

Нелинейная диффузия магнитного поля в двухслойный проводник с внешним слоем большей проводимости

Н.А. Лабецкая^{1,*}, С.А. Чайковский², И.М. Дацко¹, В.А. Ванькевич¹, В.И. Орешкин¹

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

²Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*n-fields@rambler.ru

Аннотация. Одним из способов, позволяющим исследовать динамические характеристики вещества при субмикросекундных процессах, является разгон тонкой пластины (флаера) сильным магнитным полем и ее столкновение с мишенью из исследуемого вещества. Одной из проблем использования флаеров является джоулев нагрев, связанный с магнитной диффузией, ограничивающий минимально возможную начальную толщину флаера. При снижении скорости распространения нелинейной диффузии магнитного поля в проводнике возможно увеличение времени, в течение которого обращенная к мишени поверхность проводника останется невозмущенной. На генераторе МИГ (2 МА, 100 нс) были проведены исследования распространения волны нелинейной диффузии магнитного поля в процессе скин-взрыва цилиндрических однородных по сечению и двухслойных проводников с нанесенным внешним слоем большей проводимости. Экспериментально подтверждено, что нанесение на проводник слоя с более высокой проводимостью позволяет замедлить нелинейную диффузию магнитного поля. При этом несмотря на то, что свечение поверхности двухслойного проводника в видимом диапазоне начинается раньше, различие в скорости разлета поверхностной плазмы проводника без внешнего слоя и двухслойного проводника не наблюдается.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, скиновый взрыв проводников, нелинейная диффузия магнитного поля, двухслойный проводник.

1. Введение

Электрический взрыв проводников (ЭВП) исследуется достаточно давно и нашел ряд практических применений, таких как генерация сверхсильных магнитных полей [1–5], электромагнитное ускорение тел [6, 7].

Одним из режимов ЭВП, как правило, реализующихся только на сильноточных генераторах мегаамперного диапазона, является скиновый взрыв. Основными процессами, характерными для данного режима, являются распространение в веществе проводника ударной волны и волны нелинейной диффузии (ВНД) магнитного поля [8, 9], а также образование на поверхности проводника плотной низкотемпературной плазмы. Нелинейная диффузия магнитного поля по сравнению с обычной диффузией характеризуется аномально большой скоростью проникновения его в проводник. Увеличение скорости проникновения магнитного поля в проводник связано с уменьшением проводимости поверхностных слоев металла, вызванным интенсивным джоулевым нагревом. Данный процесс приводит к «смещению» основного тока вглубь проводника, и, таким образом, плотность тока достигает максимального значения («пика») в объеме проводника в каждый момент времени. Этот «пик» плотности тока перемещается вглубь проводника и соответствует наибольшему пространственному градиенту магнитного поля, что позволяет рассматривать нелинейную магнитную диффузию как волновой процесс [8–10]. Процесс нелинейной диффузии реализуется только в сильном магнитном поле [3, 11], когда удельное сопротивление металла возрастает приблизительно в 2 раза. Значение индукции такого магнитного поля для титана составляет 36 Т, для меди – 45 Т.

Одним из способов, позволяющим исследовать динамические характеристики вещества при субмикросекундных процессах [12], является разгон тонкой пластины (флаера) сильным магнитным полем и его столкновение с мишенью из исследуемого вещества [13–17]. Для эффективности исследований необходимо, чтобы во время удара хотя бы часть флаера со

стороны мишени обладала твердотельной плотностью [13, 18]. Одной из проблем использования флаеров является джоулев нагрев, связанный с магнитной диффузией и ограничивающий минимально возможную начальную толщину флаера [13]. Ранее в наших работах были использованы двухслойные проводники с внешним слоем меньшей проводимости, которые за счет увеличения проводимости вглубь проводника позволяли снизить плотность джоулева тепловыделения на поверхности проводника и достигать высоких значений индукции магнитного поля на поверхности проводника без ее взрыва [19, 20]. Можно предположить, что использование внешнего слоя большей проводимости, нанесенного на основной материал проводника, позволит замедлить распространение ВНД внутри. Однако, взрыв поверхностного слоя и динамика изменения его проводимости существенно усложняют процесс. Поэтому представляет интерес исследование образования и разлета плазмы на внешней поверхности проводника. Цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании процесса нелинейной диффузии магнитного поля в однородные по сечению и двухслойные проводники с внешним слоем большей проводимости в режиме скинирования тока. Отметим, что методика измерений скорости проникновения сильного магнитного поля в полые цилиндрические проводники, использованная в данной работе и опирающаяся на измерения напряжения на внутренней поверхности проводника, детально описана в работах [9, 10].

2. Постановка эксперимента

Эксперименты по электрическому взрыву проводников проводились на сильноточном тераваттном генераторе МИГ (уровень тока до 2 МА, фронт 100 нс) [21, 22]. Нагрузка представляла собой полые цилиндрические проводники (трубки) с внешним диаметром ~ 3 мм и толщиной стенки около 270 мкм. В экспериментах использовались 3 типа нагрузки: 1) однородные по сечению трубки из титана, 2) двухслойные проводники, состоящие из титановой трубки и нанесенного на ее внешнюю поверхность слоя меди толщиной 10 или 20 мкм и 3) «составные» проводники. В случае последних прикатодная часть представляла собой титановую трубку с нанесенным на ее внешнюю поверхность слоем меди толщиной 10 или 20 мкм, а прианодная часть – однородную по сечению титановую трубку. Нанесение покрытий методом вакуумного дугового напыления [23] производилось в Лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Диагностический комплекс генератора МИГ состоял из делителей напряжения, поясов Роговского, магнитных зондов и четырехкадровой оптической камеры HSFC Pro с экспозицией каждого отдельного кадра 3 нс, которая использовалась для получения оптических снимков взрывающегося проводника в собственном свечении в различные моменты времени от начала протекания тока генератора МИГ по проводнику. Для измерения динамики ВНД использовался специальный датчик напряжения [9, 10], который позволял произвести экспериментальные измерения скорости проникновения магнитного поля по максимуму производной импульса напряжения на внутренней поверхности трубки. Схематично расположение датчика в узле нагрузки представлено на Рис. 1б [9]. Конструктивно датчик представлял собой торец кабеля РК-75-2 с заголенной жилой и снятой оплеткой. Датчик помещался с низковольтной стороны в открытый конец трубки таким образом, чтобы обеспечивались контакт жилы с дальним «высоковольтным» концом трубки, а также контакт оплетки с внутренней поверхностью трубки на низковольтной стороне. Второй конец кабеля подводился к активному делителю [9].

На Рис. 1 представлены схематическое изображение узла нагрузки генератора МИГ и схематичное изображение датчика напряжения в узле нагрузки генератора.

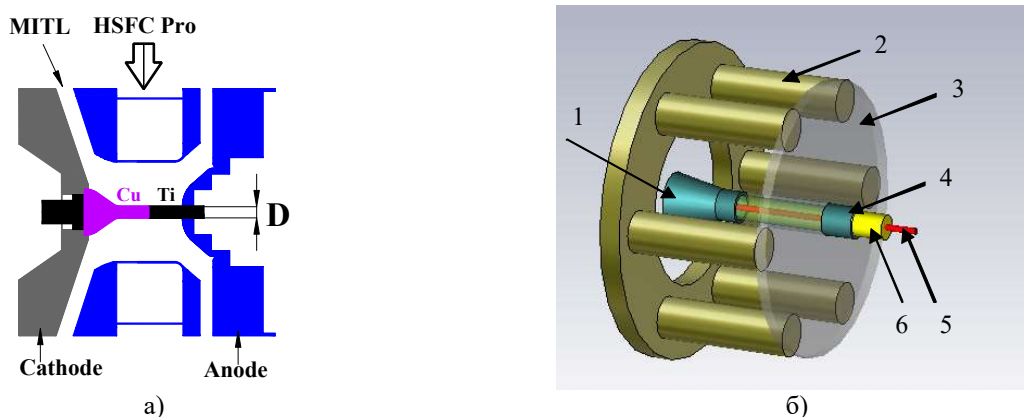


Рис. 1. а) Схематическое изображение узла нагрузки генератора МИГ (MITL – магнитоизолированная транспортирующая линия, D – внешний диаметр цилиндрического проводника. б) Схематическое изображение датчика напряжения в узле нагрузки генератора МИГ [9]: 1 – катодная конусная часть трубки; 2 – стержни обратного токопровода; 3 – анодный диск; 4 – трубка; 5 – жила кабеля; 6 – полиэтиленовая изоляция кабеля.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Однородная титановая трубка

Ниже представлены экспериментальные результаты для однородных по сечению трубок с внешним диаметром D 3 мм и толщиной стенки h 250÷270 мкм. На рисунке 2 приведены: а) оптические снимки внешней поверхности взрывающегося проводника в различные моменты времени от начала протекания тока генератора и б) осциллограмма импульса напряжения U на внутренней поверхности трубки и производная dU/dt .

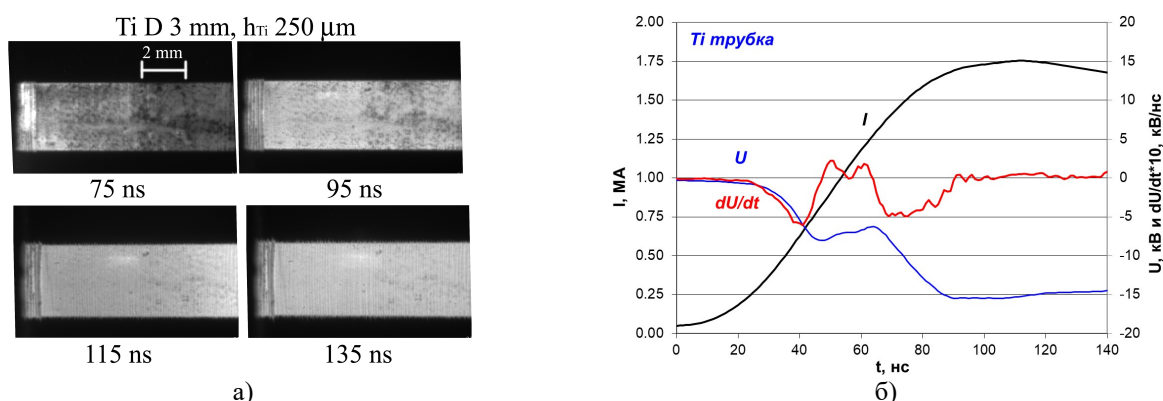


Рис. 2. а) Оптические снимки взрывающегося проводника. б) Экспериментальная осциллограмма импульса напряжения U на внутренней поверхности трубки, производная dU/dt и ток I генератора МИГ. Однородный по сечению титановый проводник $D_{Ti} = 3$ мм, $h_{Ti} = 250\div 270$ мкм.

Как можно видеть из Рис. 2, свечение поверхности титановой трубки является практически однородным уже на 75 нс от начала протекания по нему тока генератора МИГ, а с течением времени наблюдается образование на поверхности проводника плазмы и формирование неустойчивостей. Импульс напряжения на внутренней поверхности однородной титановой трубки нарастает до уровня 5 кВ примерно за 10 нс, затем скорость роста существенно замедляется (см. Рис. 2б). Момент выхода магнитного поля на внутреннюю поверхность трубок определялся по максимуму производной dU/dt напряжения, соответствующему началу сигнала напряжения U , и для вышеприведенных нагрузок составлял 41÷44 нс от начала протекания тока генератора.

3.2. Двухслойный полый титановый проводник с внешним медным слоем

На Рис. 3 приведены оптические снимки «составного» взрывающегося проводника, прикатодная часть которого представляла двухслойный проводник, а прианодная – однородный по сечению проводник.

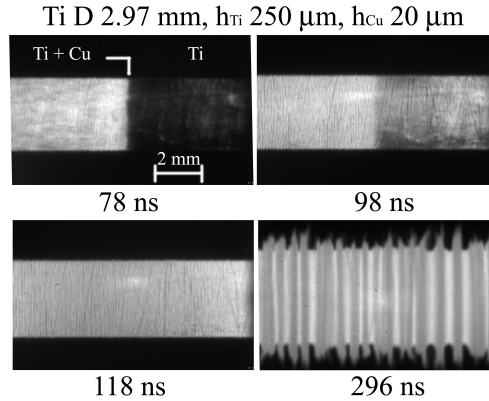


Рис. 3. Оптические снимки "составного" взрывающегося проводника. Прикатодная половина проводника: $D_{Ti} = 2.97$ мм, $h_{Ti} = 250$ мкм, $h_{Cu} = 20$ мкм; прианодная половина проводника: $D_{Ti} = 2.97$ мм, $h_{Ti} = 250$ мкм.

Как можно видеть из Рис. 3, свечение поверхности однородной титановой трубки является практически однородным на 78 нс от начала протекания по нему тока генератора МИГ, тогда как поверхность двухслойного проводника светится намного ярче, то есть свечение начинается раньше. Это связано с тем, что основной ток протекает в верхнем слое большей проводимости. Такая картина наблюдается и на 98 нс, тогда как на 118 нс свечение обеих частей составного проводника выравнивается и становится однородным. Следующий более поздний оптический снимок показывает, что развитие неустойчивостей на поверхности обеих частей проводника происходит одинаково. Диаметр однородной трубки практически не отличается от диаметра двухслойного проводника.

На Рис. 4 приведены типичные осциллограммы импульса напряжения U и производная dU/dt на внутренней поверхности двухслойного проводника для обеих толщин нанесенного слоя меди.

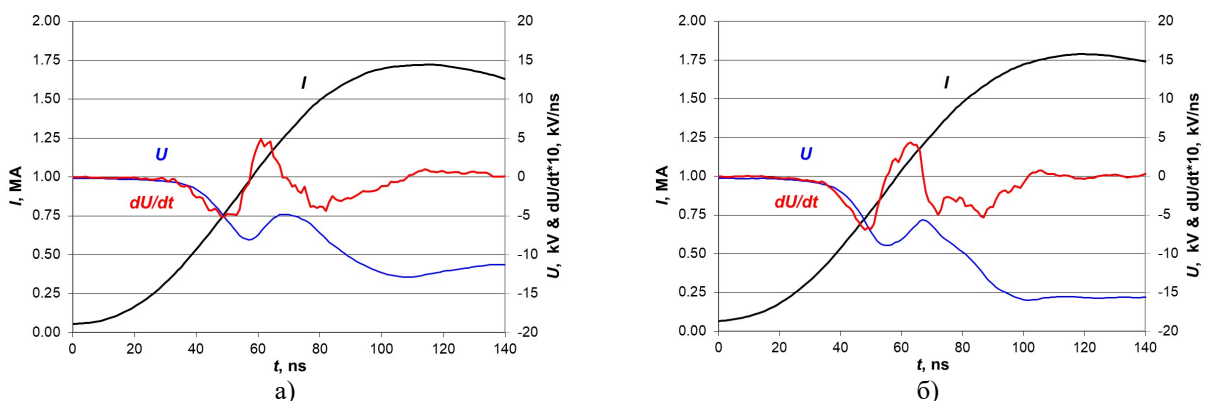


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы импульса напряжения U на внутренней поверхности двухслойного проводника, производная dU/dt и ток I генератора МИГ. Двухслойные проводники: а) $D_{Ti+Cu} = 2.99$ мм, $h_{Ti} = 262$ мкм, $h_{Cu} = 10$ мкм; б) $D_{Ti+Cu} = 3.055$ мм, $h_{Ti} = 285$ мкм, $h_{Cu} = 20$ мкм.

Так же, как и в случае однородного титанового проводника, импульс напряжения на внутренней поверхности двухслойного проводника нарастает до уровня 5 кВ примерно за 10 нс, затем скорость роста существенно замедляется (см. Рис. 4). Момент выхода

магнитного поля на внутреннюю поверхность двухслойных проводников для толщины медного слоя 10 мкм составлял $43 \div 49$ нс, для толщины медного слоя 20 мкм – $43 \div 50$ нс от начала протекания тока, соответственно.

Таким образом, сравнивая полученные экспериментальные данные для однородных и двухслойных проводников, можно отметить следующее: при использовании внешнего слоя большей проводимости наблюдается задержка выхода волны нелинейной магнитной диффузии на внутреннюю поверхность двухслойного проводника примерно на 10 нс относительно выхода ВД на внутреннюю поверхность однородного проводника. Увеличение толщины внешнего слоя потенциально должно увеличить задержку, однако в условиях проведенных экспериментов такого не наблюдалось.

4. Заключение

На генераторе МИГ (2 МА, 100 нс) были проведены экспериментальные исследования распространения волны нелинейной диффузии магнитного поля в процессе скин-эффекта однородных по сечению и двухслойных проводников с внешним слоем большей проводимости. Однородные проводники представляли собой трубки из титана (начальный диаметр ~ 3 мм, толщина стенки титана ~ 270 мкм). Двухслойные проводники состояли из титановой трубки и нанесенного на ее внешнюю поверхность слоя меди толщиной 10 или 20 мкм.

Эксперименты показали, что волна нелинейной диффузии магнитного поля выходит на внутреннюю поверхность однородного проводника на $41 \div 44$ нс от начала протекания тока генератора МИГ. Для двухслойного проводника аналогичные экспериментальные данные получены на $43 \div 50$ нс для обеих толщин напыленного внешнего слоя большей проводимости. Таким образом, наблюдается задержка выхода волны нелинейной диффузии магнитного поля на внутреннюю поверхность двухслойного проводника с внешним слоем большей проводимости относительно однородного проводника. При этом, несмотря на то, что свечение поверхности двухслойного проводника в видимом диапазоне начинается раньше, различие в скорости разлета поверхностной плазмы проводника без внешнего слоя и двухслойного проводника не наблюдается.

Благодарности

Авторы благодарят ТомЦКП СО РАН за предоставленную высокоскоростную камеру видеорегистрации HSFC Pro.

5. Список литературы

- [1] С.М. 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: 10.1063/1.1735633
- [2] A.D. Sakharov, Magnetoimplosive Generators, *Soviet Physics Uspekhi*, vol. **9**, 294, 1966, doi: 10.1070/PU1966v009n02ABEH002876
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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

- [6] R. Kinslow, *High-velocity impact phenomena*. N.Y.: Academic Press, 1970.
- [7] 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
- [8] 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
- [9] S.A. Chaikovsky, V.I. Oreshkin, I.M. Datsko, et al., Experimental study of the nonlinear diffusion of a magnetic field and skin explosion of cylindrical conductors, *Physics of Plasmas*, vol. **22**, 112704, 2015, doi: 10.1063/1.4935401
- [10] N.A. Labetskaya, V.I. Oreshkin, S.A. Chaikovsky, et al., Diffusion of fast rising strong magnetic fields into conductors, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **552**, 012020, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/552/1/012020
- [11] 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**, p. 268, 1973)
- [12] G.V. Garkushin, O.N. Ignatova, G.I. Kanel, et al., Submicrosecond strength of ultrafine-grained materials, *Mechanics of Solids*, vol. **45**, 624, 2010, doi: 10.3103/S0025654410040114
- [13] R.W. Lemke, M.D. Knudson, D.E. Bliss, et al., Magnetically accelerated, ultrahigh velocity flyer plates for shock wave experiments, *Journal of Applied Physics*, vol. **98**, 073530, 2005, doi: 10.1063/1.2084316
- [14] G.M. Oleinik, S.I. Tkachenko, E.V. Grabovski, et al., Acceleration of metallic flyers at the Angara-5-1 installation, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **1147**, 012086, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1147/1/012086
- [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] 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** (4), 390, 2018, doi: 10.3103/S1062873818040202
- [17] V.V. Aleksandrov, A.V. Branitskii, E.V. Grabovski, et al., Study of the impact of a duralumin flyer with a tungsten target at the Angara-5-1 Facility, *Plasma Diagnostics*, vol. **45**, 421, 2019, doi: 10.1134/S1063780X19040019
- [18] R.W. Lemke, M.D. Knudson, C.A. Hall, et al., Characterization of magnetically accelerated flyer plates, *Physics of Plasmas*, vol. **10**, 1092, 2003, doi: 10.1063/1.1554740
- [19] S.A. Chaikovsky, V.I. Oreshkin, I.M. Datsko, et al., Skin explosion of double-layer conductors in fast-rising high magnetic fields, *Physics of Plasmas*, vol. **21** (4), 042706, 2014, doi: 10.1063/1.4871719
- [20] I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, S.A. Chaikovsky, and V.V. Shugurov, Skin electric explosion in double-layer conductors with a low-conductivity deposited layer, *Technical Physics*, vol. **61** (6), 855, 2016, doi: 10.1134/S1063784216060049
- [21] 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
- [22] V.K. Petin, S.V. Shljakhtun, V.I. Oreshkin, and N.A. Ratakhin, X-ray source for irradiation of large-area objects, *Technical Physics*, vol. **53**, 776, 2008, doi: 10.1134/S1063784208060170
- [23] O.V. Krygina, N.N. Koval, I.V. Lopatin, et al., Generation of low-temperature plasma by low-pressure arcs for synthesis of nitride coatings, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **669**, 012032, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/669/1/012032