

Vliv prosazování koksu hrášku na provozní parametry vysokých pecí

Effect of Nut Coke Charging on Operational Parameters of Blast Furnaces

Ing. Petr Klus, Ph.D.¹; Ing. Jan Kufa²; Ing. Petr Faruzel¹; Ing. Roman Taska¹; Ing. Radek Hermann¹

¹ TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Česká republika

² MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Předkládaný článek se zabývá prosazováním koksu hrášku do vysokých pecí s cílem vyhodnotit vliv tohoto drobnozrnného podílu koksu v rudné vsázce na provozní a technicko-ekonomické parametry vysokopecního procesu. Na počátku roku 2017 byly na vysokých pecích č. 4 a 6 v TŽ, a.s. provedeny kampaně bez prosazování koksu hrášku za účelem zjištění jeho vlivu na provozní parametry chodu vysokých pecí. K samotnému vyhodnocení zkoumaného vlivu bylo využito statistické analýzy provozních dat, přičemž v příspěvku je pozornost zaměřena na analýzu kampaně proběhlé na vysoké peci č. 4. Vyhodnocení vlivu prosazování koksu hrášku se orientuje především na spotřebu vysokopecního koksu, stupeň využití plynu ETA CO, variabilitu obsahu Si v surovém železe, rozdíl teplot na sazebně, odvod tepla v chladnicích a diferenční tlak.

Klíčová slova: vysoká pec; prosazování koksu hrášku; provozní zkouška; statistická analýza

This paper deals with nut coke charging into the blast furnaces in order to evaluate the effect of charging the small size coke on operational, technical and economical parameters. At the beginning of 2017, a campaign of no-charging of the nut coke to blast furnace burden was carried out in order to determine its effect on blast furnace operation. This operational test was performed on both blast furnaces in Trinecke zelezarny, a.s. – BF No. 4 and BF No. 6. The statistical analysis of the operational data was used for the evaluation of the studied influence. This paper is focused on data analysis from the campaign of the BF No. 4. The evaluated effect of nut coke charging is oriented on these parameters: BF coke consumption, ETA CO, variability of silicon content in molten iron, temperature difference on the top, differential pressure, heat dissipation in copper staves and Fe staves. According to the results of the statistical analysis, the quantity of nut coke charging was in average of 50.2 kg/t of hot metal. According to the multidimensional regression, the replacement coefficient of blast furnace coke with nut coke was 0.948 kg·t⁻¹. The nut coke charging led to an increase of the ETA CO, to a decrease of temperature difference on the top, to a lower variability of the Si content in molten iron, to a decrease of heat dissipation in the cooling staves and to an increase of the differential pressure. The optimal utilisation of the nut coke depends on its reaction ability with different burden composition, coke quality, charging strategy and ideal nut coke distribution. This is a way for achievement of a maximal utilisation of nut coke charging into the blast furnace. Regarding the increase of differential pressure during the nut coke charging, the actual rate of nut coke in the burden is on the maximal value with the corresponding quality of the used BF coke and the injection rate of pulverized coal.

Key words: blast furnace; nut coke charging; operational test; statistical analysis

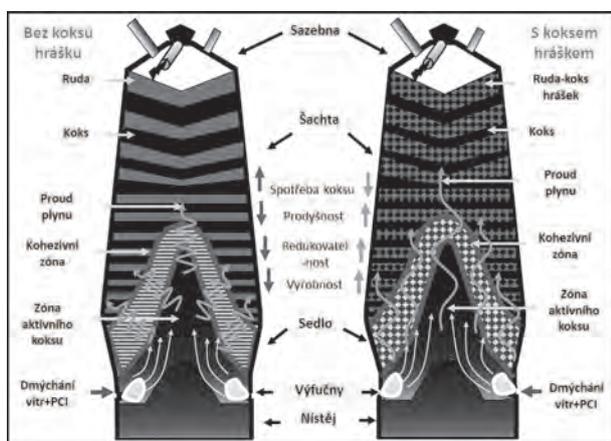
Metalurgický koks je vyráběn karbonizací směsi koksovateľného uhlí v koksárenské baterii. Takto vyrobený koks se obvykle třídí do tří granulometrických frakcí – koks prach (do 10 mm), koks hrášek (+10 mm do 25 mm) a vysokopecní koks (+25 mm do 80 mm) [1]. Vysokopecní koks je jednou z nedůležitějších složek vsázky, která ovlivňuje ekonomickou stránku vysokopecního procesu a výroby. Snahou prakticky všech výrobců železa a oceli je efektivně využívat dostupné materiály a nejnovější technologie, které v optimálním případě vedou ke snížení nákladů na výrobu. V případě technologie výroby surového železa ve vysokých pecích (VP) se celosvětově využívá drobnozrnných podílů koksu (koks hrášek, koks ořech) k zajištění vhodných podmínek chodu VP, což může přinášet zvýšení výrobnosti, úsporu vysokopecního koksu a

v konečném důsledku snížení celkových nákladů vysokopecního závodu. Provoz mnoha VP prokázal možnosti v úspoře koksu a zvýšení výrobnosti při prosazování koksu hrášku. V současné době se prosazované množství koksu hrášku liší v závislosti na podmínkách každého podniku, dále na určené velikosti zrna koksu hrášku každým podnikem a pohybuje se v širokém rozmezí od několika kilogramů až po 140 kg·t⁻¹ surového železa [2]. Na obr. 1 je zobrazeno srovnání provozu VP s koksem hráškem a bez koksu hrášku.

Současné výzkumné aktivity [3 – 6] naznačují, že využití koksu hrášku je ekonomické při správně zvoleném způsobu jeho prosazování. Většina producentů surového železa volí jeho přidávání k železnorudné části vsázky.

Tento způsob prosazování přináší výhody zejména z pohledu zajištění potřebné prodyšnosti po výšce a průřezu VP. Pokud by byl koks hrášek prosazován společně s vysokopecním koksem o větší zrnitosti, docházelo by k zaplnění volných prostorů mezi hrubozrnnými podíly, čímž by následně klesla prodyšnost vsázkového sloupce. Zavážení koksu hrášku s rudnou vsázkou tedy přináší ve výsledku zlepšení prodyšnosti v šachtě VP.

Na základě experimentů na studeném modelu doporučili Babich aj. [6] a Song aj. [3] využití koksu hrášku ve směsi s rudnou vsázkou ke zlepšení prodyšnosti v suché zóně VP. Zjistili, že větší zrnitost koksu hrášku má logicky pozitivní vliv na prodyšnost plynu. Oproti tomu vliv koksu hrášku na prodyšnost vsázky rovněž logicky klesá s jeho zvyšujícím se prosazovaným podílem.



Obr. 1 Provoz VP s/bez koksu hrášku [6]

Fig. 1 BF operation with/without nut coke [6]

Koks hrášek prosazený do VP společně s rudnou vsázkou má vliv také na prodyšnost v oblasti kohezivní zóny, kde slouží jako kostra drobného koksu, udržuje ji ve stabilní formě a zároveň může zlepšovat podmínky měknutí a tavení rudné vsázky. Obzvláště při vysokých teplotách, okolo 800 °C, se při využití koksu hrášku zabraňuje zpomalení redukce (*reduction retardation*), rozšiřuje se její oblast a v kohezivní zóně je podporována přímá redukce, která nezasahuje do oblasti nístěje, čímž se rovněž v nístěji zlepšují teplotní podmínky [2].

Bylo rovněž prokázáno, že snížení spotřeby koksu při využití koksu hrášku je vyvoláno vyšší reaktivitou koksu hrášku ve srovnání s vysokopecním koksem v důsledku zlepšených podmínek reakce s oxidem uhličitým, čímž koks hrášek přispívá k vytvoření optimálního reakčního prostředí v šachtě vysoké pece. Vyšší reaktivita koksu hrášku souvisí s jeho menší zrnitostí a větší reakční plochou. Toto zjištění prokázalo, že se koks hrášek aktivně zúčastňuje reakcí, které zároveň podporuje (Boudouardova reakce, přímá redukce, nauhličování metalického železa ad.) [3].

Mechanismus vlivu přidávání koksu hrášku k rudné vsázce na chod a výkon VP není stále úplně vysvětlen, přičemž samotné prosazování koksu hrášku je také limitováno [3]. Je zde tedy velký prostor pro další výzkum vlivu koksu hrášku na provozní parametry VP.

V Třineckých železárnách, a.s. se běžně prosazují drobnozrnné podíly koksu společně s rudnou vsázkou v množství do 75 kg·t⁻¹ surového železa. V první polovině roku 2017 byly provedeny na vysokých pecích č. 4 a 6 (VP4, VP6) kampaně bez prosazování koksu hrášku za účelem zjištění jeho vlivu na provozní parametry chodu VP. Jelikož celkové vyhodnocení vlivu koksu hrášku na provozní parametry chodu VP6 nebylo dosud kompletně analyzováno, je v článku pozornost zaměřena na analýzu provozních dat pouze z VP4. K samotnému vyhodnocení zkoumaného vlivu bylo využito statistické analýzy provozních dat.

Statistická analýza provozních dat

Cílem statistické analýzy bylo vyhodnocení vlivu prosazování koksu hrášku na spotřebu vysokopecního koksu a další provozní parametry vysokých pecí č. 4 a 6 v TŽ, a.s. Byla uvažována standardní hladina významnosti $\alpha = 0,05$. V tomto článku je pozornost zaměřena hlavně na VP4.

V datech je zachyceno období od listopadu 2016 do ledna 2017 (běžný chod VP4 s průměrnou spotřebou koksu hrášku kolem 50 kg·t⁻¹ surového železa) a dále navazující období ledna až března 2017 (období bez koksu hrášku ve vsázce VP4). Datový soubor obsahuje jak technologické proměnné, ovlivňující parametry chodu VP4 (tzv. vysvětlující proměnné), tak i provozní parametry, charakterizující kvalitu a stabilitu chodu VP4 (tzv. vysvětlované proměnné). Sestavení datového souboru bylo průběžně konzultováno s technologií vysokých pecí, kteří doporučili vyloučení 8 nestandardních dní z datového souboru. Dále byly vyloučeny dny s celkovým stáním VP4 větším než 2 h.

Finální datový soubor, ze kterého vycházela statistická analýza tak obsahuje celkem 49 záznamů (dní) běžného chodu VP4 s koksem hráškem ve vsázce a 36 dní kampaně bez koksu hrášku ve vsázce.

Vyhodnocení a diskuse dosažených výsledků vlivu koksu hrášku na spotřebu vysokopecního koksu na VP4

Vliv měrné spotřeby koksu hrášku na měrnou spotřebu vysokopecního koksu byl vyhodnocen pomocí vícerozměrné regresní analýzy.

Byl sestaven následující regresní model závislosti měrné spotřeby vysokopecního koksu (KOKS_{msp}) na třech důležitých proměnných – bohatosti vsázky (BV), měrné spotřebě uhlí (UHLI_{msp}) a měrné spotřebě koksu hrášku (hrasek_{msp}). Model je možné matematicky vyjádřit pomocí regresní rovnice (1):

$$\text{KOKS}_{\text{msp}} = 834,786 - 0,778504 \cdot \text{UHLI}_{\text{msp}} - 0,947992 \cdot \text{hrasek}_{\text{msp}} - 6,53361 \cdot \text{BV} \quad (1)$$

Takto navržený regresní model je statisticky významný jako celek. Stejně tak významné jsou odhady regresních koeficientů všech 3 vysvětlujících proměnných, které snižují spotřebu vysokopecního koksu. Koeficient

determinace tohoto modelu je roven 0,89, tzn. variabilitu měrné spotřeby vysokopečnického koksu vysvětluje z 89 %. Pomocí tzv. regresního tripletu byla provedena diagnostika regresního modelu [7]; navržený regresní model lze považovat za adekvátní.

V tab. 1 jsou uvedeny vypočtené odhady regresních koeficientů.

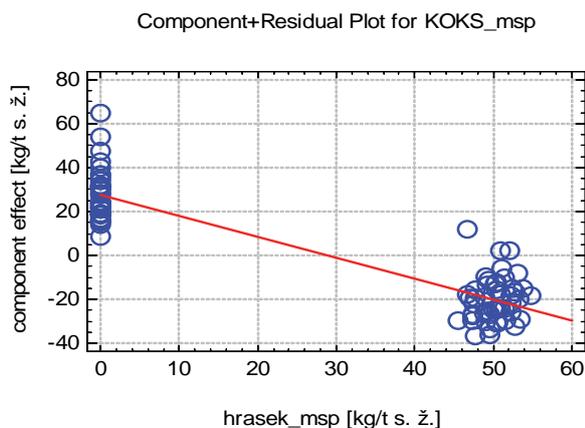
Tab. 1 Regresní koeficienty a intervaly spolehlivosti
Tab. 1 Regression coefficients and confidence intervals

Parameter	Estimate	Lower Limit	Upper Limit
CONSTANT	834.786	750.554	919.019
UHLI_msp	-0.779	-0.995	-0.562
hrasek_msp	-0.948	-1.050	-0.846
BV	-6.534	-7.593	-5.475

Regresní koeficient pro měrnou spotřebu koksu hrášku je roven -0.948. Znamená to, že zvýšení měrné spotřeby koksu hrášku o $1 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa sníží měrnou spotřebu vysokopečnického koksu o $0,948 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa.

Přesnost tohoto odhadu udává interval spolehlivosti, podle kterého se skutečná hodnota regresního koeficientu s 95% pravděpodobností nachází v rozmezí 0,85 až $1,05 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa.

Parciální regresní graf na obr. 2 ukazuje vliv měrné spotřeby koksu hrášku na změnu průměrné měrné spotřeby vysokopečnického koksu při eliminaci vlivu ostatních proměnných, respektive při uvažování jejich průměrných hodnot. V tomto grafu průměrná hodnota měrné spotřeby koksu hrášku (vypočtená ze všech hodnot obou kampaní) protíná nulovou změnu spotřeby vysokopečnického koksu, takže z grafu je např. vidět, že zvýšení měrné spotřeby koksu hrášku z průměrné hodnoty na $50 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ je spojeno se snížením spotřeby vysokopečnického koksu o cca $20 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa.



Obr. 2 Parciální regresní graf (hrasek_msp)
Fig. 2 Component + residual plot (hrasek_msp)

Na měrnou spotřebu vysokopečnického koksu má vliv celá řada dalších technologických proměnných, které v regresním modelu vyšly jako statisticky nevýznamné,

a to ať už z důvodu malého počtu datových záznamů, nebo malé variability těchto proměnných ve sledovaném období. Pro vyloučení možnosti ovlivnění výsledků regresní analýzy byly pomocí neparаметrické verze t-testu alespoň testovány rozdíly v mediánech těchto doprovodných technologických proměnných v obou sledovaných obdobích.

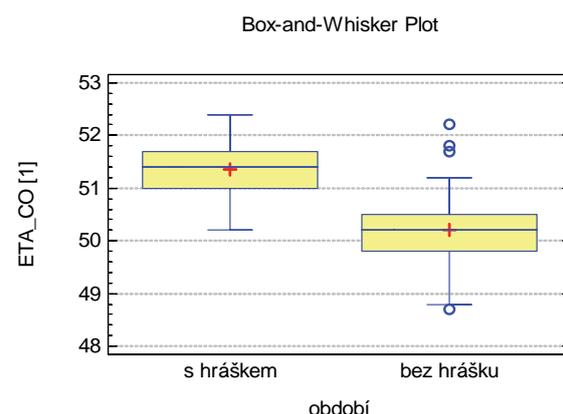
V období bez prosazování koksu hrášku byl zaznamenán vyšší medián měrného množství strusky (o $17 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa), nižší medián obsahu Mn v surovém Fe (o 0,03 %), dále vyšší měrná spotřeba vápence (o $1,9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa) a vyšší teplota horkého větru (o $4 \text{ }^\circ\text{C}$). Tyto rozdíly však zásadně neovlivnily výsledky vícerozměrné regrese.

Vyhodnocení a diskuse dosažených výsledků vlivu koksu hrášku na další provozní parametry VP4

Spotřeba vysokopečnického koksu není jediný sledovaný ukazatel chodu VP4. Pomocí dvouvýběrového t-testu byly porovnány průměrné hodnoty dalších 6 důležitých ukazatelů chodu VP4 v obou sledovaných obdobích. Nalezené (statisticky významné) rozdíly doplněné p-hodnotami provedených t-testů a krabicovými grafy jsou komentovány níže.

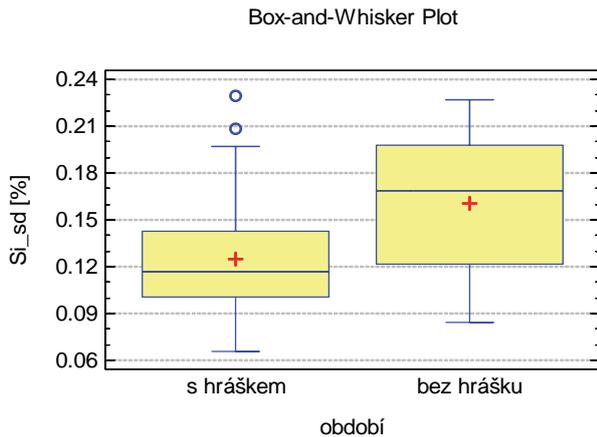
Prosazování koksu hrášku se podle těchto výsledků projevílo:

- Vyšším využitím vysokopečnického plynu. Průměrná hodnota koeficientu využití vysokopečnického plynu (ETA_CO) je statisticky vyšší ($p < 0.0001$) v období s prosazováním koksu hrášku (51,3) než v období bez prosazování koksu hrášku (50,2) – obr. 3.

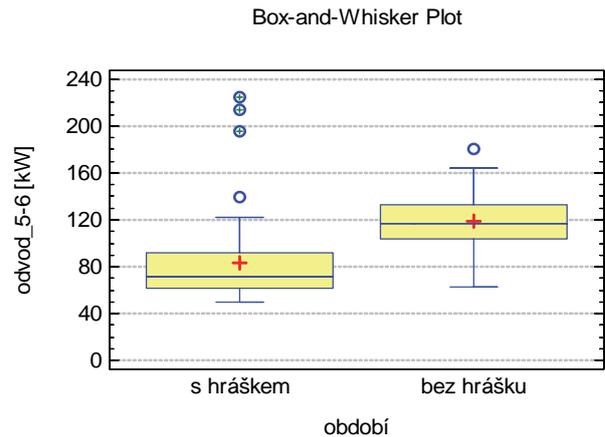


Obr. 3 Krabicový graf (ETA_CO, období)
Fig. 3 Boxplot (ETA_CO, campaign)

- Nižší variabilitou (vyšší stabilitou) obsahu Si v surovém železe. Průměrná směrodatná odchylka obsahu Si v surovém železe (Si_sd) je statisticky nižší ($p < 0.0001$) v období prosazování koksu hrášku (0,12 %) než v období bez koksu hrášku (0,16 %) – obr. 4.

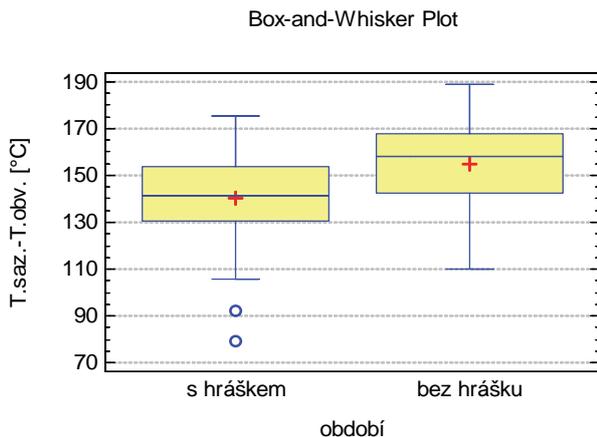


Obr. 4 Krabicový graf (Si_sd, období)
Fig. 4 Boxplot (Si_sd, campaign)



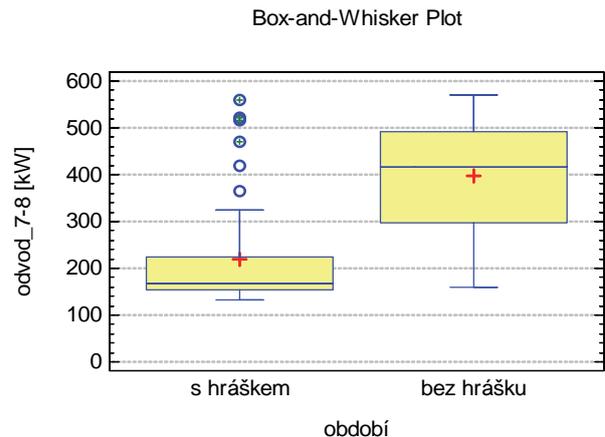
Obr. 6 Krabicový graf (odvod_5-6, období)
Fig. 6 Boxplot (odvod_5-6, campaign)

- Nižším průměrným rozdílem teplot sazebný a obvodu sazebný ($T_{\text{saz.}} - T_{\text{obv.}}$). Průměrný rozdíl těchto teplot je statisticky nižší ($p = 0.0009$) v období s prosazováním koksu hrášku ($140\text{ }^{\circ}\text{C}$) než v období bez koksu hrášku ve vsázce ($154\text{ }^{\circ}\text{C}$) – obr. 5.



Obr. 5 Krabicový graf ($T_{\text{saz.}} - T_{\text{obv.}}$, období)
Fig. 5 Boxplot ($T_{\text{saz.}} - T_{\text{obv.}}$, campaign)

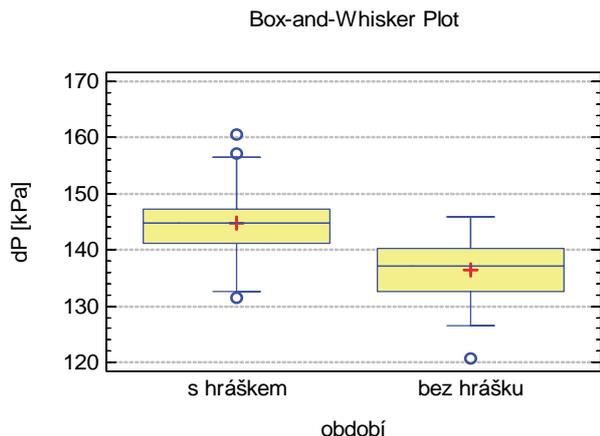
- Nižším odvodem tepla v 7.–8. řadě chladnic (odvod_7-8). Průměrná hodnota odvodu tepla v 7.–8. řadě chladnic je statisticky nižší ($p < 0.0001$) v období s prosazováním koksu hrášku ($219,6\text{ kW}$) než v období bez jeho prosazování ($396,5\text{ kW}$) – obr. 7.



Obr. 7 Krabicový graf (odvod_7-8, období)
Fig. 7 Boxplot (odvod_7-8, campaign)

- Nižším odvodem tepla v 5.–6. řadě chladnic (odvod_5-6). Průměrná hodnota odvodu tepla v 5.–6. řadě chladnic je statisticky nižší ($p < 0.0001$) v období s prosazováním koksu hrášku ($83,6\text{ kW}$) než v období bez jeho prosazování ($118,5\text{ kW}$) – obr. 6.

- Vyšším diferenčním tlakem (dP). Průměrná hodnota diferenčního tlaku je statisticky vyšší ($p < 0.0001$) v období s koksem hráškem ($144,7\text{ kPa}$) než v období bez prosazování koksu hrášku ($136,4\text{ kPa}$) – obr. 8.



Obr. 8 Krabicový graf (dP, období)
Fig. 8 Boxplot (dP, campaign)

Závěr

Podle výsledků statistické analýzy a vícerozměrné regrese je koeficient záměny vysokopecního koksu koksem hráškem roven $0,948 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa, a to v případě prosazování koksu hrášku v průměrném měrném množství $50,2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ surového železa.

Z pohledu výrobnosti VP č. 4 v uvedených obdobích (s koksem hráškem a bez koksu hrášku) byl zjištěn rozdíl - 50 tun, čili nepatrné snížení výrobnosti při prosazování koksu hrášku (dle provedené analýzy byly tyto rozdíly statisticky nevýznamné). Výsledky publikované ve zdrojové literatuře a uvedené na obr. 1 tedy nebyly ani potvrzeny ani vyvráceny.

Prosazování koksu hrášku dále vedlo ke zvýšení využití vysokopecního plynu, snížení rozdílu teplot na sazebně, nižší variabilitě obsahu Si v surovém železe, snížení odvodu tepla v 5. – 8. řadě chladnic a ke zvýšení diferenčního tlaku.

Z pohledu zvýšení diferenčního tlaku tak nebyly zcela potvrzeny dosahované výsledky z citovaných literárních poznatků, kdy je uváděno zlepšení prodyšnosti vsázky při prosazování koksu hrášku.

Optimální využití koksu hrášku závisí na jeho reakčních vlastnostech s různými složkami vsázky, kvalitě vysokopecního koksu, prosazovaném množství koksu hrášku (respektive celkového množství drobnozrnných podílů), způsobu zavážení a vhodného rozložení po průřezu pece. Jen tak lze zajistit maximální možnosti využití výhod prosazování koksu hrášku do vysokých pecí.

Z uvedených důvodů a vlivem navýšení diferenčního tlaku v období prosazování koksu hrášku se aktuální podíl koksu hrášku ve vsázce jeví jako maximální i s ohledem na kvalitu používaného vysokopecního koksu a množství injektovaného práškového uhlí.

Poděkování

Tato práce vznikla při řešení projektu č. LO1203 "Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti" financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] GAVEL, D. J. A Review on Nut Coke Utilisation in the Ironmaking Blast Furnaces. *Material Science and Technology*, 33 (2017) 4, 381–387. ISSN 0267-0836. Online ISSN 1743-2847.
- [2] MOUSA, E. A., BABICH, A., SENK, D. Effect of Nut Coke-sinter Mixture on the Blast Furnace Performance. *ISIJ International*, 51 (2011) 3, 350–358. ISSN 0915-1559. Online ISSN 1347-5460.
- [3] SONG, Q. et al. Effect of Nut Coke Reduction Behaviour in Iron-making Blast Furnace. *Baosteel Technical Research*, 9 (2015) 3, 8-16.
- [4] MOUSA, E.A., SENK, D., BABICH, A., GUDENAU, H.W. Influence of Nut Coke on Iron Ore Sinter Reducibility under Simulated Blast Furnace Conditions. *Ironmaking and Steelmaking*, 37 (2010) 3, 219–228. ISSN 0301-9233. Online ISSN 1743-2812.
- [5] BABICH, A. et al. Effect of Coke Reactivity and Nut Coke on Blast Furnace Operation. *Ironmaking and Steelmaking*, 36 (2009) 3, 222–228. ISSN 0301-9233. Online ISSN 1743-2812.
- [6] <http://ispatguru.com/use-of-nut-coke-in-a-blast-furnace/>
- [7] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Kompendium statistického zpracování dat. Metody a řešené úlohy*. 2. vyd. Praha: Academia, 2006. 982 s. ISBN 80-200-1396-2.

Salzgitter platí trestná cla USA

Börsen-Zeitung

11.04.2017

V antidumpingovém procesu USA proti evropskému ocelářskému podniku potvrdil druhý největší německý výrobce oceli Salzgitter placení trestného cla. „Od 30. března to nabylo právní účinnosti a náš výrobek hrubý plech je od té doby zatížen trestným clem ve výši 22,9 %," řekl mluvčí koncernu Salzgitter. Cla nebyla uvalena se zpětnou platností. Koncern rozhodně odmítl proti němu směřované výtky, jeho obrat v obchodu s USA činí zhruba 6 % z celkového obratu.