

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ ИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ ОТХОДОВ

© 2018 г. **З.М. Ахметвалиева, Н.А. Куленова, С.В. Мамяченков, О.С. Анисимова, Е.Л. Фокина**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет (ВКГТУ)
им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)

Статья поступила в редакцию 13.08.17 г., подписана в печать 06.09.17 г.

Приведены результаты исследования влияния предварительной термической обработки измельченных электронных отходов при температуре 450 °С на степень извлечения меди при последующем выщелачивании материала растворами азотной кислоты. В качестве объектов исследования были выбраны отходы электронной промышленности, в частности автомобильные микросхемы и компьютерные печатные платы. Экспериментальным путем выявлено, что доля органической фазы в их составе колеблется в пределах 20–25 % от массы измельченного сырья. По результатам термогравиметрического и рентгенофлуоресцентного анализов установлено, что максимальная степень удаления органики и образование оксидных форм металлов наблюдаются в интервале температур 400–450 °С. Получена математическая модель процесса выщелачивания меди из электронных отходов растворами HNO_3 . Найдены оптимальные параметры проведения процесса: температура в системе 75 °С, продолжительность выщелачивания 150 мин, концентрация кислоты 4 М, обеспечивающие максимальное извлечение меди в раствор (98 %). Проведен сравнительный анализ процессов выщелачивания двух типов сырья (после термической обработки и без таковой). Экспериментально подтверждено, что для сырья после предварительного отжига наблюдается более полное выщелачивание меди из электронных отходов растворами азотной кислоты меньшей концентрации по сравнению с образцами без термической обработки. Доказано, что последняя обуславливает фазовые изменения в составе исследуемого объекта, а именно переход металлов в их оксидные формы, что положительно влияет на степень извлечения меди из электронных отходов при последующем азотно-кислом выщелачивании.

Ключевые слова: комплексный термический анализ, термическая обработка, электронные отходы, печатные платы, медь, выщелачивание, азотная кислота.

Ахметвалиева З.М. — докторант ВКГТУ (070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19).
E-mail: zakhmetyali@gmail.com.

Куленова Н.А. — канд. техн. наук, проф., зав. научно-производственным комплексом «Металлургия» ВКГТУ.
E-mail: 3007kulenova53@gmail.com.

Мамяченков С.В. — докт. техн. наук, профессор кафедры металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17, оф. С-108). E-mail: svmamachenkov@yandex.ru.

Анисимова О.С. — канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ.
E-mail: osanis@mail.ru.

Фокина Е.Л. — вед. инженер Института наук о Земле СПбГУ (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9). E-mail: albite@yandex.ru.

Для цитирования: Ахметвалиева З.М., Куленова Н.А., Мамяченков С.В., Анисимова О.С., Фокина Е.Л. Влияние термической обработки на извлечение меди из электронных отходов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 2. С. 21–27. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-2-21-27.

Akhmetvaliyeva Z.M., Kulenova N.A., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S., Fokina E.L.

Thermal treatment influence on copper extraction from electronic waste

The paper provides the results of studying the influence of preliminary thermal treatment of crushed electronic waste at a temperature of 450 °С on the copper extraction degree during subsequent material leaching by nitric acid solutions. Electronic industry waste, in particular automobile microcircuits and computer printed circuit boards, was chosen as a research object. It was experimentally determined that the percentage of the organic phase in the research object composition varies within 20–25 % of the crushed raw material mass. The results of thermogravimetric analysis (TGA) and X-ray fluorescence analysis (XRF) show that the maximum degree of organic removal and formation of metal oxides are observed in a temperature range of 400–450 °С. A mathematical model of copper leaching from electronic waste by HNO_3 solutions was obtained. The optimum parameters for the process were found —

the temperature in the system is 75 °C; leaching duration is 150 min; acid concentration is 4 M with a maximum copper extraction to the solution of 98 %. A comparative analysis of leaching processes for two types of materials (after thermal treatment and without it) was carried out. It was experimentally confirmed that copper leaching from electronic waste by nitric acid solutions with lower concentrations is more complete for materials after preliminary thermal treatment as compared to raw material leaching without thermal treatment. It was proved that preliminary thermal treatment leads to phase changes in the composition of the research object, namely, the transition of metals to their oxide forms, which positively affects the degree of copper extraction from electronic waste at subsequent nitric acid leaching.

Keywords: complex thermal analysis, thermal treatment, electronic waste, printed circuit boards, copper, leaching, nitric acid.

Akhmetvaliyeva Z.M. — PhD candidate, East Kazakhstan State Technical University (EKSTU) (070010, Republic Kazakhstan, Ust'-Kamenogorsk city, Serikbayev str., 19). E-mail: zakhmetyali@gmail.com.

Kulnova N.A. — Cand. Sci. (Eng.), Associate prof., Head of research and production complex «Metallurgy», EKSTU. E-mail: 3007kulnova53@gmail.com.

Mamyachenkov S.V. — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals, Ural Federal University (UrFU) (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 17, off. C-108). E-mail: svmamyachenkov@yandex.ru.

Anisimova O.S. — Cand. Sci. (Tech.), Docent, Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals, UrFU. E-mail: osanis@mail.ru.

Fokina E.L. — Senior engineer, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University (199034, Russia, Saint Petersburg, University embankment, 7-9). E-mail: albite@yandex.ru.

Citation: Akhmetvaliyeva Z.M., Kulnova N.A., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S., Fokina E.L. Vliyanie termicheskoi obrabotki na izvlechenie medi iz elektronnykh otkhodov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 2. P. 21–27.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-2-21-27.

Введение

Отходы электронной промышленности, или электронные отходы (ЭО), по своему химическому составу являются очень привлекательным источником сырья для получения цветных, благородных и редких металлов. В зависимости от типа устройства, по данным [1–3], в них содержится 20–50 мас.% меди и других ценных компонентов, включая свинец, олово, цинк, алюминий, серебро, золото, платину, палладий и др.

Учитывая массу ежегодно образующихся ЭО (приблизительно от 20 до 50 млн т/год во всем мире [4]), металлургическая переработка такого типа сырья в промышленном масштабе может отличаться высокой рентабельностью производства.

Известны различные способы переработки ЭО, которые в большинстве основаны на комбинировании пирометаллургических, гидрометаллургических и электрометаллургических технологий [1, 5–9] и ориентированы на извлечение благородных металлов (БМ) [10–16]. Однако в связи с миниатюризацией электронных блоков наблюдается резкое снижение распределения БМ в современных выпускаемых приборах, что бросает вызов традиционным методам переработки отходов электронной промышленности.

Известно, что гидрометаллургические процессы переработки ЭО осуществляются с применением различных кислот — серной, азотной, соляной и их смесей [17–19], и характеризуются высокой

степенью извлечения целевых компонентов (меди, цинка, свинца и благородных металлов), гибким режимом работы и возможностью применения в небольших масштабах. Перечисленные факторы делают их более экономически стабильными методами с целью переработки широкого спектра отходов электронной промышленности, в том числе низкосортных. Тем не менее в промышленном масштабе нет действующей технологии переработки ЭО, полностью основанной на гидрометаллургических процессах.

Целью данной работы было изучение процесса выщелачивания меди растворами азотной кислоты из электронных отходов, активированных термической обработкой.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлись электронные отходы в виде автомобильных микросхем и компьютерных печатных плат. На рис. 1 представлена схема проведения экспериментов, включающая предварительную термическую обработку (ТО) исходного материала и азотно-кислотное выщелачивание.

Исходный материал измельчали в две стадии с использованием передвижного режущего станка для дробления пластика Scutter SA-22 от компании «Stolz Co. Ltd.» (крупность частиц на выходе

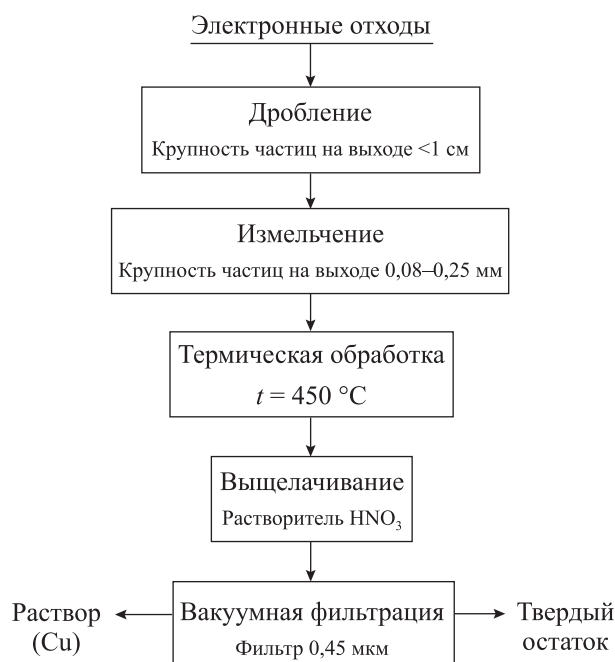


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по переработке электронных отходов

$d \leq 1$ см) и вибрационной дисковой мельницы Herzog HSM. Гравитационный анализ объекта исследования после измельчения показал, что основная доля фракций (~75 %) имела крупность +0,08–0,25 мм.

Химический состав изучаемого материала определяли на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICP-OES. Содержание основных металлов составило, мас. %: Cu — 32,87, Pb — 2,05, Zn — 2,44, Sn — 3,55, Ag — 1400 г/т, Au — 5,1 г/т.

С целью качественной идентификации фаз в исследуемом материале и полуколичественных оценок по фазовому анализу проводили рентгеновский дифракционный анализ на оборудовании PANalytical X'Pert PRO при $\theta = 5^\circ\div 70^\circ$ для определения металлических фаз и на приборе Ultima IV XRD Rigaku при $\theta = 28^\circ$ для выявления органических составляющих. Установлено наличие α -полипропилена, полипропилена, а также металлических фаз меди, свинца, цинка, олова и др.

Комплексное термическое исследование, включающее дифференциально-сканирующую калориметрию (ДСК) и термогравиметрический анализ (ТГА), проводили для изучения потерь массы и фазовых переходов с изменением температуры от 25 до 1000 °C в атмосфере воздуха на синхронном термическом анализаторе Mettler Toledo. Масса на-

вески составляла 18,842 мг (с учетом массы тигля 458,070 мг), скорость нагрева — 10 град/мин. Следует отметить, что данных по термическому анализу такого типа материалов в научной литературе не обнаружено.

Для получения зависимости изменения массы объекта исследования с ростом температуры и установления оптимальной температуры ТО проводили лабораторные испытания по прокаливанию исходного материала в интервале температур 25–700 °C в лабораторной муфельной печи SNOL 7,2/1100. Время выдержки в печи было определено по скорости окисления органических компонентов, исходя из результатов ДСК, и составило 1 ч. После удаления органических компонентов методом термической обработки образец подвергали выщелачиванию растворами азотной кислоты. Выбор кислоты-растворителя обусловлен составом объекта исследования. Присутствие 2,05 мас. % Pb исключает применение серной кислоты, так как твердая фаза малорастворимого продукта (сульфата свинца), образующаяся на поверхности растворяющихся частиц, негативно повлияла бы как на скорость выщелачивания (внутридиффузионное торможение), так и на глубину извлечения основных компонентов.

Выщелачивание осуществляли в термостойких фторопластовых стаканах емкостью 500 мл, установленных в водяную баню с автоматическим регулятором температуры. Для перемешивания использовали электроприводное лабораторное устройство IKA RW 16 basic. После установления заданной температуры в раствор азотной кислоты помещали навеску исследуемого материала.

Пульпу после проведения экспериментов разделяли на твердые остатки и растворы на системе вакуумной фильтрации (размер пор 0,45 мкм). Твердые остатки после 3-кратной промывки дистиллированной водой сушили в сушильном шкафу при температуре 100–110 °C до постоянной массы и анализировали химический состав на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS.

Результаты и их обсуждение

По результатам комплексного термического анализа исследуемого образца на кривой ДСК наблюдается значительный экзотермический эффект в интервале $t = 400\div 450$ °C (рис. 2). Согласно данным рентгеновского дифракционного анали-

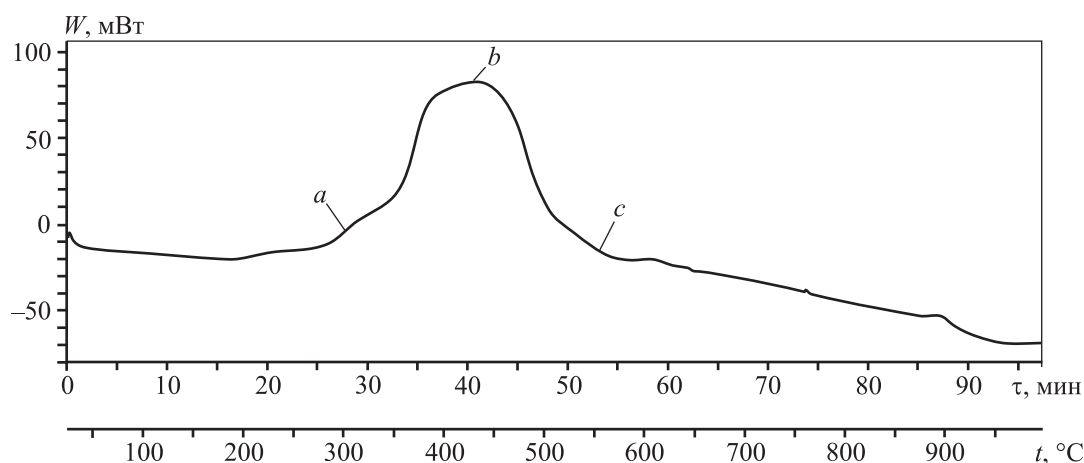


Рис. 2. Результаты ДСК исходной пробы: характер изменения количества высвободившейся энергии в зависимости от роста температуры со временем

a, b и c — начало, пик и окончание экзоэффекта соответственно

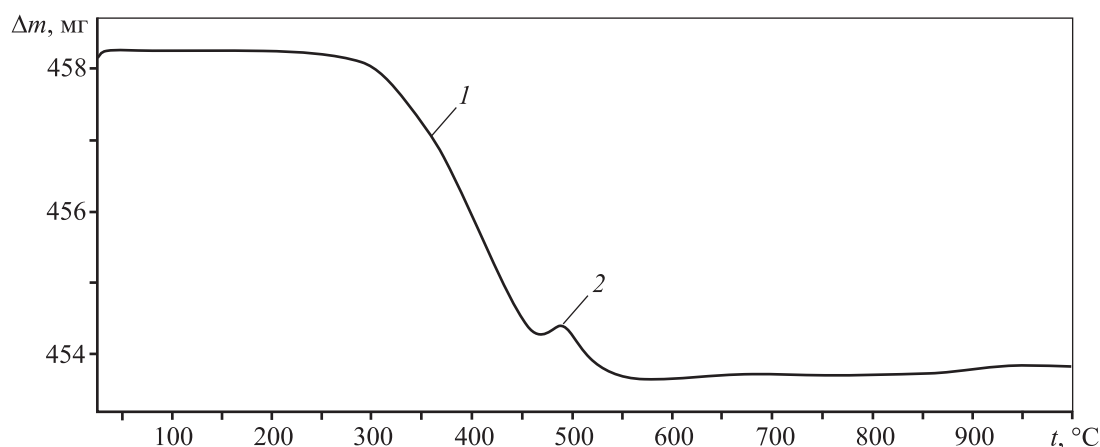


Рис. 3. Результаты ТГА исходной пробы: кривая зависимости изменения массы от температуры

1 — процесс выгорания органики (потери массы); *2* — пик фазового перехода, окисление Cu_2O

за он может быть связан с выделением большого количества тепла за счет выгорания органических компонентов (полипропилена и α -полипропилена). В то же время в области этих температур на кривой ТГА наблюдается образование небольшого пика, который с учетом химического состава (~33 мас.% Cu) свидетельствует об окислении монооксида меди (рис. 3). Последний, как и металлическая медь, входит в состав печатных плат в связи с обязательной металлизацией при их производстве.

Экспериментальным путем было установлено, что доля органической фазы в составе объекта исследования колеблется в пределах 20–25 % от массы измельченных электронных отходов. Максимальная степень удаления органики наблюдается в интервале $t = 400\div 450$ °С. Результаты проведен-

ных экспериментальных исследований согласуются с данными ТГА исходной пробы (рис. 4).

Фазовый анализ объекта исследования после проведения термической обработки при $t = 450$ °С показал присутствие оксидных фаз меди. Содержание металлов по данным рентгенофлуоресцентного анализа составило, мас. %: Cu — 41, Pb — 2,56, Zn — 3, Ag — 1750 г/т, Au — 12,5 г/т.

Серию экспериментов по азотно-кислотному выщелачиванию измельченных электронных отходов согласно схеме эксперимента (см. рис. 1) проводили методом трехфакторного эксперимента, предложенного Р. Фишером [20]. Изменяющимися параметрами выбраны продолжительность выщелачивания $X_1 = 30\div 180$ мин, температура $X_2 = 25\div +75$ °С и концентрация азотной кислоты $X_3 = 0,5\div +4,0$ М, а постоянными — отношение Ж : Т = 10 : 1

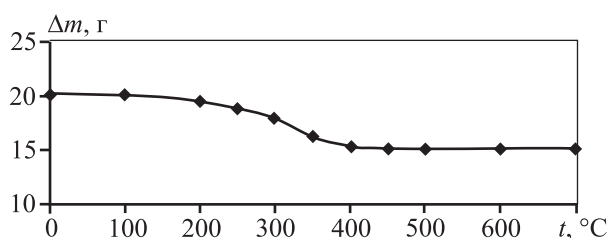


Рис. 4. Результаты ТГА исходной пробы: кривая изменения массы исследуемого образца электронных отходов в зависимости от роста температуры

и скорость механического перемешивания 500 об/мин. Функцией отклика (y) являлась степень извлечения меди в раствор (ϵ_{Cu} , %). Результаты приведены в табл. 1.

Для получения уравнения регрессии, т.е. математической модели эксперимента по азотно-кислородному выщелачиванию меди, при факторах X_1 – X_3 по формуле

$$B = \sum X_{ji} y_i / N,$$

где j — число факторов; i — число опытов; X — кодированное значение фактора (+1 или –1, см. табл. 1); y — опытное значение отклика; N — количество опытов в матрице, рассчитали коэффициенты B модели (табл. 2).

Таблица 1

Матрица трехфакторного эксперимента по азотно-кислородному выщелачиванию меди

План						Отклик
X_1	τ , мин	X_2	t , °C	X_3	C_{HNO_3} , М	ϵ_{Cu} , %
– 1	30	– 1	25	– 1	0,5	9,84
+ 1	180	– 1	25	– 1	0,5	11,20
– 1	30	+ 1	75	– 1	0,5	24,75
+ 1	180	+ 1	75	– 1	0,5	36,04
– 1	30	– 1	25	+ 1	4	51,23
+ 1	180	– 1	25	+ 1	4	68,16
– 1	30	+ 1	75	+ 1	4	91,64
+ 1	180	+ 1	75	+ 1	4	98,02

Таблица 2

Рассчитанные коэффициенты модели

B_0	B_1	B_2	B_3	B_{12}	B_{13}	B_{23}	B_{123}
48,854	4,796	13,546	28,354	0,104	1,296	4,046	–2,396

Математическая модель эксперимента по выщелачиванию меди растворами азотной кислоты с учетом влияния всех входных факторов (времени, температуры и концентрации реагента), а также их взаимодействия имеет следующий вид:

$$y = 48,854 + 4,796X_1 + 13,546X_2 + 28,354X_3 + 0,104X_1X_2 - 1,296X_1X_3 + 4,046X_2X_3 - 2,396X_1X_2X_3.$$

Расчетный критерий Фишера для матрицы экспериментов составил $F = 17,85$, а его табличное значение для заданного количества опытов в матрице ($N = 8$) и числа входных факторов ($j = 3$) равно $F_{\text{табл}} = 6,59$ [21, 22]. Поскольку $F > F_{\text{табл}}$, следовательно, найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна.

С помощью полученной математической модели были определены оптимальные параметры процесса азотно-кислородного выщелачивания меди: продолжительность процесса 150 мин, температура 75 °C и концентрация кислоты 4 М. При этом извлечение меди в раствор достигает ~98 %. Экспериментальное значение ϵ_{Cu} при указанных условиях составляет 97,85 %, т.е. практически совпадает с расчетными данными, полученными по математической модели.

Хотелось бы отметить, что фазовые изменения в составе объекта исследования, а именно, переход соединений меди в оксидные формы в ходе предварительной термической обработки, могут оказывать положительное влияние на последующее выщелачивание меди из электронных отходов. Для подтверждения этого предположения был проведен сравнительный анализ зависимости извлечения меди от концентрации HNO_3 для двух типов сырья — активированного термической обработкой и без предварительной ТО при выбранных оптимальных параметрах: $t = 75$ °C и $\tau = 150$ мин (рис. 5). Представленные графики зависимостей имеют S-образный характер. При этом наблюдается, что при низких концентрациях HNO_3 извлечение меди из сырья без ТО достигает только 20 %, в то время как степень извлечения меди из активированного сырья уже при $C_{\text{HNO}_3} = 2$ М поднимается до 40 %.

В целом анализ зависимости выщелачивания меди из электронных отходов без предварительной ТО показал, что для эффективного извлечения меди необходимы высококонцентрированные растворы HNO_3 . Процесс активного взаимодей-

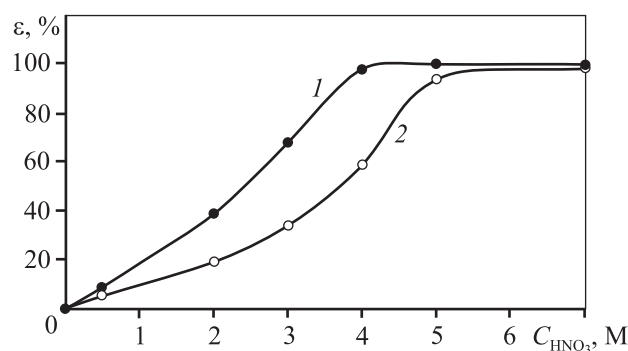


Рис. 5. Зависимости извлечения меди в раствор от концентрации азотной кислоты для двух типов измельченных электронных отходов
1 — материал после предварительной термической обработки, 2 — без ее использования

ствия частиц меди с кислотой начинается при ее концентрациях 4—5 М и стабилизируется при 6 М. Наряду с этим при выщелачивании ЭО, активированных термической обработкой, интенсивное взаимодействие частиц меди с азотной кислотой отмечается уже при ее концентрациях 3,0—3,5 М, далее при достижении максимального извлечения ~98 % кривая выходит на плато (см. рис. 5).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что интенсивное выщелачивание меди из электронных отходов, активированных термической обработкой, происходит при применении менее концентрированных растворов азотной кислоты. Благодаря предварительной ТО происходят фазовые изменения в составе объекта исследования, а именно, переход металлов в их оксидные формы, что положительно влияет на степень извлечения меди из электронных отходов при последующем кислотном выщелачивании.

Медьсодержащие растворы после стадии выщелачивания далее могут быть направлены на переработку известными способами, например цементацией, электролизом или экстракцией, для получения меди и попутно — серебросодержащих промышленных продуктов.

Заключение

Рассмотрен способ переработки электронных отходов, включающий предварительное измельчение и термическую обработку с последующим выщелачиванием в растворах азотной кислоты. Впервые приведены данные по комплексному термическому анализу измельченных ЭО. Установлено, что содержание органической фазы в со-

ставе объекта исследования колеблется в пределах 20—25 % от массы измельченных ЭО. Максимальная степень удаления органики и образование оксидных форм металлов наблюдается в интервале температур 400—450 °С. Получена математическая модель процесса выщелачивания ЭО азотной кислотой, с помощью которой найдены оптимальные параметры проведения процесса с максимальным извлечением меди в раствор 98 %. Экспериментально подтверждено положительное влияние термической обработки на процесс выщелачивания меди из электронных отходов.

Литература/References

1. Park Y.J., Fray D.J. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *J. Hazard. Mater.* 2009. No. 164. P. 1152—1158.
2. Shamsuddin M. Metal recovery from scrap and waste. *J. Metals.* 1986. No. 38. P. 24—31.
3. Cui J., Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *J. Hazard. Mater.* 2008. No. 158. P. 228—256.
4. Wong M.H., Wu S.C., Deng W.J., Yu X.Z., Luo Q., Leung A.O.W., Wong C.S.C., Luksemburg A.S., Wong A.S. Export of toxic chemicals — a review of the case of uncontrolled electronic waste recycling. *J. Environ. Pollut.* 2007. No. 149. P. 131—140.
5. Veit H.M., Bernardes A.M., Ferreira J.Z., Tenório J.A., de Fraga Malfatti C. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *J. Hazard. Mater.* 2006. No. 137. P. 1704—1709.
6. Anindya A. Minor elements distribution during the smelting of WEEE with copper scrap: PhD Thesis. Australia, Melbourne: RMIT University, 2012.
7. Dhawan N., Kumar M., Kumar V., Wadhwa M. Recovery of metals from electronic scrap by hydrometallurgical route. In: *Proc. Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (REWAS)* (Cancun, Mexico, 12—15 October 2008). P. 693—698.
8. Dhawan N., Kumar V., Kumar M. Recovery of metals from electronic scrap by hydrometallurgical route. In: *Extraction and Processing Division (EPD) Congress: The Minerals, Metals and Materials Society*. USA, Warrendale, 2009. P. 1107—1109.
9. Delfini M., Ferrini M., Manni A., Massacci P., Piga L., Scoppettuolo A. Optimization of precious metal recovery from waste electrical and electronic equipment boards. *J. Environ. Prot.* 2011. No. 2. P. 675—682.
10. Hagelüken C. Recycling of electronic scrap at Umicore's

- integrated metals smelter and refinery. *World Metall. — Erzmetall*. 2006. No. 59. P. 152—161.
11. *Lehner T.* Integrated recycling of non-ferrous metals at Boliden Ltd. Ronnskar smelter. In: *IEEE Int. Symp. on Electronics and Environment*. 1998. P. 42—47.
 12. *Park Y.J., Fray D.J.* Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *J. Hazard. Mater.* 2009. No. 164. P. 1152—1158.
 13. *Sheng P.P., Etsell T.H.* Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia. *Waste Manage. Res.* 2007. No. 25. P. 380—383.
 14. *Quinet P., Proost J., Van Lierde A.* Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. *Miner. Metall. Process.* 2005. No. 22. P. 17—22.
 15. *Kulandaisamy S., Prabhakar Rethinaraj J., Adaikkalam P., Srinivasan G.N., Raghavan M.* The aqueous recovery of gold from electronic scrap. *JOM*. 2003. No. 55. P. 35—37.
 16. *Macaskie L.E., Creamer N.J., Essa A.M.M., Brown N.L.* A new approach for the recovery of precious metals from solution and from leachates derived from electronic scrap. *Biotechnol. Bioeng.* 2003. No. 96. P. 631—639.
 17. *Моисеева Н.Г.* Исследование и разработка технологии комплексной переработки отходов электронной промышленности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва: МИСиС, 1997; *Moiseeva N.G.* Issledovanie i razrabotka tekhnologii kompleksnoi pererabotki otkhodov elektronnoi promyshlennosti [Research and development of technology of the complex waste processing of the electronic industry]: Abstr. Diss. of Cand. Sci. (Eng.). Moscow: MISIS, 1997.
 18. *Лолейт С.И.* Разработка экологически чистых технологий комплексного извлечения благородных и цветных металлов из электронного лома: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСиС, 2010; *Loleit S.I.* Razrabotka ekologicheski chistyykh tekhnologii kompleksnogo izvlecheniya blagorodnykh i tsvetnykh metallov iz elektronnoy loma [Development of environmentally friendly technologies of complex extraction of precious and non-ferrous metals from the electronic scrap]: Abstr. Diss. of Dr. Sci. (Eng.). Moscow: MISIS, 2010.
 19. *Колмакова А.А.* Физико-химические закономерности процессов вскрытия электронного лома, содержащего благородные металлы смесью азотной и серной кислот: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2004; *Kolmakova A.A.* Fiziko-khimicheskie zakonomernosti protsessov vskrytiya elektronnoy loma, soderzhashchego blagorodnye metally smes'yu azotnoi i sernoi kislot [Physicochemical regularities of the electronic scrap processing containing noble metals by a mixture of nitric and sulfuric acids]: Abstr. Diss. of Cand. Sci. (Eng.). Krasnoyarsk: State University of Non-ferrous metals and gold, 2004.
 20. *Fisher R.A.* The Design of experiments. New York: Hafner publishing company, 1971.
 21. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. школа, 1972; *Gmurman V.E.* Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1972.
 22. *Горский В.Г., Адлер Ю.П.* Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия, 1974; *Gorskii V.G., Adler Yu.P.* Planirovanie promyshlennykh eksperimentov [Planning of industrial experiments]. Moscow: Metallurgiya, 1974.