

УДК 539.63:537.311.3

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ АЛЮМИНИЯ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

С. Д. Гилёв

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

Анализируются экспериментальные данные по электросопротивлению алюминия при сильном сжатии. При помощи электроконтактного метода выполнены измерения электросопротивления алюминиевой фольги двух типов, размещенной в диэлектриках с различными ударными импедансами. Найденные зависимости электросопротивления алюминия от давления ударной волны являются монотонно возрастающими функциями давления. В то же время зависимость удельного электросопротивления алюминия от давления ударной волны оказывается монотонной (фольга в оргстекле) или немонотонной (фольга во фторопласте). В последнем случае при росте давления удельное электросопротивление сначала немного уменьшается, а далее увеличивается. Такое поведение объяснено конкурирующим влиянием на удельное электросопротивление сжатия и температурного нагрева. Ударное сжатие металлической фольги в диэлектрике с меньшим ударным импедансом (оргстекло) приводит к увеличению регистрируемого электросопротивления по сравнению с диэлектриком, имеющим больший ударный импеданс (фторопласт). Полученный результат обусловлен большим температурным разогревом металлической фольги, помещенной в оргстекло. Обсуждаются причины качественного отличия поведения удельного электросопротивления металла при статическом и динамическом сжатии.

Ключевые слова: электросопротивление, удельное электросопротивление, алюминий, ударное сжатие, высокие давления и температуры.

DOI 10.15372/FGV20230114

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий является одним из эталонных материалов в различных областях физики, в том числе физики ударных волн и физики высоких плотностей энергии. Механические и теплофизические свойства алюминия в области высоких давлений и температур исследованы достаточно подробно, в то же время электрофизические характеристики металла в этих условиях известны с большей степенью неопределенности. Данные об электросопротивлении металлов необходимы для разработки электрофизических устройств большой мощности, таких как магнитокумулятивные генераторы, электромагнитные пушки, коммутирующие элементы сильноточных импульсных цепей и т. д. К настоящему времени выполнено несколько работ, посвященных измерению электросопротивления алюминия при сильном сжатии.

В исторических опытах Бриджмена, поставленных в условиях гидростатического сжатия, получена зависимость относительного электросопротивления алюминия от давления

в диапазоне до 10 ГПа при комнатной температуре [1]. В дальнейшем, в связи с ревизией шкалы давления, верхняя граница давления в данных Бриджмена была смещена к 7 ГПа [2]. Согласно [1, 2] при росте давления электросопротивление алюминия монотонно уменьшается. В расчетах [3] предсказан более сложный, немонотонный характер изменения электросопротивления. Согласно [3] электросопротивление сначала уменьшается, достигая минимума при давлении около 25 ГПа, и увеличивается при дальнейшем росте давления. Такое поведение объяснено в [3] деформацией поверхности Ферми при сжатии металла. Насколько нам известно, экспериментальное подтверждение этого эффекта к настоящему времени отсутствует.

Результаты измерений электросопротивления алюминия при ударном сжатии немногочисленны и достаточно противоречивы. В [4] очень кратко описаны эксперименты по измерению электросопротивления алюминиевой фольги (толщина 20 мкм), размещенной между слоями оргстекла. При увеличении давления ударной волны p электросопротивление R монотонно росло. Авторы [4] обнаружили в

зависимости $R(p)$ излом при давлении около 10 ГПа. При помощи бесконтактного электромагнитного метода в [5] найдена удельная электропроводность ударно-сжатой фольги, размещенной в оргстекле. Для образцов разной толщины электропроводность оказалась различной. При давлении ударной волны 18.5 ГПа электропроводность уменьшилась по сравнению с начальным значением в 2.1 раза для образцов толщиной 30 и 50 мкм и в 6 раз при толщине 10 мкм. Различие регистрируемой в [5] электропроводности образцов различной толщины свидетельствует, по-видимому, о методических проблемах измерения в случае тонких образцов.

В [6] оригинальным электромагнитным методом найдено электросопротивление алюминиевой фольги, помещенной во фторопласт, при давлении ударной волны до 14 ГПа. Результаты [4] и [6] качественно согласуются до давления $p \approx 10$ ГПа. При большем давлении зависимость $R(p)$ в [6] отклоняется вниз относительно [4]. Такое различие объяснено в [6] возможным влиянием неконтролируемых деформаций элементов измерительной системы при сжатии в [4]. Поскольку описание системы нагружения, измерительной ячейки и процедуры измерения в [4] не приведено, трудно сделать вывод о степени обоснованности такого предположения.

Имеющаяся к настоящему времени экспериментальная информация [4–6] значительно расходится количественно и не позволяет сделать определенного вывода о поведении электросопротивления, кроме общего утверждения, что электросопротивление алюминия растет при увеличении давления ударной волны.

В [7] нами поставлены первые эксперименты по измерению электросопротивления алюминия при ударном сжатии. Согласно [7] электросопротивление алюминия монотонно растет при увеличении давления ударной волны, в то время как поведение удельного электросопротивления оказывается более сложным. Используя в [7] образцы алюминия имели значительное содержание примесей, что не позволяет рассматривать данные [7] в качестве опорных. Для того чтобы учесть возможное влияние примесей в металле на регистрируемое при ударном сжатии электросопротивление, необходимы сравнительные эксперименты с более чистыми образцами. Неисследованным также является вопрос о влиянии материала

диэлектрика на регистрируемое электросопротивление металла. Реверберация ударных волн в тонкой металлической фольге, помещенной в диэлектрик, приводит к дополнительному нагреву образца. Возможно, что расхождение результатов [4] и [6] связано с влиянием этого эффекта.

Цель настоящей работы состояла в получении количественных экспериментальных данных об электросопротивлении алюминия при ударном сжатии. Для этого проведены эксперименты с образцами алюминия различной чистоты, а также в разных условиях нагружения. Это позволило прийти к заключению о зависимости электросопротивления алюминия от давления ударной волны при размещении образца в диэлектриках с различным ударно-волновым импедансом.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

В экспериментах использовались образцы двух типов, называемые далее Al-1 и Al-2. Образцы Al-1 изготавливались из алюминиевой фольги (толщина 15 мкм) со значительным содержанием примесей. Элементный анализ на электронном микроскопе дал следующий массовый состав на поверхности образца: Al — 94.45 %, Ag — 5.17 %, Si — 0.19 %, Fe — 0.19 %. Измеренное удельное электросопротивление фольги при температуре 26 °C равнялось $(3.20 \pm 0.05) \cdot 10^{-6}$ Ом · см. Такая фольга использовалась в [7].

Для образцов Al-2 использовалась алюминиевая фольга А5 (толщина 30 мкм). Согласно техническим условиям содержание основного элемента в металле не менее 99.5 %. Элементный анализ дал следующий массовый состав поверхности образцов: Al — 97.8 %, Ag — 1.96 %, Fe — 0.24 %. Перед экспериментом фольгу отжигали в вакууме при температуре 300 °C в течение 3 ч. Измеренное удельное электросопротивление фольги при температуре 25 °C равнялось $(2.84 \pm 0.03) \cdot 10^{-6}$ Ом · см.

Таким образом, алюминиевые фольги Al-1 и Al-2 значительно отличались содержанием примесей.

Для измерения электросопротивления тонких металлических образцов применялась четырехточечная схема [8, 9]. Образец (рис. 1,а) вырезался из цельного куска фольги и размещался между пластинами диэлектрика (фторопласт-4, оргстекло) (рис. 1,б). Для ударного нагружения использовались заряды

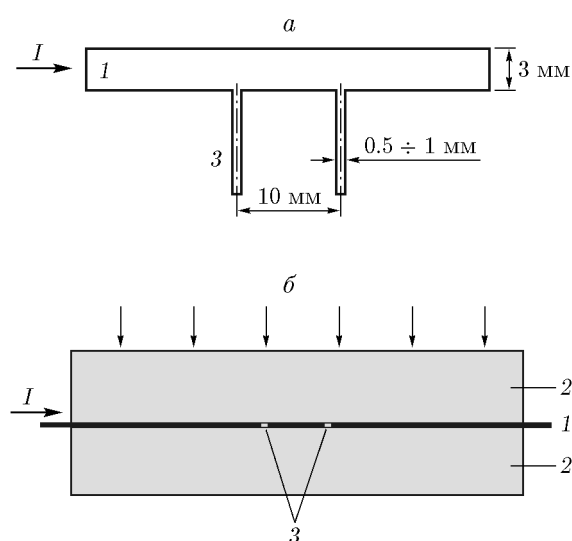


Рис. 1. Постановка измерений:

a — фольговый образец, *б* — сечение измерительной ячейки; стрелки показывают область на границе ячейки, подвергнутой ударному нагружению; 1 — образец, 2 — диэлектрик, 3 — электроды (ориентированы перпендикулярно плоскости второго рисунка)

взрывчатых веществ, которые располагались непосредственно на измерительной ячейке. В измерительной ячейке генерировалась плоская ударная волна, в которой образец испытывал одномерное сжатие. Профиль давления в измерительной ячейке имел треугольную форму с характерным временем спада $7 \div 10$ мкс. Временное разрешение измерений составляло примерно 50 нс, что существенно меньше времени спада давления.

Для устранения воздушных зазоров исследуемый образец вклеивался между диэлектрическими пластинами при помощи эпоксидного компаунда. Поскольку толщина фольги ($15 \div 30$ мкм) намного меньше толщины окружающего диэлектрика (≈ 5 мм), установившееся в алюминии давление отождествлялось с давлением падающей ударной волны в диэлектрике. В остальном постановка экспериментов соответствовала [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показана характерная экспериментальная запись напряжения с электродов. Видно, что воздействие ударной волны приводит к резкому изменению регистрируемого напряжения. В процессе измерений ток в цепи по-

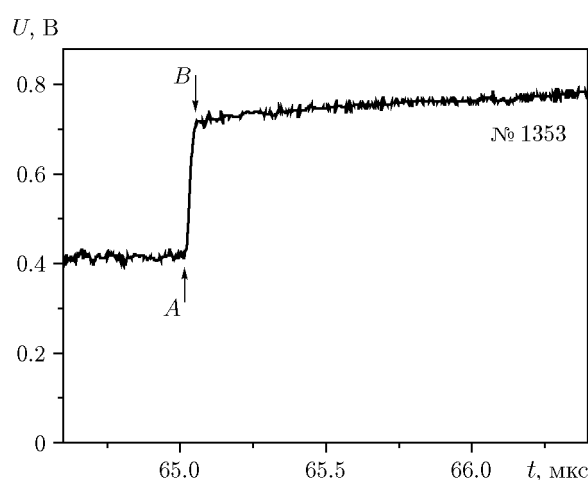


Рис. 2. Запись напряжения в опыте по измерению электросопротивления алюминиевой фольги при ударном сжатии:

A — приход ударной волны на образец, *B* — окончание фазы резкого роста напряжения; давление ударной волны в диэлектрике (фторопласт) 22.7 ГПа

стоянен, поэтому относительное электросопротивление образца равно

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

где R_0 — начальное сопротивление образца (до прихода ударной волны), U_0 — начальное напряжение. Поскольку напряжение пропорционально электросопротивлению, это означает, что при ударном сжатии происходит увеличение электросопротивления. Для определения сопротивления использовалось два уровня напряжения: начальный уровень (до воздействия ударной волны) и точка, соответствующая изменению наклона напряжения от резкого роста к плавному изменению.

Результаты проведенных экспериментов показаны на рис. 3 в виде зависимости относительного электросопротивления алюминиевой фольги R/R_0 от давления ударной волны p при размещении образцов двух типов в оргстекле и фторопласте. Здесь же показаны данные [1, 2, 4, 6]. Видно, что при ударном сжатии электросопротивление алюминия монотонно увеличивается при росте давления. Такая зависимость качественно отличается от поведения электросопротивления при статическом сжатии, где электросопротивление уменьшалось [1, 2].

Из полученных опытных данных находилось удельное электросопротивление образца ρ .

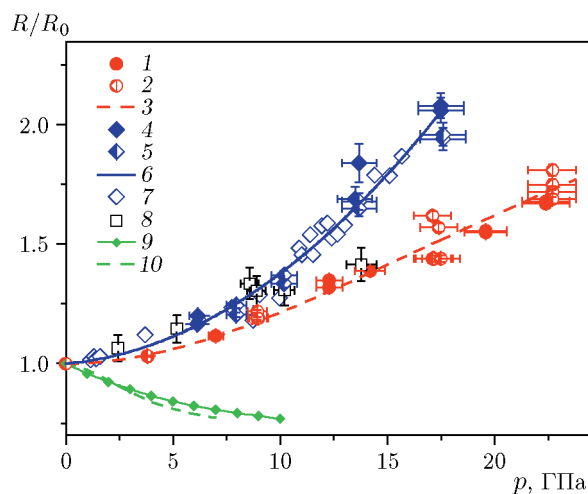


Рис. 3. Зависимость относительного электро-сопротивления алюминиевой фольги от давления ударной волны при размещении образца в различных диэлектриках (материал диэлектрика указан в скобках):

1 — фольга Al-1 (фторопласт), 2 — фольга Al-2 (фторопласт), 3 — аппроксимация данных 1 и 2 полиномиальной зависимостью, 4 — фольга Al-1 (оргстекло), 5 — фольга Al-2 (оргстекло), 6 — аппроксимация данных 4 и 5 полиномиальной зависимостью, 7 — [4] (оргстекло), 8 — [6] (фторопласт); гидростатическое сжатие при комнатной температуре: 9 — [1], 10 — [2]

Для этого использовалось соотношение

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{R}{R_0} \frac{\delta}{\delta_0}, \quad (1)$$

справедливое для одномерного сжатия в плоской ударной волне. В (1) ρ_0 — начальное удельное электро-сопротивление металла, δ/δ_0 — отношение толщин образца (сжатой и начальной). Значение δ/δ_0 определяли по ударной адиабате алюминия [10]. При использовании (1) различием в плотности вещества, определяемой по ударной адиабате однократного сжатия и при учете реверберации ударных волн в тонком металлическом образце, пренебрегали.

На рис. 4 показана найденная зависимость относительного удельного электро-сопротивления ρ/ρ_0 алюминия от давления ударной волны. Приведенные на рисунке данные динамических экспериментов соответствуют размещению образца во фторопласте и оргстекле. Здесь же показаны доступные данные других авторов [2–6].

Относительное удельное электро-сопротивление при ударном сжатии также находилось по данным [4, 6]. Для этого проводил-

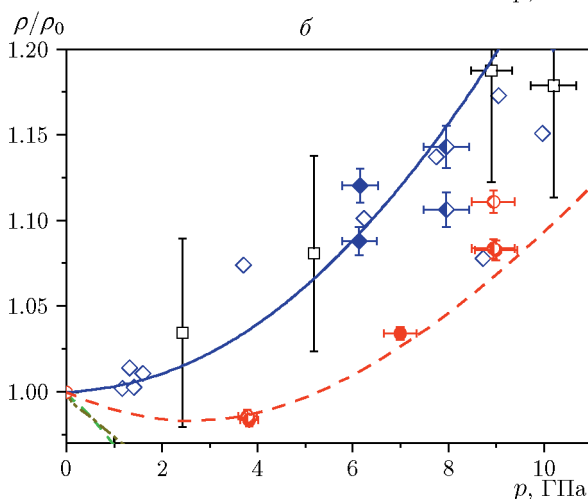
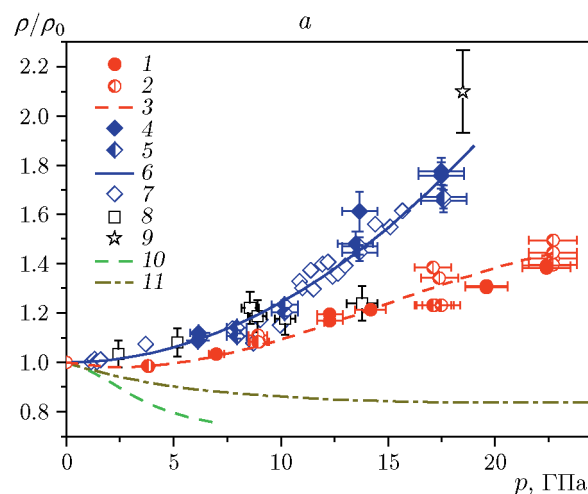


Рис. 4. Относительное удельное электро-сопротивление алюминия в зависимости от давления ударной волны при размещении образца в различных диэлектриках (материал диэлектрика указан в скобках):

a — все данные, *б* — фрагмент зависимости при малом давлении; 1 — фольга Al-1 (фторопласт), 2 — фольга Al-2 (фторопласт), 3 — аппроксимация данных 1 и 2 полиномиальной зависимостью, 4 — фольга Al-1 (оргстекло), 5 — фольга Al-2 (оргстекло), 6 — аппроксимация данных 4 и 5 полиномиальной зависимостью, 7 — [4] (оргстекло), 8 — [6] (фторопласт), 9 — фольга толщиной 30 и 50 мкм [5] (оргстекло); гидростатическое сжатие при комнатной температуре: 10 — зависимость, построенная по экспериментальным данным [2], 11 — расчетная зависимость [3]

ся пересчет относительного электро-сопротивления, приведенного в оригинальных работах [4, 6], в удельное электро-сопротивление по формуле (1).

Из рис. 4 видно, что удельные электро-сопротивления фольг Al-1 и Al-2 (точки 1 и 2),

существенно отличающихся содержанием примесей, близки друг к другу. Это подтверждает результаты [7], которые были получены на отнositельно «грязных» образцах.

Обсудим поведение электросопротивления алюминия при размещении образца во фторопласте. Удельное электросопротивление в проведенных экспериментах (точки 1, 2) оказалось в среднем несколько меньше, чем в [6]. Бесконтактная электромагнитная техника измерений [6] достаточно сложна, а данные измерений менее точны, чем при использовании электроконтактного метода. В частности, электромагнитный метод [6] не позволяет выявить динамику изменения электросопротивления металла в сжатом состоянии. Запись напряжения (см. рис. 2) демонстрирует, что после фазы резкого изменения регистрируемое напряжение продолжает плавно нарастать. Данный факт свидетельствует о дальнейшем изменении электросопротивления ударно-сжатого металла. Хотя в настоящее время причины этого явления не ясны, это означает, что метод измерений, имеющий плохое временное разрешение, может давать завышенное значение электросопротивления. Характерно, что экспериментальные данные [6] представлены линейной зависимостью электросопротивления от давления $R(p)$. Наши экспериментальные результаты могут быть описаны лишь более сложными зависимостями $R(p)$ и $\rho(p)$. Расхождения в первичных данных между нашей работой и [6] (точки 1, 2 и 8 на рис. 3) визуально невелики, но приводят к качественным отличиям, когда по ним находится удельное электросопротивление (точки 1, 2 и 8 на рис. 4).

Как видно из рис. 4, б, зависимость удельного электросопротивления от давления ударной волны включает в себя начальный участок, на котором удельное электросопротивление немного уменьшается. При давлении ударной волны 3.8 ГПа удельное электросопротивление алюминия меньше, чем в начальном состоянии, на $\approx 1.5\%$. Для того чтобы найти столь небольшое изменение электросопротивления, в опытах специально регистрировалось отклонение напряжения от начального уровня. При вычислении удельного электросопротивления по формуле (1) использовалась прецизионная ударная адиабата алюминия [10], имеющая погрешность 0.13 % для волновой скорости.

На рис. 4 наблюдается отчетливый рост

удельного электросопротивления при давлении $p > 3.8$ ГПа. Это означает, что при малом давлении на зависимости $\rho(p)$ имеется минимум удельного электросопротивления. Таким образом, зависимость удельного электросопротивления от давления ударной волны не является монотонно возрастающей функцией, как можно было бы предположить исходя из данных по электросопротивлению, соответствующих размещению образца во фторопласте (точки 1, 2 на рис. 3).

Рассмотрим экспериментальные данные, относящиеся к образцу, помещенному в оргстекло (точки 4, 5, 7 на рис. 3, точки 4, 5, 8, 9 на рис. 4). В наших экспериментах полученные записи сопровождались шумами, связанными с поляризационным сигналом в оргстекле. Поэтому эти данные имеют большие погрешности измерений, чем в случае фторопласта.

Из рис. 3 и 4 видно, что при размещении алюминиевой фольги в оргстекле регистрируются большие значения электросопротивления и удельного электросопротивления, чем у фольги во фторопласте.

Наблюдаемый эффект можно связать с различием ударно-волновых свойств оргстекла и фторопласта. Как известно [11], в переменных давление — массовая скорость ударные адиабаты материалов располагаются в следующей последовательности: алюминий, фторопласт, оргстекло. Одному и тому же значению массовой скорости вещества соответствуют разные давления — максимальное в алюминии, минимальное в оргстекле. Можно говорить, что ударный импеданс фторопласта больше, чем у оргстекла. Поэтому в системе диэлектрик — металл — диэлектрик при одном и том же давлении падающей ударной волны в диэлектрике давление первой ударной волны в металлической фольге (равно как и температура металла) оказывается больше в случае оргстекла. После реверберации волн сжатия и разрежения в тонком образце устанавливается одно и то же давление, соответствующее падающей ударной волне в диэлектрике, однако установившаяся температура в металле также оказывается больше в случае оргстекла. Неудивительно, что разница в электросопротивлении в опытах с использованием оргстекла и фторопласта увеличивается при росте давления падающей ударной волны. Именно такое поведение демонстрируют экспериментальные данные на рис. 3 и 4.

Наши данные для фольги, размещенной в оргстекле, качественно согласуются с приведенными в [4]. Экспериментальная точка из [5], соответствующая опытам для образцов толщиной 30 и 50 мкм (показана на рис. 4), визуально выпадает из общей зависимости, которую демонстрируют наши данные и результаты [4].

Авторы работы [5] не привели оценки погрешности удельного электросопротивления, найденного своим методом. Из [5] не ясно, с какой точностью выполнены первичные измерения напряжения с измерительной катушки. Поэтому дальнейший анализ может быть основан лишь необходимостью получить оценки погрешности измерений [5] для сравнения с нашими данными. В [5] зарегистрирован рост удельного электросопротивления алюминия в 2.1 раза. Пусть экспериментальная погрешность измерения напряжения $\Delta U/U$ составляет 2 %. На рис. 5 в работе [5] показана связь между электрическим полем и электропроводностью исследуемого металла. Используя эту зависимость, найденное значение удельного электросопротивления алюминия в сжатом состоянии и значение погрешности $\Delta U/U$, можно получить оценку относительной погрешности измерений удельного электросопротивления 8 %. Известно, что электромагнитные измерения в режиме скин-эффекта сопровождаются заметным падением точности получаемых данных [8]. Имея в виду, что измерения [5] проведены в подобных условиях, полученное значение погрешности представляется вполне разумным. Найденная погрешность для удельного электросопротивления из [5] показана на рис. 4, а.

Рассматривая на рис. 4, а массив точек 4, 5, 7, 9 с учетом их погрешностей, можно утверждать, что полученные данные для фольги, размещенной в оргстекле, не противоречат друг другу, хотя точка 9, соответствующая [5], согласуется с основным массивом данных лишь качественно.

Согласно рис. 4 рост удельного электросопротивления алюминия при ударном сжатии достигает 1.75 при использовании в качестве диэлектрика оргстекла. Оценки показывают, что увеличение температуры образца вследствие ударного нагрева составляет в этих условиях примерно 310 °С. Для такого нагрева, согласно [12], удельное электросопротивление алюминия при атмосферном давлении увеличивается в 2.34 раза. С учетом влияния сжа-

тия на электросопротивление, зарегистрированное в ударно-волновом эксперименте значение удельного электросопротивления алюминия представляется вполне правдоподобным.

Экспериментальные данные на рис. 3, 4 свидетельствуют о значительном влиянии на регистрируемое электросопротивление и удельное электросопротивление материала диэлектрика, который используется для размещения фольгового образца.

Отклонение экспериментальных точек [6] от [4] объяснено в [6] недостатками электроконтактного метода измерений. Из рис. 3 и 4 следует, что а) данные, полученные при помощи электроконтактного метода, имеют меньшую погрешность, чем данные, найденные электромагнитным методом [4] или [5], б) наши данные для оргстекла и фторопласта близки к [4] (диэлектрик — оргстекло) и [6] (диэлектрик — фторопласт). Таким образом, расхождение результатов [6] и [4] является следствием различия в состоянии образца, помещенного в разные диэлектрики (оргстекло, фторопласт), а не методическими проблемами электроконтактного метода измерений.

На рис. 4 представлены также данные, описывающие гидростатическое сжатие при комнатной температуре. Экспериментальные данные по сопротивлению из [2] пересчитаны к удельному сопротивлению с помощью нормальной изотермы алюминия [13, 14] по формуле

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{R}{R_0} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где V/V_0 — отношение удельного объема вещества при сжатии к начальному удельному объему. Эта формула соответствует всестороннему объемному сжатию вещества.

На рис. 4 показана одна из зависимостей удельного сопротивления от давления, полученная теоретически в [3]. Из рисунка видно, что поведение удельного электросопротивления при гидростатическом сжатии и ударном сжатии сильно отличается.

Согласно модели Блоха — Грюнайзена [15] удельное электросопротивление металла зависит от удельного объема и температуры. При ударном сжатии одновременно изменяются как удельный объем, так и температура образца. При этом изменения удельного объема и температуры влияют на удельное электросопротивление разнонаправленно: при сжатии электро-сопротивление уменьшается, при нагреве —

увеличивается. По этой причине при малом давлении, когда влияние температурного нагрева невелико, удельное электросопротивление металла может демонстрировать слабую зависимость от давления ударной волны или давать локальный минимум. Такой минимум можно обнаружить в полученных экспериментальных данных, соответствующих размещению образца во фторопласте (см. рис. 4,б).

Дополнительным фактором, влияющим на электросопротивление металла при динамическом сжатии, является генерация дефектов кристаллической структуры. Этот эффект обнаружен экспериментально для меди [16]. Возникновение дефектов кристаллической структуры приводит к росту электросопротивления металла. Можно ожидать, что генерация дефектов при ударном сжатии имеет место также для алюминия. Для получения количественной информации о возникающих дефектах можно использовать экспериментальные данные настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально получены зависимости электросопротивления и удельного электросопротивления алюминия от давления ударной волны при размещении образца в двух диэлектриках. Найденные данные соответствуют более широкой области давлений, чем имевшиеся ранее данные, что позволяет более определенно судить о поведении электросопротивления. Обнаружено влияние ударного импеданса диэлектрика на электросопротивление алюминиевых образцов. Полученная экспериментальная информация об электросопротивлении алюминия важна для разработки энергетических электромагнитных систем большой мощности. Данные об удельном электросопротивлении алюминия могут быть использованы для обоснования модели электросопротивления металла при ударном сжатии.

Автор выражает благодарность Я. Л. Лукьянову за определение элементного состава алюминиевых фольг, а также В. С. Прокопьеву и А. А. Рубану за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bridgman P. W.** The resistance of 72 elements, alloys and compounds to 100,000 kg/cm² // *Proc. of the American Academy of Arts and Sciences.* — 1952. — V. 81, N 4. — P. 165, 167–251. — DOI: 10.2307/20023677.
2. **Bundy F. P., Strong H. M.** Behavior of metals at high temperatures and pressures // *Solid State Phys.* — 1962. — V. 13. — P. 81–146. — DOI: 10.1016/S0081-1947(08)60456-7.
3. **Cheung J., Ashcroft N. W.** Aluminum under high pressure. II. Resistivity // *Phys. Rev. B.* — 1979. — V. 20, N 8. — P. 2991–2998. — DOI: 10.1103/PhysRevB.20.2991.
4. **Гончаров А. И., Родионов В. Н.** Электросопротивление меди и алюминия при ударноволновых нагружениях // П всесоюз. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике»: тез. докл. — Киев, 1985. — С. 72–73.
5. **Жугин Ю. Н., Левакова Ю. Л.** Влияние электропроводности и толщины проводящей пластины на регистрируемый сигнал индукционного датчика массовой скорости // *ПМТФ.* — 2000. — Т. 41, № 6. — С. 199–209.
6. **Гулевич М. А., Пай В. В., Яковлев И. В.** Метод определения электрической проводимости немагнитных металлов при динамическом нагружении // *Физика горения и взрыва.* — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 121–127.
7. **Гилев С. Д., Прокопьев В. С.** Электросопротивление алюминия при ударном сжатии // *Сиб. физ. журн.* — 2021. — Т. 16, № 1. — С. 101–108. — DOI: 10.25205/2541-9447-2021-16-1-101-108.
8. **Гилев С. Д.** Измерение электропроводности конденсированного вещества в ударных волнах (обзор) // *Физика горения и взрыва.* — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 3–23.
9. **Гилев С. Д., Прокопьев В. С.** Электросопротивление меди при ударном сжатии: экспериментальные данные // *Физика горения и взрыва.* — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 121–130. — DOI: 10.15372/FGV20160115.
10. **Kalitkin N. N., Kuzmina L. V.** Wide-range characteristic thermodynamic curves // *High-Pressure Shock Compression of Solids VII* / V. E. Fortov, L. V. Al'tshuler, R. F. Trunin, A. I. Funtikov (Eds). — Springer, New York. — 2004. — Ch. 4. — P. 109–176. — DOI: 10.1007/978-1-4757-4048-6_4.
11. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симakov Г. В.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — 2-е изд. — Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2006.
12. **Desai P. D., James H. M., Ho C. Y.** Electrical resistivity of aluminum and manganese // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* — 1984. — V. 13. — P. 1131–1172. — DOI: 10.1063/1.555725.
13. **Syassen K., Holzapfel W. B.** Isothermal compression of Al and Ag to 120 kbar // *J. Appl. Phys.* — 1978. — V. 49, N 8. — P. 4427–4430. — DOI: 10.1063/1.325497.

14. **Ming L. C., Xiong D., Manghnani M. H.** Isothermal compression of Au and Al to 20 GPa // Phys. B + C. — 1986. — V. 139-140. — P. 174–176. — DOI: 10.1016/0378-4363(86)90551-6.
15. **Займан Дж.** Электроны и фононы. Теория явлений переноса в твердых телах: пер. с англ. — М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
16. **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. — DOI: 10.15372/FGV20190514.

Поступила в редакцию 05.03.2022.

После доработки 21.06.2022.

Принята к публикации 07.09.2022.
