

# Электроразряд в технологическом процессе утилизации отходов печатных плат

А. Р. Ризун, Т. Д. Денисюк, А. О. Домерщикова

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [ipt@ipt.com.ua](mailto:ipt@ipt.com.ua)*

В статье предложен новый технологический процесс для разделения компонентов при утилизации печатных плат и, возможно, других отходов электронного производства.

*Ключевые слова:* электроразряд, электродная система, печатные платы, утилизация.

УДК 621.3.03:537.5:622.236

## ВВЕДЕНИЕ

Современные отрасли электронной и компьютерной техники переживают бурное развитие, ежегодно появляются новые виды и модели оборудования, а устаревшая техника нуждается в переработке и утилизации.

По данным статистики [1, 2], каждый год в мире накапливается от 30 до 50 млн т технологического лома. Ориентировочно около 3% в нем составляет электронный лом – печатные платы, не пригодные к дальнейшему применению. Для их захоронения или уничтожения нужны значительные средства. Кроме того, экологические проблемы, связанные с переработкой этого вида отходов электронной промышленности, вызывают все большую обеспокоенность во многих странах мира [3, 4]. Принимая во внимание, что это вторичное сырье содержит цветные, драгоценные и редкоземельные металлы, утилизация печатных плат является наиболее оптимальным выходом.

Разнообразные современные технологии утилизации в развитых странах являются высокорентабельными благодаря значительному количеству цветных и драгоценных металлов, которые высвобождаются при переработке печатных плат [5, 6].

Печатные платы и другие отходы электроники отличаются сложным многокомпонентным составом и имеют отличия в плотности, электропроводимости и магнитных свойствах. В состав печатных плат входят: стеклополимер в объеме до 70%, до 16% меди, припой в размере до 4% и железо до 3%. Также в их состав входят в значительном количестве никель, серебро, золото, палладий [3, 7].

Утилизация печатных плат с выделением максимального количества полезных веществ представляет определенную сложность. Для переработки электронного лома необходимы специальное промышленное оборудование и освоенная технология.

В объеме технологии переработки электронного лома наиболее сложным считается процесс разделения металлических и пластмассовых компонентов [8, 9]. Механические способы обработки, которые традиционно используются, не могут обеспечить эффективного разделения, что является главной причиной накопления отходов [10, 11].

Переработка электронного лома с использованием электроразрядных процессов, с точки зрения имеющихся наработок по дезинтеграции неметаллических материалов естественного и искусственного происхождения [12], может быть целесообразной как с экономической точки зрения, так и с точки зрения охраны окружающей среды.

Цель работы – установить пригодность применения электроразрядной технологии в процессах утилизации отходов печатных плат.

Метод достижения поставленной цели – экспериментальные исследования с использованием статистической обработки результатов, их анализ и обобщение.

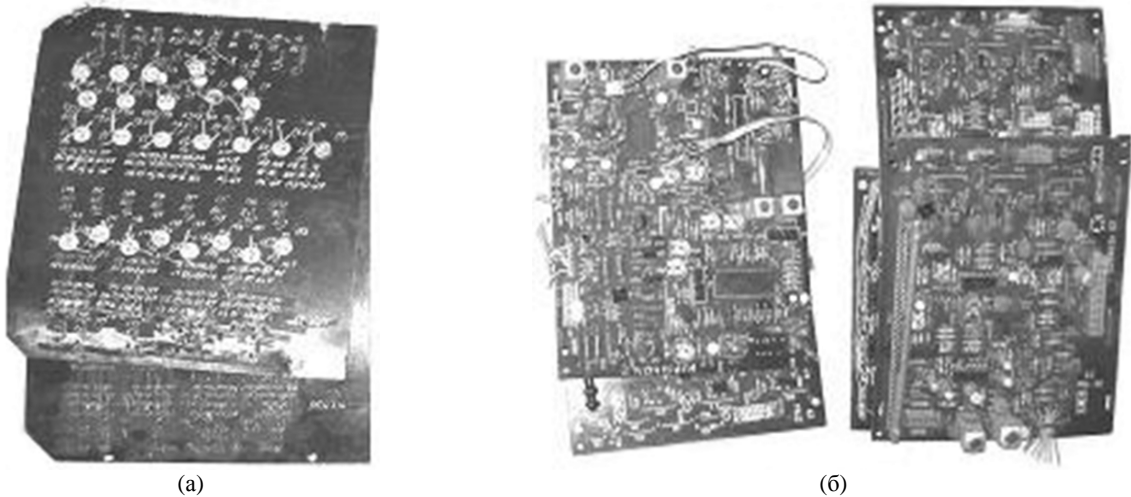
## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Электроразрядное разрушение печатных плат с целью отделения металлических компонентов от пластмассовой основы относится к многофакторному согласованному эксперименту, так как параметры электроразряда по-разному и достаточно существенно влияют на качество процессов разделения.

На рис. 1 представлена схема кибернетической системы с так называемым «черным ящиком», где от  $x_1$  до  $x_6$  – параметры электроразряда, а объект исследования – изделия электронной промышленности (односторонние и двусторонние печатные платы с гетинаксовой основой сечением  $\delta \leq 0,5$  мм) (рис. 2);  $y$  – выходной параметр оптимизации, характеризующийся относительной массой отделенных компонентов от основы.



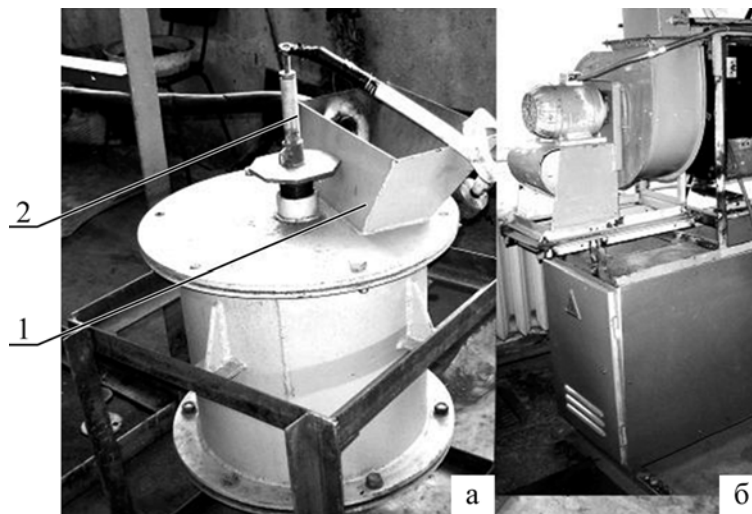
**Рис. 1.** Схема исследований многофакторного эксперимента:  $x_1$  – запасенная энергия разряда, кДж;  $x_2$  – частота следования разрядов, Гц;  $x_3$  – величина разрядного промежутка, м;  $x_4$  – время обработки, с;  $x_5$  – индуктивность разрядного контура, мкГн;  $x_6$  – удельное сопротивление разрядной среды, Ом·см;  $y$  – относительная масса отделенных компонентов.



**Рис. 2.** Образцы печатных плат. (а) – односторонние печатные платы; (б) – двусторонние печатные платы.

**Таблица 1.** Результаты расчетов амплитуды давления волн сжатия

$C \cdot 10^{-6}, \Phi$	$r, \text{ м}$							
	0,01	0,05	0,09	0,1	0,52	0,15	0,20	0,22
	$P \cdot 10^6, \text{ Па}$							
1,0	139,654	62,455	46,01	44,162	40,314	36,058	24,518	13,01
1,5	154,551	69,117	51,517	48,872	44,615	39,905	25,113	15,02
2,0	166,076	74,274	55,359	52,518	47,942	42,881	28,512	18,07
2,5	175,604	78,533	58,535	55,531	50,699	45,341	32,266	22,05
4,0	196,7	76,5	76,51	69,4	60,71	54,61	44,311	24,04



**Рис. 3.** Электроразрядная установка. (а) – технологический узел (1 – загрузочный люк; 2 – электродная система); (б) – высоковольтный генератор импульсных токов.

Таблица 2. Параметры электроразрядной установки

Наименование параметров	Диапазон значений
Напряжение в разрядном контуре $U$ , кВ	50
Диапазон энергии накопителей $W$ , кДж	от 1,25 до 5,0
Частота следований импульсов $f$ , Гц	от 1 до 4
Индуктивность $L$ , Гн	$6,0 \cdot 10^{-6}$
Объем разрядной камеры (с радиусом 0,2 м), л	20,0
Масса загрузки печатных плат, кг	0,5
Регулируемый разрядный промежуток $l$ , м	от 0,03 до 0,07

Таблица 3. Уровни и интервалы варьирования диапазоном значений параметров электроразрядной установки

Наименование уровней	$x_1$ , кДж	$x_2$ , Гц	$x_3$ , м	$x_4$ , с	$x_5$ , мкГн	$x_6$ , Ом·см
Основной (о)	2,5	2,0	0,05	30,0	6,0	1500,0
Верхний (в)	5,0	4,0	0,07	45,0	6,0	1500,0
Нижний (н)	1,25	1,0	0,03	15,0	6,0	1500,0
Интервал варьирования	1,25	1,0	0,02	15,0	6,0	1500,0

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований оптимизации параметра  $y$ 

№ опыта	Параметры электроразряда						Относительный показатель параметра $y$ , %
	$x_1$ , кДж	$x_2$ , Гц	$x_3$ , м	$x_4$ , с	$x_5$ , мкГн	$x_6$ , Ом·см	
1	(в)	(н)	(в)	(н)	(о)	(о)	80,0
2	(о)	(о)	(о)				81,0
3	(н)	(в)	(н)				84,0
4	(в)	(н)	(в)	90,0			
5	(о)	(о)	(о)	(о)			91,0
6	(н)	(в)	(н)	(о)			92,0
7	(в)	(н)	(в)	(в)			93,0
8	(о)	(о)	(о)	(в)			94,0
9	(н)	(в)	(н)	(н)			93,0

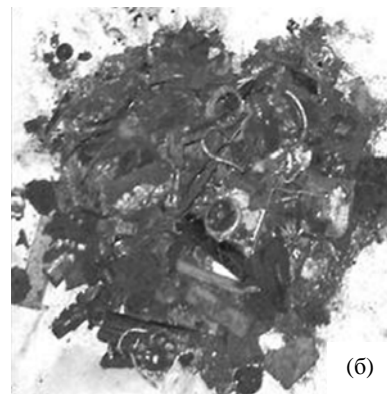
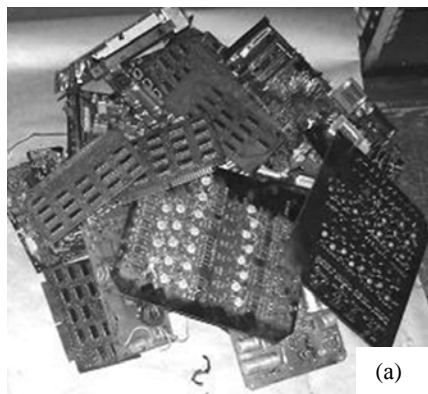
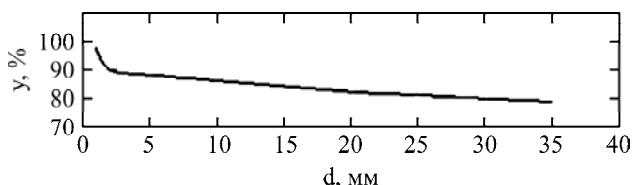
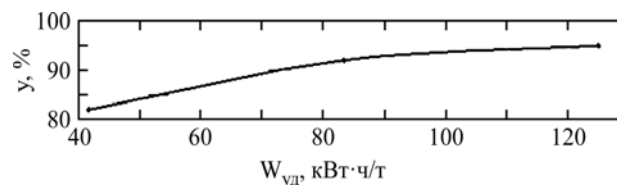


Рис. 4. Образцы печатных плат до и после разрушения. (а) – до разрушения; (б) – после разрушения.

Рис. 5. Зависимость параметра  $y$  от фракционного состава дробления.Рис. 6. Зависимость параметра  $y$  от удельных затрат энергии электроразрядов.

Параметры электроразрядной установки устанавливались расчетным путем. Основным силовым фактором, обеспечивающим эффективность электроразряда, является давление волн сжатия. Для разрушения печатных плат, в основе которых используются металлические соединения, припой, электронные изделия, а также гетинакс,

текстолит, стеклотекстолит с пределом прочности на сжатие более 200 МПа, требуется давление в импульсе, превышающее их прочность. Связь давления волн сжатия с параметрами электроразряда установлена в работе [13]. Для зоны цилиндрической симметрии ( $r \leq 2,5 l_{pn}$ ), что имеет место в установках по разрушению неме-

таллических материалов, амплитудные значения волн сжатия определяются выражением:

$$P = \frac{U_0^{5/4} C^{1/4}}{r^{1/2} L^{3/8} l_{pn}^{5/8}}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиальная координата, определяющая расстояние объекта воздействия до оси канала разряда, м;  $U_0$  – напряжение разрядного контура, В;  $C$  – емкость накопителей, мкФ;  $L$  – индуктивность, мкГн;  $l_{pn}$  – длина разрядного промежутка, м.

Введя коэффициент пропорциональности ( $k$ ), характеризующий превышение давления волн сжатия над пределом прочности ( $\sigma_{пр}$ ) разрушаемого материала, можно записать равенство:

$$\frac{U_0^{5/4} C^{1/4}}{r_k^{1/2} L^{3/8} l_{pn}^{5/8}} = k \sigma_{пр}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{пр}$  может быть пределом прочности материала на сжатие, растяжение, сдвиг, скалывание, изгиб и др.

Все перечисленные пределы прочности хрупких материалов взаимосвязаны с пределом прочности на сжатие, согласно теории Мора [14]:

$$\sigma_{сдвиг} = (5-10)\% \sigma_{сж};$$

$$\sigma_{изг.} = (7-15)\% \sigma_{сж};$$

$$\sigma_{скал} = 0,5 \sqrt{\sigma_{сж} \sigma_{рас}}.$$

При дезинтеграции материалов в зоне полей давлений, генерируемых электроразрядом, имеют место все виды деформаций. За пределами этих полей в так называемых «мертвых» зонах объект не испытывает достаточного для разрушения воздействия.

В табл. 1 представлены результаты расчетов полей давления волн сжатия, генерируемых электроразрядами, при обработке печатных плат в их активной зоне в зависимости от емкости накопителя ( $C$ ) и расстояния до канала разряда ( $r$ ).

Сопоставляя прочность печатных плат и максимальное давление волн сжатия в пределах канала разряда, размер радиуса реактора ограничен в пределах 0,2 м, а интервал величины емкости накопителей для исследований с учетом прочности плат составляет  $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \leq C \leq 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ .

На рис. 3 представлена собранная для экспериментов электроразрядная установка.

В табл. 2 представлены основные параметры электроразрядной установки для разрушения печатных плат.

Опыты по оптимизации параметра  $y$  проводились в режиме варьирования диапазонов значений параметров электроразрядной установки в интервалах, изложенных в табл. 3.

Оптимизация параметра  $y$  для каждого опыта производилась путем взвешивания массы загруженных однотипных плат и выгруженных после обработки, с фиксированием относительной массы отделившихся компонентов.

В табл. 4 представлены результаты оптимизации параметра  $y$ .

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Полученный в результате опытов статистический материал дает возможность установить степень влияния параметров электроразряда на параметр  $y$ .

Анализ результатов (табл. 4) показывает, что для разделения компонентов печатных плат оптимальным вариантом является запасенная энергия электроразряда  $W = 2,5$  кДж. Увеличение энергии ( $W$ ) в два раза, до 5,0 кДж, обеспечивает увеличение параметра  $y$  не более чем на 5%. При этом, как показали эксперименты, степень отделения компонентов зависит от размеров частиц дробления печатных плат.

На рис. 4 показаны образцы печатных плат до и после электроразрядной обработки.

На рис. 5 показана зависимость параметра  $y$  от фракционного состава дробления образцов печатных плат.

На рис. 6 представлена экспериментально установленная зависимость параметра  $y$  от удельных затрат энергии. Наиболее целесообразная оптимизация процесса разделения компонентов печатных плат возможна при удельных затратах энергии 85 кВт·ч/г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, электроразрядную технологию можно использовать для утилизации печатных плат любого типа с пластмассовой основой толщиной не более 0,5 мм.

В отличие от других механизмов электроразряд обеспечивает разделение компонентов без использования химических реагентов с соблюдением всех норм экологии.

Для утилизации плат с пластмассовой основой толщиной более 0,5 мм требуются дополнительные исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лолейт С.И., Стрижко Л.С. *Извлечение благородных металлов из электронного лома*. М.: Руда и металлы, 2009. 156 с.
2. *Переработка вторичного сырья, содержащего драгоценные металлы*. Под ред. Ю.А. Карпова. М.: Госкомдрагмет. Гиналмаззолото, 1996. 290 с.
3. Медведев А.М., Арсеньев С.М. *Компоненты и технологии*. 2008, (10), 153–159.

4. Чернюк О.В., Шуляк Т.И., Козловский К.П., Пластовец А.В. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008, (244), 62–64.
5. Гетманов В.В., Каблуков В.И. *Электролитическая переработка отходов средств вычислительной техники, содержащей драгоценные металлы*. МГТУ «Экологические проблемы современности». 2009.
6. Самсонов А.И. Козловский К.П., Пластовец А.В. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2004, (9), 56–59.
7. Локшин Э.П., Ворончук С.И., Кузьмич О.В., Ковалевский В.П. *Цветные металлы*. 2010, (9), 67–69.
8. Козловский, К.П., Пластовец Т.И., Шуляк А.В. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003, (4), 74–75.
9. Williams D.P., Dreks P. *Recovery of precious metals from electronic scrap*. Proc. 6th Int. Precious Metals Conf. Newport Beach, Calif June 1982. Toronto, Pergamon Press. 1983, 555–565.
10. Шевченко В.И., Кривашина Е.С., Осипов В.И. и др. *Переработка отходов продукции радио-электронных и электротехнических отраслей в СССР и за рубежом*. Обзор НИОКР и информ.-патент. матер. М.: Радио и связь, 1990. 317 с.
11. Бредихин В.Н., Кожанов В.А., Маняк Н.А., Кушнеров А.Ю. *Благородные металлы*. Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2009. 525 с.
12. Ризун А.Р., Цуркин В.Н. *ЭОМ*. 2002, (1), 83–85.
13. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
14. Лысенко М.П. *Состав и физико-механические свойства грунтов*. М.: Недра, 1980. 272 с.

Поступила 28.12.15

После доработки 20.07.16

### Summary

This paper proposes a new process for the separation of components in the disposal of waste printed circuit boards and possibly other electronic waste production.

*Keywords: electric discharge, printed circuit boards, electrode system, disposal.*