

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ ПРИ ТОЧЕЧНОМ ВЗРЫВЕ

А.В. Пинаев¹, В.А. Пинаев², А.П. Дрожжин¹

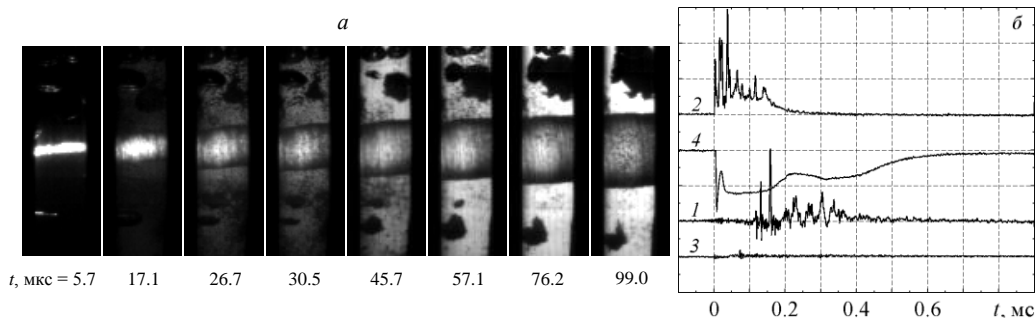
¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
630090, Новосибирск, Россия*

Выполнены покадровые съемки и измерены профили давления с целью изучения развития плазменного пузыря при взрыве проволоочки, поведения пузырьков в коротких ударных волнах УВ, а также для доказательства существования ударно-волнового механизма инициирования пузырьковой детонации ПД. Основная часть экспериментов проведена в области энергий взрыва W_0 , величина которых не более чем на порядок превышает критическую энергию инициирования ПД W^* . В качестве жидкостей использовали воду или смесь 75% H_2O +25%глицерина, в качестве газов в пузырьках – воздух, либо $C_2H_2+2.5O_2$. Размер пузырьков 3-4 мм, объемная концентрация $\beta_0 = 1\div 4\%$.

Взрыв проволоочки в воде и инертной газожидкостной среде. Во всех опытах в течение 2.5-4 мкс после подачи напряжения происходил резкий рост, и затем падение тока до нуля, обусловленное разрывом электрической цепи при взрыве проволоочки. Соответствующая длительность первой яркой вспышки проволоочки составляла 6.5-13.5 мкс. Начальная плотность тока в проводниках $j \approx (0.4\div 1.4) 10^8$ А/см². Потеря проводимости взрывающихся проводников в наших экспериментах при таких j сопровождается образованием зольных микрокапель. Разогрев и свечение проволоочки начинаются на 1.5-3.5 мкс позже момента времени максимума разрядного тока. Продолжительность свечения превышает время протекания тока. Если $W_0 > 18$ Дж, то после первого наблюдается второй пик свечения плазменного пузыря, возникающий после пробоя разрядного промежутка. Длительность и интенсивность повторного свечения возрастают с увеличением W_0 , продолжительность свечения в несколько раз превышает время выделения энергии.

На плазменном пузыре видны поперечные полосы с шагом 0.8-0.9 мм, повторяющие форму его поверхности. За время регистрации пузырь совершал одно полное колебание, свечение плазмы обычно исчезало к моменту максимального расширения. Причиной образования периодических полос на поверхности плазменного пузыря является стратифицированная неустойчивость расплавленного жидкого токового проводника на его ранней стадии взрыва. Существует две основных точки зрения на причины образования страт (чередующихся слоев материала низкой и высокой плотности) при электрическом взрыве проводника – перетяжная [1-3] и перегревная [4-6] неустойчивости. Для выяснения механизма образования неустойчивости сделаны необходимые оценки. Глубина скин-слоя, определенная по характерному времени нарастания тока, $\Delta \approx 0.34$ мм, время скинирования $\tau_{sk} \approx 13$ нс. Время взрыва или время ввода энергии в проводник $\tau_1 \approx 0.6$ мкс [7]. Поскольку $\tau_{sk} \ll \tau_1$, то сверхбыстрый режим в наших опытах не реализуется. Время развития винтовых МГД-неустойчивостей [8] $\tau_2 \approx 0.36$ мкс. Поскольку $\tau_1 \geq \tau_2$ и оценка выполнялась при максимальном значении W_0 , то взрывы проводников реализуются в медленном режиме вблизи условной границы между быстрым и медленным режимами по механизму перетяжной неустойчивости с модой $m = 0$. В [9] для определения режима взрыва проводника использован энергетический подход с оценками энергии, переданной в проволоочку, E_{in} и энергии сублимации материала проволоочки E_{at} . Установлено,



Фотоснимки взрывающейся проволочки в воде с пузырьками воздуха (а), (б) – соответствующая осциллограмма профилей давления (сигналы 1÷3) и свечения (4), по вертикали: 1÷3 – 5 МПа/дел, 4 – 5 В/дел; $C_0 = 1$ мкФ, $W_0 = 24.5$ Дж, $\beta_0 = 2\%$.

что образование страт происходит в быстром режиме взрыва проволочки, когда $0.6 \leq E_{in} / E_{at} \leq 2$. В наших опытах $E_{in} / E_{at} \geq 1.5$. Это означает, что реализуется механизм перегретной неустойчивости, приводящей к образованию страт. Из оценок следует, что в наших экспериментах может осуществляться как перегретная, так и перетяжная неустойчивость.

Характер начальной стадии взрыва проводника практически не зависит от внешней среды. В пузырьковой среде, как и в жидкости, регистрируется короткая вспышка, длительность которой определяется в основном параметрами и свойствами проводника. На поверхности образующегося после взрыва плазменного пузыря возникают поперечные линии неустойчивости (рис. а). Пузырьки, расположенные вблизи расширяющегося плазменного пузыря, иногда оказывают влияние на форму пузыря, искажая его цилиндрическую поверхность. В пузырьковой среде короткая сильная УВ после взрыва проводника, находящегося напротив D_2 (рис. б, сигнал 2), затухает гораздо быстрее, чем в жидкости без пузырьков – на датчике D_3 (3), более удаленном от проволочки чем датчик D_1 (1), УВ практически исчезает. В зависимости от значений W_0 , β_0 и случайного расположения пузырьков степень затухания УВ может изменяться и датчики D_1 , D_3 могут регистрировать волны различной конечной амплитуды.

Исследование динамики плазменного пузыря показывает, что с ростом W_0 скорость его расширения и максимальный размер при первом расширении увеличиваются. За время $t \leq 2$ мс в жидкости независимо от W_0 пузырь успевает совершить одно полное колебание, и затем при следующем расширении разрушается. В пузырьковой среде плазменный пузырь в течение того же времени постоянно расширяется и только при $W_0 \leq 32$ Дж испытывает небольшое сжатие. В пузырьковой среде из-за ее существенно большей сжимаемости по сравнению с чистой жидкостью пузырь испытывает большее расширение. На начальном этапе расширение границы плазменного пузыря в пузырьковой среде и воде происходит со скоростью около 100 м/с. В дальнейшем пузырь в воде расширяется медленнее, чем в пузырьковой среде, и при $t \sim 300$ мкс начинает сжиматься.

Взрыв проволочки в жидкости с пузырьками химически активного газа. В химически активной пузырьковой среде динамика расширяющегося плазменного пузыря остается практически такой же, как и в инертной пузырьковой среде. При величине электрической энергии, близкой к W^* , несмотря на сгорание отдельных пузырьков, детонация не возбуждается, УВ затухают. При $W_0 > W^*$ на 10-20% происходит возбуждение пузырьковой детонации. Время от начала взаимодействия пузырька с волной ПД до его воспла-

менения обычно составляет 20–30 мкс, длительность пульсаций давления соответствует узкому пику в окрестности точки воспламенения (4–6 мкс). В ПД степень сжатия пузырька $n \approx 3-4$, чему соответствуют в предположении адиабатичности процесса сжатия температура 1000–1350 К, давление 8–30 МПа и период индукции химической реакции газовой смеси менее 1 мкс. Волны ПД распространяются во все стороны от проволоочки. Оптические съемки подтвердили сделанный ранее в [10] вывод об ударно-волновом механизме инициирования ПД при взрыве проволоочки. Ни в одном опыте не было зарегистрировано воспламенение пузырьков при непосредственном контакте с проволоочкой, продуктами ее взрыва и плазменным пузырем. Возбуждение детонации происходило всегда при $W_0 > W^*$, когда после разрушения проволоочки формировалась короткая и сильная УВ. Форма профиля давления вблизи взрывающейся проволоочки близка к профилю давления волны ПД – это означает, что в этом процессе реализуется резонансный ударно-волновой механизм инициирования ПД.

Проведенные опыты позволили построить область существования ПД в координатах (W_1, β_0) , где $W_1 = 2/3 W_0$ – переданная в проволоочку и плазменный пузырь энергия конденсатора. В [8] при исследовании взрыва проводников в воздухе было установлено, что УВ образуется, если W_0 превышает энергию плавления проволоочки и почти в 2 раза меньше энергии ее испарения. Т.е. утверждалось, что пороговый взрыв проволоочек в воздухе при атмосферном давлении происходит без их испарения, УВ образуется по механизму разбрызгивания жидкого металла. В наших опытах в газожидкостной среде, где существенно ниже сжимаемость среды, значительно выше плотность и теплопотери на границе жидкий металл – жидкость, нельзя сделать однозначный вывод о связи плавления проводника с образованием пороговой УВ. Причинами взрывного разрушения проводника в газожидкостной среде кроме токовой неустойчивости являются его вскипание и частичное испарение.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант №15-01-01154а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Перегуд Б.П., Абрамова К.Б.** Экспериментальное исследование электрического взрыва // Докл. АН СССР. 1964. Т. 157, №4. С. 837-840.
2. **Абрамова К.Б., Златин Н.А., Перегуд Б.П.** Магнитогиродинамические неустойчивости жидких и твердых проводников. Разрушение проводников электрическим током // ЖЭТФ. 1975. Т. 69, вып. 6(12). С. 2007-2022.
3. **Chittenden J.P., Lebedev S.V., Ruiz-Camacho J. et al.** Plasma formation in metallic wire Z pinches // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 61. P. 4370-4380.
4. **Валуев А.А., Дихтер И.Я., Зейгарник В.А.** Страты при электрическом взрыве цезиевых проволок при закритических давлениях // ЖТФ. 1978. Т. 48, вып. 10. С. 2088-2096.
5. **Oreshkin V.I., Baksht R.B., Ratakhin N.A. et al.** Wire explosion in vacuum simulation of a striation appearance // Phys. Plasmas. 2004. Vol. 11. P. 4771 -4776.
6. **Oreshkin V.I.** Thermal instability during an electrical wire explosion // Phys. Plasmas. 2008. Vol. 15. 092103.
7. **Месяц Г.А.** Импульсная энергетика и электроника // М.: Наука, 2004.
8. **Орешкин В.И., Хищенко К.В., Левашов П.Р. и др.** Образование страт при быстром электрическом взрыве цилиндрических проводников // ТВТ. 2012. Т. 50, №5. С. 625-637.
9. **Бакшт Р.Б., Ткаченко С.И., Романова В.М. и др.** Динамика стратообразования и развитие перегретной неустойчивости при электрическом взрыве проводников // ЖТФ. 2013. Т.83, вып. 8. С.43-52.
10. **Пинаев А.В., Кочетков И.И.** Критическая энергия инициирования волны пузырьковой детонации при взрыве проволоочки // Физика горения и взрыва. 2012. Т.48, №3. С. 133-139.