

06

Деформационная составляющая электросопротивления тонких вольфрамовых образцов при высоких давлениях ударного нагружения

© А.М. Молодец, А.А. Голышев, В.В. Ким

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: molodets@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2025 г.

В окончательной редакции 14 декабря 2025 г.

Принято к публикации 19 декабря 2025 г.

Измерено электросопротивление вольфрамовых образцов при ударно-волновом нагружении до 15 GPa. Выполнен анализ и проведено моделирование эксперимента с учетом объемно-температурной и деформационной составляющей электросопротивления вольфрама. Рассмотрена связь между избыточным электросопротивлением деформационной составляющей и характеристиками абсолютной скорости деформации вольфрама при плоском одномерном нагружении.

Ключевые слова: электросопротивление, вольфрам, уравнения состояния, ударные волны, деформация, скорость деформации, гидрокод.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62661.266-25

Введение

Как известно, измерение электросопротивления ударно-сжатых материалов широко используется в исследованиях разнообразных процессов и эффектов, сопутствующих ударно-волновому нагружению конденсированных сред. Применительно к металлам такими эффектами являются полиморфные превращения, переход металл-диэлектрик и диэлектрик-металл, объемно-температурные зависимости удельной электропроводности и др. (см. [1–3] и библиографию в них).

Обычно измерение электросопротивления ударно-сжатых металлов проводится в условиях плоского одномерного сжатия с использованием тонких фольговых образцов, расположенных параллельно фронту ударной волны. Металлические образцы располагаются между слоями изолятора, жесткость которого, как правило, отличается от жесткости исследуемого металла. В ситуации, когда толщина образца оказывается гораздо меньше толщины изолятора, а жесткость, наоборот, существенно превышает жесткость изолятора, история нагружения образца содержит циклическую составляющую, обусловленную реверберацией волн сжатия и разгрузки в образце (см. [1,4]). Если же, кроме этого, амплитуды ударных волн существенно превышают предел текучести исследуемого металла, то на этапе циклического нагружения образец подвергается высокоскоростной пластической деформации, которая стимулирует дефектообразование в металле и тем самым необратимо увеличивает электросопротивление металлического образца. Таким образом, измерения электросопротивления ударно-сжимаемых тонких металличе-

ских образцов в окружении мягкого изолятора может содержать помимо обратимой объемно-температурной составляющей еще и необратимую деформационную составляющую электросопротивления, обусловленную дефектообразованием во время высокоскоростной пластической деформации.

Экспериментальные исследования эффекта и величины деформационной составляющей электросопротивления металлов непосредственно во время их ударно-волнового нагружения ведутся с 1980 гг. (см. [5] и библиографию в ней). Однако следует отметить, что экспериментальные значения электросопротивления в этих работах анализируются на основе их барической зависимости. Представляется, что в логике вышеописанной схемы возникновения деформационной составляющей электросопротивления предпочтительнее опираться на зависимость избыточного электросопротивления не от давления, а от деформации. В этом контексте цель настоящей работы заключалась в нахождении связи между избыточным электросопротивлением тонких вольфрамовых образцов и характеристиками их деформации при плоском одномерном нагружении.

Выбор вольфрама в качестве модельного материала обусловлен его малой сжимаемостью, минимизирующей разогрев и, следовательно, отжиг дефектов в течение ударного сжатия, а также тем, что реологическое поведение вольфрама при плоских одномерных нагрузках может быть с удовлетворительной точностью представлено идеальной упругопластической моделью (см. [6] и библиографию в ней).

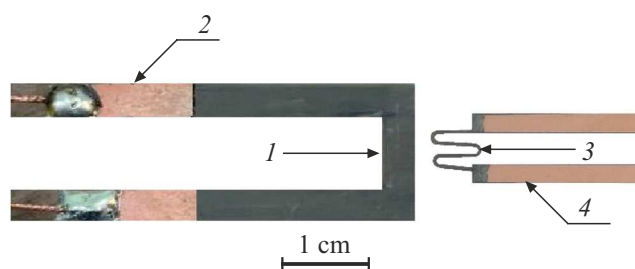


Рис. 1. Измерительная ячейка. 1 — П-образный вольфрамовый образец толщиной $h_0 = 0.052$ mm, 2 — обмедненные тоководы, 3 — чувствительный элемент манганинового датчика давления толщиной 0.035 mm, 4 — медные тоководы толщиной 0.015 mm.

1. Образцы и измерительная ячейка

Образцы для ударно-волновых исследований изготавливались из вольфрамовой фольги марки ВА толщиной 0.05 mm. Согласно техническим условиям ТУ 48-19-188-91, химический состав этой фольги в массовых процентах определяется следующими значениями: $W \geq 99.931\%$, $Al \leq 0.002\%$, $Fe \leq 0.009\%$, $Ni \leq 0.004\%$, $Ca \leq 0.010\%$, $Si \leq 0.004\%$, $Mo \leq 0.40\%$. Из листа фольги механически вырезался ленточный образец 1 (рис. 1). К обмедненным концам образца 2 припаивались сигнальный провод и земляная оплетка высокочастотного кабеля РК-75. Толщина вольфрамовых образцов составляла $h_0 = 0.050(1)$ mm, их ширина составляла $a_0 \approx 1-4.0$ mm.

Плоскость ленточного образца располагалась параллельно плоскости фронта ударной волны. В этой же плоскости располагалась измерительная ячейка манганинового датчика 3, 4, т.е. ячейка манганинового датчика представляла собой фактически аналог измерительной ячейки образца, в которой вольфрамовый образец заменен ленточным образцом манганина.

Начальные электрические сопротивления R_0 вольфрамовых и манганиновых образцов измерялись предварительно для каждого эксперимента и составляли для вольфрама $R_0 \approx 0.025(1) \Omega$ и для манганина $\approx 1.5 \Omega$.

2. Генератор ступенчато-циклического ударно-волнового нагружения и сохранения образцов

В настоящей работе использовался генератор ступенчато-циклического ударно-волнового нагружения, схема которого показана на рис. 2, а. Подробное описание работы этого генератора представлено в [4,7]. Вкратце оно заключается в следующем. Металлический плоский ударник 1 разгоняется взрывным устройством до скорости W_0 . В результате соударения ударника 1 с мишенью 2-4 тефлоновый изолятор 3 подвергается ступенчатому ударному сжатию до гигапаскальных

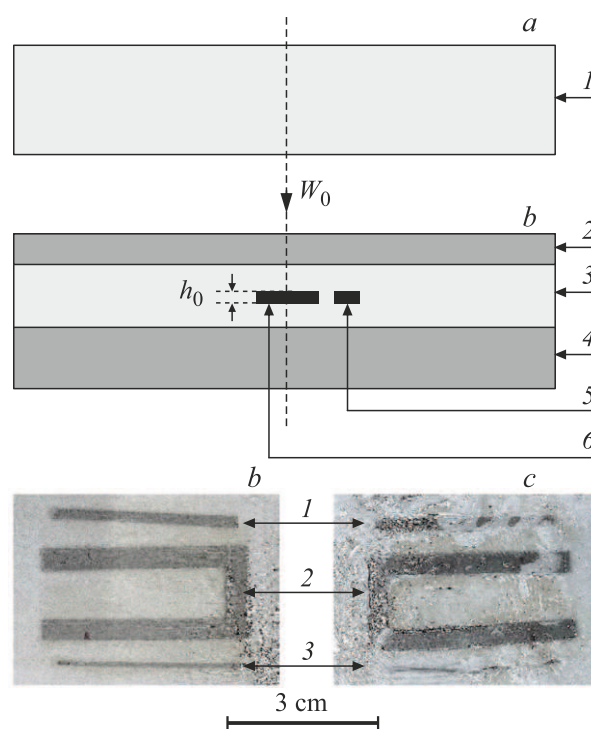


Рис. 2. Генератор ступенчато-циклического ударно-волнового нагружения. а — 1 — пластинчатый алюминиевый ударник толщиной 7.0 mm со скоростью $W_0 = 1.05$ km/s, 2 — стальная (сталь 18-8) пластина толщиной 1.97 mm, 3 — набор тефлоновых пленок с общей толщиной 1.22 mm, 4 — стальная пластина толщиной 3.77 mm, 5 — манганиновый датчик давления, б — вольфрамовый образец; в — образцы вольфрамовой фольги до нагружения; с — образцы, испытавшие ступенчато-циклическое ударно-волновое нагружение; 1, 3 — вольфрамовые полоски толщиной 0.05 mm, 2 — копия вольфрамового П-образца толщиной 0.05 mm.

давлений. В изоляторе 3 размещен манганиновый датчик давления 5. В этой же плоскости расположен ленточный образец вольфрама 6. Поочередный приход каждой ступени сжатия на датчик 5 и образец 6 сопровождается синхронной реверберацией в них затухающих волн сжатия и разгрузки. Так как толщины образцов выбраны гораздо меньше толщины изолятора, а жесткость металлов существенно превышает жесткость тефлона, то фронт каждой ступени ударного сжатия содержит высокочастотную циклическую составляющую, обусловленную реверберацией волн сжатия и разгрузки в образце. После прихода волн разгрузки с тыльной стороны ударника 1 или со свободной поверхности пластины 4 давление в датчике 5 и образце 6 синхронно уменьшается до нулевых значений.

Этот генератор использовался в идентичном отдельном опыте по сохранению образцов. В этом эксперименте рядом с П-образным образцом вместо манганинового датчика размещались полоски вольфрамовой фольги, вырезанные из близлежащих участков П-образца (рис. 2, в). Изготовленный идентичный аналог слоистой

мишени 2–6 (рис. 2, *a*) скреплялся четырьмя металлическими болтами и помещался на толстую (50 мм) железную плиту.

Вольфрамовые полоски 1, 3 и П-образец 2 до нагружения (рис. 2, *b*) и после взрывного нагружения, сохранения и разборки слоистой мишени показаны на рис. 2, *c*. Размеры и электрические сопротивления сохраненных образцов измерялись для последующего сопоставления с их значениями до взрывного нагружения. Результаты оказались следующими. Изменения линейных размеров, т.е. деформаций в плоскости ударной волны, не превышали 1%. Изменения толщин, т.е. деформаций вдоль распространения ударной волны, также не превышали 1%. Электросопротивление вдоль полосок R_{sh} увеличилось не более, чем на 5(3)%, т.е. $R_{sh} \leq 1.05(3)R_0$. В качестве погрешности указано отклонение от среднего арифметического.

3. Профили электросопротивления ударно-сжимаемых образцов вольфрама

Измерения электросопротивления образца и манганина проводились по двухточечной схеме с использованием моста Уитстона, содержащего соответствующую измерительную ячейку (рис. 1) в качестве измеряемого сопротивления. Во время взрывного эксперимента вдоль ленточных образцов вольфрама и манганина пропускались постоянные токи $J_0 = 3.0(1)$ А от независимых источников тока. Измерялись профили (зависимости от времени t) изменения напряжения разбалансировки моста $\Delta U = \Delta U(t)$, которые регистрировались высокочастотным осциллографом Tektronix DPO4104В. Профили $\Delta U(t)$ пересчитывались в изменения электросопротивления по формуле $\Delta R = k\Delta U$, где k — предварительно определяемый калибровочный коэффициент. Экспериментальный профиль электросопротивления образца $R = R(t)$ вычислялся как $R = R_0 + \Delta R$, где R_0 — его начальное электросопротивление. Результаты оптимального эксперимента приведены в виде профилей электросопротивлений манганинового образца 1 на рис. 3, *a* и профили вольфрамового образца 1 на рис. 4, *a*.

Кроме этого, в отдельном эксперименте с идентичной постановкой был измерен профиль электросопротивления ленточного образца вольфрама по четырехточечной схеме, в которой исключалось электросопротивление тоководов. Этот профиль обозначен цифрой 4 на рис. 4, *a*.

4. Моделирование электросопротивления образцов вольфрама при высоких динамических давлениях

Предполагалось, что экспериментальные профили электросопротивления вольфрамовых образцов

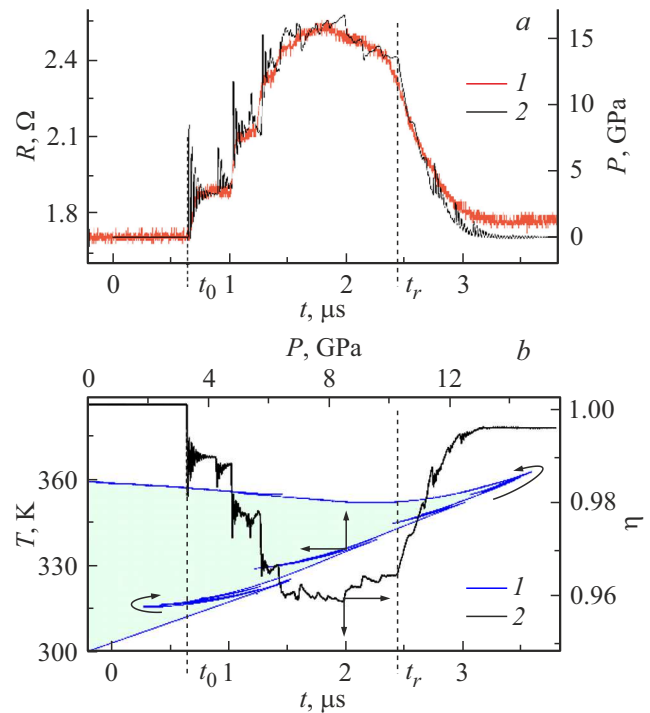


Рис. 3. История (зависимость от времени t) объемно-температурного состояния металлических образцов в условиях ступенчато-циклического ударного сжатия и последующей разгрузки. *a* — 1 — экспериментальная запись электросопротивления R манганинового датчика при ступенчатом ударном сжатии и разгрузке, 2 — модельный профиль давления P в вольфрамовом образце, t_0 — момент прихода первой ударной волны, t_r — момент прихода первой характеристики волны разгрузки; *b* — 1 — история термодинамического состояния вольфрама в координатах давление (P) — температура (T) при сжатии и разгрузке (округлыми стрелками обозначена последовательность PT -состояний во времени), 2 — относительное изменение толщины $\eta = h/h_0$, h — текущее значение толщины вольфрамового образца h_0 — начальная толщина образца.

при высоких динамических давлениях определяются двумя составляющими. Первая составляющая обусловлена свойством металла в виде обратимой объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления вольфрама. Вторая, деформационная составляющая обусловлена увеличением электросопротивления, обусловленного дефектообразованием во время высокоскоростной пластической деформации.

Объемно-температурные зависимости удельного электросопротивления вольфрама при высоких динамических давлениях были реконструированы на основе литературных данных в условиях высоких гидростатических давлений и температур. Закономерности деформационной составляющей были реконструированы в рамках феноменологической модели на основе полученных экспериментальных профилей электросопротивления вольфрамовых образцов.

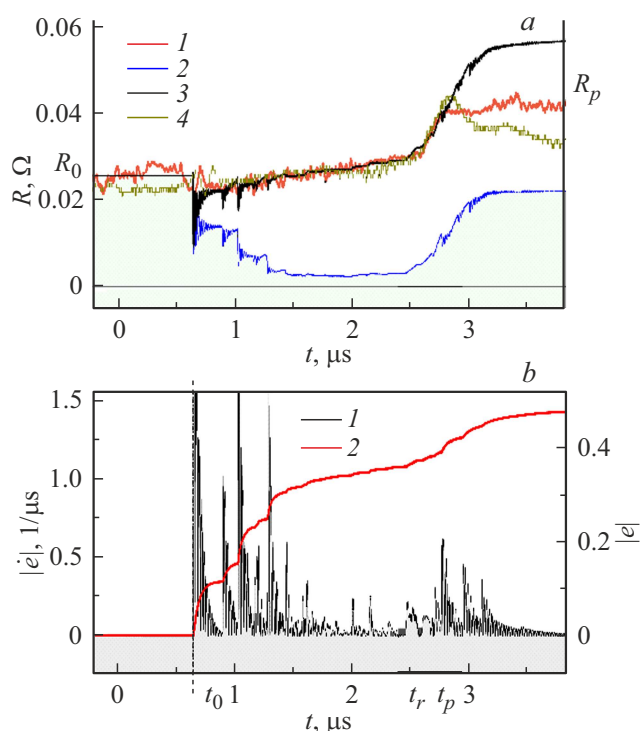


Рис. 4. Объемно-температурная и деформационная составляющие электросопротивления тонкого вольфрамового образца при ступенчато-циклическом сжатии. *a* — 1 — экспериментальный профиль $R = R(t)$ электросопротивления вольфрамового образца, измеренный по двухточечной схеме, 2 — модельный профиль объемно-температурной составляющей электросопротивления $R_1 = R_1(t)$ (5), 3 — суммарный модельный профиль $R_{mod} = R_{mod}(t)$ электросопротивления вольфрамового образца (7), 4 — профиль электросопротивления ленточного образца вольфрама, измеренный по четырехточечной схеме; *b* — 1 — абсолютная величина скорости деформации образца, 2 — интеграл по времени абсолютной величины скорости деформации образца; t_0 и t_r те же, что и на рис. 3, t_p — момент резкого диссонанса модели и эксперимента.

4.1. Моделирование термодинамического состояния вольфрама в условиях ступенчато-циклического ударно-волнового нагружения

Моделирование термодинамического состояния вольфрама в составе экспериментальной схемы рис. 2 осуществлялось в специально разработанном одномерном гидрокоде, в котором входные данные представляют собой толщины пластин проведенного эксперимента, их уравнения состояния и скорость ударника W_0 . Для манганина использовались уравнения состояния этого сплава из [7]. Уравнения состояния вольфрама взяты из [8]. Термическое уравнение состояния и его параметры для вольфрама приведены в Приложении. В гидрокоде учитывалось реологическое поведение вольфрама в рамках модели идеального упруго-пластического твердого тела с параметрами из [6]. Исследуемый образец моделиро-

вался пластиной с начальной толщиной h_0 , поскольку ширина ленточного вольфрамового образца a_0 на порядок превышала величину h_0 .

Выходными результатами гидрокода являются термодинамические состояния любой лагранжевой частицы каждой пластины многослойной мишени взрывного генератора при плоском одномерном ударно-волновом нагружении. Модельные результаты выводятся в форме зависимостей от времени (профилей) давления $P(t)$, температуры $T(t)$ и удельного объема $V(t)$ для выбранной частицы. На рис. 3, *a* графиком 2 показан модельный профиль давления $P(t)$ для вольфрамового образца конкретного оптимального эксперимента. Исключение времени из расчетных профилей $P(t)$ и $T(t)$ дает фазовую траекторию (термодинамическую историю) $T(P)$ в координатах давление–температура в каждом эксперименте. На рис. 3, *b* графиком 1 показана фазовая траектория ступенчато-циклического сжатия в эксперименте с заданным значением $W_0 = 1.05$.

Величина скорости W_0 алюминиевого ударника в экспериментах, выполненных по схеме рис. 1, уточнялась при моделировании конкретного эксперимента на основе экспериментальных показаний манганинового датчика. Для этого электросопротивление манганинового датчика, например, профиль 1 на рис. 3, *a* преобразовывался традиционным способом (см. [7]) в профиль давления. Затем с помощью гидрокода рассчитывалась серия модельных профилей давления в манганине, полученных при нескольких значениях $W_0 \sim 1.0$ km/s, и выбиралось оптимальное значение W_0 , при котором модельный профиль давления совпадал с экспериментом. Для рассматриваемого далее эксперимента величина W_0 составила $W_0 = 1.05(1)$ km/s. Это значение было использовано при расчете фазовой траектории 1 на рис. 3, *b*, что позволяет обозначить экспериментально исследованную область фазовой диаграммы вольфрама до температур 360 К и давлений до 15 GPa.

4.2. Моделирование объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления вольфрама и электросопротивления вольфрамового образца

Подобно [4] объемно (V) — температурная (T) зависимость удельного электросопротивления $\rho = \rho(V, T)$ моделировалась в виде произведения начального удельного электросопротивления ρ_0 при нормальных условиях и двух функций: объемной составляющей $\varphi = \varphi(V)$ и температурной составляющей $\epsilon = \epsilon(T)$.

В качестве начального удельного электросопротивления взята рекомендуемая в [9] величина $\rho_0 = 5.28 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. В качестве объемной составляющей $\varphi = \varphi(V)$ взята степенная функция, используемая в [4]:

$$\varphi = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{n/3} \left(\frac{v_0 - V}{v_0 - V_0}\right)^{-2n}, \quad (1)$$

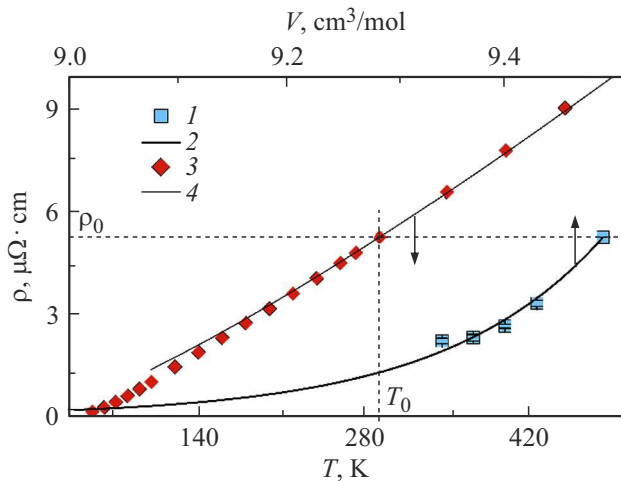


Рис. 5. Объемная (V) и температурная (T) составляющие удельного электросопротивления ρ вольфрама. 1 — экспериментальная изотерма $\rho(V)$ до давлений 5 ГПа при температуре 298 К [10], 2 — график модельной функции (1), включая область малых объемов (высоких давлений до 15 ГПа), 3 — рекомендуемая температурная зависимость ρ при атмосферном давлении из [9], 4 — график модельной функции (2).

где ν_0 — индивидуальный параметр металла, V_0 — его удельный объем при комнатной температуре T_0 и атмосферном давлении P_0 . Параметры ν_0 и V_0 являются известными параметрами уравнений состояния. Для вольфрама они взяты из [8]. Параметр n является подгоночным и может быть определен на основе экспериментальных данных по удельному электросопротивлению вольфрама при температуре 298 К в диапазоне давлений 2–5 ГПа из [10]. Для целей настоящей работы барическая зависимость ρ из [10] была пересчитана в зависимость $\rho = \rho(V)$ с помощью термического уравнения состояния. Эти пересчитанные данные представлены квадратами 1 на рис. 5. Величина n находилась методом наименьших квадратов исходя из требования наилучшего совпадения модельного графика 1 (рис. 5) и экспериментального массива $\rho = \rho(V)$. Значение n и коэффициент детерминации R^2 оказались следующими: $n = 48.5(2.7)$ и $R_2 = 0.97606$. Взаиморасположение эксперимента 1 и модельного графика 2 свидетельствует, что в диапазоне давлений до 5 ГПа график 2 согласуется с экспериментальными результатами 1 из [10].

Для температурной составляющей электросопротивления вольфрама принята эмпирическая степенная функция

$$\epsilon = \rho_0(T/T_0)^\alpha, \quad (2)$$

где значения $\rho_0 = 5.28 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ и $T_0 = 293.15 \text{ K}$ приняты в согласии с их значениями, рекомендуемыми для вольфрама при нормальных условиях в [9]. Значение подгоночного параметра $\alpha = 1.2410(5)$ найдено с использованием ρ массива 3 (рис. 5) рекомендуемых значений вольфрама из этой же статьи [9]. Аппроксимация атмосферной изобары удельного электросопротивления

вольфрама функцией (2) обозначена цифрой 4 на рис. 5, дает значения $\alpha = 1.2410(5)$. Это значение вместе с коэффициентом детерминации $R_2 = 0.99992$ найдено методом наименьших квадратов. Как видно, график 4 согласуется с результатами [9] в диапазоне температур 200–450 К.

Таким образом, с учетом (1) и (2) модельное соотношение $\rho = \rho(V, T)$ для объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления вольфрама

$$\rho = \rho_0 \phi \epsilon \quad (3)$$

согласуется с экспериментом при давлениях до 5 ГПа и при температурах 200–450 К. Комплект параметров (3) для объемно-температурной зависимости электросопротивления вольфрама представлен в табл. 1.

Заметим, что на основе (3) выражение для объемно-температурной составляющей электросопротивления ударно-сжимаемого образца в условиях плоского одномерного сжатия может быть сформулировано в виде

$$R = \left(\frac{R_0}{\eta} \right) \phi \epsilon, \quad (4)$$

где R_0 — начальное электросопротивление образца при нормальных условиях, знаменатель $\eta = \eta(t) = h(t)/h_0$ учитывает изменение толщины h плоского образца при плоской одномерной деформации. Остальные множители в (4) те же, что и в соотношении (3). Подстановка полученных выше модельных профилей температуры $T = T(t)$, объема $V = V(t)$ и относительной толщины образца $\eta = \eta(t)$ дает модельный профиль объемно-температурной составляющей электросопротивления ударно-сжимаемого образца $R_1 = R_1(t)$:

$$R_1 = \left(\frac{R_0}{\eta(t)} \right) \phi(t) \epsilon(t). \quad (5)$$

Для обсуждаемого в настоящей работе эксперимента профиль $R_1 = R_1(t)$ показан графиком 2 на рис. 4, а.

4.3. Моделирование деформационной составляющей тонких образцов вольфрама при ступенчато-циклическом ударно-волновом нагружении

В используемом гидрокоде предусмотрено также вычисление деформационных характеристик образца как целого. То есть наряду с профилями термодинамических переменных выходные результаты гидрокода сохранили, во-первых, упомянутую выше зависимость от времени относительной толщины образца в виде профиля $\eta = h(t)/h_0$. Во-вторых, в гидрокоде вычислялась скорость деформации образца как $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}(t) = (d\eta/dt)/\eta$, ее абсолютная величина $|\dot{\epsilon}|$ и, наконец, интеграл по времени от абсолютной величины скорости деформации образца $|e| = |e(t)| = \int |\dot{\epsilon}| d\tau$ в пределах $t_0 < \tau < t$. Профили η , $|\dot{\epsilon}|$ и $|e|$ для вольфрамового образца обозначены

Таблица 1. Коэффициенты модельных функций для электро- и теплофизических свойств вольфрама, используемых в настоящей работе

ρ_0 , $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	T_0 , К	V_0 , cm^3/mol	ν_0 , cm^3/mol	n	α	z
5.28	293.15	9.491	28.41	48.5(2.7)	1.2410(5)	2.9

соответственно цифрой 2 на рис. 3, *b* и цифрами 1, 2 на рис. 4, *b*.

Располагая этими характеристиками, можно сформулировать, а затем в сочетании с экспериментальными профилями $R = R(t)$, верифицировать простейшую феноменологическую модель деформационной составляющей электросопротивления R_z . Действительно, предположим, что скорость увеличения электросопротивления \dot{R}_z образца пропорциональна начальному электросопротивлению R_0 , а также скорости деформации ϵ образца как при его сжатии, так и при разгрузке. Иными словами, предположим, что $\dot{R}_z = zR_0|\dot{\epsilon}|$, где z — свободный параметр, $|\dot{\epsilon}|$ — абсолютная скорость деформации образца. В интегральном виде это предположение имеет вид

$$R_z = zR_0|\epsilon| \quad (6)$$

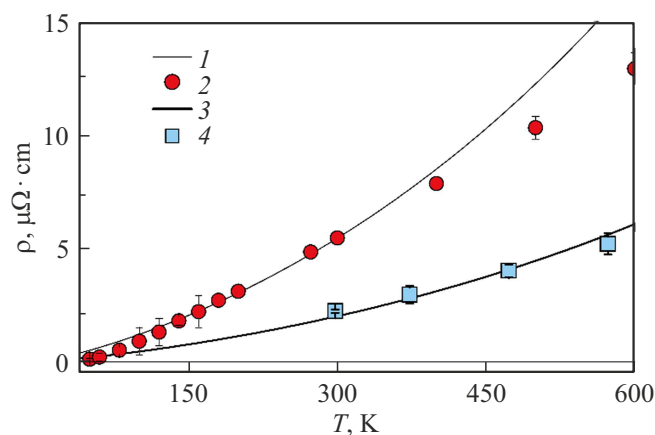
и соответственно суммарный модельный профиль $R_{mod} = R_{mod}(t)$ электросопротивления образца, включающий объемно-температурную (5) и деформационную (6) составляющие, рассчитывается по формуле

$$R_{mod} = \left(\frac{R_0}{\eta}\right)\varphi\epsilon + zR_0|\epsilon|, \quad (7)$$

где $\eta = \eta(t)$, $\varphi = \varphi(t)$, $\epsilon = \epsilon(t)$, $|\epsilon| = |\epsilon(t)|$ являются выходными данными гидрокода в виде профилей, рассмотренных в этом и предыдущих разделах. На рис. 4, *a* графиком 3 представлен профиль $R_{mod} = R_{mod}(t)$ (7), рассчитанный со значением $z = 2.9$.

В табл. 1 представлен полный комплект параметров для (7).

В заключение этого раздела отметим целесообразность использования интеграла абсолютной скорости деформации в качестве оптимальной характеристики деформационной составляющей электросопротивления. Упрощенные альтернативные формы для R_z (6), например зависимость от величины или скорости деформации, могут быть использованы, если ограничиться изменением электросопротивления образца при однократном ударном сжатии. Однако при этом для согласования модельного и экспериментального профилей электросопротивления на всем протяжении ударного сжатия и последующей разгрузки приходится вводить дополнительные подгоночные параметры. Поэтому в нашем случае предпочтительной оказывается прямо пропорциональная зависимость (6) электросопротивления от

**Рис. 6.** Объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления $\rho = \rho(V, T)$. 1 — модельная изобара $\rho_{mod} = \rho_{mod}(V, T)$ (3) при давлении $P = 0$ ГПа, 2 — точки экспериментальной атмосферной изобары $\rho = \rho(V, T)$ из [11], 3 — модельная изобара ρ_{mod} (3) при $P = 5$ ГПа, 4 — экспериментальная изобара ρ при $P = 5$ ГПа из [10].

интеграла абсолютной скорости деформации с одним подгоночным параметром z .

Отметим также, что интеграл абсолютной скорости деформации является неубывающей положительной функцией. Это означает, что модельные соотношения (6) и (7) не предусматривают отжиг или релаксацию дефектов на временах проведенного эксперимента.

5. Обсуждение результатов

Рассмотрим соотношение модельных (3) и экспериментальных результатов для объемно-температурной составляющей удельного электросопротивления вольфрама. Выше (рис. 5) упоминалась температурная $\rho(T)$ и отдельно объемная $\rho(V)$ зависимости ρ . В разд. 5 на рис. 6 графиком 1 представлен расчет $\rho_{mod} = \rho_{mod}(V, T)$ атмосферной изобары по (3), учитывающий не только температуру, но и изменение объема при нагревании в сравнении с экспериментальной $\rho = \rho(V, T)$ атмосферной изобарой 2 из [11]. Как видно, 1 и 2 на рис. 6 согласуются в области температур 150–450 К, в которой располагаются температуры вольфрама в наших взрывных экспериментах. Аналогичный результат имеет место и для изобар при давлении 5 ГПа. Действительно, в области температур 150–450 К модельная изобара 3 совпадает с экспериментом 4 из [10], в котором одновременно изменялась как температура, так и объем.

Рассмотрим теперь соотношение экспериментального профиля электросопротивления образцов 1 (рис. 4, *a*) и модельного профиля 2 объемно-температурной составляющей электросопротивления ударно-сжимаемых образцов вольфрама. Как видно, уже в первые моменты времени после t_0 , когда давления ударного сжатия не

превышают 3–5 GPa, экспериментальное электросопротивление I существенно превышает 2.

Заметим, однако, что хотя в дальнейшем избыточное по сравнению с $R_1(t)$ экспериментальное электросопротивление увеличивается, тем не менее профили I и 2 сохраняют качественное подобие. На этом основании можно предположить, что экспериментальный профиль помимо объемно-температурной содержит некоторую плавно возрастающую во времени составляющую. Оказывается, что этой составляющей может служить деформационная составляющая (6), которая в сумме с (5) дает профиль (7). Этот профиль представлен графиком 3 на рис. 4, а. Как видно, модельный профиль 3 детально согласуется с экспериментальным профилем I в интервале времен $t_0 < t < t_r$, когда давление в образце увеличивается до 15 GPa и затем в разгрузке при $t > t_r$ вплоть до времен $t_p \approx 2.7 \mu\text{s}$, когда давление уменьшается до ≈ 3 GPa.

Однако заметим, что момент t_p примечателен еще и тем, что, начиная с этого момента, согласие модельного 4 и экспериментального I профилей резко нарушается. Этот диссонанс может быть обусловлен как экспериментальными погрешностями, так и ограниченностью модели. Экспериментальный артефакт может быть связан с применением двухточечной схемы регистрации, которая не учитывает изменения электросопротивления тоководов. Но профиль электросопротивления 4, полученный с использованием четырехточечной схемы, практически совпадает с профилем I и имеет ту же особенность в момент t_p с выходом на плато $R_p = 0.0283 \Omega$ при полной разгрузке в области $\approx 4 \mu\text{s}$.

Второй экспериментальный артефакт может заключаться в том, что R_p существенно превышает электросопротивления R_{sh} сохраненных образцов, представленных на рис. 2, б, с. Однако это несоответствие имеет разумное объяснение в виде отжига дефектов при высоких остаточных температурах. Действительно, сделанные оценки показывают, что в условиях ударно-волнового эксперимента окружающий тефлоновый изолятор приобретает достаточно высокую температуру ≈ 500 К. Тонкий вольфрамовый образец в течение первых минут после ударно-волнового воздействия также разогреется за счет теплообмена с окружающим изолятором.

Таким образом, вероятнее всего рассогласование экспериментального I и модельного 4 профилей электросопротивления при разгрузке на временах $t > t_p$ связан с ограниченностью модели (6). Эффект может быть истолкован как возникновение релаксации или отжига дефектов после момента t_p . Тем не менее ограничившись временами $t_0 < t < t_p$, можно заявить, что представленная модель электросопротивления ударно-сжимаемых вольфрамовых образцов в виде суммы объемно-температурной составляющей и деформационной составляющей, пропорциональной интегралу от абсолютной величины скорости деформации, качественно и количественно согласуется с экспериментом при

высоких давлениях ступенчато-циклического ударного сжатия.

Заключение

Проведены измерения электросопротивления ударно-сжатых образцов вольфрама при давлении до 15 GPa и температур до 360 К.

Реконструирована объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления вольфрама в диапазоне давлений 0–15 GPa и температур 150–450 К.

Выполнено моделирование электрофизических свойств вольфрама в условиях ступенчато-циклического ударного сжатия.

Представлена феноменологическая трактовка деформационной составляющей электросопротивления вольфрамовых образцов в предположении ее прямо пропорциональной зависимости от интеграла абсолютной скорости деформации.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки России по программе „Комплексное исследование физико-химических свойств и процессов в веществе в условиях высокоэнергетических воздействий“, регистрационный № 124020600049-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Электрические явления в ударных волнах*, под ред. В.А. Борисенко, А.М. Молодец, Е.З. Новицкий (Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005), 265 с.
- [2] *Экспериментальные методы в физике ударных волн и детонации*, под ред. М.В. Жерноклетов (Саров, ФГУП „РФЯЦ-ВНИИЭФ“, 2020), 519 с.
- [3] B. Gan, J. Li, J. Gao, Q. Zeng, W. Song, Y. Zhuang, Y. Hua, Q. Wu, G. Jiang, Y. Yin, Y. Zhang. *Phys. Rev. B*, **109**, 115129 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevB.109.115129
- [4] А.М. Молодец, А.А. Гольшев. *ФТТ*, **67** (5), 767 (2025). DOI: 10.61011/FTT.2025.05.60736.75-25
- [5] Р.А. Грэхэм. В сб. *Ударные волны и явления высокой скорости деформации металлов*, под ред. М.А. Мейерс, Л.Е. Мурр. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1984. 512 с. [R.A. Graham. *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*, ed. by M.A. Meyers, L.E. Murr (Plenum, NY, 1981), p. 375–386.]
- [6] А.М. Молодец, А.С. Савиных, А.А. Гольшев, Г.В. Гаркушин, Г.В. Шилов, А.Н. Некрасов. *Физика металлов и металловедение*, **123** (5), 554 (2022). DOI: 10.31857/S0015323022050096
- [7] А.А. Гольшев, А.М. Молодец. *Физика горения и взрыва*, **61** (5), 120 (2025). DOI: 10.15372/FGV2024.9467

- [8] А.А. Голышев, В.В. Ким, А.Н. Емельянов, А.М. Молодец. Прикладная механика и техническая физика, **56** (4), 92 (2015). DOI: 10.15372/PMTF20150409
- [9] G.K. White, M.L. Minges. Intern. J. Thermophys., **18** (5), 1269 (1997).
- [10] J.A.H. Littleton, R.A. Secco, W. Yong, M. Berrada. J. Appl. Phys., **125**, 135901 (2019). DOI: 10.1063/1.5066103
- [11] В.Э. Пелецкий, Э.А. Бельская. *Электрическое сопротивление тугоплавких металлов*, справочник под ред. Л.Е. Шейндлина (Энергоиздат, М., 1981), 96 с.

Приложение

Термическое уравнение состояния вольфрама

Используемое в настоящей работе термическое уравнение состояния (зависимость давления $P = P(V, T)$ от удельного объема V и температуры T) для вольфрама из [8] имеет вид

$$P = 3R\Theta \frac{\gamma}{V} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\exp(\Theta/T) - 1} \right) + P_x, \quad (\text{П1})$$

где R — удельная газовая постоянная, ключевые функции $\Theta = \Theta(V)$, $\gamma = \gamma(V)$ и $P_x = P_x(V)$ являются алгебраическими функциями объема. Так, характеристическая температура $\Theta = \Theta(V)$ выражается как

$$\Theta = \Theta_0 \left(\frac{v_0 - V}{v_0 - V_0} \right)^2 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{2/3}, \quad (\text{П2})$$

$$v_0 = V_0 \left(1 + \frac{2}{\gamma_0 - 2/3} \right). \quad (\text{П3})$$

В (П2) параметр Θ_0 — начальное значение характеристической температуры $\Theta_0 = \Theta(V_0)$ при начальном удельном объеме V_0 , начальной комнатной температуре $T_0 = 298.15$ К и начальном атмосферном давлении. Параметр v_0 выражается через V_0 и термодинамический параметр Грюнайзена $\gamma_0 = \gamma_0(V_0, T_0)$. Объемная зависимость коэффициента Грюнайзена $\gamma = \gamma(V)$ и потенциального давления $P_x = P_x(V)$ имеют вид

$$\gamma = -\frac{d \ln \Theta}{d \ln V} = \frac{2}{3} + \frac{2V}{v_0 - V}, \quad (\text{П4})$$

$$P_x = 3C_1 x^{1/3} \left(-\frac{1}{5} x^{-2} + 2x^{-1} + 6 - x + \frac{1}{7} x^2 \right) + C_2. \quad (\text{П5})$$

$$x = V/v_x. \quad (\text{П6})$$

Таблица 2. Параметры термического уравнения состояния (П1) для вольфрама

Θ_0 , К	V_0 , cm^3/mol	v_0 , cm^3/mol	v_x , cm^3/mol	C_1 , GPa	C_2 , GPa
287.25	9.491	28.41	26.801	-313.876	6471.738

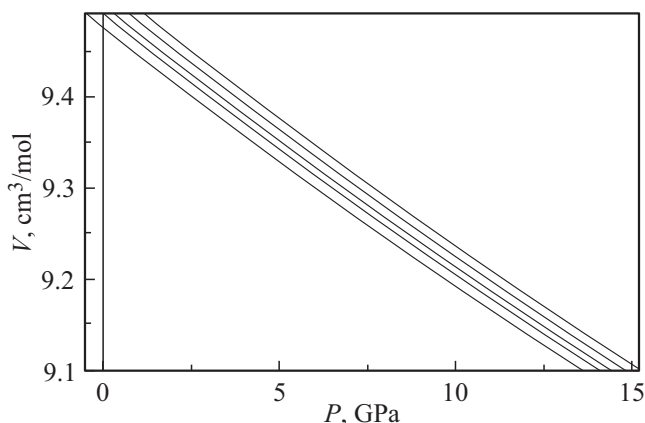


Рис. 7. Изотермы вольфрама (П1) при температурах (снизу вверх) 173, 298, 373, 473, 573 К.

Комплект определяющих параметров $\Theta_0, V_0, v_0, v_x, C_1, C_2$ для (П1)–(П6) и их численные значения из [8] представлены в табл. 2. На рис. 7 представлены некоторые изотермы (П1) для вольфрама, используемые при пересчете значений $\rho(P, T)$ в $\rho(V(P), T)$.