

- [7] Окунев В.Д., Пафомов Н.Н., Самойленко З.А. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 5. С. 1344-1352.
- [8] Лимперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М., 1973. 416 с.

Донецкий
физико-технический
институт АН УССР

Поступило в Редакцию
25 февраля 1991 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 9

12 мая 1991 г.

01

© 1991

О ЭЛЕКТРОННО-ИНЕРЦИОННОМ ЭФФЕКТЕ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПРОВОДНИКОВ

Е.А. Девяткин

В работе [1] описана новая постановка электронно-инерционных опытов (ЭИО) с соударяющимся дюралюминиевым стержнем, в которых в момент удара стержня о неподвижную преграду цепь замыкается и измеряется протекающий в ней переменный ток. Этот инерционный ток возникает в результате движения с большим ускорением частиц проводника в области фронта упругой волны сжатия, распространяющейся в стержне от места соударения. Проведенная численная оценка дала совпадение результатов по порядку величины.

В предлагаемой работе описана постановка ЭИО с дюралюминиевыми и медными стержнями и проведен статистический анализ их результатов.

Известны работы, в которых упругая волна возбуждается не за счет соударения движущегося стержня с преградой, а в результате нанесения продольного удара по неподвижному стержню [2] или при взрыве небольшого количества взрывчатого вещества [3-5]. В [2-5] никак не отмечается следующее обязательное для проведения подобных опытов условие - замкнутость электрической цепи. Действительно, возможны следующие постановки ЭИО [6]. Первая - цепь замкнута, ускоренное движение проводника, являющегося частью этой цепи, приводит к протеканию в ней тока. Вторая - цепь разомкнута, тогда сила инерции - та, действующая на электроны проводимости, компенсируется электрическим полем $E_i = \frac{m}{e} \alpha$ ($-e$, m - заряд и масса электрона, α - ускорение); ток в цепи

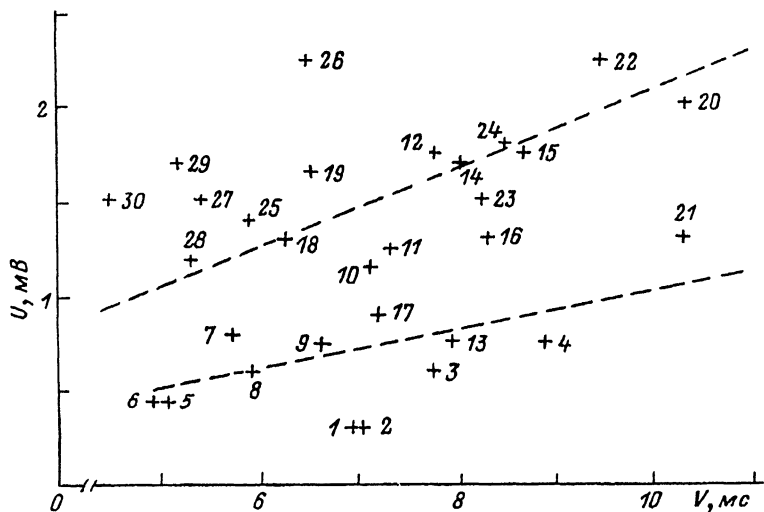


Рис. 1.

мал и возможно измерение, возникающей разности потенциалов и (или) напряженности электрического поля. Естественно, реализуется и промежуточный случай, когда сопротивление „внешней“, по отношению к „источнику тока“, замкнутой цепи соизмеримо с его „внутренним“ сопротивлением (сопротивлением ускоряемой области). Таким образом, в двух приведенных крайних случаях, при распространении упругой продольной волны в стержне, в принципе возможна регистрация как токов смещения и проводимости в замкнутой цепи, так и электрического поля вблизи стержня при разомкнутой геометрии образца. Однако последнее крайне затруднено из-за возникающего при деформировании металлов электрического поля E_d на 4-5 порядков превышающего E_i . Действительно, при продольной деформации стержня u_{zz} для продольных компонент полей из соотношений $E_i = \frac{m}{e} \frac{dV}{dt}$ и $E_d = \frac{1}{e} \bar{\lambda}_{zz} \frac{\partial u_{zz}}{\partial z}$ [7] ($\bar{\lambda}_{zz}$ - компонента тензора деформационного потенциала,¹ c - скорость продольной упругой волны, t - время) получаем $\left| \frac{E_d}{E_i} \right| \sim \frac{\bar{\lambda}_{zz}}{mc^2}$. Величина $\bar{\lambda}_{zz}$ порядка энергии Ферми 1-10 эВ. Анализ различных физических механизмов, приводящих к возникновению электромагнитных полей и токов при динамическом деформировании проводников, содержится в работах [8-13] (см. также цитированную в них литературу).

¹Строго говоря, распространение плоской продольной волны в стержне со свободной боковой поверхностью невозможно, однако ниже для оценок используется эта простейшая модель.

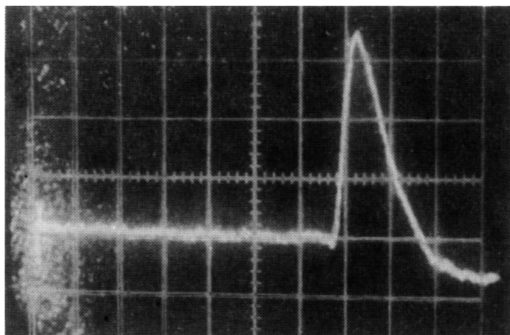


Рис. 2. Оциллограмма импульса при соударении дюралюминиевого стержня ($V = 4.18$ м/с; масштабы: по вертикали 0.5 мВ/дел, по горизонтали 5 мкс/дел).

Методика предлагаемых опытов описана в [1]. Изучение зависимости величины регистрируемого сигнала от скорости стержня могло бы служить дополнительным подтверждением проявления электронно-инерционного эффекта в этих опытах. Однако установление такой зависимости затруднительно из-за значительного разброса экспериментальных данных (см. рис. 1). Числа у экспериментальных точек на рис. 1 обозначают порядковый номер соударения одного и того же конца стержня. Максимальный инерционный ток I_0 , возникающий в замкнутой цепи сопротивлением R при продольном упругом соударении стержня, движущегося со скоростью V , и $R \gg R_i$ определяется соотношением $I_0 \approx \frac{m}{e} \frac{Vc}{\sqrt{RR_i}}$ [1], где $R_i = \frac{l}{\sigma S}$ - сопротивление области фронта волны размером l („внутреннее“ сопротивление), σ - электропроводность, S - площадь поперечного сечения стержня. Предполагалось, что упругие деформации порядка максимально возможных - $\frac{V}{c}$, возникающих при соударении стержня с абсолютно жестким препятствием. При продольном упругом соударении с таким же стержнем максимальные деформации, а, следовательно, и ток, имеют вдвое меньшие значения. Соответствующие этим случаям прямые, представленные на рис. 1 пунктиром, рассчитаны по известной переходной характеристике в предположении линейного возрастания тока в течение времени $\tau \approx 2$ мкс ($l \sim c\tau$) от нуля до своего максимального значения I_0 при формировании фронта волны. Прямая, соответствующая соударению стержня с полупространством из того же самого материала, что и стержень, должна проходить между этими двумя прямыми. При таком разбросе экспериментальных данных все же заметна тенденция к возрастанию величины сигнала с увеличением скорости стержня. Возрастание величины \mathcal{U} с увеличением номера соударения первые точки на рис. 1 лежат

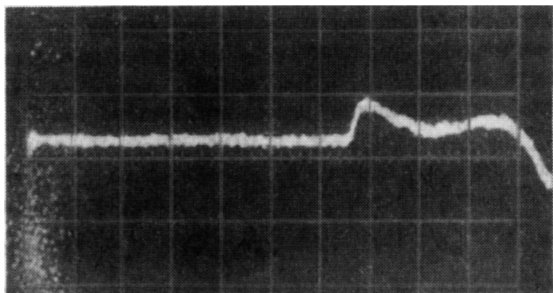


Рис. 3. Осциллограмма импульса при соударении медного стержня ($V = 6.09$ м/с; масштабы: по вертикали 0.5 мВ/дел, по горизонтали 20 мкс/дел).

ниже последних, что вероятно, главным образом связано с постепенным уменьшением в результате пластической деформации первоначальной, всегда неизбежной в таких опытах непараллельности поверхностей торца и пластины.² На рис. 1 представлена одна из серии опытов, имеющая максимальные величины амплитуды регистрируемых импульсов и разброса экспериментальных данных, т.к. предполагается, что максимальный сигнал возникает при возбуждении главным образом продольной волны, когда непараллельность поверхностей торца стержня и пластины мала. В большинстве других серий опытов наблюдался меньший разброс экспериментальных точек, расположенных в области нижней пунктирной прямой. На рис. 2 видна часть импульса отрицательной полярности, расположение которого соответствует времени прохождения волной расстояния l_1 от конца стержня до хомутика ($\tau_1 = \frac{l_1}{c} \approx 16$ мкс), а его растянутость и малая амплитуда, вероятно, объясняются соизмеримостью размеров последнего и фронта волны. В опытах с медными стержнями того же диаметра (9.8 мм) также наблюдался значительный разброс; диапазон изменения величины сигнала составлял $U = 0.1 - 0.35$ мВ при следующих изменениях скорости стержня $V = 6.2 - 6.9$ м/с. Регистрируемые импульсы имели меньшую амплитуду, чем в опытах с дюралюминиевыми стержнями (при той же полярности) и большую длительность переднего фронта ($\tau \approx 6$ мкс, см. рис. 3). Диапазон расчетных значений амплитуд импульсов $U \approx 0.32 - 0.64$ мВ при $V = 6.5$ м/с, $c = 3.8 \cdot 10^3$ м/с, $R = 0.223$ Ом, $\tau = 6$ мкс, $S = 75.4 \cdot 10^{-6}$ м² по порядку вели-

² При распространении по неоднородному стержню упругой волны возможно появление значительной деформационной эдс [8]. В работе не учитывалась, вероятно, единственная неоднородность, которая может возникнуть на конце стержня вследствие наклепа.

чины совпадает с наблюдаемым в эксперименте. Уменьшение амплитуды импульсов в опытах с медными стержнями объясняется меньшими значениями величины c и большим временем формирования фронта волны τ .

При малом сопротивлении „внешней“ цепи ($R \ll R_i$) инерционный ток $I_0 \sim \frac{m}{e} \frac{Vc}{R_i}$ и соответствующая ему плотность тока $j \sim \sigma \frac{m}{e} \frac{Vc}{\tau} \sim \sigma \frac{m}{e} \frac{c^2 \epsilon_{zz}}{\tau} \sim \sigma \frac{m}{e} \frac{\sigma_{zz}}{\rho \tau}$, где упругие напряжения $\sigma_{zz} \approx \gamma \epsilon_{zz}$ и $c^2 \sim \frac{\gamma}{\rho}$ (γ - модуль Юнга, ρ - плотность). В

приведенных оценках предполагалось постоянство ускорения частиц проводника на фронте волны. В общем случае произвольной волновой зависимости, когда известная функция $\epsilon_{zz} = \epsilon_{zz}(z - ct)$ при

$R \gg R_i$ для тока в цепи получаем выражение $I(t) = \frac{m}{e} c^2 \sqrt{\frac{\sigma}{R} \int \left(\frac{\partial \epsilon_{zz}}{\partial z} \right)^2 dz}$

Интегрирование производится по отрезку, содержащему упругий импульс.

Распространение в массивном проводнике фронта волны размером $l \sim 1$ см при $\epsilon_{zz} \sim 10^{-3}$ вызывает в нем появление токов плотностью $j \approx 600$ А/м² ($b \approx 3.6 \cdot 10^7$ Ом⁻¹ м⁻¹, $c \approx 5.4 \times 10^3$ м/с). Оценка показывает, что порождаемое этими токами магнитное поле вблизи фронта волны может быть обнаружено, например, индукционным датчиком, размерами меньшими l , при длительности процесса $\tau \sim \frac{l}{c} \sim 10^{-6}$ с. Это позволяет надеяться на развитие новых бесконтактных методов изучения волновых процессов в проводниках даже в тех случаях, когда деформированы лишь внутренние области тела и другие известные методы измерения деформаций или перемещений его свободной поверхности (например, при помощи пьезо-, тензо- и емкостных датчиков) не применимы.

Таким образом, проведенные опыты с дюралюминиевыми и медными стержнями допускают интерпретацию в рамках электронно-инерционного эффекта и доказывают принципиальную возможность их осуществления без магнитной экранировки в магнитном поле Земли.

Автор благодарит Г.Н. Чернышова за полезные обсуждения в ходе выполнения работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Девяткин Е.А. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 3. С. 51-55.
- [2] Стихановский Б.Н. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1973. № 8. В. 2. С. 60-65.

- [3] К а ш а е в Ю.Г., Н о в и к о в С.А., С и н и ц ы н В.А.//
ПМТФ. 1977. № 2. С. 139-143.
- [4] К а ш а е в Ю.Г., Н о в и к о в С.А., С и н и ц ы н В.А.//
Проблемы прочности. 1980. № 1. С. 75-77.
- [5] З л о б и н А.М., К а ш а е в Ю.Г., Н о в и к о в С.А.//
ПМТФ. 1981. № 2. С. 108-112.
- [6] Г и н з б у р г В.Л. В сб.:Памяти А.А. Андропова. М.:
Изд. АН СССР. 1955. С. 622-628.
- [7] К о г а н Ш.М. // УФН. 1971. Т. 105. В. 1. С. 157-
161.
- [8] Г и н з б у р г В.Л., К о г а н Ш.М. // ЖЭТФ. 1971.
Т. 61. В. 3. С. 1177-1180.
- [9] А л е к с е е в О.Г., Л а з а р е в С.Г., П р и е м -
с к и й Д.Г. // ПМТФ. 1984. № 4. С. 145-147.
- [10] З л о б и н А.М. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.:
теор. и прикл. физика. 1986. № 3. С. 3-7.
- [11] Ж у р а в л е в В.Ф. // МТТ. 1985. № 6. С. 101-
103.
- [12] Л а н г И.Г., П а в л о в С.Т. // ФТТ. 1970. Т. 12.
В. 8. С. 2412-2120.
- [13] Л е о н т о в и ч М., Х а и т В. // Письма в ЖЭТФ.
1971. Т. 13. В. 10. С. 579-580.

Поступило в Редакцию
10 августа 1990 г.
В окончательной редакции
26 марта 1991 г.