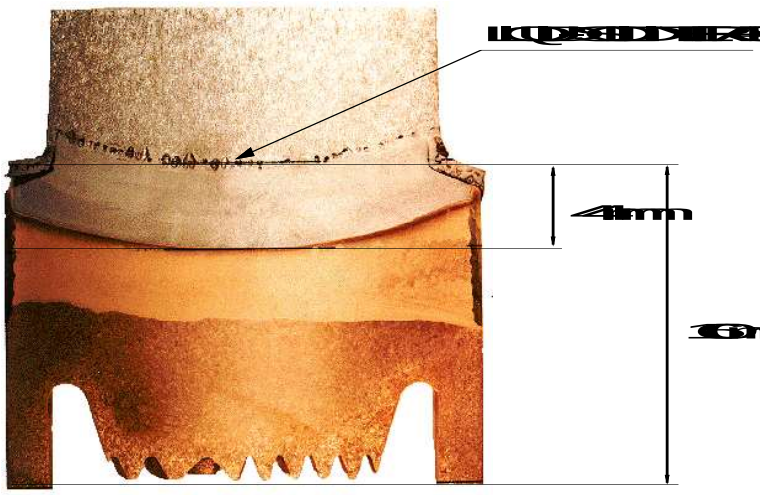
Půdní anoda sochorového typu firmy CLECIM (billet type anode)



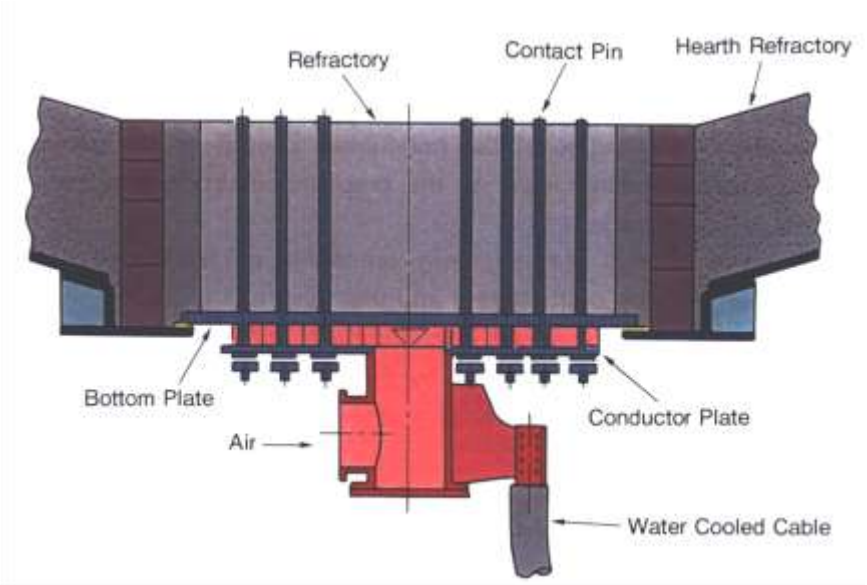
- Kompaktní ocelový sochor o průměru 100 až 150 (250) mm, který je umístěný ve vodou chlazeném měděném pouzdru (až pod vyzdívkou), jež zabezpečuje účinné chlazení elektrody podobně jako krystalizátor u plynulého odlévání oceli.
- Část sochoru ve vyzdívce je umístěna ve speciálním žáruvzdorném materiálu. Horní část sochoru je tedy natavená a zprostředkovává styk s lázní a vedení proudu. Chlazení musí být dimenzované tak, aby nedošlo k roztavení celého sochoru uvnitř pouzdra.
- Uvedený typ půdní elektrody má životnost až 1300 taveb a obvykle se používají 1 až 4 půdní elektrody při 1 až 3 grafitových elektrodách.

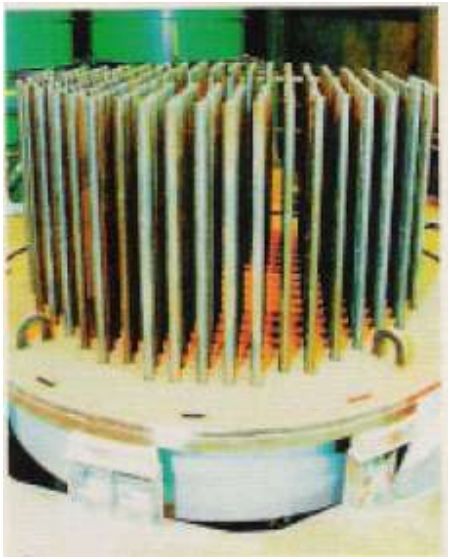
Půdní anoda sochorového typu firmy Danieli





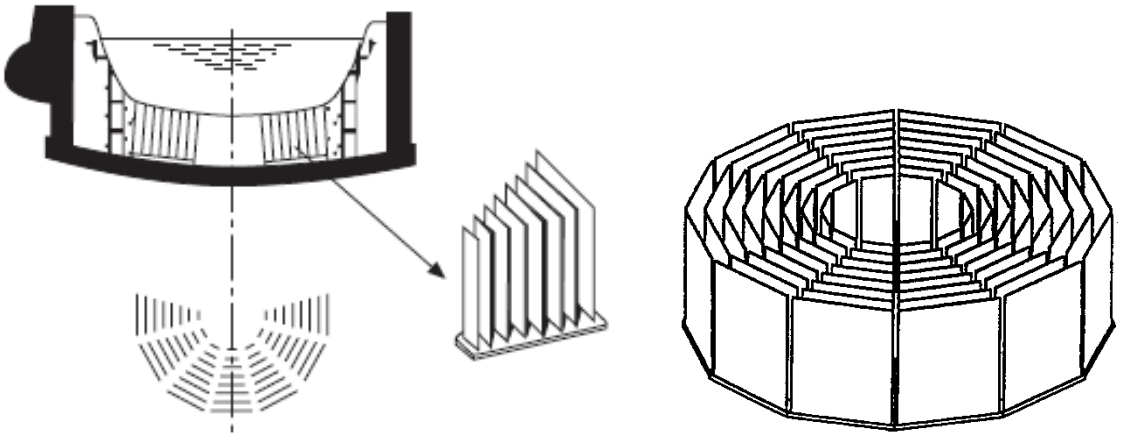
Tyčová půdní anoda





- Velký počet ocelových tyčí - contact pin (např. 150 až 400 tyčí o průměru cca 45 mm), které jsou uspořádané do válce, jenž prochází přes dno pece.
- Mezery mezi tyčemi jsou zaplněny žáruvzdornou, obyčejně magnezitovou výduskou.
- Spodní část tyčí je spojena v kontaktní desce, která je dále připojena na anodovou stranu usměrňovače.
- Odvod tepla z půdní elektrody je zabezpečen nuceným prouděním ochlazovacího vzduchu mezi spodní částí odkrytých ocelových tyčí. Horní část tyčí je v kontaktu s ocelovou lázní.
- Opotřebení tyčí je shodné s opotřebením žáruvzdorného materiálu. V kombinaci s pěchovaným magnezitem je životnost tohoto typu půdní elektrody více než 800 taveb. Při výměně je anoda odstraněna jako celek pomocí hydraulického válce umístěného pod pecí a je nahrazena anodou novou.

▪ Půdní anoda žebrového typu firmy VOEST ALPINE

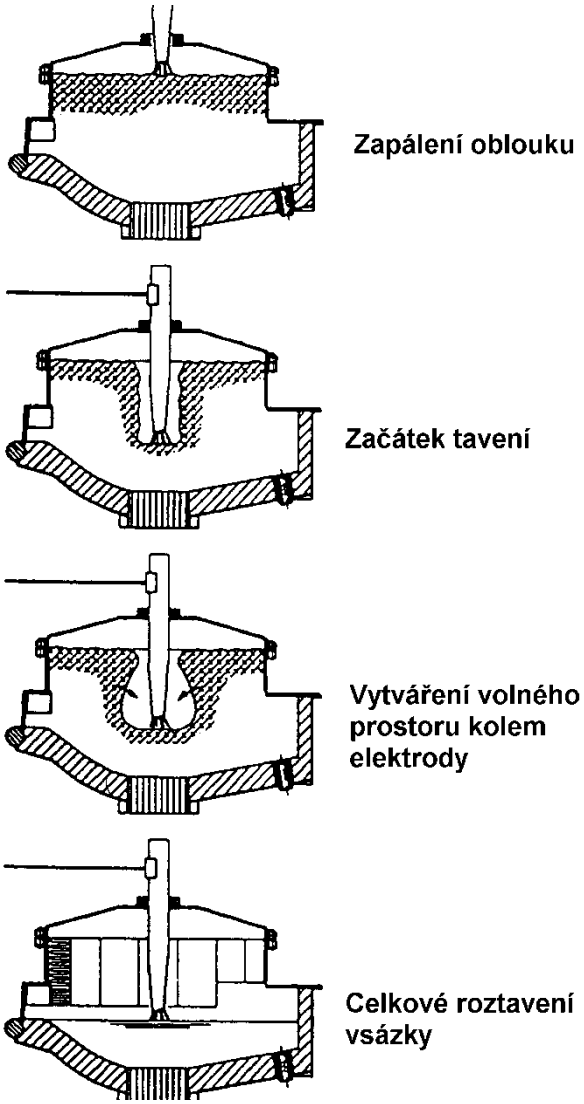


- Tenké (1,7 mm) ocelové desky, které jsou prstencovitě uspořádané ve dně pece a ve spodní části jsou navařeny na ocelovou sběrnici, která dosedá na spodní základnu spojenou s vedením od usměrňovače.
- Prostory mezi jednotlivými prstenci (cca 7 až 10 cm) jsou vyplněny monolitickou elektricky nevodivou magnezitovou hmotou.
- Výhody: velký aktivní povrch desek, dokonalé chlazení materiálem výdusky, není vyžadováno dodatečné chlazení vzduchem nebo vodou tak jako u ostatních typů půdních anod.
- Výhodou je rovněž stejnoměrné rozložení proudu přes velkou plochu ve dně nístěje, což dovoluje klidný a rovnoměrný přenos proudu přes taveninu. Příčná plocha desek je dostatečně proudově dimenzována.
- Opotřebení desek je asi 0,3 až 0,5 mm/1 tavbu.

Chování elektrického oblouku ve stejnosměrných EOP

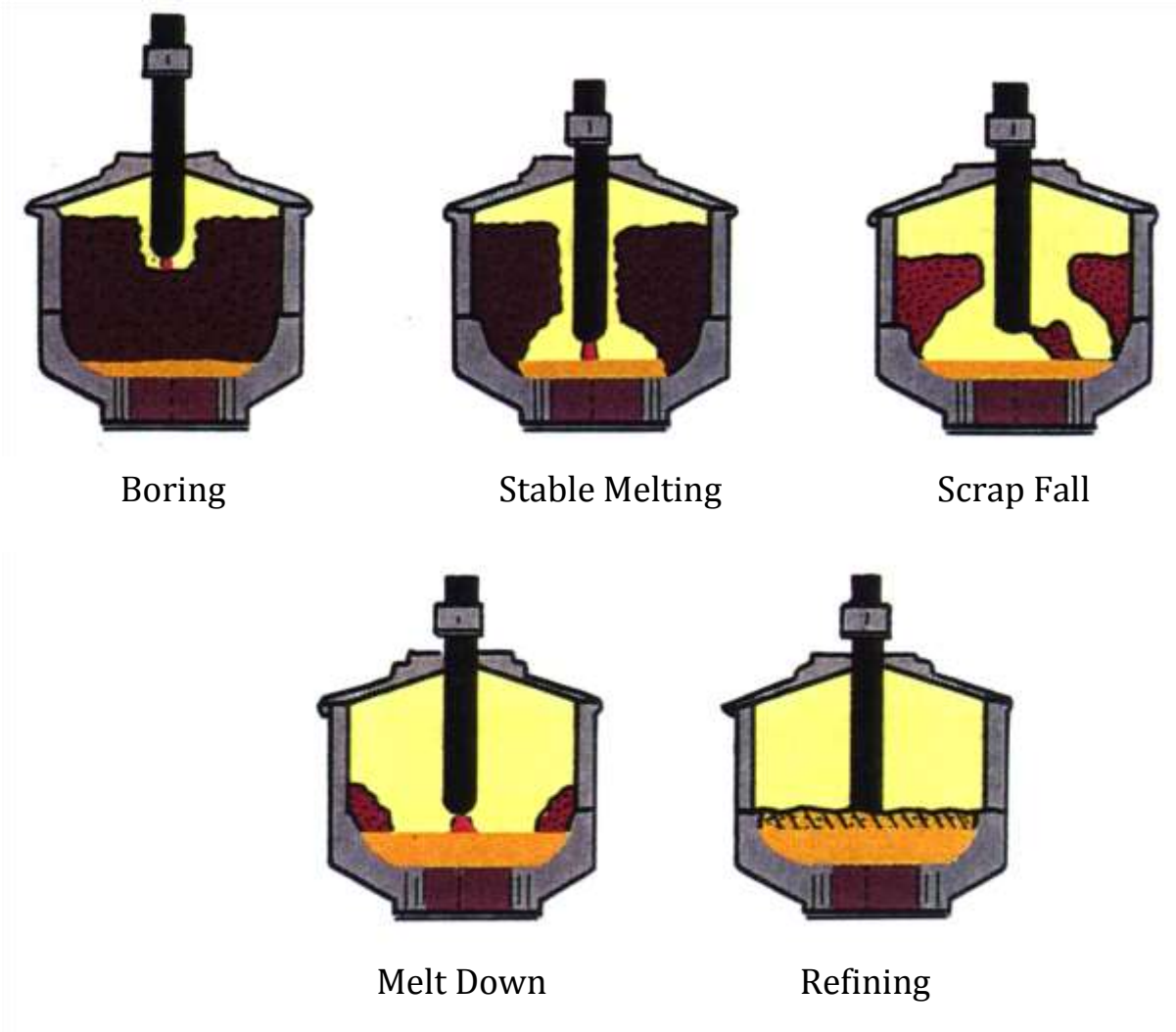
- menší vychylování oblouků směrem ke stěnám pece – cca 15 až 30°.
- změna tvaru oblouku - přímý, lomený, difúzní apod.
- větší stabilita - napětí na oblouku neprochází nulou

Průběh tavení vsázky ve stejnosměrné obloukové peci



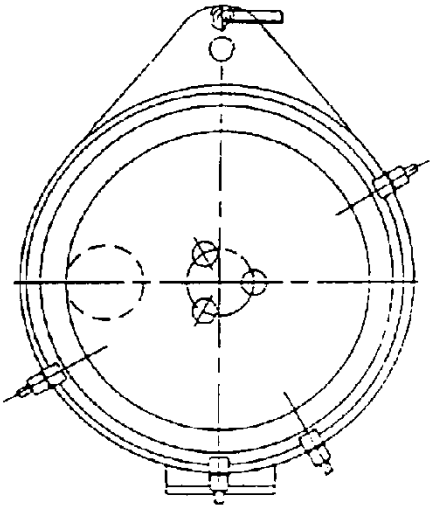
- Po zapálení oblouku se vytváří pod obloukem prázdný prostor (tzv. „studna“) a to téměř až ke dnu pece. Následkem hoření oblouku se kolem elektrody vytvoří kulový volný prostor z odtaveného materiálu.
- V důsledku centrálního umístění elektrody a svislého směru oblouku se vytváří jediný koaxiální prostor distribuce tepla do okolí. Na stěnách se tedy nevytváří „horké skvrny“, které jsou běžné u tříelektrodových střídavých EOP.
- Perioda, ve které je oblouk obklopen neroztaveným šrotem, je u stejnosměrných pecí delší než u střídavých, což vede k nižším ztrátám tepla stěnami a víkem a k jejím nižším opotřebením. To vytváří podmínky pro tavení s extrémně dlouhým obloukem (při U = 650 V, l až 700 mm), který značně urychluje tavení šrotu.

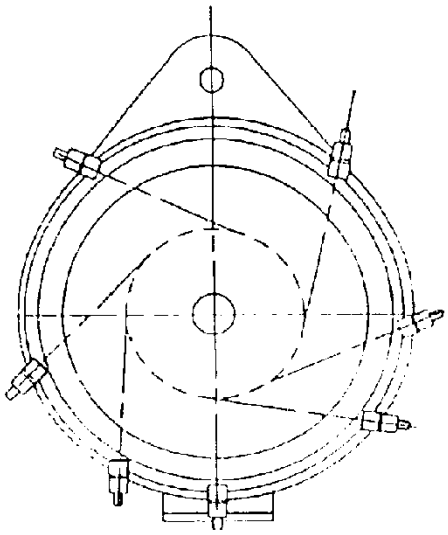
Postup natavování vsázky ve stejnosměrné EOP NKK



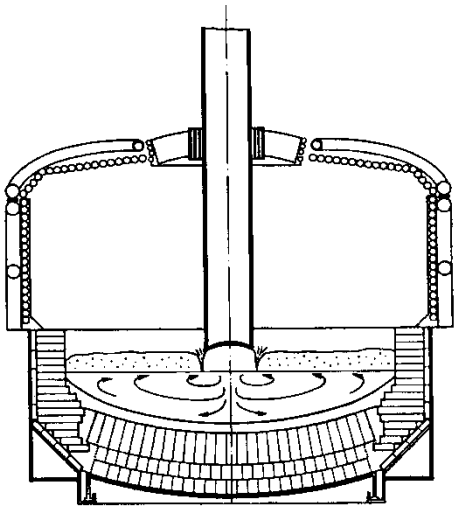
Použití přídavných hořáků na zemní plyn u střídavých a stejnosměrných obloukových pecí

Spotřebu elektrické energie lze snížit použitím přídavných hořáků na zemní plyn. Tyto hořáky by měly být instalovány tangenciálně, aby plamen nezasahoval do oblasti oblouku a nerušil jeho hoření.





Proudění ocelové lázně ve stejnosměrné obloukové peci

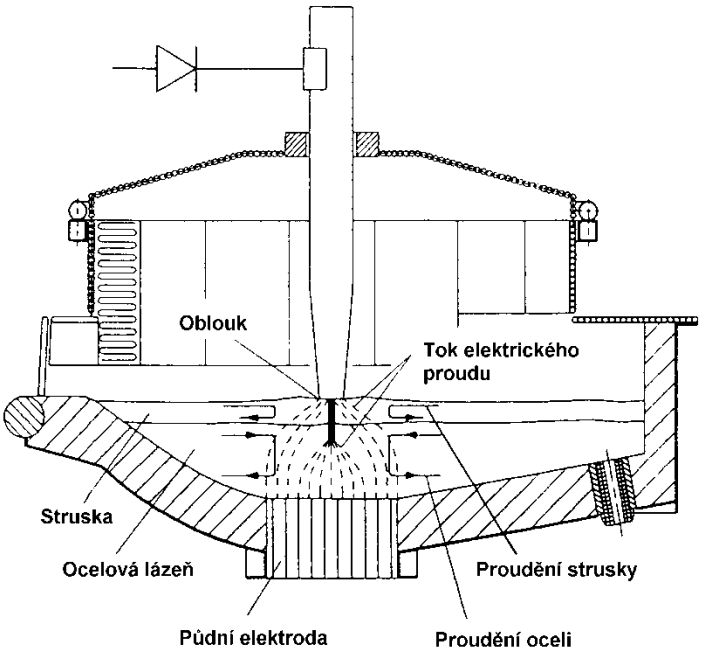


Míchání lázně ve stejnosměrné peci je z metalurgického hlediska velmi příznivé hlavně z těchto důvodů:

- zvyšuje se rychlost a účinnost metalurgických reakcí na rozhraní struska-kov
- zlepšuje se řízení odpichové teploty
- odběr vzorků během tavení je reprezentativnější

U velkých DC EOP je nutno zabezpečit míchání dmýcháním inertního plynu dnem nístěje nebo použitím elektromagnetických míchačů.

Proudění ocelové lázně a strusky ve stejnosměrné obloukové peci



Spotřeba grafitových elektrod

Spotřeba elektrod u stejnosměrných pecí je cca o 20% nižší než u vysokoimpendačních a až 50 % nižší než u klasických střídavých pecí. Běžně se u stejnosměrných pecí dosahuje spotřeby elektrod 1,1 až 1,3 $kg \cdot t^{-1}$.

Příčiny nižší spotřeby elektrod je možno shrnout následovně:

- kvalitnější elektrody (ale taky dražší),
- elektroda je vždy katodou, nevytváří se tedy na ní horká anodická skvrna (místo dopadu elektronů je vždy v kovu),
- boční opal elektrody je menší, protože celková vnější plocha jedné elektrody je menší než plocha tří elektrod u střídavých pecí,
- u střídavých pecí je vnitřní prostor mezi elektrodami značně přehřátý, což rovněž zvyšuje jejich spotřebu bočním opalem.

Výhodu nižší spotřeby elektrod u stejnosměrných pecí je nutno posuzovat ve vztahu k ceně elektrod, které jsou obecně u stejnosměrných pecí vyšší než u střídavých.

Spotřeba elektrické energie u stejnosměrných pecí

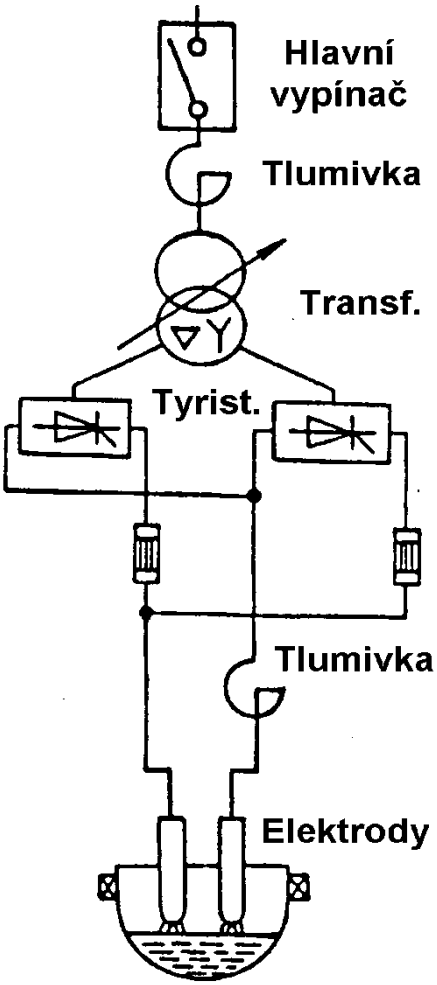
Spotřeba elektrické energie u stejnosměrných pecí je cca o 10-15 $kWh \cdot t^{-1}$ nižší než u střídavých pecí, což představuje úsporu elektrické energie 5-10 % (průměrné hodnoty bez použití hořáků se pohybují v rozmezí 300-350 $kWh \cdot t^{-1}$, některé prameny uvádějí spotřebu až 460 $kWh \cdot t^{-1}$). Hlavní příčiny nižší spotřeby jsou následující:

- pouze jedna elektroda
    - nižší elektrické ztráty – krátká síť, držáky atd.
    - nižší tepelné ztráty zářením
    - nižší tepelné ztráty otvorem kolem elektrody
- lepší přenos tepla během natavování - oblouk je obklopen po delší dobu ocelovým odpadem (vsázkou)
- přenos energie do elektrod při vyšších napětích tzn. nižší ztráty $R \cdot I^2$ v krátké síti
- lepší přenos tepla do lázně (penetrace oblouku, míchání lázně)
- indukční ztráty jsou nižší ve srovnání se střídavou pecí

Hlučnost stejnosměrných pecí

- V období tavení šrotu je hlučnost stejnosměrných pecí prakticky shodná s hlučností střídavých pecí a dosahuje podle velikosti pece hodnoty až 110 dB.
- Se zvětšováním natavené tekuté fáze se ale hlučnost stejnosměrných pecí zmenšuje a po natavení je hlučnost cca o 10 dB nižší než u střídavých pecí (95 dB → 85 dB).

Blokové schéma zapojení stejnosměrné obloukové pece s dvěma elektrodami



Parametry dvouelektrodové 170 t DC EOP v závodě TRICO, Alabama, USA

roční výroba	1,25 mil. tun
tap-to-tap time	50 minut
charge-to-tap time	40 minut
grafitové elektrody	2×610 mm
transformátor	2×75 MVA (celk. 150 MVA)
sek. proud	85 kA / 1elektrodu
půdní elektroda	tyčový typ (pin), 584 tyčí o ϕ 45 mm odděl. žárobetonem
hořáky	6 ks kyslíkopalivové (zemní plyn), 1 ks dveřní
klenba	vodou chlazená, tubular type, vyzdívka Al_2O_3 kolem elektrod
nístěj	1010 mm, indukční míchání, EBT, vyměnitelné
sázení	sázecím košem (ocel. odpad, surové železo)
	pásovým dopravníkem přes otvor mezi oběma elektrodami (DRI/HBI, vápno, dolomit)
tavení	el. oblouky + hořáky, řízení počítačem
	při část. natavení začíná dmýchání prach. uhlí s kyslíkem – pěnivá struska, mění se poměr plyn-kyslík (dospalovací funkce hořáků)
půdní odpich	EBT, průměr otvoru 165 mm, trvání odpichu 5minut, bezstruskový
spotřeba el. energie	390 $kWh \cdot t^{-1}$
spotřeba kyslíku	50 $m^3 \cdot t^{-1}$ (1600 cu ft/ton)
spotřeba elektrod	2,04 $kg \cdot t^{-1}$ (cíl: 0,9 $\cdot t^{-1}$)
životnost půdní anody	500 taveb (cíl: 1500 taveb)

Shrnutí hlavních předností a nevýhod stejnosměrných EOP oproti střídavým EOP

- **nižší spotřeba elektrod (o 40 - 60 %)**
- **nižší spotřeba elektrické energie (o 5 - 10 %)**
- **stabilnější hoření oblouku**
- **menší hodnota „flicker effect“ (50 %)**
- **menší úroveň hlučnosti (95 → 85 dB)**
- **nižší spotřeba žáruvzdorného materiálu (o 5 - 10 %)**
- **intenzivnější míchání lázně v nístěji pece**

Vysokoimpedanční střídavé EOP

Použití vyššího napětí na sekundární straně transformátoru.

- Důvod: ztráty na sekundární straně jsou funkcí reaktance sekundárního obvodu, ale zejména funkcí sekundárního proudu. Zvýšíme-li sekundární napětí, můžeme si dovolit snížit sekundární proudy pro dosažení stejného činného výkonu, ovšem při nižších celkových ztrátách.
- Označení těchto pecí jako *vysokoimpendační* je spíše obchodní název, protože impendance se u těchto pecí nemění (impedance sekundárního vinutí je 2,75 až 2,77 mΩ). Mění se pouze odpor primárního obvodu transformátoru, do kterého se obyčejně zařazuje 2,5 až 3Ω dodatečná resistance s ohledem na dosažení stability dlouhého oblouku.
- Zvyšování sekundárního napětí je limitováno použitým transformátorem, možností vzniku oblouků mezi elektrodami a stěnami pece, vlastnostmi elektrod a zejména pěnivé strusky, která se velmi často používá s technologií „dlouhého oblouku“.

Použití nižších sekundárních proudů při vyšším napětí vede ke

- snížení spotřeby elektrod až o 10 %
- zrychlení tavení vsázky – čím delší oblouk, tím větší množství vsázky je vystaveno jeho účinkům
- snížení spotřeby elektrické energie o 10 až 20 $kWh \cdot t^{-1}$
- snížení tzv. „flicker efektu“ až o 40 %
- zlepšení stability oblouků

Vysokoimpendační EOP se v posledním vývoji stávají novým standardem mezi střídavými pecemi a velmi vážným konkurentem vůči výhodám DC pecí.

Otázky k probranému učivu

1. Stejnosměrné obloukové pece, předpoklady jejich vývoje.
2. Elektrická část stejnosměrné pece, odlišnosti od střídavé pece.
3. Konstrukce usměrňovače střídavého proudu.
4. Hlavní druhy a konstrukce půdních anod, výhody a nevýhody.
5. Požadavky na grafitové elektrody stejnosměrné pece.
6. Zvláštnosti a odlišnosti tavby ve stejnosměrné peci, chování elektrického oblouku, tavení odpadu, pohyb lázně, flicker efekt.
7. Spotřeba elektrické energie a grafitových elektrod ve stejnosměrné EOP, příčiny nižší spotřeby ve srovnání se střídavými pecemi, hlučnost pecí při tavení.
8. Vysokoimpedanční střídavé EOP, podstata, výhody.

TÉMATICKÝ BLOK 11

Nové pochody ve výrobě elektrooceli

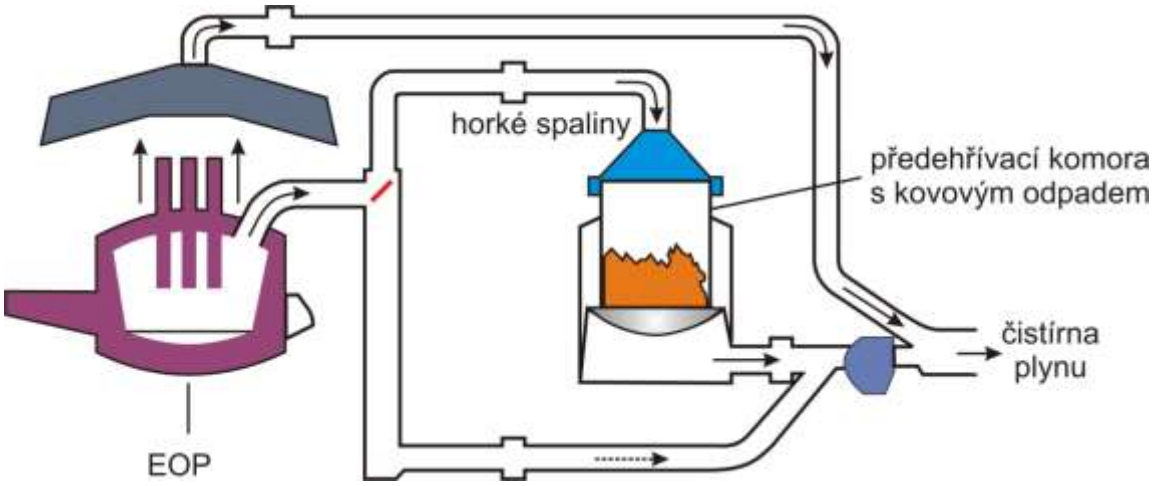
Hlavním cílem nových procesů je:

- zvýšit flexibilitu ve volbě energie a typu vsázkového materiálu
- snížit výrobní náklady
- snížit spotřebu primární elektrické energie a elektrod
- snížit vývin emisí při výrobě oceli
- zvýšit jakost vyráběné oceli
- zvýšit produkci

Základní myšlenky, které jsou u těchto procesů využívány je možno shrnout do tří základních principů:

1. **Využití tepla odcházejících pecních plynů pro *předehřev* kovové vsázky**
2. ***Dospalování* vznikajícího CO v pecním prostoru nebo v předehřívací komoře**
3. **Použití uhlíku a kyslíku jako zdroje *další energie* při tavení**

Princip výroby oceli v EOP s předehřevem vsázky



Spaliny z pracovního prostoru pece jsou odváděny do předehřívací komory, ve které je umístěn ocelový odpad. Průchodem horkých spalin přes vrstvu odpadu se obyčejně využije až 35 % tepla spalin, přičemž dochází k ohřevu odpadu až na teploty 550 – 650 °C.

Výhody předehřevu ocelového odpadu:

- zvýšení produktivity o 10 až 20 %
- snížení spotřeby elektrické energie o cca 70 až 80 kWh·t^{-1} tekuté oceli
- odstranění vlhkosti ze vsázky, což eliminuje možnost exploze
- snížení spotřeby elektrod a vyzdívky
- snížení vývinu prachu

K určitým nevýhodám nebo nedostatkům je možno zařadit:

- možnost vyšší emise škodlivých látek z kontaminovaného odpadu
- špatná kontrola teploty v komoře vede k širokému rozmezí teplot předehřátého šrotu
- při vysokých teplotách (nad 650 °C) dochází k oxidaci odpadu, což vede ke ztrátám výtěžku

Dvounístějová stejnosměrná EOP s předehřevem vsázky (UNARC, licence SMS GHH)

Fig.2 A-EAF starts melting, B-EAF is tapping

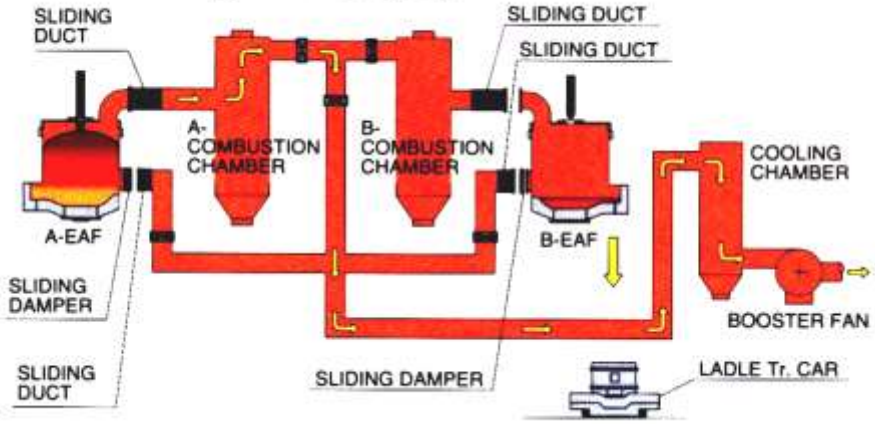


Fig.3 A-EAF is melting, B-EAF is preheating

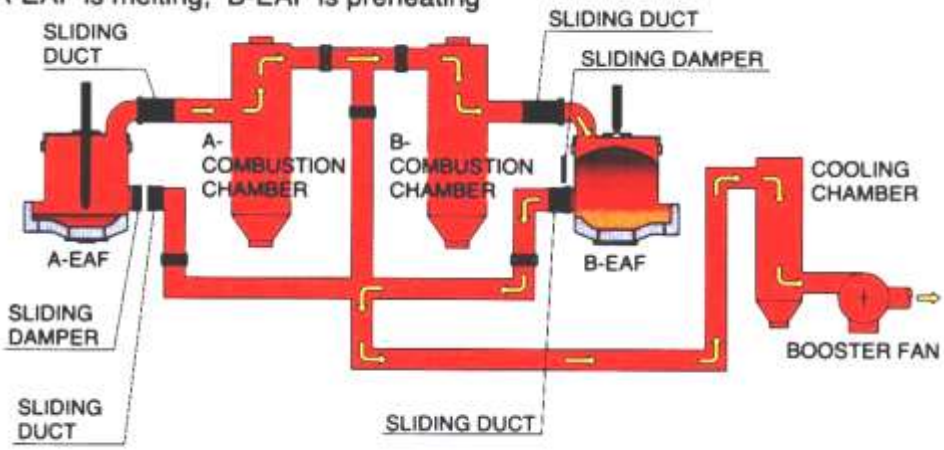
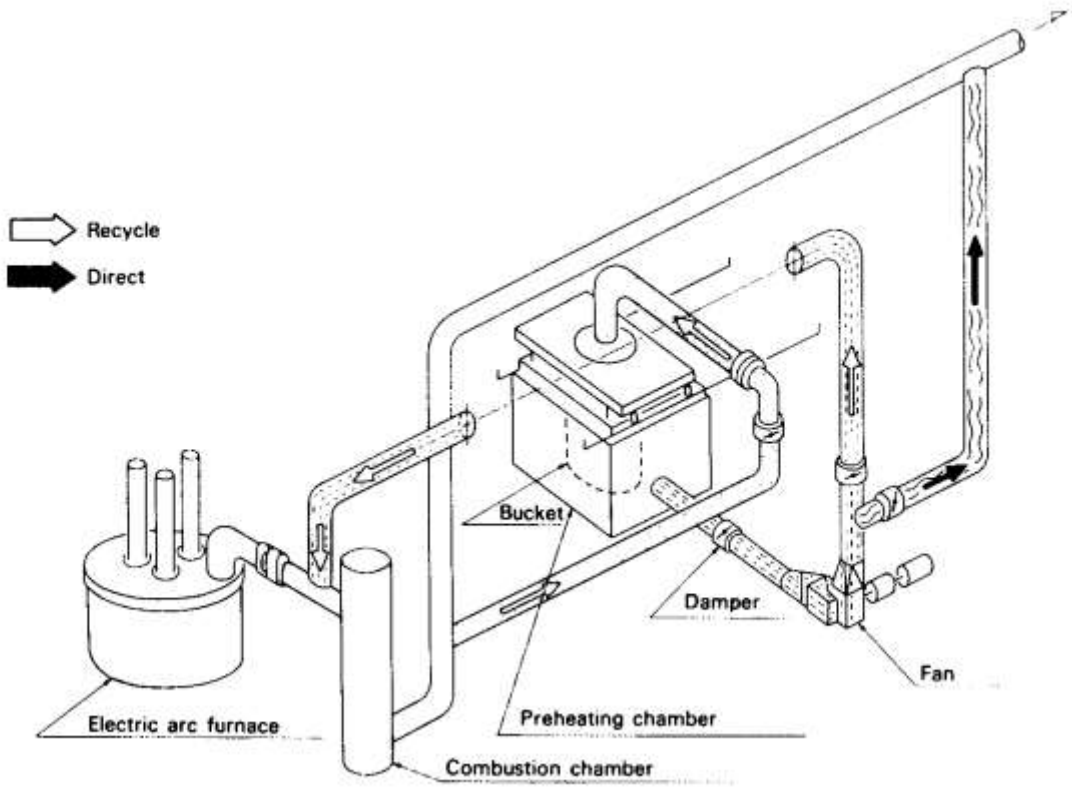
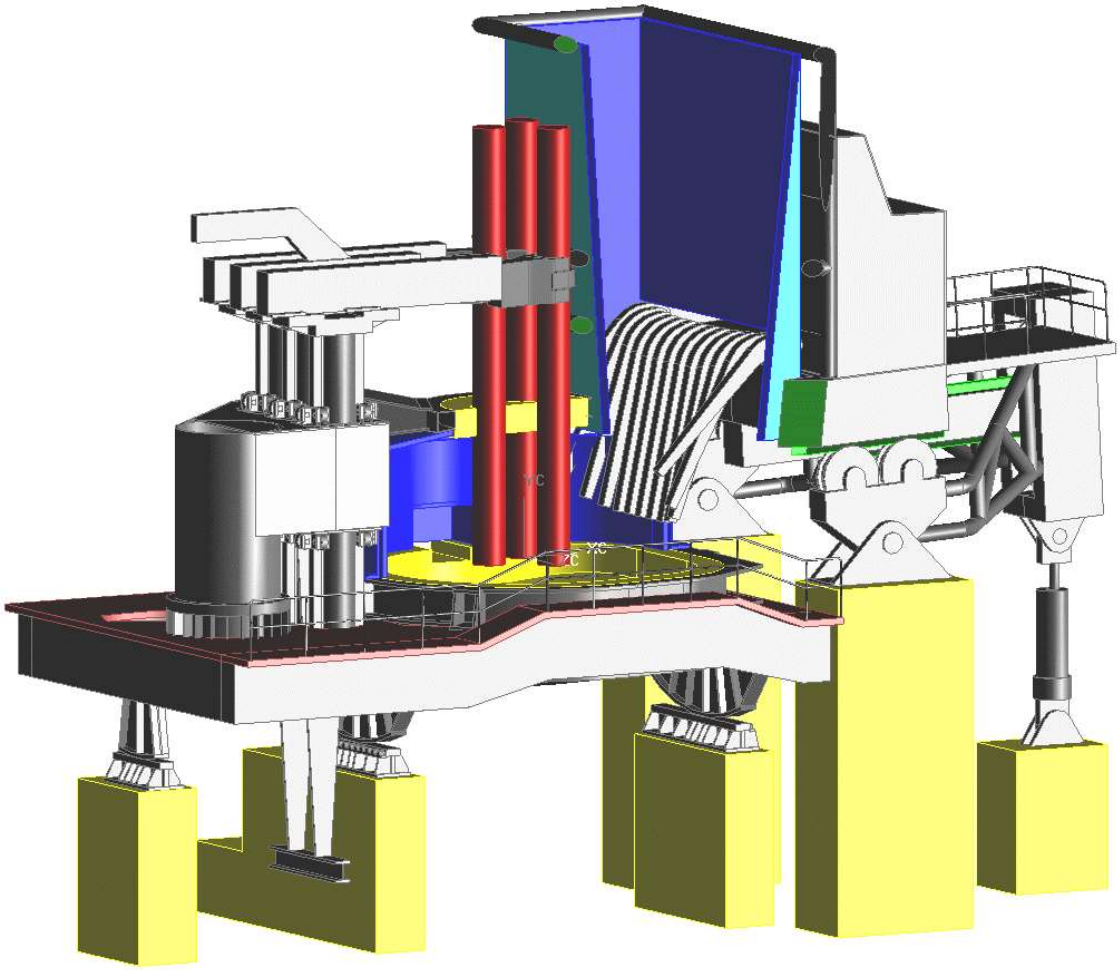


Schéma předehřevu vsázky EOP v předehřívací komoře



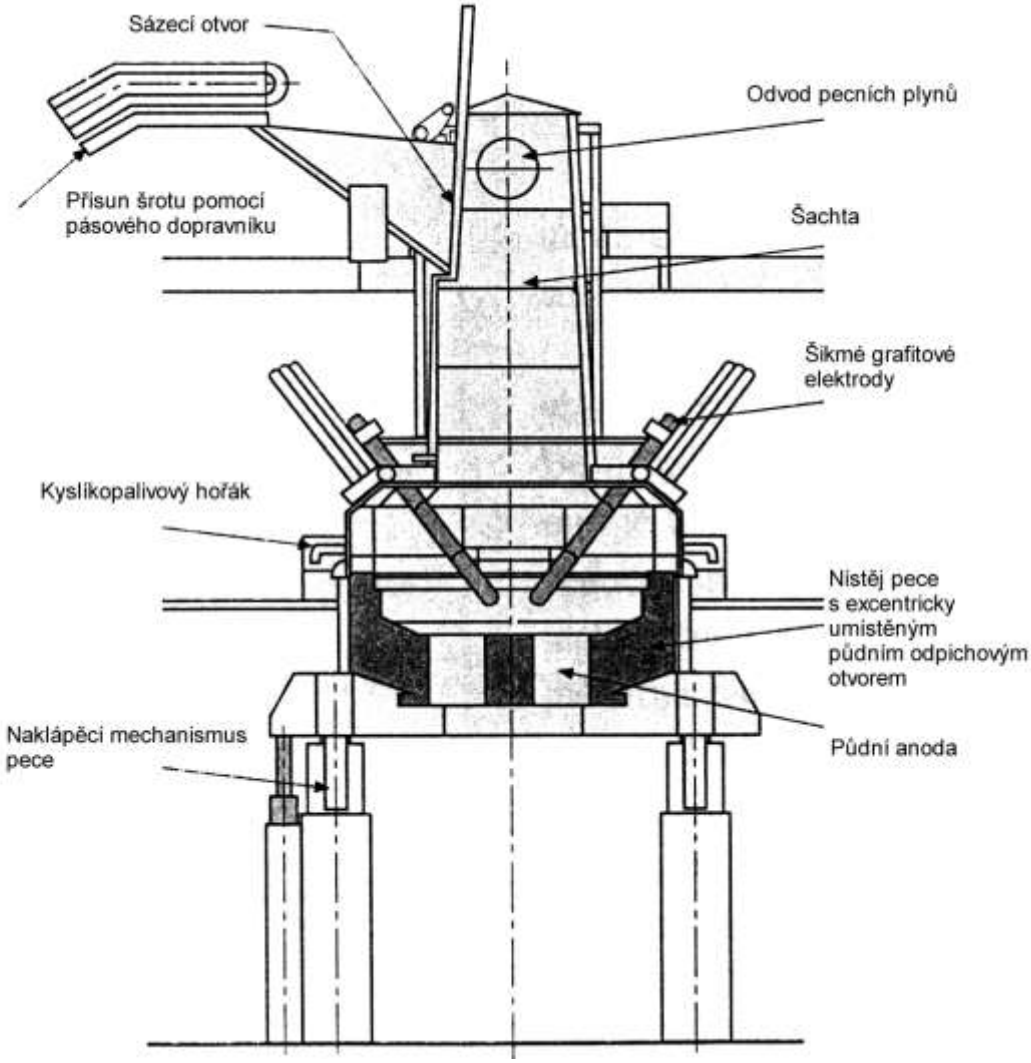
Finger Shaft Furnace (prstová šachtová EOP)



Společným principem všech modifikací je předehřívací šachta, která je umístěna nad EOP, a která dovoluje sázení předehřáté vsázky do pracovního prostoru pece.

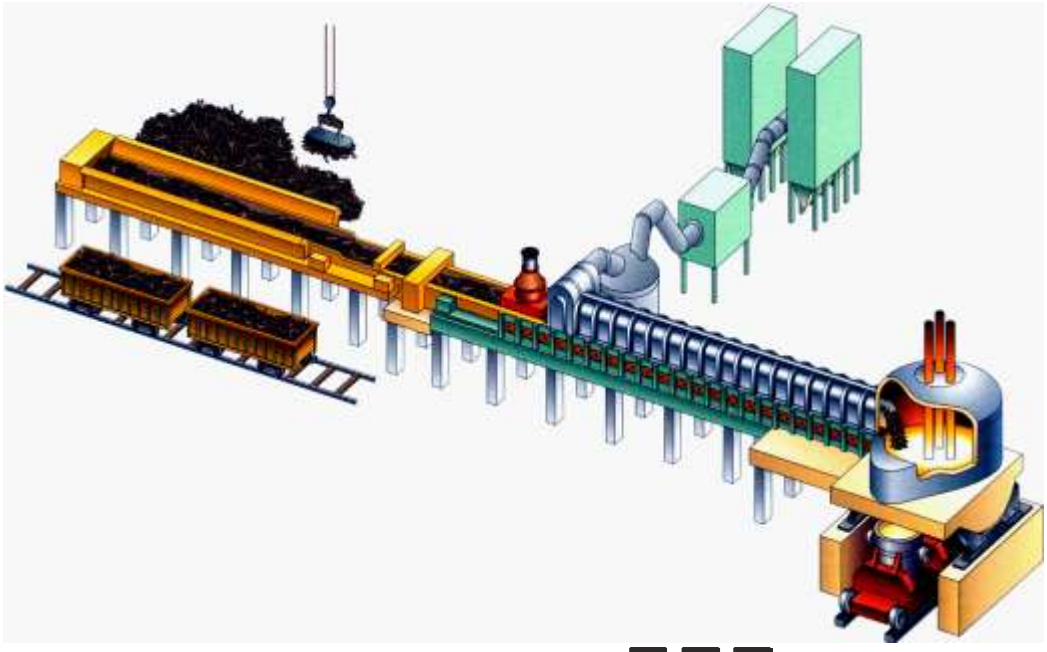
- Teplota předehřáté vsázky dosahuje až 800 °C.
- Spotřeba elektrické energie - cca 350 $kWh \cdot t^{-1}$ oceli
- Spotřeba elektrod - 1,8 kg/1t oceli
- Spotřeba kyslíku - 30 m^3/1 t oceli
- Spotřeba plynu - 8,5 m^3/ 1 t oceli
- Délka tavby - 40 až 60 minut
- Roční výroba - 0,8 až 1,25 mil. tun

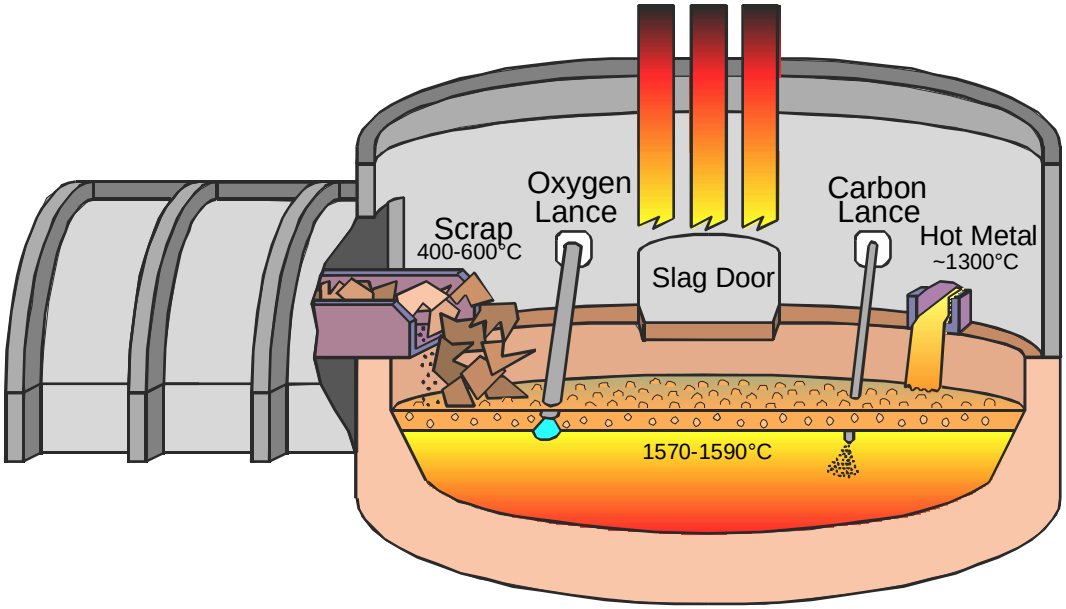
Stejnosměrná oblouková pec Comelt



- čtyři *šikmé elektrody* vstupujících bočně dovnitř pracovního prostoru pece
- integrovaná *předehřívací šachta* pro vsázku, která je umístěná nad tavící pecí.

Elektrická oblouková pec ConSteel s předehřevem vsázky

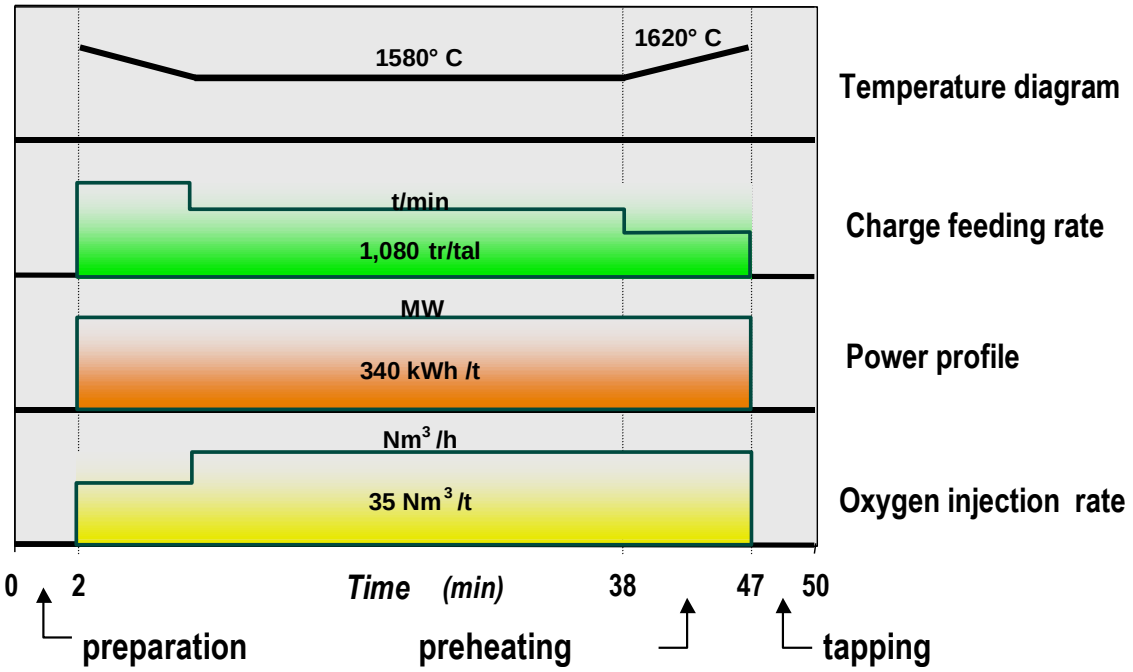




Vsázka resp. ocelový odpad je plynule přiváděn bočním otvorem do pece pomocí vibračního dopravníku (š = 1,2m, hl = 0,3m), procházejícího přes žáruvzdorným materiálem vyzděný předehřívací tunel délky až 16 m, který je vyhříván pomocí spalin z EOP a pomocí kombinovaných hořáků na zemní plyn na teplotu až 700 °C (obyčejně na 550 až 600 °C).

Pracuje se s tekutým zbytkem (až 15%), rychlost přiváděné vsázky do pece je takové, aby byla postupně tavena při ponoření, po dosažení nominální hmotnosti tavby je přísun odpadu zastaven (u 70 t pece na cca 10 minut), je upravena odpichová teplota a proveden odpich. Napájení EOP může být střídavé i stejnosměrné. Oblouk je velmi stabilní, protože se po celou dobu tavení pracuje s tekutou lázní.

Jako vsázky je používáno ocelového odpadu, surové železo, HBI, DRI. Do pece se může rovněž sadit tekuté surové železo v množství až 30-40 %, a to přes speciální koryto v plášti pece. Pro předehřev je možno použít šrédrovaný odpad, vratný odpad, lehký odpad apod.

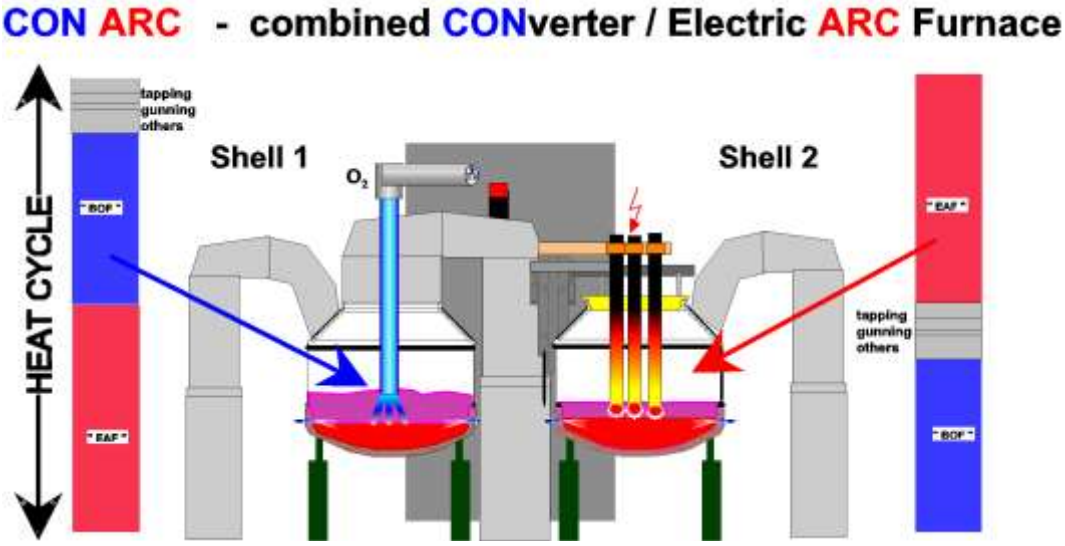


Otázky k probranému učivu

1. Hlavní cíle a postupy nových pochodů při výrobě elektrooceli.
2. Předehřev ocelového odpadu, výhody a nevýhody.
3. Fuchs Shaft Furnace, popis, parametry.
4. Proces Verticon.
5. Elektrická oblouková pec COMELT VAI.
6. CONSTEEL proces.
7. ContiArc proces výroby oceli.
8. Dvounístějová EOP (Twin Shell EAF).

TÉMATICKÝ BLOK 12

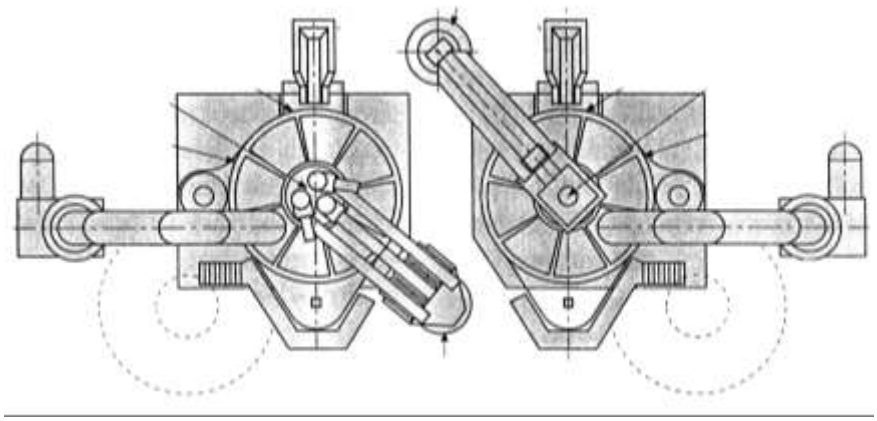
Proces CONARC



Konvertorový proces – do jedné pece se nalije pomocí žlabu tekuté surové železo, poté se začne dmýchat kyslík přes horní trysku. V druhé části dmýchání se přidává DRI nebo ocelový odpad, který částečně ochladí lázeň a zabrání tak jejímu nadměrnému přehřátí. V průběhu konvertorové části procesu se sníží obsah C, Si, Mn a P. Poté se víko s tryskou přesune nad druhou nístěj (ze které právě probíhá odpich oceli), do pece je přidán ocelový odpad a DRI a nad nístěj se přesune víko s elektrodami.

EOP proces – ve kterém probíhá tavení přidaného ocelového odpadu a DRI a přehřátí oceli na odpichovou teplotu pomocí elektrického oblouku s použitím kyslíkopalivových hořáků a dospalování CO. V údobí tavení pomocí oblouků probíhá v druhé peci konvertorový proces.

Schématický půdorysný pohled na otočná víka obloukové pece ConArc



PROCES DANARC

- dospalování odcházejících plynů
- synchronizované dmýchání kyslíku přes půdní dmyšny
- supersonické trysky a dmýchání uhlíkatých materiálů bočními tryskami.

PROCES DANARC Plus

- Sázení jednou dávkou pomocí koše
- Lepší využití tepla odcházejících spalin – vyšší konstrukce pece, vyšší vrstva vsázky, odsávání spalin
- Účinnější dospalování v prostoru pece – dáno vyšší konstrukcí pece
- Vyšší účinnost oblouku a hořáků – konstrukce pece a uspořádání vsázky dovoluje zvýšit příkon oblouku bez zvýšení zatížení stěn
- Využití technologie pěnivé strusky – zvyšuje využití energie oblouku přecházející do lázně a zmenšuje zatížení stěn
- Elektromagnetické míchání ocelové lázně – optimalizované umístění půdní anody vzhledem ke katodě
- Plně automatické řízení pece – využití expertního systému, který optimalizuje pro dané podmínky pracovní bod pece

PROCES DANARC Plus M²

- Pec je vybavena nezávislou předehřívací komorou

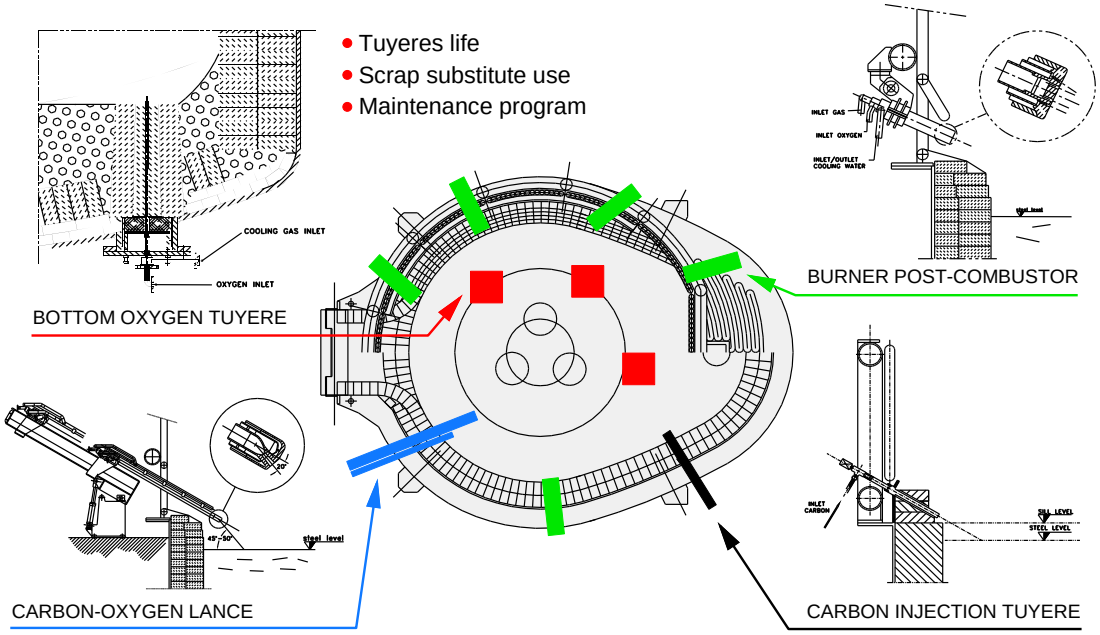
Porovnání jednotlivých procesů DANARC

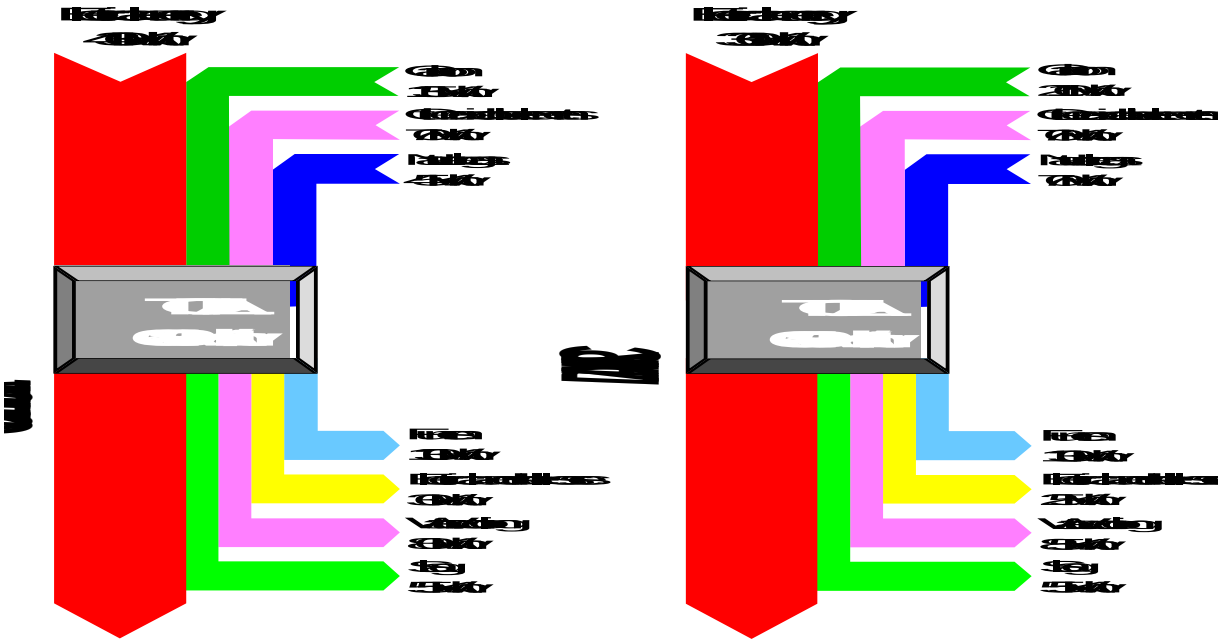
Typ pece	*Spotřeba el. energie*	*Spotřeba kyslíku*	*Spotřeba elektrod, AC*	*Spotřeba elektrod, DC*	*Tap-to-tap time*
	$kWh \cdot t^{-1}$	*$m^3 \cdot t^{-1}$*	*$kg \cdot t^{-1}$*	*$kg \cdot t^{-1}$*	*min*
Klasická EOP	**410**	**30**	**1,9**	**1,4**	**60**
DANARC	**270-320**	**35-50**	**1,7**	**1,2**	**45-55**
DANARC Plus	**310-330**	**30**	**1,7**	**1,2**	**38-45**
DANARC Plus M²	**210-250**	**30**	**1,4-1,7**	**0,9-1,2**	**28-30**

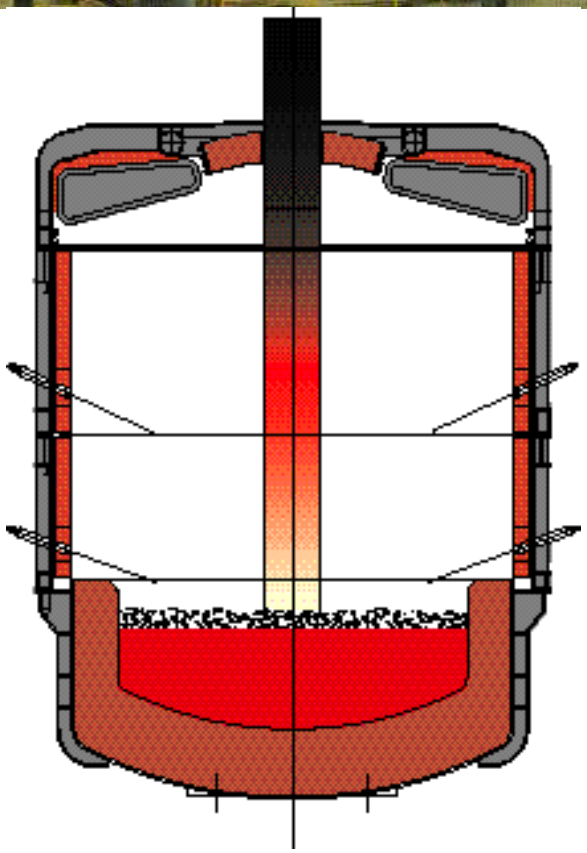
Pozn.: Údaje jsou vztaženy ke vsázce bez surového železa.

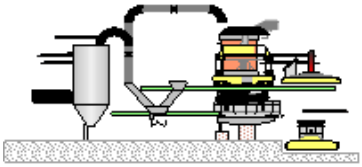
Hlavní konstrukční prvky 90t pece DANARC

- Kyslíko-palivové trysky (resp. dospalovací) – 6×3,4 MW, orientovány tangenciálně, zasunuty přes boční stěny, výškově v úrovni struskové čáry
- Půdní kyslíkové dmyšny – 3×250 $m^3 \cdot h^{-1}$, skloněny o 4° směrem k centru pece
- Kyslíkové trysky – 2×2300 $m^3 \cdot h^{-1}$, uloženy v bočních stěnách
- Injektážní uhlíkové trysky – 2×19,5 $kg \cdot t^{-1}$, umístěny v blízkosti kyslíkových trysek, mají napěňovací efekt se vznikem CO pro další dospalování

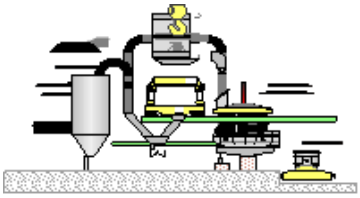




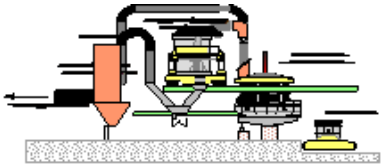




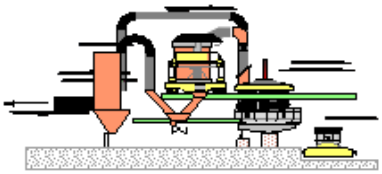
1 - charging phase



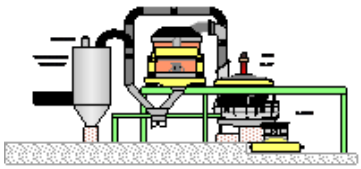
2 - bucket positioning on preheating station



3 - starting melting



4 - melting and scrap preheating phase



5 - tapping phase

Otázky k probranému učivu

1. ConArc proces výroby oceli.
2. KES proces výroby oceli.
3. Proces DANARC.
4. Proces KorfArc.
5. Tendence ve výrobě a mimopecním zpracování elektrooceli.

TÉMATICKÝ BLOK 13

Výroba oceli v indukčních pecích

- pracovní frekvence – síťová frekvence 50 Hz, středofrekvenční IP - 600 až 10000 Hz, vysokofrekční (laboratorní) IP - až 500 kHz
- příkon – 50 kVA až 5 MVA
- hmotnost vsázky – 1 kg až 10 t

Princip ohřevu a tavení

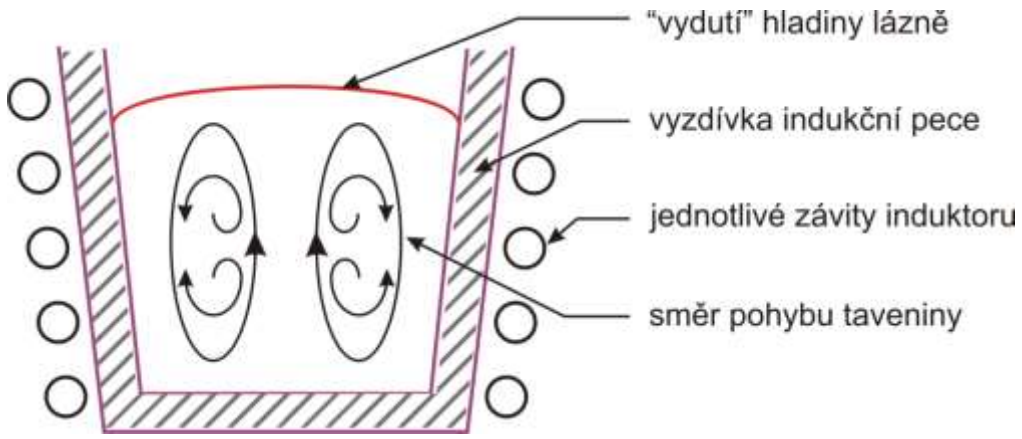
Střídavý proud procházející induktorem vytváří střídavý magnetický tok (pole), který indukuje ve vsázce střídavé elektromotorické napětí opačné polarity. Indukované napětí vytváří ve vsázce vířivé proudy, kterými se kovový materiál postupně ohřívá na požadovanou teplotu, až se roztaví. Indukčně lze tedy ohřívat materiály elektricky vodivé, nemusí být ale feromagnetické.

Pohyb taveniny v elektrické indukční peci

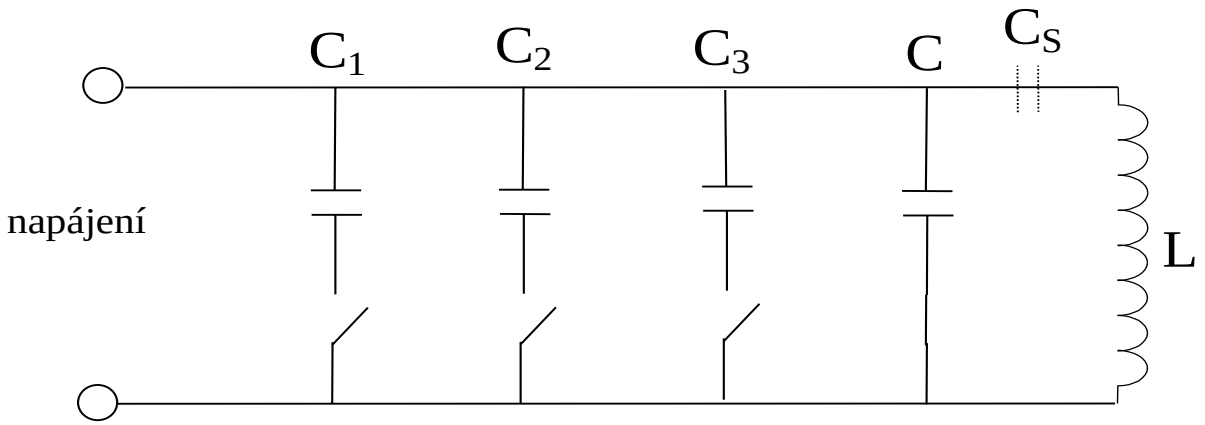
Charakteristickým rysem indukčních kelímkových pecí je elektrodynamický pohyb lázně, který je výsledkem vzájemného elektrického působení proudu induktoru a proudu v lázni.

Míchání lázně vyrovnává chemickou a teplotní heterogenitu.

Průvodním jevem tohoto míchání je však charakteristické a nepříznivé vydutí povrchu lázně a její obnažování následkem toho, že struska stéká ke stěnám kelímku. Toto vydutí se dá potlačit rozdělením induktoru na sekce a odpojením horní sekce případně zvýšením frekvence nebo snížením výkonu.



Elektrické schéma zapojení indukční pece (princip)



Induktor pece spolu se vsázkou představuje značnou indukčnost (L), která fázově zpožďuje proud vůči napětí, čímž se snižuje účiník cosφ a klesá činný výkon. K induktoru se proto paralelně musí zařazovat kondenzátorová baterie (C_1, C_2, C_3 ...C), která kompenzuje neproduktivní indukční složku proudu.

Hodnota připojené kapacity by měla být tak velká, aby se obvod dostal do paralelní rezonance, kdy se celý tento obvod chová jako ohmický odpor.

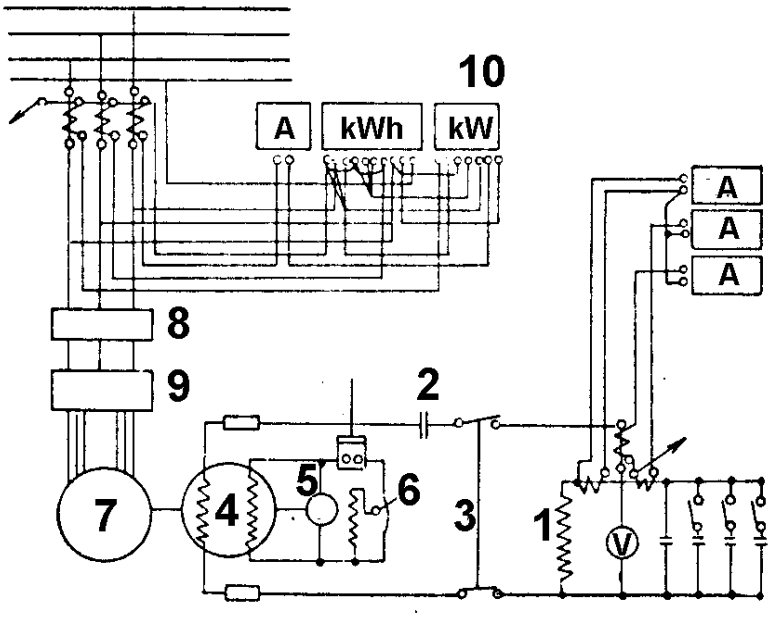
Napájení elektrické indukční pece

Středofrekvenční indukční pece byly dříve napájeny pomocí rotačního měniče, což je vlastně středofrekvenční alternátor poháněný asynchronním motorem.

V současnosti se již používají statické tyristorové měniče. U nízkofrekvenčních a síťových indukčních pecí se používají regulační transformátory s násobičem kmitočtu – jsou tedy přímo připojeny na rozvodnou síť.

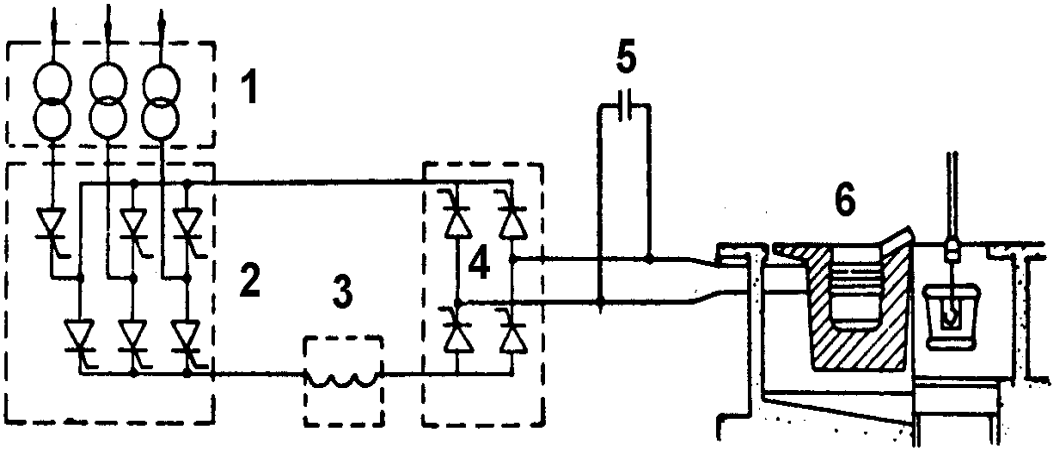
Výkon lze u středofrekvenčních pecí regulovat dvojím způsobem. U starších pecí s rotačním měničem pomocí změny proudu v budicím vinutí alternátoru, čímž měníme výstupní napětí alternátoru, u novějších tyristorových měničů pak změnou kmitočtu. Tyristorové měniče si nastavují optimální pracovní režim, takže mohou pracovat stále s plným výkonem.

Zapojení středofrekvenční indukční pece s rotačním měničem



1 – induktor pece
2 – kondenzátorová baterie
3 – jistič
4 – generátor
5 – budič
6 – derivační regulátor
7 – asynchronní motor
8 – vypínač
9 – spouštěč
10 – měřicí přístroje

Zapojení středofrekvenční indukční pece se statickým tyristorovým měničem



1 – transformátor
2 – tyristorový usměrňovač
3 – vyhlazovací tlumivka
4 – tyristorový měnič frekvence
5 – kondenzátorová baterie
6 – induktor indukční pece

Hloubka průniku indukovaného proudu do vsázky

V důsledku tzv. „skin efektu“ (zhuštění proudu na povrchu vodiče) se největší podíl tepla indukuje v povrchové vrstvě ohřívané a tavené vsázky. Hloubku průniku indukovaného proudu do vsázky je možno určit z empirického vztahu

$$\delta \cong 50{,}3 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}}$$

kde: δ ... hloubka průniku indukovaného proudu do vsázky; cm

ρ ... měrný odpor vsázky; Ω·cm

f .... frekvence proudu; Hz

μ... relativní permeabilita vsázky; $H \cdot m^{-1}$ (pro nemagn. materiály je $\mu \sim 1$, pro magn. materiály je $\mu > 1$)

Hloubka průniku proudu je

- nepřímo úměrná frekvenci - čím větší je frekvence, tím menší je hloubka vniku indukovaného proudu. U středofrekvenčních pecí se přibližně 86 % elektrického příkonu mění v teplo v oblasti hloubky proniku δ.
- nepřímo úměrná relativní permeabilitě vsázky – při teplotě 768 °C se permeabilita sníží, hloubka vniku se zvýší

Čím větší kusy vsázky použijeme, tím může být frekvence menší. Při malých kusech musíme použít vyšší frekvence, aby došlo k požadovanému ohřátí a tavení

Činný výkon - P_{el} - vyvíjený v jednotlivých kusech vsázky či v lázni

$$P_{el} = b \cdot I^2 \cdot n^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f} \cdot D \cdot K$$

kde: n ... počet závitů induktoru

D ... střední průměr vsázky:

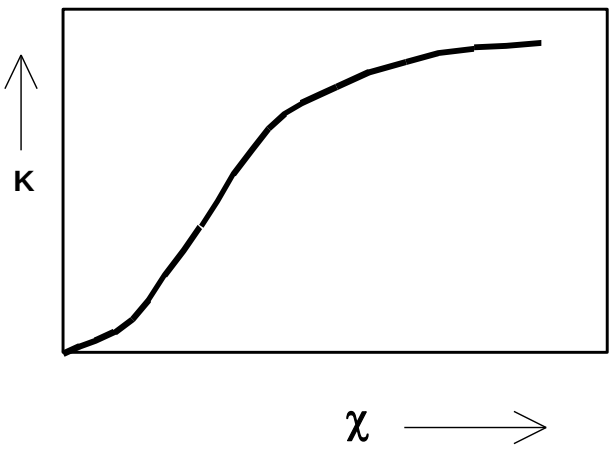
před roztavením: střední průměr kusů

po roztavení: střední průměr lázně (kelímku)

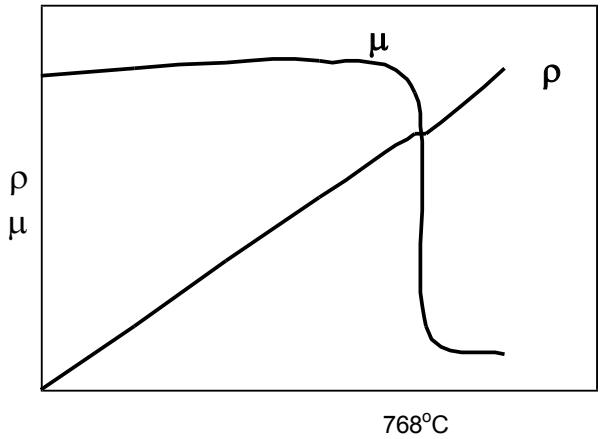
K ... korekční koeficient, $K = f\left(\frac{D}{\delta}\right)$

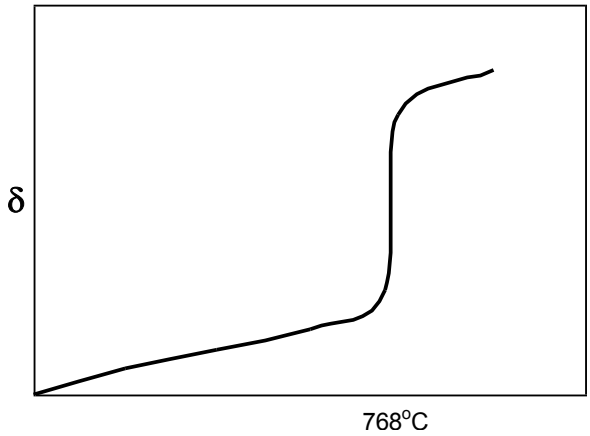
Hodnota P_{el} je tím větší, čím větší je I, n, μ, D, f. Růst hodnoty ρ pak působí na změnu hodnoty P_{el} komplikovaněji.

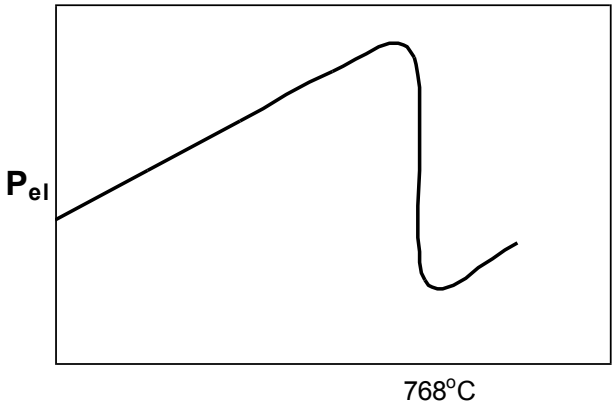
Vliv hodnoty χ=D/δ na hodnotu korekčního koeficientu K



Vliv teploty na změnu měrného odporu vsázky (ρ), její relativní permeability (μ), hloubky proniku proudu (δ) a činný výkon vyvíjený ve vsázce (P_{el})







Prudký pokles hodnot permeability vsázky μ a tedy i pokles P_{el} souvisí se ztrátou magnetických vlastností oceli při náhřevu (750 °C - Curieův bod). Pozvolný růst P_{el} souvisí s trvalým růstem hodnoty ρ a D v důsledku zaplňování kelímku taveninou. Na hodnoty veličin μ a ρ a na charakter jejich změny s teplotu má vliv i složení vsázky (chemické složení).

Technologie výroby oceli v indukčních pecích

Svou podstatou se většina technologií taveb blíží „redukční přetavbě“ v EOP (je omezen průběh oxidačních pochodů).

Kovová vsázka je tvořena podle charakteru vyráběných ocelí buď odpadem legovaným, nebo nelegovaným a feroslitinami. Ocelový odpad je mnohdy přizpůsoben tvaru kelímku (např. ve formě tyčí).

Strusky, které se tvoří během tavení plní „krycí“ funkci a omezují průnik dusíku, vodíku a kyslíku do tvořící se lázně.

Po náhřevu vsázky je prováděna přísada dezoxidovadel a legur pro korekci složení, zhomogenizování lázně, kontrolu teploty a odpich.

Vyzdívky indukčních pecí

- kyselé – suracit – na bázi křemenců a pojiva – kyseliny borité – jsou rozměrově stálejší – menší stupeň praskání vyzdívek
- zásadité – 70 % Al_2O_3, 30 % MgO, vytváří se spinel MgO. Al_2O_3 (nad 1550 °C) – tvorba monolitické vrstvy při první tavbě – vypalování pomocí grafitového trnu nebo ocelové trubky

Výhody indukčních pecí

- kov se při tavení nenauhličuje, takže lze přetavovat vratný vysokolegovaný odpad s velmi nízkým obsahem uhlíku a nízkým obsahem plynů
- přesná regulace teploty lázně
- nízký propal legujících prvků
- intenzívní míchání lázně - výhodně pro odstraňování vměstků, tepelnou a chemickou homogenitu
- možnost vést tavby v inertní atmosféře nebo vakuu

Nevýhody indukčních pecí

- nízká teplota strusky (ohřívá se a taví od kovu)
- s tím spojený horší průběh reakcí mezi kovem a struskou
- při kyselé vyzdívce (suracit na bázi křemence a kys. borité) nelze odsířit ani odfosfořit (kyselá struska)

Vakuové indukční pece (VIP)

VIP pracují obvykle se zbytkovým tlakem 1 až 0,1 Pa.

Konstrukce pece umožňuje

- odvakuování pracovního prostoru,
- přívod inertního plynu,
- dávkování feroslitin,
- měření teploty a odlití tavby v podmínkách vakua.

Podle provedení mají tyto pece sklopný pouze induktor s kelímkem nebo celý pracovní prostor.

Vyzdívka kelímku je tvořena MgO, ZrO_2 nebo Al_2O_3. Jsou dusané, k vytvoření monolitické vrstvy dochází u prvních taveb.

Nevýhodou kelímků vyrobených z MgO je to, že se za nízkých tlaků může MgO redukovat uhlíkem z lázně

$$MgO_{(S)} + [C] \rightarrow Mg_{(g)} + CO_{(g)}$$

Mg se přitom odpařuje z lázně. Použití Al_2O_3 vede v důsledku redukčních pochodů k nežádoucímu nárůstu obsahu Al v lázni.

Metalurgické pochody probíhající ve VIP

Dlouhodobé setrvání roztavené a dobře promíchávané lázně v podmínkách hlubokého vakua umožňuje provést při výrobě oceli ve VIP

- snížení obsahu kyslíku s využitím homogenní uhlíkové reakce,
- účinné odplynění,
- snížení obsahu nežádoucích doprovodných prvků (Cu, Pb, Sn) a legování bez nadměrných propalů legujících prvků.

Oduhličení a dezoxidace

Oduhličení probíhá účinkem homogenní uhlíkové reakce, jejíž rovnováha se za sníženého tlaku posouvá ve směru CO. Snížení pod 1000 Pa nemá již výrazný vliv na průběh uhlíkové reakce – nedochází k úměrnému poklesu p_{CO} v bublině

Dezoxidace lázně pouze uhlíkem v podmínkách VIP nevede k dostatečnému snížení obsahu kyslíku. Je nutno provést srážecí dezoxidaci s použitím kovových dezoxidovadel - nejčastěji Al.

Odplynění lázně

Odplynění tzv. přechod vodíku a dusíku z kovové do plynné fáze za nepřítomnosti strusky je charakterizován známými vztahy:

$$2/H/ \rightarrow H_2(g)$$

$$2/N/ \rightarrow N_2(g)$$

Přenos vodíku nečiní potíže a lze dosáhnout obsahu vodíku 1 cm^3/100 g. V případě dusíku probíhá pochod podstatně pomaleji. Příčinou jsou nižší hodnoty difúzních koeficientů dusíku v oceli a výraznější snížení jeho koeficientu aktivity složkami roztavené oceli. Rovněž v roztoku přítomný kyslík a síra patří mezi výrazné povrchově aktivní prvky, které brání adsorpci dusíku a tím zpomalují proces jeho přenosu z taveniny do plynné fáze.

Odpařování složek lázně

Sníženého tlaku ve VIP se využívá k účinnému odstranění nežádoucích příměsí, zejména Cu, Pb, Sn, Sb, Bi, As. Jedním ze základních činitelů ovlivňujících rychlost odpařování je parciální tlak dané složky lázně - p_x - nad kovovým roztokem

$$p_x = p_x^o \cdot a_x = p_x^o \cdot N_x \cdot \gamma_x$$

p_x^o ... parc. tlak par čisté látky x

N_x ... molární podíl látky x v roztoku

γ_x ... koeficient aktivity látky x v roztoku

Pořadí prvků podle p_x^o: W, Mo, Zr, B, V, Ti, Co, Te, Ni, Si, Cr, Cu, Al, Sn, Mn, Pb, Sb, Bi, Cd, Mg, Zn, S, P.

Příklady využití VIP

Ve VIP se mohou vyrábět speciální oceli např. žárupevné, transformátorové apod.

U žárupevných oceli se při tavení v normálních podmínkách tvoří oxidické síťoví po hranicích zrn – snižují se plastické vlastnosti oceli.

V podmínkách vakua se síťoví rozrušuje vlivem vakua a teploty.

Transformátorové oceli (Si až 6 %) se mohou tavit ve vakuu, aniž by se podstatně snížila tvařitelnost následkem vzniku oxidických inkluzí.

Vlastnosti oceli vytavených ve VIP:

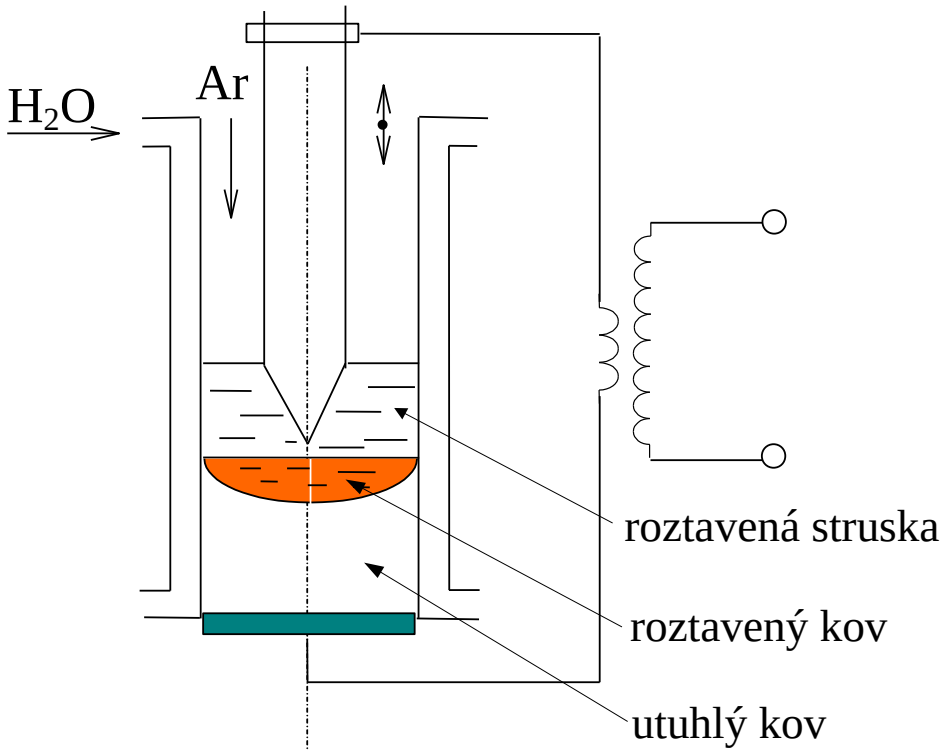
- nižší obsah NV – vysoká mikročistota
- nižší obsah kyslíku

Elektrostruskové přetavování oceli

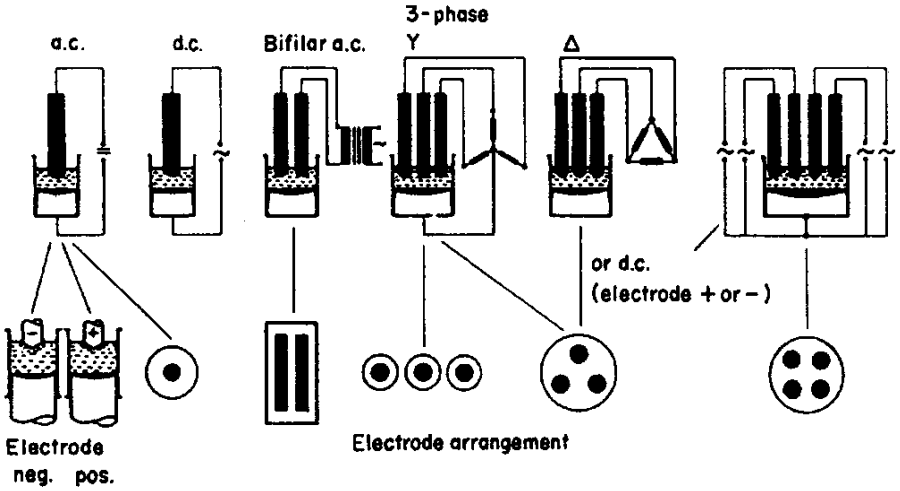
Teorie procesu ESP (*Electro Slag Remelting – ESR)* byla patentována v roce 1930 v USA, jeho praktické dopracování a rozšíření je však datováno do 60 let.

Podstata ESP:

- přetavování kovové elektrody v měděném, vodou chlazeném krystalizátoru
- elektroda se po kapkách odtavuje ve struskové lázni, kapky prochází přes vrstvu strusky a shromažďují se v krystalizátoru, kde kov postupně tuhne
- ingot se vyznačuje usměrněnou strukturou, jehož zrna jsou orientovány paralelně s podélnou osou ingotu.
- struska se odporově ohřívá tzv. *Joulovým* teplem, které vzniká při průchodu elektrického proudu mezi odtavnou elektrodou a základní deskou, později vznikajícím ingotem.



Způsoby napájení zařízení ESP



Elektrody ESP

Elektroda je zhotovena z materiálu, který se přetavuje:

- válcovaná, kovaná nebo odlévaná (tzn. ingot)
- průměr je větší než 300 mm (výjimečně 150 až 250 mm)

Krystalizátor

- vyroben převážně z mědi v dvouplášťovém provedení.
- tvar krystalizátoru nejčastěji kruhový, jsou známy i čtvercové či bramové krystalizátory, příp. krystalizátory speciálního průřezu nevyjímaje krystalizátory na výrobu dutých ingotů.
- konstrukčně je většinou krystalizátor nepohyblivý.
- v jiném konstrukčním řešení se využívá pouze krátký krystalizátor, ve kterém je roztavená struska a horní část ingotu, kde dochází k tuhnutí. Celý krystalizátor se přitom zvedá v závislosti na tom, jak roste výška ingotu. Krystalizátor může být rovněž nepohyblivý a v tomto případě pak klesá základová deska s ingotem.

Parametry přetavování (napětí, proud, příkon, stálost strusky, výška hladiny strusky a poměr průměrů elektroda-ingot) musí být vhodně sladěny, aby bylo dosaženo konstantního tavení a růst ingotu se stejnorodou strukturou zrn.
Hloubka ponoření konce elektrod je udržována na optimu automatickou napěťovou nebo proudovou kontrolou. Přibližně konstantní průběh tavení může být udržován pomocí plynulého měření hmotnosti elektrody nebo její délky a hlídáním příkonu.

Největší zařízení ESP je ve společnosti *SaarStahl GmbH* ve Voelklingenu. Je schopno vyrobit ingot o průměru 2,1 m, délce až 5 m a hmotnosti 160 t. Proces probíhá s vícenásobnou výměnou elektrody. Firma *Inteco* má ESP s průměrem krystalizátoru 1000 mm a vyrábí ingoty o hmotnosti 14 tun.

Strusky používané při ESP

Na strusky používané v ESP jsou kladeny určité požadavky:

- stabilita při teplotách procesu - nízká tenze par složek strusky
- nižší teplota tavení - při určitém přehřátí této strusky je zabezpečeno tavení kovu
- optimální elektrický odpor (vodivost) - příliš vysoká elektrická vodivost vede k vysokým proudům, v krajním případě nemusí docházet k odtavování elektrody. Při příliš nízké elektrické vodivosti je nutno zvyšovat napětí (k dosažení požadovaného proudu), což však může vést ke vzniku nežádoucího oblouku.
- metalurgická vhodnost pro průběh určitých reakcí – jiné složení bude mít struska pro odfosfoření, jiné pro odsíření
- nízká viskozita
- nízké povrchové napětí
- vysoké mezifázové napětí mezi struskou a kovem
- schopnost absorbovat nekovové vměstky
- nízký obsah nežádoucích prvků

Pro ESP menších průměru (< 500 mm) se používá struska v tuhém stavu, pro vyšší průměry ingotů se obvykle již natavuje mimo ESP a poté je do zařízení plněna horem. Pokud je používána struska v tuhém stavu, je na počátku procesu pod elektrodou umístěna exotermická směs, která po svém zapálení zabezpečí vznik tekuté strusky.

Odsíření kovu při ESP

Odsíření probíhá na třech rozhraních

- ve vrstvě tekutého kovu na čele elektrody,
- na povrchu kapek kovu padajícího přes strusku (1700 až 1900 °C) – velké reakční rozhraní
- na povrchu tekuté části ingotu.

V průběhu ESP je možno dosáhnout vysokého stupně odsíření, a to v rozmezí 20-80 %. Stupeň odsíření závisí na:

- obsahu síry v přetavovaném materiálu,
- jeho celkovém složení,
- složení strusky,
- složení atmosféry nad struskou,
- na energetickém režimu při přetavování atd.

Pro ESP se nejčastěji používají strusky na bázi CaF_2 (např. 70% CaF_2 - 30% Al_2O_3; 80% CaF_2 - 20% CaO, 60%CaF_2 - 20%CaO - 20%Al_2O_3). Tyto strusky mají poměrně nízký

rozdělovací součinitel síry L_S = 4 ÷ 30, s růstem obsahu CaO L_S roste. Byl prokázán negativní vliv přítomnosti SiO_2 na dosahované hodnoty L_S.

Vysoká rychlost odsíření není funkcí pouze L_S, ale rovněž kinetiky procesu. Vysoce tekutá struska umožňuje rozvinutější průběh difúzních procesů. Rovněž může probíhat intenzívní oxidace síry ze strusky plynnou fází na SO_2.

$[S] + (O^{2-}) \rightarrow (S^{2-}) + [O]$

$(S^{2-}) + P^3/_2\ O_{2(g)} \rightarrow SO_{2(g)} + (O^{2-})$

Složení strusky se určuje podle požadované metalurgické funkce:

- odsíření – na bázi $CaO\text{-}CaF_2$
- odfosfoření – na bázi $CaF_2\text{-}FeO$

Snížení obsahu kyslíku a oxidických vměstků při ESP

Změna obsahu kyslíku celkového a oxidů v přetavované oceli je funkcí několika souběžně probíhajících pochodů:

- část vměstků se přímo vylučuje z oceli při formování tekuté vrstvy roztavené oceli na elektrodě
- při roztavení oceli vzniknou podmínky pro opětovné „rozpuštění“ podstatné části vměstků, vzniklých homogenními exotermickými reakcemi při tuhnutí oceli
- **při krystalizaci se postupně pomalu tvoří usměrněná fronta tuhnutí a jsou tak vytvořeny podmínky pro vyplouvání vměstků do strusky.**

Chování plynů při ESP

Při ESP může docházet k nárůstu obsahu vodíku v průběhu pochodu. Příčinou je reakce atmosférického vzduchu (obsahujícího H_2O) se zásaditými složkami strusky a přechod vodíku ze strusky do kovové lázně.

Opatření proti zvyšování obsahu vodíku v oceli při ESP:

- snížení obsahu H_2 již v oceli pro ESP
- použití strusek se sníženým obsahem CaO, MgO, nejlépe pak typu $CaF_2\text{-}Al_2O_3$ bez fyzikálně vázané vody
- použití ochranné atmosféry nad struskou (sušený vzduch)

Pokud se týče dusíku, je možné snížení jeho obsahu a to o 15 až 30 %. Předpokladem je použití strusek schopných rozpouštět dusík. Rovněž může dojít k disociaci nitridů TiN podle reakce

$TiN_{(S)} \rightarrow /Ti/ + /N/$

a část dusíku může přejít do strusky vhodného složení.

Vlastnosti oceli přetavené pomocí ESP

- potlačení až úplná eliminace segregačních procesů doprovodných prvků – malý objem tekutého kovu
- usměrněné tuhnutí (od podložky směrem nahoru) - jednotlivé zrna struktury jsou orientovány pararelně s podélnou osou ingotu – vzniká vysoce homogenní ocel
- vysoká mikročistota oceli - rozdělení zbývajících nekovových vměstků rovnoměrně po průřezu ingotu
- vysoká izotropie vlastností vyrobené oceli

ESP se požívá pro přetavování nejen klasických ocelí ale i vyokolegovaných ocelí, superslitin a neželezných kovů. Oceli se využívají v elektrotechnickém průmyslu, v leteckém průmyslu, pro výrobu náročných kuličkových ložisek apod., tzn. všude tam, kde jsou zvýšené požadavky na homogenitu a mikročistotu oceli.

Nové pochody elektrostruskového přetavování

PESR – Pressurized Electroslag Remelting

Používá přetavování v hermeticky uzavřené komoře s vyšším tlakem dusíku, který leguje vytavenou ocel. S ohledem na nízký přestup dusíku s plynné do pevné fáze (krátká doba působení) je dusík přidáván do reakční zóny v podobě legur. Používá se pro výrobu speciálních ocelí a slitin.

VacESR – Vacuum Electroslag Remelting

Používá se pro výrobu zvláště čistých oceli a slitin (např. pro letecký průmysl), vyznačuje se velmi nízkým obsahem vodíku, oxidických vměstků.

Firma Inteco (*Internationale Technische Beratung* – Rakousko) vyvinula dvě modifikace ESP s cílem přiblížit se výhodám plynulého odlévání oceli. Jedná se o procesy

- *ESRR – Electro Slag Rapid Remelting*
- ESCC –Electro Slag Continuous Remelting

Podstata procesu ESRR spočívá v použití krystalizátoru tzv. T-tvaru. Jeho spodní, užší část odpovídá požadovanému průměru výsledného přetaveného ingotu. Horní část krystalizátoru je rozšířena a její průměr je definován na základě maximálního průměru použitých ingotů pro přetavování. Přetavováním ingotů (elektrody) o větších průměrech do ingotů menšího průměru se zvýší rychlost jeho tvorby. Obyčejně se volí průměry přetavované elektrody 2 až 3 krát vyšší než průměr hotového ingotu (MPT Inernational 5/96, s. 48).

Otázky k probranému učivu

1. Princip ohřevu v indukčních pecích.
2. Elektrická zařízení indukčních pecí, regulace výkonu indukčních pecí.
3. Hloubka vniku indukovaného proudu do vsázky, rozbor jednotlivých faktorů.
4. Technologie výroby oceli v indukčních pecích, výhody a nevýhody IP.
5. Výroba oceli v indukčních vakuových pecí (VIP), metalurgické pochody při VIP, oduhličení, desoxidace, odplynění, odpařování složek lázně, příklady využití VIP.
6. Elektrostruskové přetavování oceli (ESP), schéma ESP, napájení ESP, strusky používané při ESP, odsíření kovu při ESP, podstata snížení obsahu kyslíku a oxidických vměstků při ESP.
7. Chování rozpuštěných plynů při ESP, vlastnosti oceli přetavené pomocí ESP.
8. Nové pochody elektrostruskového přetavování - PESR, VaCESR, ESRR, ESCC.

TÉMATICKÝ BLOK 14

Výroba feroslitin

Feroslitiny jsou slitiny železa s dalšími kovy i nekovy např. FeMn, FeCr, FeP.

Feroslitiny obsahují:

- základní prvek - Fe, Si (báze)
- hlavní prvek - Mn, Cr, V (kvůli kterému se vyrábí)
- nežádoucí příměsi - obsah se omezuje, u různých feroslitin jsou i různé nežádoucí příměsi
- škodlivé příměsi - obsah se omezuje až na tisíciny %

Např. v bezuhlíkatém FeCr je:

- Fe - základní prvek
- Cr - hlavní prvek
- Si - nežádoucí příměs
- C, P, S - škodlivé příměsi

Feroslitiny se používají na legování, dezoxidaci a k modifikaci ocelí a slitin, což je nezbytné nejen při výrobě ocelí, ale i při výrobě barevných kovů.

Proč se využívají feroslitiny a ne čisté kovy?

- feroslitiny jsou levnější než čisté kovy
- dosahuje se nižšího propalu hlavního prvku než v případě čistých kovů
- u některých feroslitin se zvyšuje hustota (např. FeSi, FeTi), což má pozitivní vliv na proces rozpouštění a tedy i propal
- nižší teplota tání u některých feroslitin ve srovnání s čistými kovy (např. FeV, FeW, FeMo)
- feroslitiny mohou mít lepší i další fyzikální vlastnosti – např. kusovost (lépe se v oceli rozpouštějí)

Průmyslová výroba feroslitin - 60 léta 19. století

- redukční tavení v kelímkových pecích
- pak výroba ve VP (vysokopecní FeSi, FeMn - zrcadlovina)
- elektrotermický způsob v EOP - elektrický oblouk, redukční prostředí
- aluminotermické způsoby

Výrobní závody feroslitin:

- OFZ, a.s. Istebné, SK (Oravské ferozliatinárske závody)

Rozdělení feroslitin:

⇒ podle počtu legujících prvků:

jednoduché feroslitiny - pouze jeden hlavní prvek

komplexní feroslitiny - obsahují více hlavních prvků (v SiCr resp. FeSiCr je to Si a Cr)

⇒ z hlediska obsahu hlavního prvku

nízkoprocentní (FeSi 15, 18, FeMn 25)

vysokoprocentní

⇒ podle způsobu použití

* dezoxidační
* legující

⇒ podle způsobu výroby

* vysokopecní - neoduhličené feroslitiny
* elektrotermické - karbotermický způsob
* metalotermické - bezuhlíkové feroslitiny

Termodynamika, kinetika a mechanismus pochodů při výrobě feroslitin

Existuje značný počet technologií pro výrobu a to i u feroslitin stejného, či podobného složení. Z hlediska metalurgické podstaty, respektive fyzikálně-chemické podstaty, lze pochody používané pro výrobu feroslitin rozdělit do následujících skupin:

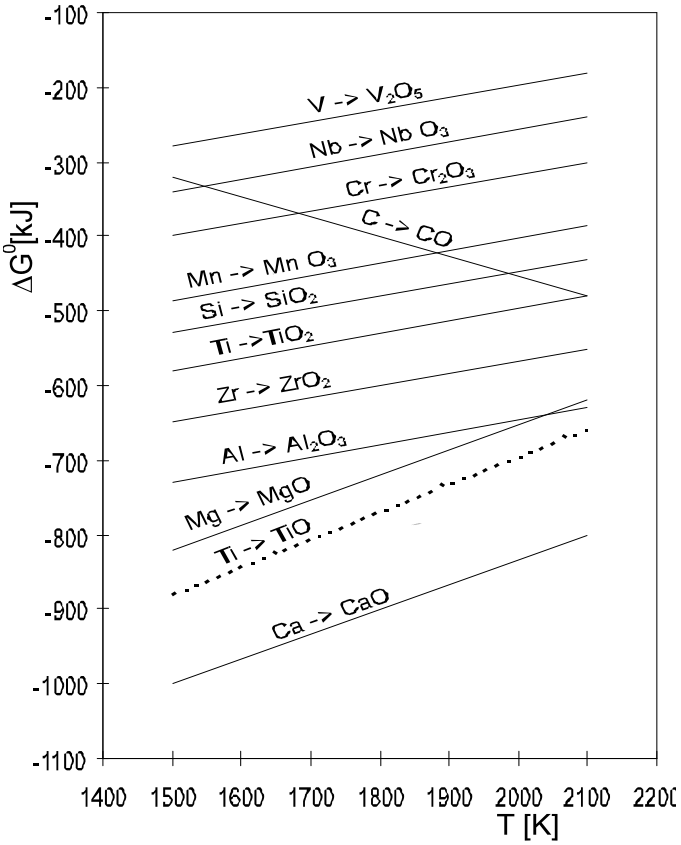
1. Karbotermické pochody (redukce uhlíkem)
2. Rafinační pochody (rafinace produktů karbotermických pochodů)
3. Metalotermické pochody - silikotermie, aluminotermie
4. Přetavné pochody (pro získání některých komplexních slitin)
5. Elektrolytické pochody
6. Jiné (např.nadusičování)

Karbotermické pochody

Principem karbotermických pochodů je redukce oxidů kovů uhlíkem za vzniku samotných kovů těchto oxidů (analogie VP pochodu).

Redukční reakce je podmíněna zejména stálostí oxidů při vysokých teplotách. Stálost oxidů je dána změnou volné entalpie při vzniku oxidu z prvků.

Čím zápornější ΔG - tím stálejší oxid, nejméně stálé jsou MoO_3 a WO_3, nejvíce stálé pak CaO, MgO, Al_2O_3 a proto jsou *nejhůře redukovatelné.*



- se stoupající teplotou klesá stálost oxidů (ΔG se stává méně záporné)
- výjimka C → CO, se stoupající teplotou stoupá i stálost CO (stoupá afinita C k O)

praktický důsledek:

- za vyšších teplot je možno uhlíkem redukovat některé oxidy
- zvýšením teploty je možno redukovat ještě stálejší oxidy
- CO je plynný, uniká z oblasti reakce - p_{CO} (výhodné)
- nižší oxid (např. TiO) je stálejší než oxid vyšší (TiO_2).

Teoreticky se tedy může *každý prvek tvořící stálejší oxid* stát *redukovadlem méně stálého oxidu*. Pro praktické uskutečnění reakce je pak nutné, aby rozdíl ΔG byl dostatečně velký (n.10^4 J). Pokud není tento rozdíl dostatečný, pak redukce probíhá neúplně a výsledná slitina vykazuje zvýšený obsah redukčního prvku.

Obyčejně tvoří prvek více oxidů. Platí, že nižší oxidy jsou stálejší než vyšší oxidy. V některých případech může být nižší oxid dokonce neredukovatelný, i když jako vyšší oxid redukovatelný je.

Redukce oxidů *uhlíkem* je reakce *endotermická*, což úplně vylučuje, aby tyto reakce probíhaly bez použití vnějšího tepelného zdroje (např. teplem elektrického oblouku apod.)

Reakce při redukcích (uhlíkem) představují sumární reakci dvou dílčích reakcí:

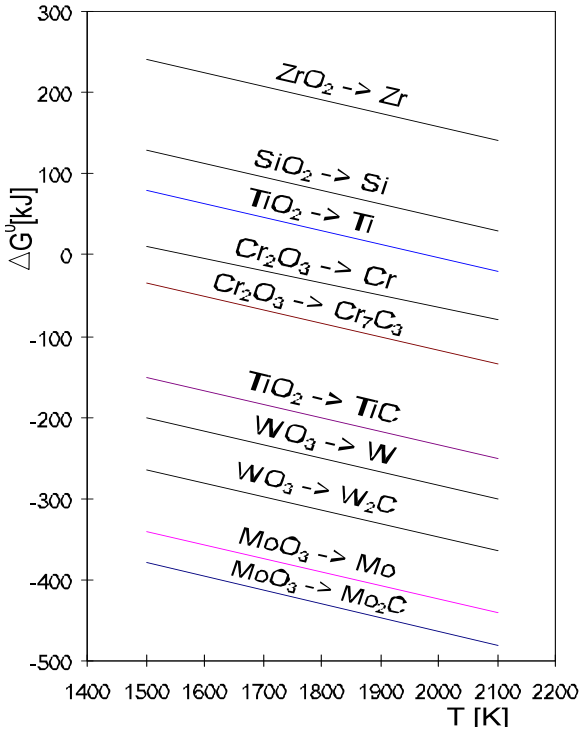
- nepřímá redukce oxidů pomocí CO $\Delta H < > 0$
- Boudoardova reakce $CO_2 + C = 2CO$ $\Delta H > 0$ (171 880 cal·mol^{-1})

Sumární ΔH je vždy kladné (endotermická reakce) na rozdíl od redukce křemíkem nebo hliníkem – exotermická reakce!

např.

$MnO + CO = Mn + CO_2$	endo či exo
$CO_2 + C = 2CO$	endo
$MnO + C = Mn + CO$	endo

Diagram závislosti změny ΔG na teplotě při redukci různých oxidů pomocí uhlíku:



- redukce MoO_3 uhlíkem bude probíhat snadno (ΔG velmi záporné)
- redukce ZrO_2 uhlíkem probíhat nebude (ΔG kladné)
- při vyšších teplotách je ΔG vzniku kovu zápornější, reakce budou probíhat úplněji - větší výtěžek kovu

Při redukci oxidů uhlíkem vznikají nejen čisté kovy, ale i příslušné karbidy těchto kovů (proto mají vyrobené feroslitiny určitý obsah C). Karbidy vznikají proto, že ΔG jejich vzniku je zápornější než ΔG vzniku pouze kovu (při redukci oxidu kovu uhlíkem).

Čím je větší tento rozdíl, tím je obtížnější výroba feroslitin s nízkým obsahem uhlíku - přednostně vzniká karbid, který vlastně předurčuje zvýšený obsah uhlíku ve feroslitině.

$Cr_2O_3 + C = Cr + CO \quad \Delta G = -126\,000\ J \cdot mol^{-1}$

$Cr_2O_3 + C = Cr_7C_3 + CO \quad \Delta G = -180\,000\ J \cdot mol^{-1}$

Nízký obsah uhlíku ve vyrobené feroslitině je možno získat jen tehdy, pokud reakce probíhá při vysokém obsahu křemíku ve feroslitině. Změna volné entalpie vzniku silicidů kovů (obecně Me_xSi_y) je obyčejně zápornější než změna volné entalpie vzniku karbidů. Křemík vytěsňuje uhlík z karbidické vazby (MeC) za vzniku silicidů (MeSi), přebytečný uhlík se vylučuje z kovu ve formě grafitu (analogicky jako v surovém železe - úlet grafitu, vysoký obsah Si v surovém železe).

Redukce uhlíkem

$(Me_xO_y) + y\ C_{(s)} \rightarrow x\ [Me] + y\ CO_{(g)}$ kov $\Delta H = +$

$(Me_xO_y) + (y+z)\ C_{(s)} \rightarrow [Me_xC_z] + y\ CO_{(g)}$ karbid $\Delta H = +$

Reakce jsou endotermické za vzniku plynného produktu (CO), proto ji budou podporovat

- zvýšená teplota (vyšší úlet redukovaného prvku, vyšší opotřebení vyzdívky, vyšší spotřeba energie)
- snížený tlak

Technologické principy karbotermické redukce

Produktem karbotermické redukce jsou tedy roztoky vyredukované složky Me (základních prvků) v železe, přičemž do uvedeného roztoku přechází též v různé míře uhlík. Míra jeho přechodu je dána obsahem křemíku v roztoku, který rozpustnost uhlíku snižuje (čím vyšší Si, tím nižší C). Snižuje ho tím, že přednostně tvoří silicidy základního prvku.

Tedy, je-li tavba vedena pouze v systému MeO-C-⊙Fe, dostáváme jako produkt roztok Fe-C-Me, přičemž Me a C tvoří v určité míře karbidy rozpuštěné ve výsledném roztoku.

Pokud redukujeme Me_xO_y pomocí levného C, ale současně chceme získat produkt s nevysokým obsahem C, musí se provést opatření ke zvýšení Si v produktu, např. současnou redukcí MeO a SiO_2 na roztok Fe-Si-C-Me. S růstem Si klesá C. Lze postupovat i tak, že do vyredukovaného systému Fe-Me-C je redukován křemík. Růst Si v roztoku vede k *vylučování uhlíku z roztoku* v důsledku *větší afinity Si k Me, Fe* (za tvorby rozpustných silicidů) než je afinita *C k Me, Fe*. Dochází tedy k reakci:

$[Me_xC_z] + n[Si] \rightarrow [Me_xSi_n] + z\ C_{(s)}$

Závěr:

Jako výsledek redukce uhlíkem získáváme pak buď

- uhlíkaté roztoky Fe-Me-C za poměrně nízkého obsahu Si,
- nebo nízkouhlíkaté roztoky Fe-Me-Si, při zvýšeném obsahu křemíku.

Rafinační pochody produktů redukce uhlíkem

Produktem redukce uhlíkem jsou roztoky typu Fe-Me-C↑-(Si↓), nebo Fe-Me-C↓-Si↑. Tyto produkty se mohou již přímo využívat (např. ↑C FeCr, ↓C FeSiCr), ale častěji slouží pro následnou výrobu nízkouhlíkatých, nebo nízkokřemíkatých feroslitin rafinačními pochody.

Základními rafinačními pochody jsou:

- oduhličení pomocí oxidačních plynů
- odkřemičení oxidační struskou.

Oduhličení roztoků Fe-Me-C↑-Si↓ v konvertoru

Provádí se:

- plynným kyslíkem
- směsí O_2 + např. argon (analogie AOD)
- plynným kyslíkem za použití vakua - analogie výroby AK ocelí - nižší propal např. Cr při oxidaci C (analogie VOD)
- v tuhém stavu kyslíkem oxidů typu Me_xO_y či SiO_2 v podmínkách vakua za zvýšených teplot podle reakcí

$$y[C]_{Fe\text{-}Mn\text{-}C} + Me_xO_y \rightarrow x[Me] + y\,CO_{(g)}$$

$$[C]_{Fe\text{-}Mn\text{-}C} + SiO_2 \rightarrow SiO_{(g)} + CO_{(g)}$$

Odkřemičení roztoků Fe-Me-C↓-Si↑

Provádí se pomocí oxidační strusky, např. periodickou tavbou v nístějové peci. Probíhají reakce (pro zjednodušení uvažujeme MeO místo Me_xO_y):

$$[Si]_{Fe\text{-}Me\text{-}Si\uparrow C\downarrow} + 2(MeO) \rightarrow (SiO_2) + 2[Me]$$

$$(SiO_2) + 2(CaO) \rightarrow 2\,CaO.SiO_2$$

přítomný CaO váže SiO_2; CaO ovlinňuje γ_{MeO} i γ_{SiO2}, u SiO_2 jde o snížení

Požadavky kladené na rafinační MeO:

- nevysoká afinita Me k O - čím vyšší afinita, tím hůře uvolňuje [O] k oxidaci
- malá ztráta Δ H
- FeO - vhodné - ředí feroslitinu
- MnO - vhodné - hlavní legovací prvek (např. MnO)
- $(MeO)^*$ - jen když požadujeme Me^* ve slitině

Metalotermické pochody

Principem metalotermických pochodů je redukce oxidů pomocí kovů s vysokou afinitou ke kyslíku (např. Al, Si, Si slitiny aj.). Při této redukci se uvolňuje tolik tepla, že:

- bez vnějšího přívodu energie se dosahuje velmi vysoké teploty
- produkty redukce (s vysokou teplotou tavení) se tvoří v tekutém stavu, takže vyredukovaný kov se odděluje ve formě kapek. Redukovadlo (kov) se oxiduje na příslušný oxid a téměř plně přechází do strusky.

Nejčastěji se pro redukci využívá Al nebo Si - mluvíme pak o aluminotermii nebo silikotermii. Redukce MeO pomocí Al se vyznačuje zápornější ΔH (reakce je silně exotermická) než redukce pomocí Si. Proto je *nutný u* redukce *Si příhřev.* (další důvod příhřevu: tvorba silicidů - na jejich rozklad je potřeba vyšší teplota).

Aluminotermie má výhodu v nižším obsahu C v získané feroslitině (C je v rozmezí 0,05-0,1 %). Vyrábí se např.: nízkouhlíkatý FeW, FeMo, FeCr, FeMn, FeV, FeTi, FeNb, FeTa a feroslitiny TiAl, CrAl.

Vstupní materiál pro aluminotermii je nutno upravovat z hlediska škodlivých příměsí (hlavně S, As, Sn, Pb, P < 0,05-0,1 %), poněvadž vznikající struska má poměrně malý rafinační účinek.

Základy metalurgie metalotermických pochodů

Základní rovnice:

$$Me_xOy + z[R] \rightarrow x[Me] + R_zO_q$$

např. pro redukci TiO_2 pomocí Al lze napsat:

$$(TiO_2) + {}^4/_3[Al] \rightarrow [Ti] + {}^2/_3(Al_2O_3) \quad \Delta H = -\ \text{(silně exotermická)}$$

Vysoká teplota posunuje rovnováhu metalotermické reakce doleva.

Při návrhu reakčních systémů (čím redukovat, tavidlo, strusky...) posuzujeme:

- TD aspekty: samovolnost uvažované reakce při různých teplotách
- zbytkový obsah redukovadla ve slitině (vliv na jakost)
- tepelné zabarvení - dostatečnost pro úplnou tepelnou bilanci (teplo na roztavení, tepelné ztráty)
- TD a kinetické aspekty: - vliv struskotvorných přísad (tavidel)
- ekonomické aspekty: - cena redukovadla, výtěžek z koncentrátu aj.

Termodynamické aspekty

Pro zjednodušení je reakce prováděna na příkladě redukce TiO_2 pomocí Al.

$$K_{Ti-Al} = \frac{a_{[Ti]} \cdot a_{(Al_2O_3)}^{2/3}}{a_{[Al]}^{4/3} \cdot a_{(TiO_2)}} \qquad K_{Ti-Al} = \frac{f_{Ti} \cdot [Ti] \cdot X_{Al_2O_3}^{2/3} \cdot \gamma_{Al_2O_3}^{2/3}}{f_{Al}^{4/3} \cdot [Al]^{4/3} \cdot X_{TiO_2} \cdot \gamma_{TiO_2}}$$

Zbytkový obsah TiO_2 ve strusce (kritérium výtěžku reakce v případě rovnováhy) je dán vztahem:

$$X_{TiO_2} = \frac{1}{K_{Ti-Al}} \cdot \frac{[Ti]}{[Al]^{4/3}} \cdot \frac{f_{[Ti]}}{f_{[Al]}^{4/3}} \cdot X_{Al_2O_3} \cdot \frac{\gamma_{Al_2O_3}^{2/3}}{\gamma_{TiO_2}}$$

Obsah TiO_2 ve strusce bude tedy tím nižší, čím bude

- nižší teplota: exotermická reakce ($\uparrow t$, $\downarrow k$, $\uparrow X_{TiO2}$)
- vyšší f_{Al}: přítomnost prvků zvyšující aktivitu Al
- nížší f_{Ti}: přítomnost prvků snižující aktivitu Ti
- nížší X_{Al2O3}: přísada neutrálního MgO
- vliv bazicity strusky

Metalotermické redukce probíhají v některých případech do úplného vyredukování kovů (např. Fe, W, Mo). Jiné jen do ustanovení rovnováhy mezi roztavenou kovovou lázní a oxidickou struskou. Ve strusce zůstává značné množství oxidu MeO a část kovového redukovadla bude legovat vznikající feroslitinu (Al ve FeTi).

Při výrobě FeTi se tvoří slitina FeTiAl s 60-80% Ti při současném vysokém obsahu TiO, TiO_2 které jsou ve strusce svázany s Al_2O_3. Tyto vazby se mohou, byť ohraničeně, měnit přísadou silné zásady, či silné kyseliny do strusky pro vazbu s Al_2O_3 (který je slabě kyselý, až amfoterní). Do strusky je tedy možno přisadit oxidy takového kovu, který svými chemickými vlastnostmi jsou shodné s MeO a mohou ho ve vazbách s Al_2O_3 zaměnit, aniž by se redukovaly ze strusky.

Příznivě působí přísada CaO, jestliže je MeO zásaditý (TiO, MnO), obdobně působí přísada BaO, MgO. Uvolněný (TiO, MnO) je možno tak více využít pro další redukci.

Vliv teploty je možno dedukovat z tepelného zabarvení reakce, která je silně exotermická. Posun rovnováhy směrem doleva při vyšších teplotách je nežádoucí. Není vhodné zvyšovat teplotu nad teploty zajišťující dokonalou tekutost systému. Pak je nutno chladit přísadami MgO, nebo vratné strusky.

Tepelná bilance

Pro tepelnou bilanci je určující tepelné zabarvení a absolutní hodnota ΔH metalotermické reakce. Navíc je nutno uvažovat:

- ΔH tvorby silicidů, aluminátů v kovu
- ΔH tvorby křemičitanů, hlinitanů ve strusce
- ΔQ potřebné pro ohřev a tavení výchozích látek i produktů při T reakce
- ΔQ tepelných ztrát
- ΔH pomocných exoreakcí, Q příhřevu (eventuelně), předehřev vsázky

Např. reakce

$$(Fe_2O_3) + 2[Al] \rightarrow (Al_2O_3) + 2[Fe] \quad \Delta H^0_{298} = \Delta 854\ kJ \cdot mol^{-1}$$

- je silně exotermická a zaručuje vznik produktů (Fe a Al_2O_3) v tekutém stavu.

Avšak u reakce:

$$3(MnO) + 2[Al] \rightarrow (Al_2O_3) + 3[Mn] \quad \Delta H^0_{298} = -519\ kJ \cdot mol^{-1}$$

- nedojde k vytvoření dostatečné teploty pro roztavení hlinité strusky. Zaměníme-li MnO např. Mn_3O_4 je $\Delta H^0_{298} = -2535\ kJ \cdot mol^{-1}$ a tepelný efekt bude dostatečný.

Závěr:

- Entalpie získané strusky, kovu a tepelné ztráty jsou přibližně stejné pro jednotlivé kovy (předpoklad).
- Bylo stanoveno pravidlo:

  Aluminotermický proces po zážehu probíhá *samovolně*, jestliže množství vyvíjejícího se tepla na 1g vsázky (tj. včetně struskotvorných přísad) je větší než cca 2300-2700 J.

Někdy se tato hodnota srovnává (ne zcela správně) s tzv. *měrným tepelným efektem* aluminotermické reakce

$$q = \frac{\Delta H^0_{298}}{n_{MeO} \cdot M_{MeO} + n_{Al} \cdot M_{Al}} \quad \text{cal/g vsázky (MeO+Al)}$$

Hodnota q nebere v úvahu hmotnost struskotvorných přísad a platí pro 298 K. Je ale vhodným pravidlem pro posouzení (porovnání) průběhu. Hodnoty q jsou tabelovány.

Z těchto hodnot je zřejmé:

- většinu kovů pro legování oceli je možno získat redukcí Al z jejich vyšších oxidů
- při použití Si je redukce možná jen pro Mn, Mo, Cr (další jen s přívodem vnějšího tepla)

Pod „samovolným průběhem“ je zde uvažována nejen podmínka záporného ΔG, ale i

- ostré rozdělení kovu a strusky
- optimální množství přísady Al a Si, aby se získala tekutá struska $MeO\text{-}Al_2O_3$, $MeO\text{-}SiO_2$ nebo $MeO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$
- množství směsi by nemělo být menší než 200 kg (aby tepelné ztráty nebyly vysoké)
- velikost částic MeO, Al, Si by neměla překročit 0,3 mm
- čistota Al; obsah [O] v něm ne větší než 0,0500 %

Další cesta ke zvýšení výtěžku (a mnohdy vůbec pro možnost provedení aluminotermické redukce z hlediska tepelné bilance) je využití tzv. *pobočné exotermické reakce.* Pro tento účel jsou vhodné oxidy MeO s nízkou hodnotou ΔH^0 (tvorby MeO). Jinými slovy s nízkou afinitou ke kyslíku, jako např. FeO, Fe_3O_4, Fe_2O_3. Železo vyredukované z FeO či z Fe_2O_3, Fe_3O_4 ve vznikající slitině působí na výtěžek příznivě svým ředícím účinkem.

Možnosti pobočných exo reakcí:

- použití vyššího oxidu Me místo nebo spolu s MnO (např. MnO_2+MnO, CrO_3+Cr_2O_3 apod.)
- použití solí Me obsahujících kyslík (např. $KMnO_4$); použití solí draslíku ($KClO_3$)
- použití vyššího oxidu, který se redukuje jen na nižší a nevstupuje do kovové slitiny, ve formě kovu (př. $CaO_2 \rightarrow CaO$+..., $BaO_2 \rightarrow BaO$+ ...)

Průběh pobočné reakce vyžaduje zvýšení spotřeby Al či Si. Zvyšuje se i celkové množství strusky.

Doplňující teplo u reakcí s nedostatečným ΔH, je možno získat také předehřevem složek před zapálením směsi.

Teplotu tavení strusky Al_2O_3 z aluminotermické redukce je možno snižovat zvýšením obsahu MeO, FeO, ZrO_2, TiO_2.

Kinetika a mechanismus metalotermických reakcí

Mělo by být zajištěno:

1. Nízká zbytková hodnota X_{MeO} (max. vyredukování MeO)
   - termodynamicky:
     - vysoké γ_{MeO}
     - nízké γ_{RzOy}
     - nízká teplota
   - kineticky: silné přiblížení systému k rovnovážnému stavu, tj. silné ztekucení vznikající strusky obsahující zejména R_zO_y.
2. Dostatečná rychlost reakce
3. Dostatečně rychlé odstranění granálií z vrstvy strusky (tuhne)

Poznámka: Jde o exotermickou reakci, vysoká teplota žádoucí z hlediska 2,3, nežádoucí z hlediska 1.

Použití přísad snižující teplotu taveniny strusek je ohraničeno - velká spotřeba tepla na jejich tavení. Možno je získat jako produkt poboční exotermické reakce.

Rychlost procesu aluminotermické reakce se musí kontrolovat a řídit (výhozy, ohrožení zdraví). Musí se použít vhodné rozměry zrna redukovadla - větší kusy zpomalují pochod, struska i kov musí být pak delší dobu tekuté, aby se reakce mohly dokončit. V prvních okamžicích redukce dochází v okolí Al k ochuzení o Me a tvoří se kapka Al-Me, která prokapává směrem dolů a při průchodu přes vrstvu strusky se dále rafinuje od Al.

- Teploty reakce - 2200-2400 °C
- Při výrobě FeW - 2500 °C

Přetavné pochody

Cíl:

Získat komplexní slitinu

Mnohokomponentní slitiny - přetavba v IP nebo VIP či EOP z čistých složek či slitin.

Otázky k probranému učivu

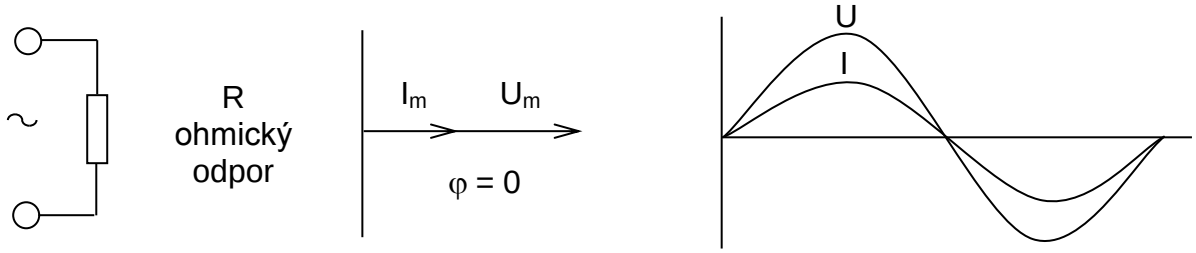
1. Členění feroslitin, základní prvek, hlavní prvek, nežádoucí příměs, škodlivá příměs.
2. Výhoda použití feroslitin místo čistých kovů.
3. Termodynamika karbotermických pochodů.
4. Technologické principy karbotermické redukce.
5. Rafinační pochody produktů redukce uhlíkem.
6. Základy metalurgie metalotermických pochodů výroby feroslitin.
7. Tepelná bilance metalotermických pochodů.
8. Kinetika a mechanismus metalotermických reakcí.
9. Charakteristika přetavných pochodů.

PŘÍLOHA K TÉMATICKÉMU BLOKU 1

Průběhy střídavého napětí a proudu v obvodech s ohmickým, induktivním a kapacitním odporem

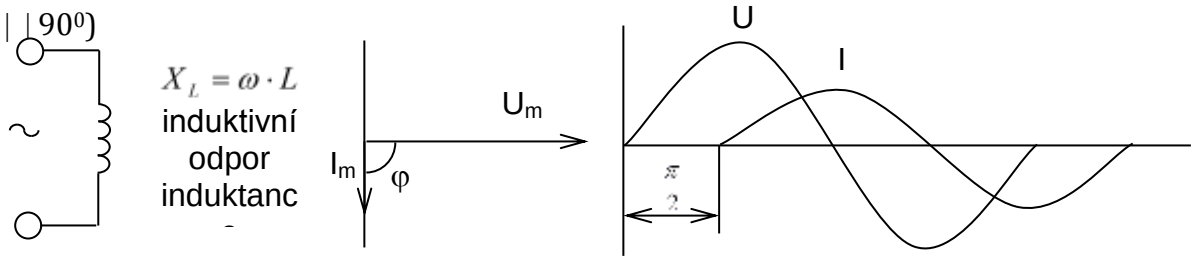
Obvod střídavého proudu s ohmickým odporem R

fázový posuv mezi proudem a napětím je nulový



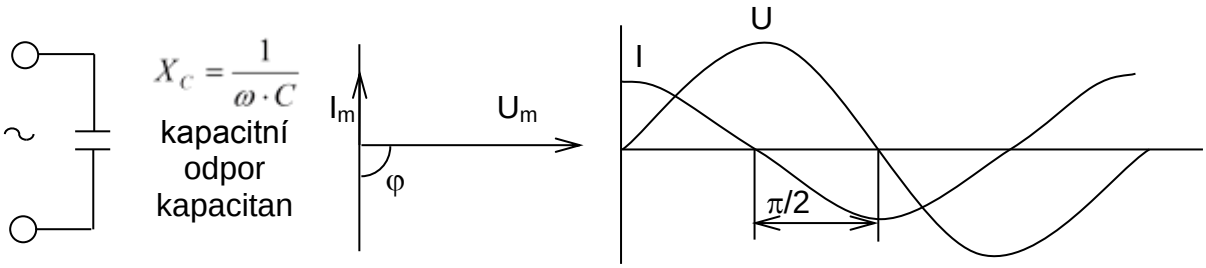
Obvod střídavého proudu s indukčností L

- proud se v důsledku samoindukce v cívce zpožďuje za napětím o hodnotu $\varphi = \frac{\pi}{2}$



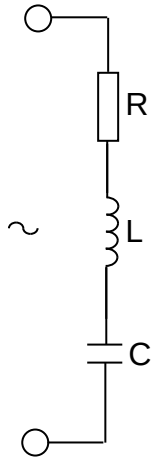
Obvod střídavého proudu s kapacitou C

- napětí se zpožďuje za proudem o hodnotu $\varphi = \frac{\pi}{2}$| |90⁰)



Průběhy střídavého napětí a proudu v obvodech s kombinací ohmického, induktivního a kapacitního odporu

Obvod střídavého proudu se sériovým zapojením R, L, C



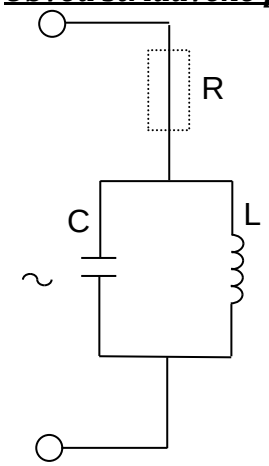
$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Z – impedance, zdánlivý odpor
$X = X_L - X_C$ – reaktance; $tg\phi = (X_L - X_C) / R$

Pokud je $X_L = X_C$ pak platí, že $Z = R$ což jsou podmínky pro vznik *sériové rezonance obvodu.*
Při sériové rezonanci se obvod chová tak, jako by byl zapojen pouze rezistor, tzn., že proud je ve fázi s napětím. Rezonance může nastat při konstantní frekvenci, pokud měníme *L,C* nebo při konstantním *L,C* pokud měníme frekvenci f_{rez}. Tuto frekvenci nazýváme rezonanční frekvencí

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

Obvod střídavého proudu s paralelním zapojením C a L



$$Z = \frac{1}{\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}}$$

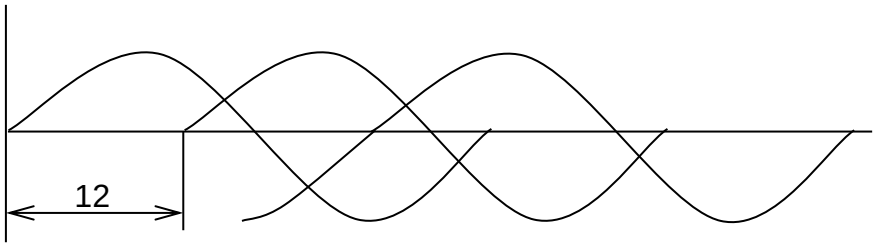
Pokud $X_L = X_C$ pak nastává *paralelní rezonance*.
Elektrické pole kondenzátoru se mění v magnetické pole indukčnosti a naopak.
ω - úhlová rychlost
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 6{,}28 \,.\, 50 = 314\ s^{-1}$ (pro 50 Hz)

Výkon střídavého proudu

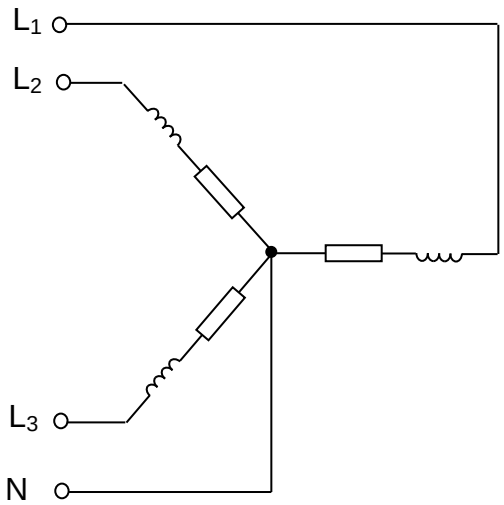
Zdánlivý výkon:	$P_{zd} = U \cdot I$	[VA]
Činný výkon:	$P_č = U \cdot I \cdot \cos\varphi$	[W]
Jalový výkon:	$P_j = U \cdot I \cdot \sin\varphi$	[VAr]

kde φ je fázový posuv mezi napětím a proudem $\varphi_{teor.}$ <-90; 90> a cos φ je účiník

Třífázový proud

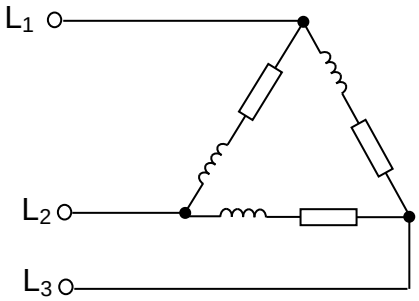


<u>Základní zapojení třífázových spotřebičů</u>



Zapojení do hvězdy

$U_{fáz} = U_{L1-N} = U_{L2-N} = U_{L3-N} = 220\ V$
$U_{sdruž} = U_{L1-L2} = U_{L1-L2} = U_{L1-L2} = 380\ V$
$U_{sdruž} = \sqrt{3} \cdot U_{fáz}$
$I_{sdruž} = \sqrt{3} \cdot I_{fáz}$
$P_č = 3.U_{fáz} \cdot I_{fáz} \cdot \cos\varphi$



Zapojení do trojúhelníku

$P_č = 3 \cdot U_{sdruž} \cdot I_{sdruž} \cdot \cos\varphi$
$P_č = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{fáz} \cdot I_{fáz} \cdot \cos\varphi$

Výkon stoupne při přepnutí Y – Δ | | |
$\sqrt{3}$ krát = 1,73krát