

УДК 537.31+539.89+53.096

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАНГАНИНА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

А. А. Голышев, А. М. Молодец

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
143432 Черноголовка, golyshev@icp.ac.ru

Исследована объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления манганина в области давлений $5 \div 70$ ГПа и температур $300 \div 1000$ К ступенчатого ударного сжатия. Измерено электросопротивление манганиновых образцов в условиях динамического нагружения плоскими одномерными ударными волнами. Разработаны термическое и калорическое уравнения состояния манганина, с использованием которых реконструирована объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления ударно-сжатого манганина. В предположении обратимости удельного электросопротивления металла сформулирована полуэмпирическая модель изменения удельного электросопротивления манганина при сжатии и разгрузке, включая эффект гистерезиса манганинового датчика.

Ключевые слова: манганин, электросопротивление, гистерезис, высокое давление, уравнения состояния, ударные волны, математическое моделирование, гидрокод.

DOI 10.15372/FGV2024.9467

EDN HSKXZZ

ВВЕДЕНИЕ

Манганин служит чувствительным элементом датчиков, которые, начиная с работы [1], широко используются при измерении давления в физике ударных волн. Как и в статических условиях (см. [2, 3] и библиографию в них), действие манганиновых датчиков в условиях динамического давления основано на сильной зависимости электросопротивления манганина от давления.

Детальные исследования барической зависимости электросопротивления манганина при ударном сжатии были начаты в 1980-х годах [4–8] и продолжают до настоящего времени (см. [9]). Главная цель большинства работ в этом направлении заключалась в определении и уточнении калибровочной зависимости электросопротивления образцов манганина только от давления. Зависимость электросопротивления манганина от температуры в цитируемых работах предполагалась незначительной и, оставаясь неизвестной, не принималась во внимание. В этой связи цель данной работы заключалась в экспериментально-расчетной реконструкции не только барической, но и температурной зависимости удельного электросопротивления манганина в условиях ударного нагружения плоскими одномерными ударными волнами.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1.1. Образцы

Манганиновый образец изготавливался из манганиновой проволоки МНМц3-12 диаметром 0.1 мм. Согласно справочным данным состав проволоки следующий: $84 \div 85$ %

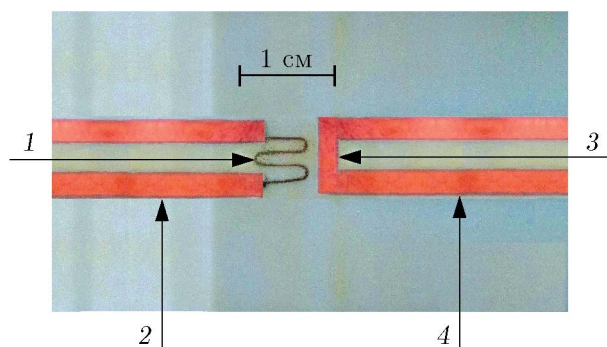


Рис. 1. Манганиновый образец и измерительная ячейка:

1 — манганиновый образец толщиной 0.04 мм, 2 — медные тоководы образца толщиной 0.015 мм, 3 — медный аналог образца 0.015 мм, 4 — медные тоководы аналога толщиной 0.015 мм

(мас.) меди, 11.5 ÷ 13.5 % марганца, 2.5 ÷ 3.5 % никеля, <0.5 % железа, <0.1 % кремния, <0.03 % магния. Первоначально образец имел форму синусоидального фрагмента, который затем раздавливался между двумя плоскими стальными пуансонами так, что манганиновый образец превращался в фольгу в виде синусоидальной плоской ленты. Фотография сформированного таким способом образца 1 показана на рис. 1. Плоскость образца располагалась параллельно плоскости фронта ударной волны. Ширина ленты 0.4 мм на порядок превышала ее толщину $h_0 = 0.04$ мм. Медные тоководы 2 (полоски медной фольги толщиной 0.015 мм, см. рис. 1) подсоединялись к концам манганиновой ленты. Измеренные удельные электрические сопротивления исходной проволоки и изготовленного образца были одинаковы и составляли $\rho_0 = 52.2(1)$ мкОм · см. Начальное электрическое сопротивление манганинового образца измерялось для каждого эксперимента и находилось в пределах $R_0 = 1.7 \div 1.8$ Ом.

1.2. Генератор ударно-волнового нагружения

На рис. 2,а представлена схема используемого взрывного генератора ударно-волнового нагружения. Металлический плоский ударник 1, разогнанный продуктами взрыва до скорости W_0 , соударяется со слоистой мишенью 2–4. Мишень представляет собой ударные наковальни из двух «жестких» металлических пластин 2 и 4, между которыми расположен «мягкий» слой изолятора 3. Изолятор 3 составлен из набора тефлоновых пленок толщи-

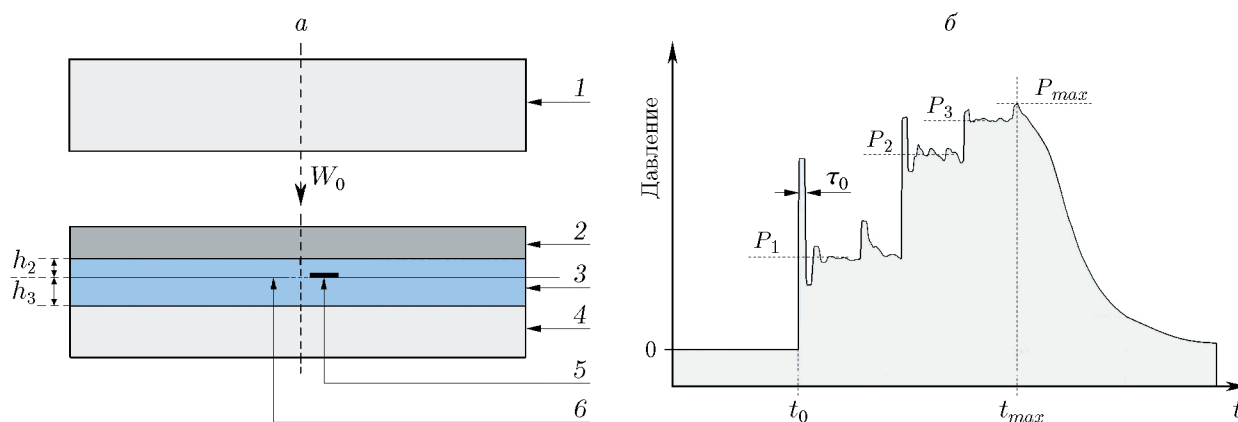


Рис. 2. Генератор ступенчато-циклического ударного нагружения (а) и профиль давления в исследуемом образце при измерении его электросопротивления (б):

1 — металлический (алюминиевый или стальной) ударник, 2 — стальная или вольфрамовая пластина, 3 — тефлон, 4 — стальная пластина, 5 — манганиновый образец, 6 — медный аналог образца

Таблица 1

Параметры пластин взрывных генераторов

Серия экспериментов	1			2		3		4	
	W_0 , км/с	металл	H_1 , мм	металл	H_2 , мм	h_2 , мм	h_3 , мм	металл	H_4 , мм
I	1.20	Al	7.0	X18	1.96	0.66	1.30	X18	3.55
II	2.18	Al	7.0	W	1.43	0.66	1.68	X18	4.07
III	2.60	X18	3.5	X18	3.37	1.3	1.1	X18	1.85

Примечание. Пластины 1–4 соответствуют таковым на рис. 2,а; H_1 , H_2 , h_2 , h_3 , H_4 — толщины пластин 1, 2–4.

ной $0.1 \div 0.5$ мм, склеенных вакуумной смазкой. Использовались отечественная вакуумная смазка (ТУ 38.401-58-172-96) и промышленные тефлоновые пленки (лента фторопластовая Ф-4 ГОСТ 24222-80 «ПН» — прокладочная неориентированная). Пластины 2 и 4 были изготовлены из стали (сталь 12X18H10T, в дальнейшем сталь X18) или вольфрама.

В результате соударения ударника 1 с мишенью 2–4 изолятор 3 подвергается плоскому одномерному ступенчатому ударному сжатию с амплитудами давления P_1 , P_2 , P_3 , P_{max} , как это схематически показано на рис. 2,б. В момент времени t_{max} давление достигает максимального значения P_{max} , после чего плавно уменьшается до нулевых значений за счет волн разгрузки от свободной поверхности ударника 1 или пластины 4.

В изоляторе 3 на расстоянии h_2 от пластины 2 и h_3 от пластины 4 размещен тонкий (по сравнению с толщиной изолятора) манганиновый образец 5, а также синхронно работающий медный аналог 6 образца (их фотографии представлены на рис. 1). Вариация толщин h_2 и h_3 задавалась набором тефлоновых пленок, склеенных микронными слоями вакуумной смазки.

Поочередный приход каждой ступени сжатия на образец сопровождается реверберацией в нем коротких затухающих волн сжатия и разгрузки. Это показано на рис. 2,б в виде высокочастотной циклической составляющей на фронтах ступеней P_1 , P_2 , P_3 . Полупериод циклической составляющей определяется как $\tau_0 \approx h_0/C_0$, где h_0 — толщина образца, C_0 — скорость звука в материале образца, и при типичных значениях для металлических образцов $h_0 \approx 0.05$ мм и $C_0 \approx 5$ мм/мкс равен $\tau_0 \approx 0.01$ мкс.

Величина P_{max} определяется главным образом скоростью полета и материалом ударника. В работе выполнены три серии экспериментов. В табл. 1 приведены параметры пластин ударника 1 и мишени 2–4 для генераторов каждой серии. Значения P_{max} этих генераторов серий I, II и III соответствуют ≈ 20 , 45 и 65 ГПа.

1.3. Измерение электросопротивления ударно-сжимаемых образцов манганина

В процессе ударно-волнового нагружения через образцы 5 и 6 пропускались постоянные токи $J_0 = 3.0(1)$ А от двух независимых импульсных источников тока. Для измерения электросопротивления измерительной ячейки использовались мосты Уитстона. В эксперименте высокочастотным осциллографом Tektronix DPO4104В измерялся профиль (зависимости от времени t) изменения напряжения разбалансировки моста $\Delta U(t)$. Профили сопротивления определялись в виде суммы $R_0 + k\Delta U$, где R_0 — начальное сопротивление R_{01} для манганинового образца 5 или R_{02} для медного аналога 6, k — предварительно определяемый калибровочный коэффициент. Осложняющие эффекты шунтирования, скин-эффект, теплообмен тонких металлических образцов с окружающим изолятором рассмотрены в [10].

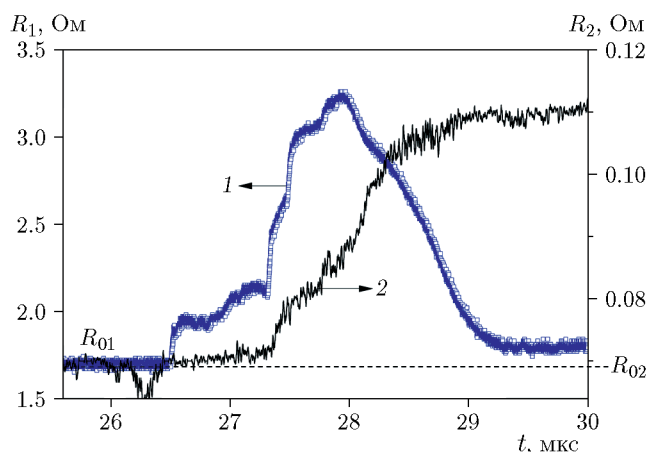


Рис. 3

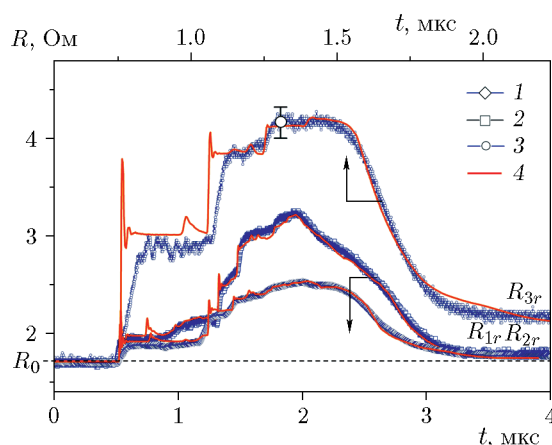


Рис. 4

Рис. 3. Первичные экспериментальные профили электросопротивления второй серии: 1 — суммарный профиль электросопротивления образца и медных тоководов $R_1 = R_1(t)$, R_{01} — начальное суммарное электросопротивление образца манганина и медных тоководов; 2 — профиль электросопротивления медного аналога $R_2 = R_2(t)$, R_{02} — начальное электросопротивление медного аналога

Рис. 4. Профили электросопротивления манганиновых образцов: 1 — результаты серии I, 2 — результаты серии II, 3 — результаты серии III (в качестве погрешности указан максимальный разброс сопротивлений в трех идентичных экспериментах); R_0 — начальное сопротивление манганиновых образцов; R_{1r} , R_{2r} , R_{3r} — остаточные сопротивления манганиновых образцов на последней характеристике волны разгрузки; 4 — модельные профили $R_m = R_m(t)$ электросопротивления манганиновых образцов для каждого эксперимента

Пример первичной экспериментальной записи в виде суммарного профиля электросопротивления образца манганина вместе с медными тоководами $R_1(t)$, а также профиля электросопротивления медного аналога $R_2(t)$ показаны на рис. 3.

Профиль электросопротивления манганинового образца $R(t)$ восстанавливался как разность $R = R_1(t) - R_2(t)$. Полученные таким способом профили электросопротивления манганиновых образцов $R(t)$ для всех трех серий измерений представлены графиками 1–3 на рис. 4.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ МАНГАНИНА

Электрофизические свойства манганина при высоких давлениях и температурах в условиях ступенчатого ударного сжатия были реконструированы в результате совместного моделирования термодинамических параметров манганина во время ударного сжатия и синхронных эффектов изменения электросопротивления манганина при изменении его объема и температуры. Для решения этих задач были разработаны уравнения состояния манганина (см. приложение), а также сформулированы полуэмпирические соотношения для объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления.

2.1. Моделирование термодинамического состояния ударно-сжатого манганина

Моделирование термодинамического состояния манганиновых образцов в проведенных экспериментах осуществлялось в программе (гидрокоде) СТАГ [11]. Эта программа

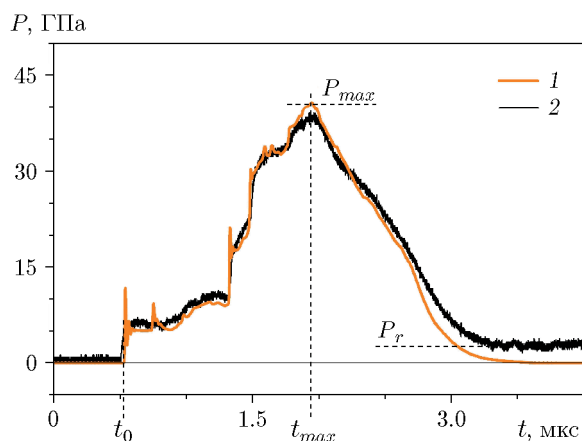


Рис. 5

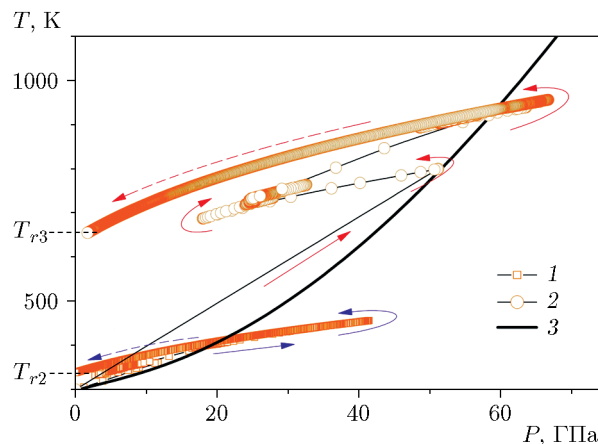


Рис. 6

Рис. 5. Профили давления в манганиновом образце:

1 — модельный профиль давления в манганине $P(t)$ для экспериментов серии II; t_0 , t_{max} , P_{max} аналогичны рис. 2,б; 2 — профиль давления в манганине, рассчитанный с использованием калибровки манганинового датчика из [16] (см. далее соотношение (5)), P_r — артефакт, обусловленный гистерезисом манганина

Рис. 6. Расчетные фазовые траектории ударного сжатия манганина в координатах давление — температура:

1 — фазовая траектория для экспериментов серии II, 2 — для серии III; 3 — ударная адиабата однократного ударного сжатия манганина; T_{r2} и T_{r3} — остаточные температуры манганина в экспериментах соответственно серий II и III; округлыми стрелками обозначена последовательность T, P -состояния во времени, сплошные стрелки обозначают сжатие, штриховые стрелки относятся к разгрузке

позволяет рассчитывать волновые взаимодействия и термодинамические состояния в форме профилей давления $P(t)$, температуры $T(t)$ и объема $V(t)$ для выбранных лагранжевых частиц каждого слоя многослойных мишеней типа приведенных на рис. 1,а при одномерном динамическом нагружении. Поскольку ширина манганинового образца на порядок превышала его толщину h_0 , то в гидрокоде манганиновый образец моделировался пластиной с начальной толщиной h_0 .

Для расчета профилей давления $P(t)$, температуры $T(t)$ и объема $V(t)$ в программе СТАГ использовались разработанные ранее уравнения состояния (УРС) материалов экспериментальной сборки. Для нержавеющей стали УРС взяты из [12], для алюминия — из [13], для тефлона — из [14], для вольфрама — из [15]. Разработанные специально для манганина уравнения состояния приведены в приложении. На рис. 5 показан модельный профиль 1 давления в манганине $P(t)$ для второй серии экспериментов.

Исключение времени из расчетных профилей $P(t)$ и $T(t)$ дает фазовую траекторию в координатах давление — температура в каждом эксперименте. На рис. 6 графиками 1 и 2 показаны фазовые траектории в экспериментах второй и третьей серий на фоне ударной адиабаты 3 однократного ударного сжатия манганина.

Как видно на рис. 6, в процессе ступенчато-циклического сжатия материала его температура может приобретать значения как меньше, так и больше температуры однократного ударного сжатия. Отметим, что этот эффект обусловлен учетом разогрева при реверберации волн ступенчато-циклического сжатия, который обычно не принимается во внимание, но играет важную роль в представляемой работе.

Таким образом, расчетные траектории очерчивают на фазовой диаграмме манганина

исследованную область, которую можно охарактеризовать давлениями $\approx 5 \div 70$ ГПа и температурами $\approx 300 \div 1000$ К.

2.2. Моделирование объемно-температурной зависимости электросопротивления манганина

В качестве модели объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления $\rho = \rho(V, T)$ было использовано соотношение в виде произведения двух функций: объемной составляющей $\varphi = \varphi(V)$ и температурной составляющей $\epsilon = \epsilon(T)$.

Вид объемной составляющей взят из [10]:

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

где n — безразмерный подгоночный коэффициент. Удельный объем V_0 при комнатной температуре и атмосферном давлении и параметр v_0 считаются известными (см. (9) в приложении) параметрами УРС.

В качестве температурной составляющей электросопротивления привлекалась степенная зависимость в виде $\epsilon = \epsilon(T) = (T/T_0)^\alpha$ с постоянным подгоночным коэффициентом α , используемая ранее. Однако применительно к манганину потребовались различные, уменьшающиеся с увеличением температуры значения α . Поэтому для температурной составляющей манганина принята эмпирическая зависимость $\epsilon(T)$ в виде экспоненциальной функции с насыщением по температуре:

$$\epsilon = \frac{x}{\exp(x) - 1}, \quad (2)$$

где $x = \theta_\epsilon/T$, θ_ϵ — подгоночный коэффициент с размерностью температуры.

Таким образом, модельное соотношение для удельного электросопротивления $\rho = \rho(V, T)$ рассматриваемого материала имеет вид

$$\rho = \frac{\rho_0}{\epsilon_0} \varphi \epsilon, \quad (3)$$

где ρ_0 — удельное электросопротивление материала при температуре T_0 и удельном объеме V_0 , $\epsilon_0 = \epsilon(T_0, V_0)$. Соответственно соотношение (3) дает выражение для электросопротивления R_m образца рассматриваемого материала в условиях плоского одномерного сжатия:

$$R_m = \left(\frac{R_0}{\epsilon_0}\right) \left(\frac{V_0}{V}\right) \varphi \epsilon, \quad (4)$$

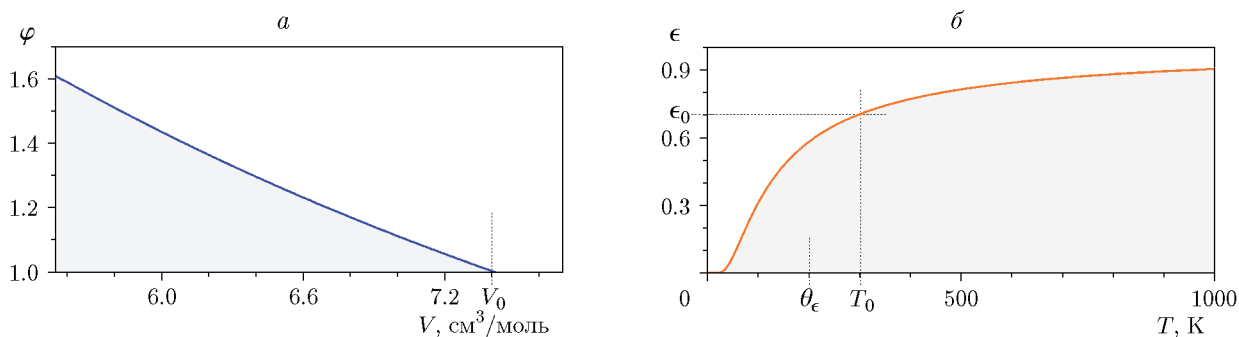
где R_0 — начальное электросопротивление образца при комнатной температуре T_0 и атмосферном давлении P_0 , множитель (V_0/V) учитывает изменение толщины плоского образца при одномерной деформации.

Подстановка модельных профилей температуры $T(t)$ и удельного объема $V(t)$ в (4) дает модельный профиль $R_m = R_m(t)$, который может быть подогнан под экспериментальный профиль $R = R(t)$ электросопротивления путем подбора коэффициентов n и θ_ϵ , что означает реконструкцию объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления материала в терминах модели (3). Результаты реализации этого приема с одинаковыми для всех серий экспериментов значениями коэффициентов n и θ_ϵ представлены на рис. 4. Здесь экспериментальные профили электросопротивления трех серий соответствуют графикам 1, 2, 3, а модельные профили — графикам 4. Значения определяющих параметров для (1) и (2) представлены в табл. 2. Функции $\varphi = \varphi(V)$ (1) и $\epsilon = \epsilon(T)$ (2) с найденными коэффициентами n и θ_ϵ для манганина показаны на рис. 7.

Таблица 2

Индивидуальные коэффициенты модельных функций (1)–(3) для манганина

ρ_0 , мкОм · см	T_0 , К	ϵ_0	θ_ϵ , К	V_0 , см ³ /моль	v_0 , см ³ /моль	n
52.2(1)	300.0	0.7034	200.0	7.4071	21.76537	–1.40

Рис. 7. Графики функций $\varphi = \varphi(V)$ (1) и $\epsilon = \epsilon(T)$ (2) для манганина

Суммарный экспериментально-расчетный результат для манганина приведен на рис. 8 в виде графика (поверхности) в координатах относительное удельное электросопротивление манганина ρ/ρ_0 , сжатие V_0/V , температура T .

В заключение этого параграфа изложим алгоритм нахождения констант n и θ_ϵ . Для двух-трех одинаковых экспериментов каждой серии, наряду с профилями температуры и объема, рассчитывались модельные профили электросопротивления образца $R_m(t, n, \theta_\epsilon)$, которые подгонялись под экспериментальные профили $R(t)$ путем вариации значений n и θ_ϵ . В качестве первого приближения для n взято значение $n = 1.0$, для первого приближения θ_ϵ использовалась характеристическая температура $\theta_0 = 223.740$ К, т. е. $\theta_\epsilon \approx \theta_0$. Оптимальные комплекты коэффициентов n и θ_ϵ разных серий оказались близки между собой. Значения коэффициентов $n = -1.40$ и $\theta_\epsilon = 200.0$ К получены при подгонке под конкретные профили $R(t)$ 1–3 (см. рис. 4) конкретных экспериментов из каждой серии.

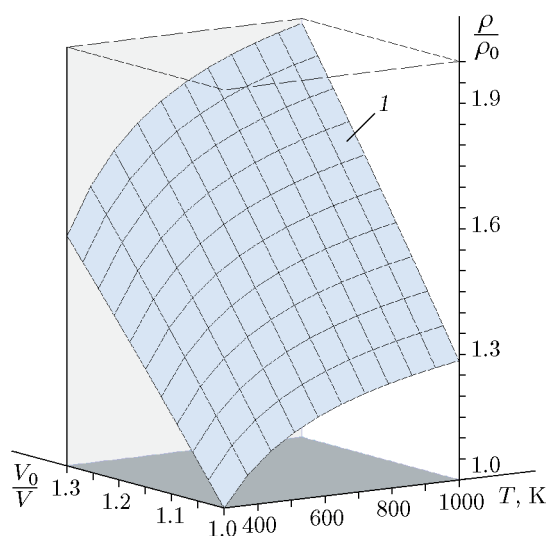


Рис. 8. Объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления манганина при высоких давлениях и температурах динамического сжатия и разгрузки:

1 — поверхность (3) в координатах относительное удельное электросопротивление манганина (ρ/ρ_0), сжатие (V_0/V), температура (T)

Подгоночные коэффициенты для остальных экспериментов не выходили за пределы для $n = -1.40(3)$ и $\theta_\epsilon = 200(30)$ К, что обеспечивало описание всех профилей $R(t)$ трех серий экспериментов с точностью 4 %.

Таким образом, изложенный прием нахождения параметров n и θ_ϵ в сочетании с УРС позволяет фактически идентифицировать удельное электросопротивление в виде (3) и тем самым реконструировать объемно-температурную зависимость удельного электросопротивления $\rho(V, T)$ манганина при высоких давлениях $\approx 5 \div 70$ ГПа и температурах $\approx 300 \div 1\,000$ К динамического сжатия и разгрузки.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим полученные экспериментальные и модельные результаты вместе с литературными данными, относящимися к фазе сжатия и разгрузки манганина в условиях динамического нагружения. Ограничимся диапазоном давлений $P \approx 5 \div 75$ ГПа, где регистрируются (рис. 9) одинаковые изменения относительного электросопротивления $\delta = (R - R_0)/R_0$ манганинового образца как в окружении корунда 3 из [4], так и в окружении полимерного изолятора 1, 2 из [5, 6]. Область повышенных давлений, где величины δ в окружении полимерного изолятора и корунда различаются, будем рассматривать как область возможных, но требующих обсуждения экстраполяций.

Отметим предварительно, что в обозначенной области сжатия на экспериментальных профилях 1–3 рис. 4 отсутствует ярко выраженная высокочастотная циклическая составляющая на фронтах ступенчатых модельных профилей электросопротивления 4. Отметим также, что модельные профили давления (см. пример 1 на рис. 5) тоже содержат высокочастотную циклическую составляющую, в отличие от экспериментального

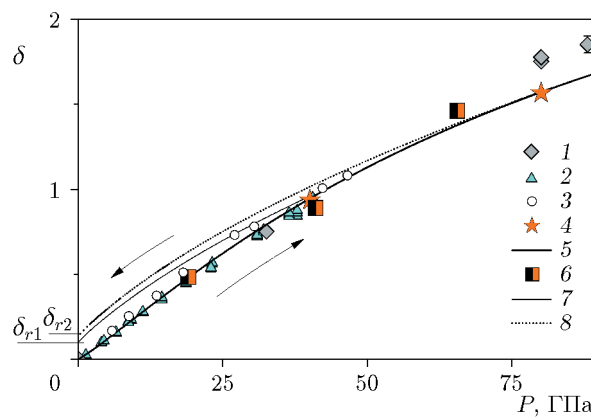


Рис. 9. Моделирование эмпирической калибровки манганинового датчика в форме зависимости изменения относительного электросопротивления $\delta = (R - R_0)/R_0$ фольгового манганинового образца от давления:

1, 2, 3 — данные экспериментов соответственно из работ [4], [5], [6]; 4 — модельные расчеты $\delta_m = \delta_m(P)$ при однократных ударных сжатиях; 5 — зависимость (6); 6 — модельные значения $\delta_i = (R_i - R_0)/R_0$ и давления P_i , соответствующие ступеням $i = 1, 2, 3$ профиля 3 на рис. 4; 7, 8 — модельные расчеты $\delta_{rm} = \delta_{rm}(P)$ разгрузки из состояний однократного ударного сжатия 4; стрелками обозначены изменения давления при однократных ударных сжатиях 4 и последующих разгрузках 7, 8; δ_{r1} и δ_{r2} — остаточные изменения δ_{rm} (гистерезис) при разгрузке из состояний 4

профиля давления 2, рассчитанного с использованием калибровки манганинового датчика $P = P(\delta)$ из [16]:

$$P = \left(\frac{b\delta}{a - \delta} \right)^m [\text{ГПа}], \quad (5)$$

где $a = 3.60$, $b = 178.0$, $m = 0.885$, $\delta = (R - R_0)/R_0$, $R = R(t)$ — экспериментальный профиль электросопротивления. Оба несоответствия модельных и экспериментальных профилей на рис. 4 и 5, очевидно, обусловлены ограниченными частотными характеристиками используемой экспериментальной методики, которые не позволяют регистрировать сигналы длительностью $\tau_0 \approx 0.01$ мкс.

Сопоставим теперь данные модельных $\delta_m(P)$ и экспериментальных $\delta(P)$ калибровочных зависимостей при сжатии. Воспользуемся для этого обратной для (5) формулой из [16], аппроксимирующей экспериментальные данные в виде калибровочной зависимости

$$\delta = \frac{aP^{1/m}}{b + P^{1/m}}, \quad (6)$$

где P , a , b , m те же, что и в (5). Зависимости (6) соответствует линия 5 на рис. 9. На этом рисунке представлены также модельные расчеты 4 для $\delta_m(P)$ при сжатии манганиновой фольги однократными ударными волнами в постановке [5]. Как видно, модельные расчеты 4 совпадают с калибровочной зависимостью 5.

Несколько иначе ситуация выглядит в случае ступенчатого сжатия. Здесь модельные точки 6 на трех ступенях $\delta_i(P_i)$ (см. подпись к рис. 9) отклоняются от линии 5. Однако на каждой ступени отличие не превышает 5 %. Таким образом, модельные калибровочные зависимости $\delta_m(P)$ с 5%-й точностью соответствуют эксперименту как при однократном, так и при ступенчатом ударном сжатии. Этот результат согласуется с одинаковыми показаниями манганинового датчика при его одноступенчатом и двухступенчатом нагружении до давления 27 ГПа из [5].

В то же время отметим, что различие между давлениями многоступенчатого ударного сжатия до 40 ГПа, рассчитанными с использованием предварительной калибровки манганинового датчика $P(\delta)$ в работе [8], и результатами расчета давления по модели из этой же работы увеличивается с каждой ступенью сжатия. Так, значения давления в первой и второй ступенях хорошо согласуются с расчетом, находясь в пределах экспериментальных ошибок. Однако давления на третьей ступени при 34.5 ГПа и в конечном состоянии меньше расчетных. Разница давлений между наблюдаемыми и расчетными значениями составляет 7 % на третьей ступени сжатия и достигает 16 % в конечном состоянии при 40.5 ГПа. В качестве одной из причин расхождения авторы [8] отмечали, что в их расчетах не принимались во внимание температурные эффекты, которые в нашей модели играют важную роль.

Обсудим теперь модельные и экспериментальные результаты по изменению электросопротивления манганина при разгрузке. Как хорошо известно, на стадии разгрузки манганина необходимо принимать во внимание гистерезис его электросопротивления.

Механизм появления гистерезиса электросопротивления манганина при динамическом нагружении рассматривался ранее в [5, 6] (см. также библиографию в них). В этих работах предполагалось, что появление гистерезиса обусловлено необратимым образованием дефектов при ударном сжатии, которые увеличивают остаточное сопротивление манганина, а количественные изменения электросопротивления за счет изменения температуры не принимались во внимание. В предлагаемой модели, наоборот, подразумевается, что обратимое объемно-температурное изменение удельного электросопротивления (3) кардинально превалирует над необратимым изменением электросопротивления манганина.

Представляется, что эта точка зрения предпочтительна, поскольку позволяет качественно и количественно воспроизвести основные особенности изменения электросопротивления не только при сжатии, но и при разгрузке. Действительно, как видно на рис. 4, все модельные профили электросопротивления 4 совпадают со своими экспериментальными прототипами 1–3 не только при сжатии, но и на стадии разгрузки вплоть до нулевых давлений, когда регистрируется гистерезис манганина в виде остаточных сопротивлений образцов R_{1r} , R_{2r} , R_{3r} .

Как отмечалось в предыдущем параграфе, разработанная расчетная техника предоставляет модельные профили давления $P(t)$ и сопротивления $R(t)$, а следовательно, и модельный профиль $\delta_{rm}(t) = (R - R_0)/R_0$. Очевидно, что исключение времени из модельных профилей $\delta_{rm}(t)$ и $P(t)$ позволяет построить модельную зависимость $\delta_{rm}(P)$, которая может быть использована в качестве калибровочной при преобразовании экспериментальных профилей сопротивления образцов в давление и при разгрузке. Пример построения зависимости $\delta_r(P)$ для двух точек 4 показан линиями 7 и 8 на рис. 9. Как видно, графики 7 и 8 располагаются над калибровочной зависимостью 5 и содержат гистерезис в виде δ_{r1} и δ_{r2} при нулевом давлении, что формально согласуется с экспериментальными результатами из [5, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерены электросопротивления фольговых образцов манганина толщиной 0.04 мм в условиях ступенчато-циклического нагружения плоскими одномерными волнами напряжений. Разработаны термическое и калорическое уравнения состояния манганина, с использованием которых определена рабочая область давлений $5 \div 70$ ГПа и температур $300 \div 1\,000$ К для выполненных ударно-волновых экспериментов.

С опорой на разработанные уравнения состояния проведено математическое моделирование термодинамической истории манганина в условиях его ступенчато-циклического нагружения. Показано, что в процессе ступенчато-циклического сжатия материал приобретает дополнительный разогрев, обусловленный учетом ревербераций волн напряжения при ступенчато-циклическом нагружении тонкого жесткого образца в окружении мягкого изолятора.

Разработана полуэмпирическая модель обратимого объемно-температурного изменения удельного электросопротивления и реконструирована объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления ударно-сжатого манганина. В сочетании с уравнением состояния модель позволяет качественно и количественно воспроизвести основные особенности изменения электросопротивления манганина не только при сжатии, но и на стадии разгрузки вплоть до нулевых давлений, когда регистрируется гистерезис манганина.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А19-119071190040-5 ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МАНГАНИНА

Полуэмпирические УРС манганина строились на основе выражения для свободной энергии твердого тела $F = F(V, T)$, базирующейся на модели эйнштейновых осцилляторов

$$F = 3R \left[\frac{\Theta}{2} + T \ln \left(1 - \exp \left(-\frac{\Theta}{T} \right) \right) \right] + E_x \quad (7)$$

и на авторских соотношениях (см. формулы в [17]) для характеристической температуры $\Theta = \Theta(V)$ и потенциальной энергии $E_x = E_x(V)$:

$$\Theta = \Theta_0 \left(\frac{v_0 - V}{v_0 - V_0} \right)^2 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{2/3}, \quad (8)$$

$$v_0 = V_0 \left(1 + \frac{2}{\gamma_0 - 2/3} \right), \quad (9)$$

$$E_x = -v_x (C_1 H_x + C_2 x) + C_3, \quad (10)$$

$$H_x = 9x^{1/3} \left(\frac{1}{10} x^{-1} + 2 + \frac{3}{2} x - \frac{1}{7} x^2 + \frac{1}{70} x^3 \right), \quad x = \frac{V}{v_x}. \quad (11)$$

Здесь R — удельная газовая постоянная, V — удельный объем материала, T — температура, V_0 — начальный удельный объем индивидуального монолитного материала, T_0 — начальная температура. Параметрами модели (7) являются температура $\Theta_0 = \Theta(V_0)$, параметр Грюнайзена $\gamma_0 = \gamma(V_0, T_0)$, подгоночный параметр v_x и зависящие от v_x константы C_1, C_2, C_3 .

Согласно термодинамическим тождествам, уравнения состояния определяются частными производными свободной энергии. Для (7) термическое УРС $P = P(V, T) = -\frac{\partial F}{\partial V}$, т. е. зависимость давления P от объема и температуры, имеет вид

$$P = P_x + 3R \frac{\gamma}{V} \Theta \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\exp(\Theta/T) - 1} \right), \quad (12)$$

где $P_x = P_x(V)$ — потенциальное давление:

$$P_x = 3C_1 x^{1/3} \left(-\frac{1}{5} x^{-2} + 2x^{-1} + 6 - x + \frac{1}{7} x^2 \right) + C_2, \quad (13)$$

$\gamma = \gamma(V)$ — объемная зависимость коэффициента Грюнайзена:

$$\gamma = -\frac{d \ln \Theta}{d \ln V} = \frac{2}{3} + \frac{2V}{v_0 - V}. \quad (14)$$

Частная производная свободной энергии по температуре представляет собой калорическое УРС $E = E(V, T)$ в виде $E = F - T \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)$, которое при использовании (7) выражается в форме УРС Ми — Грюнайзена

$$E = E_x + \frac{V}{\gamma} (P - P_x). \quad (15)$$

Таким образом, УРС (12) и (15) содержат два типа общих опорных параметров. Во-первых, это начальные справочные теплофизические свойства материала γ_0, Θ_0, V_0 для тепловой составляющей свободной энергии манганина. Значения теплофизических

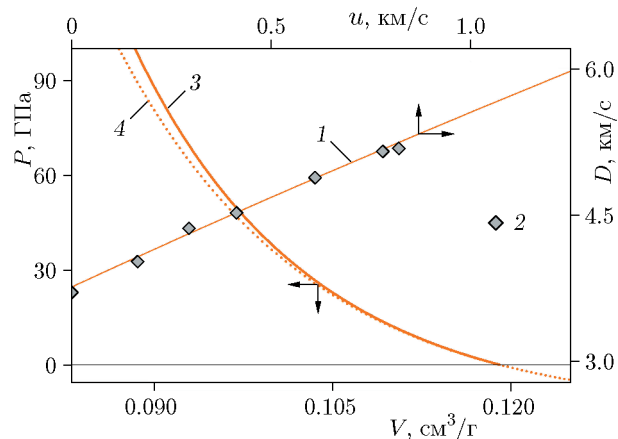


Рис. 10. Сопоставление расчетных и экспериментальных ударных адиабат однократного сжатия манганина:

1 — расчетная ударная адиабата в координатах u — D ; 2 — экспериментальные точки в координатах u — D из [19]; 3 — расчетная ударная адиабата манганина в координатах V — P ; 4 — расчетная изотерма манганина при нормальных условиях

свойств манганина определены с использованием данных [18]: $\Theta_0 = 223.740$ К, $V_0 = 7.4071$ см³/моль, $v_0 = 21.76537$ см³/моль. Молярная масса манганина, соответствующая содержанию компонентов сплава, $M = 62.22$ г/моль, а начальная внутренняя энергия $E_0 = E(V_0, T_0) = 0.12667$ кДж/г.

Вторую группу составляют параметры для потенциальной составляющей свободной энергии — это подгоночный параметр v_x и зависящие от v_x константы C_1 , C_2 , C_3 . Для манганина эти параметры определены исходя из требования совпадения расчетной и экспериментальной ударных адиабат манганина из [19]. Найденные значения параметров для потенциальной составляющей свободной энергии манганина составили: $v_x = 13.33286$ см³/моль, $C_1 = -1112.25257$ ГПа, $C_2 = 23151.03418$ ГПа, $C_3 = -2484.17264$ кДж/г.

В пользу адекватности построенных уравнений состояния манганина свидетельствует представленное на рис. 4 моделирование разнообразных экспериментальных профилей электросопротивления манганина с помощью гидрокода, опирающегося на эти УРС и согласие модельных результатов с экспериментальными данными [19] на рис. 10. Так, представленная на рис. 10 расчетная ударная адиабата однократного сжатия манганина 1 хорошо согласуется с экспериментальными данными 2 [19] в координатах массовая скорость u — скорость D ударной волны в пределах разброса экспериментальных точек. Расчетная ударная адиабата манганина 3 в координатах объем V — давление P также согласуется с экспериментальными точками объем — давление из [19].

На рис. 10 графиком 4 представлена зависимость давления от объема манганина при температуре 300 К. Экспериментальные данные для изотермы высокого давления для манганина при нормальных условиях в доступной литературе не обнаружены. Поэтому зависимость 4 носит прогностический характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fuller P. J. A., Price J. H. Electrical conductivity of manganin and iron at high pressures // Nature. — 1962. — V. 193. — P. 262–263. — DOI: 10.1038/193262a0.
2. Chen J., Cheng H., Zhou X., Yan X., Wang L., Zhao Y., Wang S. Calibration of manganin pressure gauge for diamond-anvil cells // Rev. Sci. Instrum. — 2021. — V. 92, N 3. — 033905. — DOI: 10.1063/5.0040847.

3. **Xiang L., Gati E., Bud'ko S. L., Ribeiro R. A., Ata A., Tutsch U., Lang M., Canfield P. C.** Characterization of the pressure coefficient of manganin and temperature evolution of pressure in piston-cylinder cells // *Rev. Sci. Instrum.* — 2020. — V. 91. — 095103. — DOI: 10.1063/5.0022650.
4. **De Carli P. S., Erlich D. C., Hall L. B., Bly R. G., Whitson A. L., Keogh D. D., Curran D. R.** Stress-gauge system for the megabar (100 GPa) range // *Defense Nuclear Agency Rep. No. DNA 4066F.* — 1976.
5. **Канель Г. И., Вахитова Г. Г., Дремин А. Н.** Метрологические характеристики манганиновых датчиков давления в условиях ударного сжатия и разгрузки // *Физика горения и взрыва.* — 1978. — Т. 14, № 2. — С. 130–135.
6. **Vantine H. C., Erickson L. M., Janzen J. A.** Hysteresis-corrected calibration of manganin under shock loading // *J. Appl. Phys.* — 1980. — V. 51, N 4. — P. 1957–1962. — DOI: 10.1063/1.327910.
7. **Partom Y., Yaziv D., Rozenberg Z.** Theoretical account for the response of manganin gauges // *J. Appl. Phys.* — 1981. — V. 52, N 7. — P. 4610–4616. — DOI: 10.1063/1.329339.
8. **Kondo K., Yasumoto Y., Sugiura H., Sawaoka A.** Multiple shock reverberations in a layer structure observed by particle velocity and pressure gauges // *J. Appl. Phys.* — 1981. — V. 52, N 2. — P. 772–776. — DOI: 10.1063/1.328761.
9. **Jordan L., Casem D. T.** Understanding calibration and error propagation in longitudinal and lateral manganin gauge shock experiments // *J. Dynamic Behav. Mater.* — 2021. — V. 7. — P. 188–195. — DOI: 10.1007/s40870-020-00255-7.
10. **Молодец А. М., Голышев А. А.** Электросопротивление ε -Fe при высоких давлениях ступенчатого ударного сжатия // *Физика Земли.* — 2023. — № 4. — С. 39–52. — DOI: 10.31857/S0002333723040087. — EDN: TLSYVS.
11. **Ким В. В., Молодец А. М.** Программа для расчета волновых взаимодействий и термодинамического состояния многослойных мишеней при одномерном ударном нагружении СТАГ. — Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016616914. — 22 июня 2016.
12. **Молодец А. М.** Температурная зависимость откольной прочности и уравнение состояния аустенитной хромоникелевой стали 18-10 // *Физика твердого тела.* — 2015. — Т. 57, № 10. — С. 1992–1997. — EDN: UJMJC.R.
13. **Молодец А. М.** Термоактивационная стадия откольного разрушения алюминия в субнано-секундном диапазоне времен нагружения // *Физика твердого тела.* — 2014. — Т. 56, № 11. — С. 2162–2167. — EDN: SNWANN.
14. **Молодец А. М., Шахрай Д. В., Савиных А. С., Голышев А. А., Ким В. В.** Уравнения состояния политетрафторэтилена для расчета параметров ударного сжатия в мегабарном диапазоне давления // *Физика горения и взрыва.* — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 121–129. — EDN: RNKQFX.
15. **Голышев А. А., Ким В. В., Емельянов А. Н., Молодец А. М.** Модель для расчета параметров ударного сжатия пластинчатой градиентной смеси // *ПМТФ.* — 2015. — Т. 56, № 4. — С. 92–100. — DOI: 10.15372/PMTF20150409. — EDN: UQEUIV.
16. **Голышев А. А., Молодец А. М.** Электросопротивление полимерной изоляции в мегабарном диапазоне давлений ударного сжатия // *Физика горения и взрыва.* — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 106–112. — EDN: PWVKTH.
17. **Молодец А. М.** Уравнения состояния мусковита при высоких давлениях и температурах // *Физика Земли.* — 2022. — № 1. — С. 130–139. — DOI: 10.31857/S0002333722010057. — EDN: SHUNEF.

18. **Schmon A., Aziz K., Luckabauer M., Pottlacher G.** Thermophysical properties of manganin (Cu₈₆Mn₁₂Ni₂) in the solid and liquid state // Int. J. Thermophys. — 2015. — V. 36. — P. 1618–1626. — DOI: 10.1007/s10765-015-1909-0.
19. **Keough D. D., Wong J. Y.** Variation of the shock piezoresistance coefficient of manganin as a function of deformation // J. Appl. Phys. — 1970. — V. 41, N 8. — P. 3508–3515. — DOI: 10.1063/1.1659450.

Поступила в редакцию 01.04.2024.

После доработки 13.05.2024.

Принята к публикации 03.07.2024.
