

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ
ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ**

*Н. В. Гревцев, В. Д. Золотухин, Ю. М. Кашурников,
В. А. Летагин*

(Москва)

Изложены результаты экспериментального исследования разрушения проводников в случае отключения тока на различных стадиях электрического взрыва. Показано, что при относительно быстром отключении тока развитие изгибных неустойчивостей сопровождается образованием в местах изгиба паровой фазы в виде пузырьков, распределенных в объеме жидкого металла. При более позднем отключении тока образование паровых пузырьков происходит равномерно по всей длине проводника. В определенных условиях наблюдалось формирование кумулятивных выбросов материала проводника. Дана качественная интерпретация наблюдавшихся явлений.

1. Вопрос о природе сил, приводящих к разрушению проводников при электрическом взрыве, носит дискуссионный характер [1-6]. Это обусловлено тем, что обычно исследование процесса разрушения взрывающихся проводников осложнено одновременным влиянием многих факторов (сильные магнитные и электрические поля, воздействие окружающей среды, различные неоднородности строения проводников, условия подвода энергии и т. д.). В связи с этим представляют интерес исследования разрушения в условиях, когда влияние одного или нескольких факторов можно исключить.

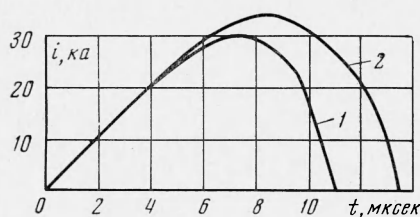
При резком отключении протекающего по проводнику тока характер разрушения зависит от того, на какой стадии электрического взрыва ток был включен [6-8]. В то же время начальная скорость нагрева проводника не зависит от того, когда выключается ток, и остается неизменной. Следовательно, отключая ток на различных стадиях электрического взрыва, можно изучить различные особенности механизма разрушения проводника в условиях постоянства одного из важнейших факторов, а именно скорости подвода к проводнику энергии.

Кроме того, при отключении тока последующее разрушение проводника должно происходить в условиях отсутствия электромагнитного поля собственного тока, поэтому после отключения тока могут развиваться только те магнитогидродинамические неустойчивости, которые успели зародиться в течение протекания тока. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные, полученные при резком выключении нагревающего тока [6-8], показывают, что характер развития и сам вид наблюдавшихся при этом разрывов проводника не дают возможности, по мнению авторов данной статьи, трактовать эти разрывы, как развившиеся перетяжные магнитогидродинамические неустойчивости.

Цель данной работы — экспериментальное исследование разрушения проводников в условиях постоянства начальной скорости нагрева и отсутствия (после определенной стадии взрыва) воздействия на проводник электромагнитного поля собственного тока. Эти условия достигались отключением протекающего по проводнику тока на различных стадиях электрического взрыва.

2. В качестве накопителя энергии использовали батарею конденсаторов типа К41И—7 общей емкостью $C = 60 \text{ мкф}$ и зарядным напряжением $U_0 = 10 \text{ кв}$. Максимальная запасаемая энергия $2,95 \text{ кДж}$, индуктивность и активное сопротивление разрядной цепи (без учета взрывающейся проволоки) соответственно 1 мкГн и $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ ом}$, период свободных колебаний $T = 50 \text{ мксек}$, максимальный ток короткого замыкания 70 ка при $U_0 = 10 \text{ кв}$.

Разрушение проволок исследовали с помощью оптической регистрации процесса электрического взрыва, осуществляемой теневым методом с помощью прибора СФР-2М в режиме покадровой съемки, при одновременном измерении тока в разрядной цепи. Применение специальных оптических насадок к СФР-2М позволяло получать изображение взрывающихся проволок на пленке в масштабе $1 : 4$. В качестве источника света использовали импульсную лампу ИСПТ-6000. Ток в разрядной цепи измеряли поясом Роговского. Совмещение оптических регистраций и осциллографических



Фиг. 1

записей тока по времени выполнялось с помощью фотоэлектрического умножителя ФЭУ-51 по методике, описанной в [9]. Световой сигнал на фотумножитель попадал с узкого зеркала, установленного внутри прибора СФР-2М между фокальной поверхностью и линзовой вставкой. Электрические сигналы с ФЭУ и пояса Роговского подавались на двухлучевой осциллограф С1-17. В результате на фоторегистрации оставался узкий незасвеченный участок, чему на осциллограмме соответствовал отброс луча. Точность совмещения при этом равнялась времени экспонирования одного кадра. Место появления сигнала-отметки на осциллограмме легко подбиралось с помощью датчика синхронизации СФР-2М.

Отключающим ток элементом служила вспомогательная проволока меньшего диаметра d_1 , включенная в разрядную цепь последовательно с основной проволокой диаметром d_0 , являющейся объектом фоторегистрации. Изменением d_1 в некоторых пределах достигалось отключение тока на различных стадиях взрыва основной проволоки. При равенстве диаметров d_1 и d_0 обе проволоки взрывались практически одновременно.

В экспериментах исследовали разрушение медных проволок диаметром $0,5 \text{ мм}$ и длиной 50 мм при взрыве их в воздухе при нормальном атмосферном давлении. В качестве вспомогательных использовали также медные проволоки длиной 130 мм , диаметром от $0,455$ до $0,500 \text{ мм}$, менявшимся с шагом $0,005 \text{ мм}$. Длина вспомогательных проволок и их минимальный диаметр были выбраны из соображений предотвращения вторичного пробоя при их взрыве.

Для сохранения постоянства начальной скорости нагрева все эксперименты проводили при одном и том же значении зарядного напряжения, равном $7,0 \text{ кв}$.

На фиг. 1 приведены зависимости тока от времени для двух предельных случаев: кривая 1 соответствует наиболее раннему отключению тока в данных экспериментах ($d_1 = 0,455 \text{ мм}$), кривая 2 — случаю отсутствия выключения тока ($d_1 = 0,5 \text{ мм}$); в обоих случаях диаметр основной проволоки $d_0 = 0,5 \text{ мм}$. Из фиг. 1 видно, что включение в разрядную цепь вспомогательной проволоки диаметром $d_1 < d_0$ приводит не только к более раннему отключению тока, но и к некоторому снижению его амплитуды.

3. Для характеристики экспериментов, соответствующих выключению тока на различных стадиях взрыва основной проволоки, целесообразно

ввести безразмерный коэффициент k

$$k = \frac{\Delta Q_l}{\Delta Q_0}, \quad \Delta Q_l = \int_0^{t_l} i_l(t) dt, \quad \Delta Q_0 = \int_0^{t_0} i_0(t) dt$$

где ΔQ_l — количество электричества, протекающего в разрядной цепи в случае отключения тока, ΔQ_0 — количество электричества без выключения тока (кривая 2 на фиг. 1), i_l , t_l , i_0 и t_0 — соответствующие токи и моменты их выключения.

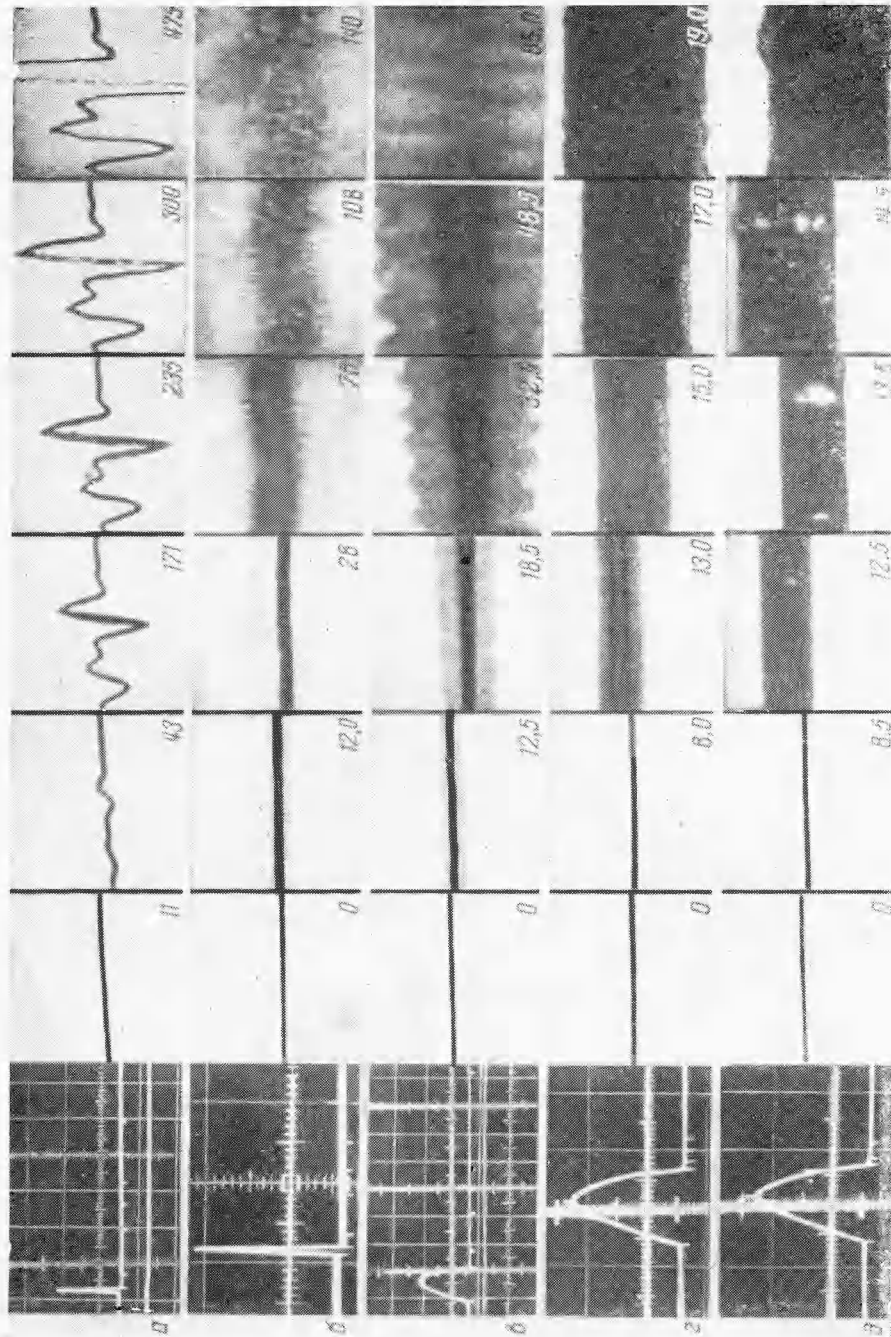
В проведенных экспериментах k менялся от 0.77 ($d_l = 0.455$ мм) до 1 ($d_l = d_0 = 0.5$ мм). При этом удалось выделить пять диапазонов значений k , в каждом из которых процесс разрушения проволоки обладал характерными особенностями. Типичные результаты фоторегистрации процесса разрушения проволок для каждого диапазона изменения k и соответствующие осциллограммы тока приведены на фиг. 2. На осциллограммах тока штрихами отмечены моменты времени получения приведенных теневых снимков, значения этих моментов времени в мксек указаны на снимках; начало отсчета времени совпадает с началом импульса тока; регистрируемая длина проволоки 15 мм. Масштаб осциллограмм: по вертикали 18.54 ка/дел., по горизонтали для $a, б$ — 100 мксек/дел., для $в, г, д$ — 10 мксек/дел.

Вид осциллограмм на фиг. 2, $a, б$ требует специального пояснения. Поскольку процесс разрушения проволок в соответствующих режимах взрыва протекал относительно медленно, для совмещения по времени начала протекания тока и характерных этапов разрушения требовалось снимать осциллограммы тока при большом временном масштабе (100 мксек/дел.). Однако для расчета коэффициента k для этих режимов использовались специально снятые осциллограммы в малом временном масштабе (10 мксек/дел.).

Фиг. 2, a соответствует $k = 0.77-0.83$. Проволока к моменту отключения тока не претерпевает никаких видимых изменений. Спустя 6—8 мксек после отключения тока становятся заметны изгибы, более или менее равномерно расположенные по оси проволоки (более тщательный анализ показывает, что изгибы начинают формироваться за 1—2 мксек до отключения тока). Скорость роста амплитуды изгибов 10—20 м/сек и остается постоянной в течение всего времени регистрации (~ 500 мксек). Вскоре после формирования изгибов начинается бурный рост объема участков проволоки в местах изгибов. Объем этих участков спустя 200 мксек в 30 раз превышает исходную величину.

Оценка плотности материала в этих участках (исходя из их массы и объема) дает значения, много меньшие плотности меди при температуре кипения. Это говорит о том, что материал проволоки в этих участках находится в форме коллоидальной пены [10], представляющей собой фазу жидкого металла с включениями металлических паров. В дальнейшем наблюдается вскрытие поверхности коллоида и выход из объема паровой фазы в виде пузырьков, т. е. по сути коллоид обращается, становясь аэрозолью с жидкими каплями, диспергированными в паровой фазе. При этом средний диаметр участка резко уменьшается и образуется тонкая цепочка капель жидкого металла. Приближенная оценка оставшейся после вскрытия коллоида массы показывает, что она в 1.5—2 раза меньше исходной величины. Это дает возможность предположить, что 30—50% массы проволоки в указанных участках превратилось в пар.

При увеличении k внутри данного диапазона снижаются амплитуды изгиба и возрастают равномерность расширения всех участков, скорость вскрытия коллоида и количество пузырьков.



Фиг. 2

Фиг. 2, б соответствует $k = 0.83-0.89$. Процесс разрушения происходит значительно быстрее и длится ~ 150 мксек. Как и в предыдущем случае, к моменту отключения тока внешний вид проволоки практически не отличается от исходного, за исключением того, что ее диаметр несколько увеличивается и от поверхности начинает отходить паровой слой. Незначительные изгибы, наблюдаемые на проволоке в момент отключения тока, в дальнейшем полностью нивелируются за счет быстрого объемного расширения. Диаметр проволоки растет с постоянной скоростью (~ 50 м/сек) и спустя 40 мксек после отключения тока достигает значения, в 5 раз превышающего исходное. Начиная с некоторого момента времени (~ 70 мксек), по всему объему расширяющейся проволоки наблюдается образование большого числа мелких разрывов и уже через 30 мксек после этого продукты разрушения проволоки представляют собой по существу быстро расширяющийся аэрозоль, в котором промежутки между отдельными жидкими каплями заполнены паром.

Фиг. 2, в соответствует $k = 0.89-0.97$. К моменту отключения тока наблюдается слабо изогнутая и увеличенная в диаметре проволока, равномерно окруженная небольшим паровым слоем. После отключения тока начинается быстрое расширение проволоки с постоянной скоростью ~ 100 м/сек, а также расширение и уплотнение парового слоя. Скорости расширения пара, отходящего от поверхности проволоки на вогнутых и выпуклых сторонах изогнутых участков, существенно отличаются друг от друга. На вогнутых сторонах скорость расширения парового слоя в 2—3 раза превышает среднюю величину и составляет 300—500 м/сек. Несмотря на то, что сами изгибы, наблюдавшиеся в момент отключения тока, в дальнейшем быстро нивелируются за счет бурного увеличения диаметра проволоки, отмеченная разница в скоростях расширяющегося пара сохраняется. В результате паровой слой приобретает волнообразную структуру, причем вершины этих волн соответствуют вогнутым сторонам наблюдавшихся ранее изгибов.

В течение 20—25 мксек после отключения тока диаметр проволоки увеличивается равномерно по всей длине. Затем начинается перераспределение материала проволоки: в местах, соответствующих вогнутым сторонам наблюдавшихся ранее изгибов, появляются узкие выбросы материала расширяющейся проволоки, направленные перпендикулярно ее оси. Эти выбросы быстро растут, постепенно весь материал проволоки сосредотачивается в них и к концу фоторегистрации (~ 80 мксек) продукты разрушения проволоки наблюдаются в виде отдельных узких уплотнений, вытянутых перпендикулярно первоначальной оси проволоки. Число этих уплотнений соответствует числу полуволн изгибов проволоки, наблюдаемых в момент отключения тока.

Фиг. 2, г соответствует $k = 0.97-0.99$. В этом диапазоне изменения k плотность паровой оболочки, окружающей проволоку, становится настолько большой, что спустя 3—5 мксек после отключения тока уже не удастся рассмотреть, что происходит с материалом проволоки. Однако к моменту отключения тока и в течение последующих 2—3 мксек видно, что внутри паровой оболочки находится уплотненный материал, границы которого расширяются со скоростью $\sim 10^3$ м/сек. Одновременно быстро расширяется ($\sim 2 \cdot 10^3$ м/сек) и уплотняется паровая оболочка.

Фиг. 2, д соответствует $k = 0.99-1$. Картина процесса разрушения существенно не меняется, за исключением того, что в момент времени, совпадающей с характерным изломом на заднем фронте импульса тока (фиг. 1), в отдельных местах проволоки появляются яркие вспышки, интенсивность свечения которых быстро падает после отключения тока.

4. Формирование изгибов проволоки, наблюдаемых в экспериментах с $k = 0.77-0.83$ (фиг. 2, а), вызвано, по мнению авторов, тремя одновременно существующими причинами:

1) кратковременным импульсивным воздействием сил электромагнитной природы [3]; 2) наличием большого осевого давления в проволоке, вызванного быстрым ее нагревом ($\sim 10^8$ град/сек) [6]; 3) неравномерным распределением внутренних напряжений вдоль оси проволоки вследствие неравномерного нагрева различных участков (на неравномерность нагрева указывает существенно различная степень объемного расширения различных участков). Тот факт, что интенсивный изгиб происходит, как правило, на тех же участках проволоки, где затем наблюдается объемное парообразование и превращение материала проволоки сначала в коллоидальную пену, а затем в аэрозоль, говорит о преимущественном влиянии третьей (из указанных выше) причины потери устойчивости. Последующее развитие сформировавшихся изгибов связано с инерционным гидродинамическим течением расплавленного материала проволоки.

Интенсивный изгиб взрывающихся проводников обычно наблюдается при таких режимах электрического взрыва, когда уровень введенной в проводник энергии лежит ниже некоторого значения энергии, названного в [3] пороговым. Это значение, как было установлено в [3], несколько больше энергии плавления материала проводника, но существенно ниже энергии испарения. Тем не менее в данных экспериментах при $k = 0.77-0.83$ наряду с интенсивным изгибом наблюдалось и объемное парообразование. Парообразование в условиях явного недогрева возможно, если предположить, что при быстром нагреве проволоки током большой плотности имеет место неравномерное по объему выделение энергии в силу различных неоднородностей внутреннего строения проволоки (включения, микрополости, скопления дефектов и др.). В результате этого в отдельных сечениях проволоки могут появляться точки с температурой выше средней, отнесенной ко всей массе проволоки, что приведет к более раннему плавлению и испарению материала в этих точках. Образование микроскопических паровых пузырьков в жидком металле происходит еще во время протекания тока, а дальнейшее объемное расширение материала проволоки происходит под действием давления расширяющегося пара в процессе выравнивания температуры проволоки за счет релаксации тепла из перегретых участков.

При отключении тока на более поздней стадии взрыва ($k = 0.83-0.89$, фиг. 2, б) количество «перегретых» точек в объеме проволоки существенно увеличивается и распределение их по длине проволоки становится более равномерным. Так как эти точки являются, по предположению, центрами объемного парообразования, то зарождение паровых пузырьков, их последующее расширение и превращение материала проволоки в коллоидальную пену, а затем в аэрозоль происходят равномерно по длине проволоки. Интенсивное объемное расширение материала приводит к тому, что зарождающиеся во время протекания тока изгибы в дальнейшем не успевают развиваться.

В течение времени, пока материал проволоки остается в форме коллоидальной пены, между отдельными паровыми пузырьками еще сохраняются перемычки из жидкого металла. Можно представить, что при пропускании через такую структуру даже относительно небольшого тока вследствие быстрого перегорания (взрыва) отдельных перемычек произойдет образование поперечной структуры, подобной той, какая наблюдается при запорговых режимах электрического взрыва [3]. Образование поперечной структуры («страт») за счет выхода пузырьков при взрыве вольфрамовых проволок наблюдалось в [11].

При $k > 0.89$ плотность паровых пузырьков становится настолько большой, а их размеры настолько малыми, что уже не удается рассмотреть отдельные пузырьки при разрушении проволоки (фиг. 2, $\epsilon - \delta$). Не останавливаясь здесь на механизме поперечного расслоения продуктов разрушения проволоки, наблюдаемого при $k = 0.89 - 0.97$, отметим, что этот процесс связан с концентрацией материала расширяющейся проволоки (по типу кумуляции) в местах ее первоначального изгиба (подробнее см. [12]). Появление же интенсивных вспышек в отдельных местах проволоки в случае отсутствия выключения тока вспомогательной проволокой (фиг. 2, δ) связано с образованием в этих местах микродуг вследствие обрывов электрической цепи при разрушении проволоки.

Таким образом, объемное парообразование играет существенную роль в механизме разрушения проводников при электрическом взрыве. Начинаясь уже при сравнительно малой введенной энергии (ниже пороговой) в силу неравномерного по объему ее выделения, объемное парообразование приводит к превращению материала проводника по схеме: коллоидная пена — аэрозоль. На эту общую схему разрушения могут накладываться такие частные особенности, как развитие изгибов (в случае малоинтенсивного объемного парообразования) или поперечное расслоение (при интенсивном парообразовании).

Поступила 24 X 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. *Smith S. H.* Origin of striations due to mechanical effects in fast wire explosions. *J. Appl. Phys.*, 1970, vol. 41, No. 10, p. 3918.
2. *Лебедев С. В., Савватимский А. И.* Об исчезновении электропроводности металла вследствие сильного нагревания электрическим током большой плотности. *Теплофизика высоких температур*, 1970, т. 8, № 3, стр. 524.
3. *Абрамова К. Б., Валицкий В. П., Вандакуров Ю. В., Златин Н. А., Перегуд Б. П.* Магнитогидродинамические неустойчивости при электрическом взрыве. *Докл. АН СССР*, 1966, т. 167, № 4, стр. 778.
4. *Bennett F. D.* High — temperature exploding wires. In: *Progr. high temperature Phys. and Chemistry*, vol. 2, 1968, Oxford, Pergamon Press., 1968.
5. *Петросян В. И., Дагман Э. И.*, К теории электрического взрыва в вакууме. II. *Ж. техн. физ.*, 1969, т. 39, вып. 11, стр. 2084.
6. *Кварцхава И. Ф., Плюто А. А., Чернов А. А., Бондаренко В. В.* Электрический взрыв металлических проволок. *ЖЭТФ*, 1956, т. 30, вып. 1, стр. 42.
7. *Соболев Н. Н.* Исследование электрического взрыва тонких проволочек. *ЖЭТФ*, 1947, т. 17, вып. 11, стр. 986.
8. *Лебедев С. В.* Взрыв металла под действием электрического тока. *ЖЭТФ*, 1957, т. 32, вып. 2, стр. 199.
9. *Гревцев Н. В., Золотухин В. Д., Кашурников Ю. М., Лотягин В. А., Махорин Б. И.* Высокоскоростная микросъемка теплового расширения проводника в процессе электрического взрыва. Современное состояние и перспективы высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстропотекающих процессов. Всесоюз. научн.-техн. конференция. М., 1972. Тезисы докладов. М., ВНИИОФИ, 1972.
10. *Чейс В.* Краткий обзор исследований по взрывающимся проволочкам. В сб. «Взрывающиеся проволочки», М., Изд-во иностр. лит., 1963.
11. *Сухара 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, p. 861.
12. *Гревцев Н. В., Золотухин В. Д., Кашурников Ю. М., Лотягин В. А.* Об одном виде стратообразования при электрическом взрыве проволочек. *ПМТФ*, 1974, № 1.