

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ EQUATIONS OF STATE AND PHASE TRANSITIONS

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИМАЕМОСТИ СПЛАВА ВНМ-3-2 В ОБЛАСТИ МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЙ

*Г.В. Борисков, А.И. Быков, Н.И. Егоров, М.И. Долотенко,
В.Н. Павлов, И.С. Стрелков В.И. Тимарева, С.И. Белов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Изложены постановка и результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию тяжёлого вольфрамового сплава ВНМ-3-2 давлением сверхсильного импульсного магнитного поля, создаваемого взрывомагнитным генератором МК-1. Экспериментальные точки, полученные на P - p диаграмме сплава, сравниваются с кривой его холодного сжатия, построенной ранее по результатам ударно-волновых экспериментов. Целью исследования является корректировка и уточнение уравнения состояния сплава в области сверхвысоких давлений и низких температур. Уравнение используется при анализе данных, получаемых в экспериментах по изоэнтропическому сжатию различных веществ.

Введение

В работе [1] изучалась возможность экспериментального построения кривой холодного сжатия – нулевой изотермы – для веществ со средним и большим атомным номером (Z) путём проведения опытов, в каждом из которых исследуемое вещество сжимается изоэнтропически с помощью давления сверхсильного магнитного поля. В [2] изложена постановка опыта, результаты расчёта процесса сжатия и результаты обработки данных, полученных в трёх таких экспериментах. В данной работе изложены результаты ещё двух опытов из этой же серии. Во всех пяти проведённых экспериментах исследуемым веществом являлся тяжёлый сплав марки ВНМ-3-2 на основе вольфрама.

Постановка эксперимента

Экспериментальная установка содержит устройство сжатия, рентгенографическое устройство, элементы электроизмерительных схем, устройства подрыва и синхронизации, источники питания. Рентгенографическое устройство состоит из бетатрона (в качестве генератора импульсов рентгеновского излучения) и системы регистрации. Основными элементами устройства сжатия являются (см. рисунок 1): магнитокумулятивный генератор МК-1, цилиндрическая камера сжатия, криогенное устройство. Последнее предназначено для охлаждения камеры сжатия и её содержимого до требуемой начальной температуры. Так как в обоих описываемых здесь опытах начальная температура совпадала с температурой воздуха, окружающей экспериментальную установку (6°C и в первом и во втором случае), то криогенное устройство в этих опытах не использовалось. Достаточно подробное описание элементов устройства сжатия содержится в [2].

В процессе работы генератора МК-1 созданное при его запитке начальное магнитное поле усиливается до мегагауссных значений, оказывая на внешнюю боковую поверхность камеры сжатия однородное плавно изменяющееся во времени давление. Под действием этого давления обжимающая трубка камеры (обжимающая трубка выполнена из меди, а начальная толщина её стенки выбрана с таким расчётом, чтобы толщина скин-слоя (слоя текущего по наружной поверхности трубки индуцированного электрического тока) в процессе работы устройства сжатия не превышала толщину стенки) схлопывается без образования ударных волн и сжимает расположенные внутри неё вещества до мегабарных давлений. Начальное поле генератора (B_0) регистрировалось осциллографическим способом по показаниям индукционных датчиков, его значение оказалось равным 145 кГс в первом опыте и 148 кГс – во втором.

При проведении каждого опыта производилось рентгенографирование центральной части экспериментального устройства в начальный момент (предварительный снимок) и в тот момент процесса сжатия, когда в камере сжатия достигалось сверхвысокое давление (основной снимок). Предварительный снимок необходим для юстировки рентгенографического устройства. Извлечённая из основного снимка информация о размерах образцов используется для определения их сжатия.

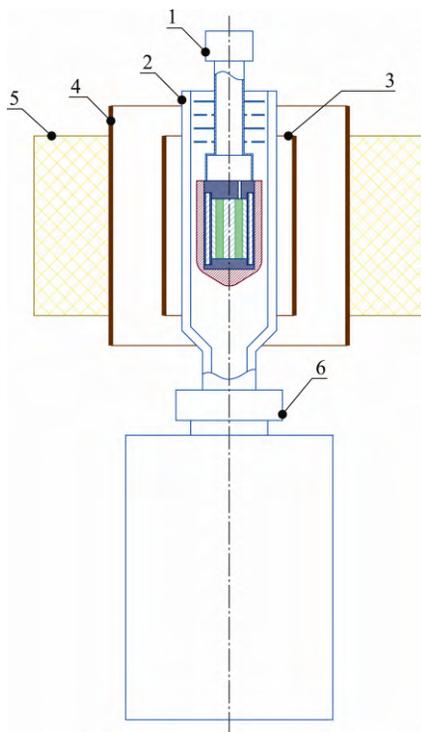


Рисунок 1. Эскиз устройства сжатия: 1 – камера сжатия, заполненная эталонным, контрастирующим и исследуемым веществами, 2 - криопровод, 3 – второй каскад генератора, 4 - соленоид начального поля генератора (первый каскад), 5 – кольцевой заряд взрывчатого вещества, 6 – сосуд для хранения жидкого хладагента

Зная сжатие, плотность образца при нормальных условиях и коэффициент термического расширения, легко определить его плотность в момент рентгенографирования. По плотности эталонов, с помощью их известной изоэнтропы, можно определить давление в эталонах и, с учётом градиентов, в исследуемом веществе. Эталонные образцы изготовлены из алюминия высокой чистоты. Используемая нами изоэнтропа алюминия построена в соответствии с работой [3], в основе которой лежат данные, полученные авторами на алмазных наковальнях до давления 2,2 Мбар, а также данные ударно-волнового сжатия вплоть до 10 Мбар. Для того чтобы определить по рентгеновскому снимку размеры сжатых образцов с приемлемой точностью, на границах,

отделяющих эталонные образцы друг от друга и от обжимающей трубки, должен располагаться тонкий слой из высокоплотного материала (т.н. контрастирующий слой, или контрастер). В его состав входят вещества с большими порядковыми номерами в таблице Менделеева. В описываемых экспериментах контрастирующие слои состояли из тяжёлого сплава на основе вольфрама.

Выбор в качестве исследуемого вещества сплава ВНМ-3-2 обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, сжимаемость этого сплава при сверхвысоких давлениях близка к сжимаемости веществ, которые предполагается исследовать в дальнейшем (Та, U); а во-вторых, он неоднократно использовался в качестве контрастера и утяжелителя в выполненных ранее опытах с изотопами водорода и инертными газами [4, 5].

Размещение образцов внутри камеры было таким же, как в [2]. (см. рисунок 2): на оси – стержень из алюминия (т.н. центральный, эталон), далее по радиусу – исследуемый образец цилиндрической формы, над ним – второй образец из алюминия (т.н. периферийный эталон) также в виде толстостенной трубки. Выше коаксиально располагался т.н. датчик давления – эталонный слой алюминия, отделённый от периферийного эталона и от обжимающей трубки тонкими контрастирующими слоями из сплава ВНЖ-7-3. (Внешний контрастирующий слой необходим для повышения качества рентгеновского изображения.) Способ взаимного расположения образцов в камере сжатия и выбор их размеров обоснован в [1] (с помощью датчика давления можно определить давление, а по нему сжатие периферийного эталона. Зная последнее, можно найти внешний радиус исследуемого образца, необходимый для определения его сжатия. Внутренний радиус исследуемого образца, тоже необходимый для определения сжатия этого образца, а также сжатия, а, следовательно, и давления в центральном эталоне, измеряется по рентгеновскому снимку. По тому же снимку находятся и внутренние радиусы контрастирующих слоёв, определяющие размеры датчика давления. Их знание необходимо для определения давления в самом датчике. Здесь и далее под давлением слоя подразумевается величина, усреднённая по объёму однородно сжатой (вдоль оси устройства) части слоя).

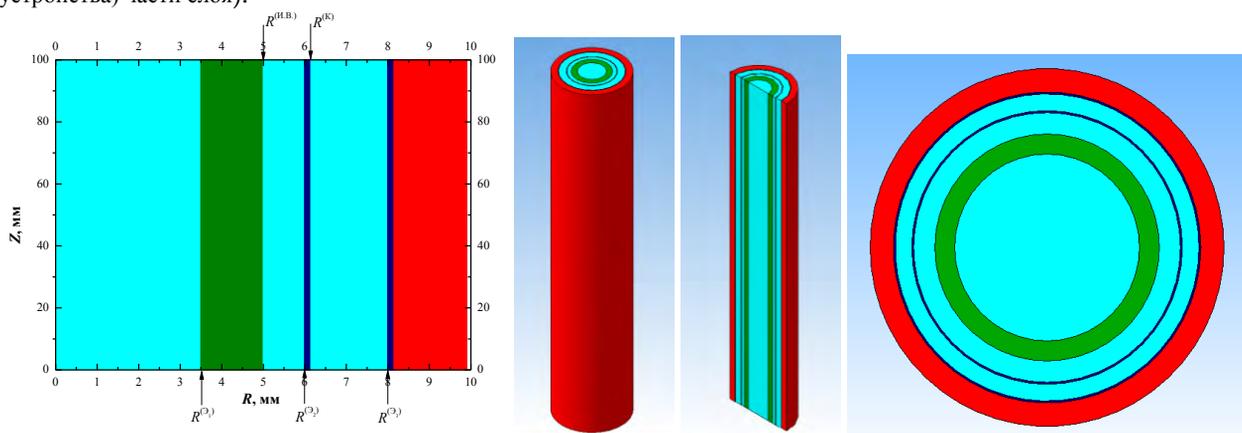


Рисунок 2. Способ взаимного расположения образцов в камере сжатия с двумя эталонами и дополнительным датчиком давления

Эталоны изготовлены из алюминиевого сплава А5 или А7 (с содержанием примесей не более 0,5 %). Исследуемый образец изготовлен из сплава ВНМ-3-2 с нормальной плотностью $17,29 \text{ г/см}^3$. Начальные размеры камеры сжатия и её содержимого такие же как и в [3]: радиус центрального эталона $R^{(1)}$ равен 3,50 мм, внешний радиус исследуемого образца $R^{(4)}$ – 5,00 мм, периферийного эталона $R^{(2)}$ – 7,35 мм, контрастирующего слоя $R^{(3)}$ – 7,50 мм, третьего алюминиевого слоя $R^{(5)}$ – 9,00 мм, толщина внешнего контрастирующего слоя равна 0,15 мм и, наконец, толщина медной обжимающей трубки – 1,75 мм. Точность измерения начальных поперечных размеров исследуемого и эталонных образцов и контрастеров составляет 5 мкм.

Расчёт процесса сжатия

Процесс, происходящий в описанном выше устройстве сжатия, рассчитывался с помощью одномерного магнитогидродинамического кода «Hz», описание которого вместе с прилагающейся к нему библиотекой определяющих соотношений приведено в [1]. Представленные ниже рисунки

показывают расчётные временные и радиальные зависимости основных интересующих нас величин. (Время отсчитано от начала усиления поля в МК генераторе.) На рисунке 3 приведены зависимости от времени для среднего (усреднение проводится по объёму той части образца, в которой он сжат однородно в осевом направлении) давления в различных слоях внутри камеры сжатия: в центральном эталоне (сплошная голубая линия), исследуемом образце (темно-зелёная линия), периферийном эталоне (штриховая голубая линия), контрастере (сплошная фиолетовая линия), эталонном слое датчика давления (штрихпунктирная голубая линия).

Аналогичные зависимости для средней температуры приведены на рисунке 4. Видно, что температура внутри камеры сжатия для каждого значения давления остаётся достаточно низкой – все образцы находятся в твёрдом состоянии. (Приведённые на рис. 3-4 зависимости относятся к первому из описываемых здесь опыту; так как значения начального поля МК генератора в проведённых экспериментах лишь незначительно отличаются друг от друга, то указанные временные зависимости во втором опыте имеют почти такой же вид, что и в первом.)

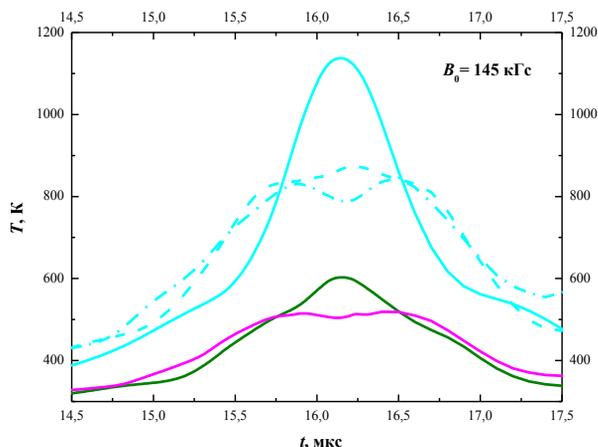
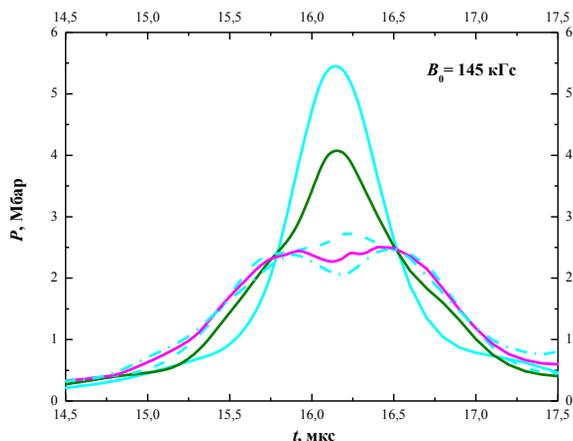
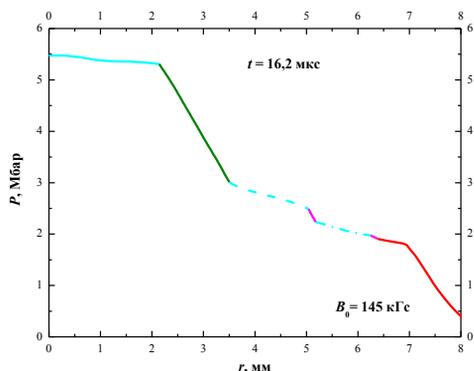


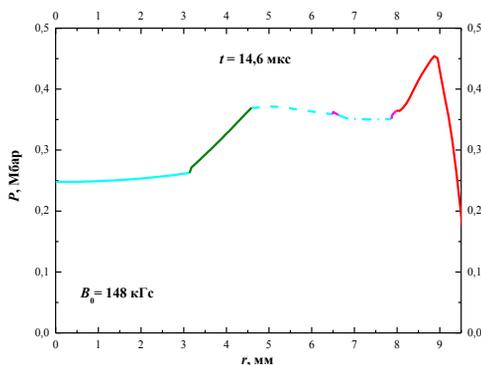
Рисунок 3. Расчётные зависимости среднего давления от времени

Рисунок 4. Расчётные зависимости средней температуры от времени

На рисунке 5 показан в эйлеровых координатах радиальный профиль давления внутри камеры на расчётный момент времени, близкий к моменту, соответствующему времени рентгенографирования. (Профиль захватывает также второй контрастер – фиолетовая штриховая линия – и часть обжимающей трубки, примыкающую к внешнему контрастирующему слою – красная линия.) Цветные линии соответствуют линиям на рис. 3-4.



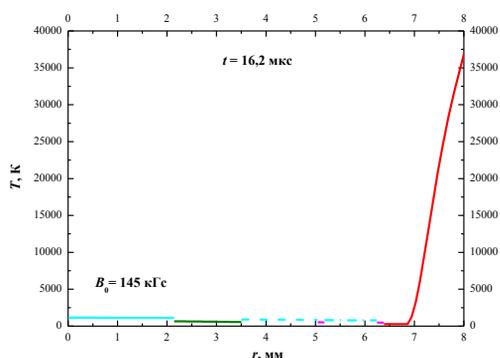
а) – первый эксперимент



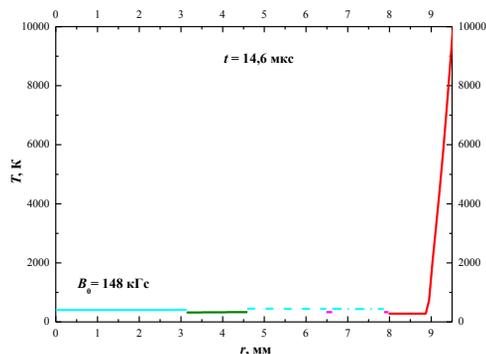
б) – второй эксперимент

Рисунок 5. Расчётный профиль давления внутри камеры сжатия на момент времени, близкий к расчётному моменту рентгенографирования сжатых образцов

Аналогичный температурный профиль на этот же момент приведён на рисунке 6. Видно, что в стенке камеры сжатия толщина скин-слоя остаётся меньше толщины самой стенки, что также обеспечивает изоэнтропичность процесса.



а) – первый эксперимент



б) – второй эксперимент

Рисунок 6. Расчётный профиль температуры внутри камеры сжатия на момент времени, близкий к расчётному моменту рентгенографирования сжатых образцов

Результаты рентгенографирования

На рисунке 7 показаны основные элементы, имеющие отношение к радиографической методике. Её реализация в двух проведённых опытах была аналогична той, что имела место при проведении трёх предыдущих экспериментов. Данные получены путём просвечиванием объекта импульсом тормозного излучения бетатрона БИМ-234 [6, 7] с регистрацией теневого изображения на фоточувствительном элементе - рентгеновской плёнке или фотохромной пластине. Источник излучения располагался на расстоянии 5 м от объекта исследования (точнее, от оси соленоида генератора МК). Характерный размер фокусного пятна – около одного миллиметра. Рентгенографирование, как это было обосновано и рекомендовано в [1], проводилось перпендикулярно оси устройства.

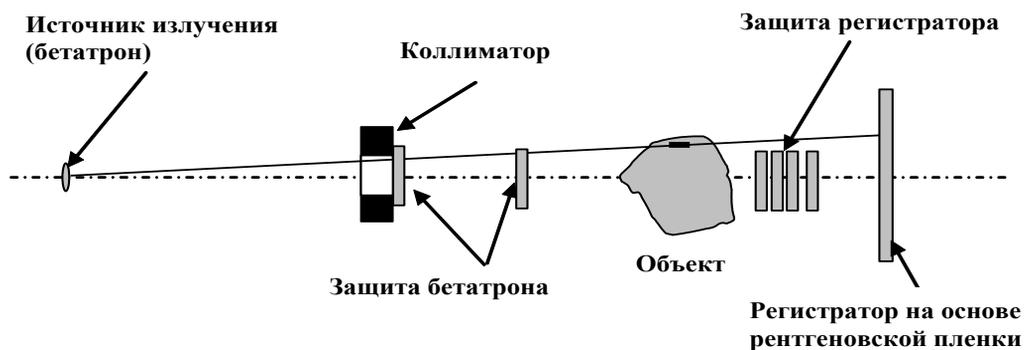


Рисунок 7а. Схема радиографической регистрации: взаимное расположение источника излучения, объекта рентгенографирования и регистратора

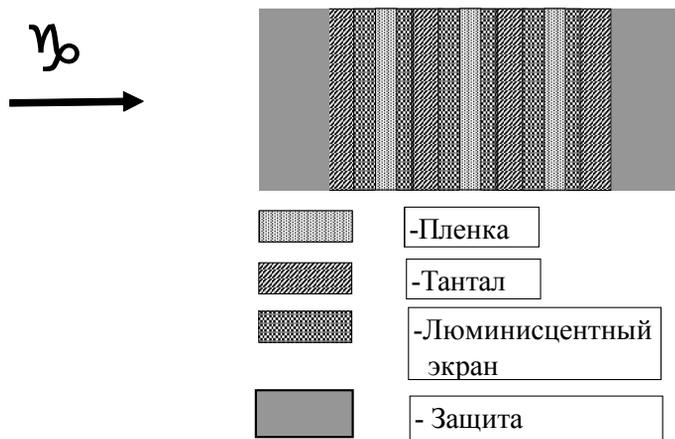


Рисунок 7б. Схема радиографической регистрации: расположение плёнок и экранов в регистраторе

В первом из описываемых опытов регистратор представлял собой взрывозащищённый контейнер с размещённой в нём кассетой с рентгеновскими плёнками в комбинации с усиливающими металлическими и люминесцентными экранами (см. рис. 7б). В кассете, которая находилась на расстоянии 1,25 м от оси генератора, было размещено 5 рентгеновских плёнок. Использовались плёнки фирмы “Kodak” типа “X-OMAT K Film”. Преимуществами метода являются высокое пространственное разрешение и чувствительность. Во втором опыте в качестве регистратора наряду с кассетой с рентгеновскими плёнками также (для пробы) использовалась фотохромная пластина многократного использования, а сам регистратор располагался в специальной взрывозащищённой камере (т.н. «свинье»). Её фотография приведена на рисунке 8.



Рисунок 8. Взрывозащищённая камера, используемая для размещения регистраторов изображений рентгенографируемого устройства при проведении взрывных экспериментов

На рисунке 9 представлен предварительный и основной снимок, полученный в первом из проведённых опытов. На рентгенограммах видны контрастирующие оболочки в камере сжатия и другие элементы экспериментального устройства.

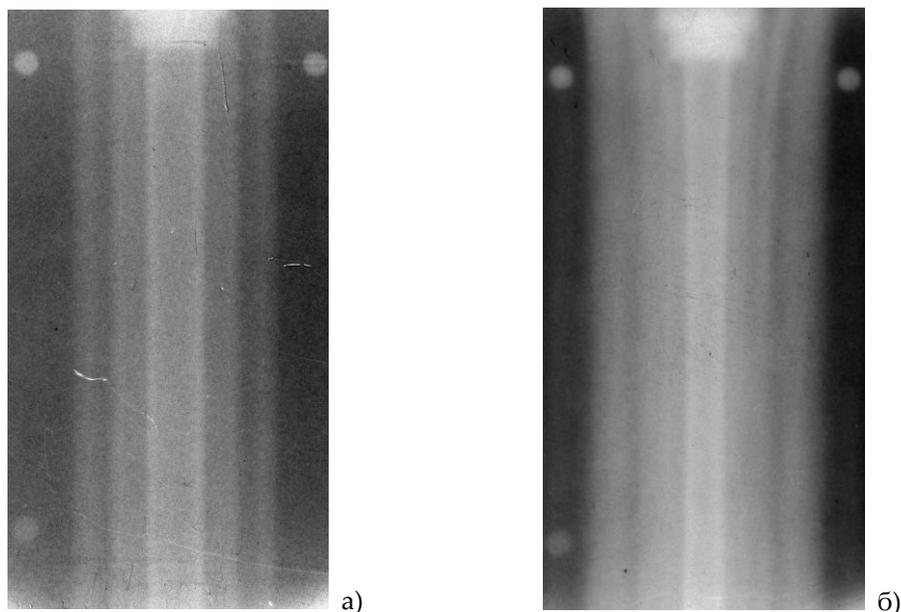


Рисунок 9. Экспериментальные рентгенограммы центральной части устройства сжатия, полученные в первом из описываемых опытов:
а) – предварительный снимок, б) – основной снимок

На рисунке 10 представлены предварительные снимки, полученные во втором опыте с использованием фотохромной пластины (рис. 10а), а также основной снимок, полученный в этом опыте с использованием как рентгеновской плёнки (рис. 10б), так и фотохромной пластины (рис. 10в). (Фотохромная пластина при этом размещалась в «свинье» позади кассеты с рентгеновской плёнкой, изображение которой видно на снимке, приведённом на рисунке 10в.) На снимке на рис. 10а и рис. 10в отчётливо видны верхняя и нижняя торцевые заглушки, предотвращающие истечение вещества из камеры сжатия.

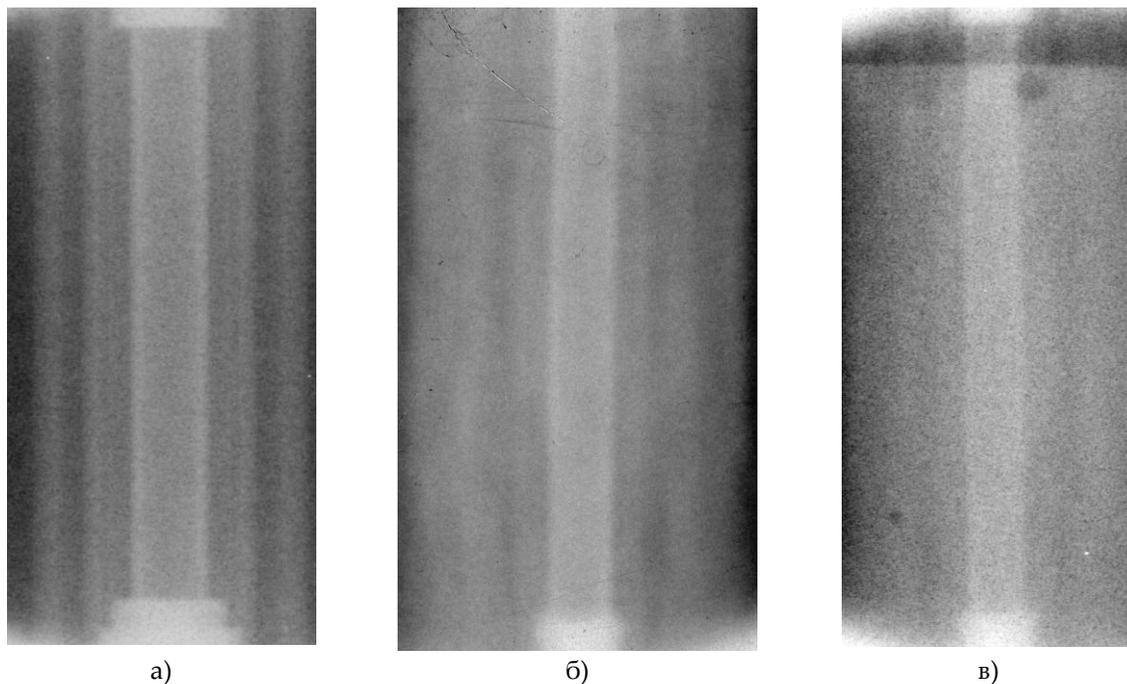


Рисунок 10. Экспериментальные рентгенограммы центральной части устройства сжатия, полученные во втором из описываемых опытов: а) – предварительный снимок на пластине, б) - основной снимок на плёнке, в) – основной снимок на пластине

Измерение размеров сжатых образцов

Полученное на основном снимке рентгеновское изображение оцифровывалось, после чего подвергалось математической обработке. Последовательность математической обработки рентгенографических данных была такой же, как в [2]. Используемая методика позволяет измерять требуемые геометрические размеры с точностью до сотых долей миллиметра, при этом значения самих измеряемых радиусов сжатых образцов оказались лежащими в интервале от 2 до 8 мм. В результате обработки были измерены: 1) радиус $r^{(Э1)}$ центрального эталона (совпадающий с внутренним радиусом исследуемого образца), 2) внешний радиус $r^{(Э2)}$ периферийного эталона (совпадающий с внутренним радиусом контрастирующего слоя датчика давления), 3) внешний радиус $r^{(Э3)}$ эталонного слоя датчика давления (совпадающий с внутренним радиусом второго контрастирующего слоя). После корректировки и уточнения получены следующие значения измеряемых радиусов: $r^{(Э1)} = (2,13 \pm 0,06)$ мм, $r^{(Э2)} = (5,00^{+0,02}_{-0,18})$ мм, $r^{(Э3)} = (6,17^{+0,02}_{-0,16})$ мм – в первом эксперименте; $r^{(Э1)} = (3,13 \pm 0,06)$ мм, $r^{(Э2)} = (6,45 \pm 0,09)$ мм, $r^{(Э3)} = (7,81 \pm 0,08)$ мм – во втором. Асимметрия в значениях погрешностей радиусов $r^{(Э2)}$ и $r^{(Э3)}$, наблюдаемая в первом опыте, связана с аномальной несимметричностью плотности почернения плёнки относительно продольной оси снимка, совпадающей по направлению с вертикальной осью устройства сжатия. Такая несимметричность, в свою очередь, может быть связана либо с неоднородностью поля излучения бетатрона в плоскости, перпендикулярной оси пучка (что маловероятно), либо (что более вероятно) с неаксиальностью слоёв второго каскада МК генератора, возникшей при изготовлении каскада (осмотр изготовленных каскадов генератора, осуществлённый нами после проведения указанного опыта, выявил заметную неаксиальность изолирующего и токопроводящего слоёв у одного из вторых каскадов. Устранения подобных изъянов потребует дополнительного контроля при изготовлении каскадов, а также при проверке и отбраковке готовых изделий).

Определение давления и плотности исследуемого вещества

Давление в исследуемом веществе, соответствующее его сжатию, вычисляется по формуле: $P^{(И.В.)} = P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}} / (1 + \varepsilon_P)$, где $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$ – приближённое значение, вычисляемое только с использованием полученных в эксперименте данных (в данном случае – значений радиусов $r^{(Эi)}$ ($i = 1; 2; 3$)) и известных изоэнтроп эталона и контрастера, а ε_P – рассчитываемая с помощью кода «Hz» поправка, учитывающая отличие $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$ от точного значения $P^{(И.В.)}(\sigma^{(И.В.)})$. (Здесь $\sigma^{(И.В.)}$ – сжатие исследуемого вещества по отношению к нормальной плотности.) Давление $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$ находится путём усреднения по объёму исследуемого образца с помощью радиального профиля, аппроксимирующего истинное распределение давления в интересующих нас сжатых образцах. Первый, наиболее простой способ построения профиля, при котором давление в исследуемом образце полагается однородным, а его значение определяется как среднее арифметическое давлений в центральном и периферийном эталоне, упоминается в работе [1]. В [2] изложен более сложный способ профилирования давления, когда в исследуемом веществе и в периферийном эталоне строится линейный профиль давления. Два коэффициента, определяющих этот профиль, находятся приравниванием крайних значений профиля давлению в центральном эталоне и в датчике давления. Как отмечалось в [2], первый способ даёт меньшие градиентные поправки, когда момент рентгенографирования приходится на передний фронт импульса сжатия, а второй – в том случае, когда этот момент соответствует спадающей части импульса сжатия.

Сжатие исследуемого вещества вычислялось по формуле: $\sigma^{(И.В.)} = \sigma^{(И.В.)}_{\text{прибл.}} / (1 + \varepsilon_\sigma)$, где $\sigma^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$ – приближённое значение, вычисляемое с использованием $r^{(Э1)}$ и приближённого значения внешнего радиуса исследуемого вещества $r^{(И.В.)}$ (это значение находится либо по изложенной в [1] методике, если применяется первый способ профилирования давления, либо по методике, изложенной в [2], при использовании второго способа), ε_σ – рассчитываемая с помощью кода «Hz» поправка, учитывающая отличие $\sigma^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$ от значения, соответствующего точному значению радиуса $r^{(И.В.)}$. Способ нахождения поправок ε_P и ε_σ изложен в [2].

В первом из описываемых опытов момент рентгенографирования пришёлся почти на максимум импульса сжатия, поэтому можно было воспользоваться как первым, так и вторым из

указанных способов профилирования. В этой ситуации мы поступили следующим образом: давление было определено с применением первого способа, который по сравнению со вторым давал в данном случае меньшую градиентную поправку по давлению (7 %), а сжатие определено по второму способу, который приводил к меньшей градиентной поправке по сжатию (5 %). Во втором опыте рентгенографирование выполнено на переднем фронте, поэтому и давление и сжатие определялись по первому способу, который в рассматриваемом случае давал меньшие градиентные поправки как по давлению (5 %), так и по сжатию (0,2 %).

Точность определения сжатия и давления определяется, прежде всего, точностью измерения внешних радиусов эталонных образцов в начальном (при нормальных условиях) и в сжатом состоянии. Погрешности $\Delta r^{(Э)}_{\pm}$ измерения радиусов сжатых оболочек на порядок превышают погрешность измерения начальных размеров, поэтому последней мы пока пренебрегаем. Погрешность измерения давления и сжатия вычислялась в соответствии с правилом вычисления погрешности функции от нескольких переменных (в данном случае такими переменными являются радиусы $r^{(Э)}$): $\Delta P^{(И.В.)} = [(\Delta P_1)^2 + (\Delta P_2)^2 + (\Delta P_3)^2]^{1/2}$, $\Delta \sigma^{(И.В.)} = [(\Delta \sigma_1)^2 + (\Delta \sigma_2)^2 + (\Delta \sigma_3)^2]^{1/2}$, где $\Delta P_i = (P^{(И.В.)}(\dots, r^{(Э)} + \Delta r^{(Э)}_{+}, \dots) - P^{(И.В.)}(\dots, r^{(Э)} - \Delta r^{(Э)}_{-}, \dots))/2$, $\Delta \sigma_i = (\sigma^{(И.В.)}(\dots, r^{(Э)} + \Delta r^{(Э)}_{+}, \dots) - \sigma^{(И.В.)}(\dots, r^{(Э)} - \Delta r^{(Э)}_{-}, \dots))/2$.

Каждая из величин $P^{(И.В.)}(\dots, r^{(Э)} \pm \Delta r^{(Э)}_{\pm}, \dots)$ и $\sigma^{(И.В.)}(\dots, r^{(Э)} \pm \Delta r^{(Э)}_{\pm}, \dots)$ вычисляется точно так же как и среднее значение $P^{(И.В.)}(r^{(Э1)}, r^{(Э2)}, r^{(Э3)})$ и, соответственно, $\sigma^{(И.В.)}(r^{(Э1)}, r^{(Э2)}, r^{(Э3)})$ – по выше изложенной процедуре.

Результаты экспериментов

После обработки данных, полученных в двух описываемых здесь опытах, на фазовой диаграмме сплава ВНМ-3-2 в координатах «сжатие-давление» в дополнение к уже имеющимся трём точкам построены ещё две точки. Обе точки принадлежат изоэнтропе, соответствующей начальной температуре исследуемого образца, равной $T_0 \approx 279$ К. В обоих случаях начальное давление в образце было близко к атмосферному ($P_0 \approx 1$ бар). Верхняя точка, полученная в [2], относится к "холодной" изоэнтропе с начальной температурой, близкой к азотной ($T_0 \approx 78$ К); нижняя точка работы [2] принадлежит изоэнтропе с начальной температурой $T_0 \approx 298$ К, средняя – изоэнтропе с $T_0 \approx 273$ К. Однако вследствие малости тепловой составляющей давления отличие всех этих изоэнтроп друг от друга и от кривой холодного сжатия намного меньше минимальной погрешности, с которой может быть определено давление или плотность исследуемого вещества. Указанное различие в исследуемой нами области составляет менее процента, в то время как минимальная достижимая в настоящее время погрешность превышает 3 %. Поэтому можно считать, что все полученные нами точки относятся к нулевой изотерме сплава ВНМ-3-2.

В описываемых опытах получены точки со следующими параметрами:

в первом эксперименте $P = (4,22 \pm 0,59)$ Мбар, $\sigma = 1,66 \pm 0,41$;

во втором: $P = (0,353 \pm 0,073)$ Мбар, $\sigma = 1,112 \pm 0,160$.

Обе точки вместе с ранее полученными показаны на рисунке 11 в сопоставлении с нулевыми изотермами, построенными нами для сплава ВНМ-3-2 методом Альтшулера-Брусникина-Кузьменкова (АБК) [8] и используемыми при моделировании работы устройства сжатия.

Светло-фиолетовая линия соответствует сплаву с нормальной плотностью $\rho_n = 17,29$ г/см³, тёмно-фиолетовая линия – с нормальной плотностью $\rho_n = 18,04$ г/см³. Хотя обе кривые хорошо согласуются с совокупностью полученных экспериментальных точек, несколько лучшее согласие наблюдается, как и следовало ожидать, для кривой с $\rho_n = 17,29$ г/см³, так как из сплава именно такой плотности были изготовлены исследуемые образцы. Из рисунка также видно, что для прояснения хода нулевой изотермы на участке от 2 Мбар до 4 Мбар необходимо построение на этом участке дополнительной точки. Желательно также построение экспериментальной точки в районе 1 Мбар.

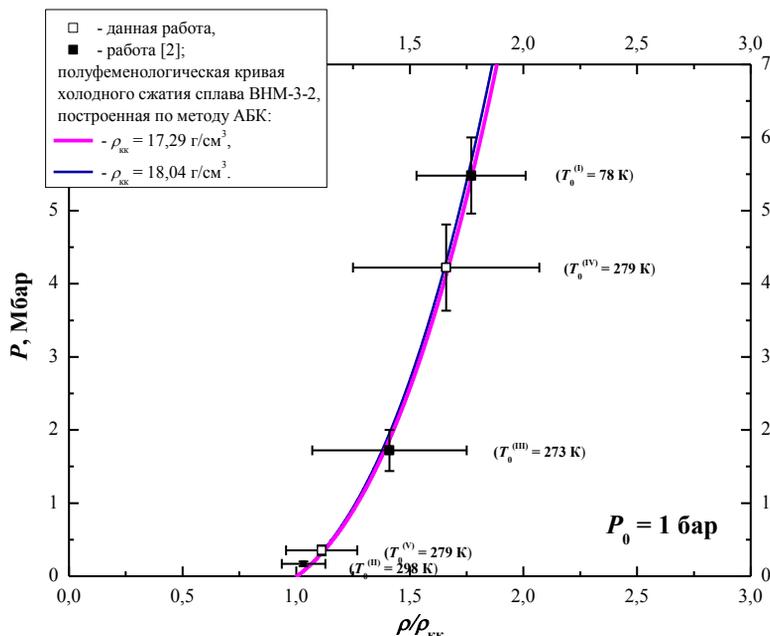


Рисунок 11. Экспериментальные результаты для сплава ВНМ-3-2 в сопоставлении с расчётными нулевыми изотермами

Список литературы

1. Борисков Г.В., Егоров Н.И., Коршунов Ф.С. и др. О возможности исследования веществ с большими и средними атомными номерами в опытах по изоэнтропическому сжатию давлением сверхсильного магнитного поля. В кн.: Мощная импульсная электрофизика. XIV Харитоновские чтения. Саров, 11-16 марта, 2012, стр. 513-528.
2. Борисков Г.В., Быков А.И., Егоров Н.И., и др. Результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию вещества с большим атомным номером. В кн.: Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Мощная импульсная электрофизика. XVII Харитоновские чтения. Саров, 23-27 марта, 2015, стр. 201-212.
3. Greene R. G., Lue H., and Ruoff A. L. Al as a simple solid: high pressure study to 220 GPa (2.2 Mbar) // Phys. Rev. Let. 1994. Vol. 73, No 15. P. 2075-2078.
4. Bykov A., Boriskov G., Dolotenko M. et al. "Isentropic Compression of Argon and Krypton Using MC-1 Flux Compression Generator". In: Megagauss Magnetic Field Generation, Its Application to Science and Ultra-High Pulsed-Power Technology. Proc. of the VIII-th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Tallahassee, Florida, USA, 18-23 October 1998. / Ed. by Hans J. Schneider-Muntau, World Scientific, 2004, p. 237.
5. Boriskov G.V., Bykov A. I., Egorov N. I. et al. // Contrib. Plasma Phys. 51, No.4, 339-348 (2011); Egorov N. I., Boriskov G.V., Bykov A. I., et al. // Contrib. Plasma Phys. 51, No.4, 333-338 (2011).
6. Павловский А.И. и др. ДАН СССР 160 68 (1965).
7. Kuropatkin Y. P. et al. Characteristics of the installation for flash radiography based on the uncored betatron BIM – M. In: 11th IEEE Pulsed Power Conference // Digest of technical papers / Eds. G. Cooperstein and I. Vitkovitsky. Piscataway NJ USA, IEEE, 1998. P. 1663-1668.
8. Альтшулер Л.В., Брусникин С. Е., Кузьменков Е. А. Изотермы и функции Грюнейзена 25 металлов // ЖПМТФ. 1987. № 1. С. 134-146.