

ВЗРЫВОМАГНИТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

К. С. Сальникова, Ю. В. Власов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородская область

Данная работа посвящена расчетным исследованиям, необходимым для разработки взрывомагнитного устройства для исследования свойств материалов по результатам измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ударе по ней пластины, движущейся со скоростью нескольких километров в секунду. Пластина – ударник ускоряется давлением магнитного поля, создаваемого током взрывомагнитного генератора (ВМГ).

Введение

Одним из способов определения параметров уравнений состояния веществ является обработка результатов измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ударе по ней пластины, движущейся со скоростью нескольких километров в секунду. Ускорение пластин до таких скоростей можно выполнить либо взрывным [1], либо электромагнитным способом [2].

Пластина – ударник ускоряется давлением магнитного поля, создаваемого протекающим по нему током. Для обеспечения требуемой точности измерений сторона ударника, противоположная той, на которую воздействует магнитное давление, к моменту соударения с мишенью должна оставаться в твердом состоянии и не быть возмущена гидродинамическими неустойчивостями. Кроме того, необходимо обеспечить однородное по длине и ширине нагружение мишени.

В первых опытах по измерению волновой и массовой скоростей в мишени потребуется выполнить ускорение плоских пластин размером $5 \times 5 \text{ см}^2$ до скорости 3–5 км/с. Для этой цели предполагается использовать источник электромагнитной энергии на основе спирального взрывомагнитного генератора со статором диаметром 200 мм (ВМГ-200) [3], формирующий в нагрузке 50 нГн импульс тока 9 МА с характерным временем нарастания (в «е» раз на конечной стадии работы) 13 мкс.

Результаты расчетов

Узел ускорения пластин в разрабатываемом устройстве представляет собой две пластины заданной ширины и толщины, расположенные на некотором расстоянии друг от друга, по которым протекает ток в противоположных направлениях. В работе проводились расчеты распределения магнитного поля в этой системе в магнитоэстатической постановке.

Распределение магнитного поля H двух пластин толщиной δ и шириной b , расположенных па-

раллельно друг другу на расстоянии a (рис. 1), по которым протекает постоянный ток I в противоположных направлениях, можно найти, решив уравнение: $\text{rot}(\text{rot } A) = j$ для векторного потенциала A , где j – плотность тока, $H = \text{rot } A$. Если пластины бесконечно длинные, то плотность тока и векторный потенциал имеют только одну компоненту, а напряженность магнитного поля – две. Уравнение для векторного потенциала сводится к уравнению Пуассона: $\Delta A_z = j_z$.

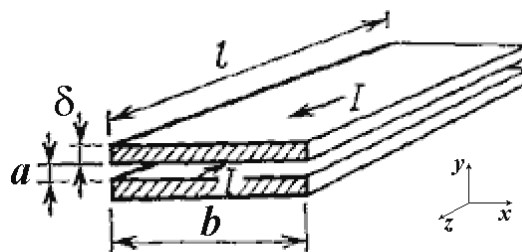


Рис. 1. Схема для расчета поля двух пластин толщиной δ

Если ток равномерно распределен по толщине пластин, то $j_z = I/(b\delta)$. Граничное условие – векторный потенциал равен нулю на бесконечности.

Результат решения задачи распределения векторного потенциала $A(x, y)$ и модуля вектора напряженности магнитного поля $H(x, y)$ для пластин шириной 5 см, толщиной 1 см, расположенных на расстоянии $a = 0,3$ см, друг от друга представлен на рис. 2. Ток через пластины $I = 5$ МА.

Глубина проникновения магнитного поля в пластины и распределение удельной внутренней энергии по их толщине определялись путем решения одномерной задачи диффузии поля с учетом изменения удельного сопротивления при джоулевом нагреве проводника. Импульс тока (рис. 3а), а значит, и магнитное поле на одной из границ считалось заданным. На противоположной границе поле полагалось равным нулю. Формулировка задачи следует из уравнений Максвелла в квазистационарном при-

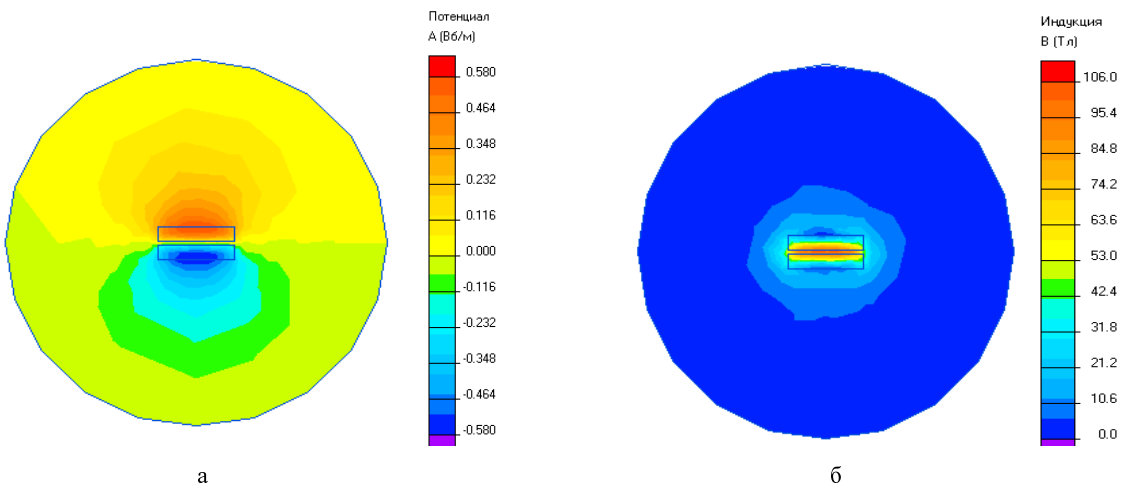


Рис. 2. Результаты расчета по программе Elcut Student [4]: а – векторный потенциал, б – магнитная индукция

ближении и уравнения для возрастания тепловой энергии в проводнике с током при его джоулевым нагреве:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) = \mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\rho(e)}{\gamma} \left(\frac{\partial H_x}{\partial y} \right)^2. \quad (2)$$

где $\mathbf{H} = (H_x, 0, 0)$ – вектор напряженности магнитного поля в системе координат, e – массовая плотность энергии, γ – плотность материала проводника, $\rho = \rho_0(1 + ke)$ – удельное сопротивление.

Зависимость удельного сопротивления от удельной внутренней энергии считалась линейной, что справедливо, по крайней мере, до начала испарения проводника. Эти уравнения решаются при граничных условиях $H_x(a/2, t) = I(t)/b$, $H_x(a/2+\delta, t) = 0$ (δ – толщина пластины, $I(t)$ – заданный импульс тока) и нулевых начальных условиях: $H_x(y, 0) = 0$, $e(y, 0) = 0$.

Результаты расчета диффузии магнитного поля тока ВМГ-200 к моменту окончания его работы для случая, когда удельное сопротивление материала проводника зависит от удельной внутренней энергии,

не противоречат [5] и представлены на рис. 3б.

Для расчета профиля тонкой пластины перед ее ударом по мишени рассмотрим движение участка пластины, расположенного на расстоянии x от ее середины. При заданном импульсе тока $I(t)$ скорость v и координата y этого участка пластины будут равны:

$$\dot{y} = v, \quad y(0) = a_0/2, \quad (3)$$

$$\dot{v} = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{k^2 I^2(t)}{b^2 \gamma \delta}, \quad v(0) = 0. \quad (4)$$

где γ , δ – плотность пластины и ее толщина, соответственно, b – ширина пластины, $a = 2y$ – расстояние между ними, a_0 – начальное расстояние между пластинами, $k = k(x, a) = -$ коэффициент, характеризующий воздействие сил магнитного давления на участок пластины, расположенный на расстоянии x от ее середины. Используя формулы из [5] для расчета магнитного поля в приближении тонких пластин, можно показать, что:

$$k(x, a) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\arctg \left(\frac{b/2+x}{a} \right) + \arctg \left(\frac{b/2-x}{a} \right) \right)}. \quad (5)$$

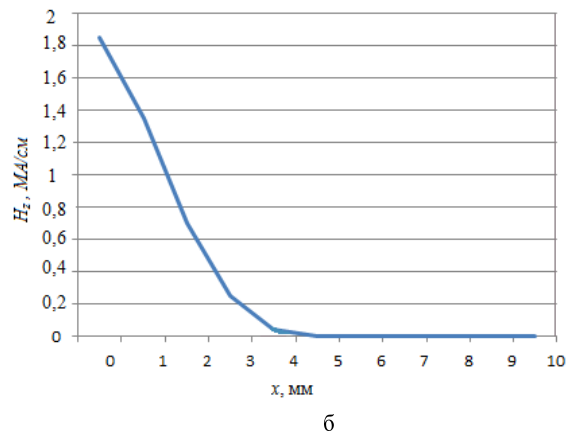
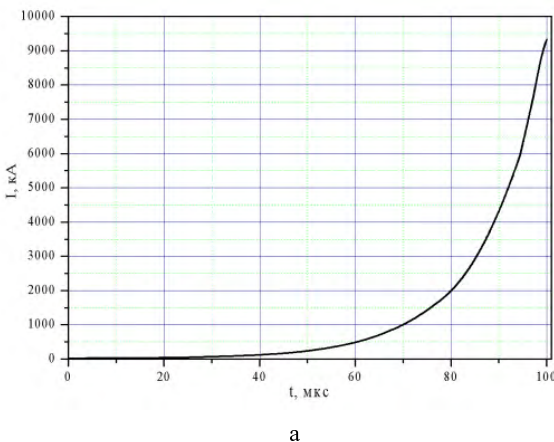


Рис. 3. Распределения напряженности магнитного поля при нелинейной диффузии магнитного поля: а – тока ВМГ-200, б – в алюминиевый проводник толщиной 1 см

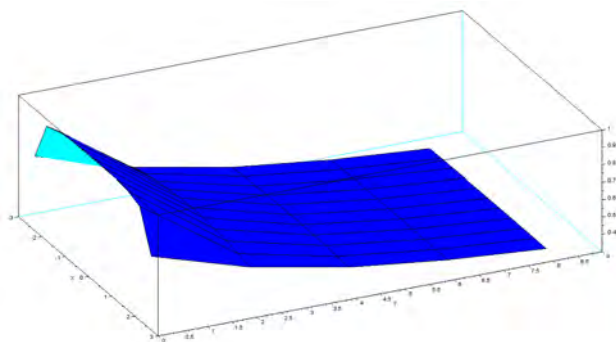


Рис. 4 Зависимость $k(x, a)$

Оценить форму профиля тонкой пластины перед ее ударом по мишени можно, решив систему уравнений (3)-(4) для нескольких значений x ($-b/2 \leq x \leq b/2$). Расчеты показывают (рис. 4), что края пластины к моменту окончания работы ВМГ отстают от центральных участков. Можно подобрать распределение толщины пластины по ее ширине так, чтобы скомпенсировать это отставание.

Конструкция устройства

В качестве аналога взрывомагнитного устройства для ускорения проводников площадью $5 \times 5 \text{ см}^2$ магнитным давлением до скорости 3–5 км/с можно взять устройство [2] для запитки одновиткового соленоида от ВМГ, заменив в нем одновитковый соленоид узлом ускорения плоских ударников, состоящим из двух параллельных пластин. Устройство (рис. 5а) состоит из спирального взрывомагнитного генератора ВМГ-200 и нагрузки, включающей в себя узел ускорения пластин и подводящую линию от ВМГ к нему. Подводящая линия содержит коаксиальный и шинный участки.

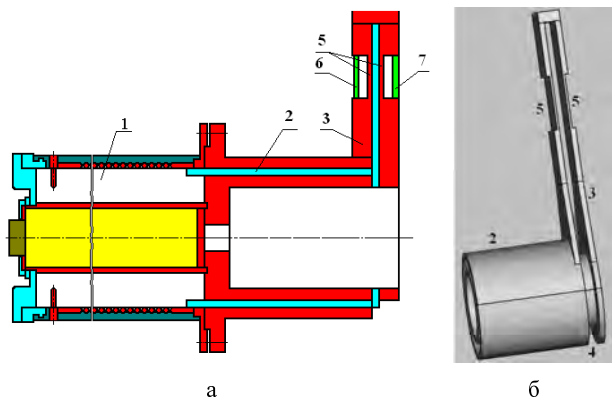


Рис. 5. Конструкция устройства: а – взрывомагнитного устройства для исследования свойств материалов, б – передающих линий и узла ускорения: 1 – ВМГ; 2 – коаксиальная передающая линия, 3 – шинная передающая линия, 4 – переход от коаксиальной к шинной линии, 5 – ускоряемые пластины, 6, 7 – исследуемые образцы разной толщины

Узел ускорения состоит из двух пластин с током, протекающим в противоположных направлениях. Чтобы магнитное поле вдоль ускоряемых участков было однородным, длина пластин примерно в 3 раза больше длины ускоряемых участков. Ускоряемые участки из алюминия имеют толщину $\sim 1 \text{ см}$, ширину и длину по 5 см. Толщина неускоряемых участков не меньше расстояния, на которое смещаются пластины к моменту окончания работы ВМГ.

Для расчета работы взрывомагнитных устройств необходимо знать индуктивность нагрузки, на которую работает генератор. Индуктивность передающей линии вычислялись по формулам из [5, 6] и составила $\sim 12 \text{ нГн}$, а индуктивность узла ускорения, согласно формулам из [5] $\sim 12 \text{ нГн}$. Таким образом, начальная индуктивность нагрузки ВМГ равна 24 нГн. Сопротивление контура нагрузки на основе оценок, сделанных по результатам расчета диффузии магнитного поля, составляет $\sim 1 \text{ мОм}$.

Заключение

Найдено распределение магнитного поля внутри пластин и в пространстве между ними. Определена глубина проникновения поля в пластины и форма их профиля к моменту окончания работы ВМГ. Приведены результаты расчётов индуктивности нагрузки ВМГ, состоящей из узла ускорения пластин и подводящих линий от ВМГ к нему.

Результаты проведенных расчетов будут использоваться при разработке взрывомагнитного устройства для исследования свойств материалов.

Литература

1. Трунин. Р. Ф. Сжимаемость металлов при высоких давлениях ударных волн // Высокие плотности энергии: Сборник научных трудов. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 1997.
2. Boriskin A. S., Brodsky A.Ya., Vlasov Yu.V., Golosov S. N., Demidov V. A., Dimant Ye. M., Kazakov S. A., Markevtsev I. M., Moiseenko A. N., Romanov A.P., Selimir V. D., Tatsenko O. M., Filippov A. V., Shapovalov Ye. V. Experimental results on single-turn solenoid powering from helical MCG with current opening switch // In: Megagauss X / Ed. M. von Ortenberg. Berlin: Humboldt University at Berlin. 2005. С. 49–53.
3. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах. Том 1 / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011.
4. <http://www.elcut.org>.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Пер. с англ. М.: Мир. 1972.
6. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга.-3-е издание, перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат Ленингр. 1986.