

УДК 537.7:532+539.893

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ УДАРНОГО СЖАТИЯ

А. А. Голышев, А. М. Молодец

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, golyshev@icp.ac.ru

Представлены результаты экспериментов, в которых определено электросопротивление полимерной изоляционной композиции (тефлоновой пленки и вакуумной смазки) в условиях ступенчатого ударного сжатия при давлениях до 150 ГПа. Полученные данные могут быть использованы в экспериментах по измерению электропроводности материалов в данном диапазоне ударных давлений.

Ключевые слова: ударные волны, электросопротивление, политетрафторэтилен, манганиновый датчик.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде исследований и приложений высоких давлений и температур (исследование ударно-индуцированного перехода диэлектрик — металл, пьезорезистивные датчики давления ударного сжатия и др.) требуются материалы, которые сохраняют высокое электрическое сопротивление при экстремальных давлениях и температурах ударного сжатия. Одним из таких материалов является оксид алюминия Al_2O_3 . Монокристалл оксида алюминия остается хорошим изолятором вплоть до мегабарных давлений ударного сжатия: в диапазоне давлений $p = 90 \div 180$ ГПа его удельное сопротивление составляет $170 \div 20$ Ом·см [1]. Плотная керамика оксида алюминия Al_2O_3 (вистал) использовалась в [2, 3] в качестве окружающей изоляционной среды, а также в композите «оксид алюминия — эпоксидная смола», применяемом для удаления воздушных зазоров около манганинового датчика при $p \leq 130$ ГПа. Однако керамики, являясь твердыми и хрупкими материалами, трудны в обработке и при использовании в качестве окружающей изоляционной среды. В ряде случаев хорошей альтернативой является тефлон (фторопласт-4), обладающий изначально высоким электросопротивлением и вместе с тем представляющий собой удобный в механической обработке материал. Так, тефлон использовался в [4] для изоляции манганиновых датчиков давления в удар-

ных волнах. При этом чувствительный элемент датчика запрессовывался в тефлон так, чтобы воздушные зазоры между датчиком и тефлоном отсутствовали. В работах [5–7] тефлоновые пленки использовались в композиции с вакуумной смазкой. Здесь воздушные зазоры в конструкции чувствительного элемента датчика удалялись (вытеснялись) с помощью вакуумной смазки. В результате манганин вместе с тоководами оказывался помещенным в полимерную изолирующую среду, состоящую из тефлоновых пленок и вакуумной смазки (ТВС-среду).

Очевидно, что электросопротивление ТВС-среды изменяется по мере увеличения давления и температуры ударного сжатия за счет изменения электросопротивления как тефлона, так и вакуумной смазки. Электросопротивление тефлона в условиях ударного сжатия изучалось в работах [8–10]. Подробное специальное исследование электросопротивления и обсуждение физических механизмов возникновения проводимости ударно-сжатого тефлона и тефлоновой пленки до 150 ГПа выполнено в [11, 12]. Что же касается ТВС-среды, то ее электросопротивление в мегабарном диапазоне давлений измерялось в [13] лишь с целью учета эффекта шунтирования электросопротивления исследуемых образцов натрия. При этом было показано, что электросопротивление ТВС-среды при давлениях (расчетных) $80 \div 230$ ГПа находится на уровне $40 \div 20$ Ом, однако его зависимость от давления не была получена. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по измерению не только электросопротивления, но и давления

Работа частично выполнена в рамках программы Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества».

ТВС-среды с последующим определением функциональной зависимости электросопротивления от давления ступенчатого ударного сжатия до 150 ГПа.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТВС-СРЕДЫ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ УДАРНОМ СЖАТИИ

Схема измерительной ячейки представлена на рис. 1. Эта ячейка дублирует измерительную ячейку манганинового датчика из [5–7] за тем лишь исключением, что в данной работе чувствительный элемент манганинового датчика R_m рассматривается в качестве шунта для эффективного электросопротивления R_{eff} ТВС-среды.

Манганиновый шунт (рис. 1, а) изготовлен из манганиновой проволоки марки МнМцЗ-12

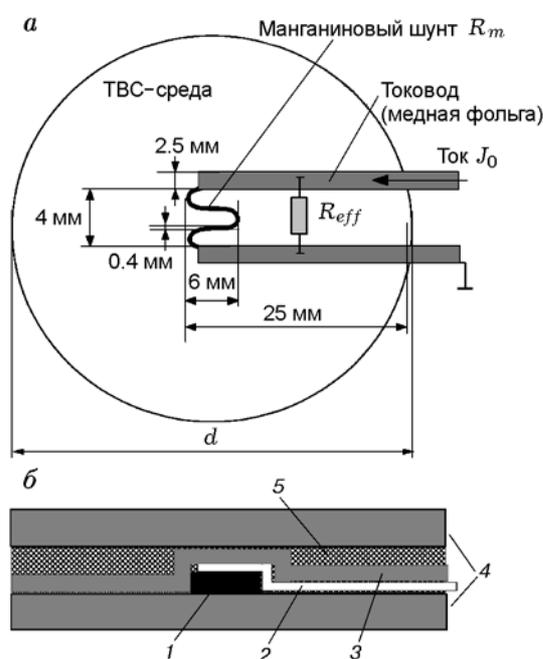


Рис. 1. Геометрические размеры измерительной ячейки и ее элементов:

a — горизонтальная проекция: R_{eff} — эффективное сопротивление ТВС-среды, R_m — сопротивление манганинового шунта, $d = 40$ мм — диаметр плоского участка ударника; b — поперечное сечение измерительной ячейки: 1 — манганиновый шунт, 2 — тоководы из медной фольги толщиной 0.02 мм, 3 — тефлоновая пленка толщиной 0.1 мм, 4 — две тефлоновые пленки толщиной 0.33 мм каждая, 5 — слой вакуумной смазки толщиной ≈ 0.05 мм

диаметром 0.1 мм. Ее химический состав соответствует ГОСТ 492-73: 84 ÷ 85 % (по массе) меди, 11.5 ÷ 13.5 % марганца, 2.5 ÷ 3.5 % никеля + кобальта, <0.5 % железа, <0.1 % кремния, <0.03 % магния. Шунт имел форму петли, которая затем раздавливалась между двумя плоскими стальными пуансонами до толщины 0.03 мм и ширины 0.4 мм. Начальное электрическое сопротивление манганинового шунта составляло $R_0 = 1.7 \div 1.8$ Ом. Медные тоководы (медные полоски из фольги) подсоединялись к концам получившейся манганиновой ленты.

Шунт 1 (рис. 1, б) вместе с тоководами 2 располагался между тонкой фиксирующей тефлоновой пленкой 3 и одной из двух изолирующих толстых пленок 4. Воздушные зазоры в конструкции чувствительного элемента датчика, так же как и в [5–7], удалялись с помощью вакуумной смазки. Вакуумная смазка применялась и при склеивании тефлоновых пленок 3, 4 между собой и с металлическими пластинами экспериментальной сборки. Использовались отечественные вакуумная смазка (ТУ 38.401-58-172-96) и промышленные тефлоновые пленки (лента фторопластовая Ф-4 ГОСТ 24222-80 «ПН» — прокладочная неориентированная). Таким образом, манганиновый шунт оказывался помещенным в ТВС-среду с эффективным электрическим сопротивлением R_{eff} .

ТВС-слой с вмонтированным в него манганиновым шунтом (см. 1–3 на рис. 2) помещался между двумя вольфрамовыми 4, 5 и стальными пластинами 6, 7. Образовавшийся «сэндвич» нагружался ударом стальной пластины — ударника 8, разогнанного продуктами взрыва до скорости несколько километров в секунду. Использование вольфрамовых наковален в сочетании со стальными пластинами позволяет существенно увеличить максимальное давление в образце. Выбранное сочетание размеров сборки обеспечивало режим одномерного нагружения измерительной ячейки в течение времени регистрации (1 ÷ 3 мкс) ее электросопротивления.

Для измерения электросопротивления измерительной ячейки использовалась мостовая схема (см. [5]). Во время нагружения через измерительную ячейку пропускался постоянный ток $J_0 = 9.9(1)$ А от импульсного источника. В эксперименте регистрировался профиль изменения во времени t напряжения разбалансиро-

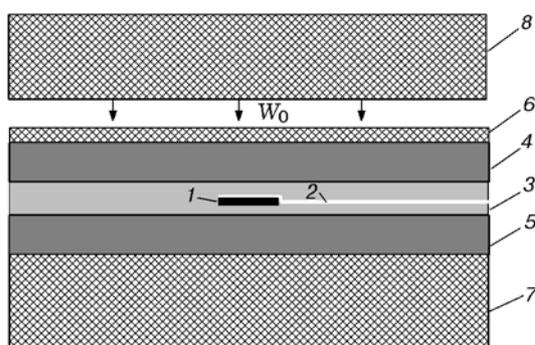


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению электропроводности при ступенчатом ударном сжатии:

1 — манганиновый шунт, 2 — медные тоководы, 3 — ТВС-среда, 4, 5 — вольфрамовые пластины толщиной 1.5 мм, 6 — пластина из нержавеющей стали толщиной 0.8 мм и диаметром 120 мм, 7 — пластина из нержавеющей стали толщиной 4.0 мм и диаметром 120 мм, 8 — ударник из нержавеющей стали (диск толщиной 3.0 мм и диаметром 60 мм), W_0 — скорость ударника

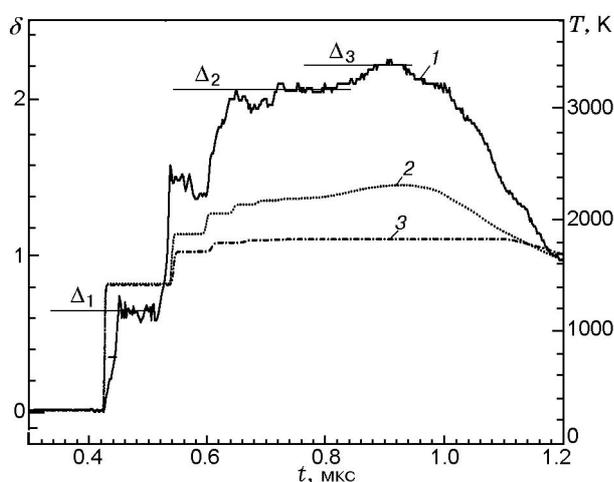


Рис. 3. Экспериментальная запись (кривая 1) относительного изменения сопротивления δ и расчетные оценочные профили температуры T для первой (кривая 2, скорость ударника 3.15 км/с) и второй (кривая 3, скорость ударника 2.6 км/с) серий экспериментов:

зависимость $\delta(t)$ в опыте соответствует скорости ударника 3.15 км/с; значения относительных изменений сопротивления $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ соответствуют значениям давления p_1, p_2, p_3 на рис. 4

ровки моста $\Delta U = \Delta U(t)$. Профили сопротивления определялись как $R = R_0 + k\Delta U$, где k — предварительно определяемый калибровочный коэффициент. Типичная экспериментальная запись в виде относительного изменения сопро-

тивления $\delta = (R - R_0)/R_0 = \Delta R(t)/R_0 = k\Delta U/R_0$ показана на рис. 3.

В этой статье мы рассматривали только стадию нагрузки в диапазоне $p \approx 20 \div 150$ ГПа. Соударение ударника с мишенями генерировало в ТВС-среде серию ударных волн p_i , определяемых реверберацией волн сжатия между стальными и вольфрамовыми пластинами и ТВС-средой. При этом измеренным значениям $\Delta_i = (R_i - R_0)/R_0$ соотносили значения p_i , рассчитанные по ударным адиабатам используемых материалов и по измеренной в специальных экспериментах скорости стальных ударников W_0 . Выполнено две серии ударно-волновых экспериментов. В первой серии мишенями служили слои сталь — вольфрам — ТВС — вольфрам — сталь, которые нагружались ударниками, разогнанными до скоростей $W_0 = 3.15(5)$ км/с. Во второй серии мишенями служили слои сталь — ТВС — сталь, нагружаемые стальными ударниками, разогнанными до скоростей $W_0 = 2.6(1)$ км/с.

Результаты расчета значений p_i ступенчатого ударного сжатия ТВС-среды приведены на рис. 4 для мишени сталь — вольфрам — ТВС — вольфрам — сталь, нагружаемой ударником со скоростью $W_0 = 3.15(5)$ км/с. Состояние S_1 с давлением p_1 возникает после волновых взаимодействий на поверхностях раздела сталь — вольфрам и вольфрам — ТВС. Состояние S_2 с давлением p_2 является результатом ревербераций ($1_t, 2_t, 3_t$ и т. д.) ударных волн в ТВС-среде между двумя вольфрамовыми пластинами (см. 4 и 5 на рис. 2). Состояние S_3 с давлением p_3 — результат ревербераций ($1_w, 2_w, 3_w$ и т. д.) ударных волн в первой вольфрамовой пластине 4 между ТВС-средой и первой стальной пластиной 6.

Толщина слоев вакуумной смазки между тефлоновыми пленками составляла ≈ 0.05 мм, что гораздо меньше толщины используемых тефлоновых пленок. Поэтому на диаграмме $p-u$ на рис. 4 реверберациями в слоях вакуумной смазки пренебрегали и считали, что ударные адиабаты ТВС-среды совпадают с ударными адиабатами тефлона.

Состояния с давлением p_4 и p_5 возникают в мишенях без вольфрамовых пластин, т. е. в ТВС-среде между двумя стальными пластинами. Как упоминалось выше и как видно на рис. 4, использование вольфрамовых наковален в сочетании со стальными пластинами позволяет при одном и том же значении W_0 увели-

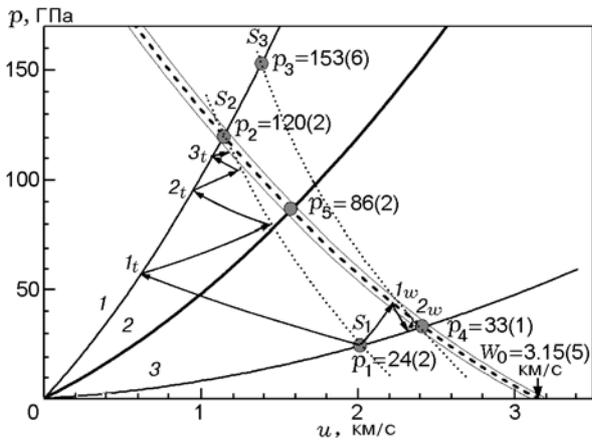


Рис. 4. Диаграмма волновых взаимодействий и расчет состояний ТВС-среды в мишени сталь — вольфрам — ТВС — вольфрам — сталь при скорости ударника $W_0 = 3.15(5)$ км/с:

1 — ударная адиабата вольфрама, $p = 19.224(4.569u + 1.4u^2)$, 2 — ударная адиабата нержавеющей стали, $p = 7.896(4.029u + 1.237u^2)$, 3 — ударная адиабата тефлона, $p = 2.204(1.846u + 1.777u^2)$ (адиабаты 1–3 взяты из [2]; штриховая линия — ударная адиабата ударника из нержавеющей стали; сплошные линии — погрешности скорости ударника; пунктирные линии — изоэнтропы разгрузки вольфрама или ударные адиабаты кратного ударного сжатия вольфрама, которые считались совпадающими с его ударной адиабатой

чить максимальное давление в образце почти вдвое.

В заключение этого параграфа отметим, что для целей данной работы, строго говоря, необходима история температуры T для того, чтобы разделить эффекты, связанные с давлением и температурой. В этой связи были проведены оценочные расчеты профилей $T(t)$ в тефлоне с использованием вычислительных приемов [13] для двух серий экспериментов, которые показаны на рис. 3 линиями 2 и 3 в том же масштабе времени, что и экспериментальный профиль $\delta(t)$. Видно, что при ступенчатом ударном сжатии основной вклад в температуру вносят первые 2 ÷ 3 ступени общей амплитудой до 50 ГПа, а затем различие температур при высоких давлениях сравнительно небольшое. То есть в первом приближении можно считать, что в данной постановке эксперимента исследуется зависимость электросопротивления образцов от давления в диапазоне $p = 50 \div 150$ ГПа при $T = 2000 \pm 300$ К.

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ТВС-СРЕДЫ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ УДАРНОМ СЖАТИИ

Полученные нами результаты по зависимости относительного сопротивления манганинового шунта от давления $\delta = \delta(p)$ представлены на рис. 5 вместе с аналогичными данными для манганиновых датчиков из [2–6]. Как видно, результаты совпадают до $p = 40 \div 60$ ГПа. Это дает основание полагать, что форма чувствительного элемента манганинового датчика, его окружение, небольшие вариации состава манганина, режим ударного сжатия слабо влияют или не влияют вообще на зависимость $\delta(p)$ в этом диапазоне динамических давлений.

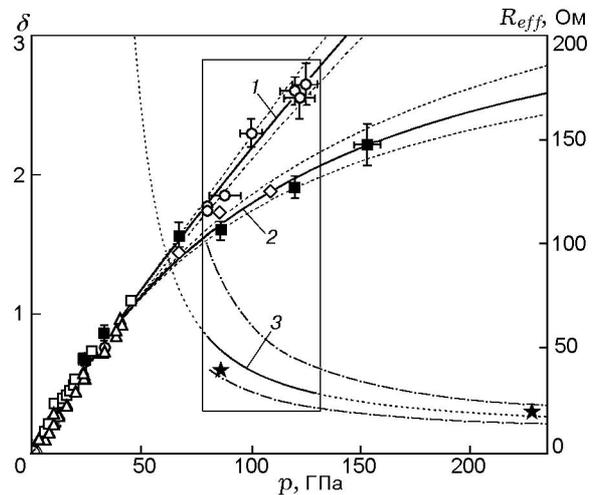


Рис. 5. Зависимость относительного изменения сопротивления манганина и эффективно-электросопротивления ТВС-среды от давления при ударном нагружении:

кружки с указанием погрешностей — данные [2, 3] для манганина в керамическом окружении, треугольники — данные [4] для манганина в тефлоновом окружении, светлые квадраты — данные [5] для манганина в ТВС-среде, ромбы — данные [6] для манганина в ТВС-среде, темные квадраты с указанием погрешности — данные настоящей работы для манганина, шунтированного ТВС-средой; 1, 2 — аппроксимация $\delta(p)$ по уравнению (2) для данных [2, 3] и настоящей работы, 3 — результаты расчета по уравнению (4) $R_{eff}(p)$ ТВС-среды; пунктирные линии около 1 и 2 — графики (2) построенные с использованием коэффициентов $\{a, b, n\}_{V_{max}}$, $\{a, b, n\}_{V_{min}}$ и $\{a, b, n\}_{T_{max}}$, $\{a, b, n\}_{T_{min}}$ соответственно, штрихпунктирные линии около 3 — оценка погрешности сопротивления R_{eff} с использованием коэффициентов $\{a, b, n\}_{V_{max}}$, $\{a, b, n\}_{T_{min}}$ (нижняя кривая) и $\{a, b, n\}_{V_{min}}$, $\{a, b, n\}_{T_{max}}$ (верхняя кривая); прямоугольник — область применимости (4); пунктирные продолжения линии 3 — экстраполяция (4) с коэффициентами из таблицы в область больших и малых давлений; звездочки — данные [13]

Однако данные [6] и наших экспериментов существенно отличаются от данных [2, 3] в диапазоне $p = 80 \div 150$ ГПа.

Как отмечалось во введении, вистал, используемый в [3], при ударном сжатии остается практически изолятором, в то время как органические материалы становятся частично проводящими. В [3] сделана поправка на проводимость используемой композиции, и поэтому данные [3] относятся к манганину в непроводящей среде. В этой связи можно предположить, что различие зависимостей $\delta(p)$ между [3] и нашими данными в диапазоне $p = 80 \div 150$ ГПа обусловлено проводимостью ТВС-среды. Предположим далее, что наши экспериментальные значения $R = R(p)$ определяются параллельным соединением проводников, одним из которых является манганиновый шунт $R_m = R_m(p)$, а вторым — ТВС с эффективным сопротивлением $R_{eff} = R_{eff}(p)$, при одном и том же значении давления p . Тогда можно записать

$$R_{eff} = \frac{RR_m}{R_m - R} \quad (1)$$

и выразить R_{eff} в виде функции $R_{eff} = R_{eff}(p)$ с помощью данных, представленных на рис. 5. Для этого заметим, что экспериментальные значения $\delta(p)$ могут быть с хорошей точностью аппроксимированы эмпирическим выражением

$$\delta = \frac{ap^n}{b + p^n}, \quad (2)$$

где a, n — безразмерные подгоночные параметры, b — подгоночный параметр с размерностью p^n , p — давление, ГПа. Отметим, что соотношение (2) предпочтительнее традиционных многочленов в том отношении, что позволяет легко записать обратную функцию, которая может использоваться как калибровка манганина в различных, частично проводящих средах:

$$p = \left(\frac{b\delta}{a - \delta} \right)^{1/n}. \quad (3)$$

Наши результаты и данные [4–6] были использованы для определения подгоночных параметров a, b, n в (2) для манганина, шунтированного ТВС-средой, а данные [3, 4] — для определения подгоночных параметров a, b, n для манганина, находящегося в непроводящей

Подгоночные параметры для калибровочных зависимостей $\delta(p)$ манганина (2) в проводящей (ТВС) и непроводящей (вистал) средах

Материал изоляционной среды	a	$b, (\text{ГПа})^n$	n
ТВС	3.6	178	1.13
Вистал	53	1 610	0.92

среде. Округленные значения подгоночных параметров представлены в таблице. Аппроксимация экспериментальных данных с помощью (2) показана на рис. 5 линией 1 для манганина и линией 2 для манганина, шунтированного ТВС-средой.

Обозначим далее величины, относящиеся к манганину в непроводящей среде и к манганину, шунтированному ТВС-средой, индексами 1 и 2 соответственно. Тогда при одном и том же давлении сопротивление манганина будет равно $R_m = R_{01}(1 + \delta_1)$, а сопротивление манганина, шунтированного ТВС-средой, — $R = R_0(1 + \delta_2)$. Очевидно, можно выбрать $R_{01} = R_0$, и тогда в согласии с (1) эффективное сопротивление ТВС-среды можно выразить как

$$R_{eff} = R_0 \frac{(1 + \delta_1)(1 + \delta_2)}{\delta_1 - \delta_2}. \quad (4)$$

График уравнения (4) со значениями констант a, b, n из таблицы показан на рис. 5 кривой 3. Величина R_{eff} при $p = 150$ ГПа равна 25 Ом, что близко к электросопротивлению тефлоновой пленки из [11].

Обсудим погрешность сопротивления композита R_{eff} (4), используя обычную процедуру оценки погрешности косвенных измерений. Для этого найдем, как и выше, значения коэффициентов $\{a, b, n\}_{V \max}$, $\{a, b, n\}_{V \min}$ и $\{a, b, n\}_{T \max}$ и $\{a, b, n\}_{T \min}$ кривых, проходящих через максимальные и минимальные значения сопротивления манганина в изолирующей среде (индекс V) и в ТВС-среде (индекс T): $\{a = 63.43, b = 2409.88 (\text{ГПа})^n, n = 0.98\}_{V \max}$, $\{a = 30.19, b = 978.31 (\text{ГПа})^n, n = 0.933\}_{V \min}$ и $\{a = 4.07, b = 195.48 (\text{ГПа})^n, n = 1.11\}_{T \max}$, $\{a = 3.19, b = 170.88, (\text{ГПа})^n, n = 1.16\}_{T \min}$. Графики соотношения (2) с этими коэффициентами показаны на рис. 5 пунктирными линиями около кривых 1 и 2. Эти линии образуют две полосы значений сопротивления манганина в изолирующей среде и композите. Полосы практически неразличимы в диапазоне давле-

ний $p = 0 \div 80$ ГПа. Это означает, что эмпирическая функция $\delta(p)$ для манганина в непроводящей среде $\delta_1(p)$ в пределах экспериментальных погрешностей неотличима от зависимости $\delta_2(p)$ в проводящей среде. Поэтому вычисления по (4), где в знаменателе стоит разность $\delta_1(p)$ и $\delta_2(p)$ в диапазоне $p = 0 \div 80$ ГПа, имеют неопределенные значения — формальное применение формулы (4) дает значение сопротивления R_{eff} , стремящееся к бесконечности.

Полосы погрешностей около линий 1 и 2 начинают расходиться лишь при $p \approx 80$ ГПа и выше. Поэтому область применимости (4) ограничена снизу значением 80 ГПа. За пределами этого давления можно сделать определенные достоверные оценки сопротивления ТВС-среды. Действительно, в этой области использование наборов $\{a, b, n\}_{V \max}$ и $\{a, b, n\}_{T \min}$ в формуле (4) дает нижнюю границу значений R_{eff} , а использование наборов $\{a, b, n\}_{V \min}$ и $\{a, b, n\}_{T \max}$ — верхнюю границу для R_{eff} . Полоса между этими границами (штрихпунктирные линии около кривой 3 на рис. 5) есть область оценок погрешности сопротивления ТВС-среды в зависимости от давления.

Очевидно, область применимости (4) по давлению ограничена сверху диапазоном экспериментальных данных для манганина из [3], т. е. давлением 130 ГПа. Таким образом, в целом область применимости (4) находится в пределах прямоугольника, показанного на рис. 5 тонким контуром. За пределами этого прямоугольника лежит область экстраполяции обобщаемого соотношения для R_{eff} .

Заметим, что на нижней границе области применимости соотношения (4) при $p = 80$ ГПа минимальное значение электросопротивления ТВС-среды составляет ≈ 42 Ом, а на верхней границе (4) при $p = 130$ ГПа — ≈ 22 Ом. Таким образом, точность определения сопротивления ТВС-среды позволяет обозначить требование к исследуемым образцам, а именно: ТВС-среда может быть использована в качестве изолятора при условии, что электросопротивление исследуемых образцов в процессе ступенчатого ударного сжатия в области давлений $80 \div 130$ ГПа остается гораздо меньше 20 Ом.

Обсудим результаты измерения электросопротивления ТВС-среды из [13] (представлены звездочками на рис. 5). Видно, что максимальные давления в [13] лежат на 100 ГПа выше верхней границы области применимости

(4). Тем не менее на рис. 5 видно, что результаты прямого измерения электросопротивления ТВС-среды как при $p \approx 90$ ГПа, так и в области экстраполяции при $p \approx 230$ ГПа согласуются с оценками по формуле (4). Этот факт свидетельствует в пользу достоверности полученного соотношения для электросопротивления ТВС-среды в области мегабарных давлений ступенчатого ударного сжатия.

Наконец, остановимся на погрешностях для коэффициентов $\{a, b, n\}$ (см. таблицу). В качестве погрешностей может быть взята разница между наборами $\{a, b, n\}_{V \max}$, $\{a, b, n\}_{V \min}$ и $\{a, b, n\}_{T \max}$, $\{a, b, n\}_{T \min}$, найденными выше. Тогда округленные значения коэффициентов и их погрешностей составят: $a = 3.6(5)$, $b = 178(20)$ (ГПа)ⁿ, $n = 1.13(3)$ для ТВС и $a = 53(20)$, $b = 1610(800)$ (ГПа)ⁿ, $n = 0.92(15)$ для вистала. Видно, что погрешности достигают $50 \div 60$ %. Вместе с этим можно полагать, что значения коэффициентов из таблицы определяют оптимальные зависимости $\delta(p)$ (2) или $p(\delta)$ (3). Действительно, на рис. 6 представлен профиль давления, найденный по осциллограмме 1 рис. 3 с использованием в формуле (3) коэффициентов из таблицы, а также профиль давления, рассчитанный для этого конкретного эксперимента. Во всем диапазоне давлений $20 \div 150$ ГПа оба профиля совпадают в пределах $5 \div 20$ %. Таким образом, можно по-

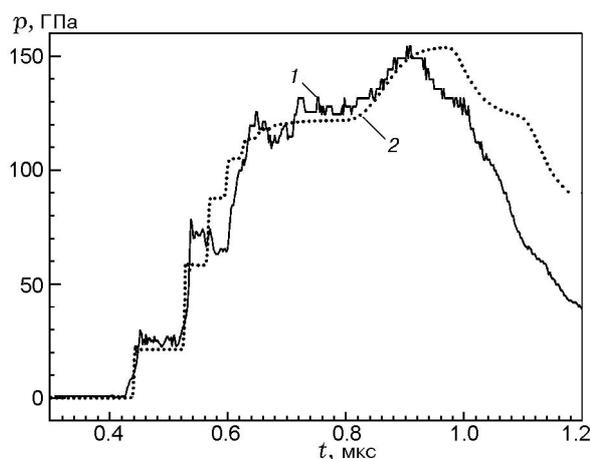


Рис. 6. Сопоставление экспериментального и расчетного профилей давления в ТВС-среде:

1 — получен путем обчета экспериментальной осциллограммы рис. 3 по формуле (3) с коэффициентами из таблицы, 2 — рассчитан в рамках газодинамического вычислительного кода для этого конкретного эксперимента

лагать, что погрешность приведенных в таблице коэффициентов не превышает 20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментов, в которых определено эффективное сопротивление полимерной изоляционной ТВС-композиции (тефлоновой пленки и вакуумной смазки) в условиях ступенчатого ударного сжатия при $p \leq 130$ ГПа. Предложено новое функциональное соотношение для калибровочной зависимости манганинового датчика в различных изоляционных средах. Предложено соотношение для оценки сопротивления ТВС-композиции при высоких динамических давлениях. Обозначено условие использования ТВС-среды в качестве изолятора в экспериментах по измерению электропроводности материалов в мегабарном диапазоне давлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weir S. T., Mitchell A. C., Nellis W. J. Electrical resistivity of single-crystal Al_2O_3 shock-compressed in the pressure range 91–220 GPa (0.91–2.20 Mbar) // J. Appl. Phys. — 1996. — V. 80, N 3. — P. 1522–1525.
2. High-Pressure Shock Compression of Solids / R. Asay, M. Shahinpoor (Eds). — New York: Springer, 1993. — P. 63.
3. De Carli P. S., Erlich D. C., Hall L. B., Bly R. G., Whitson A. L., Curran D. R. Stress-gauge system for the megabar (100 GPa) range // Defense Nuclear Agency Report N DNA 4066F. — 1976.
4. Vantine H. C., Erickson L. M., Janzen J. A. Hysteresis-corrected calibration of manganin under shock loading // J. Appl. Phys. — 1980. — V. 51. — P. 1957–1962.
5. Канель Г. И. Применение манганиновых датчиков для измерения давлений ударного сжатия конденсированных сред / ИПВХ. — М., 1973. — Деп. в ВИНТИ. — № 477-74.
6. Постнов В. И. Использование манганиновых датчиков для измерения давления на уровне одного мегабара // Нестационарные проблемы гидродинамики. — 1980. — Вып. 48. — С. 116–118.
7. Ананьин А. В., Дремин А. Н., Канель Г. И. Полиморфное превращение железа в ударной волне // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 3. — С. 93–102.
8. Кулешова Л. В. Электропроводность нитрида бора, хлористого калия и фторопласта-4 за фронтом ударной волны // Физика твердого тела. — 1969. — Т. 11, вып. 5. — С. 1085–1091.
9. Champion A. R. Effect of shock compression on electrical resistivity of three polymers // J. Appl. Phys. — 1972. — V. 43. — P. 2216–2220.
10. Таржанов В. И., Жугин Ю. Н., Крупников К. К. Электропроводность политетрафторэтилена при нагружении ударными волнами и разгрузке // ПМТФ. — 1997. — Т. 38, № 6. — С. 16–22.
11. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Электроизоляционные свойства фторопластовых прокладок при динамическом сжатии // Физика горения и взрыва. — 1990. — Т. 26, № 4. — С. 124–129.
12. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Электросопротивление политетрафторэтилена при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 6. — С. 127–133.
13. Golyshev A. A., Shakh-ray D. V., Kim V. V., Molodets A. M., Fortov V. E. High-temperature resistivity of shocked liquid sodium at pressures up to 230 GPa // Phys. Rev. B. — 2011. — V. 83. — 094114.

Поступила в редакцию 21/І 2012 г.,
в окончательном варианте — 19/VI 2012 г.