

## PYROMETALURGICKÉ SPRACOVANIE ELEKTRONICKÉHO ODPADU PLAZMOVOU TECHNOLOGIOU

MARIÁN LÁZÁR, IVAN IMRIŠ, MARTA  
LENGYELOVÁ a PETER HORBAJ

*Katedra energetickej techniky, Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice  
marian.lazar@tuke.sk*

Došlo 24.3.14, prepracované 17.7.14, prijaté 11.9.14.

Kľúčové slová: plazmová technológia, elektronický odpad, pyrometalurgické spracovanie

### Úvod

Podľa prieskumu štatistických úradov v Českej a Slovenskej republike úroveň vybavenosti domácností elektrickými a elektronickými spotrebičmi v posledných rokoch nie len stúpa, ale sa aj obmieňa za nové energeticky úspornejšie zariadenia. Medzi takéto spotrebiče patria televízory, pračky, vysávače, rádiomagnetofóny, žehličky, satelitné systémy, kuchynské roboty, mikrovlnné rúry, rýchlvarné kanvice, digitálne fotoaparáty, rôzne prehrávače, počítače, skenery, tlačiarne a pod. Ak tieto spotrebiče doslúžia, stávajú sa odpadom.

Podľa štatistických údajov na jedného obyvateľa v Slovenskej republike vzniká viac ako 4 kg rok<sup>-1</sup> elektronického odpadu. Takýto odpad obsahuje celý rad opotrebovaných elektrických a elektronických súčiastok, ktoré po vyseparovaní tvoria elektronický odpad alebo elektronický šrot.

Elektronický odpad obsahuje rôzne druhy kovov, ale aj rôzne druhy plastov, skla a keramiky. Priemerné zloženie elektronického odpadu<sup>1</sup>, ktorý vznikne pri likvidácii

rôznych spotrebičov, je sumárne uvedený v tab. I. Priemerné zloženie elektronického odpadu<sup>2</sup>, ktorý vznikne likvidáciou výpočtovej techniky je 20 % Cu, 3 % Al a Zn, 6 % Pb a Sn, 8 % Fe, 2 % Ni, 30 % plasty a 30 % keramický materiál a sklo.

Plasty sú v elektronickom šrote zastúpené hlavne vo forme polymérov na báze C-H-N-O. Sem patria hlavne polyetylén, polypropylén, polyester, polykarbonáty a fenolformaldehydy. Halogény obsahuje asi 5 % plastov a približne 1 % plastov obsahuje dusík.

Základ keramických materiálov v elektronickom šrote tvorí oxid kremičitý, ktorého obsah dosahuje až 50 % a oxid hlinitý, ktorého obsah sa pohybuje v rozmedzí od 15 do 20 %. Obsah alkalických kovov a vzácnych zemín sa v niektorých komponentoch elektronického odpadu odhaduje v rozmedzí od 6 do 10 %. Zvyšok tvorí oxid horečnatý, alumino-silikáty a piezoelektriká, medzi ktoré patrí napr. sľuda, bárium a pod. Priemerné zloženie typickej farebnej obrazovky<sup>3</sup> je 59–64 % SiO<sub>2</sub>, 8–10 % SrO, 6–8 % Na<sub>2</sub>O, 6–9 % K<sub>2</sub>O, 2–4 % PbO, 1–2 % BaO, 1–2 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ale obsahuje tiež malé množstvá Fe, Ni, Cu, Cr, Zn, Sb, Ce, Li a Nd.

Základná doska počítača, ktorá predstavuje približne 10 až 12 % hmotnosti celého zariadenia, obsahuje celý rad kovov. Kovy v elektronickom odpade je možné rozdeliť na základné a drahé. Medzi základné kovy patrí meď, železo, nikel, cín, olovo, hliník a zinok. Medzi drahé kovy zaradujeme zlato, striebro, platínu, paládium a ródium. Obsah drahých kovov závisí nie len od druhu komponentov, ale aj od technickej úrovne ich výroby. Obsah drahých kovov v elektronickom odpade spolu s typickým chemickým zložením ťažených medených rúd<sup>4</sup>, ako ich udáva spoločnosť Boliden Mineral AB Skellefteham, je uvedený v tab. II.

Medzi elektronický odpad zaradujeme aj rôzne kontakty releových stýkačov telekomunikačných zariadení, ktoré obyčajne obsahujú<sup>2</sup> 49 % Co, 48 % Fe, 2 % V, 0,5 % Ag a 0,4 % Rh.

V elektronickom odpade sa okrem ušľachtilých kovov nachádzajú aj toxické kovy, medzi ktoré patria najmä Pb, Cd a iné. To znamená, že elektronický odpad je často zaradený do kategórie nebezpečných odpadov, ktorý si vyža-

Tabuľka I  
Priemerné materiálové zloženie rôznych spotrebičov

Druh odpadu	Priemerné zloženie [hm.%]					
	železné kovy	neželezné kovy	plasty	sklo	elektro-súčiastky	iné
Osobné počítače	32	18	23	15	12	--
TV prijímače	9,9	3	9,5	56,9	8	12,7
Zosilňovače	62,2	20,7	1,6	--	15,5	--
Autorádiá	52	8,3	6,9	--	31	1,8
Reproduktory	2,5	2,5	31	--	1,5	62,5
Slúchadla	23,8	23,8	42,9	--	7,1	2,4
Videorekordéry	50	12,6	22,6	--	7,2	7,6

Tabuľka II  
Obsah drahých kovov v elektronickom odpade

Kov	Klávesnice	PC počítače	Plošné spoje	Elektronické komponenty z automobilov	Typické zloženie Cu-rudy
Cu, hm. %	13	7	25	20	0,8
Zn, hm. %	3	1,2	1,5	1	0,12
Au, g t <sup>-1</sup>	50	10	80	70	0,1
Ag, g t <sup>-1</sup>	500	90	3000	1200	3,4
Pd, g t <sup>-1</sup>	20	4	30	2	0,04

duje špeciálne zaobchádzanie a tak sa hľadajú vhodné spôsoby jeho likvidácie nie len z pohľadu recyklácie kovov, ale hlavne z pohľadu nutnosti ochrany životného prostredia<sup>5,6,13</sup>.

Na získavanie kovov z elektronického odpadu sa využívajú rôzne mechanické a fyzikálno-chemické spôsoby spracovania, ktoré delíme na:

- mechanické spracovanie: drvenie, mletie a triedenie elektronického odpadu umožňujúce ľahšiu recykláciu užitočných komponentov hydrometalurgickými a pyrometalurgickými technológiami,
- hydrometalurgické spracovanie: lúhovanie neželezných (Cu, Ni, a pod.) a ušľachtilých kovov (Au, Ag, Pt, Pd a pod.),
- pyrometalurgické spracovanie: tavenie elektronického odpadu pri pyrometalurgickej výrobe Cu alebo Pb.

Mnoho zo súčasne používaných metód spracovania elektronického odpadu, ale nespĺňa všetky požiadavky stanovené európskou smernicou 2002/96/EC a zákonom 206/2010 Z. z. na komplexné spracovanie odpadov tak, aby sa v maximálnej miere využili všetky jeho zložky. Veľký podiel plastov v elektronickom odpade, ktorý sa pohybuje od 20 do 30 % spôsobuje problémy nie len pri ich recyklácii, ale aj počas spaľovania<sup>7</sup>. Recyklácia plastového podielu z elektronického odpadu a jeho opätovné zavedenie do výrobných procesov je v mnohých prípadoch neefektívne a niekedy nemožné tak z ekonomického, ako aj z kvalitatívneho hľadiska. Spaľovanie plastov, ako najrozšírenejší tepelný proces likvidácie odpadov organického pôvodu, prináša rad ťažko riešiteľných problémov súvisiacich so zamorením životného prostredia toxickými a nebezpečnými látkami<sup>8</sup>. Je preto potrebné hľadať nové BAT (best available technology) technológie na komplexné spracovanie elektronického odpadu. Medzi takéto technológie patrí plazmová technológia, pri ktorej dochádza k recyklácii kovov vo forme kovovej zliatiny a zachytených úletov s obsahom prchavých kovov, inertnej trosky, v ktorej sa koncentrujú oxidy kovov s vysokou afinitou ku kyslíku a k tvorbe syntézneho plynu, ktorý vzniká vysokoteplotným splynovaním plastov a iných organických zložiek elektronického odpadu, ktorý sa dá energeticky využiť.

Cieľom predloženej publikácie je popis experimentu plazmového tavenia a splynovania elektronického odpadu, pri ktorom sa vyrieši nielen ekologický problém spojený

Tabuľka III  
Priemerné zloženie podrveneň vzorky elektronického odpadu

Zložka	Priemerné zloženie [hm. %]
Strata žíhaním pri 850 °C	
Organický podiel + plasty	56,04
<i>Množstvo prvkov vo výluhu získanom pri lúhovaní zbytku po oxidačnom žíhaní</i>	32,11
Cu	57,76
Al	19,23
Fe	2,89
Ca	6,55
Mg	0,31
Mn	0,055
Ag	0,101
Au, mg·kg <sup>-1</sup>	1,74
B	0,53
Cd	0,0023
Cr	0,005
Ni	0,246
Pb	2,23
Sn	1,11
V	0,005
Zn	5,12
SiO <sub>2</sub>	<0,03
<i>Množstvo prvkov v lúženci získanom pri lúhovaní zbytku po oxidačnom žíhaní</i>	11,85
SiO <sub>2</sub>	54,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,40
CaO	4,96
MgO	0,57
MnO	0,023
TiO <sub>2</sub>	0,76
Sn	8,84
Cr	0,13
Cu	0,52
Suma	100,00

s ich skládkovaním, ale touto BAT technológiou sa zhodnotí aj materiálový a energetický obsah tohoto druhu odpadu.

## Experimentálna časť

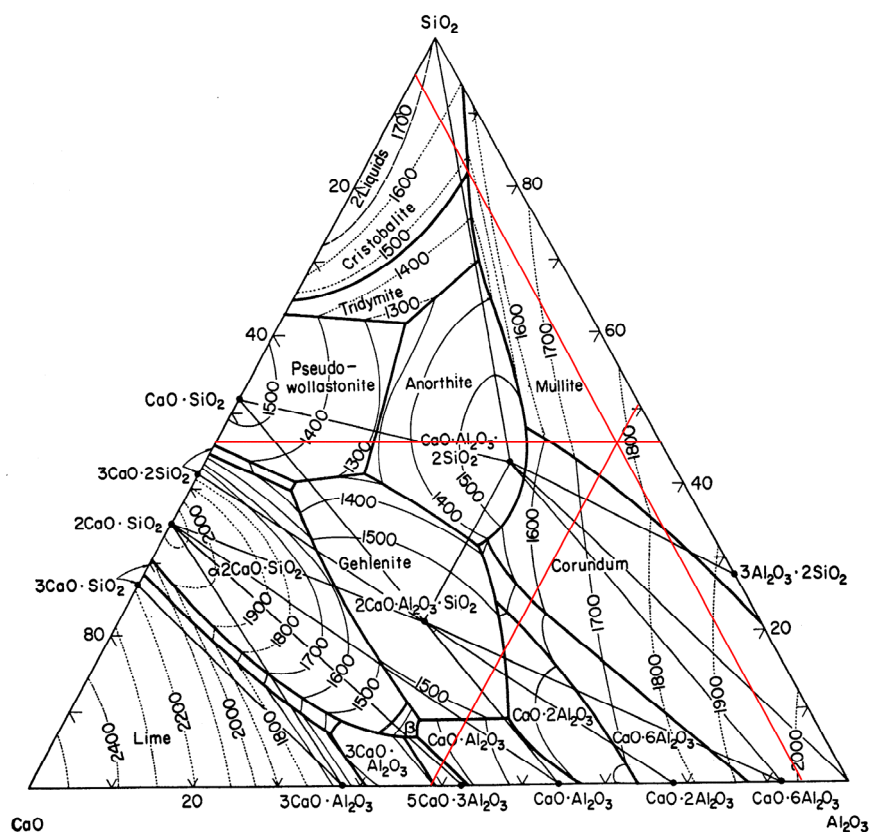
### Testovaná vzorka

Na experimentálne skúšky sa použila vzorka elektronického odpadu, ktorá sa získala z demontáže výpočtovej techniky, ktorá sa v prvom stupni prípravy rozdrvila a rozomlela na frakciu menšiu ako 5 mm. Takto upravená veľmi heterogénna vzorka s vlhkosťou 0,72 hm.% sa po rozdrvení analyzovala podľa nasledovného postupu.

V prvom stupni sa stanovil podiel organických zložiek a plastov vo vzorke elektronického odpadu jeho oxidačným vyžiháním na vzduchu pri teplote 850 °C. V druhom stupni sa zvyšok po žihaní vylúhoval v lúčavke kráľovskej, pričom sa po odfiltrovaní výluhu a lúženca v oboch produktoch stanovil obsah prvkov. Obsahy prvkov a zlúčenín vypočítané z chemických analýz výluhu a lúženca, spolu s výtťažnosťami jednotlivých produktov sú sumárne uvedené v tab. III.

### Termodynamická úvaha

Množstvo získaných kovov z elektroodpadu bude závisieť od priebehu chemických reakcií prebiehajúcich v reakčnej komore plazmového reaktora, ktoré je možné pri konštantnom tlaku a konštantnej teplote popísať pomocou štandardných zmien Gibbsových voľných energií pre redukciu oxidov kovov, o ktorých bolo podrobne pojednané na základe diagramu oblastí stability fáz v sústave Cu-Fe-Ni-Sn-Cd-Zn-Pb-O v cit.<sup>9</sup>. Z diagramu vyplýva, že optimálna teplota tavenia a splynovania elektronického odpadu je 1400 °C. Pri tejto teplote sa kovy s vysokým bodom varu ako napr. Cu, Fe, Sn, Ni a pod. skoncentrujú ako zliatina na dne plazmového reaktora, zatiaľ čo kovy s nízkym bodom varu ako napr. Zn, Pb, Cd a pod. sa odparia do syntézneho plynu, z ktorého sa zachytia vo forme úletov. Počas tavenia elektronického odpadu sa ďalej predpokladá, že približne 50 % hliníka zoxiduje na  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ktorý spolu s ďalšími troskotvornými oxidmi, medzi ktoré patria hlavne  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  a  $\text{MgO}$ , vytvorí oxidickú taveninu – trosku, ktorá sa ako samostatná kvapalná fáza bude koncentrovať na dne plazmového reaktora nad kovovou kvapalnou fázou.

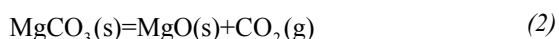
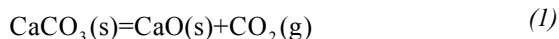


Obr. 1. Ternárny fázový diagram  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{CaO}$ . Teplota tavenia trosky z elektroodpadu približne 1800 °C

**Troska**

Teplota tavenia vznikajúcej trosky bude závisieť hlavne od obsahu hlavných troskotvorných oxidov CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> a MgO vo vsádzke. Ak sa z troskotvorných oxidov zanedbá veľmi nízky obsah MgO (tab. III) a zvyšok oxidov CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> sa prepočíta na 100 %, môžeme z ternárneho fázového diagramu sústavy SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO (cit.<sup>11</sup>) určiť teplotu tavenia trosky (obr. 1), ktorá je približne 1800 °C.

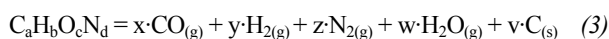
S cieľom znížiť bod tavenia trosky a zvýšiť kyslíkový potenciál v reakčnej komore plazmového reaktora, sa vzhľadom na vysoký obsah kyslých troskotvorných zložiek a plastov v elektronickom odpade, ako tavidlo použil dolomitický vápenec s obsahom 55 hm.% CaCO<sub>3</sub>, 30 hm.% MgCO<sub>3</sub> a 5 hm.% SiO<sub>2</sub>. Uhličitan vápenatý a horečnatý sa pri tavení termicky rozloží podľa chemických reakcií



Takto vzniknutý CaO a MgO spolu s SiO<sub>2</sub> z tavidla vytvoria s troskotvornými oxidmi z elektronického odpadu trosku, ktorá by mala mať teplotu tavenia okolo 1400 °C. Pri tejto teplote bude z termodynamického hľadiska dochádzať tak k roztraveniu trosky a kovovej zliatiny, v ktorej je hlavnou zložkou meď (b.t. Cu 1083 °C), ako aj k termickej disociácii plastov prítomných v elektronickom odpade.

**Rozklad plastov**

Ak plasty z elektronického odpadu popíšeme obecným vzťahom C<sub>a</sub>H<sub>b</sub>O<sub>c</sub>N<sub>d</sub>, môžeme ich termickú disociáciu v plazmovom reaktore popísať obecnou chemickou reakciou<sup>12</sup>



Podľa reakcie (3), okrem syntézneho plynu s vysokým obsahom H<sub>2</sub> a CO, bude vzhľadom na deficit kyslíka v plastoch vznikať aj elementárny uhlík vo forme sadzi, ktoré ale za prítomnosti oxidu uhličitého, vznikajúceho rozkladom uhličitanov podľa reakcie (1) a (2), budú oxidovať na oxid uhoľnatý podľa chemickej reakcie



To znamená, že ak sa pri tavení a splynovaní elektronického odpadu ako tavidlo použijú uhličitany, zvýši sa výťažnosť uhlíka z plastov do syntézneho plynu vo forme oxidu uhoľnatého. V systéme sa obmedzí vznik sadzi, ktoré sa síce vo filtračnom systéme plazmového reaktora zachytia, ale sa energeticky nevyužijú.

V elektronickom odpade sa môže nachádzať okrem uvedených prvkov aj síra, chlór, bróm a pod. Tieto prvky sa pri tavení a splynovaní elektronického odpadu neanalyzovali a nesledovali, preto sa o nich v tomto príspevku nepojednáva.

**Tavenie elektronického odpadu v plazmovom reaktore**

Tavenie elektronického odpadu z vyradenej výpočtovej techniky, ktorého zloženie je uvedené v tab. III, sa uskutočnilo v plazmovom reaktore s dutou grafitovou elektrodou so závislým oblúkom, ktorého popis je v cit.<sup>9</sup>. Na budenie plazmového oblúka sa ako plazmotvorný plyn používal dusík.

Podmienky tavenia vsádzky pozostávajúcej z podrveného elektronického odpadu (71,43 hm.%)

Tabuľka V  
Zloženie syntézneho plynu

Zložka	Zloženie syntézneho plynu [obj.%]	
	vzorka I.	vzorka II.
Metán	0,16	0,14
Vodík	48,00	47,00
Kyslík	0,33	0,22
Dusík	14,70	16,70
Oxid uhličitý	0,48	0,38
Oxid uhoľnatý	36,40	35,60
Etén	0,005	0,004
Etán	< 0,001	< 0,001
Etín	0,01	0,006
Suma C <sub>3</sub> uhľovodíkov	< 0,001	< 0,001
Suma C <sub>4</sub> uhľovodíkov	< 0,001	< 0,001
Suma C <sub>5-8</sub> uhľovodíkov	< 0,001	0,003
Výhrevnosť, MJ m <sup>-3</sup>	9,84	9,62

Tabuľka IV

Prevádzkové parametre tavenia vsádzky

Prevádzkové parametre	Hodnota
Teplota v reakčnej komore, °C	1 409
Doba realizácie experimentu, min	73
Hmotnosť vsádzky, kg	16,7
Rýchlosť vsádzania, kg min <sup>-1</sup>	0,229
Prietok dusíka, Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	1,056
Napätie, V	70
Intenzita prúdu, A	450
Celková spotreba elektrickej energie, kWh	50,1
Spotreba energie vzťahovaná na kg vsádzky, kWh kg <sup>-1</sup>	3
Produkcija syntézneho plynu <sup>a</sup> , m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	0,498

<sup>a</sup> Predstavuje produkciu syntézneho plynu stanovenú na základe bilancie dusíka

Tabuľka VI  
Zloženie zliatiny

Zložka	Zloženie [hm.%]
Cu	80,5
Al	7,21
Si	4,89
Sn	3,91
Fe	2,44
Ni	0,316
Cr	0,157
Ag	0,0563
Au	0,0163
S	0,0095
Cd	0,00046
Te	> 0,144
C	> 0,0732
Zn	< 0,003
Pb	< 0,05
Sb	< 0,0035
Co	< 0,0015
Be	< 0,0001
B	< 0,0004
Pt	< 0,002

a dolomicko-vápenčového tavidla (28,57 hm.%) sú sumárne uvedené v tab. IV, spolu s nameranými a vypočítanými hodnotami špecifickej spotreby energie a množstvom vyprodukovaného syntézneho plynu vzťahnutého na 1 kg vsádzky.

V priebehu tavenia vsádzky sa odobrali 2 vzorky syntézneho plynu, zloženie ktorých je uvedené v tab. V. Stanovenie obsahu halogénových prvkov v odobratých vzorkách syntézneho plynu sa neanalyzovali.

Pretavením 16,7 kg vsádzky zloženej z elektronického odpadu a tavidla sa z plazmového reaktora do liatinovej kokily odpichlo 2,0 kg vytavenej trosky a 0,5 kg zliatiny. Zvyšok trosky a zliatiny ostal na dne plazmového reaktora, ktorá sa z reaktora vybrala po jeho ochladení. Z vychladnutej a homogenizovanej trosky a zliatiny ako aj zo zachyteného úletu v cyklónovom odlučovači boli odobraté vzorky na chemickú analýzu. Výsledky chemických analýz sú sumárne uvedené tab. VI, VII a VIII.

Vysoký obsah medi v získanej zliatine (tab. VI) ako aj celkovú hmotnosť zliatiny ovplyvňuje meď, ktorá sa pri tavení do plazmového reaktora vsádza pred začiatkom tavenia na ochranu grafitovej nístaje. Množstvo vsadenej medi bolo 5,7 kg, z ktorej sa v priebehu ohrevu plazmového reaktora na pracovnú teplotu odparí na základe experimentálnych skúsenosti približne 50 %.

Tabuľka VII  
Zloženie trosky

Zložka	Zloženie [hm.%]
CaO	46,71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,16
SiO <sub>2</sub>	3,27
MgO	0,12
Cu	13,03
Fe celk.	0,55
Sn	0,132
Zn	0,071
Pb	0,028
Ag	0,0046
<b>Suma</b>	<b>80,62</b>

Tabuľka VIII  
Zloženie úletov

Zložka	Zloženie [hm.%]
C	40,02
CaO	16,04
MgO	10,35
SiO <sub>2</sub>	5,60
Cu	6,13
Pb	3,90
Zn	1,45
Fe celk.	0,19
Cd	0,01
<b>Suma</b>	<b>83,69</b>
Vlhkosť	3,55

## Výsledky a diskusia

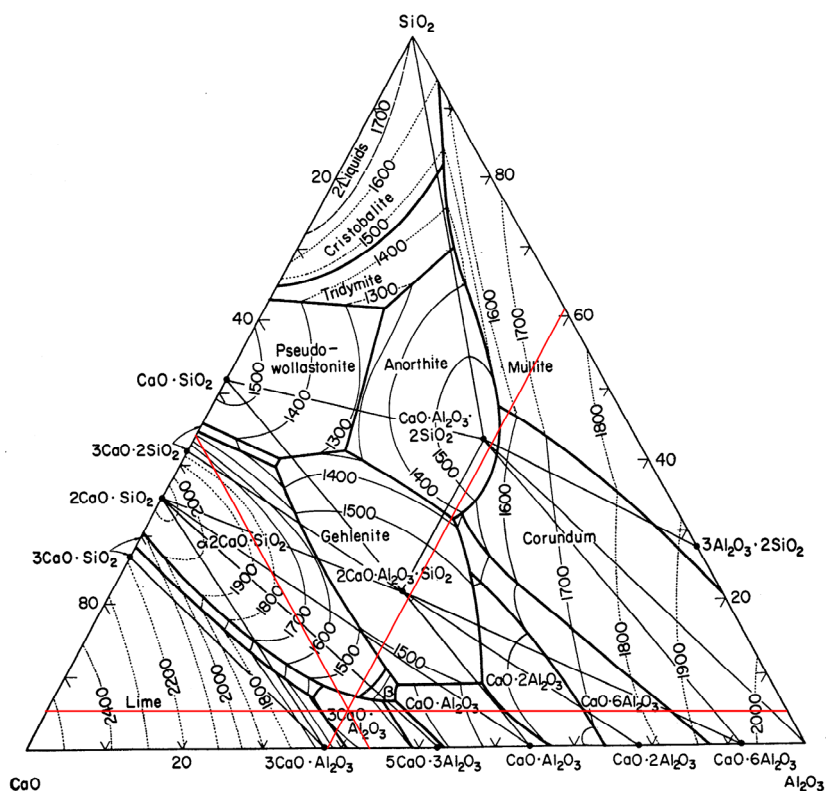
Na základe analýz uvedených v tab. III je možné predpokladať, že z 1 tony analyzovaného elektronického odpadu sa pri tavení a splynovaní v plazmovom reaktore získa 250–300 kg t<sup>-1</sup> kovov vo forme zliatiny alebo oxidických úletov, ktoré sa budú dať využiť ako druhotná surovina v metalurgickom priemysle.

Z termodynamického rozboru tavenia a splynovania elektronického odpadu a tavidiel vyplýva, že pri tavení a splynovaní vsádzky sa uhlíčitany z tavidiel rozložia podľa reakcií (1) a (2), organický podiel z elektronického odpadu sa termicky rozloží podľa reakcie (3), za vzniku syntézneho plynu s vysokým obsahom vodíka a oxidu uhoľnatého. V silne redukčnej atmosfére sa niektoré oxidy kovov z elektronického odpadu vyredukujú a s kovmi s vysokým bodom varu, medzi ktoré patria najmä Cu, Sn, Fe, Au, Ag, atď. vytvoria tekutú kovovú fázu – zliatinu, ktorá sa skon-

Tabuľka IX

Distribúcia niektorých prvkov medzi zliatinu, trosku a úlety

Fáza	Rozdelenie kovov [%]						
	Cu	Sn	Fe	Ag	Au	Zn	Pb
Zliatina	90,17	98,84	88,32	96,20	99,73	0,29	1,81
Troska	5,07	1,16	6,92	3,80	0,27	2,39	0,35
Úlet	4,75	0,00	4,76	0,00	0,00	97,32	97,84

Obr. 2. Ternárny fázový diagram  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ . Teplota tavenia trosky približne  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ 

centruje na dne plazmového reaktora. Táto zliatina, sa ako jeden z výstupných produktov plazmového tavenia, odlieva do ingotov, ktoré sa ako druhotná surovina využijú pri výrobe kovov. Kovy s nízkym bodom varu, medzi ktoré patrí hlavne Zn, Pb a pod., sa pri danej teplote odparia a vo forme pár sa spolu so syntéznym plynom dostanú do systému čistenia plynu, kde pary kovov skondenzujú, ale čiastočne aj zoxidujú. Skondenzované a zoxidované pary kovov sa následne zachytia ako úlety vhodné na ďalšie metalurgické spracovanie. Kovy s vysokou afinitou ku kyslíku, takzvané troskotvorné oxidy, medzi ktoré patria  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  a  $\text{MgO}$ , vytvoria v plazmovom reaktore inertnú trosku, ktorá sa v plazmovom reaktore koncentruje ako samostatná kvapalná fáza na dne reaktora nad hladinou

kovu. Tieto kvapalné fázy – troska a zliatina – sa z reaktora v priebehu tavby periodicky odpichujú.

Inertná troska s amorfou silikátovou sklovitou štruktúrou, s veľmi nízkou vyluhovateľnosťou kovov, predstavuje ďalší produkt plazmového tavenia, ktorý sa dá využiť napr. v stavebníctve. Vyčistený syntézný plyn s vysokým obsahom vodíka a oxidu uhoľnatého sa môže využiť v rôznych energetických aplikáciách.

Na základe chemických analýz produktov a materiálovej bilancie bola vypočítaná distribúcia prvkov medzi zliatinu, trosku a úlety, ktoré sú sumárne uvedené v tab. IX.

Z tab. IX vyplýva, že počas tavenia sa kovy s vysokou teplotou varu ako sú Cu, Sn, Fe, Ag a Au skon-

centrovali hlavne v zliatine, zatiaľ čo kovy s nízkym bodom varu ako Zn a Pb sa skoncentrovali hlavne v úletoch. Tieto výsledky sú v plnej zhode s termodynamickými úvahami a výpočtami, o ktorých je podrobne pojednané v cit.<sup>9</sup>.

Z chemických analýz zliatiny, trosky a úletov (tab. VI, VII a VIII) vidno, že počas tavenia elektronického odpadu došlo aj k čiastočnej a úplnej redukcii oxidu kremičitého. Oxid kremičitý sa v plazmovom reaktore čiastočne redukoval na prchavý SiO, ktorý sa následne v zariadení na čistenie plynu zoxidoval na SiO<sub>2</sub> a tak sa následne zachytil v úletoch (5,6 % SiO<sub>2</sub>, tab. VIII). Vyredukovaný kovový Si sa koncentroval v zliatine (4,89 % Si, tab. VI). Z uvedených skutočností je vidieť, že sa zmení predpokladané zloženie trosky, čo potvrdzujú výsledky analýzy trosky uvedené v tab. VII. Bod tavenia takejto trosky určený z ternárneho diagramu CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (cit.<sup>11</sup>), zobrazenom na obr. 2, je okolo 1450 °C. Takáto inertná troska s amorfnou silikátovou sklovitou štruktúrou, ktorá spĺňa všetky environmentálne požiadavky, je využiteľná napr. v stavebníctve ako plnidlo do betónu.

Majoritnú časť vsádzky tvorí organický podiel a plasty, ktoré sa pri tavení elektronického odpadu v plazmovom reaktore pri vysokej teplote termicky rozložili na syntézny plyn a uhlík podľa reakcie (3). Z analýz úletu (tab. VIII) vyplýva, že len časť uhlíka zreagovala s oxidom uhličitým na oxid uhoľnatý podľa reakcie (4), a tak účinnosť energetického využitia uhlíka z elektronického odpadu v syntéznom plyne je možné vyjadriť vzťahom

$$\eta_c = \frac{m_{C \text{ odpad}}}{m_{C \text{ úlet}} + m_{C \text{ troska}} + m_{C \text{ zliatina}}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5)$$

kde  $m_{C \text{ odpad}}$  je hmotnosť uhlíka v elektronickom odpade (kg),  $m_{C \text{ úlet}}$ ,  $m_{C \text{ troska}}$  a  $m_{C \text{ zliatina}}$  sú hmotnosti uhlíka v tuhých produktoch tavby (kg).

Pri tavení a splynovaní elektronického odpadu sa uhlík koncentroval hlavne v úlete (tab. VIII). V troske a kove nebol identifikovateľný. Na základe toho je možné vypočítať, že približne 45,7 % uhlíka z elektronického odpadu zreagovalo na oxid uhoľnatý a tak produkcia syntézneho plynu, o zložení uvedenom v tab. V, bola po prepočítaní na tonu vsádzky len 500 Nm<sup>3</sup>. Takýto syntézny plyn sa po vyčistení dá energeticky využiť napr. v kogeneračnej jednotke na výrobu elektrickej energie a tepla.

## Záver

Vzhľadom na environmentálne problémy so skládkovaním alebo spaľovaním elektronického odpadu sa hľadajú nové spôsoby na jeho likvidáciu. Jeden zo spôsobov je jeho tavenie a splynovanie v plazmovom reaktore.

Pri tavení a splynovaní elektronického odpadu v plazmovom reaktore sa okrem syntézneho plynu, ktorý

sa dá energeticky využiť na výrobu elektrickej energie a tepla, získa aj zliatina kovov a oxidické úlety, ktoré sa dajú ako druhotné suroviny využiť v hutníckom priemysle, a vitrifikovaná troska, ktorej zloženie sa dá modifikovať prídavkom tavidiel tak, aby sa dala využiť napr. v stavebníctve ako plnidlo do betónov.

To znamená, že technológia plazmového tavenia a splynovania elektronického odpadu je bezodpadová technológia, ktorá spĺňa všetky požiadavky BAT technológie, pri ktorej sa zhodnotí materiálový a energetický obsah tohto druhu odpadu.

Na základe výsledkov uvedených v tejto štúdií je možné konštatovať, že plazmová technológia na likvidáciu elektronického odpadu je z technického a ekologického hľadiska vhodná.

*Príspevok vznikol za podpory agentúry MŠ SR pre štrukturálne fondy EÚ operačného programu „Výskum a vývoj“ projektu č. p. ITMS 26220220044 a projektu VEGA 1/0004/2014.*

## LITERATÚRA

1. Volek J.: *Odpady 12*, 10 (1999).
2. Hoffman J. E.: *JOM 44*, 43 (1992).
3. Connelly J. H., Lopata D. J.: *Engineered materials Handbook*, ASM Intl. 1991.
4. Kurilla P.: *Dizertačná práca*. Technická univerzita v Košiciach, Košice 2012.
5. Ficeriová J., Baláž P.: *Chem. Listy 105*, 256 (2011).
6. Znamenáčková I., Lovás M., Hájek M., Sobek J.: *Chem. Listy 105*, 625 (2011).
7. Stenvall E.: *Waste Manage.* 33, 915 (2013).
8. Horbaj P.: *Chem. Listy 99*, 694 (2005).
9. Lázár M., Lengyelová M., Imriš I.: *Chem. Listy 108*, 148 (2014).
10. Komorová E., Imriš I.: *Termodynamika v hutníctve*. Alfa, Bratislava 1991.
11. Levin E. M., Robbins C. R. and McMurdie H. F.: *Phase Diagrams for Ceramists*. Columbus, Ohio 1969.
12. Imriš I., Klenovčanová A., Molčan P.: *Arch. Thermodyn.* 26, 3 (2005).
13. Znamenáčková I., Dolinská S., Lovás M., Hredzák S., Dimitrakis G.: *J. Pol. Miner. Eng. Soc.* 15, 1640 (2014).

**M. Lázár, I. Imriš, M. Lengyelová, and P. Horbaj**  
(Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University, Košice, Košice):  
**Pyrometallurgical Processing of Electronics Waste by Plasma Technology**

The article deals with the material and energy recovery of electronics waste, which is a serious environmental problem. The study specifically analyzes the plasma melting of electronics waste in a 10 kVA plasma reactor to obtain alloys, glassy slag and syngas.