

Chrom ve strusce a jeho redukce pomocí redukčních činidel Si a C a kyslíko-palivového hořáku v atmosférické indukční tavicí peci

Chromium in Slag and its Reduction Using the Reducing Agents Si and C and an Oxygen-fuel Burner in the Atmospheric Induction Melting Furnace

Ing. Vladislav Kurka, Ph.D.¹; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.¹; Ing. Jaroslav Pindor, Ph.D.¹; Ing. Zdeněk Carbol²; Ing. Pavel Machovčák, Ph.D.²

¹ MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Regionální materiálově technologické výzkumné centrum Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava - Vítkovice, Česká republika

² VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s., Vítkovice 3020, 703 00 Ostrava, Česká republika

prezentuje návrh, provedení a vyhodnocení experimentů redukce chromu ze strusky. Práce byly provedeny na základě teoretického výpočtu a jeho porovnáním s výsledky skutečně dosažené redukci. Cílem je redukce chromu ze strusky o vysokém obsahu Cr₂O₃ pomocí redukčních činidel – uhlíku ve formě antracitu a křemíku ve formě ferosilitiny FeSi. Experimentální tavby v atmosférické indukční tavicí peci byly provedeny s použitím kyslíko-palivového hořáku, který byl navržen a vyroben speciálně pro tyto experimenty. Střední obsahy prvků v tavenině během redukce byly (hm. %): 16 Cr, 5 Ni a 1 Mo. Technologie redukce chromu ze strusky byla navržena a experimentálně realizována za účelem její přenositelnosti na velký metalurgický agregát EOP.

Klíčová slova: antikorozi ocel; struska; chrom; uhlík; křemík; ferosilicium

At present, all metallurgical companies make an effort to minimize the costs and hence the energy intensity of production. First, due to the reduction of production costs and also due to competitiveness. In the production of melt from alloyed chromium waste, an electric arc furnace (EAF) leads to oxidation of chromium and its loss to slag in the form of Cr₂O₃. Depending on the Cr waste used, the losses are usually around 30-60% where the slag contains up to 13-15% of Cr₂O₃. Reverse reduction of chromium from slag to melt is difficult in the EAF and, above all, time-consuming and consequently energy intensive. For this reason, experimental fluxes used, which were aimed at chromium slag to reduce chromium back to the melt using a carbon-reducing agent in the form of anthracite and silicon in the form of ferroalloys. The paper presents the design, implementation and evaluation of experiments aimed at reduction of chromium from slag. The experiments were based on the theoretical calculation and its comparison with the really achieved reduction. The aim is to reduce chromium from Cr₂O₃ slag by reducing carbon in the agents in the form of anthracite and silicon in the form of FeSi. Experimental melts in the atmospheric induction melting furnace were performed using an oxygen-fired burner designed and manufactured for these experiments. The mean content of the elements in the melt during the reduction was 16% Cr, 5% Ni and 1% Mo. Technology of reduction of chromium from slag was designed and experimentally implemented to a large metallurgical EAF. Technology of reduction of chromium from slag was designed and verified by experimental melts under the conditions of the company MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH Ltd. The technology was designed to be transferable to an EAF of the company VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY Ltd. Verification of the technology was carried out on the steel grade X4CrNiMo16-5-1 with the chemical composition it has in the EAF, when it is produced from recycled chromium alloyed metal waste. The evaluation shows that the largest reduction of chromium from slag by 62% was achieved using a three-fold reduction dose. The dose contained 5.1 kg C and 11.7 kg C for 45 kg of slag and 1,000 kg of melt, first dosed with Si and after 10 minutes dosing with C.

Key words: stainless steel; slag; chromium; carbon; silicon; ferrosilicon

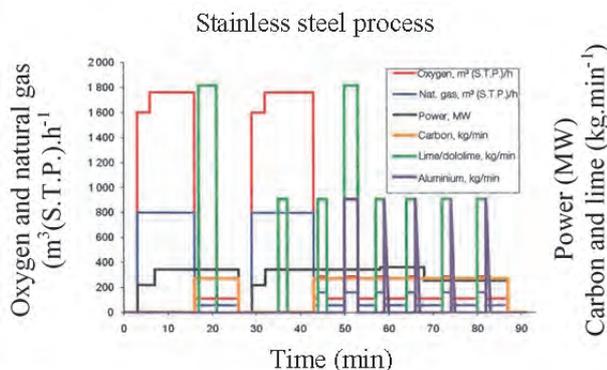
Z důvodu zvýšení konkurenceschopnosti snižují metalurgické společnosti své výrobní náklady a také energetickou náročnost výroby. Při výrobě taveniny z legovaného chromového odpadu (dále jen Cr odpad) dochází v elektrické obloukové peci (dále EOP) k oxidaci chromu a jeho ztrátám do strusky ve formě Cr₂O₃. Dle použitého Cr odpadu se ztráty pohybují většinou kolem 30 – 60 %, kdy struska obsahuje až 13 – 15 % Cr₂O₃. Zpětná redukce chromu ze strusky do taveniny je v EOP obtížná a především časově a proto také energeticky náročná. Z tohoto

důvodu byly provedeny experimentální tavby, které měly za cíl z chromové strusky redukovat chrom zpětně do taveniny pomocí redukčního činidla uhlíku ve formě antracitu a křemíku ve formě ferosilitiny.

1. Technologické možnosti redukce

V metalurgických agregátech se pro redukci chromu ze strusky do taveniny používají redukční přísady, které mají vyšší afinitu ke kyslíku než chrom. Je to především uhlík,

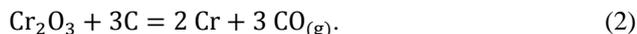
křemík a hliník. Redukční přísady na strusku musí mít velký reakční povrch, aby došlo k intenzivnějším a rychlejším redukčním reakcím. Například autor [1] ve své práci uvádí použití hliníku o velikosti granulí 1–2 mm s dávkováním rychlostí $50 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ o celkové dávce 10 kg Al na tunu oceli. Průběh technologie výroby a především dávkování hliníku a uhlíku do taveniny ve společnosti BGH při výrobě antikoročních ocelí prezentuje obr. 1.



Obr. 1 Typické schéma procesu při výrobě antikoročních ocelí ve společnosti BGH s dávkováním hliníku a uhlíku

Fig. 1 Typical diagram of process at production of stainless steels in the company BGH with dosing of aluminium and carbon

Autor [2] uvádí, že na začátku oxidační periody musí být obsah křemíku v tavenině 0,3 % Si. Důvodem je přednostní oxidace křemíku před chromem, a tím zamezení ztrát chromu do strusky. Zpětná redukce chromu pomocí křemíku a uhlíku se řídí níže uvedenými chemickými reakcemi [3, 4]:



Z hlediska termodynamického je zpětná redukce chromu ze strusky do taveniny závislá na teplotě, chemickém složení strusky a chemickém složení taveniny. Autor [5] prezentuje níže uvedené termodynamické reakce rovnováhy touto chemickou rovnicí:

$$\log (\% \text{Cr})_{\text{slag exp.}} = 4,887 - \frac{8866}{T} + 0,340 \log [\% \text{Cr}] - 0,178 \log [\% \text{Si}] - 1,721 \log B, \quad (3)$$

kde B je bazicita strusky vyjádřená vztahem

$$B = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}. \quad (4)$$

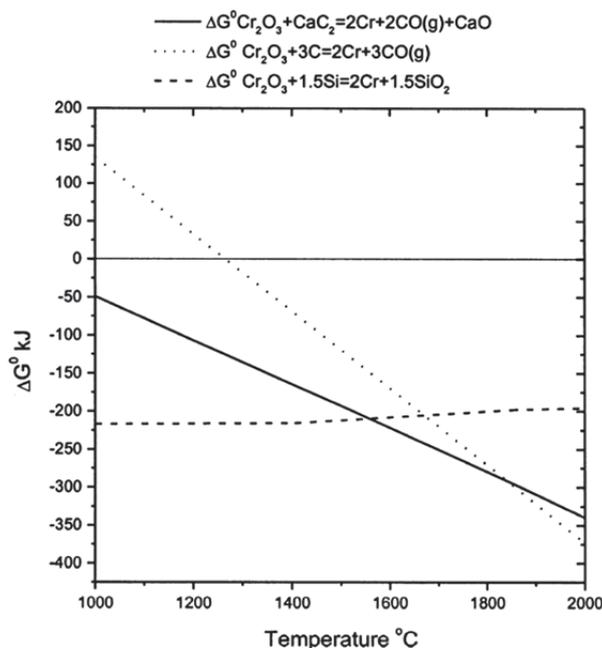
Dle autora [5] však existuje značný rozdíl mezi vypočítanými rovnovážnými stavy a skutečnými údaji z průmyslové praxe. Z tohoto důvodu autor navrhuje následující termodynamickou rovnici získanou ze statistického vyhodnocení dat z průmyslové praxe:

$$\log (\% \text{Cr})_{\text{slag ind.}} = 1,118 + \frac{949}{T} - 0,550 \log [\% \text{Cr}] - 0,154 \log [\% \text{Si}] - 0,508 \log B, \quad (5)$$

kde B je bazicita strusky vyjádřena vztahem

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}, \quad (6)$$

Teplotní závislost Gibsovy energie pro redukci chromu pomocí karbidu vápníku, uhlíku a křemíku prezentuje autor [3] v grafu na 0. Z obrázku vyplývá, že se s rostoucí teplotou zvyšuje účinek redukce chromu ze strusky pomocí karbidu vápníku (CaC_2) a uhlíku a že redukce pomocí křemíku není na teplotě až tak závislá. Dále jsou popsány experimentální tavby redukce Cr ze strusky do taveniny.



Obr. 2 Teplotní závislost Gibsovy energie pro redukci chromu karbidem vápníku, uhlíkem a křemíkem

Fig. 2 Temperature dependence of Gibbs energies for chromium reduction with calcium carbide, carbon and silicon

2. Redukce chromu ze strusky

Na základě teoretických rozborů byla navržena a na experimentálních tavných ověřena technologie redukce chromu ze strusky. Technologie byla navržena pro podmínky společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. (dále jen MMV), a to tak, aby byla přenositelná na intenzifikovanou elektrickou obloukovou pec (dále jen EOP) společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. (dále jen VHM). Experimentální tavby byly realizovány v MMV na poloprovozní atmosférické indukční tavicí peci (dále jen IP) s kyslíkopalivovým hořákem, který simuluje podmínky v EOP ve společnosti VHM (obr. 3). KPH byl napájen čistým kyslíkem a propan-butanem. Hladina taveniny byla kryta sibalovými deskami.

Bylo provedeno celkem 7 sad experimentů na tavenině oceli X4CrNiMo16-5-1. Normované chemické složení oceli X4CrNiMo16-5-1 je uvedeno v tab. 1. Chemické složení bylo modifikováno na podmínky v EOP a je v tab. 1 označeno jako X4CrNiMo16-5-1EOP. Toto chemické složení bylo stěžejní pro experimenty v MMV.



Obr. 3 Atmosférická indukční tavící pec s kyslíko-palivovým hořákem v průběhu experimentální tavby se zakrytým kelímkem pomocí sibralových desek

Fig. 3 Atmospheric induction melting furnace with oxygen-fuel burner during an experimental heat with crucible covered by sibral plates

Pro plné převedení technologie výroby z poloprovozních experimentů prováděných v MMV na metalurgický agregát EOP ve VHM byly pro experimentální tavby v MMV použity vsázkové suroviny, legující a struskotvorné přísady a redukční přísady C a FeSi ze společnosti VHM. Protože pro každý experiment byl použit odlitý ingot z předchozího experimentu, nejsou zcela stejné vstupní podmínky.

V nově vyrobeném kelímku indukční pece (IP) pro hmotnost vsázky 1750 kg bylo pro každou sérii experimentů nasazeno celkem cca 1000 kg vsázky a legujících přísad. Těsně před plným roztavením vsázky byla na hladinu vnesena struska o hmotnosti 45 kg, což odpovídá 4,5 % hmotnosti taveniny. Chemické složení externě dodané strusky pro experimenty prezentuje tab. 20. Pro lepší roztavení a pokrytí hladiny taveniny byla struska v MMV ručně rozdrčena ze zrnitosti cca 250 – 300 mm (obr. 4) na zrnitost cca 20 – 50 mm (obr. 5). Struska bezprostředně po vnesení poslední dávky je vyobrazena na obr. 6.

Tab. 1 Chemické složení oceli značky X4CrNiMo16-5-1 podle normy a pro laboratorní experimenty, které je shodné s chemickým složením oceli v provozní EOP (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of the standardised steel grade X4CrNiMo16-5-1 according to standard and for laboratory experiments, which is identical with the chemical composition in operational EAF (wt.%)

		C	Mn	Si*	P	S	Ni	Cr	Mo	V	N
Norma	min	-	-	-	-	-	4,00	15,00	0,80	-	0,0200
	max	0,06	1,50	0,70	0,040	0,030	6,00	17,00	1,50	-	-
Experimenty v MMV (X4CrNiMo16-5-1EOP)	min	0,15	0,25	0,25	-	-	4,50	15,00	0,90	-	-
	max	0,20	0,35	0,35	0,025	0,020	5,50	16,50	1,20	0,10	-

* Obsah Si byl u sedmého experimentu dvojnásobný: 0,60 % Si.

Tab. 2 Chemické složení externě dodané strusky pro experimenty redukce Cr ze strusky (hm. %)

Tab. 2 Chemical composition of externally supplied slag for Cr slag reduction experiments (wt.%)

	C	S	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	TiO ₂	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	Na ₂ O	Zn	K ₂ O	BaO	Nb ₂ O ₅
Obsah komponent	0,12	0,034	12,95	0,01	0,47	2,97	15,87	0,21	3,12	24,63	21,27	0,01	8,94	8,72	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,47



Obr. 4 Zrnitost strusky 250 – 300 mm pro experimenty před rozdrčením

Fig. 4 Slag granularity of 250 – 300 mm for experiments prior to crushing



Obr. 5 Zrnitost strusky 20 – 50 mm pro experimenty po ručním drčení

Fig. 5 Slag granularity of 20 – 50 mm for experiments after manual crushing



Obr. 6 Struska na hladině taveniny bezprostředně po nasazení poslední dávky ze 45 kg

Fig. 6 Slag on the melt meniscus right after charging the last charge of 45 kg

Immediately after the slag was added to the melt surface, a flux Topex with a high content of MgO, which is standardly used in EOP or VHM to increase the furnace life, was added. The flux Topex with a grain size of 20–30 mm (Fig. 7) was mixed in the crucible with the slag and then the KPH was closed for full and fast melting of the slag. After melting the slag for about 20 min. and heating the melt to a temperature of 1650 °C (Fig. 8) a sample of metal and slag for chemical analysis was taken.

According to the theoretical calculation, for a full reduction of chromium from the externally added chromium slag, it is necessary either 1.7 kg C, or 3.9 kg Si. The reducing agent C was dosed in the form of anthracite and the reducing agent Si was dosed in the form of ferrosilicon FeSi, both with a grain size of 1–3 mm. Both components together formed one dose of reducing agents.

After melting the slag in the IP crucible, in the first and subsequent experiments, the reducing agents C and Si were added together. In each of the subsequent experiments, the amount was doubled. In the first experiment, in the second experiment 2x, and in the subsequent experiments 4x. In the sixth experiment, a threefold dose of reducing agent was added, which was first dosed only Si and then after 3 min. a sample of metal and slag (after 10 min.) was taken. In the seventh experiment, a threefold dose was added, which contained C and Si, but in the course of the experiment, the content of Si in the melt was doubled compared to the previous one and reached a value of 0.6 % Si.

The reducing agents were added during the start of the furnace on the surface of the slag. Subsequently, they were intensively mixed into the entire volume of the slag. After 5 minutes from the addition of the reducing agent, a visual check of the melting of the reducing agents was performed. In this step, the first samples of metal and slag were taken for chemical analysis. The sampling of metal and slag for chemical analysis and the measurement of the melt temperature was performed after 5 minutes, overall after 30 minutes from the addition of the first reducing agent.

After the completion of each set of experiments, the melt was poured from the IP into a weighing pan and then on an atmospheric weighing scale

was poured under a protective argon atmosphere from the bottom into a V2A stainless steel container.



Obr. 7 Struskotvorná přísada Topex

Fig. 7 Flux Topex

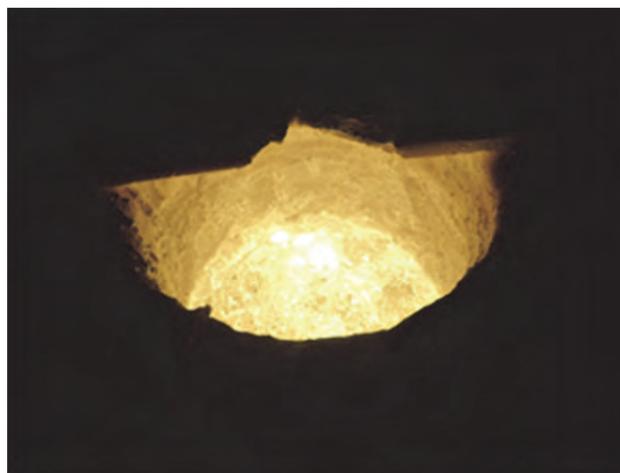


Fig. 8 Roztavená struska v kelímku indukční pece

Fig. 8 Molten slag in crucible of induction furnace

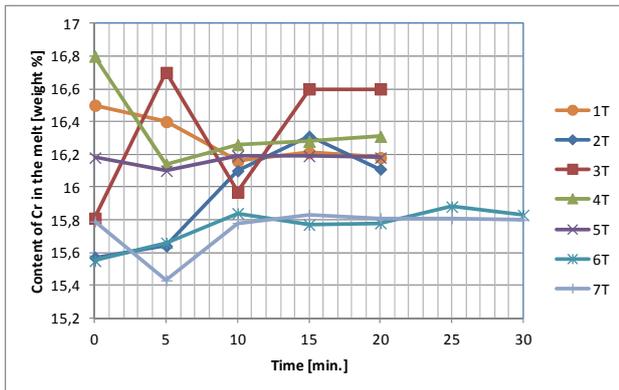
3. Vyhodnocení redukce chromu ze strusky

During the evaluation of the chromium content in the melt (Fig. 9) and especially the evaluation of the chromium content in the slag (Fig. 10) it is clear that the highest reducing capacity had the dose with a threefold amount of C and FeSi. From the slag, a total of 53 % Cr was reduced (Fig. 11). When dosing a threefold reducing agent, when Si was first dosed and after 10 minutes C, the reduction of Cr from the slag increased to 62 %.

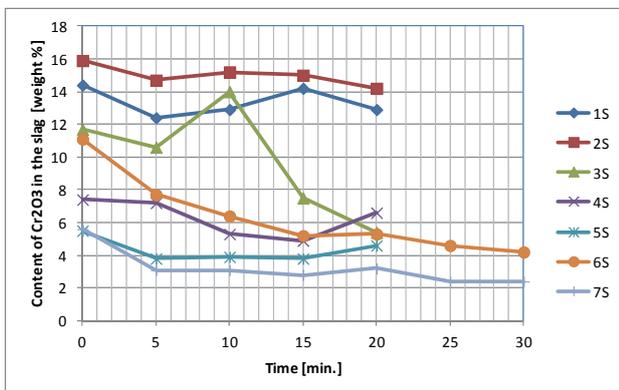
Let's recalculate in the 3. experiment the total change in the chromium content in the melt before and after the reduction, which is an increase of Cr of 8.42 kg (Tab. 3 and Fig. 12). In the slag, however, the chromium content decreased only by 1.94 kg Cr (Tab. 4 and Fig. 12). From Fig. 11 and Tab. 3 and 4 it is clear that in the 1., 4. and 5. experiment the chromium content in the melt decreased as in the slag, but in the melt. In the 2. and 3. experiment the chromium content in the melt did not increase but in the slag. Therefore, the IP crucible was removed and the walls of the crucible were subjected to chemical analysis for the presence of Cr. Parts of the slag

kelímku prezentuje obr. 13. Na fotografii zlomků výdusky je patrná penetrace kovu, pravděpodobně chromu, který v průběhu experimentů penetruje do výdusky, čímž se chrom nekontrolovatelně vrací zpět do taveniny, což zkrusluje výsledky jeho analýzy v tavenině. K přechodu chromu ze strusky však nedochází, takže hodnoty jeho analýzy ve strusce jsou brány jako platné.

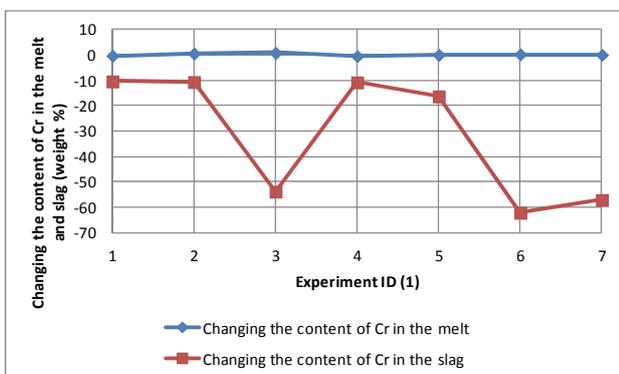
Na základě výsledků poloprovozních zkoušek a výše uvedených úvah se jako nejdůležitější považuje snížení obsahu Cr_2O_3 ve strusce, které je největší u šestého experimentu s trojnásobnou redukční dávkou C a Si (nejprve Si a poté C) a postupným dávkováním.



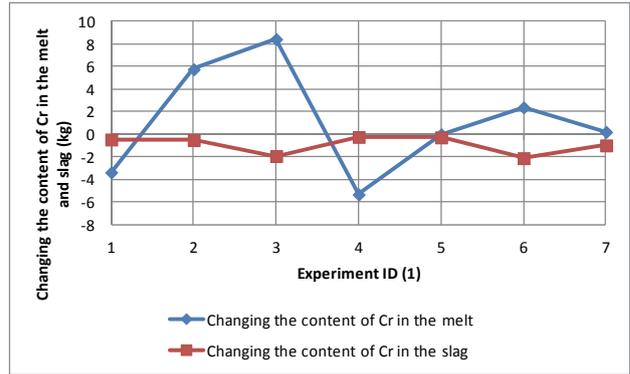
Obr. 9 Průběh obsahu Cr v tavenině u všech experimentů
Fig. 9 Evolution of Cr content in the melt in all experiments



Obr. 10 Průběh obsahu Cr_2O_3 ve strusce u všech experimentů
Fig. 10 Evolution of Cr_2O_3 content in the slag in all experiments



Obr. 11 Celková změna obsahu Cr v tavenině a strusce ve všech experimentech
Fig. 11 Total change of the Cr content in the melt and slag in all experiments



Obr. 12 Celková změna obsahu Cr v tavenině a strusce ve všech experimentech

Fig. 12 Total change of the Cr content in the melt and slag in all experiments



Obr. 13 Vybouraná stěna kelímku IP; červená část byla v kontaktu s taveninou, bílá část přiléhala k plášti kelímku

Fig. 13 Pulled down wall of the IP crucible ; the red part was in contact with the melt, the white part was adjacent to the crucible shell

Tab. 3 Změna chemického složení a hmotnosti Cr v tavenině oceli v průběhu jednotlivých experimentů

Tab. 3 Change of chemical composition and mass of Cr in the molten steel during individual experiments

Odebrané vzorky taveniny	Doba odběru (min.)	Obsah Cr v tavenině v jednotlivých experimentech (hm. %)						
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
1	0	16,5	15,57	15,81	16,8	16,18	15,55	15,79
2	5	16,4	15,64	16,7	16,14	16,1	15,66	15,43
3	10	16,16	16,1	15,97	16,26	16,19	15,84	15,78
4	15	16,21	16,31	16,6	16,28	16,19	15,77	15,83
5	20	16,18	16,11	16,6	16,31	16,18	15,78	15,81
6	25	-	-	-	-	-	15,88	15,81
7	30	-	-	-	-	-	15,83	15,8
Hmotnost taveniny	Jednotky	Experimenty						
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
	(kg)	1056	1065	1066	1089	1075	1034	1018
Změna obsahu Cr v tavenině	Jednotky	Experimenty						
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
	(hm. %)	-0,32	0,54	0,79	-0,49	0,00	0,23	0,02
	(kg)	-3,38	5,75	8,42	-5,34	0,00	2,38	0,20

Tab. 4 Změna chemického složení a hmotnosti Cr₂O₃ a Cr ve strusce v průběhu jednotlivých experimentů (záporné hodnoty znamenají úbytek)

Tab. 4 Change of chemical composition and weight of Cr₂O₃ and Cr in slag during individual experiments (negative values represent the loss)

Odebrané vzorky strusky	Doba odběru	Obsah Cr ₂ O ₃ ve strusce v jednotlivých experimentech						
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
	(min.)	(hm. %)						
1	0	14,4	15,9	11,7	7,4	5,5	11,1	5,6
2	5	12,4	14,7	10,6	7,2	3,8	7,7	3,1
3	10	12,9	15,2	14,0	5,3	3,9	6,4	3,1
4	15	14,2	15,0	7,5	4,9	3,8	5,2	2,8
5	20	12,9	14,2	5,4	6,6	4,6	5,3	3,2
6	25	-	-	-	-	-	4,6	2,4
7	30	-	-	-	-	-	4,2	2,4
	Jednotky	Experimenty						
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Hmotnost taveniny	(kg)	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
Změna obsahu Cr ₂ O ₃ ve strusce	(hm. %)	-1,50	-1,70	-6,30	-0,80	-0,90	-6,90	-3,20
	(kg)	-0,68	-0,77	-2,84	-0,36	-0,41	-3,11	-1,44
Změna obsahu Cr v tavenině	(hm. %)	-0,46	-0,52	-1,94	-0,25	-0,28	-2,12	-0,99
	(kg)	-10,42	-10,69	-53,85	-10,81	-16,36	-62,16	-57,14

4. Závěr

Technologie redukce chromu ze strusky byla navržena a ověřena na experimentálních tavebách v podmínkách společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o. Návrh technologie byl proveden tak, aby byla přenositelná na elektrickou obloukovou pec (EOP) společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. Ověření technologie bylo provedeno u oceli X4CrNiMo16-5-1, přičemž její chemické složení odpovídalo poměrům výroby v EOP s využitím vratného kového odpadu legovaného chromem

Z hodnocení poloprovozních taveb vyplývá, že největší redukci chromu ze strusky ve výši 62 %, se docílilo při použití trojnásobné redukční dávky. Dávka obsahovala

5,1 kg C a 11,7 kg C na 45 kg strusky a 1000 kg taveniny, kde nejprve bylo dávkováno Si a po 10 minutách dávkováno C. Vizuální posouzení všech odebraných vzorků strusek potvrdilo, že struska s použitím trojnásobné dávky u třetího, šestého a sedmého experimentu vykazuje nejvyšší tekutost a lze usuzovat na nejvyšší styčnou reakční plochu mezi taveninou a struskou.

Použitím jedné vsázkové suroviny pro všechny experimenty byly ovlivněny startovací podmínky experimentů, především chemické složení taveniny, které ovlivnilo i chemické složení strusky po roztavení. Výsledky byly proto také hodnoceny trendově.

Na základě provedených experimentálních taveb byl proveden návrh, ověření a následně vypracování technologie „Redukce chromu ze strusky v indukční tavicí peci pomocí redukčních činidel C a Si“, která dnes slouží jako ověřená technologie pro provozní podmínky EOP.

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci čerpání a užití institucionální podpory na Dlouhodobý a koncepční rozvoj výzkumné organizace v roce 2019, poskytovatel Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] STUBBE, G., HARP, G., SCHMIDT, D., SEDLMEIER, M. Neue Technologie zur Chromrückgewinnung aus Elektrolichtbogenofenschlacken. *Stahl und Eisen*, (2011) 5, 45-50.
- [2] ARH, B., TEHOVNIK F. The Oxidation and Reduction of Chromium of Stainless Steels in an Electric Arc Furnace. *Metallurgia*, 50 (2011), 179-182. ISSN 0543-5846.
- [3] BJORKVALL, J., ANGSTROM, S., KALLIN, L. Reduction of Chromium Oxide Containing Slags Using CaC₂ Injection. In *the 7th International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*, South African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town, South Africa, 25–28 January 2004.
- [4] MEYER, W., REZENDE, M. A., MURAN, A. et al. Modernization of the Electric Arc Furnace of Cell 1 at Villares Metals. In *the 38th International Symposium*, May 20th to 23rd, 2007, Belo Horizonte, MG, Brazil.
- [5] GUO, M., DURINCK, D., JONES, P. T., HEYLEN, G., HENDRICKX, R., BAETEN, R., BLANPAIN, B., WOLLANTS, P. EAF Stainless Steel Refining - Part I: Observational Study on Chromium Recovery in an Eccentric Bottom Tapping Furnace and a Spout Tapping Furnace. *Process Metallurgy - Steelmaking*, 78 (2007) 2.

Globální oddělení výzkumu a vývoje dostalo grant na superpočítač

Firemní měsíčník AMO – březen 2019, str. 12. Zprávy ze skupiny ArcelorMittal Amerika

Globální oddělení výzkumu a vývoje ArcelorMittal je jedním z držitelů grantu od instituce pro využívání vysoce výkonného počítače ve výrobě. Ta oznámila federální dotaci ve výši 1,2 mil. dolarů pro státní a soukromé projekty, jejichž cílem je řešení klíčových výrobních problémů v ocelářství a ve výrobě hliníku s využitím superpočítače. Výzkumná spolupráce mezi ArcelorMittal USA a státní laboratoří Lawrence Livermora bude využívat vysoce výkonný počítač a strojové učení, které by umožnilo energeticky úspornou výrobu ocelových bramb bez vad.