

B. С. КОГАН*, Г. О. РАЙХМАН

Компания AllTradeRecyclingLtd, research division, Петах Тиква, Израиль,
*Vladimir@atrecycling.com

ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ И ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ДОВОДКЕ ЭЛЕКТРОННОГО СКРАПА¹

В предлагаемой работе приведены результаты промышленного тестирования физико-механической обогатительной установки для переработки демонтированного электронного оборудования (ESRA-Recycling Plant), разработанной компанией UNTHA Recycling technik GmbH. В процессе утилизации отходов электронного оборудования изучено распределение ферромагнитных материалов, стали, алюминия, tantalа, меди, олова, благородных металлов (Au, Ag, Pd, Pt) и пластика. Показано, что представленная установка позволяет получать следующие товарные концентраты: железный концентрат с содержанием 84-92 % Fe при извлечении 78,6 %; алюминиевый концентрат с содержанием 86-89 % Al при извлечении 62,3 %; неметаллический продукт, содержащий различные сорта пластика – 86-91 % при извлечении 34,8 %; медный концентрат с содержанием 68-72 % Cu при извлечении 68,8 %; tantalовый продукт с содержанием 36 % Ta при извлечении 58,6 %. Также получен концентрат PCB (Personal Computer Boards) со средним составом, мас. %: 18-22 Cu; 1-3 Al; 5-6 Sn; 2-4 Ni; 1-3 Zn; 7-8 Fe; 1-3 Pb; 0,12-0,18 Ag; 0,012-0,016 Au; 0,004-0,006 Pd; 0,001-0,004 Pt. Остальное – пластик, керамика и резина. Изучена возможность гидрометаллургической доводки PCB концентрата с целью извлечения олова в дополнительный товарный продукт. В результате гидрометаллургической переработки извлечение олова в металлический порошок составило 89 % при содержании метапла в нем 97 %.

Ключевые слова: физико-механическая обогатительная установка, электронный скрап, измельчение, магнитная сепарация, Eddy Current сепарация, оптическая сепарация, гидрометаллургическая доводка.

Введение. В настоящее время производство электронного оборудования является одной из наиболее бурно развивающихся отраслей экономики развитых стран. Однако такое положение привело к увеличению объема соответствующих отходов, так называемых Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE) [1]. В связи с экологическими проблемами, возникшими в управлении WEEE, многие страны, в том числе и Израиль, разработали национальное законодательство для улучшения повторного использования, утилизации и других форм переработки таких отходов с целью сокращения их накопления. Комплексная переработка электронного скрапа является важным экономическим фактором не только как процесс обезвреживания отходов, но и как возможность дополнительного извлечения цветных и черных металлов (Al, Fe, Sn, Cu, Ta, RE (редкие земли), Co, Ni, In, Au,

Ag, Pd и Pt), так и неметаллических ценных компонентов (пластика). Электронный скрап является сложным многокомпонентным сырьем и требует для своей переработки нестандартного подхода и оригинального оборудования. В последнее время для утилизации демонтированного электронного оборудования предложены различные комбинированные технологические схемы, включающие как магнитные сепараторы [2], так и новые типы полисенсорных (электростатические [3] и Eddy Current [4] сепараторы) и оптических программируемых аппаратов [5]. При этом важно понять роль традиционной ручной сортировки в такой схеме.

Так, в процессе многочисленных предварительных анализов электронного скрапа различного происхождения нами было установлено, что такие широко распространенные потребительские электронные изделия, как сканеры, телеви-

¹Материалы статьи доложены на Международной научной конференции «Ресурсосберегающие технологии в обогащении руд и металлургии цветных металлов», г. Алматы, 14-17 сентября 2015 г.

зоры, цифровые телевизионные конвертеры, модемы, содержат не более 5-15 г/т золота и 2-6 % меди, поэтому ручная сортировка их экономически невыгодна. В этом случае более целесообразна прямая физико-механическая переработка электронного скрапа подобного типа. Персональные компьютеры, принтеры, факсы, ноутбуки, мобильные средства связи, кабинетные серверы, судя по содержанию в них благородных металлов (30-50 г/т золота, 200-500 г/т серебра, 10-15 г/т палладия) более выгодно подвергать предварительной разборке с извлечением печатных плат, блоков питания, жестких дисков, теплообменников, tantalовых конденсаторов и других ценных деталей. После ручной сортировки печатные платы рекомендуется подвергать механическому обогащению [6].

В предлагаемой работе приведены результаты промышленного тестирования физико-механической обогатительной установки для утилизации электронного скрапа (ESRA-Recycling Plant), разработанной компанией «UNTHA Recycling technik GmbH».

В процессе промышленного тестирования изучены исходный состав различных типов электронного скрапа и распределение железа, алюминия, меди, tantalа, олова и благородных металлов среди основных продуктов утилизации исходного сырья. Кроме того исследована возможность гидрометаллургической доводки основного конечного продукта – концентрата PCB (Personal Computer Boards) с целью извлечения олова в дополнительный товарный продукт.

Экспериментальная часть. Приборы и реагенты. Балансовые испытания комбинированной физико-механической схемы утилизации электронного скрапа на оборудовании производства компании «UNTHA Recycling technik GmbH» проводили на сырье, содержащем следующие электронные приборы: факсы, сканеры, принтеры, модемы, цифровые телевизионные конвертеры, TV-установки, ноутбуки, персональные компьютеры, мобильные средства связи и кабинетные серверы. Общий вид представленного сырья показан на рисунке 1.

Производительность промышленной обогатительной установки для комплексной физико-механической утилизации демонтированного электронного оборудования составляла 6 т исходного сырья в час. Общий вид установки и оптического сепаратора приведены соответственно на рисунках 2 и 3. Всего за время ис-

пытаний было переработано 120 т электронных отходов. Каждую партию сырья (10-12 т) перед загрузкой в питающий бункер дробильного отделения предварительно опробовали.



Рисунок 1 – Общий вид демонтированного электронного оборудования



Рисунок 2 – Промышленная установка компании «UNTHA Recycling technik GmbH»



Рисунок 3 – Оптический сепаратор компании «Titech Ltd»

Имеется достаточно много публикаций о методах опробования различных видов вторичного сырья, в том числе электронного скрапа [6, 7]. Учитывая особенности работы представленной промышленной установки, нами был использован метод детального опробования, основанный на предварительном выделении всех конечных концентратов из каждого из всех представленных типов электронных аппаратов (по одному экземпляру). Далее учитывали общее количество приборов этого типа в перерабатываемой партии и рассчитывали реальный состав каждой партии сырья. С этой целью один из приборов данного типа предварительно разбирали и сортировали с выделением деталей, содержащих металлические включения, и деталей только из пластмассы или резины. Особое внимание уделяли сортировке деталей, содержащих медь (кабели, трансформаторы, дроссели, микродвигатели и т. д.), алюминий (теплообменники и т. д.), железо, сталь, редкоземельные элементы (привод жесткого диска, LCD-мониторы), индий (блоки питания), Ni, Co, Li, Re и Pb, благородные металлы (материнские платы, memorycards, connectors). С материнских плат удаляли tantalовые и палладий-серебряные конденсаторы. Аналогичным образом поступали с конечными продуктами: железным концентратом, неметаллическим продуктом, алюминиевым концентратом, медным концентратом и концентратом PCB (Personal Computer Boards).

В ходе ручной сортировки в неочевидных случаях металлы определяли с помощью Handheld XRF scrap Analyzers Olympus (Olympus Corporation, USA) или с использованием сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM 5410 LM.

Фракции, содержащие благородные металлы, дополнительно измельчали с помощью лабораторной мельницы компании «Retch GmbH» до размеров частиц 0,5-1,0 мм. Измельченный материал последовательно разлагали: сначала в 8 М азотной кислоте при температуре 333 К для перевода в раствор меди, палладия и серебра, а затем остаток обрабатывали раствором царской водки при температуре 363 К для растворения золота и платины. Все используемые реагенты были производства компании «Fluka Israel» и соответствовали аналитической чистоте. Растворы готовили с использованием бидистиллированной воды. Концентрацию металлов в жидкой фазе измеряли спектрофотомет-

рически на приборе ISP-OES. Выход ценных составляющих исходного сырья в конечные продукты определяли по материальному балансу.

Результаты исследования и их обсуждение. Описание технологической схемы тестируемой установки. Физико-механическая технологическая схема включала следующие переделы:

- предварительную сортировку отдельных типов электронного оборудования, например, факсов, принтеров, кабинетных серверов, персональных компьютеров, мобильных средств связи и т. д. с удалением материнских плат, жестких дисков, мониторов, чернильных картриджей и аккумуляторов;
- первую стадию измельчения до среднего размера кусков 300-600 мм;
- промежуточную ручную сортировку с выделением в отдельные продукты: крупногабаритных деталей из нержавеющей стали и твердых сплавов, аккумуляторного скрапа, медного скрапа (трансформаторы, электродвигатели, кабель и т. д.) и фрагментов материнских плат;
- вторую стадию измельчения до размера частиц 8-20 мм;
- магнитную сепарацию с выделением ферромагнитных материалов, главным образом железного скрапа, в конечный продукт;
- гравитационную сепарацию для отделения легкой фракции, включающей пластик, керамику, резину и тонкие типы кабеля с размером частиц 0-8 мм и тяжелой фракции, содержащей в основном куски алюминия с включением частиц меди, медных сплавов и материнских плат;
- Eddy Current сепарацию (Titech Ltd separator) с выделением неметаллического скрапа (смесь различных сортов пластмассы, идущих на производство жидкого топлива) и металлоконтактную фракцию, в основном куски материнских плат, медного кабеля, трансформаторов из микросхем, мелких деталей из меди и медных сплавов с включением кусков пластика, нержавеющей стали и алюминия.

Характеристика отходов электронного оборудования, поступивших на тестирование, и конечных продуктов. В таблицах 1-7 приведены средний состав исходного электронного скрапа и результаты анализа полученных продуктов с выходом в них ценных металлов.

Основным технологическим недостатком этого материала является тот факт, что практически вся медь в нем находится в форме

Таблица 1- Характеристика отходов электронного оборудования

| Ценный компонент | Состав, мас. % |
|-------------------------|----------------|
| Медь | 6-8 |
| Алюминий | 2-8 |
| Железо | 20-35 |
| Нержавеющая сталь | 3-6 |
| Редкие земли | 0,0005-0,001 |
| Олово | 0,6-2,0 |
| Тантал | 0,03-0,05 |
| Серебро | 0,016-0,030 |
| Золото | 0,001-0,005 |
| Палладий | 0,0001-0,002 |
| Пластик, стекло, резина | 41-69 |

Таблица 2 – Состав продукта магнитной сепарации

| Ценный компонент | Состав, мас. % | Извлечение, % |
|------------------|----------------|---------------|
| Железо | 80-86 | 76-82 |
| Медь | 0,5-2 | 0,2-0,3 |
| Цинк | 3-8 | 38-56 |
| Алюминий | 0,2-0,5 | 0,05-0,1 |
| Золото | 0,001 < | 0,1 |
| Пластик | 10-12 | 3-5 |
| Керамика, резина | остальное | |

Таблица 3 – Состав легкой фракции гравитационной сепарации

| Ценный компонент | Состав, мас. % | Извлечение, % |
|-------------------------------|----------------|---------------|
| Медь | 7-8 | 2-3 |
| Алюминий | 8-10 | 3-5 |
| Олово | 0,3-0,6 | 0,8 |
| Железо (нержавеющая сталь) | 1-3 | 1-2 |
| Никель | 0,2-0,4 | - |
| Серебро | 0,003-0,005 | 0,8 |
| Золото | 0,001 | 2-4 |
| Пластик, керамика | 80-82 | 16-22 |

фрагментов телекоммуникационных проводов в пластиковой изоляции. Поэтому данный полупродукт был дополнительно переработан по комбинированной схеме, включающей доизмельчение материала на ножевой дробилке фирмы «Verdes», разделение меди и пластика на гравитационном столе и химическую доводку медного концентрата (очистка от алюминия). Результаты дополнительной переработки представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Состав медного концентрата после дополнительной сепарации и химической доводки

| Ценный компонент | Состав, мас. % | Извлечение, % |
|---------------------------|----------------|---------------|
| Медь | 74,52 | 2 |
| Никель | 5,23 | - |
| Железо | 18,6 | 1 |
| Серебро | 0,030 | 0,8 |
| Золото | 0,013 | 3 |
| Палладий | 0,002 | 2 |
| Алюминий | - | - |
| Пластик, керамика, резина | 1,6 | 1,8 |

Доведенный медный концентрат присоединяли к продуктам, направляемым на рафинировочное предприятие. Такой алюминиевый продукт пользуется спросом на рынке и может считаться товарным.

Таблица 5 – Состав алюминиевого концентрата после основной гравитационной сепарации

| Ценный компонент | Состав, мас. % | Извлечение, % |
|-------------------|----------------|---------------|
| Алюминий | 79,46 | 62,8 |
| PCB | 9,20 | 12,4 |
| Нержавеющая сталь | 2,88 | 2,6 |
| Медь | 6,57 | 4,7 |
| Пластик, резина | 1,89 | 1,6 |

Таблица 6 – Состав неметаллического продукта

| Ценный компонент | Состав, мас. % | Извлечение, % |
|-------------------|----------------|---------------|
| Пластик | 89,6 | 68-72 |
| Алюминий | 1,68 | 3-8 |
| PCB | 6,12 | 3-8 |
| Нержавеющая сталь | 1,34 | 1-3 |
| Медь | 1,23 | 1-3 |

Данный продукт не подвергали дополнительной доводке с целью очистки от металлов, поскольку материал такого состава используется некоторыми израильскими компаниями для производства вторичного жидкого топлива.

Полученный концентрат является полупродуктом и в дальнейшем направлялся на доводку с помощью оптического сепаратора. Кроме того, как было описано выше, в качестве полупродуктов были получены:

Таблица 7 – Состав PCB концентратов после Eddy Current сепарации

| Ценный компонент | Состав, мас. % | Извлечение, % |
|--|----------------|---------------|
| PCB (фрагменты материнских плат) | 51-62 | 76-82 |
| Алюминий | 6-8 | 15-25 |
| Медь (в форме фрагментов кабелей, трансформаторов и т.д.) | 6-9 | 20-32 |
| Нержавеющая сталь | 19-22 | 35-42 |
| Пластик (фрагменты, не содержащие и содержащие включения металлов) | 19-24 | 6-9 |

– аккумуляторный скрап, содержащий отработанные никель-металгидридные (42 % Ni, 5 % Co и 2-8 % редкоземельных элементов), литий-ион (20 % Co, 5-12 % Li) и сухие свинцовые аккумуляторы;

- LCD-мониторы (0,6 % In);
- пакеты с жестким диском (серебро, золото, редкоземельные элементы с магнитными свойствами, главным образом, неодим). Выше перечисленные полу продукты имели ограниченный выход, сложный состав, и на данном этапе работы при балансовых расчетах не учитывались.

Доводка PCB полупродукта на оптическом сепараторе. С целью повышения качества PCB полупродукта его подвергали дополнительной очистке от пластика и нержавеющей стали на оптическом сепараторе системы Combisense компании «Titech Ltd». Для этого сепаратор снабжен электромагнитными сенсорами, цветочувствительными линейными камерами (colorline-cameras) и соответствующим программным обеспечением. Оптический сепаратор способен разделять поступающие по питанию транспортеру частицы скрапа размером 8-20 мм по таким признакам, как металл-неметалл, по цвету и различной магнитной восприимчивости. В дальнейшем исходный PCB полупродукт последовательно сепарировали с использованием трех программ: Non-metal out, Stainless steel out и PCB and Copper out. Первая программа должна была очистить полу продукт от частиц, не содержащих металлы, по второй программе выделяли фрагменты из нержавеющей стали, по третьей программе сепарировали фрагменты PCB и медьсодержащих деталей.

После трех стадий сепарации был получен конечный концентрат PCB и меди следующего состава, мас. %: 18-22 Cu; 1-3 Al; 3-6 Sn; 2-4 Ni; 1-3 Zn; 6-8 Fe; 1-3 Pb; 0,08-0,14 Ag; 0,012-0,018 Au; 0,004-0,006 Pd; 0,001-0,002 Pt; остальное – пластик, керамика и резина. В данном случае надо принять в расчет, что фрагменты материнских плат содержат 42-48 % пластика, керамики и резины. Следует отметить, что из-за ошибок с оптической идентификацией фрагментов материнских плат и пластика с включением металлических деталей с покрытием из благородных металлов, на стадии оптической сепарации происходят заметные потери золота и серебра с фрагментами свободного пластика. Обычно это происходит, если металлическое включение находится только с одной стороны фрагмента, который подходит к телевизионной камере противоположной стороной, и в этом случае камера металла не видит. При сепарации нержавеющей стали некоторые фрагменты содержали как включения с покрытием из благородных металлов, так и легированной стали, что также приводило к потерям. Кроме того, на практике не реализуется демонстрационная производительность сепаратора (6 т/ч), поскольку периодически необходимо его останавливать и проводить очистку рабочего поля камеры от пыли и мелких фрагментов скрапа. В таблице 8 приведены сводные результаты тестовых испытаний.

Таблица 8 – Сводные результаты тестовых испытаний

| Наименование продукта | Вес, т | Содержание целевого компонента, мас. % | Извлечение, % |
|---|--------|--|---------------|
| Железный концентрат (магнитная фракция) | 42,4 | 84-92 | 78,6 |
| Медный концентрат (включая медный продукт ручной сортировки и медный концентрат доводки легкой фракции) | 68-72 | 9,4 | 68,8 |
| Алюминиевый концентрат | 5,1 | 86-89 | 62,3 |
| Пластмассовый продукт | 44,6 | 86-91 | |
| PCB-концентрат | 12,4 | 72-75 | 77,8 |
| Нержавеющая сталь (скрап) | 8,5 | 68-72 | 74,3 |

Таблица 9 – Распределение серебра, золота и тантала

| Наименование продукта | Вес, т | Содержание, вес. % | | | Извлечение, % | | |
|-----------------------|--------|--------------------|--------|------|---------------|-------|------|
| | | Ag | Au | Ta | Ag | Au | Ta |
| Железный скрап | 42,40 | 0,0001 | - | - | 0,17 | - | - |
| Медный скрап | 9,40 | 0,018 | 0,008 | - | 7,20 | 22,97 | - |
| Алюминиевый скрап | 5,10 | - | - | - | - | - | - |
| Пластмассовый скрап | 44,60 | 0,008 | 0,0008 | - | 14,87 | 9,91 | - |
| PCB-концентрат | 12,40 | 0,12 | 0,016 | 0,2 | 62,60 | 55,11 | 21,3 |
| Танталовый концентрат | 0,078 | 1,56 | - | 36,0 | 5,07 | - | 58,6 |

Наряду с основными продуктами, полученными главным образом механическим путем, в процессе ручной сортировки был выделен также танталовый концентрат. В таблице 9 представлены результаты распределения серебра, золота и тантала по основным продуктам переработки исходного электронного скрапа.

Как видно из представленных данных, суммарное извлечение серебра и золота в продукты, направляемые на рафинирование, составило 69,8 и 78,08 % соответственно. В результате балансовые испытания выявили основные причины потерь благородных металлов и показали направления для совершенствования технологии. Конечный PCB концентрат, содержащий медь и благородные металлы, направляли на гидрометаллургический передел с целью дополнительного извлечения другого ценного элемента – олова.

Гидрометаллургическое извлечение олова. Извлечения олова из PCB-концентрата проводили путем его выщелачивания сульфатно-хлоридным раствором, содержащим 4,0 моль/дм³ H₂SO₄ и 3,2 моль/дм³ KCl при температуре 363 К, отношении фаз жидкость:твердое = 5:1 и продолжительности обработки – 3,5 ч. Из продуктивного раствора олово извлекали путем жидкостной экстракции с использованием 0,6 моль/дм³ раствора Cyanex 923 в Solvesso 100. В качестве реэкстрагента использовали 2,5 моль/дм³ раствор NaOH. Металлическое олово получали электрохимическим путем. Подробно представленная технология гидрометаллургической доводки PCB концентрата описана нами ранее [9]. В этих исследованиях исходный материал предварительно измельчали до крупности 0,5-1 мм. В настоящей работе проверена возможность выщелачивания олова из концентрата без дополнительного измельчения при размере частиц 8-20 мм. В результате гидрометаллургической переработки извлечение олова в металлический порошок составило 89 % при содержании металла в нем 97 %.

Выводы. Исходный электронный скрап содержит коммерчески значимые количества ценных составляющих, таких как цветные и черные металлы, в числе которых железо, нержавеющая сталь, медь, алюминий, редкие земли, тантал, никель, кобальт, индий, серебро, золото, палладий и платина, а также органические полимеры, в основном пластмассы.

Промышленная установка по физико-механической переработке демонтированного электронного оборудования (ESRA-Recycling Plant), разработанная компанией «UNTHA Recycling technik GmbH», позволяет выделить основные ценные компоненты сырья в товарные концентраты.

В процессе тестирования промышленной установки было утилизировано 120 т электронного скрапа с производством:

- 42,4 т железного концентрата с содержанием 84-92 % Fe при сквозном извлечении 78,6 %;
- 9,4 т медного концентрата с содержанием 68-72 % Cu при сквозном извлечении 68,8 %;
- 5,1 т алюминиевого концентрата с содержанием 86-89 % Al при сквозном извлечении 62,3 %;
- 44,6 т пластмассового концентрата с содержанием пластмассы 86-91 % при извлечении 34,8 %;
- 12,4 т PCB концентрата с содержанием 72-75 % PCB и 18-22 % Cu при сквозном извлечении PCB 77,8 %;
- 8,5 т нержавеющей стали с содержанием металла 68-72 % при сквозном извлечении 74,3 %;
- 0,26 т танталового концентрата с содержанием 36 % Ta при извлечении 78,7 %.

В процессе физико-механической переработки электронного скрапа удалось сконцентрировать основное количество благородных металлов (92,7 % серебра и 98,8 % золота) в продуктах, направляемых на рафинировочное предприятие.

С использованием гидрометаллургической технологии из PCB концентрата возможно дополнительно извлечь олово в товарный продукт с содержанием 97 % Sn при извлечении 89 %.

ЛИТЕРАТУРА

1 Yla-Mell J., Pongraez E., Kerski R. Recovery of WEEE in Finland // Waste Minimization and Recourses Use optimization: Proceedings of the Conf., Oulu, Finland, 2004. – P. 83-92.

2 Stuart J.A., Lu Q., A model for discrete processing decisions for bulk recycling of electronic equipment // IEEE Trans. Electron Packaging Manuf. – 2000. – 23. – P. 200-314.

3 Williams J.A.S., A review of electronics remanufacturing process // Resources, Conservation and Recycling. – 2006. – 47. – P. 195-208.

4 Hischier R., Wager P., Gauglhofer J. The environmental impacts of the Swiss take-back and Recycling systems for waste electrical and electronical equipment // Environmental Impact Assessment Review. – 2005. – 25. – P. 525-539.

5 Jia Li, Hongzhou Lu, Jie Gue, Zhenning Xia and Yaohe Zhou Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards // Environmental Science and Technology. – 2007. – 41(6). – P. 1995-2000.

6 Spengler T., Ploog M., Schroter M. Integrated Planning of acquisition, disassembly and bulk recycling: a case study on electronic scrap recovery // OR Spectrum. – 2003. – 25. – P. 413-442.

7 Разумов В.А., Калмыков Ю.М., Душкова Т.М. Погрешности опробования и анализа проб при сертификации партий вторичного сырья // Заводская лаборатория. – 1997. – 63, № 6. – С. 1-9.

8 Rasemain W. Risiko der Bestimmung von Metallgehalten in Electronikschrött // Schutgut. – 2006. – Vol. 12, № 3. – P. 170-179.

9 Коган В.С. Райхман Г.О. Выделение олова (IV) из кислых хлоридных растворов с помощью Alamine 336 и Cyanex 923 // Комплексное использование минерального сырья. – 2014. – № 4. – С. 1-12.

REFERENCES

1 Yla-Mell J., Pongraez E., Kerski R. Recovery of WEEE in Finland. Waste Minimization and Recourses Use optimization: Proceedings of the Conf., Oulu, Finland, 2004. 83-92 (in Eng.).

es Use optimization: Proceedings of the Conf. Oulu, Finland, 2004. 83-92 (in Eng.).

2 Stuart J.A., Lu Q., A model for discrete processing decisions for bulk recycling of electronic equipment. *IEEE Trans. Electron Packaging Manuf.* 2000. 23. 200-314 (in Eng.).

3 Williams J.A.S., A review of electronics manufacturing process. *Resources, Conservation and Recycling*. 2006. 47. 195-208 (in Eng.).

4 Hischier R., Wager P., Gauglhofer J. The environmental impacts of the Swiss take-back and Recycling systems for waste electrical and electronical equipment. *Environmental Impact Assessment Review*. 2005. 25. 525-539 (in Eng.).

5 Jia Li, Hongzhou Lu, Jie Gue, Zhenning Xia and Yaohe Zhou Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards. *Environmental Science and Technology*. 2007. 41(6). 1995-2000 (in Eng.).

6 Spengler T., Ploog M., Schroter M. Integrated Planning of acquisition, disassembly and bulk recycling: a case study on electronic scrap recovery. *OR Spectrum*. 2003. 25. 413-442 (in Eng.).

7 Razumov V.A., Kalmykov Yu.M., Dushkova T.M. *Pogreshnosti oprobovaniya i analiza prob pri sertifikatsii partij vtorichnogo syrya* (Error of testing and analysis samples at certification of secondary raw materials). *Zavodskaya laboratoriya = Factory laboratory*. 1997. 63, 6. 1-9 (in Russ.).

8 Rasemain W. Risiko der Bestimmung von Metallgehalten in Electronikschrött. *Schutgut*, 2006. 12. 3. 170-179 (in Germ.).

9 Kogan V. S. Rajkhman G.O. *Vydelenie olova(IV) iz kislykh khloridnykh rastvorov s pomoshch'yu Alamine 336 i Cyanex 923* (Separation of tin from acid chloride solutions by Alamine 336 and Cyanex 923). *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syrya = Complex Use of Mineral Resources*. 2014. 4. 1-12 (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Ұсынылып отырған жұмыста UNTHA Recycling technik GmbH компаниясының бөлшектенген (демонтаждалған) (ESRA-Recycling Plant) электрондық құрал-жабдығының қайта өндеу үшін пайдаланылған физика-механикалық байыту қондырығысын өнеркәсіптік тестілеу қорытындылары келтірілген. Электрондық құрал-жабдықтың қалдықтарын кедеге жарату үрдісінде ферро-магниттік материалдардың, болаттың, алюминийдің, танталдың, мыстың, қалайының, асыл металдардың (алтын, күміс, палладий, платина) және пластиктің үлестірімдері зерттелді. Келтірілген қондырығы келесі тауарлы концентраттарды алуға мүмкіндік береді: бөліну дәрежесі 78,6 % құрамында 84-92 % Fe бар темір концентраты, бөліну дәрежесі 62,3 % құрамында 86-89 % Al бар алюминий концентраты, бөліну дәрежесі 34,8 % құрамы 86-91 % магниттелеңген өнім ретінде өртүрлі пластик сорттары, бөліну дәрежесі 68,8 % құрамында 68-72 % мыс бар мыс концентраты, бөліну дәрежесі 58,6 % құрамында 36 % Ta бар танталдың өнім, орташа құрамы салмақтың % бойынша: 18-22 Cu, 1-3 Al, 5-6 Sn, 2-4 Ni, 1-3 Zn, 7-8 Fe, 1-3 Pb, 0,12-0,18 Ag, 0,012-0,016 Au, 0,004-0,006 Pd, 0,001-0,004 Pt тұратын PCB (Personal Computer Boards) концентраты. Қаландары – пластик, керамика және резенке. Қалайыны қосымша тауарлы өнімге бөліп алу мақсатында осы концентратты гидрометаллургиялық сапаландыру мүмкіндігі зерттелді. Гидрометаллургиялық өндеу нәтижесінде құрамындағы металдың мөлшері 97 % болғанда қалайының металдық ұнтаққа бөліну дәрежесі 89 % құрады.

Түйінді сөздер: физика-механикалық байыту қондырығысы, электрондық жиынды, ұнтақтау, магниттік бөлу, Eddy Current separation, оптикалық бөлу, гидрометаллургиялық сапаландыру.

SUMMARY

The paper presents the results of industrial testing of physical-mechanical enrichment plant for recycling dismantled electronic equipment (ESRA-Recycling Plant), developed by UNTHA Recycling technik GmbH. In the process of waste electronic equipment disposal the distribution of the ferromagnetic materials, steel, aluminum, tantalum, copper, tin, precious metals (gold, silver, palladium, platinum) and plastic was studied. It is shown that the presented installation produces the following marketable products: iron concentrate, containing 84-92 % Fe at extracting 78.6 %, aluminum concentrate, containing 86-89 % Al at extracting 62.3 %, the non-metal concentrate, containing various grades of plastic with content of 86-91 % polymers, at extracting 34.8 %, copper concentrate containing 68-72 % Cu, at extracting 68.8 %, tantalum product having 36 % Ta at extracting 58.6 %, PCB (Personal Computer Boards) concentrate with the average composition, mass. %: 18-22 Cu; 1-3 Al; 5-6 Sn; 2-4 Ni; 1-3 Zn; 7-8 Fe; 1-3 Pb; 0,12-0,18 Ag; 0,012-0,016 Au; 0,004-0,006 Pd; 0,001-0,004 Pt; rest – plastic, ceramic and rubber. Hydrometallurgical treatment of PCB's concentrate was studied in order to tin recovery into additional marketable product. As a result of hydrometallurgical processing, tin recovery in the form of metal powder was 89% with content 97 % of Sn.

Key words: physical and mechanical enrichment plant, electronic scrap, shredding, magnetic separation, Eddy Current separation, optical separation, hydrometallurgical processing.

Поступила 25.08.2015