

Technická univerzita v Košiciach

Fakulta baníctva, ekológie, riadenia procesov a geotechnológií

**Vybrané technologické objekty a procesy  
v oblasti spracovania surovín - kyslíkový  
konvertor**

Teória procesov

2019

Ing. Michal Takáč

# Obsah

1	Kyslíkový konvertor	4
2	Procesy v kyslíkovom konvertore	7
3	Riadenie procesov v kyslíkovom konvertore	11

## Zoznam obrázkov

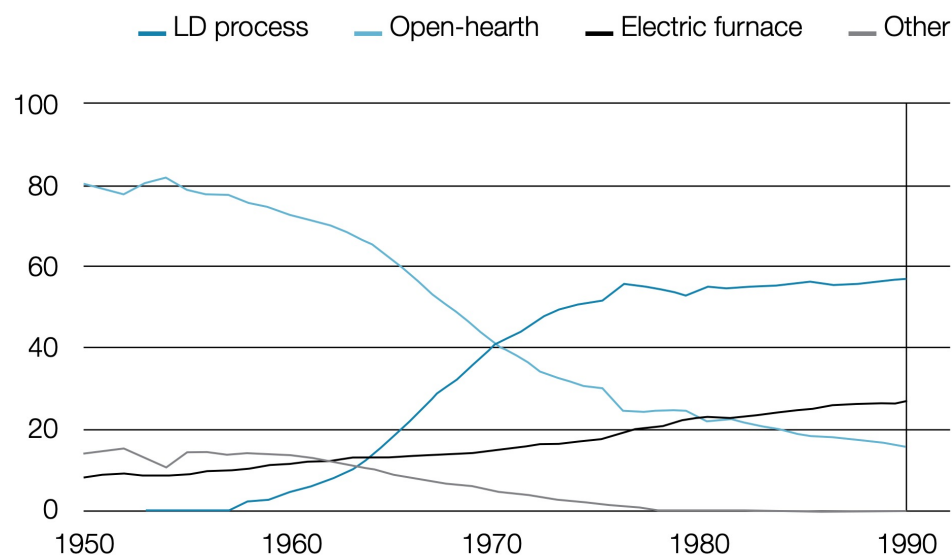
1–1	Podiel výrobných metód ocele v percentách [4] . . . . .	4
1–2	Výroba ocele v konvertore fúkaním kyslíka zhora (LD/BOF) [3]. . .	5
1–3	Výroba ocele v konvertore fúkaním kyslíka zdola (Q-BOP) [3]. . .	5
1–4	Výroba ocele procesom BOF a Q-BOP v LD konvertore s kombi- novaným typom fúkania. . . . .	6
2–1	Znázornenie elementárnych procesov v LD konvertore. . . . .	8
2–2	Zmeny v zložení kovov a trosky počas výroby ocele v LD/BOF procesom pri 300t taveniny [3]. . . . .	9
2–3	Chemické a tepelné procesy v LD konvertore [1]. . . . .	11
3–1	Schéma funkcionality systému automatizovaného LD procesu [3]. .	12

# 1 Kyslíkový konvertor

V oceliárstve nastal počas druhej polovice 20. storočia významný posun a progres vo vývoji technológií a procesov výroby ocele. Jedným z najdôležitejších milníkov bolo prvé spustenie komerčnej prevádzky výroby ocele vháňaním kyslíka do konvertora začiatkom 50. rokov minulého storočia v mestách Linz (firma VÖEST) a Donawitz (forma ÖAMG) v Rakúsku. Z názvov týchto miest pochádza aj pomenovanie spôsobu výroby ocele praktizovanom v kyslíkových konvertoch, a to LD proces, a zároveň aj názov samotného kyslíkového konvertora (LD konvertor). LD proces je vo svete široko preferovaná a efektívna metóda výroby ocele vďaka vysokej produktivite a značne nízkym výrobným nákladom [5].

Postupom času a zdokonaľovaním tohto procesu sa LD konvertory rozšírili do celého sveta a už niekoľko rokov sú najvyužívanejšou technológiou pre výrobu ocele na celom svete (až 65% podiel tejto metódy pre tavbu surovej ocele).

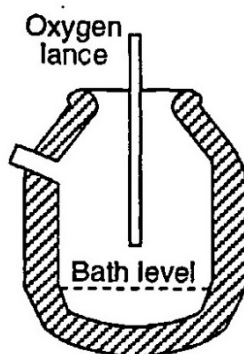
## Production method shares in %



Shares of production methods in world crude steel production, 1950–1990.<sup>90</sup>

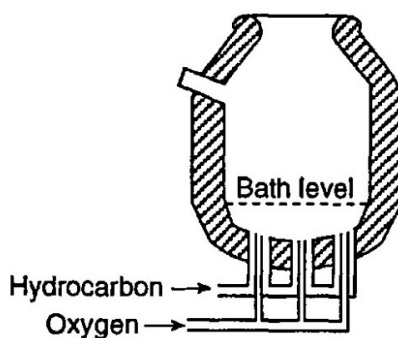
Obrázok 1 – 1: Podiel výrobných metód ocele v percentách [4]

Spomínaný LD proces sa v rôznych častiach sveta nazýva odlišne. Napríklad vo Veľkej Británii sa označuje ako BOS (basic oxygen steelmaking); v Amerike a v Ázijských krajinách BOF (basic oxygen furnace) s výnimkou americkej korporácie U.S. Steel, kde sa často označuje ako BOP (basic oxygen process) [3].



**Obrázok 1 – 2:** Výroba ocele v konvertore fúkaním kyslíka zhora (LD/BOF) [3].

V 70. rokoch bol v Kanade a Nemecku vyvinutý upravený typ konvertora s vháňaním kyslíka z dolnej časti, ktorý bol následne komercializovaný. Tento proces sa v Európe označuje ako OBM a v iných častiach sveta ako Q-BOP.



**Obrázok 1 – 3:** Výroba ocele v konvertore fúkaním kyslíka zdola (Q-BOP) [3].

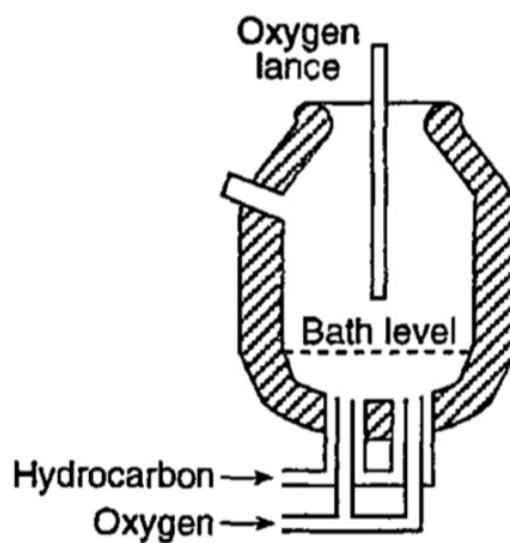
V konvertore pre Q-BOP proces sa v dolnej časti nachádzajú trysky vsadené do odnímateľného dna, cez ktoré je vháňaný kyslík ( $O_2$ ) spolu s páleným vápnom cez prstencovú medzeru okolo centrálnej rúry sa privádza plyný uhľovodík (napr.

propán alebo metán). Po kontakte s tekutou ocelou uhľovodík disociuje na C a  $H_2$  pri absorpcii tepla. Táto endotermická reakcia potláča prehrievanie hrotu trysky exotermickou reakciou kyslíka s tekutou ocelou.

Ďalší vývojovým krokom výroby ocele v kyslíkovom konvertore bolo spojenie typov fúkania kyslíka zhora a zdola.



(a) Kombinovaný BOF.



(b) Kombinovaný Q-BOP.

**Obrázok 1 – 4:** Výroba ocele procesom BOF a Q-BOP v LD konvertore s kombinovaným typom fúkania.

## 2 Procesy v kyslíkovom konvertore

Podstatou výroby ocele v kyslíkovom konvertore je oxidácia prvkov z kovonosnej vsádzky s kyslíkom fúkaným do konvertora. Oxidy týchto prvkov prechádzajú do trosky alebo odchádzajú vo forme konvertorového plynu. LD proces sa skladá z nasledujúcich elementárnych procesov:

1. Vsádzanie šrotu
2. Nalievanie tekutého surového železa
3. Fúkanie kyslíka a pridávanie troskotvorných a legujúcich prísad
4. Meranie teploty a zloženia ocele
5. Odpich ocele
6. Odpich trosky

V moderných oceliarniach sa vyrobí cca 300t ocele v priebehu 30-40 minútového cyklu. Pre prispôsobenie akosti ocele a tvorbu trosky sa počas pochodu pridávajú rozličné prísady. Počas vsádzania a odpichu je konvertorová pec naklonená. Počas fúkania kyslíka má konvertor zvislú polohu. Zmeny polohy konvertora počas jednotlivých elementárnych procesov sú znázornené na obrázku 2–1.

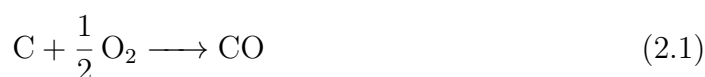
V závislosti od miestnych prevádzkových podmienok, dostupnosti šrotu, vysokopecného železa a rozsahu predúpravy, je kovová vsádzka do konvertora (LD/BOF, Q-BOP) tvorená 75 až 95 % surovým železom a zvyšok je ocelový šrot. Používané druhy šrotu sú zvyčajne tie, ktoré sa vyrábajú v oceliarni: šrot z plechu, poškodené formy, plechovky a podobne [3].

Kyslík je fúkaný vysokou rýchlosťou (až do dvojnásobnej rýchlosti zvuku) na povrch kovového kúpeľa v konvertore a v oblasti povrchu sa vytvára tzv. horúce miesto, kde prúd kyslíka naráža na povrch. Oxidačné produkty sa rozpustia v troske s výnimkou oxidu uhoľnatého, ktorý prechádza vrstvou trosky a tvorí hlavnú zložku



**Obrázok 2 – 1:** Znázornenie elementárnych procesov v LD konvertore.

konvertovaného plynu. Intenzita oxidácie jednotlivých prvkov závisí od ich chemickej afinity ku kyslíku. Oxidácia uhlíka je jedným z najdôležitejších procesov. Uhlík sa v kove počas oceliarskeho pochodu oxiduje vplyvom kyslíka najmä na CO a čiastočne na CO<sub>2</sub> podľa reakcií



Mangán sa v konvertore oxiduje na MnO



Fosfor je v oceli nežiaduci a oxiduje sa na P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>



Síra patrí medzi škodlivé prvky a prechádza do trosky vo forme CaS na základe reakcie CaO





pričom MnS vzniká podľa reakcie



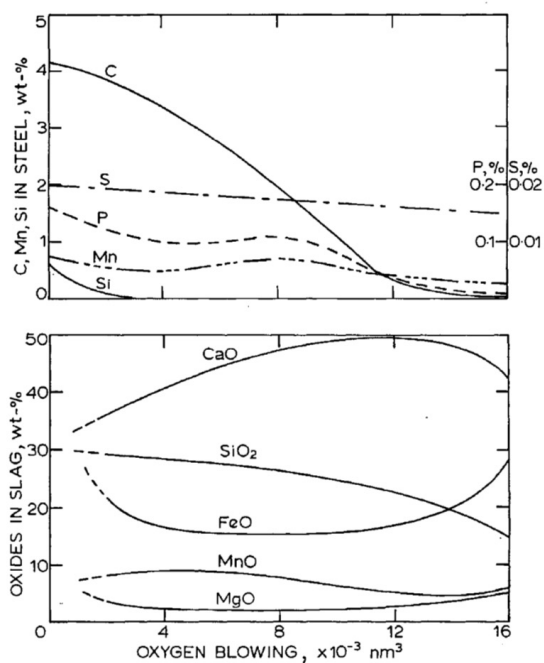
a síra taktiež odchádza aj vo forme plynu ako  $\text{SO}_2$



Kremík ma vysokú afinitu ku kyslíku, čiže sa ľahko oxiduje pričom vzniká  $\text{SiO}_2$



V počiatočných fázach fúkania sa väčšina kremíka oxiduje za vzniku trosky nízkej zásaditosti - dochádza k zmene zloženia kovu a trosky, na čo poukazuje obrázok 2–2.



**Obrázok 2–2:** Zmeny v zložení kovov a trosky počas výroby ocele v LD/BOF procesom pri 300t taveniny [3].

Intenzívny prúd kyslíka indukuje toky tekutín (cirkuláciu) v železnom kúpeli, následne núti vysoko oxidovaný kov a roztavené oxidačné produkty z povrchu železného “kúpeľa” prenikať do vnútra kúpeľa, kde reagujú s “čerstvým” kovom s vysokým obsahom nečistôt a preto je potrebné taktiež uvažovať aj straty železa vo forme FeO a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

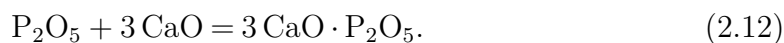


Tento prúd kyslíka a plynové bubliny vznikajúce v kúpeli privádzajú časti železnej taveniny do trosky. Teplo vyvíjané pri vysoko exotermálnych oxidačných reakciách sa spotrebúva pri zahrievaní a tavení vsádzkových materiálov, zahrievaní železného kúpeľa, trosky a oxidov uhlíka, ktoré sa tvoria pri oxidácii uhlíka a čiastočne sa strácajú do okolia počas procesu fúkania.

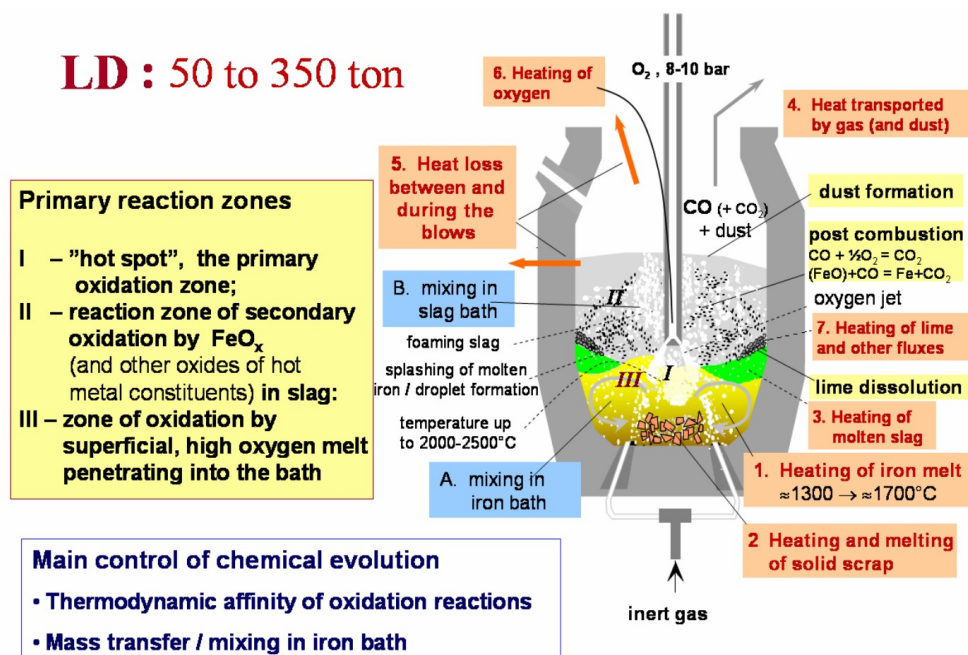
Vzniknutý SiO<sub>2</sub> prechádza do trosky ako 2 CaO · SiO<sub>2</sub> podľa rovnice



a obdobne P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> prechádza do trosky ako 3 CaO · P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> podľa rovnice [2]



Cirkulácie v železnom kúpeli spôsobené prúdom kyslíka, stúpajúcimi bublinami plynu a preplachovaním inertného plynu cez spodné trubice v konvertoroch s kombinovaným typom fúkania sa transportujú minoritné zložky taveniny železa (C, Si, Ti, Mn, P, V atď.) do horných vrstiev kúpeľa [1].



Obrázok 2 – 3: Chemické a tepelné procesy v LD konvertore [1].

### 3 Riadenie procesov v kyslíkovom konvertore

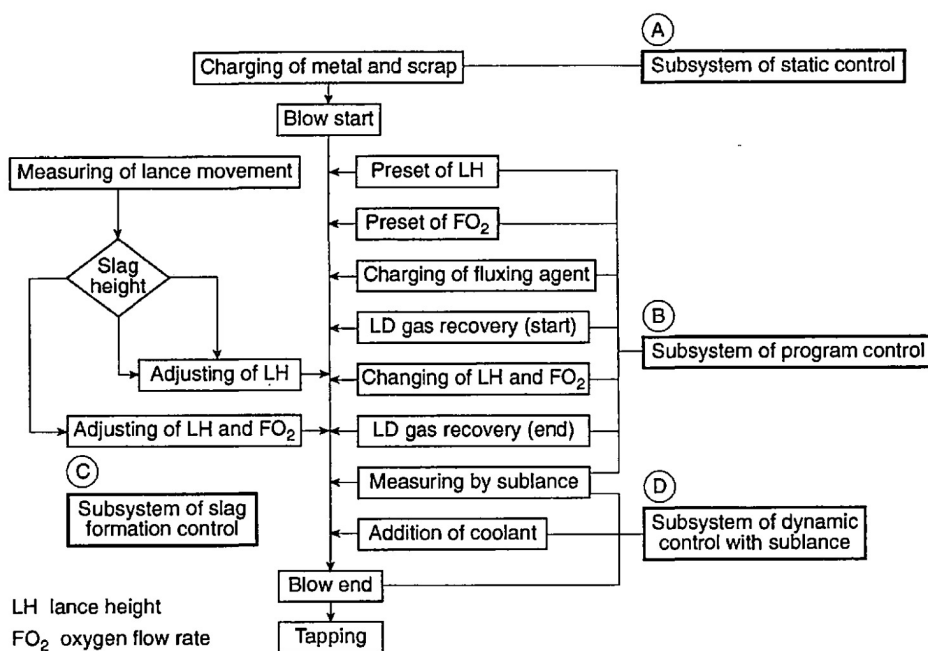
Keďže cieľom výroby ocele v kyslíkových konvertoroch je spálenie (tzv. oxidácia) nežiaducích nečistôt obsiahnutých v kovovej vsádzke, účelom tohto oxidačného procesu teda je:

- znížiť obsah uhlíka na predpísanú úroveň (z približne 4 % na menej ako 1 %, ale často nižšie),
- upraviť obsah potrebných cudzích prvkov,
- odstrániť nežiadúce nečistoty v maximálne možnej miere.

Následnou úlohou riadiaceho procesu je potom získanie predpísaných parametrov ocele, ktorá sa odpichuje z konvertora, vrátane hmotnosti, teploty a obsahu každého prvku. Na základe týchto parametrov sa rozhoduje o tom, či je roztavená oceľ prijateľná alebo nie.

Počítačom podporované výpočty vsádzky sa robia pre každú tavbu. Asi 80 percent modelu riadenia vsádzky je založený na rovnováhe tepla a materiálu, zvyšok je založený na empirických vzťahoch, ktoré sa medzi jednotlivými taviarňami líšia. Pretože každá oceliareň má svoju vlastnú formuláciu modelu riadenia vsádzky [3].

Za účelom monitorovania a riadenia procesu je možné použiť rôzne meracie systémy na poskytnutie spätnej väzby operátorovi alebo priamo existujúcemu systému na automatizované riadenie. Tieto merania môžu byť priame alebo nepriame, ako aj s časovým oneskorením alebo bez neho [6].



**Obrázok 3 – 1:** Schéma funkcionality systému automatizovaného LD procesu [3].

Existuje len niekoľko procesných premenných, ktoré môže nastavovať riadiaci systém alebo obsluha - výška trysky pre prívod fúkaného kyslíka, prietok kyslíka a prietok čistiaceho plynu. Zmeny výšky prívodnej trysky sa merajú a nastavujú ľahšie, a preto je lepšie ich používať v riadiacom systéme s uzavretou slučkou. Zmena prietoku kyslíka počas LD procesu nesmie byť väčšia ako 5%, pretože dýza je navrhnutá pre špecifický prietok [6].

---

## Literatúra

- [1] Jalkanen, H. [2006]. Experiences in physicochemical modelling of oxygen converter process (BOF), *2006 TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium* **2**: 541–554.
- [2] Laciak, M., Petráš, I., Flegner, P., Durdán, M. and Tréfa, G. [2017]. Výskum nepriameho merania teploty a uhlíka v procese skujňovania, *Technical report*, Fakulta BERG Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov.
- [3] Turkdogan, E. T. [1996]. *Fundamentals of Steelmaking*, The Institute of Materials, London.
- [4] voestalpine AG [2012]. 40 Years of LD, *Unprinted sources - holdings 26*, voestalpine AG, Corporate Communication, Documentation Center. p. 26.  
**URL:** <https://www.voestalpine.com/group/static/sites/group/.downloads/en/press/2012-broschuere-the-linz-donawitz-process.pdf>
- [5] Wang, X., Han, M. and Wang, J. [2010]. Applying input variables selection technique on input weighted support vector machine modeling for BOF endpoint prediction, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **23**(6): 1012–1018.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2009.12.007>
- [6] Widlund, D., Medvedev, A. and Gyllenram, R. [1998]. Towards Model-Based Closed-Loop Control of the Basic Oxygen Steelmaking Process, *IFAC Proceedings Volumes* **31**(23): 69–74.  
**URL:** [http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)35858-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)35858-5)