

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЛОМА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ И ПРОДУКТОВ ИХ РАЗДЕЛКИ

Запорожская государственная инженерная академия

Розглянуто технологічні прийоми переробки лому та відходів радіоелектронної апаратури з витяганням благородних металів

Рассмотрены технологические приемы переработки лома и отходов радиоэлектронной аппаратуры с извлечением благородных металлов.

Во всем мире дорожают добыча руд и получение из них цветных металлов, особенно благородных (драгоценных). К основным причинам этой тенденции относятся:

- уменьшение запасов богатых руд и увеличение расходов на их переработку;
- увеличение внимания к стабилизации и контролю цен на сырьевые ресурсы, как в национальном, так и в международном масштабе;
- необходимость обходиться собственными источниками сырья, особенно стратегическими;
- выполнение национальных и международных требований по охране окружающей среды, из-за чего переработка и захоронение отходов становятся все более сложными и дорогими;
- быстрый рост цен на сырье и энергию, что делает повторное использование отработанных продуктов эффективнее, чем переработка первичного сырья.

Металлургия вторичных драгоценных металлов (ДМ) является самостоятельной отраслью, но широко использует теоретический и практический опыт предприятий первичной металлургии, касающийся отбора и подготовки проб, различных подготовительных, обогатительных и плавильных процессов, методов очистки стоков, газовых выбросов и др. Спецификой металлургии вторичных ДМ является многообразие физических форм и химических составов отходов, содержащих эти металлы. Вторичные ДМ могут образовываться как отходы переработки или производственный брак, а также как изделия, которые потеряли эксплуатационную ценность. Лом и отходы ДМ и их сплавов стандартизованы и подразделяются по наименованиям металлов, физическим признакам, химическому составу и показателям качества [1].

Основными поставщиками вторичных ДМ является цветная металлургия, приборостроительная и электронная отрасли промышленности. В большинстве случаев отходы содержат больше металлов, чем руды, из которых добываются первичное золото, серебро, платина, и поэтому их выгодно перерабатывать, так как использование ценных компонентов, извлеченных из них, рентабельно вследствие их высокой стоимости. Использование вторичного сырья в мировом производстве металлов неуклонно растет. В ряде промышленно развитых стран производство вторичных цветных металлов (ЦМ) составляет 30...40 % от общего объема производства металлургической промышленности [2]. По оценкам, в США из вторичного сырья производят около 20 % золота и до 30 % серебра, в Европе этот показатель еще выше.

Сбор и переработка сырья, содержащего ДМ, является приоритетным направлением: содержание этих металлов во вторичном сырье значительно выше, чем в природном, они высоко ценятся и имеют постоянно высокую ликвидность на рынке. Так как себестоимость производства ДМ из вторичного сырья в 6...10 раз ниже, чем из первичного, то

накопленные запасы сырья, особенно военно-промышленного лома, делают его важным источником благородных металлов.

В последнее время большое значение приобретает переработка вторичного сырья, бедного по содержанию металлов. Для производства ДМ все более используется многокомпонентный лом, к которому относятся лом военно-технических средств; электронно-вычислительная и электрическая аппаратура, брак и отходы электротехнической, электронной, автомобильной и машиностроительной промышленности.

Лом и отходы продукции радиоэлектронных и электротехнических отраслей промышленности – богатый источник вторичных ЦМ и ДМ. Особенная ценность электронного и электротехнического лома заключается в том, что это постоянно возобновляемый источник вторичного сырья, так как техника быстро устаревает и подлежит демонтажу и переработке. До недавнего времени доминирующая роль в ломе электроники принадлежала золоту. Традиционные платы содержат 0,05...0,09 мас. % золота. Основные металлы составляют 40 % от общей массы отходов и представлены медью (50 %), железом (20 %), оловом (10 %), никелем, свинцом и алюминием (по 5 % каждого) и цинком (3 %). В одной тонне электронного лома содержится около 1,8 кг серебра, 930 г золота и 45 г палладия [2]. Многокомпонентный электронный лом не может направляться в плавку без предшествующей первичной обработки с целью выделения отдельных (или группы) компонентов.

Технология комплексной переработки такого лома обычно включает демонтаж и предварительную сортировку элементов аппаратуры, измельчение и сепарацию лома, получение чистых металлов и других продуктов или использование полученного вторичного сырья в качестве добавок к первичному сырью. Многокомпонентные отходы можно разделить на три группы по способности к обогащению:

- легко сепарируются (микросхемы, транзисторы и т.п., которые покрыты золотом, палладием или серебром);
- трудно сепарируются (лом электронной продукции);
- вовсе не сепарируются (металлы, сплавы ЦМ).

Первичная обработка многокомпонентного лома обычно заключается в его фрагментации, дроблении, измельчении, которые обеспечивают разделение металлов и неметаллических компонентов с получением механической смеси.

Лом электронной продукции представляет собой смесь различных металлов, в частности, меди, алюминия, стали, соединенных, покрытых и смешанных с различными видами пластика или керамики. Эта смесь разнородна, благородные металлы обычно присутствуют в ней в виде покрытий различной толщины, припоев и, в небольших количествах, в виде компонентов сплавов. ДМ часто используются в контактах телефонных и прочих реле, язычковых переключателях, кромочных покрытиях и различных печатных схемах компьютеров.

Известны четыре основных способа переработки электронного лома:

- механический;
- гидрометаллургический;
- механический в сочетании с гидрометаллургической переработкой;
- механический в сочетании с пиро- и гидрометаллургическими процессами.

На практике применяются технологии переработки, как смешанного лома, так и его отдельных узлов (печатных плат) и элементов (полупроводниковых приборов). Наиболее широкую известность получили технологии фирм стран Западной Европы: Германии, Франции, Швеции, Швейцарии и др.

Общим в применяемых технологиях является:

- переработка смешанного лома с обязательной механической разделкой;
- обогащение лома с помощью процессов многостадийного дробления и сепарации полученных продуктов в гидроциклонах и методами флотации;
- пирометаллургическая переработка или электролитические методы.

Анализ технико-экономических данных этих фирм показывает, что рентабельность всех технологий обеспечивается за счет получения дорогих чистых ЦМ и БМ. Для обеспечения стабильности сырья рекомендуется на одном предприятии перерабатывать смешанный промышленный и бытовой, электронный и электротехнический лом. При разборке радиоэлектронной аппаратуры из нее извлекают платы с навесными радиодеталями. Крупные радиодетали (трансформаторы, дроссели, катушки индуктивности, конденсаторы, транзисторы, реле, переключатели и другое) удаляют с применением ручного и механизированного инструмента. Мелкие радиодетали (диоды, транзисторы, микросхемы, резисторы и другие) удаляют с применением пневмомолотков с плоскими зубилами. Платы без радиодеталей, содержащие в отверстиях плат остатки впаянных «ножек» радиодеталей, покрытых драгоценными металлами, и токопроводящие луженые медные дорожки в настоящее время утилизируются с недостаточной эффективностью или, в основном, вывозятся на свалку (ООО «Драгинвест», ГП «Прогресс»).

В большинстве случаев платы без радиодеталей содержат небольшие количества ДМ, однако их ценность как вторичного сырья определяется значительным содержанием в них меди и оловянно-свинцового припоя [2,3]. По своему агрегатному состоянию разделанные платы не могут направляться на пирометаллургический передел без предварительных подготовительных операций.

Извлечение ДМ из радиоэлектронного лома с использованием гидрометаллургических процессов можно условно разделить на две стадии. На первой происходит вскрытие продукта в водном растворе с применением минеральных и органических реагентов. При этом, в зависимости от состава материала и применяемых реагентов, возможно либо селективное отделение ДМ от ЦМ, либо полный перевод всех компонентов в раствор. В варианте селективного отделения возможен перевод в раствор либо благородной, либо неблагородной части. На второй стадии происходит извлечение ценных компонентов из раствора.

Во вторичной пирометаллургии благородных металлов используют такие процессы как коллектирующая плавка и окислительное рафинирование [2]. В практике переработки отходов одно из ведущих мест продолжают занимать термические способы с возможным предварительным механическим обогащением сырья. В большинстве способов переработки радиоэлектронного лома применяют плавку с флюсами и компонентами, коллектирующими благородные металлы. В качестве коллекторов используют индивидуальные металлы (свинец, медь, железо, алюминий) или сплавы (медь-серебро и др.).

Коллектор выбирают по следующим признакам:

- высокая растворимость благородных металлов;
- максимальное извлечение ДМ в металл-коллектор при низком остаточном содержании благородных металлов в шлаке.

На сегодняшний день лидером переработки радиоэлектронного лома в Украине является ОАО «Днепр-ВДМ» (г. Днепропетровск). На предприятии применяют технологию, позволяющую извлекать ЦМ и ДМ из стекловидных печатных плат с навесными радиодеталями [4]. Технологический процесс включает в себя ручную

дифференцированную разделку, механическое дробление и гравитационное обогащение концентратов, металлургический передел и гидрометаллургическую переработку.

Ручная разделка предусматривает разборку блоков, узлов, изделий с максимальным использованием инструмента (пневмозубила, угловые плоскошлифовальные машины, пневмокусачки, дисковые ножницы, минигильотины и т.д.). Производительность 150...200 кг·чел/смену. В результате разделки получают концентраты А: А1 – печатные платы с навесным монтажом; А2 – трансформаторы (медь, железо, органика); А3 – разъемы (пластмасса, ДМ); А4 – класс Г (смесь и недоразделанные блоки).

Механическая разделка концентратов А заключается в следующем.

А1 – с печатных плат с помощью пневмозубил, пневмокусачек и т.д. удаляют навесной монтаж; ДМ-содержащие концентраты после сортировки направляют на гидрометаллургический передел.

А2 – трансформаторы подвергают обжигу в обжиговой печи, дроблению в молотковой дробилке, магнитной сепарации, воздушной сепарации. В результате получают: магнитную фракцию (железо), немагнитную фракцию (медь); оксиды железа, меди и углеродсодержащие компоненты.

А3 – разъемы, содержащие ДМ, подвергают измельчению в молотковой или ножевой дробилках, грохочению, магнитной сепарации для удаления железа. Немагнитный концентрат: медь (латунь), покрытие *Ag*, *Au*, *Pd* – направляют на гидрометаллургический передел.

Текстолитовую (стеклотекстолитовую) подложку, содержащую медь, свинец, олово с остатками ДМ направляют на обжиг в обжиговую печь с системой дожигания и газоочистки. Полученный огарок направляют на плавку в роторную газокислородную печь с окислительной атмосферой с получением черновой меди (97...98 % меди; по 0,001 % серебра и золота; по 0,0001% платины и палладия) и шлака.

Черновую медь разливают в аноды, которые подвергают электролитическому рафинированию, а шлак – восстановительной плавке в печи ДСП-1,5 с получением металлического концентрата (извлечение 4...5 %) и третичного (отвального) шлака, содержащего около 1,5 % меди.

Отметим особенности других технологий по переработке электронного лома. Фирма «*Schneck*» (ФРГ) применяет охлаждение жидким азотом лома, предварительно измельченного и подвергнутого магнитной сепарации, для увеличения хрупкости [4].

В американской технологии на установке PRV (рис. 1) используют молотковую дробилку (на двух стадиях), воздушный сепаратор «*Bauer*», магнитный сепаратор «*Eriez*», грохот, валковую дробилку «*Echolon*» (для измельчения надрешетного продукта немагнитной фракции) и электродинамический сепаратор, который работает на принципе вихревых токов в слабом поле (выделение железа) и в сильном поле (выделения латуни, бронзы).

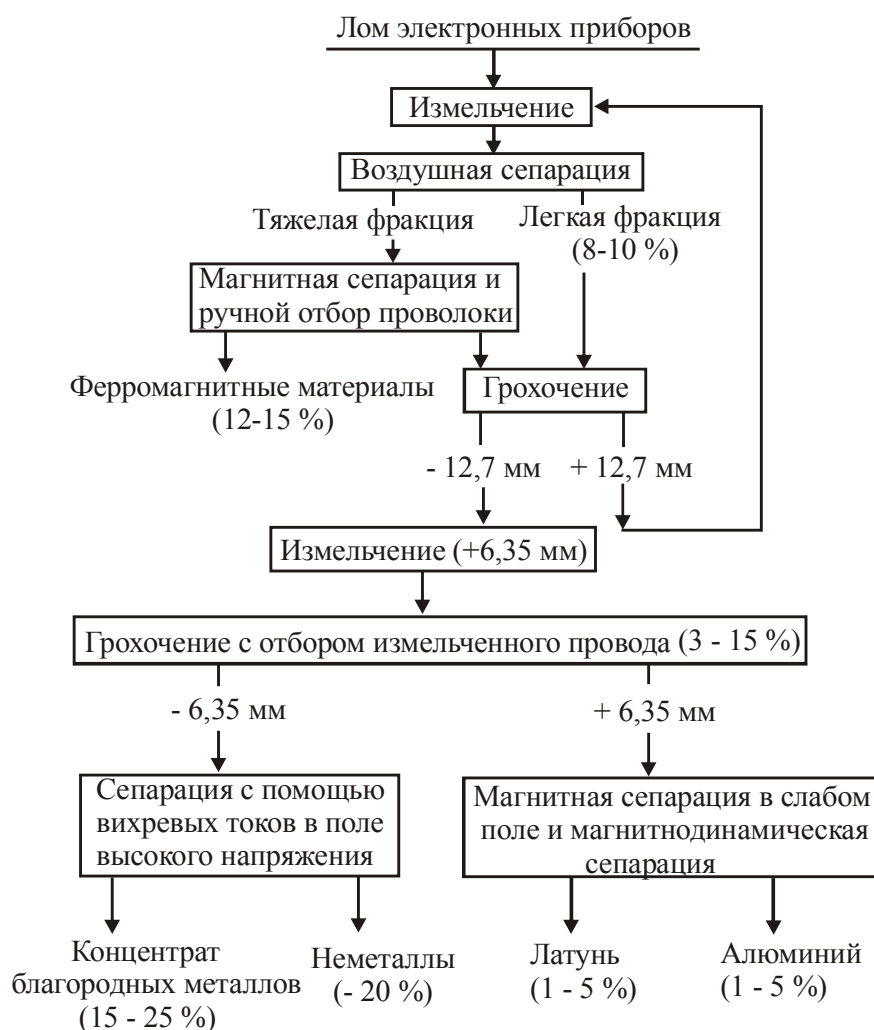


Рисунок 1 – Технологическая схема переработки электронного лома с грохочением

Также широко используют методы сепарации в разных средах, характерных для обогащения руд ЦМ, в технологиях, разработанных ДонНИПИЦМ (Украина) для переработки таких видов лома, как печатные платы, электронно-вакуумные приборы, элементы СВЧ техники, специальная аппаратура и ее элементы. Одна из технологических схем (рис. 2) позволяет комплексно перерабатывать сырье с получением концентратов для извлечения чистых металлов на последующих технологических этапах.

Технология фирмы «Valmet» (Франция) в результате механической переработки предусматривает разделение лома на три фракции: черные металлы, цветные и благородные металлы, неметаллы. Для разделения цветных и благородных металлов применяют электролитическое рафинирование.

В фирме «Inter Recycling» (США) разработана и изготовлена экспериментальная установка для дробления и сепарации предварительно разобранный вручную компьютерного лома. Из лома выделяют медь, никель и алюминий. Вместе с медью выделяются благородные металлы: золото, платина, палладий. Производительность пилотной установки составляет 5 т в смену.

В технологическом процессе фирмы «Tekony Sanso» (Япония) большое внимание уделяют процессу дробления, которое определяет эффективность и качество технологии. Фирмой изготовлено оборудование для получения чистых материалов из концентратов первичной переработки лома (металл, пластмасса, резина) на основе процесса высокой очистки с повторным циклом.

Процесс фирмы «*W.Hunter and Assiates Ltd*» отличается применением мокрого обогащения на концентрационных столах, которое направлено на еще большее обогащение фракции, содержащей благородные металлы. В конце технологического процесса используется электролиз с целью выделения золота из металлических материалов [4].

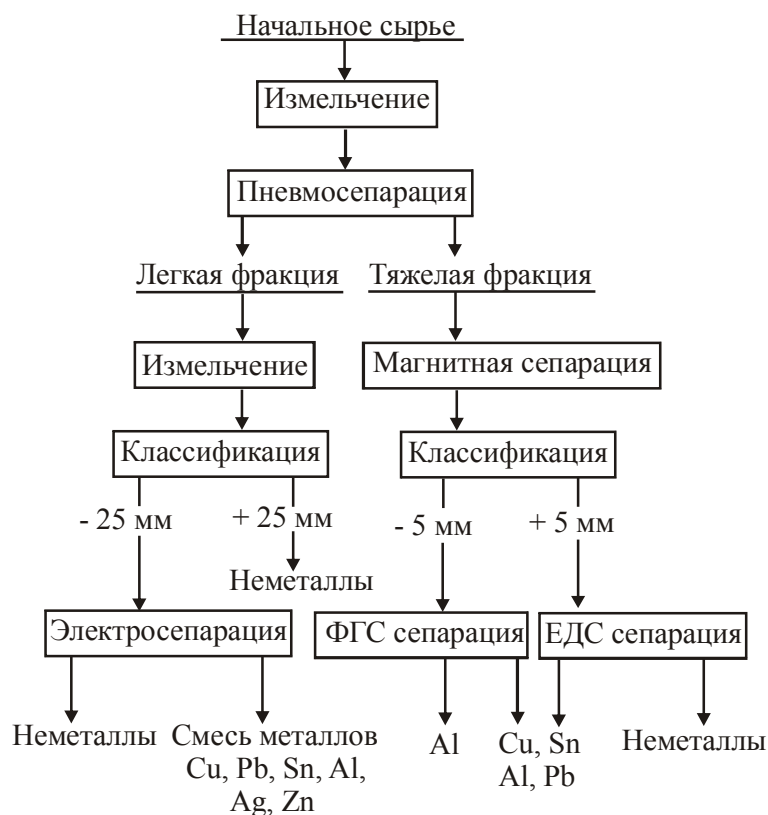


Рисунок 2 – Технологическая схема переработки электронного лома ДонНИПИЦМ

Фирма «*VEB*» осуществляет переработку печатных плат измельчением их в шаровой мельнице до -1 мм, классификацию полученных фракций и разделение металлов и неметаллов, электростатическую сепарацию.

Предлагается также отдельная регенерация печатных плат, проводников и сопротивлений. Для этого платы микросхем с покрытием подвергают комбинированным процессам растворения, промывки, сушки и обжига.

Способы извлечения золота из печатных плат с применением оловянного покрытия сводятся к обработке лома в растворе из смеси серной, азотной и соляной кислот. В результате получают концентрат, который состоит из хлопьев золота и маскировочного покрытия.

По технологии фирмы «*Galika*» (Швейцария) лом, например, телевизоров, дробят в молотковой дробилке, которая может быть установлена на грузовике. Из раздробленного продукта выделяют железо с помощью магнитного барабанного сепаратора, а узлы электронных схем и большие куски алюминия отбирают вручную. Плавку ведут во вращающейся барабанной печи под слоем расплавленного стекла, который защищает расплавленный металл [4].

В способе [5] предлагается извлекать свинец и олово из печатных плат с помощью расплавленной в тигле смеси из 50 % *NaOH* и 50 % *KOH*. После расплавления смеси в ванну вводят куски плат, покрытых слоем лака, клея, которые отделяются в течение 20...30 мин. Для удаления припоя платы вводят в контакт с расплавом, содержащим

90...95 % $NaOH$ и 5...10 % $NaNO_3$, в течение 25...40 мин, при этом через расплав пропускают постоянный ток с плотностью 500...800 А/м².

В патенте [6] предложен способ извлечения металлов из разделанных или неразделанных печатных плат, который предусматривает использование наклонного вращающегося конвертора с дутьевыми фурмами и обеспечивает возможность переработки лома печатных плат при малом расходе энергии и высоком коэффициенте извлечения металла. Конвертор разогревают до температуры выше 1200 °С и вводят в него небольшое количество шлакообразователя. Лом печатных плат загружают до, после или во время введения шлакообразователя в конвертор, подавая при этом в него газ через подвижную фурму. При продувке в конверторе поддерживают температуру на уровне 1200...1400 °С, осуществляя через горелки и подвижную фурму подачу кислорода в количестве, превышающем необходимое для сжигания органических компонентов. Из образовавшегося расплава введением в него восстановителя и продувкой воздухом выделяют металлы.

В работе [7] предложена технология рафинирования медного металлического расплава от примесей цинка, олова, свинца с применением паровоздушной смеси «пар : воздух» = 3 : 1. Расход дутья составляет 60...70 м³/ч. Плавку ведут в индукционной печи при температуре 1230...1250 °С. Переход в газовую фазу проходит за счет испарения: для цинка в виде металла, для свинца - в виде металла и оксида, для олова – в форме оксида. Рафинирование медного расплава от примесей предусматривает организацию двух стадий процесса. На первой стадии медный расплав насыщают кислородом в режиме его «мягкого» окисления, обеспечивающего эффективное рафинирование меди от примесей за счет прямого испарения с открытой поверхности расплава и перехода в гетерогенный шлак. На второй стадии, после прекращения подачи паровоздушного дутья, наводят рафинировочный шлак с выдержкой под ним расплава для извлечения из него гетерофазных оксидных соединений примесей и доочистки.

Химический метод используют для переработки отработанных радиоэлектронных плат, изготовленных на сложнооксидном ламинате с позолоченными фрагментами, содержащих 0,4...0,9 мас. % золота, а также медь, никель, олово, свинец [8]. Для выщелачивания применяют смесь кислот, мас. %: 10...20 % H_2SO_4 , 2...10 % HNO_3 , 0,5...3,0 % HCl при температуре 80...120 °С. Для осаждения золота из раствора предложены известные способы.

В патенте [9] предложено печатные платы, покрытые оловянным сплавом, предварительно обрабатывать 16 %-ным раствором HCl . Получены растворы, содержащие 0,15 и 0,75 г/л золота и концентраты с 75,0 и 79,1 % золота. Содержание металла в печатных платах, %: 2,19...6,13 олова, 1,68...2,08 меди, 0,49...0,50 никеля, 0,04...0,05 золота.

Сплав «олово-свинец» удаляют с печатных плат раствором, содержащим 400...500 мг/л HNO_3 ; 11,5...1,0 г/л HBF_4 и 1,0...1,5 г/л вещества ОС-20 (ГОСТ 10730-82) [10]. Растворение происходит при комнатной температуре.

Разработанный процесс гидрохимического удаления припоя из золотосодержащих концентратов [11], основан на применении азотнокислых растворов, содержащих комплексобразователь – производную карбоновой кислоты. Исследовали концентрат следующего состава, %: 63,90 Cu ; 18,00 Sn ; 10,30 Pb ; 0,60 Au ; 0,50 Pd ; 0,17 Zn ; 0,10 Ag . В результате термохимической обработки получены: очищенный от припоя золотосодержащий материал, азотнокислый раствор, в который переходит основная масса компонентов припоя и шлак. Содержание металлов в шлаке, %: 32,70 Sn ; 5,00 Cu ; 3,00 Au ; 2,50 Pb ; 0,50 Ni ; 0,10 Ag ; 0,10 Mg ; 0,06 Fe ; 0,06 Ca . Выход шлама составляет 0,12...0,15

% от исходной массы концентрата. Извлечение в конечный продукт из припойной части: до 99,6 % золота; 99,99 % серебра; 100 % палладия и 96...98 % олова.

В патенте [12] предложен способ извлечения благородных металлов из печатных плат, в котором материал растворяют в «царской водке» или в кислоте с добавлением нитрозила. Благородные металлы селективно восстанавливаются из раствора при добавлении формальдегида, гипофосфата щелочных металлов или гидроксилamina.

Применение электрохимических процессов позволяет селективно разделять ДМ и ЦМ из лома и отходов радиоэлектронной техники. В работе [13] приведены результаты исследования по электрохимическому извлечению серебра из вторичного концентрата, прошедшего механическую переработку, с применением щелочного роданистого электролита. Серебросодержащий концентрат имел состав, %: 67,1 меди; 11,3 серебра; 7,6 свинца; 5,1 олова; остальное – цинк и неметаллическая составляющая (пластмасса, изоляция и т.п.). Физически материал представлял сплюснутые металлические разъемы и штекеры с медной и латунной основой и нанесенным поверх основы гальваническим серебром. Поверхность серебра на 15...20 % от общей площади разъема покрывает припойный материал, близкий по соотношению $Sn : Pb$ к припою ПОС-60. Растворение перерабатываемого материала проводили во вращающемся колокольном электролизере (угол наклона оси от вертикали 45° , скорость вращения 15 мин^{-1}) с ниобиевым токоподводом (анодом) и катодом из нержавеющей стали, отделенным от основной части электролита диафрагмой из стекловолокна. Общая степень извлечения серебра в электролит и катодный осадок достигает 82...83 % от исходного при сохранении основной массы меди в анодном остатке. Более высокое извлечение серебра из данного концентрата невозможно без предварительного удаления сплава олово-свинец.

Концентрат, содержащий ДМ, ЦМ и остатки пластмассы, подвергали электрохимической переработке в электролите, содержащем 70 г/л H_2SO_4 , при анодной плотности тока 150 А/м^2 и катодной плотности – 1500 А/м^2 . Химический состав концентрата, %: 68,10 меди; 4,46 олова; 2,40 никеля; 0,30 серебра; 0,30 свинца; 0,06 палладия; 0,05 платины и 0,02 золота.

Электролиз осуществляли в диафрагменном электролизере с нижним анодным токоподводом из графита. Анодом служили частицы перерабатываемого материала, приведенные во взвешенное состояние с помощью виброустройства, катодом – титановые пластины. В процессе электролиза на катоде осаждался порошок, состоящий из 81,0 % меди, 18,9 % олова и 0,1 % никеля. В раствор переходили железо, никель, олово и медь, в анодный шлам – золото, серебро, платину, палладий, медь, остатки пластмассы. Извлечение металлов, %: 99,9 платины; 99,8 палладия; 98,7 серебра. Полученный анодный шлам переплавляли при температуре $1200...1250 \text{ }^\circ\text{C}$ под слоем флюса тетраборат натрия ($Na_2B_4O_7$) и угольного порошка с целью получения вторичных анодов. Вторичный анод подвергали электрохимическому рафинированию в электролите, содержащем 150 г/л серной кислоты и 25 г/л сульфата меди при анодной и катодной плотностях тока 2500 А/м^2 . На катоде получен порошок, содержащий 99,7 % меди. Сквозное извлечение во вторичный анодный шлам из исходного материала составило, %: 99,6 золота; 99,5 платины; 99,4 палладия и 97,4 серебра.

В патенте [14] предложен способ извлечения золота и ЦМ из отходов электронной промышленности, который осуществляют в два этапа. Вначале загружают сырье в титановую анодную корзину, покрытую катализатором, и добавляют в электролит соли металлов переменной валентности и комплексообразователь. Золото выпадает в осадок из электролита, а остальные металлы осаждаются на катоде. В качестве хлоридного раствора используют раствор хлоридов металлов (Fe, Cu, Ti) в концентрациях от 0,01 до 0,3 моль/л.

Наличие анодной корзины из титана, покрытого катализатором, позволяет генерировать окислитель внутри корзины и в пространстве вблизи нее поддерживать окислительно-восстановительный потенциал, исключающий растворение металлов с образованием соединений, способных за счет самоокисления-восстановления выделять в объеме электролита порошки металлов. На второй стадии анодное золото плавят в слитки, затем путем анодного растворения с наложением переменного асимметричного тока в электролите, содержащем водный раствор золотохлористоводородной кислоты, осаждают золото на катоде с накоплением серебра в виде хлорида на дне электролизера. Накопленные в процессе электролиза в растворе примеси с частью золота извлекают на дополнительный катод, оснащенный анионитовой или пористой диафрагмой.

В патенте [15] для извлечения ДМ и ЦМ также предложен электролиз. Слитки, выплавленные из электронного лома, загружают в электролизную ванну с раствором азотной кислоты. Через электролит пропускают переменный электрический ток промышленной частоты с определенным напряжением и плотностью. Шлам, содержащий золото и олово, осыпается на дно ванны; цветные металлы, серебро, палладий накапливаются в растворе. Шлам прокаливают при температуре 500...550 °С для перевода олова в инертное состояние и далее выщелачивают в «царской водке». Извлечение ДМ повышается на 1...4 %.

В гальванических процессах дефектные покрытия оловом или свинцом удаляют анодным растворением. Для оловянного покрытия используют раствор, содержащий 50...100 г/л едкого натра, при температуре 60...65 °С и плотности тока 50...100 А/м². Свинцовые покрытия растворяют в 10 %-ном растворе *NaOH* при температуре 60...70 °С и плотности тока 100...300 А/м². В качестве электролита используют раствор кремнефтористоводородной (*H₂SiF₆*), борфтористоводородной (*HBF₄*) или сульфаминовой (*H₂SO₃NH₂*) кислот, которые хорошо растворяют свинец и отличаются хорошей электропроводностью. Растворимые аноды содержат ЦМ (*Zn, Fe, Ni, Cu, Sn*) и БМ (*Au, Ag*) [15].

Для удаления покрытий «олово-свинец» с лома электронной промышленности предлагается [16] вести электролиз в растворе, содержащем 370...430 мл/л *H₂SiF₆* и 10...20 г/л *NH₄NO₃*. Растворение ведут при плотности тока 23 А/дм² и температуре 20...22 °С. Эффективным средством ускорения процесса электролиза является воздействие ультразвука на электродные процессы. Наложение ультразвука приводит к снижению катодной и анодной поляризации, значительно уменьшает напряжение на ванне, увеличивает скорость электроосаждения металлов в 4,0...4,5 раза по сравнению с условиями механического перемешивания [17].

Как правило, при извлечении ДМ и ЦМ используют традиционные электролизеры с литыми электродами. Однако известно несколько типов ячеек [18], в которых используют насыпные электроды: насыпной слой с механическим перемешиванием, осуществляемым при помощи мешалки и электроды с перекачиванием частиц, осуществляемым при помощи вращения электродного пространства. К преимуществам насыпных электродов относятся большая удельная электродная поверхность и хорошая массопередача.

Выводы

1. Для малотоннажных производств при выборе технологии извлечения ДМ и ЦМ из печатных плат наиболее рациональными являются пирометаллургические и электрохимические процессы.

2. Максимального разделения ДМ и ЦМ с высоким извлечением можно достичь электролизом. При этом селективно выделяются ДМ, свинец и олово в шлам, медь – на катод, а цинк, никель и железо – в раствор. Последующая переработка шлама позволяет

получать металлы, которые находятся в нем, в виде металлических продуктов. Отработанный электролит можно утилизировать цементацией с получением цементного осадка с высоким содержанием никеля, железа и цинка.

3. Вывоз разделанных радиоэлектронных плат в отвалы недопустим из-за потерь меди, олова, свинца и ДМ. При окислительной плавке на медный коллектор теряются олово и свинец, которые составляют большую часть стоимости оставшихся на плате металлов.

4. Перспективными технологическими схемами переработки многокомпонентного лома являются схемы, включающие первичную обработку лома механическими методами с целью получения концентратов всех компонентов этого лома: драгоценных металлов, цветных металлов, черных металлов, пластмасс, дерева и стекла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лолейт С. И.* Извлечение благородных металлов из электронного лома / С. И. Лолейт, Л. С. Стрижко. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2009. – 156 с.
2. Переработка вторичного сырья, содержащего драгоценные металлы / Под ред. *Ю. А. Капрова*. – М.: Госкомдрагмет. Гиналмаззолото, 1996. – 290 с.
3. Обогащение модулей радиоэлектронного лома, содержащих драгоценные металлы / *А. И. Самсонов*, К. П. Козловский, А. В. Пластовец [и др.] // *Металургія: наукові праці ЗДІА*. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2004. – Вип. 9. – С. 56-59.
4. Благородные металлы / *В. Н. Бредихин*, В. А. Кожанов, Н. А. Маняк, Е. Ю. Кушнеров. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2009. – 525 с.
5. А. с. 1668437 СССР, МКИ⁵ С 22 В 7/00. Способ переработки отходов, содержащих цветные металлы / *С. М. Кричунов*, В. Г. Лобанов, Л. П. Куликова и др. (СССР). - Заяв. 09.08.89; опубл. 07.08.91. Бюл. № 29.
6. Патент № 267741 ГДР, МКИ⁴ С 22 В 7/00 15/06.
7. *Леонтьев В. Г.* Рафинирование металлического расплава меди паровоздушной смесью / В. Г. Леонтьев, В. А. Задиранов, В. А. Брюквин // *Цветная металлургия*. – 2003. – № 5. – С. 18-21.
8. Патент 142656 ПНР, МКИ⁴ С 23 С 1/02, С 22 В 7/00; заяв. 13.06.84; опубл. 30.07.88.
9. *Ямпольский А. М.* Краткий справочник гальванотехника / А. М. Ямпольский, В. А. Ильин. – [3-е изд.]. - Л.: Машиностроение, 1981. – 269 с.
10. *Брюквин В. А.* Процесс гидрохимического удаления припойных материалов из лома и отходов электронной техники / В. А. Брюквин, Т. Н. Винецкая // *Цветные металлы*. – 1998. – № 7. – С. 35-36.
11. Патент 191365 ПНР, МКИ⁴ С 22 В 11/04. Заявл. 09.11.82; опубл. 30.05.80.
12. *Левин А. И.* Анодное окисление вторичного серебросодержащего сырья в роданистых электролитах / А. И. Левин, Т. Н. Винецкая, В. А. Брюквин // *Цветные металлы*. – 1999. – № 5. – С. 55-58.
13. Пат. 2176279 Россия, МКИ⁶ С 22 В 11/00, С 25 С 1/20. Способ переработки вторичного золотосодержащего сырья в чистое золото (варианты) / *Крыщенко К. И.*, Нейланд А. Б. – № 2001107586/02; заявл. 23.03.2001; опубл. 27.11.2001.
14. Пат. 2090633 Россия МКИ⁶ С 22 В 7/00. Способ переработки электронного лома, содержащего благородные металлы / *Караев В. Г.*, Масликов С. Т., Давыдов А. М. [и др.]. – № 94044283; заявл. 16.12.94; опубл. 20.09.97.
15. *Электрометаллургия водных растворов: справочное руководство по технической электрохимии* / Под ред. *Г. Егера*; пер. с нем. под ред. И. Т. Гульдина. – Донецк: ДПИ, 1966.
16. А. с. 1382818 СССР, МКИ⁴ С 25 F5/00. Раствор для удаления покрытий на основе сплава олово-свинец / *И. В. Соловьева*, Ю. Б. Петрошень, Т. Ф. Ткач (СССР). – № 4066716/23-02; заявл. 28.03.86; опубл. 23.03.88.
17. *Левин А. И.* Электрохимия цветных металлов / А. И. Левин. – М.: Металлургия, 1982. – 254 с.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2010 р.
Рецензент, проф. Г.О. Колобов