

УДК 536.71

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИМАЕМОСТИ СПЛАВА ВНМ-3-2 В ОБЛАСТИ МЕГАБАРНОГО ДАВЛЕНИЯ

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, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, boriskov@ntc.vniief.ru

Изложены постановка и результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию тяжелого вольфрамового сплава ВНМ-3-2 давлением сверхсильного импульсного магнитного поля, создаваемого взрывомагнитным генератором МК-1. Экспериментальные точки, полученные на  $p$ - $\rho$ -диаграмме сплава, сравниваются с кривой его холодного сжатия, построенной ранее по результатам ударно-волновых экспериментов. Целью исследования являются корректировка и уточнение уравнения состояния сплава в области сверхвысокого давления и низкой температуры. Уравнение используется при анализе данных, получаемых в экспериментах по изоэнтропическому сжатию различных веществ.

Ключевые слова: изоэнтропическое сжатие, магнитокумулятивный генератор, мегабарное давление, уравнения состояния, кривая холодного сжатия, сплавы на основе вольфрама.

DOI 10.15372/FGV20180503

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] изучалась возможность экспериментального построения кривой холодного сжатия — нулевой изотермы — для веществ со средним и большим атомным номером ( $Z$ ) путем проведения опытов, в каждом из которых исследуемое вещество сжимается изоэнтропически с помощью давления сверхсильного магнитного поля. В [2] изложена постановка опыта, результаты расчета процесса сжатия и результаты обработки данных, полученных в трех таких экспериментах. В данной работе приведены результаты еще двух опытов из этой же серии. Во всех этих пяти экспериментах исследовался тяжелый сплав марки ВНМ-3-2 состава 95 % W + 3 % Ni + 2 % Cu.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка содержит устройство сжатия, рентгенографическое устройство, элементы электроизмерительных схем, устройства подрыва и синхронизации, источники питания. Рентгенографическое устройство состоит из бетатрона (используется в качестве генератора импульсов

рентгеновского излучения) и системы регистрации. Основными элементами устройства сжатия являются магнитокумулятивный генератор МК-1, цилиндрическая камера сжатия, криогенное устройство (рис. 1). Последнее предназначено для охлаждения камеры сжатия и ее содержимого до требуемой начальной температуры. Так как в обоих описываемых здесь опытах начальная температура совпадала с температурой воздуха, окружающего экспериментальную установку (6 °С и в первом, и во втором случае), то криогенное устройство в этих опытах не использовалось. В качестве источника сверхвысокого давления выбран магнитокумулятивный генератор сверхсильного магнитного поля, включающий в себя кольцевой заряд взрывчатого вещества (ВВ), соленоид начального магнитного потока и дополнительный токнесущий лайнер (второй каскад генератора). Камера сжатия образована толстостенной медной обжимающей трубкой и массивными торцевыми заглушками из сплава на основе вольфрама. Элементы электрической цепи для измерения начальной температуры внутри камеры вводились в камеру через припаянную к ней стальную трубку.

В процессе работы генератора МК-1 созданное при его запитке начальное магнитное поле, сосредоточенное в промежутке между то-

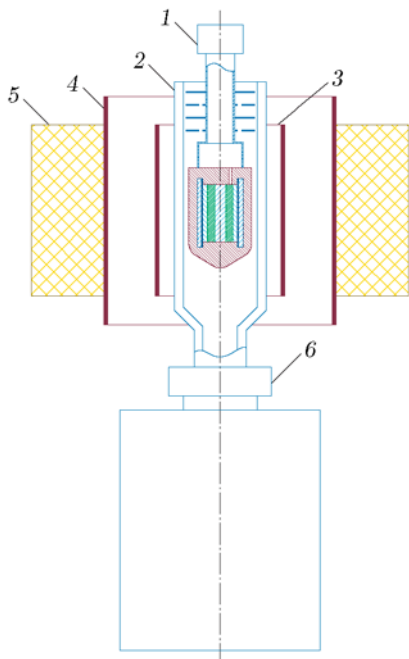


Рис. 1. Схема устройства сжатия:

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

конусообразной оболочкой первого (а затем второго) каскада генератора и обжимающей трубкой, усиливается до мегагауссовых значений, оказывая на внешнюю боковую поверхность камеры сжатия однородное, плавно изменяющееся во времени давление. Под действием этого давления обжимающая трубка камеры схлопывается без образования ударных волн и сжимает расположенные внутри нее вещества до мегабарного давления. (Начальная толщина стенки трубки выбрана с таким расчетом, чтобы толщина скин-слоя в процессе работы устройства сжатия не превышала толщину стенки.) 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 выполнялось 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. Извлеченная из основного снимка информация о размерах образцов используется для определения степени их сжатия. Зная степень сжатия, плотность образца при нормальных условиях и коэффициент термического расширения, легко определить его плотность в момент рентгенографирования. По плотности эталонов с помощью их известной изоэнтропии можно определить давление в эталонах и, с учетом градиентов, в исследуемом веществе. Эталонные образцы изготовлены из алюминия высокой чистоты. Используемая нами изоэнтропия алюминия построена в соответствии с работой [3], в основе которой лежат данные, полученные ее 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 высокоплотного материала — так называемый контрастирующий слой или контрастер. В его состав входят вещества с большими порядковыми номерами в таблице Менделеева. В описываемых экспериментах контрастирующие слои состояли из тяжелого сплава на основе вольфрама.

Выбор в качестве исследуемого вещества сплава ВМ-3-2 обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, сжимаемость этого сплава при сверхвысоком давлении близка к сжимаемости веществ, которые предполагается исследовать в дальнейшем ( $Ta$ ,  $U$ ); 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 (рис. 2) было таким же, как в [2]: на оси — стержень из алюминия (центральный эталон), далее по радиусу — исследуемый образец цилиндрической формы, за ним — второй образец из алюминия (периферийный эталон) также в виде толстостенной трубки. Далее коаксиально располагался датчик давления, в качестве которого использовался эталонный слой алюминия, отделенный от периферийного эталона и от обжимающей трубки тонкими контрастирующими слоями из сплава

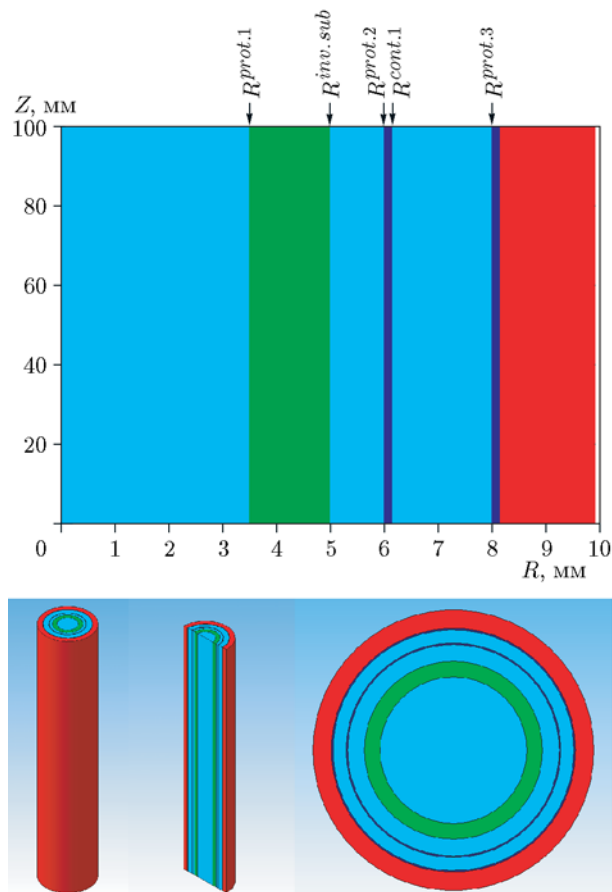


Рис. 2. Схема взаимного расположения образцов в камере сжатия с двумя эталонами и дополнительным датчиком давления

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 степень сжатия периферийного эталона. Зная последнее, можно найти внешний радиус исследуемого образца, необходимый для определения его сжатия. Внутренний радиус исследуемого образца, также необходимый для определения его сжатия, а следовательно, сжатия и давления центрального эталона, измеряется по рентгеновскому снимку. По тому же снимку находят и внутренние радиусы контрастирующих слоев, определяющие размеры датчика давления. Их знание необходимо для определения давления в самом датчике. Здесь и далее под давлением слоя подразумевается величина, осредненная по объему однородно сжатой (вдоль оси устройства) части слоя.

Эталоны изготовлены из алюминиевого сплава А5 или А7 (с содержанием примесей не более 0.5 %). Исследуемый образец изготовлен из сплава ВМ-3-2 нормальной плотности 17.29 г/см<sup>3</sup>. Начальные размеры камеры сжатия и ее содержимого такие же, как и в [2]: радиус центрального эталона  $R^{prot.1} = 3.50$  мм, внешние радиусы исследуемого образца  $R^{inv.sub} = 5.00$  мм, периферийного эталона  $R^{prot.2} = 7.35$  мм, контрастирующего слоя  $R^{cont.1} = 7.50$  мм, третьего алюминиевого слоя  $R^{prot.3} = 9.00$  мм, толщина внешнего контрастирующего слоя 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.

### РАСЧЕТ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ

Процесс 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]. Ниже на рисунках показаны расчетные временные и радиальные зависимости основных интересующих нас величин. (Время отсчитано от начала усиления поля в МК-генераторе.) На рис. 3 приведены зависимости от времени среднего давления (осреднение по

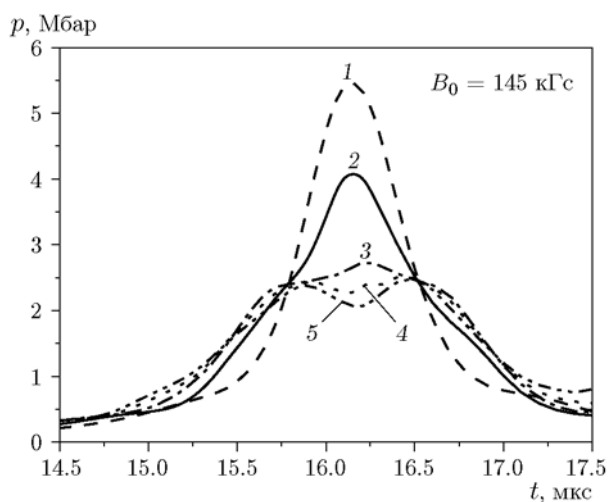


Рис. 3. Расчетные зависимости среднего давления от времени:

1 — центральный эталон, 2 — исследуемый образец, 3 — периферийный эталон, 4 — контрастер, 5 — эталонный слой датчика давления

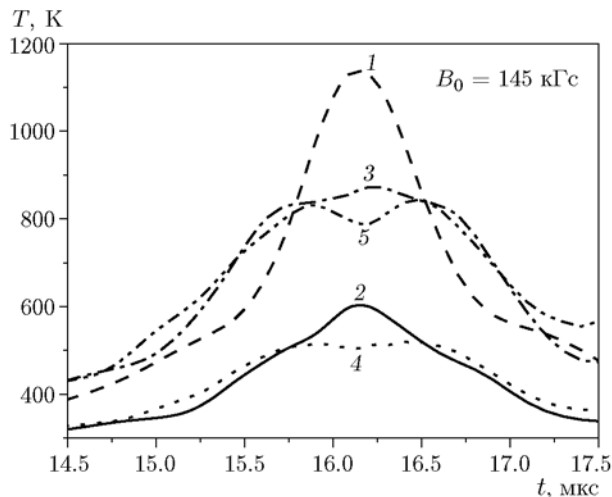


Рис. 4. Расчетные зависимости средней температуры от времени:  
 1 — центральный эталон, 2 — исследуемый образец, 3 — периферийный эталон, 4 — контрастер, 5 — эталонный слой датчика давления

объему той части образца, в которой он сжат однородно в осевом направлении) в различных слоях внутри камеры сжатия: в центральном эталоне (линия 1), исследуемом образце (2), периферийном эталоне (3), контрастере (4), эталонном слое датчика давления (5).

Аналогичные зависимости для средней температуры представлены на рис. 4. Видно, что температура внутри камеры сжатия при каждом значении давления остается достаточно низкой — все образцы находятся в твердом состоянии. (Зависимости на рис. 3, 4 относятся к первому из описываемых здесь опыту; так как значения начального поля МК-генератора в проведенных экспериментах лишь незначительно отличаются друг от друга, указанные временные зависимости во втором опыте имеют почти такой же вид, как и в первом.)

На рис. 5 показан в эйлеровых координатах радиальный профиль давления внутри камеры в расчетный момент времени, близкий к моменту, соответствующему времени рентгенографирования. (Обозначения линий 1–5 соответствуют таковым на рис. 3, 4; профиль захватывает также второй контрастер (линия 6) и часть обжимающей трубки, примыкающую к внешнему контрастирующему слою (линия 7).)

Температурный профиль в этот же момент времени приведен на рис. 6. Видно, что в стенке камеры сжатия толщина скин-слоя остается меньше толщины самой стенки, что

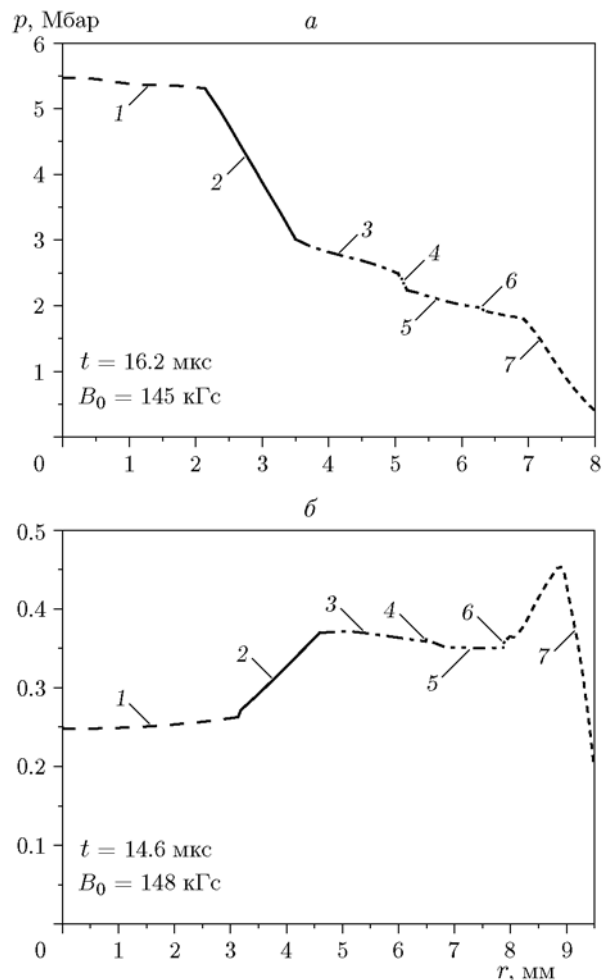


Рис. 5. Расчетный профиль давления внутри камеры сжатия в момент времени, близкий к моменту рентгенографирования сжатых образцов:

*a* — для первого эксперимента, *б* — для второго эксперимента

также обеспечивает изоэнтропичность процесса.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОГРАФИРОВАНИЯ

На рис. 7 показаны основные элементы радиографической методики. Ее реализация в двух проведенных опытах была аналогична той, что имела место в трех предыдущих экспериментах. Данные получены путем просвечивания объекта импульсом тормозного излучения бетатрона БИМ-234 [6–8] с регистрацией теневого изображения на фоточувствительном элементе — рентгеновской пленке или фотохромной пластине. Источник излучения

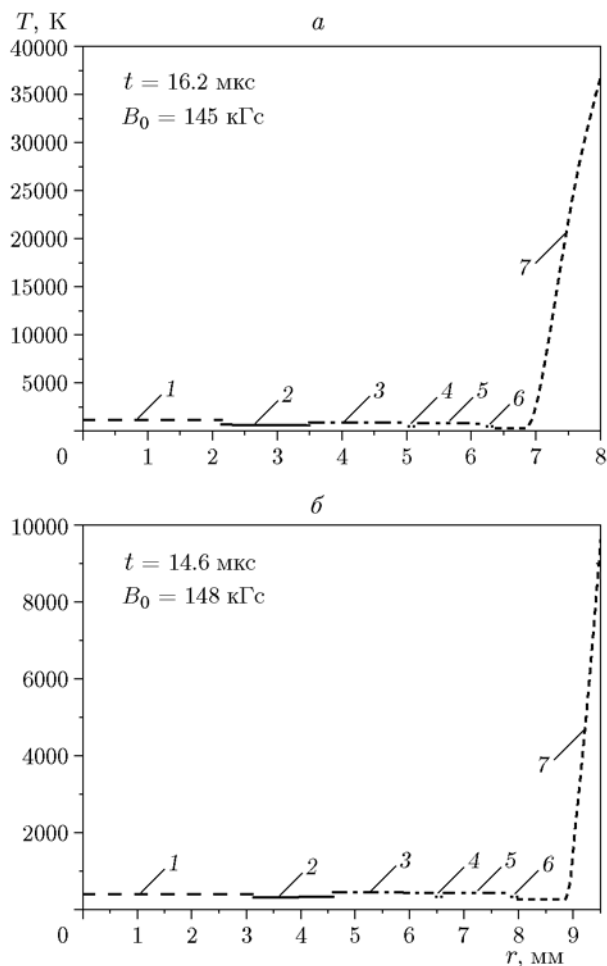


Рис. 6. Расчетный профиль температуры внутри камеры сжатия в момент времени, близкий к моменту рентгенографирования сжатых образцов:

*a* — для первого эксперимента, *б* — для второго эксперимента; вид линий соответствует таковому на рис. 5

располагался на расстоянии 5 м от объекта исследования (точнее, от оси соленоида МК-генератора). Характерный размер фокусного пятна — около 1 мм. Рентгенографирование, как это было обосновано и рекомендовано в [1], проводилось перпендикулярно оси устройства.

В первом из описываемых опытов регистратор представлял собой взрывозащищенный контейнер с размещенной в нем кассетой с рентгеновскими пленками в комбинации с усиливающими металлическими и люминесцентными экранами. В кассете, которая находилась на расстоянии 1.25 м от оси генератора, было размещено пять рентгеновских пленок. Использовались пленки фирмы «Kodak»

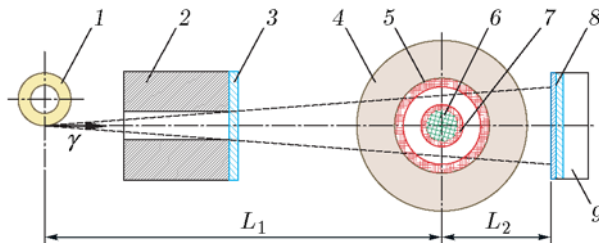


Рис. 7. Схема радиографической регистрации:

1 — бетатрон, 2 — коллиматор, 3 — защита от продуктов взрыва, 4 — заряд взрывчатого вещества, 5 — соленоид МК-генератора, 6 — содержимое камеры сжатия, 7 — обжимающая трубка, 8 — кассета, 9 — контейнер;  $L_1 = 5$  м,  $L_2 = 1.25$  м



Рис. 8. Взрывозащищенная камера, используемая для размещения регистраторов изображений при проведении взрывных экспериментов

типа X-OMAT K Film. Преимуществом метода являются высокие пространственное разрешение и чувствительность.

Во втором опыте в качестве регистратора, наряду с кассетой с рентгеновскими пленками, применялась также (для пробы) фотохромная пластина многоразового использования, а сам регистратор располагался в специальной взрывозащищенной камере. Ее фотография приведена на рис. 8.

На рис. 9 представлены предварительный и основной снимки из первого из проведенных опытов. На рентгенограммах видны контрастирующие оболочки в камере сжатия и другие элементы экспериментального устройства.

На рис. 10 представлен предварительный снимок из второго опыта, сделанный с исполь-

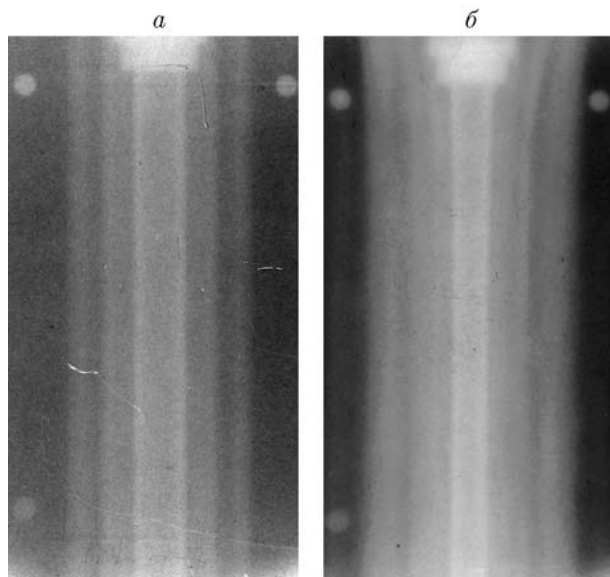


Рис. 9. Экспериментальные рентгенограммы центральной части устройства сжатия, полученные в первом из описываемых опытов:

*a* — предварительный снимок, *б* — основной снимок

зованием фотохромной пластины (рис. 10,*a*), а также основной снимок из этого же опыта, полученный с использованием как рентгеновской пленки (рис. 10,*б*), так и фотохромной пластины (рис. 10,*в*) (фотохромная пластина разме-

щалась в камере позади кассеты с рентгеновской пленкой, изображение которой видно на снимке рис. 10,*в*). На снимках на рис. 10,*a,в* отчетливо видны верхняя и нижняя торцевые заглушки, предотвращающие истечение вещества из камеры сжатия.

### ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ СЖАТЫХ ОБРАЗЦОВ

Рентгеновское изображение на основном снимке оцифровывалось и 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  $2 \div 8$  мм. В результате обработки были измерены: 1) радиус  $r^{prot.1}$  центрального эталона (совпадающий с внутренним радиусом исследуемого образца), 2) внешний радиус  $r^{prot.2}$  периферийного эталона (совпадающий с внутренним радиусом контрастирующего слоя датчика давления), 3) внешний радиус  $r^{prot.3}$  эталонного слоя датчика давления (совпадающий с внутренним радиусом второго контрастирующего слоя). После корректировки и уточнения полу-

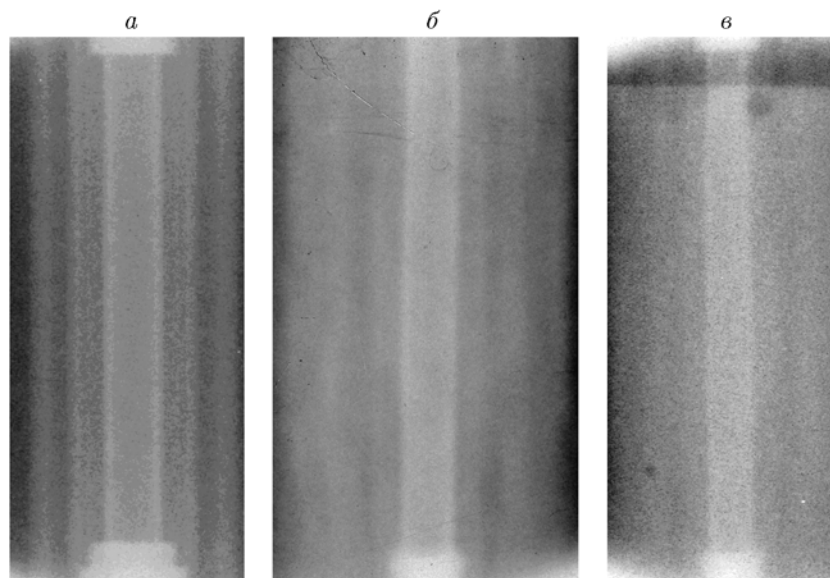


Рис. 10. Экспериментальные рентгенограммы центральной части устройства сжатия, полученные во втором из описываемых опытов:

*a* — предварительный снимок на пластине, *б* — основной снимок на пленке, *в* — основной снимок на пластине

чены следующие значения: в первом эксперименте —  $r^{prot.1} = 2.13 \pm 0.06$  мм,  $r^{prot.2} = 5.00^{+0.02}_{-0.18}$  мм,  $r^{prot.3} = 6.17^{+0.02}_{-0.16}$  мм; во втором эксперименте —  $r^{prot.1} = 3.13 \pm 0.06$  мм,  $r^{prot.2} = 6.45 \pm 0.09$  мм,  $r^{prot.3} = 7.81 \pm 0.08$  мм. Асимметрия в значениях погрешностей радиусов  $r^{prot.2}$  и  $r^{prot.3}$ , наблюдаемая в первом опыте, связана с аномальной несимметричностью плотности почернения пленки 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 слоев второго каскада МК-генератора, возникшей при изготовлении каскада<sup>1</sup>.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО ВЕЩЕСТВА

Давление в исследуемом веществе, соответствующее его сжатию, рассчитывалось по формуле  $p^{inv.sub} = p_{approx}^{inv.sub} / (1 + \varepsilon_p)$ , где  $p_{approx}^{inv.sub}$  — приближенное значение, вычисляемое только с использованием экспериментальных данных (радиусов  $r^{(prot.i)}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) и известных изоэнтроп эталона и контрастера, а  $\varepsilon_p$  — рассчитываемая с помощью кода Hz поправка, учитывающая отличие  $p_{approx}^{inv.sub}$  от точного значения  $p^{inv.sub}(\sigma^{inv.sub})$  (где  $\sigma^{inv.sub}$  — сжатие исследуемого вещества по отношению к нормальной плотности). Давление  $p_{approx}^{inv.sub}$  находится путем осреднения по объему 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 эталонах, упоминается в работе [1]. В [2] изложен более сложный способ профили-

рования 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 дает 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 рассчитывалось по формуле  $\sigma^{inv.sub} = \sigma_{approx}^{inv.sub} / (1 + \varepsilon_\sigma)$ , где  $\sigma_{approx}^{inv.sub}$  — приближенное значение, вычисляемое с использованием  $r^{prot.1}$  и приближенного значения внешнего радиуса исследуемого вещества  $r^{inv.sub}$  (это значение находится либо по методике [1], если применяется первый способ профилирования давления, либо по методике [2] при использовании второго способа),  $\varepsilon_\sigma$  — рассчитываемая с помощью кода Hz поправка, учитывающая отличие  $\sigma_{approx}^{inv.sub}$  от значения, соответствующего точному значению радиуса  $r^{inv.sub}$ . Способ нахождения поправок  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_\sigma$  описан в [2].

В первом из описываемых опытов момент рентгенографирования пришелся 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  $p_{approx}^{inv.sub}$  было определено с применением первого способа, который по сравнению со вторым давал в данном случае меньшую градиентную поправку по давлению (7 %), а сжатие  $\sigma_{approx}^{inv.sub}$  определено вторым способом, 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 обусловлена прежде всего точностью измерения внешних радиусов эталонных образцов в начальном (при нормальных условиях) и в сжатом состояниях. Погрешности  $\Delta r_{\pm}^{prot.i}$  измерения радиусов сжатых оболочек на порядок превышают погрешность измерения

<sup>1</sup>Осмотр изготовленных каскадов генератора после проведения указанного опыта выявил заметную неаксиальность изолирующего и токопроводящего слоев у одного из вторых каскадов. Устранение подобных изъянов потребует дополнительного контроля при изготовлении каскадов, а также при проверке и отбраковке готовых изделий.

начальных размеров, поэтому последней мы пока пренебрегаем. Погрешность измерения давления и сжатия находили по правилу вычисления погрешности функции от нескольких переменных (в данном случае такими переменными являются радиусы  $r^{prot.i}$ ):

$$\Delta p^{inv.sub} = [(\Delta p_1)^2 + (\Delta p_2)^2 + (\Delta p_3)^2]^{1/2},$$

$$\Delta \sigma^{inv.sub} = [(\Delta \sigma_1)^2 + (\Delta \sigma_2)^2 + (\Delta \sigma_3)^2]^{1/2},$$

где  $\Delta p_i = (p^{inv.sub}(\dots, r^{prot.i} + \Delta r_+^{prot.i}, \dots) - p^{inv.sub}(\dots, r^{prot.i} - \Delta r_-^{prot.i}, \dots))/2$ ,  $\Delta \sigma_i = (\sigma^{inv.sub}(\dots, r^{prot.i} + \Delta r_+^{prot.i}, \dots) - \sigma^{inv.sub}(\dots, r^{prot.i} - \Delta r_-^{prot.i}, \dots))/2$ . Каждая из величин  $p^{inv.sub}(\dots, r^{prot.i} \pm \Delta r_{\pm}^{prot.i}, \dots)$  и  $\sigma^{inv.sub}(\dots, r^{prot.i} \pm \Delta r_{\pm}^{prot.i}, \dots)$  вычисляется точно так же, как и среднее значение  $p^{inv.sub}(r^{prot.1}, r^{prot.2}, r^{prot.3})$  и, соответственно,  $\sigma^{inv.sub}(r^{prot.1}, r^{prot.2}, r^{prot.3})$ , — по вышеизложенной процедуре.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

После обработки данных, полученных в двух описываемых здесь опытах, на фазовой диаграмме сплава ВМ-3-2 в координатах сжатие — давление в дополнение к уже имеющимся трем точкам построены еще две. Обе точки принадлежат изоэнтропе, соответствующей начальной температуре исследуемого образца  $T_0 \approx 279$  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 из 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 могут быть определены давление или плотность исследуемого вещества. Указанное различие в исследуемой нами области составляет менее 1 %, 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 ВМ-3-2.

В описываемых опытах точки имеют следующие параметры: в первом эксперименте —  $p = 4.22 \pm 0.59$  Мбар,  $\sigma = 1.66 \pm 0.41$ ; во вто-

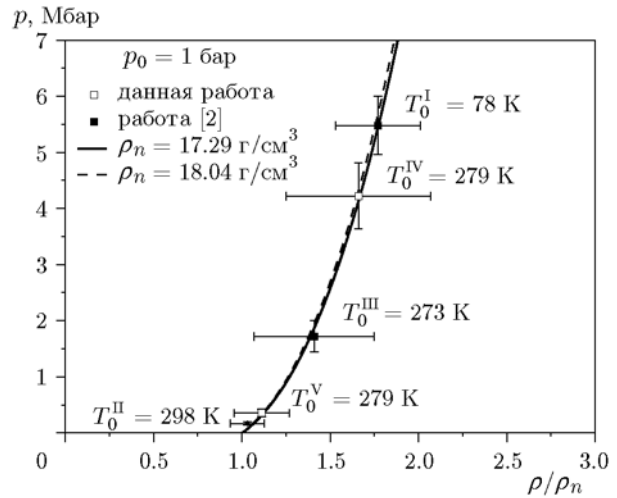


Рис. 11. Экспериментальные результаты для сплава ВМ-3-2 в сопоставлении с расчетными нулевыми изотермами:

сплошная и штриховая линии — полуфеноменологическая кривая холодного сжатия сплава ВМ-3-2, полученная методом Альтшулера — Брусникина — Кузьменкова

ром —  $p = 0.353 \pm 0.073$  Мбар,  $\sigma = 1.112 \pm 0.160$ . Обе точки вместе с ранее полученными показаны на рис. 11 в сопоставлении с нулевыми изотермами, используемыми при моделировании работы устройства сжатия и построенными нами для сплава ВМ-3-2 методом Альтшулера — Брусникина — Кузьменкова [8] с использованием потенциала Борна — Майера<sup>2</sup>.

Сплошная линия на рис. 11 соответствует сплаву с нормальной плотностью  $\rho_n = 17.29$  г/см<sup>3</sup>, штриховая — с  $\rho_n = 18.04$  г/см<sup>3</sup>. 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/см<sup>3</sup>, так как из сплава именно такой плотности были изготовлены исследуемые образцы. Из рисунка также видно, что для прояснения хода нулевой изотермы на участке 2 ÷ 4 Мбар необходимо построение на нем дополнительной точки. Желательно также построение экспериментальной точки в районе 1 Мбар.

<sup>2</sup>Различие состоит лишь в том, что показатель степени сжатия для функции Грюнайзена вычислялся не по предложенному ими выражению (см. формулы (2.7) в [9]), а методом наименьшего квадратичного отклонения данных ударно-волновых экспериментов для указанного сплава [10] от соответствующих расчетных точек.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисков Г. В., Егоров Н. И., Коршунов А. С. и др.** О возможности исследования веществ с большими и средними атомными номерами в опытах по изоэнтропическому сжатию давлением сверхсильного магнитного поля // Мощная импульсная электрофизика: XIV Харитоновские тематические научные чтения. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. — С. 513–528.
2. **Борисков Г. В., Быков А. И., Егоров Н. И. и др.** Результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию вещества с большим атомным номером // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Мощная импульсная электрофизика: XVII Харитоновские тематические научные чтения. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. — С. 201–212.
3. **Greene R. G., Lue H., Ruoff A. L.** Al as a simple solid: high pressure study to 220 GPa (2.2 Mbar) // Phys. Rev. Lett. — 1994. — V. 73, N 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 // Megagauss Magnetic Field Generation, Its Application to Science and Ultra-High Pulsed-Power Technology: Proc. of the VIIIth Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Tallahassee, Florida, USA, 18–23 October 1998 / H. J. Schneider-Muntau (Ed.). — World Scientific, 2004. — P. 237.
5. **Boriskov G.V., Bykov A. I., Egorov N. I., et al.** Isentropic compression of substances using ultra-high magnetic field: zero isotherms of protium and deuterium in the pressure range up to  $\approx 5$  Mbar // Contrib. Plasma Phys. — 2011. — V. 51, N 4. — P. 339–348.
6. **Egorov N. I., Boriskov G.V., Bykov A. I., et al.** Use of pulsed radiography for investigations of state of substances at megabar pressures // Contrib. Plasma Phys. — 2011. — V. 51, N 4. — P. 333–338.
7. **Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Склизков Г. В., Зысин Ю. А., Герасимов А. И.** Сильноточные безжелезные бетатроны // Докл. АН СССР. — 1965. — Т. 160. — С. 68–70.
8. **Kuropatkin Y. P. et al.** Characteristics of the installation for flash radiography based on the uncored betatron B1M — M // 11th IEEE Pulsed Power Conf., Piscataway, NJ, USA, IEEE, 1998. — P. 1663–1668. — (Digest of Tech. Papers).
9. **Альтшулер Л. В., Брусникин С. Е., Кузьменков Е. А.** Изотермы и функции Грюнайзена 25 металлов // ПМТФ. — 1987. — № 1. — С. 134–146.
10. **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., перераб. и доп. — Саров, 2006. — С. 260.

*Поступила в редакцию 12/II 2018 г.*

---