

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 53.092+537.312.9

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ В УСЛОВИЯХ СТУПЕНЧАТОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ

© 2024 г. А. М. Молодец*, А. А. Гольшев*

*«Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
пр. акад. Семенова, 1, Черноголовка, 142432 Россия*

**e-mail: molodets@icp.ac.ru*

Поступила в редакцию 16.07.2023 г.

После доработки 25.01.2024 г.

Принята к публикации 07.02.2024 г.

Измерено электросопротивление образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т в процессе их сжатия и разогрева при ступенчатом ударном сжатии. Выполнено математическое моделирование полученных экспериментальных результатов. Моделирование позволило перейти к удельным величинам и реконструировать объемно-температурную зависимость удельного электросопротивления стали при высоких давлениях 25–65 ГПа и температурах 350–950 К. Найденны полуэмпирические закономерности, позволяющие для стали 12Х18Н10Т прогнозировать суммарный эффект уменьшения удельного электросопротивления стали при сжатии и его увеличения при разогреве. Полученные результаты по электросопротивлению ударно сжатой и разогретой стали сопоставлены с литературными экспериментальными данными, полученными при атмосферном давлении и высоких температурах.

Ключевые слова: сталь, сталь 18-8, электропроводность, высокие давления, уравнения состояния ударные волны, математическое моделирование, гидрокод

DOI: 10.31857/S0015323024060021, **EDN:** WRHLOJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Нержавеющие аустенитные стали используются в качестве конструкционных и функциональных сплавов в важных отраслях машиностроения. В частности, в атомной промышленности они применяются в конструкциях тепловыделяющих сборок, функционирующих в активной зоне атомных реакторов при высоких температурах [1]. В связи с этим изучению разнообразных, в том числе электрофизических, свойств аустенитных нержавеющей сталей при высоких температурах посвящен ряд работ. Температурная зависимость электросопротивления аустенитных сталей в диапазоне нескольких сотен градусов исследована в работах [2–5], посвященных материаловедению термоядерных реакторов. Данные по удельному электросопротивлению аустенитных сталей при тысячеградусных температурах приведены в справочниках [6] и в современной литературе [7].

В процитированных работах экспериментальные данные по удельному электросопро-

тивлению стали 12Х18Н10Т (далее 18/10Т) представляются явными функциями только температуры. Зависимость электросопротивления от объема в этих функциях содержится неявно. Однако в научной литературе имеются работы, где предлагаются определяющие полуэмпирические соотношения для объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления металлов в виде явной функции двух переменных — температуры и объема. Так, например, в работах [8, 9] предложены определяющие соотношения, для учета объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления железа в условиях высоких температур и давлений (уменьшений объема).

Публикации, в которых предпринимали бы попытки выявить объемно-температурную зависимость электросопротивления стали 18/10Т, в доступной литературе не обнаружены. Вместе с этим представляется, что такие исследования целесообразны как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения. Прикладная це-

лесообразность связана с рисками аварийного воздействия, которое сопровождается как разогревом, так и сжатием-растяжением конструкций, содержащих сталь 18/10Т. С физической точки зрения сведения об объемно-температурной зависимости электро- и теплофизических свойств этой стали важны в задачах моделирования тепловых процессов при импульсных нагрузках, например, импульсном лазерном воздействии [10].

В этом контексте цель данной работы заключалась в экспериментально-расчетной реконструкции объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления стали 18/10Т в

протяженной области высоких давлений и температур. В работе использована техника и методические приемы [9] измерения электросопротивления сжатых и разогретых металлических образцов в условиях ступенчато-циклического ударного сжатия.

2. ГЕНЕРАТОР СТУПЕНЧАТО-ЦИКЛИЧЕСКОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ

В экспериментах использовали генератор, схема которого приведена на рис. 1а. Плоский металлический ударник 1 соударяется со слоистой мишенью 2–4, состоящей из двух “жест-

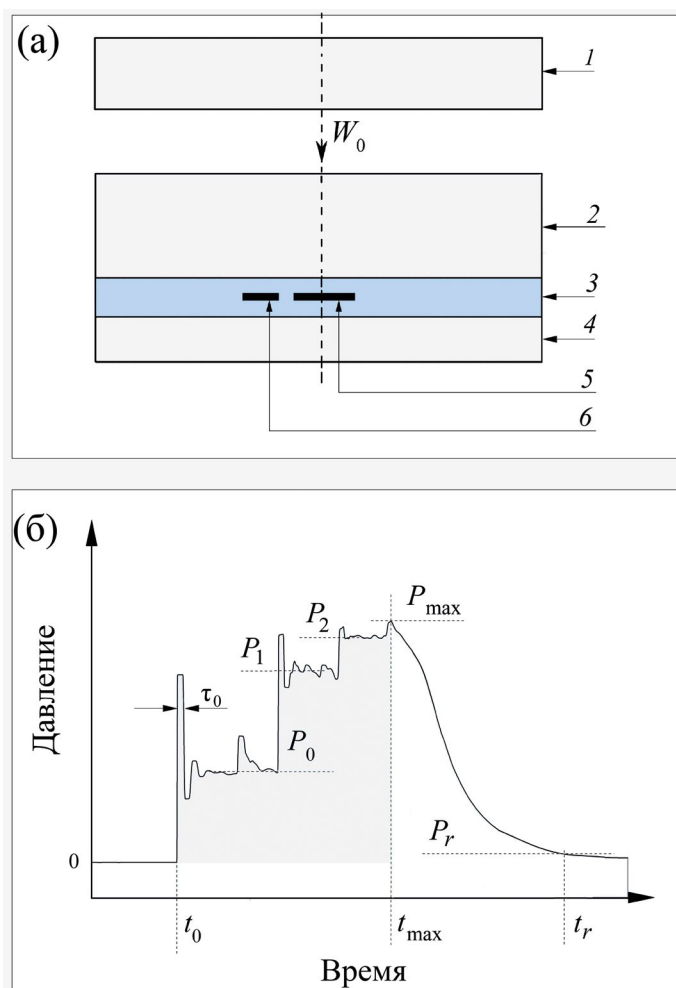


Рис. 1. Генератор ступенчатого ударного нагружения (а) и схематический профиль (зависимость от времени) давления в исследуемом образце при измерении его электросопротивления (б). (а): 1 – дискообразный стальной (сталь 18/10Т) ударник толщиной 3.50(5) мм, разогнанный взрывным устройством до скорости $W_0=2.6(1)$ км/с; 2 – стальная (сталь 18/10Т) пластина толщиной $H_{01}=3.85(5)$ мм; 3 – изолирующий материал (тефлоновые пленки, склеенные вакуумной смазкой) толщиной 2.40(1) мм; 4 – стальная (сталь 18/10Т) пластина толщиной 1.85 мм; 5 – исследуемый образец стали 18/10Т толщиной $h_0=0.55(5)$ мм; 6 – чувствительный элемент манганинового датчика давления толщиной 0.055(5) мм (5 и 6 изготовлены в виде ленты шириной $q \approx 1.0$ мм и расположены в одной плоскости); (б): t_0 – момент входа первой ударной волны в исследуемый образец, остальные обозначения пояснены в тексте.

ких” пластин 2 и 4 и зажатого между ними “мягкого” слоя-изолятора (тефлона) 3. Исследуемый лентообразный стальной образец 5 и лентообразный манганиновый датчик 6 располагаются в середине слоя 3.

После соударения в пластине 2 формируется однократный ударно-волновой импульс, фронт которого в слое 3 приобретает ступенчатую форму в виде увеличения давления P_0, P_1, P_2 (рис. 1б). Эта трансформация обусловливается реверберацией волны сжатия в “мягком” тефлоне 3 между двумя “жесткими” стальными пластинами 2 и 4. Поочередный приход каждой ступени P_0, P_1, P_2 на датчики 5 и 6 также стимулирует в них реверберации затухающих волн сжатия и разгрузки. Этот процесс иллюстрируется в виде высокочастотной циклической составляющей давления на фронтах ступеней P_0, P_1, P_2 на рис. 1б. Фаза ступенчатого ударного сжатия заканчивается достижением в момент $t_{\max}$ максимального давления $P_{\max}$. Затем до момента t_r происходит плавное уменьшение давления до близких к нулевому значению P_r , обусловленному приходом волн разгрузки со свободной поверхности пластины 4.

Отметим, что полупериод циклической составляющей τ_0 на фронтах ступеней P_0, P_1, P_2 составляет величину порядка $\tau_0 \sim h_0/C_0$, где h_0 – толщина датчика, C_0 – скорость звука в материале датчика, что при типичных для металла значениях $h_0 \sim 0.05$ мм и $C_0 \approx 5$ мм/мкс дает $\tau \approx 0.01$ мкс.

Соотношение диаметра плоского участка ударников, толщин пластин и размеров образцов подбирается так, чтобы обеспечить одноосное напряженное состояние образца в течение полезного времени регистрации электросопротивления образцов. Максимальные значения давления $P_{\max}$ и температуры $T_{\max}$ в стальном образце, полученные расчетным путем, составили $P_{\max} = 65(1)$ ГПа и $T_{\max} = 950(10)$ К.

Таким образом, рассмотренный генератор ступенчатого ударного сжатия стимулирует в исследуемом образце 5 специфический режим нагружения, состоящий из ступенчато-циклической фазы сжатия до давлений $P_{\max}$ и последующей фазы плавного уменьшения давления. Номиналы используемой в данной работе экспериментальной сборки указаны в подписи к рис. 1а. В качестве погрешностей номиналов указаны максимальные отклонения в четырех идентичных экспериментах.

Применительно к стали 18/10Т взято определяющее соотношение для удельного электросопротивления металла $\rho = \rho(T, V)$ в виде явной функции и температуры T и объема V из работы [9]:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^\alpha \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n/3} \left(\frac{v_0 - V}{v_0 - V_0} \right)^{-2n}. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 – удельное электросопротивление при нулевом давлении, комнатной температуре T_0 и удельном объеме V_0 . Параметр α характеризует температурную зависимость электросопротивления конкретного металла. Параметры α и n предназначены соответственно для индивидуальной характеристики температурной и объемной зависимости удельного электросопротивления металла. Константы v_0 и V_0 одновременно являются параметрами, задающими объемную зависимость характеристической температуры металла (см. формулы (4) и (5) Приложения).

Для стали 18/10Т значения $v_0 = 15.785$ см³/моль и $V_0 = 6.85$ см³/моль взяты из работы [11]. Измеренное значение ρ_0 для стали 18/10Т составило 71.5(3) мкОм·см. Оставшиеся два определяющих параметра α и n являются подгоночными. Согласно [9] их значения могут быть определены на основе измерений электросопротивления ударно-сжатых образцов металла и математического моделирования эксперимента, опирающегося на уравнения состояния исследуемого металла. Следующие разделы статьи содержат экспериментальные результаты и результаты моделирования электрофизических свойств стали 18/10Т.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ УДАРНОСЖАТЫХ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 18/10Т

С использованием генератора (рис. 1а) выполнена серия одинаковых взрывных экспериментов с образцами стали 18/10Т. Ленточные стальные образцы 5 изготавливали из предварительно отожженной фольги толщиной 60 мкм. Фольгу выдерживали в течение часа при температуре 1050°С в вакууме и затем плавно охлаждали до нормальной температуры, что в целом обеспечивало образование аустенитной структуры без феррита. Как отмечено выше, измеренное значение удельного электросопротивления материала исследуемых образцов стали 18/10Т составило $\rho_0 = 71.5(3)$ мкОм·см.

Измерения электросопротивлений образца 5 и манганинового датчика 6 проведены с использованием мостов Уитстона, включенных последовательно в цепи многоканального импульсного источника тока 3А. В ударно-волновых экспериментах электрический сигнал в виде изменения электрического напряжения $\Delta U(t)$ возникал при разбалансировке моста за счет изменения омического сопротивления чувствительных элементов. Профили $\Delta U(t)$ измеряли высокочастотным осциллографом Tektro-

нix DPO4104B. Первичные сигналы напряжения $\Delta U(t)$ преобразовывали в изменение электросопротивления $\Delta R(t)$ и в конечном счете в профили (зависимости от времени t) электросопротивления $R(t)=R_0+\Delta R(t)$, где R_0 — начальное сопротивление образцов. На рис. 2а представлен экспериментальный профиль 1 сопротивления $R(t)$ стального образца. Этот профиль является совпадающим в пределах 3% с профилями, полученными в четырех идентичных экспериментах.

Профили $R(t)$ манганинового датчика преобразовывали в профили давления $P(t)$ с использованием калибровочной зависимости $P=P(R)$ из [14]. На рис. 2б цифрой 1 обозначен результат преобразования $R(t)$ манганина в профиль давления.

Как отмечено выше, манганиновый датчик имеет такую же толщину и располагается в одной и той же плоскости, что и образец. Поэтому его электросопротивление изменяется синхронно

но с изменением электросопротивления образца, а первичный сигнал манганинового датчика, будучи пересчитанным в давление, может служить достоверной оценкой амплитуд ступеней ударного сжатия и разгрузки в стальном образце. Что же касается давления и температуры в стальном образце, то в дальнейшем эти параметры рассчитывали в рамках гидрокода (см. следующий раздел статьи), использующего авторские уравнения состояния. Максимальная расчетная температура образца составила $T_{\max}=950(10)$ К. Рассчитанный профиль $P(t)$ стального образца показан графиком 2 на рис. 2б. Отметим, что расчетный профиль 2 содержит все особенности схематического профиля давления рис. 1б.

Наряду с профилями давления и сопротивления $R(t)$ в гидрокоде рассчитывали профили температуры $T(t)$ и удельного объема $V(t)$ стали. Исключение времени из этих профилей позволяло реконструировать пространственную кри-

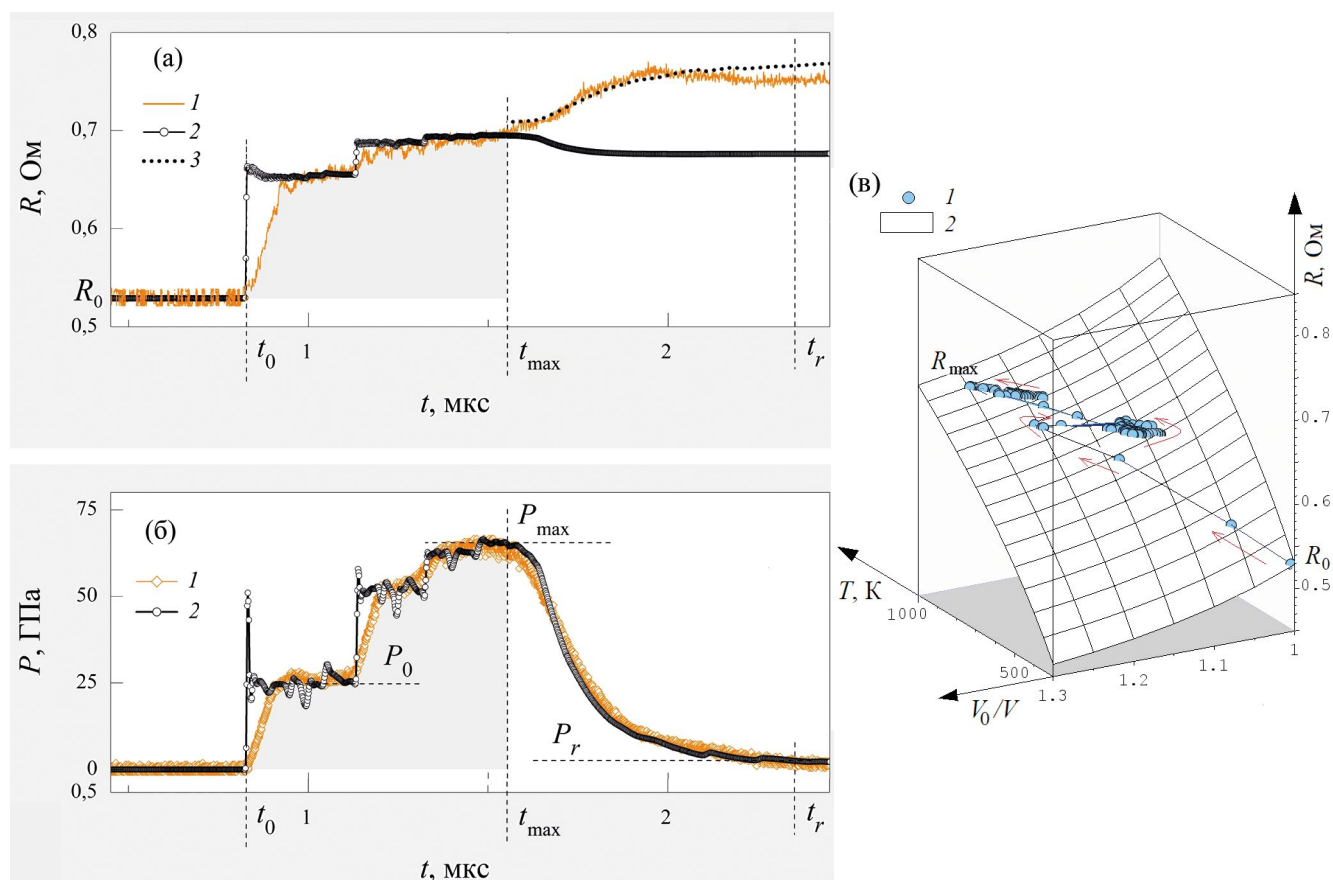


Рис. 2. Экспериментальные и модельные профили электросопротивления и давления. (а): 1 — экспериментальный профиль электросопротивления $R=R(t)$ исследуемого образца стали 18/10Т; 2 — модельный профиль $R_m=R_m(t)$ в стальном образце для сжатия; 3 — модельный профиль $R_m=R_m(t)$ в стальном образце для разгрузки. (б): 1 — профиль давления, полученный в результате обработки показаний манганинового датчика; 2 — модельный профиль давления в стальном образце (смысл обозначений $t_0, t_{\max}, t_r, P_0, P_{\max}, P_r$ тот же, что и на рис. 1б). (в): 1 — фазовая траектория образца $R_0-R_{\max}$ в координатах температура T , сжатие V_0/V , электросопротивление R , стрелками указана последовательность состояний во времени; 2 — поверхность (2).

вую $R=R(T, V)$ — так называемую фазовую траекторию в координатах $\{R, T, V\}$, которая показана точками 1 на рис. 2в.

Таким образом, в результате ударно-волновых экспериментов измерено электросопротивление образцов стали 18/10Т во время ступенчатого-циклического ударного сжатия до давлений $P_{\max}=65(1)$ ГПа и температур $T_{\max}=950(10)$ К.

4. РЕКОНСТРУКЦИЯ ОБЪЕМНО-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛИ 18/10Т

Моделирование термодинамического состояния и электрических свойств стальных образцов в проведенных экспериментах выполняли в программе СТАГ для ЭВМ [12]. Эта программа позволяет рассчитывать волновые взаимодействия в пластинчатой сборке рис. 1а и термодинамические состояния для каждой пластины при ее одномерном ударном нагружении. Поскольку ширина $q \approx 1$ мм используемого стального образца на порядок больше его толщины $h_0 \approx 0.05$ мм, то в одномерном гидрокоде образец представляли пластиной с начальной толщиной h_0 .

В программе СТАГ задается скорость, материал и толщина ударника, а также параметры уравнений состояния материалов и толщины каждой пластины. Для стали 18/10Т использовали представленное в Приложении в виде формулы (4) и поясняющих соотношений (5)–(8).

Выходными данными программы являются модельные профили давления $P=P(t)$, температуры $T=T(t)$ и объема $V=V(t)$ для серединной частицы образца. Здесь же с использованием профилей температуры и объема рассчитывается и модельный профиль электросопротивления образца $R_m=R_m(t)$ как

$$R_m = R_0 \left(\frac{\rho(T, V)}{\rho_0} \right) \left(\frac{V_0}{V} \right) \quad (2)$$

или с учетом (1)

$$R_m = R_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^\alpha \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n/3} \left(\frac{v_0 - V}{v_0 - V_0} \right)^{-2n} \left(\frac{V_0}{V} \right), \quad (3)$$

где начальное сопротивление образца R_0 измерено перед экспериментом. Последний множитель в (3) учитывает изменение толщины образца при одномерном сжатии.

Соотношение (3) было использовано для реконструкции объемно-температурной зависимости электросопротивления стали 18/10Т

путем нахождения параметров α и n , исходя из условия наилучшего совпадения модельного профиля $R_m=R_m(t)$ (3) и экспериментального профиля $R=R(t)$. Определенные этим способом комплект параметров α и n из (1) оказались следующими: $\alpha=0.34(1)$, $n=0.95(10)$. Соответствующий модельный профиль $R_m=R_m(t)$ показан графиком 2 на рис. 2а. Как видно, при сжатии в интервале времен $t_0 < t < t_{\max}$ экспериментальный 1 и модельный 2 профили удовлетворительно согласуются между собой.

Однако в разгрузке при $t_{\max} < t < t_r$ модельный профиль 1 прогнозирует заниженную величину электросопротивления по сравнению с экспериментом 2. Этот факт требует для разгрузки иные значения параметров ρ_0 , α , n . Для их нахождения было также использовано соотношение (3) с тем отличием, что заранее заданным полагали значение $\alpha=0.34$, а подгоночными считали параметры $\rho_0=\rho_{0h}$ и n_h . Как и выше, эти параметры определяли из условия наилучшего совпадения модельного профиля $R_m=R_m(t)$ (3) и экспериментального профиля $R=R(t)$ при $t_{\max} < t < t_r$. На рис. 2а графиком 3 показан модельный профиль электросопротивления (3) с оптимальными параметрами для разгрузки: $\rho_{0h}=80.7$ мкОм·см, $\alpha=0.34(1)$, $n_h=1.25(1)$. Как видно, здесь при разгрузке в интервале времен $t_{\max} < t < t_r$ экспериментальный 1 и модельный 3 профили $R(t)$ удовлетворительно согласуются между собой.

Найденные значения параметров α и n задают определенный характер изменения удельного электросопротивления (1). Действительно, при данном значении α первый множитель в (1) является возрастающей функцией температуры. В то же время найденное значение n задает убывающую функцию сжатия в виде произведения двух последних множителей (1). Таким образом, величина удельного электросопротивления аустенитной нержавеющей стали при высоких давлениях и температурах определяется двумя конкурирующими факторами — сжатием и температурой. Сжатие приводит к уменьшению удельного электросопротивления, в то время как разогрев — к его росту. Для обоих факторов найдены полуэмпирические закономерности, позволяющие прогнозировать суммарный эффект.

Количественные характеристики найденных закономерностей при сжатии представлены на рис. 3 в виде графика (поверхности 1) соотношения (1) с комплектом определяющих параметров $\rho_0=71.5$ мкОм·см, $\alpha=0.34(1)$, $n=0.95(10)$. Для удобства обсуждения поверхность 1 представлена в координатах температура T — обратный от-

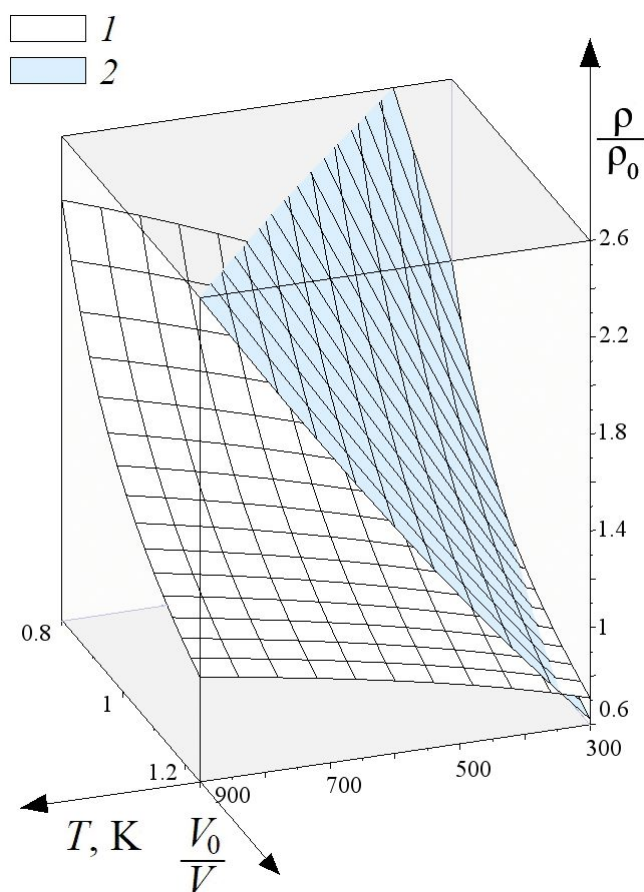


Рис. 3. Объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления в координатах ρ – температура T – сжатие (V_0/V). 1 – сталь 18/10Т, 2 – поверхность (1) с параметрами для ϵ -Fe из [9]. Параллельные кривые на поверхностях представляют собой изотермы и изохоры удельного электросопротивления.

носительный объем V_0/V – относительное удельное электросопротивление ρ/ρ_0 .

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отметим, что прототипом используемого соотношения (1) является модель объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления металла $\rho = \rho(T, V)$ из работы [8]. Поэтому физический смысл параметров ρ_0 , α и n в формуле (1) аналогичен таковым из [8] и заключается в следующем. Параметр α определяет температурную зависимость ρ . Значение $\alpha=1$ соответствует высокотемпературному соотноше-

нию Блоха–Грюнрайзена. Величина параметра n отражает объемную зависимость ρ и характеризует механизмы рассеяния электронов в металлах. Согласно [8] $n=2$ соотносится с газом свободных электронов, значение $n=3$ характерно для s-d-рассеяния, для описания электрон-фононного рассеяния ожидается $n=5$.

В работе [8] отмечено, что модель позволяет сделать обоснованные предположения о механизме проводимости металла. В этой логике обсудим индивидуальные величины α , n для стали 18/10Т и α -железа, которые приведены в табл. 1.

Как видно, величины α стали и железа по-разному отклоняются от линейной температурной зависимости, соответствующей значению $\alpha=1$. Если для железа, где $\alpha>1$ (и следовательно, $T^a - T > 0$), ожидается положительное отклонение температурной зависимости электросопротивления $\rho = \rho(T)$ от случая $\alpha=1$, то для стали с $\alpha<1$ ожидается $T^a - T < 0$, то есть отрицательное отклонение $\rho = \rho(T)$.

Соотношение (1) в сочетании с уравнением состояния в форме (4) (см. Приложение) позволяют детально проиллюстрировать этот вывод и дополнительно рассмотреть, например, влияние давления на температурную зависимость электросопротивления металла. Действительно, поскольку соотношение (1) и уравнения состояния представляют собой гладкие непрерывные функции, то оказывается возможным сравнительно легко выполнять прогностические расчеты электро- и теплофизических свойств исследуемых металлов и сравнить модельные расчеты с экспериментом. Так, на рис. 3 представлены поверхности (1) для 18/10Т и ϵ -железа в координатах температура T – обратный относительный объем V_0/V – относительное удельное электросопротивление ρ/ρ_0 . Частные производные этих поверхностей в сочетании с уравнениями состояния позволяют вычислять, например, изобары температурных зависимостей электросопротивления $\rho_p = \rho(T)_p$ или изобары температурных зависимостей температурного коэффициента электросопротивления (ТКЭС) $\eta_p = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$

при различном постоянном давлении P .

Наконец, остановимся на четырехкратном различии показателя степени температурной за-

Таблица 1. Определяющие параметры объемно-температурной зависимости (1) удельного электросопротивления стали 12Х18Н10Т (18/10Т) и α -железа

Металл	α	n	r_0 , мкОм×см	V_0 , см ³ /моль	v_0 , см ³ /моль
18/10Т	0.34(1)	0.95(10)	71.5	6.85	15.785
α -Fe [15]	1.30(1)	1.77(2)	14.4	7.093	21.092

висимости α в стали и в чистом железе. Вообще говоря, существенное уменьшение величины α в металлах говорит об изменении механизмов, определяющих электропроводность. Однако представляется, что полноценное сопоставление α , принадлежащего чистому ОЦК-железу и высоколегированному ГЦК-сплаву, каковым является сталь 12Х18Н10Т, затруднительно. Вместе с этим возможно, что существенное уменьшение α в сталях является тенденцией, обусловленной увеличением степени легирования сплава. В рамках методических приемов данной статьи это предположение может быть экспериментально проверено на сплаве с различным содержанием единственного легирующего элемента, например, на кремнистом железе. Значительное уменьшение величины α в этом случае будет свидетельствовать в пользу существенного вклада примесного рассеяния электронов проводимости на атомах легирующего элемента.

Отметим, что значения переменной $(V_0/V) < 1$ ориентировочно соответствуют уменьшенным по сравнению с V_0 объемам, т. е. сжатию под действием положительных давлений, а значения $(V_0/V) > 1$ соответствуют увеличенным объемам, то есть растяжению под действием отрицательных давлений и высоких температур.

Рассчитанные высокотемпературные изобары ρ_p и η_p приведены на рис. 4. На рис. 4а видно, что модельная атмосферная изобара 1 качественно и количественно совпадает с экспериментом 2 из [6]. Т. е. оказывается, что обсуждаемая модель адекватна не только для динамических условий, заведомо сопровождающихся наклепом, но и в статических условиях нагрева без деформации. Этот вывод позволяет предположить, что вклад дефектообразования в изменение электросопротивления стали при динамическом нагружении незначителен.

На рис. 4а показаны расчетные высокотемпературные изобары 3, 4, 5, 6 удельного электро-

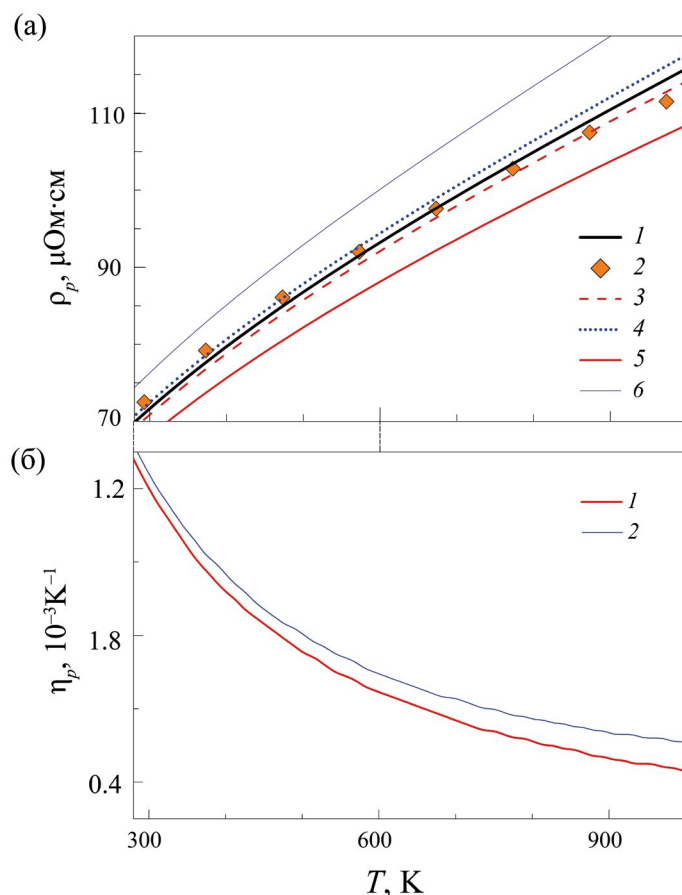


Рис. 4. Зависимость удельного электросопротивления $\rho = \rho(T, P)$ (а) и ТКЭС $\eta = \eta(T, P)$ (б) стали 12Х18Н10Т от температуры и давления. а: 1 – модельная атмосферная изобара удельного электросопротивления; 2 – справочная атмосферная изобара удельного электросопротивления из [6]; 3 – расчетная изобара ρ при давлении $P = +1$ ГПа; 4 – расчетная изобара ρ при давлении $P = -1$ ГПа; 5 – расчетная изобара ρ при давлении $P = +5$ ГПа; 6 – расчетная изобара ρ при давлении $P = -5$ ГПа; б: 1 – изобара η при давлении $P = +5$ ГПа; 2 – изобара η при давлении $P = -5$ ГПа.

сопротивления при давлениях соответственно 1 ГПа, –1 ГПа, 5 ГПа, –5 ГПа. Как видно, сжатие приводит к уменьшению, а растяжение – к увеличению электросопротивления. Видно также, что различия удельного электросопротивления стали 18/10Т при растяжении и сжатии в диапазоне от –1 ГПа до +1 ГПа находятся на уровне $\approx \pm 1\%$ при температурах 300–950 К. В диапазоне от –5 ГПа до +5 ГПа изменения удельного электросопротивления достигают $\approx \pm 10\%$ при температуре 950 К.

На рис. 46 представлено влияние давления на температурную зависимость ТКЭС стали 18/10Т. Как видно, здесь сжатие также приводит к понижению величины η . Эффект увеличивается с температурой и на уровне 950 К различия ТКЭС оказываются на уровне 9% при изменении давления от –5 ГПа до +5 ГПа.

Обсудим величину коэффициента n из (1) для стали 18/10Т. Как отмечено в табл. 1, эта величина почти вдвое меньше соответствующего значения для железа и находится на уровне единицы. Возможно, что уменьшение параметра α или n является тенденцией при переходе от чистых металлов к сплавам.

Обсудим возможную причину различия модельных профилей электросопротивления стали для сжатия и разгрузки в ударно-волновых экспериментах. Известно, что понижение температуры ударного сжатия стали 18/10Т стимулирует превращение метастабильного аустенита в мартенсит (см. ссылки в [13]). Поэтому можно предположить, что во время ступенчато-циклической фазы сжатия происходит частичное превращение метастабильного аустенита в мартенсит, что приводит к увеличению электросопротивления сплава.

Это предположение согласуется с повышенным по сравнению с ρ_0 значением параметра ρ_{0h} , которое близко к значению удельного электросопротивления стали X18H9, испытывавшей деформацию с частичным превращением аустенита в мартенсит [5].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены измерения электросопротивления образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т в процессе их сжатия и разогрева при ступенчато-циклическом ударном сжатии и последующей разгрузки. Выполнено математическое моделирование полученных экспериментальных результатов в рамках гидрокода, опирающегося на авторские уравнения состояния этого сплава.

Реконструирована объемно-температурная зависимость удельного электросопротивления

стали при давлениях 25–65 ГПа и температурах 350–950 К.

Показано, что величина удельного электросопротивления аустенитной нержавеющей стали при высоких давлениях и температурах определяется двумя конкурирующими факторами – сжатием и температурой. Сжатие приводит к уменьшению удельного электросопротивления, в то время как разогрев приводит к росту удельного электросопротивления этого сплава. Для обоих факторов найдены полуэмпирические закономерности, позволяющие прогнозировать суммарный эффект.

Показано, что модельное соотношение для объемно-температурной зависимости удельного электросопротивления стали 12Х18Н10Т адекватно эксперименту не только при ударном сжатии, но и вдоль атмосферной изобары при температурах до 950 К.

Результаты получены в рамках договора №17706413348210001380/226/3866-Д “Экспериментальное исследование перспективных конструкционных материалов, кинетики взрывчатых превращений, свойств плазмы и численное моделирование нестационарных газодинамических процессов в интересах задач атомной энергетики. Этап 2022”, выполняемого в рамках Комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года”, а также в рамках Госзадания №АААА-А19-119071190040-5.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Важной составляющей полученных экспериментально-расчетных результатов являются уравнения состояния исследованного сплава. В этом приложении приведен формульный вид базовых выражений термического уравнения состояния (зависимости давления $P=P(V, T)$ от объема V и температуры T) стали 12Х18Н10Т. В обозначениях работы [11] термическое уравнение состояния имеет следующий вид:

$$P = 3R\Theta \frac{\gamma}{V} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\exp(\Theta/T) - 1} \right) + P_x, \quad (4)$$

где R – удельная газовая постоянная, ключевые функции $\Theta=\Theta(V)$, $\gamma=\gamma(V)$ и $P_x=P_x(V)$ являются алгебраическими функциями объема. Характе-

ристическая температура $\Theta = \Theta(V)$ выражается как

$$\Theta = \Theta_0 \left(\frac{v_0 - V}{v_0 - V_0} \right)^2 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{2/3}, \quad (5)$$

где

$$v_0 = V_0 \left(1 + \frac{2}{\gamma_0 - 2/3} \right). \quad (6)$$

В (6) параметр Θ_0 – начальное значение характеристической температуры $\Theta_0 = \Theta(V_0)$ при начальном удельном объеме V_0 и начальной комнатной температуре $T_0 = 298.15$ К и начальном атмосферном давлении. Параметр v_0 (6) 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 $P_x = P_x(V)$ имеет вид:

$$\gamma = -\frac{d \ln}{d \ln V} = \frac{2}{3} + \frac{2V}{v_0 - V}; \quad (7)$$

$$P_x = 3C_1 x^{1/3} \left(-\frac{1}{5} x^{-2} + 2x^{-1} + 6 - x + \frac{1}{7} x^2 \right) + C_2. \quad (8)$$

В уравнении (8) переменная $x = V / v_x$ представляет собой удельный объем V , нормированный на параметр v_x . Используемый комплект параметров Θ_0 , V_0 , v_0 , v_x , C_1 , C_2 вместе с формульной массой $M_f = 53.94$ г/моль для стали 12Х18Н10Т приведен в [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильчиков И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. 220 с.
2. Арбузов В.Л., Гоцицкий Б.Н., Данилов С.Е., Залужный А.Г., Зуев Ю.Н., Карькин А.Е., Пархоменко В.Д., Сагарадзе В.В. Накопление и отжиг радиационных дефектов и влияние водорода на них в аустенитной стали 16Cr15Ni3Mo1Ti при низкотемпературном нейтронном и электронном облучении // ФММ. 2016. Т. 117. № 1. С. 94–104.
3. Данилов С.Е., Арбузов В.Л. Структурные изменения при термических и радиационных воздействиях в нержавеющей стали, легированной титаном // ФММ. 2019. Т. 120. № 11. С. 1200–1203.
4. Терещенко Н.А., Шабашов В.А., Уваров А.И. Особенности низкотемпературных фазовых превращений в азотсодержащих сталях на Cr–Mn основе // ФММ. 2010. Т. 109. № 5. С. 464–473.
5. Максимкин О.П., Нургули Е.Е. Изменения электросопротивления и намагниченности необлученной и облученной нейтронами стали Х18Н9 в процессах деформации и отжигов // Вестник НЯЦ РК. 2018. Вып. 1. С. 61–68.
6. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. Марочник сталей и сплавов. М.: Книга по требованию, 2012. 640 с.
7. Протасов Е.А., Петровский В.Н., Миронов В.Д. Аномальная электропроводность и намагниченность в сплавах системы Fe–Cr–Ni аустенитно-мартенситного класса // Журнал технич. физики. 2019. Т. 89. Вып. 2. С. 202–205.
8. Seagle C.T., Cottrell E., Fei Y., Hummer D.R., and Prakapenka V.B. Electrical and thermal transport properties of iron and iron-silicon alloy at high pressure // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 5377–5381.
9. Молодец А.М., Голышев А.А. Электросопротивление ε -Fe при высоких давлениях ступенчатого ударного сжатия // Физика Земли. 2023. № 4. С. 39–52.
10. Проскуряков В.И., Родионов И.В., Кошуро В.А., Перинская И.В., Куц Л.Е. Моделирование тепловых процессов в поверхностном слое нержавеющей хромоникелевой стали при лазерном импульсном легировании // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. № 2. С. 243–257.
11. Молодец А.М. Температурная зависимость откольной прочности и уравнение состояния аустенитной хромоникелевой стали 18-10 // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 10. С. 1992–1997.
12. Ким В.В., Молодец А.М. Программа для расчета волновых взаимодействий и термодинамического состояния многослойных мишеней при одномерном ударном нагружении СТАГ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616914. 22 июня 2016.
13. Молодец А.М., Фомичев А.Ю. Кинетические особенности откола, осложненного фазовым переходом в метастабильном материале // Химич. физика. 1997. Т. 16. № 11. С. 124–132.
14. 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.
15. Молодец А.М., Голышев А.А. Объемно-температурная зависимость электро- и теплофизических свойств α -железа при высоких давлениях и температурах // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 9. С. 1403–1408.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF STAINLESS CHROMIUM–NICKEL STEEL AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES AT STEPWISE SHOCK COMPRESSION

A. M. Molodets^{1,*} and A. A. Golyshev¹

¹*Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry,
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

**e-mail: molodets@icp.ac.ru*

The electrical resistance of 12X18H10T stainless steel specimens was measured in the course of compression and heating under stepwise shock compression. A mathematical simulation of the obtained experimental data was conducted. The simulation allowed switching to specific values and reconstructing the volume–temperature dependence of the electrical resistivity of steel at high pressures of 25–65 GPa and temperatures of 350–950 K. Semi-empirical regularities were identified that permit the prediction of the total effect of a decrease in the specific electrical resistivity of 12X18H10T steel upon compression and its increase upon heating. The outcomes of the electrical resistivity tests on shock-compressed and heated steel are evaluated in comparison with the existing literature data on similar experiments conducted under atmospheric pressure and high temperatures.

Keywords: steel, steel 18/10T, electrical conductivity, high pressures, equations of state, shock waves, mathematical simulation, hydrocode