

УДК 539.63

НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕДИ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

С. Д. Гилёв

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

Обсуждается вопрос о том, является ли физическое состояние ударно-сжатой меди равновесным. Для этого экспериментальные данные о дефектном электросопротивлении используются для оценки концентрации точечных дефектов. Количественная информация о концентрации дефектов может быть получена, если известен тип возникающих дефектов. В предположении преимущественного образования вакансий получена зависимость концентрации дефектов в меди от давления ударной волны. Показано, что количество дефектов монотонно возрастает при увеличении давления ударной волны. Найденная концентрация вакансий ($\approx 0.8\%$ при давлении 20 ГПа) превышает на десять порядков соответствующее равновесное значение. Таким образом, состояние меди при ударном сжатии является высокодефектным и сильно неравновесным. Сравнение данных для ударно-сжатых меди и серебра показывает общие особенности состояния этих металлов. Сопоставление данных, полученных непосредственно после прохождения ударной волны по образцу (*in situ*), с известными результатами для сохраненных после эксперимента образцов демонстрирует, что в первом случае регистрируются заметно большие (до двух порядков величины) концентрации дефектов. Таким образом, техника сохраненных образцов не дает объективной информации о состоянии вещества непосредственно за ударным фронтом. Кратко обсуждается проблема построения уравнения состояния в условиях неравновесности физического состояния.

Ключевые слова: дефекты кристаллической структуры, неравновесное состояние, электросопротивление металлов, ударное сжатие, медь.

DOI 10.15372/FGV20210314

ВВЕДЕНИЕ

Для описания физического состояния вещества при ударном сжатии широкое распространение получил термодинамический подход [1–7]. Таким способом находят важные параметры состояния вещества — удельный объем, давление, температуру, энтропию и т. д. Термодинамическое описание предполагает наличие термодинамического равновесия. Обычно состояние ударно-сжатого вещества считается равновесным. На постулате о равновесности основаны модели уравнений состояния [1–7] и многочисленные экспериментальные исследования в мощных ударных волнах [8]. В пользу наличия равновесности говорит близость значений давления, найденных при гидростатическом и динамическом сжатии при тех же удельном объеме и температуре. Точное определение соответствующих величин затруднено погрешностями измерений, а также малым временем динамического эксперимента. В то же время

строгое обоснование постулата о термодинамической равновесности в условиях ударного сжатия, пожалуй, отсутствует.

О степени равновесности состояния вещества можно судить по концентрации дефектов в кристалле. При температуре абсолютного нуля в кристалле в равновесном состоянии дефекты отсутствуют. Если температура отлична от нуля, то дефекты есть, и их равновесная концентрация определяется формулой Больцмана

$$n_d^e \approx \exp(-E_d/kT), \quad (1)$$

где E_d — энергия образования дефекта, k — коэффициент Больцмана, T — абсолютная температура. Для комнатной температуры при характерной энергии точечного дефекта 1 эВ концентрация дефектов мала ($n_d^e \approx 10^{-17}$). При температуре около 1 000 К равновесная концентрация резко увеличивается ($n_d^e \approx 10^{-5}$), но также остается незначительной.

С 1960-х годов известно, что ударная волна является генератором дефектов кристаллической структуры. Об этом в работе [9] бы-

ло написано следующее: «Ударная волна является мощным генератором дефектов, рождающихся в процессе сильной пластической деформации, происходящей на ее фронте. Эти нарушения идеальности кристалла, как и в нормальных условиях, определяют во многом электрические, оптические и другие его физические свойства». Рождение дефектов приводит к ускорению фазовых превращений, изменению электропроводности и поглотительной способности веществ.

Принципиальное различие состояния ударно-сжатой жидкости и твердого тела, в частности, вследствие генерации дефектов структуры, было отмечено Грэхэмом в монографии [10], где автор сформулировал катастрофическую парадигму ударного сжатия. Суть ее заключается в том, что ударное сжатие твердого тела нельзя рассматривать как гидростатическое сжатие с небольшими нарушениями структуры. Согласно [10] ударно-сжатое твердое тело находится в высокодефектном состоянии, гетерогенном по природе, со значительными анизотропными компонентами, в условиях отсутствия термодинамического равновесия. По сути, такой взгляд на природу состояния вещества при ударном сжатии является развитием и обобщением общепринятого подхода, сформировавшегося с момента зарождения физики ударных волн, в котором состояния при гидростатическом и динамическом сжатии считаются тождественными (при должном учете тепловых составляющих давления и внутренней энергии).

В настоящее время концепция Грэхэма не является общепризнанной в научном сообществе, скорее, она демонстрирует возможное направление развития ударно-волновой науки и технологии. Очевидно, что необходимость анализа отмеченных особенностей состояния ударно-сжатого твердого тела определяется как решаемой задачей, так и наличием объективных экспериментальных данных, которые не укладываются в традиционную модель. Поэтому принципиальное значение имеют экспериментальные наблюдения.

Известно, что возникающие дефекты сильно влияют на механические, термодинамические, электромагнитные, оптические и химические свойства материалов [9–14]. В некоторых случаях дефекты ответственны за кардинальное изменение физических характери-

стик вещества. Поэтому выяснение особенностей дефектной структуры вещества при ударном сжатии является важной научной задачей.

В настоящее время существует два основных подхода к экспериментальному исследованию дефектов структуры. Исторически первыми развились исследования сохранных после ударного сжатия образцов. Несомненным достоинством такого подхода является возможность проведения всесторонних исследований вещества комплексом взаимно дополняющих методов. Использовались различные техники исследования: оптическая и электронная микроскопия, рентгеновский анализ, дифференциальная дилатометрия, калориметрия, анализ кривых отжига электросопротивления и т. д. В образцах, извлеченных после ударно-волнового нагружения, обнаружены различные типы дефектов: вакансии, междоузельные атомы, дислокации, двойники. Неоднократно указывалось [11, 12, 15], что, вследствие меньшей энергии образования, в условиях динамического сжатия преимущественно генерируются точечные дефекты. Такая точка зрения нашла свое подтверждение в экспериментальных исследованиях.

Используя технику сохранных образцов и анализ кривых отжига электросопротивления при изохронном нагреве, авторы [15–17] зарегистрировали в экспериментах с никелем и медью увеличение концентрации вакансий, междоузельных атомов и дислокаций при росте давления ударной волны p . В [18] рентгенографически обнаружен рост плотности дислокаций в меди до давления $p = 30 \div 40$ ГПа, за которым следовало падение, объясненное авторами как следствие отжига дефектов. В тантале также зафиксирован рост плотности дислокаций ($p \leq 100$ ГПа) [18]. Найденные в [15–18] концентрации дефектов значительно превышают равновесные значения. Наибольшая концентрация дефектов соответствует вакансиям (до $1.7 \cdot 10^{-2}$ % на атом при $p \leq 40$ ГПа) [17]. Отмечено, что в условиях ударного сжатия количество дефектов существенно больше, чем при низкоскоростной деформации [12, 15, 18].

Основным недостатком техники сохранных образцов является то, что полученные результаты относятся к состоянию вещества после ударного сжатия и последующей разгрузки образца. Время между экспериментом и исследованием свойств образца составляет в лучшем случае несколько часов. Для того чтобы умень-

шить влияние отжига, эксперименты с сохраненными образцами проводятся при криогенной температуре. В ряде работ, использовавших технику сохраненных образцов, высказана точка зрения, что концентрация дефектов может слабо меняться при разгрузке. Однако реальная степень соответствия полученных данных состоянию за ударным фронтом не ясна.

Вторым подходом к изучению состояния вещества является регистрация характеристик материала непосредственно во время существования зоны высокого давления (обычно < 1 мкс). Это так называемые исследования *in situ*. Наилучшее временное разрешение имеют оптические методы — до 10^{-3} нс [9, 19]. При помощи оптического метода с использованием данных электрических измерений в ударно-нагруженном NaCl обнаружены дефекты с концентрацией около $1.6 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$, что соответствует молекулярной концентрации 0.14 % (при $p \approx 55$ ГПа). Энергия дефектов оценена в 2.4 эВ.

Другой полезной техникой *in situ* является метод электросопротивления [20–22]. Метод имеет умеренное временное разрешение (≈ 10 нс), но достаточно удобен и прост. Для металлов использование метода основано на том, что генерация дефектов приводит к росту электросопротивления. Изменение удельного электросопротивления металла при ударном сжатии относительно начального состояния можно представить в виде суммы двух слагаемых [23, 24]:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_e(V, T) + \Delta\rho_d(n_d). \quad (2)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (2) представляет собой изменение удельного электросопротивления металла в зависимости от удельного объема V и температуры T . Второе слагаемое соответствует электросопротивлению дефектов, генерируемых при ударном сжатии металла (n_d — концентрация дефектов). В [23] методом электросопротивления при ряде упрощений о физическом поведении вещества при сжатии оценена концентрация дефектов (предположительно вакансий) при ударном сжатии серебра. Количество дефектов возрастало при увеличении давления ударной волны и достигало при $p = 12$ ГПа значения 0.2 %.

Для того чтобы найти концентрацию дефектов, необходимо знать зависимость удельного электросопротивления металла от

удельного объема и температуры $\rho_e(V, T)$. В [24] предложена модель равновесного электросопротивления металла, основанная на уравнении электросопротивления Блоха — Грюнайзена и уравнении состояния типа Ми — Грюнайзена. Два свободных параметра модели найдены для меди из известных зависимостей электросопротивления при изотермическом сжатии и изобарическом нагреве. Сравнением экспериментальных данных по электросопротивлению меди с результатами расчета по модели равновесного электросопротивления в [24] выделено второе слагаемое в правой части уравнения (1), определяемое генерацией дефектов при ударном сжатии.

В настоящей работе исследуется вопрос о том, является ли физическое состояние ударно-сжатой меди равновесным. Для этого используются экспериментальные данные о дефектном электросопротивлении, полученные в [24]. На основе этих данных проводится оценка концентрации точечных дефектов при ударном сжатии. Полученное значение сравнивается с равновесной концентрацией дефектов. Для нахождения концентрации используется предположение о типе образующихся дефектов. Хотя значение концентрации зависит от типа дефектов, ответ на поставленный в исследовании вопрос не зависит от предполагаемого типа дефектов. Результаты оценок концентрации дефектов сравниваются с известными данными для серебра [23], а также для сохраненных образцов меди и никеля [15–17]. Это позволяет сделать вывод об общих особенностях состояния металлов при ударном сжатии, а также о границах применимости техники сохраненных образцов.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ДЕФЕКТОВ

Пусть величина дефектного сопротивления $\Delta\rho_d$ определена из уравнения (2). Пусть также дефекты в металле в количестве 1 % (ат.) приводят к возникновению удельного электросопротивления ρ_{dp} . Тогда концентрация дефектов n_d может быть найдена по формуле

$$n_d \approx \frac{\Delta\rho_d}{\rho_{dp}} = \frac{\Delta\rho_d}{\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho_{dp}}, \quad (3)$$

где ρ_0 — начальное удельное электросопротивление образца.

Для того чтобы найти концентрацию дефектов n_d , необходимо знать удельное электропроводление ρ_{dp} . Значение ρ_{dp} определяется типом дефекта, образующегося при ударном сжатии.

В настоящее время мы не знаем, какие дефекты кристаллической структуры генерируются при пластической деформации во фронте ударной волны. Нет модели, которая бы предсказывала количество дефектов и их тип. Возможно, методы молекулярной динамики смогут в будущем дать ответы на эти вопросы. В настоящее время, говоря о дефектах структуры, мы можем опираться лишь на доступные экспериментальные данные и общие физические соображения.

Среди обнаруженных дефектов в сохраненных образцах [15–18] точечные дефекты имеют наименьшую энергию и представляют собой наиболее экономичный (с энергетической точки зрения) способ генерации дефектов кристаллической структуры [12, 25]. В таблице перечислены типы точечных дефектов, приведены значения энергии образования E_d и удельного электропроводления ρ_{dp} дефектов для меди.

Как видно из таблицы, не все характеристики дефектов в настоящее время определены с достаточной степенью точности. Если значения энергии для вакансии по разным источни-

кам близки, то для междоузельного атома отличия существенны как по данным разных авторов, так и между теоретическими и экспериментальными результатами. Среди точечных дефектов вакансии имеют наименьшую энергию образования. Поэтому для оценки можно предположить, что ударная волна генерирует лишь точечные дефекты, а именно вакансии. (Дальше мы обсудим, как невыполнение этого предположения повлияет на главный вывод работы.)

Величина $\Delta\rho_d/\rho_0$ определена в [24] в зависимости от давления ударной волны p . Используя эту зависимость, а также значения удельного электропроводления ρ_{dp} для вакансий из таблицы, можно найти концентрацию дефектов n_d .

На рис. 1 показана найденная по формуле (3) зависимость концентрации дефектов от давления ударной волны для меди. Каждая точка представляет собой результат отдельного эксперимента. При построении зависимости учтено отличие начального удельного электропроводления медных образцов в [22] от табличного значения для чистой меди (+7%), что привело к увеличению значений $\Delta\rho_d$ и n_d .

Из рис. 1 видно, что при повышении давления ударной волны концентрация дефектов в меди растет. При $p = 20$ ГПа концентрация до-

Свойства точечных дефектов в меди

Тип дефекта	E_d , эВ	ρ_{dp} , мкОм · см/% (ат.)
Вакансия	1.27 [26] 1.28 ± 0.5 [12]	1.14 ± 0.14 ^c
Междоузельный атом	2.2 [26] 3.6 ^a [12] 3.1 ^b [12]	2.72 ^d [12]
Дефект Френкеля	3.5 [26] 4.4 ^b [12]	—

^aСреднее значение по расчетным данным, соответствующим разному расположению дефекта в кристаллической решетке [12, с. 1657].

^bСреднее значение по экспериментальным данным пяти авторов [12, с. 1666].

^cСреднее значение по данным, приведенным в монографии [25], а также по более поздним результатам [27–29]. Для оценки разброса данных приведено также среднеквадратичное отклонение величин от среднего значения.

^dСреднее значение по данным [12, с. 1655].

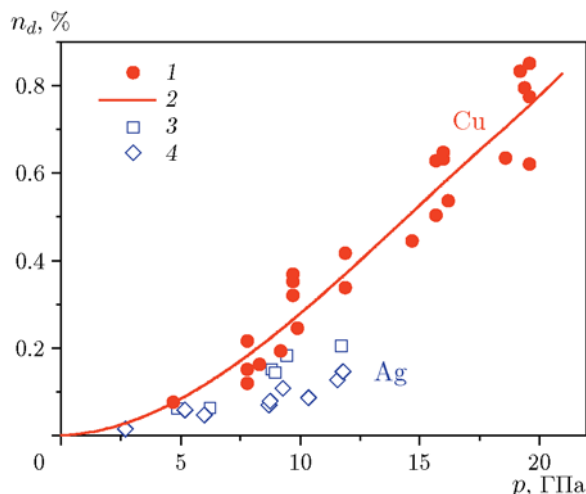


Рис. 1. Зависимость концентрации вакансий от давления ударной волны, найденная из измерений электропроводности:

медь: 1 — опытные данные, 2 — аппроксимирующая полиномиальная кривая; серебро [23]: 3 — марка W3N (более чистое серебро), 4 — марка MRC (менее чистое серебро)

стигает $\approx 0.8\%$. На этом рисунке показаны также данные для серебра [23]. Экспериментальные значения n_d для меди и серебра близки, хотя значения n_d для меди несколько больше, чем для серебра. Можно констатировать, что зависимость концентрации дефектов от давления ударной волны для обоих металлов имеет сходный характер — монотонно увеличивается с ростом давления.

2. СОСТОЯНИЕ УДАРНО-СЖАТОЙ МЕДИ

Сравним полученные значения концентрации вакансий с равновесными величинами, даваемыми зависимостью (1). При $E_d \approx 1.28$ эВ (энергия вакансии), $T = 554$ К (расчетная температура фольгового образца при давлении ударной волны 20 ГПа [24]) равновесная концентрация составляет $n_d^e \approx 10^{-12}$. Полученное экспериментальное значение концентрации вакансий ($\approx 0.8\%$ при $p = 20$ ГПа) превышает равновесное почти на 10 порядков величины. Таким образом, следует заключить, что состояние ударно-сжатой меди является сильно неравновесным. В условиях ударного сжатия образовавшиеся дефекты не успевают выйти на свободную поверхность образца или аннигилировать, являясь «замороженными».

Сделанный вывод о неравновесности состояния ударно-сжатой меди представляет собой главный результат настоящей работы и нуждается в осмыслении. Действительно, известно, что неравновесная концентрация дефектов может наблюдаться в металлах при обычных условиях, а пластическая деформация приводит к генерации большого количества дефектов [12]. Основываясь на рис. 1, можно утверждать, что ударное сжатие генерирует большое (пожалуй, максимальное известное) количество дефектов посредством деформации. Далее сравнение с серебром показывает, что высокодефектное и сильно неравновесное состояние, по-видимому, характерно также и для серебра.

Особо отметим, что качественный вывод о неравновесности состояния меди не зависит от того, какие конкретно дефекты генерируются при ударном сжатии. Если возникают преимущественно междоузельные атомы, то, вследствие большой энергии образования данного дефекта (см. таблицу) и экспоненциальной зависимости равновесной концентрации от энергии (уравнение (1)), разница между равновесной концентрацией и получаемой из оценки для

ударно-волнового эксперимента будет еще более впечатляющей.

3. КАЧЕСТВЕННАЯ КАРТИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Представим кубик вещества, в котором атомы в кристаллической решетке расположены равномерно. Рассмотрим сжатие этого кубика при деформации двух типов: гидростатической и одноосной. Пусть вещество не испытывает фазовых переходов и давление велико, так что вещество ведет себя при сжатии подобно жидкости. Поставим вопрос: что будет происходить с атомами при сжатии кубика в каждом из этих случаев?

При гидростатическом сжатии все размеры кубика меняются одинаковым образом, сдвиговой деформации нет. Расстояние между атомами уменьшается, но их взаимное расположение не меняется. Перемещение атомов происходит синхронно по трем осям и однозначным предсказуемым образом. В этом случае кристаллическая структура остается неизменной и дефектов не возникает.

Пусть теперь вещество сжимается в плоской ударной волне. В этом случае продольный размер исследуемого образца (в направлении движения ударного фронта) уменьшается при неизменности поперечного размера. После сжатия расстояние между атомами в продольном и поперечном направлениях становится меньше, чем в начальном состоянии. Для этого некоторые атомы должны переместиться из своего слоя кристаллической решетки в соседний слой. В идеальной решетке внедрение атома в «чужой» слой может происходить неоднозначным образом. Поэтому такое перемещение должно быть чувствительно к воздействию случайных факторов, и в процессе перемещения могут возникать нарушения структуры. По-видимому, генерация дефектов при ударном сжатии связана с перемещением атомов в другие слои кристаллической решетки и с малым временем наблюдения, недостаточным для теплового «залечивания» возникшего дефекта.

4. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ IN SITU И В СОХРАНЕННЫХ ОБРАЗЦАХ

Сравним результаты по концентрации вакансий в металлах, полученные при помощи

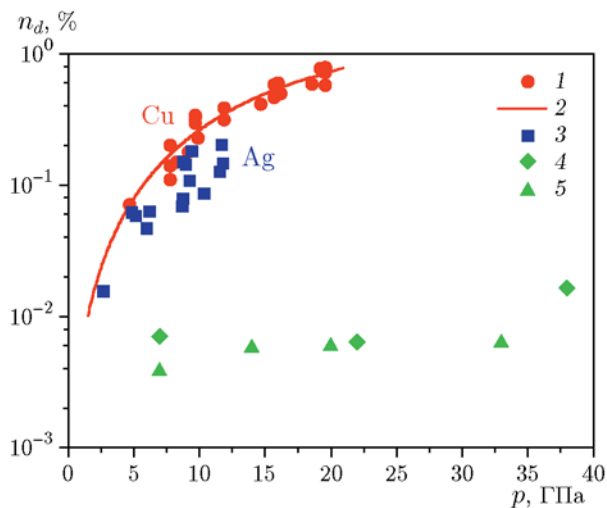


Рис. 2. Зависимость концентрации вакансий от давления ударной волны:

измерения *in situ*: 1 — медь, данные настоящей работы, 2 — аппроксимирующая кривая, 3 — серебро, все данные [23]; техника сохраненных образцов: 4 — медь [17], 5 — никель [15]

прямых измерений при ударном сжатии (*in situ*) и в сохраненных после эксперимента образцах [15–17]. На рис. 2 доступные данные представлены в виде зависимости концентрации вакансий от давления ударной волны.

Нетрудно видеть, что все данные отчетливо разбиваются на две группы, соответствующие разным методам исследования. Найденные *in situ* концентрации вакансий на один-два порядка превышают значения, соответствующие сохраненным образцам. Отсюда можно сделать вывод, что, несмотря на принятые в [15–17] меры по минимизации отжига, найденные значения концентрации дефектов в сохраненных образцах не описывают состояние ударно-сжатого металла. Изучаемые в [15–17] дефекты структуры являются результатом сложных и протяженных во времени процессов разгрузки и релаксации и лишь опосредованно связаны с состоянием ударно-сжатого вещества. Несомненно, что изучение сохраненных образцов позволяет сделать ряд важных выводов о свойствах веществ, прошедших ударно-волновую обработку, и полезно для практического использования таких материалов. В то же время техника сохраненных образцов не дает адекватной информации о состоянии ударно-сжатого вещества. Лишь измерения *in situ* могут привести к пониманию физическо-

го состояния металла непосредственно за ударным фронтом.

ОБСУЖДЕНИЕ

Остановимся на важном следствии вывода о неравновесности состояния вещества при ударном сжатии. Обычно в научной литературе термодинамическое состояние ударно-сжатого вещества полагается равновесным и идентичным состоянию при статическом сжатии (при тех же значениях удельного объема и температуры). Так, давление и внутренняя энергия представляются в виде однозначных функций удельного объема и температуры. Аналогично термодинамическим параметрам, удельное электросопротивление записывается многими авторами в виде функции удельного объема и температуры. Так как состояние ударно-сжатого вещества оказывается сильно неравновесным, то, очевидно, задача построения уравнения состояния нуждается в переосмыслении.

При описании физического состояния вещества в качестве первого шага разумно предположить квазистационарность возникающих дефектов (в течение времени существования зоны высокого давления) и термодинамическую равновесность вещества по давлению и температуре. Тогда энергия дефектов может быть учтена в полной внутренней энергии вещества. Насколько нам известно, в настоящее время отсутствуют модели уравнения состояния, учитывающие отклонение структуры кристалла от идеальной и возникновение дефектов. Для правильной записи общей энергии необходимо точно знать, дефекты какого типа генерируются при ударном сжатии. (Это не важно для решения вопроса о степени равновесности состояния ударно-сжатого вещества, но критически важно для определения соответствующего компонента энергии.) Кроме того, одной из актуальных задач является нахождение параметров вещества, определяющих наблюдаемую концентрацию дефектов. На рис. 1, 2 концентрация дефектов представлена в виде зависимости от давления, однако давление, возможно, не является оптимальным параметром для обнаружения закономерностей генерации дефектов в различных материалах.

Отметим, что найденные значения концентрации дефектов являются оценками, проведенными в рамках принятых допущений о генерации в ударно-сжатом веществе только од-

ного вида дефектов (вакансий) и об использовании определенного значения дефектного электросопротивления ρ_{dp} . На результат влияет также использованная процедура определения компонента электросопротивления, обусловленного дефектами структуры. Хотя концентрация дефектов не найдена точно, а лишь оценена в рамках принятых допущений, настоящий подход позволяет лучше охарактеризовать физическое состояние ударно-сжатого металла. Можно предположить, что количество возникающих дефектов является объективным параметром состояния и характеризует сам механизм ударного сжатия.

Возникает закономерный вопрос, является ли высокодефектное и неравновесное состояние общим для всех ударно-сжатых металлов. Для ответа на этот и другие поставленные вопросы требуются дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование показывает возможности метода электросопротивления для определения характеристик физического состояния вещества непосредственно за ударным фронтом. Измерения электросопротивления *in situ* и последующий анализ дают недоступную ранее экспериментальную информацию о природе состояния ударно-сжатого вещества. Представленные результаты свидетельствуют о том, что физическое состояние ударно-сжатой меди является сильно неравновесным. Возможно, такое состояние характерно и для других ударно-сжатых металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — 2-е изд. — М.: Наука, 1966.
2. Жарков В. Н., Калинин В. А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. — М.: Наука, 1968.
3. Бушман А. В., Фортов В. Е. Модели уравнений состояния веществ // *Успехи физ. наук.* — 1983. — Т. 140, № 2. — С. 177–232.
4. Ударные волны и экстремальные состояния вещества / под ред. В. Е. Фортова, Л. В. Альтшулера, Р. Ф. Трунина, А. И. Фунтикова. — М.: Наука, 2000.
5. Eliezer S., Ghatak A., Hora H. *Fundamentals of Equations of State.* — Singapore: World Scientific, 2002.
6. Фортов В. Е. Уравнения состояния вещества от идеального газа до кварк-глюонной плазмы. — М.: Физматлит, 2012.
7. Ломоносов И. В., Фортова С. В. Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов // *Теплофизика высоких температур.* — 2017. — Т. 55, № 4. — С. 596–626.
8. Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — 2-е изд. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2006.
9. Кормер С. Б. Оптические исследования ударно-сжатых диэлектриков // *Успехи физ. наук.* — 1968. — Т. 94, № 4. — С. 641–687.
10. Graham R. A. *Solids under High-Pressure Shock Compression.* — N. Y.: Springer-Verlag, 1993.
11. Meyers M. A. *Dynamic Behavior of Materials.* — N. Y.: John Wiley & Sons, 1994.
12. *Physical Metallurgy* / R. W. Cahn, P. Haasen (Eds). — 4th ed. — North Holland, 1996.
13. Kovács I., Sayed H. E. Point defects in metals // *J. Mater. Sci.* — 1976. — V. 11, N 3. — P. 529–559.
14. Graham R. A. Active measurements of defect processes in shock-compressed metals and other solids // *Shock Waves and High-strain-rate Phenomena in Metals* / M. Meyers (Ed.). — N. Y.: Plenum Press, 1981. — P. 375–386.
15. Kressel H., Brown N. Lattice defects in shock-deformed and cold-worked nickel // *J. Appl. Phys.* — 1967. — V. 38, N 4. — P. 1618. — <https://doi.org/10.1063/1.1709733>.
16. Brillhart D. C., Preban A. G., Gordon P. The annealing of explosively deformed copper // *Metall. Trans.* — 1970. — V. 1, N 4. — P. 969–978.
17. Могилевский М. А. Изменения структуры в чистой меди при взрывном нагружении // *Физика горения и взрыва.* — 1970. — Т. 6, № 2. — С. 224–229.
18. Подурец А. М., Ткаченко М. И., Игнатов О. Н., Лебедев А. И., Игонин В. В., Раевский В. А. Исследование плотности дислокаций в меди и тантале после ударного сжатия в зависимости от параметров нагружения и исходной микроструктуры // *Физика металлов и металловедение.* — 2013. — Т. 114, № 5. — С. 480–487.
19. Кормер С. Б., Синицин М. В., Кириллов Г. А., Попова Л. Т. Экспериментальное определение коэффициента поглощения света в ударно-сжатом NaCl. Механизм поглощения и проводимость // *ЖЭТФ.* — 1966. — Т. 49, вып. 1. — С. 135–147.
20. Якушев В. В. Электрические измерения в динамическом эксперименте // *Физика горения и взрыва.* — 1978. — Т. 14, № 2. — С. 3–19.

21. **Гилев С. Д.** Измерение электропроводности конденсированного вещества в ударных волнах (Обзор) // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 3–23.
22. **Гилев С. Д., Прокопьев В. С.** Электросопротивление меди при ударном сжатии: экспериментальные данные // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 121–130. — 10.15372/FGV20160115.
23. **Dick J. J., Styris D. L.** Electrical resistivity of silver foils under uniaxial shock-wave compression // J. Appl. Phys. — 1975. — V. 46, N 4. — P. 1602–1617. — <https://doi.org/10.1063/1.321762>.
24. **Гилев С. Д.** Электросопротивление меди при больших давлениях и температурах: равновесная модель и генерация дефектов кристаллической структуры при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 5. — С. 116–125. — 10.15372/FGV20190514.
25. **Дамаск А., Динс Дж.** Точечные дефекты в металлах. — М.: Мир, 1966.
26. **Орлов А. Н., Трушин Ю. В.** Энергии точечных дефектов в металлах. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
27. **Simmons R. O., Balluffi R. W.** Measurements of equilibrium concentrations of vacancies in copper // Phys. Rev. — 1963. — V. 129, N 4. — P. 1533–1544. — <https://doi.org/10.1103/PhysRev.129.1533>.
28. **Berger A. S., Ockers S. T., Siegel R. W.** Measurement of the monovacancy formation enthalpy in copper // J. Phys. F: Met. Phys. — 1979. — V. 9, N 6. — P. 1023–1033.
29. **Волков В. А.** Электросопротивление металлов с вакансиями // Физика металлов и металлосоведение. — 1980. — Т. 50, № 5. — С. 1094–1097.

Поступила в редакцию 09.01.2020.

После доработки 27.08.2020.

Принята к публикации 27.11.2020.
