

УДК 537.523

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХЗВУКОВЫХ ФАКЕЛОВ
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ**

М. А. Султанов, Л. И. Киселевский

Исучен механизм эрозионного действия на металлы сверхзвуковых факелов импульсного разряда. Показано, что разрушение металлов происходит вследствие их плавления и последующего сдувания расплавленной пленки. При несимметричных условиях поступления паров на анода и катода факельное разрушение может играть существенную роль в процессе электрической эрозии электродов.

Одна из причин электрической эрозии металлов при искровом разряде — разрушающее действие факелов, тормозящихся на противоположных электродах [1, 2]. Исследования [1] относились к высоковольтному разряду небольшой мощности, а [2] — к разряду низкого напряжения, когда групповая скорость паров в факелах достигала 10^3 м/сек и, по-видимому, не превышала скорости звука.

Из теории теплообмена следует, что количество энергии, передаваемой единице поверхности горячим газом, тормозящимся на твердой стенке, зависит от основных параметров набегающего потока следующим образом:

$$W \sim vT \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right), \quad (1)$$

где v — скорость газа; T — температура в набегающем потоке; $\gamma = c_p / c_v$; M — число Маха.

Из (1) видно, что поток энергии к обтекаемому телу возрастает с увеличением скорости и температуры газа и может быть весьма большим при сверхзвуковых скоростях набегающего потока. Данные о физических свойствах факелов, полученные в последнее время [3, 4], показывают, что при импульсных разрядах большой мощности скорость электродных факелов может достигать 10^4 м/сек и в несколько раз превышать скорость звука. Следует ожидать, что подобные факелы должны обладать особенно сильным разрушающим действием как вследствие сильной теплоотдачи, так и специфики сверхзвукового обтекания плазменными потоками.

Задача настоящего исследования — изучение механизма и роли факельной эрозии металлов при мощных режимах импульсного разряда, когда факелы достигают противостоящего электрода со сверхзвуковыми скоростями. Исследования проводились с импульсными разрядами от батареи конденсаторов ИМ 3-100, емкость которой 200 мкф. Индуктивность разрядного контура 1 мкгн. Начальное напряжение на электродах 3 кв. Осциллограмма тока разряда приведена на рис. 1. Амплитуда тока в мак-

сумме первого полупериода достигала 10^4 а. Основное разрушение тел происходило в течение первого полупериода, длительность которого ~ 80 мксек. Изучался разряд в воздухе при атмосферном давлении.

Сначала было рассмотрено разрушающее действие пространственно выделенных сверхзвуковых факелов, направляемых на электрически нейтральные металлические преграды. Для формирования факела применялся метод, предложенный в [1]. Схема расположения электродов показана на рис. 1а. Оба электрода (медные) заключались в изолятор (плексиглас) и располагались перпендикулярно друг к другу. Верхний плоский срез вертикального электрода (катода), из которого выбрасывался факел, был опущен в глубь изолятора на 3 мм. Диаметр отверстия в изоляторе над этим электродом составлял также 3 мм. Твердые пластины, эрозия которых изучалась, помещались на расстоянии около 5 мм над отверстием в шайбе. В [3] было показано, что при данных условиях эксперимента факел должен достигать пластинку со сверхзвуковой скоростью.

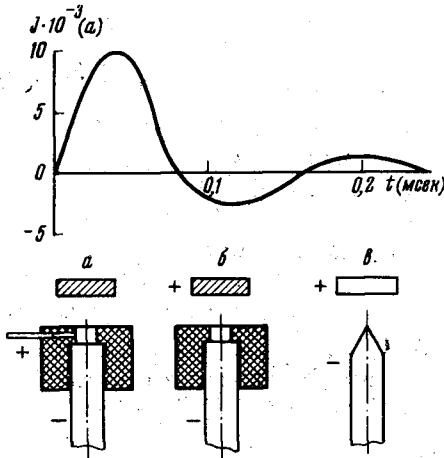


Рис. 1. Осциллограмма тока и схемы расположения электродов

$\sim 10^4$ К. Полученные значения скорости и температуры оказались несколько меньшими, чем в [5], что, по-видимому, связано со спецификой применяемого разряда. В [5] состав плазменной струи в основном определялся материалом испаряющихся стенок капилляра. В спектре струи в нашем случае наблюдались также линии нейтральных атомов и ионов меди, что связано с электрической эрозией электродов.

На рис. 2а, б приведена временная развертка свечения струи при ее торможении на плоской стальной пластине. Скоростные фотографии получены на камере СФР. Видно, что при торможении плазменной струи у поверхности твердой преграды образуется зона интенсивного свечения с относительно резкими границами. Форма этой зоны зависит от формы твердой преграды. На рис. 2в приведен кадр скоростной съемки картины обтекания цилиндрического тела небольшого диаметра. В последнем случае эта картина содержит все основные черты, характерные для сверхзвукового обтекания. Анализ условий, наблюдаемых в яркой зоне, примыкающей к твердой преграде, показывает, что она соответствует ударно-сжатой области, которая должна образовываться при сверхзвуковом обтекании неподвижной преграды. Эта область плазмы заключена между отходящей ударной волной и преградой.

Давление в этой области можно приблизительно оценить (без учета потерь энергии на ионизацию) с помощью соотношения Ренкина — Гюгонио [6]

$$p_2 = p_1 \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_1^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right), \quad (2)$$

где p_1 — давление в набегающем потоке; p_2 — давление за ударной волной. Полагая для плазмы $\gamma = 1,25$, при числе Маха ~ 4 , получим, что давление в ударно-сжатом слое должно увеличиться в 20 раз. В [5] было

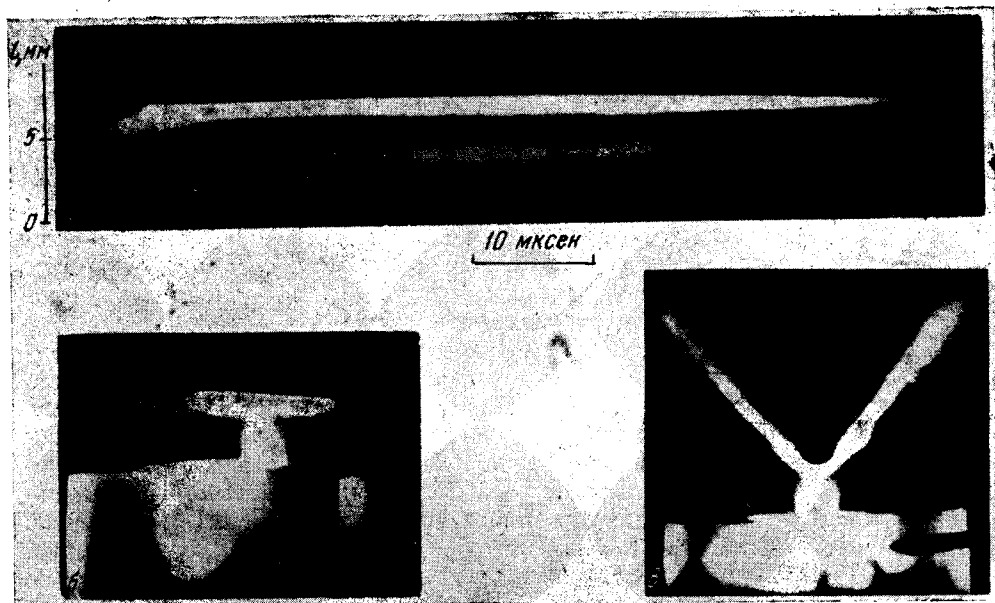


Рис. 2. Временная развертка и отдельные кадры скоростной съемки (125 000 кадров/сек) сверхзвукового факела, набегающего на плоскую преграду (а, б) и цилиндрическое тело (в)

показано, что давление в свободной струе близко к атмосферному. Следовательно, давление плазмы в ударно-сжатом слое должно составлять ~ 20 атм. О сильном увеличении давления в ударно-сжатом слое плазмы свидетельствует также и большой механический импульс, передаваемый струей преграде.

На рис. 3а, б приведены фотографии следов разрушения, образованных изучаемым факелом на поверхности электрически нейтральной стальной пластинки. Подобные следы образуются на поверхности и других сплавов и металлов. Изучение этих следов показывает, что они имеют форму, близкую к круговой, окруженную валом застывшего металла, с углублением в центральной области. Вся зона поражения также напоминает поверхность застывшего металла с радиально расходящимися натеками. В случае легкоплавких металлов за периферическими зонами пятна поражения образуется металлическая пленка, покрывающая поверхность металла.

Сопоставление формы и размеров эрозионных следов, образующихся на поверхности различных металлов, позволяет сделать заключение о том, что основной причиной разрушения металлических поверхностей и уноса их массы под действием импульсных сверхзвуковых факелов является плавление и последующее сдувание расплавленной пленки потоком. Следовательно, механизм разрушения во многих чертах аналогичен механизму абляции метеоритов на некоторых участках траектории при их вхождении в плотные слои атмосферы [7, 8]. С помощью плазменных струй импульсного разряда представляется возможным воспроизводить энтальпию торможения, соответствующую скоростям вхождения, превышающим 10^4 м/сек. Значение энтальпии торможения можно изменять, меняя режим разряда.

Дополнительные исследования показали, что материалы, которые в условиях разряда не плавятся, практически не поражаются импульсной плазменной струей. К таким материалам относятся уголь, дерево, текстолит и даже бумага. Интересно, что лист писчей бумаги может выдержать без заметного разрушения воздействие нескольких плазменных импуль-

сов, в то время как железо поражается от одного импульса на глубину, большую толщины этого листа. Представляется поэтому возможным производить фигурную поверхностную обработку металлической поверхности импульсными разрядами, используя трафареты из термически и механически малопрочных материалов. На рис. 3г приведена фотография звезды, выплавленной на поверхности стальной пластинки плазменной струей, когда непораженные области предохранялись листом писчей бумаги.

Предохранить металлическую поверхность от поражения можно также покрывая эту поверхность тонким слоем воды или масла (толщиной до 1, мм). Характерно, что через жидкость при этом передается механический импульс, и пластинки из мягкого металла (свинец, олово и др.) прогибаются в месте воздействия плазменной струи.

Описанные выше эксперименты относились к случаю, когда пластинка, на которую направлялись факелы, была электрически нейтральной. Однако факел может достигать со сверхзвуковой скоростью поверхность не только электрически нейтрального металла, но и поверхность противоположного электрода, если поступление вещества из отдельных электродов оказывается несимметричным [3]. Можно ожидать, что роль факельного механизма разрушения противостоящего электрода в этом случае также будет существенной. В работе было проверено это предположение. Для создания резко асимметричных условий поступления вещества из отдельных электродов применялась схема их установки, изображенная на рис. 16. Нижний электрод (катод) по-прежнему имел капилляр, формирующий сверхзвуковой факел, а вторым электродом (анодом) служила пластинка, эрозия которой изучалась.

Скоростные съемки такого разряда показали, что и в данном случае со стороны нижнего электрода распространяется сверхзвуковой факел, создающий у поверхности пластинки ударно-сжатую область плазмы. Фотографии оказались почти полностью совпадающими с представленными на рис. 2 и поэтому отдельно не приводятся. Образующийся в рассматриваемом случае эрозионный след приведен на рис. 3в. Сравнение его с тем, который имел место на электрически нейтральной поверхности (рис. 3а, б), позволяет обнаружить сильное подобие эрозионных следов. Размеры их также оказываются близкими. Все это позволяет считать, что в том случае, когда высокоскоростной факел достигает противостоящего электрода, воздействие его на электрод является существенной причиной эрозии последнего.

Во всех рассмотренных выше случаях факел, распространяющийся из нижнего электрода, формировался с помощью изолятора с отверстием. Исследования показали, что наличие такой локализации разряда не является необходимым условием образования факелов, достигающих противоположного электрода со сверхзвуковой скоростью. Подобные факелы могут образовываться и непосредственно из электрода, особенно при более высоких напряжениях и когда электрод имеет коническую форму. На рис. 4а, б показаны развертка и покадровая съемка разряда при установке электродов, соответствующей рис. 1в. Режим разряда: $C = 200 \text{ мкф}$, $U = 6 \text{ кВ}$, $L = 1 \text{ мкгн}$. Из скоростных фотографий видно, что по-прежнему у поверхности верхнего плоского электрода образуется зона интенсивного свечения, появление которой может быть объяснено на основании рассмотренных выше гидродинамических представлений. Следует, однако, отметить, что ударно-сжатая область плазмы в данном случае, особенно в конечной стадии импульса, менее интенсивна и не так резко очерчена, как ранее. Если поражение электродов за счет их взаимодействия с ударно-сжатыми областями плазмы существенно, то следует ожидать, что разрушение стальной пластинки при данном режиме разряда должно быть меньшим, чем ранее, несмотря на то, что мощность разряда возросла. Исследование полученного эрозионного следа (рис. 4в) подтверждает это предположение.

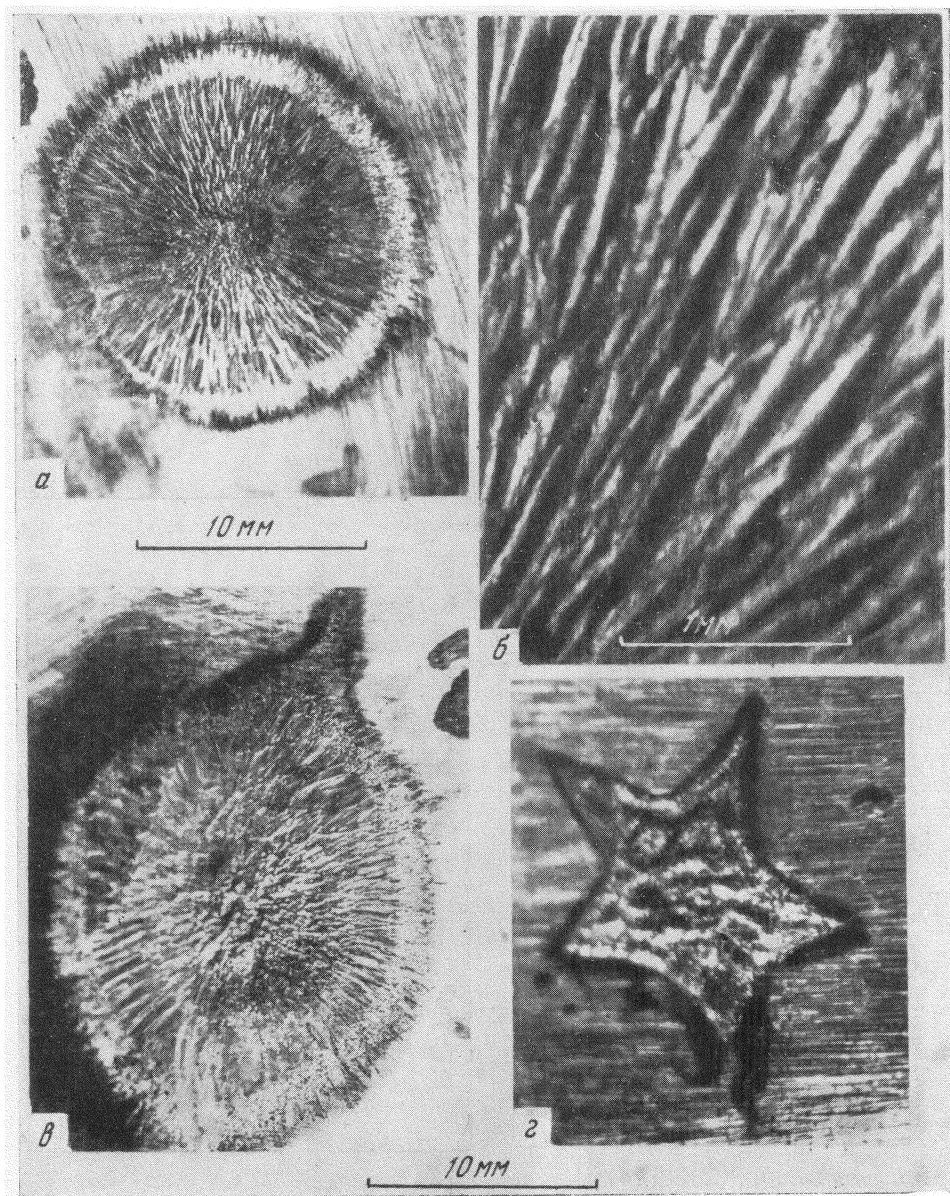


Рис. 3. Фотографии следов поражения, образованных сверхзвуковыми факелами на электрически нейтральной стальной пластинке (а, б), на пластинке, служащей анодом (в), и нейтральной пластинке, покрытой листом писчей бумаги с фигурным вырезом (г)

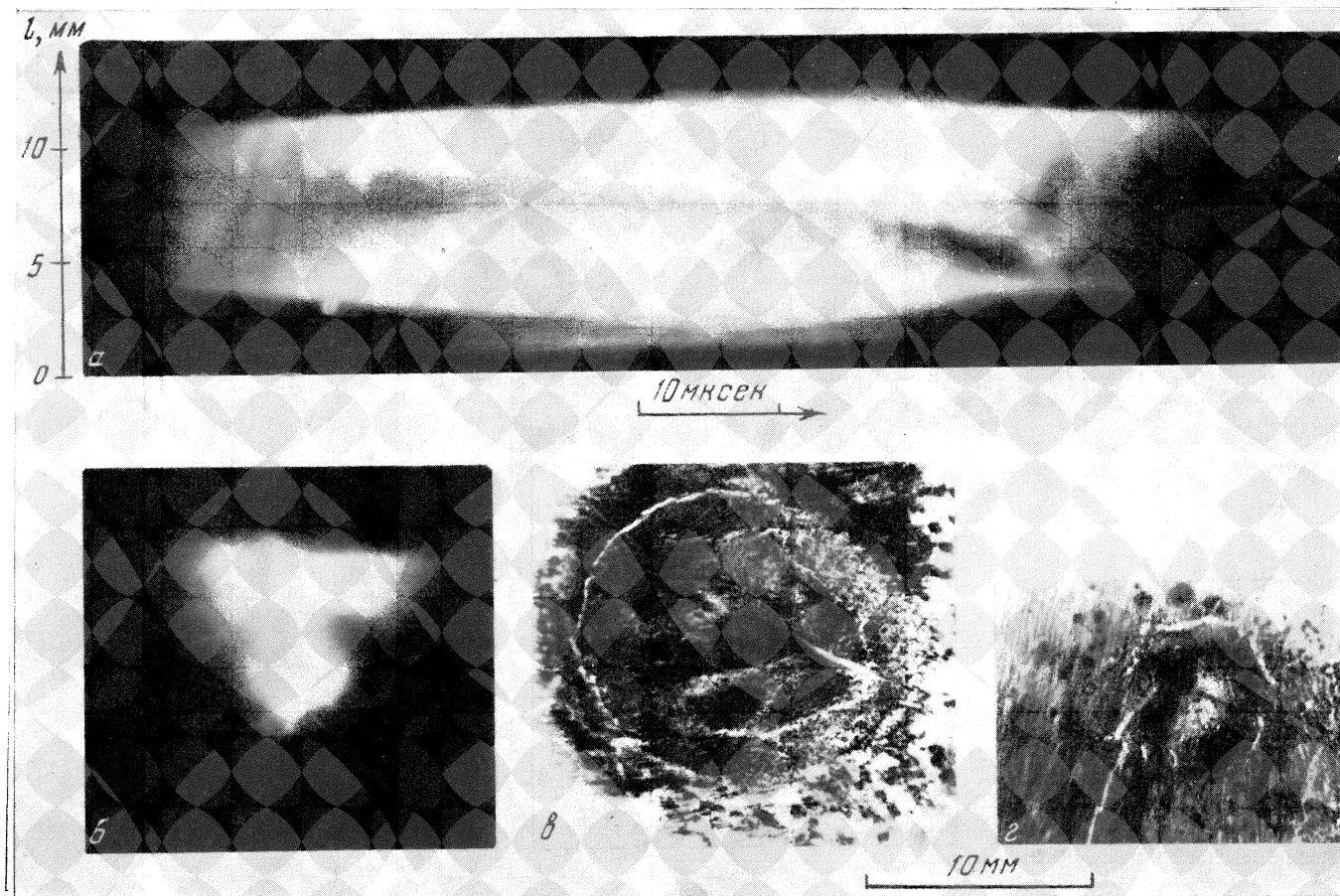


Рис. 4. Временная развертка (а), кадр скоростной съемки (б) и эрозионные следы на стальной пластинке (в, з). Нижний электрод заострен. Напряжение 6 кв (а, б, в) и 3 кв (з)

Совсем незначительным становится поражение стальной пластинки с применением открытого противостоящего электрода, если напряжение разряда остается прежним (рис. 4а). В этом случае устойчивой яркой области у поверхности пластинки не обнаруживается. Характерно, что зона поражения, в отличие от прежних экспериментов, начинает покрываться окислами.

Таким образом, в том случае, когда выбрасываемые при разряде факелы достигают противостоящего электрода со сверхзвуковой скоростью, воздействие этих факелов является важной причиной эрозии металла. При этом механизм разрушения электродов состоит в плавлении металла и последующем уносе расплавленной пленки потоком. Достигать противостоящих электродов со сверхзвуковой скоростью факелы могут только при асимметричных условиях поступления вещества из анода и катода. В противном случае взаимодействие факелов приводит к образованию ударно-сжатой области плазмы в межэлектродном промежутке, в которой гасится скорость факелов [3]. Асимметрия в поступлении вещества может быть создана искусственно, как это делалось в работе. Однако она может быть и естественной, обусловленной нестационарностью поступления вещества электродов при разряде.

Институт физики
Академии наук БССР

Поступила в редакцию
7 XII 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Л. Мандельштам, С. М. Райский. Изв. АН СССР, сер. физ., 13, 549, 1949.
2. Б. Н. Золотых. Электрические контакты, Изд-во «Энергия», 1964.
3. М. А. Султанов, Л. И. Киселевский. Теплофизика высоких температур, 4, 40, 1966.
4. М. А. Султанов, Л. И. Киселевский. Ж. прикл. спектр., 1, 268, 1964.
5. Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошечский, В. М. Шелемина. Оптика и спектроскопия, 15, 743, 1963.
6. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред, Гостехтеоретиздат, 1954.
7. В. А. Бронштейн. Проблемы движения в атмосфере крупных метеоритных тел, Изд-во АН СССР, 1963.
8. Л. Кринов. Основы метеоритики, Гостехиздат, 1955.