

ИССЛЕДОВАНИЕ РАННЕЙ СТАДИИ ВЗРЫВА ТОНКИХ ПЛОСКИХ ФОЛЬГ В СИЛЬНОТОЧНОМ ДИОДЕ С ТОКОМ 40–80 кА

*И. Н. Тиликин**, *Т. А. Шелковенко*, *А. Р. Мингалеев*, *В. М. Романова*, *С. А. Пикуз*

*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 9 августа 2018 г.,
после переработки 11 января 2019 г.
Принята к публикации 15 января 2019 г.

Представлены результаты исследования начальной стадии наносекундного взрыва плоских фольг толщиной 1–15 мкм в диоде с током 40–80 кА. Методом проекционной рентгенографии получены изображения взорванных фольг с пространственным разрешением 3–4 мкм в мягком рентгеновском излучении ($E = 2.5\text{--}5$ кэВ) гибридного X-пинча и временным разрешением лучше 0.1 нс. Полоски из фольги шириной 0.3–2 мм и длиной 0.5–7 мм включались в цепь обратного тока диода сильноточного генератора БИН с амплитудой тока 270 кА и временем его нарастания 100 нс, основной нагрузкой которого являлся X-пинч. Эксперименты показали, что в фольге образуются мелкомасштабные структуры, форма и размер которых зависят от материала фольги, плотности и распределения тока через нее. Обсуждаются возможные сценарии образования наблюдавшихся структур.

DOI: 10.1134/S0044451019060166

1. ВВЕДЕНИЕ

Электровзрыв проводников используется при создании, исследовании и использовании большого количества научных и технологических процессов и устройств от электрических предохранителей, размыкателей и детонаторов [1, 2] до генераторов сверхмощных импульсов рентгеновского излучения [3] и производства нанопорошков [4, 5]. Несмотря на то что исследования в этой области ведутся уже много десятилетий, некоторые аспекты явлений, связанные со взрывом вещества под действием электрического тока, остаются невыясненными. Особенно это относится к начальной фазе процесса при «быстрых», субмикросекундных и наносекундных, взрывах, а именно такие взрывы являются основой современных технологий создания ультрадисперсных материалов и исследований по управляемому термоядерному синтезу при сжатии лайнеров с замагниченной плазмой [6, 7]. Трудности с исследованием начальной фазы электровзрыва проводников связаны, главным образом, с тем, что процессы фазовых

переходов и сопутствующей им трансформации вещества имеют объемный характер, а само вещество является труднодоступным для имеющихся диагностик, так как оно не прозрачно для зондирующего излучения. При этом такое излучение должно иметь чрезвычайно высокое пространственное (на уровне единиц микрометров) и временное (порядка наносекунды) разрешение. Одной из возможностей упростить задачу является использование в исследованиях тонких фольг при условии, что толщина скин-слоя сравнима с толщиной фольги, а материал фольги хотя бы частично прозрачен для зондирующего излучения.

Для лазерного излучения, в котором требуемые значения пространственного и временного разрешения в принципе достижимы, фольга, по крайней мере в исходном состоянии, непрозрачна. Поэтому хорошо разработанные лазерные методы для исследований трансформаций структуры фольги в начальной фазе процесса неприменимы. Использование «традиционного» рентгеновского излучения с жесткостью более 10–15 кэВ, получаемого в рентгеновских трубках, несмотря на его высокую проникающую способность, также встречает серьезные трудности. Во-первых, для достижения приемлемо-

* E-mail: ivan.tilikin@gmail.com

го пространственного разрешения необходимо использовать контактный метод, т. е. помещать приемник излучения непосредственно за исследуемым объектом, что практически невозможно при исследовании взрывных процессов. Во-вторых, заметный контраст изображений может быть получен только для материалов с большим зарядом ядра (тантал, вольфрам, золото, свинец) из-за малой толщины образцов. В-третьих, очень трудно достичь наносекундного временного разрешения.

Очень продуктивным для исследования различных физических объектов и быстропротекающих процессов в них оказалось использование мягкого рентгеновского излучения горячей точки X-пинчей [8–10]. В исследованиях врывающихся проволок были достигнуты рекордные значения по чувствительности, пространственному и временному разрешению и получены изображения чрезвычайно высокого качества. Именно этот метод был использован в настоящей работе для исследования врывающихся фольг на начальной стадии разряда, когда становится наблюдаемым изменение структуры материала.

Первоначальной мотивацией представленных исследований было наблюдение мелкокасптабной структуры, образующейся при взрыве алюминиевого лайнера толщиной 4 мкм и диаметром 4 мм на установке COBRA (Cornell beam research accelerator) с разрядным током 1.2 МА и временем его нарастания 100 нс [11] в экспериментах, проводимых в рамках программы MAGLIF (magnetized liner inertial fusion) [6, 7]. Специально выполненные эксперименты на установке БИН по взрыву плоских фольг той же толщины и из того же материала [12] показали, что при плотностях тока, сопоставимых с плотностью тока через лайнер, в фольге образуются весьма близкие по характеру распределения материала структуры. Значительно меньшая стоимость экспериментов на установке БИН по сравнению с установкой COBRA позволила провести существенно более детальные исследования взрыва фольг и установить зависимости характера взрыва от условий эксперимента.

Более того, переход от исследований цилиндрической геометрии (взрывающиеся проволоки) к плоской геометрии (взрывающиеся фольги) позволили изучать эволюцию структуры вещества при электрическом взрыве, не наблюдавшуюся ранее при взрыве проволок.

С точки зрения исследования начальной стадии трансформации металла, тонкие фольги, толщиной от долей микрона до десятков микрон, являются бо-

лее удобным объектом для исследований. Микронной толщины фольги шириной от долей миллиметра до нескольких миллиметров и длиной до десятков миллиметров в некотором приближении можно считать двумерным объектом. В таком объекте преобразования при электровзрыве видны на его поверхности или над ней, которая уже является большим одномерным объектом, удобным для изучения даже на начальной стадии электровзрыва. В экспериментах используются фольги из алюминия и меди, для которых оценка толщины скин-слоя составляет соответственно 26 и 21 мкм для тока со временем его нарастания 100 нс. Это говорит о том, что в экспериментах с фольгами толщиной до 15 мкм ток протекает по всей толщине фольги. Для такого объекта подходят диагностики, использующие для визуализации трансформации объекта излучение от оптического до рентгеновского диапазона, например, лазерные диагностики в оптическом диапазоне и проекционная рентгенография в мягком рентгеновском диапазоне. К тому же самосвечение фольги на начальной стадии взрыва в оптическом и УФ-диапазонах и его динамика дают косвенную информацию о распределении тока по объекту, что совершенно невозможно исследовать в случае взрыва проволоки.

В статье приведены экспериментальные данные, полученные при исследовании ранней стадии взрыва тонких плоских фольг, помещенных в цепь обратного тока генератора БИН.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Начальная стадия электровзрыва плоских фольг была исследована на генераторе БИН (250 кА, 100 нс, 300 кВ). В качестве нагрузки генератора использовался гибридный X-пинч (ГХП) [13], а в цепь обратного тока, вместо одного из стержней устанавливается исследуемая фольга. На рис. 1 приведена схема нагрузки генератора БИН. ГХП в качестве основной нагрузки генератора является точечным источником мягкого рентгеновского излучения (МРИ), с помощью которого получается рентгенограмма исследуемой фольги [8, 9]. Фольга в первых экспериментах приклеивалась проводящим клеем, а в последующих припаивалась к электродам для лучшего контакта с поверхностью, расположенной перпендикулярно излучению [14]. Проекционная рентгенография является основной диагностикой, используемой в данных экспериментах.

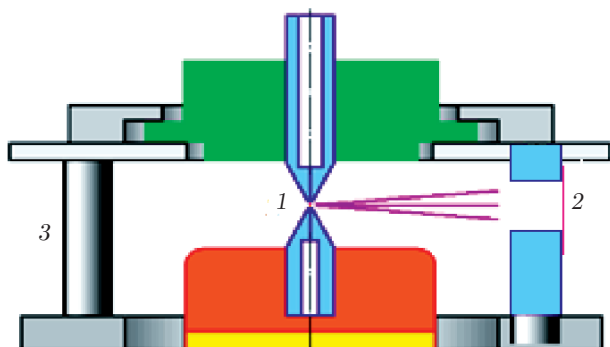


Рис. 1. Схема нагрузки генератора БИН для исследования взрыва тонкой фольги 2, помещенной в цепь обратного тока вместо одного из стержней 3, с помощью МРИ от ГХП 1

Для определения тока, протекающего через фольгу, применялся калиброванный пояс Роговского, установленный на электроде, к которому прикреплялась фольга. Напряжение измерялось с помощью резистивного делителя, установленного непосредственно около места крепления фольги к катоду. К сожалению, в данных экспериментах трудно вычистить индуктивную составляющую напряжения и убрать все наводки, поскольку две цепи (основная и цепь обратного тока) находятся слишком близко друг к другу, поэтому на данном этапе трудно судить о резистивном напряжении на фольге. В настоящее время мы измеряем ток через фольгу, который может изменяться в диапазоне 40–80 кА при постоянной скорости нарастания 100 нс. Так как фольгу устанавливают в цепи обратного тока, а параллельно ей помещают дополнительные стержни, по которым также протекает ток, то, изменяя их количество, можно изменять ток, текущий через фольгу. При этом на максимальное значение тока также влияют размер и материал фольги. Излучение ГХП регистрировалось алмазными датчиками с фотопроводимостью (ФПД).

Зарегистрированные в выстреле сигналы, изображения которых показаны на рис. 3, приведены на рис. 2. В данном выстреле в X-пинче образовались две горячие точки примерно одинаковой интенсивности, поэтому были зарегистрированы два пика на сигнале ФПД. Видно, что максимум тока через фольгу составляет около 55 кА. Изображения фольги получены через 78 и 90 нс от начала протекания тока. Ток к этим моментам времени составлял соответственно 41 и 44 кА. На рис. 2 также приведен сигнал с делителя напряжения, по форме которого можно сделать предположение, что пробой фольги

произошел около 30-й нс (резкий спад напряжения).

Одним из первых встал вопрос о том, какая структура появляется в начальные моменты времени, а какая образуется в результате дальнейшего нагрева и расширения вещества. Исследование взрывающейся фольги в цепи обратного тока ограничивает возможности получения изображения взрыва фольги в широких временных пределах из-за невозможности изменять время образования горячей точки ГХП в таких пределах. Однако это не мешает изменять ток, протекающий через фольгу, тем самым изменяя количество энергии, вкладываемой в фольгу. Для определения зависимости структуры взрыва фольги от плотности тока, а следовательно, и количества энергии, вложенной до момента пробоя, можно использовать фольгу, имеющую разную ширину на разных участках. Тем самым можно на одном изображении наблюдать участки с различной вложенной энергией. Такое сравнение будет справедливым, так как до момента пробоя ток протекает только по самой фольге, а значит, в более широкой части фольги плотность тока меньше. При одинаковой начальной толщине фольги это сравнение будет верным, несмотря на то, что толщина не может быть точно определена к моменту получения изображения из-за расширения зерна фольги [14].

На рис. 3 приведено изображение взрыва Al-фольги толщиной 4 мкм и шириной 1.5 мм около электродов и около 0.7 мм в центре. Длина фольги 3.6 мм. В результате взрыва X-пинча образовались две вспышки МРИ. В результате наблюдались два частично наложенных изображения сравнимого качества (по интенсивности, фоновому излучению, пространственному разрешению). Этот факт позволяет проследить динамику взрыва фольги. Вспышки произошли в различные моменты времени: через 78 и 90 нс после начала протекания тока. По развитию разрывов на фольге можно определить, какому времени соответствует каждое изображение. На рис. 3а отмечены контуры фольги, соответствующие двум временным кадрам: первый кадр обведен белой линией, второй — черной. Ток, протекающий через фольгу, нарастал и в моменты вспышек МРИ составлял соответственно 41 и 44 кА. На рис. 3г и рис. 3д приведены рентгенограммы края фольги в разные моменты времени. На рисунках видно, что на краях широких частей фольги возникают неоднородности, на месте которых затем появляются разрывы. Возможно, эти неоднородности — это очень узкие разрывы, но мы не можем их увидеть из-за явления фазового контраста [15]. В то же время в более узкой части фольги, где плотность

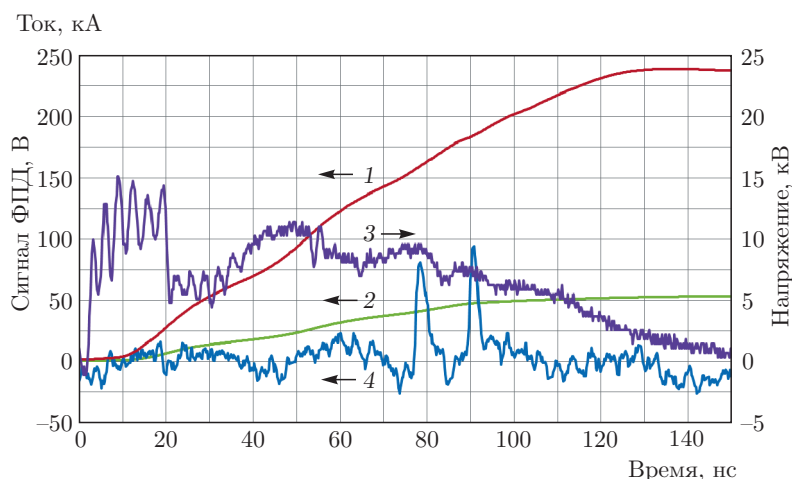


Рис. 2. Характерные сигналы, регистрируемые на генераторе БИН, при взрыве Al-фольги толщиной 4 мкм в обратном токопроводе: 1 — ток через ГХП; 2 — ток через фольгу; 3 — напряжение на фольге; 4 — сигнал ФПД, регистрирующий момент времени получения изображения фольги, количество вспышек и интенсивность МРИ

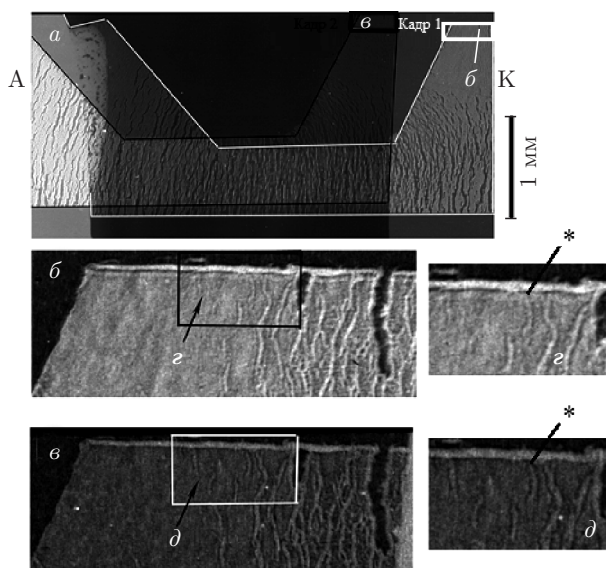


Рис. 3. Рентгенограмма взрыва Al-фольги толщиной 4 мкм, полученная в излучении ГХП с Mo-проволочкой диаметром 25 мкм: а — два изображения, полученные на 78 нс (белый контур) и 90 нс (черный контур); протекающий ток составлял соответственно 41 кА и 44 кА. Приведены увеличенные фрагменты кадров с белым контуром (б, з) и с черным контуром (в, д). На рисунке отмечены электроды: А — анод; К — катод; звездочками показаны разрывы, длины которых измерялись

тока к моменту пробоя была в два раза выше (так как ширина в два раза меньше), уже наблюдается большое число разрывов большой длины и увеличивающейся ширины. При этом из-за явления

фазового контраста края разрывов видны очень четко. На рис. 3 представлены два изображения, и мы можем оценить скорость расширения разрыва уже после пробоя поверхности фольги. Увеличение длины разрыва (отмеченного звездочкой на рисунке) составило около 90 мкм за время 12 нс. Таким образом, скорость развития разрыва составляет около 7.5 км/с. Эта скорость сравнима со скоростью звука в Al, которая составляет 6.4 км/с.

На рис. 3 видно, что разрывы возникают перпендикулярно направлению тока. Для подтверждения данного предположения были проведены эксперименты с фольгами различных форм. На рис. 4 представлены изображения Al-фольги толщиной 4 мкм, которая сужена в центре (рис. 4а), фольги с уширением в центре (рис. 4б) и фольги, вырезанной в форме буквы V (рис. 4в).

Если фольга имеет сужение или уширение, то распределение тока изменяется. Разрывы при этом также возникают перпендикулярно краю фольги, а значит, и перпендикулярно направлению тока. Аналогичное поведение наблюдается и в более сложном случае, когда фольга имеет вид буквы V. В данном случае у фольги есть участки, где ток движется под углом к промежутку катод-анод, при этом разрывы также повторяют это направление, оставаясь перпендикулярными направлению тока. Эти наблюдения позволяют сделать вывод о том, что образование разрывов связано с протеканием тока, и они возникают под его воздействием.

На приведенных выше рис. 3 и 4 наблюдаются лишь разрывы, перпендикулярные току. При этом

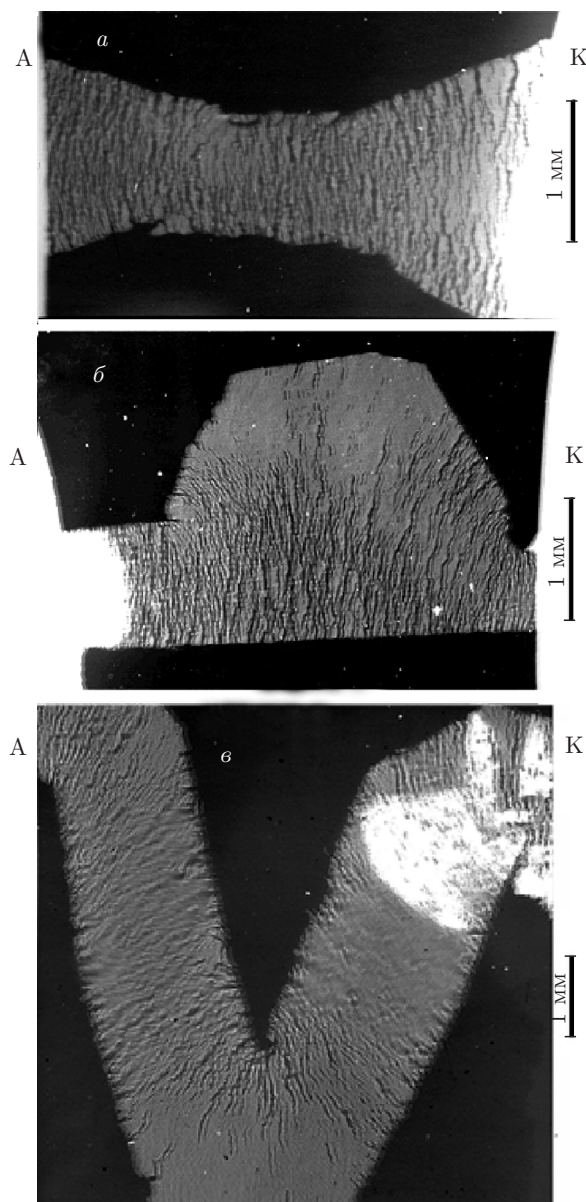


Рис. 4. Изображения процесса взрыва Al-фольги толщиной 4 мкм различной формы, полученные на 82 нс (а), 80 нс (б), 65 нс (е) от начала протекания тока, который составлял к моменту получения изображения 52 кА (а), 72 кА (б), 48 кА (е). На рисунке отмечены электроды: А — анод; К — катод

видно, что на некоторых участках фольги разрывы только зарождаются, никаких других структур не наблюдается. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о том, что разрывы являются начальной стадией взрыва фольги.

Из динамики образования и развития разрывов видно, что в металле существуют произвольно расположенные небольшие участки с более вы-

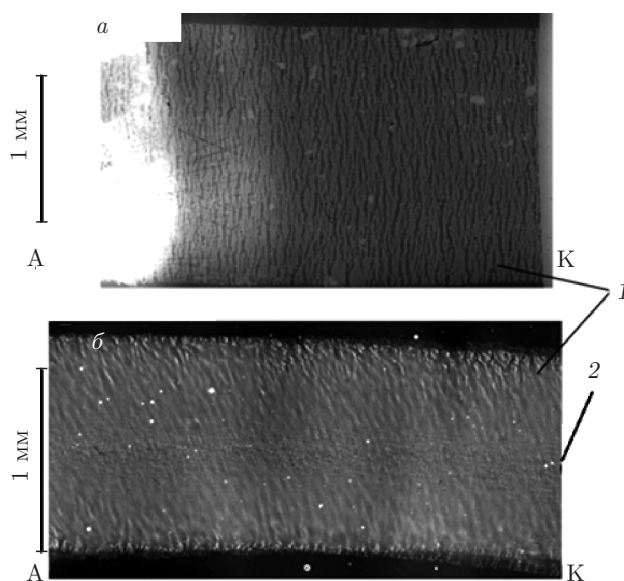


Рис. 5. Изображения взрыва Al-фольги толщиной 4 мкм и шириной 1.8 мм (а) и 1.2 мм (б), полученные соответственно на 40 нс и 45 нс: 1 — разрывы; 2 — пузырьки (по всей длине фольги в центре). На рисунке отмечены электроды: А — анод; К — катод

соким сопротивлением, в которые происходит больший вклад энергии, что приводит к дальнейшему росту сопротивления. Таким образом, длина такого участка растет в направлении, перпендикулярном направлению тока, поскольку ток начинает обтекать данный участок перпендикулярно основному направлению тока [16, 17], что приводит к образованию длинных структур, перпендикулярных направлению тока. Подобное явление было зарегистрировано в экспериментах по исследованию неустойчивостей в стержне с током [17], а распределение плотности тока в направлении, перпендикулярном направлению тока, найдено путем расчета [16].

Далее проведено сравнение взрыва Al-фольг толщиной 4 мкм при различной ширине фольги. На рис. 5 дано изображение взрыва фольги из Al шириной 1.8 мм (рис. 5а) и 1.2 мм (рис. 5б). Пробой по поверхности фольг происходил приблизительно на 28 нс, при этом ток составлял соответственно 40 кА и 41 кА. Изображения получены на 40 и 45 нс. Несмотря на то что фольги имеют разную ширину, ток к моменту пробоя оказался приблизительно одинаковым. Тем самым к моменту пробоя фольги шириной 1.2 мм (рис. 5б) линейная плотность тока была в 1.5 раза выше по сравнению с плотностью тока, необходимой для пробоя фольги шириной 1.8 мм (рис. 5а). На рис. 5б видно, что начинается закипание расплавленного материала с образованием «пузырей» (область в центре фольги, отмеченная циф-

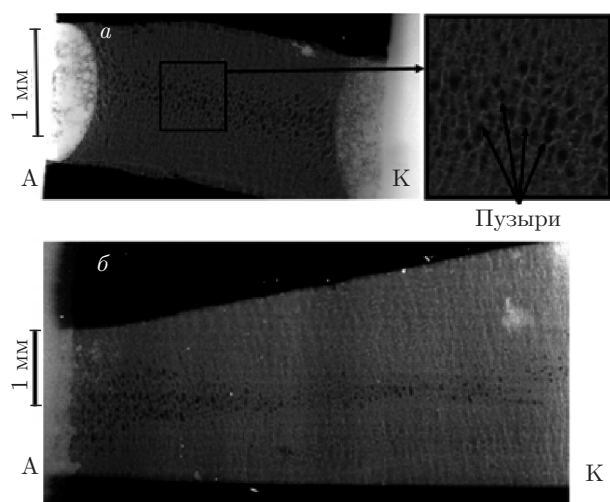


Рис. 6. Рентгенограммы взрыва медных фольг толщиной 1 мкм, имеющих разный профиль, полученные на 62 нс (а) и 50 нс (б) от начала протекания тока. На рисунке отмечены электроды: А — анод; К — катод

рой 2), что является продолжением процесса взрыва фольги. Такой вывод можно сделать на основании того факта, что на рис. 5а, когда плотность тока меньше, наблюдаются только разрывы, а на рис. 5б, когда плотность тока, а следовательно, и вложенная энергия выше, на крае фольги наблюдаются разрывы, а в центре фольги — пузыри.

Наличие пузырей говорит о том, что наблюдается начало процесса кипения вещества. Предположить появление пузырей, не вызванное кипением, сложно. В образованиях, названных пузырями (см. рис. 6), поглощение рентгеновского излучения значительно меньше, чем в окружающем их материале фольги. При этом границы пузырей видны четко (см. увеличенный фрагмент рис. 6а) из-за явления фазового контраста. Без фазового контраста пузыри трудно было бы четко зафиксировать. Наличие фазового контраста свидетельствует о том, что источник излучения имел размер около 1 мкм [15]. Наличие пузырей также описано в других работах [18].

На рис. 5б разрывы поверхности видны не очень отчетливо, особенно ближе к центру. Вероятно, расплавленный металл выравнивает поверхность фольги, а плазма короны взорванной фольги может частично закрывать отдельные детали на поверхности керн фольги [14]. Из приведенных в работе [16] расчетов и полученных экспериментальных данных можно считать, что разрывы с большой вероятностью представляют собой разрушение поверхности фольги и сохраняются вплоть до начала кипения материала. Данные результаты были подтверждены многократным повторением данного эксперимента.

В экспериментах исследовалась не только алюминиевая фольга, но и медная. Чтобы добиться образования пузырьков, была использована медная фольга толщиной 1 мкм. На рис. 6а приведено изображение взрыва медной фольги толщиной 1 мкм и шириной 1.1 мм, полученное на 62 нс. При этом ток составлял 72 кА. На рис. 6б показано изображение взрыва фольги с уширением с одной стороны: ширина фольги изменяется от 2 до 4 мм. Изображение получено на 50 нс, при этом ток составлял 78 кА. При взрыве медной фольги толщиной 1 мкм наиболее часто наблюдалось образование пузырей. Разрывы видно лишь по краям фольги, при этом без четких границ. Возможно, это вызвано тем, что при большой плотности тока за счет меньших размеров фольги взрыв медной фольги протекает быстрее, и нам не удается зарегистрировать процесс образования разрывов и начало образования пузырей.

Однако на рис. 6б видно, что при большей линейной плотности тока у более узкого края фольги наблюдается большее число пузырей, в то время как у широкого края пузыри только начинают образовываться. Нечеткие разрывы наблюдаются на краю фольги по всей ее длине. После момента пробоя образуется корона [14], на которую должен переключиться ток, и вклад энергии в керн должен прекратиться.

В наших экспериментах наблюдались зависимости стадии взрыва от линейной плотности тока на разных участках фольги, а также от момента времени, в который получено изображение, если зарегистрировано несколько изображений в одном выстреле. Возможно, что, в отличие от взрыва проволоки, при взрыве фольг весь ток не уходит в корону при пробое поверхности, по крайней мере, в экспериментах с токами в десятки килоампер. Пробой происходит по краям фольги и затем распространяется к центру. Об этом свидетельствует то, что образование разрывов начинает зарождаться на краях фольги, затем распространяется к центру. Спустя какое-то время ток переключается на центральную область фольги, в которой происходит активное образование пузырей. При этом ток продолжает протекать по фольге, и чем дальше участок фольги от края, тем больше энергии в него вкладывается. Таким образом, из экспериментальных результатов можно сделать вывод, что если разрывы образуются около края фольги и распространяются к ее центру, то пузыри, наоборот, начинают зарождаться в центре, а далее распространяются на периферию. Размер пузырей изменяется от 4–6 мкм до 20–40 мкм в зависимости от времени и материала фольги.

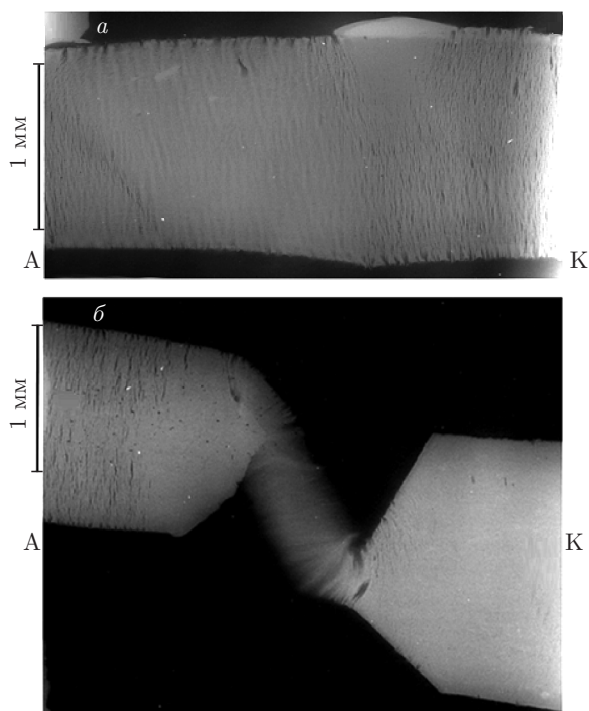


Рис. 7. Изображения взрыва Al-фольги толщиной 15 мкм различной формы: *a* — прямой; *b* — со значительным сужением в центре. Оба изображения зарегистрированы на 85 нс от начала протекания тока. А — анод; К — катод

Если в экспериментах использовать более толстую фольгу, тем самым уменьшая плотность протекающего тока, то удастся наблюдать аналогичные структуры, однако их образование происходит менее интенсивно. На рис. 7*a* приведено изображение взрыва Al-фольги толщиной 15 мкм и шириной 1.1 мм. При этом протекающий ток составлял 42 кА. На рисунке видно, что разрывы образуются, но их количество и ширина значительно меньше, чем в случае более тонкой фольги.

Однако если взять более узкую фольгу или сделать сужение фольги в центре, как на рис. 7*b*, то удастся наблюдать принципиально другое поведение. На рис. 7*b* приведено изображение фольги толщиной 15 мкм и шириной 1.2 мм со стороны анода и 2 мм со стороны катода, имеющей в середине сужение шириной около 300 мкм. Ток через фольгу в данном эксперименте составлял около 70 кА. При этом оба изображения (рис. 7*a* и рис. 7*b*) получены на 85 нс от начала протекания тока.

Таким образом, за счет сужения плотность тока у анода была выше в 1.6 раза по сравнению с плот-

ностью тока около катода, при этом в середине плотность тока была еще в 4 раза больше относительно анодной части. На рис. 7 видны различия в состоянии фольги. На анодной части происходит образование и рост разрывов, а у катода разрывы только начинают образовываться, тогда как в центральной части, шириной 0.3 мм, фольга взрывается, практически как проволочка. На узком участке фольги наблюдается образование страт, как и на поздней стадии взрыва проволочек [19]. Стадии образования разрывов и пузырей при такой плотности тока фольга проходит намного быстрее, или, возможно, некоторые стадии такая фольга не проходит совсем.

В дальнейшем нужны более подробные исследования каждой стадии взрыва фольг с измерением вклада энергии в фольгу.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приведенных экспериментах удалось визуализировать начальную стадию взрыва фольг при разных токах и показать наличие нескольких стадий, которые проходит фольга при протекании тока. За счет разного вклада энергии и невозможности точно настраивать момент времени, в который будет получено изображение, не всегда удается наблюдать все стадии взрыва фольги. Вероятно, что при увеличении вклада энергии некоторые стадии не происходят. Это может быть обусловлено тем, что вклад энергии в фольгу продолжается только до момента пробоя, после которого ток переключается на окружающую корону.

Экспериментально показано, что взрыв фольги начинается с образования разрывов, вытянутых в направлении, перпендикулярном направлению тока. Разрывы появляются на краю фольги и представляют собой разрушение ее поверхности. Со временем длина и ширина разрывов начинают увеличиваться. При этом количество таких разрывов также растет. Это приводит к тому, что они покрывают всю поверхность фольги, после чего в центре начинают образовываться пузыри небольшого размера. Это говорит о начале процесса закипания фольги. При этом на краях фольги все еще наблюдаются разрывы. Таким образом, закипание вещества начинается с центра фольги. Вероятнее всего это происходит из-за того, что пробой начинается с края фольги, таким образом, вклад энергии в центральную область оказывается больше. Со временем увеличиваются размер и количество пузырей.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00631).

ЛИТЕРАТУРА

1. Q. C. Chen, Q. B. Fu, L. Chen et al., *Propellants, Explos., Pyrotech.* **39**, 558 (2014).
2. J. A. Waschl and D. J. Hatt, *Int. J. Impact Eng.* **14**, 785 (1993).
3. M. K. Matzen, *Phys. Plasmas* **4**, 1519 (1997).
4. Г. П. Глазунов, В. П. Канцзедал, Л. А. Комиенко и др., в сб. *Вопросы атомной науки и техники: материаловедение и новые материалы*, вып. 1 (1978), с. 21.
5. A. Sahaia, N. Goswami, M. Mishra et al., *Ceramics Intern.* **44**, I. 2, 2478 (2018).
6. R. D. McBride, S. A. Slutz, C. A. Jennings et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 135004 (2012).
7. T. J. Awe, R. D. McBride, C. A. Jennings et al., *Phys. Rev. Lett.* **111**, 235005 (2013).
8. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. А. Хаммер, *Физика плазмы* **41**, 483 (2015).
9. Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, Д. А. Хаммер, *Физика плазмы* **42**, 234 (2016).
10. М. А. Блохина, *Рентгеновские лучи*, Изд-во иностр. лит., Москва (1960).
11. L. Atoyán, T. A. Shelkovenko, S. A. Pikuz et al., *Rev. Sci. Instr.* **88**, 113502 (2017).
12. Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, И. Н. Тиликин et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **6**, 3741 (2018).
13. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. А. Хаммер, *Физика плазмы* **41**, 319 (2015).
14. Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, И. Н. Тиликин et al., *Plasma Phys. Rep.* **44**, 236 (2018).
15. B. M. Song, S. A. Pikuz, and T. A. Shelkovenko, *Appl. Opt.* **44**, 2349 (2005).
16. J. D. Pecover and J. P. Chittenden, *Phys. Plasma* **22**, 102701 (2015).
17. T. J. Awe, E. P. Yu, K. C. Yates et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45**, 584 (2017).
18. A. Zhigalin, A. Rousskikh, V. Oreshkin et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **552**, 012027 (2014).
19. В. М. Романова, Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев и др., *Физика плазмы* **41**, 671 (2015).