

12

Исследование возникновения МГД-возмущений в цилиндрическом проводнике при протекании импульса разрядного тока

© А.Л. Суркаев

Волгоградский государственный технический университет
Волжский политехнический институт (филиал), Волжский
E-mail: vpti@volpi.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2013 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований радиального и аксиального механических возмущений в цилиндрическом проводнике, возникающих вследствие протекания импульсного разрядного тока. Показано, что амплитуда возмущений носит колебательный характер, а радиальная компонента может являться одной из причин возникновения магнитогиродинамической неустойчивости с модой $m = 0$ и стратообразования при электрическом взрыве проводника.

Феномен электрического взрыва проводников (ЭВП) и сопровождающие при этом многие процессы, в частности стратообразования, на сегодняшний день не представлены однозначным трактованием. Авторы [1] рассматривают образование страт за счет возникновения магнитогиродинамических (МГД) неустойчивостей, в то же время для быстрых режимов протекания электрического взрыва развиваются [2] перегревные неустойчивости. В данной работе представлены результаты исследований механических возмущений, возникающих в металлическом проводнике при протекании импульса плотности тока $j \approx 10^9$ А/м² в миллисекундном диапазоне. Возникающие механические возмущения могут рассматриваться как одна из причин возникновения магнитогиродинамической неустойчивости перетяжечного типа с модой $m = 0$ и стратообразования. Согласно классической теории электропроводности Друде–Лоренца свободные электроны металла массой m , направленно движущиеся с некоторой дрейфовой скоростью v_{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, по которому протекает разрядный ток короткого замыкания. В проводнике возникнет импульс механического возмущения (нормального напряжения $\sigma_{theor} = F/S$) в произвольном сечении проводника. Импульс возмущения, передаваемый электронами N некоторому объему V цилиндрического проводника сечением S и высотой $h = (v_{dr}t)/2$ за время t действия внешнего поля, равен $\sigma_{theor} = (Nmv_{dr})/(St)$. Плотность протекающего тока $j = dI/dS$ определяется $j = nev_{dr}$, где $n = N/V$ — концентрация электронов, e — заряд. Ток короткого замыкания $I = I_0 \sin \omega t$. Тогда можно получить выражение, определяющее импульс механического возмущения на торце однородного цилиндрического проводника длиной ℓ

$$\sigma_{theor} = \frac{mI_0\ell^2}{Ste h}. \quad (1)$$

При протекании тока по проводнику кроме аксиального возмущения, очевидно, должно присутствовать радиальное механическое возмущение. Согласно [1], в твердых проводниках с током могут возникать и развиваться магнитогидродинамические неустойчивости, приводящие к деформации проводника. Для исследования зарождения возникновения механических возмущений в цилиндрическом проводнике I при протекании тока разряда использовалась экспериментальная установка (рис. 1). В качестве регистратора импульсных радиальных возмущений применялся волноводный [3] пьезокерамический датчик 2. Датчик перемещается по боковой поверхности вдоль оси медного цилиндрического проводника I при каждом выстреле с шагом $h = 0.5$ mm. Щуп (предволновод) 3 датчика 2, реактивный волновод 4 и пьезотаблетка (ЦТС-19) 5 зафиксированы между собой и имеют электрическую развязку. Для регистрации аксиальных механических возмущений пьезокерамические преобразователи 6 располагались на торцах цилиндрического проводника I . Разрядный ток, протекающий по проводнику, формируется генератором импульсных токов (ГИТ) с физико-техническими параметрами [4] и регистрируется поясом Роговского 7. Сигналы от датчиков регистрировались цифровым запоминающим осциллографом (ОС). Начальное напряжение составляло $U_0 = 1$ kV, длина цилиндрического проводника $\ell = 45$ mm, диаметр $d = 4$ mm.

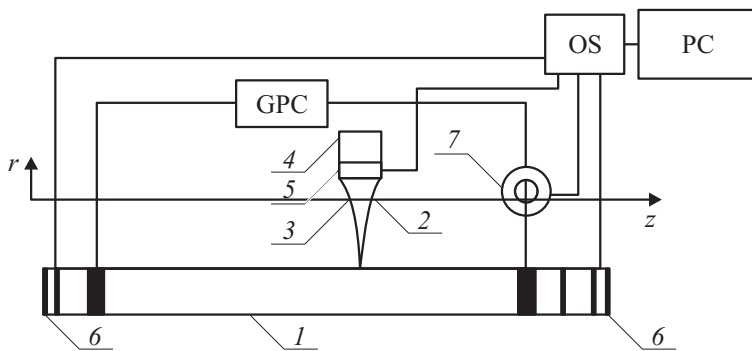


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — медный цилиндрический проводник в виде стержня; 2 — волноводный датчик; 3 — предволновод; 4 — реактивный волновод; 5 — пьезотаблетка датчика; 6 — торцевые пьезотаблетки; 7 — пояс Роговского; GPC — генератор импульсных токов; OS — осциллограф; PC — персональный компьютер.

На рис. 2, *a* представлены характерные осциллограммы, полученные в серии экспериментов, разрядного тока, импульсов радиальных и аксиальных возмущений, из которых следует в первую очередь наличие механических возмущений в проводнике с током. Используя выражение (1), амплитуда аксиального возмущения составляет $\sigma_{theor} = 7.33 \cdot 10^4$ Па, в то же время, исходя из осциллограммы, при коэффициенте преобразования пьезокерамической таблетки $k = 0.65 \cdot 10^5$ Па/В имеем $\sigma_{exp} \approx 6.5 \cdot 10^4$ Па, что 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 периодичность, которую можно рассматривать как зарождение неустойчивости, длина волны которой составляет $\lambda_{cond} \approx 1.6 \cdot 10^{-3}$ м.

Используя методику [5] наблюдения стратообразования на стеклянной пластинке при взрыве цилиндрических проводников, были получены аналогичные образцы (рис. 3). Начальное напряжение конденсаторного накопителя составляло $U_0 = 2$ кВ, длина взрывающейся

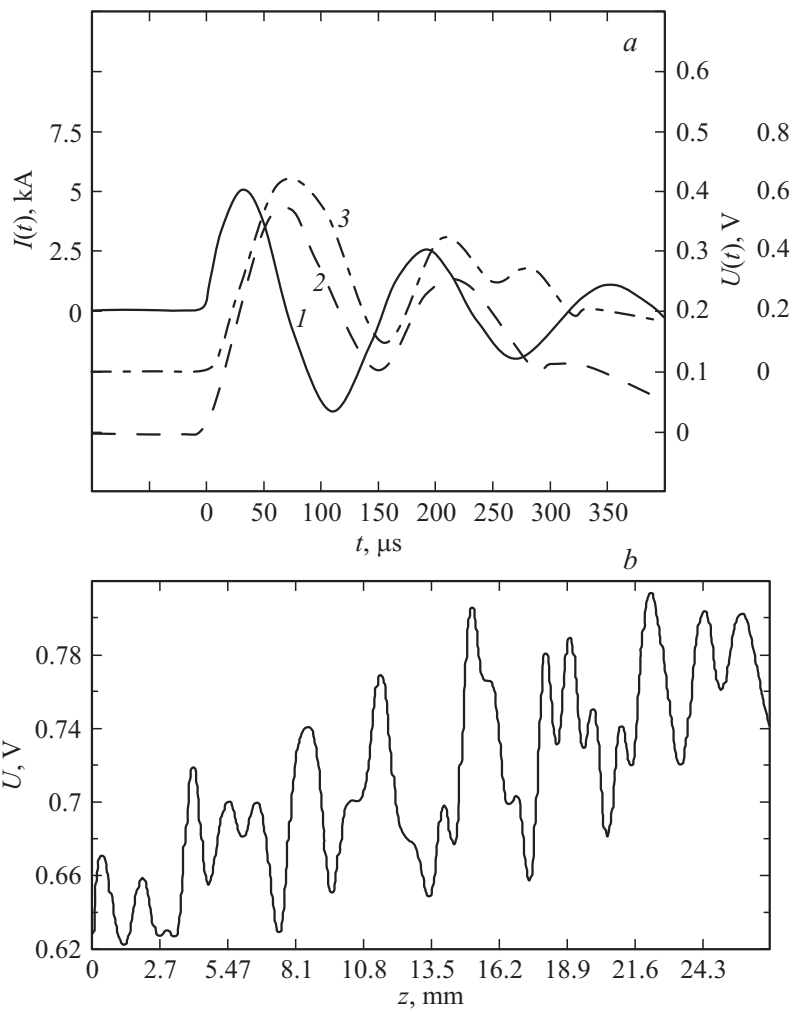


Рис. 2. *a* — осциллограммы: 1 — разрядного тока (шкала $U = 0\text{--}0.6\text{ V}$); 2 — импульс радиального возмущения; 3 — импульс аксиального возмущения (шкала $U = 0\text{--}0.8\text{ V}$). *b* — график зависимости амплитуды первого импульса радиального механического возмущения от координаты z .

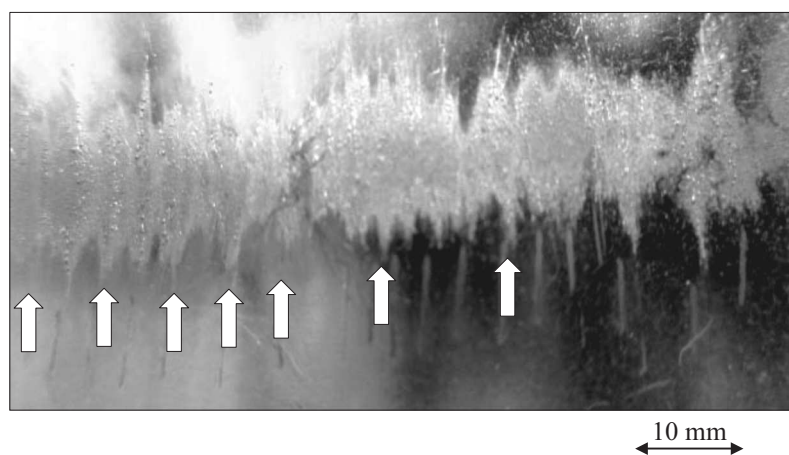


Рис. 3. Следы разлета продуктов электрического взрыва проволоочки на стеклянной пластинке, располагающейся вблизи проводника.

проволочки (Cu) составляла $\ell = 50$ mm, диаметр $d = 0.38$ mm. Пластинка располагалась от взрывающегося проводника на расстоянии порядка $\sigma_{pl} = 0.5\text{--}4$ mm. Электрический взрыв осуществлялся близким к согласованному режиму [6]. При протекании импульса тока, в частности миллисекундного диапазона, происходит дробление проводника по длине с некоторой периодичностью вследствие возникающей магнитогидродинамической неустойчивости [1] перетяжечного типа с модой $m = 0$, что приводит к возникновению чередования плотности вещества — страт. Разлет продуктов взрыва отображается на стеклянной пластинке, расположенной вблизи проводника. При медленном режиме ЭВП 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. Участки расплавленного проводника с большей плотностью при разлете жидкого металла и имеющие большие размеры по отношению к другим оставляют на стекле больший след в радиальном направлении, что наблюдается в образцах. Кроме того, наблюдаются фрагменты металла в виде напыления и в виде капель размером десятые доли микрона и менее. Расстояние

Параметры МГД-возмущений

$\sigma_{theor},$ Па	$\sigma_{exp},$ Па	$\varepsilon_{atom},$ J/g	$E_{sub},$ J	$E_{wire},$ J	$\tau_{theor},$ μs [1]	$\tau_{inst},$ μs [2]	$\lambda_{cond},$ m	$\lambda_{wire},$ m
$7.33 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^4$	$5.2 \cdot 10^3$	300	320	0.013	0.013	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.82 \cdot 10^{-3}$

между ближайшими наиболее яркими всплесками (на рис. 3 показаны белыми стрелками), очевидно, является длиной волны неустойчивости перетяжечного типа. Средняя длина волны возмущения составила $\lambda_{wire} \approx 1.82 \cdot 10^{-3}$ m, что согласуется с результатами вышеуказанных экспериментов (рис. 2, b). Следовательно, зарождение магнитогидродинамической неустойчивости возникает в металле до фазового перехода и является одной из возможных причин возникновения страт. Энергия сублимации для меди [7] (см. таблицу) принималась $\varepsilon_{atom} = 5.2 \cdot 10^3$ J/g и составила $E_{sub} \approx 300$ J, энергия, вложенная в проводник к моменту взрыва, $E_{wire} \approx 320$ J. Постоянная времени развития возмущения [1] при максимальном инкременте нарастания $\Omega_{max} = \sqrt{2}$ равна

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

где r_0 — радиус взрывающегося проводника; ρ — плотность (медь Cu); $H_0 = I/2\pi r_0$ — напряженность поля собственного тока на невозмущенной поверхности проводника. При этом, согласно [2], характерное время развития неустойчивостей с модой $m = 0$ зависит от радиуса проводника и скорости распространения возмущений в веществе

$$\tau_{inst} \approx \frac{r_0}{c_A}, \quad (3)$$

где $c_A = H_0/\sqrt{2\pi\rho}$ — альфвеновская скорость, при этом следует заметить, что выражения (2) и (3) идентичны. Время протекания тока бралось до потери металлической проводимости — паузы тока.

Таким образом, механические возмущения при протекании разрядного тока в проводнике в твердом состоянии носят колебательный характер, наличие радиальной компоненты возмущения следует рассматривать как одну из возможных причин возникновения МГД-неустойчивости перетяжечного типа с модой $m = 0$ и стратообразования при медленных режимах протекания ЭВП.

Список литературы

- [1] *Абрамова К.В., Златин Н.А., Перегуд Б.П.* // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. № 6. С. 2007–2022.
- [2] *Орешкин В.И., Хищенко К.В.* и др. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 5. С. 625–637.
- [3] *Суркаев А.Л., Муха Ю.П., Суркаев В.А.* / Патент № 2241212 от 27.11.2004.
- [4] *Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И.* // Известия ВолгГТУ. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Волгоград, 2012. В. 6. Сб. науч. ст. // ВолгГТУ. № 6. С. 74–78.
- [5] *Арнольд Г., Конн У.* Электрический взрыв проводников / Под ред. А.А. Рухадзе. М.: Мир, 1965. 360 с.
- [6] *Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 36. В. 23. С. 97–104.
- [7] *CRC Handbook of Chemistry and Physics.* 90th ed. <http://www.hbcpnetbase.com>.