

УДК: 533.951.22

РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ТОНКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ ФОЛЬГАХ, ВЗРЫВАЕМЫХ НА ГЕНЕРАТОРЕ С ТОКОМ ДО 10 КА

© 2024 г. С. А. Пикуз^а, И. Н. Тиликин^а, В. М. Романова^{а,*}, А. Р. Мингалеев^а,
Т. А. Шелковенко^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН Москва, Россия

*e-mail: vmr@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.05.2024 г.

После доработки 30.05.2024 г.

Принята к публикации 01.06.2024 г.

Приведены результаты исследования неустойчивостей во взорванных плоских алюминиевых фольгах толщиной 4 мкм на генераторе ГВП с током короткого замыкания 10 кА и временем нарастания 350 нс. Динамика разрушения фольги при взрыве изучалась с помощью лазерного зондирования. В ходе экспериментов установлено, что при наличии собственной двумерной структуры фольги скорость развития неустойчивостей и их характер зависят от ориентации фольги относительно направления протекания тока. Выявлены условия, при которых происходит замедление развития неустойчивостей при взрыве фольг с двумерной собственной структурой.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, рентгенография, структура фольги, неустойчивости

DOI: 10.31857/S0367292124070041, **EDN:** OJNWWX

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие работы по инерциальному управляемому термоядерному синтезу (УТС) на основе Z -пинчей развиваются в направлении использования газонаполненных цилиндрических лайнеров в качестве нагрузки сильноточных генераторов. В частности, в лаборатории Sandia на генераторе ZR (ток — до 27 МА, время нарастания — 100–200 нс) ведутся эксперименты по сжатию цилиндрических лайнеров из алюминия или бериллия, помещенных во внешнее магнитное поле и заполненных газом, нагреваемым излучением мощного лазера (программа MAGLIF [1–4]). Полномасштабные эксперименты на генераторе Z очень сложны и дорогостоящи, поэтому некоторые исследования проводились на генераторах меньшей мощности, например, на генераторах с токами порядка 1 МА — таких как COBRA [5], ZEBRA [6], MAIZE [7], генераторе МИГ с током 2 МА [8], генераторе Ангара-5 с током 3–5 МА [9]. Одним из направлений таких исследований является изучение процессов при взрыве фольги, из

которой изготавливается лайнер. Например, одним из важнейших факторов, влияющих на процесс сжатия лайнера и на достижение в образующемся пинче требуемых для УТС параметров, является образование в нем неустойчивостей. Подобные исследования возможны также при взрыве плоских проводников при правильном выборе их размеров и сохранении удельных значений параметров разряда; при этом могут быть использованы и генераторы со сравнительно невысокими параметрами [9–14], как в настоящей работе.

Плоские фольги использовались также с большим или меньшим успехом в качестве быстрых размыкателей тока при создании мощных генераторов высоковольтных импульсов [15, 16], для генерации ударных волн [17], для создания детонаторов, а также в других устройствах [18]. Следует упомянуть исследования поведения фольг под воздействием мощного ВУФ-излучения, когда они разрушаются при вложении достаточного количества энергии [19, 20].

Во всех этих работах полагалось, что фольга является однородной по объему. Однако в недавних экспериментах при использовании высоко-разрешающей проекционной рентгенографии [22, 23] было обнаружено, что взрываема фольга имеет, как правило, собственную структуру. Форма и размеры неоднородностей зависят как от свойств материала фольги, так и от технологии ее изготовления. В некоторых случаях распределение неоднородностей имеет анизотропный характер. Например, в работах [12, 13] было показано, что от ориентации собственной структуры фольги относительно направления тока зависит энерговклад в образец, и, соответственно, структура и время его разрушения. В этих и в данной работе выходные параметры генераторов отличаются на порядки, при этом полученные экспериментальные данные аналогичны.

В упомянутых выше работах [12, 13] структура фольги была исследована лишь фрагментарно, поскольку получение изображений с использованием излучения горячей точки X-пинча [23] на имеющейся экспериментальной установке было возможно лишь в ограниченном диапазоне времени $t = 0\text{--}800$ нс от начала импульса тока. Расширение этого диапазона потребовало бы кардинальной и поэтому очень затратной модификации системы синхронизации генератора X-пинча с генератором взрыва фольги. Кроме того, эксперименты показали, что структуры с характерным размером больше 20–30 мкм образуются только на поздних стадиях процесса взрыва фольги. Экстремальное пространственное разрешение 3–5 мкм, достижимое с помощью рентгенографии, в этом случае не является обязательным. Поэтому в настоящей работе для исследований структуры взорванной фольги использовалось лазерное зондирование, что существенно упростило постановку эксперимента и позволило значительно расширить диапазон времени, доступный для измерений. Полученное при этом пространственное разрешение около 25 мкм при длительности зондирующего импульса 7 нс оказалось вполне достаточным для получения надежных экспериментальных результатов.

В данной работе приведены экспериментальные данные по исследованию взрыва алюминиевых фольг толщиной 4 мкм, имеющих двумерную собственную структуру [13]. Изучалось развитие во времени неустойчивостей, возникающих во взорванной фольге при ее различной

ориентации относительно тока. Ориентация собственной структуры на образцах определялась по рентгенограмме не взорванной фольги и контролировалась в оптический микроскоп.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ДИАГНОСТИКА

Эксперименты в настоящей работе проводились на установке ГВП [13], представляющей собой малоиндуктивный высоковольтный конденсатор (0.1 мкФ, 10 нГ, 35 кВ), заряжаемый до 18–20 кВ и коммутируемый газовым управляемым разрядником на нагрузку в виде полоски алюминиевой фольги толщиной 4 мкм, шириной 0.8–2.2 мм и длиной 10 мм, расположенной в вакуумной камере, откачиваемой до давления 0.1 мТорр (рис. 1а). Максимум тока короткого замыкания цепи при зарядном напряжении конденсатора 20 кВ равнялся 10 кА, при времени нарастания 350 нс. Осциллограммы тока и напряжения при взрыве фольги показаны на рис. 1б. При вычислении вложенной в фольгу энергии необходимо учитывать индуктивную составляющую в измеряемом напряжении, для чего определялась производная тока с помощью петли, расположенной около разрядного промежутка.

В экспериментах, выполненных ранее с использованием проекционной рентгенографии [13], было обнаружено, что исследуемая фольга толщиной 4 мкм имеет собственную структуру, не видимую на оптических изображениях. Впервые она была замечена на рентгенограммах не взорванной фольги, зарегистрированных с большим увеличением и высоким пространственным разрешением. На рис. 2а приведена рентгенограмма фольги до взрыва, полученная на установке БИН, где видна ее двумерная структура. Характерные размеры первоначальной структуры фольги приведены на рис. 2б. Изображения регистрировались на запоминающих пластинах FUJI BAS-TR и затем считывались сканером Durr-HD-CR 35 NDT. На результирующих цифровых изображениях в данном случае более светлые участки соответствуют большей интенсивности зарегистрированного излучения, то есть меньшему ослаблению излучения в веществе фольги. На рисунках видно, что структура фольги имеет квазипериодический характер в виде штрихов, причем периоды в ортогональных направлениях различны.

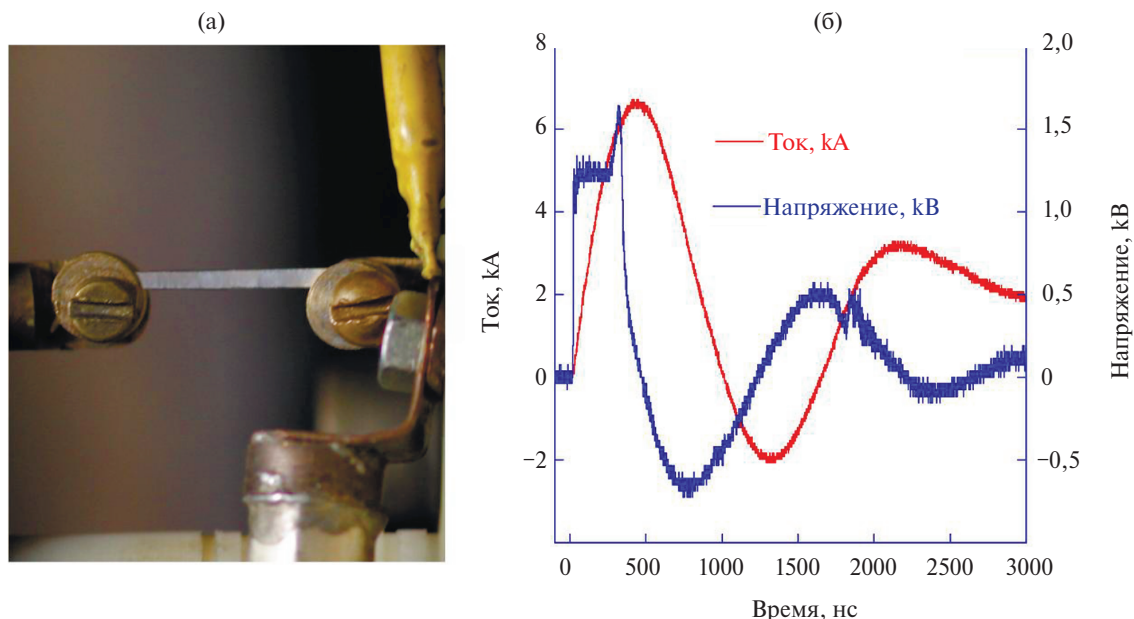


Рис. 1. а) Фотография диодного промежутка установки ГВП, катод — слева, анод — справа, зазор промежутка — 10 мм; б) осциллограммы тока и напряжения при взрыве алюминиевой фольги толщиной 4 мкм и шириной 1 мм.

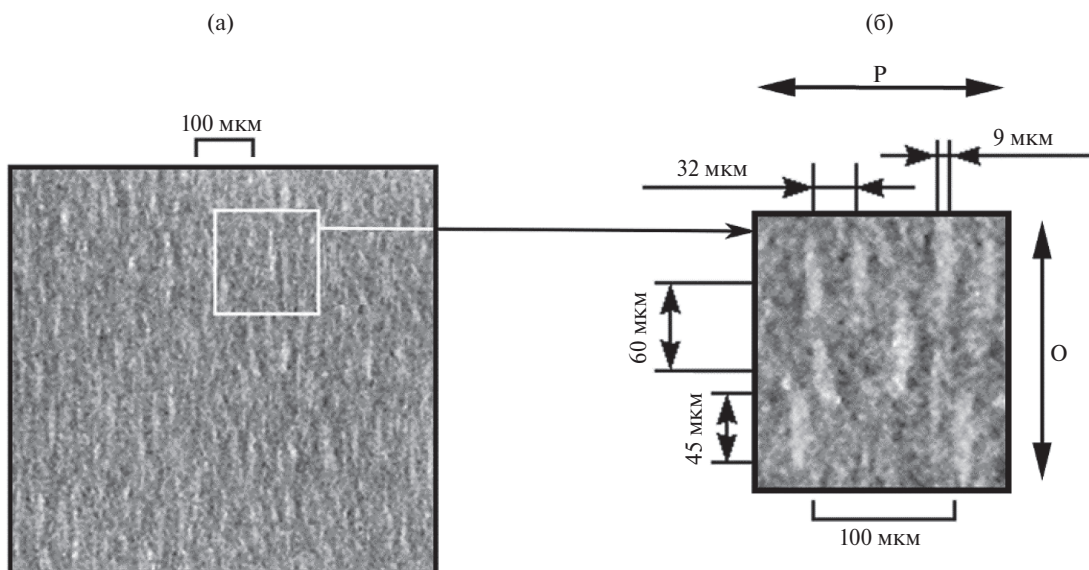


Рис. 2. а) Рентгенограмма не взорванной алюминиевой фольги, используемой в экспериментах, полученная на установке БИН в излучении гибридного X-пинча с Мо-проволочкой диаметром 30 мкм через фильтр из титановой фольги толщиной 12.5 мкм с увеличением в 7.8 раз; б) участок фольги, представленный в большем масштабе. Буквами **Р** и **О** обозначена ориентация структуры, **О** — направление вдоль длинной стороны первоначальной структуры, **Р** — направление вдоль короткой стороны. Более светлые участки изображения соответствуют меньшему поглощению рентгеновского излучения.

Имеется в виду локальная периодичность, то есть среднее расстояние между штрихами в пределах небольшого элемента фольги. Наблюдаемость структуры на рентгенограммах обусловлена, по-видимому, небольшими вариациями плотности вещества фольги, возникающими при ее изготовлении, а также наличием определенной

кристаллической структуры исходного материала. Выяснение причин возникновения этой структуры представляет собой отдельную материаловедческую задачу, что не являлось предметом настоящей работы.

Для обозначения ориентации структуры, т. е. направления, в котором рассматривается и изме-

руется периодичность, мы сохранили символы, введенные ранее в работе [13]: **О** — направление вдоль длинной стороны (больший период неоднородности) и **Р** — вдоль короткой стороны первоначальной структуры (меньший период неоднородности) (рис. 2б). Во взорванной фольге была зарегистрирована четкая зависимость образующейся структуры от первоначальной ориентации собственной структуры относительно направления тока, поскольку, как уже упоминалось выше, темп вложения энергии в фольгу в разряде зависит от взаимной ориентации направления тока и первоначальных неоднородностей материала фольги. Далее мы будем называть **О**-ориентацией такое расположение фольги, когда ток протекает в **О**-направлении, и **Р**-ориентацией, когда ток протекает в **Р**-направлении. В работе [13] было показано, что различие в структуре во взорванных фольгах при **О**- и **Р**-ориентации фольги относительно тока сохраняется примерно до 800 нс, когда еще была возможность получать рентгенограммы. Для изучения структуры фольги в более позднее время в данной работе используется лазерное зондирование. На рис. 3 приведены зависимости от времени энергии, вложенной в фольгу, при различной ориентации неоднородностей относительно направления протекания тока.

Из рисунков видно, что темп вложения энергии в фольгу вначале не зависит от ориентации фольги, но начиная с некоторого момента времени (200 нс для фольги шириной 1 мм и 260 нс

для фольги шириной 2 мм) энерговклады начинают расходиться, причем в обоих случаях вложенная энергия больше для **О**-ориентации. При этом общее время вложения энергии соответствует длительности положительной полуволны разряда (около 900 нс), а максимальное ее значение примерно одинаково для обеих ширин фольги, хотя формы кривых существенно различаются. Природа такого различия априори непонятна и требует выяснения с помощью детального анализа преобразований в фольге в ходе электрического разряда.

Оптические изображения взрыва фольги были получены путем зондирования диодного промежутка в излучении второй гармоники Nd:YAG лазера Lotis LS-2131М (7–9 нс, 200 мДж на основной частоте) на длине волны $\lambda = 532$ нм. Принципиальным отличием формирования оптических изображений от изображений с помощью рентгенографии является тот факт, что материал фольги (металл в нашем случае) как в твердом, так и в жидком состоянии непрозрачен для видимого света для толщины слоя больше 0.11 (>50 нм), то есть тогда, когда он практически прозрачен для рентгеновского излучения. Например, алюминиевая фольга толщиной 4 мкм поглощает 23% рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda = 0.27$ нм, используемого в данном случае для проекционной рентгенографии, а при толщине фольги 50 нм (граница прозрачности для видимого света) поглощается лишь 0.26%. Поэтому

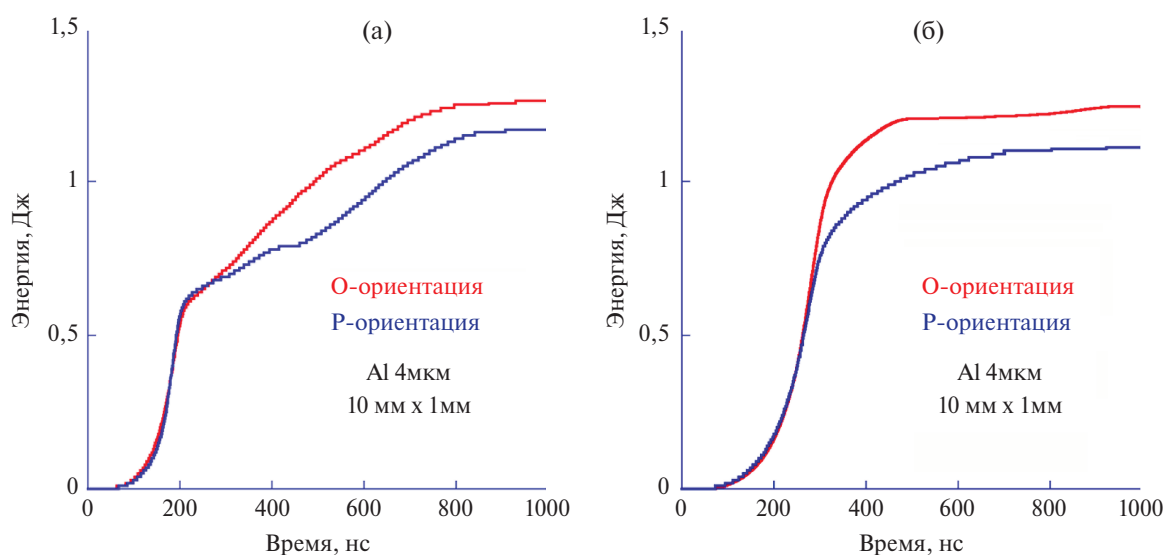


Рис. 3. Зависимость от времени энергии, вложенной в фольгу шириной 1 и 2 мм, при различной ориентации первоначальной структуры фольги относительно направления тока.

рентгеновские изображения взрыва фольг на поздних стадиях процесса будут иметь низкий контраст из-за сильного расширения вещества, и оптические изображения могут дать в этом случае гораздо больше информации.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 показаны рентгеновские и оптические изображения взрыва алюминиевой фольги при различном ее расположении относительно направления тока, полученные в близкие моменты времени. Как было показано ранее [13], при взрыве образуются две характерные структуры, хорошо различимые на рентгенограммах: пузыри при **О**-ориентации (рис. 4а) и разрывы при **Р**-ориентации образцов (рис. 4в). Здесь следует отметить особенности формирования изображений при использовании проекционной рентгенографии в излучении Х-пинча, которая применялась в упомянутых экспериментах. Экстремально малый размер источника зондирования приводит к тому, что изображение чувствительно не только к величине поверхностной плотности из-за поглощения зондирующего излучения в исследуемом объекте (которое мало), но и к градиенту плотности из-за так называемого фазового контраста. Именно поэтому изображение пузырей кажется состоящим из каркаса плотных нитей,

так как объект исследования фактически является пеной из тонкостенных пузырей. То же самое справедливо и для изображений разрывов.

Лазерные теневые изображения взорванных фольг также показывают вполне заметное различие между пузырями (рис. 4б) и разрывами (рис. 4г) при аналогичной ориентации образцов. Однако в оптическом диапазоне видны только те структуры, в которых толщина материала по лучу наблюдения очень мала или материал отсутствует, а их характерный размер превышает величину пространственного разрешения оптической системы. Именно поэтому лазерная диагностика успешно работает, в основном, лишь на достаточно поздней стадии взрыва фольг. На начальной стадии взрыва практически весь объект остается непрозрачным, а размер неоднородностей может не достигать величины пространственного разрешения.

Во взрываемой фольге неустойчивости развиваются неравномерно как по длине образца, так и по его ширине (рис. 5), и детальное сопоставление изображений, получаемых в разное время, представляет весьма сложную задачу. Поэтому на данном этапе исследований мы ограничились лишь качественным рассмотрением процесса и не приводим абсолютных численных значений инкрементов развития неустойчивостей. Анализировались, в основном, центральные области

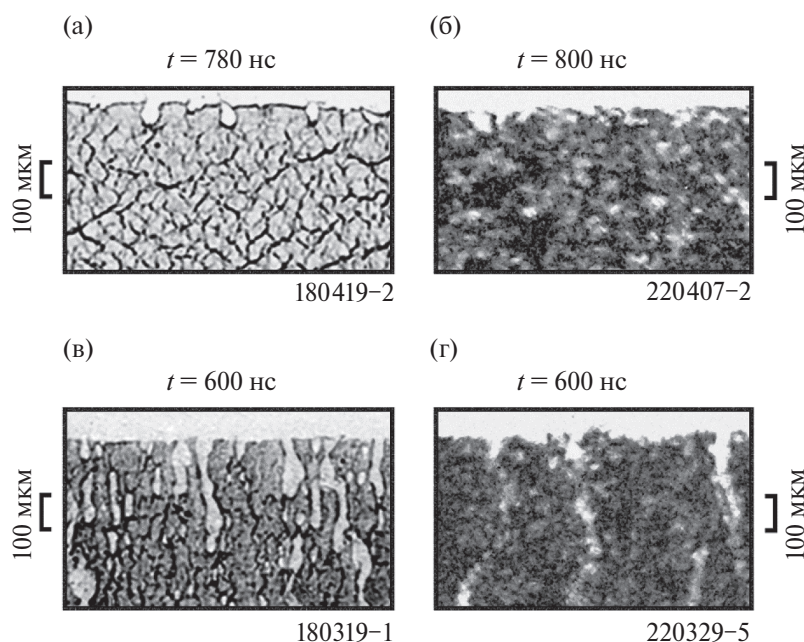


Рис. 4. Изображения фрагментов взрыва Al фольги толщиной 4 мкм при **О**-ориентации (а, б) и **Р**-ориентации (в, г), полученные с помощью рентгенографии (а, в) и лазерного зондирования (б, г).

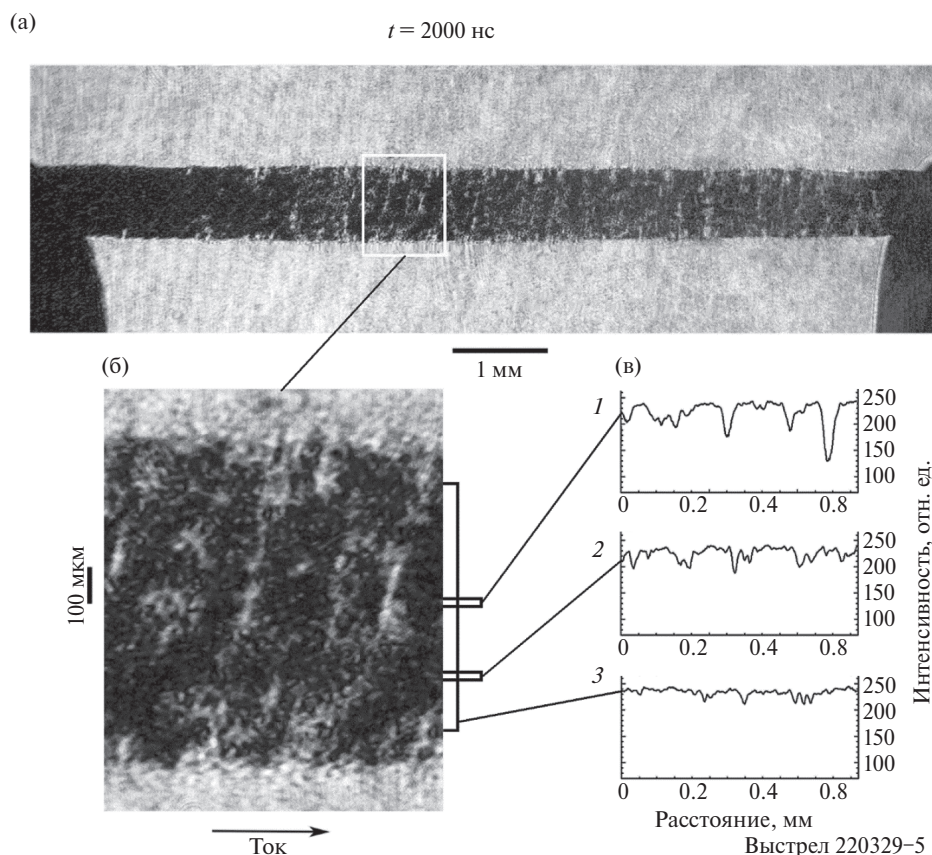


Рис. 5. Тенеграмма взорванной алюминиевой фольги (**P**-ориентация) на 2000-й нс после начала тока (а) и ее увеличенный фрагмент (б); денситограммы, сделанные в разных частях фольги в местах, где на денситограмме наблюдаются наибольшие 1 и наименьшие 2 изменения структуры, вдоль направлений, обозначенных на рисунке (в). Денситограмма 3 сделана по всей поверхности фольги, исключая края.

образцов (примерно 2/3 длины фольги), где процессы взрыва фольги достаточно хорошо воспроизводимы. На рис. 5в показана область исследования и интегральное по данной области значение почернения. Из рис. 5 следует, что в интеграл почернения по исследуемой области грубо отражает картину неустойчивости в фольге на данный момент времени. Кроме того, из рассмотрения исключались края образцов, так как в этой области нельзя гарантировать качество их изготовления. Заметим также, что в рассматриваемой полосковой геометрии вдоль краев повышена плотность тока, и резко увеличено давление поля из-за натяжения магнитных силовых линий. Это может сказаться на более быстром развитии поперечных разрывов при **P**-ориентации тока.

На рис. 6 представлены теневые изображения взорванных фольг в разные моменты времени при различной ориентации образцов относительно направления тока. На рис. 7 приведены денситограммы центральных фрагментов изображений,

показанных на рис. 6. Эти фрагменты были выбраны как наиболее характерные для области фольги, составляющей примерно 80% общей длины образца. Денситограммы захватывали область центральной части фольги (по ее ширине) размером 0.7 мм. Концы фольги, непосредственно примыкающие к электродам, не рассматривались. Денситограммы делались как по оси образца, так и с усреднением по всей его ширине, исключая края. Каждый график для удобства сопоставления кривых искусственно сдвинут на величину, кратную 1/4 полной шкалы ординат (0.1).

Анализ изображений взорванных фольг показывает, что при **O**-ориентации образца развитие неустойчивостей, проявляющихся в виде пузырей, на завершающих стадиях вложения энергии происходит достаточно медленно. При этом распределение пузырей остается равномерным, лишь период неоднородностей несколько возрастает. Так происходит до тех пор, пока не становятся существенными неустойчивости, свя-

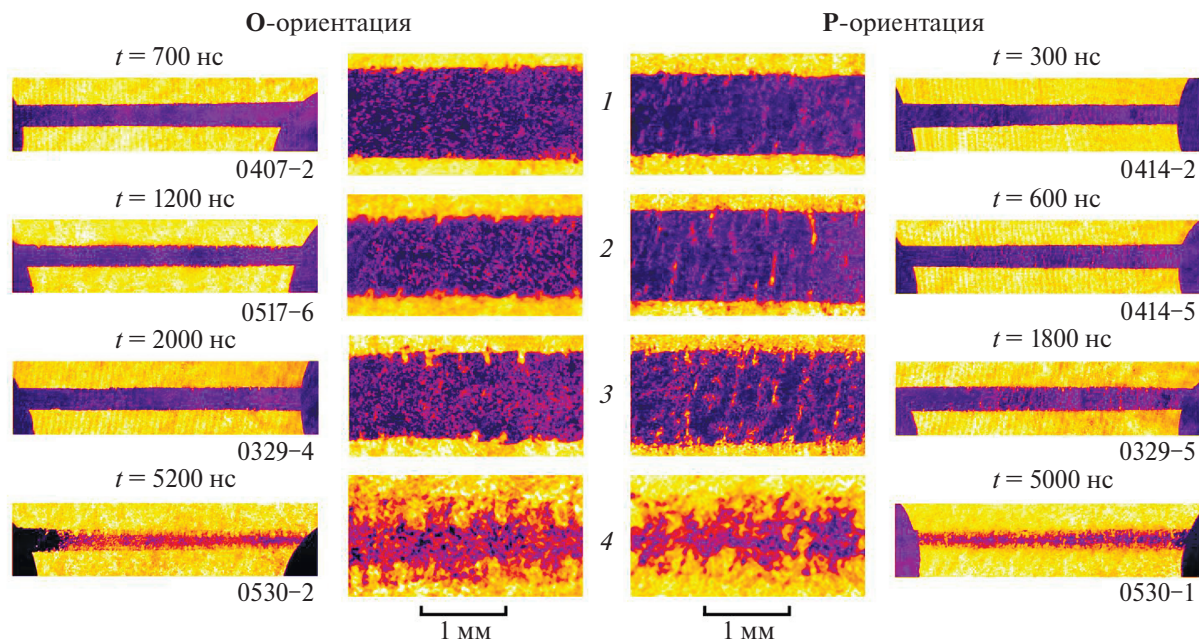


Рис. 6. Лазерные теннеграммы взорванных фольг для разных моментов времени при **О**- и **Р**-ориентации образцов относительно направления тока, а также увеличенные изображения центральных участков фольги. 1–4 – увеличенные изображения центральных участков фольги, вдоль которых были сделаны денситограммы, приведенные на рис. 7.

занные с процессами на краях образца. Но даже тогда (в наших экспериментах это 4–6 мкс от начала тока) приосевая область остается однородной. Совершенно другая картина наблюдается при **Р**-ориентации, когда еще на стадии быстрого энерговложения в образце появляются неоднородности типа разрывов, которые быстро развиваются в том числе и после окончания этой стадии (рис. 3). К 5200-й наносекунде в образце с **О**-ориентацией значительная часть фольги сохраняет оптическую толщину», тогда как при **Р**-ориентации происходит полная деструктуризация образца.

3. ВЫВОДЫ

Из данного экспериментального материала можно сделать следующие выводы.

При применении фольг для любых целей требуется первоначальное изучение их собственной структуры, поскольку она оказывает прямое воздействие процессы развития неустойчивостей во время взрыва.

Для изучения собственной структуры фольг необходимо применять высокоразрешающую проекционную рентгенографию.

В тех случаях, когда структура имеет аперидический, изотропный характер, ее ориентация

относительно направления тока не является принципиальной [23].

При выраженной анизотропии фольги и квазипериодическом характере ее неоднородностей их ориентация относительно тока приводит к различной скорости развития неустойчивостей. При расположении собственной структуры фольги параллельно току (**О**-ориентация), несмотря на большую величину введенной энергии, развитие неустойчивостей происходит значительно медленнее, чем в случае, когда структура ориентирована перпендикулярно току (**Р**-ориентация). К тому же пузыри, образующиеся в первом случае, имеют в несколько раз меньшие размеры, чем разрывы во втором.

Понимание влияния структуры фольги на ее поведение в процессе взрыва требует проведения дальнейших экспериментов. Необходимо сопоставление различных типов неоднородностей и определение порогов их влияния, в частности исследование взрыва фольг с минимально возможными неоднородностями.

Нанесение искусственной структуры на фольгу должно, очевидно, также влиять на развитие неустойчивостей при взрыве. Первые эксперименты, проведенные с фольгами со структурой, нанесенной методом лазерной гравировки [24, 25], подтверждают данное предположение.

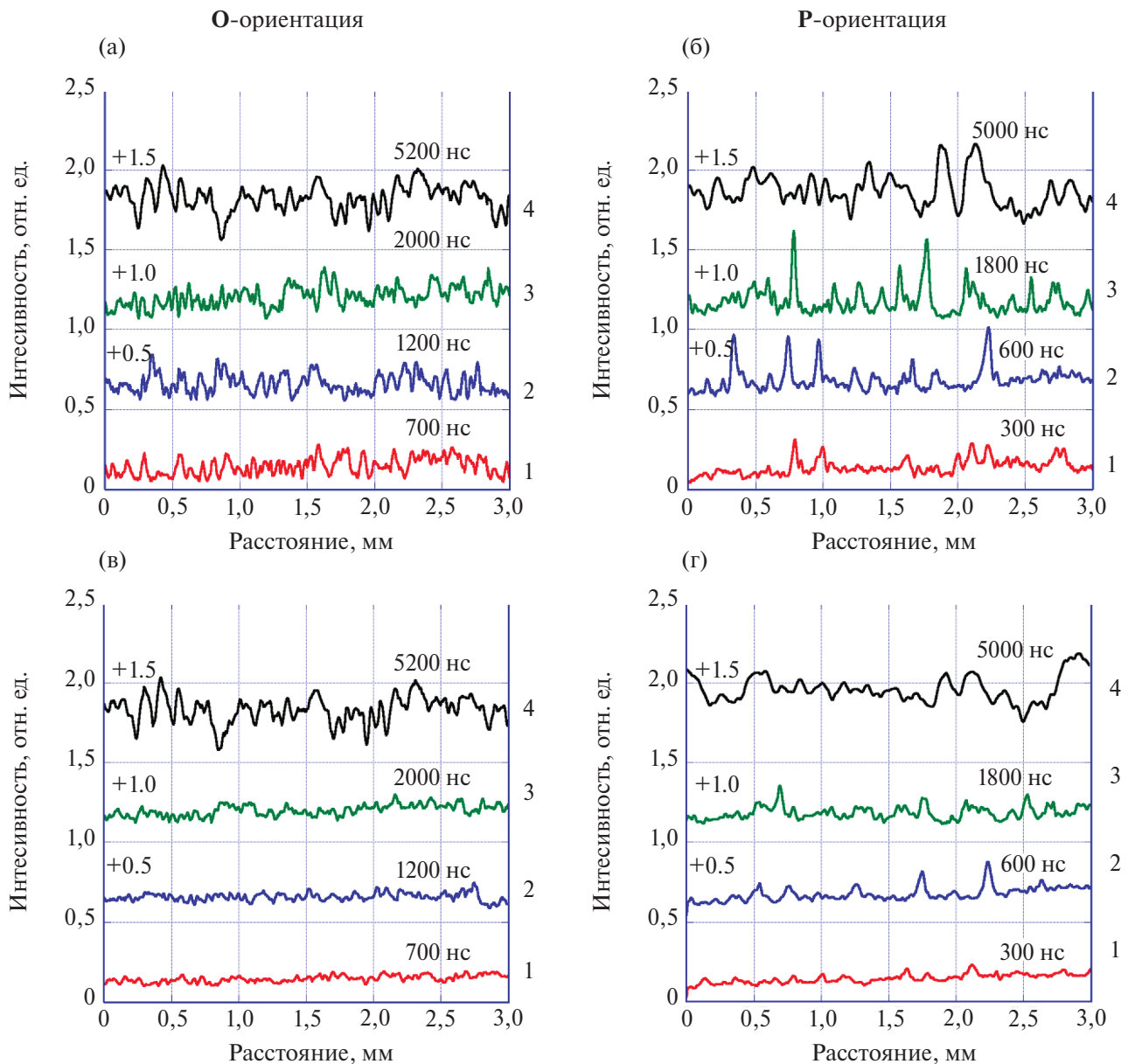


Рис. 7. Денситограммы фрагментов изображений взрывающейся фольги, представленных на рис. 6; (а, б) — в центральной (осевой) области шириной 0.7 мм, (в, г) — усредненные по всей ширине образцов, исключая края. Для наглядности кривые сдвинуты по оси ординат на величины, кратные 0.5, при этом 0 соответствует полностью непрозрачной области поля зрения, а 1 — полностью открытой области.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом РНФ No. 19-79-30086-Р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McBride R.D., Slutz S.A., Jennings C.A., Sinars D.B., Cuneo M.E., Herrmann M.C., Lemke R.W., Martin M.R., Vesey R.A., Peterson K.J., Sefkow A.B., Nakhleh C., Blue B.E., Killebrew K., Schroen D., Rogers J., Laspe A., Lopez M.R., Smith I.C., Atherton B.W., Savage M., Stygar W.A., and Porter J.L. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 135004.
2. Awe T.J., McBride R.D., Jennings C.A., McBride R.D., Slutz S.A., Jennings C.A., Sinars D.B., Cuneo M.E., Herrmann M.C., Lemke R.W., Martin M.R., Vesey R.A., Peterson K.J., Sefkow A.B., Nakhleh C., Blue B.E., Killebrew K., and Schroen D. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. P. 235005.
3. McBride R.D., Slutz S.A., Vesey R.A., et al. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. P. 012705.

4. Atoyan L., Hammer D.A., Kusse B.R., Byvank T., Cahill A.D., Greenly J.B., Pikuz S.A., and Shelkovenko T.A. // *Phys. Plasmas*. 2016. V. 23. P. 022708.
5. Kantsyrev V.L., Chuvatin A.S., Safronova A.S. et al. // *Phys. Plasmas*. 2014. V. 21. P. 031204.
6. Yager-Elorriaga D.A., Zhang P., Steiner A.M., Jordan N.M., Campbell P.C., Lau Y.Y., and Gilgenbach R.M. // *Phys. Plasmas*. 2016. V. 23. P. 124502.
7. Chaikovskiy S.A., Datsko I.M., Labetskaya N.A., Oreshkin E.V., Oreshkin V.I., Ratakhin N.A., Roussikh A.G., Vankevich V.A., Zhigalin A.S., and Baksht R.B. // *Phys. Plasmas*. 2022. V. 29. P. 103501.
8. Grabovskii E.V., Alexandrov V.V., Branitskii A.V., et al. // *Journal of Physics: IOP Conf. Ser.* 2018. V. 946. P. 01204. doi:10.1088/1742-6596/946/1/012041.
9. Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Тиликин И.Н., Мингалеев А.Р., Атоян Л., Хаммер Д.А. // *Физика плазмы*. 2018. Т. 44. С. 193. doi:10.1134/S1063780X18020113.
10. Тиликин И.Н., Шелковенко Т.А., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Пикуз С.А. // *ЖЭТФ*. 2019. Т. 155. С. 1115. doi:10.1134/S0044451019060166.
11. Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., Romanova V.M., and Hammer D.A. // *J. Appl. Phys.* 2020. V. 128. 205902. doi:10.1063/5.0019330.
12. Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Mingaleev A.R., and Pikuz S.A. // *Phys. Plasmas*. 2020. V. 27. P. 043508. doi:10.1063/1.5133126.
13. Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Pikuz S.A., Mingaleev A.R., Romanova V.M., Atoyan L., and Hammer D.A. // *Matter Radiat. Extremes*. 2022. V. 7. P. 055901. doi:10.1063/5.0098333.
14. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990.
15. Sedoi V.S., Mesyats G.A., Oreshkin V.I., Valevich V.V., and Chemezova L.I. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1999. V. 27. P. 845.
16. Takayuki M., Matsuo N., Otsuka M., and Itoh S. // *Proc. SPIE* 75. 2010. P. 75222.
17. Smilowitz L., Remelius D., Suvorova N., Bowlan P., Oschwald D., and Henson. B.F. // *Appl. Phys. Lett.* 2019. V. 114. P. 104102.
18. Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Грищук А.Н., Фролов И.Н., Вранитский А.В., Лукин Я.Н. // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. С. 367.
19. Грабовский Е.В., Сасоров П.В., Шевелько А.П., Александров и др. // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 103. С. 394.
20. Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Cahill A.D., Knapp P.F., Hammer D.A., Sinars D.B., Tilikin I.N., and Mishin S.N. // *Phys. Plasmas*. 2010. V. 17. P. 112707. doi:10.1063/1.3504226.
21. Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Хаммер Д.А. // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. С. 234. doi:10.7868/S0367292116030070A.
22. Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Tilikin I.N., Romanova V.M., Mishin S.N., Atoyan L., and D.A. Hammer. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2018. V. 46. P. 3741. doi:10.1109/TPS.2018.2852063.
23. Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Огинов А.В., Перваков К.С., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Пикуз С.А. // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. С. 1075. doi:10.31857/S0367292122600510.
24. Shelkovenko T.A., Tilikin I.N., Oginov A.V., Mingaleev A.R., Romanova V.M., and Pikuz S.A. // *Matter Radiat. Extremes*. 2023. V. 8. P. 055601. doi:10.1063/5.0146820

DEVELOPMENT OF INSTABILITIES IN THIN ALUMINUM FOILS EXPLODED USING GENERATOR WITH CURRENT OF UP TO 10 A

S. A. Pikuz^a, I. N. Tilikin^a, V. M. Romanova^a*, A. R. Mingaleev^a, and T. A. Shelkovenko^a

^a*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: vmr@inbox.ru

The results of studying instabilities in flat aluminum 4- μm -thick foils exploded using the GVP generator with a short circuit current of 10 kA and a current rise time of 350 ns are presented. The dynamics of foil destruction during the explosion was studied using laser probing. During the experiments, it was ascertained that in the presence of the two-dimensional structure of foil, the growth rates of instabilities and their nature depend on the foil orientation relative to the direction of current flow. The conditions are cleared up, under which during the explosion of foils with two-dimensional inherent structures, the development of instabilities is slowed down.

Keywords: electrical explosion of conductors, poit-projection radiography, foil structure, instabilities