

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ БРИЗАНТНЫХ ВВ

В. Бабуль, М. Корзун

(Варшава)

Применяемые способы инициирования детонации взрывчатых веществ и формирования ее фронта во времени и в пространстве не удовлетворяют всем требованиям эксперимента.

В настоящей работе, являющейся продолжением работы [1] с целью лучшего решения вопроса, для возбуждения бризантных взрывчатых веществ применен метод электрического взрыва проводников [2—5]. Электрический взрыв проводников — это процесс внезапного перехода материала проводника из твердого состояния в газовое (непосредственно или через жидкую фазу) в результате подвода к нему достаточно большой электрической энергии за короткий промежуток времени. Давление возникающего газа составляет приблизительно 30 кбар, а его температура достигает нескольких десятков тысяч градусов.

В обсуждаемом способе возбуждения взрываемый проводник выполняет функцию передатчика энергии, накопленной в конденсаторах, взрывчатому веществу. Эта энергия передается к ВВ в виде тепловой, магнитной, кинетической и других видов энергии. Хотя в настоящий момент отсутствуют убедительные доказательства, тем не менее представляется, что в рассматриваемом методе принимают участие два механизма инициирования: кинетический удар паров металлов покрывает находящиеся поблизости кристаллы ВВ, и нагрев возникшей в результате взрыва плазмы, инициирующий поверхностное горение кристаллов ВВ.

Исследования процесса электрического взрыва металлической фольги и электровзрывного возбуждения ВВ проводились с использованием нескольких типов генераторов тока.

Представленные ниже результаты получены при использовании батареи конденсаторов емкостью 22 мФ, заряжаемой до напряжения 30 кВ. Максимальное значение тока во время взрыва достигало $2 \cdot 10^5$ А при частоте порядка 50 кГц.

В экспериментах применялась алюминиевая фольга толщиной в 5, 17, 50 и 100 мкм с поверхностью, изменяющейся от 1 до 200 см². Фольга

наклеивалась на подложку из плексигласа, толщина которой (около 15 мм) подбиралась из условия получения наилучших параметров импульса взрыва (влияние волны разгрузки, распространяющейся от задней поверхности плексигласа, на форму импульса).

При данных размерах фольги плотность тока во время взрыва изменялась от 10^6 до $4 \cdot 10^8$ А/см². Исследуемыми параметрами являлись время до взрыва и поверхностная одновременность («плоскостность») взрыва фольги.

На рис. 1 представлена зависимость временной неравно-

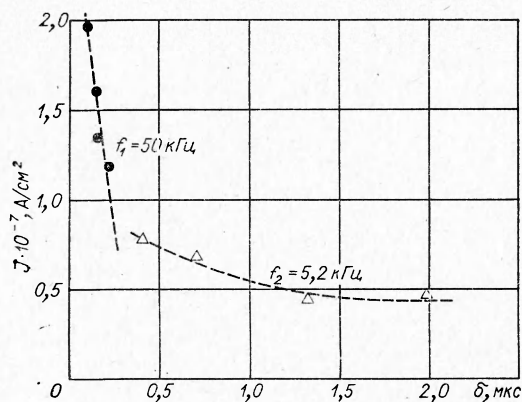


Рис. 1. Изменение поверхностной одновременности взрыва фольги в функции плотности тока и частоты контура отпала.

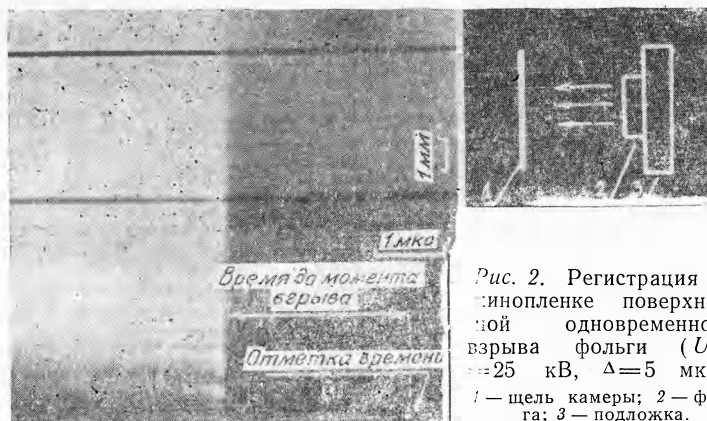


Рис. 2. Регистрация на киноплёнке поверхностной одновременности взрыва фольги ($U = 25$ кВ, $\Delta = 5$ мкм). 1 — щель камеры; 2 — фольга; 3 — подложка.

мерности поверхностного взрыва в функции плотности тока для двух типов генераторов с собственными частотами соответственно 5 и 50 кГц. Из представленных результатов (каждая точка на графике является средним значением из 3—5 экспериментов) видно большое влияние плотности тока на одновременность взрыва и поперечное сечение, изменения которого осуществлялось шириной фольги (при постоянной ее толщины). Значительного влияния длины фольги на одновременность взрыва при фиксированной величине поперечного сечения, не обнаружено.

На рис. 2 представлена регистрация на киноплёнке момента взрыва фольги. На примере этой и аналогичных фотографий можно констатировать, что при высоких значениях плотности тока поверхностная неодновременность взрыва была меньше 50 нс. Нижний предел отсчета определяется разрешающей способностью применяемой съёмочной аппаратуры (ультраскоростная фотокамера типа СФР).

На рис. 3 показана зависимость времени до момента взрыва в функции плотности тока для упомянутых генераторов тока. Видна большая аналогия с изменениями поверхностной одновременности взрыва в функции плотности тока. На основе сказанного выше можно сделать вывод, что более выгодными являются системы, обеспечивающие большие значения dl/dt .

На рис. 4 показана регистрация скорости разлета продуктов взрыва и генерированной ими ударной волны в воздухе. Эта скорость переменна; ее значение является функцией параметров контура поджига. Среднее значение скорости в интервале времени $0 \div 0,25$ мкс, отсчитываемого от момента взрыва, составляет $7 \cdot 10^5$ см/с. Следует отметить, что в этом процессе надо различать две поверхности, одна из которых является фронтом ударной волны, генерированной в воздухе, вторая же — поверхностью раздела между воздухом, через который прошел фронт ударной волны, и парами металла. В самых ранних фазах движения фронт ударной волны

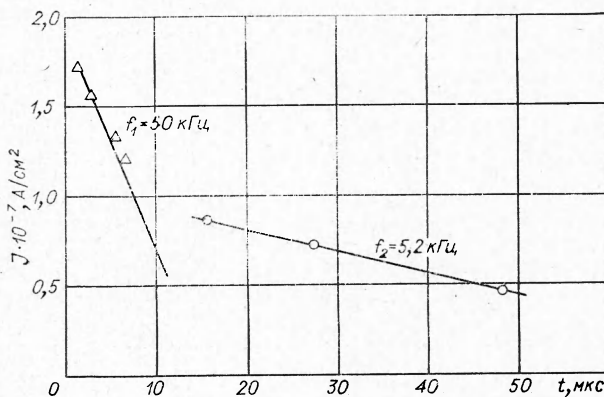


Рис. 3. Изменение времени до взрыва в функции плотности тока и частоты контура.

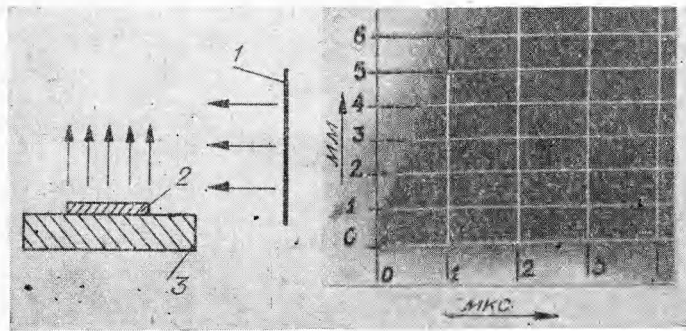


Рис. 4. Регистрация на киноплёнке процесса разлета паров металла после взрыва (обозначения см. на рис. 2).

можно трактовать как бы «приклеенным» к парам металла. Из-за недостаточной разрешающей способности съемочной аппаратуры отрыв ударной волны от паров металла виден на более далеких расстояниях. Приведенные выше экспериментальные значения максимальной скорости разлета в начальных стадиях взрыва совпадают со значениями, рассчитанными для случая паров металла, которые перед разлетом достигли критической температуры. Расчеты проводились по теории распада произвольного сильного разрыва (не представлены из-за громоздкости).

В процессе исследований была экспериментально подтверждена гипотеза Ф. А. Бенета о появлении волны испарения. Обнаружено, что процесс взрывного испарения фольги начинается со стороны воздуха (среды с меньшим импедансом по сравнению с подложкой) и распространяется в глубь проводника (рис. 5). Скорость распространения фронта испарения различна и зависит от температуры кипения, которая в свою очередь растет с увеличением внешнего давления (в случае процесса электрического взрыва проводников — это магнитное давление от текущего в проводнике тока). В интервале температур от $\sim 4 \cdot 10^3$ °К до критических эта скорость изменяется от 60 до 200–300 м/с.

Волну испарения можно охарактеризовать как газодинамическую или гидродинамическую волну разрежения. Волну испарения правильно рассматривать как волновое движение. Скорость ее почти в десять раз меньше скорости звука в жидкости. Фазовый переход (жидкость — газ) имеет место на фронте волны испарения (в противовес обыкновен-

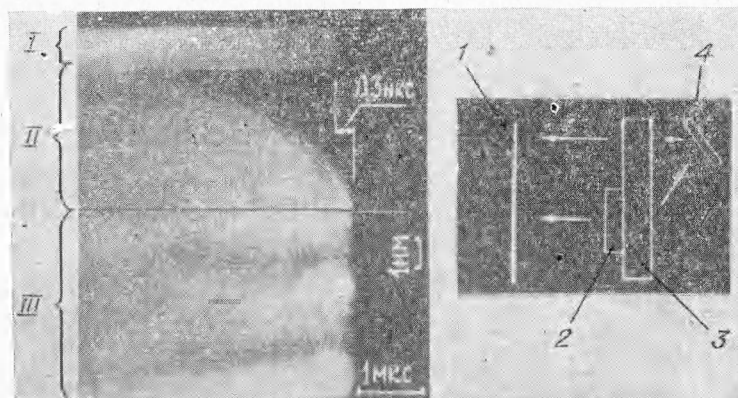


Рис. 5. Регистрация моментов взрыва фольги на поверхностях со стороны воздуха и со стороны подложки ($U=20$ кВ, $\Delta=17$ мкм).
I — шель камеры; 2 — фольга; 3 — подложка; 4 — зеркало. I — со стороны подложки; II — истечение по поверхности; III — со стороны воздуха.

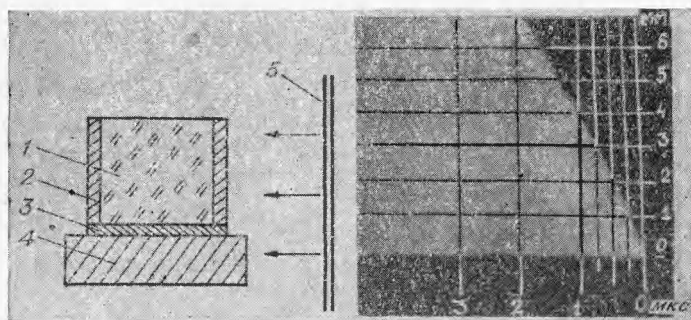


Рис. 6. Случай инициирования детонации ВВ ($U=18$ кВ; $\Delta=17$ мкм).
1 — заряд ВВ; 2 — оболочка; 3 — фольга; 4 — подложка; 5 — щель камеры.

ным динамическим волнам в жидкостях). Кроме этого скорость волны испарения зависит не только от удельной энергии, но и от тепла испарения (нулевое значение при критической температуре). Скорость волны испарения отлична от скорости звука в жидкости, так как адиабатическая сжимаемость паров металла во много раз превышает сжимаемость жидкости.

В исследованиях с ВВ применялись кристаллический гексоген и РЕТН, нормальная скорость детонации которого равнялась $4 \cdot 10^5$ см/с.

Способность возбуждения заряда ВВ является функцией его энергетических свойств. В ходе исследований выяснено, что возбуждение детонации получено в случае введения в момент взрыва в фольгу удельной энергии, равной (на единицу возбуждаемой поверхности) $\sim 130 \div 150$ Дж/(г·см²). Факт возбуждения детонации представлен на рис. 6. При меньших значениях удельной энергии на единицу поверхности получено возбуждение нестационарного горения с равными скоростями взрывного перехода в начальный момент. Возбуждение получено не только на границе металл — ВВ, но и внутри заряда. Такой случай инициирования (дефлаграция) представлен на рис. 7.

Возбуждение детонации или дефлаграции можно попытаться объяснить следующим образом. Считаем ВВ двухкомпонентной средой, состоящей из твердых частиц и пустот, заполненных воздухом. Взрываемый электрически проводник считаем подвижным поршнем, который при контакте с ВВ нагружает его (аналогия с задачей генерирования ударной волны в грунте [1]). Принимая, что ВВ есть среда, удовлетворяющая условию $(\partial^2 p / \partial \xi^2)_s > 0$, то в зависимости от характера движения границы ВВ будем иметь дело с различно протекающим процессом нагружения, схематически представленном на рис. 8. На

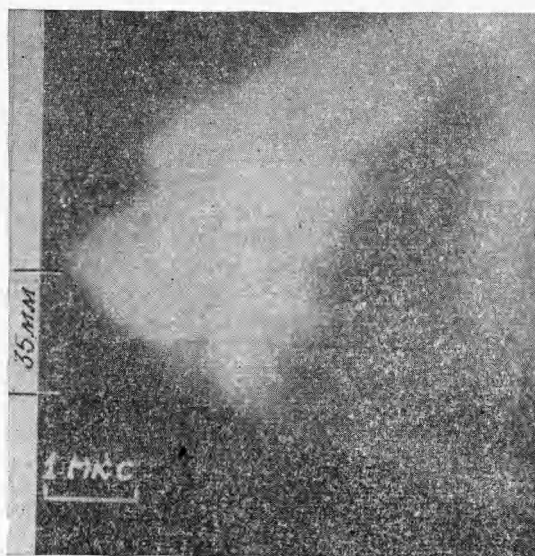


Рис. 7. Случай инициирования дефлаграции ВВ ($U=20$ кВ; $\Delta=100$ мкм).

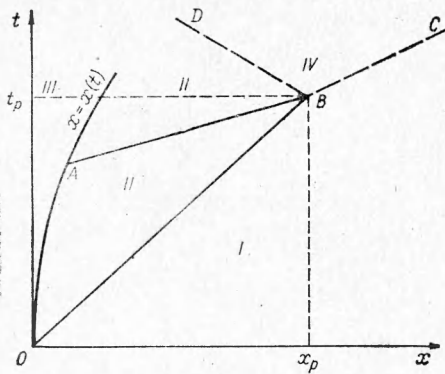


Рис. 8. Схематическая иллюстрация процесса электровзрывного возбуждения ВВ на фазовой плоскости.

этом рисунке кривая OA иллюстрирует движение поверхности взрывае-мый проводник — $ВВ$, прямые OB и AB — характеристики Римана, BC и BD — движение фронта реакции взрывного перехода. Точка B — глубина, на которой в заряде будет генерироваться ударная волна. На рисунке показаны четыре характеристические области: I — $ВВ$, находящийся в невозмущенном состоянии, II — изэнтропическое сжатие $ВВ$ (обязывает решение Римана), при предположении, что можно пренебречь эффектами реакции разложения, III — электрически взрывае-мый проводник, IV — пространство, занятое продуктами реакции взрыва.

Положение точки B (см. рис. 8), т. е. глубины, на которой возникает ударная волна x_p , зависит от характера движения границы OA . По мере роста скорости границы глубина x_p уменьшается, принимая нулевое значение для случая скачкообразного приобретения (в момент $t=0$) границей скорости большей, чем скорость звука в $ВВ$ (это отвечает генерированию ударной волны на границе). Интенсивность генерированной в точке B ударной волны (фактически увеличивающейся по мере приближения к границе) в области, которая выше некоторого предельного значения x_p , меньше, чем интенсивность ударной волны, инициирующей детонацию. В этом случае будет инициироваться процесс реакции взрыва с додетонационной скоростью — обычно это процесс дефлаграции. Отметим, что характер движения границы $ВВ$ — это функция электрической энергии, введенной во взрывае-мый проводник, а также скорости ее ввода.

Из этих фактов следует, что поскольку для обеспечения наибольшей поверхностной одновременности взрыва фольги решающим параметром является плотность тока, для эффективного возбуждения детонации требуется соответствующая плотность энергии взрыва на единицу возбуждаемой поверхности. Иными словами — при заданной ширине фольги (поперечном сечении) решающей является ее длина.

На рис. 9 показана скорость реакции взрыва, бо́льшая нормальной скорости детонации. Обычно скорость детонации равна $4 \cdot 10^5$ см/с, при этом же способе инициирования наибольшая скорость реакции взрывного перехода (сверхдетонации) составила $13 \cdot 10^5$ см/с, в интервале времени $0 \div 0,25$ мкс от момента взрыва. Этот факт объясняется, по всей вероятности, некоторой электропроводностью продуктов детонации. Концентрация электронов [6] на несколько порядков превышает значения, рассчитанные по уравнению Саха для условий теплового равновесия в продуктах реакции взрывного разложения. Согласно [7], область сильной ионизации прибли-

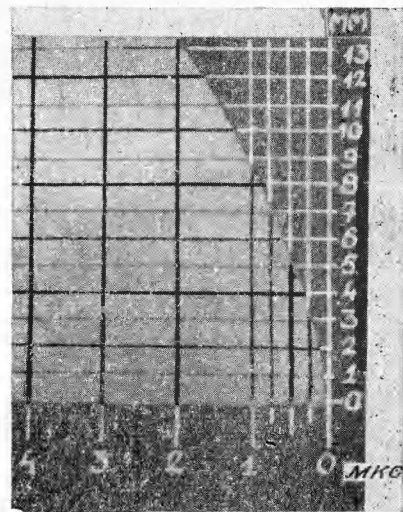


Рис. 9. Случай инициирования сверхдетонации ВВ.

