

УДК 539.63

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕДИ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

С. Д. Гилёв, В. С. Прокопьев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gilev@hydro.nsc.ru

Выполнены измерения электросопротивления медной фольги при ударном сжатии. Построены зависимости электросопротивления и электропроводности от ударного давления в диапазоне до 20 ГПа. Эти зависимости являются монотонными, без явных изломов и особенностей. Выявлена качественная зависимость электросопротивления металла от ударного импеданса материала обоймы, в которой располагается образец. Сравнение полученных данных с результатами других авторов указывает на важность учета материала обоймы, формы и толщины образца, процедуры определения параметров состояния образца.

Ключевые слова: электросопротивление, электропроводность, медь, ударное сжатие, высокая плотность энергии, высокое давление.

DOI 10.15372/FGV20160115

ВВЕДЕНИЕ

Электропроводность является важной характеристикой состояния конденсированного вещества при большой плотности энергии. Как и другие транспортные коэффициенты, электропроводность характеризует природу межчастичного взаимодействия и фазовое состояние системы. В силу недостаточной разработанности теоретических подходов особое значение для определения транспортных коэффициентов материалов имеют результаты экспериментальных исследований при ударном сжатии.

Важность экспериментальных исследований электропроводности металлов при сжатии в сильных ударных волнах обусловлена рядом обстоятельств.

1. Электропроводность может быть связана с физическим состоянием вещества, что позволяет судить о происходящих изменениях в веществе и диагностировать фазовые переходы при сжатии [1, 2].

2. Результаты измерения электропроводности имеют фундаментальное значение, поскольку позволяют тестировать модели электропроводности металлов при высокой плотности энергии [3–9].

3. Величина электропроводности может дать информацию о механизме деформации при ударном переходе, природе сжатого состояния, наличии несовершенств сжатой кристал-

лической решетки [10, 11].

4. Знание электропроводности железа и других геологических материалов при больших давлениях и температурах важно для геофизики Земли и гигантских планет, в частности, для обоснования моделей магнитного динамо и планетарного магнетизма [1].

5. Связь между электропроводностью и другими транспортными коэффициентами (например, соотношение между электропроводностью и теплопроводностью, выражаемое законом Видемана — Франца) позволяет найти эти коэффициенты в условиях высокой плотности энергии [12].

6. Информация об электросопротивлении металлов важна для ряда экспериментальных методик, использующих пьезорезистивный и терморезистивный эффекты, например для датчиков ударного давления и температуры [13–15].

В настоящее время данные измерений электросопротивления при динамическом сжатии наиболее широко используются для качественной диагностики фазовых превращений [2]. Для этого находят зависимость электросопротивления исследуемого вещества от ударного давления. Резкое изменение электросопротивления, происходящее при некотором пороговом ударном давлении, является отчетливым индикатором изменений в веществе. При этом вывод о наличии превращения носит качественный характер, поскольку прогностическая модель электросопротивления материалов

в настоящее время отсутствует.

Часто зависимость электросопротивления вещества от ударного давления имеет плавный характер или отличается небольшими изменениями, которые трудно идентифицировать как очевидный фазовый переход. При ударном сжатии электросопротивление образца изменяется вследствие различных факторов: изменение концентрации носителей тока и их типа, температурный нагрев, генерация дефектов кристаллической структуры, деформация образца и т. д. Выделить на общем фоне изменение электросопротивления, обусловленное структурным или электронным переходом, бывает непросто. Для расширения возможностей метода электросопротивления как инструмента диагностики фазовых превращений необходимо иметь модель электросопротивления «нормального» металла при ударном сжатии. Под «нормальным» можно понимать металл, не имеющий фазовых переходов в исследуемой области давлений и температур. В этом случае можно ожидать, что электросопротивление и электропроводность при росте ударного давления будут меняться монотонно.

Очевидно, что построение модели электропроводности металла должно опираться на надежные экспериментальные данные. Для построения модели разумно выбрать металл с простым поведением электропроводности и наличием массива экспериментальной информации.

Возможным кандидатом на роль такого металла является серебро. Оно не имеет фазовых переходов в диапазоне давления до 100 ГПа [16]. Серебру посвящено весьма тщательное исследование электросопротивления при ударном сжатии [10], в котором впервые сделан анализ влияния различных факторов на изменение электросопротивления металла. Полученные в [10] первичные данные могут быть использованы для построения и апробирования модели электропроводности. В то же время исследованный диапазон ударных давлений в [10] довольно ограничен (до 12 ГПа), а другие измерения электросопротивления серебра, насколько нам известно, отсутствуют.

Удобным кандидатом является также медь. Она служит эталонным материалом при исследовании ударно-волновой сжимаемости веществ, а также широко используется в различных электрофизических устройствах и датчиках. Медь не имеет фазовых переходов в

области ударных нагрузок до ≈ 200 ГПа [16], поэтому поведение электросопротивления меди должно быть достаточно простым. Экспериментальные данные по электросопротивлению и электропроводности меди при ударном сжатии опубликованы в работах [1, 14, 17–21].

В [17] приведена экспериментальная запись напряжения с медного образца. Отмечается, что главный вклад в рост сопротивления при ударном сжатии вносит ударно-волновой нагрев образца.

В [1] представлена нормированная на температуру зависимость электропроводности меди и железа от ударного давления. Комбинация величин $\sigma T_H/T_0$ (σ — электропроводность образца, T_H — температура ударно-сжатого образца, T_0 — начальная температура) демонстрирует монотонный рост при увеличении давления вплоть до ≈ 130 ГПа. Постановка опытов, первичные экспериментальные данные, методика расчета температуры в [1] не раскрываются. Это делает трудным сопоставление с результатами других авторов.

В [14] для целей термометрии измерялось сопротивление медной фольги толщиной 5 мкм, помещенной в оргстекло. Авторы не привели экспериментальной записи напряжения от времени, но утверждали, что в течение $0.2 \div 0.5$ мкс достигается тепловое равновесие между медной фольгой и окружающим ее диэлектриком. Зарегистрирована величина относительного электросопротивления при двух значениях удельного сжатия оргстекла.

В [18] кратко представлены результаты, по-видимому, достаточно обширных измерений электросопротивления медной проволоки (толщина 60 мкм) и алюминиевой фольги (20 мкм), помещенных в оргстекло. После прихода ударного фронта на образец электросопротивление меди сначала резко растет, а далее увеличивается медленно. В работе представлена зависимость электросопротивления меди от ударного давления $R(p)$ в диапазоне до 15 ГПа. Зависимость $R(p)$ имеет области с отличающимся наклоном, что объясняется авторами различием между скоростями волн в металле и окружающем диэлектрике. Детали постановки экспериментов и процедура обработки полученных данных в [18] не описаны. В частности, не ясно, какая точка на зависимости напряжения от времени использовалась для нахождения электросопротивления образца. Отметим, что ударная деформация проволоочного образца

неоднородна, что может влиять на регистрируемое электросопротивление.

В [19] приведен фактический материал из [1] вместе с результатами расчетов электропроводности по моделям Кнопфеля и Бургеса, а также дан качественный анализ данных.

В [20] методом вихревых токов измерена электропроводность медных фольг при ударном сжатии. Фольга (толщина 15 и 30 мкм), помещенная в оргстекло, продемонстрировала уменьшение электропроводности примерно в 1.9 раза при ударном давлении $p = 18.5$ ГПа.

В [21] разработан другой вариант метода вихревых токов и выполнены измерения электропроводности медных фольг (толщина 50 мкм), расположенных между пластинами из фторопласта. Представлено четыре группы экспериментальных точек, описывающих зависимость относительного электросопротивления $R(p)/R_0$ от ударного давления при $p < 16$ ГПа. Отличительной особенностью данных [21] является немонотонный характер зависимости $R(p)/R_0$. Автор [21] объясняет расхождение с [18] (где зависимость $R(p)/R_0$ монотонна) недостатками электроконтактного метода, для которого в принципе возможна неконтролируемая деформация чувствительного элемента или измерительного контура. Немонотонная зависимость относительного электросопротивления $R(p)/R_0$ от ударного давления представляется странной, поскольку в данном диапазоне давления у меди фазовые переходы отсутствуют.

В целом, экспериментальные данные по электросопротивлению и электропроводности меди [1, 14, 17–21] не обладают необходимой полнотой и согласованностью. Зависимость относительного электросопротивления $R(p)/R_0$ меди от ударного давления p надежно не установлена. Имеются противоречия относительно характера зависимости $R(p)/R_0$, в частности монотонности зависимости и изменения ее наклона. Указания на зависимость электросопротивления ударно-сжатого образца от времени и, возможно, от формы образца и толщины нуждаются в дополнительном анализе. Можно констатировать, что для меди отсутствуют публикации с полным описанием постановки измерений, процедуры нахождения электропроводности, а также с анализом экспериментальных результатов, подобные классической работе [10], выполненной для серебра. Отсутствие ясной картины не позволяет использо-

вать имеющиеся данные [1, 14, 17–21] в качестве опорных для построения или тестирования модели электропроводности классических металлов. Эти обстоятельства послужили стимулом для выполнения данной работы.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование электросопротивления меди при ударном сжатии. Мы ставили перед собой задачу найти зависимости электросопротивления и электропроводности тонкой медной фольги, размещаемой между диэлектрическими пластинами, от ударного давления в диэлектрике.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для измерения электропроводности тонких металлических образцов использовалась четырехточечная схема [22]. Полная электрическая схема эксперимента показана на рис. 1, а, измерительная ячейка — на рис. 1, б, образец — на рис. 1, в.

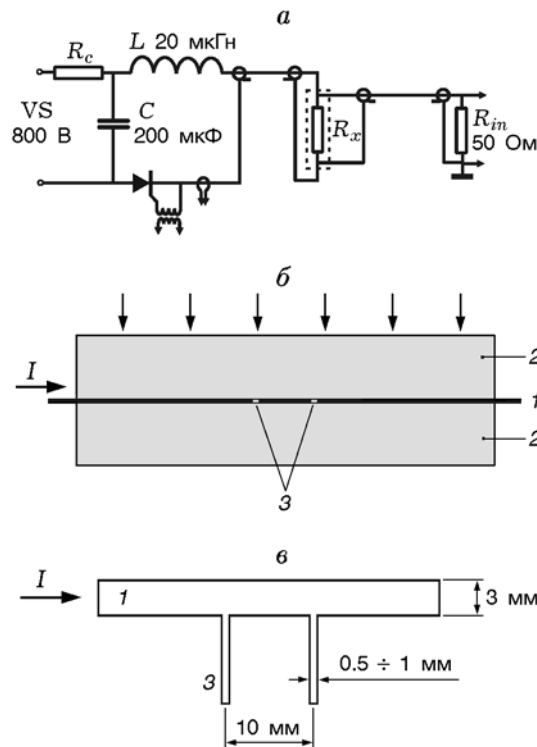


Рис. 1. Постановка измерений электросопротивления медной фольги:

а — электрическая схема измерения, б — сечение центральной части измерительной ячейки, в — схема измерения образца из фольги; 1 — образец, 2 — диэлектрик, 3 — электроды

Образец вырезали из цельного куска фольги, и он не имел накладных контактов. Длина образца около 120 мм, однако измерения проводились лишь в центральной его части длиной 10 мм. Электроды (ширина $0.5 \div 1$ мм) располагались в плоскости фольги и соединялись с регистрирующим коаксиальным кабелем вне области действия ударной волны.

Для экспериментов использовалась медная фольга толщиной 16 мкм (в основной части экспериментов) и 50 мкм (для сравнения). Фольга соответствует ГОСТ 5638-75 (марка М1) и применялась в состоянии поставки. Согласно справочнику [23, с. 305] удельное электрическое сопротивление чистой меди при комнатной температуре составляет $1.67 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Начальное удельное сопротивление медной фольги толщиной 16 и 50 мкм оказалось равным $(1.79 \pm 0.05) \cdot 10^{-6}$ и $(1.81 \pm 0.04) \cdot 10^{-6}$ Ом·см соответственно.

Образец медной фольги располагался между диэлектрическими пластинами (толщина $3 \div 10$ мм, размеры 120×120 мм). Заполнение пустот и фиксирование образца выполнялись при помощи эпоксидного клея. В качестве диэлектрика использовались гетинакс, оргстекло и фторопласт-4. Электрическая проводимость этих материалов в исследуемом диапазоне ударных нагрузок пренебрежимо мала по сравнению с проводимостью медных фольг.

Нагружение измерительной ячейки в основной части опытов осуществлялось зарядом конденсированного взрывчатого вещества (ВВ), который накладывался непосредственно на диэлектрические пластины с вмонтированным образцом, а также через металлическую пластину, располагаемую между зарядом и ячейкой. При использовании накладного заряда ВВ в толстом диэлектрике генерировался импульс нагружения, имеющий треугольную форму. Характерное время спада давления при использовании литых зарядов ВВ составляло около 5 мкс. Диаметр заряда ВВ ≈ 75 мм.

Электрические измерения проводились в режиме постоянного тока. Сила тока через измерительную ячейку $I \leq 500$ А, время роста тока около 60 мкс. Нагрев образца протекающим током не превышал 15 К. Напряжение регистрировалось цифровым осциллографом LeCroy WaveJet 314 с полосой пропускания 100 МГц и временем дискретизации 1 нс.

Регистрируемое напряжение $U(t) = IR(t)$, где $R(t)$ — сопротивление образца. Относи-

тельное электрическое сопротивление образца определяется как $R(t)/R_0 = U(t)/U_0$, где R_0 — начальное сопротивление образца (до прихода ударной волны), U_0 — начальное напряжение.

Относительную электропроводность образца σ/σ_0 (σ_0 — начальная электропроводность) находили по формуле

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\delta_0 R_0}{\delta R}. \quad (1)$$

Здесь δ_0 — начальная толщина образца, δ — толщина ударно-сжатого образца. Коэффициент сжатия образца δ_0/δ определялся по известной ударной адиабате меди при ударном давлении p , соответствующем установившемуся давлению в образце.

На рис. 2 показаны характерные осциллограммы, полученные в опытах по измерению электросопротивления медной фольги. На рис. 2,а представлена запись, соответствующая постановке опыта с накладным зарядом ВВ (литой заряд располагался непосредственно на измерительной ячейке). Как видно из рисунка, ударное сжатие образца приводит к росту регистрируемого напряжения. Запись на рис. 2,б соответствует опыту с металлической пластиной, размещенной между зарядом ВВ и измерительной ячейкой. В этом случае регистрируемое напряжение уменьшается в момент начала движения пластины (интервал MN) и возрастает при приходе ударной волны на образец (интервал AB). Сигнал, обусловленный движением металлической пластины в магнитном поле, созданном током в образце, существует до начала движения образца. Когда относительная скорость образца и пластины обращается в нуль, сигнал исчезает.

Из полученных экспериментальных записей следует, что зависимость электросопротивления медных фольг от времени имеет два основных участка, на каждом из которых сопротивление образца монотонно возрастает. Первый участок (AB) соответствует ударному сжатию образца и характеризуется максимальной скоростью изменения сопротивления. Время роста напряжения на участке AB составляет обычно $25 \div 60$ нс и, по-видимому, обусловлено неодновременностью сжатия рабочей части образца вследствие неплоскостности ударного фронта и неидеальности расположения фольги между слоями диэлектрика. Характерное время прохождения ударной волны по медному образцу толщиной 16 мкм около 3 нс.

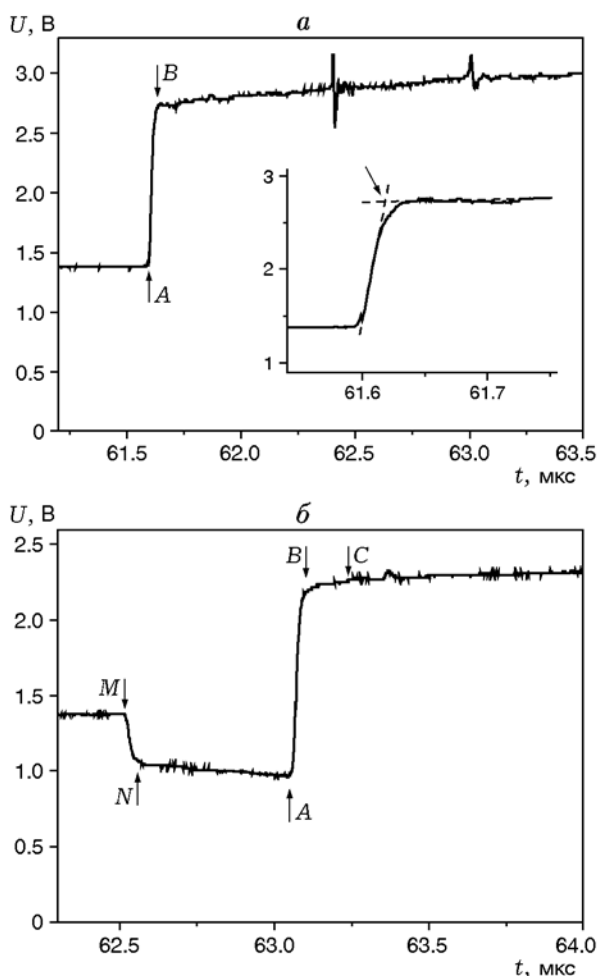


Рис. 2. Записи напряжения с измерительной ячейки в опытах с медной фольгой:

a — опыт с накладным зарядом ВВ, давление ударной волны в диэлектрике $p = 22.7$ ГПа; на врезке — участок резкого изменения напряжения, стрелкой отмечен уровень напряжения, используемый для определения относительного электросопротивления образца; *b* — опыт с металлической пластиной между зарядом ВВ и диэлектриком, $p = 14.7$ ГПа; *A* — начало ударного сжатия образца, *B* — окончание резкого роста напряжения, *C* — окончание переходного участка роста напряжения, *M* — начало движения тыльной поверхности металлической пластины, *N* — окончание фазы резкого уменьшения напряжения

После участка резкого изменения (*AB*) электросопротивление растёт очень слабо. Иногда на записях можно выделить переходный участок *BC* между резким и слабым ростом напряжения (см. рис. 2, *b*). Он чаще всего регистрируется в опытах со вспомогательной металлической пластиной и может быть обусловлен влиянием периферийных областей метал-

лической пластины.

Для определения электросопротивления образца в сжатом состоянии нами использовалась точка пересечения двух прямых, соответствующих основным участкам изменения напряжения: резкого роста напряжения и последующего плавного его изменения на протяжении ≈ 1 мкс (отмечена стрелкой на врезке на рис. 2, *a*).

В таблице дана информация о постановке эксперимента (тип ВВ, состав слоистой системы) и приведены экспериментальные значения относительного электросопротивления образца R/R_0 и найденной относительной электропроводности σ/σ_0 . Ударное давление в диэлектрике p и другие гидродинамические параметры рассчитывались методом ударных импедансов. Использовались ударные адиабаты материалов в виде зависимости волновой скорости D от массовой скорости u : $D = 3.915 + 1.495u$ (медь) [24], $D = 5.385 + 1.316u - 0.0101u^2$ (сплав Д16Т) [25], $D = 2.572 + 1.536u$ (оргстекло), $D = 3.048 + 1.422u$ (гетинакс), $D = 1.682 + 1.819u$ (фторопласт-4) [26]. Также использовалось уравнение состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ [27]. Ударное давление в диэлектрике для ряда взрывных систем контролировались манганиновым датчиком. Погрешность определения давления равна $5 \div 7$ %, погрешность определения относительного электросопротивления R/R_0 и относительной электропроводности σ/σ_0 — около 3 %.

На рис. 3 показана зависимость относительного сопротивления меди R/R_0 от ударного давления в диэлектрике p при размещении фольги в гетинаксе, фторопласте, оргстекле. Приведены также данные по ударно-волновому нагружению из работ [18] (медная проволока в оргстекле) и [21] (медная фольга во фторопласте), а также данные [28] по статическому сжатию меди.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольший массив экспериментальных данных соответствует размещению медной фольги толщиной 16 мкм между гетинаксовыми пластинами. Эти опытные данные описаны сплошной кривой на рис. 3, полученной методом наименьших квадратов. Найденная таким образом зависимость относительного сопротивления меди R/R_0 от ударного давле-

Постановка опытов и результаты измерения электросопротивления медной фольги при ударном сжатии

Опыт	Экспериментальное устройство: материал слоя (толщина, мм)	p , ГПа	R/R_0	σ/σ_0
Диэлектрик — гетинакс				
1199	Тр(204)—Cu(6.2)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	4.7	1.08	0.897
1208	Тр(214)—Д16Т(5.3)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	7.8	1.17	0.812
1234	Тр(196)—Д16Т(5.5)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	7.8	1.19	0.799
1241	Т(60)—Cu(6.2)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	7.8	1.23	0.773
1229	Т(90)—Cu(3.9)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	8.3	1.21	0.783
1232	Гекс(203)—Д16Т(5.1)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	9.2	1.26	0.746
1189	Тр(203)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	9.7	1.37	0.687
1215	Тр(210)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	9.7	1.35	0.697
1233	Тр(201)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	9.7	1.38	0.682
1217	ТГ(90)—Cu(6.5)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	9.9	1.31	0.717
1207	Гекс(266)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	11.9	1.5	0.617
1231	Гекс(298)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	11.9	1.45	0.638
1240	ТГ(60)—Д16Т(10.4)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	14.7	1.64	0.559
1181	Т(60)—гер(5)—Cu ф.(0.016)—гер(5)	15.7	1.81	0.504
1206	ТГ(60)—Д16Т(5.3)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	15.7	1.73	0.527
1216	Т(60)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	16	1.84	0.495
1228	Т(60)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	16	1.83	0.498
1230	ТГ(90)—Д16Т(5.5)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	16.2	1.78	0.511
1235	ТГ(60)—нерж. ст.(3)—в(10)—гер(1.5)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	18.6	1.99	0.453
1180	ТГ(60)—гер(5)—Cu ф.(0.016)—гер(5)	19.2	2.16	0.416
222	ТГ(105)—гер(8)—Cu ф.(0.02)—гер(5)	19.4	2.15	0.417
1214	ТГ(60)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	19.6	1.98	0.453
1225	ТГ(60)—гер(3)—Cu ф.(0.016)—гер(10)	19.6	1.97	0.455
1238	ТГ(66)—гер(3)—Cu ф.(0.050)—гер(10)	19.6	2.15	0.417
1239	ТГ(60)—гер(3)—Cu ф.(0.050)—гер(10)	19.6	2.05	0.437
1242	ТГ(66)—гер(3)—Cu ф.(0.050)—гер(10)	19.6	2.2	0.408
Диэлектрик — фторопласт				
1198	Т(60)—Cu(4.3)—фт(2.2)—Cu ф.(0.016)—фт(8.2)	9.7	1.2	0.784
1186	ТГ(90)—Cu(4.5)—фт(5.1)—Cu ф.(0.016)—фт(7.5)	11.7	1.39	0.669
1270	ТГ(90)—Cu(4.3)—фт(3.8)—Cu ф.(0.050)—фт(7)	12.5	1.47	0.63
1258	Т(60)—Д16Т(3.7)—фт(4.4)—Cu ф.(0.016)—фт(7.6)	15.6	1.64	0.557
1259	Т(60)—Д16Т(3.8)—фт(3.3)—Cu ф.(0.016)—фт(7.6)	15.6	1.51	0.605

Продолжение таблицы

Опыт	Экспериментальное устройство: материал слоя (толщина, мм)	p , ГПа	R/R_0	σ/σ_0
Диэлектрик — фторопласт				
1245	T(60)—фт(3.8)—Cu ф.(0.016)—фт(9.8)	18.4	1.79	0.503
1187	T(60)—фт(4.6)—Cu ф.(0.016)—фт(8)	18.3	1.81	0.498
1182	T(60)—фт(3.8)—Cu ф.(0.016)—фт(8.1)	18.4	1.77	0.509
1251	TГ(60)—Д16Т(4.7)—фт(4.2)—Cu ф.(0.016)—фт(8)	20	1.85	0.483
1183	TГ(60)—фт(4.3)—Cu ф.(0.016)—фт(7.8)	22.7	1.83	0.484
1243	TГ(60)—фт(4)—Cu ф.(0.016)—фт(7.7)	22.7	1.97	0.449
1244	TГ(60)—фт(4.3)—Cu ф.(0.016)—фт(7.7)	22.7	2.04	0.434
1271	TГ(90)—фт(4.3)—Cu ф.(0.050)—фт(5)	23.1	1.92	0.46
Диэлектрик — оргстекло				
1262	T(60)—Д16Т(3.3)—орг(2.7)—Cu ф.(0.016)—орг(5)	11.1	1.46	0.64
1263	T(60)—Д16Т(3.3)—орг(2.7)—Cu ф.(0.016)—орг(5)	11.1	1.53	0.61
1237	T(60)—орг(2.8)—Cu ф.(0.016)—орг(4.8)	14.4	1.84	0.499
1250	T(60)—орг(3.2)—Cu ф.(0.016)—орг(4.9)	14.4	1.86	0.494
1260	TГ(60)—орг(2.7)—Cu ф.(0.016)—орг(5)	17.6	2.08	0.435
1261	TГ(60)—орг(2.7)—Cu ф.(0.016)—орг(5)	17.6	2.14	0.423

Примечания. Принятые сокращения для материала слоев: ТГ — сплав тротил/гексоген 50/50, Т — литой тротил, Гекс — порошковый гексоген, Тр — порошковый тротил, Cu — медная пластина, Cu ф. — медная фольга, Д16Т — сплав Д16Т, нерж. ст. — нержавеющая сталь, гет — гетинакс, фт — фторопласт-4, орг — оргстекло, в — воздух.

ния p представляет собой монотонно возрастающую функцию.

Зависимость $R(p)/R_0$ для ударно-волнового сжатия качественно отличается от соответствующей зависимости для статического сжатия: при статическом сжатии электросопротивление уменьшается при повышении давления, при ударном сжатии — растет. Разница между зависимостями, очевидно, обусловлена отличиями ударно-волнового и статического сжатия.

В пределах экспериментальных погрешностей выявленная зависимость $R(p)/R_0$ для ударно-волнового сжатия не имеет явных особенностей, таких как изломы или участки с резко отличающимся наклоном. Опыты с использованием фольги разной толщины (16 и 50 мкм) дали одинаковые результаты, что свидетельствует об отсутствии влияния толщины фольги на относительное электросопротивление.

В большей части экспериментов использовались накладные заряды ВВ, поэтому за-

висимость $p(t)$ имеет спадающий характер. В опыте № 1235, в котором нагружение измерительной ячейки осуществлялось ударником, ускоряемым продуктами взрыва, в месте расположения образца генерировался прямоугольный импульс давления длительностью около 1 мкс. Зарегистрированный сигнал имел ту же форму, что в основной части экспериментов. Несмотря на то, что после прихода ударной волны давление оставалось около 1 мкс неизменным, регистрировался слабый рост напряжения. Это означает, что сопротивление образца слабо меняется в нагруженном состоянии. Отметим, что данный эффект наблюдался нами ранее для олова [29], где он был выражен более отчетливо.

При размещении фольги в оргстекле электросопротивление выше (при том же ударном давлении в диэлектрике), а при размещении во фторопласте ниже, чем при использовании гетинакса, как в основной части опытов. Причина такого поведения состоит в особенностях ударного сжатия металлической фольги, раз-

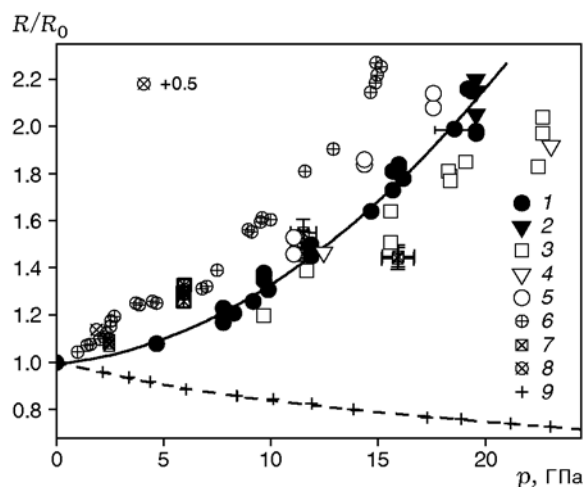


Рис. 3. Зависимость относительного сопротивления меди от ударного давления в диэлектрике:

1, 2 — фольга толщиной соответственно 16 и 50 мкм между гетинаксовыми пластинами, 3, 4 — фольга толщиной соответственно 16 и 50 мкм между фторопластовыми пластинами, 5 — фольга толщиной 16 мкм между оргстеклянными пластинами, 6 — проволока (диаметр 60 мкм) в оргстекле [18], 7 — фольга толщиной 50 мкм во фторопласте [21], 8 — фольга толщиной 5 мкм в оргстекле (верхнюю точку необходимо сместить на +0.5) [14], 9 — данные по статическому сжатию [28], сплошная кривая — опыты с фольгой толщиной 16 мкм, помещенной между гетинаксовыми пластинами

мещенной между слоями диэлектрика.

Ударные импедансы меди и диэлектрика значительно отличаются, поэтому регистрируемое электросопротивление характеризует состояние образца, достигаемое в ходе прохождения по образцу последовательности волн сжатия и разрежения. На рис. 4 показана p - u -диаграмма сжатия медной фольги, расположенной между пластинами из гетинакса. Для построения диаграммы использовались известные ударные адиабаты материалов. Ударные адиабаты многократного сжатия и кривой разгрузки находились как зеркальные отражения ударной адиабаты однократного сжатия материала. Из рис. 4 видно, что давление в первой ударной волне в образце (метка 1) заметно превышает давление в падающей ударной волне (метка 0). В ходе реверберации волн давление в образце приближается к давлению падающей ударной волны в диэлектрике. Вследствие реверберации металлическая фольга испытывает дополнительный разогрев, величина которого

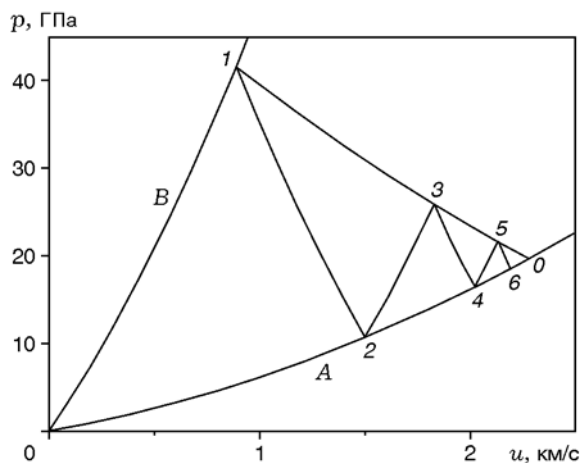


Рис. 4. Диаграмма p - u для системы гетинакс — медь — гетинакс:

A — ударная адиабата гетинакса, B — ударная адиабата меди; 0 — состояние в падающей ударной волне в гетинаксе, 1–6 — состояния в медном образце после последовательных прохождений волн по образцу

зависит от соотношения ударных импедансов металла и диэлектрика. Для материала обоймы с меньшим ударным импедансом (оргстекло) разогрев фольги больше, для материала с большим ударным импедансом (фторопласт) разогрев меньше. Это различие обуславливает разницу в электросопротивлении, которая видна на рис. 3.

Полученные нами экспериментальные данные для фольги, помещенной в оргстекло и гетинакс, отличаются между собой не очень сильно (см. рис. 3). В то же время наши точки располагаются заметно ниже точек из работы [18], где в оргстекле размещалась медная проволока. Отличие наших данных для оргстекла от [18] может быть обусловлено различием режимов деформации образцов. В наших экспериментах использовалась фольга, сжатие такого образца практически одномерное. В [18] применялись проволочные образцы. Их неоднородная пластическая деформация приводит к генерации дополнительных микроструктурных дефектов, что вызывает увеличение электросопротивления образца. Хотя на основании полученной экспериментальной информации мы не можем подтвердить наличие изломов на зависимости $R(p)/R_0$, в целом монотонно растущий характер зависимости в [18] качественно согласуется с нашими результатами.

Как видно из рис. 3, экспериментальные значения относительного электросопротивления, найденные в [14], располагаются заметно выше наших данных. Такое расположение точек [14] может быть обусловлено прогревом тонкой фольги потоком тепла от окружающего диэлектрика (оргстекло) за время существования области высокого давления. Толщина использованных нами фольг (16 и 50 мкм) значительно больше, чем в [14, 15], поэтому тепловой нагрев образца от окружающего образец диэлектрика пренебрежимо мал.

Согласие наших результатов с данными [21], полученными при размещении фольги во фторопласте, можно считать лишь частичным. Результаты [21] демонстрируют немонотонную зависимость относительного сопротивления меди R/R_0 от ударного давления при $p > 11$ ГПа, что не находит разумного объяснения в рамках известной информации о поведении меди при ударном сжатии. По-видимому, имеющиеся расхождения в характере зависимости $R(p)/R_0$ между нашими данными и [21] обусловлены достаточно сложной процедурой обработки первичных экспериментальных данных в [21], что привело к большим неучтенным погрешностям в [21].

На рис. 5 показана зависимость относительной электропроводности меди σ/σ_0 от ударного давления в диэлектрике p . Величина σ/σ_0 определялась по формуле (1). Здесь вместе с нашими данными показана экспериментальная точка, полученная в [20].

Зависимость $\sigma(p)/\sigma_0$ демонстрирует практически линейное уменьшение электропроводности с ростом ударного давления (в данном диапазоне ударных давлений). Как можно было ожидать, данные для оргстекла располагаются несколько ниже, а для фторопласта — несколько выше основной зависимости для гетинакса. Примечательно, что экспериментальная точка из работы [20] качественно согласуется с нашими данными.

К сожалению, мы не смогли сравнить напрямую наши результаты по электропроводности с результатами [1], поскольку последние даны лишь в приведенном виде, без первичных данных и объяснения процедуры их пересчета. На важность таких деталей указывает тот факт, что относительная электропроводность на рис. 5 уменьшается при росте ударного давления, в то время как приведенная электропроводность в [1] возрастает. Причины такого ка-

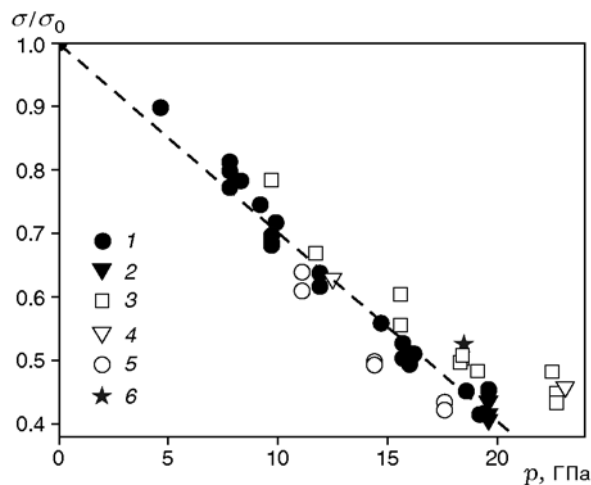


Рис. 5. Зависимость относительной электропроводности меди от ударного давления в диэлектрике:

1, 2 — фольга толщиной соответственно 16 и 50 мкм между гетинаксовыми пластинами, 3, 4 — фольга толщиной соответственно 16 и 50 мкм между фторопластовыми пластинами, 5 — фольга толщиной 16 мкм между оргстеклянными пластинами, 6 — эксперимент [20]

чественного расхождения не ясны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе экспериментальные данные по электросопротивлению и электропроводности медных фольг при ударном сжатии согласуются между собой и в определенной степени — с имеющимися результатами других авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Килер Р. Электропроводность конденсированных сред при высоких давлениях // Физика высоких плотностей энергии / под ред. П. Калдиrola, Г. Кнопфеля. — М.: Мир, 1974. — С. 120–142.
2. Электрические явления в ударных волнах / С. С. Набатов, В. А. Борисенко, А. М. Молодец, Е. З. Новицкий. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
3. Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В. Магнитогидродинамический расчет взрывающихся проводников // ЖТФ. — 1976. — Т. 46, № 9. — С. 1963–1969.
4. Волков Н. Б. Плазменная модель проводимости металлов // ЖТФ. — 1979. — Т. 49, вып. 9. — С. 2000–2002.

5. **Lee Y. T., More R. M.** An electron conductivity model for dense plasmas // *Phys. Fluids*. — 1984. — V. 27, N 5. — P. 1273–1286.
6. **Zollweg R. J., Liebermann R. W.** Electrical conductivity of nonideal plasmas // *J. Appl. Phys.* — 1987. — V. 62. — P. 3621–3628.
7. **Burgess T. J.** Electrical resistivity model for metals // *Megagauss Technology and Pulse Power Applications: Proc. of 4th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Santa Fe, 1986* / C. M. Fowler, R. S. Caird, D. J. Erickson (Eds). — N. Y., L.: Plenum Press, 1987. — P. 307–316.
8. **Беспалов И. М., Полищук А. Я.** Методика расчета степени ионизации тепло- и электропроводности плазмы в широком диапазоне плотностей и температур // *Письма в ЖТФ*. — 1989. — Т. 15, вып. 2. — С. 4–8.
9. **Гаранин С. Ф., Мамышев В. И.** Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой // *ПМТФ*. — 1990. — № 1. — С. 30–37.
10. **Dick J. J., Styris D. L.** Electrical resistivity of silver foils under uniaxial shock-wave compression // *J. Appl. Phys.* — 1975. — V. 46, N 4. — P. 1602–1617.
11. **Gilev S. D., Trubachev A. M.** Metallization of silicon in a shock wave: metallization threshold and ultrahigh defect densities // *J. Phys.: Condensed Matter*. — 2004. — V. 16, N 46. — P. 8139–8153.
12. **Молодец А. М., Голышев А. А.** Теплопроводность индия при высоких давлениях и температурах ударного сжатия // *Физика твердого тела*. — 2009. — Т. 51, N 2. — С. 213–216.
13. **Канель Г. И.** Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. — Черноголовка, 1973. — (Препр. АН СССР. ОИХФ).
14. **Bloomquist D. D., Sheffield S. A.** Shock-compression temperature rise in polymethyl methacrylate determined from resistivity of embedded copper foils // *Appl. Phys. Lett.* — 1981. — V. 38, N 3. — P. 185–187.
15. **Rosenberg Z., Partom Y.** Direct measurement of temperature in shock-loaded polymethylmethacrylate with very thin copper thermistors // *J. Appl. Phys.* — 1984. — V. 56, N 7. — P. 1921–1926.
16. **Tonkov E. Yu., Ponyatovsky E. G.** Phase transformations of elements under high pressure. — CRC Press, 2005.
17. **Duff R. E.** Materials properties at high pressure // *Properties of Matter under Unusual Conditions* / H. Mark, S. Fernbach (Eds). — N. Y., 1969. — P. 73–104.
18. **Гончаров А. И., Родионов В. Н.** Электросопротивление меди и алюминия при ударноволновых нагружениях // II Всесоюз. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике»: тез. докл. — Киев, 1985. — С. 72–73.
19. **Mitchell A. C., Keeler R. N.** The electrical conductivity of copper and aluminum at high temperatures and pressures // *Megagauss Technology and Pulsed Power Applications: Proc. 4th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Topics, Santa Fe, 1986* / C. M. Fowler, R. S. Caird, D. J. Erickson (Eds). — N. Y.; L.: Plenum Press, 1987. — P. 317–321.
20. **Жугин Ю. Н., Левакова Ю. Л.** Влияние электропроводности и толщины проводящей пластины на регистрируемый сигнал индукционного датчика массовой скорости // *ПМТФ*. — 2000. — Т. 41, № 6. — С. 199–209.
21. **Гулевич М. А.** Измерение электрической проводимости меди при импульсном нагружении // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 110–116.
22. **Гилев С. Д.** Измерение электропроводности конденсированного вещества в ударных волнах (обзор) // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 3–23.
23. **Таблицы физических величин: справочник** / под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
24. **Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Дудолов И. П., Дынин Е. А., Трунин Р. Ф., Чекин Б. С.** Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности // *ПМТФ*. — 1981. — № 2. — С. 3–34.
25. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — 2-е изд. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2006.
26. **Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др.** Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // *Высокоскоростные ударные явления* / под ред. Р. Кинслоу. — М.: Мир, 1973. — С. 299–427.
27. **Физика взрыва** / под ред. К. П. Станюковича. — 2-е изд. — М.: Наука, 1975.
28. **Pu Fn, Ding Yz, Guo Qq.** The pressure-dependence of electrical resistances for iron, nickel and copper // *Science in China (Scientia Sinica)*. Ser. A. Mathematics, Physics, Astronomy. — 1993. — V. 36, N 3. — P. 333–337.
29. **Гилев С. Д., Прокопьев В. С.** Электросопротивление фаз высокого давления олова при ударном сжатии // *Физика горения и взрыва*. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 94–100.

*Поступила в редакцию 14/X 2014 г.,
в окончательном варианте — 4/XII 2014 г.*