

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

УДК 621.7

**НАУЧНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
ФИЗИКО–МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© 2014 г. В.А. Борисёнок<sup>1</sup>, Е.Е. Ломтева<sup>1</sup>, А.Л. Михайлов<sup>1,2</sup>, М.А. Пухов<sup>1,2</sup>,  
А.Г. Сироткина<sup>1</sup>, В.В. Алексеев<sup>1</sup>, Ю.В. Батьков<sup>1</sup>, Е.Н. Богданов<sup>2</sup>, В.А. Волгин<sup>1</sup>,  
К.И. Евланов<sup>1</sup>, А.М. Подурец<sup>1,2</sup>, В.Г. Симаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ

<sup>2</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

В статье приведены цели и задачи стратегического плана развития НИЯУ МИФИ в отношении формирования учебно-научного комплекса для осуществления качественной подготовки специалистов для ядерно-оружейного и ядерно-энергетического комплекса Российской Федерации и для других приоритетных областей техники и технологий. Это достигается глубокой интеграцией причастных отраслей науки и образования на примере интеграции НИЯУ МИФИ и федеральных ядерных центров. Как результат такой интеграции – создание научных образовательных центров (НОЦ).

В настоящей статье приведены описания основных испытательных установок и измерительных методик научно-исследовательского центра. Названы характеристики материалов, которые можно определить с помощью каждой установки. Дан ряд экспериментальных результатов, призванных показать экспериментальный потенциал центра.

*Ключевые слова:* учебно-научный комплекс, оружейный комплекс, ядерный комплекс, научно-образовательный центр, конструкционные материалы, испытательная машина, диаграмма напряжение-деформация, измерение скорости деформации образца, генератор плоской ударной волны, оптическая металлография, рентгеноструктурный анализ, измерение микротвёрдости, НИЯУ МИФИ, Саровский физико-технический институт, Российский федеральный ядерный центр.

Поступила в редакцию 10.12.2014 г.

**ВВЕДЕНИЕ**

Цель стратегического плана развития национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) – формирование учебно – научного комплекса, обеспечивающего качественную многоуровневую подготовку инновационно ориентированных специалистов в приоритетных фундаментальных и прикладных направлениях ядерно – оружейного и ядерно – энергетического комплексов (ЯОК и ЯЭК), прорывных областях техники и технологии на основе наукоемких технологий обучения. Одним из путей достижения этой цели служит глубокая интеграция науки и образования, в частности, интеграция НИЯУ МИФИ и Федеральных ядерных центров: РФЯЦ – ВНИИЭФ и РФЯЦ – ВНИИТФ. Одним из результатов такой интеграции явилось создание научно – образовательных центров (НОЦ), объединяющих профилирующие и базовые кафедры, учебные и научные лаборатории НИЯУ МИФИ и Федеральных ядерных центров. Основная задача НОЦ – целевая индивидуальная подготовка специалистов и научных работников ключевых

профессий ЯОК и ЯЭК на базе наукоемких технологий обучения, проведение фундаментальных и прикладных исследований, внедрение разработанных технологий в производство.

Саровским физико-техническим институтом (СарФТИ) – филиалом НИЯУ МИФИ совместно с РФЯЦ – ВНИИЭФ создан ряд НОЦ, соответствующих некоторым из основных направлений деятельности РФЯЦ – ВНИИЭФ. Среди них одним из ведущих является НОЦ «Физика экстремальных динамических состояний вещества», организованных СарФТИ и Институтом физики взрыва (ИФВ) РФЯЦ – ВНИИЭФ. В состав НОЦ входят три научных лаборатории СарФТИ и несколько научно-исследовательских отделов и лабораторий ИФВ. Возглавляет центр директор ИФВ, доктор технических наук А.Л. Михайлов.

Конструкционные материалы, входящие в состав различных объектов и изделий гражданского и военного назначения, при эксплуатации последних испытывают статические и динамические воздействия различной природы. Для оптимального проектирования устройств и конструкций необходимо знание характеристик материалов при нагрузках, которые они испытывают в процессе эксплуатации. Поэтому исследование свойств материалов было, есть и будет важной и актуальной проблемой, имеющей большое практическое значение для современной техники. Для участия в решении этой проблемы в научном плане и в плане подготовки специалистов, в составе НОЦ создан и действует «Научно-исследовательский центр по определению физико-механических характеристик конструкционных материалов» (НИЦ). НИЦ обладает испытательным оборудованием для статического и динамического нагружения образцов материала, позволяющим проводить исследования в диапазоне скоростей деформирования  $10^{-3}$ – $10^7$  с<sup>-1</sup>, и методическим обеспечением, включающим как классические (тензометрия, фотохронография и т.п.), так и современные (лазерная и радиоинтерферометрия, пьезополимерный датчик давления) методики, что позволяет проводить комплексные исследования материалов.

В настоящей статье приведены описания основных испытательных установок и измерительных методик НИЦ. Названы характеристики материалов, которые можно определить с помощью каждой установки. Дан ряд экспериментальных результатов, призванных показать экспериментальный потенциал центра.

## ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА SHIMADZU

Для исследования материалов при статическом нагружении используется испытательная машина Shimadzu серии Autograph AJS01 [1]. Деформирование исследуемых образцов происходит посредством движения траверсы. Машина позволяет развивать усилие до 100 кН [1]. Диапазон скорости траверсы составляет 0,0005-1000 мм/мин (скорость деформации в опытах на одноосное растяжение или сжатие  $\dot{\epsilon}=10^1$ - $10^3$  с<sup>-1</sup>). Управление испытанием, а так же обработка результатов экспериментов: построение диаграмм напряжение–деформация производится с помощью программного комплекса Autograph TrapeziumX.

Испытательная машина Shimadzu AG-X в классическом варианте комплектации позволяет проводить испытания образцов из исследуемых материалов на одноосное растяжение и сжатие, однако, с применением пуансонов и упоров, а также зажимных устройств определенного типа, машина дополнительно позволяет проводить исследования на изгиб и кручение. При этом конструктивные особенности испытательной машины предусматривают проведение температурных испытаний образцов из исследуемых материалов. Результатом испытаний в классическом варианте исполнения машины является определение пределов

прочности ( $\sigma_B$ ) и текучести материалов ( $\sigma_{0.2}$ ), модуля Юнга и деформационного упрочнения а так же истинные и условные диаграммы деформирования, построенные разными методами.

На испытательной машине проведены исследования ряда металлов и сплавов. Для примера на рисунке 1 приведены фото образца гантельного типа с захватами при испытании на растяжение и диаграмма растяжения трубной стали. Эксплуатация машины Shimadzu показала ее высокую эффективность.

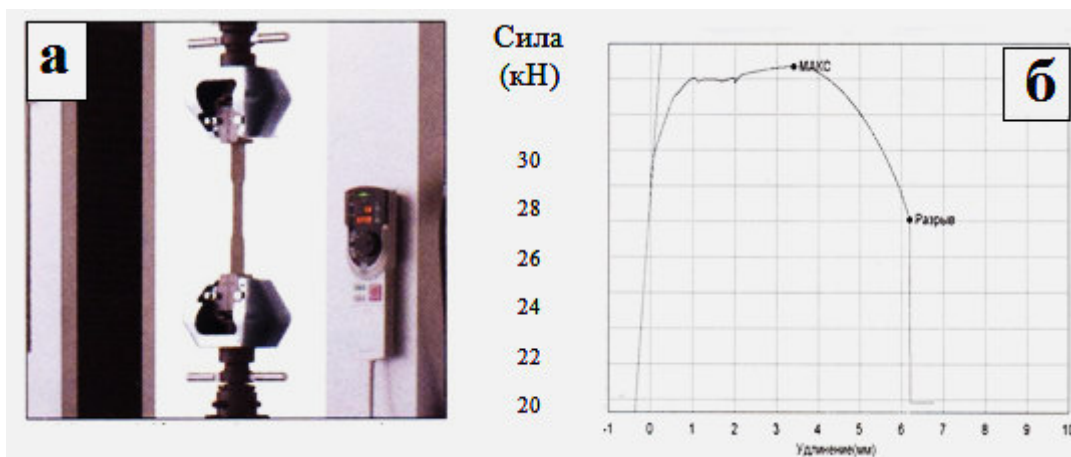


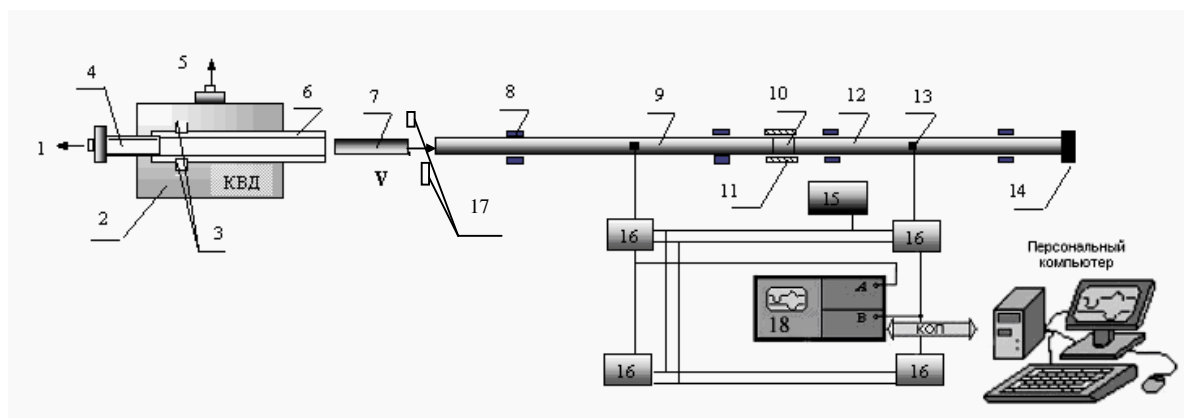
Рис. 1. – Фото образца с захватами в испытании на растяжение (а) и диаграмма растяжения трубной стали (б)

#### УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

Одним из самых распространенных методов исследования свойств материалов при скоростях деформирования  $10^2 - 10^4 \text{ c}^{-1}$  является метод составного стержня Гопкинсона (ССГ) [3]. Метод основан на следующем: образец из исследуемого материала помещается между нагружающим и опорным стержнями. При взаимодействии ударника и нагружающего стержня в обоих возбуждаются импульсы сжатия постоянной амплитуды. Длительность импульса сжатия в нагружающем стержне равна двойному времени прохождения упругой волны в ударнике, а его величина пропорциональна скорости ударника. Когда импульс сжатия, распространяющийся по нагружающему стержню, достигает образца, часть его проходит в образец, а часть отражается вследствие разницы в площадях сечений и акустических импедансах стержня и образца.

Форма прошедшего и отраженного импульса определяется величиной площади сечения и механическими характеристиками материала. По импульсам деформации, зарегистрированным тензометрическими датчиками на стержнях, можно определить деформирование концов стержней во времени или смещение торцов стержней друг относительно друга.

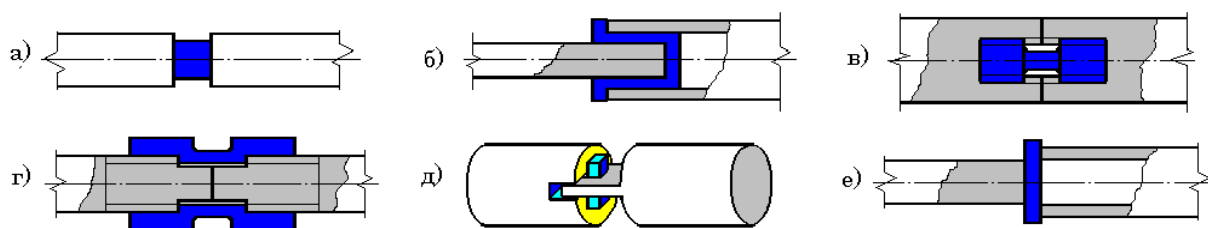
Для исследования прочности и трещиностойкости материалов разработана и внедрена экспериментальная установка, реализующая метод ССГ, в которой для создания нагрузочных импульсов применено пневматическое нагружающее устройство (газовая пушка). Установка включает в себя, кроме газовой пушки, систему управления, комплекс измерительно-регистрирующей аппаратуры и сменные комплекты составных стержней. Схема установки приведена на рисунке 2.



**Рис. 2.** – Схема установки для проведения динамических испытаний материалов методом ССГ  
 1 – пусковое устройство, 2 – камера высокого давления, 3 – отверстия сброса, 4 – пусковая камера, 5 – магистраль к компрессору, 6 – ствол, 7 – ударник, 8 – втулки скольжения, 9 – нагружающий стержень, 10 – образец, 11 – ограничительная обойма, 12 – опорный стержень, 13 – тензодатчики, 14 – упор, 15 – источник питания, 16 – схемы питания и калибровки, 17 – датчики для измерения скорости ударника (контактные и оптические); 18 – цифровой регистратор

Стержни закрепляются и центрируются в текстолитовых подшипниках скольжения, позволяющих с помощью регулировочных элементов производить юстировку положения стержней для обеспечения соосности стержней между собой и с летящим ударником. В качестве ударников используются стержни (из стали или титана) длиной от 50 до 500 мм, разгоняемые в диапазоне скоростей от 5 до 50 м/с. Использование такой системы нагружения позволяет получать при испытаниях скорости деформации от  $2 \cdot 10^2$  до  $6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  и нагружающие импульсы длительностью до 200 мкс и амплитудой до 1500 МПа.

Основные схемные решения ССГ для различных типов испытаний образцов и узлы их крепления представлены на рисунке 3. Наиболее простую форму (в виде цилиндра) имеют образцы для испытаний при сжатии (рис. 3а).



**Рис. 3.** – Основные схемные решения ССГ:  
 а) – сжатие; б), в), г) – растяжение; д), е) – сдвиг

Испытания выполняются как при комнатной температуре, так и при повышенной (до  $+300^{\circ}\text{C}$ ) и пониженной (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) температурах. Для нагрева испытуемых образцов используется малогабаритная печка, надеваемая на концы мерных стержней с размещенным между ними образцом, а для их охлаждения используется разъемный контейнер из пенопласта с жидким азотом.

Комплекс измерительно-регистрающей аппаратуры включает приборы для измерения параметров нагружения, аппаратуру регистрации параметров деформирования и систему синхронизации запуска регистрирующих устройств. Из параметров нагружения измеряется только скорость ударника. Для этого используется оптический измеритель скорости 17, размещенный на дульном срезе ствола и

включающий два точечных источника света, два фотодиода со схемой питания и формирования импульсов и цифровой осциллограф. Для дублирования применяются также контактные датчики – скорость определяется по интервалу времени замыкания двух контактов, установленных на известной базе.

Измерение деформаций производится с помощью наклеенных на боковую поверхность стержней на значительном расстоянии от образца малобазных тензорезисторов 13. Причем для компенсации изгибных колебаний в стержнях и увеличения амплитуды полезного сигнала в рабочих сечениях наклеено по 4 соединенных последовательно тензорезистора. Сигналы с датчиков регистрируются с помощью цифрового осциллографа. Для питания тензорезисторов выбрана потенциометрическая схема ввиду ее простоты и возможности питания нескольких измерительных каналов от одного источника. Обе группы тензорезисторов питаются постоянным током от стандартного стабилизированного блока питания 15 через схемы питания и калибровки 16.

Для запуска регистрирующей аппаратуры используется сигнал от одного из фотодиодов, использующихся для измерения скорости ударника.

На рисунке 4 приведены, как пример, осциллограммы импульсов информации при испытаниях на сжатие. На верхнем луче зарегистрированы падающий  $\epsilon_i(t)$  и отраженный  $\epsilon_r(t)$  импульсы деформации, на нижнем луче – прошедший через образец импульс  $\epsilon_t(t)$ .

На их основе с помощью метода Кольского [4] строится динамическая диаграмма деформирования исследуемого материала при одноосном сжатии и соответствующая ей история изменения скорости деформации. По полученным диаграммам определяются такие характеристики изучаемого материала как модули нагрузочной и разгрузочной ветвей, условный предел текучести, разрушающее напряжение, работа деформирования и т.д.

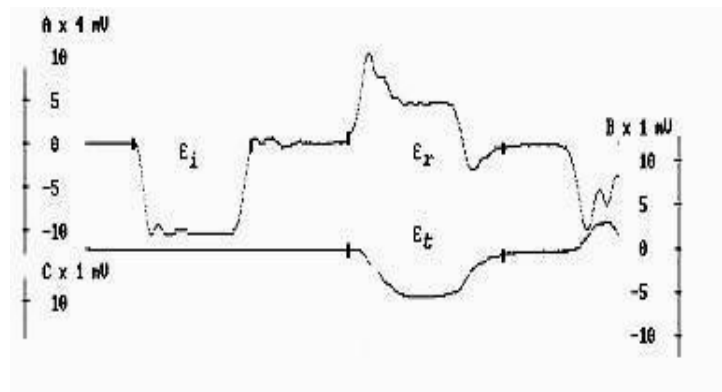


Рис. 4. – Исходная экспериментальная информация (импульсы деформаций в мерных стержнях)

С целью повышения информативности эксперимента при испытаниях на сжатие при необходимости дополнительно используются пьезополимерные датчики давления на основе сегнетоэлектрика поливинилидена (ПВДФ) [5]. Постановка опыта по испытанию на сжатие хрупкого материала и результаты измерений показаны на рисунке 7. толщина датчиков 20-30 мкм, так что они практически не влияют на процесс деформирования образца.

Эксперименты проведены при двух значениях амплитуды нагружающего импульса. Результаты измерений показывают, что в обоих случаях разрушение образца начинается после достижения в материале критического давления. Динамика процесса

разрушения в обоих экспериментах одинакова, но время, требующееся на разрушение образца, уменьшается с ростом амплитуды нагружения.

### БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ УДАРНЫЕ ТРУБЫ

Более высокие, чем указанные выше, скорости деформирования могут быть достигнуты при использовании для нагружения образцов исследуемого материала баллистических ударных труб (БУТ). БУТ является разгонным устройством, в котором метаемое тело (снаряд, ударник) перемещается в трубе под действием изначального сжатия газа. Несмотря на конструктивные отличия различных ударных труб, все они имеют одну и ту же принципиальную схему: любая БУТ состоит из камеры высокого давления (КВД), ствола, мишенной камеры и тормозного отсека. КВД отделяется от остальной части установки диафрагмой, за которой в стволе размещается снаряд. Камера высокого давления заполняется рабочим газом до давления, обычно, не превышающего 10 МПа, ствол и мишенная камера вакуумируются. При разрушении диафрагмы происходит разгон снаряда расширяющимся рабочим газом. Снаряд нагружает образец исследуемого материала, размещенный в мишенной камере. Максимальная скорость метания с помощью БУТ около 2 км/с [6].

Баллистические ударные трубы безопасны в эксплуатации и просты в обслуживании, что позволяет использовать их в условиях обычной научно-исследовательской лаборатории.

НИЦ располагает двумя баллистическими ударными трубами калибрами 76,2 и 38 мм, которые обеспечивают скорость деформирования  $10^3$ - $10^5$  с<sup>-1</sup>. В первой из них рабочий газ – воздух, максимальная масса снаряда ~ 700г. Скорость движения снаряда такой массы при начальном давлении в воздухе 10 МПа составляет  $W \approx 0,5$  км/с [6,7].

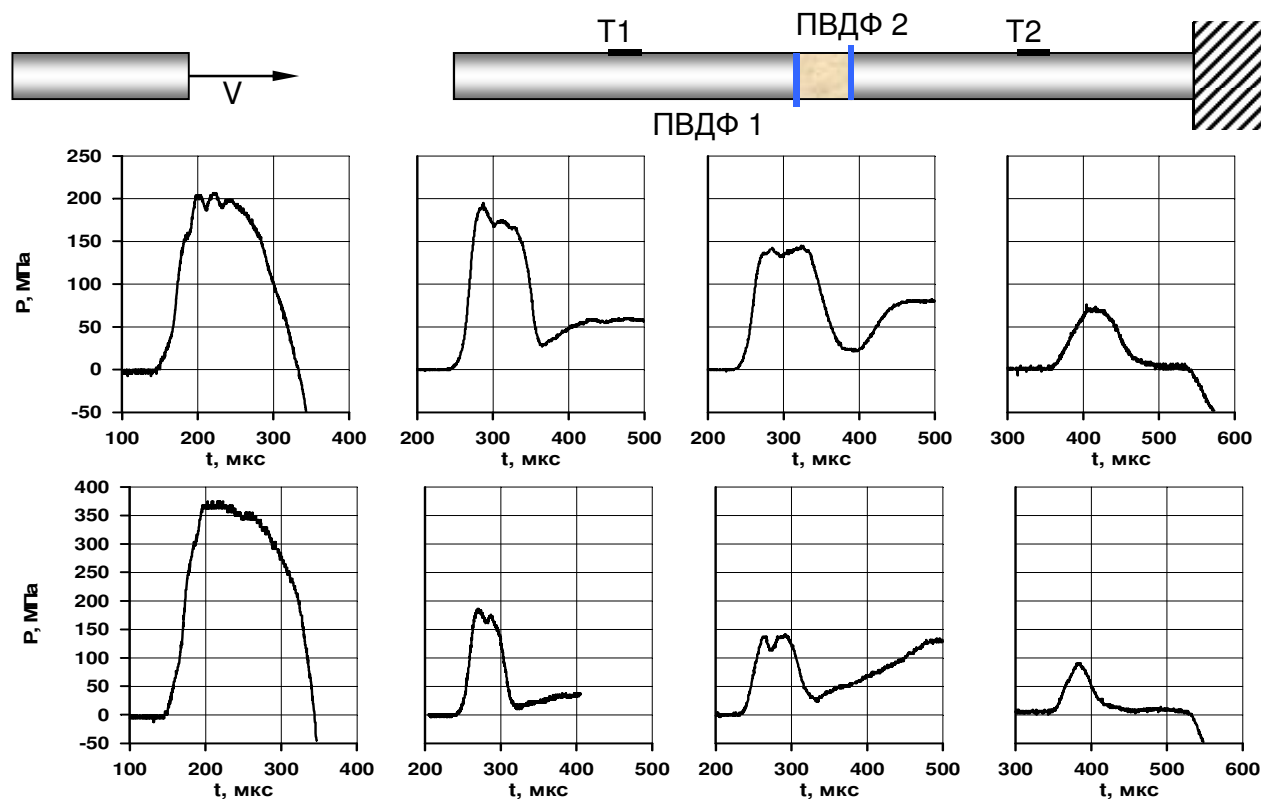


Рис. 5. – Результаты опыта по разрушению хрупкого материала, T1, T2 – тензодатчики, ПВДФ1, ПВДФ2 – пьезополимерные датчики давления

Во второй БУТ в качестве рабочего газа используется гелий. Масса снаряда не превышает 50 г. Его скорость при давлении в КВД 5 МПа  $W \approx 0,7$  км/с.

Обе БУТ оснащены системами автоматического управления выстрелом, устройствами для измерения скорости снаряда (электроконтакты или оптика) и измерительными методиками состояния вещества. В качестве последних, в основном, применяются методики манганинового [6] и пьезополимерного [5] датчиков динамического давления и лазерная интерферометрия [6]. Эти экспериментальные установки используются сегодня для определения характеристик ударнонагруженного твердого вещества. Как пример, на рисунке 6 приведены профили давления  $p(t)$ , зарегистрированные пьезополимерным датчиком (ПВДФ – датчик) в оргстекле.

В принципе по измеренным скоростям снаряда и зависимости  $p(t)$  в каждом опыте могут быть определены массовая скорость вещества, давление, продольная и объемная скорости звука, откольная прочность материала. На основе этих величин могут быть рассчитаны волновая скорость, модули всестороннего сжатия, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, динамический предел текучести и некоторые другие характеристики.

### ВЗРЫВНЫЕ НАГРУЖАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Для исследования свойств материалов в широком диапазоне нагружающих давлений и скоростей деформирования интенсивно используют взрывные метательные устройства. Разгон ударника в этих устройствах производится газообразными продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). На этом принципе в ИФВ РФЯЦ – ВНИИЭФ разработаны разнообразные устройства, формирующие в исследуемом веществе плоские, цилиндрические и сферические ударные волны и позволяющие получить в образцах давления вплоть до 1-2 ТПа [6].

В настоящей работе рассмотрим только наиболее часто используемый генератор плоской ударной волны. Схема устройства приведена на рисунке 7.

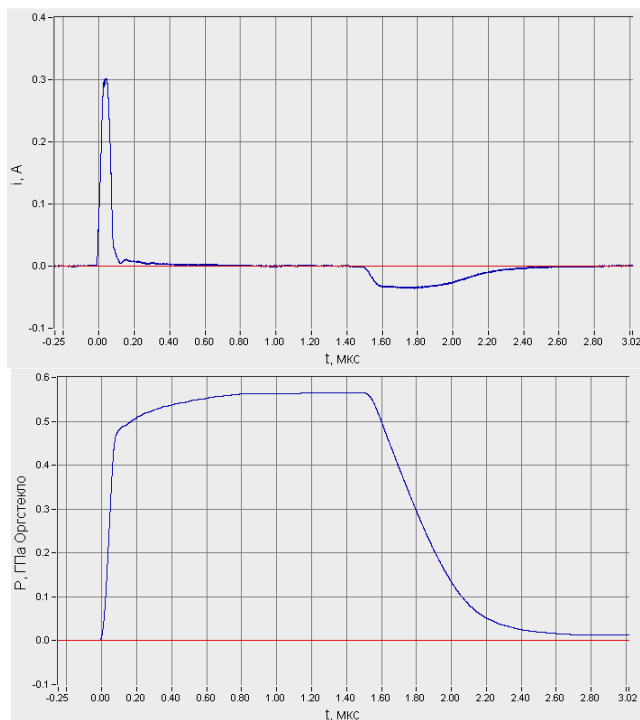
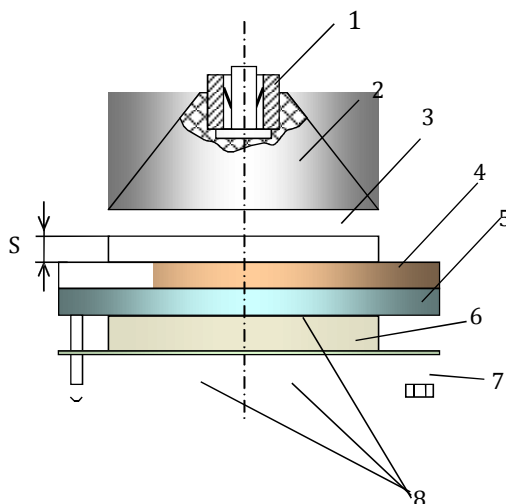


Рис. 6. – Профиль давления  $p(t)$ , зарегистрированный пьезополимерным датчиком в оргстекле



**Рис. 7.** – Генератор плоской ударной волны. 1–электродетонатор; 2–линза из УВ; 3–шашка из ВВ; 4,5–экран; 6–исследуемое вещество; 7–монтажная пена; 8–датчики; S–воздушный зазор

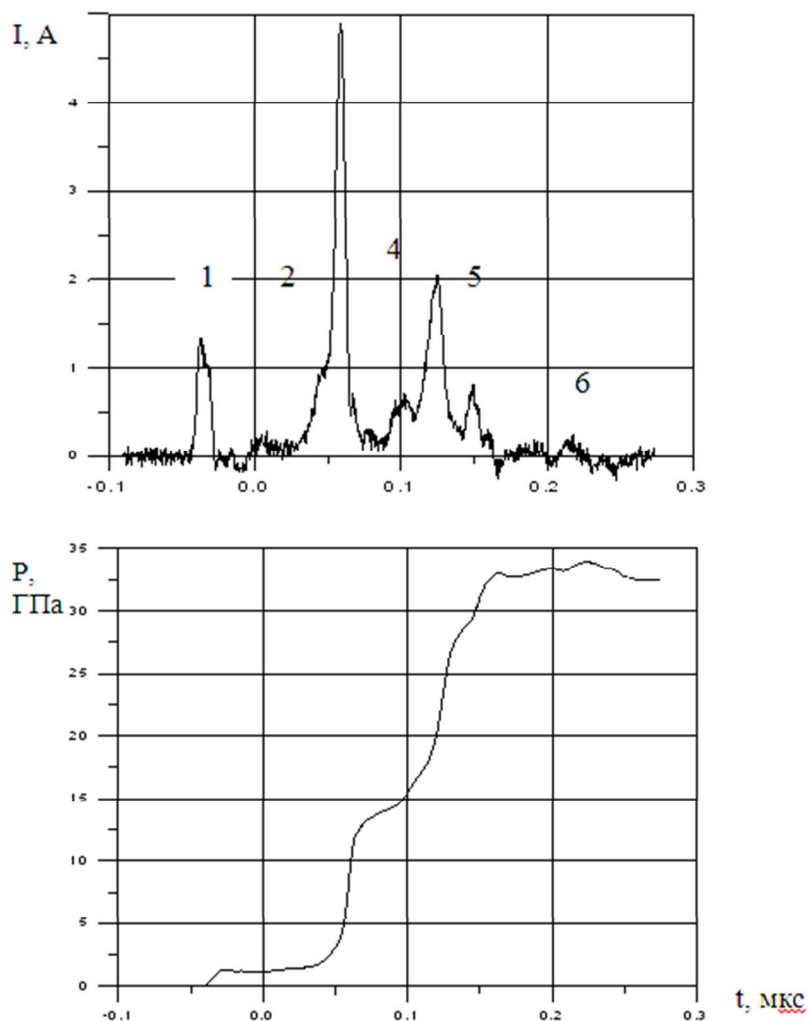
Оно состоит из линзы из ВВ, которая инициируется с помощью электродетонатора, цилиндрической детали (шашки) из ВВ, в которой с помощью линзы формируется плоская детонационная волна от экрана. Вместо линзы может быть использовано устройство, обеспечивающее многоточечное инициирование. В качестве экрана, обычно, применяют пластину из алюминия или меди толщиной  $\approx 10$  мм, на которой размещают образцы исследуемого материала. Важным элементом генератора является воздушный зазор ( $\sim 5$  мм) между шашкой и экраном, который обеспечивает формирование в экране ударной волны П-образного профиля. Устройства рассматриваемого типа позволяют за счет использования разных взрывчатых веществ (обычно, это тринитротолуол и составы на основе гексогена и октогена), изменения высоты шашки и введения дополнительных прокладок между экраном и исследуемым образцом из материалов с меньшей, чем у экрана, акустической жесткостью варьировать давление нагружения от нескольких десятых до  $\sim 40$  ГПа [6].

Рассмотренные устройства используются для исследования состояния вещества при скоростях деформирования до  $10^7$  с $^{-1}$ . Для этого используются разнообразные измерительные методики: электроконтактная, манганинового и пьезополимерного датчика, лазерная и радиоинтерферометрия. Измеряются волновая и массовые скорости вещества, скорости звука в сжатом веществе, сжатие и другие характеристики конденсированного вещества в таких экстремальных условиях нагружения. Исследуются детонация конденсированных взрывчатых веществ, агрегатные и структурные фазовые превращения материалов.

В качестве примера на рисунке 8 приведен профиль давления, формирующийся в железе в результате полиморфного  $\alpha - \epsilon$  фазового превращения.

Давление нагружения  $\approx 33$  ГПа. Измерения проведены с помощью ПВДФ – датчика динамического давления. Структура профиля следующая: упругий предвестник (1); отраженный от первой пластической волны упругий предвестник (2); первая пластическая волна, амплитуда которой соответствует началу  $\alpha - \epsilon$  перехода; отраженный от второй пластической волны упругий предвестник (4); вторая пластическая волна, которая переводит железо из  $\alpha$  в  $\epsilon$  фазу (5); волна 5, отраженная от границы раздела фаз (6). В целом результаты эксперимента дают достаточно полную информацию о фазовом превращении.





**Рис. 8.** – Профиль давления, формирующийся в железе в результате полиморфного  $\alpha - \epsilon$  фазового превращения

На рисунке 9 приведены зависимости скорости инициирующей ударной волны в образцах из взрывчатого состава на основе триаминотринитробензола, полученные с использованием радиоинтерферометра [8] с длиной волны зондирующего излучения 3,2 мм. Инициирование исследованных образцов производилось плоскими ударными волнами прямоугольного профиля с давлениями на фронте 8.4, 11.2, 13.0, 16.6, 19.1 и 23,4 ГПа. Особенностью радиоинтерферометра является то, что с его помощью можно проводить измерения в объеме радиопрозрачных материалов.

Из рисунка видно, что по мере распространения инициирующей ударной волны по образцу взрывчатого вещества ее скорость непрерывно увеличивается, при этом переход к детонации происходит практически скачком. Следует заметить, что чем выше давление на фронте инициирующей ударной волны, тем раньше происходит переход к детонации.

### ОПТИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОГРАФИЯ И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

После динамического или ударноволнового воздействия сохраненные образцы могут быть подвергнуты подробному лабораторному исследованию с целью анализа изменений в их структуре, вызванных высокоскоростным нагружением. Для этого в настоящее время используются методики рентгеноструктурного анализа

(рентгеновские дифрактометры XRD-7000 и ДРОН-УМ1), оптической металлографии (микроскопы МЕТАМ-ЛВ31 и АХИОVERT 40МАТ и полный комплекс оборудования для пробоподготовки), измерения микротвердости (микротвердомер IndentaMet 5104).

### РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Применительно к исследованию сохранных образцов с помощью рентгеноструктурного анализа решаются, в основном, следующие задачи:

- Определение фазового состава (качественный и количественный).
- Анализ текстур (преимущественных ориентировок).
- Определение размеров зерна (областей когерентного рассеяния).
- Определение плотности дислокаций.
- Определение параметров элементарной ячейки.

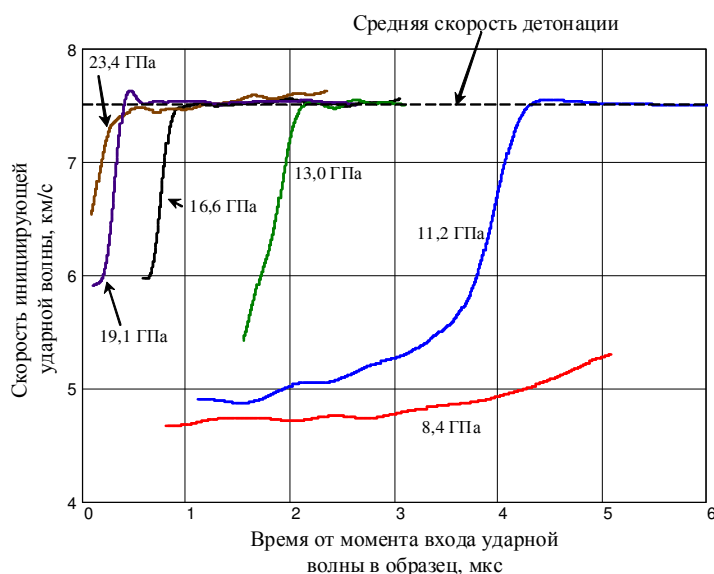
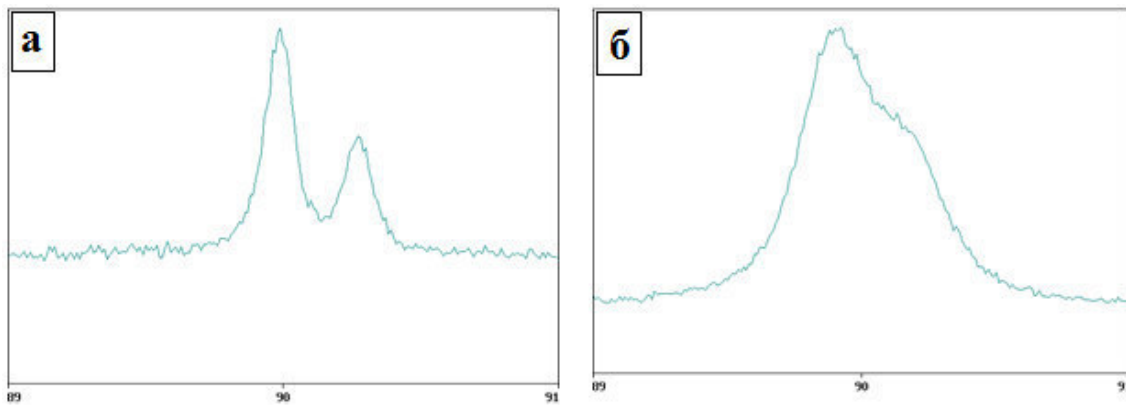


Рис. 9. – Зависимости скорости инициирующей ударной волны

Наиболее современным из используемых приборов является рентгеновский дифрактометр XRD-7000 производства фирмы Шимадзу (Япония). XRD-7000 имеет  $\theta$ - $\theta$  гониометр, юстировка и съёмка происходят в автоматическом режиме, управление параметрами работы прибора и детектирование происходят при помощи компьютерных программ. Прибор обладает точностью измерения дифракционных углов  $0,0001^\circ$ , что позволяет качественно решать задачи рентгеноструктурного анализа. Дифрактометр снабжён международной рентгеноструктурной базой данных PDF-2, позволяющей проводить качественный фазовый анализ всех известных кристаллических веществ.

В качестве примера использования рентгеноструктурной методики можно привести измерения плотности дислокаций в ударно нагруженной меди с различным размером зерна. На рисунке 10 приведены рентгенограммы одной и той же дифракционной линии (311) до (а) и после (б) нагружения. По уширению линии можно вычислить величину внутренних напряжений в материале, вызванных повышенной плотностью дислокаций. Зависимость плотности дислокаций  $\rho$  от давления нагружения приведены на рисунке 11. Эти экспериментальные данные используются для создания и тестирования дислокационных моделей прочности при высокоскоростной деформации.

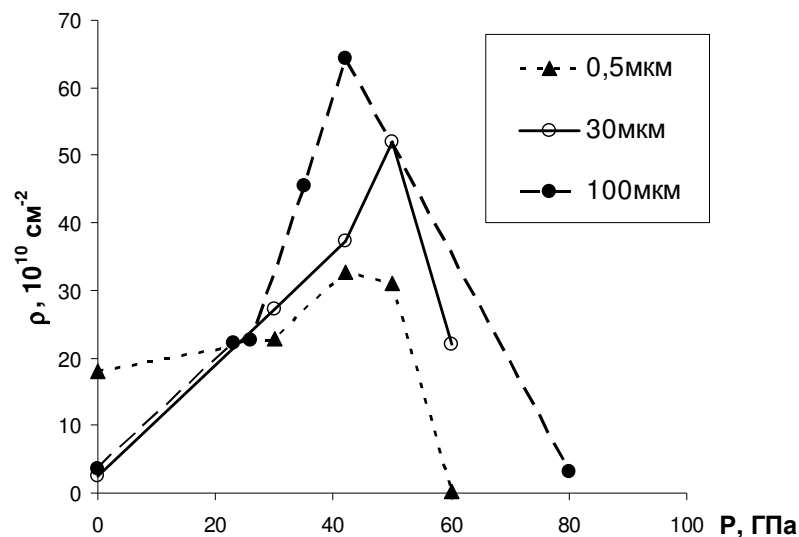


**Рис. 10.** – Рентгенограммы линии (311) Si до (а) и после (б) ударного нагружения до  $P=11$  ГПа

### ОПТИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОГРАФИЯ

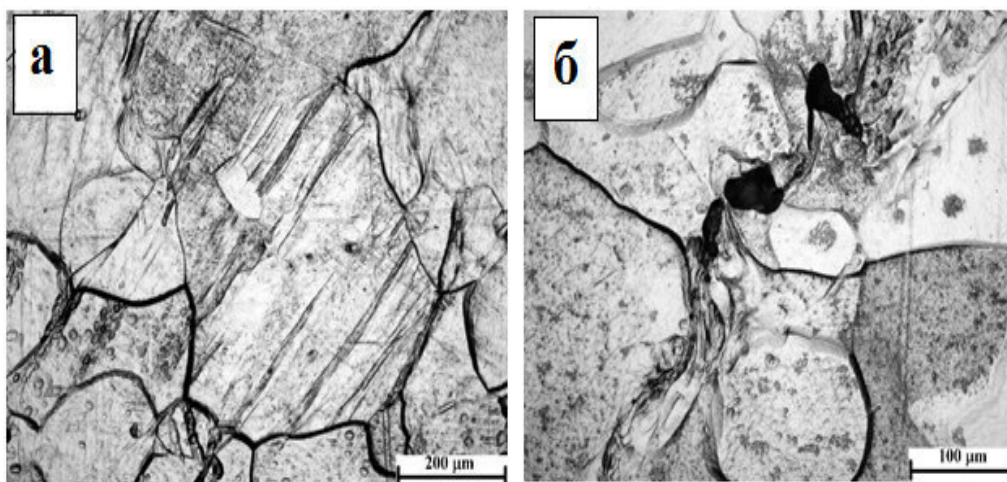
С помощью металлографии можно исследовать микроструктуру материалов после ударной обработки, а именно:

- фазовый состав;
- размер и форму зёрен;
- распределение зерен по размерам;
- наличие и плотность дефектов, вызванных деформацией (полосы сдвига, двойники, тензогенные мартенситные фазы и т.п.);
- эффекты, вызванные термическим воздействием ударного нагружения (зоны рекристаллизации, плавления, отжига дефектов);
- следы разрушения, в т.ч. откольного: микротрещины, поры.



**Рис. 11.** – Зависимость плотности дислокаций в меди от давления ударного нагружения при разном начальном размере зерна: 0.5, 30 и 100 мкм

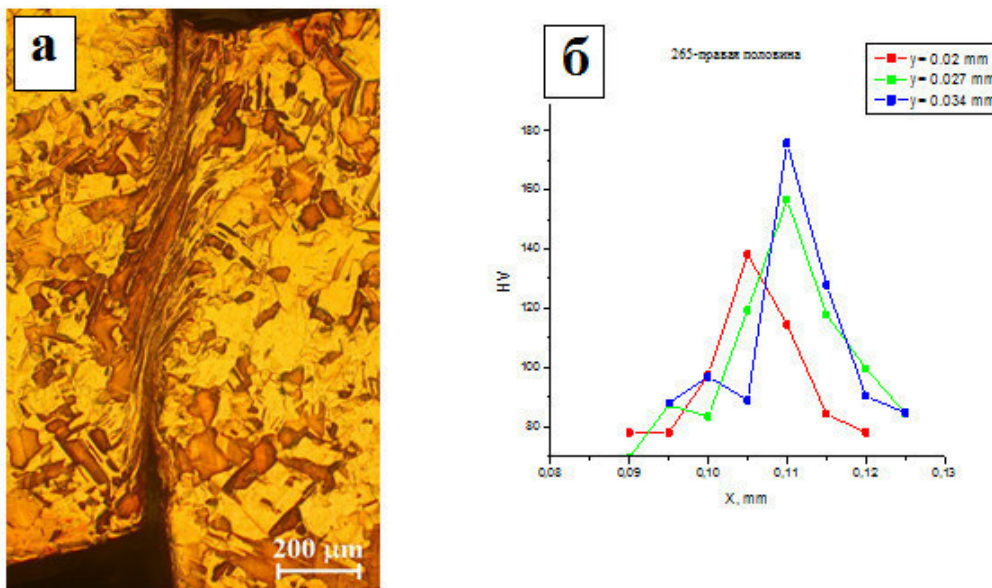
В качестве примера на рисунке 12 приведены фотографии микроструктуры тантала после ударноволнового воздействия. Фотографии получены на микроскопе AXIOVERT 40MAT (производство Carl Zeiss, Германия).



**Рис. 12.** – Примеры микроструктуры тантала после ударного воздействия: а – полосы локализованной деформации внутри зерна; б - поры, возникшие при воздействии растягивающих напряжений и соединяющие их деформационные полосы

### ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ

Измерение такой локальной механической характеристика, как микротвердость, бывает информативным при исследовании различных явлений, сопровождающих высокоскоростную деформацию. В частности, при изучении локализации деформации, имеющей место при адиабатическом сдвиге (рис. 13). Измерения проведены на микротвердомере IndentaMet 5104 (производство Buehler, Германия).



**Рис. 13.** – Локализованный сдвиг при высокоскоростной деформации меди: а – микрофотография; б – микротвердость сечения полосы сдвига (зависимость от координаты  $x$ )

Получаемые при помощи металлографической методики и измерения микротвердости как качественные, так и количественные данные используются при моделировании процесса высокоскоростной деформации металлов, их сдвиговой и откольной прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паспорт на испытательную машину Shimadzu серии Autograph AJSOJ [Текст]. – [Б.м., б.г.].
2. Новиков, С.А. и др. Исследование эффекта Баушингер при динамическом нагружении [Текст] / С.А. Новиков, В.А. Пушков, В.А. Синицын, П.А. Цой // ПМТФ. – 1995. – Т.36. – №4. – С. 136–169.
3. Зукас, Дж.А. и др. Динамика удара [Текст] / Дж.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф. Свифт. – М.: Мир, 1985.
4. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения [Текст] / Г. Кольский // Механика. – 1950. – Вып. 4. - С. 108–128.
5. Борисёнок, В.А. и др. ПВДФ – датчик динамического давления [Текст] / В.А. Борисёнок, В.Г. Симаков, В.Г. Куропаткин // ПТЭ. – 2008. – №4. – С. 113–121.
6. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках [Текст] / Под редакцией М.В. Жерноклетова. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2003.
7. Минеев, В.Н. и др. Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках [Текст] / В.Н. Минеев, В.П. Погорелов, А.Г. Иванов // ФГВ. – 1975. – Т. 14. – №3. – С. 129–133.
8. Cook M.A., Doran R.L. and Moris G.J. Measurements of detonation velocity by Doppler effect at three-centimeter wavelength // J. Appl. Phys., 1955, v. 26, № 3.

## Scientific – Research Center for Determination of the Physical and Mechanical Characteristics of Constructional Materials

V.A. Borisenok<sup>1</sup>, E.E. Lomteva<sup>1</sup>, A.L. Mikhailov<sup>1,2</sup>, M.A. Pukhov<sup>1,2</sup>, A.G. Sirotkina<sup>1</sup>,  
V.V. Alexeev<sup>1</sup>, Y.V. Butkov<sup>1</sup>, E.N. Bogdanov<sup>2</sup>, V.A. Volgin<sup>1</sup>, K.I. Evlanov<sup>1</sup>,  
A.M. Podurets<sup>1,2</sup>, V.G. Simakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sarov Physics and Engineering Institute  
the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»  
6 Duhova St., Sarov, Nizhegorodskaya region, Russia 607186  
e-mail: sarfti@mephi.ru

<sup>2</sup> Federal state unitary enterprise «The Russian Federal Nuclear Center – the All-Russian Research  
Institution of Experimental Physics»,  
37 Mira Avenue, Sarov, Nizhegorodskaya region, Russia 607188  
e-mail: staff@vniief.ru

**Abstract** – The purposes and tasks of the strategic development plan of NRNU MEPhI concerning formation of an educational and scientific complex for high-quality training of specialists for a nuclear and weapon and nuclear and power complex of the Russian Federation and for other main areas of equipment and technologies are given in article. It is reached by deep integration of involved branches of science and educations on the example of integration of NRNU MEPhI and the federal nuclear centers. The result of such integration is creation of the scientific educational centers (SEC).

Descriptions of the main test facilities and measuring techniques of the research center are provided in the article. Characteristics of materials which can be defined by each installation are called. A number of the experimental results is given to show the experimental capacity of the center.

**Keywords:** educational and scientific complex, weapon complex, nuclear complex, scientific educational center, constructional materials, test machine, chart tension – deformation, speed measurement of sample deformation, generator of a flat shock wave, optical metallography, X-ray diffraction analysis, microhardness measurement, NRNU MEPhI, Sarov Physics and Engineering Institute, Russian federal nuclear center.

## REFERENCES

- [1] Pasport na ispytatel'nuju mashinu Shimadzu serii Autograph AJSOJ [The passport on the test Shimadzu car of the Autograph AJSOJ series]. 2014. (in Russian)
- [2] Novikov S.A., Pushkov V.A., Sinicyn V.A., Coj P.A. Issledovanie jeffekta Baushinger pri dinamicheskom nagruzhenii [Research of effect Baushinger at dynamic loading]. PMTF [Applied mechanics and technical physics]. 1995, T.36 [Vol.36], №4, ISSN 0021-8944, pp. 136–169. (in Russian)
- [3] Zukas Dzh.A., Nikolas T., Svift H.F. Dinamika udara [Dynamics of blow]. M. Pub. Mir [Mir], 1985. (in Russian)
- [4] Kolskij G. Issledovanie mehanicheskikh svojstv materialov pri bolshih skorostjah nagruzhenija [Research of material mechanical properties at big speeds of loading]. Mehanika [Mechanics]. 1950, Vyp. 4 [Issue 4], pp. 108–128. (in Russian)
- [5] Borisjonok V.A., Simakov V.G., Kuropatkin V.G. etc. PVDF – datchik dinamicheskogo davlenija [A PVDF dynamic pressure gage]. PTJe [Instruments and Experimental Techniques]. 2008, Vol. 51, №4, ISSN 0020-4412, DOI: 10.1134/S0020441208040167, pp. 593–601. (in English)
- [6] Metody issledovanija svojstv materialov pri intensivnyh dinamicheskikh nagruzkah [Methods of research of properties of materials at intensive dynamic loadings] / Pod redakciej M.V. Zhernokletova [Edited by M.V. Zhernokletov]. Sarov. Pub. RFJaC – VNIIEF [Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute Of Experimental Physics], 2003, ISBN 5-9515-0008-7, 402 p. (in Russian)
- [7] Mineev V.N., Pogorelov V.P., Ivanov A.G. Ustanovka dlja issledovanija povedenija materialov i konstrukcij pri dinamicheskikh nagruzkah [Installation for research of materials behavior and designs at dynamic loadings]. FGV [Physics of burning and explosion]. 1975, T. 14 [Vol.14], №3, ISSN 0430-6228, pp. 129–133. (in Russian)
- [8] Cook M.A., Doran R.L., Moris G.J. Measurements of detonation velocity by Doppler effect at three-centimeter wavelength. J. Appl. Phys., 1955, V. 26, №3, ISSN 0021-8979. (in English)