

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ  
ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ**

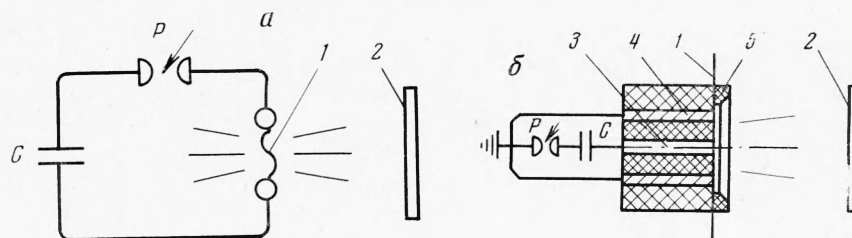
*Н. В. Гревцев, Ю. М. Каширников, В. А. Лелягин,  
Б. И. Махорин*

(Москва)

Исследуются особенности движения и конденсации паров металла и жидких капель при электрическом взрыве проволочек и фольги с различным конструктивным выполнением токоподводящих электродов с целью осуществления сепарации продуктов взрыва и получения бескапельных однородных конденсатов. Установлено, что поверхностные дефекты на пленках в виде деформированных капель, лунок и сквозных отверстий образуют капли размером свыше 0.1 мкм. Показано, что подобное явление может быть объяснено, исходя из специфики движения и конденсации парок капельных сред.

Обнаруженные различия в характере движения паров и капель позволили осуществить газодинамическую сепарацию продуктов взрыва и получить конденсаты с зеркальной поверхностью.

Метод электрического взрыва проводников позволяет получать незагрязненные конденсаты в условиях сравнительно невысокого вакуума (до  $10^{-5}$  мм рт. ст.) за время  $\sim (10^{-5} \div 10^{-4})$  сек. По ряду причин [1-5] продукты взрыва, как правило, неоднородны (представляют собой смесь пара и капель), а полученные конденсаты характеризуются наличием поверхностных дефектов (малодеформированные капли, лунки, сквозные отверстия) из-за термического и кинетического ударного воздействия капель.



Фиг. 1

Для получения бездефектных конденсатов (с зеркальной поверхностью) обычно стремятся создать условия взрыва [4-7], обеспечивающие полное испарение взрывающего проводника. Из-за многочисленных трудностей [1-7] в настоящее время известно лишь ограниченное количество работ [8,9], в которых сообщается о получении фазооднородных конденсатов (исключительно в лабораторных условиях).

В связи с этим представляет научный и практический интерес задача исследования возможности сепарации продуктов взрыва в процессе движения. С этой целью было предпринято изучение особенностей и характера движения капельной и паровой фазы распыленного материала для трех схем взрыва, изображенных на фиг. 1: электрический взрыв проволочек 1 (ЭВП) или фольги (ЭВФ) между двумя соосно расположенными электродами (фиг. 1, а) и коаксиальный электрический взрыв фольги 1 (КЭВФ) на торце коаксиальных электродов 3 и 4 (фиг. 1, б).

При КЭВФ размеры фольги на  $5 \div 10$  мм превышали наружный диаметр цилиндрического электрода 4. Прижатие фольги к электродам осуществлялось с помощью кольца 5 из диэлектрического материала. Подложка 2 располагалась на расстоянии  $20 \div 150$  мм от взрывааемого материала в зависимости от схемы взрыва.

Эксперименты проводились в вакууме  $p \sim 5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Взрывообразно расплылись алюминиевые и медные проволоочки и фольги. Использовались конденсаторы типа ИМ-5—140. Максимальная запасаемая энергия  $\sim 3,5$  кДж. Разрядный ток регистрировался с помощью пояса Роговского. Кинесъемка процесса разрушения образцов и движения продуктов взрыва осуществлялась с помощью камеры СФР-2М. Подложки из стекла и ситалла подогревали до  $150 \div 250^\circ$  С.

В [10] показано, что разрушение взрывааемого образца при КЭВФ (в отличие от ЭВП и ЭВФ [1, 2]) происходит не одновременно по всему объему, а постепенно от центрального электрода к периферийному. Закон распространения взрыва по фольге имеет вид

$$r(t) = A \left[ \int_0^t I^2(t) dt \right]^{1/2}, \quad A = (4\pi^2 \delta^2 Q_1 \sigma)^{-1/2} \approx \text{const}$$

Здесь  $Q_1$  — энергия, достаточная для взрывного испарения единицы объема материала фольги;  $\delta$  — толщина фольги;  $\sigma$  — удельная проводимость материала фольги.

На фиг. 2 представлены типичные осциллограмма тока и последовательные стадии разрушения образца при КЭВФ. Как видно из фиг. 2, а, на осциллограмме тока отсутствует пауза или характерные особенности [1, 2], имеющие место при объемном разрушении образца.

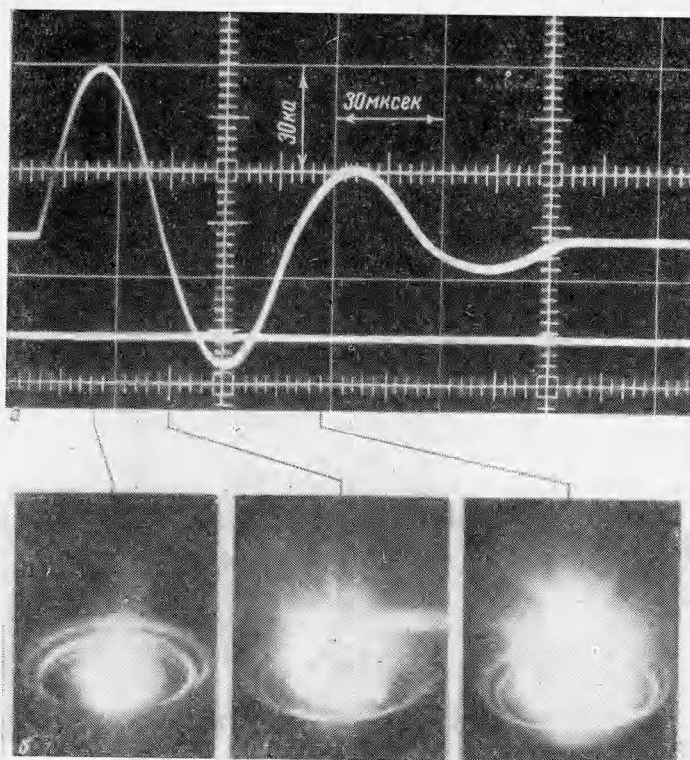
В связи с неодновременностью разрушения образца при КЭВФ (время разрушения  $T_*$  может составлять несколько полупериодов разрядного тока:  $T_* \approx (1 \div 3) T/2$ ), образование продуктов взрыва и вовлечение их в движение происходит непрерывно. Соотношение между паровой и капельной фазами в продуктах взрыва также непрерывно изменяется, поскольку центральная зона наиболее высокотемпературная и условия для парообразования здесь наиболее лучше, чем на периферии. К такому же выводу приводит анализ конденсации капель на подложке: плотность капель и их размеры возрастают от центра к периферии. Следовательно, источником каплеобразования являются главным образом периферийные участки фольги, а поскольку они разрушаются позднее центральных, то образующиеся капли отстают в движении от паров металла.

Таким образом, при КЭВФ вследствие постепенного разрушения фольги и неодновременности образования пара и капель наблюдается пространственно-временное разделение движущихся продуктов взрыва. В процессе движения указанное явление еще больше прогрессирует, поскольку скорость разлета паров (во всех вариантах взрыва) больше скоростей разлета капель [4, 5, 11].

Геометрия взрывааемого образца и схема взрыва оказывают существенное влияние на характер движения продуктов взрыва в целом. Так, при электрическом взрыве проволоочек продукты взрыва движутся (расширяются) равномерно во все стороны, сохраняя цилиндрическую симметрию относительно исходного положения взрывааемого образца. При ЭВФ движение продуктов взрыва анизотропно: основная масса распыленного материала летит в двух взаимно противоположных направлениях, перпендикулярных к плоским сторонам фольги.

При КЭВФ наблюдается направленный выброс продуктов взрыва в одну сторону, при этом движение носит осесимметричный характер.

Имеются общие для всех случаев взрыва закономерности движения частиц. В начальный момент разлет частиц происходит по нормали к исходной поверхности [12]. В дальнейшем пары металла всегда интенсивно расширяются, а жидкие металлические капли движутся по прямолинейным траекториям как материальные тела (визуально и особенно при фотокино съемках отчетливо видны прямолинейные светящиеся треки).



Фиг. 2

Поэтому можно считать, что пар и крупные капли движутся независимо друг от друга.

Исходя из специфики движения пара и капель, можно объяснить общий характер движения продуктов взрыва для всех рассмотренных схем.

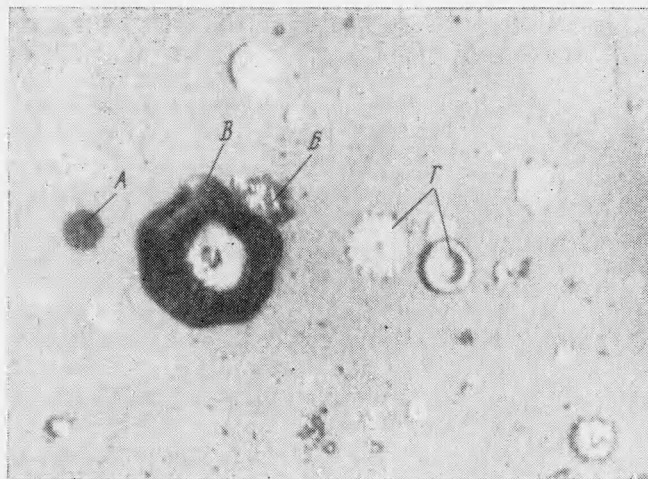
Для сепарации продуктов взрыва с целью получения бездефектных конденсатов необходимо выяснить: все капли образуют дефекты или только капли определенных размеров и почему?

При анализе полученных конденсатов на микроскопе МИМ-8М (увеличение 2000) не удалось обнаружить деформированных капель или следов от удара каплей размером менее  $0,3 \div 0,5 \text{ мкм}$ .

Для определения истинного размера каплей необходимо знать степень их деформации. Принимая  $h/D \approx 1/10$  [11], где  $h$  — толщина деформированной капли, имеющей форму плоской тонкой чешуйки,  $D$  — диаметр чешуйки, после вычислений (исходя из равенства объемов капли до и после деформации) получаем истинный диаметр капли  $d \approx 0,5 D$ . В данных экспериментах отношение толщины деформированной капли к ее диаметру колебалось в пределах от  $1/10$  до  $1/100$ . При  $h/D = 1/100$  получаем  $d = 0,25 D$ , т. е. соотношение между истинным и деформированным диаметрами капли

слабо зависит от степени деформации:  $d \approx (0.25 \div 0.5) D$ . Подставляя в данное соотношение минимальные значения диаметра деформированных капель  $D \approx 0.3 \div 0.5 \text{ мкм}$ , находим, что истинный размер дефектообразующих капель  $d > 0.1 \text{ мкм}$ .

Учитывая непрерывный характер распределения частиц по размерам при электрическом взрыве [13, 14], причину подобного явления, по мнению авторов, следует искать в специфике движения и конденсации парок капельных сред.



Фиг. 3

Известно [15], что в парок капельном потоке частицы размером менее  $0.1 \text{ мкм}$  хорошо «захватываются» газовой фазой и движутся в ней с одинаковой скоростью. Частицы больших размеров хуже или совсем не увлекаются газовой фазой (эффект скольжения). Подобная картина имеет место и при электрическом взрыве. Так, в [13] для измерения размеров частиц, взрыв в широком диапазоне запасаемых энергий осуществлялся в потоке нейтрального газа или воздуха, пропускаемого через фильтры, где и улавливались продукты взрыва. При этом максимальный размер частиц не превышал  $0.1 \text{ мкм}$ .

Можно считать, что при электрическом взрыве частицы размером менее  $0.1 \text{ мкм}$  движутся и конденсируются на подложке совместно и одновременно с паровой фазой. Вследствие высокой скорости конденсации паров (до  $1 \text{ см/сек}$ ), их большой энергии и плотности происходит значительный разогрев конденсата (вплоть до расплавления), что способствует улучшению структурного совершенства пленок [8].

Частицы свыше  $0.1 \text{ мкм}$ , отстающие в движении от паровой фазы и конденсирующиеся позднее, взаимодействуют уже с пленкой, полученной из сконденсированного пара. Поскольку начальные скорости этих частиц различны, а в дальнейшем они движутся практически по инерции (без существенного ускорения паровой фазой), то характер их взаимодействия с паровой пленкой различен (фиг. 3).

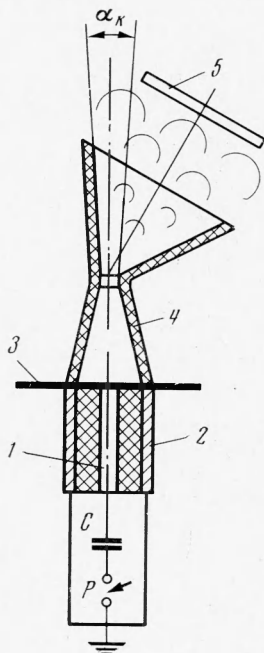
В зависимости от конкретного значения скорости и температуры капель они кристаллизуются на той или иной стадии деформации (на фиг. 3, B и Г представлены соответственно слабо и сильно деформированные капли) или образуют дефекты в виде сквозных отверстий (фиг. 3, A) и кратеров (фиг. 3, B).

Исходя из специфики движения и конденсации паров и капель, можно предположить, что для получения бездефектных конденсатов с зеркальной поверхностью достаточно отсепарировать частицы размером свыше  $0.1 \text{ мкм}$ .

Сепарацию можно осуществить, воспользовавшись спецификой движения продуктов взрыва: прямолинейным движением дефектообразующих капель и интенсивным расширением паров (совместно с мельчайшими частицами  $d < 0.1 \text{ мкм}$ ), если заставить капли двигаться узким пучком в одном направлении, а парам предоставить возможность расширяться в другом направлении.

Эти условия могут быть выполнены при коаксиальном электрическом взрыве фольги, характеризующемся хорошей направленностью разлета продуктов взрыва.

Специальное сопло (фиг. 4), состоящее из двух конусов — сужающегося и расширяющегося, расположенных под углом  $\sim (30 \div 40^\circ)$  друг к другу, позволяет изменить направление движения потока пара и сфокусировать разлет капель ( $\alpha_k$  — угол разлета капель), не изменяя их первоначального направления движения. Пространственно-временное разделение продуктов взрыва при КЭВФ облегчает вывод пара из общего потока без «захвата» капелек. При расположении подложки на пути движения паров были получены бездефектные конденсаты с зеркальной поверхностью. В качестве примера в исследованных режимах напыления были получены тонкие алюминиевые пленки толщиной  $\sim (200 \div 500) \text{ \AA}$  на ситалловых подложках размером  $40 \times 60 \text{ мм}^2$ .



Фиг. 4

К недостаткам предложенного метода сепарации следует отнести неполное использование распыленного материала вследствие сепарации капель и частичной конденсации на стенках сопла, а также возможность загрязнения пленок продуктами испарения стенок сопла при изготовлении его из нетермостойких материалов.

Таким образом, показана возможность осуществления газодинамической сепарации продуктов электрического взрыва на основе специфики движения паров и капель и получения поверхностно бездефектных конденсатов.

Поступила 30 VII 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Взрывающиеся проволоки, т. 1. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
2. Электрический взрыв проводников, т. 2. М., «Мир», 1965.
3. Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Вандажуров Ю. В., Златин Н. А., Перегуд Б. П. Магнитогидродинамические неустойчивости при электрическом взрыве. Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 4, стр. 778—781.
4. Петросян В. И., Дагман Э. И., Алексеев Д. С., Скрипкина П. А. Некоторые особенности электрического взрыва металлических и полупроводниковых образцов в вакууме. I. Ж. техн. физ., 1969, т. 39, вып. 11, стр. 2076—2083.
5. Петросян В. И., Дагман Э. И. К теории электрического взрыва в вакууме. II. Ж. техн. физ., 1969, т. 39, вып. 11, стр. 2084—2091.

6. *Лесник А. Г.* Об одном необходимом условии для превращения металлической проволоки в пар при взрыве ее током. Докл. АН СССР, 1966, т. 170, № 5, стр. 1059—1061.
7. *Mattox D. M., Mullendore A. W., Rebarchik F. N.* Film deposition by exploding wires. J. Vacuum Sci. and Technol., 1967, vol. 4, No. 3, pp. 123—127.
8. *Петросян В. И., Дагман Э. И.* Эпитаксиальная кристаллизация в вакууме при больших пересыщениях. Сб. «Проблемы эпитаксии полупроводниковых пленок», Новосибирск, «Наука», 1972, стр. 136—193.
9. *Gray D. R., Hammond J. J.* Explosive evaporation — a method for ultra-rapid deposition of magnetic thin films. Vacuum, 1968, vol. 18, No. 3, p. 148.
10. *Косточко Ю. П., Мерзляков В. Д.* Электрический взрыв фольги. Изв. вузов, Физика, 1967, вып. 6, стр. 145, 146.
11. *Мима И.* Новая технология металлизации. Киндзоку, 1969, т. 39, № 12, стр. 71—75.
12. *Кварцхава И. Ф., Бондаренко В. В., Меладзе Р. Д., Суладзе К. В.* Электрический взрыв проволоки в вакууме. ЖЭТФ, 1956, т. 31, вып. 5 (11), стр. 737.
13. *Кариорис Ф., Фиш Б., Ройстер Г.* Получение аэрозолей с помощью взрыва проволочек. Сб. «Электрический взрыв проводников», т. 2. М., «Мир», 1965, стр. 341—355.
14. *Сужара Т., Фукуда С., Ито Х.* Электрический взрыв проводников и его применение. Сообщ. 4. Напыление металлов взрывным способом. Сосэй то како, J. Japan Soc. Technol. Plast., 1970, vol. 11, No. 119, pp. 861—867.
15. *Хилл П., Виттинг Х., Диметри Е.* Конденсация паров металла в процессе быстрого расширения. Теплопередача, 1963, № 4, стр. 17—34.