

# Влияние параметров разряда на эффективность электроразрядного разрушения электронных печатных плат

\*В. М. Алексеенко, А. А. Жерлицын, С. С. Кондратьев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИСЭ СО РАН), г. Томск, 634055, Россия, \* e-mail: [alexeenko@oit.hcei.tsc.ru](mailto:alexeenko@oit.hcei.tsc.ru)*

Поступила 19.06.2019  
После доработки 16.09.2019  
Принята к публикации 18.09.2019

Приведены результаты электроразрядного дробления электронных печатных плат до миллиметрового размера фракций, пригодных для последующей сепарации металла от диэлектрика. Дробление выполнялось на высоковольтном импульсно-периодическом генераторе при варьировании числа импульсов, емкости высоковольтного накопителя от 4 до 15 нФ, выходного напряжения от 140 до 300 кВ и длины разрядного промежутка в камере дробления от 6 до 10 мм. Результаты подтверждают возможность электроразрядного разрушения электронных печатных плат различных типов, включая четырехслойные со стеклотекстолитовой основой, и позволяют оптимизировать параметры разрядного контура на основании критериев производительности и энергоэффективности процесса дробления.

*Ключевые слова:* электроразрядная технология, переработка, печатные платы

УДК 621.9.044

DOI: 10.5281/zenodo.3640326

## ВВЕДЕНИЕ

Электронные печатные платы являются неотъемлемой и ценной частью электронных отходов. Переработка печатных плат обладает большим потенциалом, что обусловлено значительным содержанием в них металлов. В мировой практике извлечение металлов осуществляют посредством механической переработки плат, пирометаллургии, гидрометаллургии или сочетания этих технологий. Сжигание и плавление, а также процессы гидрометаллургии отличаются большой материало- и энергоемкостью, создают экологическую опасность для окружающей среды.

В методах, основанных на механическом дроблении электронных плат, получают дезинтегрированный размельченный материал, который далее разделяется различными способами [1–3]. При этом для эффективной сепарации важно, чтобы получаемый механическим путем материал был однородным, с размером фракций порядка 0,1–1 мм [3, 4]. Немаловажно и обеспечение низкой энергозатратности, а также выполнение экологических требований механическими методами дробления.

Обоснованные предпосылки для эффективного дробления плат имеет электроразрядный метод, в котором рабочим инструментом является канал разряда с высокой концентрацией энергии порядка 100 кДж/см<sup>3</sup>. Метод электроразрядного дробления, в частности, развивался применительно к задаче извлечения драгоценных

и редких металлов из горных пород [5, 6]. Результаты работ демонстрируют высокую селективность разрушения, лучшее извлечение и меньшее содержание тонкодисперсных включений в сравнении с традиционными механическими методами. Селективность дезинтеграции достигается за счет отличия компонентов по диэлектрическим, прочностным, деформационным и акустическим свойствам.

Электронные печатные платы обладают сложным многокомпонентным составом. Поскольку основные компоненты печатных плат значительно отличаются по плотности и электропроводимости, то представляет интерес использование электроразрядного метода для их дезинтеграции [7–9].

Наиболее распространенными основами для изготовления печатных плат являются фольгированные стеклотекстолит (FR-4) и гетинакс (FR-2). FR-4 используется, как правило, в сложных дорогостоящих электронных устройствах, FR-2 – в бытовой электронике. Помимо материала основания, платы различаются числом токопроводящих медных слоев. Материал диэлектрической основы, а также количество токопроводящих слоев определяют механические свойства плат и энергозатраты на их измельчение.

В работе приведены результаты электроразрядного дробления электронных печатных плат различных типов до миллиметрового размера фракций, пригодных для последующей сепарации металла от диэлектрика. Представлены информация по фракционному составу

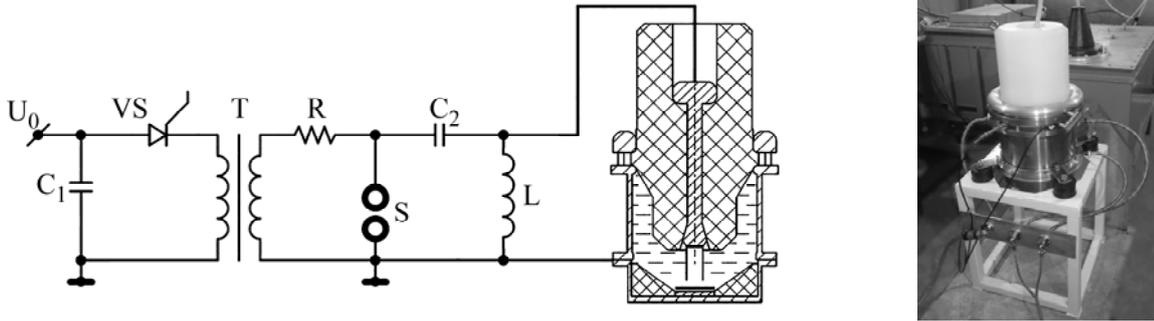


Рис. 1. Схема генератора и фотография камеры для электроимпульсного дробления.

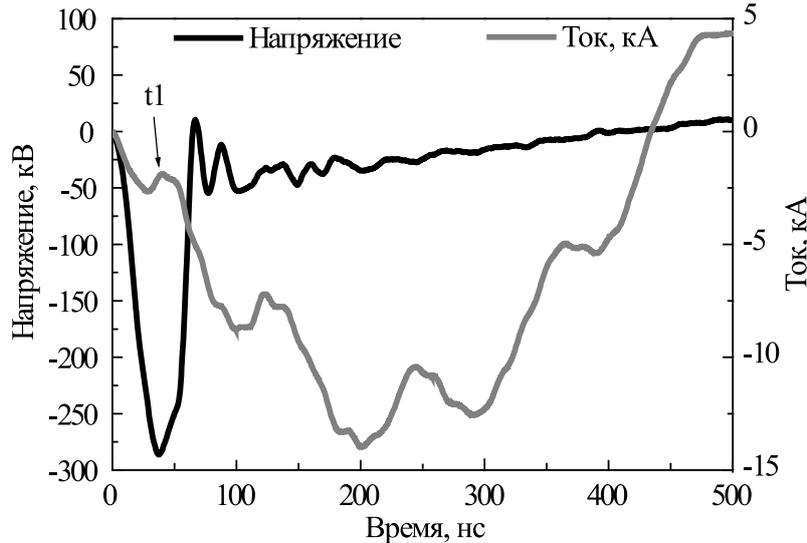


Рис. 2. Осциллограммы напряжения  $U$  и тока разряда  $I$  накопителя  $C_2$  емкостью 8 нФ с зарядным напряжением 286 кВ. Зазор 8,8 мм.

получаемого материала и данные по оптимизации параметров разрядного контура для эффективного дробления.

#### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты выполнялись на высоковольтном импульсном генераторе с выходным каскадом в виде низкоиндуктивного емкостного накопителя, который через коммутатор и передающую линию разряжается на рабочий промежуток камеры дробления. Схема генератора и фотография камеры дробления приведены на рис. 1. Первичный емкостной накопитель энергии  $C_1$  коммутируется тиристором  $VD$  на первичную обмотку повышающего импульсного трансформатора  $T$  и заряжает высоковольтный накопитель энергии  $C_2$ . Емкостной накопитель  $C_2$  коммутируется неуправляемым газовым разрядником  $S$ , работающим в атмосфере сухого воздуха, на разрядный промежуток камеры дробления. Волновое сопротивление разрядного контура высоковольтного накопителя энергии порядка 10 Ом. Частота следования импульсов не более 5 Гц.

В камере дробления используется конфигурация с резко неоднородным электрическим полем. Потенциальный электрод выполнен в форме тонкостенного цилиндра диаметром 40 мм. На заземленном плоском электроде размещается фрагмент печатной платы. Объем камеры дробления заполняется водой из водопроводной сети без дополнительной обработки. Удельное сопротивление воды  $\sim 10^4$  Ом·см.

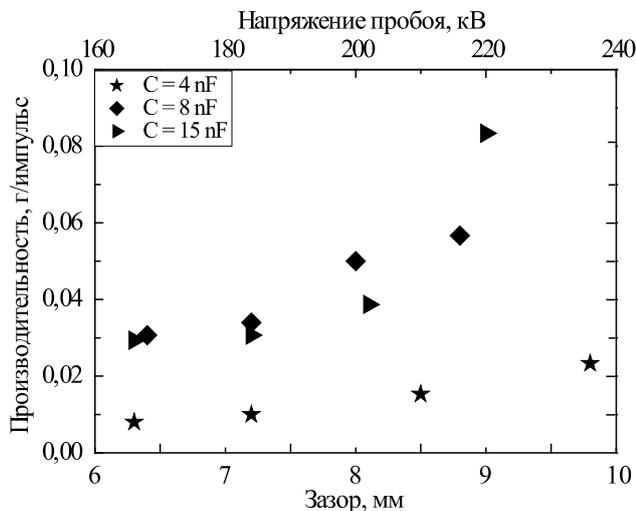
Пример осциллограммы разряда показан на рис. 2. За время  $t = 0$  принят момент коммутации разрядника  $S$ . Пробой межэлектродного промежутка в камере дробления происходит в момент времени  $t = t_1$ . До момента пробоя в камере протекает ток проводимости воды до 2,5 кА и рассеивается энергия  $\sim 16$  Дж.

#### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗЯДНОГО КОНТУРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ

Эффективность разрушения печатных плат определяется давлением ударной волны, генерируемой искровым каналом, и зависит от параметров генератора. Оптимальные условия преобразования электрической энергии в меха-

ническую можно найти, варьируя параметры разрядного контура [10]. Поскольку индуктивность разрядного контура определяется конструкцией генератора и разрядной камеры, то варьируемыми параметрами остаются емкость и напряжение. В экспериментах емкость высоковольтного накопителя изменялась от 4 до 15 нФ. Зарядное напряжение высоковольтного накопителя варьировалось от 140 до 300 кВ. Длина разрядного промежутка в камере составляла 6–10 мм и выбиралась такой, чтобы обеспечить пробой при напряжении, близком к зарядному напряжению емкостного накопителя. На этапе оптимизации параметров в качестве разрушаемого объекта использовались образцы размером  $60 \times 60 \text{ мм}^2$  из стеклотекстолита толщиной 3 мм. На образец воздействовали фиксированным числом импульсов – 30, после чего определялась потеря массы образца с помощью электронных весов с точностью до 0,02 г.

Зависимость производительности разрушения образцов от напряжения и длины разрядного промежутка при емкости высоковольтного накопителя 4, 8 и 15 нФ показана на рис. 3. Производительность определялась как потеря массы образца, пересчитанная на один импульс.

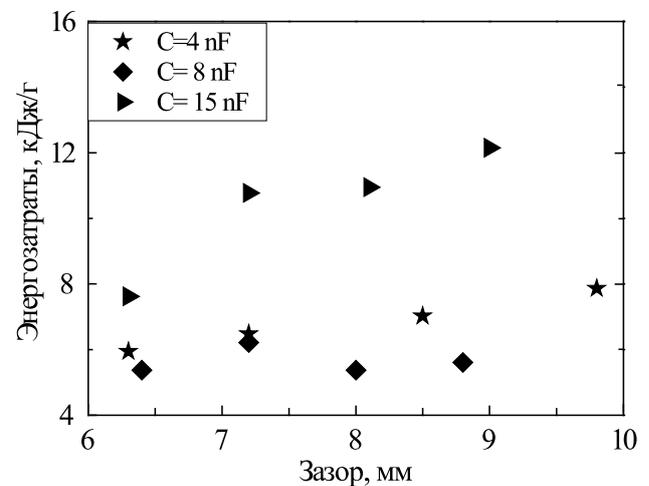


**Рис. 3.** Производительность дробления в зависимости от длины искрового промежутка, усредненная за 30 импульсов.

Увеличение емкости накопителя позволяет увеличить энергию, вкладываемую в разряд и расходующую на механическое разрушение, тем самым повышая производительность установки. Однако повышение производительности не пропорционально увеличению энергии накопителя. Так, при увеличении емкости с 4 до 8 нФ наблюдается примерно трехкратный рост производительности. Дальнейшее увеличение емкости до 15 нФ значимого прироста производительности не дает.

Увеличение напряжения пробоя на разрядном промежутке, определяемого длиной промежутка, приводит к росту тока разряда и производительности. В этом смысле увеличение напряжения желательно. В то же время использование больших напряжений повышает требования к изоляции и снижает технологичность установки.

Помимо производительности важной характеристикой электроразрядного метода дробления является эффективность преобразования запасенной в накопителе энергии в механическую работу. На рис. 4 приведена зависимость энергозатрат процесса дробления от емкости высоковольтного накопителя и напряжения пробоя (величины зазора) искрового промежутка. Энергозатраты определялись как количество запасенной энергии, необходимой для извлечения 1 г материала из образца.



**Рис. 4.** Энергозатраты на извлечение 1 г образца в зависимости от емкости высоковольтного накопителя и длины искрового промежутка.

Из диаграммы видно, что минимальные энергозатраты реализованы при емкости высоковольтного накопителя 8 нФ. Влияние длины зазора на энергозатраты для этого случая явно не выражено.

### ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ИМПУЛЬСОВ НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ

На следующем этапе при фиксированных параметрах разрядного контура исследовалось электроразрядное разрушение трех распространенных типов электронных печатных плат: однослойных плат из гетинакса, двухслойных и четырехслойных плат из стеклотекстолита. Основываясь на вышеуказанных данных, выбраны оптимальная величина емкости высоковольтного накопителя  $C_2 = 8 \text{ нФ}$  и зазор 10 мм, обеспечивающие оптимальное соотношение между энергозатратами в процессе дробления материала и производительностью дробления.

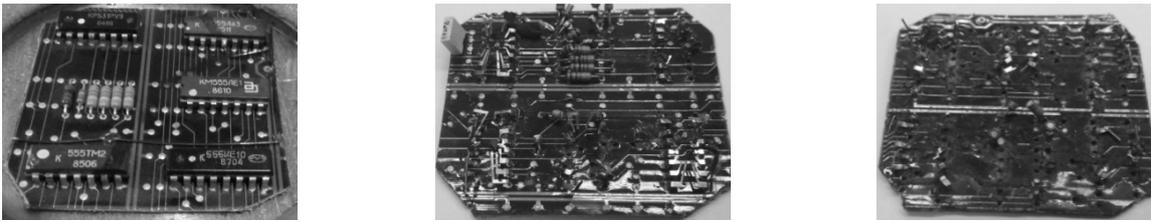


Рис. 5. Фотографии четырехслойной платы с навесными элементами: исходная, после 100 и 250 импульсов.

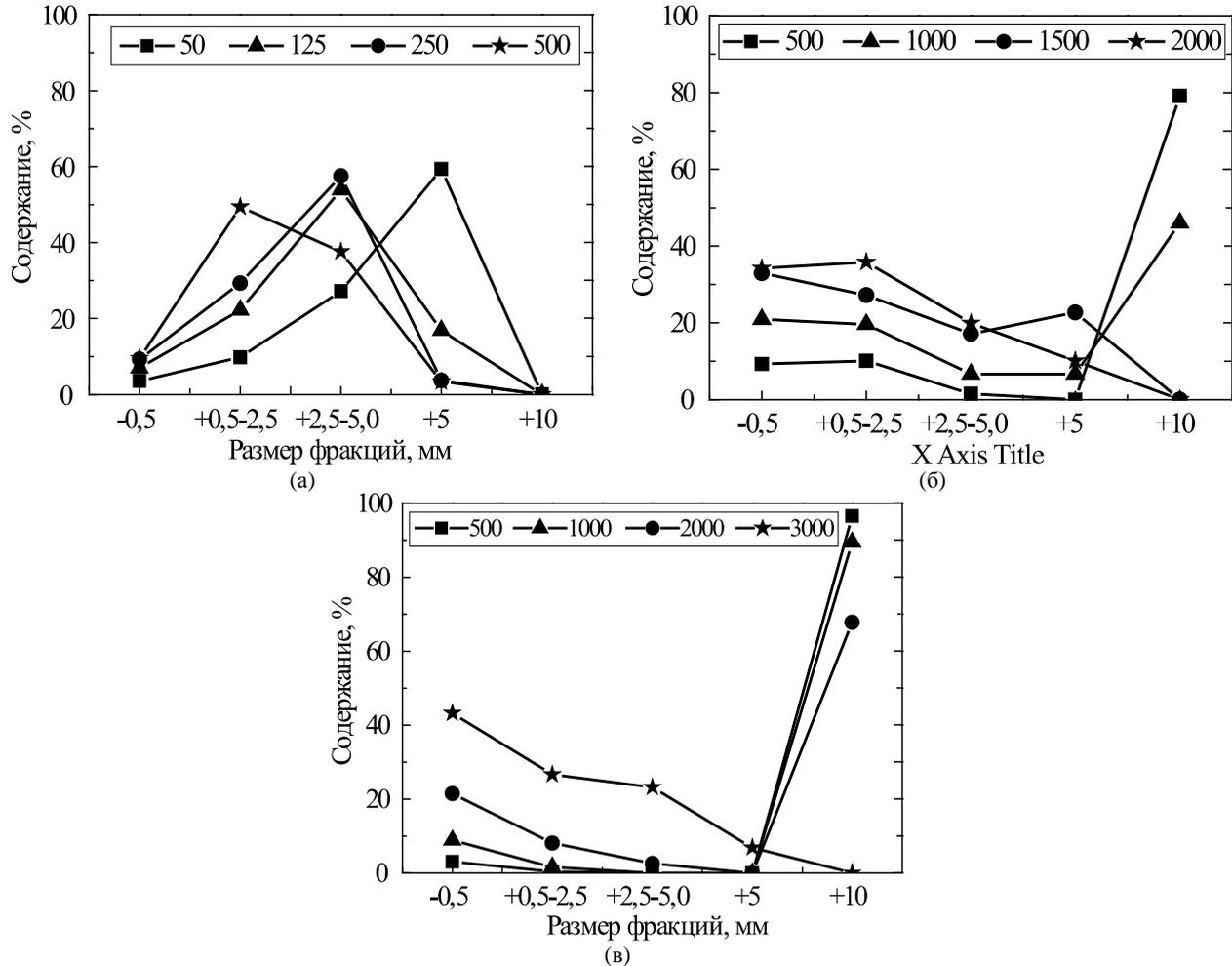


Рис. 6. Диаграммы зависимости фракционного состава от количества импульсов для однослойных плат из гетинакса (а), двухслойных (б) и четырехслойных плат (в) из стеклотекстолита.

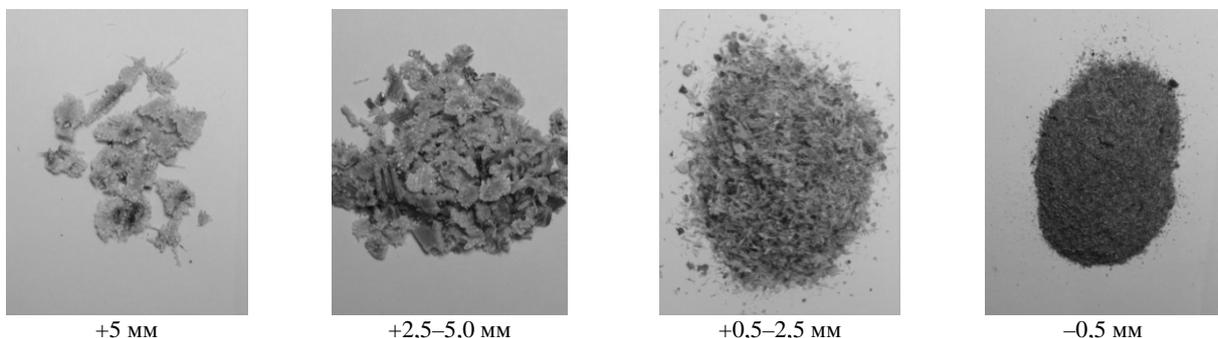


Рис. 7. Фотографии фракций, получаемых после дробления четырехслойной платы.

Электронные платы нарезались на образцы размером  $60 \times 60 \text{ мм}^2$ .

Вначале оценивалась возможность обработки плат без удаления навесных элементов. На рис. 5 показаны исходный образец четырехслойной платы с навесными элементами и ее внешний вид после 100 и 250 импульсов. Для полной

очистки таких плат от электронных компонентов (резисторы, конденсаторы, полупроводниковые элементы и подобное) требуется около 250 импульсов. При дальнейшем увеличении импульсов начинается разрушение непосредственно самой платы.

В дальнейшей работе производилась очистка плат от навесных элементов до обработки для снижения вероятности искажения результатов. Для исследования влияния количества импульсов на фракционный состав выбирались по четыре образца каждого типа плат с близкой конфигурацией (количество проходных отверстий и площадь проводящих дорожек), и на каждый образец воздействовали разным количеством импульсов. Затем продукты дробления последовательно просеивали через набор металлических сеток с разным размером ячейки и получали разделение продуктов дробления на фракции размером: +5, +2,5–5, +0,5–2,5 и –0,5 мм. После этого фракции высушивались и взвешивались.

Зависимости фракционного состава от количества импульсов для трех типов плат показаны на рис. 6. Пример внешнего вида фракции после электроразрядного дробления приведен на рис. 7.

Стоит отметить, что дробление однослойных печатных плат из гетинакса значительно отличается от дробления плат из стеклотекстолита. Основное отличие связано со значительно меньшей (в разы) механической прочностью гетинакса. Вследствие этого уже после 100 импульсов получаемые фракции в основном имеют размер менее 5 мм. В случае дробления двухслойных плат из стеклотекстолита для достижения фракционного состава с преимущественным размером фракции > 5 мм требуется более 1000 импульсов, а в случае четырехслойных плат из стеклотекстолита – не менее 3000 импульсов. Дробление последнего типа плат электроразрядным методом наиболее энергозатратно, что обусловлено наличием в них внутренних сплошных медных слоев питания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы подтверждают возможность разрушения электронных печатных плат различных типов, включая четырехслойные со стеклотекстолитовой основой, электроразрядным методом. Выполнена оптимизация параметров контура на основании критериев производительности и энергоэффективности процесса дробления. Определены зависимости фракционного состава продуктов дробления от количества импульсов в цикле и показана возможность получения фракций субмиллиметрового размера. Полученные данные позволяют подобрать режим электроразрядного дробления, обеспечивающий максимальный выход фракции необходимого размера для полного отделения металла от диэлектрика.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-29-24079 мк.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhao Y., Wen X., Li B. *Miner Metall Process.* 2004, **21**(2), 99–102.
2. Estrada-Ruiz R.H., Flores-Campos R., Gámez-Altamirano H.A., Velarde-Sánchez E.J. *J Hazard Mater.* 2016, **311**, 91–99.
3. Burat F., Ozer M. *Physicochem Probl Miner Process.* 2018, **54**(2), 554–566.
4. Sarvar M., Salarirad M.M., Shabani M.A. *J Waste Manag.* 2015, **45**, 246–257.
5. Ito M., Owada S., Nishimura T., Ota T. *Int J Miner Process.* 2009, **92**, 7–14.
6. Anders U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses. *Int J Miner Process.* 2010, **97**, 31–38.
7. Duan C.L., Diao Z.J., Zhao Y.M., Huang W. *Miner Eng.* 2015, **70**, 170–177.
8. Martino R., Iseli C., Gaydardzhiev S., Streicher-Porte M. et al. *Miner Eng.* 2017, **107**, 20–26.
9. Ризун А.Р., Денисюк Т.Д., Домерщикова А.О. *ЭОМ.* 2017, **53**(2), 110–114.
10. Ризун А.Р., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д. *ЭОМ.* 2003, (4), 74–84.

## Summary

The results of the electric discharge crushing of *printed circuit boards* (PCB) to millimeter-sized fractions suitable for separation of a metal from a dielectric are presented. The crushing was performed on a high-voltage repetitively pulsed generator, varying the number of pulses, the capacity of the high-voltage storage from 4 to 15 nF, the output voltage from 140 to 300 kV, and the length of the discharge gap in the reaction chamber from 6 to 10 mm. The results of the work confirm the possibility of electrical discharge destruction of various types of PCB, including PCB with four layers and a fiberglass cloth, and allow optimizing the discharge circuit parameters based on performance criteria and energy efficiency of the crushing process.

*Keywords:* electric discharge technology, reutilizing, printed circuit board