

Charakterizácia EOP trosky z pohľadu chemického prvkového a fázového zloženia

Elemental and phase analysis of EAF slag

doc. Ing. Dušan Oráč, PhD.¹; Ing. Tomáš Vindt, PhD.¹; prof. Ing. Tomáš Havlik, DrSc.¹; Ing. Vladimír Marcinov¹; Ing. Gréta Maruškinová, PhD.²; Ing. Pavol Beraxa, PhD.²; Ing. Vladimír Chomič²

¹ Ústav recyklačných technológií, Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie, Technická univerzita v Košiciach, Letná 1/9, 042 00 Košice-Sever, Slovensko

² ŽP Výskumno-vývojové centrum s.r.o., Kolkáreň 35, 976 81 Podbrezová, Slovensko

Troska z elektrickej oblúkovej pece (EOP) sa vyznačuje zvýšeným obsahom železa viazaného v rôznych, prevažne oxidických fázach, ktoré môžu komplikovať drvenie, respektíve mletie trosky. Predkladaný príspevok sa venuje charakterizácii EOP trosky z pohľadu chemického prvkového a fázového zloženia, s dôrazom na distribúciu jednotlivých fáz železa do definovaných zrnitostných tried. Za týmto účelom sa EOP troska upravila drvením, podrobená troska sa podrobila sitovej analýze, v rámci ktorej sa rozdelila na 6 zrnitostných tried. Jednotlivé zrnitostné triedy sa podrobili magnetickej separácii na feritovom magneti. Magnetický podiel sa následne podrobil prvkovej a fázovej analýze. Výsledky magnetickej separácie ukázali, že so znižujúcou sa zrnitosťou stúpa aj podiel magnetickej frakcie.

Kľúčová slova: Elektrická oblúčová pec; spracovanie; troska; magnetická separácia

The slag from the electric arc furnace (EAF) is characterized by an increased content of iron in various, predominantly oxidic phases, which can complicate the crushing or milling of the slag. The presented paper is dealing with the characterization of EAF slag from the point of view of chemical elemental and phase composition, with an emphasis on the distribution of individual iron phases into defined grain size fractions. EAF slag was crushed and sieved into 6 grain sizes. Individual fractions were subjected to magnetic separation on a ferrite magnet. The magnetic part was subsequently subjected to elemental and phase analysis. The results of the magnetic separation showed that the proportion of the magnetic fraction increases with decreasing grain size.

Key words: Electric arc furnace; processing; slag; magnetic separation

1. Úvod

Oceľ patrí k významným produktom ľudskej činnosti, bez ktorého sa v súčasnosti ľudstvo nedokáže zaobísť. Produkcia ocele vo svete za posledných desať rokov vzrástla o viac ako 50 %. V roku 2009 sa vo svete vyrobilo 1,239 miliardy ton ocele a v roku 2021 celosvetová výroba predstavovala 1,9 miliardy ton. Najväčším výrobcom je Čína s ročnou produkciou viac ako 1 miliarda ton (52,9 % podiel na svete), druhým najväčším producentom je India s produkciou nad 100 mil. ton. S výrobou ocele súvisí aj produkcia vedľajších produktov ako sú napr. trosky a úlety [1].

Predkladaný článok sa venuje problematike EOP trosky. Definovať presné chemické zloženie EOP trosky je zložité, pretože úzko závisí od vstupných surovín – hlavne od typu a zloženia oceľového šrotu, surového železa, od čistoty pridávaných troskotvorných prísad ako aj od procesov prebiehajúcich v danom pecnom agregáte. Napriek významnej heterogenite chemického a mineralogického

zloženia EOP trosiek je možné sformulovať všeobecné predpoklady [2, 3]:

- chemické zloženie trosky je významne ovplyvnené zložením vsádzky, a teda troska môže okrem oxidov železa obsahovať troskotvorné zložky (CaO, MgO), produkty oxidácie nežiaducich prvkov v šrote a v surovom železe (MnO, SiO₂, P₂O₅) a taktiež oxidy, ktoré vznikli reakciami s pecnou výmurovkou,
- značne heterogénne je aj mineralogické zloženie trosky, ktoré je závislé od kvality a akosti vyrábanej ocele, použitých troskotvorných prísad, tepelného režimu vzniku trosky a od priebehu chladnutia. V tuhých troskách je možné definovať viac ako 100 rôznych minerálov [2].

EOP troska pozostáva hlavne z oxidov ako: CaO, SiO₂, MgO, FeO, Fe₃O₄, FeO a Al₂O₃, MnO, ale aj voľné CaO a MgO + MnO a iné. Súčasťou trosiek však môžu byť aj chróm, vanád, bárium, titán, nikel, molybdén a iné, ktoré sa dostali do trosky jednak zo surového železa, z oceľového šrotu prípadne môžu byť súčasťou legujúcich prísad [4-7].

Tab. 1 Chemické zloženie EOP trosiek od rôznych autorov
Tab. 1 Chemical composition of EAF slag from different authors

Obsah [%]										Zdroj
CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	
20-40	5-15	10-20	2-10	-	-	20-40	2,5-5	-	-	[3]
30-60	5-15	9-20	2-9	15-30		-	3-8	-	-	[2]
39-45	8-15	24-32	3-8	1-6		-	0,4-2	-	-	
40-50	2-12	12-20	3-10	-	-	5-35	5-15	-	-	[10]
55-70	3-12	15-25	1-12	-	-	0,5-2	0,5-2	-	-	
33	5,03	19,8	20	-	-	36,8	4,18	-	-	[11]
15-25	2-5	15-25	10-15	-	-	30-50	-	2-5	0,1-0,2	[7]
15-25	1-3	5-25	1-3	-	-	30-50	-	5-30	1-2	
20-50	5-15	10-40	5-15	-	-	5-30	-	0,5-3	0,05-0,4	
22-60	3-13	6-34	3-14	10-40	-	-	-	-	-	[12]
20,4	3,4	9,9	8,1	-	42,9	-	5,6	3,6	-	[13]
25,08-30,91	2,82-7,68	12,22-13,35	1,55-2,73	-	37,89-38,51	-	4,1-5,87	0,8-0,84	-	[14]
38,18	3,7	-	9,03	-	-	30,7	-	3,03	1,74	[15]
20-25	3,5-4,5	9-10	7-10	40-45		-	-	2,7-4,04	-	[8]
24,3	2,32	9,71	8,01	-	-	31,82	-	3,84	0,072	[16]
28-34	4-7	11-14	5-7	-	10-21	-	3-6	-	-	[17]
20,7-22,8	3,4-3,7	9,8-10,6	7,8-10	-	-	28,2-31,8	5,5-6	3,23-3,5	-	[9]
29,5	4,3	5,7	5,2	-	48,5	-	5,2	4,71	0,52	[18]

Z tab. 1 vyplýva, že EOP troska obsahuje v majoritnom zastúpení CaO, Fe/FeO/Fe₂O₃ a SiO₂ v pomerne rovnakých množstvách. Najväčšie obsahy Fe a Ca z rôznych typov trosky obsahujú práve trosky z uhlíkovej ocele. Ďalej sú to MgO, Al₂O₃, MnO. EOP trosky sú však zaujímavé aj z pohľadu iných kovov, preto sa niektoré štúdie zamerali na sledovanie Cr₂O₃, pričom jeho obsah sa pohybuje v rozmedzí 0,5 – 30 %, V₂O₅ s obsahom od 0,05 – 1,75 % a TiO₂ s obsahom od 0,37 do 1 %. Zdroj [8] sa zamerl na analýzu okrem vanádu aj na molybdén a niób, pričom ich hodnoty boli ~ 1000 ppm V, <100 ppm Mo a 300 – 500 ppm Nb. Zdroj [9] vo svojej štúdiu charakterizoval trosku z výroby uhlíkovej ocele v elektrickej oblúkovej peci a analyzoval 47 – 56 mg·kg⁻¹ Mo, 245 – 332 mg·kg⁻¹ Nd a 714 – 744 mg·kg⁻¹ V.

Z mineralogického hľadiska trosky obsahujú v majoritnom zastúpení zlúčeniny CaO ako napríklad 3CaO·MgO·SiO₂ (merwinit). Ďalej to môžu byť: FeO – tuhý roztok (wüstit), tuhý roztok FeO-MnO-MgO, M₂SiO₄ (olivín; M = Fe, Mg, Ni, Mn), 3CaO·SiO₂ (trikalcium silikát, C₃S), 2CaO·SiO₂ (dikalium silikát, C₂S), CaCO₃, Ca₃SiO₅, CaAl₂O₄, MgO, Fe₂O₃ (magnetit), Fe₃O₄, Ca₂Al(AlSiO₇) (gehlenit), Ca₂SiO₅ (belit), Ca₁₄Mg₂(SiO₄)₈, MgFe₂O₄ (magnesio-

ferit), Mn₃O₄, MnO₂, MnO, β-Ca₂SiO₄, γ-Ca₂SiO₄, spinel tuhý roztok (Mg,Mn)(Cr,Al)₂O₄, Ca₂(Al,Fe)₂O₅, Fe₂SiO₄, Fe₇SiO₁₀, MgCr₂O₄. Podľa autorov [13] je dominantným minerálom v troske spinel obsahujúci Mg-Fe: MgFe₂O₄ (17 %), Fe₃O₄ (magnetit do 5 %), MgCr₂O₄ (magnesiochróm do 3 %), potom SiO₂, MgO (periklas), Ca₂SiO₄ (larnit), Ca₂FeAlO₅ (brownmillerit). Iný autori [14] uvádzajú nasledovné kvantitatívne zloženie: Ca₂FeAlO₅ (1 – 2,7 %), Mg_{2,4}Fe_{1,6}O₄ (0,2 %), spinel Mn_{9,54}Cr_{14,46}O₃₂ (0,1 – 0,8 %), Fe₃O₄ (0,4 – 4,2 %), Ca₁₅P₂SiO₃₂, Ca₂Fe₂O₅ (srebro-dolskit). Prítomnosť Cr v troskách potvrdili autori [8, 15] vo fáze FeCr₂O₄. Z technologického kroku výroby ocele a teda aj z chemického hľadiska vyplýva, že EOP trosky obsahujú Nb, Mo a V, ale ich koncentrácie sú pre mineralogickú identifikáciu príliš nízke [19].

Ako najjednoduchšia úprava trosiek z výroby ocele sa javí využitie viacstupňových procesov drvenia, mletia a magnetickej separácie, pri ktorej sa od trosky oddelia kovové podiely. Vzhľadom na čo najvyššiu komercializáciu trosky sa táto troska drví a triedi na zrnitostné frakcie požadované zákazníkom, čo závisí aj od ďalšieho spôsobu využitia trosky. Podstatou magnetickej separácie oceliarskej trosky

je využitie magnetických vlastností kovových zložiek. Oceliarenská troska obsahuje približne 10 – 40 % kovového železa, ktoré sa môže odseparovať a opätovne použiť ako vsádzka na výrobu ocele. Kombináciou magnetickej separácie s nízkou a vysokou intenzitou (LIMS a HIMS) je možné z trosky pomletej na veľkosť častíc 63 μm v mokrom procese získať aj feromagnetické častice (oxidy železa) pri LIMS a paramagnetické častice pri HIMS, zatiaľ čo nemagnetická frakcia obsahuje väčšinou kremičitany vápenaté. Týmto procesom je možné získať vysoko kvalitný materiál s obsahom železa, ktoré je možné recyklovať v metalurgických procesoch. Produkt bohatý na vápnik a oxid kremičitý je možné využiť pri výrobe cementu [20-22].

Cieľom práce je charakterizovať trosku z výroby ocele v elektrickej oblúkovej peci a pomocou magnetickej separácie zistiť správanie sa jednotlivých frakcií počas separácie.

2. Experimentálna časť

2.1 Materiál a metodika

Materiál tvorila tzv. „surová“ EOP troska, ktorá bola zachytená z EOP do troskových mís a neprešla následným spracovaním na úpravárenskej linke (metalseparátor, vibračný triedič). Dodaná vzorka nedemetalizovanej trosky, predstavovala kusy rôznych veľkostí s max. zrnitosťou až 15 cm. Preto sa vzorka podrobila drveniu pomocou čeľuťového drviča. Podrvená vzorka nedemetalizovanej trosky sa podrobila sitovaniu a jednotlivé frakcie sa použili na magnetickej separácii.

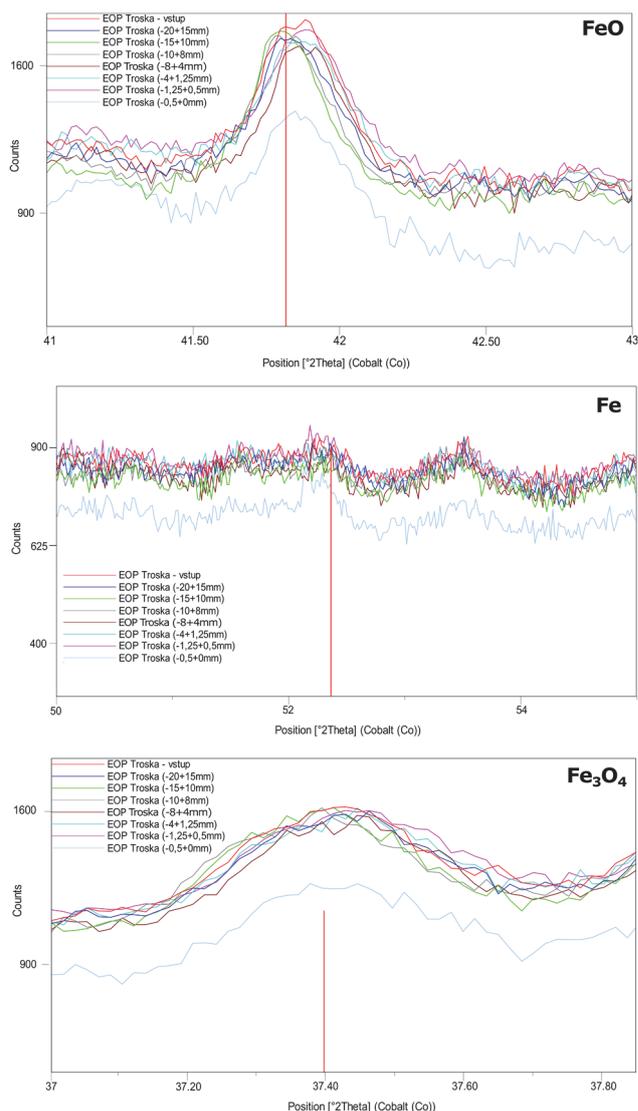
Röntgenová difrakčná fázová analýza vstupnej nedemetalizovanej vzorky poukázala na prítomnosť železa hlavne vo forme FeO a Fe₃O₄, alebo jeho nestechiometrickej forme, prípadne komplexnej oxidickej forme spolu s mangánom a/alebo chrómom. Významné zastúpenie mala aj fáza Ca₂SiO₄. Prvková analýza sa realizovala pomocou atómovej absorpčnej spektrometrie a je uvedená v tab. 2.

Tab. 2 Chemická analýza trosky
Tab. 2 Chemical analysis of slag

Obsah [%]					
Fe	Cr	Ca	SiO ₂	Mn	Al
21,5	0,34	16,12	32,12	4,55 %	2,19

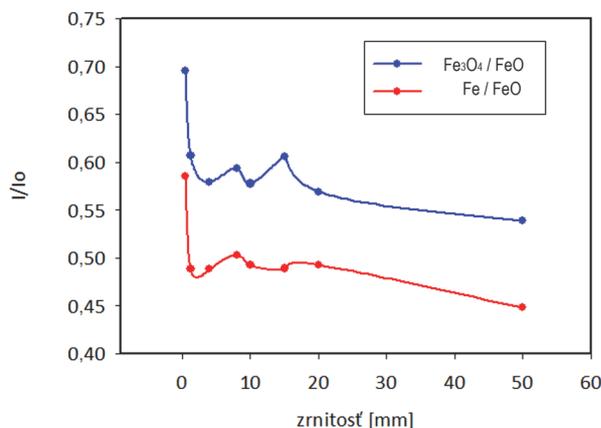
2.2 Výsledky

Po presitovaní sa jednotlivé frakcie podrobili RTG difrakčnej analýze. Z výsledkov RTG analýz jednotlivých frakcií nedemetalizovanej trosky vyplýva, že z mineralogického hľadiska sa jednotlivé zrnitostné frakcie kvalitatívne v zásade nelíšia. Bližšie pozorovanie však ukazuje, že v jednotlivých frakciách sa plynule menia množstvá FeO, Fe₃O₄ a kovového Fe, obr. 1 a 2. Hodnoty I/I₀ reprezentujú pomer intenzít pík Fe₃O₄ a Fe ku FeO pri danej zrnitosti.



Obr. 1 Zmena množstva FeO, Fe a Fe₃O₄ v závislosti od zrnitosti nedemetalizovanej trosky podľa RTG difraktogramov

Fig. 1 Change in the amount of FeO, Fe and Fe₃O₄ depending on the grain size of non-metalized slag according to X-ray diffractograms



Obr. 2 Grafické vyjadrenie zmeny množstva FeO, Fe a Fe₃O₄ v závislosti od zrnitosti nedemetalizovanej trosky

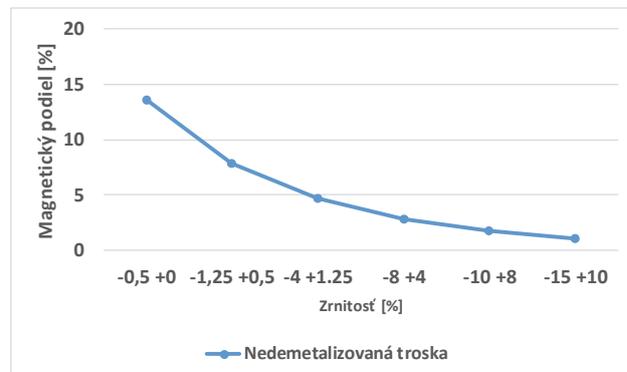
Fig. 2 Graphic representation of the change in the amount of FeO, Fe and Fe₃O₄ depending on the grain size of non-metalized slag

Jednotlivé zrnitostné frakcie trosky sa podrobili magnetic-
kému triedeniu na magnetickom triediči Steinert, čo je
konštrukčne feritový permanentný bubnový magnet
umiestnený nad vibračnou doskou s magnetickou induk-
ciou = 0,16 T.

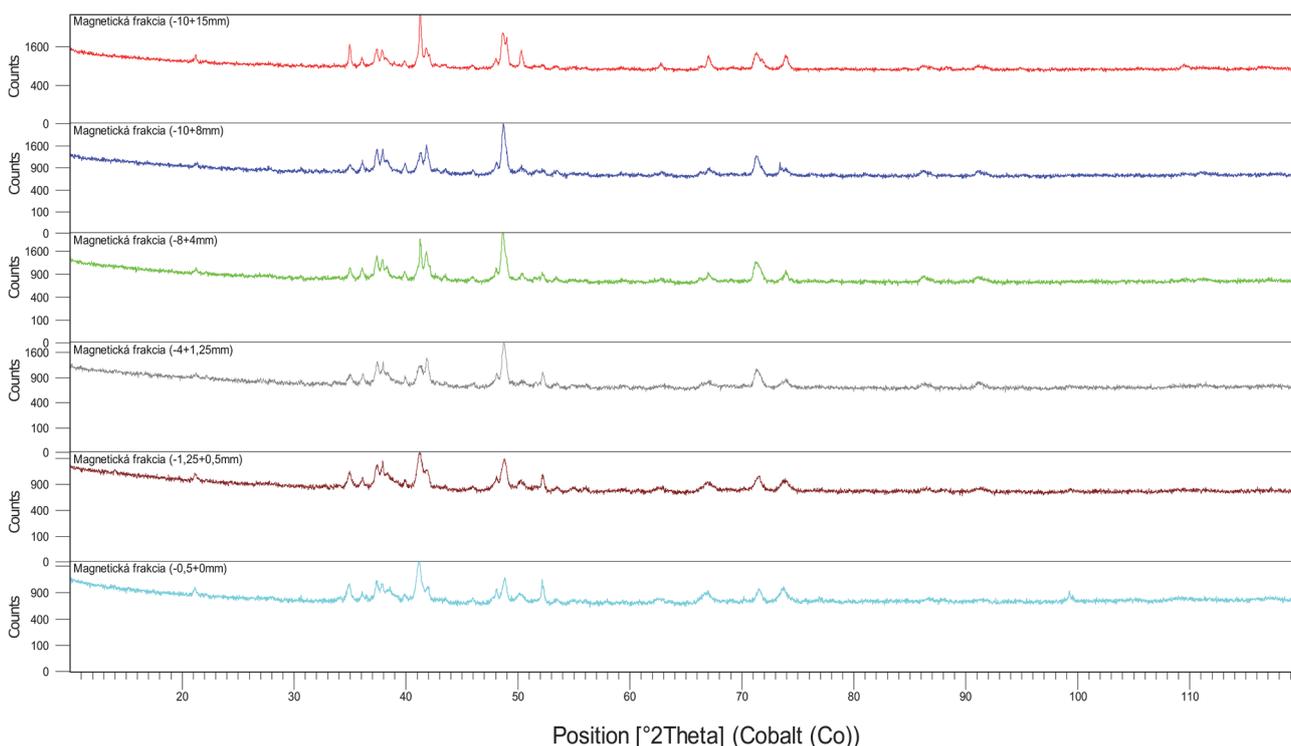
Z výsledkov magnetickej separácie jednotlivých frakcií
nedemetalizovanej trosky vyplýva, že so znižujúcou sa
zrniťosťou stúpa podiel magnetickej zložky (obr. 3). Tento
jav je možné vysvetliť tak, že s nižšou zrniťosťou dochádza
k lepšiemu oddeleniu magnetickeho podielu a tým lepšej
separácii od nemagnetickeho podielu. Zároveň, kovové
železo obsiahnuté v troske sa nachádza aj vo veľmi malých
zrniťostiach, ako aj magnetit. Magnetit sám o sebe je veľmi
tvrdá a krehká látka, takže je možné, že dochádza k jeho
prednostnému zdobňovaniu vplyvom drvenia resp. mletia.

Na obr. 4 je zobrazené porovnanie jednotlivých zrniťosť-
ných podielov magnetickej frakcie a na obr. 5 ich grafický
priebeh. Z RTG záznamov je zřejmé, že vzorky magnetic-
kých frakcií jednotlivých zrniťostí sú čo do kvalitatívneho
zloženia veľmi podobné. Z výsledkov meraní, vychádzajú

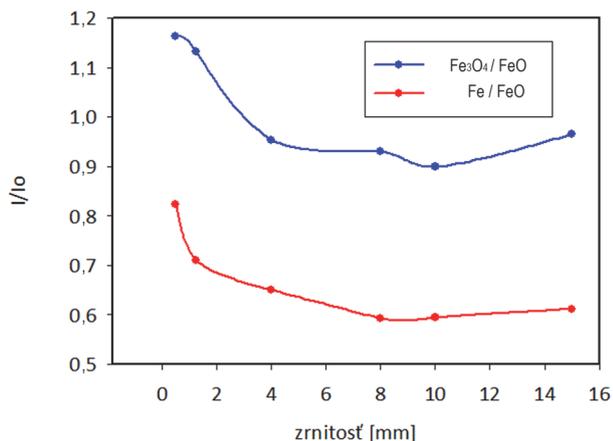
z predpokladu, že prvkové železo, ako aj magnetit sú látky
magneticke, kdežto wüstit FeO je látka paramagnetic-
ká, možno konštatovať, že so znižujúcou sa zrniťosťou
narastá magnetický podiel v jednotlivých zrniťostných
triedach.



Obr. 3 Podiel magnetickej frakcie v jednotlivých zrniťostných triedach
Fig. 3 The ratio of the magnetic fraction in individual grain sizes



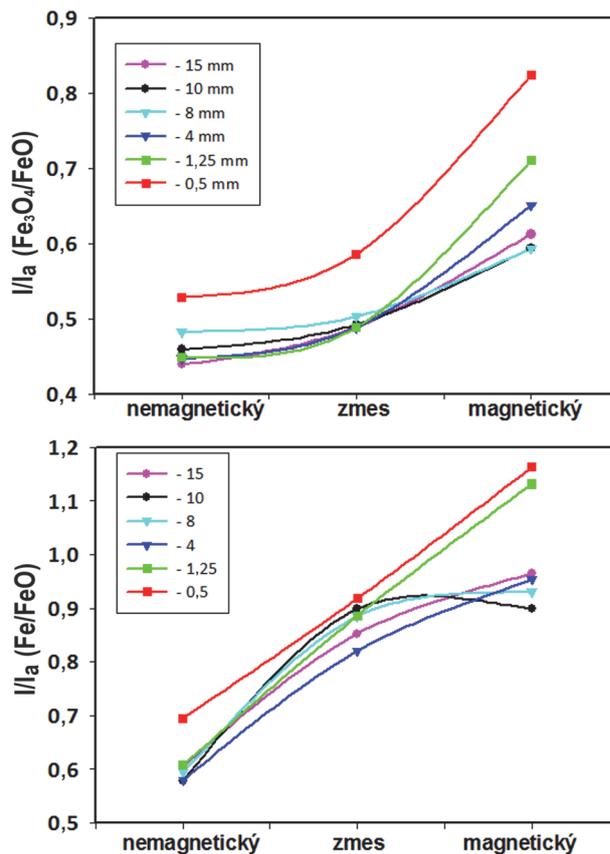
Obr. 4 Porovnanie výsledkov RTG difrakčnej fázovej kvalitatívnej analýzy jednotlivých zrniťostných podielov magnetickej frakcie trosky
Fig. 4 Comparison of the results of the X-ray diffraction phase qualitative analysis of the individual grain sizes of the magnetic fraction of the slag



Obr. 5 Grafické vyjadrenie zmeny množstva FeO, Fe a Fe₃O₄ v závislosti od zrnitostných podielov magnetickej frakcie trosky
Fig. 5 Graphic representation of the change in the amount of FeO, Fe and Fe₃O₄ depending on the grain size fraction of the slag

Zo vzájomného porovnania je zároveň možné pozorovať, že najmenší podiel Fe₃O₄:FeO resp. Fe:FeO (tzn. viac FeO) sa nachádza v nemagnetickej podiele, kdežto najvyšší pomer uvedených fáz sa nachádza v magnetickej podiele tak, ako to dokumentuje obr. 6.

Jednotlivé magnetickej frakcie po separácii ako aj vstupné frakcie sa podrobili prvkovým analýzám metódou atómovej absorpčnej spektrometrie. Výsledky prvkových analýz sú zosumarizované v tab. 3. Z výsledkov analýz vyplýva, že magnetickej separáciou sa podarilo v každej z frakcií zvýšiť obsah železa za súčasného poklesu obsahu vápnika a kremíka.



Obr. 6 Závislosť obsahu magnetickej podiele vo vytriedených frakciách
Fig. 6 Dependence of the content of the magnetic fraction in the sorted fractions

Tab. 3 Chemická analýza magnetickej frakcií a vstupov jednotlivých frakcií
Tab. 3 Chemical analysis of magnetic fractions and inputs

Zrniťnosť	Vzorka	Obsah [%]					
		Fe	Cr	Ca	SiO ₂	Mn	Al
-15 +10 mm	Zmes	18,91	0,33	14,8	29,3	4,46	2,2
	Magnetickej frakcia	28,91	0,39	10,28	28,78	3,36	1,83
-10 + 8 mm	Zmes	18,54	0,28	13,24	39,88	4,03	2,18
	Magnetickej frakcia	22,85	0,25	11,2	32,46	2,62	1,91
-8 + 4 mm	Zmes	15,91	0,3	14,21	27,97	3,7	2,36
	Magnetickej frakcia	25,9	0,31	13,16	29,48	3,88	2,2
-4 +1,25 mm	Zmes	17,99	0,34	15,48	34,66	4,35	2,6
	Magnetickej frakcia	45,57	0,27	9,28	25,44	2,49	1,53
-1,25 +0,5 mm	Zmes	19,45	0,35	15,08	34,36	4,52	2,92
	Magnetickej frakcia	30,28	0,37	11,08	27,84	2,79	2,2
-0,5 +0 mm	Zmes	22,41	0,34	15,64	35,16	4,77	2,48
	Magnetickej frakcia	24,56	0,42	13	27,59	3,96	2,42

3. Záver

Oceliarenské trosky možno vo všeobecnosti charakterizovať ako značne heterogénny materiál z hľadiska fyzikálnych vlastností, aj z hľadiska chemického a mineralogického zloženia. Ukázalo sa aj, že tieto vlastnosti sa čiastočne distribuujú aj do jednotlivých zrnitostných podielov. Významnou charakteristikou tejto trosky je obsah železa na úrovni 20 – 25 %, či už v podobe metalického železa alebo v podobe zlúčenín s obsahom železa. Dôležitým z tohto hľadiska je aj obsah magnetických fáz v jednotlivých zrnitostných podieloch. V prípade nedemetalizovanej trosky sa magnetické podiely koncentrovali do jemných zrnitostí a zároveň je potrebné mať na pamäti fakt, že do hrubozrnejších frakcií sa koncentrujú kvapôčky kovovej ocele, ktorá je mechanicky strhávaná do trosky a tieto kovové častice sa prakticky nedajú podrvíť ani pomlieť, takže ostávajú v hrubozrnejších podieloch.

Okrem podielu kovovej ocele vykazuje magnetické vlastnosti aj magnetit Fe_3O_4 , a potenciálne aj wustit FeO , ktorý je prirodzene paramagnetický. Samozrejme záleží od metodiky magnetického triedenia; pokiaľ sa triedenie realizuje klasickým feritovým magnetom, ktorý je relatívne slabomagnetický a je určený pre silnomagnetické látky, vytriedia sa hlavne častice kovovej ocele, eventuálne magnetitu. Pokiaľ by sa však aplikoval silnomagnetický neodýmový triedič, vytriedia sa aj silno aj slabomagnetické častice, čo v dôsledku znamená, že sa vytriedi do magnetického podielu viac ako 90 % celkového množstva.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla v rámci riešenia grantu VEGA MŠ SR 1/0678/23 a za jeho finančnej podpory.

Literatúra

- [1] World Steel in Figures 2022, <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>
- [2] TURŇA, S., et al. Možnosti úpravy chemických a mineralogických parametrov trosky z EOP v ŽP a.s. za účelom jej zužitkovania. Zborník príspevkov. In *Odborná konferencia ŽP VVC 2018*, 4.-6. September 2018, Hotel Stupka, Tále, Slovensko, p. 208-212, ISBN 978-80-973141-0-1.
- [3] THOMAS, C., et al. Steel slags 7. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete* (2019) Elsevier Ltd, p. 169-186, ISBN 978-0-08-102580-5.
- [4] DASH, M.K., et al. Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*. (2016) 5, 484–516.
- [5] OGE, M., et al. An Overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications. In *ICMTMTE 2018: Materials Today: Proceedings* 11 (2019) 516-525.
- [6] JIANG, Y., et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete - A review. *Resources, Conservation & Recycling* 136 (2018) 187-197.
- [7] MOMBELLI, D., et al. The effect of chemical composition on the leaching behaviour of electric arc furnace (EAF) carbon steel slag during a standard leaching test. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4 (2016), 1050-1060.
- [8] HAVLIK, T., et al. Materiálová recyklácia niektorých kritických kovov z oceliarenských trosiek – projekt CHROMIC. In *24. ročník konferencie TOP 2018*, Vysoké Tatry, Panorama Resort na Štrbskom Plese, 17.–19. 9. 2018 „Technika ochrany prostredia – TOP“.
- [9] KUKURUGYA, F. et al. Up-Concentration of Chromium in Stainless Steel Slag and Ferrochromium Slags by Magnetic and Gravity Separation. *Minerals* 2020, 10, 906; doi:10.3390/min10100906.
- [10] WANG, GEORGE, C. Ferrous metal production and ferrous slags - Charper 2. In: Book: *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*. 2016, p. 9-33, ISBN 978-0-08-100994-9.
- [11] XIN YU, et al. Performance of concrete made with steel slag and waste glass. *Construction and Building Materials*, 114, 737-746.
- [12] LIMBACHIVA, V., et al. Strength, durability and leaching properties of concrete paving blocks incorporating GGBS and SF. *Construction and Building Materials* 113 (2016), 273-279.
- [13] HORCKMANS, L., et al. Multi-Analytical Characterization of Slags to Determine the Chromium Concentration for a Possible Re-Extraction. *Minerals* (2019), 9, 646; doi:10.3390/min9100646.
- [14] BALAGUERA, C. A. C., et al. Characterization of steel slag for the production of chemically bonded phosphate ceramics (CBPC). *Construction and Building Materials* 241 (2020) 118138.
- [15] MIŠKUFOVÁ, A., et al. Metallurgical Slags – The Raw Material for Metals Recovery. In *Materiálová recyklácia priemyselných odpadov*. 20.-21.3. 2018, Tále, Horná Lehota, Slovensko, p.60-69, ISBN 978-80-553-2951-2.
- [16] TURŇA, S., et al. Physico – Chemical Parameter of EAF Slag in the Terms of Zeleziarne Podbrezová, a.s. In *Materiálová recyklácia priemyselných odpadov*. 20.-21.3.2018, Tále, Horná Lehota, Slovensko, p.91-98, ISBN 978-80-553-2951-2.
- [17] MAHMUTOVIČ, A., et al. Trends in production and using of metallurgical ferrous slag in bosnia and Herzegovina. In *IOC 2014, 46th International October Conference on mining and Metallurgy* 01-04 October 2014, Bor Lake, Bor (Serbia), p.569-572, ISBN 978-86-6305-026-6.
- [18] MENAD, Nour-Eddine, et al. New EAF Slag Characterization Methodology for Strategic Metal Recovery. *Materials* (2021), 14, 1513. <https://doi.org/10.3390/ma14061513>.
- [19] HORCKMANS, L., et al. Chromic: new processec to recover metals from carbon steel, stainless steel and ferrochrome steel. In *Euroslag 2017*, p.12, [12.03.2020] http://www.chromic.eu/wp-content/uploads/2017/10/4-4_Horckmans.pdf
- [20] MALHOTRA, K. Iron and steel slag utilization: a comprehensive analysis. *International Journal of Engineering Science Invention*, (2019), 8(8/1), p. 69-74.
- [21] BARICOVÁ, D. *Progresívne metódy zužitkovania trosiek z procesov výroby surového železa a ocele*. Habilitačná práca, Technická univerzita v Košiciach, s. 118. 2009,
- [22] MENAD, N., KANARI, N., SAVE, M. Recovery of high-grade iron compounds from LD slag by enhanced magnetic separation techniques. *International Journal of Mineral Processing*, (2014), 126, p.1-9.