

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕГОРАНИЯ МОСТИКОВ НАКАЛИВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В. Ф. Проскудин, В. А. Голубев, П. Г. Бережко,

В. Н. Лобанов, Е. Н. Беляев

ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Показано, что химические окислительно-восстановительные свойства среды, окружающей мостик накаливания из высокоомного сплава, при определенных условиях могут существенным образом влиять на процесс нагрева мостика электрическим током на стадии, близкой к его разрушению (перегоранию), способствуя или противодействуя появлению дополнительной стадии нагрева уже расплавленного мостика.

Проволочные мостики накаливания используются для инициирования самых различных систем (газообразных [1], жидких [2] и твердых [3]). Закономерности зажигания таких систем, в том числе и мостиками накаливания, изучены достаточно подробно [1, 3–6]. При этом необходимо отметить, что в ряде случаев на процесс зажигания заметное влияние оказывает окружающая среда [7]. Существенную роль в процессе нагрева мостика накаливания может играть образующаяся на его поверхности тугоплавкая окисная пленка [6, 8]. Поэтому в случае зажигания проволочными мостиками накаливания особенное значение приобретают химические свойства окружающей среды\*, поскольку именно они определяют поведение окисной пленки в процессе разогрева мостика.

В зависимости от величины тепловой мощности, выделяемой в мостике электрическим током, его нагрев протекает в одном из трех режимов, различающихся тремя агрегатными состояниями материала мостика, в котором он находится при достижении максимальной температуры нагрева (твердом, жидком или парообразном). Для разных режимов нагрева мостика влияние окисной пленки на протекание процесса его нагрева будет различным.

При плотности тока  $j$ , протекающего по мостику, меньше чем  $\approx 10^5$  А/см<sup>2</sup> мощность тепловыделения в мостике сравнима с теплоотводом в окружающую среду при температуре, не превышающей температуры плавления материала мостика. Поэтому мостик, находясь в твердом состоянии, сохраняет свою целостность и может поддерживаться в нагретом

состоянии теоретически неограниченно долго, и разрушение его наступает только от теплового воздействия воспламенившейся поджигаемой системы. В этом режиме влияние химических свойств окружающей среды на процесс нагрева мостика накаливания должно быть минимальным и может выражаться в виде коррозии поверхности мостика при очень длительном процессе нагрева до воспламенения поджигаемой системы.

При пропускании по мостику токов большей плотности ( $j = 10^5 \div 10^6$  А/см<sup>2</sup>) он разогревается уже настолько, что происходит плавление как материала мостика, так и более тугоплавкой окисной пленки (если такая образуется на его поверхности) [8]. В результате перехода в жидкое состояние мостик накаливания достаточно быстро разрушается (перегорает). Для мостиков, работающих в таком режиме, влияние химических свойств окружающей среды может оказаться весьма значимым, поскольку эти свойства, определяющие состояние окисной пленки на поверхности мостика, будут определять и условия его разрушения (перегорания), влияя тем самым на параметры генерируемого мостиком теплового импульса. Необходимость учета этого обстоятельства при анализе закономерностей зажигания различных систем мостиками накаливания при  $j = 10^5 \div 10^6$  А/см<sup>2</sup> делает весьма актуальным изучение особенностей перегорания мостиков накаливания в различных средах именно для данного режима нагрева. (Мостик может также работать в режиме «взрывающейся проволоки», когда при  $j = 10^7 \div 10^8$  А/см<sup>2</sup> за время порядка  $10^{-6}$  с происходит его нагрев и испарение с интенсивностью взрыва [9]. Зажигание пиротехнических систем в таком режиме

\* В качестве окружающей среды для мостиков накаливания может выступать и сама поджигаемая система.

обычно не производят, и здесь этот режим не рассматривается.)

В настоящей работе использовали установку, позволяющую с помощью фотодиода ФД-3 регистрировать процесс нагрева проволочного мостика накаливания по изменению его светимости в течение всего времени «жизни»  $\tau_L$ , т. е. от момента подачи напряжения на мостик до момента его разрушения (перегорания) [8].

Для изучения поведения мостиков накаливания в газовой среде исследуемую проволочку закрепляли на весу между двумя стальными электродами, расположенными друг от друга на расстоянии 3 мм. Фотодиод ФД-3 помещали на расстоянии  $\approx 5$  мм от мостика. Вся эта конструкция располагалась в герметичном контейнере, внутри которого создавалась необходимая атмосфера. Были испытаны мостики из нихромовой, константановой, манганиновой, вольфрамовой и платиновой проволочек диаметром  $20 \div 70$  мкм. Постоянное электрическое напряжение, подаваемое на мостик накаливания, составляло  $6 \div 20$  В. При этом время «жизни» мостиков в зависимости от величины подаваемого напряжения лежало в пределах от  $\approx 0,5$  до  $\approx 5$  мс.

В качестве окислительной газовой среды использовался атмосферный воздух, а в качестве восстановительной — водород при давлении 0,1 МПа.

Характерный вид осциллограмм, получаемых в этих опытах с помощью осциллографа С8-17, показан на рис. 1.

Осциллограммы, описывающие поведение мостиков из высокоомных сплавов (нихрома, константана и манганина) при нагреве их электрическим током на воздухе (см. рис. 1, а), показывают, что время «жизни» мостиков складывается из трех стадий: нагрев до плавления (I), плавление (II) и дальнейший нагрев после расплавления до разрушения (III). Причем длительность стадии нагрева III составляет  $\approx 20\%$  от всего времени «жизни» мостика накаливания.

Оценки показывают, что мостик накаливания после расплавления, находясь в неустойчивом положении, должен потерять форму и разрушиться на отдельные капли за время порядка  $10^{-2}$  мс. Следовательно, стадия III нагрева мостиков из высокоомных сплавов, длительность которой обычно на порядок (и более) превышает значение  $10^{-2}$  мс и составляет неизменную долю от времени «жизни» мостика,

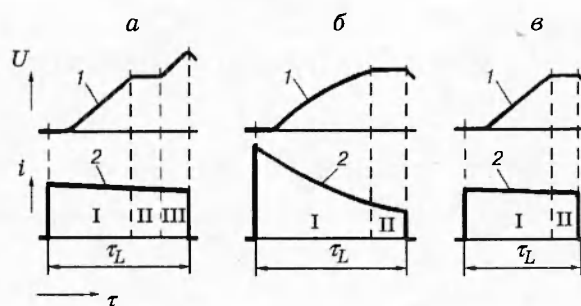


Рис. 1. Характерный вид осциллограмм, получаемых при нагреве мостика накаливания электрическим током:

а — для нихромовых, константановых и манганиновых мостиков, перегорающих в атмосфере воздуха; б — для вольфрамовых и платиновых мостиков, перегорающих в атмосфере воздуха; в — для нихромовых, константановых и манганиновых мостиков, перегорающих в атмосфере водорода; 1 — осциллограмма электрического сигнала  $U$ , генерируемого фотодиодом; 2 — осциллограмма тока  $i$ , проходящего по мостiku

обусловлена наличием на его поверхности более тугоплавкой оболочки, предположительно окисной, которая и удерживает жидкий мостик от разрушения в течение времени, необходимого для нагрева жидкого мостика до температуры расплавления этой оболочки [6, 8].

В случае, когда окисная пленка имеет температуру плавления ниже, чем у основного металла (вольфрам), или когда ее вовсе нет (платина), нагрев мостика накаливания протекает в две стадии: нагрев до плавления (I) и плавление (II) (см. рис. 1, б).

При нагреве в атмосфере водорода нихромовые, константановые и манганиновые мостики, лишившись окисной пленки, разрушаются сразу же после завершения стадии нагрева II (см. рис. 1, в).

Поскольку различные подготовительные работы (включая изготовление и хранение проволоки) с мостиками накаливания в течение длительного времени проводятся на воздухе, следует ожидать, что поверхность мостиков в исходном состоянии достаточно хорошо окислена. И действительно, при испытаниях нихромовых, константановых и манганиновых мостиков в нейтральной «среде» — в вакууме ( $\approx 0,1$  Па) — практически во всех опытах присутствовали три стадии нагрева (как на рис. 1, а). Но в некоторых случаях нагрев нихромовых мостиков в вакууме протекал в две

стадии (как на рис. 1, в). Отсюда следует, что в исходном состоянии поверхность нихромовых (а возможно, и константановых и марганциновых) мостиков может иногда не иметь достаточно «прочной» окисной пленки.

Дальнейшие опыты проводили с нихромовыми (X20H80) мостиками накаливания диаметром 40 мкм и длиной 3 мм. Исследовали влияние химических окислительно-восстановительных свойств жидких и твердых сред на характер перегорания мостика. Электрическое напряжение, подаваемое на мостик, составляло 12 В. При этом время «жизни» мостиков в зависимости от условий опыта находилось пределах  $1 \div 1,5$  мс.

Лабораторная сборка для нагревания электрическим током мостиков накаливания в жидких средах представляла собой чашку из пресс-материала АГ-4, на дне которой располагался мостик накаливания, прикрепленный контактной сваркой к стальным электродам (рис. 2, а). Чашку после заполнения требуемой жидкостью закрывали пластиной из оргстекла, за которой располагали фотодиод.

Такая лабораторная сборка предназначена для использования прозрачных жидкостей с тем, чтобы фотодиод мог регистрировать протекание процесса нагрева мостика накаливания по светимости последнего.

В качестве жидких сред использовали 23 %-й водный раствор перекиси водорода (окислительная среда), дистиллированную воду

(среда, близкая к нейтральной), ацетон (восстановительная среда) и масло промышленное И-8А (которое также можно отнести к восстановителям).

В среде перекиси водорода нагрев мостика накаливания протекает в три стадии. В среде дистиллированной воды в основном также наблюдаются три стадии нагрева мостика, но в отдельных редких опытах разрушение мостика происходит сразу после завершения стадии нагрева II. Это еще раз подтверждает тот факт, что в исходном состоянии поверхность нихромовых мостиков в ряде случаев может не иметь достаточно «прочной» окисной пленки.

В среде ацетона в большей части опытов процесс нагрева мостиков ограничивается протеканием только первых двух стадий, так как окисная пленка, находясь в контакте с восстановителем, успевает к моменту полного расплавления материала мостика в значительной степени восстановиться. И лишь в некоторых случаях наблюдается появление стадии нагрева III мостика, обусловленное, по видимому тем, что окисная пленка в исходном состоянии оказывалась слишком толстой.

В среде масла промышленного И-8А нагрев мостика стабильно протекает в две стадии.

Для изучения процесса нагрева мостиков накаливания, находящихся в контакте с прессованными порошками твердых веществ, использовали лабораторную сборку (рис. 2, б), в которой нихромовую проволочку с наложенными на нее двумя электродами в виде узких тонких медных полосок располагали на подложке из слюды, покоящейся, в свою очередь, на подставке из оргстекла, за которой располагался фотодиод.

На мостик, захватывая частично и медные полоски, насыпали тонкий слой порошка требуемого вещества, который пластмассовой чашкой с запрессованным в нее таким же порошком прижимали к подложке, обеспечивая контакт как медных полосок с нихромовой проволочкой, так и порошка с мостиком накаливания [8]. Перед применением в опытах порошки дополнительно измельчали в ступке. Все работы проводили на воздухе.

В качестве окислительной среды использовали смесь порошков свинцового сурика  $Pb_3O_4$  с окисью алюминия  $Al_2O_3$  в соотношении 0,3/0,7, в качестве нейтральной среды — порошок окиси алюминия, а в качестве восстановительной среды — порошки соли Мора

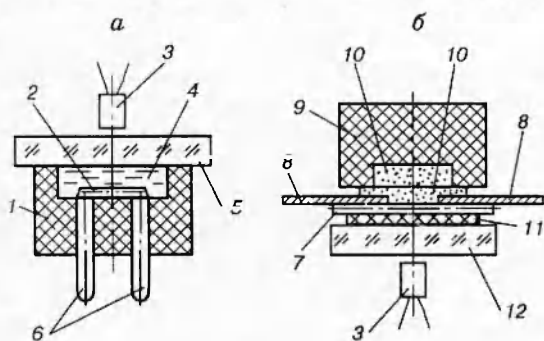


Рис. 2. Схемы лабораторных сборок:

а — мостик в контакте с жидкой средой, б — в контакте с твердой средой (в виде прессованного порошка); 1 — чашка из пресс-материала АГ-4, 2 — мостик накаливания, 3 — фотодиод, 4 — жидкость, 5 — пластина, 6 — стальные электроды, 7 — нихромовая проволочка, 8 — медные электроды, 9 — пластмассовая чашка, 10 — порошок, 11 — подложка, 12 — подставка

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , сернокислого гидроксиламина  $(\text{NH}_3\text{OH})_2\text{SO}_4$ , гидрида алюминия  $\text{AlH}_3$  и хлористого олова  $\text{SnCl}_2$ .

Кроме того, изучали нагрев мостиков, залитых эпоксидным клеем ЭЛ-20 в чашке (см. рис. 2, а). Опыты проводили после затвердевания клея (спустя несколько суток после заливки). Было получено, что в контакте с окислительной и нейтральной средой мостики накаливания за время «жизни» проходят все три стадии нагрева. В контакте с таким восстановителем, как хлористое олово, мостики накаливания стабильно разрушаются сразу после завершения стадии нагрева II. Аналогичным образом перегорают и мостики, залитые эпоксидным клеем. А в опытах, где мостики контактировали с порошками соли Мора, сернокислого гидроксиламина и гидрида алюминия, наблюдалось как наличие, так и отсутствие стадии нагрева III, а также варьирование ее длительности в интервале от 0 до 20 % времени «жизни» мостика. Это, вероятно, определяется реализующимся в каждом конкретном эксперименте соотношением долей влияния порошка восстановителя, кислорода воздуха (находящегося в порах прессовки из порошка восстановителя) и степени окисленности поверхности мостика в исходном состоянии на скорость восстановления (разрушения) или образования окисной пленки.

Анализ полученных результатов показывает, что в зависимости от химических окислительно-восстановительных свойств окружающей среды (в газовой, жидкой или твердой фазе) мостики накаливания из высокоомных сплавов, работающие в режиме, завершающемся их расплавлением, могут существенно (на  $\approx 20\%$ ) изменять такие важные для зажигания параметры, как время «жизни», количество электрической энергии, вводимое в мостик до его разрушения (перегорания), максимальная температура разогрева мостика, интенсивность вводимой в поджигаемую систему тепловой энергии и др., за счет наличия или отсутствия стадии нагрева III. Эта неоднозначность не проявляется, если плотность тока достаточно мала ( $j < 10^5 \text{ А/см}^2$ ), вследствие чего температура мостика не превышает температуру его плавления. Однако, обладая рядом и других преимуществ, такой режим нагрева мостиков накаливания имеет существенный недостаток — большую продолжительность процесса зажигания, достигающую иногда нескольких секунд. Поэтому, когда тре-

буется определенное быстроедействие пиротехнического устройства, приходится сознательно идти на пропускание по мостику тока большей плотности ( $j > 10^5 \text{ А/см}^2$ ), понимая, что возможно преждевременное его разрушение из-за расплавления материала мостика. Но и в этом случае не следует ожидать появления отказов в зажигании, если поджигаемая система настолько чувствительна к тепловому воздействию, что ее воспламенение всегда происходит до момента расплавления мостика накаливания. И только для таких систем, где воспламенение может реализовываться после расплавления мостика, наличие или отсутствие стадии нагрева III, обусловливаемое окислительно-восстановительными свойствами окружающей среды, может иметь решающее значение, влияющее на исход процесса зажигания и придающее тем самым определенную неоднозначность поведению системы в зависимости от ее химических и теплофизических свойств. Наличие стадии III, приводя к увеличению интенсивности ввода тепловой энергии  $q$  в поджигаемую систему на последней стадии нагрева мостика, для одних веществ может стимулировать процесс зажигания, а для других, возможно, оказывать и обратное действие.

Известно, например, что зажигание гексогена лазерным излучением при  $q \geq 270 \text{ Вт/см}^2$  затрудняется по мере роста интенсивности ввода тепловой энергии в систему, что обусловлено, в первую очередь, кипением гексогена, начинающимся при  $q \approx 200 \text{ Вт/см}^2$  [7]. Поэтому при зажигании гексогена мостиком из высокоомного сплава в режиме, сопровождающемся плавлением мостика, для которого интенсивность ввода тепловой энергии в конденсированную систему характеризуется уровнем  $> 10^3 \text{ Вт/см}^2$ , следует ожидать, что наличие стадии нагрева III мостика будет приводить не к стимулированию процесса зажигания, а наоборот, к затруднению его прохождения. Данный эффект, по-видимому, может проявляться при зажигании довольно широкого класса конденсированных систем, которым свойственно закипать (сублимироваться) при введении тепловой энергии с интенсивностью от нескольких сотен до нескольких тысяч ватт на квадратный сантиметр (вторичные взрывные вещества, пороха), особенно если не предусмотрены конструктивные меры, предотвращающие разлет испаряющегося вещества и продуктов реакции из зоны теплового воздействия [10].

Для других классов конденсированных систем (термитные смеси, системы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза), температура закипания компонентов которых выше температуры разогрева мостика накаливания на стадии III, наличие этой стадии должно стимулировать процесс зажигания. Причем в ряде случаев для успешного зажигания подобных систем мостиками накаливания, работающими в режиме, сопровождающемся плавлением мостика, наличие стадии III обязательно. Это показывают, в частности, результаты изучения возможности зажигания смеси  $Zr + WO_3$  нихромовым мостиком диаметром 40 мкм и длиной 3 мм. Опыты проводили с использованием лабораторной сборки, показанной на рис. 2, б. На мостик подавали напряжение 12 В.

Проведено две серии экспериментов. В первой серии на части мостика, примыкающей к одному из электродов (на половине длины мостика), располагался тонкий слой порошка хлористого олова. Оставшаяся часть мостика контактировала со смесью  $Zr + WO_3$ , располагаемой таким же тонким слоем. Порошки прижимали к мостику и подложке таблеткой из смеси  $Zr + WO_3$ , находящейся в пластмассовой чашке лабораторной сборки (см. рис. 2, б), затем подавали напряжение на мостик. В данных условиях процесс нагрева нихромового мостика накаливания электрическим током до перегорания всегда протекал в две стадии (стадия III нагрева отсутствовала, см. рис. 1, в); загорания смеси  $Zr + WO_3$  в первой серии опытов не происходило.

Во второй серии экспериментов использовали точно такую же лабораторную сборку, как и в первой, только вместо порошка хлористого олова на половине длины мостика размещали тонкий слой порошка окиси алюминия. Получаемые во второй серии опытов осциллограммы соответствовали показанной на рис. 1, а (т. е. фиксировалось наличие стадии III); во всех опытах было зарегистрировано загорание смеси  $Zr + WO_3$ .

Таким образом, опыты показали, что наличие или отсутствие стадии нагрева III мостика накаливания при зажигании трудновоспламеняемых систем в режиме, характеризующемся наличием стадии плавления материала мостика, может иметь решающее значение, определяя, произойдет ли воспламенение данной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При работе мостиков накаливания из высокоомных сплавов в условиях, обуславливающих наличие стадии плавления материала мостика, окислительно-восстановительные свойства окружающей среды могут оказывать существенное влияние на протекание завершающей стадии процесса нагрева мостика накаливания, стимулируя или затрудняя зажигание системы в зависимости от ее химических и теплотехнических свойств.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ВНИИ экспериментальной физики И. Л. Малкову, Н. М. Крекниной, А. А. Ускову, С. А. Другову и И. В. Шевцовой за помощь в работе.

Авторы считают своим долгом выразить также благодарность рецензенту нашей статьи за очень полезные и компетентные замечания, а также предложения, которые были реализованы при ее доработке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. 2-е изд. / Пер. с англ. под ред. К. И. Щелкина и А. А. Борисова. М.: Мир, 1968. С. 303-304.
2. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973. С. 225.
3. Лурье Л. И. Электрическое взрывание зарядов. М.: Наука, 1973.
4. Зарко В. Е., Хлевной С. С. Зажигание баллистического пороха накаленными проволочками // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 2. С. 158-170.
5. Толстых Н. Д., Павлыш Б. П. О механизме воспламенения электровоспламенителя промышленных электродетонаторов // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 4. С. 607-610.
6. Merzhanov A. G., Grigorjev Yu. M., Gal'chenko Yu. A. Aluminum ignition // Combust. Flame. 1977. V. 29, N 1. P. 1-14.
7. Страковский Л. Г., Уляков П. И., Фролов Е. И. Воспламенение некоторых вторичных ВВ лазерным излучением // Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977. С. 8-12.
8. Бережко П. Г., Проскудин В. Ф., Голубев В. А. и др. Использование светочувствительного элемента для изучения зажигания пиротехнических смесей мостиком накаливания.

- М.: ЦНИИАтоминформ, 1991. (Препр. ВНИИ-ЭФ, № 7-91).
9. **Взрывающиеся** проволочки: Сб. статей / Пер. с англ. под ред. А. А. Рухадзе. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
10. **Карабанов Ю. Ф., Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Зажигание твердых вторичных ВВ коротким импульсом ОКГ // Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977. С. 5-8.

*Поступила в редакцию 29/VII 1996 г.,  
в окончательном варианте — 26/VI 1997 г.*

---