

Электрический взрыв плоских медных проводников в мегагауссных магнитных полях

В.А. Ванькевич^{1,}, И.М. Дацко¹, С.А. Чайковский², Н.А. Лабезкая¹, В.И. Орешкин¹*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

²*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

**www_vlad_v@mail.ru*

Аннотация. На генераторе МИГ (2.5 МА, 100 нс) проведены экспериментальные исследования разлета плазмы и распространения волны нелинейной диффузии магнитного поля, возникающих при электрическом взрыве плоских медных проводников в мегагауссных магнитных полях. Экспериментально показано, что при таком взрыве плоских проводников, ширина которых (по оси x) много больше их толщины (по оси y) и ток протекает в направлении оси z , проводник расширяется по толщине вдоль оси y , а вдоль оси x по ширине разлет плазмы подавлен. Образовавшаяся на торцевых гранях в плоскости YZ (толщина проводника) малоплотная плазма слетается к центру симметрии по широким граням пластинки в плоскости XZ (ширина проводника).

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, нагрев и разлет плазмы, диффузия магнитного поля.

1. Введение

Интерес к исследованиям электрического взрыва проводников (ЭВП) в сильных магнитных полях связан с различными приложениями. Это транспортировка электромагнитной энергии в передающих магнито-изолированных линиях [1, 2], генерация сверхсильных магнитных полей [3–7], электромагнитное ускорение тел [8, 9], ускорение плоских металлических пластин в экспериментах по изучению ударных волн [10–15]. Основными процессами, протекающими при ЭВП в режиме скинирования тока, являются совместное распространение в веществе проводника ударной волны и волны нелинейной диффузии (ВНД) магнитного поля [16, 17], а также образование на поверхности проводника, к которой прикладывается магнитное поле, плотной низкотемпературной плазмы. Нелинейная диффузия магнитного поля характеризуется аномально большой скоростью проникновения его в проводник (по сравнению с обычной диффузией). Возрастание скорости диффузии магнитного поля связано с увеличением удельного сопротивления металла за счет его нагрева протекающим током. Процесс нелинейной диффузии может быть реализован лишь в достаточно сильном магнитном поле [5, 18], в котором удельное сопротивление металла возрастает приблизительно в 2 раза. Значение индукции такого магнитного поля для большинства металлов составляет несколько десятков тесла (для исследуемой в данной работе меди – 45 кГс). Величина магнитной индукции в несколько десятков кГс соответствует магнитному давлению на поверхности проводника в десятки Кбар. Поэтому волна нелинейной диффузии распространяется по веществу вместе с ударной волной, вызванной давлением магнитного поля на поверхности проводника.

2. Методика экспериментов

Эксперименты по электрическому взрыву проводников проводились на сильноточном генераторе тераваттного диапазона МИГ при уровне тока до 2.5 МА с фронтом его нарастания до 100 нс [19, 20]. Импульс тока в нагрузке имеет предимпульс, который начинается примерно за 250 нс до начала основного импульса, нарастает приблизительно линейно и достигает значений 3% от амплитуды основного импульса. При работе генератора МИГ с нагрузками в виде цилиндрических проводников длиной более 1 см, примерно на максимуме обратной полуволны напряжения на них, происходит перекрытие вакуумной

поверхности проходного изолятора вода-вакуум. Вследствие «захвата» магнитного потока в вакуумной передающей линии, ток нагрузки на $130\div 150$ нс приобретает форму слабо спадающей экспоненты с характерным временем спада несколько микросекунд.

Диагностика, использованная в экспериментах, включала в себя электротехнические измерения тока и напряжения. Для получения изображения проводников в видимом диапазоне спектра в различные моменты времени от начала протекания тока использовалась четырехкадровая оптическая камера HSFC Pro с минимальной длительностью экспозиции каждого кадра 3 нс. Нагрузка представляла собой плоский медный проводник (фольгу) шириной w и толщиной d . Схемы подключения проводника и фотоснимки узла нагрузки при его различной конфигурации представлены на рис. 1. Эксперименты проводились с симметричным и несимметричным расположением обратного массивного токопровода (2) относительно плоского проводника. Это позволило наблюдать картину разлета взорванного вещества при различной конфигурации силовых линий магнитного поля вокруг нагрузки. При этом плоский проводник шириной w (плоскость XZ) и толщиной d (плоскость YZ) мог устанавливаться любыми гранями в направлении к камере.

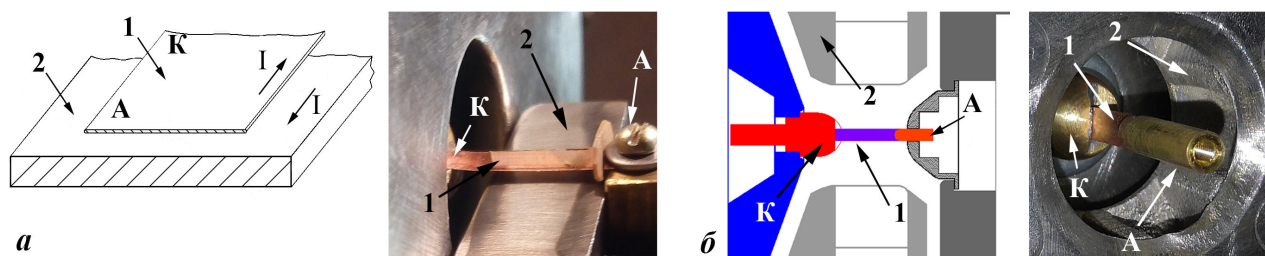


Рис. 1. Эскиз узла подключения проводников и фотоснимки узла нагрузки при несимметричной (а) и симметричной (б) конфигурации расположения обратного токопровода относительно плоского проводника. 1 – проводник; 2 – обратный токопровод.

3. Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 2 приведены снимки свечения плоского медного проводника толщиной $d = 100$ мкм и шириной $w = 5$ мм, установленного с зазором $h = 1.2$ мм относительно обратного токопровода, при протекании по нему максимального тока 2.1 МА в несимметричной системе электродов. Представлены характерные снимки, полученные при съемке с двух разных направлений. На снимках, как правило, во всех экспериментах, с боковой стороны (толщина w) было видно, что уже на 50 нс края пластины светятся в видимом диапазоне. Как видно на рис. 2б, это свечение расширяется в сторону по направлению от массивного электрода. При этом заметно, что оно не однородно, то есть имеет место чередование светлых и темных полос. По всей видимости, в плазме происходит развитие неустойчивостей. На этих снимках хорошо просматривается зазор между проводником и массивным обратным токопроводом, не заполненный светящейся плазмой. По-видимому, усиление индукции магнитного поля на краях пластины [21] приводит к их более раннему взрыву, образованию и разлету плазмы. Причем разлет происходит по силовым линиям магнитного поля в сторону уменьшения их плотности, в нашем случае вверх от обратного токопровода. Такая картина подтверждается и снимками, полученными при съемке верхней широкой грани проводника в плоскости XZ , приведенными на рис. 2а. Их характерной особенностью является наличие свечения в центральной части пластины вдоль ее продольной оси.

Это свечение у такого типа конфигурации нагрузки всегда начиналось в районе 70 нс в прианодной области и развивалось к катоду (см. рис. 2а). Наряду с гораздо более ярким свечением на продольной оси проводника, отчетливо видно свечение и по краям пластины с

перпендикулярными направлению тока возмущениями. С 135 нс амплитуда возмущений уже сравнима с шириной фольги, причем отчетливо наблюдается граница между возмущенным и невозмущенным веществом. К 175 нс от начала тока практически весь проводник подвержен развивающимся неустойчивостям, ограниченным вблизи продольной оси расширившимся ярким свечением. Это свечение является результатом продолжающегося нагрева оставшегося керна. Оно после 140 нс тоже перестает быть однородным, явно наблюдается чередование светлых и более темных полос. Образование плазмы на оси пластины обусловлено высокой плотностью тока в районе оси, что может быть связано с падением удельного сопротивления при сжатии вещества ударной волной, сопровождающей волну нелинейной диффузии магнитного поля. Далее, на наш взгляд, происходит нагрев и свечение остальной части пластины по ширине, оставшейся от взрыва и разлета ее краев на данный момент времени. Это свечение на оси и просвечивает разлетающуюся с боковых граней (толщиной w) по силовым линиям магнитного поля в направлении от обратного токопровода с поворотом к центру симметрии проводника плазму с ее неустойчивостями. Что и объясняет неоднородность осевого свечения после 140 нс, когда плазма от обеих боковых граней смыкается в приосевой области проводника.

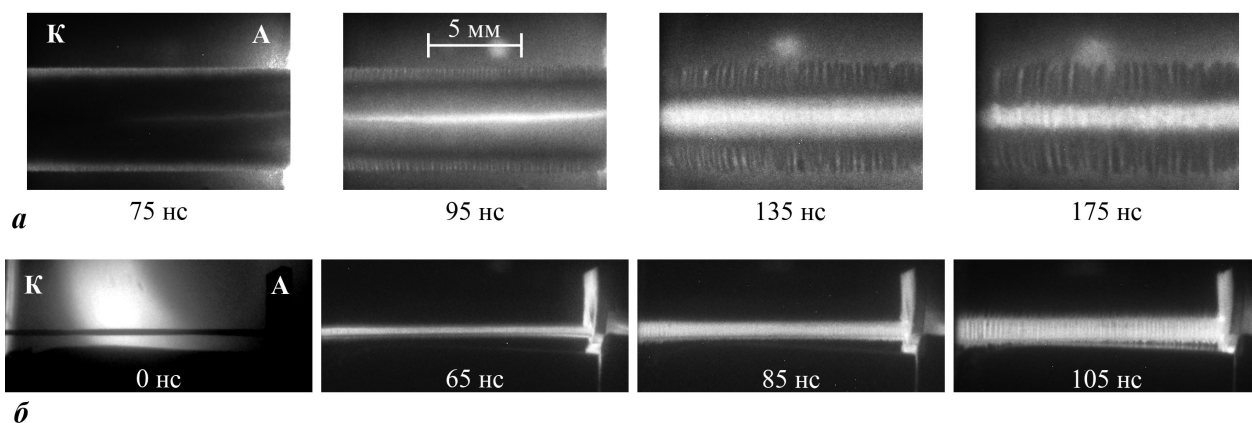


Рис. 2. Фотоснимки свечения поверхности плоского проводника в несимметричном варианте расположения обратного токопровода в видимом диапазоне излучения в различные моменты времени: а – вид сверху (ширина w), б – вид сбоку (толщина d).

Увеличение ширины пластины до 10 мм с неизменной толщиной 100 мкм показало картину ее взрыва, идентичную взрыву пластины шириной 5 мм, что демонстрируют снимки, представленные на рис. 3. Таким же образом происходит образование светящейся плазмы на краях пластины с ее разлетом в сторону от обратного токопровода и в направлении к осевой области пластины. Так же наблюдается более яркое свечение вблизи оси на внешней стороне пластины, которое начинается в районе 140 нс, в два раза позднее, чем для более узкой пластины шириной 5 мм. Кроме этого, из-за большего количества взорванного вещества с боковых граней, плотность плазмы над широкой гранью более высокая, излучение с осевой области оставшегося к данному времени керна не просвечивает в видимом диапазоне излучения поверхностные неустойчивости.

Таким же образом плоские проводники ведут себя при прохождении по ним тока генератора МИГ в симметричной схеме расположения обратного токопровода относительно проводника (рис. 1б). Проведение таких экспериментов позволило изучить поведение плоского проводника при более равномерном распределении мегагауссного магнитного поля вокруг него, что дало возможность проведения МГД моделирования их электрического взрыва. Результаты проведенного МГД-моделирования взрыва плоских проводников и

сравнения полученных расчетов с экспериментальными данными представлены в [23]. Было показано, что при взрыве в мегагауссных магнитных полях плоских проводников, ширина которых (вдоль оси x) много больше их толщины (вдоль оси y), разлет плазмы вдоль оси x (по ширине) подавлен, а проводник расширяется в основном вдоль оси y (по толщине). Это связано с усилением магнитного поля на краях проводника, из-за чего магнитное давление на краях существенно превышает значение магнитного давления на поверхности в центре проводника. Результаты моделирования хорошо согласуются с полученными экспериментальными результатами. Также в экспериментах по взрыву плоских проводников в мегагауссных магнитных полях наблюдаются крупномасштабные неустойчивости.

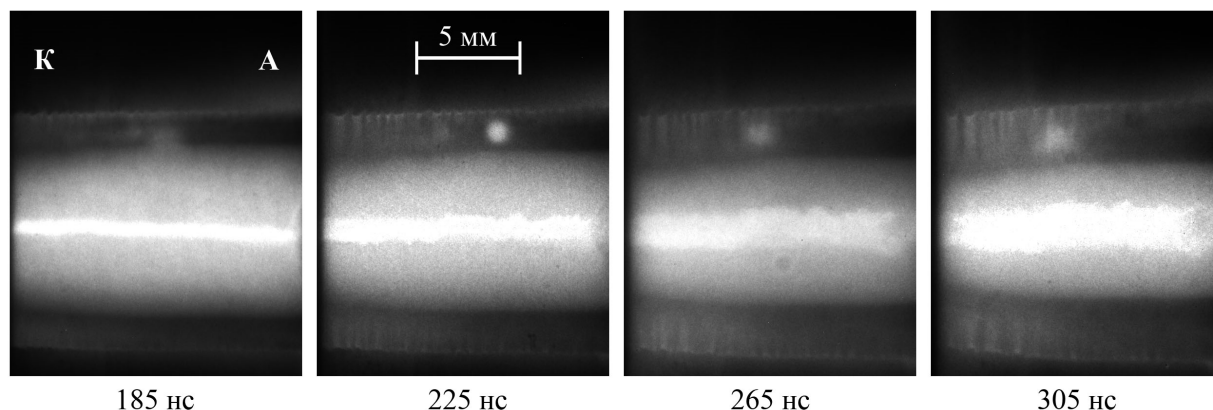


Рис. 3. Фотоснимки свечения поверхности плоского медного проводника толщиной 100 мкм и шириной 10 мм в несимметричном варианте расположения обратного токопровода в видимом диапазоне излучения в различные моменты времени – вид сверху (ширина w).

4. Заключение

На генераторе МИГ (2.5 МА, 100 нс) проведены экспериментальные исследования разлета плазмы и распространения волны нелинейной диффузии магнитного поля, возникающих при электрическом взрыве плоских медных проводников в мегагауссных магнитных полях в асимметричной и симметричной конфигурациях электродов. Эксперименты показали, что при взрыве плоских медных проводников, ширина которых (по оси x) много больше их толщины (по оси y), а ток протекает в направлении оси z , проводник расширяется в основном по толщине вдоль оси y , а по ширине вдоль оси x разлета плазмы практически не наблюдается. Образовавшаяся на торцевых гранях в плоскости YZ малоплотная плазма слетается к центру симметрии по широким граням пластинки в плоскости XZ . В обеих конфигурациях электродов было зарегистрировано появление плазменного канала в осевой области плоского проводника, а также появление и развитие неустойчивостей на его поверхности.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00364, <https://rscf.ru/project/20-19-00364/>

5. Литература

- [1] W.A. Stygar, T.J. Awe, J.E. Bailey, et al., Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, vol. **18** (11), 110401, 2015, doi: 10.1103/physrevstab.18.110401

-
- [2] A.A. Kim, M.G. Mazarakis, V.A. Sinebryukhov, et al., Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages, *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*, vol. **12**, p. 050402, 2009, doi: 10.1103/physrevstab.12.050402
- [3] C.M. Fowler, W.B. Garn, and R.S. Caird, Production of very high magnetic fields by implosion, *Journal of Applied Physics*, vol. **31**, 588, 1960, doi: doi.org/10.1063/1.1735633
- [4] A.D. Sakharov, Magnetoimplosive generators, *Soviet Physics Uspekhi*, vol. **9**, 294, 1966, doi: 10.1070/PU1966v009n02ABEH002876
- [5] H. Knoepfel, *Pulsed high magnetic fields: physical effects and generation methods concerning pulsed fields up to the megaoersted level*. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1970.
- [6] Yu.N. Bocharov, S.I. Krivosheev, and G.A. Shneerson, Delay of a single-coil solenoid failure beginning in a Megagauss magnetic field, *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, vol. **8**(4), 212, 1982.
- [7] S.I. Krivosheev, V.V. Titkov, and G.A. Shneerson, Two-dimensional field diffusion and magnetohydrodynamic flow in an electric explosion of a miniature single-turn solenoid in a megagauss magnetic field, *Technical Physics*, vol. **42**, 352, 1997, doi: 10.1134/1.1258833
- [8] R. Kinslow, *High-velocity impact phenomena*. N.Y.: Academic Press, 1970.
- [9] S.C. Rashleigh, and R.A. Marshall, Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities, *Journal of Applied Physics*, vol. **49**, 2540, 1978, doi: 10.1063/1.325107
- [10] V.E. Fortov, Intense shock waves and extreme states of matter, *Physics-Uspekhi*, vol. **50**, 333, 2007, doi: 10.1070/pu2007v050n04abeh006234
- [11] T.J. Nash, C. Deeney, G.A. Chandler, et al., Comparison of a copper foil to a copper wire-array Z pinch at 18 MA, *Physics of Plasmas*, vol. **11**, L65, 2004, doi: 10.1063/1.1796352
- [12] M.D., Knudson R.W. Lemke, D.B. Hayes, et al., Near-absolute Hugoniot measurements in aluminum to 500 GPa using a magnetically accelerated flyer plate technique, *Journal of Applied Physics*, vol. **94**, 4420, 2003, doi: 10.1063/1.1604967
- [13] R.W. Lemke, M.D. Knudson, C.A. Hall, et al., Characterization of magnetically accelerated flyer plates, *Physics of Plasmas*, vol. **10**(4), 1092, 2003, doi: 10.1063/1.1554740
- [14] S.I. Tkachenko, E.V. Grabovski, A.N. Gribov, et al., Studying the Parameters of Aluminum Flyer with a Linear Current Density of 4.5 MA cm⁻¹ on the Angara 5-1 Installation, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. **82**, 390, 2018, doi: 10.3103/S1062873818040202
- [15] E.V. Grabovskii, V.V. Alexandrov, A.V. Branitskii, et al., Flyer acceleration by magnetic pressure on Angara-5-1 installation, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **946**, 012041, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/946/1/012041
- [16] V.I. Oreshkin, and S.A. Chaikovsky, Stability of a nonlinear magnetic field diffusion wave, *Physics of Plasmas*, vol. **19**, 022706, 2012, doi: 10.1063/1.3683557
- [17] V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovsky, I.M. Datsko, et al., MHD instabilities developing in a conductor exploding in the skin effect mode, *Physics of Plasmas*, vol. **23**, 122107, 2016, doi: 10.1063/1.4971443
- [18] G.A. Shneerson, To the theory of electric explosion of a skin-layer in a superhigh magnetic field, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, vol. **43**, 419, 1973 (*Soviet Physics Technical Physics*, vol. **18**, 268, 1973).
- [19] A.V. Luchinskii, N.A. Ratakhin, V.F. Fedushchak, and A.N. Shepelev, Multipurpose transformer-type pulse generator, *Russian Physics Journal*, vol. **40**, 1178, 1997, doi: 10.1007/BF02524306
- [20] V.K. Petin, S.V. Shljakhtun, V.I. Oreshkin, and N.A. Ratakhin, X-ray source for irradiation of large-area objects, *Tech. Phys.*, vol. **53**, 776, 2008, doi: 10.1134/S1063784208060170

- [21] G.A. Shneerson, *Strong Magnetic Fields (in Russian)*. Lenigrad: LPI, 1985.
- [22] S.A. Chaikovskii, V.I. Oreshkin, N.A. Labetskaya, et al., Peculiarities of an Electrical Explosion of Flat Conductors in the Current Skinning Mode, *Russian Physics Journal*, vol. **62**, 1235, 2019, doi: 10.1007/s11182-019-01840-7
- [23] S.A. Chaikovsky, I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, et al., Foil explosion in megagauss magnetic fields: Non-uniform expansion and instabilities, *Physics of Plasmas*, vol. **29**, 103501, 2022, doi: 10.1063/5.0098206