

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПРОВОДИМОСТЬЮ ОТ $10$ ДО $10^5$ См/м

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

**Введение.** Известно [1], что под воздействием сильного электрического поля в веществе (в зависимости от того, является оно диэлектриком или проводником) может формироваться разряд, реализующийся в виде электрического пробоя (ЭП) или электрического взрыва (ЭВ). Однако веществ, обладающих идеальной проводимостью или являющихся идеальными диэлектриками, в природе не существует, поэтому реальные вещества, содержащие различные примеси, могут занимать промежуточное положение и проявлять те или иные свойства. Нишу с диапазоном проводимости  $10 < \sigma < 10^5$  См/м занимают композиционные проводники. Композиционный проводник представляет собой гетерогенную систему из двух или нескольких фаз, из которых одна является проводящей. В качестве компонентов проводящей фазы используют порошкообразные полупроводники с малой энергией активации в мелкодисперсном состоянии, иногда в сочетании с металлами.

Чтобы электрические свойства композиции приближались к свойствам проводящей фазы, последняя должна быть сплошной, а проводимость непроводящей фазы – значительно меньше общей проводимости композиции. Объемная концентрация проводящей фазы в композиции превышает некоторый минимум, при котором возникает вероятность образования непрерывных цепей из контактирующих частиц проводника, диспергированного в композиции. При этом образование проводящей структуры происходит во всем объеме композиции.

Особенности развития электрического разряда в таких системах изучены слабо, поэтому цель работы – исследование зависимости характера протекания возможных видов высоковольтного электрического разряда в веществе от его параметров, в частности электропроводности.

**Методика проведения эксперимента.** В основу эксперимента положен метод регистрации разрядного тока и падения напряжения на исследуемом образце при его электрическом взрыве. В состав экспериментального стенда входил автотрансформатор АОМН-40-220-75У4, обеспечивавший плавную регулировку напряжения первичной обмотки трансформатора-выпрямителя ОМТВ-5/50-У4, с выходного выпрямителя которого через зарядное сопротивление  $R_3$  осуществлялась зарядка емкостного накопителя энергии  $C$ . В качестве последнего использовались конденсаторы типа К75-29-А. Коммутатором служил воздушный шаровой разрядник  $F$ , на который с блока поджига подавался импульс высокого напряжения. Блок поджига БП запускался прямоугольным импульсом с выхода генератора Г5-60. Одновременно с генератора подавался синхроимпульс на вход синхронизации запоминающего осциллографа С8-17.

Электроразрядная камера была оборудована электродной системой с подпружиненными контактами, обеспечивающими надежный электрический контакт и снижающими уровень помех при измерениях. На дне камеры имелся слив, через который извлекалась жидкость с продуктами взрыва образцов. Электрическими датчиками были коаксиальный низкоомный шунт  $R_{ш}$  и емкостный экранированный делитель  $Z_{д1}/Z_{д2}$ . Регистрация электрических сигналов осуществлялась запоминающим двухлучевым осциллографом С8-17.

Полученные в ходе эксперимента осциллограммы тока и напряжения сканировались и оцифровывались, дальнейшая обработка проводилась на ЭВМ. Временные зависимости тока были численно проинтегрированы. Величина  $L \frac{dI}{dt}$  является индуктивной составляющей напряжения, а раз-

ности напряжений с делителя и их индуктивных составляющих дают значения активных составляющих напряжений рассматриваемых процессов. Таким образом, проводилась численная компенсация индуктивной составляющей. По полученным сигналам напряжения и тока определялись временные характеристики и активные сопротивления канала разряда. Численно определяли мощность и энергию, выделившуюся за время процесса. Точность измерений контролировалась по балансу энергии в разрядной цепи.

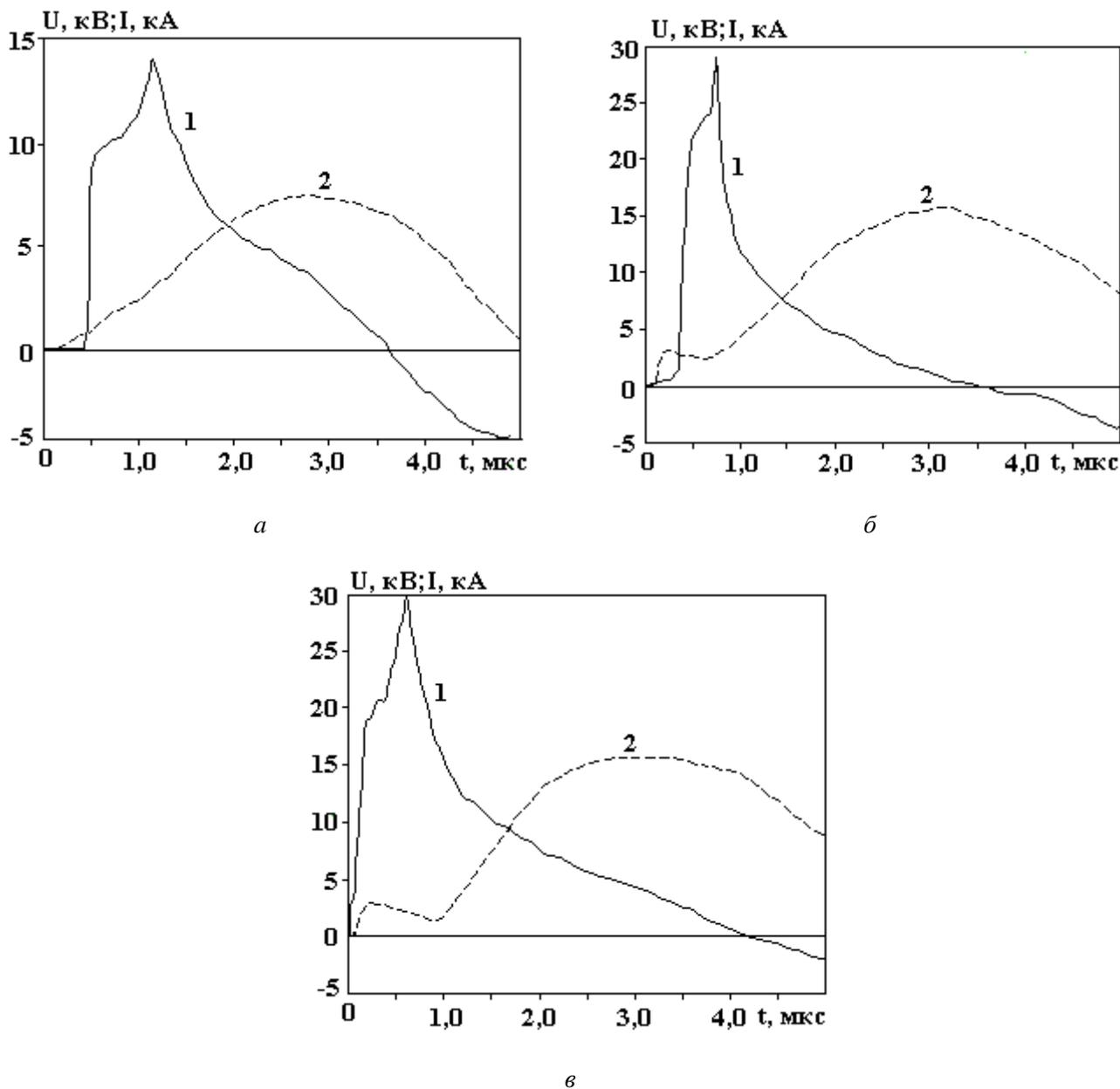


Рис. 1. Временные зависимости тока и напряжения при электровзрыве углеродсодержащих композитных проводников. 1 – напряжение; 2 – ток. а –  $R = 3 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 25 \text{ кВ}$ ; б –  $R = 21,1 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 25 \text{ кВ}$ ; в –  $R = 21,1 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 30 \text{ кВ}$

Электровзрыв проводников осуществлялся при изменении запасенной энергии конденсаторной батареи  $W_0$  от 12 до 1000 Дж при индуктивности разрядного контура  $L = 2,3 \text{ мкГн}$ . Зарядное напряжение  $U_0$  и емкость  $C$  конденсаторной батареи изменяли от 5 до 40 кВ и от 1 до 3 мкФ соответственно.

Нами осуществлялся электровзрыв углеродистых и композитных пленок, покрывающих поверхность керамических цилиндров. Композитные пленки включали в себя металлосилициловые сплавы и представляли собой микрокомпозицию металла, полупроводника и диэлектрика. Размеры углеродистых пленок в зависимости от начального сопротивления (3; 22,1; 80,6 Ом) составляли

8x25,1; 19x21; 25,5x39 мм<sup>2</sup>, толщина пленок – от 0,2 до 0,3 мкм. А размеры композитных кремнийсодержащих пленок (при их начальных сопротивлениях 30 и 91 Ом) были соответственно 7,3x18 и 24x10,5 мм<sup>2</sup>, толщина – от 0,2 до 0,3 мкм.

Кроме того, осуществляли электровзрыв германиевого образца, сопротивление которого составляло 81 кОм.

**Результаты экспериментов.** Осциллограммы тока и напряжения, полученные при ЭВ таких полупроводниковых образцов, приведены на рис. 1–4. Сравнение этих осциллограмм с ЭВ графитовых проводников [2] показало, что ЭВ образцов из композиционных материалов сопротивлением до 100 Ом подобен разряду в других проводящих веществах. Имеются пики напряжения, свидетельствующие о наличии фазовых переходов первого рода (см. рис. 1, 3), токовые паузы с вторичным пробоем (для углеродистых пленок с высоким сопротивлением – рис. 2). Значения величины пика напряжения  $U_n$  и амплитуд первого  $I_{m1}$  и второго  $I_{m2}$  импульсов тока приведены в таблице.

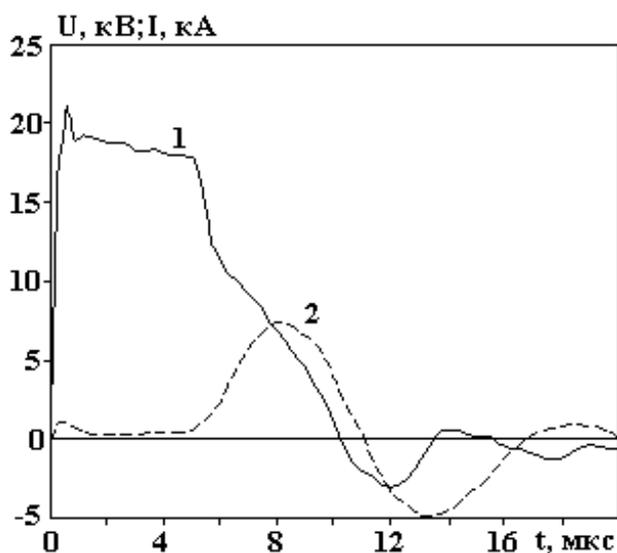


Рис. 2. Временные зависимости тока и напряжения при взрыве углеродсодержащего композитного проводника. 1 – напряжение; 2 – ток.  $R = 80,6 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 20 \text{ кВ}$

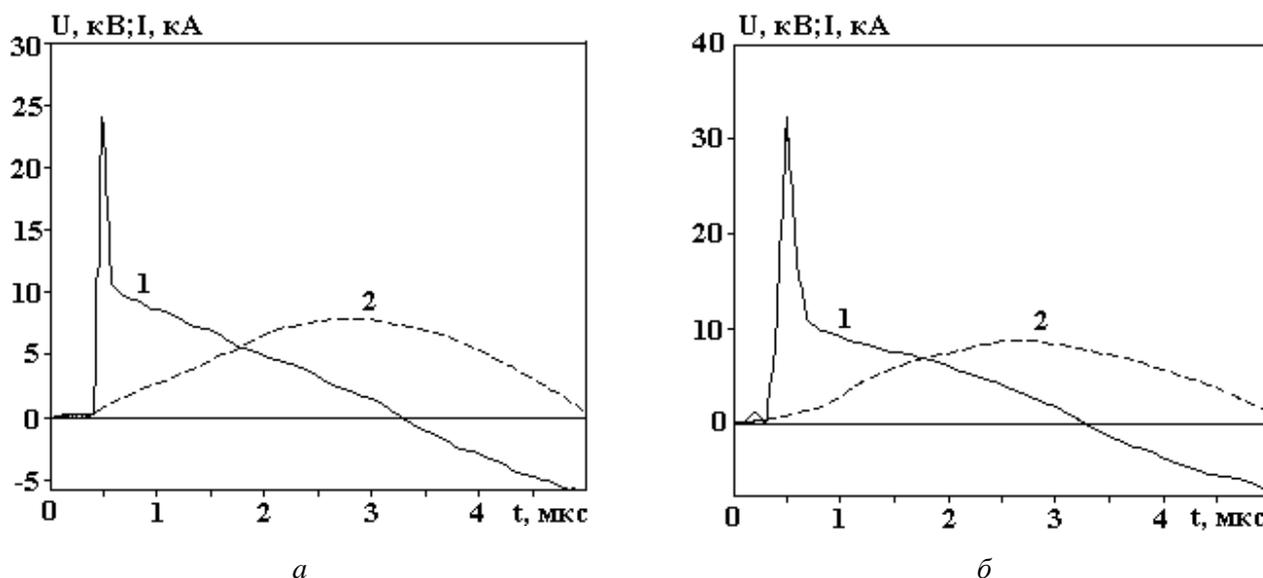


Рис. 3. Временные зависимости тока и напряжения при электровзрыве кремнийсодержащих композитных проводников. 1 – напряжение; 2 – ток. а –  $R = 30 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 25 \text{ кВ}$ ; б –  $R = 91 \text{ Ом}$ ,  $U_0 = 29 \text{ кВ}$

Характеристики ЭВ композитных и полупроводниковых образцов

| Материал          | $U_0$ , кВ | $R$ , Ом | $U_n$ , кВ | $I_{m1}$ , кА | $I_{m2}$ , кА |
|-------------------|------------|----------|------------|---------------|---------------|
| Углеродсодержащий | 25         | 3,0      | 14         | 7,4           | –             |
| –//–              | 25         | 22,1     | 20,2       | 3,2           | 15,7          |
| –//–              | 30         | 22,1     | 30         | 2,8           | 15,7          |
| –//–              | 20         | 80,6     | 20         | 1,0           | 7,4           |
| Кремнийсодержащий | 25         | 30       | 24         | 7,8           | –             |
| –//–              | 29         | 91       | 32         | 8,7           | –             |
| Германий          | 30         | 81000    | 7,6        | 2,5           | –             |

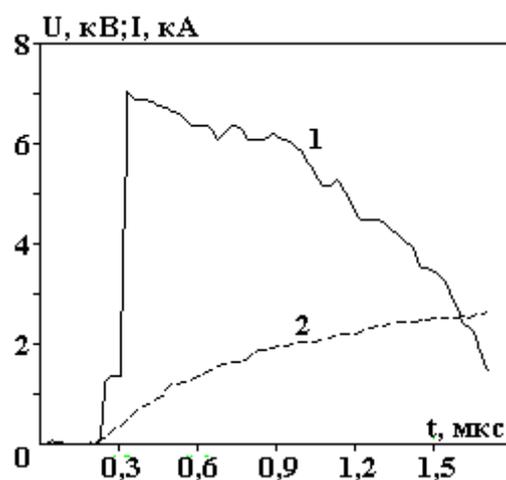
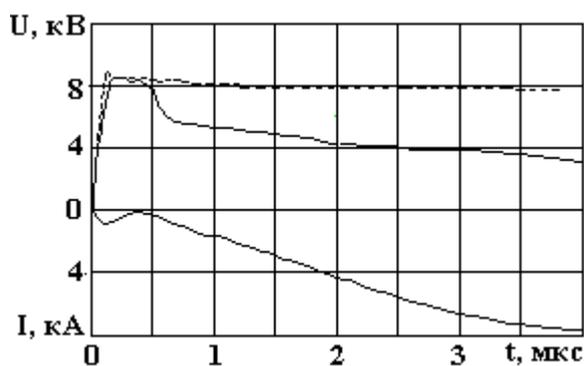
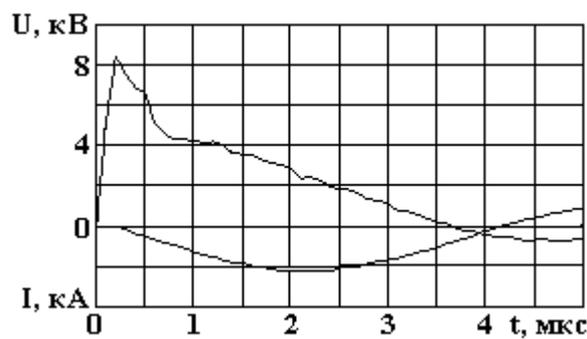


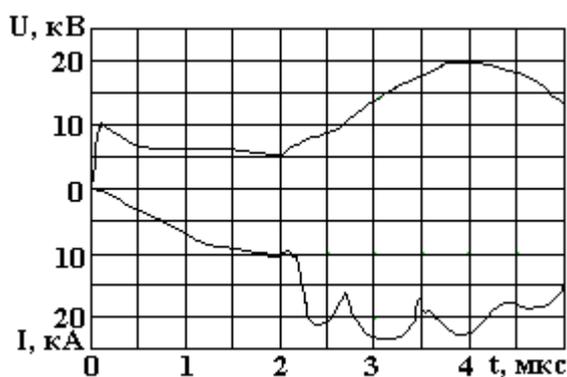
Рис. 4. Временные зависимости тока и напряжения при электровзрыве германиевого проводника. 1 – напряжение; 2 – ток.  $R = 81$  кОм,  $U_0 = 30$  кВ



а



б



в

Рис. 5. Временные зависимости тока и напряжения на плоском германиевом проводнике. а –  $U_0 = 10$  кВ,  $C = 3$  мкФ; б –  $U_0 = 10$  кВ,  $C = 0,5$  мкФ; в –  $U_0 = 28$  кВ,  $C = 3$  мкФ

Временные зависимости тока и напряжения ЭВ германиевого проводника (рис. 4) отличаются от осциллограмм композитных образцов, очевидно, вследствие его высокого начального омического сопротивления (81 кОм).

ЭВ пленки происходит неравномерно по ее поверхности, о чем свидетельствует резкая неоднородность окраски поверхности остатков керамической подложки этих пленок. На сером фоне этой поверхности наблюдается несколько (чаще всего два или три) широких белых с рваными краями следа от разрядов. Чем выше напряжение  $U_0$ , тем шире следы, которые могут охватить и всю поверхность пленки. Эти результаты хорошо согласуются с выводами работы [3] о неравномерном характере разрушения композитов при их импульсном электрическом пробое.

Кроме того, было проведено экспериментальное исследование развития разряда в плоских прямоугольных германиевых проводниках сопротивлением 5 кОм, имеющих толщину  $\delta = 0,25$  мм, длину  $l = 10$  мм, ширину  $h = 2$  мм и начальную проводимость  $\sigma_0 = 1,8 \cdot 10^2$  См/м. Емкость  $C$  составляла 0,5 и 3 мкФ, индуктивность  $L = 2$  мкГн. Зарядное напряжение  $U_0$  изменялось от 10 до 28 кВ.

На рис. 5 представлены полученные временные зависимости тока и напряжения. Анализ этих зависимостей показывает, что максимальное напряжение на образце растет до 8,5 кВ при  $U_0 = 10$  кВ и до 10,1 кВ при  $U_0 = 28$  кВ. Затем наблюдается падение напряжения, очевидно, вызванное формированием шунтирующего образец поверхностного канала разряда.

Зависимости  $I(t)$  и  $U(t)$ , приведенные на рис. 5, *а,б*, подобны получаемым при искровом разряде в жидкости с предпробивной стадией. Чем меньше емкость  $C$  при  $U_0 = 10$  кВ, тем круче спад напряжения при формировании разряда за время 0,5 мкс. Затем происходит разряд емкости  $C$  в основном через образовавшийся канал разряда. Штриховая линия на рис. 5, *а* – это осциллограмма напряжения при пробое межэлектродного промежутка без образца.

Увеличение напряжения  $U_0$  до 28 кВ привело к сокращению предпробивного времени до 0,1 мкс и значительному увеличению разрядного тока. Резкое увеличение напряжения и тока (рис. 5, *в*) при  $t \geq 2$  мкс может быть вызвано как действием на канал разряда волны давления, отраженной от электродной системы, так и процессами в образце. При  $U_0 = 10$  кВ энергии этой волны недостаточно для такого сжатия канала разряда, как при  $U_0 = 28$  кВ, приводящего к резкому росту его сопротивления.

С другой стороны, волна давления за 2 мкс при скорости 1500 м/с могла пройти двойное расстояние, равное лишь 3 мм. На таком расстоянии от канала металлических поверхностей, кроме электродной системы, в разрядной камере нет. Поэтому вполне вероятно, что такой характер поведения параметров пробоя может быть обусловлен процессами, происходящими в образце.

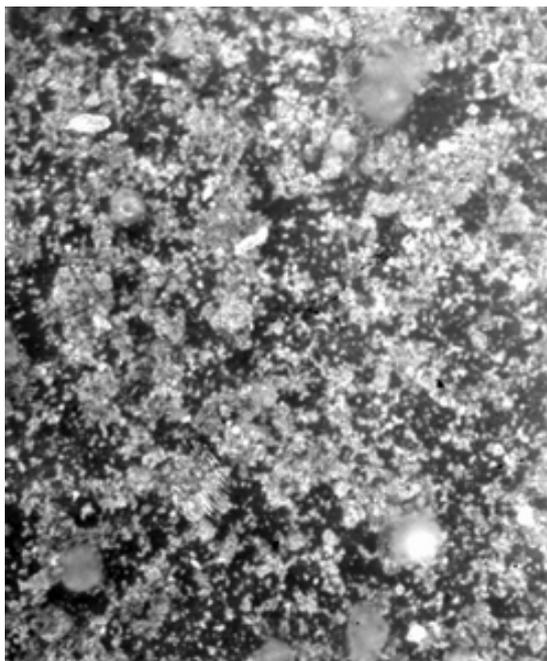


Рис. 6. Продукты ЭВ германиевого проводника  $\times 100$

Для исключения поверхностного разряда при исследовании образцов с большим сопротивлением  $R$  необходимо использовать жидкость, проводимость которой значительно меньше проводимости образца. Но и при проведении экспериментов в воде образцы германия были разрушены таким ЭВ на мельчайшие частицы. Фотография продуктов ЭВ германиевого образца, полученная с помощью микроскопа "Неофот-2", приведена на рис. 6. Анализ зависимости размера частиц от параметров разряда свидетельствует о том, что при различном энергоотводе реализуется как процесс разрушения композитных материалов по механизмам, указанным в [3], так и рост кластеров из атомарной плазмы в соответствии с данными работы [4].

**Выводы.** Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на некоторые особенности, для полупроводниковых, композиционных и металлических образцов сохраняются основные закономерности ЭВ, полученные ранее для графита [2]. Для рассмотренного интервала электропроводностей материалов ( $10 \text{ См/м} < \sigma < 10^3 \text{ См/м}$ ) различных образцов возможна реализация как электрического пробоя в них, так и электровзрыва, приводящего к получению микропорошков, размер которых определяется параметрами генератора и проводника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 206 с.
2. *Богуславский Л.З., Кускова Н.И., Петриченко В.Н., Хайнацкий С.А.* Электрический разряд в графите и его особенности // *Электронная обработка материалов.* 2002. № 3. С. 32–38.
3. *Курец В.И.* Влияние неоднородностей на характер разрушения композитов при их импульсном электрическом пробое // *Электронная обработка материалов.* 1986. № 6. С. 44–46.
4. *Лернер М.И.* Управление процессом образования высокодисперсных частиц в условиях электрического взрыва проводников: Автореф.дис. ... канд.техн.наук. Томск, 1988. 22 с.

*Поступила 27.12.05*

## Summary

The experimental investigations of the dependency of realization nature of the electric discharge in composite materials with the conductivity  $10 \text{ Sm/m} < \sigma < 10^5 \text{ Sm/m}$  on the power input mode were carried out. The work demonstrates that for the examined interval of various materials samples electroconductivity, the realization of both the electric breakdown in them, and the electric explosion that results in the receipt of micropowders which size is determined by the generator and conductor parameters is possible.