

С. И. Коршаковский, М. А. Красенков

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОПЫТЫ
С НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМИ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМИ ТЕЛАМИ**

Показано, что при воздействии на электропроводное твердое тело внешней силы, например при ударе, в нем происходит разделение электрических зарядов в направлении деформации и протекает электрический ток. Эффект усиливается при воздействии на тело внешнего постоянного магнитного поля. Обсуждаются механизмы этих явлений и прикладное использование результатов исследований.

E-mail: seekmyseen@gmail.com

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, электропроводные тела.

Механические явления, сопровождающие деформацию твердых тел при действии на них внешней силы, в том числе при ударе, достаточно полно описаны в работах [1–3]. Изучение этих явлений — актуальная задача для ряда технологических процессов, например: изготовление изделий с помощью штамповки, забивание свай при строительстве жилых и промышленных объектов в зоне вечной мерзлоты. Эти явления сопровождаются появлением механических напряжений в объеме деформированных тел, упругих волн при ударных нагрузках [2], микро- и макродефектов, деградацией внутренней структуры материала и, наконец, его разрушением [3]. В то же время эти явления, в свою очередь, сопровождаются сложными электрофизическими процессами в объеме напряженно-деформированного тела. Для выяснения этих закономерностей проведены экспериментальные исследования по измерению электрического заряда, протекающего в электропроводном теле при контактной деформации: при упругом ударе и при статической нагрузке. В качестве испытуемых образцов использовались объемные тела в форме параллелепипеда, цилиндра и стержня (латунь, алюминий, сталь), а также стальная проволока. Индуцированный на деформируемых образцах электрический заряд измерялся с помощью баллистического гальванометра (рис. 1).

Деформация сжатия образца, установленного на массивной диэлектрической плите, осуществлялась за счет удара медного цилиндра массой $m = 0,6$ кг, подвешенного на высоте $h = 1$ м над его верхней поверхностью (рис. 1, а). Деформация растяжения проволоки достигалась путем подвешивания к нижнему ее концу груза массой $m = 15$ кг, устанавливаемого на горизонтальной диэлектрической платформе, при снятии опор, на которых устанавливалась платформа (рис. 1, б). Таким

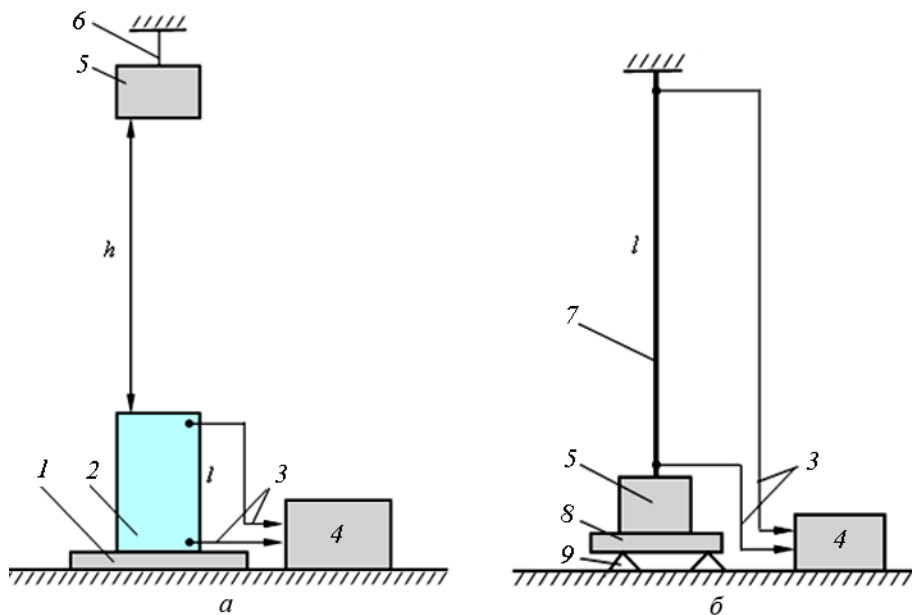


Рис. 1. Схема проведения опыта с деформированными телами:

a – деформация сжатия при ударе; *б* – деформация растяжения при статической нагрузке; 1 – диэлектрическая плита; 2 – испытуемый образец (параллелепипед); 3 – токоподвод к гальванометру; 4 – баллистический гальванометр; 5 – груз; 6 – нить подвеса; 7 – испытуемый образец (проволока); 8 – диэлектрическая платформа; 9 – опоры

же образом производился удар, но с последующей постоянной нагрузкой на образец. Соответственно, деформация сжатия имела место при снятии нагрузки.

Во всех наблюдаемых опытах при ударной нагрузке медный цилиндр отскакивал от образца, что позволило при интерпретации результатов с некоторым приближением считать удар упругим. Во всех случаях фиксировался прошедший через гальванометр заряд $\sim (0,7 \dots 1) \cdot 10^{-6}$ Кл. К сожалению, этот результат не позволяет с приемлемой точностью определить силу электрического тока, протекающего через образец, поскольку неизвестна продолжительность этого процесса τ . Вычисления, проведенные с использованием закона сохранения энергии $mgh = k(\Delta l)^2/2$, где k – коэффициент жесткости образца, Δl – величина деформации, и закона Гука $\sigma = \Re \varepsilon$ ($\sigma = F/S$ – нормальное напряжение, F – продольная сила, S – площадь поперечного сечения образца, \Re – модуль Юнга, $\varepsilon = \Delta l/l$ – относительное удлинение), позволили оценить величину деформации

$$\Delta l = \sqrt{2w/\Re} l. \quad (1)$$

Здесь w – объемная плотность механической энергии в образце при ударе ($w = W/V$, $W = mgh$). При этом $k = \Re S/l$. Записывая далее

закон изменения импульса $\bar{F}\tau = \Delta(mv)$, где \bar{F} — средняя сила удара, v — скорость груза перед ударом ($v = \sqrt{2gh}$), и используя линейное приближение для \bar{F} , можно оценить продолжительность процесса:

$$\tau_1 = 2\Delta l/v. \quad (2)$$

Так, для латунного образца получено $\Delta l \sim 9 \cdot 10^{-5}$ м и $\tau_1 \sim 4 \times 10^{-5}$ с. В этом случае в образце должен протекать электрический ток силой $\sim 20 \cdot 10^{-3}$ А. Это достаточно большой ток, и его силу можно подтвердить измерением создаваемого им магнитного поля. Однако внесение магнитной компоненты в технологию эксперимента с включением баллистического гальванометра сопряжено с определенными трудностями и приводит к достаточно большому разбросу в определении магнитной индукции ($10^{-4} \dots 10^{-2}$ Тл), что связано с несовершенством методики определения этого поля.

Продолжительность процесса τ можно оценить, используя более прагматичный подход. Как известно, удар сопровождается распространением в среде упругих, в общем случае продольных и поперечных волн [1, 2]. При $l \geq L$, где L — характерный поперечный размер образца (стержень, проволока), скорость распространения этих волн может быть определена как $c = \sqrt{\mathfrak{R}/\rho}$ (ρ — плотность). Используя далее элементарные уравнения кинематики и динамики в линейном приближении относительно силы удара, получаем

$$\tau_2 = 2l/c. \quad (3)$$

Таким образом, характерное время τ определяется длиной прямой и обратной волн, деленной на скорость распространения волны. В табл. 1 приведены результаты оценки τ , выполненные для гипотетических образцов из различных материалов ($l = 125 \times 10^{-3}$ м, $S = 225 \cdot 10^{-6}$ м²), и для сравнения — значения периода колебаний образцов $T = 2\pi\sqrt{\rho Sl/k}$, причем $\tau_1 < T/2 < \tau_2$.

Таблица 1

Сравнительные оценки характерного времени τ , полученные различными методами

Материал образца	$c \cdot 10^{-3}$, м/с	$k \cdot 10^{-8}$, Н/м	$\Delta l \cdot 10^{-3}$, м	$\tau_1 \cdot 10^{-5}$, с	$\tau_2 \cdot 10^{-5}$, с	$T \cdot 10^{-5}$, с
Сталь	5,06	3,60	183	4,94	8,2	15,6
Алюминий	5,03	2,41	315	4,97	14,2	11,0
Латунь	3,30	3,35	268	7,75	12,1	16,8
Титан	5,16	4,32	236	4,84	10,6	10,8
Бронза	3,61	4,14	241	6,90	10,8	15,4
Свинец	1,23	0,612	626	20,3	28,2	42,2

Оценку величины τ в опытах с проволокой можно получить, используя аналогичные приемы. Так, при использовании концепции ударных волн эта величина также определится выражением (3). Проведенные оценки для стальной проволоки диаметром, например, $0,5 \cdot 10^{-3}$ м дают $\tau \approx 0,4 \cdot 10^{-3}$ с.

Следует отметить, что процессы протекания зарядов в проводниках при исключении любых видов электродвижущих сил (модель инерционности электронной и ионной компонент) изучались ранее. Так, в классическом эксперименте Стюарта и Толмена (1916) измерялся заряд при резкой остановке вращающейся электропроводной катушки. При линейной скорости витков ~ 300 м/с зарегистрирован заряд $\sim 10^{-9}$ Кл [4, 5]. Полученные результаты были использованы для определения удельного заряда электрона и хорошо согласуются с классической теорией электропроводности [6]. Нельзя не отметить также более поздние работы, связанные с развитием физических представлений о свойствах проводников при воздействии электромагнитных полей и имеющие прикладное значение [7–9].

Эффективность процесса разделения зарядов может быть увеличена за счет действия постоянного магнитного поля на деформируемый образец. Для изучения этого эффекта была проведена серия опытов с теми же деформированными проводниками при воздействии на них поперечного (по отношению к деформации) внешнего магнитного поля, создаваемого двумя постоянными стержневыми магнитами, установленными симметрично по обе стороны образца (рис. 2). Индукция магнитного поля в середине торцов магнитов составляла 0,115 Тл. При удалении источника поля от образца заряд уменьшается (рис. 3).

Изменение протекающего заряда при воздействии магнитного поля на образец связано, по-видимому, с коллективным движением электронов, что предполагает детальный анализ явлений с учетом свойств материала образца.

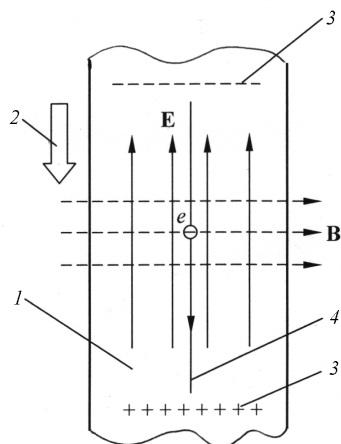


Рис. 2. Индуцированные электрические заряды в скрещенных электрическом и магнитном полях: 1 — электропроводное тело; 2 — направление деформации; 3 — индуцированные электрические заряды; 4 — “усредненная” траектория электрона при $B = 0$; E и B — напряженность электрического поля в проводнике и индукция внешнего магнитного поля

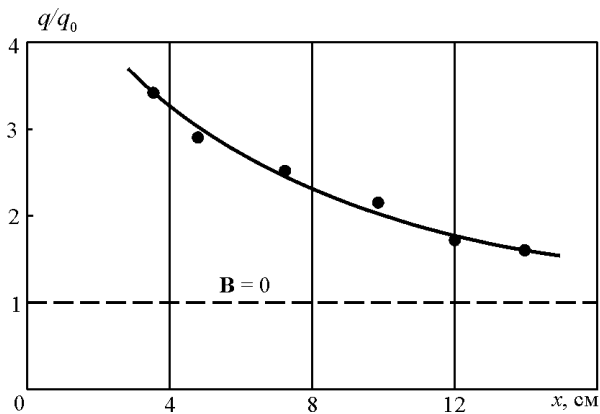


Рис. 3. Зависимость относительного заряда в образце от расстояния от источника поля

Точность измерений заряда в проведенных опытах составляла 3–10–15%. На значение заряда, вообще, может оказывать влияние естественный фон электромагнитных полей, в частности электрическое поле Земли. Проведенные оценки изменения заряда на образцах показали, что поправки за счет этого эффекта ничтожно малы ($\sim 10^{-12}$ Кл). Это подтвердили также контрольные опыты, проведенные при упругом ударе стального образца в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования деформированных образцов

Образец; деформация	Длина·10 ³ , м	Размеры поперечного сечения или диаметр, мм	$\tau_1 \cdot 10^6$, с	$\tau_2 \cdot 10^6$, с	Заряд·10 ⁶ , Кл	
					$B = 0$	$B \neq 0$
Стальной стержень; удар	125	15 × 15	4,9	8,2	0,94	3,21
Латунный параллелепипед; удар	80	30 × 40	4,4	4,2	0,92	1,21
Алюминиевый цилиндр; удар	50	20	1,8	7,6	0,85	1,41
Стальная проволока; растяжение	1,1	0,5	—	400	0,21	0,38
Стальная проволока; сжатие	1,1	0,5	—	400	0,17	0,30
Стальная проволока; растяжение	1,1	1,0	—	400	0,12	0,32

Некоторые результаты измерений электрического заряда в деформированных образцах приведены в табл. 2. Ожидаемая сила тока при ударе для стального образца составляет от 11 до 20 мА, при деформации растяжения проволоки диаметром 0,5 мм $\sim 0,5$ мА. При действии магнитного поля сила тока увеличивается в несколько раз. Проведенный анализ научных публикаций за последние десятилетия убедил авторов, в том, что подобные эксперименты с внешним магнитным полем не проводились.

Результаты проведенных исследований могут, в частности, уточнить представления о физике контактных явлений и различных видов деформации. Изучение физики электромагнитных явлений в деформируемых электропроводных телах позволит понять механизмы появления в них микро- и макродефектов и расширить знания о причинах механических разрушений в элементах энергоемких объектов техники, связанные прежде всего с обеспечением необходимого уровня безопасности объектов и сохранением экологии окружающей среды.

Выводы. 1. В напряженно-деформированных электропроводных телах изменение механического напряжения инициирует в направлении деформации разделение электрических зарядов в теле, что приводит к кратковременному протеканию электрического тока в нем.

2. Эффективность разделения зарядов увеличивается при воздействии на тело внешнего постоянного магнитного поля, имеющего, по крайней мере, поперечную составляющую по отношению к деформации. Индуцированный заряд зависит от характерного продольного размера тела и значения индукции поля и может увеличиться за счет этого эффекта в 1,6–8 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т р е б у ш к о О. И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Наука, 1984.
2. А л и м о в О. Д., М а н ж о с о в В. К., Е р е м а я н ц В. Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. – М.: Наука, 1989.
3. К о л е с н и к о в Ю. В., М о р о з о в Е. М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989.
4. А р к а д ь е в В. К. Электромагнитные процессы в металлах. – М.: Госэнергоиздат, 1949.
5. С у х о р у к о в В. В. Математическое моделирование электромагнитных полей в проводящих средах. – М.: Энергия, 1975.
6. Л о р е н ц Г. Л. Теория электронов. – ГТТИ, 1934.
7. К л и м о в К. М., Н о в и к о в И. И. Особенности пластической деформации металлов в электромагнитном поле // Докл. АН СССР. – 1980. – Т. 253, № 3. – С. 603–606.
8. Б а т а р о н о в И. Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. Физика. – 1999. – № 10.

Статья поступила в редакцию 15.04.2010

Станислав Иосифович Коршаковский родился в 1939 г. Канд. техн. наук, доцент Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета – МИРЭА). Автор более 150 научных работ, авторских свидетельств, изобретений и патентов в области неразрушающего контроля энергоемких объектов техники, электрореактивных двигателей космических летательных аппаратов.



S.I. Korshakovskii (b. 1939) – Ph. D. (Eng.), assoc professor of the Moscow State Institute for Radio-Engineering, Electronics and Automatics (technical university – MIREA). Author of more than 150 publications, author’s certificates, inventions and patents in the field of non-destructive inspection of energy-consuming technical objects, electric-jet engines of spacecrafts.

Михаил Александрович Красненков родился в 1942 г. Д-р техн. наук, профессор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета – МИРЭА). Автор более 120 научных работ, авторских свидетельств, изобретений и патентов в области неразрушающего контроля и физики плазмы.



M.A. Krasnenkov (b. 1942) – D. Sc. (Eng.), professor of the Moscow State Institute for Radio-Engineering, Electronics and Automatics (technical university – MIREA). Author of more than 120 publications, author’s certificates, inventions and patents in the field of non-destructive inspection and plasma physics.