

УДК 666.247.2

Ecological Problems of Electronic Means Production and Utilization

**Tamara N. Patrusheva^{*a}, Vladimir A. Barashkov^b,
Olga V. Churbakova^b and Sergey K. Petrov^a**

*^aBaltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov
1, 1st Red Army Str., St. Petersburg, 190005, Russia*

*^bSiberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Received 09.06.2016, received in revised form 01.08.2016, accepted 04.01.2018

The article deals with chemicals for electronics manufacturing and environmental problems of large electronics manufactures. Disposal of electronic and recycling of electronic waste are also important for the environment. Consider, in particular, technology of printed circuit boards re-processing. The prospects of "green electronics" development are noted.

Keywords: enterprise for the production of electronic equipment, emissions of harmful substances, waste, environment, recycling.

Citation: Patrusheva T.N., Barashkov V.A., Churbakova O.V., Petrov S.K. Ecological problems of electronic means production and utilization, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2018, 11(6), 679-693. DOI: 10.17516/1999-494X-0085.

Экологические проблемы производства и утилизации электронных средств

**Т.Н. Патрушева^a, В.А. Барашков^b,
О.В. Чурбакова^b, С.К. Петров^a**

*^aБалтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

^bСибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

В статье рассмотрены химические вещества для производства электроники и экологические проблемы крупных производств электроники. Утилизация электронных средств и

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: pat55@mail.ru

переработка отходов электронной промышленности также являются важными для экологии. Рассмотрены, в частности, технологии переработки печатных плат. Отмечены перспективы развития «зеленой электроники».

Ключевые слова: предприятия по производству электронной техники, выбросы вредных веществ, отходы, окружающая среда, переработка отходов.

Введение

Заводы по изготовлению электронной техники по сравнению с предприятиями других отраслей промышленности дают относительно небольшое количество выбросов в окружающую среду. Однако, учитывая то, что данные производства, как правило, расположены в городах, в зонах жилых массивов и водных бассейнов рек, природоохранные мероприятия на этих предприятиях являются жизненно необходимыми.

Большое количество процессов, операций и материалов, используемых при изготовлении электронных средств, являются источниками огромного количества веществ, имеющих неблагоприятное воздействие на человека и биосферу. При изготовлении элементной базы, электронных изделий, при обработке, выращивании полупроводниковых кристаллов, при изготовлении интегральных схем, в процессе гальванического производства утилизация исходных материалов часто происходит с низким коэффициентом использования, огромное количество их идет в отходы, попадая в атмосферу, гидросферу, загрязняя почву. Таким образом, наряду с истощением природных запасов дефицитных материалов происходит загрязнение окружающей среды, что ведет к губительным последствиям для отдельных экосистем и биосферы в целом.

Отрицательное воздействие на окружающую среду происходит на протяжении всего жизненного цикла изделия, от приобретения сырья и изготовления изделия до его утилизации по окончании срока полезного применения.

Поиски путей выхода из создавшейся ситуации приводят к выводу, что без знания экологических принципов организации живой материи, без осознания профессиональной ответственности каждого гражданина, каждого участника производственного процесса невозможно дальнейшее существование человечества. Чрезвычайную роль должны сыграть законодательные ограничительные документы, регламентирующие процессы производства новой и утилизации отработанной электронной продукции.

1. Химические вещества для производства электроники

При производстве электронных продуктов и их компонентов (полупроводниковых чипов, компьютерных клавиатур, мониторов, устройств хранения информации) используется свыше 1000 различных материалов, включая растворы хлорированных веществ, бромированные препараты-гасители пламени, поливинилхлориды, тяжелые металлы, пластики, газы и пр., многие из которых способны оказывать тяжелый вред окружающей среде и здоровью рабочих. Значительный вред рабочим возникает на стадии сборки и монтажа электронного изделия, где используются расплавленные припои, лаки, краски и пластмассы, в которых содержатся токсичные добавки.

Рабочие, занятые в производстве электроники, могут подвергаться воздействию свыше тысячи различных химических веществ. Многие из этих веществ увеличивают риск заболе-

вания раком, вызывают повреждение репродуктивной функции, дефекты детского развития и тяжелые заболевания. Основные риски связаны с содержащимися в электронных изделиях тяжелыми металлами, такими как, например; свинец, ртуть, кадмий. Опасность свинца для человека определяется его значительной токсичностью и способностью накапливаться в организме. По степени воздействия на живые организмы свинец отнесен к классу высокоопасных веществ наряду с мышьяком, кадмием, ртутью, селеном, цинком, фтором и бензпиреном [2]. Свинец вызывает повреждение мозга у детей, в связи с чем употребление многих продуктов для них ограничено. Ртуть токсична в очень малых дозах, она воздействует на мозг и повреждает почки. Она может попасть в организм уже с грудным молоком. Всего 1/70 чайной ложки ртути может вызвать отравление около 100 000 квадратных метров озерной поверхности, делая рыбу непригодной к употреблению в пищу. Кадмий аккумулируется в теле человека и может вызвать повреждение почек.

Полибромированные дифенил эфиры (PBDE) являются особым классом химических веществ, используемых в качестве замедлителей горения. Эти соединения часто применяются в качестве добавки в пластические материалы, используемые для изготовления корпусов телевизоров, потребительской электроники, изоляции проводов, персональных компьютеров и других небольших электронных изделий. Достоинством данных веществ является то, что они снижают вероятность возгорания и интенсивность горения. В практических целях PBDE используются весьма широко, и их содержание в пластике может составлять от 5 до 30 % от его общего веса. Эти соединения, будучи подмешанными к пластику, не вступают, тем не менее, с ним в соединение, поэтому они легко покидают его и оказываются в окружающей среде. Количество атомов брома и их местоположение в соединении может варьироваться. Это ведет к тому, что обнаруживается 209 различных форм PBDE [1]. Наибольший вред оказывает пентабромдифениловый эфир. Эти соединения способны распространяться на большие расстояния и оказывать хроническое воздействие на живые организмы. Они обнаруживаются в тканях всех морских обитателей. Подобно полихлорированным бифенилам (особой группе углеводородов, широко используемых в различных промышленных процессах), PBDE являются сильно гидрофобными и поэтому адсорбируются на различных частицах и липидах, что способствует их аккумуляции в тканях организмов животных, поглощающих их с пищей. Наибольшая концентрация PBDE отмечается в тканях морских обитателей: животных, рыб и птиц. Есть подозрение, что PBDE вызывает нарушение репродукции животных, отравленных этими веществами. В настоящее время использование замедлителей горения при производстве электронной техники запрещено.

Все возрастающими темпами в полупроводниковой промышленности используется индий, истощая природные запасы дефицитных материалов. Наноматериалы сейчас широко применяются в различных изделиях, включая продукты электронной промышленности, хотя воздействие наноматериалов на здоровье человека пока проверяется.

Упомянутые химические вещества и материалы способны оказывать вредное воздействие на здоровье рабочих и общества в целом на любой стадии жизненного цикла продукта.

В настоящее время наиболее распространен процесс получения высокочистых твердых материалов путем химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) (англ. *Chemical vapor deposition, CVD*) – плазмохимический процесс, который также используется в индустрии по-

лупроводников для создания тонких пленок, селективного удаления и модификации материалов. Как правило, при процессе CVD подложка помещается в пары одного или нескольких веществ, которые, вступая в реакцию и/или разлагаясь, производят на поверхности подложки необходимое вещество. Часто образуется также газообразный продукт реакции, выносимый из камеры с потоком газа. В отличие от других технологий газофазные процессы выгодно отличаются повышенным качеством получаемых продуктов, возможностью точного управления параметрами процесса. Газофазные процессы нашли широкое применение для анизотропного травления химически стойких материалов (Al_2O_3 , благородные, тугоплавкие металлы и их сплавы); глубокое и сквозное травление материалов IV группы (C, Ge, Si, SiC, SiGe), соединений с высоким аспектным отношением при субмикронных топологических размерах формируемых элементов состава АІІІВ (GaAs, AlN, InP) и АІІВІ (CdTe, ZnO); конформное осаждение ненапряженных диэлектрических покрытий (SiN_x , SiO_x , $SiON_x$); атомно-слоевое осаждение, широкий спектр диффузионных процессов; газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений. Снижению риска воздействия на здоровье людей и состояние окружающей среды могла бы послужить замена токсичных гидридов металлов менее опасными материалами. В последние годы активизировались исследования по использованию МОС-элементов в качестве альтернативы гидридам. Например, $As(CH_3)_3$, $As(C_2H_5)_3$, $C_4H_9PH_2$, $C_3H_7PH_2$ вместо AsH_3 , PH_3 . Лучшие результаты дает использование частично замещенных МОС $AsH_2(C_2H_5)$, $AsH_2(C_4H_9)$.

Экологическую ситуацию нарушают выбросы в секторе производства полупроводниковых приборов и электронной аппаратуры, образующиеся в ходе процессов диффузии, очистки, травления, содержащие парниковые газы, токсичные, химически и коррозионно-активные (пары кислот, легирующие примеси, чистящие газы и летучие органические соединения). Например, перфторуглероды (ПФУ) – CF_4 , C_2F_6 и C_3F_8 , трехфтористый азот (NF_3), $HFC-23$ (CHF_3) и гексафторид серы (SF_6) используются при производстве полупроводниковых приборов в качестве чистящих газов в системах газофазного осаждения, при плазменном травлении и в производстве тонкопленочных транзисторов. Но есть возможность произвести замену C_2F_6 на менее вредные NF_3 или C_4F_8 в качестве альтернативного чистящего газа для камеры. Коэффициент глобального потепления для NF_3 в 47 раз меньше, чем у CF_4 , и в 12 раз меньше, чем у SF_6 , но высокая стоимость NF_3 тормозит его широкое использование.

Рекомендовано исключить по возможности применение токсических компонентов при изготовлении электронных средств. Усилия проектировщиков направлены на изготовление элементов конструкции из чистых пластмасс без добавок красителей, минимизацию состава применяемых пластмасс и других материалов. Выполнение этих требований приведет к упрощению дальнейшей переработки и утилизации снятых с эксплуатации электронных приборов. Ограничение использования опасных компонентов может расширить возможности, повысить экономическую эффективность производства электронного оборудования и сократить негативное воздействие на здоровье служащих.

2. Экологические проблемы крупных производств электроники

Экологические проблемы электронной промышленности становятся все более острыми, что связано, с одной стороны, с расширением производства электронных средств, вовлечени-

ем в это производство все новых стран и регионов земного шара, а с другой – с усложнением электронных изделий и необходимостью использования в их производстве все новых, часто токсических веществ.

На протяжении длительного времени большинство электронных гаджетов изготавливалось в США. И только сравнительно недавно производство переместилось за рубеж в развивающиеся страны, что было вызвано желанием использовать в своих интересах дешевый труд и слабое местное законодательство. Владельцы фирменного знака прекратили заниматься производством и передали контракты на изготовление электроники своим новым партнерам. Теперь многие из электронных изделий, которые мы покупаем, собираются в убогих мастерских, например, вроде тех в Китае, где практически отсутствует охрана труда, где рабочих заставляют работать сверхурочно для того, чтобы обеспечить высокую интенсивность производства, а платят им ниже прожиточного минимума. Рабочим также не разрешают формировать независимые профессиональные союзы, призванные защитить своих членов и требовать для них лучших условий труда.

Наибольшим контрактом на производство электроники владеет компания Hon Hai Precision Industry, Ltd Тайваня, обычно известная под именем Foxconn [3, 4]. Она одна владеет 13 предприятиями в Китае, у нее занято почти 1 миллион рабочих по всему миру. Давно известно, в каких нечеловеческих условиях фирма Apple производит iPhones и iPads. Применяемая поточная система привела к тому, что в 2010 г. 18 рабочих пытались покончить жизнь самоубийством. Подобные проблемы не ограничиваются компанией Foxconn. Исследования китайской инспекции труда показали, что отвратительные условия труда в Foxconn являются типичными для всех производителей электроники в Азии. При обследовании 10 фабрик электроники Китая в провинциях Гуандуне и Цзянсу были обнаружены обычные ужасающие условия на всех предприятиях, восемь из которых работают по контракту с Dell, и семь – с HP.

Отмечено, что на всех фабриках рабочие заняты на производстве по 36–160 ч в месяц при законном, установленном пределе в 36 ч; на девяти из этих десяти фабрик минимальная ежемесячная заработная плата (138 \$ на одной фабрике) не обеспечивала прожиточный минимум большинства рабочих, что не оставляло им другой возможности к выживанию, как брать много часов сверхурочной работы; условия труда на поточной линии очень тяжелые, рабочий день длится 8–10 ч и более. Перерывы часто не допускаются; на всех десяти фабриках были обнаружены случаи дискриминации при приеме на работу. Многие наниматели предпочитают молодых людей (часто моложе 18 лет) и женщин, которых легче контролировать.

3. Проблемы утилизации электронных средств

Быстрое развитие электроники, которое немислимо было представить всего десять-двадцать лет тому назад, приводит к тому, что электронные изделия быстро морально устаревают и выбрасываются на свалки. Нужно сказать, что этому способствует и агрессивная рекламная кампания фирм-производителей. Жизненный цикл телевизоров, телефонов, приборов глобальной навигации, офисного оборудования и т. п. становится все короче, а себестоимость производимой продукции – выше.

Необходимо учитывать, что в отходы поступает, как правило, огромное количество чрезвычайно дефицитных материалов (стали, пластика, цветных и драгоценных металлов, стекла,

древесины и др.), которые просто обязаны быть возвращены в процесс производства. Многие ценные компоненты электронных изделий (золото, серебро, редкие металлы), содержащиеся в печатных платах, аккумуляторах, кабелях, экранных мониторах, ртутных выключателях и пр., также выключаются из производственного оборота [5].

С середины 1990-х гг. продукты электроники становятся общепризнанным доминирующим компонентом в общем потоке твердых отходов. Это связано с тем, что потребление небольших электронных устройств типа сотовых телефонов стало повсеместным во всех развитых и развивающихся странах. В отсутствие адекватной государственной политики по переработке таких отходов, из-за малого размера, короткого срока жизни и высокой стоимости их переработки такие изделия люди обычно выбрасывают, не задумываясь по поводу негативного воздействия их на окружающую среду и здоровье сограждан.

Разрушающиеся на свалках электронные продукты и их компоненты (полупроводниковые чипы, компьютерные клавиатуры, мониторы, устройства хранения информации) становятся источниками поступающих в окружающую среду 1000 различных материалов, включая растворы хлорированных веществ, бромированные препараты-гасители пламени, поливинилхлориды, тяжелые металлы, пластики, газы и пр. Одна только электронно-лучевая трубка может содержать от одного до трех килограммов свинца. В большом телевизионном мониторе его окажется еще больше. Плоские панельные телевизоры и мониторы содержат меньше свинца, но больше ртути. Примерно 40 % тяжелых металлов, включая свинец, ртуть и кадмий, обнаруживаемых в окружающей среде, обязано своим присутствием выбрасываемым и попадающим на свалки электронным изделиям [5].

При сжигании отходов на открытых полигонах возникает особая проблема образования токсичных продуктов горения. Это относится, в частности, к пластмассам, используемым при изготовлении электронных средств. В этом случае характерно образование чрезвычайно опасных химических веществ – диоксинов. Особую опасность представляют PBDE, которые интенсивно выделяются в процессе горения пластмасс. Сейчас эти вещества запрещены к использованию, хотя в изделиях, произведенных до 2004 г., они содержатся в достаточно высоких количествах.

В ряде государств мира широко распространена практика обеспечения социальных групп с ограниченными финансовыми возможностями старыми компьютерами. Например, в 1993 г. в большинстве городов Канады были открыты многочисленные пункты по приему старых компьютеров. Одновременно в связи с утилизацией электронных устройств были приняты соответствующие законы по охране окружающей среды. Согласно данным законам граждане и организации могут сдать старые компьютеры в пункты бесплатно или по рыночным ценам. В приемных пунктах старые компьютеры классифицируются по их пригодности или необходимости утилизации. Пригодные к использованию компьютеры очищаются химическими средствами, восстанавливается нужная конфигурация. По соглашению, заключенному с компанией Microsoft, лицензионная операционная система Windows, программные продукты MS Office бесплатно инсталлируются, и компьютеры поступают в продажу по очень низким ценам. Одновременно часть принятых компьютеров различные благотворительные фонды безвозмездно раздают малообеспеченным гражданам, центрам обучения иммигрантов компьютерным навыкам, детям, лишенным родительского попечения, инвалидам.

Благотворительная организация «Международная компьютерная поддержка», действующая в Англии, отправляя старые компьютеры в малоразвитые страны, помогает тем самым решению проблем с нищетой. Так, за последние годы эта организация отправила во многие страны Африки и Южной Америки приблизительно 200 тыс. компьютеров.

4. Переработка отходов электронной промышленности

Значительные экологические и экономические выгоды сулит переработка отходов электронной промышленности и повторное их использование. Она должна осуществляться путем разделения отходов на отдельные однородные компоненты, выделения химическими методами ценных для дальнейшего использования компонентов, направления их для повторного использования.

Многие страны предпринимают серьезные шаги в этом направлении, в первую очередь в области законодательства и регламентирования процессов утилизации и хранения отходов производства. В 2002 г. Европейским союзом был разработан совместный документ – директива № 2002/96 «Об отходах электрического и электронного оборудования», которая требует от всех европейских производителей оборудования и комплектующих брать на себя ответственность за производимый продукт после окончания срока его службы, включая стадии сбора, переработки и утилизации. В Великобритании ввели запрет на выброс отработанной радиоэлектроники (старых телефонов, телевизоров, компьютеров и пр.) на мусорные свалки. Для таких товаров появляются отдельные места утилизации в соответствии с программой, разработанной в сотрудничестве с представителями электронной промышленности. Такие меры позволяют ежегодно отсеивать до 4 500 т электронного мусора, а в сфере его переработки создаются новые рабочие места.

Нужно отметить, что процесс переработки телевизоров, компьютеров, мониторов, принтеров, сканеров, телефонов, факсов и видеозаписывающих устройств может принести значительную выгоду хотя бы за счет повторного использования добытых из них цветных металлов [6]. Из полученных в ходе переработки продуктов электроники уже сейчас производят хорошего качества коробки, вывески, детали подсвечников, таблички и другие изделия по сравнительно низкой цене.

В США и в Европе существуют специальные рынки, где продаются демонтированные и восстановленные компоненты плат. Они поступают на рынок с производств, где используют робототехнические системы, обеспечивающие возможность идентификации и демонтажа только тех компонентов, которых недостает на складе. Однако приходится считаться с тем, что быстрое обновление элементной базы и относительно низкая стоимость новых компонентов приведут к серьезному ограничению повторного использования демонтированных компонентов неопределенной давности.

В Германии фирма FUBA перевела на коммерческую основу выделение от 92 до 95 % металлов из отходов пустых печатных плат за счет использования механических и гидрометаллургических методов разделения. Они включают измельчение, гранулирование, магнитное разделение, классификацию и электростатическое разделение. Совокупность композиций, получаемая от этой обработки, нашла свое применение в изготовлении изделий, имеющих в своем составе большое количество стекловолокна, а также в качестве наполнителей в произ-

водстве строительных материалов. Особенно успешным оказалось применение стеклополимерных композиций для производства емкостей и поддонов, стойких к химическому воздействию, по технологии, разработанной фирмой FUBA. Металлические составляющие отходов печатных плат (в основном медь) растворяются в серной и азотной кислотах с последующим восстановлением меди.

В китайском городе Гуйюй находится больше всего в мире предприятий по переработке электронных отходов. С конца 1980-х гг. множество тонн электронных отходов из других стран было импортировано в Китай и утилизировалось в Гуйюй [3, 4]. Более 17 тысяч предприятий по утилизации электронных отходов обеспечивает работой десятки тысяч человек. При этом ежегодно утилизировалось 1,5 млн т электронных отходов, что приносило \$ 75 млн дохода.

Необходимо, однако, заметить, что процесс переработки электронных отходов в Китае находится на чрезвычайно низком уровне. Никаких мер по охране труда не предпринимается. Широко используется ненормированный ручной труд женщин и детей. Зачастую переработка электронных отходов происходит в примитивных условиях, где отсутствуют средства защиты и нормы экологического контроля. Попытки получения золота или платины из электронных отходов связаны с риском потери здоровья, что не может быть компенсировано никакими материальными выгодами. В результате содержание свинца в крови детей, проживающих в местности Гуйюй (провинция Гуандонг, Китай), ставшей местом самой большой свалки электронных отходов на Земле, составляет в среднем 15,3 мкг/децилитр. Хотя уровень безопасной концентрации свинца не известен, рекомендуется предпринимать соответствующие корректирующие действия у детей с концентрацией свинца, превышающей 10 мкг/децилитр. Полибромированные дифениловые эфиры, используемые в качестве замедлителей горения в электронике, обнаружены в опасных количествах (до 4,1 промилле от веса жировой ткани) в яйцах сапсанов, что увеличивает риск исчезновения этого вида.

Экологический подход в области производства продуктов электроники может принести и приносит уже в настоящее время существенную экономическую выгоду тем странам, которые осознали необходимость срочных мер в области защиты здоровья своего населения и окружающей среды. Правительства этих стран стимулируют научные исследования по экологическому контролю технологических процессов в электронике и поискам альтернативных безопасных технологий в производстве электронных средств.

4.1. Технологии переработки печатных плат

Печатные платы является одним из наиболее важных компонентов электронного оборудования. Они представляют собой платформу, на которой устанавливаются и связываются между собой микросхемные компоненты, такие как полупроводниковые микросхемы и конденсаторы. Переработка плат включает в себя три типа обработки: предварительная обработка, физическая переработка и химическая переработка. В предварительную обработку входит демонтаж многоразовых и токсичных элементов, измельчение или разделение. Затем следует физическая переработка. Потом материалы извлекают путем химического процесса переработки.

Механическая переработка – это физический метод переработки, при котором разобранные детали размалываются до необходимых размеров (рис. 1), после чего они поступают на

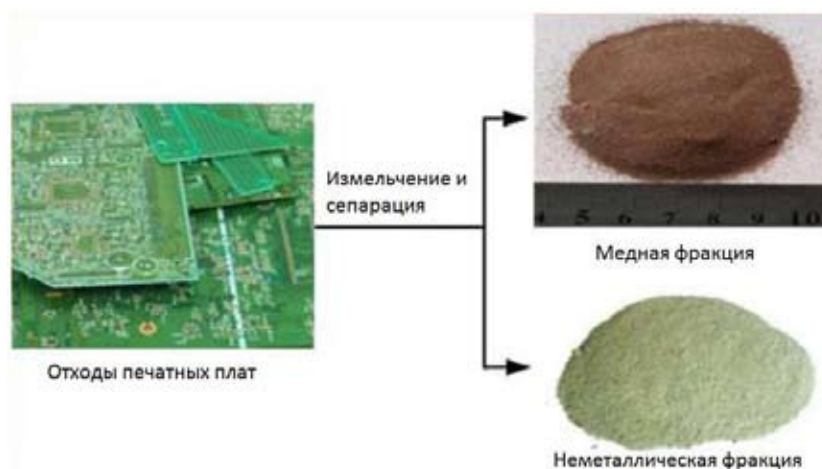


Рис. 1. Механическая переработка печатных плат

Fig. 1. Mechanical processing of printed circuit boards

установку тонкого измельчения. Полученный порошок подвергают воздействию вихревых токов в сепараторах, где металлы отделяют благодаря их электропроводности. Затем порошок разделяют в зависимости от плотности и размеров частиц. Расслоение на различные материалы можно наблюдать в столбе жидкости.

Методом воздушной сепарации разделение диспергированных твердых частиц происходит благодаря различным размерам и плотностям частиц. Подвешенные в газе частицы, в основном в воздухе, занимают разные положения в сепараторе под воздействием различных сил в зависимости от материала. У тяжелых частиц предельная скорость осаждения больше, чем скорость воздуха, в то время как у более легких частиц предельная скорость осаждения меньше скорости воздуха. Следовательно тяжелые частицы перемещаются вниз против воздушного потока, в то время как легкие частицы поднимаются вместе с воздушным потоком в верхнюю часть сепаратора (рис. 2).

Электростатический метод для разделения сыпучих материалов использует электростатическое поле, которое воздействует на заряженные или поляризованные тела. Метод основан на различиях в траектории перемещения заряженных коротким разрядом, трением и другими способами частиц в электрическом поле (рис. 3а). Схема электростатического барабанного сепаратора с противостоящим плоским электродом включает: 1 – бункер; 2 – барабан-электрод; 3 – плоский электрод; 4 – приемник отходов; 5 – приемник концентратов (рис. 3б).

Эти технологии применяются для переработки металлов и пластмасс из промышленных отходов. Электростатические технологии разделения могут использоваться для отделения Cu, Al, Pb, Sn и железа и некоторых благородных металлов и пластика.

Магнитная сепарация – технология разделения материалов на основе различия их магнитных свойств (магнитной восприимчивости) и различного поведения материалов в зоне действия магнитного поля, изменяющего гравитационную траекторию материалов (рис. 4).

Магнитные сепараторы широко используются для отделения ферромагнитных металлов от цветных металлов и других немагнитных отходов. Недостатком магнитного разделения яв-

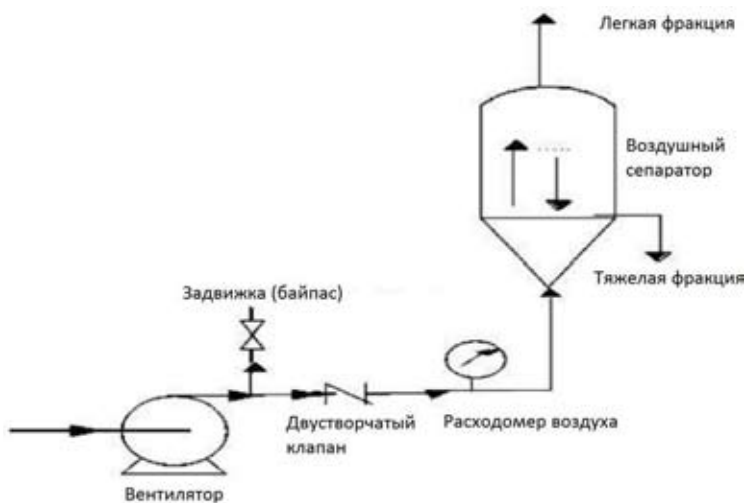


Рис. 2. Принцип воздушной сепарации отходов печатных плат
 Fig. 2. The principle of air separation of waste printed circuit boards

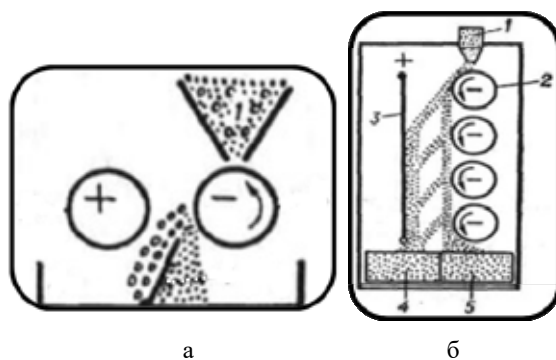


Рис. 3. Принцип электростатической сепарации (а) и схема электростатического барабанного сепаратора (б)
 Fig. 3. Principle of electrostatic separation (a) and circuit of electrostatic drum separator (б)

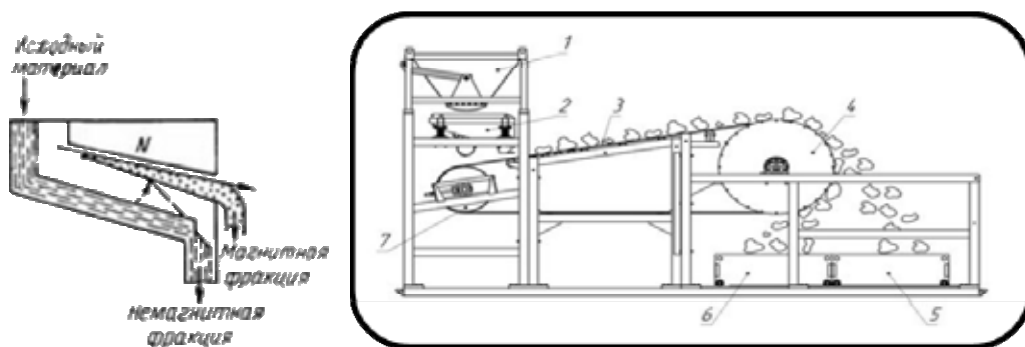


Рис. 4. Принцип и устройство для магнитной сепарации материалов
 Fig. 4. Principle and device for magnetic separation of materials

ляется агломерация частиц, вследствие которой магнит вытягивает вместе с ферромагнитными металлами и неметаллические включения. Следовательно, этот метод не очень эффективен.

Химические методы переработки отходов печатных плат включают пиролиз, гидрометаллургический, биометаллургический методы и назификацию.

Пиролиз – это химический метод, который широко используется для переработки синтетических полимеров, включая полимеры со стекловолокном. При пиролизе происходит разложение любых соединений на составляющие менее тяжелые молекулы или химические элементы под действием повышенной температуры. При пиролизе полимеров образуются газы, углеводороды и обугленный остаток. Эти вещества в дальнейшем можно использовать в качестве химического сырья или топлива. Платы нагревают до достаточно высокой температуры, чтобы расплавить припой, используемый для связывания электрических компонентов. Обугленный конгломерат, который называется также «черным металлом», содержит в себе большой процент меди и небольшое количество железа, кальция, никеля, цинка и алюминия, которые можно затем восстановить. На рис. 5 представлена схема устройства для пиролиза полимерных отходов. В результате пиролиза полимерных отходов получают продукты для химического синтеза: синтез-газ, жидкие углеводороды, а также полукокс.

Гидрометаллургический метод главным образом используется для переработки плат с целью извлечения металлической фракции. Метод заключается в выщелачивании металлов с применением растворов кислот и щелочей, за которым следует электрорафинирование извлекаемых металлов. Этот метод считается более гибким и энергосберегающим, следовательно, экономически эффективным. Широко используемыми выщелачивателями являются царская водка, азотная кислота, серная кислота и цианистые растворы. В случае неметаллических подложек металлы выщелачиваются в раствор с подложки. В случае металлической подложки для восстановления металлов может применяться электрохимическая обработка. Таким образом, гидрометаллургический метод позволяет восстанавливать металлы без какой-либо дополнительной обработки, остальные же материалы в плате перед повторным использованием или захоронением должны подвергаться дополнительной термической обработке. Основным недостатком этого метода является едкость и ядовитость используемых жидкостей.

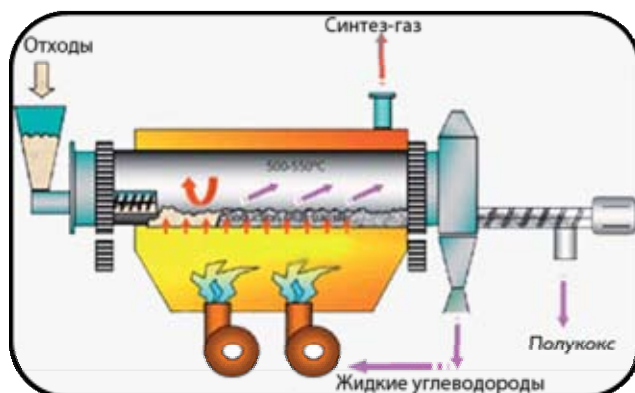


Рис. 5. Схема устройства для пиролиза полимерных отходов

Fig. 5. Diagram of the device for pyrolysis of polymer waste

Биометаллургический метод сепарации применяют для извлечения драгоценных металлов и меди из руды уже давно, однако до сих пор он не очень хорошо развит. Микроорганизмы используют металлы, присутствующие во внешней среде и на поверхности клеток, для своих внутриклеточных функций. Каждый тип микроорганизма имеет характерную тенденцию переносить конкретный металл в определенной среде. Биовыщелачивание и биосорбция в целом два основных направления биометаллургии, используемые для извлечения металлов. Биовыщелачивание – избирательное извлечение химических элементов из многокомпонентных соединений посредством их растворения микроорганизмами (бактериями или грибами) в водной среде. Биосорбция – это совместное использование сорбентов (активные угли, порошкообразные) и активного ила. Биовыщелачивание успешно применяется для извлечения драгоценных металлов и меди из руд в течение многих лет. Та же методика может применяться для извлечения меди и других ценных металлов из отходов печатных плат.

Газификация – преобразование органической части твердого или жидкого топлива в горючие газы при высокотемпературном (1000–2000 °С) нагреве с окислителем (кислород, воздух, водяной пар, CO₂ или чаще их смесь). Основное применение процесса газификации – это генерация синтез-газа (CO, H₂). Газификация протекает приблизительно при температуре 1600 °С и давлении около 150 бар. Богатый водородом синтез-газ – основной продукт газификации, который является ценным сырьем для производства метанола. После соответствующей обработки некоторые фракции этого газа могут использоваться для производства тепловой и электрической энергии. Схема процесса газификации отходов печатных плат (рис. 6) включает печь газификации, куда подается кислород, высокотемпературную печь и разделители и анализаторы газов.

Преимущества физических методов переработки, таких как магнитные сепараторы, сепараторы, отделяющие материалы в зависимости от плотности, и т.д., относительно химической переработки заключаются в том, что они не требуют больших финансовых вложений, относительно просты, удобны, меньше загрязняют окружающую среду, требуют меньших

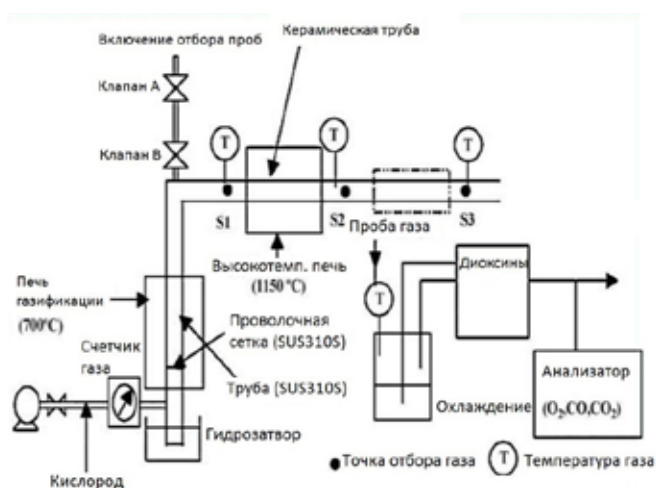


Рис. 6. Принцип процесса газификации отходов печатных плат

Fig. 6. The principle of the of waste printed circuit boards gasification process

затрат энергии. Металлические фракции, полученные физическими методами переработки, можно использовать в коммерческих целях без значительных процедур восстановления. Однако для использования в коммерческих целях неметаллических фракций они должны подвергнуться химической переработке. Таким образом, физические методы переработки являются более экономически выгодными для переработки металлических фракций, чем неметаллических. Основная цель химических методов переработки, таких как пиролиз, заключается в преобразовании полимеров, содержащихся в неметаллических фракциях, в химическое сырье или топливо. Химические методы переработки имеют преимущества в преобразовании бромантипиренов и извлечении тяжелых металлов, оставшихся после физических методов переработки.

Большое количество неметаллических отходов печатных плат, которые зачастую являются опасными для людей и окружающей среды (из-за наличия бромированных антипиренов и тяжелых металлов, таких как свинец, кадмий, бериллий и т.п.), сбрасываются на свалках. Чтобы предотвратить это, необходимо найти им оптимальное применение. Неметаллические фракции получаются легче, чем цемент и песок, их гранулы гораздо меньше, следовательно, они обладают более надежной микроструктурой. Механическая прочность материала повышается в присутствии грубых стекловолокон. Поэтому благодаря вышеуказанным свойствам неметаллические фракции могут успешно использоваться в качестве наполнителя в строительных материалах, для изготовления клеев и декоративных агентов. Разработана методика использования неметаллических фракций печатных плат в производстве неметаллических пластин, которые могут использоваться для получения композитных плит. Композитные плиты находят применение во многих областях, включая автомобильную промышленность, мебель, различное оборудование и отделочные материалы. Фенольные компаунды используются в производстве радиодеталей и кухонной утвари. В связи с уменьшением лесных ресурсов и повышением их стоимости производители ищут альтернативы деревянному полу. Неметаллические фракции печатных плат на бумажной основе кажутся хорошим вариантом замены деревянному полу.

Переработка электроники очень важна, так как компоненты технических средств и предметов электроники – это, скорее, ресурсы, чем отходы. В компонентах электроники, подлежащих переработке, достаточно высокое содержание полезных ресурсов, что делает их извлечение экономически выгодным.

5. Зеленая электроника

Подбор системы утилизации выхлопов технологического оборудования требует не только знаний физико-химических принципов протекания технологических процессов, но и практического опыта внедрения систем экологической безопасности с соблюдением природоохранного законодательства. Для обеспечения безопасности работы на предприятиях электроники обсуждены некоторые законодательные меры.

Сертификат ISO 14001 (сертификат соответствия стандартам системы экологического менеджмента) предполагает исключение из производства шести веществ, запрещенных к использованию в Евросоюзе, – это тяжелые металлы (свинец, шестивалентный хром, ртуть, кадмий) и два органических вещества (бромиды). Одно из требований стандарта – постоянные

улучшения. Кроме законодательных и нормативных актов стандарт предусматривает выполнение программ экологического менеджмента, в которых идет развитие по снижению отрицательного воздействия производства на окружающую среду. Основные аспекты деятельности заводов микроэлектроники – текущее производство, хранение и транспортировка материалов, сбор и утилизация отходов – влияют на окружающую среду. Предприятия микроэлектроники проходят достаточно жесткую сертификацию. Аудитор рассматривает любое место производства, а также документы. Аудитор нанесет крупный ущерб своей компании, если что-то упустит. Деньги, потраченные на сертификацию, возвращаются. Закрытый раньше экспортный рынок открылся, и цена на некоторые изделия повысилась. Внешний экономический эффект состоит в том, что сертификация позволила торговать с крупными мультинациональными компаниями. Кроме этого, есть внутренний экономический эффект, поскольку эта работа заставляет продумывать ходы по снижению ресурсоемкости и вообще по оптимизации системы обработки и утилизации материалов. В Японии встречаются наклейки «ISO 14000» на кафедрах, закусовых, магазинов. Каждая компания берет на себя определенную экологическую инициативу.

Для того чтобы работать с западными, восточными серьезными холдингами, необходимо полностью привести в соответствие строгим европейским, японским стандартам экологический аспект деятельности российских предприятий электроники. Даже Sony кроме стандарта выдвигает более широкие требования – стать «зеленым» партнером. Корпорация вовлекает своего поставщика, чтобы он развивался в направлении защиты экологии. Экологические аспекты реализуются также в изделиях микроэлектроники, которые работают в режимах «standby», «green mode», «blue angel». «Зеленые» технологии в мире объявлены основными движущими силами рынка. Кроме того, в мире развиваются «smart grids» («умные сети» распределения энергии), обеспечивающие высокую эффективность конвертации энергии, т.е. минимизирующие ее потери.

Заключение

Улучшение экологической ситуации в электронной промышленности может быть осуществлено при создании так называемой зеленой электроники, в рамках которой токсичные материалы при производстве средств электроники заменяются нетоксичными и легко разлагающимися в окружающей среде. Важным является внедрение на предприятиях стандартов, устанавливающих требования к системам экологического менеджмента. В то же время исследования по отысканию альтернатив токсичным материалам и инвестиции в металлургическое оборудование для безопасной утилизации электронных отходов катастрофически отстают от темпов появления новых электронных устройств. Необходимы новые стандарты по испытанию используемых материалов, особенно в областях, связанных с медициной, аэрокосмическими технологиями. Улучшенное тестирование материалов и создание надежной базы данных по токсичности материалов может стимулировать производителей учитывать опасность продукта на ранних стадиях проектирования, а не в дальнейшем, после принятия эксплуатационных и экономических решений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-КФН р-Сибирь № 15-48-04224.

Список литературы

[1] Брейтер М. Обзор химической промышленности в России. *Американская и зарубежная коммерческая служба и Госдепартамент США*. 1997. [Breiter M. Overview of the chemical industry in Russia. *U.S. & Foreign Commercial Service and U.S. Department of State*, 1997. (in Russian)]

[2] ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения [GOST 17.4.1.02-83 Protection of nature. Soil. Classification of chemicals for pollution control]

[3] Liu X., Tanaka V., Matsui Y. Electrical and electronic waste management in China: progress and the barriers to overcome. *J. Waste Management Research*, 2006, 24, 92–101.

[4] Oladele A. Ogunseitan, Julie M. Schoenung, Jean-Daniel M. Saphores, Andrew A. Shapiro The Electronics Revolution: From E-Wonderland to E-Wasteland. *J. Ciencia*, 2009, 326, 670-671.

[5] Аксенова О.В., Гузенкова А.С., Нерето М.О., Тумковский С.Р. Экологические проблемы электронной отрасли и экопроектирование. *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*, 2014, 4, 137. [Aksenov O.V., Guzenkova A.S., Nereta M.O., Tumkovsky S.R. Environmental problems of the electronics industry and eco-design. *National Research University “Higher School of Economics”*, 2014, 4, 137. (in Russian)]

[6] ООО «Росконтакт» – предприятие по переработке отходов, содержащих драгоценные металлы; <http://roskontakt.ru/proizvodstvo/demontazhno-zagotovitelnyj-uchastok.html> [Ltd. “Roskontakt” – Режим доступа: recycling facility containing precious metals]