

муна и однозначную зависимость  $K$  от  $h_i$  в исследованной области их изменения.

Наблюдавшийся в процессе оптимизации правильный характер траекторий спуска позволяет судить об отсутствии оврагов и особенностей на гиперповерхности (2.3) (по крайней мере, для рассматриваемых начальных условий). Поэтому при небольшом числе слоев в прокладке изложенный подход может быть доведен до упрощенного расчета путем применения в оптимизирующем автомате быстрых и менее трудоемких поисковых методов, использующих гладкость критерия.

Автор выражает благодарность Г. А. Аржанникову, составившему программу оптимизируемого объекта, за помощь в работе.

Поступила 13 III 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ададунов Г. А. О развитии методов динамического воздействия на вещество.— В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., изд. ВНИИФТРИ АН СССР, 1976.
2. Альтшулер Л. В., Дынин Е. А., Свишинский В. А. Гидродинамические методы низкотемпературного сжатия твердого водорода.— Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 17, вып. 1.
3. Огарков В. А., Пурьгин И. П., Самылов С. В. Простая модель слоеных систем для получения больших скоростей тел.— В сб.: Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черногоровка, 1978.
4. Kaliski S. Rendering the explosion compression isentropic by a «soft» layer effect.— J. Techn. Phys., 1976, vol. 17, N 3.
5. Рождественский Б. Л., Яценко И. П. Системы квазилинейных уравнений. М., 1968.
6. Высокоскоростные ударные явления. М., Мир, 1973.
7. Рихтмайер Р. Д. Разностные методы решения краевых задач. М., ИЛ, 1961.
8. Жданов В. А., Жуков А. В. Термодинамически полные уравнения состояния металлов (твердая фаза).— ПМТФ, 1978, № 5.
9. Щеголев Е. А. Уравнения изотерм твердого тела.— В кн.: Материалы IV научной конференции по математике и механике. Ч. II. Томск, изд. ТГУ, 1974.
10. Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. М., Химия, 1975.
11. Рузинов Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов. М. Химия, 1972.

УДК 537.1 : 546.3 : 531.66

### О ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В УПРУГИХ ВОЛНАХ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ

А. М. Злобин, Ю. Г. Кашаев, С. А. Новиков

(Москва)

Исследование ЭДС, возникающей при ударном нагружении твердых тел, как показали уже полученные экспериментальные результаты [1, 2], позволяет изучить широкий круг тонких динамических эффектов: увлечение носителей тока поляризованными фононами, диффузии носителей тока с фронта ударной волны (ФУВ), электронно-инерционный эффект, ударную поляризацию материала за ФУВ и т. д. С другой стороны, измерение электрических сигналов при ударном нагружении твердых тел открывает новые возможности при исследовании ударных взаимодействий и динамических физико-механических свойств материалов [3, 4].

Одним из возможных механизмов генерации ЭДС при ударном нагружении металлов является электронно-инерционный эффект, аналогичный эффекту Толмена—Стюарта [5]. Он заключается в том, что в области ФУВ кристаллическая решетка испытывает как сжатие, так и ускорение, приводящее вследствие инерции носителей тока к возникновению стороннего электрического поля. Послед-

нее создает электрический ток  $i(t)$ , определяемый величиной ускорения  $w(i(t) \sim w(t))$ . Непосредственное измерение электрического тока и деформации как функции времени показало [3], что в исследованных металлах при ударном нагружении в области упругих деформаций пропорциональность тока и ускорения выполняется с хорошей точностью.

В данной работе приведены результаты исследования генерации электрических сигналов при ударном сжатии и растяжении образцов из титана Ti и стали в области упругих деформаций. Одновременное измерение тензора деформаций  $\epsilon_{zz}$  (ось  $z$  ортогональна ФУВ) и электрического тока  $i(t)$  позволило определить отношение  $m/e$  ( $m, e$  — масса и заряд носителей тока соответственно), а измерение токов  $i(t)$  на динамометрических участках образца дает возможность получить значение модуля упругости  $E$  и предела текучести материала  $\sigma_{0,2}$ .

Как показали результаты экспериментов, количество электричества, прошедшее по цепи, определяется величиной деформации и эффективной массой носителей тока  $m^*$ :

$$(1) \quad \frac{1}{\sigma_* S c} \int_0^t i(t') dt' = \frac{m^*}{(-e)} \epsilon_{zz}(t),$$

где  $\sigma_*$  — проводимость образца;  $S$  — поперечное сечение;  $c$  — стержневая скорость звука. Из (1) следует, что стороннее электрическое поле  $E_{ст}$ , возникающее при ударном нагружении, зависит от эффективной массы носителей тока:

$$E_{ст}(t) = (S\sigma)^{-1} i(t) = \frac{m^*}{(-e)} \frac{du_z}{dt}$$

( $u_z$  — массовая скорость за ФУВ).

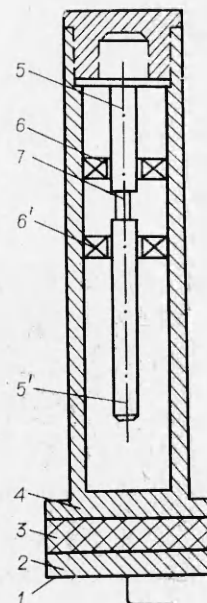
Нетривиальность этого вывода состоит в том, что в классической постановке электронно-инерционных опытов стороннее поле  $E_{ст}$  определяется массой свободного электрона  $m_0$ :  $E_{ст} = (m_0/e)w$  [5]. Значения эффективной массы носителей тока  $m^*$  и модуля упругости  $E$ , найденные в экспериментах с ударным сжатием и растяжением, находятся в хорошем согласии с известными результатами [6, 7].

В трех сериях опытов были выбраны образцы в виде цилиндрических стержней диаметром 13,8 мм из титана ( $\alpha$ -фаза), сталей 30ХГСА и Х18Н10Т. Установка и методика измерения деформации и тока в стержне приведены в [3].

Для определения отношения  $m^*/m_0$  измерение деформации и тока в стержне проводили одновременно. Деформацию измеряли тензодатчиками сопротивления типа 2ФКПД-5 — 100.

В качестве индуктивного датчика использовали трансформатор тока в виде ферритового кольца марки 300НМ с намотанными на него витками медного провода. Последние экранировали алюминиевой фольгой от влияния внешних электромагнитных помех. Между стержнем и датчиком устанавливали зазор приблизительно в два миллиметра.

В четвертой серии опытов для исследований были выбраны образцы из высокопрочного титана марки ВТ-14. Волну сжатия в волноводе 4 создавали с помощью слоя взрывчатого вещества ВВ 1 (фиг. 1), стального ударника 2, пенопластового демпфера 3. Деформацию рабочей части образца 7 при растяжении измеряли трансформаторами тока 6—6', которые устанавли-



Ф и г. 1

лпвали на динамометрических участках 5—5'. Сердечники датчиков выполняли из пермаллоевых лент марки 79НМ толщиной приблизительно 50 мкм и витков медного провода диаметром 0,35 мм. Количество витков составляло 100. Нагрузочное сопротивление трансформаторов 240 Ом. Для защиты от помех последние также экранировались алюминиевой фольгой. Сигналы с датчиков без усиления поступали на входы регистраторов типа С1-18, которые запускали от импульса подрыва детонатора через линию задержки. Выражения для деформации рабочей части образца  $\varepsilon$  и напряжения  $\sigma$  имеют вид

$$\varepsilon = \frac{1}{L} \int_0^{\tau} (v_1 - v_2) dt, \quad v_{1,2} = \frac{k_{1,2} e E}{\sigma m^* S c} \int_0^{\tau} i_{1,2}(t) dt,$$

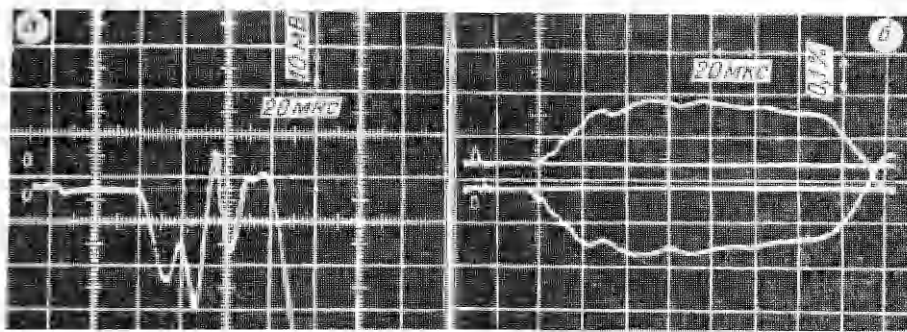
$$\sigma = \frac{k_2 e E}{\sigma m^* S c} \int_0^{\tau} i_2(t) dt, \quad i_{1,2} = \frac{U_{1,2} k_{1,2}}{2\sqrt{2} R_{H1,2}},$$

где  $i_{1,2}$  — ток в цепи соответственно первого и второго датчиков;  $v_{1,2}$  — скорости переходных сечений образца;  $U_{1,2}$  — напряжения на входе регистраторов;  $k_{1,2}$ ,  $R_{H1,2}$  — калибровочные коэффициенты и нагрузочные сопротивления датчиков;  $L$  — длина рабочей части образца;  $S$  — площадь поперечного сечения динамометра.

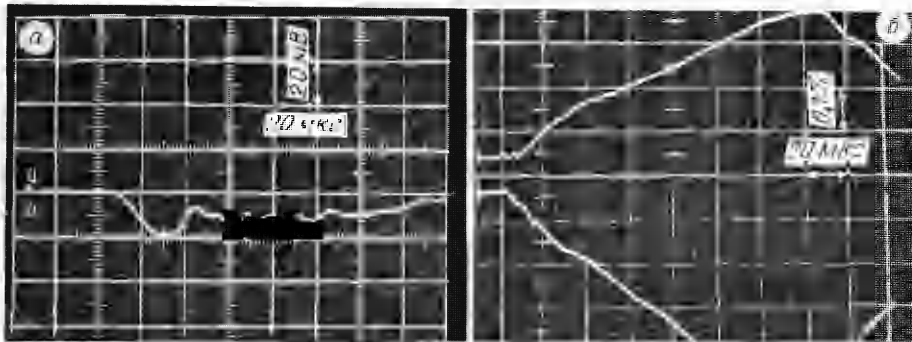
Образцы имели рабочую часть длиной 10 мм, диаметром 4 мм, что создавало в ней близкое к однородному напряженное состояние [8, 9]. Длина динамометра 5', равная 250 мм, выбиралась из расчета, чтобы на измеряемый сигнал длительностью 100 мкс не влиял импульс давления, отраженный от свободного конца. При нагружении образца динамометрические участки деформировались упруго, а рабочая часть — упругопластически. Напряжение  $\sigma(t)$ , возникающее в рабочей части цилиндрического стержня, определялось по деформации динамометра 5 из выражения  $\sigma^* = \sigma \phi$ , где  $\phi = S/S_1$  ( $S_1$  — площадь поперечного сечения рабочей части образца). Величину деформации  $\varepsilon(t)$  и напряжение  $\sigma^*(t)$ , полученные при вычислении из эксперимента, выражали в параметрическом виде. При исключении параметра  $t$  можно получить значение модуля упругости  $E$ , предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , временную прочность  $\sigma_{вр}$  материала.

Типичные осциллограммы ускорение—время и деформация—время, полученные для титана ( $\alpha$ -фаза) в первой серии опытов, приведены в [3].

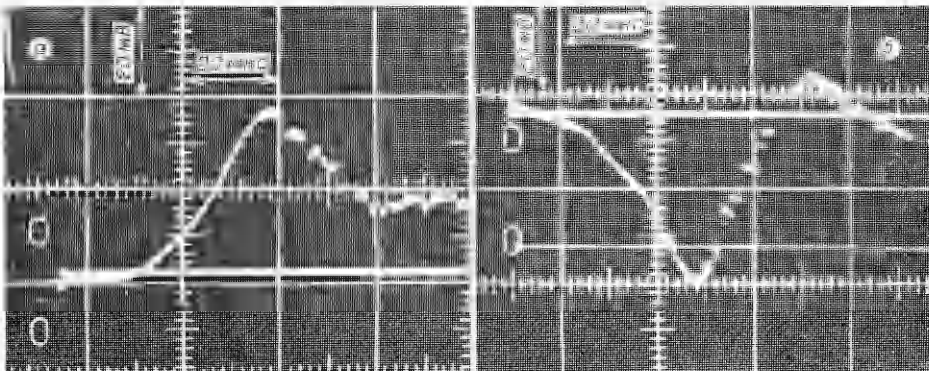
На фиг. 2, 3 показаны осциллограммы, полученные для сталей 30ХГСА и Х18Н10Т соответственно ( $a$ ,  $b$  соответствуют измерениям с помощью трансформатора тока и тензодатчика). Типичные осциллограммы ускорение—время, полученные в четвертой серии опытов для титана



Ф и г. 2



Ф и г 3



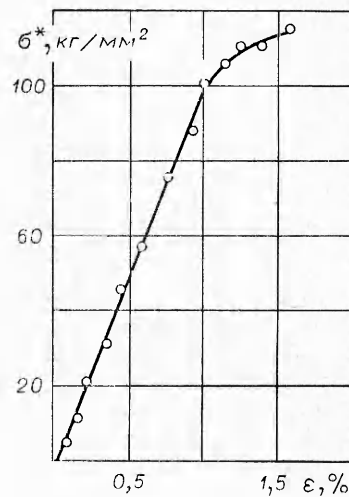
Ф и г. 4

ВТ-14 на растяжение, приведены на фиг. 4 (а, б соответствуют измерениям на динамометре длиной 250 мм). Обработку осциллограмм трех серий опытов для ударно-сжатых сталей и титана проводили по формулам [3], из которых можно определить отношение  $m^*/m_0$ .

На фиг. 5 представлена диаграмма растяжения  $\sigma^*(\epsilon)$  для ВТ-14, полученная в четвертой серии опытов. Модуль упругости, вычисленный из диаграммы, отличался от табличного значения [6] не более чем на 20%. При этом сравнивались величины модулей, соответствующие статическим и динамическим испытаниям материала, так как известно, что их различие незначительно. Полученное значение модуля  $E$  соответствовало отношению  $m^*/m_0 = 10$ .

В таблице представлены результаты экспериментального определения значения  $m^*/m_0$  для трех серий опытов, соответствующих двум маркам сталей и титана ( $\alpha$ -фаза) на ударное сжатие, а также титана ВТ-14, подвергнутого ударному растяжению.

Удельное сопротивление  $\rho$  стали Х18Н10Т определяли из [10], для остальных материалов — экспериментально. Среднеквадратичная погрешность измерения тока  $i(t)$  и деформации  $\epsilon(t)$  в эксперименте состав-



Ф и г. 5

Марка стали	Титан ( $\alpha$ -фаза)	Сталь 30ХГСА	Сталь Х18Н10Т	Титан BT-14
$\frac{m^*}{m_0}$	18,5	20	5	10

вила соответственно 16 и 13%. Из таблицы (значений  $m^*/m_0$ ) и данных работы [3] можно видеть, что внешнее поле  $E_{ст}$  зависит от эффективной массы электрона.

Принципиальное отличие полученного результата от известной зависимости  $E_{ст}$  от массы свободного электрона  $m_0$  в классических электронно-инерционных опытах [5], возможно, связано с тем, что в опытах Толмена—Стьюарта и Барнета решетка ускорялась относительно носителей тока как целое, без локальных возмущений. Это приводило к тому, что инертные свойства носителей тока в кристалле определялись массой свободного электрона  $m_0$ . В условиях распространения по неподвижному кристаллу локального возмущения кристаллического потенциала инерционные свойства носителей тока, как показали эксперименты, зависят от эффективной массы носителей тока, описывающей взаимодействие электронов с кристаллическим потенциалом.

Поступила 22 I 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Минеев В. И., Иванов А. Г. ЭДС при ударном сжатии вещества.— УФН, 1976, т. 119, с. 75.
2. Минеев В. И., Иванов А. Г., Лисицын Ю. В. и др. ЭДС при ударном сжатии лантаноидов.— ЖЭТФ, 1974, т. 61, с. 254.
3. Кашаев Ю. Г., Новиков С. А., Симицын В. А. Об использовании электронно-инерционного эффекта при ударном нагружении для измерения деформации стержней.— ПМТФ, 1977, № 2.
4. Кашаев Ю. Г. Способ измерения параметров ударного процесса на металлическом образце. Авт. свид. № 620849. Бюл. изобр., 1978, № 31.
5. Цидильковский П. М. Электроны и дырки в поле сил инерции.— УФН, 1975, т. 115, с. 321.
6. Материалы в машиностроении. Т. 1. М., Машиностроение, 1965.
7. Dault J. G.— In: Progress in low temperature physics. Vol. 1. Amsterdam, 1955.
8. Петушков В. Г. О выборе образца для высокоскоростных испытаний на растяжение.— Проблемы прочности, 1970, № 4.
9. Hauser F. E. Techniques for measuring stress-strain relations at high strain rates.— Exptl Mech., 1968, vol. 6, N 8.
10. Таблицы физических величин. М., Атомиздат, 1976.

УДК 532.593 : 620.172

### О РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВЗРЫВОМ ЛИСТОВОГО ЗАРЯДА ВВ

В. К. Голубев, С. А. Новиков, Л. М. Симицына  
(Москва)

Нагружение взрывом листового заряда ВВ довольно широко применяется в практике взрывных экспериментов. Это, например, упрочнение и сварка взрывом [1], исследование разрушения металлов при отколе [2—4]. Совмещение этого простого метода нагружения с расчетом течения нагружаемого материала позволило получить сравнительные результаты по откольному разрушению ряда металлов и полимеров, которые, в свою очередь, могут быть сопоставлены с результатами, полученными при других условиях импульсного механического нагружения (взрыв блока ВВ, удар пластиной).