

УДК 539.63:539.89:537.311.3

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ФАЗ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ОЛОВА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

С. Д. Гилёв, В. С. Прокопьев

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

Измерено относительное электросопротивление R/R_0 олова при различных давлениях ударного сжатия p . Найденная зависимость $R/R_0(p)$ существенно отличается от известных зависимостей для статического и квазиизоэнтропического сжатия и демонстрирует рост сопротивления с давлением. На зависимости обнаружен излом, свидетельствующий о фазовом переходе. Излом соответствует давлению $4.7 \div 5.3$ ГПа в диэлектрике, между слоями которого располагался тонкий образец, и давлению первой ударной волны в образце $8.4 \div 9.6$ ГПа. Последние параметры находятся в качественном согласии с характеристиками фазового перехода $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$. Первая ударная волна в олове в значительной мере определяет итоговое электросопротивление образца после реверберации волн. Полученные экспериментальные данные указывают на кинетическое поведение электросопротивления при переходе $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$, который сопровождается генерацией дефектов кристаллической структуры с характерным временем >1 мкс. В волне разгрузки зарегистрирован резкий рост электросопротивления образца, который связывают с плавлением олова.

Ключевые слова: олово, фазовый переход, ударное сжатие, электросопротивление, плавление.

DOI 10.15372/FGV20150413

ВВЕДЕНИЕ

Фазовые переходы в олове при большом давлении являются предметом исследований на протяжении многих лет [1–19]. В настоящее время последовательность фазовых переходов при статическом сжатии выглядит следующим образом: $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$ (объемно-центрированная тетрагональная структура) $\rightarrow \sigma\text{-Sn}$ (объемно-центрированная кубическая структура). Этим переходам при комнатной температуре соответствуют давления 9.4 ГПа [4] и $40 \div 45$ ГПа [4, 6]. Переход $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$ является реперным и используется для градуировки камер высокого давления с 1960-х годов [20].

В экспериментальных исследованиях олова при статическом сжатии использовались методы измерения электросопротивления [1, 2] и рентгеновской дифракции [4, 6] при давлении $p \leq 120$ ГПа. Проводились также теоретические исследования фаз высокого давления олова [8–10, 13–16].

При изучении фазовых превращений олова в условиях квазиизоэнтропического и ударного сжатия использовался широкий круг экспериментальных методик: измерение электросо-

противления [5], регистрация волновой структуры с использованием манганинового датчика [7], рентгенографирование поверхности образца [11], метод индикатора плавления при разгрузке [12], измерение скорости звука в сжатом веществе с использованием догоняющей разгрузки и индикаторной жидкости [17–19].

В условиях ударного сжатия переход $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$ диагностируется при 8.9 ГПа [7], переход $\gamma\text{-Sn} \rightarrow \sigma\text{-Sn}$ — при 34 ± 2 ГПа [18], плавление — при 39 ± 2 ГПа [18], $60 \div 90$ ГПа (начало и конец плавления соответственно) [19]. Отличие давлений фазовых переходов при статическом и ударном сжатии может быть связано с уменьшением температуры с ростом давления на кривых сосуществования фаз $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$, $\gamma\text{-Sn} \rightarrow \sigma\text{-Sn}$ в переменных температура — давление ($T-p$) [4, 6, 14].

В [5] выполнены измерения электросопротивления олова в условиях квазиизоэнтропического сжатия до давления 10 ГПа. Сначала идет линейный спад сопротивления до 85 % от начального его значения. Далее, при $p > 4.5$ ГПа следует участок постоянного сопротивления, который сменяется резким падением сопротивления при приближении к давлению 10 ГПа. Авторы предположили, что фазовый переход в олове начинается при $p = 5$ ГПа

и растянут до 9.5 ГПа, однако отметили, что для окончательного заключения требуются дополнительные исследования. Полученные в [5] результаты не согласуются с цитированными выше статическими и динамическими исследованиями.

Расхождения характеристик фазового перехода β -Sn \rightarrow γ -Sn, выявленные при измерении электросопротивления [5] и регистрации структуры волновых фронтов [7], не позволяют сделать однозначный вывод о давлении фазового перехода в олове при динамическом сжатии. Необходимы дополнительные исследования фазовых переходов в олове при ударном сжатии методом измерения электросопротивления.

Для исследования фазовых переходов в металлах при ударном сжатии широкое распространение получила техника тонких фольг [21]. Образец в виде металлической фольги располагается между слоями толстого диэлектрика. Регистрируется напряжение на электродах, подключенных к образцу. Для режима постоянного тока, проходящего через образец, регистрируемое напряжение пропорционально сопротивлению образца. Вследствие различия ударных импедансов образца и диэлектрика состояние металлической фольги устанавливается в процессе реверберации волн. В этом случае установившееся давление в образце соответствует давлению падающей ударной волны в диэлектрике, в то время как температура образца определяется историей нагружения и зависит от соотношения ударных импедансов образца и диэлектрика. Таким образом, техника тонких фольг позволяет варьировать давление и температуру, достигаемые при ударном сжатии образца. Это может быть полезно для определения кривых фазового равновесия металлов при высоком давлении. Регистрация электросопротивления также может дать информацию о кинетике фазовых превращений.

Целью настоящей работы является исследование фазовых переходов в олове при ударном сжатии при помощи измерения электросопротивления.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Опыты проводили с оловом металлическим ТУ 6-09-1484-85 марки «ч» (содержание основного вещества не менее 98 %). Процесс изготовления образца включал в себя плавление металла, прессовку и прокатку образца через валки для получения фольги. Со-

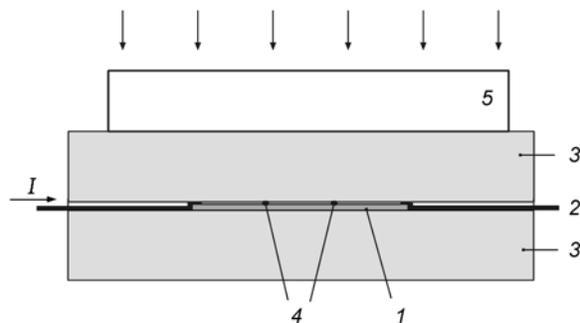


Рис. 1. Ячейка для измерения электросопротивления олова при ударном сжатии:

1 — образец (оловянная фольга), 2 — токоподводы, 3 — диэлектрик, 4 — электроды, 5 — заряд взрывчаточного вещества

гласно [22, с. 306] удельное электрическое сопротивление чистого олова при комнатной температуре составляет $1.28 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$. Удельное сопротивление полученной оловянной фольги оказалось несколько выше — около $1.5 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$.

Схема ударно-волновых экспериментов показана на рис. 1. Образец олова в виде фольги (толщина $50 \div 100$ мкм, длина ≈ 30 мм, ширина $3 \div 10$ мм) располагался между диэлектрическими пластинами (толщина $3 \div 5$ мм). В большей части экспериментов в качестве диэлектрика применялся гетинакс, в нескольких экспериментах — оргстекло и фторопласт-4. К образцу точечной сваркой подсоединялись токоподводы и электроды из медной или никелевой фольги. Нагружение измерительной ячейки осуществлялось зарядом конденсированного взрывчаточного вещества, который накладывался непосредственно на ячейку, а также через металлическую пластину, располагаемую между зарядом и ячейкой. В ряде опытов нагружение ячейки осуществлялось металлическим ударником, ускоряемым продуктами детонации взрывчаточного вещества. При использовании накладного заряда в толстом диэлектрике генерировался импульс нагружения треугольной формы с характерным временем спада давления ≈ 5 мкс.

Измерительная ячейка подключалась к электрической схеме, состоящей из заряженного конденсатора, тиристора, силового кабеля и осциллографа, регистрирующего напряжение на электродах. Измерения проводили в режиме постоянного тока. Поскольку в процессе измерения ток не менялся, электрическое сопро-

тивление образца определяли следующим образом:

$$R(t) = R_0 \frac{U(t)}{U_0},$$

где R_0 — начальное сопротивление образца (до прихода ударной волны), $U(t)$ — регистрируемое напряжение, U_0 — начальное напряжение. Сила тока через измерительную ячейку не превышала 500 А, время роста тока — около 60 мкс. Нагрев образца протекающим током не превышал 25 К. Схема измерения электросопротивления тонких металлических образцов описана в [21].

Ударное давление рассчитывали методом ударных импедансов с использованием известных адиабат Гюгонио материалов. Вычислялось давление p падающей волны в диэлектрике, соответствующее установившемуся после реверберации волн давлению в образце, а также давление первой ударной волны в олове p_1 . Для олова использовалась ударная адиабата в виде зависимости скорости ударной волны D от массовой скорости u : $D = 2.72 + 1.19u + 0.14u^2$, полученная обработкой экспериментальных данных для олова [23] в диапазоне ударного давления до 70 ГПа. Характерное время ударного сжатия образца составляло $12 \div 30$ нс.

С использованием компьютерного пакета «Мастер» в гидродинамическом приближении находили также зависимости давления в диэлектрике и в средней части образца от времени.

На рис. 2 показаны характерные экспериментальные осциллограммы, полученные в

опытах по измерению электросопротивления оловянной фольги, размещенной между слоями гетинакса. На рис. 2,а представлена запись, соответствующая постановке опыта согласно рис. 1. Видно, что ударное сжатие образца приводит к росту регистрируемого напряжения. Запись на рис. 2,б соответствует опыту с

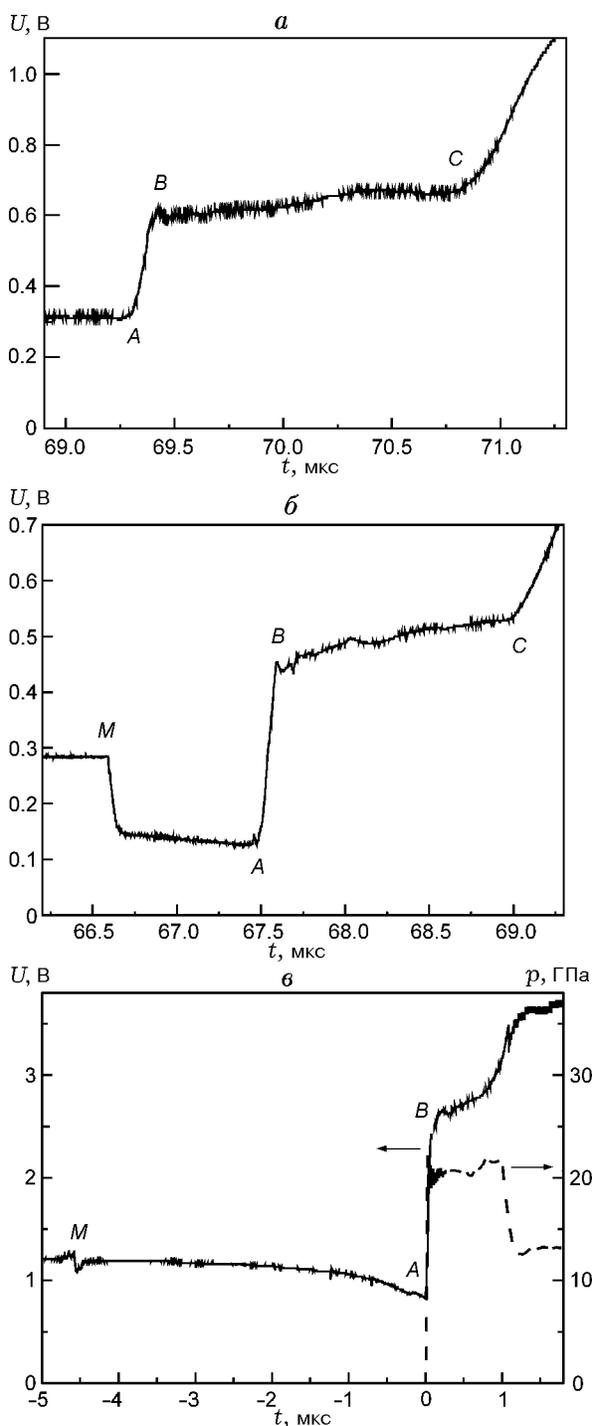


Рис. 2. Записи напряжения с измерительной ячейки (сплошные кривые) в разных постановках опытов:

а — опыт соответствует рис. 1, давление ударной волны в диэлектрике $p = 14$ ГПа; б — опыт, в котором между зарядом взрывчатого вещества и диэлектриком расположена металлическая пластина, $p = 15$ ГПа; в — опыт с использованием металлического ударника, штриховая кривая — расчетная зависимость $p(t)$ в месте расположения образца; А — начало ударного сжатия образца; В — окончание резкого роста напряжения; С — приход волны разрежения со свободной поверхности измерительной ячейки на образец, М — начало движения поверхности металлической пластины

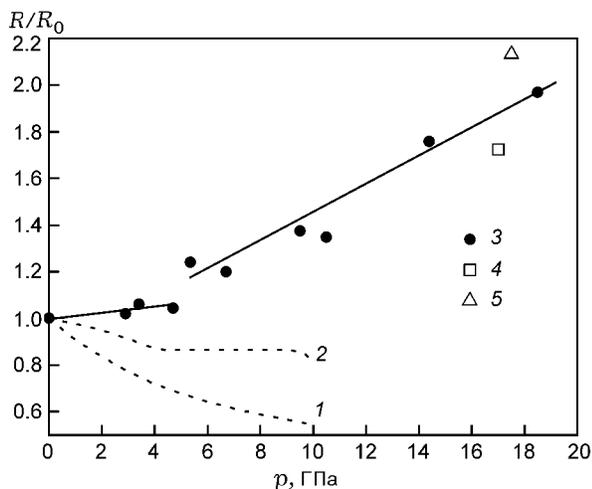


Рис. 3. Зависимость относительного сопротивления олова от давления при ударном сжатии (настоящая работа, точки 3–5), статическом сжатии [1] (кривая 1), квазиизоэнтропическом динамическом сжатии [5] (кривая 2):

образец располагается между пластинами гетинакса (точки 3), фторопласта (точка 4), оргстекла (точка 5)

металлической пластиной, размещенной между зарядом взрывчатого вещества и измерительной ячейкой. Осциллограмма на рис. 2, в соответствует опыту с металлическим ударником. При использовании металлической пластины регистрируемое напряжение уменьшается в момент начала движения пластины и возрастает при приходе ударной волны на образец. Сигнал, обусловленный движением металлической пластины в магнитном поле, созданном током в образце, существует до начала движения образца. Когда относительная скорость образца и пластины обращается в нуль, сигнал исчезает.

Из полученных экспериментальных данных следует, что зависимость сопротивления олова от времени имеет три основных участка, на каждом из которых сопротивление образца монотонно возрастает. Первый участок (AB на рис. 2) соответствует ударному сжатию образца и характеризуется максимальной скоростью изменения сопротивления, второй участок (BC) соответствует ударному сжатому состоянию, а также последующему спаду давления в волне Тейлора, третий участок (после момента C) — действию волны разрежения со свободной поверхности образца. На третьем участке сопротивление образца быст-

ро возрастает, достигая значения $\approx 10R_0$. Для определения электросопротивления образца в сжатом состоянии нами использовался момент B , в котором наклон зависимости $U(t)$ резко изменяется.

Результаты измерения относительного сопротивления олова R/R_0 при изменении ударного давления в диэлектрике приведены на рис. 3. Каждая точка на рисунке является результатом осреднения 2–4 опытов. Необходимость проведения такой процедуры обусловлена заметным разбросом опытных данных ($\approx 10\%$), вызванным, возможно, вариацией свойств образцов, получаемых в лабораторных условиях описанным выше способом. На рис. 3 приведены также известные зависимости $R/R_0(p)$ для статического [1] и квазиизоэнтропического [5] сжатия.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Полученная зависимость $R/R_0(p)$ существенно отличается от известных зависимостей сопротивления при статическом [1, 2] и при квазиизоэнтропическом [5] сжатии, которые показывают уменьшение электросопротивления при росте давления. Как видно из рис. 3, электросопротивление олова при ударном сжатии растет. Такое поведение соответствует большинству металлов, исследовавшихся ранее [24].

На зависимости $R/R_0(p)$ можно выделить два участка с различным наклоном. Излом зависимости наблюдается при $p = 4.7 \div 5.3$ ГПа. Можно было бы ожидать, что этот излом соответствует фазовому переходу $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$. Однако согласно имеющимся данным переход $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$ регистрируется при статическом сжатии при $p = 9.4$ ГПа [4], а в случае ударного сжатия — при $p = 8.9$ ГПа [7].

Выявленная несогласованность величины давления фазового перехода, определенного при измерении электросопротивления, с известными данными указывает на необходимость более тщательного анализа экспериментов с тонкой металлической фольгой, размещаемой между слоями диэлектрика. Поскольку динамический импеданс олова выше импеданса окружающего диэлектрика, фольга подвергается многократному сжатию в последовательности волн нагружения и разгрузки. Отмеченное расхождение в величине давления перехода можно устранить, если предположить, что регистрируемое электросопротивление определяет-

ся главным образом давлением первой ударной волны в образце. Такая волна имеет наибольшую амплитуду и генерирует состояние с максимальной температурой и изменением энтропии. Отметим, что в наших экспериментах регистрируемое напряжение $U(t)$ всегда монотонно росло со временем, в то время как давление в образце вследствие действия волн сжатия и разрежения изменялось немонотонно.

Зависимость $R/R_0(p_1)$ для первой ударной волны качественно подобна зависимости $R/R_0(p)$ и имеет излом при $p_1 = 8.4 \div 9.6$ ГПа. Эти значения достаточно близки к известным давлениям фазового перехода при статическом и ударном сжатии [4, 7]. Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что установившееся в ходе реверберации волн электросопротивление образца определяется первой ударной волной в образце.

Как видно из рис. 3, на электросопротивление образца при ударном сжатии влияет материал обоймы, в которой располагается образец. При размещении образца в оргстекле электросопротивление выше, а при размещении образца во фторопласте меньше, чем при использовании гетинакса, как в основной части экспериментов. Эти данные иллюстрируют влияние динамической жесткости диэлектрика на электросопротивление. Качественное объяснение этих результатов состоит в том, что размещение образца в легкосжимаемом материале (оргстекло) приводит к большей температуре образца, что обеспечивает большее электросопротивление.

Для анализа состояния образца олова при ударном сжатии выполнены оценки температуры. Для этого использовалось термодинамическое уравнение [25]

$$dT = \frac{V_0 - V}{2c_V} dp + \frac{p}{2c_V} dV - \gamma \frac{TdV}{V}.$$

Здесь V_0 — начальный удельный объем, c_V — удельная теплоемкость, γ — коэффициент Грюнайтзена. В вычислениях использовались следующие значения коэффициентов: $c_V = 26.4$ Дж/(моль · К) [22], $\gamma_0 = 2.11$ [12] (полагалось $\gamma_0/V_0 = \gamma/V$), теплота фазового перехода $\beta\text{-Sn} \rightarrow \gamma\text{-Sn}$ $\Delta H = 18$ Дж/г, теплота фазового перехода $\gamma\text{-Sn} \rightarrow \sigma\text{-Sn}$ $\Delta H = 2.8$ Дж/г [18], теплота плавления $\Delta H = 61$ Дж/г [22].

На рис. 4 показана фазовая диаграмма олова вместе с результатами расчета темпера-

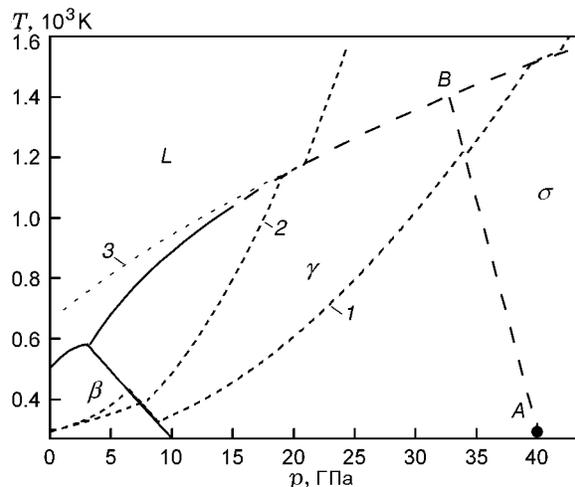


Рис. 4. Зависимость температуры олова от ударного давления при однократном сжатии (кривая 1), многократном сжатии (кривая 2), при разгрузке из состояния с $p = 20$ ГПа (кривая 3), а также фазовая диаграмма олова:

β , γ , σ — фазы, L — жидкость, метка A соответствует параметрам фазового перехода $\gamma\text{-Sn} \rightarrow \sigma\text{-Sn}$ при комнатной температуре [4], B — предполагаемая тройная точка

туры при ударном сжатии. Сплошные линии соответствуют известным экспериментальным данным, полученным при статическом сжатии. Для построения диаграммы использованы данные справочника [20] (максимальное давление 10 ГПа), экспериментальная кривая плавления олова (максимальное давление около 15 ГПа) и ее экстраполяция в область больших давлений по уравнению Симона (штриховая кривая) [18]. Предполагаемая граница между областями γ и σ показана прямой штриховой линией. Она построена исходя из параметров фазового перехода $\gamma\text{-Sn} \rightarrow \sigma\text{-Sn}$ при статическом сжатии $p \approx 40$ ГПа, $T = 293$ К [4] (метка A на рис. 4), а также давления перехода $\gamma\text{-Sn} \rightarrow \sigma\text{-Sn}$ (34 ГПа) при ударном сжатии [18]. Полученная таким образом тройная точка $\gamma\text{-}\sigma\text{-}L$ имеет параметры $p = 32.8$ ГПа, $T = 1400$ К (обозначена меткой B на рис. 4).

На рис. 4 показана также зависимость температуры олова от ударного давления $T(p)$ при однократном сжатии (кривая 1), а также при размещении тонкого образца в диэлектрике (гетинакс) (кривая 2). Расчет волн в образце проводился методом ударных импедансов. При таком расчете кривые вторичного сжатия и кривые разгрузки находились зеркальным отражением главной ударной адиабаты вещества в

переменных p - u . Как видно из сравнения кривых 1 и 2, размещение образца в диэлектрике приводит к существенному разогреву образца по сравнению с режимом однократного ударного сжатия (при том же давлении).

Зависимость $T(p)$ для многократного ударного сжатия проходит по нескольким областям фазовой диаграммы. Согласно этой зависимости при $p > 7.5$ ГПа образец находится в области γ -фазы, а при $p > 21$ ГПа — в области расплава.

Кривая 3 на рис. 4 соответствует разгрузке образца из сжатого состояния с $p = 20$ ГПа. Как видно из рисунка, кривая разгрузки имеет меньший наклон, чем граница между фазами γ -Sn — расплав, поэтому состояние образца при разгрузке соответствует области жидкости. При разгрузке из состояния с несколько меньшим давлением, чем $p = 20$ ГПа, образец сначала приближается к фазовой границе с расплавом, а затем переходит в жидкую фазу.

Отмеченные особенности зависимостей $T(p)$ позволяют интерпретировать поведение электросопротивления олова при разгрузке. Рост электросопротивления образца после момента C (см. рис. 2) обусловлен разгрузкой образца и, возможно, переходом его в жидкое состояние. Об этом свидетельствуют также большие значения относительного электросопротивления образца в процессе разгрузки.

Более сложна интерпретация поведения электросопротивления на интервале BC (см. рис. 2). Здесь электросопротивление образца возрастает. При использовании накладного заряда, как в основной массе проведенных экспериментов, давление в образце уменьшается вследствие спада давления в волне Тейлора. Вместе с тем разгрузка является не единственным фактором, определяющим поведение электросопротивления сжатого металла. В этом убедили эксперименты, поставленные с нагружением измерительной ячейки металлической пластиной, метаемой продуктами детонации. На рис. 2, в показана запись напряжения с ячейки и приведена расчетная зависимость давления в месте расположения образца. Давление в ячейке остается постоянным до прихода волны разрежения от границы раздела пластины — продукты детонации (≈ 1 мкс). В то же время, как видно из рисунка, регистрируемое напряжение продолжает возрастать. Монотонный рост электросопротивления после момента B свидетельствует о кинетическом по-

ведении электросопротивления, которое может быть обусловлено генерацией дефектов кристаллической структуры с характерным временем больше 1 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные измерения электросопротивления позволили диагностировать фазовый переход в олове при ударном сжатии. Определенное давление перехода близко к известным результатам статических и ударно-волновых измерений. Электросопротивление тонкого образца олова, размещенного между слоями диэлектрика, в значительной мере определяется первой ударной волной в олове.

Интерпретация экспериментальных данных осложнена реверберацией волн в тонком образце, а также влиянием на электросопротивление олова сжатия, температурного нагрева и неизоэнтропичности течения, приводящего к генерации дефектов кристаллической структуры. Данные факторы являются серьезным препятствием для обнаружения фазовых переходов, сопровождающихся небольшим изменением свойств фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bridgmen P. W.** The resistance of 72 elements, alloys and compounds to $100\,000\text{ kg/cm}^3$ // Proc. Amer. Acad. Arts and Sci. — 1952. — V. 81, N 4. — P. 165–251.
2. **Stager R. A., Balchan A. S., Drikamer H. G.** High pressure phase transition in metallic tin // J. Chem. Phys. — 1962. — V. 37, N 3. — P. 1154–1163.
3. **Vnuk F., Monte A., de, Smith R. W.** The effect of pressure on the semiconductor-to-metal transition temperature in tin and in dilute Sn—Ge alloys // J. Appl. Phys. — 1984. — V 55. — 4171. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.333035>.
4. **Liu M., Liu L.** Compression and phase transitions of tin to half a megabar // High Temp. — High Press. — 1986. — V. 18. — P. 79–85.
5. **Постнов В. И., Набатов С. С., Щербань А. А., Якушев В. В.** Регистрация в условиях динамического эксперимента фазовых переходов в Bi, Yb, и Sn при изоэнтропическом сжатии // 4-е Всесоюз. совещание по детонации: докл. — Черногловка, 1988. — Т. 1. — С. 70–75.
6. **Disgreniers S., Vohra Y. K., Ruoff A. L.** Tin of high pressures: the energy-dispersive x-ray diffraction study to 120 GPa // Phys. Rev. B. — 1989. — V. 39. — P. 10359–10361.

7. Павловский М. Н., Комиссаров В. В. Полиморфные превращения олова в ударных волнах сжатия и разгрузки // ЖЭТФ. — 1990. — Т. 98, вып. 5(11). — С. 1748–1751.
8. Corkill Jennifer L., Garca Alberto, Cohen Marvin L. Theoretical study of high-pressure phases of tin // Phys. Rev. B. — 1991. — V. 43. — P. 9251–9254.
9. Cheong B. H., Chang K. J. First-principles study of the structural properties of Sn under pressure // Phys. Rev. B. — 1991. — V. 44, N 9. — P. 4103–4108.
10. Lewis Steven P., Cohen Marvin L. Theoretical study of Raman modes in high-pressure phases of Si, Ge, and Sn // Phys. Rev. B. — 1993. — V. 48, N 6. — P. 3646–3653.
11. Rybakov A. P. Spall damage in low-melting metals // Latv. J. Phys. Techn. Sci. — 1994. — N 3. — P. 12–22.
12. Осипов Р. С., Фунтиков А. И., Цыганов В. А. Определение термодинамических параметров ударного сжатия свинца, олова, меди и никеля по их плавлению в ампулах сохранения // Теплофизика высоких температур. — 1998. — Т. 36, № 4. — С. 590–595.
13. Молодец А. М., Молодец М. А., Набатов С. С. Изохорно-изотермический потенциал расплавленных металлов // Теплофизика высоких температур. — 1998. — Т. 36, № 6. — С. 914–920.
14. Молодец А. М., Набатов С. С. Термодинамические потенциалы, диаграмма состояний и фазовые переходы олова при его ударном сжатии // Теплофизика высоких температур. — 2000. — Т. 38, № 5. — С. 741–747.
15. Молодец А. М. Изломы ударных адиабат β -Sn и γ -Sn // Теплофизика высоких температур. — 2002. — Т. 40, № 3. — С. 1–4.
16. Katzke H., Bismayer U., Tolédano P. Theory of the high-pressure structural phase transitions in Si, Ge, Sn, and Pb // Phys. Rev. B. — 2006. — V. 73. — 134105.
17. Hu Jianbo, Zhou Xianming, Tan Hua, Li Jiabo, Dai Chengda. Successive phase transitions of tin under shock compression // Appl. Phys. Lett. — 2008. — V. 92. — 111905. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.2898891>.
18. Hu Jianbo, Zhou Xianming, Dai Chengda, Tan Hua, Li Jiabo. Shock-induced bct-bcc transition and melting of tin identified by sound velocity measurements // J. Appl. Phys. — 2008. — V. 104 — 083520. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3003325>.
19. Жерноклетов М. В., Ковалев А. Е., Комиссаров В. В., Новиков М. Г., Зохер М. Э., Черне Ф. Дж. Измерение скоростей звука за фронтом ударной волны в олове // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 123–129.
20. Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. — М.: Наука, 1979.
21. Гилев С. Д. Измерение электропроводности конденсированного вещества в ударных волнах (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 3–23.
22. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
23. 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.
24. Электрические явления в ударных волнах / под ред. В. А. Борисенка, А. М. Молодца, Е. З. Новицкого. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
25. Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // Высокоскоростные ударные явления / под ред. Р. Кинслоу. — М.: Мир, 1973. — С. 299–427.

Поступила в редакцию 11/II 2014 г.