

04

## Возникновение магнитогидродинамических возмущений в металлических проводниках при протекании импульса разрядного тока

© А.Л. Суркаев

Волгоградский государственный технический университет,  
Волжский политехнический институт (филиал),  
404125 Волжский, Россия  
e-mail: vpf@volpi.ru

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2014 года. В окончательной редакции 19 сентября 2014 г.)

Экспериментально показано наличие радиального и аксиального механических возмущений в металлических проводниках в виде цилиндра и плоской пластины, возникающих вследствие протекания разрядного тока миллисекундного диапазона. Амплитуда возникающих механических возмущений в проводниках в твердой фазе носит колебательный характер. Радиальную компоненту механического возмущения следует рассматривать как одну из причин возникновения магнитогидродинамической неустойчивости с модой  $m = 0$  и соответственно страт при электрическом взрыве проводника. Представлены результаты электрического взрыва цилиндрического проводника и плоской фольги.

### Введение

Открытие феномена электрического разряда (ЭР) и взрыва проводников (ЭВП) и сопровождающие при этом различные физические процессы, в частности генерация мощного импульса механического воздействия, принадлежит П. Лейн и Дж. Пристли (1767–1769 гг.), а также Nairne [1] (1774 г.). На сегодняшний день нет однозначного понимания и полноценной интерпретации возникновения и развития электрического взрыва. Одной из особенностей протекания электрического взрыва проводников, известной с 50-х годов прошлого столетия [2], является возникновение страт — периодической структуры, представляющей собой чередование плотности взрывающегося вещества, перпендикулярно направлению разрядного тока. Явление стратообразования также наблюдается и при протекании электрического разряда [3,4] в плазме газовой среды. Процесс зарождения, формирования и эволюция страт также сегодня не имеет полного представления у исследователей и не находит однозначного понимания в современной литературе. На сегодняшний день представляется несколько механизмов данного явления. Авторы [5,6] предлагают рассматривать причину образования страт за счет возникновения магнитогидродинамических (МГД)-неустойчивостей перетяжечного типа с модой  $m = 0$  и винтовых с модой  $m = 1$ . В работе показано, что МГД-неустойчивости наблюдаются как в жидких проводниках, так и в проводниках, находящихся в твердой фазе. Возникновение перетяжек в токнесущих плазмоподобных средах экспериментально наблюдали, в частности, авторы [7] с использованием In–Ga-эвтектики. Также можно привести пример проявления стратообразования, которое наблюдалось автором [8] вследствие изменения рельефа поверхности проводника с возникновением перетяжек типа „бусинок“ при протекании по нему экстре-

мального тока миллисекундного и большего временного диапазона. Явление образования страт рассматривалось авторами работы [9], в которой предложен механизм периодического формоизменения микропровода с привлечением синергетической концепции. Одним из других механизмов стратообразования предлагается рассматривать возникновение и развитие при ЭВП перегретых (тепловых) МГД-неустойчивостей [10–12], которые наиболее ярко выражены при значительных величинах плотности тока и быстрых режимах протекания электрического взрыва проводника.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование механических возмущений, возникающих в металлических проводниках при протекании разрядного тока, которые способствуют возникновению страт при электрическом взрыве последних.

### Математическое описание МГД-неустойчивостей

В настоящее время в литературе представлено несколько вариантов классификации режимов ЭВП. В частности, один из оригинальных и оправдывающих себя подходов предлагается авторами [13], который базируется на соотношении звуковой, альфвеновской скорости и времени энергии сублимации и позволяет выделить области параметров взрыва:

$c_A > c_s$  и  $r_w/c_A < \tau_\Delta$  — доминирование магнитных сил сжатия,

$c_A < c_s$  и  $r_w/c_A > \tau_\Delta$  — преобладание термодинамического давления,

$c_A < c_s$  и  $r_w/c_A \leq \tau_\Delta$  — ограничение сверху и  $c_A > c_s$  и  $r_w/c_A > \tau_\Delta$  снизу параметров  $jr_* < \rho^{1/2}c_s$  и  $j^2r_w < \rho^{1/2}c_*^2\sigma/c$ .

Другой вариант классификации режимов ЭВП, представляющий собой достаточно универсальный и простой подход, основывающийся на соотношении характерных времен процессов, предложен автором [14]. Основными характерными временами ЭВП являются: время ввода энергии в проводник (полное время взрыва) —  $\tau_{\text{exp}}$ , время возникновения и развития МГД-неустойчивостей —  $\tau_{\text{inst}}$ , время скинирования тока —  $\tau_{\text{skin}}$ . При описании ЭВП используется параметр удельного действия тока [15,16]

$$h = \int_0^{\tau_{\text{exp}}} j^2 dt. \quad (1)$$

Согласно [10,15], параметр удельного действия тока представляется в виде суммы

$$h = h_1 + h_2, \quad (2)$$

где  $h_1$  — удельное действие тока от комнатной температуры  $T_0$  до температуры плавления  $T_{\text{melt}}$ ,  $h_2$  — удельное действие от плавления до взрыва. Время до взрыва определяется

$$\tau_{\text{exp}} \approx \frac{h}{j^2}. \quad (3)$$

Характерное время развития МГД-неустойчивостей перетяжечного типа с модой  $m = 0$  зависит от радиуса проводника и скорости распространения возмущений в веществе

$$\tau_{\text{inst}} \approx \frac{r_0}{c_A}, \quad (4)$$

где  $c_A = H_0/\sqrt{2\pi\rho}$  — альфвеновская скорость. С другой стороны, постоянная времени развития возмущения [5] при максимальном безразмерном инкременте нарастания  $\Omega_{\text{cyl max}} = \sqrt{2}$  для цилиндрического проводника равна

$$\tau_{\text{theor}} = \frac{r_0(4\pi\rho)^{1/2}}{H_0\Omega_{\text{cyl max}}}, \quad (5)$$

где  $r_0$  — радиус взрывающегося проводника,  $\rho$  — плотность,  $H_0 = I/2\pi r_0$  — напряженность поля собственного тока на невозмущенной поверхности проводника,  $I = \pi r_0^2 j$  — разрядный ток, протекающий через проводник, при этом следует заметить, что выражения (4) и (5) идентичны. Для получения количественной оценки при решении дисперсионного уравнения [5] вводятся безразмерные параметры  $q$  и  $f$ , зависящие от проводимости  $\sigma$ , плотности  $\rho$  и поверхностного натяжения  $\alpha$

$$q^2 = \frac{r_0\sigma H_0}{c^2} \left(\frac{4\pi}{\rho}\right)^{1/2}, \quad f = \frac{4\pi\alpha}{r_0 H_0^2}, \quad (6)$$

и безразмерная длина волны

$$x = 2\pi r_0/\lambda_{\text{cyl}}. \quad (7)$$

Максимальное значение инкремента нарастания  $\Omega_{\text{cyl max}} = \sqrt{2}$  для моды  $m = 0$  достигается в точках

$$x = (3f)^{-1/4}. \quad (8)$$

В работах [17,18] рассматривается модель, объединяющая перетяжечную и перегревную неустойчивости как последовательные процессы при рассмотрении динамики электрического взрыва проволоочки. Возникающая продольная вдоль проволоочки неоднородность может быть вызвана неравномерностью вклада энергии из-за резко падающей зависимости электропроводности от температуры  $\sigma(T)$  в области перехода металл-диэлектрик, рассматривая ее как перегревную неустойчивость. Сама же перегревная неустойчивость связана с развитием перетяжечной МГД-неустойчивости на начальной жидкометаллической стадии нагрева проводника, т.е. можно говорить, что перетяжечная неустойчивость перерастает в перегревную. Возникновение МГД-неустойчивостей, приводящее к стратообразованию, наблюдается и при электрическом взрыве фольги (ЭВФ) [15,19].

Авторами [20,21] рассматривался металлический проводник прямоугольного сечения (полоска фольги), находящийся в жидком состоянии, по которому протекает ток вдоль оси  $z$  симметрии. Геометрические параметры  $2a_{\text{plat}} \ll 2b_{\text{plat}} \ll l_{\text{plat}}$ , где  $2a_{\text{plat}}$ ,  $2b_{\text{plat}}$ ,  $l_{\text{plat}}$  — толщина, ширина и длина проводника. Металлическая жидкость считается несжимаемой и ее электропроводность постоянна  $\sigma = \text{const}$ . Решение системы уравнений магнитной гидродинамики приводит к дисперсионному уравнению [20], определяющему связь между инкрементом неустойчивости  $\Omega_{\text{plat}}$  и волновым числом  $k_{\text{plat}} = 2\pi/\lambda_{\text{plat}}$

$$2k_{\text{plat}} \text{th}(k_{\text{plat}}p) \sum_{i=1}^2 A_i \text{cth}(s_i p) = 1 - \Omega_{\text{plat}}^2, \quad (9)$$

где

$$s_{1/2} = \left( \Omega_{\text{plat}}/2 + k_{\text{plat}}^2 \pm \sqrt{\Omega^2/4 + k_{\text{plat}}^2/\Omega_{\text{plat}}} \right)^{1/2},$$

$$A_1 = \frac{s_1(s_2^2 - k_{\text{plat}}^2)}{(s_1^2 - k_{\text{plat}}^2)(s_2^2 - s_1^2)}$$

и

$$A_2 = -\frac{s_2(s_1^2 - k_{\text{plat}}^2)}{(s_2^2 - k_{\text{plat}}^2)(s_2^2 - s_1^2)}$$

— коэффициенты,  $\nu_m = c^2/4\pi\sigma$  — магнитная вязкость и  $p$  — внешний управляющий параметр

$$p = [(I^2 a_{\text{plat}}^3)/(2\rho\nu_m^2 b_{\text{plat}}^3 c^2)]^{1/4}. \quad (10)$$

Из дальнейших математических выкладок следует, что инкремент неустойчивости  $\Omega_{\text{plat}} \rightarrow 0$  при  $k_{\text{plat}} \rightarrow 0$  и  $k_{\text{plat}} \rightarrow \infty$  и зависимость  $\Omega_{\text{plat}}(k_{\text{plat}})$  немонотонна. При некотором конечном  $k_{\text{plat}}$  инкремент неустойчивости достигает максимального значения  $\Omega_{\text{plat max}}$ , определяющийся внешним управляющим параметром  $p$ . Определив точку пересечения асимптотик выражений  $\Omega_{\text{plat}} = (p/\pi)^4 k_{\text{plat}}^2$  при  $k_{\text{plat}} \rightarrow 0$  и  $\Omega_{\text{plat}} = 1/2k_{\text{plat}}^2$  при

$k_{\text{plat}} \rightarrow \infty$ , можно оценить  $\Omega_{\text{plat}}(p)_{\text{max}}$ . Инкременты неустойчивости совпадают при

$$k_{\text{plat}} = \frac{(\pi/p)^{3/2}}{(2)^{3/8}}, \quad (11)$$

тогда  $\Omega_{\text{plat}}(p)_{\text{max}} < p/2^{3/4}\pi$ .

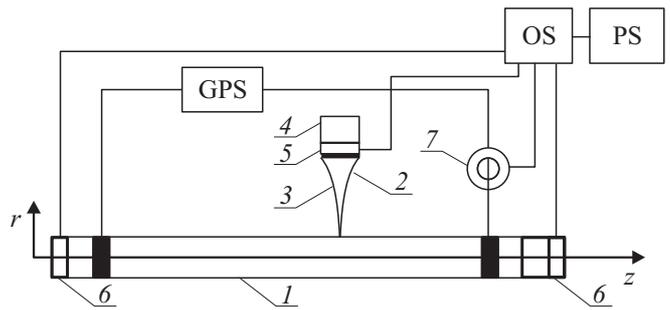
В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований механических возмущений, возникающих в металлическом цилиндрическом проводнике при протекании импульса плотности разрядного тока  $j \approx 5 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  и в проводнике в виде тонкой плоской пластины  $j \approx 3 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  в миллисекундном временном диапазоне, а также рассмотрена одна из возможных причин зарождения стратообразования при электрическом взрыве цилиндрического проводника и плоской фольги в воздухе.

### Методика эксперимента

Согласно классической теории электропроводности Друде–Лоренца, свободные электроны металла массой  $m$  направленно движущиеся с некоторой дрейфовой скоростью  $v_{\text{dr}}$ , рассеиваются на ионах кристаллической решетки и на дефектах металла. Происходит передача энергии внешнего электрического поля кристаллической решетки, соответственно проводник приобретает некоторый импульс механического возмущения. Рассмотрим цилиндрический проводник в виде стержня, по которому протекает разрядный ток короткого замыкания. В проводнике возникнет импульс механического возмущения (нормального напряжения  $\sigma = F/S$ ) в произвольном сечении проводника. Импульс возмущения, передаваемый  $N$ -электронами некоторому объему  $V$  цилиндрического проводника сечением  $S$  и высотой  $h = v_{\text{dr}}t/2$  за время  $t$  действия внешнего поля, равен  $\sigma = \frac{Nmv_{\text{dr}}}{St}$ . Плотность протекающего тока  $j = dI/dS$  определяется  $j = nev_{\text{dr}}$ , где  $n = N/V$  — концентрация электронов (медь Cu),  $e$  — заряд. Ток короткого замыкания  $I = I_0 \sin \omega t$ . Тогда можно получить выражение, позволяющее оценить импульс механического возмущения, возникающего за время полупериода разрядного тока на торце однородного цилиндрического проводника длиной  $l$

$$\sigma_{\text{theor}} = \frac{mI_0l^2}{St\omega h}. \quad (12)$$

Аналогичную оценку можно произвести и для проводника в виде плоской пластины. При протекании разрядного тока по проводнику кроме аксиальных механических возмущений в цилиндрических проводниках должны присутствовать и радиальные возмущения, а в проводниках в виде плоской пластины аналогично должны возникать механические возмущения, распространяющиеся перпендикулярно ее боковой поверхности. Согласно [5], в твердых проводниках с током могут возникать и развиваться МГД-неустойчивости, приводящие к деформации проводника.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — металлический проводник, выполненный в виде цилиндрического стержня или плоской пластины, 2 — волноводный датчик, 3 — предволновод, 4 — реактивный волновод, 5 — пьезотаблетка датчика, 6 — торцевые пьезотаблетки, 7 — пояс Роговского; GPC — генератор импульсных токов, OS — осциллограф, PC — компьютер.

Для исследования зарождения возникновения механических возмущений при протекании разрядного тока в проводниках цилиндрической и плоской геометрии использовалась (рис. 1) экспериментальная установка. Энергетический блок установки представляет собой конденсаторный накопитель [22] с соответствующей электродной системой. Генератор импульсных токов (GPC) установки набирался из конденсаторов марки КБГ–П–2eV в количестве 32 шт., соединенных между собой параллельно, емкостью  $C = 10 \mu\text{F} \pm 10\%$ . Максимальная запасенная энергия в накопителе составляет  $W = 640 \text{ J}$ , общая электрическая емкость равна  $C = 320 \mu\text{F}$ , индуктивность разрядного контура равна  $L = 7.85 \mu\text{H}$ , которая определялась экспериментально измерителем импеданса E7-14, максимальное напряжение конденсаторов  $U_{\text{max}} = 2 \text{ kV}$ . Разрядный ток, протекающий по проводнику, формируется генератором импульсных токов и регистрируется поясом Роговского, напряжение — высокоомным делителем. Сигналы от датчиков регистрировались цифровым запоминающим осциллографом (Os).

В первой серии экспериментов использовался медный (Cu) цилиндрический проводник в виде стержня — 1, по которому протекал разрядный ток от генератора импульсных токов. Для регистрации аксиальных механических возмущений пьезокерамические преобразователи — 6 в виде пьезотаблеток (ЦТС-19) располагались на торцах цилиндрического проводника — 1, длина которого  $l_{\text{cyl}} = 45 \text{ mm}$ , диаметр  $d_{\text{cyl}} = 4 \text{ mm}$ .

В качестве регистратора импульсных радиальных возмущений использовался волноводный [23] пьезокерамический датчик — 2. Датчик перемещается по боковой поверхности цилиндрического проводника 1 вдоль оси с шагом  $h = 0.5 \text{ mm}$  при каждом выстреле. Щуп (предволновод) 3 датчика 2, реактивный волновод 4 и пьезотаблетка (ЦТС-19) 5 зафиксированы между собой посредством эпоксидной смолы и имеют электрическую развязку.

Таблица 1. Механические возмущения в металлических проводниках

Металл	Параметры						
	Размер, mm	$I_{\max}$ , kA	$U_0$ , kV	$j \cdot 10^9$ A/m <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{theor}}$ , Pa	$\sigma_{\text{exp}}$ , Pa	$\lambda_{\text{cond}}$ , mm
Цилиндрический стержень (Cu)	$l_{\text{cyl}} = 45$ $d_{\text{cyl}} = 4$	5	1	0.4	$7.33 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^4$	1.62
Пластина (Cu)	$l_{\text{plat}} = 63$ $a_{\text{plat}} = 3.5$ $b_{\text{plat}} = 17.5$	5	1	0.08	—	—	1.67
Пластина (Al)	$l_{\text{plat}} = 63$ $a_{\text{plat}} = 4$ $b_{\text{plat}} = 13.5$	5	1	0.092	—	—	1.54
Пластина (Cu-Zn)	$l_{\text{plat}} = 63$ $a_{\text{plat}} = 2$ $b_{\text{plat}} = 12$	5	1	0.2	—	—	1.59

Во второй серии экспериментов вместо цилиндрического стержня использовались медный (Cu), латунный (Cu-Zn) и алюминиевый (Al) проводники в виде плоской пластины, по поверхности которых перемещался волноводный пьезокерамический датчик 2. Геометрические размеры представлены в табл. 1. Начальное напряжение во всех экспериментах составляло  $U_0 = 1$  kV.

Следующим шагом в работе являлось экспериментальное исследование возникновения страт при электрическом взрыве металлических проводников. Используя методику [24], были получены аналогичные образцы следов продуктов взрыва цилиндрических проволочек и плоской фольги в воздухе. Взрывающиеся проводники располагались между двумя полосками стекла на расстоянии  $h = 0.5-2$  mm. Напряжение конденсаторного накопителя выбиралось максимальным  $U_{\max} = 2$  kV.

## Результаты экспериментальных исследований

В первой серии экспериментов исследовались механические аксиальные и радиальные возмущения, возникающие в цилиндрическом медном (Cu) проводнике в виде стержня при протекании по нему разрядного тока короткого замыкания. На рис. 2, *a* представлены характерные осциллограммы разрядного тока, импульсов радиальных и аксиальных возмущений, из которых следует возникновение собственных механических колебаний в проводнике, возбуждаемых импульсом тока. Используя выражение (12), можно оценить амплитуду аксиального возмущения  $\sigma_{\text{theor}} = 7.33 \cdot 10^4$  Pa, в то же время исходя из осциллограммы, при амплитуде первого импульса  $U_{\max} = 0.7$  V и при коэффициенте преобразования пьезокерамической таблетки  $k = 0.925 \cdot 10^5$  Pa/V, имеем  $\sigma_{\text{exp}} \approx 6.5 \cdot 10^4$  Pa, что показывает согласие теоретической оценки с экспериментом и является достаточно удовлетворительным результатом. На рис. 2, *b* приведен

график зависимости амплитуды первого импульса радиального возмущения, регистрируемого волноводным пьезокерамическим датчиком на боковой поверхности проводника, от его места положения, т.е. от координаты  $z$ . На графике наблюдается ярко выраженная пространственная периодичность, что позволяет высказать

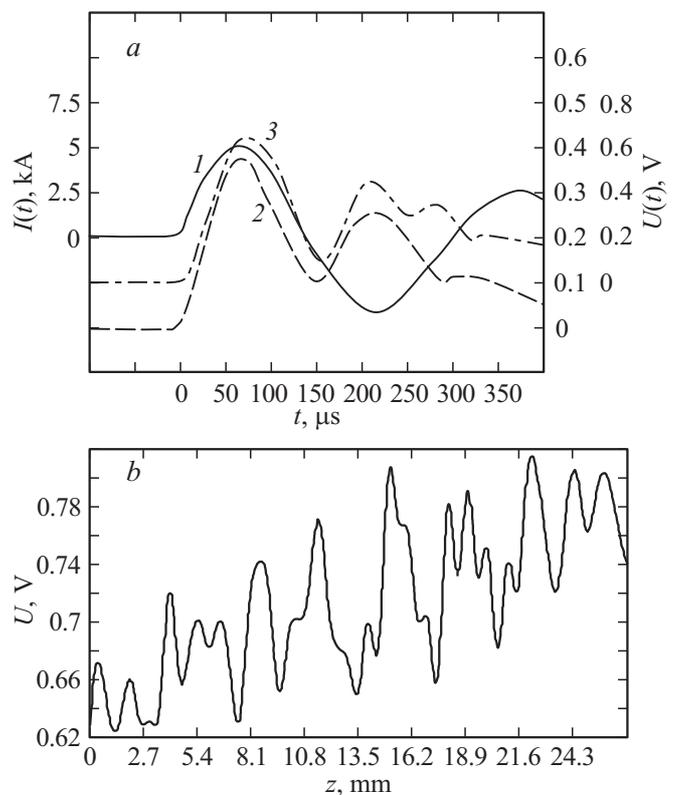
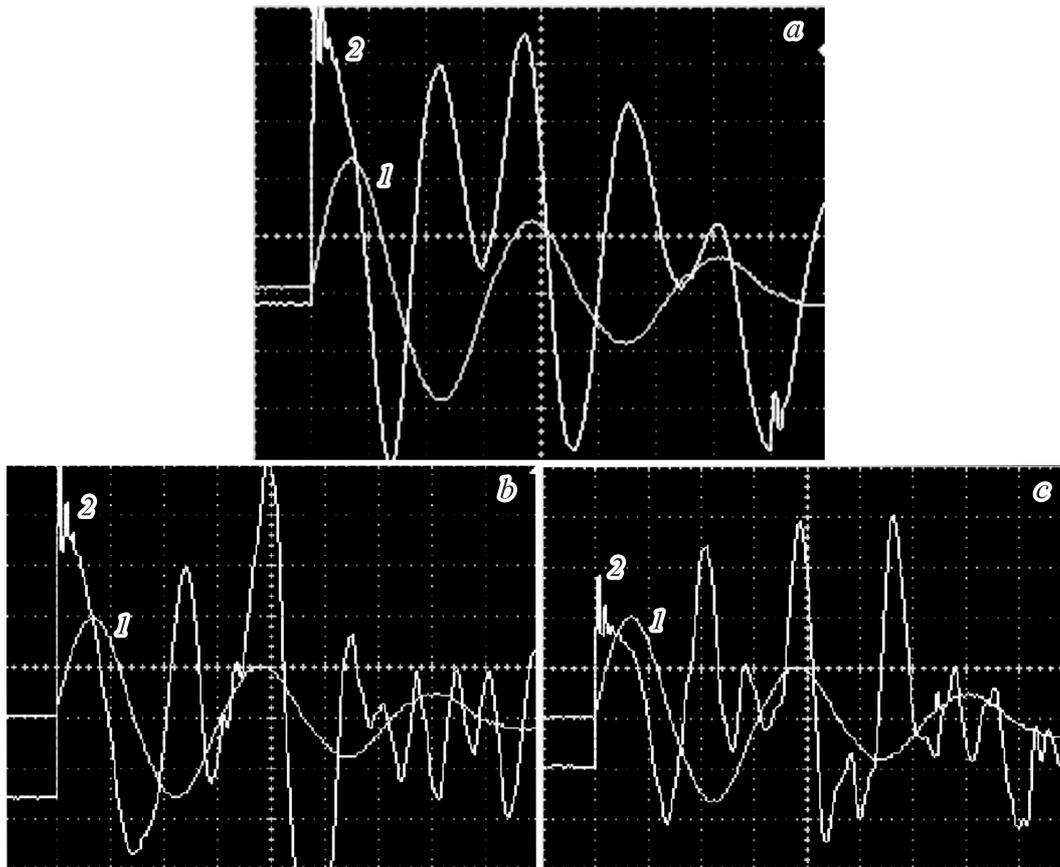


Рис. 2. *a* — характерные осциллограммы разрядного тока  $I$ , импульса радиального возмущения 2, импульса аксиального возмущения 3 для цилиндрического медного стержня; *b* — график зависимости амплитуды первого импульса радиального механического возмущения от координаты  $z$  для цилиндрического медного стержня.



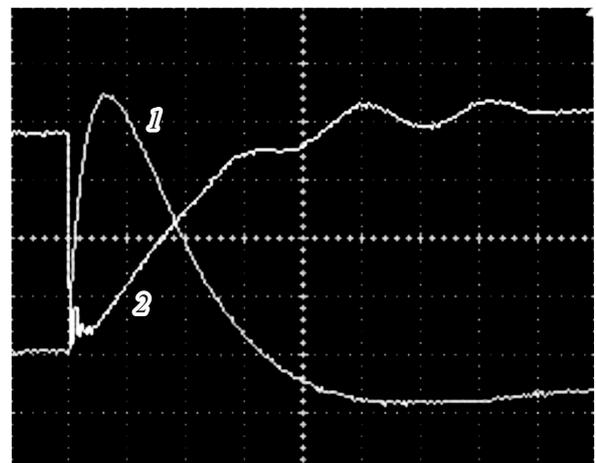
**Рис. 3.** Характерные временные осциллограммы разрядного тока  $I$  и импульса механического возмущения 2:  $a$  — медная (Cu),  $b$  — латунная (Cu-Zn) и  $c$  — алюминиевая (Al) пластины.

предположение о возможном зарождении неустойчивости в проводнике до наступления фазового перехода, длина волны которой составляет  $\lambda_{\text{cond}} \approx 1.6 \cdot 10^{-3}$  м.

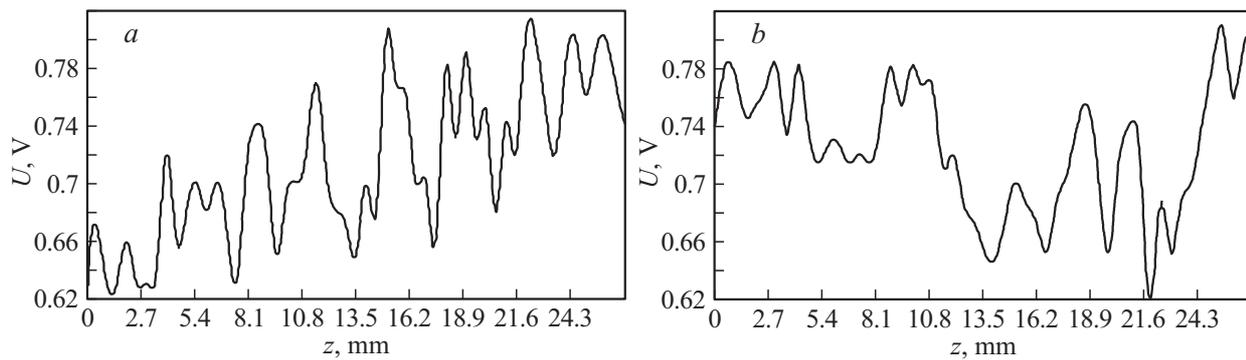
Аналогичный результат получаем при рассмотрении проводников в виде пластин прямоугольного сечения с разрядным током короткого замыкания. Характерные осциллограммы разрядного тока и импульса механических возмущений представлены (рис. 3) для медной (Cu), латунной (Cu-Zn) и алюминиевой (Al) плоской пластины. Увеличение индуктивности разрядного контура до  $L \approx 20 \mu\text{H}$  и активного сопротивления до  $R \approx 0.5 \Omega$  приводит к аperiodическому разряду (рис. 4) и длине волны неустойчивости  $\lambda_{\text{cond}} \approx 1.2 \cdot 10^{-3}$  м. На рис. 5 приведены графики зависимости амплитуды первого импульса механического возмущения от координаты  $z$ , на которых также наблюдается ярко выраженная периодичность, подтверждающая зарождение неустойчивости, возникающие в твердых проводниках моды.

Дальнейшие эксперименты проводились по исследованию ЭВП в виде цилиндрических проволочек и плоской фольги, которые осуществлялись близким к согласованному режиму [25] в миллисекундном временном диапазоне. На осциллограммах (рис. 6,  $a, c$ ) представлены характерные временные зависимости разрядного тока и напряжения для медной проволочки и плоской алю-

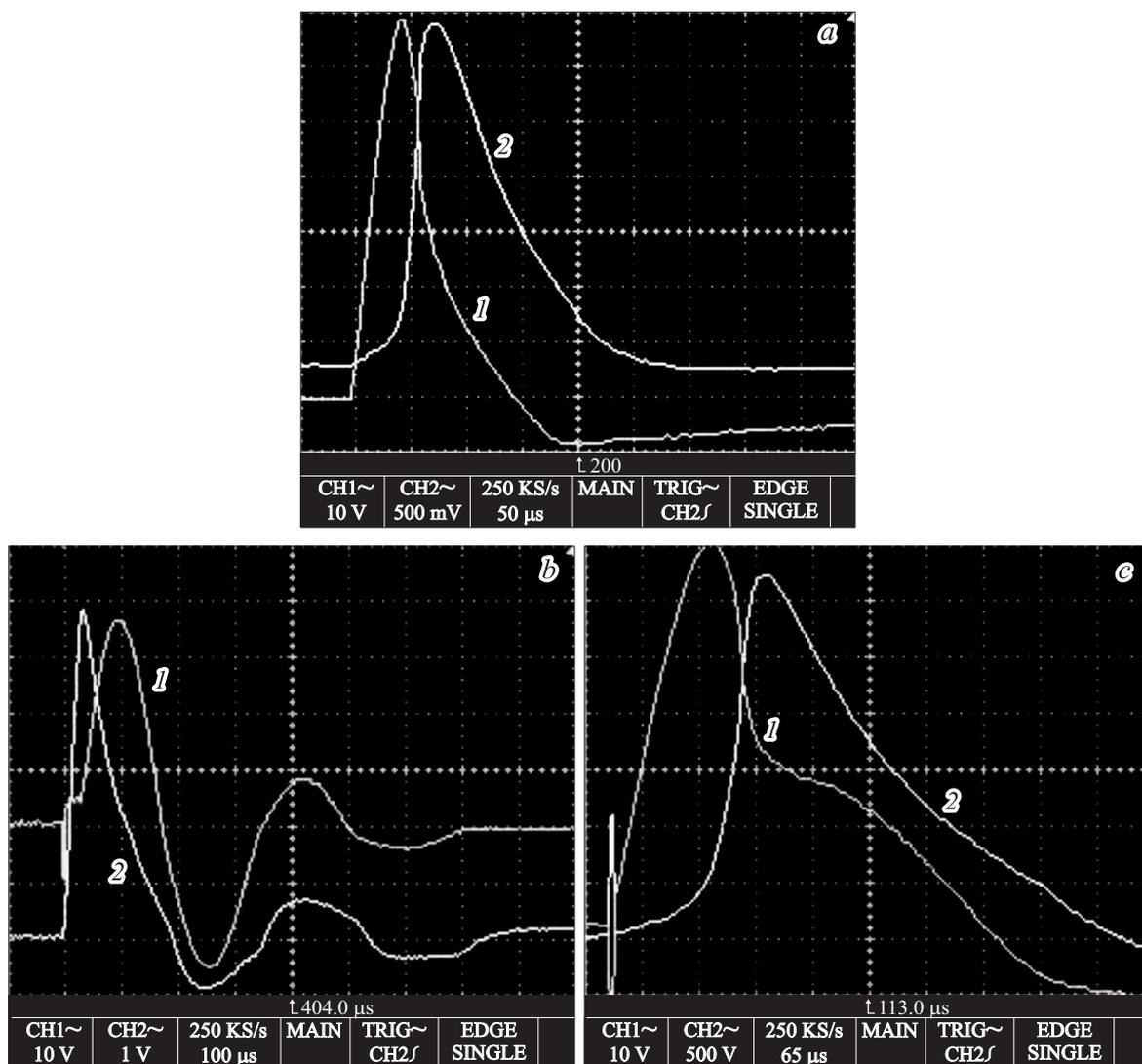
миниевой фольги, где наблюдается полная реализация энергии взрыва в первой половине периода, а также наличие „паузы тока“. На осциллограмме (рис. 6,  $b$ ) — временные зависимости разрядного тока и напряжения



**Рис. 4.** Характерные временные осциллограммы разрядного тока  $I$  и импульса механического возмущения 2: для (Cu) медного стержня при индуктивности разрядного контура  $L \approx 20 \cdot 10^{-6}$  Н и активного сопротивления  $R \approx 0.5 \cdot 10^{-3} \Omega$ .



**Рис. 5.** График зависимости амплитуды первого импульса радиального механического возмущения от координаты  $z$ :  $a$  — медный (Cu) цилиндрический стержень,  $b$  — медная (Cu) пластина.



**Рис. 6.** Характерные осциллограммы разрядного тока  $I$  и напряжения  $U$  при электрическом взрыве медной ( $a$ ), никромовой ( $b$ ) проволоочки и алюминиевой ( $c$ ) плоской фольги.

**Таблица 2.** Параметры электрического взрыва проводников

Металл	Параметры								
	Размер	$I_{\max}$ , kA	$\epsilon_{\text{atom}}$ , kJ/g	$E_{\text{sub}}$ , J	$E_{\text{dep}}$ , J	$j \cdot 10^6$ A/cm <sup>2</sup>	$h \cdot 10^9$ , A <sup>2</sup> s/cm <sup>2</sup>	$h \cdot 10^9$ , A <sup>2</sup> s/cm <sup>2</sup>	$\lambda_{\text{wire}} \cdot 10^{-3}$ , m
Цилиндрический проводник	$l_{\text{cyl}} = 80$ $d_{\text{cyl}} = 0.38$	7.35	5.2	420	326	3.24	6.37	4.1	1.82
Цилиндрический проводник	$l_{\text{cyl}} = 50$ $d_{\text{cyl}} = 0.2$	6.51	7.3	127	490	17.31	53.5*	3.24	1.77
Полосная фольга	$l_{\text{platelet}} = 120$ $2a_{\text{foil}} = 0.01$ $2b_{\text{foil}} = 20$	7.15	12.8	763	290	3.57	4.91	1.8	1.58

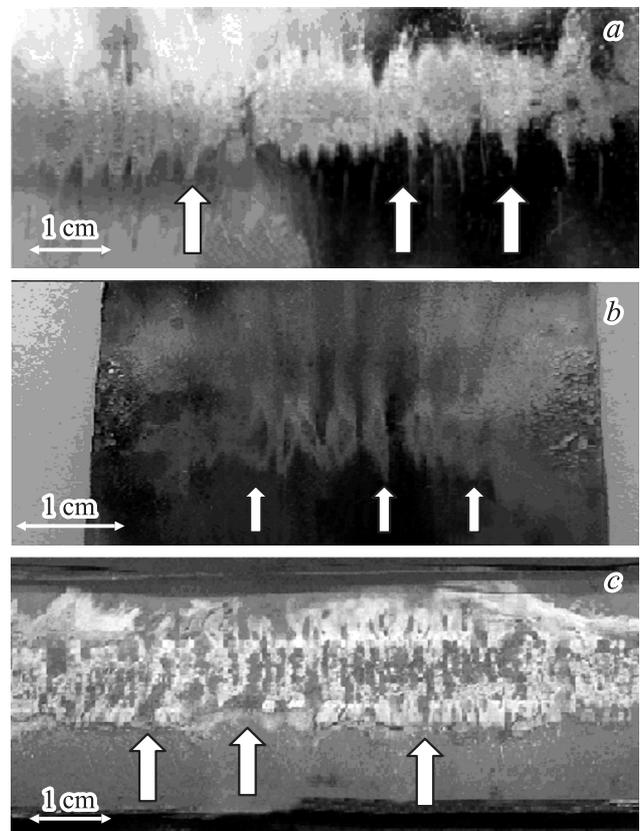
**Примечание:** Значение получено при условии ограничения влияния шунтирующего разряда.

(ЭВП) для проволоочки из тугоплавкого металла — нихром.

Рассмотрим модель электрического взрыва, протекающего в медленном режиме. В этом случае происходит неоднородный разогрев пинча, и до разрушения проводника испаряется незначительная его часть, а оставшаяся большая часть керна, вследствие МГД-неустойчивостей, дробится на капли, которые разлетаются в окружающее пространство. При протекании импульса тока, в нашем случае миллисекундного диапазона, происходит дробление проводника по длине с некоторой периодичностью вследствие возникающей МГД-неустойчивости перетяжечного типа с модой  $m = 0$ , что приводит к возникновению чередования плотности вещества — страт. Разлет продуктов взрыва отображается на стеклянной пластинке, расположенной вблизи проводника. Участки расплавленного проводника с большей плотностью и имеющие большие размеры по отношению к другим при разлете жидкого металла оставляют на стекле больший след в радиальном направлении. Это отчетливо наблюдается в образцах на стеклянной пластинке при взрыве цилиндрических медных проволоочек (рис. 7, *a*) и алюминиевых плоских фольг (рис. 7, *c*). Тот же эффект наблюдается при электрическом взрыве тугоплавкого металла (рис. 7, *b*) в виде проволоочки из нихрома. Кроме того, присутствуют фрагменты металла в виде напыления и в виде капель размером десятых долей микрона и менее. Расстояние между ближайшими наиболее яркими всплесками (на рис. 6 показаны белыми стрелками), очевидно, является длиной волны неустойчивости перетяжечного типа.

Средняя длина волны возмущения при взрыве медных, нихромовых и алюминиевых проводников составила (табл. 2) соответственно  $\lambda_{w \text{ Cu}} \approx 1.82 \cdot 10^{-3}$  m,  $\lambda_{w \text{ Cr-Ni}} \approx 1.77 \cdot 10^{-3}$  m,  $\lambda_{\text{foil Al}} \approx 1.58 \cdot 10^{-3}$  m. Данный результат согласуется с результатами экспериментов (табл. 1) по исследованию механических возмущений, возникающих вследствие протекания разрядного тока, из чего можно предположить, что зарождение МГД-неустойчивости может возникать в металле до фазового перехода. Для сравнения полученных результатов сле-

дует обратиться к работе [5]. В соответствии с формулами (6)–(8) оценка возникающей длины волны МГД-неустойчивости для медной проволоочки при достижении амплитуды разрядного тока  $I \approx 7.3 \cdot 10^3$  A составила  $\lambda_{w \text{ th}} [5] \approx 0.27 \cdot 10^{-3}$  m, что на порядок меньше полученных результатов в эксперименте. Полученная несогласованность результатов интерпретируется большим, по сравнению с результатами авторов [5], временем электрического взрыва проводников (миллисекундный диапазон) и меньшим значением (отличается на порядок) разрядного тока. Очевидно, силы поверхностно-



**Рис. 7.** Следы разлета продуктов электрического взрыва — страты: медной (Cu) (*a*), нихромовой (*b*) проволоочки и алюминиевой (Al) плоской фольги на стеклянной пластинке.

го натяжения вносят определенный вклад в масштаб неустойчивости и стратообразования при медленных режимах протекания ЭВП.

Неоднозначная ситуация возникает при рассмотрении электрического взрыва алюминиевой фольги как плазмоподобной токнесущей среды, с использованием выражений (9)–(11) авторов [18,19]. Согласно представленным выражениям для ЭВП сравнительно длительного временного диапазона получаем значение длины волны МГД-неустойчивости, не отражающее физического смысла, хотя для цилиндрической In–Ga эвтектики авторы получили удовлетворительный результат. Удельная энергия сублимации  $\varepsilon_{\text{atom}}$  для проводников принималась [26], энергия сублимации и энергия, вложенная в проводник к моменту взрыва, представлены в табл. 2. В соответствии с выражением (1) и осциллограмм разрядного тока электрического взрыва рассчитывался интеграл действия  $h$  при максимальном значении тока, полученные результаты достаточно убедительно согласуются с ранее полученными результатами авторов [14].

## Заключение

Таким образом, при протекании тока разряда по металлическому проводнику, находящемуся в твердом состоянии, возбуждаются в радиальном и аксиальном направлении механические возмущения колебательного характера. Амплитуда радиальной компоненты возмущения представляется периодической зависимостью от аксиальной координаты  $\sigma_{ra}(z)$  и рассматривается как одна из причин возникновения МГД-неустойчивости перетяжечного типа с модой  $m = 0$ .

## Список литературы

- [1] Nairne E. // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1974. Vol. 6. P. 79–89.
- [2] *Exploding Wires* / Ed. by W.G. Chace, H.K. Moor. NY: Plenum Press, 1959–1968. Vol. 1–4.
- [3] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [4] Недоспасов А.В. // УФН. 1968. Т. 94. Вып. 3. С. 439–462.
- [5] Абрамова К.В., Златин Н.А., Перегуд Б.П. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. № 6. С. 2007–2022.
- [6] Iskoldsky A.M., Volkov N.V., Zubarev N.M. // Phys. Rev. A. 1996. Vol. 217. P. 330.
- [7] Волков Н.Б., Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Шкатов В.Т. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 13. С. 43–47.
- [8] Набок А.Д. Способ контроля остаточных внутренних напряжений в проволоке. А.С. № 1073669. 15.02.1984.
- [9] Моисеев Л.М., Ковальчук В.В. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 5. С. 53–57.
- [10] Орешкин В.И., Хищенко К.В. и др. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 5. С. 625–637.
- [11] Oreshkin V.I. // Phys. Plasmas. 2008. Vol. 15. N 9. P. 092 103.
- [12] Бакуит Р.Б., Ткаченко С.И. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 43–52.
- [13] Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А. и др. Обзор литературы по моделированию электрического взрыва тонких проволочек. Препринт ФИАН. 2004. № 9. Ч. 1. 26 с.
- [14] Chace W.G., Levine M.A. // J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. N 7. P. 1298.
- [15] Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
- [16] Месляц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука. 2004. 704 с.
- [17] Батенин В.М., Берковский М.А., Валуев А.А., Куриленков Ю.К. // ТВТ. 1987. Т. 25. № 2. С. 218–224.
- [18] Валуев А.А., Дихтер И.Я., Зейгарник В.А. // ЖТФ. 1978. Т. 48. № 10. С. 2088–2096.
- [19] Белько В.О., Емельянов О.А. // ПЖТФ. 2009. Т. 35. В. 18. С. 58–64.
- [20] Волков Н.Б., Зубарев Н.М., Зубарева О.В. // ПЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 22. С. 38–44.
- [21] Волков Н.Б., Зубарев Н.М., Зубарева О.В. // ПЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 10. С. 1–6.
- [22] Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И. // Изв. ВолГТУ. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Вып. 6: Сб. науч. ст. 2012. Волгоград. ВолГТУ. № 6. С. 74–78.
- [23] Суркаев А.Л., Муха Ю.П., Суркаев В.А. // Волноводный датчик давления. Патент № 2241212. 27.11.2004.
- [24] Арнольд Г., Конн У. Электрический взрыв проводников / Под ред. А.А. Рухадзе. М.: Мир, 1965. 360 с.
- [25] Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 36. Вып. 23. С. 97–104.
- [26] *CRC Handbook of Chemistry and Physics* / Ed. by D.R. Lide. 90<sup>th</sup> ed. CRC Press, 2009. 2804 p.