

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.
ДЕТОНАЦИЯ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

EXTREME STATES OF SUBSTANCE.
DETONATION. SHOCK WAVES

СБОРНИК ТЕЗИСОВ
ДОКЛАДОВ

ABSTRACTS



САРОВ • РФЯЦ-ВНИИЭФ

XXIII ХАРИТОНОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

**ФГУП
«РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР –
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»**

**FSUE
«RUSSIAN FEDERAL NUCLEAR CENTER –
ALL-RUSSIA RESEARCH INSTITUTE
OF EXPERIMENTAL PHYSICS»**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
XXIII ХАРИТОНОВСКИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ**

**03 ОКТЯБРЯ – 07 ОКТЯБРЯ 2022 ГОДА
OCTOBER – OCTOBER**

**INTERNATIONAL CONFERENCE
XXIII KHARITON'S TOPICAL SCIENTIFIC READINGS**

**ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.
ДЕТОНАЦИЯ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

**EXTREME STATES OF SUBSTANCE.
DETONATION. SHOCK WAVES**

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

ABSTRACTS

**САРОВ
SAROV
2022**

УДК 534.222.2+536.4

ББК 22.23

Э41

Э41 **Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Extreme states of substance. Detonation. Shock waves.** Международная конференция XXIII Харитоновские тематические научные чтения. International Conference XXIII Khariton's Topical Scientific Readings. Сборник тезисов докладов. Abstracts – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2022. – 223 с.

ОРГАНИЗАТОР КОНФЕРЕНЦИИ

**ФГУП
«РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР –
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»**

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА

**Почетный научный руководитель ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Академик РАН – Р.И. ИЛЬКАЕВ**

СОПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА

**Директор Института экспериментальной газодинамики
и физики взрыва ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – С.В. ЕРУНОВ**

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА

**Заместитель научного руководителя ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
по газодинамическим исследованиям – А.Л. МИХАЙЛОВ**

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

А.Л. Михайлов – председатель

С.В. Ерунов	А.С. Гладцинов
О.В. Свирский	И.Р. Трунин
М.В. Жерноклетов	В.А. Огородников
О.Б. Дреннов	Н.В. Невмержицкий
С.А. Вахмистров	И.В. Занегин
Ю.В. Шейков	А.Б. Георгиевская
А.М. Подурец	

РЕДАКЦИОННО-ОФОРМИТЕЛЬСКАЯ ГРУППА

О.В. Мясоедов, Н.П. Румянцева, З.В. Соколова, Н.Н. Чухонцева

К УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ !

Международная конференция «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» проводится в рамках традиционных ежегодных тематических чтений, организуемых Российским Федеральным Ядерным Центром – Всероссийским НИИ экспериментальной физики (ВНИИЭФ) и посвященных памяти выдающегося ученого XX века академика Юлия Борисовича Харитона, который был организатором и в течение почти полувека научным руководителем ВНИИЭФ – крупнейшего научного центра России.

Данная конференция продолжает тематику III, V, VII, IX, XI, XIII, XV, XVII, XIX, XXI Харитоновских научных чтений, состоявшихся в 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 годах.

Предлагаемый Вам сборник тезисов докладов содержит материалы, представленные на XXIII Харитоновские чтения.

Материалы размещены в соответствии с тематикой шести направлений (секций) конференции:

- Энергетические материалы и физика детонации
- Уравнения состояния и фазовые переходы
- Динамическая прочность и реология материалов, динамика конструкций
- Высокоскоростное метание и соударение. Явления кумуляции
- Гидродинамические неустойчивости
- Методики эксперимента и взрывные технологии.
Моделирование динамических процессов

Мы рады приветствовать в стенах РФЯЦ-ВНИИЭФ представителей различных научных школ, НИИ, КБ и ВУЗов России, приехавших на конференцию, и расцениваем их участие как высокую оценку нашего сотрудничества и как дань памяти Юлию Борисовичу Харитону.

Желаем всем участникам конференции успешной научной работы, творческих успехов и развития взаимовыгодного сотрудничества.

Оргкомитет
XXIII Харитоновских научных чтений

РОССИЙСКИЕ ОРГАНИЗАЦИИ-УЧАСТНИКИ

ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», г. Саров
Филиал ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седякина»,
г. Нижний Новгород
СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров
Филиал МГУ им М.В. Ломоносова Нижегородская область, Дивеевский район,
пос. Сатис
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», г. Снежинск
ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
НИЯУ МИФИ, г. Москва
ООО «ВИДЕОСКАН», г. Москва
ООО «НПП НАНОСКАН», г. Москва
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
НИУ Высшая школа экономики, г. Москва
ФГБОУ ВО МИРЭА-Российский технологический университет,
Институт искусственного интеллекта, г. Москва
ООО КурЭйт, г. Москва
АО «Институт взрыва», г. Москва
ФГУП «ФЦДТ «Союз», г. Дзержинский, Московская обл.
ФГБНУ «Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных
материалов» (ТИСНУМ) г. Москва, г. Троицк
ФГБУН Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка
ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск
ФГУП «СКТБ «Технолог», г. Санкт-Петербург
Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»,
ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа
им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирская область, р. п. Кольцово
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск
Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск
ФГАОУ ВО Научно-исследовательский институт механики ННГУ
им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород
АО «ГосНИИ «Кристалл», г. Дзержинск, Нижегородская обл.
АО «ГосНИИмаш», г. Дзержинск, Нижегородская обл.
ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
г. Екатеринбург
Институт механики сплошных сред УРО РАН, г. Пермь
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский
университет), г. Челябинск

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

PLENARY TALKS

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ С.Б. КОРМЕРА. К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

М.А. Мочалов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Настоящий доклад посвящен 100-летию юбилею С.Б. Кормера, член-корреспондента Академии наук СССР, выдающегося ученого и организатора. Под его руководством во ВНИИЭФ сформировалась научная школа, сыгравшая важную роль в развитии ряда областей фундаментальной и прикладной науки. Он явился инициатором таких уникальных направлений исследований, как изучение свойств ударно-сжатых прозрачных диэлектриков, сжимаемости газов, в том числе водорода и его изотопов, а также совершенно несвойственной тематике ВНИИЭФ – физики лазеров. В докладе представлены наиболее яркие результаты газодинамических экспериментов, составляющие часть научного наследия Самуила Борисовича, а также новые результаты, полученные в более поздний период и расширившие диапазон давлений по исследованию сжимаемости изотопов водорода из «пионерских» работ С.Б.Кормера, например, дейтерия, до 200 Мбар.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

FUNDAMENTAL RESEARCH

МОДЕЛЬ РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (ОТО) С РАЗЛЁТОМ В ПУСТОТУ ГОРЯЧЕЙ НАЧАЛЬНОЙ СИНГУЛЯРНОСТИ

А.Н. Крайко

ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»,
г. Москва, Россия

По открытому Э. Хабблом (1929 г.) закону далёкие галактики удаляются от нас со скоростью $\mathbf{u} = H(t)\mathbf{r}$ с радиусом-вектором \mathbf{r} до них и функцией времени $H = H(t)$. Имея решение, описывающее такой разлёт, можно определить, когда начал разлетаться образовавший галактики газ. С 1929 г. расширение Вселенной описывали решением А. Фридмана (1922 г.). В нём скалярные параметры газа – функции только времени t , расстояния между частицами газа растут с ростом t , а за начало расширения всегда безграничной Вселенной взят момент сингулярности её скалярных параметров. Время t_0 , отсчитываемое от этого момента, – время "жизни" Вселенной. В 1998 г. две группы астрономов США обнаружили несоответствие наблюдений решению А. Фридмана. Для его устранения это решение было обобщено на ненулевые значения "космологической постоянной" Λ , введённой А. Эйнштейном для построения стационарной Вселенной. Выбор Λ позволил согласовать наблюдения с таким решением. Найденные значения Λ , приводят к антигравитации. Её носителя назвали "тёмной энергией".

Казалось бы, более естественно решение задачи о разлёте из точки в пустоту конечной массы газа. Однако до 2015 г. такого решения не было даже в классической постановке. В такой постановке задача разлёта конечной массы m_0 газа с удельной энтропией s_0 была решена в [1] (2015 г.). Согласно [1] газ, сжатый в точку и из-за этого имеющий при конечных m_0 и s_0 бесконечные полную E_0 и удельную ϵ_0 энергии, температуру T_0 , давление p_0 , плотность ρ_0 и скорость звука a_0 , разлетается на всё пространство так, что $u = r/t$ при $0 \leq r \leq \infty$ (1), а p , T , ρ и a становятся нулями. Однако разлёт со сколь угодно большими скоростями противоречит СТО и ОТО, согласно которым скорость частиц не может превышать скорость света c . Решения [1-4] в рамках СТО удовлетворили этому ограничению, с такой же, как в (1), формулой для

u , но с $r \leq ct$ и $u \leq c$. Сравнение наблюдательных данных [5] и полученного без единой эмпирической константы решения с $H = 1/t$ и показало, что оно лучше любой современной космологической теории с тёмной энергией, т.е. тёмная энергия излишня.

В [6, 7] разлёт в пустоту начальной горячей сингулярности (HSS) внутри её гравитационного радиуса ($r \leq r_g = 2E_0G/c^4$, G – гравитационная постоянная) рассмотрен в рамках ОТО. Степень разогретости HSS определяется отношением её полной энергии E_0 к энергии покоя всех её N_0 барионов: $\sigma = E_0/(N_0m_Bc^2)$, где m_B – масса покоя холодного бариона. На первый взгляд, такой разлёт, как и разлёт сингулярности чёрной дыры, невозможен. Принципиальное отличие, однако, в том, что чёрная дыра – результат коллапса после выгорания в звезде термоядерного горючего. Поэтому при коллапсе рост T , p и ρ таков, что в процессе сжатия силы тяготения всегда больше противостоящего им перепада давления. При разлёте HSS всё наоборот из-за огромного в начале разлёта давления всех безмассовых (с нулевой массой покоя) и массовых частиц и античастиц при пренебрежимом вкладе избыточных (над антибарионами и позитронами) барионов и электронов. При реализации разлёта плотность в его центре сразу становится конечной, убывая с ростом t . Благодаря этому в центре разлёта возникает и растёт R-область, в части которой метрика близка к галилеевой и из уравнений ОТО следуют три уравнения СТО без гравитации и их решения для скорости $\mathbf{u} = \mathbf{r}/t$ и давления $p = 0$. Равенство $p = 0$ получилось без задания $p = 0$ на границе с пустотой. Это существенно, ибо R-область отделяет от пустоты шаровая T-область, описываемая уравнениями ОТО. При больших σ и t T-область может исчезнуть, после чего останутся две разделённые гравитационным радиусом R-области.

© А.Н. Крайко, 2022. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-01-00100).

Литература

1. Валиев Х.Ф., Крайко А.Н. Разлет идеального газа из точки в пустоту. Новая модель Большого взрыва и расширения Вселенной // ПММ. 2015. 79 (6). 793-807.
2. Валиев Х.Ф., Крайко А.Н. Сжатие идеального газа в точку, разлет из точки его конечной массы в пустоту, Большой взрыв и расширение Вселенной // Труды "XVII Харитоновских научных чтений". Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 614-620.
3. Kraiko A.N., Valiyev Kh.F. The new model of the Big Bang and the Universe expansion. A comparison with modern observational data and cosmological theories // AIP Conference Proceedings. V. 1770. American Institute of Physics, 2016. 020002-1-020002-11.
4. Крайко А.Н., Валиев Х.Ф. Модель Большого взрыва и расширения Вселенной с разлетом в пустоту газа, сжатого "почти в точку". Сравнение с наблюдательными данными и современными космологическими теориями // Труды "XIX Харитоновских научных чтений". Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017. 5-12.

5. WMAP Cosmological parameters Model/Data Set Matrix. NASA; <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/parameters.cfm>.
6. Kraiko A.N. A Model of the Big Bang and Universe Expansion in General Relativity with spread of a gas mass from a point to empty space // Grav. Cosmol. 2020. 26 (4). 399–407.
7. Kraiko A.N. Erratum to: A Model of the Big Bang and Universe Expansion in General Relativity with spread of a gas mass from a point to empty space // Grav. Cosmol. 2022. 28 (1). 96.

A MODEL OF UNIVERSE EXPANSION IN GENERAL RELATIVITY WITH SPREAD OF A HOT START SINGULARITY TO EMPTY SPACE

A.N. Kraiko

Baranov Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow, Russia

According to the law discovered by E. Hubble (1929), distant galaxies are moving away from us at a speed $\mathbf{u} = H(t)\mathbf{r}$ with a radius vector \mathbf{r} to them and a function of time $H = H(t)$. Having a solution describing such a spread, it is possible to determine when the gas that formed the galaxies began to disperse. Since 1929, the expansion of the Universe has been described by the solution of A. Friedman (1922). In it, the scalar parameters of a gas are functions of only time t , the distances between gas particles grow with the growth of t , and the moment of singularity of its scalar parameters is taken as the beginning of the expansion of the always boundless Universe. The time t_0 , counted from this moment, is the time of the Universe "life". In 1998, two groups of US astronomers discovered an inconsistency of observations with A. Friedman's solution. To eliminate it, this solution was generalized to non-zero values of the "cosmological constant" Λ , introduced by A. Einstein to construct a stationary Universe. The choice of Λ allowed us to match observations with such a solution. The found values of Λ lead to antigravity. Its bearer was called "dark energy".

It would seem more natural to solve the problem of the expansion from a point into the void of a finite mass of gas. However, until 2015, there was no such decision even in the classical setting. In this formulation, the problem of the expansion of a finite mass m_0 of a gas with a specific entropy s_0 was solved in [1] (2015). According to [1], a gas compressed to a point and, because of this, having infinite total E_0 and specific ε_0 energies, temperature T_0 , pressure p_0 , the density ρ_0 and the sonic velocity a_0 , is scattered over the entire space so that $u = r/t$ when $0 \leq r \leq \infty$ (1), and p , T , ρ and a become zeros. However, the expansion with arbitrarily high velocities contradicts SR and GR, according to which the velocity of particles cannot exceed the speed of light c . Solutions [1-4] within SR satisfied this limitation, with the same formula as in (1) for u , but with $r \leq ct$ and $u \leq c$. Comparison of the observational data [5] and the solution obtained without a single empirical constant with

$H = 1/t$ showed that it is better than any modern cosmological theory with dark energy, i.e. dark energy is superfluous.

In [6, 7], the expansion into the void of the hot start singularity (HSS) inside its gravitational radius ($r \leq r_g = 2E_0G/c^4$, G is the gravitational constant) is considered in the framework of GR. The degree of warming of the HSS is determined by the ratio of its total energy E_0 to the rest energy of all its N_0 baryons: $\sigma = E_0/(N_0m_Bc^2)$, where m_B is the rest mass of the cold baryon. At first sight, such a spread, like the spread of the singularity of a black hole, is impossible. The fundamental difference, however, is that a black hole is the result of a collapse after burning out of thermonuclear fuel in a star. Therefore, during collapse, the growth of T , p and ρ is such that in the process of compression, the gravitational forces are always greater than the pressure drop opposing them. During the HSS expansion, the opposite is true due to the enormous pressure at the beginning of a spread of all massless (with zero rest mass) and mass particles and antiparticles with a negligible contribution of excess (over anti-baryons and positrons) baryons and electrons. When the expansion is realized, the density in its center immediately becomes finite, decreasing with the growth of t . Due to this, an R-region arises and grows in the center of the expansion, in part of which the metric is close to the Galilean one and three equations of SR without gravity follow from the GR equations and their solutions for velocity $\mathbf{u} = \mathbf{r}/t$ and pressure $p = 0$. The equality $p = 0$ turned out without setting $p = 0$ on the border with the void. This is essential, because the R-region is separated from the void by a spherical T-region described by the GR equations. When large σ and t , the T-region may disappear, and two R-regions separated by the gravitational radius will remain.

References

1. Valiyev Kh.F., Kraiko A.N. The dispersion of an ideal gas from a point into a void. A new model of the Big Bang and the expansion of the Universe // J. of Applied Mathematics and Mechanics. 2015. 79 (6). 556-565.
2. Valiyev Kh.F., Kraiko A.N. Compression of ideal gas into a point, its finite mass dispersing from the point into the vacuum, the Big Bang and the Universe expansion // Proceedings of XVII Khariton's Topical Scientific Readings. Sarov: RFNC-ARRIEP, 2015. 621-626.
3. Kraiko A.N., Valiyev Kh.F. The new model of the Big Bang and the Universe expansion. A comparison with modern observational data and cosmological theories // AIP Conference Proceedings. V. 1770. American Institute of Physics, 2016. 020002-1-020002-11.
4. Kraiko A.N., Valiyev Kh.F. A model of the Big Bang and the Universe expansion with the dispersion to the void a gas, compressed "almost in a point". A comparison with observational data and modern cosmological theories // Proceedings of XIX Khariton's Topical Scientific Readings. Sarov: RFNC-ARRIEP, 2017. 12-19.
5. WMAP Cosmological parameters Model/Data Set Matrix. NASA; <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/parameters.cfm>.

6. Kraiko A.N. A Model of the Big Bang and Universe Expansion in General Relativity with spread of a gas mass from a point to empty space // Grav. Cosmol. 2020. 26 (4). 399–407.
7. Kraiko A.N. Erratum to: A Model of the Big Bang and Universe Expansion in General Relativity with spread of a gas mass from a point to empty space // Grav. Cosmol. 2022. 28 (1). 96.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ФИЗИКА ДЕТОНАЦИИ

ENERGETIC MATERIALS AND PHYSICS OF DETONATION

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПЛАСТИЧНЫХ И ЭЛАСТИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОСТОЙКИХ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А.С. Гладков, Г.П. Куценко, Л.Г. Сухова, В.Я. Базотов

АО «ГосНИИ «Кристалл» г. Дзержинск, Нижегородская обл., Россия

Приготовлены пластичные и эластичные взрывчатые составы (ПВВ и ЭВВ) на основе ряда индивидуальных термостойких взрывчатых веществ (ВВ) и изучена их детонационная способность.

Для исследований использовались октоген, бициклооктан (БЦО), CL-20, бензтрифуроксан (БТФ), амидин, аминокамидин, пентазол, пентациклан, октанит, пирин, а также различные каучуки и пластификаторы.

Составы на основе амидина, аминокамидина, пентазола, пентациклана, октанита и пирина имеют большой критический диаметр от 5 мм и более. Минимальный критический диаметр детонации получен на шнурах из составов на основе октогена, БЦО, CL-20 и БТФ.

Отмечено, что наилучшую технологичность имеют составы на основе октогена, БЦО, CL-20, БТФ, пентазола, пентациклана и октанита. Данные составы хорошо вальцевались, шнуры из них имели удовлетворительную прочность и эластичность. Взрывчатые составы на основе амидина, аминокамидина и пирина сформировать в однородную массу гомогенизацией было затруднительно.

INVESTIGATION OF THE DETONATION ABILITY OF PLASTIC AND ELASTIC EXPLOSIVE COMPOUNDS BASED ON HEAT-RESISTANT INDIVIDUAL EXPLOSIVES

A.S. Gladkov, G.P. Kutsenko, L.G. Sukhova, V.Ya. Bazotov

JSC "GosNII "Kristall", Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, Russia

Plastic and elastic explosive compounds based on a number of individual heat-resistant explosives were prepared and their detonation ability was studied.

HMX, bicyclooctane, CL-20, benztrifuroxane, amidine, aminoamidine, pentazole, pentacyclane, octanite, pyrine, as well as various rubbers and plasticizers were used for research.

Compounds based on amidine, aminoamidine, pentazole, pentacyclane, octanite and pirin have a large critical diameter of 5 mm or more. The minimum critical detonation diameter was obtained on cords from compounds based on HMX, bicyclooctane, CL-20 and benzotrifuroxane.

It is noted that compounds based on HMX, bicyclooctan, CL-20, benzotrifuroxane, pentazole, pentacyclane and octanite have the best manufacturability. These compositions were well rolled, the cords made of them had satisfactory strength and elasticity. It was difficult to form the homogeneous mass of explosive compounds based on amidine, aminoamidine and pirin by homogenization.

ИЗУЧЕНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А.С. Юношев¹, М.П. Девушкин^{1,2}, А.В. Пластинин¹, А.А. Плуман^{1,2}

¹Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Изучение процесса ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ (ВВ) важно по многим причинам, например в связи с определением условий безопасного обращения с ВВ, или с точки зрения оптимизации способов возбуждения детонации. Основным классом промышленных ВВ на данный момент являются эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ). Однако научных работ, посвященных ударному или ударно-волновому инициированию этого класса взрывчатых веществ крайне мало. Например, в [1, 2] изучается ударно-волновое инициирование различных ЭмВВ с начальной плотностью 1.248 г/см³ и 1.18-1.33 г/см³, соответственно, созданного на основе аммиачной селитры. В [3] анализируется процесс возбуждения детонации в различных составах ЭмВВ при простреле их высокоскоростными компактными ударниками.

В данной работе изучено инициирование детонации в ЭмВВ ударом тонкой дюралевой пластинки. В основе исследуемого ЭмВВ лежит эмульсионная матрица, в составе которой присутствуют раствор аммиачной (68.25%) и натриевой (10.55%) селитр в воде (15.2%), индустриальное масло И-20 (4%) и эмульгатор сорбитан моноолеат (2%). Плотность эмульсии составляет 1.41 г/см³. В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25.

Тонкая дюралевая пластинка металась скользящей детонацией *активного* заряда ВВ на плоский *пассивный* заряд из исследуемого ВВ. Расположение зарядов было таким, чтобы удар пластинки по пассивному заряду происходил под небольшим углом, а скорость точки контакта метаемой пластинки и пассивного заряда превышала скорость детонации пассивного заряда. В результате удара в пассивный заряд распространялась ударная волна, в некоторых экспериментах переходящая в детонационную волну. При указанных выше условиях картина нагружения пассивного заряда, является стационарной. Процесс удара регистрировался с помощью импульсной рентгенографии. На рентгенограмме фиксировались форма ударной и форма детонационной (в случае инициирования детонации) волн. По рентгенограммам процесса нагружения пассивного заряда были построены ударные

адиабаты исследуемых ЭмВВ и рассчитаны скорости детонационных волн, в случае их инициирования.

На полученных рентгенограммах можно непосредственно измерить глубину инициирования H (в случае возбуждения детонации). Также можно оценить энергию ударно-волнового инициирования исследуемого ВВ, если предположить, что кинетическая энергия движения метаемой пластинки в направлении пассивного заряда полностью поглощается исследуемым ВВ и идёт на возбуждение детонационного процесса. Для ЭмВВ с начальной плотностью 1.0 г/см^3 при скорости метаемой пластины 0.88 мм/мкс глубина инициирования составила примерно 5 мм , эта энергия инициирования, в расчёте на единицу поверхности составила 1.57 Дж/мм^2 .

Рассчитанное давление в исследуемом ЭмВВ в момент удара, приводящее к инициированию детонации, значительно меньше давления Чепмена-Жуге для исследуемого ВВ. Это подтверждает то, что в ЭмВВ реакция разложения эмульсионной матрицы начинается в «горячих точках», то есть в областях за фронтом УВ, температура в которых гораздо больше средней. В ЭмВВ «горячие точки» возникают в окрестности ударно сжатых пор.

Литература

1. J. Lee, F. W. Sandstrom, B. G. Craig, and P. -A. Fersson DETONATION AND SHOCK INITIATION PROPERTIES OF EMULSION EXPLOSIVES // in: *Proc. of the 9th Int. Symp. on Detonation* (1989), pp. 573–584.
2. Сильвестров В.В., Караханов С.М., Дерибас А.А., Пластинин А.В. Ударно-волновая чувствительность эмульсионного ВВ // Труды межд. конференции «IX Харитоновские тематические чтения», 12–16 марта 2007 г., Саров., С.133-138.
3. K.L.C. Nielsen, C. Craciun, T.R. Craig, R. Turcotte High-velocity projectile initiation of emulsion explosives // https://www.researchgate.net/publication/257432578_High-velocity_Projectile_Initiation_of_Emulsion_Explosives

INVESTIGATION OF SHOCK-WAVE INITIATION OF EMULSION EXPLOSIVES

A.S. Yunoshev¹, M.P. Devushkin^{1,2}, A.V. Plastinin¹, A.A. Pluman^{1,2}

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The study of the process of shock-wave initiation of explosives (HE) is important for many reasons, for example, in connection with the determination of the conditions for the safe handling of explosives, or from the point of view of optimizing detonation initiation methods. The main class of industrial explosives at the moment are emulsion explosives (EmEx). However, there are very few scientific works devoted to shock or shock-wave initiation of this class of explosives. For example, in [1, 2], the shock-wave initiation of various EEMs with an initial density of 1.248 г/см^3 and $1.18\text{--}1.33 \text{ г/см}^3$, respectively, created on the basis of ammonium nitrate, is studied. In [3], the process of detonation initiation in various compositions of EmEx is analyzed when they are shot through by high-speed compact projectiles.

In this work, we study the initiation of detonation in an EHE by the impact of a thin duralumin plate. The emulsion matrix under study is based on an emulsion matrix, which

contains a solution of ammonia (68.25%) and sodium (10.55%) nitrate in water (15.2%), industrial oil I-20 (4%), and the emulsifier sorbitan monooleate (2%). The density of the emulsion is 1.41 g/cm^3 . Expancel 461 DET 40 d25 polymeric microballoons were used as a sensitizer.

A thin duralumin plate was thrown by a sliding detonation of an active explosive charge onto a flat passive charge from the investigated explosive. The location of the charges was such that the impact of the plate on the passive charge occurred at a small angle, and the speed of the point of contact between the thrown plate and the passive charge exceeded the detonation velocity of the passive charge. As a result of the impact, a shock wave propagated into the passive charge, which in some experiments turned into a detonation wave. Under the above conditions, the loading pattern of the passive charge is stationary. The impact process was recorded using pulsed radiography. The shape of the shock and the shape of the detonation (in the case of detonation initiation) waves were fixed on the X-ray pattern. According to the X-ray patterns of the passive charge loading process, the shock adiabats of the investigated EmEx were constructed and the detonation wave velocities were calculated in the case of their initiation.

On the obtained X-ray patterns, one can directly measure the depth of initiation H (in the case of detonation excitation). It is also possible to estimate the energy of shock-wave initiation of the investigated explosive, if we assume that the kinetic energy of the movement of the thrown plate in the direction of the passive charge is completely absorbed by the investigated explosive and goes to excite the detonation process. For an EEM with an initial density of 1.0 g/cm^3 at a speed of a thrown plate of $0.88 \text{ mm}/\mu\text{s}$, the initiation depth was approximately 5 mm; this initiation energy, per unit surface, was 1.57 J/mm^2 .

References

1. J. Lee, F. W. Sandstrom, B. G. Craig, and P. -A. Fersson DETONATION AND SHOCK INITIATION PROPERTIES OF EMULSION EXPLOSIVES// in: Proc. of the 9th Int. Symp. on Detonation (1989), pp. 573–584.
2. Сильвестров В.В., Караханов С.М., Дерибас А.А., Пластинин А.В. Ударно-волновая чувствительность эмульсионного ВВ // Труды межд. конференции «IX Харитоновские тематические чтения», 12–16 марта 2007 г., Саров., С.133-138.
3. K.L.C. Nielsen, C. Craciun, T.R. Craig, R. Turcotte High-velocity projectile initiation of emulsion explosives // https://www.researchgate.net/publication/257432578_High-velocity_Projectile_Initiation_of_Emulsion_Explosives

ТОНКАЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И МИКРОМОРФОЛОГИЯ ПЛЁНОК ЭНЕРГОЁМКИХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ

А.В. Станкевич, А.В. Соболевская, А.Н. Грецова, М.С. Стрельцова, О.А. Фролова

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

В данной работе проведены исследования структуры тонких плёнок различной толщины из бензотрифуроксана, циклотриметиленатринитрамина, циклотетраметиленатетранитрамина, триаминотринитробензола, динитроанизола,

пентаэритриттетранитрата, диаминодинитроэтилена, полученных методом кристаллизации из газовой фазы на различных подложках: полиэтилентерефталата, подпергамента, алюминия, кварцевого стекла, полимерной смолы, кремния и сапфира. Проведена предварительная подготовка газообразных продуктов, которые были получены методом термовакuumной сублимации. Установлено, что получаемые тонкие плёнки имеют молекулярное строение соответствующее исследуемым веществам. Определена текстура полученных плёнок. В основной массе микроморфология плёнок определяется частицами, имеющими столбчатую форму, неравновесную огранку и развитую поверхность. Измерения проводились методами рентгеновской дифрактометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, ИК-спектроскопии, УФ-вид- спектрофотометрии, оптической и электронной микроскопии.

Кроме того, проведены исследования топологии поверхности и электронные свойства полученных текстурированных плёнок.

FINE CRYSTAL STRUCTURE, SPECTRAL PROPERTIES AND MICROMORPHOLOGY OF FILMS OF ENERGY- INTENSIVE COMPOUNDS OBTAINED BY CRYSTALLIZATION FROM THE GAS PHASE ON VARIOUS SUBSTRATES

A.V. Stankevich, A.V. Sobolevskaya, A.N. Gretsova, M.S. Streltsova, O.A. Frolova

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

In this work, we studied the structure of thin films of various thicknesses from benzotrifuroxan, cyclotrimethylenetrinitramine, cyclotetramethylenetetranitramine, triaminotrinitrobenzene, dinitroanisole, pentaerythritol tetranitrate, diaminodinitroethylene, obtained by crystallization from the gas phase on various substrates: polyethylene terephthalate, parchment, aluminum, quartz glass, polymer resin, silicon and sapphire. Preliminary preparation of gaseous products, which were obtained by the method of thermal vacuum sublimation, was carried out. It has been established that the obtained thin films have a molecular structure corresponding to the studied substances. The texture of the obtained films was determined. In the bulk, the micromorphology of films are determined by particles having a columnar shape, nonequilibrium faceting, and a developed surface. The measurements were carried out by x-ray polycrystalline diffraction, Raman spectroscopy, IR spectroscopy, UV-Vis spectrophotometry, optical and electron microscopy.

In addition, studies of the surface topology and electronic properties of the obtained textured films were carried out.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ УГЛЕРОДА РАЗЛИЧНОЙ АЛЛОТРОПИИ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

*С.Ю. Нарыжный, В.Ю. Долматов, А.С. Козлов, В.В. Фоменко,
Г.В. Семашкин, В.А. Марчуков, С.В. Десятов, А.С. Кузakov*

ФГУП «Специальное конструкторско-техническое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

В данной работе проведено исследование влияния углерода различной аллотропии на характеристики горения смесевых ракетных топлив (СРТ). В качестве модельных составов использовалось пастообразное ракетное топливо (ПРТ) [1], которое является неотверждённым СРТ. В рецептурах модельных составов использовались активное горючее связующее на хлорно-кислой основе с добавлением углерода и перхлорат аммония в качестве окислителя. Подобные составы исследовались в работе [2].

В данном исследовании более глубоко было изучено сравнительное влияние разных видов углерода на скорость горения СРТ. За основы использовался модельный состав без добавок. Предварительно были проведены термодинамические оценки данных модельных составов.

По результатам исследований выявлены закономерности влияния добавления углерода разной аллотропии на СРТ, в работе приведены сравнительные таблицы. Наибольшая прибавка в скорости горения модельного состава была получена с использованием углерода в виде детонационных наноалмазов (ДНА) и составила 23% от скорости горения исходного модельного состава при давлении в камере сгорания 10 МПа.

Литература

1. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Животов Н.П. и др. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. М: Физматлит. 2010. 320с.
2. С.Ю. Нарыжный, А.С. Козлов, В.Ю. Долматов, В.В. Фоменко и др. Влияние модификации тетриловых детонационных наноалмазов на горение модельных пастообразных ракетных топлив. Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. №6. С. 48-55.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ В ОСКОЛОЧНО-ФУГАСНЫХ БОЕПРИПАСАХ СРЕДНЕГО КАЛИБРА

К.С. Колобов, И.А. Кузнецов, А.С. Смирнов

АО «ГосНИИмаш им. В.В. Бахирева», г. Дзержинск, Россия

Проведен анализ широкой номенклатуры испытаний боеприпасов на устойчивость к штатным и несанкционированным воздействиям вероятным на стадиях жизненного цикла, в том числе рассмотрены отечественные и зарубежные методики испытаний. Предложен подход, позволяющий совместно рассматривать результаты экспериментальных исследований по разным методикам в сравнении с реальными уровнями воздействий на стадиях жизненного цикла.

Проведен комплекс испытаний устойчивости боеприпасов, снаряженных взрывчатыми составами на основе штатных, а также малочувствительных ВВ. Для интерпретирования полученных результатов выполнены оценочные расчёты количества тепла заносимого в боеприпас при проникании внутрь корпуса пуль и осколков. Предложены сценарии реакций взрывчатых составов на локальный разогрев в зоне осколка. Разработанный в ходе работы формализованный энергетический подход позволяет объяснить полученные экспериментальные результаты.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ДОБАВКИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*И.А. Рубцов^{1,2}, К.А. Тен², А.О. Кашкаров², А.С. Юношев², А.В. Пластинин²,
С.М. Караханов², А.А. Студенников^{1,2}, В.П. Халемчук¹,
А.Е. Курепин³, Л.В. Маланчева³, И.А. Кузнецов³*

¹ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, р. п. Кольцово,, Новосибирская область, Россия

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³АО «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева», г. Дзержинск, Нижегородская обл., Россия

Среди применяемых импульсных рентгеновских методов изучения детонационных и ударно-волновых явлений активно развиваются методы, основанные на использовании синхротронного излучения ускорителей высоких энергий. Их преимущество заключается в малом времени экспозиции (менее 1 нс), хорошей повторяемости импульсов излучения и отсутствием возмущающих воздействий на исследуемый объект.

Работа посвящена исследованию детонационных характеристик алюминизированных взрывчатых составов с использованием синхротронного излучения. Исследовались изготовленные методом литья цилиндрические заряды (Ø20x30 мм) из взрывчатых составов ОЛА-30Т и С25А, имеющие практически одинаковое по массе количество октогена и алюминиевого наполнителя, но отличающиеся энергосодержанием связующего вещества (в ОЛА-30Т ~ 17 % активного связующего, а в С25А ~ 19 % инертного связующего).

Экспериментально получены данные о времени реакции алюминия в волне разгрузки продуктов детонации, а также уравнение состояния продуктов взрыва исследуемых ВВ, определены их детонационные характеристики. Для определения степени реагирования горючего наполнителя непосредственно в условиях взрыва была использована методика малоуголового рентгеновского рассеяния.

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН.

INVESTIGATION OF THE OXIDATION PROCESS OF AN ALUMINUM ADDITIVE DURING DETONATION OF HIGH EXPLOSIVE USING SYNCHROTRON RADIATION

*I.A. Rubtsov^{1,2}, K.A. Ten², A.O. Kashkarov², A.S. Yunoshev², A.V. Plastinin²,
S.M. Karakhanov², A.A. Studennikov^{1,2}, V.P. Khalemenchuk¹,
A.E. Kurepin³, L.V. Malancheva³, I.A. Kuznetsov³*

¹SRF «SKIF» Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Kol'tsovo, Novosibirsk region, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³JSC "State Scientific Research Institute of Mechanical Engineering after V.V. Bakhirev", Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, Russia

Among the applied pulsed X-ray methods for studying detonation and shock wave phenomena, methods based on the use of synchrotron radiation from high-energy accelerators are actively developing. Their advantage lies in the short exposure time (less than 1 ns), good repeatability of radiation pulses and the absence of disturbing effects on the object under study.

The work is devoted to the study of detonation characteristics of aluminized explosive compositions using synchrotron radiation. Cylindrical charges (Ø20x30 mm) made by casting from the explosive compositions OLA-30T and C25A, having almost the same amount of octogen and aluminum filler by weight, but differing in the energy content of the binder (in OLA-30T ~ 17% of the active binder, and in C25A ~ 19% of the inert binder).

Experimentally obtained data on the reaction time of aluminum in the wave of discharge of detonation products, as well as the equation of state of the explosion products of the studied explosives and were determined their detonation characteristics. The technique of small-angle X-ray scattering was used to determine the degree of reaction of the fuel filler directly in the explosion conditions.

The work was done at the shared research center SSTRC on the basis of the VEPP-4 - VEPP-2000 complex at BINP SB RAS.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ С АМПЛИТУДОЙ ДАВЛЕНИЯ ДО 5 ГПа

*Е.Н. Богданов, Е.В. Рычагов, И.А. Спиринов, В.Н. Князев, Р.А. Воронков,
Г.А. Козлов, В.В. Барабин, Д.В. Крючков, Д.Н. Замотаев, А.М. Ивин*

РФЯЦ-ВНИЭФ, г. Саров, Россия

Для верификации моделей кинетики детонации, применяемых при математическом моделировании работы изделий, содержащих ВВ, используются данные по ударно-волновому инициированию детонации, получаемые в модельных экспериментах. Основными при этом являются эксперименты по инициированию стационарной детонации ударными волнами прямоугольного (столбчатого) профиля в диапазоне амплитуд от 2 до 20 ГПа. В них регистрируются такие характеристики, как профили давления за фронтом ударной волны, глубина

возбуждения детонации, профили волновой скорости, которые позволяют наблюдать за эволюцией инициирующей ударной волны при переходе ее к детонации.

Успешными являются те модели кинетики детонации, которые при одинаковом наборе параметров способны с приемлемой точностью описать весь набор экспериментальных данных по ударно-волновому инициированию.

Наиболее ценными для тестирования моделей кинетики детонации являются экспериментальные результаты, полученные при относительно низкоинтенсивных ударно-волновых воздействиях. Эти результаты позволяют наблюдать эволюцию инициирующей ударной волны в детонационную в достаточно протяженном временном интервале, а их корректное математическое описание является серьезным тестом, свидетельствующим о правильности заложенных в моделях физических принципов.

В данной работе проведено исследование процесса инициирования детонации во взрывчатом веществе на основе октогена ударными волнами прямоугольного профиля с давлением во фронте 2 и 5 ГПа. Нагружение ВВ осуществлялось ударником с применением ствольных нагружающих установок. Регистрация проведена с использованием метода манганинового датчика давления, PDV и радиоинтерферометра. Получены профили давления за фронтом инициирующей ударной волны в различных сечениях нагружаемого образца ВВ, зарегистрированы непрерывные $x-t$ и $D-t$ диаграммы перехода инициирующей ударной волны в детонационную. Экспериментальные данные сравнены с расчетными, полученными с помощью модели кинетики детонации «ОЧАГ»: наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Результаты экспериментов также могут быть полезны для тестирования других моделей кинетики детонации.

INITIATION OF DETONATION IN EXPLOSIVES BASED ON HMX BY RECTANGULAR SHOCK WAVES WITH A PRESSURE AMPLITUDE OF UP TO 5 GPa

*E.N. Bogdanov, E.V. Rychagov, I.A. Spirin, V.N. Knyazev, R.A. Voronkov,
G.A. Kozlov, V.V. Barabin, D.V. Kryuchkov, D.N. Zamotaev, A.M. Ivín*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

To verify the models of detonation kinetics used in mathematical modeling of the operation of products containing explosives data on shock-wave initiation of detonation obtained in model experiments are used. The main ones are experiments on the initiation of stationary detonation by shock waves of a rectangular (table-shaped) profile in the amplitude range from 2 to 20 GPa. They record such characteristics as pressure profiles behind the shock wave front, the depth of detonation excitation, and wave velocity profiles, which make it possible to observe the evolution of the initiating shock wave during its transition to detonation.

Successful models of detonation kinetics are those that, with the same set of parameters, are able to describe with acceptable accuracy the entire set of experimental data on shock wave initiation.

The most valuable for testing models of detonation kinetics are the experimental results obtained under relatively low-intensity shock-wave impacts. These results make it possible to observe the evolution of an initiating shock wave into a detonation wave over a

sufficiently long time interval, and their correct mathematical description is a serious test of the correctness of the physical principles embedded in the models.

In this work, we studied the process of detonation initiation in an HMX-based explosive by rectangular shock waves with front pressures of 2 and 5 GPa. The loading of explosives was carried out by an impactor using barrel loading installations. The registration of process was carried out using the method of manganin pressure sensor, PDV and radio interferometer. The pressure profiles behind the front of the initiating shock wave in various sections of the loaded explosive sample were obtained, x-t and D-t diagrams of the transition of the initiating shock wave to the detonation wave were recorded. The experimental data are compared with the calculated ones obtained using the "ОСНАГ" detonation kinetics model: a good agreement between the calculated and experimental data is observed. The experimental results can also be useful for testing other models of detonation kinetics.

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ПОР И ДРУГИХ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ОКТОГЕНА

*А.М. Злобин, П.С. Белухина, С.В. Бондарева, С.А. Вахмистров, С.Э. Гребенникова,
Т.Е. Кирсанова, Н.А. Мирошниченко, А.В. Сквирская, А.А. Старостина, Ю.В. Шейков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Получен большой объем экспериментального материала в процессе исследования устойчивости стабильной при комнатной температуре β - фазы октогена, мощного термостойкого взрывчатого вещества, нашедшего широкое применение в различных взрывных устройствах. Изучалось влияние ряда физических факторов на температуру полиморфного превращения октогена $\beta \rightarrow \delta$, таких как внешнее давление, гранулометрический состав, дефектность кристаллов, предварительное термическое старение, вакуумирование.

В работе представлен анализ результатов экспериментальных исследований превращения октогена $\beta \rightarrow \delta$ в зависимости от размера кристаллов, проведенных методами дифференциально-термического анализа, дифференциально-сканирующей калориметрии, а также пикнометрическим методом измерения плотности кристаллов.

На основании термодинамического подхода и обобщенного уравнения Клапейрона - Клаузиуса рассмотрен размерный эффект – зависимость температуры начала полиморфного превращения $\beta \rightarrow \delta$ октогена от размеров кристаллов. Проведены оценки влияния на этот эффект различных физических факторов: внешнего давления, изменения плотности материала из-за структурных дефектов (дислокаций, микропор, микротрещин и др.), вклада поверхностной энергии в свободную энергию Гиббса, зависимости влияния структурных дефектов на энтальпию фазового перехода.

Показано, что в условиях проведенных экспериментов действие ряда факторов (давление, изменение плотности материала, обусловленное присутствием дефектов, поверхностная энергия) не может объяснить наблюдаемый размерный эффект.

Сделан вывод о том, что снижение температуры начала полиморфного превращения $\beta \rightarrow \delta$ октогена на 5-7 градусов при увеличении размеров кристаллов в интервале от 100 мкм до 500 мкм может быть связано с зависимостью скачка энтальпии на фазовом переходе от структурных дефектов.

**ON POSSIBLE INFLUENCE OF PORES AND OTHER STRUCTURAL DEFECTS
UPON TEMPERATURE OF POLYMORPHIC TRANSFORMATION OF HMX**

*A.M. Zlobin, P.S. Belukhina, S.V. Bondareva, S.A. Vakhmistrov, S.E. Grebennikova,
T.E. Kirsanova, N.A. Miroshnichenko, A.V. Skvirskaya, A.A. Starostina, Yu.V. Sheikov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

By now, a lot of experimental studies were implemented with regard to the β -phase of HMX being stable at a room temperature, which is a strong heat-resistant explosive having wide application in various explosive devices. The effect of some physical factors was studied on a temperature of the polymorphic transformation $\beta \rightarrow \delta$, such as ambient pressure, granulometric composition, imperfection of crystals, prior thermal ageing, vacuumization etc.

The work presents analyzed results of experimental studies of the polymorphic transformation $\beta \rightarrow \delta$ of HMX depending on a crystal size, which were performed via a differential-thermal method, differential-scanning calorimetry as well as a pycnometric measuring method of crystalline density.

From a thermodynamic approach and the Clapeyron-Clausius generalized equation a size effect was considered – dependence between a temperature of onset of HMX polymorphic transformation $\beta \rightarrow \delta$ and crystal sizes. It was assessed how different physical factors influenced on this effect. The physical factors are as follows: ambient pressure, a density change of a material owing to structural defects (dislocations, micropores, microcracks etc.), the contribution of surface energy to Gibbs free energy, dependencies of the effect of structural defects on enthalpy of a phase transition.

It was showed that under the conditions of the implemented experiments the action of the following factors (a pressure, a material density change owing to defects, surface energy) cannot explain an observed size effect.

The authors concluded that a temperature drop of the beginning of HMX polymorphic transformation $\beta \rightarrow \delta$ by 5-7 degrees with increasing crystal sizes from 100 μm to 500 μm may be connected with dependence between enthalpy jump in a phase transition and structural defects.

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР
ДЕТОНАЦИИ ПЛАСТИЧНЫХ И ЭЛАСТИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ**

Л.Г. Сухова, Г.П. Куценко, А.С. Гладков, В.Я. Базотов

АО «ГосНИИ «Кристалл», г. Дзержинск, Нижегородская обл., Россия

Изучено влияние высоких температур на критический диаметр детонации ($d_{\text{кр}}$) пластичных и эластичных взрывчатых составов (ПВВ и ЭВВ) на основе октогена и бициклооктана (БЦО), содержащих различные каучуки. Термирование шнуров из составов проводилось при температурах 130 °С, 170 °С и 190 °С в течение 30 минут.

Результаты испытаний показывают, что у всех составов, независимо от используемого каучука, после выдержки при высоких температурах снижается $d_{\text{кр}}$. Причем чем выше температура, при которой происходило термирование, тем больше наблюдается снижение $d_{\text{кр}}$.

Предполагается, что на снижение $d_{кр}$ составов при высоких температурах влияет как рост дефектности кристаллов, образующейся в процессе изменения их объема при нагревании и охлаждении, так и изменение условий контакта сорбционного слоя с поверхностью частиц ВВ и состояния самого сорбционного слоя.

Проведенные исследования показывают, что воздействие высоких температур на изделия (шнуры) из составов на основе октогена и БЦО не оказывает отрицательного влияния на величину $d_{кр}$, который только уменьшается, обеспечивая тем самым надежность функционирования детонационной цепи.

Однако высокие температуры отрицательно сказываются на физическом состоянии изделий. Длительное воздействие высоких температур приводит к полной физической и химической структуризации каучука в составе, в результате теряется пластичность и эластичность шнуров и они становятся хрупкими.

Следовательно, при эксплуатации при высоких температурах изделия необходимо заключать в корпус с целью предотвращения разрушения изделий и исключения нарушения целостности взрывной цепи.

THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON THE CRITICAL DETONATION DIAMETER OF PLASTIC AND ELASTIC EXPLOSIVE COMPOUNDS

L.G. Sukhova, G.P. Kutsenko, A.S. Gladkov, V.Ya. Bazotov

JSC "GosNII "Kristall", Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, Russia

The effect of high temperatures on the critical detonation diameter of plastic and elastic explosive compounds based on HMX and bicyclooctan containing various rubbers was studied. The heating of the cords from these compounds was performed at temperatures of 130°C, 170°C and 190°C during 30 minutes.

The test results show that for all compounds regardless of the used rubber, the critical detonation diameter decreases after exposure at high temperatures. Moreover, the higher the temperature of thermalization, the smaller the critical detonation diameter.

It is assumed that the decrease of the critical detonation diameter of compounds at high temperatures is affected by the increase of the defectiveness of crystals formed in the process of changing in their volume during heating and cooling, the changes of the contact conditions of the sorption layer with the surface of the explosives particles and the state of the sorption layer itself.

The performed studies show that the effect of high temperatures on products (cords) from compounds based on HMX and bicyclooctane does not adversely affect the value of critical detonation diameter, which only decreases, thereby ensuring the reliability of the detonation circuit.

However, high temperatures negatively affect the physical condition of the products. Prolonged exposure to high temperatures leads to complete physical and chemical structuring of the rubber in the composition, as a result, the plasticity and elasticity of the cords are lost and they become brittle.

Therefore, during operating at high temperatures, the products should be enclosed in a housing to prevent their destruction and to exclude the violation of the integrity of an explosive circuit.

**ПАРАМЕТРЫ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ КРИТИЧЕСКИМ ДИАМЕТРОМ
ДЕТОНАЦИИ И КРИТИЧЕСКИМ СЕЧЕНИЕМ ДЕТОНАЦИИ,
ОПРЕДЕЛЕННЫМ МЕТОДОМ КЛИНА И МЕТОДОМ ПИРАМИДЫ
ДЛЯ ПЛАСТИЧНЫХ ВВ**

А.В. Бессонова, Д.А. Пронин, Ю.В. Шейков, О.В. Шевлягин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Для оценки детонационной способности пластичных взрывчатых веществ, а именно для исследования пределов распространения детонации в ВВ, в зависимости от поставленных задач и требуемой точности получения результатов используются различные методы. В классическом варианте для такой оценки используют критический диаметр детонации, определяемый на цилиндрических зарядах ВВ. Кроме того, в практике исследований используется метод клина и метод пирамиды, при использовании которых фактически получают такие значения сечения заряда, при которых произошло затухание детонации. По аналогии, в этом случае используют термин «критическое сечение детонации». В силу особенностей каждого метода достоверное сравнение по детонационной способности различных ВВ, для которых отсутствуют данные по характеристикам, полученным одним и тем же методом, проблематично, даже с учетом использования известных соотношений [1, 2].

Экспериментально-расчетным путем для пластичных ВВ получены зависимости между характеристиками детонационной способности, полученными различными методами. Предложенные зависимости позволяют использовать данные, полученные одним из методов для оценки результатов, характерных для других методов с учётом методических особенностей. Таким образом, появляется возможность достоверно сопоставлять результаты оценки детонационной способности пластичных ВВ, полученной только одним из известных экспериментальных методов, с результатами оценки детонационной способности, полученными другими методами. Например, данные, полученные на клине любой ширины, могут быть использованы для определения диапазона, в котором будут лежать значения критического диаметра детонации данного ВВ или критического сечения детонации, полученного для него методом пирамиды. В результате становится возможным достоверное сравнение по детонационной способности пластичных ВВ, для одного из которых было определено значение критического диаметра, для другого – критического сечения на клине, для третьего – критическое сечение на пирамиде.

Литература

1. Расчет геометрических пределов распространения стационарной детонации конденсированных взрывчатых веществ, А.И. Фадеев и др. Труды ЛТИ, т. XXXIX, вып. 3, Л. Инв. №14886, с. 35-40, 1988.
2. High Detonation Capability of High Explosives. G.T. Afanas'ev, A.A. Sovko, Y.V. Sheikov, 16Int. Colloquium of Explosions and Reactive Systems, Cracow, Poland, 1997.

PARAMETERS OF DEPENDENCE BETWEEN CRITICAL DIAMETER OF DETONATION AND CRITICAL CROSS-SECTION OF DETONATION DETERMINED WEDGE METHOD AND PYRAMID METHOD FOR PLASTIC HE

A.V. Bessonova, D.A. Pronin, Yu.V. Sheikov, O.V. Shevlyagin

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

Various methods are used for evaluation of detonation capability of plastic explosives, namely for investigation of limits of detonation propagation in HE, depending on the intention and required accuracy of result obtainment. For this evaluation in the classic variant, critical diameter of detonation is used. It is determined using cylindrical HE charges. Besides, the wedge method and the pyramid method are employed for investigations. These methods allow to obtain actually values of charge cross-section when detonation deceleration occurred. In similar, the term “critical cross-section of detonation” is used in this case. Due to peculiarities of each method, reliable comparison on detonation capability of various HE, which have no data on characteristics obtained by similar method, is not certain even when using the known ratio [1, 2].

For plastic HE, the experimental-calculated method is employed for getting dependences between characteristics of detonation capability obtained by various methods. The suggested dependences allow using data obtained by one of the methods for evaluating results typical for the other methods with account for methodical capabilities. Therefore, the opportunity appears for reliable comparing results of evaluation of detonation capability of plastic HE obtained by only one of the known experimental methods and results of evaluation of detonation capability obtained by other methods. For example, data, which are obtained by wedge of any width, can be used to determine the range, where values of critical diameter would be located for detonation of this HE or critical cross-section of detonation obtained by the pyramid method. In result, it becomes possible to perform reliable comparison of detonation capability of plastic HE. Value of critical diameter was determined for one HE, value of critical cross-section on wedge was determined for the second HE, and value of critical cross-section on pyramid was determined for the third HE.

References

1. Calculation of geometric limits for propagation of stationary detonation of condensed explosives, A.I. Fadeev et al. Proceedings of LTI, v. XXXIX, is. 3, L. Inv.N14886, p. 35-40, 1988.
2. Higt Detonation Capability of High Explosives. G.T. Afanas'ev, A.A. Sovko, Y.V. Sheikov, 16Int. Colloquium of Explosions and Reactive Systems, Cracow, Poland, 1997.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ВВ И АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

*Н.С. Толоконникова, С.М. Батьянов, В.А. Бурнашов, Е.В. Карлина,
О.М. Луковкин, Д.В. Мильченко, Н.А. Понькин, А.В. Руднев, Ю.В. Шейков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В работе предложен новый способ приготовления композитов высокодисперсных ВВ с порошками наноалюминия. Подобные композиты имеют

достаточно высокую чувствительность к лазерному излучению и в основном используются для разработки безопасных средств инициирования.

Для повышения эффекта чувствительности к лазерному излучению является важным достичь как можно более равномерного распределения наночастиц алюминия между кристаллами ВВ. Известно, что ультразвуковая обработка суспензий наноалюминия значительно улучшает его диспергирование и приводит к получению композитов с более равномерной структурой. Это, в свою очередь, приводит к заметному повышению чувствительности ВВ к лазерному излучению [1].

Авторами решалась задача дальнейшего улучшения равномерности распределения частиц Al в композите, за счет их включения непосредственно в структуру частиц взрывчатого материала. Для этого использовали метод высадки высокодисперсного ВВ (в данном случае, гексогена) из раствора в ацетоне в суспензию наноалюминия в воде или гексане. Процесс осуществляли при непрерывном воздействии ультразвука. Предполагалось, что частицы наноалюминия могут в этих условиях играть роль центров кристаллизации, вокруг которых будут формироваться кристаллы ВВ.

По данным химического анализа, высказанное предположение оправдывается, и значительная часть наноалюминия включена в структуру кристаллов гексогена. Это создает предпосылки для повышения чувствительности к лазерному излучению, так как повышается площадь контакта между компонентами на межфазной границе.

Кроме того, показано, что при высадке высокодисперсного гексогена при УЗ-воздействии возможно, в зависимости от условий:

- повышение удельной поверхности осаждаемого ВВ на 2000-3000 см²/г против достигаемой при высадке без ультразвука;
- получение более крупных, но малодефектных кристаллов, практически не содержащих внутренних пор. Этот результат может быть интересен с точки зрения возможностей снижения чувствительности ВВ к механическим воздействиям.

Литература

1. Патент №2637016 «Способ изготовления термостойких светочувствительных взрывчатых составов и светодетонатор на их основе» / О.М. Луковкин, Ю.В. Шейков, С.М. Батьянов, С.А. Вахмистров, О.Н. Калашникова, Д.В. Мильченко. – ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. Заявлено 20.03.2017. Опубликовано 29.11.2017.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

А.С. Юношев, С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, А.В. Пластинин

Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) являются основными промышленными взрывчатыми веществами (ВВ) поскольку обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными ВВ, использовавшимися ранее. Алюминиевый порошок является одним из компонентов некоторых смесевых ВВ, в том числе и эмульсионных [1, 2], который добавляют в ВВ, чтобы увеличить их мощность и метательную способность. Влияние алюминия на детонационные

характеристики ВВ зачастую непредсказуемо [1, 3]. Оно определяется природой ВВ, морфологией и размером алюминиевых частиц, структурой заряда ВВ и т.д. Для большинства мощных ВВ добавление алюминия не приводит к увеличению скорости или давления детонации [2, 3]. Однако время действия высокого давления на окружающее заряд вещество может значительно возрастать, что актуально, например, при обработке материалов взрывом.

Несмотря на широкое использование алюминизированных ЭМВВ в промышленности, детально их детонационные характеристики малоизучены. Работы, в которых приводятся результаты исследования детонационных характеристик ЭМВВ с добавлением алюминия, немногочисленны [4-7]. Как правило, изучаются составы с плотностью более 1.0 г/см^3 , что актуально при ведении горных работ. Отмечается, что скорость детонации ЭМВВ с добавлением алюминия всегда меньше, чем у исходного ЭМВВ [4, 5, 7], а давление в окружающей среде при этом оказывается несколько больше.

Кроме измерения механических характеристик полезную информацию о поведении алюминия в детонационной волне можно получить, измерив температуру продуктов детонации (ПД). В данной работе изучалось влияние алюминиевого порошка на детонационные характеристики ЭМВВ с начальной плотностью 0.5 г/см^3 . Этот состав интересен тем, что обладает скоростью детонации около 3 км/с , что позволяет использовать его для сварки металлов взрывом. Одной из измеряемых характеристик являлась яркостная температура ПД. Основой ЭМВВ, исследуемого в данной работе, является эмульсионная матрица, содержащая: аммиачную селитру 68 %, натриевую селитру 11 %, воду 15 %, индустриальное масло И-20 4% и эмульгатор сорбитан моноолеат 2 %. В качестве сенсibilизатора использовались полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40. В качестве добавки использовался алюминиевый порошок ПАП-2 или, для более полного понимания влияния добавок, молотое стекло.

Скорость детонации исходного ЭМВВ с плотностью 0.507 г/см^3 равна $3.14 \pm 0.05 \text{ мм/мкс}$. Скорость детонации ЭМВВ с 20 % Al (с плотностью $\approx 0.60 \text{ г/см}^3$) составляет $3.38 \pm 0.05 \text{ мм/мкс}$. Добавление молотого стекла вместо алюминия в том же количестве понижает скорость детонации до $2.84 \pm 0.05 \text{ мм/мкс}$. Давление в детонационной волне для состава ЭМВВ+20% Al увеличивается по сравнению с давлением чистого ЭМВВ примерно на 50%. Полученные результаты можно объяснить дополнительным вкладом реакции алюминия с ПД сразу за фронтом УВ наряду с вкладом за счет увеличения плотности алюминизированного ЭМВВ.

Яркостная температура ПД уменьшается при добавлении алюминия в ЭМВВ. Этот результат может быть связан с неоднородностью распределения поля температур в веществе за фронтом детонационной волны. За фронтом УВ частицы алюминия прогреваются, отбирая тепло от ПД. На начальном этапе этого процесса температура частиц алюминия значительно ниже температуры ПД. Вследствие этого происходит экранировка излучения от высокотемпературных ПД частицами алюминия.

Результаты данной работы демонстрируют сложность интерпретации влияния добавки алюминия на детонационные характеристики ЭМВВ.

Литература

1. Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К. и др. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 98 – 115.

2. Махов М. Н., Гоголя М. Ф., Долгобородов А. Ю. и др. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 96 – 105.
3. Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю. и др. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 82 – 95.
4. Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., and Campos J. Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal practices // Shock Compression of Condensed Matter. – 2011. – P. 267-270.
5. Bednarczyk E., Maranda A., Paszula J., Papliński A. Studies of effect of aluminium powder on selected parameters of emulsion explosive sensitized with microballoons // Polish J. Chem. – 2016. – V. 70, N 1. – P. 41-50.
6. Lefrancois A., Grouffal J-Y, Bouinot P. Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion// Proc. Twelfth Int. Det. Symp. – 2002. – P. 432-439.
7. Arvind Kumar Mishra, Hemant Agrawal, Manamohan Raut Effect of aluminum content on detonation velocity and density of emulsion explosives // Journal of Molecular Modeling - 2019.

EFFECT OF THE ADDITIVE OF ALUMINUM POWDER ON DETONATING CHARACTERISTICS OF THE EMULSION EXPLOSIVE

A.S. Yunoshev, S.A. Bordzilovsky, S.M. Karakhanov, A.V. Plastinin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Emulsion explosives (EmEx) are the main industrial explosives (HE) because they have a number of advantages over traditional explosives used in the past. Aluminum powder is one of the components of some mixed explosives, including emulsion ones [1, 2], which is added to explosives to increase their power and propelling ability. The influence of aluminum on the detonation characteristics of explosives is often unpredictable [1, 3]. It is determined by the nature of the explosive, the morphology and size of aluminum particles, the structure of the explosive charge, etc. For most powerful explosives, the addition of aluminum does not lead to an increase in the detonation velocity or pressure [2, 3]. However, the time of action of high pressure on the substance surrounding the charge can significantly increase, which is important, for example, in the processing of materials by explosion.

Despite the wide use of aluminized EmEx in industry, their detonation characteristics have not been studied in detail. There are few works that present the results of studying the detonation characteristics of EmEx with the addition of aluminum [4–7]. As a rule, compositions with a density of more than 1.0 g/cm³ are studied, which is important in mining operations. It is noted that the detonation velocity of EmEx with the addition of aluminum is always lower than that of the original EmEx [4, 5, 7], while the pressure in the environment is somewhat higher.

In addition to measuring mechanical characteristics, useful information about the behavior of aluminum in a detonation wave can be obtained by measuring the temperature of detonation products (DP). In this work, we studied the effect of aluminum powder on the detonation characteristics of an EmEx with an initial density of 0.5 g/cm³. This composition is interesting in that it has a detonation velocity of about 3 km/s, which makes it possible to use it for explosive welding of metals. One of the measured characteristics was the DP

brightness temperature. The basis of the EmEx studied in this work is an emulsion matrix containing: ammonium nitrate 68%, sodium nitrate 11%, water 15%, industrial oil I-20 4% and emulsifier sorbitan monooleate 2%.

Expancel 461 DET 40 polymeric microballoons were used as a sensitizer. PAP-2 aluminum powder was used as an additive or, for a better understanding of the effect of additives, ground glass.

The detonation velocity of the original EmEx with a density of 0.507 g/cm^3 is $3.14 \pm 0.05 \text{ mm}/\mu\text{s}$. The detonation velocity of an EmEx with 20% Al (with a density of $\approx 0.60 \text{ g/cm}^3$) is $3.38 \pm 0.05 \text{ mm}/\mu\text{s}$. The addition of ground glass instead of aluminum in the same amount reduces the detonation velocity to $2.84 \pm 0.05 \text{ mm}/\mu\text{s}$. The pressure in the detonation wave for the EmEx + 20% Al composition increases by approximately 50% compared to the pressure of pure EmEx. The results obtained can be explained by an additional contribution from the reaction of aluminum with DP immediately behind the SW front, along with the contribution due to an increase in the density of aluminized EmEx.

The brightness temperature of the DP decreases when aluminum is added to the EmEx. This result can be related to the inhomogeneity of the distribution of the temperature field in the substance behind the front of the detonation wave. Behind the SW front, aluminum particles are heated, removing heat from the DP. At the initial stage of this process, the temperature of aluminum particles is much lower than the temperature of DP. As a result, radiation is screened from high-temperature DPs by aluminum particles.

The results of this work demonstrate the complexity of interpreting the effect of the aluminum addition on the detonation characteristics of the EmEx.

References

1. Vadhe, P.P., Pawar, R.B., Sinha, R.K. et al. Cast aluminized explosives (review). *Combust Explos Shock Waves* 44, 461–477 (2008).
2. Makhov, M.N., Gogulya, M.F., Dolgoborodov, A.Y. et al. Acceleration Ability and Heat of Explosive Decomposition of Aluminized Explosives. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 40, 458–466 (2004).
3. Gogulya, M.F., Makhov, M.N., Dolgoborodov, A.Y. et al. Mechanical Sensitivity and Detonation Parameters of Aluminized Explosives. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 40, 445–457 (2004).
4. Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., and Campos J. Non ideal detonation of emulsion explosives mixed with metal practices // *Shock Compression of Condensed Matter*. – 2011. – P. 267-270.
5. Bednarczyk E., Maranda A., Paszula J., Papiński A. Studies of effect of aluminium powder on selected parameters of emulsion explosive sensitized with microballoons // *Polish J. Chem.* – 2016. – V. 70, N 1. – P. 41-50.
6. Lefrancois A., Grouffal J-Y, Bouinot P. Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion// *Proc. Twelfth Int. Det. Symp.* – 2002. – P. 432-439.
7. Arvind Kumar Mishra, Hemant Agrawal, Manamohan Raut Effect of aluminum content on detonation velocity and density of emulsion explosives // *Journal of Molecular Modeling* - 2019.

РЕГИСТРАЦИЯ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ПЛАСТИФИЦИРОВАННОМ ТАТБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВМЕЩЁННЫХ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДИК

*В.И. Таржанов, Д.П. Кучко, А.В. Воробьёв, М.А. Ральников,
Д.С. Боярников, Ю.А. Аминов, Ю.Р. Никитенко*

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Представлены постановка и полученные результаты опыта по регистрации временного профиля сферически сходящейся детонации в пластифицированном триаминотринитробензоле (ПСТ) с одновременной диагностикой волновых процессов совмещёнными лазерно-интерферометрическими комплексами, построенными на различных оптических схемах, через окно из фтористого лития.

Исследовалось пересжатие детонации при ее схождении в полусферическом заряде ПСТ с наружным и внутренним радиусами 75 мм и 20 мм после задействия его по внешней поверхности системой инициирования. Достигнутое в рассматриваемом эксперименте пересжатие по давлению относительно точки Жуге – 2,3 (при нормальной детонации 30,6 ГПа по [1]).

По экспериментально полученному максимальному значению скорости $u(t)_{LiFmax}$ на контактной границе ВВ с индикаторным окном из LiF найдено состояние, совпадающее с пиковым состоянием расчётного профиля на радиусе 20 мм. Таким образом, экспериментально-расчётные параметры пересжатой детонации на радиусе 20 мм в максимуме профиля таковы: давление – 70 ГПа, скорость фронта 9,45 км/с, массовая скорость ПВ 3,88 км/с.

Литература

1. Аминов Ю.А., Горшков М.М., Заикин В.Т., Коваленко Г.В., Никитенко Ю.Р., Рыкованов Г.Н. Исследование торможения продуктов детонации взрывчатого вещества на основе ТАТБ // Физика горения и взрыва, 2002. Т.38. №2. С. 121-124.

REGISTRATION OF SPHERICALLY CONVERGING DETONATION WAVE IN PLASTICIZED TATB USING COMBINED LASER-INTERFEROMETRY PROCEDURES

*V.I. Tarzhanov, D.P. Kuchko, A.V. Vorobiev, M.A. Ralnikov,
D.S. Boyarnikov, Yu.A. Aminov, Yu.R. Nikitenko*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The paper presents the experimental procedures and results obtained during the experiment on registration of the time profile of spherically converging detonation wave in plasticized triaminotrinitrobenzene (TATB) with simultaneous diagnostics of wave processes using the combined laser-interferometry systems based on different optical circuits, through the lithium fluoride window.

Detonation supercompression was studied as it converged in the semispherical TATB charge having the outer and inner radiuses of 75 mm and 20 mm, correspondingly, after its initiation over the external surface by the firing system. The achieved experimental pressure

supercompression with respect to Jouguet point was equal to 2.3 (at normal detonation of 30.6 GPa, according to [1]).

The state coincided with the peak state of the design profile on 20 mm radius was found by experimental maximum velocity $u(t)_{\text{LiFmax}}$ at the HE – indicator LiF window interface. Then the computational and experimental parameters of supercompressed detonation on 20 mm radius at the profile maximum are the following: pressure – 70 GPa, front velocity – 9.45 km/s, mass velocity of explosion products (EP) – 3.88 km/s.

References

1. Aminov Yu.A., Gorshkov M.M., Zaykin V.T., Kovalenko G.V., Nikitenko Yu.R., Rykovanov G.N. Studies on Deceleration of TATB-based Explosive Detonation Products // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2002. Vol.38. No 2. P. 121-124.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ГОРЕНИЯ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ТАТБ, НА ИХ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

*Е.В. Халдеев, С.Н. Баранов, Е.Н. Борисков, С.Г. Игошина,
И.И. Никифоров, Д.А. Пронин, О.В. Шевлягин, А.В. Шкуряков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Целью настоящей работы является исследование влияния термомеханического воздействия, возникающего в процессе развития горения ВВ на основе октогена и ТАТБ, в герметичном объеме в условиях нарастания давления (метод возрастающего давления в манометрической бомбе) на их структурные изменения.

Определено влияние параметров термомеханического воздействия (амплитуда, скорость нарастания значения давления и температуры) на изменения в структуре деталей из ВВ на основе октогена и ТАТБ при их горении, находившихся в составе сплошных зарядов и зарядов со щелевым зазором 0,5 мм. Для оценки степени поврежденности деталей из ВВ после термомеханического воздействия использованы ультразвуковой метод и метод цветовой дефектоскопии. Определено изменение плотности деталей из ВВ в результате воздействия с использованием гидростатического и гаммаматрического методов.

Изучено влияние степени поврежденности деталей из ВВ на основе октогена и ТАТБ, предварительно подвергнутых термоудару с резким температурным перепадом до 105 °С, на процесс развития их горения.

Дана оценка возможного развития процесса горения зарядов из ВВ на основе октогена и ТАТБ как сплошных, так и зарядов со щелевым зазором 0,5 мм, сформированных из деталей подвергнутых термомеханическому воздействию.

Результаты настоящей работы представляют практический интерес при решении вопросов, связанных с оценкой безопасности изделий с ВВ, а также моделировании взрыва ВВ при аварийных тепловых воздействиях.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕРМОСТОЙКОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА – 2,6-БИС(ПИКРИЛАМИНО)-3,5-ДИНИТРОПИРИДИНА

*А.С. Козлов, С.М. Путис, А.Ю. Мершин, Д.В. Бармашова, П.Г. Буковский,
О.В. Базанов, Г.В. Семашкин, А.А. Котомин, С.А. Душенюк*

ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

В нефтегазодобывающей промышленности широко применяются прострелочно-взрывная аппаратура, содержащая различные взрывчатые вещества (ВВ) и средства инициирования [1,2]. В последнее время, в связи с истощением запасов «приповерхностной» нефти и нефтепродуктов (с глубины до 3 км), необходимо проводить работы по добыче этих полезных ископаемых с больших глубин (до 7 км), где температура может достигать до 250-280°C. Соответственно, аппаратура, используемая на данных глубинах, должна выдерживать не только повышенное давление, но и повышенные температуры. Если для давления проблема решается конструктивными методами при изготовлении аппаратуры, то в случае повышенных температур (280 °C и более) необходимо использовать ВВ, не разлагающиеся при указанных температурах [3].

Одним из перспективных термостойких ВВ, которое может использоваться в такой аппаратуре, является 2,6-бис(пикриламино)-3,5-динитропиридин (РУХ), способный сохранять свои взрывчатые свойства до температур 360 °C [3].

Нами был разработан простой и эффективный способ получения РУХ [4], а в настоящей работе изучены и определены его основные физико-химические и взрывчатые характеристики:

- чувствительность к удару, в соответствии с ГОСТ 4545-88, составляет 100 и 0 % при падении груза 10 и 2 кг соответственно;
- нижний предел (порог) чувствительности к трению при ударном сдвиге, в соответствии с ГОСТ Р 50835-95, составляет 2200 кг/см²;
- температура начала интенсивного разложения ($T_{\text{НИР}}$), определенная методом дериватографического анализа, составила 368 °C;
- химическая стойкость за 14 часов при температуре 110 °C, в соответствии с ОСТ В 84-744-73 (ИВК «Вулкан-2000»), составила 10 мм рт.ст. (без учета первого часа);
- различными методами оценен критический диаметр детонации ($d_{\text{кр}}$) РУХ, который составил от 3,9 (для $S_{\text{уд}} = 1650 \text{ см}^2/\text{г}$) до 1,8 мм (для $S_{\text{уд}} = 12500 \text{ см}^2/\text{г}$);
- предварительно оценены коэффициенты уравнения, отражающего зависимость $d_{\text{кр}}$ от удельной поверхности ВВ, для расчета критического диаметра детонации по методу [5, формула 2.76]: $a = 1,85$; $b = 0,37$;

На основе РУХ изготовлен состав, содержащий 95 % РУХ и 5 % инертного полимера и определена его скорость детонации (7,10 км/с при плотности 1,64 г/см³), которая соответствует расчету, выполненному в соответствии с [5].

Полученные данные позволяют рассматривать РУХ как перспективное термостойкое ВВ для использования в глубоких нефтяных и газовых скважинах.

Литература

1. Фридляндер Л. Я. Прострелочно-взрывная аппаратура и ее применение в скважинах. – М: Недра, 1985г – 199 с.

- Петрушин А. Г. Прострелочно-взрывные работы в скважинах: учеб. пособие / А. Г. Петрушин ; Урал. гос. горн. ун-т. – Екатеринбург: УГГУ, 2015. – 221 с.
- Agrawal J.P. Recent trends in high-energy materials. Prog. Energy Combust. Sci. 1998. 24. P. 1-30.
- Получение и кристаллизация термостойкого взрывчатого вещества РУХ / Путис С.М., Мершин А.Ю., Бармашова Д.В., Козлов А.С., Семашкин Г.В., Котомин А.А., Душенюк С.А. Настоящий сборник.
- Котомин А. А. Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций: монография / А. А. Котомин, С. А. Душенюк, А. С. Козлов. – Санкт-Петербург : Лань, 3е изд., 2022. — 384 с.

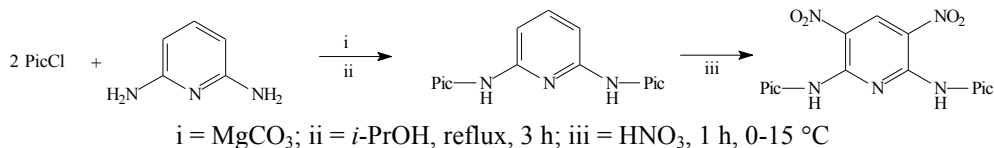
ПОЛУЧЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ТЕРМОСТОЙКОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА РУХ

*С.М. Путис, А.Ю. Мершин, Д.В. Бармашова, А.С. Козлов,
Г.В. Семашкин, А.А. Котомин, С.А. Душенюк*

ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

Высокоэнергетические термостойкие соединения, содержащие несколько 2,4,6-тринитрофенильных (пикрильных) фрагментов, наиболее перспективные соединения, которые нашли применение в космической, горнодобывающей и нефтяной областях [1,2]. Среди них особенно выделяются HNS (гексанитростильбен), РУХ (2,6-бис(2,4,6-тринитрофениламино)-3,5-динитропиридин) и т.д. [1]. РУХ является малоиспользуемым соединением, несмотря на то, что является более термостойким ВВ, чем HNS [1]. Ограниченное применение РУХ обусловлено тем, что метод его получения, описанный еще Coburn M.D. в 1972 году, не претерпел изменений, а суммарный выход конечного продукта не превышал 65 % [3]. Поэтому в настоящее время оптимизация метода получения РУХ является одной из перспективных задач.

Известный способ получения РУХ (или «Пиринна», как его называли Российские ученые [4]) процесс двухстадийный и заключается в акилировании пикрилхлоридом 2,6-диаминопиридина в среде апротонного растворителя (ДМФА) с последующим нитрованием продукта алкилирования [3]. Как было отмечено ранее, суммарный выход продукта составляет не более 60-65 %, что делает данный метод экономически нецелесообразным. В настоящей работе нами разработан метод получения РУХ с выходом до 85 %.



Разработанный синтез РУХ, также как и в случае [3], является двухстадийным, однако в качестве растворителя на первой стадии использовали пропанол-2, в котором исходные компоненты хорошо растворимы, а конечный (т.н. пре-РУХ) не растворим. Последующее нитрование пре-РУХа азотной кислотой, не содержащей окислы, при температуре 0-15 °С позволяет получить хроматографически чистый РУХ выходом 95 %. Полученный таким образом продукт является мелкодисперсным и не обладает постоянством удельной поверхности ($S_{уд}$ от 5000 до 10000 см²/г). Для обеспечения

постоянства $S_{уд}$ нами дополнительно разработан метод кристаллизации из системы различных растворителей, позволяющий получить продукт с заданной $S_{уд}$.

Строение, индивидуальность и состав полученного соединения подтверждены методами ЯМР (^1H , ^{13}C и COSY (^1H , ^{13}C)), ИК- и УФ-спектроскопии, тонкослойной хроматографией, а также элементным (C,H,N) анализом.

Литература

1. M. H. Keshavarz, T.M. Klapötke. Energetic Compounds: Methods for Prediction of their Performance. De Gruyter; 2nd edition, 2020, 280 p.
2. J. Sarlauskas, J. Vaitiekunas, J. Tamuliene, Proceedings of the 21st Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, 2018, p.1080-1094.
3. Coburn M.D., inventor; US Atomic Energy Com., assignee. 2,6-bis(picrylamino)-3,5-dinitropyridine and a method for its preparation. United States patent US 3,678,061. 1972 July 18.
4. Н.И. Торуткина, И.Ф. Фаляхов, Р.З. Гильманов, А.С. Сальников, В.Я. Базотов. Термостойкий энергонасыщенный состав на основе пирина. Вестник технологического университета. – 2016, – Т.19, № 19. –С.34-36.

ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СУСПЕНЗИЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В НИТРОМЕТАНЕ

А.А. Котомин, С.А. Душенок, А.С. Козлов

ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

Детонационная способность многих твердых индивидуальных ВВ с различными химическим строением и дисперсностью, ряда жидких ВВ и их растворов друг в друге и в инертных растворителях, а также смесей твердых ВВ разной дисперсности друг с другом и с различными органическими и неорганическими инертными веществами хорошо известна [1-4]. Однако, детонационная способность смесей твердых и жидких ВВ (суспензий ВВ) исследована мало, хотя они являются частью составов пластизольных и пастообразных взрывчатых композиций широко используемых на практике [5-8].

В данной работе, начатой в 2011 году [9-10], экспериментально исследованы критические диаметры детонации (d_k) суспензий кристаллических ВВ (ТЭНа, гексогена, октогена, Фох-7) различной дисперсности (удельная поверхность 350 - 7000 $\text{см}^2/\text{г}$) в нитрометане. Удельная поверхность ВВ определялась по их газопроницаемости на приборе ПСХ-12. Суспензии готовились вибро-вакуумным способом. Заряды суспензий изготавливались в тонкостенных лавсановых трубках различного диаметра. Седиментационная устойчивость и однородность суспензий обеспечивалась загущением их небольшой добавкой аэросила (2,5% мас.). Таким образом определялись критические диаметры детонации суспензий ВВ практически без оболочки. Точность определения составляла 0,5 мм. Для чистого нитрометана $d_k=18$ мм, загущенного $d_k=19,5$ мм. Объемная доля кристаллических ВВ в суспензиях составляла 0,02-0,49.

В результате исследований получен большой массив экспериментальных данных. Установлено, что зависимости критических диаметров детонации суспензий от объемной доли твердых ВВ имеют S – образный вид. Показано влияние удельной

поверхности ВВ на эти зависимости. Характер полученных зависимостей наглядно свидетельствует о влиянии вида и дисперсности твердого ВВ на детонационную способность суспензий и отражает изменение времени разложения компонентов в зоне химической реакции в детонационной волне.

Полученные зависимости для суспензий твердых ВВ в нитрометане сопоставлены с аналогичными экспериментальными зависимостями для других взрывчатых систем: растворов жидких ВВ в нитрометане; растворов твердого ВВ в нитрометане; бинарных смесей высокодисперсных твердых ВВ; бинарных смесей грубодисперсного и высокодисперсного ВВ; составов, содержащих смеси грубодисперсного и высокодисперсного ВВ и инертное связующее [1]. Показано, что такой же S – образный вид как для суспензий имеют зависимости для бинарных смесей твердых грубодисперсного и микронного ВВ (отчетливо выраженных гетерогенных систем).

Литература

1. Котомин А. А. Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций : монография / А. А. Котомин, С. А. Душенок, А. С. Козлов. – Санкт-Петербург : Лань, 3-е издание, 2022. — 384 с.
2. Котомин А.А., Душенок С.А., Козлов А.С. Критические диаметры детонации гетерогенных взрывчатых систем. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2013. № 21 (47). С. 43-51.
3. Воскобойникова Н.Ф. Критические диаметры детонации растворов жидких взрывчатых веществ. “Горение и взрыв” - Материалы 3-го Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. М.: Наука. 1972. С. 474-479.
4. Воскобойников И.М., Душенок С.А., Котомин А.А. Критические диаметры детонации растворов бис(фтординитроэтил)формала // Химическая физика. Т. 17. № 11. 1998. С. 130-139.
5. П. П. Вадхе, Р. Б. Павар, Р. К. Синха, С. Н. Астана, А. Субхананда Рао. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор). Физика горения и взрыва. 2008. № 4. С. 98-115.
6. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь // Под ред. Б.П. Жукова. Изд. Второе, М.: “Янус-К”. 2000. 595 с.
7. Е.И. Ермолович, Е.М. Евстифеев, А.Б. Севастьянов, В.П. Ильин, В.Г. Кожевников. Детонационные параметры и уравнение состояния пластизольного ВС ОЛД-20. Труды межд. конф. XIII Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 14-18 марта 2011г., С. 64-66.
8. Бармин А.В., Евстифеев М.Е., Имховик Н.А., Одинцов В.А. Испытание пластизольного состава в стандартном осколочном цилиндре № 12. Горение и взрыв. 2010. № 3. С. 273-278.
9. Жёлтиков Ф.А., Котомин А.А., Козлов А.С., Лысов А.Н., Душенок С.А. Исследование детонационной способности смесей твердых и жидких взрывчатых веществ. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции молодых ученых “Неделя науки - 2011” Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 30 марта- 1 апреля 2011 г, с. 75.
10. Гуреев М.А., Желтиков Ф.А., Котомин А.А. Исследование детонационной способности смесей твердых и жидких взрывчатых веществ. Тезисы докладов XXXVIII Самарской областной студенческой научной конференции, Самара, 10-20 апреля 2012г, с. 218-219.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИИ В БИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДОРОДОМ

А.В. Троцюк, П.А. Фомин, И.В. Тетервова

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Предложена обобщенная модель кинетики для описания детонационного горения двухтопливных газовых смесей метана, гексана и керосина с водородом и сделан численный расчет размера детонационной ячейки в стехиометрической смеси метана с водородом. Актуальность работы связана с (i) перспективой использования данных смесей в непрерывных детонационных двигателях, (ii) проблемой обеспечения безопасной транспортировки водорода на значительные расстояния в рамках существующей газотранспортной системы для природного газа и (iii) определяющим влиянием размера ячейки на детонационные характеристики газовой смеси.

Предлагаемая кинетическая модель позволяет рассчитывать тепловой эффект химической реакции, молярную массу и внутреннюю энергию смеси без расчета ее детального химического состава. В рамках модели предложен алгоритм расчета периода индукции. Химические превращения в индукционной зоне заменялись одной брутто-реакцией разложения метана, тепловой эффект которой много меньше соответствующего значения в плоскости Чепмена-Жуге. Молярная масса смеси в зоне основного тепловыделения рассчитывалась по обыкновенному дифференциальному кинетическому уравнению

Впервые сделан численный двумерный расчет многофронтной структуры детонационной волны в стехиометрической метано-водородной смеси с воздухом. Для расчета химической реакции использована предложенная кинетическая модель. Полученная в расчете качественная структура детонационной волны (в том числе динамика ее перестройки от регулярной к нерегулярной при уменьшении концентрации водорода) и размер детонационной ячейки хорошо соответствуют эксперименту.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-29-01307, <https://rscf.ru/project/22-29-01307/>.

MODELING OF DETONATION STRUCTURE IN BINARY GASEOUS MIXTURES OF HYDROCARBONS WITH HYDROGEN

A.V. Trotsyuk, P.A. Fomin, I.V. Tetervova

Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Generalized models of chemical kinetics of detonation combustion of two-fuel gaseous mixtures of methane, hexane and kerosene with hydrogen and 2-D numerical calculation of multifront detonation structure in stoichiometric mixture of methane with hydrogen are presented. The relevance of the work is associated with (i) the prospect of using these dual-fuel mixtures in continuous detonation engines, (ii) the problem of ensuring the safe transportation of hydrogen over long distances within the existing gas pipe-line system for natural gas, and (iii) the determining influence of the cell size on the detonation characteristics of the gas mixture.

The proposed kinetic model makes it possible to calculate the heat release of a chemical reaction, the molar mass and internal energy of a mixture without calculating its detailed chemical composition. Within the framework of the model, an algorithm for calculating the induction period is proposed. Chemical transformations in the induction zone were replaced by one gross reaction of methane decomposition, the thermal effect of which is much less than the corresponding value in the Chapman-Jouguet plane. The molar mass of the mixture in the main heat release zone was calculated using the one ordinary differential kinetic equation.

A two-dimensional numerical calculation of the multifront structure of a detonation wave in a stoichiometric methane-hydrogen mixture with air was made for the first time. The proposed kinetic model was used to calculate the chemical reaction. The qualitative structure of the detonation wave obtained in the calculation (including the dynamics of its transformation from regular to irregular with decreasing hydrogen concentration) and the size of the detonation cell are in good agreement with the experiment.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01307, <https://rscf.ru/project/22-29-01307/>.

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЫХОДА ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВВ

В.Ю. Долматов¹, А.Н. Озерин², Е.Д. Эйдельман³, А.О. Дорохов⁴

¹ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН,
г. Москва, Россия

³ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский химико-фармацевтический университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Завод «Пластмасс», г. Копейск, Челябинская область, Россия

Детонационное превращение взрывчатого вещества (ВВ) в настоящий момент, и в будущем тоже, невозможно описать простой и конкретной зависимостью, тем более и процесс получения ДНА – одномоментно и параллельно идут множество реакций в плазме зоны химических реакций, температура плазмы очень велика – 3500 – 4000 К, давление 25-30 ГПа, ширина зоны химических реакций ~ 0,6 мм, а время процесса составляет 0,1 – 0,3 мкс. Окислитель (кислород молекул ВВ) во фронте детонационной волны и до плоскости Чепмена-Жуге взаимодействует с горючим (углерод и водород в молекулах ВВ), создавая необходимые Р,Т- условия для коагуляции нанокпель «лишнего» углерода в зоне химических реакций. Выходя за пределы плоскости Чепмена-Жуге эти нанокпель сливаются в более крупные и при остывании, в зависимости от Р,Т-условий кристаллизуются в виде наноалмазов или аморфизуются.

В данной работе, для прогнозной оценки можно использовать только самые простые и очевидные данные – массовое содержание всех элементов – углерода, водорода, азота и кислорода в молекулах углеродосодержащих индивидуальных и смесевых ВВ общей формулы $C_aH_bN_cO_d$.

Куполообразная зависимость выхода ДНА от содержания углерода в ВВ определяет то количество углерода (23-34 % мас.) в комбинации с кислородом, которого необходимо и достаточно для получения приемлемого выхода наноалмаза

(более 5% мас. от массы ВВ). Водород (1,5 – 3,0 %), как и часть сгоревшего углерода, является горючим для кислорода ВВ для выделения дополнительного количества энергии, обеспечивающей необходимые Р, Т – условия в зоне химических реакций (ЗХР). Количество окислителя (кислорода) имеет свой оптимум (42-46 % мас.) для обеспечения нужного количества энергии в ЗХР, достаточной для обеспечения нужных Р, Т – условий для образования праструктуры ДНА в ЗХР.

Азот считается инертным элементом для взрывных процессов, однако, отчетливо выраженная куполообразная зависимость выхода ДНА от его содержания в ВВ (23 – 31 % мас.) показывает, что это – не так. Более того, аномально большое количество азота в кристаллитах ДНА (~ 2,5 % мас.) подтверждает это.

Для получения приемлемого выхода в промышленных условиях более 5 % мас. необходимо, чтобы одновременно были соблюдены следующие условия: содержание водорода в ВВ составляло ~ 1,5 – 3,0 % мас., углерода ~ 23 – 34 % мас., азота ~ 23 – 31 % мас. и кислорода ~ 42 – 46 % мас. Зависимость сугубо эмпирическая, однако очень простая и удобная в работе.

Оптимальное содержание ДНА в АШ – от 45 до 71 % мас. достигается при наличии в молекулах ВВ углерода от 26 до 31 % мас.

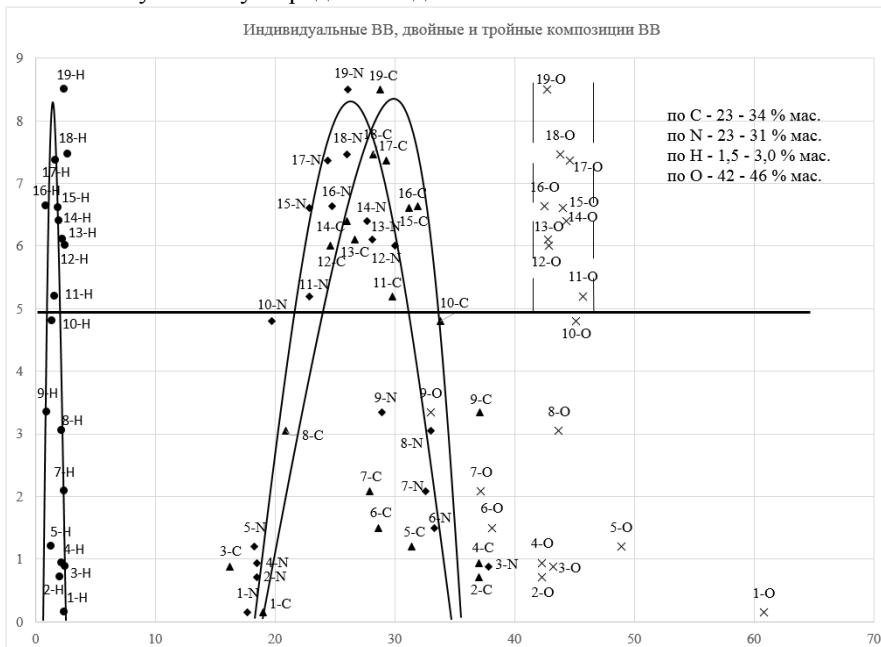


Рисунок 1. Зависимость выхода ДНА от содержания углерода, водорода, азота и кислорода в молекулах ВВ

Установлены оптимальные диапазоны содержания в молекулах ВВ углерода (23 – 34 % мас.), водорода (1,5 – 3,0 % мас.), азота (23 – 31 % мас.) и кислорода (42 – 46 % мас.), что в совокупности с высокой вероятностью могут обеспечить выход ДНА более 5 % мас.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-19112.

ДАННЫЕ ПО СКОРОСТЯМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В БАЗЕ ТЕФИС

А.А. Белов, О.И. Топор, Л.В. Бородачев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Скорости химических реакций. Для расчета задач экологии и оптимизации химических производств требуется знать зависимости скоростей химических реакций $K(T)$ от температуры. В химических экспериментах непосредственно измеряют концентрации реагирующих веществ в зависимости от времени, и по этим профилям определяют скорости реакций при фиксированной температуре T и давлении p . Затем экспериментальную зависимость $K(T)$ аппроксимируют обобщенной формулой Аррениуса

$$K(T) = AT^m \exp(-E/T). \quad (1)$$

Как правило, по каждой реакции опубликовано много экспериментальных работ, причем диапазон условий в них частично перекрывается, частично различается. Аппроксимации вида (1) собраны в компендиумы [1,2].

Базы данных. Из-за неизбежных погрешностей эксперимента результаты разных авторов отличаются, причем зачастую весьма существенно. Чтобы нивелировать индивидуальные отклонения отдельных экспериментов, проводят совместную обработку большого количества данных различных источников. Такие обработки публикуются в компендиумах [1,2] и в тематических сборниках (см., например, [3-5]).

Однако при этом остается неясным, с какой точностью получены коэффициенты формулы Аррениуса. Во многих случаях для аппроксимирующей кривой (1) приводят экспертную оценку доверительного коридора. Как правило, он составляет $\pm 0.3-0.5$ для $\lg K$, т.е. истинное значение K до 2-3 раз больше либо меньше приведенного в сборнике. Очевидно, такие оценки являются сильно перестраховочными.

С 1960-х годов в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН коллектив под руководством Калиткина создает базу данных ТЕФИС по теплофизическим свойствам веществ. В последние годы в эту базу включен раздел, посвященный скоростям химических реакций, описывающих ряд актуальных процессов. Для создания этого раздела были разработаны новые математические методы регрессии экспериментальных данных, измеренных со значительными погрешностями [6]. В данной работе представлено текущее состояние работ по этому направлению.

Метод обработки. Анализ экспериментальных данных показывает, что для газофазных реакций между малоатомными молекулами наличие множителя T^m в (1) является недостоверным. Поэтому будем исходить из классической формулы Аррениуса, в которой $m = 0$. Сделаем замену переменных $x = 1/T$, $y = \lg K$. Тогда закон Аррениуса превращается в прямую.

Для аппроксимации мы используем полиномы, ортогонализированные на множестве экспериментальных точек с весами, равными обратным квадратам погрешностей. Благодаря ортогональности базиса погрешности коэффициентов аппроксимации являются некоррелированными. Это позволяет построить статистически достоверные оценки погрешности коэффициентов и

аппроксимирующей кривой. Сами коэффициенты можно округлять независимо в пределах соответствующих погрешностей. Напомним, что при разложении по неортогональным полиномам коэффициенты разложения оказываются коррелированными, и их независимое округление может вносить заметную погрешность.

Системы реакций. Описанный метод был применен к следующим системам реакций: (1) 20 реакций водородо-воздушного горения, существенных для задач плазмохимии ($T < 1000$ К, $p \sim 1$ атм); (2) 15 реакций термического разложения этана [7], (3) 10 реакций водород-кислородного горения, существенных в условиях сопла реактивного двигателя ($T \sim 3000$ К, $p \sim 150$ атм); (4) 16 реакций с участием S, H, O, N, существенных в условиях нижних слоев атмосферы ($T \sim 300$ К, $p \sim 1$ атм). Полученная точность аппроксимации составляет 1-10% для хорошо изученных реакций и 20-30% для плохо изученных. Это в 3-5 раз точнее мирового уровня.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-3630.2021.1.1.

Литература

1. NIST Chemical kinetics database. Standard reference database 17-2Q98. <http://kinetics.nist.gov/kinetics/>
2. Berkeley University, Gas Research Institute, GRI-Mech 3.0. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
3. Burkholder J.B. et al. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies, Evaluation No. 18, JPL Publication 15-10. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA, 2015.
4. Baulch D.L. et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data, 34(3):757–1397, 2005.
5. Ибрагимова Л.Б., Смахов Г.Д., Шаталов О.П. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 8:1–25,
6. Белов А.А., Калиткин Н.Н. // ЖВМиМФ. 60:7 (2020), 105-113.
7. Nurislamova L.F et al. // Chem. Product Process Model. 2014. Vol. 9. No. 2. P. 143.

DATA ON CHEMICAL REACTION RATES IN THE TEFIS DATABASE

A.A. Belov, O.I. Topor, L.V. Borodachev

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Chemical reaction rates. The calculation of environmental and chemical production optimization problems requires knowledge of the temperature dependences of chemical reaction rates $K(T)$. In chemical experiments the concentrations of reacting substances are directly measured as a function of time, and from these profiles the reaction rates at a fixed temperature T and pressure p are determined. The experimental dependence of $K(T)$ is then approximated by the generalized Arrhenius formula

$$K(T) = AT^m \exp(-E/T). \quad (1)$$

As a rule, many experimental papers have been published for each reaction, and the range of conditions in them partly overlap and partly differ. Approximations of the form (1) are collected in compendiums [1,2].

Databases. Due to unavoidable errors of the experiment the results of different authors differ, and often considerably. In order to level out deviations of individual

experiments, joint processing of a large number of data from various sources is carried out. Such treatments are published in compendiums [1,2] and thematic collections (see, e.g., [3-5]).

However, the accuracy with which the coefficients of the Arrhenius formula are obtained remains unclear. In many cases an expert estimate of the confidence belt for the approximating curve (1) is given. As a rule, it is $\pm 0.3-0.5$ for $\lg K$, i.e. the true value of K is up to 2–3 times greater or less than that given in the collection. Obviously, such estimates are highly overestimated.

Since the 1960s at the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, a team led by Kalitkin creates a TEFIS database on the thermophysical properties of substances. In recent years, this database has included a section on the rates of chemical reactions that describe a number of relevant processes. To create this section, new mathematical methods for regression of experimental data measured with significant errors were developed [6]. This paper presents the current state of work in this area.

Processing method. Analysis of experimental data shows that for gas-phase reactions between small atomic molecules the multiplier T^m in (1) is unreliable. Therefore, we account for the classical Arrhenius formula in which $m=0$. Let us replace the variables $x=1/T$, $y=\lg K$. Then the Arrhenius law turns into a straight line.

For approximation we use polynomials orthogonalized on the set of experimental points with weights equal to the inverse squares of the errors. Due to the orthogonality of the basis, the errors of the approximation coefficients are uncorrelated. This provides statistically valid estimates of the error of the coefficients and the approximating curve. The coefficients themselves can be rounded independently within their respective uncertainties. Recall that when decomposed by nonorthogonal polynomials, the expansion coefficients appear correlated and their independent rounding can introduce a noticeable error.

Reaction systems. The method described has been applied to the following reaction systems: (1) 20 hydrogen-air combustion reactions significant for plasma chemistry problems ($T < 1000$ K, $p \sim 1$ atm); (2) 15 reactions of thermal decomposition of ethane [7], (3) 10 hydrogen-oxygen combustion reactions significant at jet engine nozzle conditions ($T \sim 3000$ K, $p \sim 150$ atm); (4) 16 reactions involving S, H, O, N significant at lower atmosphere conditions ($T \sim 300$ K, $p \sim 1$ atm). The obtained approximation accuracy is 1–10% for well studied reactions and 20–30% for poorly studied ones. This is 3–5 times more accurate than the world level.

This work was supported by grant MK-3630.2021.1.1 from the President of the Russian Federation.

References

1. NIST Chemical kinetics database. Standard reference database 17-2Q98. <http://kinetics.nist.gov/kinetics/>
2. Berkeley University, Gas Research Institute, GRI-Mech 3.0. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
3. Burkholder J.B. et al. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies, Evaluation No. 18, JPL Publication 15-10. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA, 2015.
4. Baulch D.L. et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data, 34(3):757–1397, 2005.
5. Ibragimova L.B., Smekhov G.D., Shatalov O.P. // Physical and Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2009. 8. 1-25, [In Russian]
6. Belov A.A., Kalitkin N.N. // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. 60:7 (2020), 105-113. [In Russian]
7. Nurislamova L.F. et al. // Chem. Product Process Model. 2014. Vol. 9. No. 2. P. 143.

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ

В.Ю. Долматов¹, А.Н. Озерин², А.С. Козлов¹, А.О. Дорохов³

¹ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН,
г. Москва, Россия

³Завод «Пластмасс», г. Копейск, Челябинская область, Россия

Предполагается возникновение фрактальной углеродной сетки с флуктуациями плотности углерода в плазме зоны химических реакций (ЗХР) при взрывном разложении взрывчатых веществ (ВВ). В «узлах» этой сетки, обладающий наибольшей плотностью, углеродный конденсат успевает сформировать трехмерное упорядоченное ядро.

Углеродная плазма за плоскостью Чепмена-Жуге становится сначала жидким углеродом, а затем кристаллизуется в кристаллиты детонационных наноалмазов (ДНА). Процесс кристаллизации завершается в диапазоне $1/3$ - $3/4$ диаметра заряда от фронта детонационной волны.

Заключение:

1. Сделано предположение, что конденсированный углерод в зоне химических реакций должен иметь плотность в диапазоне $2,5$ - $3,2$ г/см³ в соответствии с его определением в плазме методом МУРР (малоугловое рентгеновское рассеивание).

2. Вероятно возникновение фрактальной углеродной сетки с одновременными флуктуациями плотности углерода в ЗХР с образованием трехмерного упорядоченного ядра в узлах сетки.

3. Время химических реакций в ЗХР укладывается в рамки $0,1$ - $0,3$ мкс, а ширина ЗХР от $0,4$ до $1,4$ мм для образования ДНА.

4. Образование наноалмазов происходит на расстоянии от фронта детонационной волны в $1/3$ - $3/4$ диаметра заряда.

5. Наиболее высокий выход ДНА (более 6 мас.%) достигается, когда на его образование уходит 20 ± 2 мас.% от общего углерода ВВ.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта 18-29-19112.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ СФЕРОИДАЛЬНОГО ОКТОГЕНА НА ГОРЕНИЕ СМЕСЕВЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

*С.Ю. Нарыжный, В.В. Фоменко, М.В. Ахтырский, А.С. Кузаков, С.В. Десятов,
С.М. Путис, О.Д. Пуцин, С.А. Душенок, А.А. Котомин, А.С. Козлов*

ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

В данной работе в исследуется влияние дисперсности высокоэнергетической добавки на характеристики смесевых ракетных топлива (СРТ). В качестве модельных составов СРТ использовались пастообразные ракетные топлива (ПРТ) [1] на основе

перхлората аммония (ПХА) и хлорноокислого энергонасыщенного самогорящего связующего, применяемого в работе [2], с добавлением высокоэнергетической добавки. В качестве высокоэнергетической добавки использовался сфероидальный октоген следующих фракций: 160-250, 80-160, 40-80 и <40 мкм. Для оценки влияния высокоэнергетической добавки были предварительно выполнены термодинамические расчеты характеристик модельных составов.

Экспериментальные работы по определению характеристик горения модельных составов проводились на манометрической установке высокого давления (УВД) при давлениях до 120 МПа и модельном ракетном двигателе (МРД) калибра 30 мм при давлениях до 25 МПа. Отдельно были исследованы реологические характеристики модельных составов.

По результатам исследований выявлен характер влияния дисперсности октогена на скорость горения и реологию модельных составов, определены параметры процесса горения.

Литература

1. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Животов Н.П. и др. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. М: Физматлит. 2010. 320с.
2. С. Ю. Нарыжный, А. С. Козлов, В. Ю. Долматов, В. В. Фоменко и др. Влияние модификации тетриловых детонационных наноалмазов на горение модельных пастообразных ракетных топлив. Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. №6. С. 48-55.

ТОРМОЖЕНИЕ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ВО ФТОРИД ЛИТИЯ

*А.А. Становов, Е.Н. Богданов, В.И. Буренин, Л.И. Канунова,
А.О. Яговкин, Л.К. Антонюк, Т.А. Говорунова, А.Е. Сафронов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Для тестирования уравнений состояния ПВ привлекается широкий набор различных экспериментальных данных, в частности, результаты экспериментов по торможению продуктов взрыва в оптически прозрачные преграды с регистрацией профиля массовой скорости методами высокочувствительной лазерной интерферометрии (VISAR, PDV).

Важную информацию в экспериментах содержит профиль Тейлоровской волны расширения, в которой продукты взрыва расширяются из состояния Чепмена-Жуге до относительно низких давлений. Поскольку волна Тейлора является нестационарной зоной детонационной волны, то при увеличении длины заряда скорость спада давления в ней уменьшается, что позволяет реализовывать различные диапазоны изменений давления в продуктах взрыва.

В данной работе для тестирования уравнения состояния продуктов взрыва пластифицированного октогена проведены две серии экспериментов по непрерывной регистрации с помощью многоканального комплекса гетеродин-интерферометра зависимостей скорости контактной границы продукты взрыва – оптическое окно из фторида лития. В первой серии цилиндрические заряды диаметром 100 мм и толщиной 40 и 60 мм инициировались с помощью плосковолновых генераторов, а во второй серии инициирование зарядов диаметром 120 мм и толщиной 20 мм осуществлялось в точке на оси. В проведённых экспериментах реализованы состояния в продуктах взрыва от ~ 40 ГПа до 10 ГПа.

Полученные экспериментальные результаты использованы для тестирования уравнения состояния продуктов взрыва исследуемого взрывчатого вещества в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL). Результаты проведенного расчетного моделирования в двумерной геометрии находятся в удовлетворительном согласии с результатами экспериментов.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДАХ ИЗ ТАТБ

А.В. Ерастов, В.В. Змушко, Т.И. Змушко, К.Н. Панов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Исследован процесс распространения детонации в цилиндрических зарядах из пластифицированного ТАТБ со стальной оболочкой внутри при инициировании нормальной детонации по линии на наружной поверхности заряда. Конструкция инициатора обеспечивает надежное инициирование нормальной детонации на поверхности заряда из ТАТБ без задержки. В экспериментах определена форма фронта детонационной волны (ДВ) рентгенографическим методом на несколько моментов времени. С помощью электроконтактных датчиков измерена скорость распространения фронта ДВ по наружной поверхности заряда. Получено, что в области прямой видимости точки инициирования скорость фронта расходящейся ДВ составляет $\approx 7,3$ км/с. В области “тени” точки инициирования скорость фронта расходящейся ДВ уменьшается в зависимости от пройденного расстояния, как по наружной, так и по внутренней поверхности заряда до значения $\approx 5,7$ км/с. При этом около оболочки зафиксирована зона непрореагировавшего ТАТБ. Проведено численное моделирование экспериментов с использованием кинетики детонации SURF. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, как на ранней стадии процесса инициирования детонации, так и в области “тени” точки инициирования, где скорость фронта ДВ уменьшается.

**NUMERICAL-EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF DETONATION
PROPAGATION IN CYLINDRICAL TATB CHARGES***A.V. Erastov, V.V. Zmushko, T.I. Zmushko, K.N. Panov*

RFNC-VNIIEF, Sarov. Russia

The authors investigated the process of detonation propagation in cylindrical charges made of plasticized TATB with a steel shell inside of it when normal detonation was initiated along the line on the external surface of the charge. The initiator design provides reliable initiation of normal detonation on TATB charge surface without delay. In experiments the front shape of detonation wave (DW) was determined by the X-ray radiography method for several times. Velocity of DW front propagation on the external surface of the charge was measured by electrocontact gauges. It was revealed that velocity of diverging DW front was ≈ 7.3 km/s in the line of sight of the initiation point. In the area of the initiation point “shade”, velocity of diverging DW front decreased depending on traveled distance both on the external and internal surfaces of the charge up to the value of ≈ 5.7 km/s. Besides, zone of unreacted TATB was recorded near the shell. Numerical simulation of the experiments was performed with use of SURF detonation kinetics. Calculation results are in good agreement with the experimental data both at the early stage of detonation initiation process and in the area of initiation point “shade” where DW front velocity decreases.

**ИЗУЧЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ
НАГРУЖЕНИИ МЕТОДОМ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА***В.А. Пушков*

СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Россия

В работе по литературным данным обзорно рассмотрены виды исследований характеристик взрывчатых веществ (ВВ) при динамическом низкоскоростном (до ≈ 100 м/с) механическом воздействии, отвечающем аварийным нагрузкам при хранении, перевозке, теракте и т. п. Часто при таких воздействиях в твердых ВВ инициируются взрывчатые превращения [1]. Наиболее вероятным механизмом возникновения взрывчатых превращений является образование очагов реакции, возникающих при пластическом деформировании ВВ [2]. Разработка физических моделей и количественное описание процессов деформирования, разрушения и возбуждения взрывчатого превращения в ВВ на сегодня далеко не закончены, поэтому исследования продолжают в целях получения более полного объема данных. Исследования выполняются с помощью различных методов, в том числе известного метода составного стержня Гопкинсона (ССГ). Такие работы проводятся как в России, так и за рубежом, например, [3-7].

Подробнее из работы [7] рассмотрены результаты исследования динамического сжатия пластифицированного ТЭНа методом ССГ. Опыты проведены при скоростях

деформации $7500-12000 \text{ с}^{-1}$. Построены диаграммы «усилие-деформация», «усилие-смещение», оценена величина энергии, необходимая для возбуждения взрывчатого превращения. Предложено использовать метод ССГ как дополнительный к имеющимся методам изучения характеристик ВВ [7].

Литература

1. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом // М.: Наука. – 1968.
2. V.A. Pushkov, A.I. Abakumov, A.V. Yurlov, A.V. Kal'manov, A.A. Sedov and A.V. Rodionov. Response of HMX-based HE to low-velocity loading by steel cylindrical impactor. Proceedings of the AIP Conference, 1426, Part one, 2011, pp.418-421.
3. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов. // Физика горения и взрыва. - 2011. - Т. 47. – N 6. - С. 29-41.
4. Быстрое инициирование ВВ. Особые режимы детонации. Сборник научных статей под. ред. Таржанова В.И.// Снежинск, Челябинская обл., Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. – 1998.
5. S.K. Chidester, D.G. Thompson, K.S. Vandersall, D.J. Idar, C.M. Tarver, F. Garcia, and P.A. Urtiew. Shock initiation experiments on PBX 9501 explosive at pressures below 3 GPa with associated ignition and growth modeling. AIP Conference Proceedings. 2007. 955. 903.
6. J.W. Tringe, K.S. Vandersall, J.E. Reaugh, H.W. Levie, B.F. Henson, L.B. Smilowitz, and G.R. Parker. Observation and modeling of deflagration-to-detonation transition (DDT) in low-density HMX. AIP Conference Proceedings. 2017. 1793. 060024.
7. В.А. Пушков, А.Л. Михайлов, А.Н. Цибиков, А.А. Окинчиц, А.В. Юрлов, А.М. Васильев, Т.Г. Найданова, А.В. Баканова. Изучение характеристик взрывчатых веществ при динамическом нагружении с использованием метода составного стержня Гопкинсона. // Физика горения и взрыва. – 2021. - Т. 57. – N 1. - С. 120-129.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУГАСНОГО И МЕТАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.П. Зоткин, А.А. Селезнев, А.В. Складов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В докладе представлены компьютерные модели (цифровые аналоги) экспериментальных методик по определению фугасности ВВ (проба Трауцля) и метательного действия продуктов детонации (цилиндр – тест). Цель работы – создание компьютерных моделей пробы Трауцля и цилиндр - теста для расчетного определения фугасности ВВ и метательного действия продуктов детонации (ПД). Метод расчётной оценки фугасности основывается на численном моделировании взрыва заряда ВВ в свинцовой бомбе Трауцля с последующим измерением степени расширения внутреннего канала свинцовой бомбы. Метод расчетной оценки метательного действия ПД основывается на численном моделировании динамики разлёта медной трубы после детонации заряда ВВ при одновременной регистрации радиальной скорости разлёта цилиндрической оболочки в зависимости от степени расширения ПД.

В процессе работы с помощью методов компьютерного моделирования проводились исследования работоспособности зарядов ВВ в свинцовой бомбе

Трауцля, расчеты скорости метания и величины смещения цилиндрической оболочки при детонации зарядов из различных ВВ. Рассчитаны энергия Гарни и термодинамический критерий фугасности для рассматриваемых ВВ. Получены корреляционные зависимости между величиной термодинамического критерия фугасности и такими параметрами работоспособности ПД как максимальная скорость метания медной цилиндрической оболочки (рисунок 1), энергия Гарни, показатель фугасности по Трауцлю.

Верификация расчетных моделей пробы Трауцля и цилиндр-теста была проведена методом сравнения экспериментальных и расчетных результатов для следующих ВВ: октоген, гексоген, тротил, тэн, и гексанитростильбен.

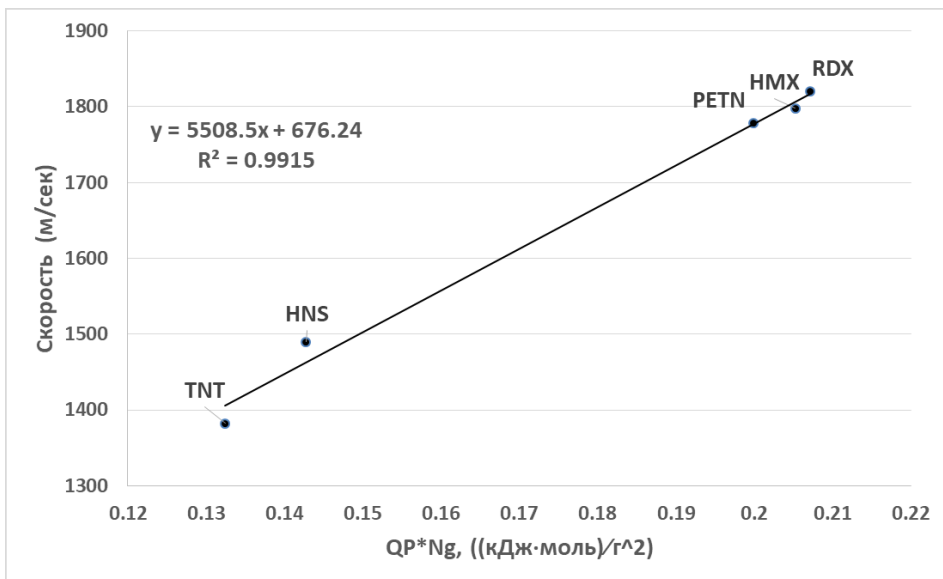


Рисунок 1. Корреляционная зависимость между термодинамическим критерием фугасности и максимальным значением скорости цилиндрической оболочки

DETERMINATION OF EXPLOSIVE CHARGES PERFORMANCE USING NUMERICAL SIMULATION METHODS

S.P. Zotkin, A.A. Selezenev, A.V. Sklyarov

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The report presents the computer models (digital analogues) of experimental methods for determining the high explosive (HE) performance (Trauzl test) and projectile action of detonation products (cylinder test). The purpose of the work is creating computer models of the Trauzl test and the cylinder test for the calculated determination of the HE performance

and the projectile action of detonation products. The calculation method for determination of the HE performance is based on numerical simulation of explosion of the HE charge in the Trauzl lead block, followed by measuring of the expansion degree of the inner channel in the lead block. The calculation method for determination of projectile action of detonation products is based on numerical simulation of the dynamics of the copper tube expansion after detonation of HE charge with simultaneous registration of radial velocity of the cylindrical layer depending on expansion degree of the detonation products.

In the course of the work, the studies of the performance of the HE charges in the Trauzl lead block, calculations of the radial velocity and the displacement value of the cylindrical layer during detonation of charges for the various HE, were carried out using computer simulation methods. The Garney energy and thermodynamic performance criteria for the HE under consideration were calculated. Correlations dependencies between the value of the thermodynamic criterion of explosive performance and such experimental parameters of the detonation products performance as the maximum projectile velocity of cylindrical layer (Figure 1), the Garney energy, and the performance value of the Trauzl test were obtained.

Verification of the numerical models of the Trauzl test and the cylinder-test was carried out by comparing experimental and calculated results for the following explosives: HMX, RDX, TNT, PETN, HNS.

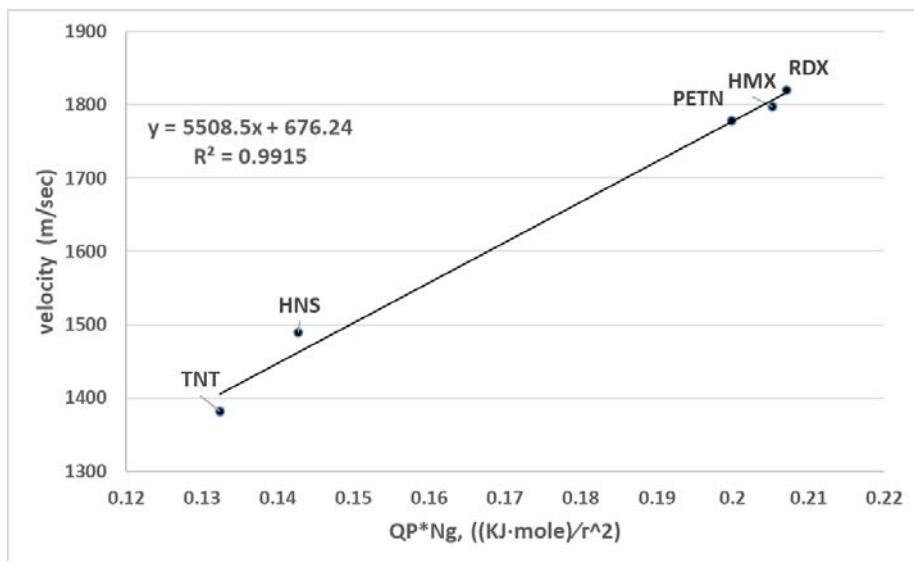


Figure 1. Correlation dependence between the thermodynamic performance criterion and the maximum velocity of the cylindrical layer

ОЦЕНКА ФУГАСНОСТИ СМЕСЕВЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

А.А. Селезнев, А.Ю. Алейников, П.А. Устимкин, С.П. Зоткин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В докладе приведены результаты термодинамических расчетов по оценке работоспособности (фугасности) смесевых взрывчатых составов (СВС) на основе октогена и перхлората аммония с добавкой порошков активных металлов (алюминия, магния или бора). Рассматривались следующие критерии работоспособности продуктов взрыва: произведение удельной теплоты взрыва на удельное газосодержание ПВ ($Q_p \cdot n_g$), параметр «Сила» ПВ (F_S), показатель фугасности (f) для промышленных ВВ, полученный в работе [1] и критерий эффективности ВВ по импульсу воздушной ударной волны (f_J), полученный в работе [2]

$$F_S = n_g \cdot R \cdot T_A, \quad (1)$$

$$f = \left(\frac{Q_p}{Q_{p,TNT}} \right)^{0.5} \cdot (Tr)^{0.25}, \quad (2)$$

$$f_J = \frac{J_{ВВ}}{J_{TNT}} = \left(\frac{Q_p}{Q_{p,TNT}} \right)^{0.5204} \cdot T_r^{0.259} \quad (3)$$

$$Tr = \frac{(Q_p \cdot n_g)}{(Q_p \cdot n_g)_{TNT}},$$

где n_g – удельное газосодержание ПВ, T_A – температура ПВ в точку Чепмена-Жуге, Q_p – теплота взрыва.

Для рассматриваемых СВС расчетным методом определены массовые содержания компонент, при которых критерии эффективности достигают максимальных значений. Анализ полученных расчетных результатов показал, что использование в качестве активной добавки в СВС порошка бора приводит к большему увеличению тротилового эквивалента по импульсу воздушной УВ по сравнению с добавкой порошка алюминия или магния. В тоже время, по критериям «Сила» ПВ или «проба Трауцля» добавки порошка алюминия или магния являются более эффективными по сравнению с добавкой порошка бора. Анализ полученных расчетных результатов также показал, что использование порошков магния или бора вместо порошка алюминия не приводит к заметному увеличению эффективности ПВ с точки зрения фугасного действия.

Литература

1. Афанасенков А.Н. О работоспособности взрывчатых веществ. Метод Трауцля. ФГВ, 2004, Т.49, №1, С.132.
2. Смирнов А.С., Воронько О.В., Лемперт Д.Б., Пивина Т.С. Расчетная оценка возможности применения новых энергоёмких материалов. Труды международной конференции 27 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Саров, 2015, С.69.

ESTIMATION OF COMPOSITE EXPLOSIVES PERFORMANCE USING THE THERMODYNAMIC CRITERIA

A.A. Selezenev, A.Yu. Aleynikov, P.A. Ustimkin, S.P. Zotkin

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The results of thermodynamic calculations of composite explosives performance are presented in the report. The composite explosives (CE) containing HMX, ammonium perchlorate, and powders of active metals (aluminum, magnesium or boron) are considered. The following criteria of composite explosives performance are considered: production of specific explosion heat on specific gas content of explosion products ($Q_p \cdot n_g$), "Force" of explosion products (F_s), the performance criterion (f) for industrial high explosives (HE) that has been formulated in the work [1] and the criterion of HE efficiency on impulse of air shock wave (f_J) that has been formulated in the work [2]

$$F_s = n_g \cdot R \cdot T_A, \quad (1)$$

$$f = \left(\frac{Q_p}{Q_{p,TNT}} \right)^{0.5} \cdot (Tr)^{0.25}, \quad (2)$$

$$f_J = \frac{J_{BB}}{J_{TNT}} = \left(\frac{Q_p}{Q_{p,TNT}} \right)^{0.5204} \cdot Tr^{0.259}, \quad (3)$$

$$Tr = \frac{(Q_p \cdot n_g)}{(Q_p \cdot n_g)_{TNT}},$$

where n_g is specific gas content of explosion products, T_A is explosion products temperature in Chapman-Jouguet point, Q_p is explosion heat.

Mass contents of the component at which the performance criteria reach the maximum value are determined for the considered CE using calculation method. The analysis of the obtained calculation results show that using boron powder in CE leads to larger increase of TNT equivalent on impulse of air shock wave in comparison with aluminum or magnesium powder. At the same time, according to the "Force" of explosion products and Trauzl test criteria, additives of aluminum or magnesium powder are more effective in comparison with boron powder. The analysis of the obtained calculation results

also show that using magnesium or boron powders instead of aluminum powder does not lead to noticeable increase of CE performance.

References

1. Afanasenkov A. N. About performance of explosives. Trautsl's method. Combustion, Explosion, and Shock Wave, 2004, V.49, No.1, P. 132.
2. Smirnov A. S., Voronko O. V., Lempert D.B., Pivina T. S. Estimate of a possibility of use of new energetic materials. Proc. of the international conference XXVII Hariton's Thematic Scientific Readings. Extreme Conditions of Matter. Detonation. Shock Waves. Sarov. Russia. 2015, P. 69.

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

EQUATIONS OF STATE AND PHASE TRANSITIONS

ОСОБЕННОСТИ СЖИМАЕМОСТИ ЦЕРИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ДО 25 ГПА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНО-ГЕТЕРОДИННОЙ ДИАГНОСТИКОЙ

В.И. Таржанов, Е.А. Козлов, Д.Г. Панкратов

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Представлены результаты по ударной сжимаемости высокочистого церия, полученные в РФЯЦ-ВНИИТФ в сотрудничестве с LANL [1, 2] при взрывном нагружении клиновых образцов с реализацией высокоскоростной деформации в области протекания γ - α - и α -жидкость фазовых превращений. Диагностика процессов осуществлялась с совмещением фотохронографической методики оптического рычага (ОР) [3] и лазерно-гетеродинной методики.

Получены новые данные по структуре волн напряжений в клиновых образцах церия для различных режимов их взрывного нагружения, отличающихся амплитудой и длительностью импульса нагрузки. Зарегистрирована эволюция единого профиля упругого и γ - α – фазового предвестников, вплоть до их разделения при самых низких уровнях нагружения. С использованием профиля фазового предвестника построена зависимость от времени объёмной скорости звука, характеризующая кинетику процессов в нём, реализующихся при деформации.

Установлены границы областей существования в церии одно-, двух- и трехволновых конфигураций, связанных с упруго-пластическим поведением церия и γ - α -превращением. Приведены экспериментальные корреляции скорости свободной поверхности W , волновой скорости D и продольного напряжения σ_{xx} с пройденным по образцу расстоянием x для фазового предвестника и основной пластической волны. Построена ударная адиабата церия в виде D, u –соотношения (u – массовая скорость), а также в виде функций $\sigma_{xx}(u)$ и $\sigma_{xx}(V/V_0)$ (V/V_0 – относительный удельный объём). Проведено сравнение результатов с литературными данными. Констатируется хорошее соответствие данных РФЯЦ-ВНИИТФ, РФЯЦ-ВНИИЭФ и ЛАНЛ.

Представлены некоторые факты, связанные с плавлением церия на ударной адиабате. В частности, в подтверждение данных РФЯЦ-ВНИИЭФ, зафиксирован излом ударной адиабаты в D, u –координатах с локализацией в точке с $D = 2,38$ км/с и

$u = 0,723$ км/с. Это с учетом погрешности аппроксимации соответствует диапазону $\sigma_{xx} = 9,3 - 14,2$ ГПа – диапазону плавления по данным измерений скоростей звука и импульсным рентгеноструктурным данным. В этом же диапазоне в пределах одного клинового образца зарегистрированы изломы зависимостей $W(x)$ и $D(x)$. При $\sigma_{xx} = 10 - 12$ ГПа методом ОР зафиксировано резкое снижение интенсивности отраженного от свободной поверхности образца света и увеличение дисперсии скорости разлета свободной поверхности церия.

Экспериментально подтверждено установленное теоретически отсутствие пересечения ударной адиабаты с линией α - ϵ -фазового равновесия. С привлечением данных ЛАНЛ по двукратному ударному сжатию церия указано на возможность расположения этой линии равновесия в $\sigma_{xx}(V/V_0)$ -координатах между адиабатами однократного и двукратного сжатий.

По экспериментально зарегистрированным волновым профилям скорости движения свободной поверхности клиновых образцов определены толщины отколов и откольная прочность церия (0,2–0,4 ГПа), зависящие от градиента импульса растягивающих напряжений и амплитудного значения предшествовавших растяжению сжимающих напряжений.

Литература

1. А.В. Петровцев, Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, Д.Г. Панкратов, А.В. Воробьев, В.А. Маткин, Д.М. Горбачев, Ю.С. Морева, Е.В. Какшина, А.Н. Грачев, Ю.Н. Зуев, И.Л. Святов, И.В. Подгорнова, Н.А. Цепилов, Е.А. Шмаков, Д.А. Беляев, А.Е. Шестаков, Е.А. Шестакова, Н.В. Иванова. Кинетика фазовых превращений и свойства чистого церия при высокоскоростной деформации”. Особенности сжимаемости и откольная прочность церия в области (γ - α -жидкость) фазовых превращений при взрывном нагружении // Отчет о НИР РФЯЦ – ВНИИТФ, № ПС 08.11234, 2008, 74 С.
2. А.В. Петровцев, Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, Д.Г. Панкратов, А.В. Воробьев, В.А. Маткин, Д.М. Горбачев, Ю.С. Морева, Е.В. Какшина, А.Н. Грачев, Ю.Н. Зуев, И.Л. Святов, И.В. Подгорнова, Н.А. Цепилов, Е.А. Шмаков, Д.А. Беляев, А.Е. Шестаков, Е.А. Шестакова, Н.В.Иванова. Новые результаты по кинетике фазовых превращений и откольной прочности церия, полученные по совмещенной методике оптического рычага и лазерно-гетеродинной методике // Отчет о НИР РФЯЦ – ВНИИТФ, № ПС 13.12888, 2013, 105 С.
3. В.И. Таржанов. Использование метода оптического рычага для получения ударных адиабат материалов // Приборы и техника эксперимента, 2022, № 1, С. 106-119.

FEATURES OF CERIUM COMPRESSIBILITY UNDER SHOCK-WAVE LOADING UP TO 25 GPa IN EXPERIMENTS USING PHOTOCRONOGRAPHIC AND LASER-HETERODYNE DIAGNOSTICS

V.I. Tarzhanov, E.A. Kozlov, D.G. Pankratov

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The paper presents the results of experiments on high-purity cerium shock compressibility, obtained at RFNC-VNIITF in cooperation with LANL [1, 2] under explosive loading of wedge specimens with high-rate deformation in the region of γ - α - and α -liquid phase transitions. The process diagnostics was performed using the photochronographic optical lever (OL) technique [3] and the laser-heterodyne method.

New data on the structure of stress waves in wedge cerium specimens were obtained for different explosive loading conditions which differed in load pulse amplitude and duration. The evolution of the single profile of elastic and γ - α -phase precursors was recorded up until their separation under the lowest loading levels. The volume velocity of sound as a function of time, which described the kinetics of processes occurred under deformation, was plotted using the phase precursor profile.

The boundaries of single-, two-, and three-wave configuration domains existing in cerium were defined, which were related to elastoplastic cerium behavior and the γ - α -transition. Experimental correlations of free surface velocity, W , wave velocity, D , and longitudinal stress, σ_{xx} , with the distance travelled along the specimen, x , for the phase precursor and the main plastic wave are given. The shock cerium adiabat was plotted in the form of the D, u -relation, where u is the mass velocity, and also in the form of the functions $\sigma_{xx}(u)$ and $\sigma_{xx}(V/V_0)$, where V/V_0 is the relative specific volume. The obtained results were compared to the literature data. The data acquired by RFNC-VNIITF, RFNC-VNIIEF, and LANL was found to be in close agreement.

Some facts related to cerium melting on the shock adiabat are presented. In particular, in support of RFNC-VNIIEF data, the shock adiabat break was recorded in D, u -coordinates with localization in the point with $D = 2.38$ km/s and $u = 0.723$ km/s. With regard to the approximation error, this corresponds to the range $\sigma_{xx} = 9.3 - 14.2$ GPa, that is, the melting range according to measured sound velocity and pulse X-ray data. The breaks of $W(x)$ vs $D(x)$ curves were recorded in the same range within a single wedge specimen. The sharp falloff in intensity of light reflected from the specimen free surface and the increased dispersion of cerium free-surface scatter velocity was recorded at $\sigma_{xx} = 10 - 12$ GPa by the optical lever (OL) technique.

The theoretically-predicted absence of shock adiabat intersection with the α - ϵ -phase equilibrium line was experimentally validated. The possibility of this equilibrium line positioning in $\sigma_{xx}(V/V_0)$ -coordinates between the single and double compression adiabats was shown using the LANL data on double shock compression of cerium.

The cerium spall thickness and spall strength (0.2–0.4 GPa) dependent on the gradient of the tensile stress pulse and peak pretension compressive stresses were determined from experimentally recorded wave profiles of free-surface velocity of wedge specimens.

References

1. Petrovtsev A.V., Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G., Vorobiev A.V., Matkin V.A., Gorbachov D.M., Moreva Yu.S., Kakshina E.V., Grachov A.N., Zuev Yu.N., Sviatov I.L., Podgornova I.V., Tsepilov N.A., Shmakov E.A., Belyaev D.A., Shestakov A.E., Shestakova E.A., Ivanova N.V. Phase Transformation Kinetics and Properties of Pure Cesium under High-Rate Deformation". Features of Cerium Compressibility and Spall Strength in the (γ - α -liquid) Phase Transformation Region under Explosive Loading // RFNC-VNIITF Research Report, No PS 08.11234, 2008, P.74.
2. Petrovtsev, A.B., Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G., Vorobiev A.V., Matkin V.A., Gorbachov D.M., Moreva Yu.S., Kakshina E.V., Grachov A.N., Zuev Yu.N., Sviatov I.L., Podgornova I.V., Tsepilov N.A., Shmakov E.A., Belyaev D.A., Shestakov A.E., Shestakova E.A., Ivanova N.V. New Results in Phase Transformation Kinetics and Spall Strength of Cerium, Obtained Using Combined Optical Lever Technique and Laser-Heterodyne Method // RFNC-VNIITF Research Report, No PS 13.12888, 2013, P.105.
3. Tarzhanov V.I. Application of Optical Lever Technique to Obtain Material Shock Adiabats // Experimental Instruments and Techniques, 2022, No 1, P. 106-119.

**РЕАКЦИЯ ЦЕРИЯ НА УДАРНО-ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ
В ОБЛАСТИ $(\gamma-\alpha)$ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ**

*В.А. Борисенко¹, В.Г. Симакон^{1,2}, В.А. Брагунец², М.В. Жерноклетов^{1,2},
Е.Е. Шестаков^{1,2}, А.М. Подурец^{1,2}, М.И. Ткаченко^{1,2}*

¹СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Россия

²РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Исследовали электролитический церий марки ЦЭ-0 (СТ48-295-85) чистой 99,83%. Содержание примесей (масс.%): La – 0,07%, Nd – 0,05%, Fe – 0,02%. Плотность материала 6,75г/см³. Для создания ударной волны (УВ) в образцах церия использовали баллистическую установку СарФТИ НИЯУ МИФИ калибром 37мм (рабочий газ – гелий) и взрывные нагружающие устройства РФЯЦ-ВНИИЭФ. Профили давления измеряли ПВДФ-датчиками с размерами чувствительного элемента 2x2 мм² и толщиной 30 мкм в режиме короткозамкнутой измерительной цепи. В этом режиме ток датчика пропорционален производной давления по времени [1]. Эксперименты проведены в диапазоне давлений нагружения 0,2-11,8ГПа.

Анализ результатов показал, что реакцией церия на нагружение УВ, близкой к П-образной форме, является импульс давления со сложной структурой профиля, которая существенным образом зависит от уровня давления во фронте входящей в церий ударной волны P_n . Выделены пять типов конфигураций профиля в зависимости от P_n :

1. $P_n < 0,6$ ГПа - упругая волна.

2. $0,6$ ГПа $\leq P_n \leq 3,3$ ГПа - двухволновая конфигурация из волн изэнтропического сжатия, первая из которых упругий предвестник с амплитудой 0,6ГПа. При превышении этого давления в церии начинается $(\gamma-\alpha)$ превращение, полнота и скорость которого зависит от давления нагружения: при фиксированном давлении нагружения происходит наработка α -фазы до определённого её количества (незавершённый фазовый переход). В материале реализуется состояние смешанных фаз и дополнительно к упругому предвестнику формируется волна изэнтропического сжатия. В этом диапазоне нагружающих давлений наблюдается аномалия скоростей волн сжатия и разгрузки: скорость уменьшается с увеличением давления.

3. $3,3$ ГПа $\leq P_n \leq 6,2$ ГПа - трехволновая конфигурация: упругий предвестник, волна изэнтропического сжатия и УВ. Образование УВ, согласно [2,3], можно считать указанием на завершение фазового перехода.

4. $6,2$ ГПа $\leq P_n \leq 11,8$ ГПа - двухволновая конфигурация: упругий предвестник и УВ.

При уровнях нагружения $P_n \geq 3,3$ ГПа, скорость УВ увеличивается с ростом P_n . Давление перехода волны изэнтропического сжатия в УВ, первоначально составляющее величину $\sim 0,84$ ГПа, начиная с некоторого давления (в опытах не определено), уменьшается и при давлениях нагружения $P_n \geq 6,2$ ГПа волна изэнтропического сжатия не регистрируется.

5. $P_n \geq 11,8$ ГПа - одноволновая конфигурация.

Скорость УВ в α -фазе растёт с ростом давления нагружения и при давлениях 11,8ГПа в церии распространяется только УВ.

Волна разгрузки в церии имеет одноволновую конфигурацию. В волне разгрузки при давлениях нагружения, достигнутых на баллистической установке,

происходит обратный (α - γ) переход. Это следует из результатов рентгенографического анализа исходных и постопытных образцов церия.

Проведено сравнение полученных результатов с данными теоретических и экспериментальных (статика и динамика) исследований.

Литература

1. ПВДФ-датчик динамического давления. В.А. Борисенко, В.Г. Симаков, В.Г. Куропаткин и др. ПТЭ. 2008. №4. С.113-121.
2. Уравнение состояния церия и особенности его динамического сжатия в области γ - α -перехода. В.М. Елькин, Е.А. Козлов, Е.В. Какшина, Ю.С. Морева. ФММ. 2006. Т.101. №3.С.232-241.
3. Phase states of dynamically compressed cerium. Elkin N.M., Mikhaylov V.N., Petrovtsev A.V., Cherne F.J. Phys.Rev.B. 2011. V. 84, 094120.

CERIUM REACTION TO SHOCK-WAVE LOADING IN THE REGION OF (γ - α) PHASE TRANSFORMATION

*V.A. Borisenok¹, V.G. Simakov^{1,2}, V.A. Bragunets², M.V. Zhernokletov^{1,2},
E.E. Shestakov^{1,2}, A.M. Podurets^{1,2}, M.I. Tkachenko^{1,2}*

¹SarPhTI MEFPhI, Sarov, Russia

²RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

Electrolytic cerium of the CE-0 brand (ST48-295-85) with a purity of 99.83% was studied. Impurity content (mass.%): La - 0.07%, Nd - 0.05%, Fe - 0.02%. The density of the material is 6.75g/cm³. To create a shock wave (SW) in cerium samples, the SarPhTI ballistic installation with a caliber of 37mm (working gas – helium) and explosive loading devices RFNC-VNIIEF were used. Pressure profiles were measured by PVDF gauges with a sensor element size of 2x2 mm² and a thickness of 30 microns in the mode of a short-circuited measuring circuit. In this mode, the sensor current is proportional to the time derivative of the pressure [1]. The experiments were carried out in the range of loading pressures 0.2-11.8GPa.

Analysis of the results showed that the reaction of cerium to shock wave loading, close to the step-shape, is a pressure pulse with a complex profile structure, which significantly depends on a loading level in a front of a shock wave P_1 entering into cerium. There are five types of profile configurations depending on P_1 :

1. $P_1 < 0.6$ GPa - elastic wave.

2. $0.6 \text{ GPa} \leq P_1 \leq 3.3$ GPa is a two-wave configuration of isentropic compression waves, the first of which is an elastic precursor with an amplitude of 0.6 GPa. When this pressure is exceeded, a (γ - α) transformation begins in cerium, the completeness and speed of which depends on the loading pressure: at a fixed loading pressure, the α -phase is worked up to a certain amount of it (incomplete phase transition). The state of mixed phases is realized in the material and, in addition to the elastic precursor, an isentropic compression wave is formed. In this range of loading pressures, there is an anomaly in the velocities of compression and unloading waves: the velocity decreases with increasing pressure.

3. $3.3\text{GPa} \leq P_1 \leq 6.2\text{GPa}$ - three-wave configuration: elastic precursor, isentropic compression wave and shock wave. The formation of a shock wave, according to [2,3], can be considered an indication of the completion of the phase transition.

4. $6.2\text{GPa} \leq P_1 \leq 11.8\text{GPa}$ - two-wave configuration: elastic precursor and shock wave.

At loading levels of $P_1 \geq 3.3\text{GPa}$, the rate of SW increases with increasing P_1 . The transition pressure of the isentropic compression wave into the shock wave, initially amounting to $\sim 0.84\text{GPa}$, starting from a certain pressure (not determined in experiments), decreases and at loading pressures $P_1 \geq 6.2\text{GPa}$, the isentropic compression wave is not recorded.

5. $P_1 \geq 11.8\text{GPa}$ - single-wave configuration. The rate of SW in the α -phase increases with increasing loading pressure at pressures of 11.8GPa in cerium, only SW spreads.

The rarefaction wave in cerium has a single-wave configuration. In the rarefaction wave, the reverse (α - γ) transition occurs at the loading pressures reached on the ballistic installation. This follows from the results of X-ray analysis of the initial and post-test cerium samples.

The obtained results are compared with the data of theoretical and experimental (statics and dynamics) studies.

References

1. Borisenok V.A., Simakov V.G., Kuropatkin V.G. et al. PTE. 2008. No. 4. pp.113-121.
2. Elkin V.M., Kozlov E.A., Kakshina E.V., Moreva Y.S. FMM. 2006. Vol.101. No.3.pp.232-241.
3. Elkin N. M., Mikhailov V. N., Petrovtsev A.V., Cherne F. Ya. Phys.Rev.B. 2011. V. 84. 094120.

АНОМАЛЬНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА ЭНТРОПИЙНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ВЕЩЕСТВЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

И.Л. Иосилевский, В.К. Грязнов, Д.Н. Николаев, А.В. Шутов

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Доклад является продолжением и развитием темы докладов, представлявшихся на конференциях ХНЧ в 2015–2019 гг. На примере плотного и горячего флюида (плазмы) водорода (дейтерия) и азота обсуждается взаимосвязь аномалий в экспериментах по динамическому сжатию с термо- и гидродинамическими особенностями слабо изученной связки двух сопряженных объектов - т.наз. “энтропийного” фазового перехода (S - PT) [Иосилевский-ХНЧ-2015] и сопутствующей ему зоны аномальной термодинамики (ATR).

Энтропийные переходы флюид-флюид существенно сложнее по своим свойствам и топологии фазовых границ, нежели привычные (ван-дер-Ваальсовы) переходы. В качестве примера в докладе обсуждается наличие в S - PT третьей зоны метастабильного состояния (помимо двух обычных - перегретой и переохлажденной фаз) с двумя дополнительными спинодалями и замыкающей их сингулярной концевой точкой нулевой сжимаемости. Обсуждаются следствия потенциально возможного попадания в эту зону вещества, исследуемого в процессе квазиизэнтропического сжатия в экспериментах ИПХФ РАН и ВНИИЭФ.

Зона ATR является зоной одновременной аномальной отрицательности группы нормально положительных вторых перекрестных производных термодинамического потенциала, таких как параметр Грюнайзена, коэффициент термического расширения и др., что проявляется, в частности, в многочисленных взаимопересечениях и нарушениях порядка многих изолиний исследуемого вещества. Формально все аномалии связки (S-PT)+(ATR) можно трактовать, как проявление общей аномалии – многослойности в зоне ATR ряда термодинамических поверхностей $T(P,V)$, $U(P,V)$, $S(P,V)$ и др.

Как пример упомянутых аномалий обсуждается эффект т.наз. “ударного охлаждения” в азоте, экспериментально зафиксированный еще в 1980-х В.Неллисом при мегабарном сжатии азота. Позже этот эффект был теоретически объяснен Е.Якубом, как следствие эффекта *полимеризации* азота. В данном докладе эффект “ударного охлаждения” рассчитан на основании анализа результатов “первопринципных” вычислений УРС азота Б. Милицером и др. (2016). Как следствие, этот эффект предсказывается, как достижимый в запланированных экспериментах по квазиизэнтропическому сжатию в ИПХФ РАН и ВНИИЭФ. Более того, есть все основания ожидать проявления эффекта “ударного охлаждения” при некоторых достижимых параметрах в экспериментах с квазиизэнтропическим сжатием в водороде (дейтерии) и многих других планетарных флюидах.

ANOMALOUS THERMODYNAMICS OF ENTROPIC PHASE TRANSITIONS IN MATTER OF EXTREME STATE

I.L. Iosilevskiy, V.K. Gryaznov, D.N. Nikolaev, A.V. Shutov

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

Present contribution continues discussion of the problems already discussed in previous contributions at previous Khariton readings at 2015–2019. The main subject of present discussion is interrelation of well-known anomalies in dynamic compression experiments on hydrogen (deuterium) and nitrogen with thermo- and hydrodynamic features of poorly recognized combination of two tightly connected objects – so called “Entropic phase transition” (S-PT) (see e.g. [Iosilevskiy, Khariton Readings, 2015]) and conjugated accompanying Anomalous Thermodynamics Region (ATR). The point is that Entropic fluid-fluid phase transitions are much more complicated than well-known “ordinary” (van-der-Waals-like) phase transitions in physical properties and topology of phase boundaries. It is for example, presence of 3rd additional nonstandard metastable region in S-PT (besides two well-known ones – overheated dense and overcooled rare phases – with two additional spinodals and one more singular end-point (SEP) – both of being of zero-compressibility objects (!). The interesting but not explored problem is what will happen when dynamically compressing sample would reach this new metastable region during quasi-isentropic compression in corresponding future experiments in IPCPh RAS and VNIIEF. Main feature of ATR zone is simultaneous negativity of great variety (usually positive) second cross derivatives of thermodynamic potential, e.g. Gruneisen parameter, thermal expansion coefficient etc. The main consequence of this negativity is mutual crossing and violated order for great number of isolines like isotherms, isentropes, Hugoniot etc. It should be

stressed that formal origin for all mentioned above anomalies of the double object (S -PT)+(ATR) could be considered as direct result of outstanding feature of this double object. Namely – multilayered structure in Anomalous Thermodynamic Region of a number of thermodynamic surfaces like $T(P,V)$, $U(P,V)$, $S(P,V)$ etc. The effect of so-called “shock cooling” is under discussion as important example of anomalies mentioned above. This effect was discovered experimentally by W.Nellis in 1980-s in reflected shock compression of nitrogen at Megabar pressure range. This effect was explained later by E.Yakub as a consequence of *polymerization* in shock compressed nitrogen. Presently we expose the results of our calculations of the “shock cooling” effect in nitrogen on the base of using of so-called First-Principle Equation of State (FPEOS) calculated by K.Driver & B.Militzer in 2016. We predict and discuss possibility of real generation and diagnostics of this effect in future experiments in IPCP RAS (Chernogolovka) and VNIIEF (Sarov). Even more, we have enough reason to expect appearance of the discussed “shock cooling” effect in similar Anomalous Thermodynamics Region, really achievable in quasi-isentropic compression experiments on dense hydrogen-helium mixture and many other fluid planetary substances.

УДАРНО ВОЛНОВОЕ СЖАТИЕ ГАЗООБРАЗНОГО АЗОТА В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 140 - 250 ГПа

*М.В. Жерноклетов¹, А.Е. Ковалев¹, М.Г. Новиков¹, В.К. Грязнов²,
И.Л. Иосилевский², А.В. Шутов²*

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

²Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

Описываются постановка и результаты эксперимента по ударному сжатию газообразного азота, предварительно статически сжатого до плотности $\rho_0 = 0.5; 0.65$ и $0,8$ г/см³, дополняющие и развивающие проведенные во ВНИИЭФ ранее (2008-2010) эксперименты по ударному сжатию жидкого азота в диапазоне давлений 100 – 330 ГПа. Настоящие эксперименты, проведенные на генераторах ударных волн полусферической геометрии в диапазоне давлений 140 – 250 ГПа, позволяют расширить диапазон начальных плотностей ударного сжатия и получить дополнительные экспериментальные данные по уравнению состояния плотного плотной неидеальной плазмы азота в диапазоне давлений 140 – 250 ГПа и температур 15 – 50 кК. Результаты настоящих измерений давлений и температур азота дополняются их сравнением с расчетными данными характеристик ударного сжатия, полученными в рамках трех теоретических подходов: - в традиционном «квазихимическом» представлении (код SAHA); в известном интерполяционном УРС SESAME, и в рамках строгого первопринципного подхода (FPEOS), с использованием данных расчета, опубликованных в литературе (Driver & Milirzer, 2021). Полученные в настоящих экспериментах результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее для жидкого азота, где зафиксировано максимальное сжатие азота в диапазоне $P \approx 100 - 300$ ГПа и обнаружено, что зависимость давления от плотности приобретает необычный, практически изохорный характер со степенью сжатия $\rho/\rho_0 \approx 4.2$. Также полученные экспериментальные данные находятся в удовлетворительном согласии с результатами расчёта по «химической» модели плазмы и с расчетами в рамках первопринципных подходов, но заметно расходятся с результатами расчёта по УРС SESAME

SHOCK-WAVE COMPRESSION OF GASEOUS NITROGEN IN THE RANGE OF PRESSURES FROM 140 GPa TO 250 GPa

*M.V. Zhernokletov¹, A.E. Kovalev¹, M.G. Novikov¹, V.K. Gryaznov²,
I.L. Iosilevskiy², A.V. Shutov²*

¹RFNC-VNIIEF Sarov, Russia

²Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia

The set-up and the experimental results are presented on shock compression of gaseous nitrogen, previously statically compressed up to density $\rho_0=0,8; 0,65$ and $0,5 \text{ g/cm}^3$. They add and develop the experiments fulfilled in VNIIEF earlier (2008-2010) on shock compression of liquid nitrogen in the range of pressures between 100 GPa and 330 GPa. The presented experiments implemented in shock-wave generators of the hemispherical geometry in the range of pressures of 140-250 GPa enable one to expand a range of initial densities realized in the framework of shock compression and to obtain additional experimental data for an equation of state of dense nonideal nitrogen plasma in the pressure range of 140-250 GPa and temperatures of nitrogen over a range of 15-50 kK. The results of the given measurements of pressures and temperatures are compared with the calculated data of characteristics of shock compression, which were implemented within the framework of three theoretical approaches – in traditional “quasi-chemical” representation (code SAHA); in the known interpolated equation of state SESAME, and in the context of strict principled approach (FPEOS) with the use of the calculated data published in the literature (Driver & Milizer, 2021). The results achieved in the presented experiments are in good agreement with experimental data obtained earlier for liquid nitrogen, where maximum compression of nitrogen was recorded in the range of $P \approx 100 \div 300$ GPa and it has been found that a dependence between a pressure and density acquires an unusual isochoric behavior with a degree of compression $\rho/\rho_0 \approx 4.2$. The obtained experimental data also are in satisfactory agreement with the calculated results using a «chemical» plasma model and with the calculations in the context of principled approaches. But they disagree apparently with the calculated results using the equation of state SESAME.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УДАРНО-СЖАТОГО АЗОТА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский, А.В. Шутков

Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

Представлены результаты расчета термодинамических свойств плазмы, полученной при ударном сжатии исходно жидкого и газообразного (предварительно сжатого) азота до давлений мегабарного диапазона, соответствующих высоко ионизованным состояниям азотной плазмы. Результаты получены в рамках модели SAHA-N, разработанной на основе квазихимического представления, в котором многокомпонентная плазма состоит из электронов, ионов, молекул, взаимодействующих между собой. Подход позволяет получить наряду с компонентным составом уравнение состояния и все термодинамические функции, проанализировать влияние различных плазменных эффектов, включающих различные

виды межчастичного взаимодействия, вырождение электронов и эффекты излучения, существенные при высоких температурах ударно-сжатой плазмы. Отмечены выраженные эффекты, соответствующие различным областям фазовой диаграммы от относительно пологого (при низких давлениях ударного сжатия) до почти вертикального хода ударной адиабаты при высоких давлениях. Полученные результаты сопоставляются с ранее проведенными и новыми экспериментами ВНИИЭФ, проведенными при помощи генераторов ударных волн различной геометрии. Вместе с этим представлено сравнение результатов расчета с данными характеристик ударного сжатия, полученными в рамках двух теоретических подходов: хорошо известным УРС SESAME и данными первопринципного подхода (FPEOS, Driver & Militzer, 2021). Проведенное сравнение показало удовлетворительное согласие наших результатов с экспериментом, результатами, полученными в рамках прямого численного моделирования (FPEOS) и заметное расхождение с результатами расчёта по УРС SESAME.

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF SHOCK-COMPRESSED NITROGEN IN A WIDE PRESSURE RANGE

V.K. Gryaznov, I.L. Iosilevsky, A.V. Shutov

Institute for Problems of Chemical Physics of the RAS, Chernogolovka, Russia

The results of calculating the thermodynamic properties of plasma obtained by shock compression of initially liquid and gaseous (preliminarily compressed) nitrogen to pressures in the megabar range corresponding to highly ionized states of nitrogen plasma are presented. The results were obtained in the framework of the SAHA-N model, developed on the basis of a quasi-chemical representation, in which a multicomponent plasma consists of electrons, ions, and molecules interacting with each other. The approach makes it possible to obtain, along with the component composition, the equation of state and all thermodynamic functions, to analyze the influence of various plasma effects, including various types of interparticle interaction, electron degeneracy, and radiation effects, which are significant at high temperatures of shock-compressed plasma. Pronounced effects are noted corresponding to different regions of the phase diagram from a relatively flat (at low shock compression pressures) to an almost vertical course of the Hugoniot at high pressures. The results obtained are compared with previous and new VNIIEF experiments carried out using shock wave generators of various geometries. At the same time, the calculation results are compared with the data on the shock compression characteristics obtained within the framework of two theoretical approaches: the well-known SESAME EOS and the first-principles data (FPEOS, Driver & Militzer, 2021). The comparison showed a satisfactory agreement between our results and the experiment, the results obtained in the framework of direct numerical simulation (FPEOS), and a noticeable discrepancy with the results of calculations using the SESAME EOS.

**КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ГЕЛИЯ
И ДЕЙТЕРИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ
ПРИ ТЕРАПАСКАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЯХ**

*М.В. Жерноклетов, С.Ф. Маначкин, В.А. Раевский, Н.Б. Давыдов, А.О. Бликов,
С.Ю. Согрин, А.В. Рыжков, В.А. Аринин, Б.И. Ткаченко, А.И. Логвинов, А.В. Дегтярев,
В.А. Комраков, А.И. Давыдов, Н.Н. Анашкин, В.В. Хрусталева*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Сарова, Россия

Приводятся результаты четырех экспериментов по исследованию квазиизэнтропического сжатия газообразных гелия и дейтерия во взрывных сферических каскадных конструкциях. Гелий и дейтерий были предварительно статически сжаты. Регистрация процесса сжатия газа проведена рентгенографическим методом с использованием рентгеновского комплекса РГК-Б-Л РФЯЦ-ВНИИЭФ. Плотность газа определялась по полученному положению границ стальных оболочек, сжимающих газ. Эксперименты моделировались по одномерной газодинамической программе, в которой для изучаемых газов использовалось уравнение состояния Копышева - Хрусталева. Давления получены из расчетов, которые удовлетворительно описали динамику сжатия газов во всей совокупности экспериментов.

В первом эксперименте по сжатию гелия получено максимальное давление $P \approx 4,9$ ТПа при плотности $\rho_{\max} \approx 6.4$ г/см³, при этом степень сжатия $\delta = \rho/\rho_0 \approx 320$, во втором эксперименте $P_{\text{ср}} \approx 10.9$ ТПа, $\rho_{\max} \approx 10.3$ г/см³, степень сжатия $\delta \approx 470$. Для дейтерия эти параметры составляют: $P_{\text{ср}} \approx 3.4$ ТПа, $\rho_{\max} \approx 6.0$ г/см³, степень сжатия $\delta \approx 162$, в первом эксперименте, и $P_{\text{ср}} \approx 13.3$ ТПа, $\rho_{\max} \approx 11.4$ г/см³, степень сжатия $\delta \approx 520$ – во втором.

Показано, что в области давлений $\approx 11-13$ ТПа сжатия дейтерия и гелия в одинаковых конструкциях совпадают.

Полученные результаты этих четырех экспериментов сопоставлены с данными в терапаскальной области давлений, полученными во ВНИИЭФ в аналогичных экспериментах на других сферических конструкциях.

Сделан вывод, что в результате проведенных экспериментов получены данные по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия и гелия в терапаскальной области давлений, не противоречащие положениям расчетных по УРС РФЯЦ-ВНИИЭФ изэнтропам и согласующиеся с экспериментальными данными, представленными в других работах.

QUASI-ISENTROPIC COMPRESSION OF GASEOUS HELIUM AND DEUTERIUM IN SPHERICAL STRUCTURES AT TERRAPASCAL PRESSURES

*M.V. Zhernokletov, S.F. Manachkin, V.A. Raevskiy, N.B. Davydov, A.O. Blikov,
S.Yu. Sogrin, A.V. Ryzhkov, V.A. Arinin, B.I. Tkachenko, A.I. Logvinov,
A.V. Degtyarev, V.A. Komrakov, A.I. Davydov, N.N. Anashkin, V.V. Khrustalev*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The results of four experiments on quasi-isentropic compression of gaseous deuterium and helium using explosive spherical cascade devices are presented. Deuterium and helium were statically pre-compressed. The position of the boundaries of the steel shells that compressed the gas was determined on the results registered by the RGK-B-L X-ray complex (RFNC-VNIIEF). Gas density was calculated using this data. Experiments were simulated using one-dimensional gas-dynamic code. Kopyshv-Khrustalev equation of state was used to model the helium and deuterium. The above mentioned pressures P are the results of numerical simulations which describe the gas compression dynamics of all the experiments in proper way.

In the first experiment with helium the data are: pressure $P \approx 4.9$ TPa, ultimate density $\rho_{\max} \approx 6.4$ g/cm³, and compression ratio $\delta = \rho/\rho_0 \approx 320$; in the second experiment the data are: $P \approx 10.9$ TPa, $\rho_{\max} \approx 10.3$ g/cm³, $\delta \approx 470$. For deuterium the parameters of the first experiment are: $P \approx 3.4$ TPa, $\rho_{\max} \approx 6.0$ g/cm³, $\delta \approx 162$; for the second experiment the parameters are: $P \approx 13.3$ TPa, $\rho_{\max} \approx 11.4$ g/cm³, $\delta \approx 520$.

It was shown that the compression ratios of helium and deuterium in the pressure range $\approx 11 - 13$ TPa coincide with each other when identical spherical devices are used.

The presented data are compared with other VNIIEF's data received in a similar pressure range by using different spherical devices. The results of helium' and deuterium' quasi-isentropic compression in the terapascal pressure range are consistent with data of other studies and doesn't contradict the calculated isentropes of RFNC VNIIEF.

КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ГЕЛИЯ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 600 ГПа

*Г.С. Яндубаев, А.О. Бликков, М.А. Мочалов, В.А. Огородников, В.В. Ерастов,
А.А. Турков, В.А. Аринин, А.В. Рыжков, С.Е. Елфимов, Е.П. Волков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Ключевые слова: квазиизэнтропическая сжимаемость, теоретический плазменный фазовый переход, плазма гелия.

Представлены данные по квазиизэнтропической сжимаемости сильно-неидеальной плазмы гелия в области давлений 250-600 ГПа в устройствах цилиндрической геометрии. Тщательная проработка конструкций экспериментальных устройств позволила получить данные о сжатии неидеальной плазмы гелия до плотности ≈ 3 г/см³ при постоянной температуре ~ 20000 К.

Траекторию движения металлических оболочек, сжимающих плазму, регистрировали с помощью мощных импульсных источников рентгеновского

излучения с граничной энергией электронов до 60 МэВ. Значения плотности плазмы гелия определены по измеренному значению радиуса оболочек в момент их «остановки». Давление сжатой плазмы получено на основе газодинамических расчетов, учитывающих реальные характеристики экспериментальных устройств.

В настоящей работе не зарегистрирована аномалия экспериментальных данных в области давлений теоретически предполагаемого плазменного фазового перехода (ПФП) в гелии.

QUASI-ISENTROPIC COMPRESSION OF A NONIDEAL HELIUM PLASMA AT PRESSURE UP TO 600 GPa

*G.S. Yandubaev, A.O. Blikov, M.A. Mochalov, V.A. Ogorodnikov, V.V. Erastov,
A.A. Turkov, V.A. Arinin, A.V. Rizhkov, S.E. Elfimov, E.P. Volkov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

Key words: quasi-isentropic compressibility, theoretical plasma phase transition, helium plasma.

Data on the quasi-isentropic compressibility of a strongly nonideal helium plasma in the pressure range of 250-600 GPa in cylindrical geometry devices are presented. A careful study of the designs of the experimental devices made it possible to obtain data on the compression of a nonideal helium plasma to a density $\approx 3 \text{ g/cm}^3$ at a constant temperature of $\sim 20000 \text{ K}$.

The trajectory of motion of metal shells compressing the plasma was recorded using powerful pulsed X-ray sources with a boundary electron energy of up to 60 MeV. The values of the helium plasma density are determined from the measured value of the radius of the shells at the moment of their «stop». The pressure of the compressed plasma was obtained on the basis of gas-dynamic calculations, taking into account the real characteristics of the experimental devices.

In the present work, the anomaly was not recorded by experimental data in the pressure range of the theoretically assumed plasma phase transition (PPT) in helium.

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ГИДРИДОВ МЕТАЛЛОВ

Л.Ф. Гударенко, М.В. Жерноклетов, А.А. Какян

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В докладе анализируются результаты выполненных в разные годы во ВНИИЭФ экспериментальных исследований ударных адиабат гидридов и дейтеридов ванадия, кальция, магния, тантала, титана, циркония с различной концентрацией атомов водорода или дейтерия в диапазоне давлений 30÷220 ГПа. Для ряда соединений представляются новые данные.

При выборе формы уравнения состояния проведено сравнение описания экспериментов с расчетами для гидридов ванадия и тантала, выполненными с использованием широкодиапазонного уравнения состояния [1] и простого по форме

уравнения состояния Ми-Грюнайзена. При определении параметров простого УРС использовано отмеченное ранее в японских работах свойство одинаковой сжимаемости ($\rho_0 \cdot C_0^2$) металла и его соединений с изотопами водорода D и H . Приведенные в работе результаты свидетельствуют о том, что при расчетах ударных адиабат рассмотренных соединений данное свойство выполняется.

Сравнение показало, что в диапазоне исследованных давлений и плотностей не выявлено практически значимых отличий в расчетах ударных адиабат V и Ta и их соединений с водородом и дейтерием, полученных с использованием широкодиапазонного и простого УРС. Учитывая это, в дальнейшем все расчеты, результаты которых представлены в докладе, выполнены с использованием УРС в простой форме.

Результаты проведенных экспериментов служат базовым материалом для разработки уравнений состояния таких соединений и калибровки (верификации) методик расчета свойств веществ «из первых принципов». Однако сравнительно небольшой объем имеющейся экспериментальной и расчетной информации о термодинамических свойствах гидридов (дейтеридов) титана, циркония и тантала ограничивает разработку широкодиапазонных уравнений состояния этих соединений.

Литература

1. Д.Г. Гордеев, Л.Ф. Гударенко, А.А. Каякин, В.Г. Куделькин. Модель уравнения состояния металлов с эффективным учетом ионизации. Уравнения состояния Ta , W , Al , Be / ФГВ. 2013, т. 49, № 1. С. 106 - 120.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВВ В ФОРМЕ JWJ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО СХЕМЕ CYLINDER-TEST С СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКОЙ

*Е.Б. Смирнов, Д.В. Петров, А.Ю. Гармашев, А.К. Музыря,
К.М. Просвирнин, С.В. Шахмаев, Э.Р. Прууэл, К.А. Тен, А.О. Кашкаров*

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Процесс совершения работы над окружающей средой при детонации, а так же параметры ударной волны, создаваемой в окружающей среде, для каждого ВВ однозначно определяются уравнением состояния продуктов взрыва (ПВ). Уравнение состояния продуктов взрыва ВВ как правило определяется на основе изэнтропы ПВ, проходящей через точку Чепмена-Жуге. Для определения хода изэнтропы расширения ПВ проводят эксперименты по определению метательного действия ВВ. С этой целью широко используются эксперименты по торцевому метанию пластин продуктами взрыва ВВ, а также эксперименты по метанию цилиндрических оболочек, получившие название экспериментов по схеме Cylinder-test. Наличие металлической оболочки в эксперименте вносит искажение в процесс расширения продуктов взрыва ВВ, но является необходимым для осуществления оптической или электроконтактной диагностики.

В данной работе предложена редакция экспериментов по схеме Cylinder-test без металлической оболочки с диагностикой процесса расширения ПВ при помощи синхротронного излучения. Эксперименты выполнены на ускорительном комплексе ВЭПП-3 Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

На основании экспериментальных данных построена изэнтропа расширения продуктов взрыва ВВ для уравнения состояния ПВ в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL).

JONES-WILKINS-LEE EQUATION OF STATE FOR HE DETONATION PRODUCTS BASED ON CYLINDER-TEST EXPERIMENTS USING SYNCHROTRON DIAGNOSTICS

*E.B. Smirnov, D.V. Petrov, A.Yu. Garmashev, A.K. Muzyrya,
K.M. Prosvirnin, S.V. Shakhmaev, E.R. Prueel, K.A. Ten, A.O. Kashkarov*

RFC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The work done by detonation products on the environment in a process as well as shock-wave parameters generated within the environment for each HE are definitely defined by the equation of state for detonation products (DP). The equation of state for detonation products is generally determined based on the DP isentrope passing through the Chapman-Jouguet point. The experiments to determine the HE throwing action are conducted to establish the behavior of the DP expansion isentrope. For this purpose, common are the experiments on end-face throwing of plates under the effect of HE detonation products and the experiments on throwing cylindrical shells, so-called cylinder-test experiments. The presence of the metal shell in the experiment contributes to distortion of the HE detonation products expansion process but remains necessary to conduct optical and electric-contact diagnostics.

This work suggests the revised version of the cylinder-test experiments without metal shell involving diagnostics of detonation products expansion through synchrotronic radiation. The experiments were conducted using the accelerator complex VEPP-3 of Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS.

The experimental data were used to plot isentropic expansion of the HE detonation products for the Jones-Wilkins-Lee (JWL) equation of state for detonation products.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРС JWL ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ВВ БЖВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЦИЛИНДР - ТЕСТА

А.А. Селезнев¹, А.М. Исаков², П.А. Устимкин¹, С.П. Зоткин¹

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

²АО «Институт взрыва», г. Москва, Россия

Для описания процесса изоэнтропического расширения продуктов детонации (ПД) широко используется уравнение Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) [1-3]. Уравнение для изоэнтропы расширения ПД в форме JWL имеет вид

$$P_S(v) = A \cdot e^{-R_1 \cdot v} + B \cdot e^{-R_2 \cdot v} + C \cdot v^{-(1+\omega)}, \quad v = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность ВВ в исходном состоянии.

Для определения констант, входящих в уравнения (1), использовались параметры адиабаты Гюгонио в точке Чепмена-Жуге (CJ)

$$E_{CJ} = E_0 + \frac{1}{2} P_{CJ} \cdot (1 - v_{CJ}) \quad (2)$$

и экспериментальные данные цилиндр-теста для ВВ 6ЖВ (методика Т60М [4]). Для определения параметров уравнения изохотропии ПД в форме JWL использовалась система уравнений, предложенная в [2]

$$\begin{aligned} P_S(v_{CJ}) &= P_{CJ}, \\ E_S(v_{CJ}) &= E_{CJ}, \\ \left(\frac{dP_S}{dv}\right)_{v=v_{CJ}} &= -\rho_0 D^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_S(v_i) + E_G(v_i) = E_0, \quad i = 1, 2, 3.$$

Система уравнений (3) решалась относительно неизвестных A, B, C, R_1, R_2, E_0 . Параметр ω оценивался из соотношения

$$\omega = \gamma - 1, \quad (4)$$

где γ - показатель адиабаты при расширении ПД вблизи атмосферного давления. Кинетическая энергия цилиндрической оболочки и ПД (энергия Гарни) рассчитывалась по соотношению из работы [5]

$$E_G = \frac{W^2}{2} \left(\eta + \frac{1}{2} \right), \quad (5)$$

где W - радиальная скорость цилиндрической оболочки, η - отношение массы трубы к массе ВВ.

Верификация констант уравнения (1) для ВВ 6ЖВ проводилась при сравнении результатов численного решения задачи по разлету медной трубы с внутренним диаметром 60 мм и толщиной оболочки 6 мм с результатами цилиндрического теста по методике Т60М [4]. В таблице 1 приведены полученные таким образом константы для УРС JWL продуктов детонации ВВ 6ЖВ. На рисунке 1 приведено сравнение результатов экспериментов по измерению зависимости величины радиального смещения цилиндрической оболочки от времени [4] с результатами численного решения в программном комплексе «Master Professional» [6].

Таблица 1. Параметры УРС JWL для продуктов детонации аммонита 6ЖВ

ВВ	$\rho_0, \text{г/см}^3$	A, ГПа	B, ГПа	C, ГПа	R_1	R_2	ω
6ЖВ	1.017	82.432	14.985	0.347	4.485	1.951	0.129

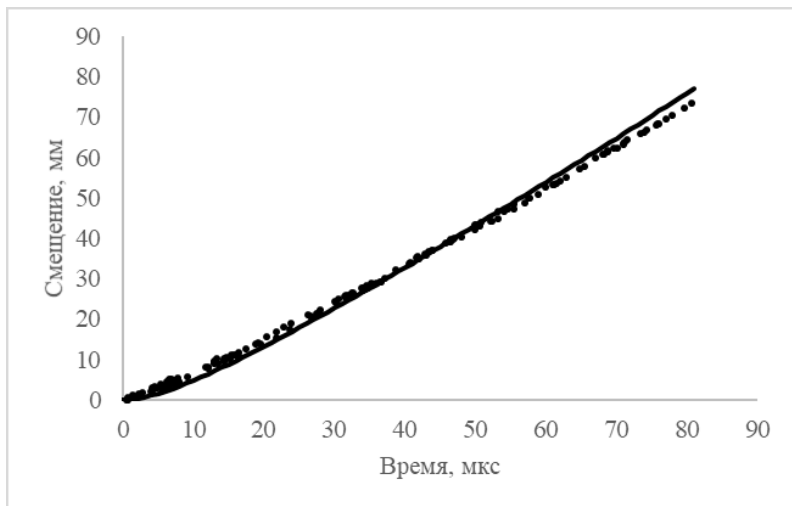


Рисунок 1. Зависимость величины радиального смещения цилиндрической оболочки от времени (линия – расчет, кружки – эксперимент [4])

Литература

1. Souers P. C., Wu Ben and Haselman L. C. Jr. Detonation Equation of State at LLNL, 1995, UCRL-ID119262 Rev 3, February 1, 1996.
2. Urtiew P.A., Hays B. Parametric Study of the Dynamic JWL-EOS for Detonation Products. ФГВ, 1991, №4, С.126-136.
3. Андреев С.Г., Шестаков М.А. Оценка работоспособности высокоплотных взрывчатых веществ с использованием уравнения состояния JWL. Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 07. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1401.html>.
4. Исаков А.М. Определение взрывчатых характеристик промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) по методу Т60М. Часть 1. Измерительный заряд Т60М 2020, 207 с. Отчет, АО «Институт взрыва», 2020.
5. Richard Catanach, Larry Hill, Herbert Hary, Ernest Aragon, Don Murk. Cylinder Test Specification. Los Alamos, LA-13643-MS, Issued: October 1999.
6. V. Rudenko, M.Chabourov, E.Tchekounov. Virtual physics laboratory of the package MASTER. Proc. International Conference “Physics Teacher Education beyond 2000”, Barselona, 2000.

DETERMINATION OF THE JWL EQUATION OF STATE PARAMETERS ON THE BASIS OF THE CYLINDER – TEST DATA FOR 6GV INDUSTRIAL EXPLOSIVE

A.A. Selezenev¹, A.M. Isakov², P.A. Ustimkin¹, S.P. Zotkin¹

¹RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

² JSC «Institute of explosion», Moscow, Russia

Jones - Wilkins-Li (JWL) equation of state is widely used [1-3] to describe an isentropic expansion of detonation products (DP). The JWL equation for isentropic expansion of detonation products has the form

$$P_S(v) = A \cdot e^{-R_1 \cdot v} + B \cdot e^{-R_2 \cdot v} + C \cdot v^{-(1+\omega)}, \quad v = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (1)$$

were ρ_0 is high explosive (HE) density at initial state.

The parameters of the Hugoniot at Chapman-Jouguet (CJ) state

$$E_{CJ} = E_0 + \frac{1}{2} P_{CJ} \cdot (1 - v_{CJ}) \quad (2)$$

and experimental data of the cylinder test for HE 6GV (T60M methods [4]) were used to determine the constants of JWL equations of state. The system of the equations obtained in the work [2] was used to determine the parameters of the isentropy equation of the detonation products at the JWL form

$$\begin{aligned} P_S(v_{CJ}) &= P_{CJ}, \\ E_S(v_{CJ}) &= E_{CJ}, \\ \left(\frac{d P_S}{d v}\right)_{v=v_{CJ}} &= -\rho_0 D^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_S(v_i) + E_G(v_i) = E_0, \quad i = 1, 2, 3.$$

The system of the equations (3) was solved to obtain A, B, C, R_1, R_2, E_0 unknown quantities, ω parameter has been estimated using ratio (4)

$$\omega = \gamma - 1, \quad (4)$$

were γ is adiabatic gamma of the detonation products near atmospheric pressure.

Kinetic energy of the cylindrical outer skin and detonation products (Garney energy) was calculated using formula from the work [5]

$$E_G = \frac{W^2}{2} \left(\eta + \frac{1}{2} \right), \quad (5)$$

were W is radial velocity of the cylindrical layer, η is the relation of the tube mass to the HE mass.

Verification of constants of the equation (1) for 6GV explosive was carried out by comparing of the numerical solution results of the task on radial expansion of the copper tube that has 60 mm internal diameter and 6 mm thickness with the results of the cylinder test using T60M method [4]. The constants of JWL equation of state for detonation products of 6GV HE obtained by such method are shown in the table 1. The comparison of the experimental results on measuring dependence of radial displacement of the cylindrical outer skin on time [4] with the results of the numerical simulation using "Master Professional" computer code [6] is shown in the figure 1.

Table 1. JWL equation of state parameters for detonation products of 6GV explosive

Explosive	$\rho_0, \text{g/cm}^3$	A, GPa	B, GPa	C, GPa	R_1	R_2	ω
6GV	1.017	82.432	14.985	0.347	4.485	1.951	0.129

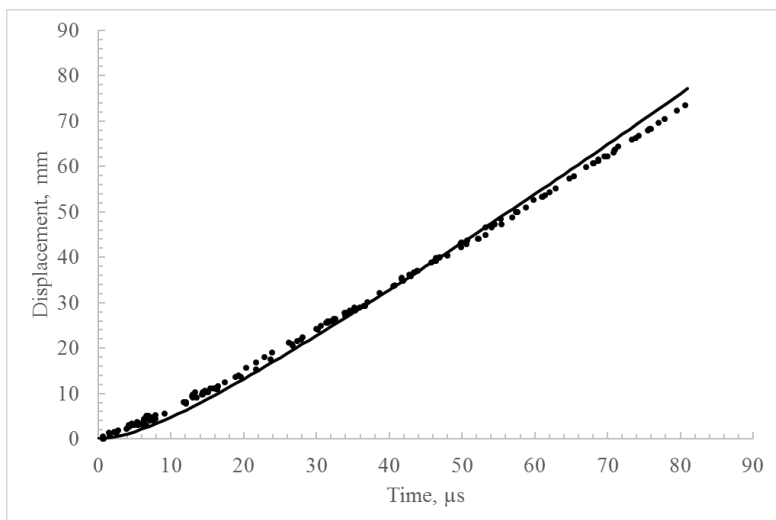


Figure 1. Value of radial displacement of cylindrical outer skin as a function of time (line – numerical simulation, circles – experiment [4])

References

1. Souers P. C., Wu Ben and Haselman L. C. Jr. Detonation Equation of State at LLNL, 1995, UCRL-ID119262 Rev 3, February 1, 1996.
2. Urtiew P.A., Hays B. Parametric Study of the Dynamic JWL-EOS for Detonation Products. ФГВ, 1991, №4, С.126-136.
3. Andreyev S. G., Shestakov M.A. Estimation of performance of high density explosives use of the JWL equation of state. Engineering magazine: science and innovations, 2015, issue 07. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1401.html>.
4. Isakov A.M. Determination of explosive characteristics of the industrial explosives (IE) use of the T60M method. Part 1. Measuring charge T60M 2020, 207 p. Report, JSC “Institute of explosion”, 2020.
5. Richard Catanach, Larry Hill, Herbert Hary, Ernest Aragon, Don Murk. Cylinder Test Specification. Los Alamos, LA-13643-MS, Issued: October 1999.
6. V. Rudenko, M.Chabourov, E.Tchekhouov. Virtual physics laboratory of the package MASTER. Proc. International Conference “Physics Teacher Education beyond 2000”, Barselona, 2000

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИЗОЭНТРОПИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ПО ДАННЫМ ЦИЛИНДР-ТЕСТА: АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ

А.И. Ахметзянов¹, В.А. Вирченко¹, А.А. Казак¹, С.В. Шахмаев²

¹ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия
²РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Известны три основных способа расчета изоэнтроп продуктов детонации (ПД) по экспериментальным данным методики цилиндр-тест:

- прямое численное моделирование эксперимента [1];

- приближенный метод, предложенный Тейлором [2,3];
- метод, использованный Л.В. Загускиным и сотрудниками [4].

Проведены расчеты по всем трём методам на примере экспериментальных данных цилиндр-теста для состава Б [5].

Анализ результатов расчётов показал следующее:

- первый метод позволяет с максимально доступной точностью рассчитать изоэнтопу ПД, но предполагает использование специальных компьютерных программ и больших ресурсов машинного времени;
- второй метод показал зависимость результата расчета от формы аппроксимации экспериментальных данных и относительную ошибку расчета в области низких давлений до 50% по сравнению с первым методом;
- третий метод оказался удачной комбинацией высокой точности расчета, приближающейся к первому методу, с его доступностью.

Литература

1. А.В. Свидинский, М.В. Ширшова, Применение методики PDV для калибровки параметров моделей ВВ в численных расчетах, \ Тезисы XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву,- 2021-,с.483-484.
2. P.M. Elek, et al. Determination of detonation products equation of state from cylinder test: analytical model and numerical analysis. \ THERMAL SCIENCE,- 2015,- v19, №1, pp. 35-48.
3. B.D. Sutton, J.W. Ferguson and A.N. Hodgson, An analytical approach to obtaining JWL parameters from cylinder tests, AIP Conference Proceedings 1793, 030032 (2017) 5p.; <https://doi.org/10.1063/1.4971490>, Published Online: 13 January 2017.
4. В.Л. Загускин и др. Метод расчета изоэнтроп продуктов детонации. \ IV Все-союзное совещание по детонации, доклады, 1989, т.1. ОИХФ АН СССР, Черно-голова. С. 244-250.
5. E. Lee, H. Horning, and J. Kury, Adiabatic expansion of high explosive detonation products, \Tech. Rep. UCRL-50422, Lawrence Radiation Laboratory,- 1968,- Livermore, California.

СТРУКТУРНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛ-ГРАФЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

Е.В. Шорохов, И.Г. Бродова, И.В. Хомская, С.В. Разоренов, Л.А. Елишина

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия
Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

Изучены структура и механические свойства металлматричных композитов на основе алюминиевых сплавов разного состава (АА -3003, АА -5154 и Al) с графеном (0.1 вес. %), «in-situ» синтезированных под слоем солевого расплава, в зависимости от химического состава и размера зерна матрицы. Химический состав синтезированных композитов, производили спектральным анализом на спектрометре ICPE-9000 SHIMADZU с индуктивно-связанной плазмой (погрешность ± 0.005 мас.%). Аттестацию углеродных включений в композитах проводили энергодисперсионным анализом на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta- 200 и методом рамановской спектроскопии, используя спектрометр Renishawu-1000. Обработка и анализ спектров выполнены с помощью встроенного комплекса программного обеспечения Wige-30 и специализированного программного пакета Fityk 0.9.8. Для

сравнения закономерностей структурообразования композитов с разным размером зерна были исследованы алюмоматричные композиты трёх составов в литом крупнозернистом (КК) и деформированных мелко-зернистом (МК, размер зерна < 1 мм) и субмикроструктурном (СМК, размер зерна < 1 мкм) состояниях. Деформация композитов осуществлялась методами Гопкинсона – Кольского и динамического канально-углового прессования (ДКУП). Измерены твёрдость композитов и динамические механические свойства в интервале квазистатических скоростей деформации от $\dot{\epsilon} = 1.8 - 4.7 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$. Проведены измерения свойств СМК композитов, (динамического предела упругости σ_{HEL} и динамического предела текучести Y) при ударно-волновом нагружении с $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ c}^{-1}$. Структурные исследования показали, что графен не является инокулятором и не влияет на размер зерна литых алюмоматричных композитов. Твёрдость литых композитов зависит от химического состава матрицы и повышается на 5-10% относительно неармированных Al сплавов. Измельчение структуры композитов при динамическом сжатии относительно литого состояния (до 100-50 мкм) приводит к незначительным изменениям твёрдости и микротвёрдости матрицы. Твёрдость МК композита AlGn возрастает на 25%, а микротвёрдость матрицы МК композита AlMgGn - не более, чем на 15-20%. Переход от КК к СМК состоянию вызывает резкое повышение твёрдости композитов: в 1,6 раза в композитах на основе Al-Mn сплава и в 2.6 раза в композите AlGn. При формировании деформированной МК и СМК структуры нанопластины графена дробятся, изгибаются и располагаются преимущественно по границам зерен-субзерен, обеспечивая дополнительный деформационный механизм упрочнения за счёт взаимодействия с дислокациями. В легированных композитах они могут располагаться также на фрагментах хрупких кристаллов интерметаллидов. Установлена связь упруго-пластических свойства алюмоматричных композитов от размера зерна и химического состава матрицы и показано, что переход от КК к СМК структуре повышает их в среднем в 1.5 раза. Сравнение упруго-пластических свойств СМК композитов со свойствами СМК неармированных материалов показало, что добавка графена в количестве 0.1% упрочняет материал и вызывает рост σ_{HEL} и Y - на 30-50 % в зависимости от химического состава матрицы. Повышение упруго-пластических характеристик при легировании Al матрицы сопровождается снижением откольной прочности на 10-20 %, так как твердые частицы графена являются концентраторами напряжений при динамическом растяжении в условиях откола. Величина откольной прочности для легированных графеном сплавов составляет ~1.5 ГПа. Доказано, что упрочняющий эффект графена увеличивается с уменьшением размера зерна композитов. Предложены механизмы упрочнения алюмоматричных композитов, армированных графеном.

Изучены особенности формирования СМК структуры и динамических механических свойств меди, легированной микродобавкой 0.02 мас.% графена, полученной высокоскоростной деформацией методом ДКУП. Ранее показано, что отличительной особенностью метода ДКУП, является комбинированное воздействие высокоскоростной (10^4 - 10^5 c^{-1}) деформации сдвига, ударно-волновой деформации сжатия и температуры. Формирование при ДКУП неравновесной СМК структуры в медь-циркониевом композите, происходит в результате процессов фрагментации и динамической рекристаллизации. Динамические свойства СМК сплавов на основе меди исследованы в условиях ударного сжатия интенсивностью 4.7-7.3 ГПа и скоростью деформации $(0.9-2.1) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Показано, что ДКУП ($n=1$) композита на основе меди увеличивает σ_{HEL} и Y в 4,9. раза и в 1.7 раза откольную прочность по сравнению с КК состоянием.

Полученные экспериментальные данные о характере откольного разрушения композитов с СМК структурой, сформированной при ДКУП, и оценка влияния дисперсности и дефектности структуры на сопротивление высокоскоростному деформированию при субмикросекундных длительностях нагрузки позволяют прогнозировать поведение подобных материалов в экстремальных условиях их эксплуатации.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ в по теме «Структура» №122021000033-2 и № АААА-А19-119071190040-5.

STRUCTURAL AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF METAL-GRAPHENE COMPOSITES IN SHOCK WAVES

E.V. Shorokhov, I.G. Brodova, I.V. Khomskaya, S.V. Razorenov, L.A. Yolshina

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

Mikheev Institute of Metal Physics, UB of the RAS, Ekaterinburg, Russia

Institute of Problems of Chemical Physics of the RAS, Chernogolovka, Russia

The structure and mechanical properties of metal matrix composites based on aluminum and its alloys of different composition (AA-3003, AA-5154) with graphene (0.1 wt.%) synthesized *in situ* under a layer of molten salts are investigated as a function of chemical composition and grain size of the matrix. The chemical composition of the materials obtained was studied by spectroscopic analysis on ICPE-9000 SHIMADZU spectrometer (± 0.005 wt.% uncertainty). Carbon inclusions in the composites were analysed by energy dispersive spectroscopy using a Quanta-200 scanning electron microscope and by Raman spectroscopy on a Renishaw U1000 instrument. The spectra were processed and analysed with the help of the built-in Wire-30 software package and Fityk 0.9.8 data analysis application. Aluminum matrix composites of three compositions were studied in as-cast coarse-grained (CG), deformed fine-grained (FG, grain size < 1 mm) and deformed submicrocrystalline (SMK, grain size < 1 μm) states in order to compare structural characteristics of composites with different grain size. The composites were subjected to deformation in a split Hopkinson-Kolsky bar and by dynamic channel angular pressing. The hardness and dynamic mechanical properties of the composites are measured at the quasi-static strain rate from $\dot{\epsilon} = 1.8 - 4.7 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. The properties of SMC composites (dynamic elastic limit σ_{HEL} and dynamic yield strength Y) under shock-wave loading with $\dot{\epsilon} > 10^5 \text{ s}^{-1}$ were measured. Structural studies have shown, Graphene is not an inoculant and does not affect the grain size of the as-cast aluminum matrix composites. The hardness of the as-cast composites depends on the chemical composition of the matrix and increases by 5-10 % compared to the unreinforced Al alloys. Refinement of the structure relative to the as-cast state induced by dynamic compression (down to 100 - 50 μm in FG state) leads to minor changes in the hardness and microhardness of the matrix. The hardness of FG AlGr composite increases by 25%, while the microhardness of FG AlMgGr composite matrix increases by no more than 15-20%. It is found that grain refinement to SMC state induces a sharp increase in the hardness of the composites with various compositions (by a factor of 1.6-2.6). When FG and SMC deformed structure is formed, graphene nanoplatelets break up, bend, and primarily occupy the position along the grain-subgrain boundaries, providing

an additional deformation mechanism of reinforcement due to a contact with the dislocations, but the graphene may reside on the surface of brittle intermetallics in the alloyed composites. A correlation of the elastic-plastic properties of aluminum matrix composites with the grain size and the chemical composition of the matrix is established. A transition from CG to SMC structure is shown to improve the elastic-plastic properties by a factor of 1.5 on average. A comparison of the elastic-plastic properties of SMC composites with the properties of SMC unreinforced materials has shown that a 0.1% addition of graphene strengthens the material and increases σ_{HEL} and Y by 30-50 % depending on the chemical composition of the matrix. The enhancement of elastic-plastic properties induced by alloying the Al matrix is accompanied by a 10-20 % decrease in the shear strength. Its value for graphene-doped samples is ~ 1.5 GPa and tends to slightly decrease with increasing graphene concentration, since the graphene solid particles are stress concentrators during dynamic tension under spall conditions. It is proved that the reinforcing effect of graphene increases with decreasing grain size of the matrix. Mechanisms of reinforcing aluminum matrix composites with graphene are proposed. The features of the formation of the SMC structure and the dynamic mechanical properties of copper doped with a microadditive of 0.02 wt % graphene obtained by high-speed deformation by the DCAP method are studied. Previously, it was shown that a distinctive feature of the DCAP method is the combined effect of high-speed (10^4 – 10^5 s $^{-1}$) shear deformation, shock-wave compression deformation, and temperature. The formation of a nonequilibrium SMC structure in a copper-graphene composite during DCAP occurs because of fragmentation and dynamic recrystallization processes. The dynamic properties of SMC alloys based on copper were studied under conditions of shock compression with an intensity of 4.7-7.3 GPa and a strain rate of $(0.9$ - $2.1) \times 10^5$ s $^{-1}$. It is shown that the DCAP ($n=1$) of the copper-based composite increases σ_{HEL} and Y by 4.9. times and 1.7 times the spall strength compared to the CG state. The obtained experimental data on the nature of spall fracture of composites with an SMC structure formed during DCAP and an assessment of the effect of structure dispersion and imperfection on the resistance to high-speed deformation at submicrosecond loading times will make it possible to predict the behavior of such materials under extreme operating conditions.

The results were obtained within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme “Структура” 122021000033-2, and № АААА-А19-119071190040.

УТОЧНЕННАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА УГЛЕРОДА И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В АЛМАЗЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

М.Ю. Попов, В.Д. Чуркин, Б.А. Кульницкий, В.Д. Бланк

ФГБНУ ТИСНУМ, Москва, г. Троицк, Россия

Ранее нами была предложена уточненная фазовая диаграмма углерода, включающая область нестабильности алмаза в диапазоне давлений от 55 до 115 ГПа при температуре 300 К, которая сужается до 55-75 ГПа при температурах около 5000 К [1, 2]. Экспериментально доказано, что в этой области формирование алмаза прекращается, а уже сформировавшиеся алмазы переходят в более плотные углеродные луковичные структуры фуллеренового типа (состоящие из

пятиугольников и шестиугольников), оболочки которых связаны sp^3 связями. Число слоев в этих структурах уменьшается с ростом температуры от ~ 10 при 300 К до 2-5 при 2400 К. Для сравнения, луковичные структуры, сформировавшиеся при давлениях ниже 50 ГПа, образованы оболочками графенового типа, состоящими только из шестиугольников и не имеют межслоевых sp^3 связей.

Формирование луковичных структур фуллеренового типа может являться репером давлений и температур. Их образование в процессе взаимодействия с алмазом сфокусированного на глубину 5 мкм лазерного импульса (100 нс, длина волны 532 нм, мощность импульса варьировалась от 0 до 1,5 мДж, интенсивность до 20 ГВт/см²) указывает на давление и температуру около 70 ГПа и 2400 К соответственно [3]. Размер полости, созданной в алмазе лазерным воздействием, описывается моделью образования взрывной полости после взрыва внутри твердого тела (камуфлетный взрыв, объем полости пропорционален энергии с учетом механических характеристик алмаза). При этом для формирования такой полости за счет пластической деформации алмаза требуется уровень напряжений около 90 ГПа, что согласуется с давлением формирования луковичных структур фуллеренового типа. Показано, что в таком режиме осуществляется эффективная резка алмаза лазером [3].

Литература

1. V. D. Blank, et al. *Nanotechnology* 29, 115603 (2018)
2. Popov, et al. *Nanotechnology* 31, 315602 (2020)
3. Popov, et al. *Diamond and Related Materials* 113, 108281 (2021)

REFINED CARBON PHASE DIAGRAM AND PHASE TRANSITIONS IN DIAMOND WHEN INTERACTING WITH PULSED LASER RADIATION

M.Yu. Popov, V.D. Churkin, B.A. Kulnitskiy, V.D. Blank

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Troitsk, Moscow, Russia

Earlier, we proposed a refined carbon phase diagram, including the diamond instability region in the pressure range from 55 to 115 GPa at a temperature of 300 K, which narrows to 55-75 GPa at temperatures of about 5000 K [1, 2]. It has been experimentally proved that in this region, diamond formation stops, and already formed diamonds turn into more dense carbon onions structures of fullerene type (consisting of pentagons and hexagons), the shells of which are connected by sp^3 bonds. The number of layers in these structures decreases with increasing temperature from ~ 10 at 300 K to 2-5 at 2400 K. For comparison, onions structures formed at pressures below 50 GPa are formed by graphene-type shells consisting only of hexagons and do not have interlayer sp^3 bonds.

The formation of onions fullerene-type structures can be a reference point for pressures and temperatures. Their formation during interaction with diamond of a laser pulse focused to a depth of 5 microns (100 ns, wavelength 532 nm, pulse power varied from 0 to 1.5 mJ, intensity up to 20 GW/cm²) indicates a pressure and temperature of about 70 GPa and 2400 K, respectively [3]. The size of the cavity created in the diamond by laser action is described by the model of the formation of an explosive cavity after an explosion inside a solid (the volume of the cavity is proportional to the energy taking into account the mechanical characteristics of the diamond). At the same time, for the formation of such

cavity due to plastic deformation of the diamond, a stress level of about 90 GPa is required, which is consistent with the pressure of the formation of onions fullerene-type structures. It is shown that in this mode, effective laser cutting of diamond is carried out [3].

References

1. V. D. Blank, et al. *Nanotechnology* 29, 115603 (2018)
2. Popov, et al. *Nanotechnology* 31, 315602 (2020)
3. Popov, et al. *Diamond and Related Materials* 113, 108281 (2021)

УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ПЕНОБОРА И ПЕНОДИФЛОНА В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 7-25 ГПа

*Ф.И. Тарасов, А.Ю. Николаев, Р.Н. Канунников,
А.С. Лобачёв, В.Е. Симонов, Я.М. Горопашный*

РФЯЦ-ВНИИТФ, и/ Снежинск, Россия

Работа посвящена исследованию ударной сжимаемости пенобора и пенодифлона. В работе представлены постановка и полученные результаты взрывных экспериментов по определению скорости ударной волны в образцах из пенобора и пенодифлона в диапазоне давлений 7-25 ГПа. Начальная плотность образцов из пенобора составляла $0,65 \text{ г/см}^3$, образцов из пенодифлона – от $0,65$ до $0,85 \text{ г/см}^3$.

Для определения скорости ударной волны в образцах применялась электроконтактная методика. В экспериментах использовалось от 6 до 8 пар датчиков в зависимости от габаритов образца. Точки ударных адиабат материалов определялись по методу торможения.

Для создания ударных волн в образцах применялись взрывные нагружающие устройства на основе мощных взрывчатых веществ с ударниками из стали. Скорости полёта ударников варьировались в диапазоне от $2,7$ до $5,7 \text{ км/с}$.

SHOCK COMPRESSIBILITY OF FOAM BORON AND FOAM DIFLON WITHIN THE PRESSURE RANGE OF 7 TO 25 GPa

*F.I. Tarasov, A.Yu. Nikolaev, R.N. Kanunnikov,
A.S. Lobachyov, V.E. Simonov, Ya.M. Goropashnyy*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The paper is devoted to the investigation into shock compressibility of foam boron and foam diflon. The experimental setup is presented and the results of explosive experiments are given. The experiments aimed at determining shock velocity in specimens of foam boron and foam diflon within the pressure range of 7 to 25 GPa. The initial density of specimens was 0.65 g/cm^3 for foam boron and from 0.65 to 0.85 g/cm^3 for foam diflon.

The electric contact technique was used to determine shock velocity in the specimens. In the experiments, 6 to 8 pairs of gauges were applied depending on specimen size. Hugoniot points for the materials were determined through retardation method.

Explosive loading devices based on high-power explosives with steel impactors were used for shock wave generation. Impactor flight velocities varied from 2.7 to 5.7 km/s.

РЕГИСТРАЦИЯ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В СТАЛЯХ СтЗПС, 12Х18Н10Т И АК-33 ПРИ ДАВЛЕНИИ УДАРНОГО СЖАТИЯ ДО 25 ГПа

А.П. Куруленко, Д.Н. Замотаев, А.М. Ивин, Д.В. Крючков, И.А. Терешкина, И.Р. Трунин, Д.А. Баженов, А.Е. Сафронов, Т.О.Скляднева, А.Н. Баландина

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В докладе приведены результаты экспериментальной регистрации скорости движения свободной поверхности $W(t)$ образцов из сталей СтЗПС, 12Х18Н10Т и АК-33, нагруженных стальным ударником со скоростями $W_{уд}=600$ м/с и 1200 м/с.

Разгон стального ударника толщиной 2 мм производился в стволе пороховой нагружающей установке калибром 100 мм. Ударник тормозился о смещенную сборку с тремя встроенными в нее образцами из исследуемого материала. Толщины образцов составляли 1,4 и 6 мм.

В такой постановке экспериментов были зарегистрированы: упругий предвестник и его затухание по толщине образца, откольный импульс и α - ϵ - фазовый переход в стали СтЗПС и АК-33, и его отсутствие в стали 12Х18Н10Т.

На рисунке 1, в качестве примера, приведены зависимости $W(t)$ образцов толщиной 4 мм из исследуемых сталей, нагружение которых проводилось со скоростью 600 и 1200 м/с.

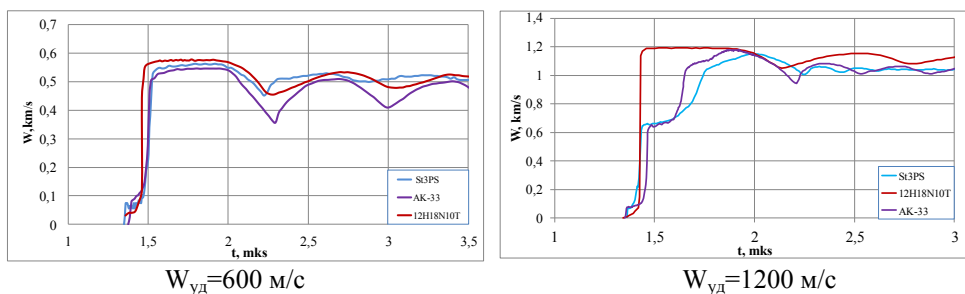


Рисунок 2. Временные зависимости скорости движения свободных поверхностей образцов

В экспериментах с $W_{уд}=600$ м/с давление ударного сжатия составило ~ 12 ГПа, что меньше давления фазового перехода в железе, поэтому на зависимостях $W(t)$ не регистрируется фазовый переход. Для $W_{уд}=1200$ м/с давление ударного сжатия составило ~ 26 ГПа и на зависимостях $W(t)$ видна характерная “ступенька” на фронте волновой скорости. Исключение составляет сталь 12Х18Н10Т.

Полученные результаты подтверждают известные данные по фазовому переходу в железе [1,2] и сталях [3]. Предложенный и отработанный в данной работе подход, включающий в себя высокоскоростной разгон ударника в стволе нагружающей установке пушечного типа, одновременное нагружение в одном опыте трех образцов различной толщины или разных материалов, регистрацию скорости движения свободной поверхности с помощью методики непрерывной доплеровской

диагностики на основе оптической схемы PDV, позволяет применить его к исследованию поведения различных материалов, в том числе испытывающих фазовые превращения в относительно низкой области нагружения.

Литература

1. Bancroft D., Peterson E.L., Minshall S. Polymorphism of iron at high pressure / J.Appl.Phys. - 1956. - V.27. - P.291-298.
2. Barker L.M., Hollenbach R.E. Shock wave study of the $\alpha \rightarrow \epsilon$ phase transition in iron / J.Appl.Phys. - 1974. - V.45. - # 1. - P.291-298.
3. Козлов Е.А., Бричиков С.А., Вильданов В.Г. и др. Откольные и сдвиговые разрушения в сферически сходящихся оболочках из железа и сталей. Измерение энергий и остаточных деформаций./ Деформация и разрушение материалов №11, 2008, с. 2-10.

PHASE TRANSITION RECORDING IN St3PS, 12H18N10T AND AK-33 STEELS AT SHOCK COMPRESSION PRESSURE UP TO 25GPa

*A.P. Kurulenko, D.N. Zamotaev, D.V. Kryuchkov, I.A. Tereshkina, I.R. Trunin,
D.A. Bazhenov, A.E. Safromov, T.O. Sklyadneva, A.N. Balandina*

RFNC-VNIIEF Sarov, Russia

The report presents the results of experimental recording of the free surface velocity $W(t)$ of specimens made of St3PS, 12H18N10T and AK-33 steels loaded with a steel impactor with velocities of $W=600$ m/s and 1200 m/s

The acceleration of a steel impactor 2 mm thick was carried out in the barrel of a powder loading installation with a caliber of 100 mm. The impactor was decelerated on a mixed assembly with three samples built into it from the material under study. The sample thicknesses were 1,4 and 6 mm.

In this setup of experiments, the following was recorded: an elastic precursor and its attenuation over the thickness of the sample, a spall pulse and α - ϵ - phase transition in steel St3PS and AK-33, and its absence in steel 12H18N10T.

Figure 1, as an example, shows the dependences $W(t)$ of samples 4 mm thick from the studied steels, whose loading was carried out at a speed of 600 and 1200 m/s.

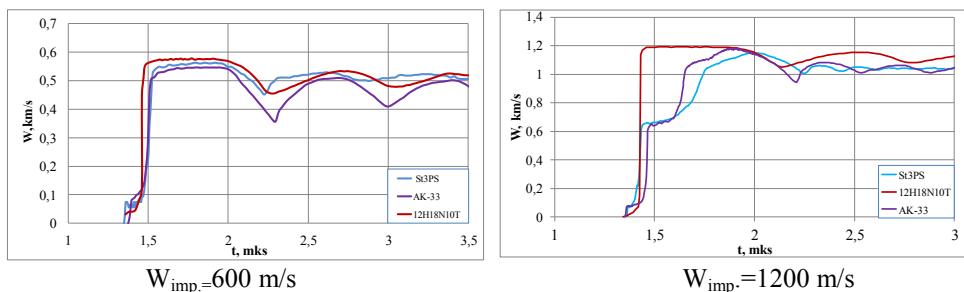


Figure 2. Time dependence of the rate of motion of the free surfaces of the samples

In the experiments with $W=600$ m/s, the pressure of shock compression is 12 GPa, which is less than the phase transition pressure in iron, therefore, no phase transition was formed on the dependences of shock compression $W(t)$ at a velocity of 1200 m/s, the shock

compression pressure was 26 GPa and in $W(t)$ dependences there is a characteristic “step” at the wave velocity front. The exception is steel 12H18N10T.

The results obtained confirm the known data on the phase transition in iron [1, 2] and steels [3]. The approach proposed and tested in this work, which includes high-speed acceleration of the impactor in the barrel of a cannon-type loading installation, simultaneous loading of three samples having different thicknesses or different materials in one experiment, recording of the rate of motion of its own surface using the method of continuous Doppler diagnostics based on the optical scheme of the PDV, makes it possible to apply it to the study of the behavior of various materials, including those undergoing phase transformations in a relatively low loading region.

References

1. Bancroft D., Peterson E.L., Minshall S. Polymorphism of iron at high pressure / J.Appl.Phys. - 1956. - V.27. - P.291-298.
2. Barker L.M., Hollenbach R.E. Shock wave study of the $\alpha \rightarrow \epsilon$ phase transition in iron / J.Appl.Phys. - 1974. - V.45. - # 1. - P.291-298.
3. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Vildanov V.G. Spall and shear fractures in spherically converging iron and steel shells. Measurement of energies and residual deformations./ Deformation and destruction of materials #11, 2008, p. 2-10

ОПИСАНИЕ УДАРНОГО СЖАТИЯ НЕКОТОРЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ

М.А. Бирюкова^{1,2}, Д.В. Петров¹, Ю.М. Ковалев², Е.Б. Смирнов^{1,2}

¹РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

Процессы, протекающие при действии ударных волн на энергетические материалы, представляют большой, как практический, так и теоретический интерес и являются объектом многочисленных исследований [1]. В данных исследованиях одной из актуальных проблем является проблема ударно-волнового разогрева энергетического материала. Это связано с тем, что кинетика ударно-волнового инициирования детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) существенным образом зависит от температуры, возникающей после прохождения ударной волны. Поэтому разработка математических моделей уравнений состояния для определения ударных адиабат и температур ударно-волнового сжатия в задачах инициирования детонации является особенно актуальной. Для ВВ построить ударную адиабату в широком диапазоне давлений не представляется возможным, так как при ударно-волновом сжатии возможно инициирование детонации. В настоящее время предлагаются различные способы восстановления ударных адиабат ВВ на основании экспериментальных данных по изотермическому сжатию, например в работе [2]. В данной работе был предложен алгоритм построения ударных адиабат ТАТБ и ТЭНа на основании экспериментальных данных по их изотермическому сжатию в рамках уравнения состояния в форме Ми-Грюнайзена, который отличается от подхода, описанного в работе [2], тем что при пересчете значений давлений с изотермического сжатия на ударно-волновое применяются только те параметры, которые могут быть получены в результате непосредственных измерений.

Для определения значений давлений ударного сжатия в данной работе были использованы экспериментальные данные, приведенные в работах [3,4] для ТАТБ и работе [5] для ТЭНа. В результате проведенных расчетов была получена табличная зависимость давления ударного сжатия от степени сжатия.

При построении ударных адиабат кроме экспериментальных данных были апробированы полумпирические уравнения состояния [6,7], хорошо описывающие экспериментальные данные по изотермическому сжатию [3-5]. Расчет давлений ударного сжатия был проведен по предложенному в данной работе алгоритму пересчета. Данные проведенных расчетов показали, что давления ударного сжатия, полученные путем пересчета с помощью экспериментальных данных [3,5] и уравнений состояния [6,7], совпадают в пределах диапазона погрешности определения степени сжатия [3,5]. Следовательно, уравнения состояния [6,7] могут быть применены при описании холодной составляющей более общих уравнений состояния, определяющих параметры ударно-волнового сжатия. Тепловая составляющая уравнений состояния определялась в соответствии с рекомендациями работы [8], что позволило рассчитать температуры ударного сжатия.

На основании результатов, полученных в данной работе, можно делать следующие выводы:

1. Предложен алгоритм построения ударных адиабат ВВ на основании экспериментальных данных по изотермическому сжатию;
2. Построены и апробированы уравнения состояния, позволяющие проводить расчеты температуры ударного сжатия ВВ.

Литература

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1966. – 408 с.
2. Олинджер Б., Кейди Г. Ударная сжимаемость ТЭНА, ТАТБ, CO₂ и H₂O при давлениях до 10 ГПа, рассчитанная на основании экспериментальных данных по гидростатическому сжатию//Детонация и взрывчатые вещества –М.:Мир, 1981. -С.203
3. Stevens L.L., Velisavljevic N., Hooks D.E., Dattelbaum D.M. Hydrostatic Compression Curve for Triamino - Trinitrobenzene Determined to 13.0 GPa with Powder X- Ray Diffraction // Propellants, Explos. Pyrotech. – 2008 – v. 33, № 4. – P. 286 – 295.
4. Plisson Th., Pineau N., Weck G., Bruneton E., Guignot N., Loubeyre P. Equation of state of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene up to 66 GPa // J. Appl. Phys. –2017. –Vol.122. P. 235901.
5. Olinger B., Halleck P.M., Cady H.H. The isothermal linear and volume compression of pentaerythritol tetranitrate (PETN) to 10 GPa (100 kbar) and the calculated shock compression // J. Chem. Phys. – 1975. – Vol. 62, № 11. – P. 4480 – 4483.
7. Ковалев Ю.М. Определение температурной зависимости изобарического коэффициента объемного расширения для некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений //ИФЖ - 2018. - Т. 91, № 6. - С. 1653-1663.
8. Ковалев Ю.М. Уравнения состояния для описания изотермического сжатия некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений // ИФЖ - 2020. - Т. 93, № 1. - С. 229-239.
9. Ковалев Ю.М., Куропатенко В.Ф. Определение температурной зависимости теплоемкости для некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений // ИФЖ. 2018. Т. 91. № 2. С. 297-306.

**DESCRIPTION OF SHOCK COMPRESSION OF CERTAIN
MOLECULAR CRYSTALS**

M.A. Biryukova^{1,2}, D.V. Petrov¹, Yu.M. Kovalev², E.B. Smirnov^{1,2}

¹RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

The processes in shocked energetic materials represent a great theoretic and practical interest. They have also been the subject of a huge number of studies [1]. Shock-wave heating of energetic materials is one of the relevant issues in these studies. The reason is that kinetics of the shock detonation initiation in condensed explosive is highly dependent on the temperature following the shock wave. Development of mathematical models for the equations of state (EOS) to calculate shock Hugoniot and shock compression in the detonation initiation problems is, thus, of great importance. A wide-pressure-range shock Hugoniot for HE can hardly be constructed, as detonation might initiate under shock compression. In the recently proposed methods, for example the one described in [2], isothermal compression experimental data is used to recover the HE shock Hugoniot. In this paper, the algorithm for constructing shock Hugoniot for TATB and PETN using the experimental data on their isothermal compression based on the Mie-Grüneisen EOS has been proposed. In our approach, in contrast to the one presented in [2], parameters of direct measurements can only be used to convert the isothermal compression pressure into the shock compression one.

In the present study, the experimental results for TATB from [3,4] and PETN from [5] were used to calculate the shock-compression pressure. Table dependence of the shock-compression pressure on the compression ratio was obtained. In addition to the experimental data, semiempirical EOSs [6,7], which describe well experimental data on isothermal compression [3-5], were approved when constructing shock Hugoniot. The shock-compression pressure was calculated with the recalculation algorithm proposed in this paper. The calculations showed that the shock-compression pressures recalculated, using the experimental data [3,5] and EOSs [6,7], (agree) within the range of the compression ratio error [3,5]. Consequently, the EOSs [6,7] can be applied when describing the cold component of more general EOSs defining shock compression parameters. The thermal component of the EOSs was determined as recommended in [8]. This enabled the calculation of the shock-compression temperature.

The results of this study allow us to make the following conclusions:

1. Algorithm for constructing the HE shock Hugoniot using the isothermal compression data has been proposed;
2. EOSs to calculate the HE shock compression temperatures have been constructed and approved.

References

1. Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. Shock waves in condensed-states. M.: Yanus-K, 1966. – 408 p.
2. Olinger B., Cady H.H. The Hydrostatic Compression of Explosives and Detonation Products to 10 GPa (100 kbars) and their Calculated Shock Compression: Results for PETN, TATB, CO₂ и H₂O (in Russian)//Detonation and high explosives –M.: Mir, 1981. 203 p.
3. Stevens L.L., Velisavljevic N., Hooks D.E., Dattelbaum D.M. Hydrostatic Compression Curve for Triamino - Trinitrobenzene Determined to 13.0 GPa with Powder X- Ray Diffraction // Propellants, Explos. Pyrotech. – 2008 – Vol. 33, № 4. – pp. 286 – 295.

4. Plisson Th., Pineau N., Weck G., Bruneton E., Guignot N., Loubeyre P. Equation of state of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene up to 66 GPa // J. Appl. Phys. –2017. –Vol.122. p. 235901.
5. Olinger B., Halleck P.M., Cady H.H. The isothermal linear and volume compression of pentaerythritol tetranitrate (PETN) to 10 GPa (100 kbar) and the calculated shock compression // J. Chem. Phys. – 1975. – Vol. 62, № 11. – pp. 4480 – 4483.
6. Kovalev Y.M. Determination of the temperature dependence of the isobaric volumetric expansion coefficient for certain molecular crystals of nitro compounds // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91. № 6. pp. 1573-1582.
7. Kovalev Y.M. Equations of state to describe isothermal compression of certain molecular nitro compound crystals // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. Vol. 93. № 1. pp. 223-233.
8. Kovalev Y.M., Kuropatenko V.F. Determination of the temperature dependence of heat capacity for some molecular crystals of nitro compounds // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91. № 2. pp. 278-287.

ИЗОТЕРМА МЕТАЛЛА, ПОСТРОЕННАЯ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГРЮНАЙЗЕНА

С.Д. Гилев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В рамках полуэмпирического подхода рассматривается метод построения кривой холодного сжатия и изотермы металла на основе обобщенного уравнения для коэффициента Грюнайзена. В частных случаях обобщенное уравнение сводится к различным теоретическим моделям конденсированного вещества – Слэтера-Ландау ($t=0$), Дугдейла–Мак-Доналда ($t=1$), Зубарева–Вашенко ($t=2$), где t – безразмерный параметр в обобщенном уравнении. Дальнейшее развитие полуэмпирического метода привело к пониманию, что ни одна из известных моделей не имеет явного преимущества перед другими, а лучшее описание экспериментальных данных достигается если параметр t является нецелочисленным (а для некоторых веществ – отрицательным).

Проведенный в настоящей работе анализ экспериментальных данных по сжимаемости металлов показал, что безразмерный параметр t , входящий в обобщенное уравнение Грюнайзена, не является постоянным. Это означает, что при сжатии происходит изменение характера взаимодействия атомов в кристалле. В отличие от известных подходов, в настоящей работе параметр t предлагается рассматривать как функцию сжатия. Анализ показывает, что параметр t увеличивается с ростом плотности. Обсуждаются начальное и предельное значение параметра t при сжатии. В предположении экспоненциального характера изменения параметра t с плотностью, найдены свободные параметры полуэмпирической модели для алюминия. Настоящий подход позволяет в рамках малопараметрического уравнения состояния описать изотерму алюминия с лучшей точностью и в более широком диапазоне плотности. Для кривой холодного сжатия рабочая область модели увеличена почти на порядок величины по плотности и более чем на два порядка по давлению (по сравнению с моделью, в которой параметр t полагался постоянным). При сжатии алюминия до 23 раз отличие настоящей модели от общепризнанных не превышает 2.5% по давлению.

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОРИСТОГО НАНОРАЗМЕРНОГО НИКЕЛЯ

*А.Ю. Долгобородов, С.Ю. Ананьев, В.В. Якушев,
Т.А. Ростиллов, В.С. Зиборов, М.Л. Кусков*

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Семенова РАН,
г. Москва, Россия

Исследовано ударное сжатие прессованных образцов порошка никеля. Средний размер частиц составлял 50 нм, пористость образцов –около 50%. Ударные волны создавались металлическими пластинами со скоростями от 300 до 5000 м/с. Параметры ударных волн в образцах определялись с помощью метода лазерной интерферометрии (VISAR) и электроконтактной методики. С помощью 4-канальной интерферометрической регистрации определялись массовые скорости на контактной границе между образцами и окнами из воды или LiF. Это позволяло определять не только скорости ударной волны, но и состояния на изэнтропах разгрузки. В диапазоне ниже 8 ГПа профили ударных волн в образцах имеют сложную многоступенчатую структуру, в которой четко выделяются волна-предвестник и волна уплотнения. При более высоких давлениях никаких особенностей не отмечено. Полученная ударная адиабата наноразмерного никеля в пределах ошибок измерения совпадает с ударной адиабатой микронного никеля при той же пористости [1]. Параметры состояния при ударном сжатии до 61 ГПа хорошо описываются моделью Зельдовича для пористой среды [2] и могут быть рассчитаны с помощью уравнения состояния Ми-Грюнайзена. Однако, результаты по состояниям на изоэнтропах разгрузки имеют существенные особенности. При разгрузке из состояний с давлением до 20 ГПа расчетные изэнтропы расширения описывают данные в пределах погрешности эксперимента. Эти изэнтропы близки к изэнтропам сплошного никеля, полученными в предположении «зеркальной симметрии». Однако в среднем диапазоне при расширении из состояний с давлением 20–35 ГПа изэнтропы на диаграммах давление–массовая скорость значительно отклоняются в сторону массовых скоростей на 300–400 м/с выше, чем в случае «зеркальной симметрии». По расчетам в этом диапазоне должно начаться плавление никеля. Однако причина значительного отклонения наклона изэнтроп расширения в этом диапазоне остается неясной. При расширении из состояний с давлением 61 ГПа изэнтропа снова совпадает с «зеркальной».

Литература

1. Трунин Р.Ф., Симаков Г.В., Сутулов Ю.Н. и др. Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах // ЖЭТФ. 1989. Т.96. №3(9). С. 1024-1038.
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. / М.: Наука. 1966. 688 С.

SHOCK COMPRESSION OF POROUS NANOSIZED NICKEL

*A.Yu. Dolgoborodov, S.Yu. Ananov, V.V. Yakushev, T.A. Rostilov,
V.S. Ziborov, M.L. Kuskov*

N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the RAS, Moscow, Russia

Shock compression of pressed samples of nickel powder has been studied. The average particle size was 50 nm, and the sample porosity was about 50%. Shock waves were created by metal plates with velocities from 300 to 5000 m/s. Shock wave parameters in the samples were determined using laser interferometry (VISAR) and electrocontact technique. Using 4-channel interferometric recording, mass velocities were determined at the contact boundary between the samples and windows made of water or LiF. This made it possible to determine not only the shock wave velocities, but also the states on the unloading isentropes. In the range below 8 GPa, the shock wave profiles in the samples have a complex multistage structure, in which the precursor wave and the compaction wave are clearly distinguished. At higher pressures, no features were noted. The resulting shock adiabat of nanosized nickel, within the limits of measurement errors, coincides with the shock adiabat of micron nickel at the same porosity [1]. The parameters of state under shock compression up to 61 GPa are well described by the Zel'dovich model for a porous medium [2] and can be calculated using the Mie-Grüneisen equation of state. However, the results on the states on the unloading isentropes have significant features. When unloading from states with pressures up to 20 GPa, the calculated expansion isentropes describe the data within the experimental error. These isentropes are close to the isentropes of solid nickel obtained under the assumption of "mirror symmetry". However, in the middle range, upon expansion from states with a pressure of 20–35 GPa, the isentropes in the pressure–mass velocity diagrams deviate significantly towards mass velocities 300–400 m/s higher than in the case of "mirror symmetry." According to calculations, nickel melting should begin in this range. However, the reason for the significant deviation of the slope of the expansion isentrope in this range remains unclear, since, upon expansion from states with a pressure of 61 GPa, the isentrope again coincides with the "mirror" one.

References

1. R. F. Trunin, G. V. Simakov, Yu. N. Sutulov, et al. "Compressibility of porous metals in shock waves," *Sov. Phys. JETP* 69(3), 580–588 (1989).
2. Ya. B. Zel'dovich, Yu. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (New York: Academic Press, 1966–1967).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ДВУКРАТНОМУ СЖАТИЮ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Н.Л. Клиначева, Е.С. Шестаковская, А.П. Яловец

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия

Математическое моделирование ударно-волновых процессов с использованием результатов синхротронной регистрации открывает широкие возможности для построения или уточнения уравнений состояния конструкционных материалов. В данной работе представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения полиметилметакрилата (ПММА) с помощью математической модели, описывающей двумерные упругопластические течения в лагранжевых переменных. Система уравнений МСС записана с учетом необратимости реальных физических процессов, для чего в уравнениях использованы неравновесные напряжения, которые учитывают конечное время релаксации системы к равновесному состоянию [1-3]. Для описания пластических течений применена модель Прандтля–Рейса [4, 5], в которой явно фигурирует тензор скоростей пластических деформаций. Восстановление плотности вещества вдоль луча синхротронного излучения (СИ) и относительного поглощения проводилось с использованием методики [6].

Для численного решения предложенной математической модели использовался полуаналитический метод [1], отличительной особенностью которого является то, что только пространственные производные заменяются конечными разностями. В этом случае система уравнений МСС сводится к системе дифференциальных уравнений, которые допускают приближенное аналитическое решение на некотором временном шаге.

Как известно, эксперименты с однократным и двукратным ударным сжатием вещества являются основой для построения уравнений состояния материалов при высоких давлениях [7, 8]. Двукратное сжатие по сравнению с однократным сопровождается меньшим увеличением внутренней энергии, вследствие чего реализующиеся состояния располагаются ниже ударной адиабаты однократного сжатия, приближаясь к изотерме. Это обстоятельство объясняет значение, которое имеют опыты по двукратному сжатию для изучения состояния веществ и их уравнений состояния при высоких давлениях.

В данной работе проведено сравнение результатов математическое моделирование эксперимента [9] по ударно-волновому нагружению цилиндрического образца ПММА во встречных ударных волнах в 1D- и 2D-постановке. Показано, что математическое моделирование экспериментов по двукратному сжатию возможно только в 2D-постановке. Так как исследование роли радиальной разгрузки показало, что профили напряжений для 1D- и 2D-расчетов на стадии схождения ударных волн к центру хорошо согласуются, однако, как показали двумерные расчеты, далее возникает существенная неоднородность плотности по радиусу из-за переотражения ударных волн, что, с одной стороны, делает невозможным применение одномерных расчетов и, с другой стороны, усложняет интерпретацию результатов экспериментов с использованием синхротронной диагностики.

Литература

1. Яловец А.П. Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т.38. № 1. С. 151–166.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. Москва: Наука, 1988.
3. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. В кн. Вычислительные методы в гидродинамике. Москва: Мир, 1967. С. 212–263.
4. Prandtl L. Spannungsverteilung in plastischen korper. // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft. 1924. P. 43.
5. Рейс А. Учет упругой деформации в теории пластичности. Теория пластичности. Москва: Издательство иностранной литературы, 1948.
6. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под. ред. Д.т.н. А.Л. Михайлова. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015.
7. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 1997.
8. Альтшулер Л.А. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Успехи физических наук, 1965. Т. 85. Вып. 2. С. 52-91.
9. Смирнов Е. Б., Петров Д. В., Гармашев А. Ю., Музыря А. К., Долгих С. М. Исследование однократного и двукратного сжатия плексигласа и поликарбоната с применением синхротронного излучения // Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения: Всеросс. конф., 2018.

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THE RESULTS OF EXPERIMENTS
ON THE TWO-FOLD COMPRESSION OF POLYMETHYL METHACRYLATE
BY USING SYNCHROTRON DIAGNOSTIC**

N.L. Klinacheva, E.S. Shestakovskaya, A.P. Yalovets

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Mathematical modeling of shock-wave processes using the results of synchrotron registration opens up wide opportunities for constructing or refining the equations of state of structural materials. This paper presents the results of numerical experiments on modeling shock-wave loading of polymethyl methacrylate (PMMA) using a mathematical model describing two-dimensional elastoplastic flows in Lagrangian variables. The system of continuum mechanics equations is written taking into account the irreversibility of real physical processes, for which non-equilibrium stresses are used in the equations, which take into account the finite time of system relaxation to an equilibrium state [1-3]. To describe plastic flows, the Prandtl–Reiss model [4, 5] is used, in which the plastic strain rate tensor appears explicitly. The restoration of the matter density along the synchrotron radiation (SR) beam and relative absorption was carried out using the technique [6].

For the numerical solution of the proposed mathematical model, a semi-analytical method [1] was used, the distinctive feature of which is that only spatial derivatives are replaced by finite differences. In this case, the system of equations of continuum mechanics is reduced to a system of differential equations that admit an approximate analytical solution at a certain time step.

As is known, experiments with of one- and two-fold compression of matter are the basis for constructing the equations of state of materials at high pressures [7, 8]. Two-fold

compression, compared with one-fold compression, is accompanied by a smaller increase in internal energy, as a result of which the realized states are located below the shock adiabat of one-fold compression, approaching the isotherm. This circumstance explains the importance that two-fold compression experiments have for studying the state of substances and their equations of state at high pressures.

In this paper, we compare the results of mathematical modeling of the experiment [9] on shock-wave loading of a cylindrical PMMA sample in counterpropagating shock waves in 1D and 2D formulations. It is shown that mathematical modeling of experiments on two-fold compression is possible only in a 2D formulation. Since the study of the role of radial unloading showed that the stress profiles for 1D and 2D calculations at the stage of shock wave convergence to the center are in good agreement, however, as shown by two-dimensional calculations, then a significant density inhomogeneity along the radius arises due to the re-reflection of shock waves, which, on the one hand, makes it impossible to use one-dimensional calculations and, on the other hand, complicates the interpretation of the results of experiments using synchrotron diagnostics.

References

1. Yalovets A.P. Calculation of flows of a medium induced by high-power beams of charged particles. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1997. Vol.38. № 1. P. 137-150.
2. Landau L.D., Lifshitz E.M. Theoretical Physics. T.VI. Hydrodynamics. Moscow: Nauka, 1988.
3. Wilkins M.L. Calculation of elastoplastic flows. In the book. Computational methods in hydrodynamics. Moscow: Mir, 1967. P. 212–263.
4. Prandtl L. Spannungsverteilung in plastischen korper. // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft. 1924. P. 43.
5. Rejs A. Accounting for elastic deformation in the theory of plasticity. Theory of plasticity. Moscow: Publishing house of foreign literature, 1948.
6. Non-disturbing methods of diagnostics of fast-flowing processes. Sarov: RFNC VNIIEF, 2015.
7. Zababahin E.L. Some questions of explosion gas dynamics. Snezhinsk: RFNC-VNIITF, 1997.
8. Al'tshuller L.A. Use of shock waves in high-pressure physics. // Soviet Physics Uspekhi. 1965. Vol.8. № 1. P.52-91.
9. Smirnov E.B., Petrov D.V., Garmashev A. Yu., Muzyrya A.K., Dolgikh S.M. Investigation of one- and two-fold compression of plexiglass and polycarbonate using synchrotron radiation // Physics of explosion: theory, experiment, applications: All-Russian. Conf., 2018

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ БЕРИЛЛИЯ И МАГНИЯ ПРИ УЛЬТРАВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Н.А. Смирнов

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

В работе представлены результаты первопринципных расчётов фазовой стабильности различных кристаллических структур бериллия и магния до ультравысоких давлений (> 10 ТПа). Показано, что при сжатии магний претерпевает ряд структурных переходов, которые сопровождаются значительным уменьшением коэффициента упаковки кристалла. В свою очередь, оцк фаза высокого давления бериллия остаётся стабильной до очень высоких давлений. В работе проанализированы изменения электронной структуры кристаллов Be и Mg в процессе

сжатия и выявлены некоторые интересные эффекты. Также построены фазовые диаграммы рассмотренных металлов и выполнено сравнение с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других работ.

COMPARATIVE ANALYSIS FOR THE BEHAVIOR OF BERYLLIUM AND MAGNESIUM CRYSTALS AT ULTRAHIGH PRESSURES

N.A. Smirnov

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The work presents results of relative phase stability calculations from first principles for different crystal structures of beryllium and magnesium to ultrahigh pressures (>10 TPa). It is shown that magnesium under compression undergoes a number of structural transitions accompanied by a significant decrease in packing index. Body-centered cubic high pressure phase of beryllium remains stable up to very high pressures. Changes in the electron structures of Be and Mg under compression were analyzed and some interesting effects found. Phase diagrams for both the metals were also constructed and compared with available experimental and theoretical data.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МОЛИБДЕНА ОКОЛО КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ–ПАР ПРИ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМ РАСШИРЕНИИ ПОСЛЕ УДАРНОГО СЖАТИЯ

К.А. Боярских, К.В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

С использованием трех простых моделей получено уравнение состояния молибдена при высоких температурах вблизи критической точки фазового перехода жидкость–пар. Используются две модели с двумя параметрами: уравнение состояния Ван-дер-Ваальса

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \quad (1)$$

и уравнение состояния, полученное при рассмотрении модельной задачи заряженных твердых сфер [1],

$$P = \frac{RT}{V(1-4\eta)} - \frac{1}{3} \alpha e^2 V^{-4/3}. \quad (2)$$

Также использована модель с тремя параметрами: уравнение состояния взаимодействующих точечных центров [2]

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+\chi b)}. \quad (3)$$

Здесь R – газовая постоянная; a и b – параметры в (1) и (3); e – элементарный заряд; η – параметр в (2), имеющий смысл степени упаковки (доли занятого частицами

объема); α – еще один параметр в (2); χ – параметр в (3), который называется управляющим.

По каждому из этих трех уравнений состояния оценивалось положение критической точки фазового перехода жидкость–пар на фазовой диаграмме молибдена с привлечением данных экспериментов по изобарическому расширению этого металла в жидкой фазе. По результатам оценок параметров критической точки были получены наборы оптимальных (дающих минимальное отклонение от опытных данных) параметров трех уравнений состояния молибдена.

По полученным уравнениям состояния проведены расчеты ударных адиабат образцов молибдена с высокой начальной пористостью, а также изоэнтропы расширения ударно-сжатых образцов. Результаты расчетов представлены в сравнении с имеющимися данными экспериментов при высоких плотностях энергии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

Литература

1. Ликальтер А. А. Критические точки конденсации в кулоновских системах // УФН. 2000. Т. 170. № 8. С. 831–854.
2. Петрик Г. Г., Гаджиева З. Р. Однопараметрическое семейство уравнений состояния на основе модели точечных центров и его связь с однопараметрическим законом соответственных состояний // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. № 1. С. 67–78.

EQUATION OF STATE FOR MOLYBDENUM NEAR THE CRITICAL POINT OF THE LIQUID–VAPOR PHASE TRANSITION DURING ISENTROPIC EXPANSION AFTER SHOCK COMPRESSION

K.A. Boyarskikh, K.V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

Three simple models are used to derive the equation of state for molybdenum at high temperatures near the critical point of the liquid–vapor phase transition. Two models with two parameters are used: the van der Waals equation of state,

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}, \quad (1)$$

and the equation of state obtained by considering the model problem of charged hard spheres [1],

$$P = \frac{RT}{V(1-4\eta)} - \frac{1}{3}ae^2V^{-4/3}. \quad (2)$$

A model with three parameters is also used: the equation of state of interacting point centers [2],

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+\chi b)}. \quad (3)$$

Here R is the gas constant; a and b are parameters in (1) and (3); e is the elementary charge; η is the parameter in (2), which has the meaning of the degree of packing (the fraction of the volume occupied by particles); α is another parameter in (2); χ is the parameter in (3), which is called the control parameter.

For each of these three equations of state, the position of the critical point of the liquid–vapor phase transition on the phase diagram of molybdenum was estimated using experimental data on the isobaric expansion of this metal in the liquid phase. Based on the results of estimations of the parameters of the critical point, sets of optimal (giving the minimum deviation from the experimental data) parameters of three equations of state of molybdenum were obtained.

The shock adiabats of molybdenum samples with high initial porosity, as well as the expansion isentropes of shock-compressed samples, were calculated using the obtained equations of state. The calculation results are presented in comparison with the available experimental data at high energy densities.

This work is done under the support from the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

References

- [1] Likalter A.A. Critical points of condensation in Coulomb systems // Phys. Usp. 2000. V. 43. P. 777–797.
- [2] Petrik G.G., Gadzhieva Z.R. One-parameter family of equations of the state based on a model of the point centers and its connection with one-parameter law of the corresponding states // Monitoring. Science and Technologies. 2010. № 1. P. 67–78.

ЭНЕРГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА НЕЛИНЕЙНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В ПРИБЛИЖЕНИИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ПОЛОСТИ

И.А. Мартынова, И.Л. Иосилевский

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Авторы рассматривают двухкомпонентную равновесную электронейтральную систему классических макроионов конечных размеров с зарядом $Z \gg 1$ и точечных противоположно заряженных микроионов с единичным зарядом в приближении Пуассона–Больцмана в корреляционной полости [1]. Указанное приближение является модификацией приближения Дебая–Хюккеля в корреляционной полости для двухкомпонентной системы [2]. Вследствие учета эффекта нелинейного экранирования предложен способ приближенного деления всех микроионов системы на два сорта (свободных и связанных) и отмечено значительное уменьшение эффективного заряда Z^* по сравнению с исходной величиной заряда макроиона Z за счет экранирования плотной сферой связанных микроионов. В работе рассчитана полная энергия взаимодействия всех частиц в системе и продемонстрировано отличие от более ранних работ [2,3]. Также, проведен расчет свободной энергии и давления в указанной системе.

Литература

- Martynova I.A., Iosilevskiy I.L. Effect of nonlinear screening on a modification of the Debye–Hückel plus hole approximation in complex plasma // Contrib. Plasma Phys. – 2019. – V. 59. – P. 1 – 6.
- Khrapak S.A., Khrapak A.G., Ivlev A.V. and Morfill G.E. Simple estimation of thermodynamic properties of Yukawa systems // Phys. Rev. E. – 2014. – V. 89. – P. 023102.

3. Farouki R.T., Hamaguchi S. Thermodynamics of strongly coupled Yukawa systems near the one-component plasma limit. II. Molecular dynamics simulations // J. Chem. Phys. – 1994. – V. 101. – P. 9885 – 9883.

INTERACTION ENERGY OF ASYMMETRIC COMPLEX PLASMA WITH ACCOUNT OF THE NON-LINEAR SCREENING EFFECT IN THE CORRELATION HOLE APPROXIMATION

I.A. Martynova, I.L. Iosilevskiy

Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow, Russia

The authors analyze two-component electroneutral systems of classical finite-sized macroions with the charge $Z \gg 1$ and point-like oppositely charged microions with a unit charge in the Poisson-Boltzmann plus hole approximation [1]. This approximation is a modification of the Debye–Hückel plus hole approximation for two-component systems [2]. As a result of taking into account the nonlinear screening effect, a method for the approximate division of all microions of the system into two types (free and bound ones) is proposed, and a significant decrease in the effective charge Z^* compared to the initial macroion charge Z due to screening of bound microions by a dense sphere is noted. In this work, the total interaction energy of all system particles is obtained and the difference from earlier works [2, 3] is demonstrated. Also, free energy and pressure are obtained in the indicated system.

References

1. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L. Effect of nonlinear screening on a modification of the Debye–Hückel plus hole approximation in complex plasma // Contrib. Plasma Phys. – 2019. – V. 59. – P. 1 – 6.
2. Khrapak S.A., Khrapak A.G., Ivlev A.V. and Morfill G.E. Simple estimation of thermodynamic properties of Yukawa systems // Phys. Rev. E. – 2014. – V. 89. – P. 023102.
3. Farouki R.T., Hamaguchi S. Thermodynamics of strongly coupled Yukawa systems near the one-component plasma limit. II. Molecular dynamics simulations // J. Chem. Phys. – 1994. – V. 101. – P. 9885 – 9883.

ДОПЛЕРОВСКАЯ И ПИРОМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА УДАРНО-СЖАТОЙ ПЛАЗМЫ ПЛОТНОГО КСЕНОНА

*Г.А. Козлов, Е.Н. Богданов, А.Е. Ковалев, М.Г. Новиков,
А.Н. Мальшев, Д.В. Козлов, В.И. Буренин, А.А. Становов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

При экспериментальном определении параметров состояний на изэнтропах продуктов взрыва методом преград в области давлений ниже 5 ГПа, в которой происходит сильное расширение и охлаждение продуктов взрыва, в качестве эталонных материалов используются различные газы. Наибольшее распространение получили благородные газы – аргон, ксенон, криптон, что связано с их большой

молекулярной массой и отсутствием диссоциации и химических реакций при их ударном сжатии. Следует отметить, что наибольший объем исследований изэнтропического расширения продуктов взрыва отечественными исследователями проведен с ксенонем. Путем варьирования начального давления газа можно реализовать достаточно широкий диапазон параметров на изэнтропах расширения продуктов взрыва.

В связи с развитием методов и средств расчётного моделирования в последнее время ощущается необходимость уточнения уравнения состояния продуктов взрыва ВВ и соответственно эталонных материалов. Внедрение прецизионных методик непрерывной невозмущающей диагностики дает основание предполагать, что данная задача может быть решена при условии определения областей их применимости в исследованиях ударно-волнового сжатия газов.

Вопросы применимости доплеровских методов диагностики (микроволновый интерферометр и гетеродин-интерферометр PDV) связаны с взаимодействием зондирующего радио и инфракрасного излучения с разогретым и ионизированным газом за фронтом ударной волны. Разный характер этого взаимодействия обусловлен различием на почти четыре порядка между длинами волн зондирующего излучения. Так, для микроволнового излучения при относительно низких скоростях фронт ударной волны в ксеноне является хорошо отражающей поверхностью, но при увеличении скорости фронта до ~ 7 км/с возникает эффект экранировки излучения. Для гетеродин-интерферометра, наоборот, имеется порог скорости фронта, при переходе через который возможна регистрация движения ударной волны.

Исследованиям указанного выше вопроса посвящена настоящая работа. Её целью является определение нижнего порога по скорости доплеровских методов диагностики по регистрации ударной волны в ксеноне и определения состояний на его ударной адиабате.

В работе проведены экспериментальные исследования ударно-волновой сжимаемости ксенона, изначально находившегося при давлении $P_0=5$ атм, в диапазоне массовых скоростей от 1,7 до 2,8 км/с с использованием методов непрерывной невозмущающей диагностики – гетеродин-интерферометра, радиоинтерферометра и пиометра.

Продемонстрирована принципиальная возможность регистрации ударной волны в ксеноне с помощью гетеродин интерферометра PDV, начиная со значений массовых скоростей выше 2 км/с. Измеренные значения волновых скоростей находятся в согласии с результатами регистрации с использованием микроволнового радиоинтерферометра. Полученные экспериментальные данные по ударно-волновой сжимаемости ксенона находятся в согласии с результатами расчетов по модели химической плазмы.

**DOPPLER AND PYROMETRIC DIAGNOSIS OF SHOCK-COMPRESSED
DENSE XENON PLASMA**

*G.A. Kozlov, E.N. Bogdanov, A.E. Kovalev, M.G. Novikov,
A.N. Malyshev, D.V. Kozlov, V.I. Burenin, A.A. Stanovov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

When experimentally determining the parameters of states on isentropes of explosion products by the obstacle method in the pressure range below 5 GPa, in which strong expansion and cooling of explosion products occur, various gases are used as reference materials. The most widely used noble gases are argon, xenon, krypton, due to their large molecular weight and the absence of dissociation and chemical reactions during their shock compression. It should be noted that the largest volume of studies of the isentropic expansion of explosion products by domestic researchers was carried out with xenon. By varying the initial gas pressure, it is possible to realize a fairly wide range of parameters on the expansion isentropes of the explosion products.

In connection with the development of methods and tools for computational modeling, there has recently been a need to refine the equation of state for explosive explosion products and, accordingly, reference materials. The introduction of precision techniques for continuous non-perturbing diagnostics suggests that this problem can be solved provided that the areas of their applicability in studies of shock-wave compression of gases are determined.

Questions of the applicability of Doppler diagnostic methods (microwave interferometer and PDV heterodyne interferometer) are related to the interaction of probing radio and infrared radiation with heated and ionized gas behind the shock wave front. The different nature of this interaction is due to the difference by almost four orders of magnitude between the wavelengths of the probing radiation. Thus, for microwave radiation at relatively low velocities, the shock wave front in xenon is a well-reflecting surface, but as the front velocity increases to ~ 7 km/s, the radiation screening effect appears. For a heterodyne interferometer, on the contrary, there is a front velocity threshold, when passing through which it is possible to register the motion of a shock wave.

The present work is devoted to the study of the above question. Its purpose is to determine the lower threshold for the speed of Doppler diagnostic methods for detecting a shock wave in xenon and determining the states on its shock adiabat.

In this work, experimental studies of the shock-wave compressibility of xenon, initially at a pressure of $P_0=5$ atm, were carried out in the mass velocity range from 1.7 to 2.8 km/s using the methods of continuous non-perturbing diagnostics - a heterodyne interferometer, a radio interferometer and a pyrometer.

The fundamental possibility of detecting a shock wave in xenon using the heterodyne interferometer PDV is demonstrated, starting from mass velocities above 2 km/s. The measured values of wave velocities are in agreement with the results of registration using a microwave radio interferometer. The obtained experimental data on the shock-wave compressibility of xenon are in agreement with the results of calculations using the chemical plasma model.

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ 40-70 ГПа

*А.А. Становов, Е.Н. Богданов, Е.А. Чудаков, В.И. Буренин, Л.И. Канунова,
Г.А. Козлов, А.А. Седов, Т.А. Говорунова, А.М. Тарасов, Е.С. Митин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Для верификации расчетных уравнений состояния на практике широко используется метод преград, в котором параметры состояния на изэнтропе расширения продуктов взрыва определяются по результатам измерений зависимостей от времени массовых или волновых скоростей в преградах, вплотную контактирующих с зарядом исследуемого взрывчатого вещества. В области давлений выше состояния Чепмена-Жуге для тех же целей используются результаты экспериментов по определению ударных адиабат продуктов взрыва и изэнтроп расширения из состояний на ударных адиабатах продуктов взрыва.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования пересжатых продуктов взрыва пластифицированного октогена. Пересжатые детонационные волны в образцах ВВ генерировались при воздействии металлических ударников, разгоняемых до скоростей в несколько километров в секунду с помощью взрывных нагружающих устройств. Для регистрации движения ударников и ударных волн в образцах применялись гетеродин-интерферометр и радиоинтерферометр миллиметрового диапазона длин волн.

В результате проведенных исследований с использованием метода отражения ударных адиабат получена новая информация о параметрах состояний на ударной адиабате продуктов взрыва пластифицированного октогена в области давлений 40-70 ГПа. Экспериментальные данные находятся в согласии с результатами расчета ударной адиабаты продуктов взрыва с помощью УРС ПВ на основе модели мВдВ для химически реагирующих смесей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ ТАНТАЛА ДО СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

*Г.В. Борисков, А.И. Быков, Н.И. Егоров, А.С. Кориунов, И.В. Макаров,
В.Н. Павлов, П.Б. Репин, И.С. Стрелков, О.М. Сурдин, С.И. Белов,
Н.А. Беляева, В.А. Аринин, С.Е. Елфимов, А.В. Рыжков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Изложены постановка и результаты опытов по изоэнтропическому сжатию тантала (с нормальной начальной плотностью) в устройстве на основе магнитокумулятивного генератора до давлений в несколько мегабар. Полученные на P - ρ диаграмме экспериментальные точки сопоставляются с нормальной изоэнтропой, построенной полуфеноменологически – по данным ударно-волновых экспериментов методом Альтшулера-Брусникина-Кузьменкова, и с аналогичной кривой, построенной по данным первопринципных расчётов.

EXPERIMENTAL RESULTS OF ISENTROPIC TANTALUM COMPRESSION
UP TO ULTRA-HIGH PRESSURES

*G.V. Boriskov, A.I. Bykov, N.I. Egorov, A.S. Korshunov, I.V. Makarov,
V.N. Pavlov, P.B. Repin, I.S. Strelkov, O.M. Surdin, S.I. Belov,
N.A. Belyaeva, V.A. Arinin, S.E. Elfimov, A.V. Ryzhkov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The authors provide the geometry and experimental results of the isentropic tantalum compression (with a standard initial density) in the device based on the magneto-cumulative generator up to several magabar pressure. The experimental points obtained on the P - ρ diagram are compared with a normal adiabat built semiphenomenologically and based on the data of shock-wave experiments by the method of Altshuler-Brusnikin-Kuzmenkov; they are also compared with a similar curve that is built based on the data of first-principle calculations.

АПРОБАЦИЯ МОДЕЛЕЙ МИКРОПОЛЯ ПО СПЕКТРАМ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

А.А. Белов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Введение. В плазме заряженные частицы создают микроскопическое электрическое поле (плазменное микрополе). Из-за хаотического теплового движения частиц оно флуктуирует в пространстве и времени. Это приводит к размытию порогов фотоэффекта и штарковскому уширению линий. В плотной плазме с плотностью 0.1 г/куб.см. и более эффект Штарка увеличивает ширину линий сильнее, чем эффект Доплера. При этом микрополе, во-первых, достаточно велико, а во-вторых, неоднородно. Поэтому для правильного описания оптических свойств плотной плазмы нужно знать статистические свойства микрополя.

Модели микрополя. Изучение микрополя начал Хольцмарк [1]. Он построил функцию распределения напряженности однородного микрополя в разреженной плазме методом Фурье-преобразования. Позднее в литературе было построено большое количество моделей на основе метода коллективных координат, теории функционала плотности, метода Монте-Карло. Обзор этих подходов приведен в [2].

Качественно другой подход был предложен Калиткиным и Козлитиним в [3,4] (эти работы не упоминаются в [2]). Этот подход получил название модель квазинезависимых частиц (Quasi-Independent Particles, QUIP). Обобщение этой модели на случай неоднородного микрополя построено в [5,6].

Данная работа является продолжением цикла работ, выполненных в коллективе под руководством Калиткина. Мы провели апробацию модели QUIP путем сравнения с экспериментами по спектрам излучения сверхплотной лазерной плазмы. Это эксперименты по свечению плазмы Al [7] или Ag [8,9], в которых целиком видны лаймановские серии водородоподобных ионов Al^{+12} , Ag^{+17} и гелиеподобного иона Ar^{+16} .

В экспериментах [7-9] реализуется широкий диапазон условий. Плотности принимали значения 0.04-1.7 г/куб.см., температуры – 300-850 эВ. Формальный

параметр неидеальности Γ варьировался от 0.05 до 5.0. При этих условиях микрополя очень велики. Они оказываются основным фактором, уменьшающим заселенность верхних уровней и, соответственно, интенсивность спектральных линий. Расчетное число наблюдаемых линий сильно зависит от микрополевой функции распределения. Поэтому сравнение проводится по числу наблюдаемых линий в спектральных сериях и их интенсивностям. Такая проверка является представительной.

Результаты. Показано, что модель QUIP правильно описывает число наблюдаемых линий и их интенсивности во всех перечисленных экспериментах. При этом концентрации излучающих ионов определяются по модели ионизационного равновесия Саха. В результате в модели QUIP микрополевые и термодинамические свойства оказываются согласованными.

Также проведено сравнение модели QUIP с рядом других моделей [2]: Хольцмарка, Хупера, Иглесиаса (APEX), простых гармонических осцилляторов (SHO). Показано, что эти модели не могут предсказать число линий, наблюдаемых в экспериментах. Отметим также, что в существующих методах анализа спектров проводят индивидуальную подгонку каждой линии в спектральной серии. Температуры и плотности, которые при этом получаются, противоречат модели Саха. При этих значениях температуры и плотности концентрация излучающего иона нередко оказывается исчезающе малой.

Таким образом, модель QUIP описывает совокупность экспериментальных спектров ионов различных элементов в широком диапазоне условий. Эти спектры опубликованы различными экспериментальными лабораториями. Поэтому данную модель можно считать надежно верифицированной.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-3630.2021.1.1.

Литература

1. Holtsmark J. // Ann. Phys. 58 (1919). 577
2. Demura A.V. // Int. J. Spectrosc. 2010 (2010). Art. ID 671073.
3. Калиткин Н. Н., Козлитин И. А. // ДАН. 411:1 (2006). 36.
4. Калиткин Н. Н., Козлитин И. А. // ДАН. 418:5 (2008). 614.
5. Белов А.А., Калиткин Н.Н. // ДАН. 489:1 (2019). 22.
6. Belov A.A., Kalitkin N.N. // Annals of Physics. (2020) 168275.
7. Kilkenny J.D. et al. // Phys. Rev. A. 22:6 (1980). 2746.
8. Burris-Mog T.J. et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 99 (2006). 120.
9. Hooper C.F., Jr. et al. // SPIE. High intensity laser-matter interactions. 913 (1988). 129.

VALIDATION OF MICROFIELD MODELS BY LASER PLASMA SPECTRA

A.A. Belov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Introduction. In plasma, charged particles create a microscopic electric field (plasma microfield). Due to the chaotic thermal motion of the particles, it fluctuates in space and time. This leads to a blurring of the photoelectric effect thresholds and Stark-like line broadening. In dense plasma with a density of 0.1 g/cc and more, the Stark effect increases the line width more than the Doppler effect. In this case, the microfield is, firstly, quite large

and, secondly, inhomogeneous. Therefore, for a correct description of the optical properties of dense plasmas, it is necessary to know the statistical properties of the microfield.

Microfield models. Holtzmark [1] started the study of the microfield. He constructed a distribution function for the strength of a homogeneous microfield in a rarefied plasma by the Fourier transform method. Later, a large number of models based on the collective coordinate method, density functional theory, and Monte Carlo method have been built in the literature. An overview of these approaches is given in [2].

Qualitatively different approach was proposed by Kalitkin and Kozlitin in [3,4] (these works are not mentioned in [2]). This approach was called the Quasi-Independent Particles Model (QUIP). Generalization of this model to the case of inhomogeneous microfield is constructed in [5,6].

This work is a continuation of the cycle of work done in the team led by Kalitkin. We have validated the QUIP model by comparing it with experiments on superdense laser plasma emission spectra. These are experiments on Al [7] or Ar [8,9] plasma luminescence, in which the whole Lyman series of hydrogen-like Al^{+12} , Ar^{+17} ions and helium-like Ar^{+16} ions are visible.

In experiments [7-9] a wide range of conditions is realized. Densities were taken as 0.04-1.7 g/cc and temperatures from 300-850 eV. The formal non-ideality parameter Γ ranged from 0.05 to 5.0. Under these conditions the microfields are very large. They turn out to be the main factor reducing the population of the upper levels and, consequently, the intensity of spectral lines. The calculated number of observed lines strongly depends on the microfield distribution function. Therefore, a comparison is made on the basis of the number of observed lines in the spectral series and their intensities. Such a check is representative.

Results. It is shown that the QUIP model correctly describes the number of observed lines and their intensities in all listed experiments. The emitting ion concentrations are determined from the Saha ionization equilibrium model. As a result, in the QUIP model the microfield and thermodynamic properties are consistent.

The QUIP model is also compared with a number of other models [2]: Holtzmark, Hooper, Iglesias (APEX), and simple harmonic oscillators (SHO). It is shown that these models cannot predict the number of lines observed in the experiments. Note also that existing spectral analysis methods individually fit each line in the spectral series. The temperatures and densities obtained in this way contradict the Saha model. At these temperatures and densities the concentration of the emitting ion is often vanishingly small.

Therefore, the QUIP model describes a set of experimental spectra of ions of various elements over a wide range of conditions. These spectra have been published by various experimental laboratories. Therefore, this model can be considered as reliably verified.

This work was supported by grant MK-3630.2021.1.1 from the President of the Russian Federation.

References

1. Holtzmark J. // Ann. Phys. 58 (1919). 577
2. Demura A.V. // Int. J. Spectrosc. 2010 (2010). Art. ID 671073.
3. Kalitkin N. N., Kozlitin I. A. // Doklady akademii nauk. 411:1 (2006). 36. [In Russian]
4. Kalitkin N. N., Kozlitin I. A. // Doklady akademii nauk. 418:5 (2008). 614. [In Russian]
5. Belov A.A., Kalitkin N.N. // Doklady akademii nauk. 489:1 (2019). 22. [In Russian]
6. Belov A.A., Kalitkin N.N. // Annals of Physics. (2020) 168275.
7. Kilkenny J.D. et al. // Phys. Rev. A. 22:6 (1980). 2746.
8. Burris-Mog T.J. et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 99 (2006). 120.
9. Hooper C.F., Jr. et. al. // SPIE. High intensity laser-matter interactions. 913 (1988). 129.

**КВАНТОВО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ
ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ***М.А. Кадатский, К.В. Хищенко*

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Для построения уравнения состояния вещества в широком диапазоне температур и плотностей успешно применяется квантово-статистический подход. В рамках этого подхода отдельный интерес для описания веществ в состояниях с высокой плотностью энергии представляют ячеечные модели среднего атома, использующие приближение самосогласованного поля. Эти модели относительно просты в реализации и не требуют больших вычислительных затрат. При этом применение приближений этих моделей тем более оправдано, чем выше температура и плотность вещества. В связи с этим, в настоящее время продолжают исследования связанные с изучением возможности применения этих моделей для описания поведения широкого класса веществ в различных областях фазовой диаграммы. Кроме того, в рамках этих исследований проводится усовершенствование ранее предложенных моделей и идёт разработка новых.

Одной из ранее разработанных моделей среднего атома является модель Хартри–Фока–Слэтера (ХФС) [1]. Эта модель достаточно широко используется для расчёта термодинамических параметров простых веществ в условиях относительно высоких температур и близких к нормальной плотности (область горячей плотной плазмы). Но при проведении широкодиапазонных расчётов ранее представленные реализации этой модели [1] давали скачки термодинамических функций, связанные с переходом состояний электронов между дискретным и непрерывным спектром. Либо требовали ввода дополнительного свободного параметра, отвечающего за способ выбора граничного значения энергии состояний электронов, отнесённых к непрерывному спектру в конкретной области входных термодинамических параметров.

В настоящей работе реализован вариант модели ХФС, для которого при проведении широкодиапазонных расчётов уравнения состояния не требуется дополнительных свободных параметров, но при этом полученные термодинамические зависимости остаются непрерывными [2].

В работе представлены результаты расчетов по модели ХФС ударных адиабат титана, молибдена и рения для диапазона давлений от 1 ГПа до 10 ППа. Проведено сравнение результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

Литература

1. Nikiforov A. F., Novikov V. G., Uvarov V. B. Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter. Basel: Birkhäuser, 2005.
2. Kadatskiy M. A. Quantum-statistical calculations of the thermodynamic properties of molybdenum at high energy densities // High Energy Density Physics. 2019. V. 33. P. 100700.

**QUANTUM-STATISTICAL CALCULATION OF SHOCK ADIABATS
OF REFRACTORY METALS IN A WIDE PRESSURE RANGE***M.A. Kadatskiy, K.V. Khishchenko*

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

The quantum-statistical approach is successfully used to construct the equation of state of matter in a wide range of temperatures and densities. Within the framework of this approach, cell models of the average atom, which use the self-consistent field approximation, are of particular interest for describing substances in states with a high energy density. These models are relatively easy to implement and do not require large computational costs. In this case, the use of approximations of these models is all the more justified, the higher the temperature and density of the substance. In this regard, research is currently ongoing to study the possibility of using these models to describe the behavior of a wide class of substances in various areas of the phase diagram. In addition, within the framework of these studies, the previously proposed models are being improved and new ones are being developed.

One of the previously developed models of the average atom is the Hartree–Fock–Slater (ХФС) model [1]. This model is widely used to calculate the thermodynamic parameters of simple substances under conditions of relatively high temperatures and close to normal density (a region of hot dense plasma). But when performing wide-range calculations, the previously presented implementations of this model [1] gave jumps in thermodynamic functions associated with the transition of electron states between discrete and continuous spectrum. Or they required the introduction of an additional free parameter responsible for the method of choosing the boundary value of the energy of the states of electrons related to the continuous spectrum in a specific region of input thermodynamic parameters.

In the present work, a variant of the HFS model is implemented, for which, when performing wide-range calculations of the equation of state, no additional free parameters are required, but the obtained thermodynamic dependences remain continuous [2].

The paper presents the results of calculations using the HFS model for the shock adiabats of titanium, molybdenum and rhenium for the pressure range from 1 GPa to 10 PPa. The calculation results are compared with the available experimental data.

This work is done under the support from the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

References

1. Nikiforov A. F., Novikov V. G., Uvarov V. B. Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter. Basel: Birkhäuser, 2005.
2. Kadatskiy M. A. Quantum-statistical calculations of the thermodynamic properties of molybdenum at high energy densities // High Energy Density Physics. 2019. V. 33. P. 100700.

**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ***К.В. Хищенко*

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Для анализа физических процессов при интенсивном импульсном воздействии на вещество требуется знать термодинамические свойства среды в широком диапазоне давлений и температур. В этом докладе представлена модель уравнения состояния для тугоплавкого металла рения в форме свободной энергии как функции удельного объема и температуры с учетом фазовых переходов (плавления и испарения). Результаты расчетов термодинамических характеристик этого металла рассмотрены в сравнении с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов. Разработанная модель многофазного уравнения состояния рения может быть эффективно использована при численном моделировании динамики процессов при высоких плотностях энергии. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

**EQUATION OF STATE FOR RHENIUM AT HIGH
TEMPERATURES AND PRESSURES***K.V. Khishchenko*

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

To analyze physical processes under intense pulse action on a substance, it is required to know the thermodynamic properties of the medium in a wide range of pressures and temperatures. In this report, a model of the equation of state for refractory metal rhenium in the form of free energy as a function of specific volume and temperature is presented taking into account phase transitions (melting and evaporation). The results of calculations of the thermodynamic characteristics of this metal are considered in comparison with the available data of shock-wave experiments. The developed model of the multiphase equation of state for rhenium can be effectively used in numerical simulation of the dynamics of processes at high energy densities. This work is done under the support from the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

**РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СПЛАВОВ НИОБИЯ С ТАНТАЛОМ
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ***Н.Н. Середкин, К. В. Хищенко*

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Знание термодинамических свойств материалов представляет интерес, как для фундаментальных исследований, так для решения прикладных задач физики высоких

плотностей энергии. В настоящей работе мы провели расчеты ударных адиабат для сплавов Nb–Ta с различными массовыми долями компонентов на основе смесового метода [1]. В данном методе объем ударно-сжатой смеси (V_{12}) предполагается равным сумме объемов компонентов (V_1 и V_2), сжатых по отдельности в виде однородных монокристаллических образцов в ударной волне той же интенсивности: $V_{12}(P) = \alpha_1 V_1(P) + \alpha_2 V_2(P)$, где P – давление; α_1 и α_2 – весовые доли компонентов ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$). Для расчета ударных адиабат компонентов использованы полуэмпирические уравнения состояния конденсированной фазы металлов при высоких давлениях и температурах. Результаты проведенных в этой работе расчетов сравниваются с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов [2]. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

Литература

1. Alekseev Yu. F., Altshuler L. V., Krupnikova V. P. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1971. V. 12. P. 624–627.
2. Bakanova A. A., Dudoladov I. P., Sutulov Yu. N. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1972. V. 13. P. 903–907.

CALCULATION OF SHOCK ADIABATS OF NIOBIUM–TANTALUM ALLOYS AT HIGH PRESSURES

N.N. Serezhkin, K.V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

Knowledge of the thermodynamic properties of materials is of interest both for fundamental research and for solving applied problems of high energy density physics. In this work, we have calculated the shock adiabats for Nb–Ta alloys with different mass fractions of components based on the mixture method [1]. In this method, the volume of the shock-compressed mixture (V_{12}) is assumed to be equal to the sum of the volumes of the components (V_1 and V_2) compressed separately in the form of homogeneous monolithic samples in a shock wave of the same intensity: $V_{12}(P) = \alpha_1 V_1(P) + \alpha_2 V_2(P)$, where P is the pressure; α_1 and α_2 are the mass fractions of the components ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$). The shock adiabats of the components are calculated using semiempirical equations of state for the condensed phase of metals at high pressures and temperatures. The results of the calculations performed in this work are compared with the available data of shock-wave experiments [2]. This work is done under the support from the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

References

1. Alekseev Yu. F., Altshuler L. V., Krupnikova V. P. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1971. V. 12. P. 624–627.
2. Bakanova A. A., Dudoladov I. P., Sutulov Yu. N. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1972. V. 13. P. 903–907.

ПАРАМЕТРЫ КВАЗИЧАСТИЦЫ ДАВЛЕНИЯ РОГНОН ДЛЯ ЗОЛОТА И ПЛАТИНЫ

В.А. Каренов, П.В. Лебедев

РЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Расчеты кривых холодного сжатия для 10 металлов «из первых принципов», интегрирующие ТЕОРИЮ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ и эффективные методы решения трехмерной задачи для электронной плотности в кристаллической ячейке методом FLPAW, содержащиеся в программе ELK [1], показывают хорошее согласие с экспериментальными данными. На этой основе рассмотрены общие закономерности сжатия [2]. Вопреки известной картине процесса ионизации давлением в диапазоне двукратного сжатия конденсированного вещества происходит обратное явление «атомизации» – перемещение электронов в атомную область, заключенную внутри МТ-сферы (типичного радиуса 2Бора). Анализ результатов расчетов даёт лаконичный закон «атомизации»

$$\frac{\Delta Z}{(\delta - 1)} = z_0 - z_1 \delta^{-1} + z_2 \delta^{-2}, \quad (1)$$

связывающий число упавших на атом электронов ΔZ и относительное сжатие δ . Все квантово-механические особенности содержатся в трех константах z_0 , z_1 и z_2 .

Для анализа свойств электронов кристалла была введена, оказавшаяся плодотворной, величина плотности электронов в ячейке, средней по всему пространству за исключением атомной МТ-сферы. Установлено, что зависимость давления от приращения этой величины для всех 10 элементов близка к степенной «5/3». На рисунке она приведена для Au, Pt, Pb.

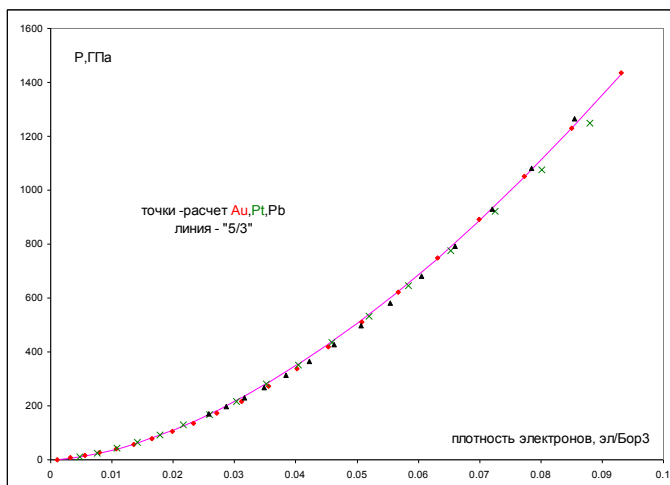


Рисунок 1. Зависимости давления в Au, Pt, Pb от приращения средней по ячейке электронной плотности. Линия - степенная кривая «5/3»

Полученные зависимости давления от электронной плотности проинтерпретированы аналогично электропроводности электронов в металлах, где вводят эквивалент массы свободного электрона с аналогичными транспортными

характеристиками. Так в золоте, платине и свинце эквивалентная масса электрона равна $0.73m_e$. Это означает, что электроны в ячейке Au, Pt и Pb создают давление при сжатии аналогично вырожденному электронному газу с уменьшенной в $1/0.73$ раза массой электрона. Определены массы электрона и для других элементов. Они составили 1 для алюминия и тантала, 1.3-1.4 для урана и плутония. Поскольку введенная эквивалентная масса отражает свойство материала при сжатии, её можно назвать упругой массой. В итоге давление приближенно имеет вид:

$$P = \frac{bn_1^{5/3}}{M}(\delta - 1)^{5/3} \quad (2)$$

Это выражение показывает, что поведение вещества при сжатии может быть приближенно проклассифицировано двумя константами – упругой массой электрона M и плотностью n_1 , эквивалентное физическое представление которой состоит, например, в количестве электронов, падающих на атом при двукратном сжатии в соответствии с законом (1).

Близость «упругой» массы к единице, то есть эквивалентность избыточных электронов в ячейке при сжатии невзаимодействующему вырожденному газу отражает, по-видимому, физику явления, существенно завуалированную сложным подходом, стартующим с блоховских функций в твердом теле. Она отражается в известном феномене квазичастиц, в данном случае квазичастиц давления, получивших от авторов доклада название РОГНОН.

Вблизи атома поведение валентных электронов обладает особенностью. Установлено, что внутри сферы некоторого радиуса, названного радиусом изоляции, заряд сохраняется при сжатии. Для Au радиус изоляции составил 1.6 Bohr , для Ce, Yb -2.4 Bohr . Одновременно радиус изоляции соответствует почти античному представлению об атоме, как неделимой частице, твердом шарике. То есть радиус изоляции может быть назван радиусом атома.

Обращение к последним экспериментальным данным с двукратным холодным сжатием [3] повышает достоверность представленных параметров квазичастиц для золота и платины.

Литература

1. EXCITING code developed under the Research and Training Network EXCITING funded by the EU, contract No. HPRN-CT-2002-00317, 2004.
2. Новый взгляд «из первых принципов» на общие закономерности сжатия вещества. В.А.Карепов. ХНЧ, 2010г
3. Establishing Gold and Platinum Standards to 1 Terapascal Using Shockless Compression. D. E. Fratanduono, M. Millot, D. G. Braun et al. DOI: 10.1126/science.abh0364

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ
В ЖИДКОМ И ОКОЛОКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ:
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЙ РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ**

*Д.В. Минаков, М.А. Парамонов, В.Б. Фокин, И.С. Гальцов,
П.Р. Левашов, А.В. Дороватовский, М.А. Шейнблин*

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Мы представляем наши текущие достижения в описании термодинамических, транспортных и оптических свойств металлов методом квантовой молекулярной динамики в широком диапазоне параметров: от окрестности плавления до критической точки. В работе будут представлены данные по тепловому расширению, энтальпии, удельному сопротивлению и нормальной спектральной излучательной способности. Также будут продемонстрированы расчетные зависимости плотности, энтальпии, изобарной и изохорной теплоемкости, параметра Грюнайзена и скорости звука от температуры вдоль критической изобары для Zr, Mo и Fe. Для перечисленных металлов будут представлены оценки критических параметров, полученные впервые с помощью первопринципных расчетов.

Помимо расчетных данных нами будут представлены новые экспериментальные данные по импульсному нагреву электрическим током циркониевой и железной проволочек. Мы отмечаем отличное согласие между измеренной энтальпией плавления и рассчитанным значением.

В работе будут обсуждаться результаты первопринципных расчетов удельного сопротивления для Zr и Fe в широком диапазоне температур. Будут представлены *ab initio* расчеты нормальной спектральной излучательной способности для Zr и Fe в жидкой фазе вдоль критической изобары.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-79-10398).

**INVESTIGATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF METALS
IN LIQUID AND NEAR-CRITICAL STATES: FIRST-PRINCIPLE
CALCULATIONS AND EXPERIMENT**

*D.V. Minakov, M.A. Paramonov, V.B. Fokin, I.S. Galtsov,
P.R. Levashov, A.V. Dorovatovskiy, M.A. Sheindlin*

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

We present our current advances in describing the thermodynamic, transport, and optical properties of metals from the vicinity of melting up to the critical point by the quantum molecular dynamics method. We focus on the analysis of thermal expansion, enthalpy, resistivity, and normal spectral emissivity. Calculated dependences of density, enthalpy, the isobaric and isochoric heat capacities, the Gruneisen parameter, and the speed of sound on temperature along the critical isobar for Zr, Mo, and Fe are going to be demonstrated. The first *ab initio* estimates of the critical parameters for the metals under consideration are also presented.

New experimental data on electrical pulse heating of zirconium and iron wires are also presented. We note an excellent agreement between the measured enthalpy of fusion and calculated value.

The results of the first-principle calculations of the resistivity for Zr and Fe in a wide temperature range will be discussed. Ab initio calculations of the normal spectral emissivity for Zr and Fe in the liquid phase along the critical isobar will be presented. This work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 20-79-10398).

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РЕОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ, ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ

DYNAMIC STRENGTH AND RHEOLOGY OF MATERIALS, DYNAMICS OF CONSTRUCTIONS

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ИНКОНЕЛЬ 718

С.В. Разоренов¹, Г.В. Гаркушин¹, А.С. Савиных¹, С.А. Атрошенко²

¹Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия

²Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Путем регистрации и анализа полных волновых профилей проведены измерения динамического предела упругости и критических разрушающих напряжений при отколе образцов жаропрочного сплава Inconel 718, изготовленных традиционным методом вакуумной индукционной плавки в исходном состоянии и после термической обработки 3-х видов при нормальной и повышенной до 650⁰С температуре. Аналогичные измерения были проведены на образцах сплава Inconel 718, аддитивно изготовленного методом прямого лазерного выращивания при нормальной температуре. Ударно-волновое нагружение тестируемых образцов осуществлялось с помощью легкогазовой пушки, разгоняющей медный ударник толщиной от ~0.1 мм до ~1 мм до скорости 372±10 м/с, что соответствует максимальному давлению ударного сжатия ~6.5 ГПа. Толщина образцов варьировалась в этих экспериментах от 4 до 0.5 мм. Во всех экспериментах осуществлялась регистрация профилей скорости свободной поверхности с помощью лазерного интерферометра VISAR. Исследован процесс затухания упругой волны сжатия при ее распространении по образцу и зависимость откольной прочности от скорости деформирования перед разрушением в диапазоне 10⁵с⁻¹ – 5×10⁶с⁻¹. Для выявления анизотропии прочностных свойств сплава проведены две серии опытов по нагружению аддитивно изготовленных образцов вдоль и перпендикулярно направлению наплавки.

Во всех случаях наблюдается затухание подобным образом упругого предвестника с пройденным расстоянием. Термообработка аддитивных образцов приводит к заметному росту динамического предела упругости. Снижение динамического предела упругости и более быстрый процесс затухания упругого предвестника на толстых образцах демонстрирует литой сплав. Минимальное значение предела упругости 0.35 GPa измерено в экспериментах с литыми образцами номинальной толщины 4 мм. Для всех типов исследованных образцов ожидаемо

найденно, что величина откольной прочности возрастает с ростом скорости деформирования, причем скорость роста прочности зависит от термообработки. Максимальные критические растягивающие напряжения измерены для термообработанных аддитивно изготовленных образцов сплава, а откольная прочность образцов литого сплава в рамках разброса измерений равна прочности исходных аддитивных образцов не зависимо от скорости деформирования. Показано, что анизотропия структуры, связанная с технологией изготовления аддитивного материала, слабо влияет на прочностные свойства аддитивных образцов во всем диапазоне условий нагружения.

На основании проведенных измерений всех типов исследованных образцов сплава Инконель 718 при комнатной и повышенной до $\sim 650^{\circ}\text{C}$ температуре построены кривые затухания динамического предела упругости по мере распространения упругой волны сжатия по образцам толщиной от 0.2 до 4 мм и зависимости их откольной прочности от скорости деформирования в волне разгрузки в диапазоне от 10^5 c^{-1} до $5 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$, аппроксимированные степенными функциями и определены их коэффициенты.

Инструментальные измерения прочностных характеристик литого и аддитивного сплава Инконель 718 при ударном воздействии дополнены металлографическими исследованиями его структурных характеристик в зоне откольного разрушения, которые показали незначительные различия в морфологии зоны откола для литых и аддитивных образцов, нагружаемых в направлении и перпендикулярно направлению наплавки.

EFFECT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY AND HEAT TREATMENT ON THE DYNAMIC STRENGTH OF THE HEAT-RESISTANT INCONEL 718 SUPERALLOY

S.V. Razorenov¹, G.V. Garkushin¹, A.S. Savinykh¹, S.A. Atroshenko²

¹Institute of Problems of Chemical Physics, RAS, Chernogolovka, Russia

²Institute of Problems of Mechanical Engineering, RAS, St. Petersburg, Russia

By registering and analyzing the velocity histories measurements of the Hugoniot elastic limit and critical fracture stresses were carried out under the spalling of samples of the heat-resistant Inconel 718 alloy manufactured by the traditional method of vacuum induction melting in the initial state and after heat treatment of 3 types at normal and elevated temperatures up to 650°C . Similar measurements were carried out on samples of Inconel 718 alloy, additively manufactured by direct laser deposition at normal temperature. Shock-wave loading of the tested samples was carried out using a light-gas gun accelerating a copper impactor with a thickness of ~ 0.1 mm to ~ 1 mm to velocity of 372 ± 10 m/s, which corresponds to a maximum shock compression pressure in the samples of ~ 6.5 GPa. The thickness of the samples varied in these experiments from 4 to 0.5 mm. In all experiments, free surface velocity profiles were recorded using a VISAR laser interferometer. The process of decay of an elastic compression wave during its propagation through the sample and the dependence of the spall strength on the strain rate before spallation in the range of $10^5 \text{ c}^{-1} - 5 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$ are investigated. To identify the anisotropy of the strength properties of the alloy, two series of experiments were carried out on loading additively manufactured samples along and perpendicular to the direction of surfacing.

In all cases, the decay of the elastic precursor with the distance traveled into the sample is observed in a similar way. Thermal treatment both cast and additive samples leads to a noticeable increase in the Hugoniot elastic limit. A decrease in the Hugoniot elastic limit and a faster process of decay of the elastic precursor on thick samples is demonstrated by a cast alloy in as-received state. The minimum value of the elastic limit of 0.35 GPa was measured in experiments with cast samples with a nominal thickness of 4 mm. For all types of samples studied, it was expected, the spall strength increases with an increase in the strain rate, and the rate of strength growth depends on thermal treatment. The maximum critical tensile stresses were measured for thermally-treated cast and additively manufactured alloy samples, and the spall strength of cast alloy samples within the measurement range is equal to the strength of the additive samples, regardless of the strain rate. It is shown that the anisotropy of the structure associated with the additive material manufacturing technology has a weak effect on the strength properties of additive samples over the entire range of loading conditions.

Based on the measurements of all types of studied Inconel 718 alloy samples at room temperature and elevated to $\sim 650^{\circ}\text{C}$, curves of decay of the Hugoniot elastic limit as the elastic compression wave propagates over samples with a thickness of 0.2 to 4 mm and the dependence of their spall strength on the strain rate in the rarefaction wave in the range from 10^5 s^{-1} to $5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, approximated by power functions and their coefficients are determined.

Instrumental measurements of the strength characteristics of the as-received and thermal treated cast and additive Inconel 718 alloy under impact were supplemented by metallographic studies of its structural characteristics in the zone of spall fracture, which showed minor differences in the morphology of the spall zone for cast and additive samples loaded along with and perpendicular to the direction of surfacing.

СТРУКТУРА И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК6, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

*А.И. Кленов¹, А.Н. Петрова², И.Г. Ширинкина², И.Г. Бродова²,
В.В. Астафьев², Т.И. Яблонских², Е.Б. Смирнов¹*

¹РФЯЦ-ВНИИТ, г. Снежинск, Россия

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В работе исследовано влияние структуры монолитных и сетчатых образцов Al-Mg-Cu-Si сплава АК6, а также геометрии построения сетчатых образцов, синтезированных методом селективного лазерного плавления (СЛП) на 3D принтере по металлу Realizer SLM100, на динамические механические свойства. Для синтеза исследуемых образцов использовали порошок сплава АК6, изготовленный на предприятии ФГУП ВИАМ. Исследовано влияние параметров синтеза объемных образцов сплава АК6 со сплошным заполнением для исключения кристаллизационных дефектов, связанных с методом СЛП, контролируя параметры синтеза такие как толщина слоя, мощность лазера, скорость сканирования. В результате получена зависимость структурных характеристик, твердости и микротвердости СЛП сплава от параметров синтеза. Показано, что при мощности лазера $P=100-200$ Вт и скорости сканирования более 400 мм/с в структуре сохраняются не проплавленные частицы порошка и присутствуют горячие трещины и поры. Для устранения этих дефектов и повышения качества структуры предложено изменение режима печати за счет снижения скорости сканирования лазерного пучка. Установлено, что СЛП образцы из сплава АК6 имеют смешанную структуру, состоящую из столбчатых

и равноосных зерен, средний размер которых на порядок ниже, чем в сплаве, полученном традиционными методами литья.

Синтезированы сетчатые образцы с разной геометрией построения (кубической, гексагональной топологий, топологии трижды периодической поверхности минимальной энергии (ТППМЭ)), с изменением геометрических параметров, таких, как толщина стенки решетки и период решетки. Исследовано влияние литой структуры и геометрических параметров сетчатых образцов на динамические механические свойства сплава в диапазоне скоростей деформации 10^2 - 10^3 с⁻¹. Динамические механические свойства на сжатие сетчатых образцов и образцов со сплошным заполнением определяли по методу Гопкинсона-Кольского. Показано, что снижение суммарной доли площади отверстий в плоскости построения и перпендикулярной ей плоскости от 86 до 4% приводит к трехкратному повышению динамического предела текучести и к росту предела прочности в 4,7 раза.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (тема «Структура», № 122021000033-2).

STRUCTURE AND DYNAMIC PROPERTIES OF AK6 ALUMINUM ALLOY PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING

*A.I. Klenov¹, A.N. Petrova², I.G. Shirinkina², I.G. Brodova²,
V.V. Astafiev², T.I. Yablonskih², E.B. Smirnov¹*

¹RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

The influence of the structure of monolithic and mesh samples of Al-Mg-Cu-Si alloy AK6, as well as the geometry of the construction of mesh samples synthesized by the method of selective laser melting (SLM) on a Realizer SLM100 3D metal printer, on the dynamic mechanical properties of aluminum alloy AK6 was studied. The AK6 alloy powder manufactured at the VIAM was used for synthesis of the studied samples. The influence of the synthesis parameters of bulk samples of the alloy with continuous filling was studied to exclude crystallization defects associated with the SLM method by controlling the synthesis parameters such as layer thickness, laser power, and scanning speed. As a result, the dependence of the structural characteristics, hardness, and microhardness of the SLM alloy on the synthesis parameters was obtained. It is shown that at a laser power of $P=100$ - 200 W and a scanning speed of more than 400 mm/s, unmelted powder particles remain in the structure and hot cracks and pores are present. To eliminate these defects and improve the quality of the structure, it is proposed to reduce the scanning speed of the laser beam. It has been established that SLM specimens from the AK6 alloy have a mixed structure consisting of columnar and equiaxed grains, the average size of which is an order of magnitude lower than in the alloy obtained by traditional casting methods. Mesh samples with different construction geometry (cubic, hexagonal topology, topology of thrice-periodic minimum energy surface (TPMES)), with a change in geometric parameters, such as lattice wall thickness and lattice period, are synthesized. The influence of the cast structure and geometrical parameters of mesh samples on the dynamic mechanical properties of the alloy in the range of strain rates of 10^2 - 10^3 s⁻¹ has been studied. The dynamic mechanical properties of mesh samples and samples with continuous filling were determined by the Hopkinson-Kolsky method. It is shown that a decrease in the total share of the area of holes in the construction plane and the plane perpendicular to it from 86 to 4% leads to a threefold increase in the dynamic yield strength and to an increase in the tensile strength by 4.7 times.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme «Структура» №122021000033-2).

ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Т.О. Скляднева^{1,2}, М.С. Адигамов², В.А. Брагунец¹, И.С. Гнутов¹, И.В. Пикунин¹, А.М. Подурец^{1,2},
В.Г. Симаков^{1,2}, И.А. Терешкина^{1,2}, М.И. Ткаченко^{1,2}, И.Р. Трунин^{1,2}, Е.Е. Шестаков^{1,2}

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Россия

Доклад посвящен определению динамических прочностных характеристик образцов на основе порошка из стали 12Х18Н10Т, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления (СЛП) и сравнение их со свойствами стали, полученной по традиционной технологии горячекатаного проката, при ударном нагружении со скоростями до 450 м/с.

Ударно-волновые эксперименты проведены по схеме, согласно которой ударник, разогнанный в стволе пневматической нагружающей установки ствольного типа калибром 40 мм, соударяется с мишенным блоком, на котором закреплена обойма с тремя встроенными в нее образцами диаметром 10 мм и толщиной 4 мм из стали марки 12Х18Н10Т, изготовленными по различным технологиям (горячекатаный прокат - образец №1, горячекатаный прокат, отожженный при температуре 650°C - образец №2, СЛП – образец №3). Нагружение мишенного блока проводилось ударником из стали 12Х18Н10Т (горячекатаный прокат) толщиной 2 мм со скоростями от 165 м/с до 450 м/с (диапазон давлений сжатия от 3 до 9 ГПа). Всего проведено пять экспериментов.

Для регистрации скоростей движения свободных поверхностей $W(t)$ трех образцов и подлетной скорости ударника применялась методика непрерывной доплеровской диагностики на основе оптической схемы PDV. Зарегистрированные с помощью методики PDV спектрограммы, фотографии поперечных срезов сохраненных образцов приведены для эксперимента с подлетной скоростью ударника $W_{уд} = 225$ м/с на рисунке 1.

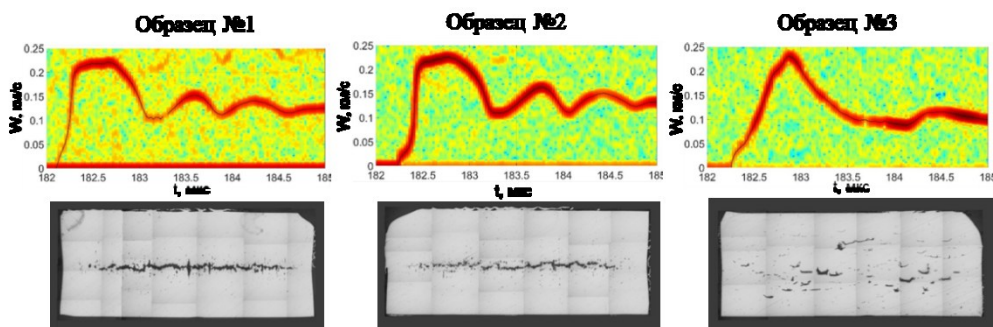


Рисунок 1. Экспериментальные спектрограммы и фотографии поперечных срезов образцов при $W_{уд}=225$ м/с

Профили $W(t)$, зарегистрированные методикой PDV, отличаются для «традиционных» сталей и стали, изготовленной по технологии СЛП. При практически одинаковом максимальном значении скорости W сильно различаются наклон фронта ударной волны, длительность стационарного максимального участка зависимости $W(t)$ (у образца из стали СЛП он отсутствует) и откольный импульс.

Сравнительный анализ результатов показал, что предел Гюгонио, а, следовательно, и динамический предел текучести стали СЛП в $\sim 1,5$ раза больше, чем у стали, изготовленной по традиционной технологии.

Металлографический анализ сохранных в опытах образцов также подтвердил многостадийный характер откольного разрушения и меньшую степень поврежденности образцов из стали СЛП по сравнению с образцами традиционной технологии изготовления при одинаковых условиях действия растягивающих волн. Это свидетельствует о том, что прочностные характеристики стали 12X18H10T, изготовленной по методу СЛП, как при высокоскоростном сжатии, так и при растяжении выше, чем у стали 12X18H10T, изготовленной по традиционной технологии горячекатаного проката.

SPALL FRACTURE OF SPECIMENS OF STEEL 12CR18NI10TI MANUFACTURED USING SELECTIVE LASER MELTING

*T.O. Sklyadneva^{1,2}, M.S. Adigamov², V.A. Bragunets¹, I.S. Gnutov¹, I.V. Pikulin¹, A.M. Podurets^{1,2},
V.G. Simakov^{1,2}, I.A. Tereshkina^{1,2}, M.I. Tkachenko^{1,2}, I.R. Trunin^{1,2}, E.E. Shestakov^{1,2}*

¹RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

²SarPTI RNU MEPhI, Sarov, Russia

The report is devoted to determining the dynamic strength characteristics of specimens based on 12Cr18Ni10Ti steel powder, manufactured using selective laser melting (SLM) technology and comparing them with the properties of steel obtained using traditional hot-rolled rolling technology under impact loading at speeds up to 450 m/s.

Shock-wave experiments were carried out according to the scheme, according to which the striker, dispersed in the barrel of a 40 mm caliber pneumatic loading installation of a barrel type, collides with a target block, on which a holder is fixed with three samples built into it with a diameter of 10 mm and a thickness of 4 mm made of steel grade 12Cr18Ni10Ti made by various technologies (hot-rolled steel - sample No. 1, hot-rolled steel annealed at a temperature of 650 °C - sample No. 2, SLP - sample No. 3).

The target block was loaded with a striker made of steel 12Cr18Ni10Ti (hot-rolled steel) 2 mm thick at speeds from 165 m/s to 450 m/s (compression pressure range from 3 to 9 Gpa). A total of five experiments were conducted.

To record the free surface velocities $W(t)$ of the three samples and the approach velocity of the impactor, we used the continuous Doppler diagnostics technique based on the PDV optical scheme. Recorded using the PDV spectrogram technique, photographs of the cross-sections of the stored samples are shown for the experiment with the approach speed of the impactor $W_{sp} = 225$ m/s in Figure 1.

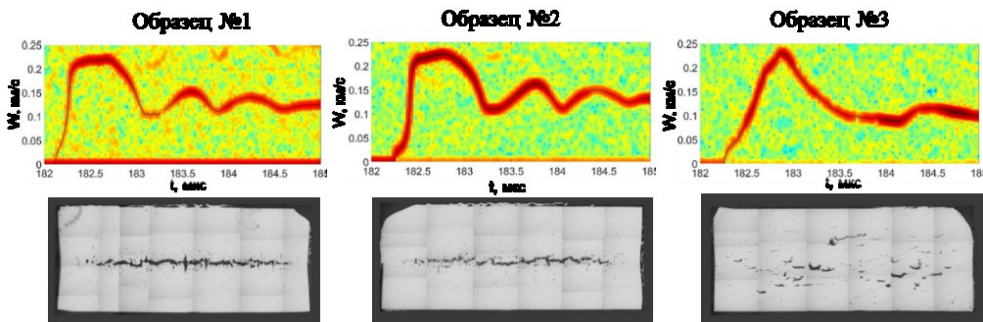


Figure 1. Experimental spectrograms and photographs of cross sections of samples at $W_{sp}=225$ m/s

The $W(t)$ profiles recorded by the PDV method are different for "traditional" steels and steel made using the SLM technology. At almost the same maximum velocity W , the slope of the shock wave front, the duration of the stationary maximum portion of the $W(t)$ dependence (it is absent for the SLM steel sample), and the spall pulse differ greatly.

A comparative analysis of the results showed that the Hugoniot limit, and, consequently, the dynamic yield strength of SLM steel, is $\sim 1,5$ times greater than that of steel manufactured by traditional technology.

The metallographic analysis of the samples preserved in the experiments also confirmed the multistage character of spall fracture and the lower degree of damage to samples made of SLP steel compared to samples of traditional manufacturing technology under the same conditions of action of tensile waves. This indicates that the strength characteristics of 12Cr18Ni10Ti steel manufactured using the SLM method, both under high-speed compression and tension, are higher than those of 12Cr18Ni10Ti steel manufactured using the traditional hot-rolled rolling technology.

АВТОМОДЕЛЬНАЯ ВОЛНА РАЗРЕЖЕНИЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ

В.Н. Нозин

РФЯЦ-ВНИИТФ, Г. Снежинск, Россия

Получено аналитическое решение задачи об одномерной разгрузке упругопластического материала из произвольного напряженного начального состояния. Проведено сравнение с результатами численных расчетов по двумерной программе СПРУТ. Показано, что структура пластического течения существенно зависит от способа корректировки девиатора напряжений в двумерных программных комплексах. Рассмотрены постановки экспериментов, результаты которых могут быть использованы для калибровки двумерных методик.

SELF-SIMILAR RAREFACTION WAVE IN ELASTOPLASTIC MATERIAL*V.N. Nugin*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

An analytical solution is derived for 1D rarefaction of elastoplastic material from an arbitrarily stressed initial state. Comparison with calculations by a 2D code SPRUT is provided. The plastic flow pattern is shown to be strongly dependent on the method of stress deviator correction in 2D codes. Discussed are setups of experiments whose results can be used to test and adjust 2D techniques.

О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ*А.В. Красильников, В.Н. Ногин*

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Получено аналитическое решение задачи о форме откольного сигнала в рамках модели мгновенного разрушения для простейшего уравнения состояния конденсированного вещества $P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2(\rho - \rho_{0k})$. Показано, что традиционно используемая для оценок откольной прочности формула $\sigma_{отк} = \frac{1}{2}\rho_0 C_0(U_{max} - U_{min})$, где U_{max} – максимальная скорость свободной поверхности, U_{min} – скорость поверхности перед выходом откольного импульса, для ударных волн с трапециевидальным профилем может приводить к ошибке до 30% в величине откольной прочности. На примере численного моделирования экспериментов по столкновению пластин из нержавеющей стали показано, что расчёты с реальным уравнением состояния вещества как в гидродинамическом, так и упругопластическом приближении подтверждают выводы, полученные при анализе аналитического решения для модельного уравнения состояния.

THE ACCURACY OF SPALL STRENGTH EVALUATION FROM CONTACT SURFACE MEASUREMENTS*A.V. Krasilnikov, V.N. Nugin*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

An analytical solution is derived for the spall signal waveform within the instantaneous failure model for a simple equation of condense matter state in the form $P = (\gamma - 1)\rho E + C_{0k}^2(\rho - \rho_{0k})$. It is shown that the traditionally used formula $\sigma_{отк} = \frac{1}{2}\rho_0 C_0(U_{max} - U_{min})$, with U_{max} for the maximal free surface velocity and U_{min} for the velocity before spall signal output, for shock waves with trapezoidal profiles, the error in the determination of spall strength may reach 30%. Using stainless steel as an example, we show that calculations with a real-world equation of state both in hydrodynamic and in

elastic-plastic approximations verify what was inferred from the analysis of the analytical solution for the model equation of state.

О КРИТИЧЕСКОМ ПОВЕДЕНИИ МЕТАЛЛОВ, АКТИНИДОВ И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Н.И. Сельченкова, И.Р. Трунин, А.Я. Учайев

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Работа посвящена установлению общих закономерностей динамических деструктивных процессов (динамического разрушения и диспергирования), протекающих в металлах, при высокоинтенсивном внешнем воздействии в динамическом диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} \div 10^{-9}$ с.

Установлены количественные характеристики кинетических процессов, которые являются откликом системы на внешнее воздействие. Определены фрактальная размерность, показатель Херста диссипативных структур – продуктов диспергирования, гидродинамических мод, кластеров центров разрушения [1].

Диссипативные структуры обладают свойством самоподобия [1, 2]. Самоподобие диссипативных структур является следствием самоорганизации в неравновесных системах; кинетика процессов динамического разрушения и диспергирования демонстрирует примеры масштабно-инвариантного поведения.

Масштабная инвариантность возникающих диссипативных структур указывает на то, что неравновесная система достигла критического состояния.

Также признаком того, что система находится в критическом состоянии является обращение в бесконечность сжимаемости (восприимчивости) χ , $\chi \sim K^{-1}$, K – упругий модуль [2].

Используя парный потенциал кристаллической решетки определено выражение для сжимаемости (восприимчивости) нагружаемого образца, которая зависит от плотности центров разрушения.

Установление общих релаксационных признаков для неравновесных систем позволяет прогнозировать поведение неисследованных систем [2, 3].

В настоящее время для исследования поведения конденсированных сред в экстремальных условиях применяются высокоинтенсивные установки: импульсные реакторы, ускорители, фемтосекундные лазеры. Мощностные возможности таких установок связаны со стойкостью элементов, узлов.

Показана аналогия количественных характеристик турбулентных течений в системах различной физической природы.

Проведено численное моделирование 2D, 3D процесса диспергирования из металлических образцов с нанесенными возмущениями в виде пирамидок [4].

Спрогнозировано поведение металлического плутония, тория, урана в диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} \div 10^{-9}$ с, $E \sim 30 \div 300$ Дж/г с применением установленного временного инварианта поведения металлов в экстремальных условиях [1-3] и экспериментальных данных по критическому давлению, приводящего к разрушению, металлического плутония [5].

Литература

1. Кошелева Е.В., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Учаев А.Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 211 с.
2. E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, and A. Ya. Uchaev On the Relationship between Thermodynamic and Dynamic Properties of Actinides and on Kinetics of Radiation Defects // *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, Vol. 84, No. 12, pp. 2022–2033. © Pleiades Publishing, Ltd., 2021.
3. Учаев А.Я., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Кошелева Е.В. Физическая природа долговечности легких актиноидов в явлении динамического разрушения. XIII Международный семинар «Фундаментальные свойства плутония». Материалы семинара / Под редакцией Б.А. Надькто. Саров, 9-13 сентября, 2013. С. 259-262.
4. Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов, И. Р. Трунин, А. Я. Учаев. О критическом поведении динамических систем при высокоинтенсивном воздействии. Международная конференция «XXII Харитоновские тематические научные чтения. Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2021. – С. 70-72.
5. Голубев В.К., Соболев Ю.С., Трунин И.Р. К определению условий разрушения плутония и его сплава с галлием при ударном нагружении // *Проблемы прочности*. 1998. №5. – С. 100-105.

ON CRITICAL BEHAVIOR OF METALS, ACTINIDES AND PLUTONIUM METAL ON HIGH-INTENSITY EXPOSURE

N.I. Sel'chenkova, I.R. Trunin, A.Ya. Uchaev

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The paper is devoted to establishing of general regularities of dynamic destructions (those of dynamic failure and dispersion) in metals, under high intensity external action in the dynamic range of non-equilibrium states $t \sim 10^{-6} \div 10^{-9}$ s.

Stipulated are kinetic process specifications of quantity, which are a system's response to exposure. Determined are fractal dimension, Hearst index of dissipative structures – dispersion products, hydrodynamic modes, failure center clusters [1].

Dissipative structures possess a self-similarity property [1, 2]. Dissipative structures' self-similarity is a consequence of self-organization in non-equilibrium systems; kinetics of the dynamic failure processes and dispersion demonstrate examples of a scale-invariant behavior.

Scale invariance of arising dissipative structures points out to the fact that the non-equilibrium system has reached a critical state.

Also an attribute of the system in a critical state is compressibility becoming infinite (susceptibility) χ , $\chi \sim K^{-1}$, K – an elastic module [2].

Using a crystal lattice pair potential, there is determined an expression for compressibility (susceptibility) of a loaded sample that depends on failure centers density.

Determining of common relaxation attributes for non-equilibrium systems allows prediction of unstudied systems' behavior [2, 3].

At present, to study condensed media behavior under extreme conditions, applied are high-intense facilities: pulsed reactors, accelerators, femtosecond lasers. High-power capabilities of such facilities are related to resistance of elements, units.

It is shown an analogy of turbulent flows specification of quantity in systems of various physical natures.

Carried out is 2D, 3D numerical simulation of process of metal samples' dispersion with applied perturbations in the form of pyramids [4].

Predicted is behavior of plutonium metal, thorium, uranium in the range of non-equilibrium states $t \sim 10^{-6} \div 10^{-9}$ s, $E \sim 30 \div 300$ J/g using established temporal invariant of metals behavior under extreme conditions [1- 3] and experimental data on critical pressure, causing failure of plutonium metal [5].

References

1. Kosheleva Ye.V., Punin V.T., Sel'chenkova N.I., Uchaev A.Ya. General behavior of hierarchy relaxation processes in metals under action of penetrating radiation pulses: Monograph - Sarov: RFNC-VNIIEF, 2015. – 211 p.
2. E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, and A. Ya. Uchaev On the Relationship between Thermodynamic and Dynamic Properties of Actinides and on Kinetics of Radiation Defects // Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 12, pp. 2022–2033. © Pleiades Publishing, Ltd., 2021.
3. Uchaev A.Ya., Punin V.T., Sel'chenkova N.I., Kosheleva E.V.. Physics of light actinides longevity in the dynamic failure phenomenon. XIII International Workshop «Fundamental Plutonium Properties». Workshop Materials / Edited by B.A. Nadykto. Sarov, September 9-13, 2013. P. 259-262.
4. Kosheleva E.V, Sel'chenkova N.I., S. S. Sokolov, Trunin I. R., Uchaev A.Ya. On critical behavior of dynamic systems on high-intensity exposure. International Conference «XXII Khariton Scientific Lectures. Supercomputer simulation and artificial intellect». – Sarov: FSUE «RFNC-VNIIEF», 2021. – P. 70-72.
5. Golubev V.K., Sobolev Yu.S., Trunin I. R. To determination of conditions of failure of plutonium and its alloys with gallium under shock loading/ Probl. Prochnosti. 1998. №5. – P. 100-105.

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

О.Б. Наймарк

ИМСС УрО РАН, Россия, г. Пермь, Россия

Ключевые слова: степенная универсальность, упруго-пластические волновые фронты, разрушение, адиабатический сдвиг

Закономерности формирования упруго-пластических волновых фронтов и разрушения при динамическом и ударно-волновом нагружении связываются с механизмами структурной релаксации, обусловленными коллективными эффектами в ансамблях дефектов (микросдвигов, микротрещин) в условиях специального типа критических явлений — структурно-скейлинговые переходы. Установлена связь механизмов разделения волнового фронта на упругий предвестник и пластический фронт с термодинамикой метастабильного состояния твердого тела с дефектами и формированием областей ориентационного упорядочения дефектов, обнаруживающих коллективную динамику при формировании автомодельных пластических волновых фронтов. Установлен вид неравновесного термодинамического потенциала твердых тел с дефектами в зависимости от

«параметра порядка» - деформации, индуцированной дефектами, и получены определяющие соотношения, описывающие связь релаксационных механизмов и локализацию поврежденности. Показано, что универсальность пластических волновых фронтов обусловлена «подчинением» кинетики релаксации коллективным модам дефектов автосолитонной природы, формирующимся в области перехода от упругого предвестника (предела Гюгонио) к пластическому фронту. При этом амплитуда упругого предвестника определяется кинетикой перехода в области метастабильности в зависимости от динамики роста напряжений, максимальная амплитуда упругого предвестника - шириной области метастабильности по напряжениям [1-3]. Установлено, что закономерности формирования пластических волновых фронтов аналогичны кинетике инициирования областей локализованного (адиабатического) сдвига на спектре масштабов коллективных мод дефектов; механизм деформирования локализованным сдвигом и разрушения соответствует инициирование двух разных типов коллективных мод дефектов: автосолитонных мод и диссипативных структур обострения [1]. Показано, что формирование автомодельных пластических волновых фронтов, множественного откола, волн разрушения может быть связано с качественными изменениями типов метастабильности материалов с дефектами, следствием которых является «резонансное» возбуждение установленных коллективных мод дефектов. Обсуждаются асимптотические зависимости вязкости, обусловленные релаксационных механизмов и нелинейной кинетикой дефектов. Результаты моделирования перечисленных эффектов подтверждены оригинальными широкодиапазонными экспериментами [4,5].

Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда № 21-79-30041.

Литература

1. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. -2003. -Т. 6, № 4. С. 45-72. DOI: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2003-00055>
2. Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Экспериментальное и теоретическое исследование автомодельной структуры пластического фронта ударных волн в конденсированных средах // Физическая мезомеханика. -2004. -Т. 7, № S1-1. С. 305-308. DOI: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00173>
3. Saveleva N.V., Bayandin Yu.V., Savinykh A.S., Garkushin G.V., Lyapunova E.A., Razorenov S.V., Naimark O.B. Peculiarities of the elastic-plastic transition and failure in polycrystalline vanadium under shock-wave loading conditions // Technical Physics Letters. – 2015. – V. 41, Is. 6. – P. 579-582 <https://doi.org/10.1134/S1063785015060292>
4. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Yu., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands // Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity). - 2016. - V.10, Is.38. - P. 280-287. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.38.40>
5. Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // Acta Mechanica. - 2021. - V.232. - P.1943-1959 <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1>

SELF-SIMILAR REGULARITIES OF DEFORMATION AND FAILURE UNDER INTENSIVE LOADING

O.B. Naimark

ICMM UB RAS, Perm, Russia

Keywords: self-similarity, power-law universality, elastic-plastic wave fronts, fracture, adiabatic shear

The patterns of formation of elastic-plastic wave fronts and fracture under dynamic and shock-wave loading are associated with the mechanisms of structural relaxation caused by collective effects in defects ensembles (microshears, microcracks) under conditions of a special type of critical phenomena - structural-scaling transitions. A link is established between the mechanisms of wave front splitting into elastic precursor and plastic front with the thermodynamics of the metastable state of a solid with defects and the formation of regions of orientational ordering of defects that exhibit collective dynamics during the formation of self-similar plastic wave fronts. The form of the non-equilibrium thermodynamic potential of solids with defects is established depending on the "order parameter" that is the deformation induced by defects, and constitutive relations are obtained that describe the relationship between relaxation mechanisms and damage localization. It is shown that the universality of plastic wave fronts is due to the "subordination" of the relaxation kinetics to the collective modes of defects of autosoliton nature, which are formed in the transition region from the elastic precursor (the Hugoniot limit) to the plastic wave front. In this case, the amplitude of the elastic precursor is determined by the kinetics of the transition in the metastability region depending on the dynamics of stress growth, the maximum amplitude of the elastic precursor is determined by the width of the metastability region with respect to stresses [1–3]. It has been established that the regularities of the formation of plastic wave fronts are similar to the kinetics of initiation of localized (adiabatic) shear regions on the scale spectrum of collective defect modes; The mechanisms of localized shear deformation and fracture correspond to the initiation of two different types of collective defect modes: autosoliton modes and dissipative blow-up structures [1]. It is shown that the formation of self-similar plastic wave fronts, multiple spall, and failure waves can be associated with qualitative changes in the types of metastability of materials with defects, the consequence of which is the "resonant" excitation of established collective modes of defects. Asymptotic dependences of viscosity due to relaxation mechanisms and nonlinear kinetics of defects are discussed. The results of simulation of the listed effects are confirmed by original wide-range experiments [4, 5].

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-30041.

References

1. Naimark O.B. Collective properties of ensembles of defects and some nonlinear problems of plasticity and fracture // *Physical mesomechanics*. -2003. -T. 6, No. 4. S. 45-72. DOI: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2003-00055>.
2. Bayandin Yu.V., Naimark O.B. Experimental and theoretical study of the self-similar structure of the plastic front of shock waves in condensed media // *Physical mesomechanics*. -2004. -T. 7, No. S1-1. pp. 305-308. DOI: <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2004-00173>.
3. Saveleva N.V., Bayandin Yu.V., Savinykh A.S., Garkushin G.V., Lyapunova E.A., Razorenov S.V., Naimark O.B. Peculiarities of the elastic-plastic transition and failure in polycrystalline vanadium under shock-wave loading conditions // *Technical Physics Letters*. – 2015. – V. 41, Is. 6. – P. 579-582 <https://doi.org/10.1134/S1063785015060292>.

4. Sokovikov M., Bilalov D., Oborin V., Chudinov V., Uvarov S., Bayandin Yu., Naimark O. Structural mechanisms of formation of adiabatic shear bands // *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*. - 2016. - V.10, Is.38. - P. 280-287. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.38.40>.
5. Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // *Acta Mechanica*. - 2021. - V.232. - P.1943–1959 <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В СОТРУДНИЧЕСТВЕ С ИНСТИТУТАМИ РАН

*Г.И. Канель, С.В.Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Мочалова, Д.М. Шалковский,
А.В. Петровцев, Д.А. Варфоломеев, В.В. Дремов, Е.А. Козлов, В.И. Таржанов,
Д.Т. Юсупов, С.С. Мокрушин, Д.Н.Казаков,С.И. Балабин, Д.А. Беляев,
С.Н. Малюгина, Н.И. Талуц, А.В. Добромислов,В.В. Сагарадзе, Н.В. Катаева,
А.Е. Шестаков, А.В. Седов, А.В. Павленко*

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

В работе приведены результаты исследования температурно-скоростных зависимостей динамических свойств материалов, используемых в атомной энергетике, таких как циркониевые сплавы Э100, Э110, Э125, Э635; реакторные стали: малоактивируемая сталь ЭК181, перспективная реакторная сталь Х13В2, аустенитная нержавеющая сталь Х16Н15МЗТ1 в сравнении со сталью 12Х18Н10Т; титановые сплавы: - ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ20, ОТ4, алюминиевые сплавы, магниевый сплав Ма14Т1. Динамические исследования проводили в диапазоне давлений до 20..30 ГПа, температуру образцов варьировали в диапазоне от минус 160 до 1020 градусов Цельсия. Сохраненные образцы анализировали на структурно-фазовые изменения, обусловленные воздействием ударных волн на образцы с различной температурой, а также выявление основных механизмов деформации и разрушения. Для магниевого сплава Ма14Т1, сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т выполнены калибровка модели разрушения.

Работа выполнена при поддержке Гос.контрактов №№ Н.4х.44.90.13.1111, Н.4х.44.9Б.16.1012 и Н.4х241.9Б.17.1013

STUDYING DYNAMIC PROPERTIES OF MATERIALS IN COOPERATION WITH THE RAS INSTITUTES

*G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin, V.E. Mochalova, D.M. Shalkovsky,
A.V. Petrovtsev, D.A. Varfolomeev, V.V. Dremov, E.A. Kozlov,
V.I. Tarzhanov, D.T. Yusupov, S.S. Mokrushin, D.N. Kazakov,
S.I. Balabin, D.A. Belyaev, S.N. Malyugina, N.I. Taluts, A.V. Dobromyslov,
V.V. Sagaradze, N.V. Kataeva, A.E. Shestakov, A.V. Sedov, A.V. Pavlenko*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

This paper presents the results of studying temperature-velocity dependences of dynamic properties of materials applied in nuclear power engineering, including zirconium

alloys E100, E110, E125, E635; reactor steels, namely, reduced activation steel EK181, advanced reactor steel Kh13V2, and austenitic stainless steel Kh16N15M3T1, which is compared to steel 12Kh18N10T; titanium alloys VT1-00, VT1-0, VT20, and OT4; aluminum alloys; and magnesium alloy MA14T1. Dynamic properties of materials were studied under pressures up to 20..30 GPa. The temperature of samples varied from -160 oC up to 1020 oC. The recovered samples were analyzed to reveal the changes in phase and structure of shockwave-loaded samples having different temperature, as well as the main deformation and fracture mechanisms. The fracture models for alloy MA14T1 and the 30KhGSA and 12Kh18N10T steels were calibrated.

The work was supported by Government Contracts ## N.4h.44.90.13.1111, N.4h.44.9Б.16.1012, and N.4h241.9В.17.1013.

СТАТИЧЕСКАЯ, ДИНАМИЧЕСКАЯ И УДАРНО-ВОЛНОВАЯ ПРОЧНОСТЬ ТРУБНОЙ СТАЛИ МАРОК 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ И КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60

*В.А. Огородников, М.А. Сырунин, К.В. Ерофеев, Е.В. Кулаков, А.С. Пупков,
Е.В. Кошатов, Ф.Ф. Галиев, А.М. Подурец, М.И. Ткаченко, Т.О. Складнева*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

При разработке специализированных взрывозащитных камер, к которым предъявляются повышенные требования по прочностной надежности, одним из важных вопросов является выбор материала силового корпуса, воспринимающего импульсные (динамические и ударно – волновые) нагрузки [1]. Как правило, для таких конструкций используются трубы промышленного производства различных типоразмеров из низколегированной стали [2]. При этом всегда возникает вопрос о выборе той или иной марки стали, особенно на этапе расчетного обоснования их взрывостойкости, поскольку характеристики динамической прочности материала труб, как правило, не известны. В связи с этим в данной работе впервые приведены результаты исследования статической, динамической и ударно-волновой прочности на сжатие и растяжение материала труб из низколегированной стали марок 17Г1С, 09Г2С и легированной стали марок 10Г2ФБЮ, класса прочности К60.

Кроме того, приведены данные о поведении несущей способности труб из этих марок стали при динамических нагрузках взрывного типа. Установлено, что взрывостойкость оболочек из менее прочной, но более пластичной стали 09Г2С, при скоростях деформации $(2 - 5) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ несколько выше, а характер разрушения менее катастрофичен по сравнению с оболочками из более прочной, но менее пластичной стали марки 10Г2ФБЮ и 10ХСНД.

Литература

1. Сырунин М.А., Огородников В.А. Взрывозащитные камеры для исследований гидродинамических процессов и взрывных технологий. // Приборы и техника эксперимента. 2015, № 2, с. 5 – 13.
2. Ерофеев К.В., Огородников В.А., Сырунин М.А., Ханин Д.В. Реакция цилиндрических оболочек из стали марок 09Г2С и 10ХСНД с продольными и кольцевыми сварными швами на взрывное нагружение. // Физика горения и взрыва. 2020, № 6, с. 116 – 121.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

К.В. Ерофеев, М.А. Сырунин, В.А. Огородников, Д.В. Ханин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Взрывозащитные камеры (ВЗК) являются основным контуром, обеспечивающим безопасность взрывных экспериментов в испытательных комплексах для исследования гидродинамических процессов. Силовой корпус ВЗК, работающий при динамических нагрузках, к которому предъявляются повышенные требования прочностной надежности, изготавливается из конструкционных сталей. Появление новых марок сталей с повышенными механическими характеристиками и отсутствие данных об их динамических свойствах определяет необходимость выполнения прочностных исследований их свойств, в том числе определение взрывостойкости и несущей способности оболочек из низколегированных сталей для обоснования их применения в конструкциях ВЗК.

В докладе представлены исследования деформирования и разрушения цилиндрических оболочек из стали марок 09Г2С, 17Г1С, 10Г2ФБЮ и стали класса прочности К60 различных типоразмеров: с диаметром от 820 мм до 1420 мм и толщиной стенки от 10 мм до 21,6 мм при внутреннем взрывном нагружении зарядами ВВ массой от 2 до 34 кг ТЭ.

Выявлены особенности упругопластического деформирования оболочек при реакции на динамические нагрузки, связанные с их прочностными и пластическими свойствами.

Установлены характер разрушения оболочек и предельные неразрушающие уровни деформаций, определяющие несущую способность каждой из исследуемых оболочек.

Проведено сравнение несущей способности оболочек с различным диаметром и толщиной стенки, наличием или отсутствием конструктивных отверстий в наиболее нагруженном центральном сечении. Установлено, что при уровнях деформаций ~15% возможно разрушение оболочки с образованием магистральной трещины в зоне сварного шва, что снижает уровни допустимых предельных деформаций.

Получены зависимости максимальных деформаций оболочек от удельной взрывной нагрузки, в которых также учтены результаты предыдущих сравнительных исследований оболочек из стали 09Г2С и 10ХСНД.

Для данных марок сталей также выполнен ряд исследований по определению различных статических и динамических прочностных параметров.

RESEARCH OF DEFORMATION AND DESTRUCTION OF COVERS FROM THE LOW-ALLOYED STEEL AT INTERNAL EXPLOSIVE LOADING

K.V. Erofeyev, M.A. Syrunin, V.A. Ogorodnikov D.V. Khanin

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

Containment chambers are the main contours ensuring safety of explosive experiments in testing complexes for the research of hydrodynamic processes. The chamber power body working at dynamic loads, to which increased requirements of strength

reliability are imposed, is manufactured of structural steels. The emergence of new steel grades with the increased mechanical characteristics and the lack of data on their dynamic properties define the need of performance of strength researches of their properties, including definition of the explosive resistance and bearing capacity of covers made of low-alloyed steels for justifying their application in designs of containment chambers.

The paper presents the researches of deformation and destruction of cylindrical covers from steel of brands 09G2S, 17G1S, 10G2FBYu and steel of the class of durability K60 of different standard sizes: with the diameter from 820 mm to 1420 mm and thickness of the wall from 10 mm to 21.6 mm at internal explosive loading by charges from 2 to 34 kg of TNT.

Features of elastic-plastic deformation of covers on reaction to the dynamic loads connected with their strength and plastic properties are revealed.

The nature of destruction of covers and extreme nondestructive levels of deformations defining bearing capacity of each of the studied covers are established.

Bearing capacity of covers was compared with a different diameter and a thickness of the wall, availability or lack of constructive openings in the most loaded central section. It is established that at levels of deformations $\sim 15\%$ are possible destruction of the cover with formation of the main crack in the zone of the weld joint that reduces levels of admissible limit deformations.

The dependences of the maximum deformations of covers on unit explosive load, in which results of the previous comparative researches of covers from steel 09G2S and 10HSND are also considered, are received.

For these steel grades the number of researches on determination of different static and dynamic strength parameters is also executed.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ОБЕДНЕННОГО УРАНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

А.В. Ольховский, А.Е. Ковалев, А.И. Иванушкин, Д.П. Кучко, Д.Г. Панкратов

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

В данной работе представлены постановки и результаты взрывных экспериментов по изучению прочностных характеристик образцов из нелегированного обедненного урана технической чистоты и его легированного молибденом сплава. Для регистрации временных профилей скоростей $W(t)$ диагностируемых участков свободной поверхности исследуемых образцов использовалась многоканальная лазерно-гетеродинная диагностика. Такой подход позволяет получить статистически представительные результаты в относительно небольшом количестве сравнительных взрывных экспериментов. Значимых отличий прочностных характеристик при интенсивном ударно-волновом нагружении не проявилось для металла технической чистоты и его легированного молибденом сплава, в отличие от низкоскоростного деформирования.

Литература

1. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, Релаксация упругого предвестника при взрывном нагружении предварительно квазистатически экструдированного мелкозернистого нелегированного урана, ДАН, 2008, том 421, № 3, С. 332-334, [Doklady Physics (Engl. transl.), 2008, Vol. 53, No. 7, pp.368-370]

2. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, Динамическая сдвиговая и откольная прочности предварительно квазистатически экструдированных мелкозернистого урана и сплава U – 0,3% Mo, ДАН, 2009, т.424, № 6, стр.769-773 [Doklady Physics (Engl. transl.), 2009, Vol. 54, No. 2, pp.88-92]
3. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, Динамическая сдвиговая и откольная прочности предварительно квазистатически экструдированных мелкозернистого урана и сплава U – 0,3% Mo, ФММ, 2009, т.108, № 4, стр.424–438 The Physics of Metals and Metallography 10/2009; 108(4):401-414
4. Е.А.Козлов, С.В.Бондарчук, Ю.Н.Зуев, С.М.Новгородцев, Механизмы высокоскоростной деформации и разрушения мелкозернистого нелегированного урана при взрывном нагружении, ФММ, 2011, т.111, вып.4, стр. 428-438 [The Physics of Metals and Metallography (Engl. transl.), 2011, V. 111, No. 4, pp.410-420]

STRENGTH PROPERTIES OF THE SHOCK-LOADED DEPLETED URANIUM SAMPLES

A.V. Olkhovsky, A.E. Kovalev, A.I. Ivanushkin, D.P. Kuchko, D.G. Pankratov

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The work presents the set-ups and results of explosive experiments aimed to study strength properties of the samples made of technically pure unalloyed depleted uranium and its molybdenum-doped alloy. Multi-channel PDV diagnostic procedure was used to record time velocity profiles, $W(t)$, for diagnosable portions of the test samples' free surface. This approach allows us to collect statistically representative data from a relatively small number of comparative explosive experiments. In contrast to low-rate deforming, intense shock-wave loading revealed no significant differences in the strength properties of technical-purity metal and its molybdenum-doped alloy.

References

1. E.A. Kozlov, D.G. Pankratov, V.I. Tarzhanov, I.V. Telichko, Elastic precursor relaxation under explosive loading of quasi-statically pre-extruded fine-grained unalloyed uranium. Doklady Physics (Engl. transl.), 2008, Vol. 53, No. 7, pp.368-370
2. E.A. Kozlov, D.G. Pankratov, V.I. Tarzhanov, I.V. Telichko, Dynamic shear and spall strengths of quasi-statically pre-extruded fine-grain uranium and U-0.3% Mo alloy. Doklady Physics (Engl. transl.), 2009, Vol. 54, No. 2, pp.88-92
3. E.A. Kozlov, D.G. Pankratov, V.I. Tarzhanov, I.V. Telichko, Dynamic shear and spall strengths of preliminary quasi-statically extruded fine-grained uranium and U-0.3% Mo alloy. The Physics of Metals and Metallography, 2009; V. 108, No. 4, pp.401-414
4. E.A. Kozlov, S.V. Bondarchuk, Yu.N. Zuev, S.M. Novgorodtsev, Mechanisms of high-strain-rate deformation and fracture of fine-grained unalloyed uranium upon explosive loading. The Physics of Metals and Metallography (Engl. transl.), 2011, V. 111, No. 4, pp.410-420.

**ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УРАНА
РАЗМЕРА ЗЕРНА И ЛЕГИРОВАНИЯ МОЛИБДЕНОМ**

Е.В. Кошатова, Д.Н. Замотаев, Ф.Ф. Галиев

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В связи с широким применением урана в военной области, атомной энергетике, космической технике и других отраслях промышленности [1] необходимо получение новых данных о влиянии размера зерна и легирования урана на его механические свойства для проведения прочностных расчетов, а также создания математических моделей материала в широком диапазоне скоростей деформирования (10^2 - 10^5 с⁻¹).

В данной работе представлены результаты исследования и сравнения прочностных и пластических свойств крупнозернистого и ультрамелкозернистого (УМЗ) урана нелегированного и легированного молибденом (~0,3% и ~1,3% Мо).

Для формирования УМЗ структуры в уране и его сплаве с молибденом использован метод обработки заготовок крупнозернистого урана, заключающийся в сочетании специальных термообработок и интенсивной пластической деформации [2]. Средний размер зерна УМЗ нелегированного урана составил ~0,2 мкм, УМЗ сплава урана с 0,3% молибдена - ~3 мкм.

Исследование механических свойств проведено на пневматической нагружающей установке по методу Кольского с использованием составного стержня Гопкинсона [3] при динамическом сжатии в диапазоне скоростей деформаций ($5,0 \cdot 10^2$ - $3,6 \cdot 10^3$) с⁻¹.

На основании анализа совокупности полученных экспериментальных данных установлено, что измельчение зерна у нелегированного и легированного молибденом (0,3% Мо) урана на два – три порядка приводит к увеличению его условного предела текучести на ~47% и ~32 %, пластичности на ~23% и ~55%, соответственно.

Легирование крупнозернистого урана молибденом ~0,3% и ~1,3% приводит к увеличению условного предела текучести на ~40% и ~60%, соответственно. Пластичность крупнозернистого урана легированного ~0,3% молибдена в ~3 раза выше, чем у крупнозернистого нелегированного урана.

Литература

- 1 Механические свойства урана при квазистатическом и ударно-волновом нагружении: Препринт. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 54-97. Большаков А.П., Квасков Г.А., Новиков С.А., Пушков В.А., Синицын В.А. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997, 44с.
- 2 Исследование механических свойств урана с различной исходной структурой при скорости деформирования 10^3 - 10^5 с⁻¹. В.А. Пушков, О.Н. Игнатова, Е.В. Кошатова и др. Физическая мезомеханика, том 13, №1, 2010, с.107-112.
- 3 Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения. - Механика, 1950, вып.4, с.108-128.

INFLUENCE OF GRAIN SIZE AND ALLOYING OF URANIUM BY MOLYBDENUM ON DYNAMICAL MECHANICAL PROPERTIES OF URANIUM

E.V. Koshatova, D.N. Zamotaev, F.F. Galiev

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

In relation to wide application of uranium in a military area, nuclear power engineering, space technology and other branches of industry [1] it is necessary to obtain new data on influence of grain size and alloying of uranium on its mechanical properties for implementing strength calculations as well as for creating mathematical models of a material in a wide range of strain rates (10^2 - 10^5 s⁻¹).

This work presents the results of the study and the comparison of strength and plastic properties of coarse-grained and ultrafine-grained (UFG) uranium to be unalloyed and alloyed by molybdenum (~0,3% and ~1,3% Mo).

To form a UFG structure in uranium and its alloy with molybdenum, a method of blocking was used for blanks of coarse-grained uranium. This method consists of special heat treatment and intensive plastic strain [2]. An average grain size of UFG unalloyed uranium was ~0,2 μm, UFG uranium alloy with 0,3% molybdenum was ~3 μm.

The study of mechanical properties was implemented on a pneumatic loading facility according to Kol'skiy method with the use of a Hopkinson-split-bar method [3] at dynamic compression in a range of strain rates ($5,0 \cdot 10^2$ - $3,6 \cdot 10^3$) s⁻¹.

It was found based on the analysis of obtained experimental data that grain refinement of uranium unalloyed and alloyed by molybdenum (0,3% Mo) on two-three orders leads to an increase of its conventional yield strength by ~47% and ~32 %, plasticity increased by ~23% and ~55%, respectively.

Alloying of coarse-grained uranium by molybdenum ~0,3% and ~1,3% brings about an increase of conventional yield strength by ~40% and ~60%, accordingly. Plasticity of coarse-grained alloyed uranium by ~0,3% molybdenum is three times higher than that of coarse-grained unalloyed uranium.

References

1. 1 Uranium mechanical properties at quasi-static and shock-wave loading: Preprint. RFNC-VNIIEF. 54-97. Bol'shakov A.P., Kvaskov G.A., Novikov S.A., Pushkov V.A., Sinitsyn V.A. Sarov: RFNC-VNIIEF, 1997, 44p.
2. 2 The study of uranium mechanical properties with a various initial structure at a strain rate of 10^3 - 10^5 s⁻¹. V.A. Pushkov, O.N. Ignatova, E.V. Koshatova et al. Physical meso-mechanics, volume 13, №1, 2010, pp.107-112.
3. Kol'skiy G. The study of mechanical properties of materials at high loading rates.- Mechanics, 1950, issue 4, pp.108-128.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕДИ И СПЛАВОВ МЕДИ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ

И.В. Хомская, Д.Н. Абдуллина, С.В. Разоренов, Е.В. Шорохов, Л.А. Елишина

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Изучено влияние дисперсности и дефектности кристаллической структуры на сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению меди чистой 99.8 мас.% и сплавов меди, легированных микродобавками (0.02-0.10 мас.%) циркония, хрома и графена. Субмикрокристаллическая (СМК) структура в материалах была получена методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Метод ДКУП, разработанный в РФЯЦ-ВНИИТФ (Патент РФ 2006 г), представляет собой высокоскоростной (10^4 – 10^5 с⁻¹) вариант квазистатического РКУП. Деформация простого сдвига, которая формирует структуру при РКУП, в случае ДКУП является высокоскоростной, кроме того, на образец при ДКУП действует ударно-волновая деформация сжатия, что создает дополнительный источник деформационного наклепа. Показано, что СМК структура в меди формируется за счет циклических процессов фрагментации и динамической рекристаллизации. В сплавах меди при ДКУП протекают процессы фрагментации и частичного деформационного упрочнения с выделением наноразмерных частиц вторых фаз - Сг и Cu_5Zr .

Динамические свойства материалов исследованы в условиях ударного сжатия интенсивностью 4.7-7.3 ГПа и скоростью деформации $(0.9-2.1) \cdot 10^5$ с⁻¹. Регистрацию волновых процессов в образцах осуществляли с помощью Доплеровского измерителя скорости VIZAR. В результате были получены профили скорости свободной поверхности меди, сплавов и композитов в исходном состоянии и после ДКУП. Кроме того, для сплавов дополнительно были получены профили свободной поверхности после комбинированной обработки: ДКУП и отжига при 400-450°C. Из анализа волновых профилей, были рассчитаны: динамический предел упругости (σ_{HEL}), динамический предел текучести (Y) и откольная прочность (σ_{sp}) материалов до и после ДКУП по различным режимам. Из сравнения волновых профилей и динамических характеристик сделан вывод о том, что измельчение исходной крупнокристаллической (КК) структуры до микрокристаллического (МК) и СМК состояний приводит к существенному изменению динамических свойств материалов.

Показано, что измельчение зерна меди от 100 до 0.05 - 0.5 мкм, то есть до СМК и СМК + НК состояний в 6 раз увеличивает динамический предел упругости (σ_{HEL}) и динамический предел текучести (Y). Это обусловлено специфическими неравновесными состояниями, сформированными в меди при ДКУП в результате высокоскоростных процессов фрагментации и динамической рекристаллизации. Определено, что диспергирование структуры меди до СМК + НК-состояния увеличивает в 1.4 раза откольную прочность, по сравнению с ее значением в КК-состоянии. Это связано с формированием в меди при ДКУП, $n = 4$ структуры, состоящей из сильно разориентированных зерен размерами 50-350 нм, с преимущественно неравновесными большеугловыми границами, что способствует замедлению роста микротрещин, т.е. затягиванию процесса высокоскоростного разрушения. Таким образом, можно отметить следующие особенности деформационного поведения меди с СМК+НК-структурой, полученной ДКУП, в условиях ударного сжатия при субмикросекундных длительностях нагрузки: возрастание характеристик упруго-пластического перехода, увеличение критического

разрушающего напряжения при отколе и затягивание процесса откольного разрушения, по сравнению с КК состоянием.

Измельчение кристаллитов до МК состояния (3-5 мкм) в сплавах при ДКУП, $n = 1$ увеличивает σ_{HEL} в 1.9-2.8 раза и Y в 1.6-1.7 раза, по сравнению с исходным КК состоянием. Образование СМК структуры при ДКУП, $n = 3$ в сплавах приводит к повышению σ_{HEL} и Y в 1.9-3.7 и 1.8-2.6 раз, соответственно. Отметим, что в сплаве Cu-0.1 мас.%Cr формирование МК и СМК структуры приводит к увеличению откольной прочности σ_{sp} в 1.3-1.5 раза, по сравнению с исходной КК структурой. В сплаве Cu-0.03 мас. %Zr после ДКУП образуется структура с меньшей долей высокоугловых границ, наблюдается снижение σ_{sp} . Последующие отжиги при 400 и 450°C приводят к дополнительному увеличению динамических свойств СМК сплавов Cu-0.03 %Zr и Cu-0.1%Cr в 1.2 и 1.9 раза, соответственно. Повышенный уровень механических свойств сплавов, по сравнению с медью, связан с упрочнением, обусловленным выделением наночастиц вторых фаз в процессе ДКУП и последующего отжига. Показано, что ДКУП композита на основе меди с микродобавкой графена (Cu-0.02 % Gn) приводит к увеличению σ_{HEL} и Y в 4.0-5.6 раз и σ_{sp} в 1.5-1.8 раз. Полученные экспериментальные данные о характере откольного разрушения меди и сплавов меди, легированных микродобавками циркония, хрома и графена с СМК структурой, сформированной при ДКУП и оценка влияния дисперсности и дефектности структуры на сопротивление высокоскоростному деформированию при субмикросекундных длительностях нагрузки позволяют прогнозировать поведение СМК материалов в экстремальных условиях их эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки по темам: «Структура» № 122021000033-2 и № АААА-А19-119071190040-5.

THE DYNAMIC STRENGTH OF COPPER AND COPPER ALLOYS WITH A SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE OBTAINED BY HIGH-SPEED PRESSING

I.V. Khomskaya, D.N. Abdullina, S.V. Razorenov, E.V. Shorokhov, L.A. Elshina

Miheev Institute of Metal Physics UB RAS, Ekaterinburg, Russia
RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

The influence of the dispersity and imperfection of the crystal structure on its resistance to the high-strain-rate deformation and fracture of copper of 99.8 wt. % purity and copper alloys alloyed with microadditives (0.02-0.10 wt.%) of zirconium, chromium and graphene have been studied. The submicrocrystalline (SMC) structure in the materials was obtained by dynamic channel-angular pressing (DCAP). The DCAP method developed at RFNC-VNIITF (RF Patent 2006) is a high-speed (10^4 - 10^5 s⁻¹) version of the quasi-static method of equal-channel angular pressing (ECAP). The deformation by simple shear, which forms the structure in the case of ECAP, in the case of DCAP is a high-strain-rate process; furthermore, the sample is affected by the shock-wave deformation of compression, creating an additional source of deformation-induced strengthening. It was shown that the SMC structure in copper is formed due to cyclic processes of the fragmentation and dynamic recrystallization. In copper alloys by DCAP the processes of the fragmentation and partial strain hardening occur with the precipitation of nanoparticles of the second phase - Cr and Cu₅Zr.

The dynamic properties of the materials were studied under conditions of shock compression with an intensity of 4.7-7.3 GPa and the strain rate of $(0.9-2.1) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. The registration of wave processes in the samples was carried out using a VISAR laser Doppler velocimeter. As a result, profiles of a free-surface velocity of copper, alloys and composites were obtained in the initial state and after DCAP. In addition, profiles of a free-surface velocity were additionally obtained for alloys after combined treatment: DCAP and annealing at 400-450°C. Based on the analysis of the obtained wave profiles, the following characteristics were calculated: the dynamic elastic limit (σ_{HEL}), the dynamic yield stress (Y), and the spall strength (σ_{sp}) of materials before and after the DCAP according to various treatments. Based on the comparison of wave profiles and dynamic characteristics, it is concluded that the refinement of the structure from the initial coarse-grained (CG) to microcrystalline (MC) and SMC states leads to a significant change in the dynamic properties of materials.

It has been shown that the grain refinement of copper from 100 to 0.5–1.0 μm , that is, up to the SMC and SMC+NC states increased the dynamic elastic limit (σ_{HEL}) and the dynamic yield stress (Y) of copper by six times. This is due to the specific nonequilibrium states formed in copper during DCAP as a result of the high strain-rate fragmentation and the dynamic recrystallization processes. It has been determined that the refinement of the copper structure to an SMC + NC state increases the spall strength in 1.4 times as compared to its value in the CG state. This is due to the formation in copper upon DCAP with $n = 4$ of a structure consisting of highly misoriented grains with dimensions from 50 to 350 nm with mainly nonequilibrium high-angle boundaries, which promotes a slowing down of the growth of the microcracks, i.e., leads to a delay of the process of the fracture induced by high-strain-rate deformation. Thus, the following features of the deformation behavior of copper with an SMC + NC structure obtained by DCAP under conditions of shock compression upon submicrosecond durations of loading can be noted: an increase in the characteristics of the elastic–plastic transition; an increase in the critical fracture stress during the spalling; and a delay of the process of the spall fracture as compared to CG state.

The refinement of crystallites to the MC state (3-5 μm) in alloys during DCAP, $n = 1$ increases σ_{HEL} by 1.9-2.8 times and Y by 1.6-1.7 times, compared with the initial CG state. The formation of SMC structure at DCAP, $n=3$ in alloys leads to an increase in σ_{HEL} and Y by 1.9-3.7 and 1.8-2.6 times, respectively. Note that in the alloy Cu-0.1 wt.%Cr the formation of the MC and SMC structure leads to an increase the spall strength σ_{sp} by 1.3-1.5 times, compared with the initial CG structure. Subsequent annealing at 400-450°C leads to an additional increase in the dynamic properties of the Cu-0.03%Zr and Cu-0.1%Cr alloys by 1.2-1.9 times, respectively. The increased level of mechanical properties of the alloys, compared with copper, is associated with the additional strain hardening caused by the precipitation of nanoparticles of the second phases during DCAP and subsequent annealing. It is shown that the DCAP of a copper-based composite with a graphene microadditive (Cu-0.02 wt.% Gn) leads to an increase in σ_{HEL} and Y by 4.0-5.6 times and σ_{sp} by 1.5-1.8 times. The obtained experimental data on the nature of the spall fracture of binary copper alloys doped with microadditives of zirconium, chromium and graphene with a SMC structure formed during DCAP and the estimation of the influence of the dispersion and defect of the structure on the resistance to high-speed deformation at submicrosecond durations of loading will allow us to predict the behavior of SMC materials under extreme operating conditions.

The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation according to the theme: "Structure" No. 122021000033-2 and No. AAAA19-119071190040-5.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

И.А. Банникова, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк, Ю.В. Баяндин

ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

Ключевые слова: полярные и неполярные жидкости, откольная прочность, динамическая вязкость, VISAR.

Применение ударно-волнового нагружения и систем регистрации высокого временного разрешения дают уникальную возможность для разработки методов исследования реологических свойств и разрушения конденсированных сред и их связи с многомасштабными механизмами структурной релаксации и разрушения. Целью работы является экспериментальное исследование релаксационных свойств жидкостей (в том числе полярных: дистиллированная вода, глицерин, пропантоносители, и неполярных: силиконовое, трансформаторное масло, додекан) при сжатии и растяжении в условиях ударно-волновых воздействий для установления связи автомоделных закономерностей деформирования и разрушения, асимптотических закономерностей изменения вязкости. В работе приводятся результаты исследования профилей массовой скорости жидкостей, подвергнутых ударно-волновому нагружению методом электровзрыва проводника (ЭВП) и использованием техники взрывного генератора (ВГ), реализованных на базе институтов ИМСС УрО РАН и ИПХФ РАН [1, 2, 3]. Установленные закономерности реологического поведения, разрушения жидкостей обнаруживают признаки автомоделности, характерные для поведения твердых тел (степенная универсальность квазипластического фронта, зависимости откольной прочности, асимптотики вязкости), позволяют установить связь механизмов структурной релаксации с особенностями формирования волновых фронтов в жидкостях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590016.

Литература

1. Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушения жидкостей при интенсивных воздействиях // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, №3. – С. 69-77.
2. Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В. Импульсное сжатие и растяжение додекана и минеральных масел при ударно-волновом воздействии // ЖТФ, 2018. – Т. 88, вып. 4. – С. 514-520.
3. Bannikova I.A., Uvarov S.V., Bayandin Y.V. Surfactant solutions behavior under electric explosion wire loading // Procedia Structural Integrity. - 2021. - V.33. - P.1146–1151.

**EXPERIMENTAL STUDY OF RHEOLOGICAL AND STRENGTH
PROPERTIES OF LIQUIDS UNDER INTENSE LOADING***I.A. Bannikova, S.V. Uvarov, O.B. Naimark, Yu.V. Bayandin*

ICMM UB RAS, Perm, Russia

Keywords: polar and nonpolar liquids, shear strength, dynamic viscosity, VISAR

The use of shock-wave loading and high-time resolution recording systems provides a unique opportunity to develop methods for studying the rheological properties and destruction of condensed media and their relationship with multiscale mechanisms of structural relaxation and destruction. The aim of the work is an experimental study of the relaxation properties of liquids (including polar: distilled water, glycerol, propane carriers, and nonpolar: silicone, transformer oil, dodecane) under compression and tension under shock-wave effects to establish the connection of self-similar patterns of deformation and destruction with asymptotic patterns of viscosity changes. The paper presents the results of a study of the mass velocity profiles of liquids subjected to shock-wave loading by the method of electric explosion wire (EEW) and using the explosive generator (EG) technique implemented on the basis of the ICMM UB RAS and IPCP RAS institutes [1, 2, 3]. The obtained regularities of rheological behavior and destruction of liquids reveal signs of self-similarity characteristic of the behavior of solids (the power-law universality of the quasi-plastic front, the dependence of the shear strength, the asymptotics of viscosity), allow us to establish a connection between the mechanisms of structural relaxation and the peculiarities of the formation of wave fronts in liquids.

The reported study was funded by RFBR and Perm Territory, project number 19-48-590016.

References

1. Bannikova I.A., Zubareva A.N., Utkin A.V., Uvarov S.V., Naimark O.B., Metastable states, relaxation mechanisms, and fracture of liquids under severe loading conditions // *Phys. Mesomech*, 2017, 20(4), 399-406.
2. Bannikova I.A., Zubareva A.N., Utkin A.V., Shock-Wave Pulse Compression and Stretching of Dodecane and Mineral Oils. // *Technical Physics*, 2018, Vol. 63, No. 4, pp. 498–505.
3. Bannikova I.A., Uvarov S.V., Bayandin Y.V. Surfactant solutions behavior under electric explosion wire loading // *Procedia Structural Integrity*. - 2021. - V.33. - P.1146–1151.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
ПРИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКЕ***Д.Р. Ледон, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк*

Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

В работе предложена модель деформационного поведения и разрушения для широкого класса материалов (металлы и сплавы), способная описывать поведение материалов в широком диапазоне скоростей деформаций (от 10^{-4} до 10^7 с⁻¹), давлений (от 10 МПа до 10 ГПа) и температур (от комнатной до 0,5 температуры плавления).

Константы для предложенной модели определяли в несколько этапов с использованием различных экспериментальных данных: 1. Решение задачи минимизации невязки между экспериментальной диаграммой деформирования (при квазистатическом нагружении) и расчётом. 2. Решение задачи минимизации невязки между экспериментальной диаграммой деформирования (при динамическом нагружении при скоростях деформации 10^2 - 10^3 с⁻¹) и расчётом. 3. Решение задачи минимизации невязки между экспериментальными данными и расчётом при повышенных температурах.

В качестве верифицирующего эксперимента использовали модифицированный тест Тейлора, который заключается в соударении цилиндрического ударника с мерным стержнем. В таком эксперименте для исследуемого материала реализуется напряжённо-деформированное состояние, неоднородное вдоль длины, а также не одноосное. Материал деформируется с различными скоростями деформации и до различных степеней деформации. Сопоставление экспериментальных и расчётных данных осуществляется по конечной форме налетающего ударника, а также по температурным полям, измеренным в процессе соударения, которые свидетельствуют о диссипации энергии при деформировании.

Построенная модель успешно применена для описания поведения ряда материалов при ударно-волновом нагружении с использованием лазера. Проведено сравнение с экспериментальными данными [1]. Получено хорошее соответствие расчёта и эксперимента.

Литература

1. Seddik R., Rondepierre A., Prabhakaran S., Morin L., Favier V., Palin-Luc T., Berthe L. Identification of constitutive equations at very high strain rates using shock wave produced by laser // *European Journal of Mechanics / A Solids*. – 2022. – Vol. 92. – P. 104432.

NUMERICAL SIMULATION OF THE BEHAVIOR OF METALS AND ALLOYS DURING LASER SHOCK PEENING

D.R. Ledon, Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

The paper proposes a model of deformation behavior and fracture for a wide class of materials (metals and alloys), which is capable of describing the behavior of materials in a wide range of strain rates (from 10⁻⁴ to 10⁷ s⁻¹), pressures (from 10 MPa to 10 GPa) and temperatures. (from room temperature to 0.5 melting point).

The constants for the proposed model were determined in several stages using various experimental data: 1. Solving the problem of minimizing the discrepancy between the experimental deformation diagram (under quasi-static loading) and the calculation. 2. Solving the problem of minimizing the discrepancy between the experimental deformation diagram (under dynamic loading at strain rates of 10²-10³ s⁻¹) and the calculation. 3. Solving the problem of minimizing the discrepancy between experimental data and calculation at elevated temperatures.

As a verification experiment, a modified Taylor test was used, which consists in the impact of a cylindrical striker with a measuring rod. In such an experiment, a stress-strain state is realized for the material under study, which is inhomogeneous along the length, and

also not uniaxial. The material is deformed at different strain rates and to different degrees of deformation. Comparison of experimental and calculated data is carried out by the final shape of the projectile, as well as by the temperature fields measured during the collision, which indicate the dissipation of energy during deformation.

The constructed model has been successfully applied to describe the behavior of a number of materials under shock-wave loading using a laser. A comparison with experimental data [1] was made. Good agreement between calculation and experiment is obtained.

References

1. Seddik R., Rondepierre A., Prabhakaran S., Morin L., Favier V., Palin-Luc T., Berthe L. Identification of constitutive equations at very high strain rates using shock wave produced by laser // European Journal of Mechanics / A Solids. - 2022. - Vol. 92. - P. 104432.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОГО НАГРУЖЕНИЯ, ИНИЦИИРОВАННОГО ЛАЗЕРОМ, НА ВНУТРЕНнюю СТРУКТУРУ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ

А.Н. Балахнин, С.В. Уваров, И.А. Банникова, А.Н. Вишков, А.Е. Прохоров, О.Б. Наймарк

ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

Ключевые слова: интенсивное нагружение, лазерное воздействие, микроструктура, VISAR.

Применение ударно-волнового нагружения, инициированного лазером, дает возможность для изучения поведения материала в условиях интенсивных воздействий. Для инициирования ударной волны в материале мишени применяли высокоэнергетический наносекундный импульсный лазер Beamtech SGR-Extra-10 с энергией импульса до 10 Дж; лазерный пучок фокусировался на поверхности металлической мишени в пятно размером 1x1 или 3x3 мм. Профиль скорости тыльной поверхности мишени, подвергнутой воздействию лазерного импульса, записывался с применением лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR. Изучение внутренней структуры материала мишеней после однократного нагружения выполняли на металлографических шлифах в поперечном сечении образца в зоне воздействия в направлении распространения ударной волны. Полученные результаты свидетельствуют о возможности развития локальной поврежденности материала мишени, в том числе предшествующей стадии откола, в исследованном диапазоне интенсивностей воздействия.

Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда № 21-79-30041.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF INTENSE LOADING INITIATED BY A LASER ON THE INTERNAL STRUCTURE OF METAL TARGETS

A.N. Balakhnin, S.V. Uvarov, I.A. Bannikova, A.N. Vshivkov, A.E. Prohorov, O.B. Naimark

ICMM UB RAS, Perm, Russia

Keywords: intensive loading, laser impact, microstructure, VISAR

The use of shock-wave loading initiated by a laser makes it possible to study the behavior of a material under conditions of intense impacts. To initiate a shock wave in the target material, a Beamtech SGR-Extra-10 high-energy nanosecond pulsed laser with a pulse energy of up to 10 J was used; the laser beam was focused on the surface of a metal target into a spot 1x1 or 3x3 mm in size. The velocity profile of the rear surface of the target exposed to the laser pulse was recorded using a VISAR laser Doppler velocity meter. The study of the internal structure of the target material after a single loading was performed on metallographic sections in the cross section of the sample in the impact zone in the direction of shock wave propagation. The results obtained indicate the possibility of developing local damage to the target material, including the previous spalling stage, in the studied range of exposure intensities.

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-30041.

РАЗРУШЕНИЕ СВИНЦА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В ТВЕРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ, ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ СПАДАЮЩЕГО ПРОФИЛЯ

А.Н. Мальшев, О.Н. Игнатова, В.А. Раевский, В.И. Скоков, А.Н. Катыхов, Д.В. Крючков, Д.Н. Замотаев, И.В. Шибери, А.Б. Георгиевская

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В докладе представлены постановка и результаты серии экспериментов по исследованию характера разрушения свинца, находящегося в твердом и жидком фазовом состоянии при воздействии ударной волны спадающего треугольного профиля (волны Тейлора). Максимальная амплитуда УВ на входе в образец составляла ~17, 44 ГПа, что соответствует твердому и жидкому состоянию свинца в разгрузке. Градиент спада давления за фронтом УВ составлял ~120 ГПа/см. Характер разрушения определялся из анализа импульса торможения разогнанного образца на подложках из фторопласта и фторида лития, регистрируемых с помощью методик манганинового датчика и лазерного интерферометра «Visar».

При регистрации откола в «твердой» фазе зарегистрирован характерный импульс соответствующий торможению тонкого откольного слоя и практически полное отсутствие дальнейших импульсов до момента торможения основной массы образца.

Торможение «жидкой» фазы характеризуется монотонно спадающим профилем скорости, амплитуда которого уменьшается с увеличением расстояния. Характерных импульсов связанных с формированием откольного слоя и его отрывом от остальной массы образца не зафиксировано.

На зарегистрированных зависимостях $P(t)$ фиксируется аналогичное монотонное снижение давления при торможении диспергированной части образца. Падение скорости и давления можно связать с уменьшением плотности диспергированного материала.

Полученные результаты согласуются с расчетами, выполненными по одномерной лагранжевой методике с использованием согласованной системы определяющих соотношений сжатия, пластического деформирования, откольного разрушения и компактирования свинца (СОС РИНГ-ДРК-Л).

Получен значительный объем экспериментальных данных для верификации расчетных моделей.

В результате сравнительных экспериментов по исследованию откольного разрушения в «твердой» и «жидкой» фазах показано существенное различие характера зарегистрированных профилей скорости и давления.

FRACTURE OF SOLID AND LIQUID LEAD BY THE ACTION OF A SHOCK WAVE WITH A FALLING PROFILE

A.N. Malyshev, O.N. Ignatova, V.A. Raevskiy, V.I. Skokov, A.N. Katykov, D.V. Kryuchkov, D.N. Zamotaev, I.V. Shiberin, A.B. Georgievskaya

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The paper presents experimental set-up and experimental results to study a fracture behavior of lead in solid and liquid phase states under the action of a shock wave with a falling triangular profile (a Taylor wave). A maximum amplitude of a shock wave (SW) at entry into a sample amounts to $\sim 17, 44$ GPa. It corresponds to a solid and liquid state of lead at unloading. A gradient of a pressure decrease behind SW was ~ 120 GPa/cm. The fracture behavior was determined by analyzing an acceleration pulse of an accelerated sample at substrates made of fluoroplastic and lithium fluoride recorded through techniques of a manganin-based sensor and a laser interferometer «Visar».

When recording spall in a «solid» phase, the authors recorded a typical pulse complying with deceleration of a thin spall layer and a practically total lack of further pulses up to the moment of deceleration of great bulk of a sample.

The deceleration of a «liquid» phase is characterized via a monotonically decreasing velocity profile, whose amplitude decreases with increase in a distance. Characteristic pulses, which are connected with the spall layer formation and its separation from the remainder of the sample, were not recorded.

A similar monotone pressure reduction is recorded in observed dependencies $P(t)$ at deceleration of a dispersed part of a sample. A drop in velocity and pressure may be associated with a decrease in density of a dispersed material.

The obtained results agree with the calculations fulfilled via a one-dimensional Lagrangian technique by the help of a self-consistent system of defining relationships of compression, plastic deformation, spall fracture and compaction of material damage (SCS RING-DRK-L).

Lots of experimental data were achieved to verify calculated models.

As a result of comparative experiments for the studies of spall fracture in «solid» and «liquid» phases, a considerable difference was showed in characters of recorded velocity profiles and pressure profiles.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1420

*Д.Н. Замотаев¹, Е.В. Кошатова¹, В.А. Пушков², А.Г. Иошлев^{1,2}, В.И. Скоков¹,
А.Н. Мальшев¹, В.Г. Симаков^{1,2}, Е.Е. Шестаков^{1,2}, И.С. Гнутов¹,
Т.А. Говорунова¹, В.А. Брагунец¹, М.А. Мусатова², Н.А. Логинов^{1,2}*

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Россия

В работе представлены результаты исследования динамических свойств алюминий-магний-литиевого сплава 1420 [1] методами составного стержня Гопкинсона (ССГ) и торможения в диапазоне скоростей деформации 10^3 - 10^4 с⁻¹.

Эксперименты по исследованию σ - ε диаграмм динамического сжатия сплава 1420 при скоростях деформации $\dot{\varepsilon}=1350$ - 7000 с⁻¹ проведены методом ССГ. Установлено, что условный предел текучести сплава 1420 не зависит от $\dot{\varepsilon}$. Не зависит от $\dot{\varepsilon}$ и деформационное упрочнение: при разных $\dot{\varepsilon}$ наклон σ - ε диаграмм приблизительно одинаков. Сплав 1420 обладает высокими пластическими свойствами: при $\dot{\varepsilon}=7000$ с⁻¹ он деформируется без разрушения до деформации 72%.

По сравнению со сплавом Д16 у сплава 1420 на диаграммах σ - ε присутствует более длительный переходный участок от упругого участка к участку развитых пластических деформаций, предел текучести сплава 1420 составляет (353,4 \pm 4,4) МПа, что на ~5 % больше, чем предел текучести сплава Д16 (337,5 \pm 10,3 МПа) [2].

По полученным экспериментальным σ - ε диаграммам идентифицированы значения параметров модели деформирования Джонсона-Кука сплава 1420.

Эксперименты по исследованию упругого предвестника, откольной прочности и ударно-волновой сжимаемости сплава 1420 проведены методом торможения. Для создания ударных волн в образцах в диапазоне давления ударного сжатия до ~8 ГПа были применены взрывные метательные устройства и ствольные нагружающие установки. Регистрация осуществлялась методикой непрерывной доплеровской регистрации и методом ПВДФ-датчика давления.

В диапазоне давлений ударного сжатия 2-6 ГПа методом ПВДФ-датчика зарегистрированы профили давления в образцах, определены значения скорости фронта ударной волны и построена аппроксимация ударной адиабаты в виде зависимости давления P от массовой скорости U : $P=20,34 \cdot U+12,08 \cdot U^2$ при $0,129 < U < 0,247$ км/с. По полученным экспериментальным данным идентифицированы значения параметров уравнения состояния Ми-Грюнайзена для сплава 1420.

В диапазоне давления ударного сжатия 2-8 ГПа методикой непрерывной доплеровской регистрации зарегистрированы временные зависимости скорости движения свободной поверхности исследуемого образца сплава 1420. Значения амплитуды упругого предвестника (упругого предела Гюгонио) и откольной прочности составили $\sigma_{HE} \approx 0,5$ ГПа и $\sigma_{отк} \approx 0,83$ ГПа. Упругий предел Гюгонио сплава 1420 примерно такой же, как у закалённого сплава Д16 [3], и в ~2 раза выше, чем у отожжённых сплавов Д16 и АД1 [3]. Откольная прочность сплава 1420 в ~2 раза ниже, чем у сплавов АМг-6 и АД1 [4].

Литература

1. Корягин Ю.Д. Структура и свойства сплавов системы Al-Mg-Li, упрочненных термической обработкой и деформацией. // Технология легких сплавов. 1991. №9. с.35-39.
2. V.A.Pushkov, S.A.Novikov, V.A.Sinitsyn, I.N.Govorunov. Deformation of aluminum alloys AD-1, AMg-6 and D-16 at dynamic compression and temperatures of 25-250°C // Journ. Phys. IV. France. 2003. Vol.110. P.135-140.
3. Новиков С. А., Синицин В.А., Иванов А.Г., Васильев Л.В. Упругопластические свойства ряда металлов при взрывном нагружении // ФММ. 1966. Т.21. № 3. С.452-460.
4. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: «Янус-К», 1996. 408с.

DYNAMIC PROPERTIES OF ALUMINUM-MAGNESIUM-LITHIUM ALLOY 1420

*D.N. Zamotaev¹, E.V. Koshatova¹, V.A. Pushkov², A.G. Ioilev^{1,2}, V.I. Skokov¹,
A.N. Malyshev¹, V.G. Simakov¹, E.E. Shestakov¹, I.S. Gnutov¹, T.A. Govorunova¹,
V.A. Bragunets¹, M.A. Musatova², N.A. Loginov^{1,2}*

¹RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

²SarFTI NIYaU MIFI, Sarov, Russia

The paper presents results of investigation of dynamic properties of aluminum-magnesium-lithium alloy 1420 [1] by the split-Hopkinson-pressure-bar (SHPB) method and the method of deceleration in the strain rate range of 10^3 - 10^4 s⁻¹.

Experiments with investigation of σ - ε diagrams of dynamic compression of alloy 1420 at strain rates $\dot{\varepsilon}=1350$ - 7000 s⁻¹ were performed by the SHPB method. It is revealed that the conventional yield strength of alloy 1420 does not depend on $\dot{\varepsilon}$. Neither does strain hardening depend on $\dot{\varepsilon}$. Inclinations of σ - ε diagrams are approximately similar at different $\dot{\varepsilon}$. Alloy 1420 has high plastic properties. At $\dot{\varepsilon}=7000$ s⁻¹ it is deformed up to deformation of 72% with no destruction.

Comparing to alloy D16, a longer segment of transition from the elastic area to the area of developed plastic strains takes place in the σ - ε diagrams in alloy 1420. The yield strength of alloy 1420 is (353.4±4.4) MPa that is ~5 % higher than the yield strength of alloy D16 (337.5±10.3 MPa) [2].

Values of parameters of the Johnson-Cook strain model for alloy 1420 were identified using the obtained experimental σ - ε diagrams.

Experiments on investigation of elastic precursor, spall strength and shock-wave compressibility of alloy 1420 were performed by the deceleration method. Explosive launching devices and barrel loading facilities were used for generating shock waves in samples in the range of shock compression up to ~8 GPa. Recording was performed by the continuous Doppler recording method and by the PVDF pressure gauge method.

In the range of shock compression pressures of 2÷6 GPa, the PVDF pressure gauge method allowed to record pressure profiles in samples, to determine values of shock wave front velocity, and to plot approximation of shock adiabat as pressure P versus mass velocity U: $P=20.34 \cdot U+12.08 \cdot U^2$ at $0.129 < U < 0.247$ km/s. Parameters of the Mie-Grueneisen equation of state were identified for alloy 1420 basing on the obtained experimental data.

Dependences of free surface velocity on time were recorded for investigated sample of alloy 1420 in the range of shock compression pressure of 2÷8 GPa by the continuous Doppler recording method. Values of amplitude of elastic precursor (elastic Hugoniot limit) and spall strength were $\sigma_{HE} \approx 0.5$ GPa and $\sigma_{sp} \approx 0.83$ GPa. The elastic Hugoniot limit of alloy 1420 approximately equals to that of hardened alloy D16 [3], and it is ~2 times higher than that of annealed alloys D16 and AD1 [3]. The spall strength of alloy 1420 is ~2 times lower than that of alloys AMg-6 and AD1 [4].

References

1. Yu.D. Koryagin. Structure and properties of Al-Mg-Li system alloys, which are hardened by thermal processing and deformation. // Technology of light alloys. 1991. #9. p.35-39.
2. V.A.Pushkov, S.A.Novikov, V.A.Sinitsyn, I.N.Govorunov. Deformation of aluminum alloys AD-1, AMg-6 and D-16 at dynamic compression and temperatures of 25-250°C // Journ. Phys. IV. France. 2003. Vol.110. P.135-140.
3. S.A.Novikov, V.A.Sinitsyn, A.G. Ivanov, L.V. Vasiliev. Elastic-plastic properties of some metals under explosive loading // FMM. 1966. V.21. # 3. P.452-460.
4. G.I. Kanel', S.V. Razorenov, A.V. Utkin, V.E. Fortov. Shock-wave phenomena in condensed media. M.: "Yanus-K", 1996. 408p.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕДИ МАРКИ М1, СПЛАВОВ ВНЖ И СВИНЕЦ- СУРЬМА В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ 10^2 - 10^3 С⁻¹

Ю.А. Кузнецова, Е.В. Кошатова, А.В. Кальманов, Ф.Ф. Галиев, А.П. Куруленко

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Исследование физико-механических свойств конструкционных материалов при динамическом нагружении является важной и актуальной задачей. Наиболее эффективной схемой исследования процессов деформирования и разрушения материалов является экспериментально-расчетный метод, подразумевающий совместное применение экспериментальных и численных методов.

В рамках настоящей работы приведены экспериментально-расчетные результаты исследования динамического деформирования образцов из мелкозернистой меди М1 и сплавов ВНЖ Н8Ж2К1 и свинец-сурьма методами Тейлора и составного стержня Гопкинсона.

Эксперименты на динамическое сжатие образцов методом составного стержня Гопкинсона проведены в диапазоне скоростей деформаций $\dot{\varepsilon} = (1850-5100)$ с⁻¹. На основе зарегистрированных зависимостей падающего (в нагружающем стержне) и проходящего (в опорном стержне) импульсов деформации построены σ - ε диаграммы.

Эксперименты по методу Тейлора проведены со скоростью ударника $W = (70-330)$ м/с в диапазоне скоростей деформаций $\dot{\varepsilon} = (1950-8250)$ с⁻¹. Построены экспериментальные отношения конечной длины образца к начальной длине в зависимости от скорости соударения, а также зависимости радиуса испытанных образцов от длины при различных скоростях соударения. Получено, что условный

предел текучести мелкозернистой меди М1 составляет 467 МПа, сплава ВНЖ Н8Ж2К1 составляет 1528 МПа, сплава свинец-сурьма составляет 85 МПа.

На основании полученных по методу ССГ экспериментальных данных определены параметры модели прочности Джонсона-Кука и верифицированы с помощью экспериментальных данных по методу Тейлора. Численное моделирование проводилось в трехмерной постановке с применением расчетного комплекса ЛОГОС-Прочность.

Подобранные параметры расчетной модели описывают σ - ε диаграммы для всех материалов с максимальной погрешностью не превышающей 8%. В опытах по методу Тейлора сравнение экспериментальной длины образцов после удара с расчетной показывает что погрешность не превышает 5%.

Полученные параметры материалов будут в дальнейшем использованы для внедрения в программный модуль пакета программ «ЛОГОС» для моделирования процессов поведения конструкций, в которых важную роль играет прочность.

EXPERIMENTAL-CALCULATED STUDY OF STRAINING OF M1 COPPER, ALLOYS OF WNiFe AND Pb- Sb IN THE RANGE OF STRAIN RATES OF 10^2 - 10^3 S⁻¹

Yu.A. Kuznetsova, E.V. Koshatova, A.V. Kal'manov, F.F. Galiev, A.P. Kurulenko

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The study of physical-mechanical properties of structural materials at dynamic loading is an important and topical problem. The most efficient scheme for studying processes of straining and fracture of materials is an experimental-calculated method, which implies a joint use of experimental and numerical methods.

This work contains experimental and calculated results of the studies of dynamic straining of samples made of fine-grained copper M1, of alloys WNiFe Ni8Fe2K1 and Pb-Sb via a Taylor method and split-Hopkinson-bar method.

The experiments for dynamic compression of samples using a split-Hopkinson-bar method were performed over a range of strain rates of $\dot{\varepsilon} = (1850-5100) \text{ s}^{-1}$. Some σ - ε diagrams were built on the basis of recorded dependencies of an incident pulse of deformation (in a loading bar) and a transient pulse of deformation (in a support bar).

The experiments with a Taylor method were fulfilled with an impactor velocity of $W = (70-330) \text{ m/s}$ in a range of strain rates $\dot{\varepsilon} = (1950-8250) \text{ s}^{-1}$. Experimental relations were built between a finite length and an initial length of a sample depending on an impact velocity as well as dependencies were constructed between a radius of tested samples and a length at different impact velocities. It was obtained that conventional yield strength for fine-grained copper M1 is 467 MPa. For alloy WNiFe Ni8Fe2K1 it is 1528 MPa and for a Pb- Sb alloy it is 85 MPa.

Based on experimental data gained via a split-Hopkinson-bar method, parameters for a Johnson-Cook strength model were determined and verified by the help of experimental

data according to a Taylor method. Numerical simulation was performed in a three-dimensional set-up by using a computed complex named LOGOS -STRENGTH.

The selected parameters of a calculated model describe σ - ε diagrams for all materials with a maximum error not exceeding 8%. In tests on a Taylor method a comparison between experimental lengths after impact and calculated lengths of samples shows that an error does not exceed 5%.

The obtained parameters of materials will be used at a later time to promote a «LOGOS» software package into a programming module for simulating processes of a behavior of a construction, where structural strength plays a key role.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ МЕТАНИЕ И СОУДАРЕНИЕ. ЯВЛЕНИЯ КУМУЛЯЦИИ

HIGH-VELOCITY LAUNCHING AND IMPACTS. CUMULATION PHENOMENA

ПРИРОДА ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА И СОПУТСТВУЮЩИХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

П.А. Фомин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Сделан обзор выполненных ранее исследований Тунгусского явления [1] и представлен ряд новых расчетов по природе Тунгусского взрыва. Показано, что в основе Тунгусского события лежит детонация тороидального облака, образованного разовым выбросом газогидратного метана в атмосферу. Выбросом метана объясняется вынос на поверхность так называемых “камней Джона”, образованных осадочными породами. Подобные выбросы не являются уникальными (Бованенковский кратер). Детонация метано-воздушного облака инициирована относительно небольшим, полого летевшим метеоритом, скорость которого к моменту инициирования замедлилась до нескольких километров в секунду. Указана область, откуда произошел выброс. Рассчитаны возможные траектории метеорита, оценены его максимальный и минимальный размеры (15 и 2 м). Определен наиболее вероятный сектор его падения, который находится от эпицентра на расстоянии нескольких десятков километров. Для определения минимального размера метеорита, способного возбудить детонацию, сделана оценка размера детонационной ячейки в метано-воздушной смеси с добавками летучих.

Выполнен модельный эксперимент по вывалу леса (взрыв детонирующего шнура в форме кольца над «лесом» из проволочек). Результаты эксперимента были статистически обработаны. Показано, что вывал проволочек полностью идентичен вывалу леса при Тунгусском взрыве. В рамках пакета Fluent сделан расчет взрывной волны в воздухе, генерируемой мгновенным взрывом тороидального облака, наклоненного к горизонтальной поверхности. Результаты расчета качественно соответствуют эксперименту.

Дано объяснение световым, акустическим и атмосферным явлениям (увеличение яркости серебристых облаков над северной Европой после взрыва, нарушения озонового слоя, магнитная буря), связанным с Тунгусским событием. Сделана оценка характерного размера микрочастиц метеоритного вещества, найденного в районе взрыва. Оценена возможная скорость вращения метеорита и связанное с ней изменение его траектории. Проанализирована вероятность взрывов наподобие Тунгусского.

Литература

1. Ю.А. Николаев, П.А. Фомин. Идентификация тунгусской катастрофы с взрывом метановоздушного облака, инициированным небольшим “медленно” и полого летящим метеоритом. Физика горения и взрыва, 2011, т. 47, № 2, с. 112-127.

**NATURE OF TUNGUSKA EXPLOSION
AND ASSOCIATED GEOPHYSICAL PHENOMENA**

P.A. Fomin

Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics SB RAS; Novosibirsk, Russia

A review of previous studies [1] and a number of new calculations on the Tunguska phenomenon are presented. It is shown that the Tunguska event is based on the detonation of a toroidal cloud formed by a one-time release of gaseous methane (having a gas-hydrate nature) into the atmosphere. The release of methane explains the removal to the surface of the so-called "John's stones", formed by sedimentary rocks. Similar releases are not unique (Bovanenkovo crater). The detonation was initiated by a relatively small, flat flying meteorite, the speed of which had slowed down to several kilometers per second before the moment in time of initiation. The area from which the ejection occurred is indicated. The possible trajectories of the meteorite were calculated, its maximum and minimum sizes (15 and 2 meters in diameter respectively) were estimated. The most probable sector of its fall is located at a distance of several tens of kilometers from the epicenter. To determine the minimum size of a meteorite capable of initiating a detonation wave, an estimate was made of the size of the detonation cell of a methane-air mixture with volatile additives.

A model experiment was carried out on forest felling (explosion of a detonating cord in the form of a ring over a "forest" of wires). The experimental results were statistically processed. It is shown that the fallout of the wires is completely identical to the fallout of the forest during the Tunguska explosion. In the frames of Fluent computer package, a calculation was made of a blast wave in air generated by an instantaneous explosion of a toroidal cloud inclined to a horizontal surface. The calculation results are in qualitative agreement with the experiment.

An explanation for the light, acoustic and atmospheric phenomena (increase in the brightness of noctilucent clouds over northern Europe after the explosion, ozone layer disturbance, magnetic storm) associated with the Tunguska event is presented.

An estimate was made of the characteristic size of microparticles of meteorite matter found in the explosion region. The possible speed of rotation of the meteorite and the associated change in its trajectory are estimated.

The absence of a significant amount of meteorite matter in the epicenter area is explained. An estimate was made of the characteristic size of microdroplets torn off the molten surface of the meteorite (and, accordingly, the characteristic size of microparticles of meteorite matter found in the explosion region). The possible speed of rotation of the meteorite and the associated change in its trajectory are estimated. The probability of explosions similar to the Tunguska is analyzed.

References

1. Yu.A. Nikolaev, P.A. Fomin. Identification of the Tunguska event with the explosion of a methane-clouds initiated by a slow- and flat-moving small meteorite. Combustion, Explosions and Shock Waves, 2011, Vol. 47, Number 2, pp. 226-240.

СКОРОСТЬ ВЗРЫВНОГО МЕТАНИЯ ОБОЛОЧЕК И ФРАГМЕНТОВ

М.М. Бойко, Е.Ф. Грязнов, И.А. Перевалов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

В работе проведен сравнительный анализ известных подходов к проблеме взрывного метания металлических цилиндрических оболочек и их фрагментов, среди которых можно выделить наиболее широко применяемую методику с известным соотношением Гарни [1].

В последнее время в зарубежных источниках появились сообщения об исследованиях дополнительного ускорения фрагментов нагруженных взрывом металлических оболочек после из разрушения [2, 3]. В нашей стране аналогичные исследования применительно к стальным оболочкам проводятся с начала 2000-х годов [4]. Явление дополнительного ускорения фрагментов в известной мере меняют наши представления о применимости известных соотношений, в частности, формулы Гарни для определения не только скорости оболочки, но и фрагментов.

В настоящей работе на основании достаточно большого объема экспериментальных данных по скорости стальных оболочек и их фрагментов предложена методика уточнения параметров, содержащихся в формуле Гарни, а именно, характеристической скорости Гарни с учетом дополнительного ускорения фрагментов, а также коэффициента нагрузки. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Показано заметное повышение точности расчетных оценок по сравнению с классическим подходом Гарни.

Литература

1. R.M. Lloid Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design. Progress in Astronautics and Aeronautics. Publ.: AIAA. Virginia, 1998, V.1801, p. 636.
2. M.D. Hutchinson, D.W. Price On the continued acceleration of bomb casing fragments following casing fracture. – Defense Technology, 2014, N 10, p. 211-218.
3. P.H. Denny, D.J. James, H.R. James Blast and fragments from steel cylinders containing RDX/wax explosive with varying aluminum content. Part 2: the initial velocity of the casing/ AWRE Report. N040/70. 1970
4. Acceleration of fragments from Cylindrical Shells by Detonation Products of HE Charges / E.F.Gryaznov, S.I.Voronkov, V.N. Okhitin [at al.] //proc 23-rd Intern. Symp. on Ballistics: Tarragona, Spain, 2007, V.2, p.1083-1089.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ ИЗ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА

С.С. Рассоха

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Проведен численный анализ функционирования вращающихся КЗ с помощью численного моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц (SPH) в программном комплексе ANSYS LS-DYNA [1].

Длина заряда составляла $1,6d_{кз}$, высота облицовки $0,6d_{кз}$, ее толщина $0,04d_{кз}$, угол при вершине – 60° , где $d_{кз}$ – диаметр кумулятивного заряда. Для моделирования

материалов корпуса КЗ (сталь) и облицовки (медь) использовалась модель упругопластического материала (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC). Взрывчатое вещество (BB) рассчитывалось с помощью стандартной модели, которая используется в LS-DYNA (*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN) и уравнения состояния в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL).

В качестве основного расчетного варианта моделировалось функционирование невращающегося КЗ. Результаты численного моделирования КЗ в условиях начального вращения совпадают с известными экспериментальными данными [2-7]. Общая длина струи вместе с воздушными промежутками оказывается не зависящей от угловой скорости КЗ, что свидетельствует об отсутствии значительного влияния вращения на градиент осевой скорости вдоль КС.

Сплошность струи в осевом направлении, согласно результатам моделирования, зависит от угловой скорости. С образованием центрального канала в струе толщина ее стенки в радиальном направлении снижается. Это приводит к сокращению времени от начала развития шеечной неустойчивости до разрыва материала КС в месте сформировавшейся шейки [8]. Иными словами, сплошной КС требуется больше времени от начала развития шейки до того момента, как утонение в месте ее образования приведет к разрушению струи, из-за большего пути, который должна преодолеть шеечная впадина с поверхности КС по сравнению со струей с центральным каналом. Вследствие этого механизма вращающаяся КС, для случая угловой скорости КЗ менее 100 об/с, раньше разрушается на отдельные элементы, чем не вращающаяся. Этот механизм объясняет снижение глубины пробития в отсутствие центробежного разрушения струи для малых начальных угловых скоростей вращения КЗ [9].

Данную идею можно формализовать путем переопределения известных зависимостей для коэффициента предельного удлинения n_b [2]:

$$n_b = A + B \cdot \dot{\epsilon}_{z0} \cdot R_{J0}; n_b = C \left(\frac{\rho_j \dot{\epsilon}_{z0}^2 R_{J0}^2}{Y} \right)^D, \quad (1)$$

где A, B, C, D – постоянные коэффициенты; $\dot{\epsilon}_{z0}$ – начальный градиент осевой скорости; R_{J0} – радиус КС; Y – предел текучести материала струи. Переопределение зависимостей (1) заключается в том, что вместо радиуса КС R_{J0} предлагается использовать толщину струи в радиальном направлении. Ее значение уменьшается из-за образования центрального канала, что приводит к сокращению предельного коэффициента удлинения и глубины пробития струи.

На основе результатов численного моделирования оценены распределения угловых скоростей КС в осевом и радиальном направлениях для различного начального вращения КЗ. Показано, что в радиальном направлении распределение угловой скорости на начальном этапе ее растяжения носит постоянный характер с последующим торможением слоев вблизи внешней поверхности струи и раскруткой их в центральной части.

Кроме этого, произведена оценка распределения напряжений по длине струи и по ее толщине в срединном сечении. Показано, что для срединного сечения струи в радиальном направлении характер напряженного состояния является смешанным. В осевом направлении ярко выражена область всестороннего сжатия возле точки схлопывания облицовки на оси симметрии. При удалении от нее к головной части струи растягивающий характер напряженного состояния становится все более выраженным.

Литература

1. LS-DYNA Theory Manual. 2019. Livermore Software Technology Corporation

2. Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум [и др.]; под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, перераб. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
3. *W.P. Walters, J.A. Zukas* Fundamentals of Shaped Charges. N.Y.: John Wiley and Sons, 1989.
4. *О.В. Свирский и др.* Проверка влияния «допороговых» скоростей углового вращения заряда на пробивную способность и параметры кумулятивной струи // Сб. докладов V научной конференции ВРЦ РАРАН. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. Т. 1. С. 381-384
5. *В.Г. Смеликов* Устойчивость ограниченной кумуляции: сборник научно-технических статей. М.: Студия «Этника», 2016
6. *R.J. Eichelberger* Spin compensation // Critical Review of Shaped Charge Information. Ballistic Research Laboratories Report № 905/ Edited by L. Zernow. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1959.
7. *C.A. Weickert* Spinning Self-Forging Fragments and Shaped Charges. PhD Thesis, Drexel University, 1986
8. *А.В. Бабкин, С.В. Ладов, С.С. Рассоха* О центробежном разрушении градиентных стержней // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Специальный выпуск, 2010
9. *B. Haugstad* On the Break-Up of Shaped Charge Jets // Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 8 (1983). P. 119-120

NUMERICAL SIMULATION OF JET FORMATION FROM ROTATING SHAPED CHARGE

S.S. Rassokha

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

A numerical analysis of rotating shaped charges functioning was carried out using numerical simulation by smoothed particle hydrodynamics method (SPH) in ANSYS LS-DYNA software package [1].

The length of the charge was $1.6d_{sc}$, the height of the liner – $0.6d_{sc}$, its thickness – $0.04d_{sc}$, liner apex angle was 60° , where d_{sc} is the diameter of the shaped charge. To simulate the materials of the SC case (steel) and liner (copper), an elastic-plastic material model (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) was used. High explosive (HE) was calculated using the standard model that is used in LS-DYNA (*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN) and the equation of state in the form of Jones-Wilkins-Lee (JWL)

As the main calculated variation, the functioning of a non-rotating shaped charge was considered. The results of numerical simulation of the shaped charge under conditions of initial rotation coincide with the known experimental data [2-7]. The total jet length, together with air gaps, turns out to be independent of the SC angular velocity, which indicates the absence of a significant effect of rotation on the axial velocity gradient along the jet.

According to the simulation results, the continuity of the jet in the axial direction depends on its angular velocity. With the formation of a jet central channel, its wall thickness decreases. This leads to a time reduction from the start of the neck instability development to the rupture of the jet material at the formed neck [8]. In other words, a solid jet requires more time from the beginning of the neck development to the moment when radius reduction at the neck site leads to the destruction of the jet. This happens due to the longer path that instability must develop from the jet surface compared to the jet with a central channel. Because of this mechanism, a rotating jet for the case of an angular velocity

of a shaped charge less than 100 rps, is breakup into separate elements earlier than a non-rotating one. This mechanism explains the decrease in the penetration depth in the absence of centrifugal destruction of the jet for small initial angular velocities of SC rotation [9].

This idea can be formalized by redefining the known dependencies for the maximum elongation factor n_b [2]:

$$n_b = A + B \cdot \dot{\varepsilon}_{z0} \cdot R_{J0}; n_b = C \left(\frac{\rho_J \dot{\varepsilon}_{z0}^2 R_{J0}^2}{Y} \right)^D, \quad (1)$$

где A, B, C, D – constant coefficients; $\dot{\varepsilon}_{z0}$ – initial axial velocity gradient; R_{J0} – radius of the jet; Y – yield strength of the jet material. The redefinition of dependences (1) is that instead of the jet radius R_{J0} it is proposed to use the jet thickness in the radial direction. Its value decreases due to the formation of a central channel, which leads to a reduction in the maximum elongation factor and, consequently, the depth of penetration of the jet.

Based on the results of numerical simulation, the distributions of the jet angular velocities in the axial and radial directions for different initial SC rotations are estimated. It is shown that in the radial direction the distribution of the angular velocity at the initial stage of jet stretching is constant, with the subsequent deceleration of the layers near the outer surface and spin-up in the central part.

In addition, the distribution of stresses along the length of the jet and its thickness in the middle section was estimated. It is shown that for the middle section of the jet in the radial direction, the nature of the stress state is mixed. In the axial direction, there exists an area of compression near the point of collapse of the liner on the axis of symmetry. With moving from it to the leading part of the jet, the tensile nature of the stress state becomes more and more obvious.

References

1. LS-DYNA Theory Manual. 2019. Livermore Software Technology Corporation
2. Physics of Explosion / *S.G. Andreev, A.V. Babkin, F.A. Baum* [et al.]; ed. L.P. Orlenko. Vol. 2. Fizmatlit, 2004.
3. *W.P. Walters, J.A. Zukas* Fundamentals of Shaped Charges. N.Y.: John Wiley and Sons, 1989.
4. *O.V. Svirsky et al.* Checking the effect of "sub-threshold" angular velocities of the shaped charge on its penetration and parameters of the jet // Proceedings of V RARAS scientific conference. Sarov, 2008. Vol. 1. P. 381-384
5. *V.G. Smelikov* Stability of confined cumulation: collection of scientific articles. Etnika, 2016
6. *R.J. Eichelberger* Spin compensation // Critical Review of Shaped Charge Information. Ballistic Research Laboratories Report № 905/ Edited by L. Zernow. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1959.
7. *C.A. Weickert* Spinning Self-Forging Fragments and Shaped Charges. PhD Thesis, Drexel University, 1986
8. *A.V. Babkin, S.V. Ladov, S.S. Rassokha* About centrifugal destruction of gradient rods // Herald of BMSTU. Mechanical Engineering Series. Special Issue. 2010
9. *B. Haugstad* On the Break-Up of Shaped Charge Jets // Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 8 (1983). P. 119-120

ПРИЧИНЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ПРОНИКАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ

М.А. Власова, О.В. Свирский

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Согласно гидродинамической теории М.А. Лаврентьева глубина проникания кумулятивной струи (КС) определяется её полной длиной. Однако, как показывает опыт практического применения кумулятивных зарядов, прекращение проникания обычно наступает раньше, чем струя израсходуется полностью. Для достоверного описания экспериментальных результатов вводятся параметры «эффективной длины» или «эффективной (критической) скорости» кумулятивной струи, суть которых состоит в исключении из рассмотрения замыкающего участка струи, по различным причинам не участвующего в проникании. Значения эффективной скорости вводятся в расчётные методики как постоянное значение для конкретной пары материалов струи и преграды (отечественные методики МГТУ) или в виде эмпирической зависимости от фокусного расстояния. В докладе рассмотрена возможность разделения струи на эффективный и неработоспособный участки по физически обоснованным причинам без необходимости построения эмпирических зависимостей.

С использованием комплекса двумерных программ МКД и доступных авторам экспериментальных результатов рассмотрены и введены в инженерную модель проникания кумулятивной струи АТОС-М несколько расчётных алгоритмов. Они позволяют определить критические условия окончания проникания и соответствующие им значения «эффективной скорости» по следующим возможным причинам:

- Прочностное сопротивление преграды превышает давление, создаваемое струей на границе струя/преграда;
- Объем формируемой каверны в преграде недостаточен для вытекания отработанного материала струи;
- Локальное сужение каверны из-за увеличения расстояния между элементами струи при проникании фрагментированной струи;
- Взаимодействие струи со стенками каверны из-за наличия скорости дрейфа.

Применение разработанных алгоритмов позволяет проводить достоверные расчёты пробивной способности кумулятивных зарядов, в том числе построение зависимостей величины пробития от фокусного расстояния.

О ВЛИЯНИИ ЗАЗОРОВ НА ДИНАМИКУ РАЗГОНА ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ

А.В. Красильников, В.Н. Ногин, А.Е. Ковалев, А.В. Ольховский

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Проведён анализ процесса разгона двухслойной пластины с зазором. Для простой модельной системы получены приближенные формулы для расчёта скорости движения свободной поверхности на начальной стадии разгона пластины. Показано, что наличие зазора приводит к дополнительному скачку скорости по сравнению с ситуацией без зазора. Проведены одномерные и двумерные расчёты

метания двухслойной пластины, подтвердившие приближённые формулы. С использованием методики PDV проведены эксперименты с многоканальной регистрацией скорости свободной поверхности двухслойной пластины, подтвердившие значимое влияние зазора.

THE GAP EFFECT FOR DYNAMICS OF ACCELERATION TWO-LAYER PLATE

A.V. Krasilnikov, V.N. Nogin, A.E. Kovalev, A.V. Olkhovskiy

RFNC – VNIITF, Snezhinsk, Russia

Analysis of acceleration process of two-layer plate is provided. For model system has been get approximate formulae of the free surface velocity at initial stage of two-layer plate acceleration. It is shown that gap gives additional velocity jump versus situation without gap. 1D- and 2D-calculations of throwing two-layer plates validate approximation formulae. With PDV method have been realized experiments with multichannel registration of free surface velocity two-layer plate that confirmed significant gap effect.

УСИЛЕНИЕ АКСИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ

С.В. Станкевич

Институт Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, г. Новосибирск, Россия

В докладе рассматривается явление увеличения магнитного поля в конических течениях материалов, деформируемых действием взрыва. Постановка задачи связана с проблемой генерации сверхсильных магнитных полей, а также с задачей влияния магнитного поля на кумулятивную струю.

На основе численного моделирования задачи нестационарной магнитной гидродинамики в двумерной осесимметричной постановке представлены результаты расчетов усиления аксиального магнитного поля, первоначально создаваемого в конической кумулятивной облицовке (КО) в процессе ее деформирования под действием взрыва окружающем ее заряда. В расчётах учитывались процессы: связанные с нестационарной диффузией магнитного поля, джоулевым нагревом материала КО и изменение вследствие этого ее электропроводности. Предполагалось, что начальное поле в КО создается окружающем ее соленоидом.

В результате расчетов установлено, что усиление магнитного поля в области схлопывания КО происходит в результате возникающих индукционных токов, обусловленных растяжением частиц материала струи в направлении линий магнитной индукции поля, а также быстрым уменьшением связанного с частицами среды потока магнитной индукции при их приближении к оси симметрии. Максимальное увеличение магнитного поля зависит от начальной скорости движения элементов КО, угла при котором они достигают оси симметрии и может достигать значений >1000 раз. При начальных значениях магнитного поля в КО равных

0,05–0,1 Тл конечное поле может превышать 100 Тл, а нагрев элементов, образующейся кумулятивной струи, вблизи оси симметрии может достигать нескольких сотен градусов.

Полученные результаты показывают возможность дополнительного нагрева элементов кумулятивной струи за счет предварительного создания в кумулятивных облицовках магнитного поля, что может приводить к уменьшению предела текучести ~~и~~ материалов и, соответственно, к замедлению развития пластической неустойчивости струи. Вследствие этого эффекта возможно увеличение эффективности действия кумулятивной струи.

AMPLIFICATION OF THE AXIAL MAGNETIC FIELD IN AXISYMMETRIC CONICAL FLOWS

S.V. Stankevich

Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk, Russia

The amplification of the magnetic field in conical flows of explosively deformed materials is considered. The problem statement is related to the problem of generating superstrong magnetic fields and to the problem of the effect of a magnetic field on a shaped-charge jet.

The amplification of an initial axial magnetic field in a conical shaped-charge liner (SCL) deformed by explosion of the charge surrounding the liner was studied by numerical simulation of the problem of unsteady magnetohydrodynamics in a two-dimensional axisymmetric formulation. In the simulation, the unsteady diffusion of the magnetic field, the Joule heating of the SCL material, and the change in its electrical conductivity due to this heating were taken into account. It was assumed that the initial magnetic field in the SCL was generated by a solenoid surrounding the liner.

The results of the simulation show that magnetic-field amplification in the region of SCL collapse is due to the induction currents caused by the stretching of jet material particles along the magnetic field induction lines and by a rapid decrease in the magnetic induction flux associated with material particles as they approach the axis of symmetry. The maximum increase in the magnetic field can reach a factor of 1000 or more and depends on the initial velocity of the SCL elements and the angle at which they reach the axis of symmetry. When the initial magnitude of the magnetic field in the SCL is 0.05–0.1 T, the final field can exceed 100 T and the elements of the resulting shaped-charge jet near the symmetry axis can be heated to several hundred degrees.

The results show the possibility of additionally heating of shaped-charge jet elements by preliminary generation of a magnetic field in a shaped-charge liners, which can reduce the yield strength of the liner material and, hence, slow down the development of plastic instability of the jet. Using this effect, it is possible to increase the efficiency of the shaped-charge jet.

УСКОРЕНИЕ ПЛОСКИХ УДАРНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПИРАЛЬНОГО МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА

*Д.А. Тепаев, А.А. Агапов, А.С. Борискин, Ю.В. Власов, С.И. Володченко,
В.А. Демидов, С.А. Казаков, П.Б. Репин, А.В. Филиппов, А.М. Тарасов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Одним из способов определения параметров уравнений состояния веществ является обработка результатов измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ударе по ней пластины, движущейся со скоростью нескольких километров в секунду. Ускорение пластин до таких скоростей можно выполнить электромагнитным способом. В качестве источника электромагнитной энергии возможно применение спирального взрывомагнитного генератора, но необходимо учитывать, что к моменту соударения ударника и мишени сторона ударника, противоположная той, на которую воздействует магнитное давление, должна остаться в твердом состоянии и не должна быть возмущена гидродинамическими неустойчивостями. В докладе представлены результаты экспериментов по ускорению плоских ударников из алюминия площадью 25 см^2 и массой ~ 70 грамм с использованием спирального взрывомагнитного генератора со статором диаметром 200 мм и их сравнение с расчетами.

ACCELERATION OF FLAT STRIKERS WITH THE USE OF HELICAL MAGNETO-CUMULATIVE GENERATOR

*D.A. Tepaev, A.A. Agapov, A.S. Boriskin, Yu.V. Vlasov, S.I. Volodchenkov,
V.A. Demidov, S.A. Kazakov, P.B. Repin, A.V. Filippov, A.M. Tarasov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The analysis of measurement results of wave and mass velocities in the target at the plate strike is one of the methods to determine the equation of state parameters. The plate is moving with the velocity of several kilometers per second. The acceleration of the plates up to such velocities can be performed by the electromagnetic method. A helical explosive magnetic generator can be used as a source of the electromagnetic energy. We must take into account that by the moment of collision of the striker and the target, the striker side opposite to the side influenced by the magnetic pressure, should remain in the solid state and should not be disturbed by hydrodynamic instabilities. The report presents the results of the experiments of the acceleration of flat strikers made of aluminum with the area of 25 cm^2 and the mass of 70 g with the use of a helical explosive magnetic generator with a stator of a 200 mm diameter, and their comparison with calculations.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

HYDRODYNAMIC INSTABILITIES

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ПРОЦЕССА

Ю.В. Янилкин, А.Р. Гужова, Л.И. Дегтяренко, В.Ю. Колобянин, В.А. Шмелёв

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Особое место среди процессов, включающих турбулентное перемешивание, занимает процесс горения, как химическое, так и термоядерное, и он сильно зависит от степени смешения (гомогенного или гетерогенного) участвующих в процессе горения веществ. При этом локальная степень смешения зависит от того, являются ли вещества смешивающимися или несмешивающимися. При численном моделировании, по-видимому, можно считать, что газы являются смешивающимися веществами, а конденсированные вещества и жидкости – несмешивающимися.

Для определения локальной степени смешения в любой смешанной ячейке авторами в рамках метода концентраций [1] при прямом моделировании турбулентного перемешивания разработан специальный метод, который состоит из двух алгоритмов:

- а) алгоритма определения состояния смешения в смешанной ячейке,
- б) алгоритма учета истории процесса смешения.

Тестирование метода проведено на классической задаче гравитационного перемешивания.

Литература

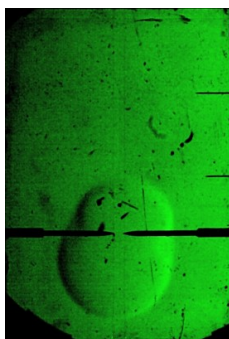
1. С.М. Бахрах, Ю.П. Глаголева, М.С. Самигулин, В.Д. Фролов, Н.Н. Яненко, Ю.В. Янилкин Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // ДАН СССР, 1981, т.276, №4.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА ПРИ ЧИСЛЕ МАХА
ПАДАЮЩЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ $M \approx 5$**

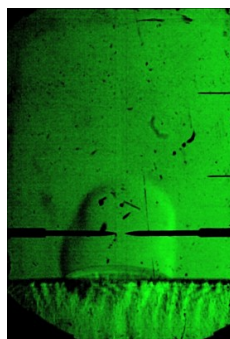
А.А. Тяктев, Ю.А. Пискунов, И.Л. Бугаенко, Н.Б. Аникин

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

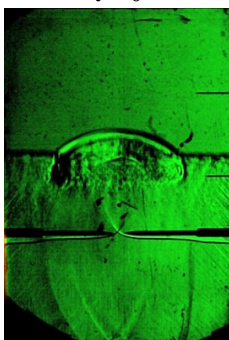
На ударной трубе экспериментально исследовалось взаимодействие стационарной ударной волны с числом Маха $M \approx 5$ с контактной газовой границей раздела сред разной плотности квазисферической формы. Граница раздела сформирована в результате горения смеси с концентрацией водорода 8 об. % с воздухом при начальном давлении 20 кПа. К моменту взаимодействия с ударной волной горение смеси (пламя) формировало тонкую, близкую к сферической границу раздела легкого газа (продукты сгорания) и тяжелого (несгоревшая смесь). После взаимодействия с ударной волной получены фотоизображения развития начального возмущения в тороидальный вихрь. Определены пространственно-временные зависимости движения ударной волны, верхней и нижней границ тороидального вихря, его продольный и поперечный размеры.



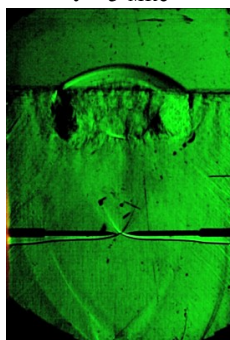
$t = 0$



$t = 5 \text{ мкс}$



$t = 45 \text{ мкс}$



$t = 65 \text{ мкс}$

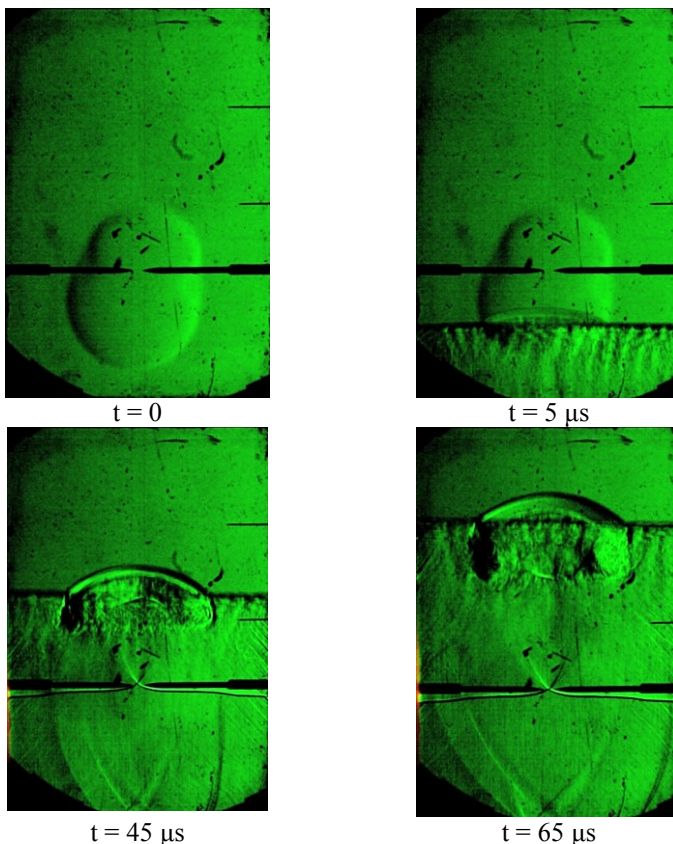
За ударной волной можно практически пренебречь горением и считать, что течение в основном развивается за счет действия на границу раздела сред неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Эксперименты могут быть полезны при расчетно-теоретическом моделировании турбулентного перемешивания в сжимаемых средах.

**EXPERIMENTAL STUDY OF RICHTMYER-MESHKOV INSTABILITY
AT THE INCIDENT SHOCK-WAVE MACH NUMBER $M \approx 5$**

A.A. Tyaktev, Yu.A. Piskunov, I.L. Bugaenko, N.B. Anikin

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

Shock tube experiments were conducted to study interaction between steady-state shock wave with the Mach number $M \approx 5$ and quasi-spherical gas interface separating two media of different densities. The interface was formed by the combustion of hydrogen-air mixture (8 vol.% H_2) at the initial pressure of 20 kPa. To the moment of shock-wave interaction, the mixture combustion (flame) was forming a thin interface, quasi-spherical in shape, between light (combustion products) and heavy gases (unburnt mixture). The pictures made upon shock-wave interaction show evolution of initial perturbation into a toroidal vortex. Space-time dependencies for shock wave propagation, and for upper and bottom boundaries of the toroidal vortex were determined. Vortex longitudinal and lateral dimensions were measured.



The combustion can be neglected behind the shock wave to assume that the flow is mainly developing due to the Richtmyer-Meshkov instability affecting the interface. The experiments can be worthwhile for numerical simulation of turbulent mixing in compressible media.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ
ГАЗ-ЖИДКОСТЬ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ**

*Н.В. Невмержицкий, А.Н. Разин, В.В. Змушко, А.Э. Большакова,
Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, Е.В. Бодров, О.Л. Кривonos, К.В. Анисифоров,
Е.В. Левкина, С.В. Фролов, А.С. Соколова, И.Р. Фарин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Приведены экспериментальные и расчетные результаты исследования развития турбулентного перемешивания на наклонной контактной границе воздух-жидкость под действием косо́й ударной волны. Эксперименты проводились в воздушной ударной трубе. В качестве жидкости использовалась вода и глицерин. Число Маха ударной волны в опытах составляло $M = 1,7-2,2$. Угол наклона ударной волны к контактной границе составлял 15° и 30° . При прохождении волны через границу развивалась неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и турбулентное перемешивание веществ. Поле течения регистрировалось скоростными видеокамерами. Экспериментально установлено, что с увеличением угла падения ударной волны и (или) числа Маха УВ скорость роста ширины зоны турбулентного перемешивания увеличивается; размер капель диспергированной жидкости уменьшается; вязкость жидкости уменьшает ширину зоны ТП.

Численное моделирование опытов по двумерной методике показало, что методика удовлетворительно рассчитывает максимальную высоту зоны турбулентного перемешивания, но требуется учет турбулентной вязкости, повышение точности моделирования потоков массы, импульса и энергии через граничных ячеек.

**RESULTS OF NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENT
MIXING AT TILTED INTERFACES UNDER INCLINED SHOCK WAVE**

*N.V. Nevmerzhitskiy, A.N. Razin, V.V. Zmushko, A.E. Bolshakova, E.D. Senkovskiy,
E.A. Sotskov, E.V. Bodrov, O.L. Krivonos, K.V. Anisiforov, E.V. Levkina,
S.V. Frolov, A.S. Sokolova, I.R. Farin*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russian

The experimental and numerical studies of the turbulent mixing propagation at inclined air-liquid interface under effect of an inclined shock wave are presented. The experiments were conducted in the air shock tube. Water and glycerin were used as a liquid. The Mach number of the shock wave in experiments was equal to $M = 1.7-2.2$. A tilt angle of the shock wave to the interface was equal to 15° and 30° . In the passage of a shock wave through the interface, the Kelvin-Helmholtz and the turbulent mixing of matters were propagated. The flow field was recorded by high speed video cameras. It was experimentally obtained that with increasing the angle of shock wave incidence and (or) the Mach number of the shock wave, the growth rate of a width of a turbulent mixing zone increases; the size of dispersed liquid drops reduces; and the liquid viscosity reduces the width of a turbulent mixing zone.

Numerical simulation of experiments with a two-dimensional technique shows that this technique satisfactorily calculates the maximum height of the turbulent mixing zone, but it is required to take into account the turbulent viscosity, the accuracy enhancement in the flux simulation of mass, momentum and energy through borders of counting cells.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ВЕЛИЧИНАМ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ЖИДКОСТИ В ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ГРАНИЦЕ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ ПРИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА

*Н.В. Невмержицкий, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, Е.В. Бодров, О.Л. Кривonos,
К.В. Анисифоров, С.В. Фролов, И.Р. Фарин, Д.О. Кочетков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Представлены экспериментальные данные по исследованию пульсаций скорости в зоне турбулентного перемешивания, развивающейся на границе газ-жидкость при неустойчивости Рэля-Тейлора. Опыты проводились на легкогазовой пушке в диапазоне величин ускорения жидкого слоя от $g \approx 10^2 g_0$ до $g \approx 10^4 g_0$. Исследования проводились с использованием аттестованной методики трассерной визуализации. В качестве жидкости использовался водный раствор этилового спирта, в качестве трассеров – взвешенные в жидкости частицы полипропилена. Зона перемешивания регистрировалась двухкадровой CCD-видеокамерой при подсветке течения «лазерным ножом». Принималось, что скорости трассеров соответствуют скорости жидкости в зоне перемешивания. По значениям этих скоростей определялись пульсации скорости в зоне перемешивания.

Получены данные по пульсации скорости в зоне перемешивания газа и жидкости. Величина максимальной пульсации скорости (отдельных выбросов) изначально увеличивается с увеличением средней массовой скорости течения в зоне ТП, а затем уменьшается, и при массовой скорости течения $V_{тр.сп} \approx 70$ м/с выходит на постоянный режим и составляет примерно 8,4 м/с.

Средняя величина пульсации скорости составляет 8-15 % от средней скорости течения в зоне ТП.

EXPERIMENTAL DATA OF LIQUID VELOCITY PULSATIONS IN TURBULENT MIXING ZONE AT GAS-LIQUID INTERFACE UNDER RELEIGH-TAYLOR INSTABILITY

*N.V. Nevmerzhitskiy, E.D. Senkovskiy, E.A. Sotskov, E.V. Bodrov,
O.L. Krivonos, K.V. Anisiforov, S.V. Frolov, I.R. Farin, D.O. Kochetkov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russian

The experimental data are presented for velocity pulsations in the turbulent mixing zone propagated at gas-liquid interface under the Rayleigh-Taylor instability. The experiments were conducted with the use of light-gas gun in the range of liquid layer

accelerations from $g \approx 10^2 g_0$ to $g \approx 10^4 g_0$. The study was performed with the help of a certified method – particle image velocimetry. The water solution of ethanol was used as a liquid, and the polypropylene particles suspended in liquid were used as tracers. A mixing zone was recorded by two-framed CCD video camera under the «laser knife» lighting of a flow. It was supposed that velocities of the tracers correspond to velocities of liquid in the turbulent mixing zone. According to the values of these velocities, the velocity pulsations in the mixing zone were determined.

The data of velocity pulsations in gas-liquid mixing zone were obtained. The value of maximum velocity pulsation (for individual ejections) initially increases with the growth of average mass flow velocity in the turbulent mixing zone, and then reduces. With the mass flow velocity of $V_{tr,av} \approx 70$ m/s, the velocity pulsation remains constant and equals to approximately 8.4 m/s.

The average value of velocity pulsation is 8-15 % from the average flow velocity in the turbulent mixing zone.

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Н.В. Невмержицкий, А.Б. Георгиевская, Е.Д. Сеньковский,
Е.В. Левкина, Е.А. Сотсков, О.Л. Кривonos, К.В. Анисифоров, С.В. Фролов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований фрагментации капли жидкости (вода, спирт, глицерин) при воздействии воздушной ударной волны с давлением 0,2 и 3,2 ати. Эксперименты проводились на воздушной ударной трубе; диаметр капли жидкости составлял $\approx 0,6$ мм и 2 мм. Процесс регистрировался скоростной видеосъемкой.

Зарегистрированы частицы диспергированной жидкости размером от ≈ 3 мкм, построены распределения частиц жидкости по размерам, и определены скорости отдельных частиц, разработана полумпирическая модель диспергирования жидкости. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: ударная волна, дробление, капля жидкости, спектр частиц, численное моделирование.

DISPERSION OF LIQUID DROP UNDER EFFECT OF AIR SHOCK WAVE

*N.V. Nevmerzhtskiy, A.B. Georgievskaya, E.D. Senkovskiy, E.V. Levkina,
E.A. Sotskov, O.L. Krivonos, K.V. Anisiforov, S.V. Frolov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russian

The results of experimental and numerical research of dispersion of liquid drop (water, alcohol, glycerin) under effect of an air shock wave with the pressure of 0.2 and 3.2 gage atmospheres are presented. The experiments were conducted with the use of an air

shock tube; the liquid drop diameter was ≈ 0.6 mm and 2 mm. The process was recorded using high speed video filming.

The dispersed liquid particles with the size from ≈ 3 μm were recorded; the size distributions of liquid particles were plotted; the velocities of individual particles were determined, and a semiempirical model of liquid dispersion was developed. The experimental results were compared with the results of numerical simulations.

Keywords: shock wave, liquid drop, fragmentation, particle distribution, direct numerical simulation

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ МОЩНЫХ УФ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ МИШЕНЯМИ

И.Г. Лебо

МИРЭА-Российский технологический университет,
Институт искусственного интеллекта, г. Москва, Россия

Одним из основных претендентов на драйвер в будущем термоядерном реакторе является мощный эксимерный лазер. В докладе представлен обзор результатов численного моделирования лазер-плазменных экспериментов. Эксперименты выполнены на установке «ГАРПУН» (KrF- эксимерный лазер, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН). Моделировались три серии экспериментов: 1) прожигание алюминиевых фольг различной толщины [1]; 2) изучение развития особенностей неустойчивости при ускорении тонких полимерных пленок мощным УФ импульсом, и формирование турбулентного слоя («лазерная ударная труба») [2], [3]; 3) взаимодействие мощных УФ импульсов с двухслойными мишенями (алюминий плюс оргстекло) и исследование «тонких» структур, формирующихся в веществе [4, 5].

Изучается сжатие и нагрев термоядерной мишени в виде двойных встречных конусов при облучении ее мегаджоульным ультрафиолетовым лазерным импульсом в гибридном реакторе [6, 7]. Эксимерный KrF лазер генерирует излучение на длине волны $\lambda=0.248$ мкм, широкую полосу генерации, возможность работы в частотном режиме, и другие привлекательные черты.

Численное моделирование выполнено по двумерным цилиндрическим программам “NUTCY” (эйлеровые координаты) и “Atlant_C” (лагранжевые координаты) [8].

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (НЦФМ).

Литература

1. V.D.Zvorykin, I.G.Lebo. // Laser and Particle Beams, (1999), v.17, 69-88.
2. В.Д. Зворыкин, И.А. Краснюк, И.Г. Лебо, А.О. Левченко. // Краткие сообщения по физике ФИАН. (2005), №9, 34-41.
3. I.G. Lebo, V.D. Zvorykin // Physica Scripta. IOP Publishing. Phys. Scr. T132 (2008) 014018.
4. V. Zvorykin, I. Lebo, A. Shutov, N. Ustinovskii. // Matter and Radiation at. Extremes. (2020), 5, 03540.

5. И.Г. Лебо. // Российский технологический журнал, (2021), 9(1), 71-79. www.rtj-mirea.ru
6. И.Г. Лебо, Е.А. Исаев, А.И. Лебо. // Квантовая электроника, (2017), 47(2), 106-110
7. Г.В. Долголева, И.Г. Лебо. // Квантовая электроника. (2019), 49(8), 796-800.
8. И.Г. Лебо. В.Ф. Тишкин. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза. МОСКВА. ФИЗМАТЛИТ, 2006.

NUMERICAL MODELING OF THE EXPERIMENTS OF THE POWER UV LASER PULSE INTERACTION WITH THE CONDENSE TARGETS

I.G. Lebo

Russian Technological University-MIREA, Institute of Artificial Intelligence,
Moscow, Russia

A review has devoted the numerical modeling of the power UV-laser pulse interaction with the condense targets. The experiments have been made at the KrF-laser 'GARPUN' (Lebedev Physical Institute of RAS). We have modeled the three sets of experiments: 1) a burning through Al foils of the different thickness [1]; 2) the study of hydrodynamic instability development at the thin film acceleration with help of UV laser pulses ('laser shock tube') [2], [3]; 3) the interaction of power UV laser pulses with two-layer targets (Al + plexiglass), and study of 'fine structures' in the matter [4, 5].

The opportunity of the use of two-side cone laser targets in hybrid fusion-fission reactor with MJ UV - laser driver has discussed [6, 7]. The excimer KrF laser fundamentally generates UV light at $\lambda=0.248 \mu\text{m}$, a wide bandwidth, the opportunity of high repetition rate of pulses, and a number of attractive features.

The simulations have been made using 2D cylindrical codes 'NUTCY' (Euler coordinates) and 'Atlant_C' (Lagrange coordinates) [8].

This paper has been made in frame of the Scientific Program of National Centre of Physics and Mathematics.

References

1. V.D. Zvorykin, I.G. Lebo. // Laser and Particle Beams, (1999), v.17, 69-88.
2. V.D. Zvorykin, I.A. Krasnyuk, I.G. Lebo, A.O. Levchenko. // Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN, (2005), №9, 34-41 (in Russian).
3. I.G. Lebo, V.D. Zvorykin // Physica Scripta. IOP Publishing. Phys. Scr. T132 (2008) 014018.
4. V. Zvorykin, I. Lebo, A. Shutov, N. Ustinovskii. // Matter and Radiation at. Extremes. (2020), 5, 03540.
5. I.G. Lebo // Russian Technological Journal, (2021), 9(1), 71-79, (in Russian). www.rtj-mirea.ru
6. I.G. Lebo, E.A. Isaev, A.I. Lebo. // Quantum Electronics, (2017), 47(2), 106-110
7. G.V. Dolgoleva, I.G. Lebo. // Quantum Electronics. (2019), 49(8), 796-800.
8. I.G. Lebo, V.F. Tishkin. Issledovanie gidrodinamicheskij neustojchivosti v zadachah lazernogo termojadernogo sinteza. M. FIZMATLIT, 2006, (in Russian).

**МОДИФИКАЦИИ k - ε МОДЕЛИ ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ
УДАРНОВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ**

Ю.В. Третьяченко А.Р. Гужова, В.П. Стаценко, Ю.В. Янилкин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Феноменологические модели турбулентности нашли широкое применение при описании разнообразных течений. Наиболее распространённая среди них – k - ε модель, которая отличается относительной простотой и не требует значительных машинных ресурсов. При этом в [1] для модели удалось подобрать единый набор констант, позволяющий удовлетворительно описывать широкий класс турбулентных течений.

Корректное описание порождения турбулентности на ударной волне (УВ) представляет собой сложную проблему для феноменологических моделей. Данный вопрос рассматривался в ряде работ.

В настоящей работе исследуется вопрос о генерации турбулентности в k - ε модели турбулентного перемешивания [1] при прохождении УВ. На основе такого анализа предложены модификации генерационных членов k - ε модели. Для нескольких тестовых задач проведено исследование развития турбулентности на границе раздела двух различных газов при прохождении УВ по методике ЭГАК [2] с k - ε моделью без изменения подобранных ранее констант модели. Эти результаты являются содержанием данной работы.

Литература

1. А.Р. Гужова, А.С. Павлуни, В.П. Стаценко. Уточнение констант k - ε модели турбулентности на основе результатов прямого численного моделирования простейших турбулентных течений и измерений // ВАНТ, сер. ТПФ, вып. 3, 2005, с. 37-48.
2. Н.С. Дарова, О.А. Дибиров, Г.В. Жарова, А.А. Шанин, Ю.В. Янилкин. Комплекс программ ЭГАК. Лагранжево-эйлерова методика расчёта двумерных газодинамических течений многокомпонентной среды. // ВАНТ, сер. ММФП. 1994. Вып. 2. С. 51-58.

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА УДАРНО-ВОЛНОВОГО
ПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ, ОСНОВАННОЙ НА ФИЗИКЕ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА, ДЛЯ РАСЧЁТА
СПЕКТРА РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ОЛОВА И СВИНЦА**

А.Б. Георгиевская

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Модель источника ударно-волнового пыления, основанная на физике неустойчивости Рихтмайера-Мешкова и развитая для расчёта выброшенной массы частиц металла и её распределения по скоростям в потоке, применена для расчёта распределения частиц по размерам. Модель разработана для металлов, переходящих в расплавленное состояние после ударно-волнового воздействия.

В работе проанализированы эксперименты, проведенные в ЛАНЛ и во ВНИИЭФ по регистрации размеров частиц, выброшенных из узких полос с начальными возмущениями на свободной поверхности образцов из олова и свинца.

Показано, что для прогнозирования спектра размеров частиц при пылении жидкой среды необходимо знать не только её плотность и поверхностное натяжение, но и начальную амплитуду a_0 и длину волны λ возмущений, профиль ударной волны. Согласно развитой теории размер частиц в потоке в большей мере определяется длиной волны возмущений, чем начальной амплитудой. Результаты расчётов по уравнениям модели согласуются с данными экспериментов.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ «ПЫЛЕНИЯ» И ИХ СРАВНЕНИЕ С СИНХРОТРОННОЙ РАДИОГРАФИЕЙ

*К.А. Тен^{1,3}, Э.Р. Прууэл¹, И.А. Рубцов^{1,2}, А.О. Кашкаров¹,
А.А. Студенников², Л.И. Шехтман³, Б.П. Толочко^{3,4},
А.Ю. Гармашев⁵, Д.В. Петров⁵, Е.Б. Смирнов⁵, К.В. Новоселов⁶*

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²ЦКП "СКИФ", Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Кольцово, Россия

³Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁵РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

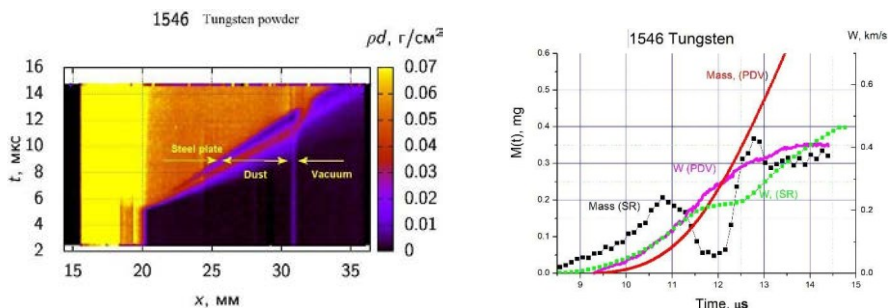
⁶Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Выход сильной ударной волны на свободную поверхность (СП) металлического образца приводит к выбросу облака частиц из образца (так называемое «пыление»). В литературе имеется несколько моделей выброса микрочастиц, из них наиболее теоретически развита модель с развитием неустойчивостей на границе СП и дальнейшем отрыве микрочастиц. В последнее время интерес к явлению «пыления» сильно возрос в связи с влиянием выброса «пыли» на результаты измерений динамики движения СП с использованием лазерных методов регистрации движения. Экспериментальное исследование этих процессов сильно затруднены из-за малых размеров микрочастиц (1 – 100 мкм) и больших скоростей их полета (2-5 км/с). Наиболее часто для исследования «пыления» используются лазерные системы PDV и пьезодатчики. Их достоинства – многоканальность и возможность транспортировки оборудования. А недостатки – низкая точность и сложность калибровки показаний. Синхротронное излучение (СИ) дает возможность получения многих радиографических снимков (кино) процесса зарождения и динамики движения облака микрочастиц.

В данной работе движение облака вольфрамовых микрочастиц исследовалось одновременного тремя методиками – лазерной PDV, пьезодатчиками и радиографией синхротронного кино. Опыты проводились на базе ускорительного комплекса ВЭПП-3 – ВЭПП-4 в ИЯФ СО РАН. Синхротронные рентгеновские импульсы имеют одинаковые параметры (длительность 1 нс, период следования 124 нс) в течении длительного времени, что позволяет тщательно калибровать детектор DIMEX для измерения массы (и плотности) при движении облака микрочастиц. Точность измерения плотности составляет ~ 1 мг/см³. Плотность облака также измерялась индикаторным методом по движению танталовой фольги (с помощью PDV) и по давлению на пьезодатчики. Тестовый вольфрамовый порошок (~ 10 мкм) наносился тонким слоем на стальную пластину, которая металась зарядом ВВ. На снимке слева показаны радиографические кадры, а справа – измеренные скорости танталовой фольги (сиреневый – PDV, зеленый – СИ) и линейные массы

облака пыли (красный PDV, черный – СИ).

Видно, что интегрально все методики равноценны, но «быстрые» изменения плотности вольфрамовой пыли видны только при радиографии с помощью СИ.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ЧАСТИЦ, ВЫБРАСЫВАЕМЫХ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СВИНЦОВЫХ ОБРАЗЦОВ, В УСЛОВИЯХ ИХ ДВУХВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

*А.П. Явтушенко, Е.А. Чудаков, А.В. Федоров
А.О. Яговкин, А.Л. Гамов, М.П. Калинин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Представляет интерес задача исследования процесса ударно-волнового пыления поверхности металла в условиях, когда металл подвергается воздействию нестационарной ударной волны, приводящей к его разрушению, и последующему воздействию уплотняющей волны (вторая ударная волна). Действие этой волны приводит к дополнительному выбросу вещества с поверхности. В настоящей работе проведена серия экспериментов по регистрации удельной массы потока пыли при двухволновом нагружении свинцовых образцов в условиях разницы между выходами волн через 5 мкс. Регистрация скорости образцов и частиц производилась с помощью метода PDV. Выброшенная масса частиц определялась с помощью метода индикаторных экранов и метода оптического датчика из фторида лития, интегрированных с PDV.

Массовые характеристики пылевого потока определялись с помощью регистрации скорости индикаторных экранов (металлические фольги и прозрачные стекла) и окна из фторида лития, которые устанавливались на пути движения потока частиц на разных базах измерения. В опытах варьировались параметры обработки поверхности: либо $Ra \sim 2$ ($\lambda \sim 40$ мкм, $A \sim 6$ мкм), либо $Ra \sim 0,044$ ($\lambda \sim 25$ мкм, $A \sim 0,2$ мкм). Амплитуда первой ударной волны составляла $P=45$ ГПа, что достаточно для плавления металла. В экспериментах получено распределение удельной массы потока в зависимости от времени и относительной скорости.

По результатам экспериментов, в которых регистрировалось пыление до выхода второй УВ на СП образца, было получено, что удельная масса выбрасываемых частиц увеличивается в 6,5 раз при увеличении шероховатости поверхности образца. Это соответствует существующим представлениям о пылении, как о результате влияния шероховатости. Однако по результатам опытов, в которых зарегистрировано пыление, индуцированное второй УВ, удельная масса частиц

оказалась близка по значениям при разных классах обработки поверхности. По-видимому, это обстоятельство связано с тем, что после выхода первой УВ, приводящей к плавлению свинца, происходит разрушение образца. Вторая УВ распространяется по разрушенной среде, компактируя образец и формируя новые условия для выброса частиц. Таким образом, обработка поверхности образцов слабо влияет на массу выбрасываемых частиц после выхода второй УВ.

DETERMINATION OF THE INTEGRAL CHARACTERISTICS OF THE FLOW OF PARTICLES EJECTED FROM THE FREE SURFACE OF LEAD SAMPLES UNDER THEIR TWO-WAVE LOADING

A.P. Yavtushenko, E.A. Chudakov, A.V. Fedorov, A.O. Yagovkin, A.L. Gamov, M.P. Kalinin

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

Of interest is the problem of studying the process of shock-wave dusting of a metal surface during its loading under conditions when the metal is exposed to a non-stationary shock wave, leading to its destruction, and subsequent action of a compaction wave (the second shock wave), leading to an additional ejection of matter from the surface. In the present work, a series of experiments was carried out to record the specific mass of a dust flow under two-wave loading of lead samples under conditions of a difference between wave outputs after 5 μs . The velocity of samples and particles was recorded using the PDV method. The ejected particle mass was determined using the indicator screen method and the lithium fluoride optical sensor method integrated with the PDV.

The mass characteristics of the dust flow were determined by recording the velocity of indicator screens (metal foils and transparent glasses) and lithium fluoride windows, which were installed in the path of the particle flow at different measurement bases. In the experiments, the surface treatment parameters were varied: either $R_a \sim 2$ ($\lambda \sim 40 \mu\text{m}$, $A \sim 6 \mu\text{m}$) or $R_a \sim 0.044$ ($\lambda \sim 25 \mu\text{m}$, $A \sim 0.2 \mu\text{m}$). The amplitude of the first shock wave was $P = 45 \text{ GPa}$, which is sufficient to melt the metal. In experiments, the distribution of the specific mass of the flow depending on time and relative velocity was obtained.

In experiments in which dusting was recorded before the second shock wave reached the free surface of the sample, it was found that the specific mass of ejected particles increased by a factor of 6.5 with an increase in the surface roughness of the sample. Which corresponds to the existing ideas about dusting. However, in experiments in which dusting induced by the second shock wave was recorded, the specific mass of particles turned out to be close in values for different classes of surface treatment. Apparently, this circumstance is due to the fact that after the release of the first shock wave, which leads to the melting of lead, the sample is destroyed. The second shock wave propagates through the destroyed medium, compacting the sample and creating new conditions for particle ejection. Thus, the treatment of the surface of the samples has little effect on the mass of ejected particles in the field of the second shock wave.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ
СВИНЦА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ И
ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКЕ**

*Н.В. Невмержицкий, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, А.Б. Георгиевская,
В.А. Раевский, А.Н. Малышев, Е.В. Бодров, О.Л. Кривonos, Е.В. Левкина,
В.И. Скоков, К.В. Анисифоров, С.В. Фролов, Д.В. Козлов, И.Р. Фарин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Приведены результаты экспериментальных исследований диспергирования свинцового образца в вакуум после ударно-волнового нагружения и изоэнтропической разгрузки с использованием электронно-оптической микроскопической методики и методики PDV: исследовалась динамика и спектр диспергированных частиц. Для обеспечения оптической визуализации из диспергированного облака при помощи диафрагмы со щелью «вырезался» тонкий поток (шириной 0,5 мм).

Эксперименты проводились в герметичной бронекамере. Образец толщиной 1 или 2,5 мм нагружался твердым взрывчатым веществом через металлическую подложку толщиной 1 и 2 мм. Интенсивность ударной волны варьировалась от $P \sim 23$ до 38 ГПа. После нагружения свинец находился либо в жидкой фазе, либо в твердой фазе, либо в смеси жидкой и твердой фаз.

Получено, что при разном фазовом состоянии распределения частиц диспергированного свинца по размерам и их скорости значительно различаются.

**RESULTS OF INVESTIGATIONS OF LEAD DISPERSION UNDER SHOCK
LOADING AND ISOENTROPIC UNLOADING**

*N.V. Nevmerzhitskiy, E.D. Senkovskiy, E.A. Sotskov, A.B. Georgievskaya, V.A. Raevskiy,
A.N. Malyshev, E.V. Bodrov, O.L. Krivonos, E.V. Levkina, V.I. Skokov, K.V. Anisiforov,
S.V. Frolov, D.V. Kozlov, I.R. Farin*

The results of experimental study of lead sample dispersion into vacuum after shock loading and isentropic unloading with the use of electron-optical microscopic methods and PDV-method are presented: the dynamics and the spectrum of dispersed particles are studied. To obtain optical visualization, a thin flow (0.5 mm wide) is cut from the dispersed cloud with the help of split diaphragm.

The experiments are conducted in a leak-proof armor chamber. The sample with the thickness of 1 or 2.5 mm is loaded by a solid high explosive through the metal substrate with the thickness of 1 and 2 mm. The shock wave intensity is varied from $P \sim 23$ up to 38 GPa. After loading, lead remains in a liquid phase or in a solid state, or in a mixture of liquid and solid phases.

It is obtained that in a different phase state, the size distributions of particles in dispersed lead and their velocities differ significantly.

ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ С ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СВИНЦА И МЕДИ ПРИ ИХ НАГРУЖЕНИИ ОДНОЙ ИЛИ ДВУМЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

*А.Л. Михайлов, В.А. Огородников, С.В. Ерунов, С.А. Финюшин, Д.Е. Зотов,
Е.В. Кулаков, М.А. Сырунин, М.В. Антипов, Н.В. Невмержицкий, К.Н. Панов,
Е.А. Чудаков, А.С. Пупков, А.В. Мишанов, А.Б. Георгиевская, И.В. Юртов,
Д.Н. Замыслов, Е.В. Бодров, И.А. Калашиник, А.О. Яговкин, А.В. Чапаев*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

С использованием методик импульсной рентгенографии, микроскопической лазерно-оптической съемки, пьезоэлектрических датчиков давления и гетеродин-интерферометра с индикаторными экранами исследована качественная картина и количественные характеристики процесса выброса частиц со свободной поверхности (СП) образцов из свинца и меди при выходе на нее одной или двух последовательных ударных волн, разделенных по времени на $\sim 0,2$ мкс.

Установлено, что:

– при нагружении образца из меди одной УВ интенсивностью $P_{ув}=45$ ГПа ($P_{ув} < P_{пл}$) с его СП выбрасывается поток частиц и микрооткольных фрагментов, удельная масса потока ~ 17 мг/см², а при его нагружении двумя последовательными УВ интенсивностью $P_1=45$ ГПа и $P_2=65$ ГПа, разделенными на $0,2$ мкс, поток частиц, выброшенных на первой УВ, «собирается» СП, ускоренной второй УВ, при этом удельная масса частиц в потоке составляет $\sim 0,7$ мг/см²;

– при нагружении образца из свинца одной УВ интенсивностью $P_{ув}=44$ ГПа ($P_{ув} > P_{пл}$) и, в отличие от меди, с СП выбрасывается поток частиц в виде кумулятивных струй, удельная масса потока ~ 26 мг/см², а при его нагружении двумя последовательными УВ интенсивностью $P_1=39$ ГПа и $P_2=59$ ГПа, разделенными на $0,2$ мкс, поток частиц уплотняется за счет поджатия его СП при выходе на нее второй УВ, удельная масса остается на прежнем уровне ~ 26 мг/см².

CHARACTERISTICS OF SHOCK-INDUCED DISPERSIVE FLOW FROM SURFACES OF SAMPLES MADE OF LEAD AND COPPER AT THEIR LOADING WITH ONE OR TWO SEQUENTIAL SHOCK WAVES

*A.L.Mikhaylov, V.A.Ogorodnikov, S.V.Erunov, S.A.Finyushin, D.E.Zotov, E.V.Kulakov,
M.A.Syrunin, M.V.Antipov, N.V.Nevmerzhitskiy, K.N.Panov, E.A.Chudakov, A.S. Pupkov,
A.V.Mishanov, A.B.Georgievskaya, I.V.Yurtov, D.N.Zamyslov, E.V.Bodrov, I.A.Kalashnik,
A.O.Yagovkin, A.V.Chapaev*

RFNC, Sarov, Russia

When using techniques of flash radiography, microscopic laser-optical survey, piezoelectric pressure gauges and a heterodyne-interferometer with indicator screens, the authors investigated a qualitative pattern and quantitative characteristics of ejection of particles from a free surface (SF) of samples made of lead and copper, as one or two sequential shock waves (SW) separated in time by $\sim 0,2$ μ s pass towards a free surface.

It was found that:

– at loading of a copper sample by one SW with wave strength of $P_{sw}=45$ GPa ($P_{sw} < P_{melting}$) a flow of particles and micro-fragments is ejected from its surface, specific

weight of a flow is $\sim 17 \text{ mg/cm}^2$, and at its loading by two sequential SW with intensity of $P_1=45 \text{ GPa}$ and $P_2=65 \text{ GPa}$, separated in time by $0,2 \mu\text{s}$, a flux of particles ejected in the first SW, «is collected» by FS, accelerated by the second SW, in this case specific weight of particles in a flow is $\sim 0,7 \text{ mg/cm}^2$;

– at loading of a lead sample by one SW with wave strength of $P_{\text{sw}}=44 \text{ GPa}$ ($P_{\text{sw}} > P_{\text{melting}}$) and, in contrast to copper, from FS a particle flux is ejected in the shape of cumulative jets, specific weight of a flow is $\sim 26 \text{ mg/cm}^2$, and under its loading by two sequential SW with intensity of $P_1=39 \text{ GPa}$ and $P_2=59 \text{ GPa}$, separated in time by $0,2 \mu\text{s}$, a particle flux is compacted at the expense of its constriction by FS at outlet of the second SW to FS, specific weight remains at a previous level $\sim 26 \text{ mg/cm}^2$.

ОСОБЕННОСТИ ВЫБРОСА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И ФРАГМЕНТОВ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ

А.В. Федоров, С.А. Финюшин, Е.А. Чудаков, А.П. Явтушенко, А.Г. Халаев

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

При выходе ударной волны на свободную поверхность (СП) металлов происходит микрокумулятивных выброс частиц, который называют ударноволновым пылением материалов [1,2].

В настоящей работе с помощью метода лазерного гетеродин-интерферометра PDV [3, 4] приведены результаты серии ударноволновых экспериментов с образцами меди с разномасштабной (микрометрового и миллиметрового диапазона) величиной шероховатости поверхности. Регистрировали скорость СП, скорость облака инжектируемых мелких частиц пыли (1-100 мкм) и крупных фрагментов (0,1-2 мм), причем для миллиметрового масштаба шероховатости эти параметры регистрировались отдельно в области канавок и отдельно в области гребней.

Особенность пыления в области расположения гребней заключается в том, что в образце с амплитудой возмущения 1,9 мм и длиной волны 4 мм при скорости свободной поверхности $W = 1,8 \text{ км/с}$ реализуется дисперсия скорости величиной $W = 0,98 - 1,26 \text{ км/с}$. Данная дисперсия скорости реализуется из-за действия с двух сторон встречных волн разгрузки, что приводит к множественному откольному дроблению гребней на их вершинах.

Для области расположения канавок зарегистрированы треки скорости более 30 фрагментов с их максимальной величиной от 1,6 км/с до 3,88 км/с. При формировании линейной кумулятивной струи происходит ее растяжение, пластическая деформация с разрывом шеек и образованием фрагментов. Показано что время от начала формирования в канавках кумулятивных струй до отрыва фрагментов составляет 0,2 - 2,6 мкс.

Работа является продолжением [4], в которой с применением метода PDV на медных образцах с крупномасштабными возмущениями показана возможность регистрации скорости выбрасываемого облака частиц по всей его глубине и определения внутренней структуры материала при множественном откольном разрушении.

Литература

1. В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, С.В. Ерунов, С.А. Финюшин, Д.Е. Зотов, Н.В. Невмержицкий, Характеристики ударно-индуцированных пылевых потоков с поверхности

- образцов из свинца и меди при давлении в ударной волне 45-50 ГПа и разгрузке в вакуум. ЖЭТФ, 2019, т.156, №3.
2. В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, В.В. Бурцев, С.А. Лобастов, С.В. Ерунов, Ю.Б. Базаров и др. Регистрация выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных образцов. ЖЭТФ, т.136, вып.3(9), стр.1-6, (2009).
 3. T. Resseguier, L. Signor, A. Dragon et al., J. Appl. Phys. 101, 013506 (2007).
 4. А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, С.А. Финюшин, Е.А. Чудаков, Д.А. Калашников и др., ЖЭТФ, т. 149, выпуск 2, 2016 г.

PECULIARITIES OF EJECTION OF PARTICLES AND FRAGMENTS FROM THE FREE SURFACE OF SHOCK LOADED COPPER SAMPLES

A.V. Fedorov, S.A. Finyushin, E.A. Chudakov, A.P. Yavtushenko, A.G. Khalaev

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russian

When the shock wave comes to the free surface of metals, the microcumulative particle ejection is occurred, and it is known as the shock ejection of materials [1, 2].

In this paper, the results of shock experiments with copper samples of different surface roughness (the scale of micrometers and millimeters) using the photon Doppler velocimetry (PDV) [3, 4] are performed. The free surface velocity, the velocity of ejecting fine particles (1-100 μm) and large fragments (0.1-2 mm) were recorded. These parameters for millimeter scale of roughness were recorded separately in the area of grooves and in the area of crests.

A peculiarity of ejection in the area of crests location is that the velocity dispersion of $W = 0.98\text{-}1.26$ km/s is occurred in a sample with the perturbation amplitude of 1.9 mm and wave length of 4 mm under the free surface velocity of $W = 1.8$ km/s. This velocity dispersion leads to the multiple spall fragmentation of crests at their peaks.

For groove locations, the velocity tracks of more than 30 fragments are recorded with the maximum value of 1.6 km/s up to 3.88 km/s. Under the formation of linear cumulative jet, its tension, plastic deformation with the neck breaks and fragmentations are occurred. It is shown that the time from the start of cumulative jet formation in the grooves up to separation of fragments is equal to 0.2-2.6 μs .

This paper continues the work [4] where using PDV in copper samples with large scale perturbations, the velocity of a cloud of ejecting particles is possible to record through all of its depth. The possibility of determination of the material internal structure under multiple spall fragmentation is shown.

References

1. V.A. Ogorodnikov, A.L. Mikhailov, S.V. Erunov, S.A. Finyushin, D.E. Zotov, N.V. Nevmerzhitkiy. Characteristics of shock induced ejecting flows from the surface of lead and copper at the shock pressure of 45-50 GPa and unloading into vacuum. Journal of Experimental and Theoretical Physics.. 2019. V. 156, 3.
2. V.A. Ogorodnikov, A.L. Mikhailov, V.V. Burtsev, S.A. Lobastov, S.V. Erunov, Yu.B. Bazarov et al. Recording of ejection of particles from the free surface of shock loaded samples. Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2019. V. 136, 3(9).
3. T. Resseguier, L. Signor, A. Dragon et al. J. Appl. Phys. 101, 013506 (2007).
4. A.V. Fedorov, A.L. Mikhailov, S.A. Finyushin, E.A. Chudakov, D.A. Kalashnikov et al. Journal of Experimental and Theoretical Physics V. 149, 2. 2016.

МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

TEST TECHNIQUES AND EXPLOSIVE TECHNOLOGIES. SIMULATION OF DYNAMICAL PROCESSES

ПОРОШКОВЫЙ СОСТАВ, СОДЕРЖАЩИЙ ДЕТОНАЦИОННЫЕ НАНОАЛМАЗЫ (ДНА) – ЭФФЕКТИВНАЯ ДОБАВКА В ЭЛЕКТРОЛИТ ИЗНОСОСТОЙКОГО ХРОМИРОВАНИЯ

В.Ю. Долматов¹, С.П. Богданов², В.А. Марчуков,¹ А.С. Козлов¹

¹ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог»,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
г. Санкт-Петербург, Россия

Применение детонационных наноалмазов (ДНА) для нанесения гальванических покрытий известно более 30 лет, но широкого распространения не получило, так как была возможность использования только водных (5 мас. % по ДНА), не стойких во времени, суспензий, с получением нестабильных результатов по качеству покрытий. Кроме того, перевозка ~95% воды в виде суспензий очень затратна.

К настоящему времени впервые разработан ряд сухих порошковых составов (ПС), содержащих 72,5±2,5 мас. % ДНА, хорошо совместимых с электролитами хромирования, никелирования, золочения, серебрения и дающих высокое качество покрытий. ПС - не токсичен, не мутагенен, не канцерогенен.

Использование ПС возможно в трех вариантах:

1. Наиболее оптимальный - внесение в дистиллированную воду с последующей обработкой ультразвуком (УЗ), а затем - в электролит;
2. Внесение в воду без обработки УЗ, а затем - в электролит;
3. Наименее оптимальный - внесение ПС непосредственно в электролит.

В данной работе описано применение ПС для классического электролита износостойкого хромирования, одного из самых применяемых в мире, его состав: Cr_3O – 250 г/л, H_2SO_4 – 2,5 г/л, ПС (в расчете на ДНА) - 5,0 г/л. Режим осаждения: плотность тока - 50 А/дм², температура электролита 55°C. Рабочая концентрация ДНА - от 5,0 до 1,0 г/л в электролите.

Таблица 1. Сравнительные значения по микротвердости и износостойкости (хром износостойкий)

№	Количество добавки в расчете на ДНА, г/л	Микротвердость, Н _ц , кгс/мм ² Толщина покрытия 20 мкм (40 мин)							Скорость износа, г/м ² , мин
		Точка 1 (центр)	Точка 2 (верх справа)	Точка 3 (верх слева)	Точка 4 (низ справа)	Точка 5 (низ слева)	Средняя	Разница между максимальным и минимальным значениями	
1	-	690	750	887	874	892	818,6	202	0,82
2	5,0	1050	1032	982	994	1057	1023	75	0,31

Износостойкость покрытий оценивали по скорости его истирания. Диск с покрытием истирали с помощью абразивного порошка карбида кремния зернистости 20-40 мкм, контр-телом служила корундовая керамика. Из таблицы 1 видно, что скорость износа хромового покрытия при внесении в электролит ПС упал в 2,6 раза.

Рассеивающую способность электролита (равномерность осаждения металла) косвенно можно охарактеризовать и разницей между максимальным и минимальным значениями микротвердости для одного и того же образца. Из таблицы 1 видно, что такая разница значительна для хромового покрытия без добавки ПС (более 200 кгс/мм²) и наоборот, вполне приемлема для хромового покрытия с ДНА (75 кгс/мм²).

В процессе работы было показано, что слишком высокая микротвердость (для износостойкого хрома), более 1100 кгс/мм², приводит к охрупчиванию покрытия (падает износостойкость) и значительному трещинообразованию - появлению большого количества мелких трещин. Истирание таких покрытий приводит к частичному отслоению микрочастиц покрытий с обнажением матрицы (падает адгезия покрытия к матрице).

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ в рамках научного проекта №21-73-30019.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАЛОПЛОТНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД, РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ УДАРНЫХ ВОЛН

*И.А. Белов, С.А. Бельков, С.В. Бондаренко, А.Ю. Воронин, В.Н. Деркач,
А.В. Илюшечкина, А.А. Кузина, И.В. Кузьмин, А.Е. Мюсова, А.Н. Рукавишников,
Е.Ю. Соломатина, К.В. Стародубцев, П.В. Стародубцев, О.О. Шаров*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Малоплотные микроструктурированные среды (пены) в последние годы широко востребованы в экспериментальных исследованиях, проводимых на мощных лазерных установках. В частности малоплотные среды находят применение в качестве предварительного каскада усиления давления в экспериментах по измерению

уравнения состояния (УРС) [1, 2]. Слои малоплотных пен широко используются для сглаживания неоднородностей лазерного пятна, фокусируемого на мишень [3]. Дополнительные возможности, появляются в лазерных экспериментах при использовании малоплотных сред (пен), как эффективных поглотителей лазерного излучения в условиях, когда поглощение лазерного излучения используемой частоты на твердотельных мишенях оказывается невелико (или недостаточно велико). В ИЛФИ экспериментальные исследования мишеней, содержащих слои малоплотной пены, в течение уже многих лет ведутся на лазерных установках ЛУЧ и ИСКРА-5.

В работе описаны развиваемые на данный момент в ИЛФИ технологические цепочки [4] по созданию малоплотных материалов с заданной плотностью, толщиной и размерами пор, в том числе с включениями нанокластеров металлов с большим Z [5]. Полученные пены проходили аттестацию на специальном измерительном оборудовании [6] и интегрировались в мишенные конструкции для лазерных экспериментов.

Приведены результаты расчётов параметров ударных волн для мишеней, содержащих малоплотный ударник и индикатор из металла, по программам СНДП [7] и ДИАНА [8]. Учитывался объемный характер поглощения лазерного излучения в области, размер которой определялся глубиной геометрической прозрачности пены в различных конфигурациях [9].

Экспериментально подтверждена гомогенность малоплотных пен, в том числе и с допированием металлов с большим Z . Представлены постановка и результаты экспериментов, проведённых на установке ЛУЧ по управлению развиваемым в материалах давлением. В экспериментах применялось излучение с длиной волны 0,53 мкм, временная форма являлась трапецией с длительностью на полувысоте интенсивности от 3,3 до 4,0 нс. Фокусировка производилась в пятно \varnothing 600 мкм с равномерным распределением энергии, интенсивность в пятне облучения составляла до $2 \cdot 10^{15}$ Вт/см².

Работы выполнены в рамках проекта 4 «Физика высоких плотностей энергии» Национального Центра Физики и Математики.

Литература

1. A. Benuzzi, M. Koeng, J. Krishnan, and B. Farral, Phys. Plasmas, Vol. 5, No. 8, (1998).
2. С.А. Бельков и др. Ударная передача давления твердому веществу в мишени с пористым поглотителем излучения мощного лазерного импульса. ЖЭТФ. 161. 3. 403-413 (2022).
3. S. X. Hu, W. Theobald, P. B. Radha et al., Physics of Plasmas 25, 082710 (2018).
4. Aegerter M.A., Leventis N., Koebel M.M., Aerogels Handbook. Springer, 2011. стр. 585.
5. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1975. – 511 с.
6. И.В. Акимова, Н.Г. Борисенко, А.И. Громов, Ю.А. Меркульев, А.С. Орехов, Изготовление эффективных малоплотных конвертеров лазерного излучения в рентгеновское и новый метод измерения плотности слоёв из наночастиц тяжёлых металлов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 2
7. С.А. Бельков и др. Модель среднего иона для расчета состояния многозарядной многокомпонентной нестационарной и неравновесной плазмы. ЖЭТФ. 111. 2. 495-513 (1997).
8. S.Y. Gus'kov et al. Plasma Phys. Control. Fusion. 61. 105014 (2019).
9. S.Y. Gus'kov. Journal of Russian Laser Research. 31. 574 (2010).

DEVELOPMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF LOW-DENSITY POROUS MEDIA, DESIGN-THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THEIR APPLICATION FOR SHOCKWAVE PARAMETERS CONTROL

*I.A. Belov, S.A. Belkov, S.V. Bondarenko, A.Yu. Voronin, V.N. Derkach,
A.V. Ilyushechkina, A.A. Kuzina, I.V. Kuzmin, A.E. Myusova, A.N. Rukavishnikov,
E.Yu. Solomatina, K.V. Starodubtsev, P.V. Starodubtsev, O.O. Sharov*

RFNC-VNIEF, Sarov, Russia

In recent years, low-density microstructured media (foams) are widely used in experimental studies carried out on powerful laser facilities. In particular, low-density media are used as a preliminary cascade of pressure amplification in the experiments of the equation of state (EOS) measurement [1, 2]. The layers of low-density foams are used for smoothing the non-uniformities of the laser spot focused on the target [3].

Additional capabilities appear in laser experiments when using low-density media (foams) as effective absorbers of laser emission in conditions when the absorption of laser radiation of the used frequency on solid-state targets is small (or not large enough). In the Institute of Laser Physics (ILPHI), experimental studies of targets containing layers of low-density foam have been conducted for many years on the LUCH and ISKRA-5 laser facilities.

The work describes the technological chains [4], being developed at the moment in the ILPHI, to create low-density materials with a given density, thickness and pore size, including high-Z metal nanoclusters inclusions [5]. The resulting foams have been certified on special measuring equipment [6] and integrated into target structures for laser experiments.

The results of calculation of shock wave parameters for targets containing low-density impactor and metal indicator according to Spectral Non-Equilibrium Absorption Dynamics [7] and DIANA [8] programs are given. The volumetric nature of laser emission absorption in the area, the size of which was determined by the depth of geometric transparency of the foam in various configurations [9] was taken into account.

The homogeneity of low-density foams, including doping of high-Z metals, was experimentally confirmed. The formulation and results of experiments carried out at the LUCH facility to control the pressure developed in materials are presented. The 0,53 μm wavelength emission was used in the experiments, the pulse shape represented trapezoid with a duration at half-height of intensity from 3,3 up to 4,0 ns. Focusing was carried out into the 600 μm spot with a uniform distribution of energy; the intensity in the irradiation spot was up to $2 \cdot 10^{13}$ W/cm².

The work was carried out within the framework of the “Physics of high energy densities” project of the National Center for Physics and Mathematics.

References

1. A. Benuzzi, M. Koeng, J. Krishnan, and B. Farral, *Phys. Plasmas*, Vol. 5, No. 8, (1998).
2. S.A. Belkov et al. Shock propagation of pressure to the solid in the target with porous absorber of powerful laser pulse emission. *Journal of experimental and theoretical physics*. 161. 3. 403-413 (2022).
3. S. X. Hu, W. Theobald, P. B. Radha et al., *Physics of Plasmas* 25, 082710 (2018).
4. Aegerter M.A., Leventis N., Koebel M.M., *Aerogels Handbook*. Springer, 2011. p. 585.
5. Voyutskiy S.S. *Colloid chemistry course*. – M.: Chemistry, 1975. – 511 p.

6. I.V. Akimova, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, Yu.A. Merkuliev, A.S. Orekhov, Manufacturing of the effective low-density convertors of laser emission into x-ray and a new measurement method of the density of layers from high-density metal nanoparticles, Problems of Science and Technology (VANT), Series Thermonuclear fusion, 2012, issue 2
7. S.A. Belkov et al. Averaged ion model for calculation of multicharged multicomponent transient and non - equilibrium plasma state. Journal of experimental and theoretical physics. 111. 2. 495-513 (1997).
8. S.Y. Gus'kov et al. Plasma Phys. Control. Fusion. 61. 105014 (2019).
9. S.Y. Gus'kov. Journal of Russian Laser Research. 31. 574 (2010)

СВАРКА ВЗРЫВОМ ТРУБ

О.Б. Дреннов, И.А. Терешкина

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Для сварного соединения труб предлагается применение достаточно нового, но уже нашедшего свое место в технологических разработках метода – сварка взрывом. Этот метод может выгодно отличаться (экономия материальных и физических ресурсов) от своих статических аналогов (электронно – лучевая, аргононо – дуговая, плазменная, газовая сварка и т.п.) особенно в труднодоступных по географическим и климатическим условиям регионам.

Предлагается применять в качестве заполнителя воду. Используется принцип несжимаемости жидкости при квазидинамическом нагружении. В одномерных газодинамических и упругоэластических расчетах определена недеформированная масса воды. Модельные эксперименты с трубами радиусом $R = 57$ мм подтвердили результаты расчетов и принципиальную возможность сварки взрывом труб при использовании воды в качестве заполнителя.

ИССЛЕДОВАНИЯ СЕТЧАТЫХ АДДИТИВНЫХ СТРУКТУР, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

А.Ю. Гармашев, Е.Б. Смирнов, Д.В. Петров, А.И. Клёнов, Д.Т. Юсупов, Д.П. Кучко

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

В работе на установке составных стержней Гопкинсона (ССГ) исследовались образцы, имеющие как сплошную (однородную), так и объёмно-периодическую структуру. Эксперименты по нагружению методом ССГ позволяют получать динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Цель работы: исследование динамических свойств образцов-материалов, изготовленных методом аддитивных технологий.

Задача: получение динамических прочностных характеристик и анализ экспериментальных результатов, полученных в результате проведения серии

экспериментов на установке ССГ с образцами 3-D алюминия марки АК6, имеющими сплошную и объёмно-периодическую структуру, при скоростях деформации от $5,5 \times 10^2$ до $37,0 \times 10^2$ с⁻¹.

Образцы из алюминия, аналогичного по химическому составу сплаву АК6, заданной объёмно-периодической структуры, были изготовлены способом лазерного спекания металлического порошка (Selective Laser Sintering) на промышленном 3-D принтере.

В ходе исследований проведено более 150 экспериментов. Получены диаграммы напряжение-деформация и скорости деформации-деформация в диапазоне скоростей ударника от 7,14 до 31,2 м/с, при этом собственные скорости деформации образцов составили от 8×10^2 до 37×10^2 с⁻¹. Проведено сравнение результатов исследований прочностных свойств сплошных, объёмно-структурированных и образцов, полученных традиционным методом, предложены направления дальнейших исследований.

ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ШИРОКОМ КЛАССЕ СТВОЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ю.И. Орехов¹, А.Л. Михайлов², В.Н. Хворостин², Е.С. Митин²

¹Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород, Россия

²РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Микроволновая радиоинтерферометрия активно развивается в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ с 2000 г. при диагностике быстропротекающих газодинамических процессов. Развитие методики микроволновой диагностики позволило получить новые экспериментальные результаты по исследованиям распространения детонации в зарядах взрывчатых веществ (ВВ), ударно-волнового инициирования ВВ, адиабатического расширения процессов взрыва и других подобных задач [1]. Это стало возможным благодаря созданию серии одноканальных и многоканальных радиоинтерферометров (РИ) 3 мм диапазона в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИС им. Ю.Е. Седакова».

Меньшее внимание уделено микроволновой диагностике процессов в ствольных системах пушечного типа - во взрывных ударных стендах (ВУС), являющихся основой испытательных комплексов типа «Ствол» с каналами стволов калибрами от 30 до 900 мм, обеспечивающих отработку ВВ, исследования процесса передачи энергии взрыва ВВ метаемому ударнику или снаряду.

Кроме того, стволы являются основой широкого класса вооружений от стрелкового оружия калибром единицы-десятки мм до разнообразных артиллерийских систем калибром десятки-сотни мм и внутривствольная баллистика является основой для разработки оружейных систем [2]. Ключевым вопросом реализации радиоинтерферометрии для ствольных систем является выбор и реализация способа возбуждения электромагнитных волн для обеспечения однозначной интерференционной картины при распространении волн в стволе и взаимодействии с ударником (снарядом) в процессе его движения.

С точки зрения электродинамики ствол эквивалентен металлическому волноводу (МВ) круглого сечения. Ключевой задачей волноводной теории и практики

является возбуждение и распространение по МВ основной волны Н11 с минимальными погонными потерями. Известно, что в сверхразмерных МВ с отношением диаметра волновода D к длине волны λ в диапазоне $D/\lambda=(5...30)$ потери на порядки меньше, чем в стандартных одноволновых МВ. Однако, в сверхразмерных МВ возможен многомодовый режим, что приводит к сильной частотной зависимости коэффициента передачи, неприемлимой для реализации радиоинтерферометрии в ствольных системах. В докладе рассмотрены вопросы оптимального возбуждения основной волны в волноводах с соотношением $D/\lambda=(1...300)$ в представляющем интерес для диапазона калибров от нескольких мм до сотен мм и предложены варианты диэлектрических излучателей для отдельных участков, перекрывающих весь указанный диапазон калибров и требующих различных электродинамических подходов.

Материалы доклада показывают реальную возможность радиоинтерферометрии процессов в ствольных системах калибра от 3 до 900 мм при максимальных длинах стволов до 5-10 метров.

Литература

1. Невозможные методы диагностики быстропротекающих процессов/Под.ред. Михайлова А.Л. – Саров:ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015.
2. Поршнев С.В. Радиолокационные методы измерений экспериментальной баллистики. Екатеринбург: УрО РАН, 1999.

DEVELOPMENT PROSPECT OF MICROWAVE DIANOSTICS OF FAST PROCESSES FOR WIDE CLASS OF BARREL SYSTEMS

Yu. I. Orekhov¹, A.L. Mikhaylov², V.N. Khvorostin², E.S. Mitin²

¹“NIIS im. Yu.E. Sedakova” – Branch of RFNC-VNIIEF, Nizhny Novgorod, Russia
² RFNC -VNIIEF, Sarov, Russia

Microwave radio interferometry is being actively developed at RFNC -VNIIEF since 2000 to diagnose fast gas-dynamics processes. Development of methods of microwave diagnostics leads obtaining of new experimental results for detonation propagation in explosives charges, shock wave initiation of explosives, adiabatic expansion of explosion processes and other similar matters [1]. This became possible due to developing and creating of series of single-channel and multi-channel radio interferometers in the 3 mm range at the Branch of RFNC -VNIIEF “NIIS im. Yu.E. Sedakova”.

Less attention has been paid to microwave diagnostics in barrel systems (so-called explosion striking stands), which are the base for test complexes of the type “Barrel” with 30-900 mm calibers, providing research process for explosives and energy transmission from explosives to a launching impactor or a bullet.

In addition to that, barrels are also the base for a wide class of weapon systems from small arms having calibers of units-tens mm to various artillery systems with calibers from tens to hundreds mm and intra barrel ballistics is a basis for developing weapon systems [2]. The key goal of radio interferometry for barrel systems lies in selecting and implementing a method of exciting electromagnetic waves to provide a clear interferometry picture for wave propagation in a barrel and impactor/bullet movement within a barrel.

The barrel can be presented as a round metal waveguide (MW) in electrostatics. The key goal of waveguide theory and practice is exciting and propagating the base wave H₁₁ over MW with minimal linear losses. It is well known, that in oversized MW with a ratio between a diameter to wavelength in the $D/\lambda = (5 \dots 30)$ range the losses are orders of magnitude less than in standard single-wave MW. But in oversized MW a multi-wave mode is possible that leads to a strong frequency dependency of the transmission coefficient, which is unsuitable for implementing barrel systems interferometry. In this paper there are covered the aspects of optimal main wave exciting in waveguides with a diameter to wavelength ratio in the range $D/\lambda = (1 \dots 300)$ for calibers from several millimeters to hundreds of millimeters. Different options are suggested for dielectric radiators for specific sections, covering the entire range of calibers and requiring differentiated electrostatics approaches.

The article presents real capabilities of radio interferometry processes for barrel systems with 30-900 mm calibers with maximal barrel lengths of 5 to 10 meters.

References

1. Un-disturbing diagnostic techniques of fast processes/Mikhaylov A.L. – Sarov, “RFNC - VNIIEF,” 2015
2. Porshnev S.V. Radiolocation measurements methods for experimental ballistics. Ekaterinburg, UrO RAS, 1999.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДА ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТВОЛЬНЫХ НАГРУЖАЮЩИХ УСТАНОВОК

*Е.А. Чудаков, С.А. Финюшин, А.Е. Сафронов, А.М. Тарасов,
Л.В. Чернов, Е.А. Разумков, Т.О. Скляднева, Д.В. Крючков,
Д.Н. Замотаев, А.П. Куруленко, В.В. Барабин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Представлены результаты адаптации метода гетеродин-интерферометра (PDV) для проведения газодинамических исследований с использованием ствольных нагружающих установок. Для согласования измерительных каналов по временам регистрации проведены измерения относительных временных поправок гетеродин-интерферометра с точностью вплоть до 0,1 нс с использованием корреляционного анализа времен прохождения фемтосекундных импульсов с различным периодом повторения через измеряемые волоконные линии. Для учета перекоса соударения метаемого объекта с исследуемым образцом и определения скорости движения ударной волны предложен метод линейной регрессии, позволяющий наиболее полно использовать весь объем экспериментальных данных и статистически определять доверительные интервалы получаемых оценок. Для надежной регистрации параметров упругой волны предложен метод активно-пассивной диагностики гетеродин-интерферометра, позволяющий полностью устранить помеховую опорную линию и, соответственно, увеличить точность и разрешающую способность интерферометра как по времени, так и по скорости.

**HETERODYNE VELOCIMETER ACCURACY INCREASING
IN INVESTIGATIONS INVOLVING BALLISTICS LOADING**

*E.A. Chudakov, S.A. Finyushin, A.E. Safronov, A.M. Tarasov,
L.V. Chernov, E.A. Razumkov, T.O. Sklyadneva, D.V. Kryuchkov,
D.N. Zamotaev, A.P. Kurulenko, V.V. Barabin*

RFNC-VNIEF, Sarov, Russia

Results of heterodyne velocimeter (PDV) adaptation in some investigations involving ballistics loading are presented. Measurement channels time alignment accuracy about 0,1 ns is acquired with correlation analysis time of flight for two femtosecond impulse laser with difference repetition rate. Linear regression is used for impactor tilt and shock velocity calculation allowing using statistical approach in confidence range determination. Active-passive heterodyne velocimeter method is proposed for «base» line suppression and elastic precursor registration with high temporal and velocity accuracy and resolution.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КВАДРАТУРНОГО ДОПОЛНЕНИЯ
ДЛЯ ВРЕМЯРАЗРЕШЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА**

Н.Б. Аникин

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

Ранее, в работе [1] был предложен итеративный метод квадратурного дополнения для восстановления мгновенной частоты доплеровского сигнала, основанный на преобразованиях интегральной свертки сигнала с ядрами $F^{\parallel}(\varphi)$, $F^{\perp}(\varphi)$ особого вида, определёнными на конечных интервалах приближенной доплеровской фазы $\varphi(t)$ кратных доплеровскому периоду. Преобразования, ослабляя шумы, производят приближенную первую доплеровскую гармонику $S_1^{\parallel}(t)$ и приближенно квадратурное к ней дополнение $S_1^{\perp}(t)$ и позволяют определить новое приближение частоты $\omega_D(t)$ и фазы $\varphi(t)$ доплеровского сигнала, а также предельной среднеквадратичной ошибки определения частоты $\chi_{\omega}(t)$. В предположении постоянства спектральной плотности случайного шума D_{ω} в доплеровском сигнале ошибка $\chi_{\omega}(t)$ определялась интегральным преобразованием свертки доплеровской частоты $\omega_D(t)$ с ядром, зависящим от $D_{\omega} = const$ мгновенной амплитуды $A_1(t)$ доплеровской гармоники $S_1^{\parallel}(t)$ и огибающей F ядер $F^{\parallel}(\varphi)$ и $F^{\perp}(\varphi)$.

В настоящей работе метод квадратурного дополнения получил значительное развитие – преобразования с ядрами $F^{\parallel}(\varphi)$, $F^{\perp}(\varphi)$ были заменены на преобразование с комплексным ядром $f(\varphi)$, которое позволяет определить комплексную доплеровскую гармонику $s_1(t) = S_1^{\parallel}(t) + iS_1^{\perp}(t)$, в которой $S_1^{\parallel}(t)$ и $iS_1^{\perp}(t)$ – точно квадратурные сигналы. Предложенный подход позволяет выразить первую гармонику, ее амплитуду $A_1(t)$, доплеровские частоту $\omega_D(t)$ и фазу $\varphi(t)$ всего через шесть первообразных вида:

$$J_{k,n}^{\pm}(\varphi_0) = \int^{\varphi_0} h_{k,n}^{\pm}(\varphi) S_e(\varphi) d\varphi,$$

где $\varphi_0 = \varphi(t)$ - приближенная доплеровская фаза, а $h_{k,n}^+(\varphi) = \cos \frac{k\varphi}{n}$ и $h_{k,n}^-(\varphi) = \sin \frac{k\varphi}{n}$, $k = n, n \pm 1$. Предложен способ определения из экспериментального сигнала Se оценки моментальной спектральной плотности мощности шума

$$D_\omega(\varphi) \approx \frac{[J_{n+1,n}^-]^2(\varphi) + [J_{n-1,n}^-]^2(\varphi) + [J_{n+1,n}^+]^2(\varphi) + [J_{n-1,n}^+]^2(\varphi)}{2\omega_D(\varphi)}$$

Тогда, среднеквадратичная погрешность доплеровской частоты выражается через первообразную

$$X(\varphi_0) = \int^{\varphi_0} D_\omega(\varphi) \omega_D(\varphi) d\varphi.$$

Выражение интегральных преобразований свертки через семь вычисляемых на каждой итерации функций (первообразных) позволяет существенно сократить время расчета. Рассмотрены примеры восстановления частоты экспериментальных сигналов как в предположении постоянства спектральной плотности шума, так и с вычислением ее моментального значения.

Часто экспериментальный доплеровский сигнал содержит несколько кратных доплеровских гармоник. Для вычисления доплеровской фазы в работе предложен способ совместного использования произвольного количества гармоник, которые рассматриваются в качестве независимых измерений доплеровского сигнала. Представлены примеры использования 3 гармоник экспериментального сигнала для вычисления частоты.

Во многих экспериментах регистрируется доплеровский сигнал, чья частота инструментально сдвинута (обычно вверх) на некоторую фиксированную величину. В работе предложен способ численного сдвига частоты зарегистрированного сигнала как вниз, так и вверх. На примерах восстановления доплеровской частоты экспериментального сигнала со сдвигом, как инструментальным, так и численным, рассмотрены особенности и преимущества метода.

Литература

1. N.B. Anikin Quadrature complement method for time-resolved signal frequency reconstruction // Rev. Sci. Instrum. 92, 075104 (2021).

APPLICATION OF THE QUADRATURE COMPLEMENT METHOD FOR TIME-RESOLVED SIGNAL FREQUENCY RECONSTRUCTION

N.B. Anikin

RFNC – VNIITF, Snezhinsk, Russia

Previously, in [1], an iterative quadrature complement method was proposed for reconstructing the instantaneous frequency of a Doppler signal, based on integral signal convolution transforms with kernels $F^{\parallel}(\varphi)$, $F^{\perp}(\varphi)$ of a special form, determined at the finite intervals of the approximate Doppler phase, $\varphi(t)$, that are multiples of the Doppler period. While reducing the noise, these transforms produce the approximate first Doppler harmonic, $S_1^{\parallel}(t)$, and its approximate quadrature complement, and make it possible to find a new

approximation of both Doppler signal frequency, $\omega_D(t)$, and phase, $\varphi(t)$, as well as the maximum rms frequency error, $\chi_{\omega}(t)$. Assuming a constant spectral density of random noise, D_{ω} , in the Doppler signal, the error, $\chi_{\omega}(t)$, was determined by the integral transform of the convolution of the Doppler frequency, $\omega_D(t)$, with the kernel, which depends on $D_{\omega} = const$ of the instantaneous amplitude, $A_1(t)$, of the Doppler harmonic, $S_1^{\parallel}(t)$, and the envelope F of kernels $F^{\parallel}(\varphi)$ and $F^{\perp}(\varphi)$.

The quadrature complement method proposed in the present paper has been significantly improved; the transforms with the kernels $F^{\parallel}(\varphi)$, $F^{\perp}(\varphi)$ have been replaced by a transform with a complex kernel $f(\varphi)$, which makes it possible to determine the complex Doppler harmonic, $s_1(t) = S_1^{\parallel}(t) + iS_1^{\perp}(t)$, in which $S_1^{\parallel}(t)$ and $iS_1^{\perp}(t)$ are exactly quadrature signals. The proposed approach allows expressing the first harmonic, its amplitude $A_1(t)$, the Doppler frequency $\omega_D(t)$ and phase $\varphi(t)$, in terms of just six antiderivatives in the form

$$J_{k,n}^{\pm}(\varphi_0) = \int^{\varphi_0} h_{k,n}^{\pm}(\varphi) S_e(\varphi) d\varphi,$$

where $\varphi_0 = \varphi(t)$ is the approximate Doppler phase, $h_{k,n}^+(\varphi) = \cos \frac{k\varphi}{n}$, $h_{k,n}^-(\varphi) = \sin \frac{k\varphi}{n}$, and $k = n, n \pm 1$. A method for determining the instantaneous spectral density of noise from an experimental signal, S_e , is proposed.

$$D_{\omega}(\varphi) \approx \frac{[J_{n+1,n}^-]^2(\varphi) + [J_{n-1,n}^-]^2(\varphi) + [J_{n+1,n}^+]^2(\varphi) + [J_{n-1,n}^+]^2(\varphi)}{2\omega_D(\varphi)}.$$

This implies that the rms error of the Doppler frequency is expressed in terms of the antiderivative

$$X(\varphi_0) = \int^{\varphi_0} D_{\omega}(\varphi) \omega_D(\varphi) d\varphi.$$

Expressing the integral transforms of the convolution in terms of seven functions (antiderivatives) calculated at each iteration can significantly reduce the calculation time. Examples of experimental signal frequency reconstruction are considered both under the assumption of a constant noise spectral density and with the calculation of its instantaneous value.

The experimental Doppler signal often contains several multiple Doppler harmonics. To calculate the Doppler phase, we propose a method for sharing an arbitrary number of harmonics, which are considered as independent measurements of the Doppler signal. Examples of using 3 harmonics of the experimental signal to calculate the frequency are provided.

A Doppler signal, whose frequency is instrumentally shifted (usually up) by some fixed amount, is recorded in many experiments. A method for numerically shifting the frequency of the recorded signal both down and up is proposed. The peculiar features and advantages of the method based on the examples of Doppler frequency reconstruction of an experimental signal with a shift, both instrumental and numerical, are considered.

References

1. N.B. Anikin. Quadrature complement method for time-resolved signal frequency reconstruction // Rev. Sci. Instrum. 92, 075104 (2021).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ВВ БЫСТРОЛЕТЯЩИМИ ТОНКИМИ ПЛАСТИНАМИ

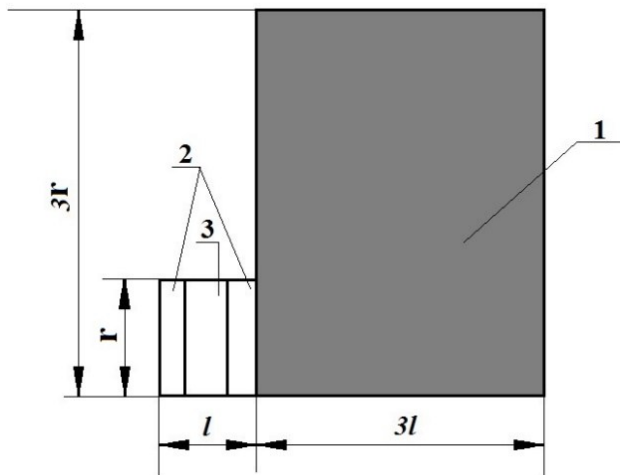
Е.И. Липенкова, А.А. Селезнев, М.В. Епифановский, А.В. Скляр

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В программном комплексе «Master Professional» [1] реализована методика численного моделирования процесса взаимодействия быстролетающей тонкой пластины с образцом ВВ. С использованием разработанной методики была проведена серия расчетов по определению параметров ударно-волнового нагружения образца гексанитростильбена (ГНС) тонкими пластинами различного типа: сплошной пластиной из однородного материала (лавсановая плёнка) и многослойной пластиной (фторопласт-полиимид-фторопласт) (рисунок 1).

Получены расчетные зависимости величины давления на фронте ударной волны (УВ) (рисунок 2) и значения массовой скорости за фронтом УВ в образце ГНС от скорости пластины.

Определены значения минимальной скорости полёта пластины и глубина её проникновения в образец ГНС, при которых происходит инициирование детонации образца ВВ. Рассчитаны параметры ударной волны в образце ГНС в условиях отсутствия инициирования детонации. Результаты расчетов показали, что давление на фронте ударной волны, распространяющейся по образцу ГНС, находится в интервале от 10 до 24 ГПа, когда скорость пластины находится в интервале от 2 до 4 км/с. Сопоставление результатов численного моделирования с результатами экспериментов позволило рассчитать для рассматриваемого образца ГНС численное значение критерия инициирования детонации $P^2\tau$.



1 – образец ГНС, 2 – фторопласт, 3 – полиимид

Рисунок 1. Схема двумерной расчетной модели для проведения расчетов в программе «Master Professional»

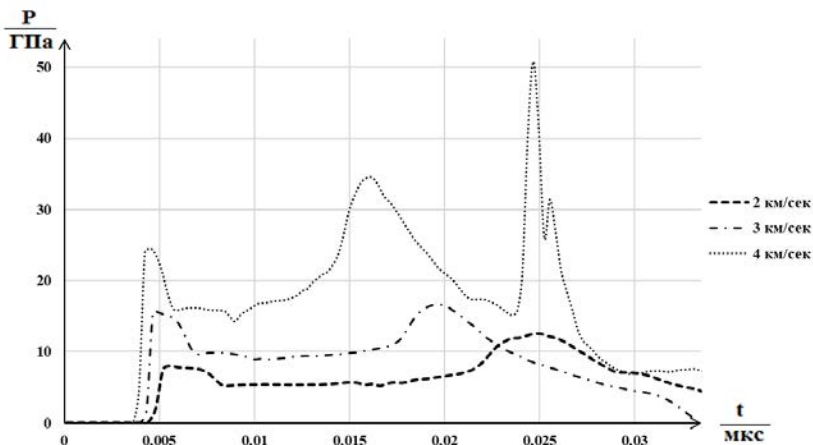


Рисунок 2. Зависимости давления от времени, полученной на датчике, расположенном в образце ГНС при нагружении его составной пластиной, имеющей различную начальную скорость

Литература

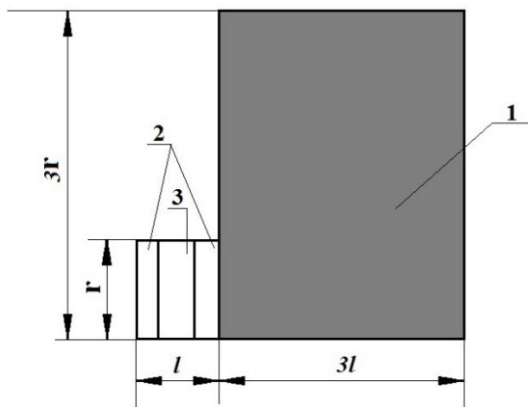
1. V.Rudenko, M.Chabourov, E.Tchekhounov. Virtual physics laboratory of the package MASTER. Proc. International Conference “Physics Teacher Education beyond 2000”, Barselona, 2000.

NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMICS OF SHOCKWAVE LOADING OF EXPLOSIVES BY HIGH VELOCITY THIN PLATES

E.I. Lipenkova, A.A. Selezenev, M.V. Epifanovskiy, A.V. Sklyarov

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

Using “Master Professional” computer code [1], the technique of numerical simulation of interaction process of the fast-flying thin plate with high explosive (HE) sample has been developed. Using the developed technique, the series of calculations were carried out to determine the shock wave parameters at loading of the Hexanitrostilbene (HNS) sample. The thin plates of different types were considered: the single-layer plate from homogeneous material (the mylar film) and the multilayer plate (teflon-polyimide-teflon) (figure 1).



1 – HNS sample, 2 – teflon, 3 – polyimide

Figure 1. The scheme of two-dimensional model for carrying out calculations using “Master Professional” code

The calculated dependences of the pressure at the front of the shock wave (SW) (figure 2) and values of the particle velocity behind of the SW front in the HNS sample as a function of the plate velocity have been obtained.

The values of minimum velocity of plate flight and depth of its penetration into HNS sample, at which initiation of detonation of HE sample takes place, have been determined. Parameters of the shock wave in HNS sample at the conditions of failure of detonation initiation were calculated. The calculation results showed that pressure at the front of the shock wave extending on sample HNS is in the range from 10 up to 24 GPa when the velocity of the plate is in the range from 2 up to 4 km/s. The comparison of the numerical modeling results to the experimental results allowed to calculate value of the detonation initiation criterion ($P^2\tau$) for the considered sample of HNS explosive.

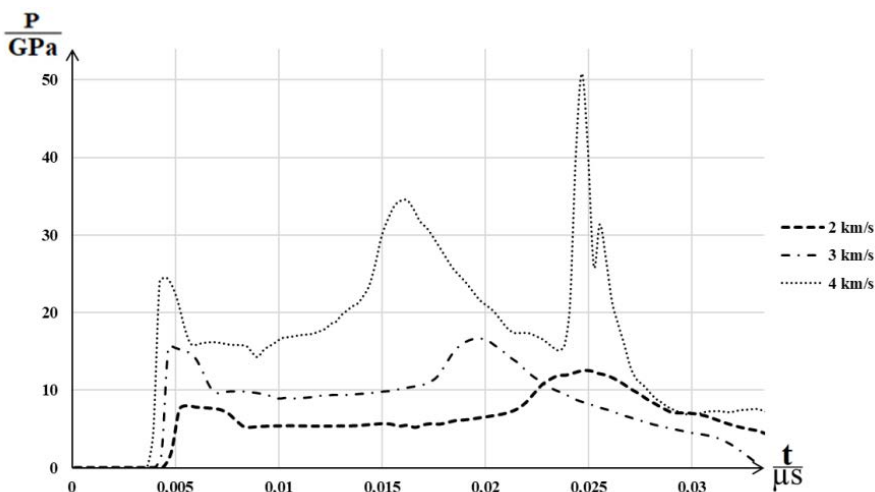


Figure 2. The dependences of pressure on time are obtained on the sensor located in the HNS sample at different initial velocity of the multilayer plate

References

1. V. Rudenko, M. Chabourov, E. Tchekhounov. Virtual physics laboratory of the package MASTER. Proc. International Conference "Physics Teacher Education beyond 2000", Barselona, 2000.

**ИСТОЧНИК ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ**

И.А. Журавлев, И.В. Пензин, О.А. Никитин, С.Д. Хренков, А.Р. Ахметов

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

Для получения необходимой и максимально полной информации об исследуемом объекте при проведении ГДИ необходим принципиально новый источник тормозного излучения, нацеленный на получение пучка с субмиллиметровым фокусным размером на мишени.

В настоящее время в РФЯЦ ВНИИТФ совместно с ИЯФ СО РАН ведутся работы по разработке и настройке мощного линейного ускорителя электронов с энергией несколько десятков МэВ и током до двух килоампер.

В представленной статье описаны работы поэтапного монтажа и настройки ускорителя. Представлены рентгенограммы тест-объектов выполненные с постепенным увеличением параметров тока и энергии ускорителя. Описаны мероприятия направленных на получения проектных характеристик ускорителя и выводу на мишень сильноточного высокоэнергичного электронного пучка с минимальным поперечным размером.

В ходе проведения этих работ были выполнены рентгенографические снимки тест-объектов. Представлены результаты отработки различных режимов ускорителя.

**СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ФОКУСНОГО ПЯТНА ЛИНЕЙНОГО
ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ В НАПРАВЛЕНИИ ОБРАТНОМ
ДВИЖЕНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ**

*П.А. Колесников¹, В.Ю. Политов¹, С.А. Колесников¹, А.Р. Ахметов¹,
А.В. Каплунов¹, В.Ю. Эверт¹, О.А. Черница¹, О.А. Никитин¹, Ю.А. Трунев²,
Д.И. Скворodin², М.Г. Атлуханов², А.В. Бурдаков²,
В.В. Данилов², В.В. Куркучев², С.С. Попов², К.И. Живанков²*

¹РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

²ИЯФ СО РАН им. академика Г.И. Будкера, г. Новосибирск, Россия

В РФЯЦ-ВНИИТФ введена в эксплуатацию установка на базе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) для исследования динамически развивающихся объектов за счет взрывного нагружения по методу импульсной рентгенографии. Одним из основных преимуществ ЛИУ является высококачественный электронный пучок и малый размер фокусного пятна. Для настройки ускорителя необходимо создание комплекса быстродействующих и эффективных диагностик.

Разработана система диагностики ЛИУ, контролирующая размер фокусного пятна в обратном направлении движению электронов. При этом контроль

осуществляется в каждом пуске независимо от наличия тест-объектов на оси рентгенографирования.

Представлена разработанная система диагностики фокусного пятна в обратном направлении, принцип ее работы. Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований по определению фокусного пятна ЛИУ с использованием системы диагностики методом «полутени от резкого края».

THE PINHOLE DIAGNOSTIC SYSTEM OF LINEAR INDUCTION ACCELERATOR IN A DIRECTION OPPOSITE TO THE BEAM MOTION

*P.A. Kolesnikov¹, V.Yu. Politov¹, S.A. Kolesnikov¹, A.R. Akhmetov¹,
A.V. Kaplunov¹, V.Yu. Evert¹, O.A. Chernitsa¹, O.A. Nikitin¹, Yu.A. Trunev²,
D.I. Skovorodin², M.G. Atlukhanov², A.V. Burdakov²,
V.V. Danilov², V.V. Kurkuchekov², S.S. Popov², K.I. Zhivankov²*

¹RFNC – VNIITF, Snezhinsk, Russia

²BINP, the SB of the RAS, Novosibirsk, Russia

RFNC – VNIITF has put into operation a facility based on linear-induction accelerator (LIA) to study dynamically evolving objects through explosive loading using flash radiography technique. One of the main LIA advantages is a high-quality electron beam and a small-sized focal spot. A variety of responsive and efficient diagnostic tools is required to adjust the accelerator.

A system to diagnose the LIA is developed which allows sizing the focal spot size in the backward direction as to the direction of electron motion. At that, this is done in each run regardless the presence of test objects on the X-ray radiography axis.

The system developed to diagnose the focal spot in the backward direction is depicted, and its operation principle is described. The computational and experimental results are presented on determining the LIA focal spot through “half-shadow from sharp edge” diagnostic technique.

ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ СТАНЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

*Д.В. Сысков, В.Ю. Эворт, Д.Н. Шепелев, П.А. Колесников,
А.П. Клевцов, Г.В. Ставрицкий*

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ ведется разработка новых перспективных систем регистрации. Для регистрации рентгеновских изображений разработана мозаичная скинтилляционная электронная система – детектирующая станция. Традиционная система регистрации на основе фотолюминесцентных экранов с запоминанием позволяет зарегистрировать только один кадр теневого рентгеновского изображения. Такая система обладает динамическим диапазоном $\sim 10^4$ отн.ед. и низкой чувствительностью.

Многокадровая система регистрации на базе электронно-оптических регистраторов позволяет зарегистрировать до двух кадров теневых рентгеновских изображений на один регистратор. Такая система обладает низким динамическим диапазоном $\sim 10^3$ отн.ед. (из-за способа оптического переноса света и технических характеристик).

Детектирующая станция основана на волоконно-оптическом переносе света, позволяет зарегистрировать более двух кадров рентгенографических изображений. Такой детектор обладает высоким динамическим диапазоном $\sim 10^7$ отн.ед. и высокой чувствительностью 200 гамма-квантов на единичный элемент. Детектирующая станция разработана и введена в эксплуатацию совместно специалистами ИЯФ СО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ.

Целью данного доклада является описание способа съема сцинтилляционного света с кристаллов на примере одного канала регистрации, описание схемы построения детектирующей станции. В докладе приведены первые результаты регистрации на детектирующую станцию, и сравнение с результатами регистрации на традиционную систему регистрации.

DETECTING STATION IN THE RECORDING SYSTEM OF LINEAR-INDUCTION ACCELERATOR

*D.V. Syskov, V.Yu. Evert, D.N. Shepelev, P.A. Kolesnikov,
A.P. Klevtsov, G.V. Stavrietskii*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

Currently, RFNC – VNIITF is developing new advanced recording systems. A mosaic scintillation electronic system, i.e. a detecting station, has been created for X-radiography. A conventional recording system based on storage photoluminescent screens allows recording only one frame of a shadow X-ray image. Such system has a dynamic range of $\sim 10^4$ rel. units and low sensitivity.

A multi-frame recording system based on electron-optical recorders enables recording up to two frames of a shadow X-ray image per one recorder. Such system has a low dynamic range of $\sim 10^3$ rel. units (due to both optical light transport mode and technical characteristics).

The detecting station based on fiber-optical light transport allows recording more than two frames of X-ray images. Such detector has a high dynamic range of $\sim 10^7$ rel. units and high sensitivity of 200 gamma quanta per a single element. The detecting station has been developed and put into operation jointly by the specialists from Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science and RFNC – VNIITF.

The report is aimed at describing the mode of scintillation light capture from crystals using a single recording channel as an example, and presenting the block schematic diagram of the detecting station. The report gives the first recording outcomes using the detecting station, and compares with the recording outcomes using the conventional recording system.

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР ГАММА-ИМПУЛЬСОВ НА БАЗЕ БЕТАТРОНА ТИПА БИМ

*К.В. Савченко, Ю.П. Куропаткин, В.И. Нижегородцев,
В.Д. Селемир, В.А. Фомичёв, А.А. Чинин, О.А. Шамро*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Описан модернизированный генератор гамма-импульсов, представляющий собой циклический ускоритель на базе безжелезного импульсного бетатрона с системой сброса ускоренных электронов на танталовую мишень. Генератор предназначен для радиографирования динамических объектов с большими оптическими толщинами и позволяет получать до трех гамма-импульсов за один цикл ускорения. Приведено описание ускорителя и результаты его тестовых включений в 2021 году. Оцененная граничная энергия электронного пучка составила 70 МэВ. Толщина просвеченного свинцового тест-объекта на расстоянии 4 м от танталовой мишени – 165 мм, длительность гамма-импульса на полувысоте в одноимпульсном режиме – 100 нс, в трехимпульсном режиме – 150 нс. Размеры источника излучения – (2×4) мм. Применение таких генераторов в составе рентгенографического комплекса* позволит повысить эффективность газодинамических исследований за счет улучшения его выходных характеристик и оптимизации геометрии опытов.

Литература

1. Пат. 2548585 С1 RU МПК G03В 42/02. «Мобильный радиографический комплекс и источник излучения бетатронного типа для радиографического комплекса». Д.И. Зенков, Ю.П. Куропаткин, В.И. Нижегородцев, В.Д. Селемир, О.А. Шамро, БИ. 2015, №11.

UPGRADED GAMMA-RADIATION GENERATOR BASED ON IRONLESS PULSED BETATRON

*K.V. Savchenko, A.A. Chinin, V.A. Fomichev, Yu.P. Kuropatkin,
V.I. Nizhegorodtsev, I.N. Romanov, V.D. Selemir, O.A. Shamro, E.V. Urlin*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The paper concerns an upgraded gamma-radiation generator which is a cyclic electron accelerator based on the ironless pulsed betatron with a dump of the accelerated electrons onto the tantalum target. The generator is designed for the radiography of dynamic objects with the large optical thickness and enables up to three gamma-pulses to be obtained in one acceleration cycle. The description of the accelerator and results of its testing powering in 2021 are provided. The estimated boundary energy of the electron beam is equal to 70 MeV. The thickness of the lead test object examined with gamma-rays is 160 mm at 4 m from the tantalum target. The full width of the output γ -pulse at half maximum in a single pulse mode is equal to 100 ns, the same width in a three pulse mode is equal to 150 ns. The dimension of the radiation source is 2×4 mm. The application of these generators within the radiographic complex* will improve the hydrodynamic investigation efficiency by increasing the complex output parameters and optimizing the experiments geometry.

References

1. Pat. 2548585 C1 RU МПК G03B 42/02. D.I. Zenkov, Yu.P. Kuropatkin, V.I. Nizhegorodtsev, V.D. Selemir, O.A. Shamro. «Mobile radiographic complex and radiation source of betatron type for radiographic complex». Bulletin of Inventions, vol. 11, 2015 (in Russian).

**ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ КАМЕРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
ИЗОБРАЖЕНИЙ В НАНОСЕКУНДНОЙ ОБЛАСТИ ВРЕМЕНИ
С ЛИНЕЙНЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ
СВЕТ/СИГНАЛ БОЛЕЕ 1000**

М.И. Крутик

ООО «Научно-Производственное Предприятие НАНОСКАН», г. Москва, Россия

В Научно-Производственном Предприятии НАНОСКАН завершена разработка и проведена пробная эксплуатация затворной электронно-оптической камеры (ЭОК) нового поколения НАНОГЕЙТ-38. Основное назначение – детальное, прецизионное исследование пространственно-временных и энергетических характеристик быстротекающих процессов в нано - и микросекундной области времени.

ЭОК обладает возможностью регистрировать изображение с длительностью экспозиции от 60 нс до 1 000 мкс, в котором присутствуют как области с предельно малыми уровнями энергетической экспозиции, так и уровнями в тысячу раз большими. Нелинейность преобразования *Свет-Сигнал* в динамическом диапазоне 1:1000 составляет не более 1%.

ЭОК могут объединяться в многокамерные комплексы, управляемые от одного компьютера, для получения серии изображений быстротекающего процесса.

В структуру ЭОК входит:

- бипланарный (диодный) электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с рабочим диаметром фотокатода 25 мм;
- малогабаритный высоковольтный (6... 9 кВ) формирователь, импульс с выхода которого подается между фотокатодом и экраном ЭОП. Длительность включения (длительность экспозиции) ЭОП определяется длительностью высоковольтного импульса;
- цифровая малозумящая система считывания (ЦСС) и передачи в компьютер зарегистрированного изображения с экрана ЭОП.
- проекционный объектив с масштабом переноса 1:1 и угловой апертурой 18°, который переносит изображение с экрана ЭОП на ЦСС.
- интерфейс связи ЭОК с управляющим компьютером.

Изображение с экрана ЭОП через проекционный объектив передается с масштабом 1:1 на крупноформатный сенсор sCMOS ЦСС.

- Размер сенсора 22,5×22,5 мм;
- Число пикселей 2048×2048;
- Размер пикселя 11×11 мкм;
- Полный заряд пикселя 91 000 e^- .
- Шум чтения 1,5 e^- .

Для стабилизации параметров сенсор термостабилизирован при температуре +5°C.

На измерительных стендах НПП НАНОСКАН определяются основные параметры НАНОГЕЙТ-38: функция темнового тока и передаточная характеристика.

Высокое качество получаемых изображений обеспечивается не только аппаратными, но и программными средствами. В ходе предобработки используются результаты калибровки сенсора, что позволяет получить изображения высокого качества.

В НПП НАНОСКАН разработаны специальные программы

1. **Cerntrum** - для компенсации неоднородности экспозиционного поля ЭОК.

2. **Iso_Line_v1.0** - для линеаризации передаточной характеристики ЭОК.

Созданная ЭОК обладает уникальной совокупностью параметров:

– Чувствительность: одноквантовая, в том смысле, что каждый выбитый из фотокатода ЭОП фотоэлектрон обязательно примет участие в формировании конечного изображения.

– Динамический диапазон: не менее 1000.

– Нелинейность передаточной характеристики: не более 1 %.

– Пространственное разрешение по 5 %-ному критерию контраста стандарта Государственного Оптического Института РФ: не менее 980 линий на горизонтальный (вертикальный) габарит изображения.

Сенсор ЦСС чрезвычайно чувствителен к электромагнитным помехам любого типа, поэтому применена многоуровневая экранировка всех электронных блоков камеры с бесконтурной схемой заземления. Кроме того, высоковольтная и аналого-цифровая части ЭОК гальванически развязаны.

Объединение в одном корпусе камеры бипланарного электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 25 мм без микроанальной пластины (МКП), малогабаритного высоковольтного (6... 9 кВ) формирователя затворного импульса ЭОП и цифровой малошумящей системы считывания изображения с экрана ЭОП, позволило создать серийную ЭОК, которая на сегодняшний день не имеет аналогов в мире. Ни российские, ни зарубежные фирмы, выпускающие затворные ЭОК указанного временного диапазона, не имеют в своей номенклатуре подобных камер.

В докладе приведены результаты применения камеры НАНОГЕЙТ-38 в составе протонографического комплекса Института Физики Высоких Энергий, г. Протвино, Московская область

ПОДАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ШУМА МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

М.С. Семин

ООО «ВИДЕОСКАН», г. Москва, Россия

Рассмотрены возможности применения RTNS (RealTimeNoiseSuppression) технологии в регистраторах на базе CMOS и CCD видеокамер при решении задач выявления малоконтрастных объектов.

Приводится функциональное решение RTNS технологии, включающее аппаратную и программную части.

Аппаратная часть решает задачу периодического плоскопараллельного сканирования проекции изображения сцены по полю матрицы.

Задачей программной части является построение RTNS изображения сцены путем обработки регистрируемых значений яркостей пикселей в фазах сканирования.

Приводятся результаты исследования макетного образца RTNS/CMOS камеры.

Применение RTNS технологии при регистрации стационарных и квазистационарных изображений принципиально снимает ограничения на возможность выявления в них малоконтрастных объектов, обусловленное различием свет/сигнальных характеристик светочувствительных областей поля фотоприемника, что позволяет приблизиться к теоретическому значению СКО шума регистрируемого видео сигнала.

SPATIAL NOISE SUPPRESSION OF MATRIX PHOTODETECTORS

M.S. Semin

“Videoscan”, LTD, Moscow, Russia

The possibilities of using RTNS (RealTimeNoiseSuppression) technology in recorders based on CMOS and CCD video cameras in solving problems of detecting low-contrast objects are considered.

It contains a functional decision of RTNS technology, including hardware and software parts.

Hardware part solves the problem of periodic plane-parallel scanning of image scene projection on the matrix field.

The task of software part is to build RTNS scene image by processing of recorded values pixel brightness values in scanning phases.

It presents the research results of the of RTNS/CMOS camcorders model sample.

The use of RTNS technology in the registration of stationary and quasi-stationary images fundamentally removes restrictions on the possibility of detecting low-contrast objects in them, due to the difference in the light/signal characteristics of the photosensitive areas of the photodetector field, which makes it possible to approach the theoretical value of the noise level of the recorded video signal.

ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРТЕЛЯ

*И.В. Пензин, Д.В. Петров, О.А. Никитин, А.Р. Ахметов, С.Д. Хренков,
Р.В. Протас, Е.И. Чухаев, К.С. Волосенко, Д.Н. Шепелев*

РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

В работе рассмотрена концепция фотонейтронного источника на базе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ), созданного ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ для проведения рентгенографических экспериментов. Возможность реализации на базе ЛИУ мощного фотонейтронного источника обусловлена параметрами формируемого ускорителем электронного пучка, а именно током пучка и его энергией. Импульсная мощность ускорителя достигает 40 ГВт, что позволяет создать фотонейтронный источник с уникальными характеристиками.

В работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по генерации потоков фотонейтронов на линейном индукционном ускорителе. Рассмотрены различные типы и материалы фотонейтронных мишеней.

PHOTONEUTRON SOURCE BASED ON LINEAR INDUCTION ACCELERATOR

*I.V. Penzin, D.V. Petrov, O.A. Nikitin, A.R. Akhmetov, S.D. Khrenkov,
R.V. Protas, E.I. Chukhaev, K.S. Volosenko, D.N. Shepelev*

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russian

The work addresses the concept of photoneutron source based on the linear induction accelerator (LIA) that has been developed by BINP SB RAS jointly with RFNC-VNIITF to perform X-ray experiments. The possibility of implementing the LIA-based powerful photoneutron source is determined by the parameters of an electron beam formed by the accelerator, i.e. beam current and beam energy. The pulsed power of accelerator reaches 40 GW, that allows generating a photoneutron source with unique characteristics.

The work presents the results of numerical and experimental studies on generation of photoneutron flows at the linear induction accelerator. The different types and materials of photoneutron targets are described.

РАДИОГРАФИЯ НЕЙТРОННЫМИ ПОТОКАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ ПРОТОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ

Ю.Б. Базаров, М.А. Карпов, В.В. Мармышев, С.В. Белов, А.А. Демидов, А.А. Христенко

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Рассмотрен новый метод визуализации с высоким пространственным разрешением низкоплотных объектов за высокоплотными преградами: импульсная радиография высокопоточными нейтронными пучками, генерирующимися в мишенях-конвертерах из вольфрама при их облучении протонными пучками высоких энергий. Получены радиографические изображения боро- и углеродосодержащих объектов, в том числе животного происхождения с разрешающей способностью ~ 200 мкм, находящихся за свинцовой преградой толщиной 40 см.

В настоящее время для исследования внутренней структуры различных объектов, а также в области неразрушающего контроля широко используется метод рентгеновской и гамма радиографии [1], также в последние годы развивается метод протонной [2] и синхротронной [3] радиографии. Эти методы используют для получения изображений высокоэнергетические протоны, или гамма-кванты. Вероятность поглощения гамма-кванта веществом зависит от его энергии и плотности вещества, а для настройки глубины Брэгговского пика энергией протонного пучка требуется иметь априорную информацию о плотности и составе исследуемой композиции, что не всегда возможно. Наличие дополнительного фона от

Комптоновского рассеяния в материале и вторичное излучение при этом вносит дополнительный паразитный фон в изображение, ухудшая разрешающую способность и отношение сигнал-шум. Для задач распознавания объектов, состоящих из легких элементов, в том числе органического происхождения, большими перспективами обладает нейтронная радиография [4], позволяющая визуализировать малоплотные объекты, расположенные за высокоплотными преградами. Проведенные нами эксперименты по разработке импульсного нейтронного источника на основе вольфрамовой мишени, облучаемой высокоэнергетическими протонами, позволили получить высококачественные нейтронные изображения объектов, расположенных за свинцовой преградой толщиной 40 см между объектами и источником нейтронов (рисунок 1).

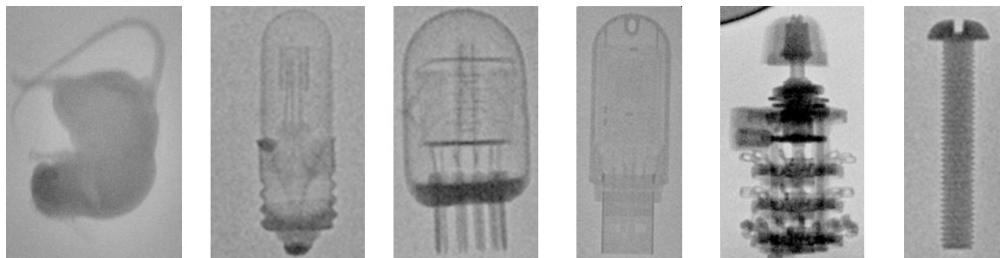


Рисунок 1. Изображения некоторых объектов в нейтронном пучке: лабораторная мышь (*Mus albus officinarum*), галогеновая лампа, вакуумная радиолампа, флеш-диск, реле, латунный винт

Литература

1. Alexander Rack, Margie Olbinado, Mario Scheel et al // Real-Time Hard X-ray Imaging // Springer Link Publishing AG, 2018.
2. Бурцев В.В., Лебедев А.И., Михайлов А.Л. и др. Многокадровая протонография на базе ускорителя У-70 как метод исследования быстропотекающих гидродинамических процессов. // В сб.: 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии, вып. 2, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011 г., стр. 205–225.
3. К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, А.О. Кашкаров и др. Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами синхротронного излучения // ФГВ. 2018, №5, с.103-111.
4. Neutron Imaging: a non-destructive tool for materials testing. IAEA-TecDoc-1604 (2008).

RADIOGRAPHY BY NEUTRON FLUXES GENERATED FROM HIGH ENERGY PROTONS DURING NEUTRON EXPOSURE OF TUNGSTEN TARGET

YU.B. Bazarov, M.A. Karpov, V.V. Marmyshev, S.V. Belov, A.A. Demidov, A.A. Khristenko

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

A new method of visualization with high spatial resolution of various small-sized low-density objects against the background of thick high-density obstacles is considered: pulsed neutron radiography by high-flux neutron beams generated in heavy converter targets when they are irradiated with high-energy proton beams. Neutron radiographic images of boron- and carbon-containing objects, including of animal origin, with a resolution of ~200 μm , located behind a 40-cm-thick lead barrier, were obtained.

ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕНИЯ

*М.В. Антипов¹, А.Б. Георгиевская¹, В.А. Огородников¹, А.Л. Михайлов¹,
И.А. Спирин¹, Д.А. Калаишиков¹, А.А. Утенков¹, И.В. Юртов¹, О.Б. Согрина¹,
А.В. Федосеев¹, К.А. Тен², Э.Р. Прууэл², А.О. Кашкаров², И.А. Рубцов²*

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Представлены постановки и результаты экспериментов по исследованию процесса ударно-индуцированного пыления с использованием синхротронного излучения (СИ) из вигглера, установленного на ускорителе заряженных частиц ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск). По сравнению с традиционными источниками рентгеновского излучения, возникающего при торможении ускоренных электрическим полем электронов на аноде, СИ имеет более высокую интенсивность потока, стабильность и когерентность, малую угловую расходимость и время экспозиции, а также высокую периодичность повторения, что позволяет проводить рентгеновскую хронографию взрывных процессов, высокого пространственного и временного разрешения. В отличие от протонографии, СИ с мягким рентгеновским спектром позволяет регистрировать низкоплотные объекты, например, ударно-индуцированные пылевые потоки.

Исследования проводили с использованием оловянных образцов, нагружавшихся одной или двумя последовательными ударными волнами с давлением ~40 ГПа. Токарным способом задавали различные шероховатости образцов: Rz 5, 20 и 60 мкм. В опытах перед свободной поверхностью создавали вакуум или газовую среду (воздух, гелий, азот) с давлениями от 1 до 8 атм. В опытах также проводили измерения с помощью пьезодатчиков и лазер-гетеродин интерферометрического метода.

Использование СИ в этих опытах позволило получить недоступные для других методов данные о зарождении и развитии ударно-индуцируемых пылевых потоков при различных режимах ударно-волнового нагружения, при движении потоков в различных средах.

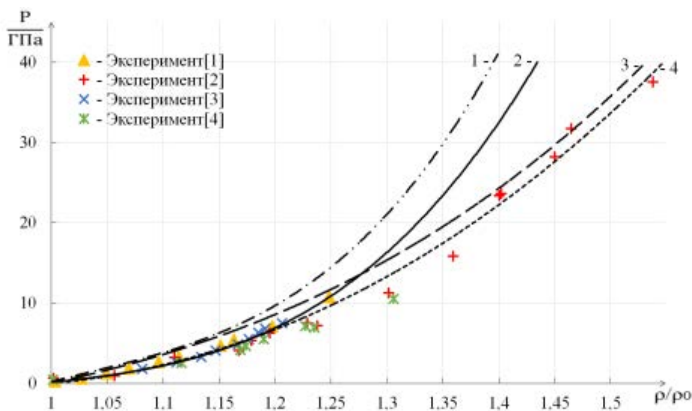
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ МД-МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В.Ю. Королев, Е.В. Гусарова, А.А. Селезнев, В.Б. Титова

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В работе представлены результаты определения параметров УРС и адиабат Гюгонио для большой номенклатуры молекулярных кристаллов энергетических материалов. Параметры УРС и адиабат Гюгонио были получены методами классической и квантовой молекулярной динамики. Проведена верификация и установлены пределы применимости существующих открытых параметризаций межмолекулярного силового поля (ReaxFF) для описания ударно-волновых свойств молекулярных кристаллов энергетических материалов.

На основе методов квантовой молекулярной динамики рассчитаны изотермы сжатия молекулярных кристаллов HMX и RDX. Результаты проведённых расчётов показали преимущества методов *ab-initio* перед методом ReaxFF для моделирования свойств молекулярных кристаллов при давлениях выше 20 ГПа. В частности, в представляемой работе при помощи *ab-initio* МД моделирования проведён расчёт изотерм сжатия монокристалла β -HMX (при температуре 10 и 300 К) в интервале давления от 0 до 40 ГПа и монокристалла RDX (при температуре $T = 300$ К) также в интервале давления от 0 до 40 ГПа. В представляемой работе показано, что изотермы сжатия монокристаллов β -HMX и RDX, рассчитанные разными методами, совпадают до давления 12 - 15 ГПа. С увеличением давления расчёты на основе силового поля ReaxFF-Ig завышают величины давления по сравнению с экспериментальными значениями и результатами расчетов на основе квантовой молекулярной динамики. Результаты расчётов представлены на рисунке 1.



1 – MD-расчёт при $T = 10$ К; 2 – MD-расчёт при $T = 300$ К; 3 – DFTMD-расчёт при $T = 10$ К;
4 – DFTMD-расчёт при $T = 300$ К;

Рисунок 1. Зависимость давления изотермического сжатия монокристалла β -HMX от величины степени сжатия

Литература

1. Sewell T.D., Menikoff R., Bedrov D., Smith G.D. A molecular dynamics simulation study of elastic properties of HMX // Journal Of Chemical Physics. 2003. - P. 7417-7426.
2. Yoo C.S., Cynn H., Howard W.M., Holmes N. Eleventh International Detonation Symposium // Equations of state of unreacted high explosives at high pressures. Colorado. 1998. - P. 95 1- 957.
3. Olinger B. W. R. B., Cady H. H. // Symposium international Sur Le Comportement Des Milieux Denses Sous Hautes Pressions Dynamiques; Commissariat a l'Energie Atomique Centre d'Etudes de Vajours: Paris, France. 1978. – P. 3.
4. Yoo C.-S., Cynn H. // J. Chem. Phys. 1999. - V. 111. - P. 10229.

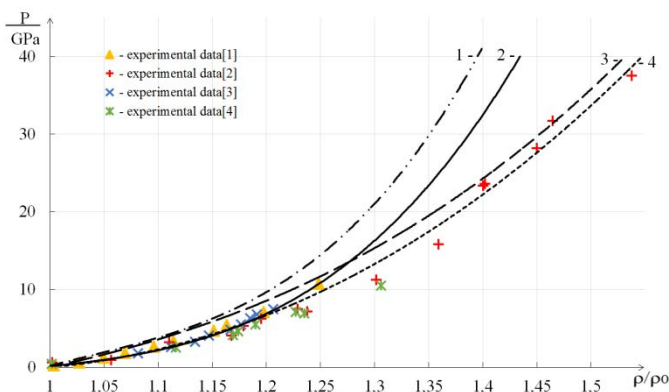
DETERMINATION OF ISOTHERMAL COMPRESSION CHARACTERISTICS OF ENERGETIC MATERIALS MOLECULAR CRYSTALS BY THE METHODS OF MD-MODELING

V. Yu. Korolev, E. V. Gusarova, A. A. Seleznev, V. B. Titova

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The report presents the results of determination of the equation of state (EOS) parameters and Hugoniot for a large list of energetic materials molecular crystals. The EOS and Hugoniot parameters have been obtained using classical and quantum molecular dynamics. Verification of the intermolecular force field (ReaxFF) was carried out. The limits of applicability of the existing open parametrizations of the intermolecular force field (ReaxFF) for description of shockwave properties of the energetic materials molecular crystals have been determined.

The compression isotherms of HMX and RDX molecular crystals were calculated using methods of quantum molecular dynamics. The results of the carried-out calculations showed advantages of the *ab-initio* methods compared to the ReaxFF method when properties of molecular crystals are calculated with pressure over 20 GPa. In particular, calculations of β -HMX isotherms at the temperature 10 and 300 K in the range of pressure from 0 to 40 GPa and RDX isotherms (at $T = 300$ K) in the range of pressure from 0 to 40 GPa have been carried out using *ab-initio* MD methods. The work shows that isotherms of β -HMX and RDX monocrystals calculated by different methods match up to the pressure of 12 - 15 GPa. When pressure increases the ReaxFF-Ig force field-based calculations overestimate pressure in comparison with experimental data and calculation results which were obtained using quantum molecular dynamics. The obtained calculation results are presented in figure 1.



1 - MD calculation at $T = 10$ K; 2 - MD calculation at $T = 300$ K; 3 - DFTMD calculation at $T = 10$ K; 4 - DFTMD calculation at $T = 300$ K; markers - experimental data

Figure 1. Dependence of isothermal compression pressure of β -HMX molecular crystal on compression degree

References

1. Sewell T.D., Menikoff R., Bedrov D., Smith G.D. A molecular dynamics simulation study of elastic properties of HMX // Journal Of Chemical Physics. 2003. - P. 7417-7426.
2. Yoo C.S., Cynn H., Howard W.M., Holmes N. Eleventh International Detonation Symposium // Equations of state of unreacted high explosives at high pressures. Colorado. 1998. - P. 95 1- 957.
3. Olinger B. W. R. B., Cady H. H. // Symposium international Sur Le Comportement Des Milieus Denses Sous Hautes Pressions Dynamiques; Commissariat a l'Energie Atomique Centre d'Etudes de Vajours: Paris, France. 1978. – P. 3.
4. Yoo C.-S., Cynn H. // J. Chem. Phys. 1999. - V. 111. - P. 10229.

**РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ КНЯЗЕВА ДЛЯ КИНЕТИКИ ГОРЕНИЯ ВВ
МОНОТОННЫМ МЕТОДОМ ДРОБНЫХ ЧАСТИЦ
НА НЕПОДВИЖНЫХ СЕТКАХ**

И.Е. Чередниченко, Ю.В. Янилкин, В.А. Шмелёв, В.Н. Князев

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Модель Князева «ОЧАГ» рассматривает процесс взрывчатого превращения и его переход в детонационный режим с учётом времени индукции и возможной смены типа реакции разложения. Данная модель предполагает хранение используемых в ней величин для каждой ячейки. При её моделировании на неподвижных сетках возникает проблема корректного переноса кинетических величин из ячейки в ячейку.

Для решения этой проблемы в методике ЭГАК [1] было решено использовать монотонный метод дробных частиц [2], основанный на лагранжевом представлении частиц. В работе [3] метод был применён для аппроксимации уравнений кинетики МК [4]. Для модели Князева использовался аналогичный подход.

В данной работе описывается реализация модели «ОЧАГ» в лагранжево-эйлеровой методике ЭГАК. Приведены результаты расчётов в сравнении с экспериментальными данными.

Литература

1. Дарова Н.С., Дибиров О.А., Жарова Г.В., Шанин А.А., Янилкин Ю.В. Комплекс программ ЭГАК. Лагранжево-эйлерова методика расчёта двумерных газодинамических течений многокомпонентной среды. // ВАНТ, сер. ММФП. 1994. Вып. 2. С. 51-58.
2. Янилкин Ю.В., Шмелёв В.А., Колобянин В.Ю., Беляев С.П. Монотонный метод частиц для моделирования двумерных газодинамических течений // ВАНТ, сер. ММФП, вып. 3, 2012.
3. Янилкин Ю.В., Захарова Ю.Ф., Генрих В.А. Реализация кинетики Морозова-Карпенко на основе монотонного метода частиц. Сб. Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем. Пенза, 2014, 217-221.
4. Морозов В.Г., Карпенко И.И., Куратов С.Е., Соколов С.С., Шамраев Л.В., Дмитриева Л.В. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТЬ. // Химическая физика, т.14, №2-3, 1995.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ МК ДЛЯ КИНЕТИКИ ГОРЕНИЯ ВВ В МЕТОДИКЕ ЭГАК

С.С. Львова, Ю.Д. Чернышев, В.Б. Титова

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Кинетика МК [1] нашла довольно широкое применение в численных исследованиях процессов, связанных с горением взрывчатых веществ. При этом, как правило, она используется в лагранжевых расчетах, в которых масса вещества в ячейках не меняется, а меняться может только его состояние. Касательно кинетики выгорания ВВ это означает, что в таких ячейках может происходить лишь выделение энергии в соответствии с его калорийностью. Однако при проведении расчетов в эйлеровых переменных имеются существенные проблемы при программной реализации кинетик, в том числе и кинетики МК.

Первая проблема связана с тем, что на неподвижных сетках массы ячеек и их состав могут меняться за счет потоков через стороны ячеек. Для нивелирования этой проблемы в настоящей работе используется кинетика МК в полностью дифференциальной форме (отметим, что обычно при реализации этой кинетики уравнение рождения очагов на первой волне интегрируется вдоль прямой Рэлея-Михельсона).

Вторая проблема связана с тем, что для кинетики требуется очень мелкая сетка масштаба долей миллиметра при размерах моделируемых систем порядка нескольких десятков сантиметров. В эйлеровых расчетах при использовании однородной сетки во всей счетной области это становится трудно преодолимой преградой. Выход из этой ситуации заключается в использовании неоднородной сетки, что достигается путем использования адаптивно-встраиваемойся дробной сетки в окрестности некоторых особенностей течения.

В докладе дано описание программной реализации кинетики и приводятся результаты расчетов нескольких тестовых задач.

Литература

1. Морозов В.Г., Карпенко И.И., Куратов С.Е., Соколов С.С., Шамраев Л.В., Дмитриева Л.В. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТЬ. //Химическая физика, т.14, #2-3, 1995.

РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУМЕРНОЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ НИК В МЕТОДИКЕ ЭГАК

Ю.В. Третьяченко, В.И. Козлов, Ю.В. Янцкин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Для учета турбулентного перемешивания в газодинамических расчетах В.В. Никифоровым была разработана полуэмпирическая модель [1,2], учитывающая анизотропию турбулентных вихрей. Позднее В.И. Козловым была предложена модификация этой модели (модель НИК) [3], которая позволила повысить точность

описания турбулентных течений и обеспечить сходимость разностного решения модельных уравнений при наличии ударных волн.

За прошедшее время накоплен значительный опыт практического использования модели НИК и в нее введен ряд уточнений. В настоящей работе приводятся основные уравнения унифицированной версии модели НИК со всеми введенными уточнениями в двумерном приближении.

В работе описывается численная реализация унифицированной модели НИК в методике ЭГАК [4], и приводятся результаты ее тестирования.

Литература

1. Никифоров В.В. Турбулентное перемешивание на контактной границе разноплотных сред. // ВАНТ, Сер. ТПФ. 1985. Вып. 1. С. 3-8.
2. Никифоров В.В. Расчет гравитационного турбулентного перемешивания в неавтономных течениях. // ВАНТ, Сер. ТПФ. 1993. Вып. 1. С. 3-13.
3. Козлов В.И., Сапожников И.В. Моделирование нестационарных турбулентных течений на основе модифицированной модели Никифорова // VIII Харитоновский чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Саров, 2006.
4. Дарова Н.С., Дибиров О.А., Жарова Г.В., Шанин А.А., Янилкин Ю.В. Комплекс программ ЭГАК. Лагранжево-эйлерова методика расчёта двумерных газодинамических течений многокомпонентной среды. // ВАНТ, Сер. ММФП. 1994. Вып. 2. С. 51-58.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЯХ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ В СОПЛЕ ЖРД

П.В. Лебедев

Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова, пос. Сатис, Россия

В данной работе рассматривается моделирование тепломассопереноса в турбулентных струях с фазовым переходом в сопле ЖРД, которая охватывает широкий спектр науки и техники, от полёта космического летательного аппарата до движения торпеды. При численном расчёте сопла было рассмотрено четыре режима полёта, соответствующих рабочих режимах РДТТ на четырёх разных высотах: 0 км, 10 км, 20 км, 30 км, где атмосферное давление и температура равно соответственно 101325 Па и 288.76 К, 26500 Па и 223.3 К, 5450 Па и 216.7 К, 1197 Па и 226.5 К, наблюдая при этом влияние скорости 5 Маха набегающего потока воздуха на затопленную струю, находим параметры на выходе из сопла и распределение чисел Маха на некотором расстоянии от выхода из сопла до изобарического участка, где равнодействующая сил равна нулю и её импульс не меняется, рассматриваем каталитические реакции в потоке и на его границах с пульсациями.

В ходе численного моделирования также были выбраны геометрические характеристики сопла с критическим диаметром 250 мм, и диаметром 1250 мм на выходе. Параметры атмосферы для данных высот были взяты согласно модели «Атмосфера стандартная» по ГОСТ 4401-81.

Для численного моделирования была построена регулярная, квазиортогональная сетка с возмущениями в области ядра потока и разрежением к стенки. Для более точного решения на скачках уплотнения была установлена релаксация сетки.

В каждом численном расчёте использовалась единая численная модель и граничные условия: решались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с уравнением энергии и уравнением непрерывности, с применением модели турбулентности $k-\omega$ SST, также была выбрана модель совершенного газа с изменяемой от температуры вязкостью. Массовые доли были найдены с помощью свободного программного комплекса написанного на языке MATLAB. В критическом сечении сопла установлено граничное условие избыточного давления, равное 107 Па. Внешние гравитационные силы не учитываются, следовательно количество движения не меняется.

В качестве результатов были представлены поля чисел Маха сопла на разных высотах полёта. Из данных полей течения видно, что на малых высотах сопло работает в режиме сильного перерасширения, благодаря чему и возникает отрыв продуктов сгорания с внутренней поверхности сопла. На большой высоте сопло работает в режиме недорасширения, поэтому поток газа продолжает расширяться даже при выходе из сопла.

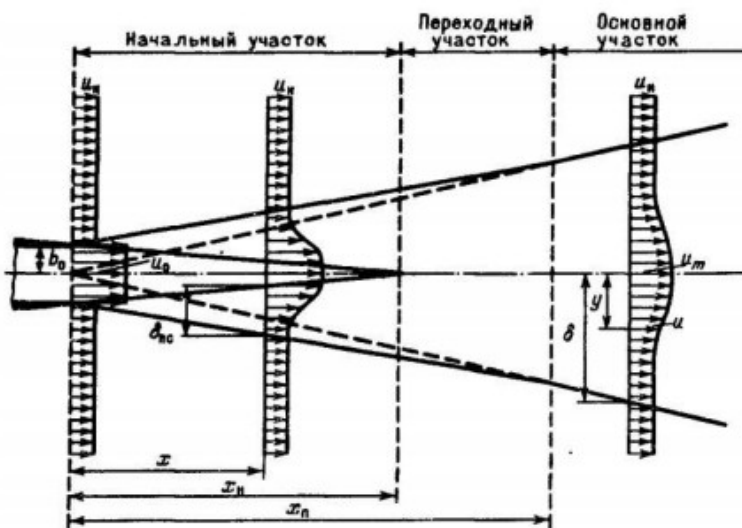


Рисунок 1. Схема струи

Как показывают многочисленные опыты, одним из основных свойств такой струи является постоянство статического давления во всех области течения, в следствии чего скорость в потенциальном ядре струи остаётся постоянной. Размывание струи за пределами начального участка выражается не только в её утолщении, но и также в изменении скорости вдоль её оси.

В общем виде уравнение для вычисления силы тяги выглядит следующим образом:

$$R = w_a dm + \iint_{F_a} (p_a - p_n) dF$$

Литература

1. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. Москва: Физматлит, 2012. 468 с. ISBN 978-5-9221-1438-7
2. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А. Теория турбулентных струй. Москва: Наука, 1984. 708 с.
3. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. Л.Энергия, 1978. 216 с.

3D КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ НА ОСНОВЕ МНОГОСЕТОЧНЫХ АЛГОРИТМОВ И СХЕМЫ ГОДУНОВА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

М.Х. Абузяров, Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, С.В. Крылов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В настоящее время для решения сложных трехмерных задач динамики конструкций при нестационарном нагружении и при взаимодействии с окружающими сжимаемыми средами в основном используются зарубежные коммерческие вычислительные системы LS-DYNA, AUTODYN, EUROPLEXUS и др. В связи с последними событиями и наложенными санкциями использование этих средств в России поставлено под вопрос. Отечественная вычислительная система FlowVisoon, для решения задач динамической прочности предполагает использование также импортного пакета программ ABAQUS. В рамках российской системы ЛОГОС существуют программы, моделирующие динамические задачи прочности на основе МКЭ и численных схем типа Уилкинса в лагранжевых переменных, обладающих известными недостатками, связанными с искажениями лагранжевых расчетных сеток при больших деформациях и перемещениях. В разрабатываемых в последнее время в евросоюзе и США вычислительных системах EUROPLEXUS, ALE3D, DYTRAN используются численные модели в эйлеровых переменных, как для описания динамики конструкций, так и окружающих сред, компенсирующих недостатки лагранжевых подходов. Наиболее продвинутой разработкой ALE3D Ливерморской лаборатории США признана к применению только определенными американскими организациями еще до введения санкций в отношении РФ. Поэтому в целях импортозамещения и поддержания научно-технического паритета предлагается оригинальная 3D технология и вычислительная система для моделирования ударно-волновых процессов в жидких и твердых деформируемых телах и процессов взаимодействия жидкости и твердых деформируемых тел в неподвижных эйлеровых сетках с явным лагранжевым выделением подвижных контактных поверхностей и границ тел (sharp interface tracking), ориентированная на применение суперЭВМ. Численное моделирование процессов взаимодействия конструкций со средами проводится в геометрически и физически нелинейной постановке в эйлеровых переменных на основе многосеточных алгоритмов и единого численного метода – модифицированного метода Годунова повышенной точности. Контактные алгоритмы строятся на основе точных решений задачи распада произвольного разрыва, как между средами с шаровым, так и с полным тензором напряжений. В областях, удаленных от границ, интегрирование происходит на неподвижной декартовой сетке, а в областях, примыкающих к границам, на подвижных локальных сетках. Обмен параметрами между сетками производится с помощью интерполирования с весовыми коэффициентами. Для описания необратимого деформирования элементов конструкций используется теория пластического течения с упрочнением. Численный алгоритм строится на основе принципа расщепления для упругопластических течений. Оригинальность предлагаемого комплекса по сравнению с известными пакетами программ состоит также в создании расчетной модели конкретной задачи

на основе поверхностных сеток рассчитываемых объектов, заданных в виде стандартных STL файлов, непосредственно полученных конструкторами, с помощью инженерных CAD систем проектирования (КОМПАС, SOLIDWORK и др.). На основе этих поверхностей автоматически строятся все необходимые расчетные сетки. Такая технология существенно сокращает этап подготовки трехмерной расчетной модели и позволяет эффективно выделять и отслеживать граничные и контактные поверхности при больших перемещениях и деформациях

Данный многосеточный подход показал свою эффективность при решении 3D динамических задач с большими перемещениями и деформациями, решение которых по LS DYNA, AUTODYN вызывает значительные трудности. Это задачи разгона деформируемых упругопластических тел газообразными продуктами взрыва, формирование ударных волн и высокоскоростных струй при детонации твердых взрывчатых веществ и их взаимодействие с упругопластическими телами [1], задачи пробивания деформируемыми ударниками многослойных упругопластических преград с учетом рикошетирувания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 22-29-00672) и при поддержке Программы стратегического академического лидерства "Приоритет 2030" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. М.Х. Абузяров, Глазова Е.Г., А.В. Кочетков, С.В. Крылов. Численная методика решения трехмерных задач взаимодействия высокоскоростных газовых струй с упругопластическими преградами. ВАИТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2021. Вып. 4. С.24-40.

3D COMPLEX FOR SIMULATION OF HIGH-SPEED DYNAMIC PROCESSES IN CONTINUOUS MEDIA ON THE BASIS OF MULTI-GRID ALGORITHMS AND THE GODUNOV SCHEME OF INCREASED ACCURACY IN EULER VARIABLES

M.Kh. Abuziarov, E.G. Glazova, A.V. Kochetkov, S.V. Krylov

National Research Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia

At present, foreign commercial computing systems LS-DYNA, AUTODYN, EUROPLEXUS, etc. are mainly used to solve complex three-dimensional problems of structural dynamics under non-stationary loading and when interacting with surrounding compressible media. In connection with recent events and imposed sanctions, the use these funds in Russia put into question. The domestic computing system FlowVisoon, for solving problems of dynamic strength, also involves the use of an imported ABAQUS software package. Within the framework of the Russian LOGOS system, there are programs that simulate dynamic strength problems based on the FEM and Wilkins-type numerical schemes in Lagrangian variables, which have known drawbacks associated with distortions in Lagrangian computational grids under large deformations and displacements. In the recent developments in the European Union and the USA, the EUROPLEXUS, ALE3D, DYTRAN computer systems use numerical models in Euler variables to describe both the dynamics of structures and environments that compensate for the shortcomings of Lagrangian

approaches. The most advanced development of ALE3D by the US Livermore Laboratory is allowed for use only by certain US organizations even before the imposition of sanctions against the Russian Federation. Therefore, in order to replace imports and maintain scientific and technical parity, an original 3D technology and computer system is proposed for modeling shock wave processes in liquid and solid deformable bodies and processes of interaction between liquid and solid deformable bodies in fixed Eulerian meshes with an explicit Lagrangian selection of moving contact surfaces and boundaries of bodies (sharp interface tracking), focused on the use of supercomputers. Numerical modeling of the processes of interaction of structures with media is carried out in a geometrically and physically nonlinear formulation in Euler variables based on multigrid algorithms and a single numerical method - a modified Godunov method of increased accuracy. Contact algorithms are built on the basis of exact solutions to the problem of decay of an arbitrary discontinuity, both between media with a spherical and with a full stress tensor. In areas far from the boundaries, integration occurs on a fixed Cartesian grid, and in areas adjacent to the boundaries, on moving local grids. The exchange of parameters between grids is performed using interpolation with weight coefficients. To describe the irreversible deformation of structural elements, the theory of plastic flow with hardening is used. The numerical algorithm is based on the splitting principle for elastoplastic flows. The originality of the proposed complex in comparison with known software packages also lies in the creation of a calculation model of a specific problem based on surface grids of calculated objects specified in the form of standard STL files directly obtained by designers using engineering CAD design systems (KOMPAS, SOLIDWORK, etc.). Based on these surfaces, all the necessary computational grids are automatically built. This technology significantly reduces the stage of preparing a three-dimensional calculation model and allows you to effectively select and track boundary and contact surfaces with large displacements and deformations. This multigrid approach has shown its effectiveness in solving 3D dynamic problems with large displacements and deformations, the solution of which by LS DYNA, AUTODYN causes significant difficulties. These are the problems of acceleration of deformable elastoplastic bodies by gaseous explosion products, the formation of shock waves and high-speed jets during the detonation of solid explosives and their interaction with elastoplastic bodies [1], the problems of breaking through deformable impactors of multilayer elastoplastic barriers, taking into account ricocheting.

The work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-29-00672) and by the support of the federal academic leadership program "Priority 2030" of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

References

1. M.Kh. Abuzyarov, Glazova E.G., A.V. Kochetkov, S.V. Krylov. Numerical method for solving three-dimensional problems of the interaction of high-speed gas jets with elastic-plastic barriers. VANT, ser. Mathematical modeling of physical processes, 2021. Issue. 4. S.24-40.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ДВОЙНИКИ НАГРУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

Г.С. Яндубаев, А.О. Бликов, М.А. Мочалов, С.В. Ерунов, В.А. Огородников, В.В. Ерастов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Ключевые слова: квазиизэнтропическая сжимаемость, нагружающие устройства, газодинамическое моделирование, неидеальная плазма, дейтерий, гелий.

Предложена упрощенная схема нагружающего устройства для исследования квазиизэнтропического сжатия неидеальной плазмы (гидродинамический двойник). Она позволяет моделировать движение оболочек первого и второго каскадов с помощью задания на внешней границе камеры высокого давления граничного условия второго рода.

Преимуществом такого подхода является бóльшая прозрачность и удобство представления манеры счета посредством замены подбираемых входных параметров, характеризующих нагружающее устройство, диаграммой скорости наружной границы оболочки первого каскада. Манера счета верифицируется на результаты опытов с макетами.

HYDRODYNAMIC TWINS OF LOADING DEVICES FOR QUASI-ISENTROPIC COMPRESSION

G.S. Yandubaev, A.O. Blikov, M.A. Mochalov, S.V. Erunov, V.A. Ogorodnikov, V.V. Erastov

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

Key words: quasi-isentropic compressibility, loading devices, gas-dynamic computation, non-ideal plasma, deuterium, helium.

A simplified scheme of a loading device for researching the quasi-isentropic compression of a non-ideal plasma (hydrodynamic twin) is proposed. It allows simulating the motions of the shells of the first and second cascades by specifying a second-type boundary condition on the external boundary of the high-pressure chamber.

The advantage of this approach is greater transparency and convenience of representing the manner of counting by replacing the selected input parameters characterizing the loading device with the velocity diagram of the external boundary of the shell of the first cascade. The manner of counting is verified against the results of experiments with models.

ПЛАНЫ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С ГРАНИЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ДО 2 МэВ

*А.О. Черница¹, И.А. Карачинский¹, П.А. Колесников¹, О.А. Никитин¹,
Д.А. Старостенко², Д.А. Никифоров², Я.В. Куленко², П.А. Бак², О.А. Павлов²*

¹РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия

²ИЯФ СО РАН им. академ. Г.И. Будкера, г. Новосибирск, Россия

В РФЯЦ-ВНИИТФ в 2011 году введена в эксплуатацию рентгенографическая установка на базе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ). ЛИУ используется для исследования динамически развивающихся объектов при взрывном нагружении. В ходе опытной эксплуатации ЛИУ были отработаны различные узлы ускорителя и выявлены недостатки.

Для повышения надежности работы ускорителя и информативности получаемых результатов принято решение провести модернизацию системы импульсного питания, системы транспортировки пучка, индукторной системы.

В докладе рассмотрены выявленные недостатки, пути их устранения, представлены этапы модернизации ЛИУ, внедрение новых решений по обеспечению стабильности работы ускорителя.

PLANS ON UPGRADING THE LINEAR-INDUCTION ACCELERATOR WITH THE ELECTRON BOUNDARY ENERGY OF UP TO 2 MEV

*A.O. Chernitsa¹, I.A. Karachinsky¹, P.A. Kolesnikov¹, O.A. Nikitin¹,
D.A. Starostenko², D.A. Nikiforov², Ya.V. Kulenko², P.A. Bak², O.A. Pavlov²*

¹RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

²BINP, the SB of the RAS, Novosibirsk, Russia Federation

In 2011, RFNC – VNIITF put into operation a radiography facility based on linear-induction accelerator (LIA). The LIA is applied to study dynamically evolving objects under explosive loading. In the course of the LIA pilot operation, various accelerator assemblies were worked-up, and the shortcomings were revealed.

To improve accelerator operation reliability and information value of the obtained results, it has been decided to upgrade the pulsed power system, the beam transport system, and the inductor system.

In the work, the revealed shortcomings are analyzed, and paths to eliminate them are considered. The work presents the stages of the LIA upgrade, and describes new solutions to be implemented to ensure accelerator stable operation.

ГЕНЕРАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И.В. Юртов, А.А. Утенков, М.В. Антипов, А.В. Федосеев, В.А. Огородников

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

При проведении газодинамических экспериментов важно получать данные о временах прихода ударных и детонационных волн в интересующие области, а также измерять давления. Методики, используемые в этих опытах, должны позволять проводить измерения с достаточной точностью, требуется устанавливать большое количество датчиков, при этом нежелательно подавать напряжение на экспериментальные сборки.

В докладе представлены конструкции и примеры применения разработанных в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ датчиков генераторного типа, основанных на использовании пьезокерамических и ферромагнитных материалов. Эти датчики позволяют регистрировать времена прихода ударных и детонационных волн. В отличие от электроконтактов такие датчики более информативны, позволяют получать данные о структуре ударноволнового течения и оценивать или измерять величину давления в диапазоне до ~ 4 ГПа. Датчики имеют компактные размеры и сравнительно простую конструкцию. Для регистрации сигналов, как правило, используется максимально простая электрическая схема. Это делает представленные датчики удобным средством для проведения газодинамических исследований.

ВЗРЫВОЗАЩИТНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ДВУХРАКУРСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ С НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДО 1 КГ ТЭ

*Д.В. Ханин, М.А. Сырунин, М.П. Калинин, В.И. Романов,
Е.Е. Маслов, Д.А. Варавин, Ю.А. Калинина*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

При проведении исследований быстропротекающих процессов в макетах, содержащих взрывчатые вещества, с помощью рентгенографических комплексов, применяется взрывозащитная камера (ВЗК). Её конструкция должна обеспечить полную локализацию (удержание) газообразных продуктов взрыва, токсичных аэрозолей и осколков от взрыва исследуемого макета. С целью обеспечения рентгенографирования, такая ВЗК должна иметь две пары диаметрально противоположных радиографических окон (по числу каналов вывода сканирующего излучения). Исполнение ВЗК с расположением радиографических окон в наиболее нагруженной центральной части не должно снижать несущую способность и прочностную надёжность ВЗК.

В докладе представлены результаты разработки ВЗК с несущей способностью 1 кг ТЭ для двухракурсной радиографии.

На основании расчетно-экспериментальных исследований выбрана схема ВЗК, материал её основных элементов и габаритные размеры. Конструкция ВЗК состоит из двух независимых контуров: внутренней камеры, воспринимающей импульсное (взрывное) воздействие и внешней камеры, обеспечивающей герметичное удержание

продуктов взрыва в случае аварийной разгерметизации внутреннего контура. Такое исполнение ВЗК позволит повысить надежность всей конструкции.

Результаты расчетного моделирования показали, что разрабатываемая камера имеет достаточную несущую способность при проектных и повышенных нагрузках, а также были выявлены особенности напряженно-деформированного состояния конструкции и наиболее нагруженные области.

Экспериментальное исследование внутренней камеры при нагрузке от взрыва сферического заряда ВВ 1,5 кг ТЭ показало, что она сохраняет свою конструкционную целостность, прочность и герметичность, а элементы её силового корпуса работают в области упругих деформаций.

При испытании внешней камеры нарастающим внутренним давлением газа, она сохранила герметичность при давлении ~20 ат. Полученный результат превышает расчетное значение давления в её полости (12 ат) при мгновенном выходе горячих продуктов взрыва из внутренней камеры в случае разгерметизации во время проведения эксперимента.

Проведенные исследования показали, что разработанная взрывозащитная камера с проектной несущей способностью до 1 кг ТЭ отвечает требованиям повышенной надежности и может использоваться для двухракурсной рентгенографии.

THE CONTAINMENT CHAMBER WITH BEARING CAPACITY UP TO 1 KG OF TNT FOR DUAL AXES X-RAY ANALYSIS

*D.V. Khanin, M.A. Syrunin, M.P. Kalinin, V.I. Romanov,
E.E. Maslov, D.A. Varavin, Yu.A. Kalinina*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

When carrying out researches of the fast-proceeding processes in the models containing explosives by means of radiographic complexes, the containment chamber is used. Its design has to provide full localization of gaseous products of explosion, toxic aerosols and splinters from explosion of the studied model. For providing the X-RAY analysis, such chambers must have two couples of diametrically opposite radiographic windows (on number of channels of the conclusion of the scanning radiation). A version of a chamber with arrangement of radiographic windows in the most loaded central part should not reduce bearing capacity and strength reliability of a chamber.

In the paper, results are provided for developing a chamber with bearing capacity of 1 kg of TNT for the dual axes X-RAY analysis.

On the basis of experiment-calculated studies, the scheme of a containment chamber, a material of its basic elements and overall dimensions are chosen. The design of containment chamber consists of two independent contours: the internal chamber perceiving pulse (explosive) action and the external chamber providing hermetic confinement of explosion products in the case of emergency depressurization of the internal contour. Such a version of a chamber will allow one to increase reliability of the whole design.

Results of rated modeling showed that the developed camera has sufficient bearing capacity at the design and raised loadings and features of the stressed-deformed condition of the design and the most loaded areas were revealed.

The pilot study of the internal chamber at the explosion load of the spherical charge of 1.5 kg of TNT showed that it keeps the constructional integrity, durability and tightness, and elements of its power body work in the field of elastic deformations.

When testing the external chamber with the increasing internal pressure of gas, it kept tightness with the pressure of ~ 20 atm. The received result exceeds the design value of pressure in its cavity (12 atm.) at the instant exit of hot explosion products from the internal chamber in the case of depressurization during the experiment.

The conducted researches showed that the developed containment chamber with design bearing capacity to 1 kg of TNT meets the requirements of the increased reliability and can be used for the dual axes X-RAY analysis.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОСЕВОЙ ГОЛОГРАФИИ ФРАУНГОФЕРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ

*А.В. Федосеев, М.В. Антипов, А.Н. Подувалов, В.А. Огородников,
 А.А. Утенков, О.Б. Созирина, Д.А. Поликов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В последнее время интенсивно исследуется явление ударно-индуцированного пыления, заключающееся в выбросе со свободной поверхности (СП) конденсированного вещества потока микрочастиц при выходе на нее ударной волны. Образующиеся при этом пылевые потоки характеризуются большими скоростями – до 10^3 - 10^4 м/с, малыми плотностями $\sim 0,1$ - 100 мг/см³ и малыми размерами $\sim 10^{-5}$ - 10^{-7} м выбрасываемых частиц. Одним из основных и наименее изученных параметров этих пылевых потоков является распределение составляющих их частиц по размерам и скоростям. Для получения целостной картины таких потоков необходимо регистрировать область с размерами $\sim \varnothing 20$ мм с микронным разрешением, с экспозицией не более 5 нс. Существенной проблемой при этом является малая глубина резкости для частиц размерами несколько микрометров, так для частиц диаметром $d=1, 5, 10$ и 20 мкм, при $\lambda=0,5$ мкм (зеленый цвет), глубина контрастного изображения будет равна $2, 50, 200$ и 800 мкм, соответственно.

Такие измерения можно проводить с использованием метода осевой голографии Фраунгофера. В докладе представлены реализация и примеры использования этого метода для регистрации потоков частиц, в том числе при проведении взрывных опытов. Регистрацию проводили на КМОП матрицу или на голографические пластины ВРП-М, с использованием импульсного лазера с длиной волны 532 нм и длительностью пучка ~ 5 нс.

РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЛЕТА МЕТАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО ИНДУКЦИОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

*И.В. Тропынин, Д.З. Давлетчин, В.Ю. Фадеев, Д.В. Назаров, И.В. Ошкин,
 С.В. Жарков, В.Г. Симаков, В.А. Брагунец, А.А. Окинчиц, Е.Е. Шестаков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

При экспериментальных исследованиях на этапе разработки и испытаний опытных образцов артиллерийского вооружения возникает необходимость регистрации пролета метаемых объектов (МО) в заданных участках ствола, в том

числе в условиях существенных электромагнитных помех, возникающих при срабатывании электро-физических установок. В отдельных случаях возникает необходимость в передаче зарегистрированного сигнала на большие расстояния (до 1 км).

Вышеперечисленным требованиям наиболее удовлетворяет неконтактный метод измерения и регистрации, основанный на индукционном регистраторе (датчике).

Для реализации передачи сигнала регистрации пролета МО на большие расстояния и защиты от электромагнитных помех, наиболее оптимальным способом является метод передачи сигнала по оптическим линиям.

В Институте физики взрыва (ИФВ) ВНИИЭФ был разработан комбинированный индукционно-оптический датчик генераторного типа.

При пролете МО с составной частью из ферромагнитной стали (кольцо, ударник) в зоне чувствительности датчика, генерируется сигнал эдс индукции, напряжение и мощность которого достаточны для формирования излучателем оптического сигнала на выходе датчика для успешной передачи на расстояния до 1 км.

Комбинированный датчик был успешно отработан в серии опытов на установках НПУ-50 (нагружающая пневматическая установка) при скорости пролета МО 500-700 м/с.

Литература

1. Герасимов С.И., Герасимова Р.В., Ерофеев В.И., Зубанков А.В., Каныгин И.И., Кикеев В.А., Одзериho И.А., Яненко Б.А.. Способ запуска регистрирующих систем и измеритель средней скорости метаемого объекта // Вестник научно-технического развития. 2017. №3 (115). С. 22-29.
2. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля: монография / А.В. Федотов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 176 с.
3. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – 704 с.
4. Ошкин И.В., Быков А.Г., Троцюк К.В., Гетманец А.Н., Прудкой Н.А., Прозоров В.Б., Тихонова Е.А. Расчет проникновения электромагнитного поля в цилиндрический экран со щелью // Технологии ЭМС. 2019. 34 (71). С. 41-50.

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ГЕНЕРАТОРА ГАММА – ИМПУЛЬСОВ НА БАЗЕ БЕТАТРОНА ТИПА БИМ

*А.А. Чинин, Ю.П. Куропаткин, В.И. Нижегородцев,
К.В. Савченко, В.Д. Селемир, О.А. Шамро, В.А. Фомичев*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Описана мобильная система питания электромагнита генератора гамма-импульсов на базе бетатрона типа БИМ, позволяющая создавать в обмотках электромагнита униполярный импульс тока амплитудой $I \approx 110$ кА и длительностью по основанию $t \approx 1$ мс. Разброс времени срабатывания $\Delta t \leq 50$ нс. Система содержит высоковольтный источник питания ЗУ 25 – 15М, ёмкостной накопитель из конденсаторов ИЭПС - 24 - 290 общей ёмкостью $C_0 \approx 2,4$ мФ, модуль коммутации, элементы управления, синхронизации и контроля. Приведены конструкция, электрическая схема и осциллограммы сигналов с датчиков контроля её параметров. Система входит в состав мобильного комплекса, предназначенного для рентгенографирования динамических объектов с большими оптическими толщинами.

MOBILE POWER SUPPLY SYSTEM OF ELECTROMAGNET FOR GAMMA-PULSE GENERATOR BASED ON CYCLIC ACCELERATOR

*A.A. Chinin, Yu.P. Kuropatkin, V.I. Nizhegorodtsev,
K.V. Savchenko, V.D. Selemir, O.A. Shamro*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russi

The authors describe a mobile power supply system of electromagnet for gamma-pulse generator based on cyclic accelerator [1]. It allows producing a current pulse with the amplitude of 110 kA and the length of 1 ms in the magnetic coils. The time spread of the system triggering is less than 50 ns. The system contains a high-voltage charger, a battery of a capacitive storage of 2,4 mF, controls and synchronization elements located in the switching rack. The electrical scheme, the construction and oscillograms of the betatron output parameters are provided. The system is a part of the mobile radiographic complex and is aimed to radiograph dynamic objects with the large optical thickness.

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ПОСТРОЕНИЮ УРС ВЕЩЕСТВ С БОЛЬШИМИ АТОМНЫМИ НОМЕРАМИ

*Н.И. Егоров, Г.В. Борисков, А.И. Быков, П.Б. Репин, В.Н. Павлов,
И.С. Стрелков, О.М. Сурдин, Д.А. Маслов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Обоснована прецизионная точность метода рентгенографических измерений для построения уравнений состояния веществ с большими атомными номерами в области мегабарных давлений с использованием устройства изоэнтропического сжатия на основе генератора МК-1. Приведено сравнение результатов рентгенографических измерений, выполненных в одном и том же эксперименте двумя научно-исследовательскими группами, использующими различные методы обработки данных рентгенографирования.

RADIOGRAPHIC MEASUREMENTS IN THE EXPERIMENTS OF EQUATION OF STATES WITH LARGE ATOMIC NUMBERS

*N.I. Egorov, G.V. Boriskov, A.I. Bykov, P.B. Repin, V.N. Pavlov,
I.S. Strelkov, O.M. Surdin, D. A. Maslov*

RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

The precision accuracy of the radiographic measurement method is validated. The method is intended to set up the equations of state with large atomic numbers in the area of megabar pressures. The device of the isentropic compression based on the MC-1 generator was used. The results of the radiographic measurements were compared in one and the same experiment by two scientific research groups. The groups used different methods of the X-ray radiography data analysis.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

PLENARY TALKS

Научное наследие С.Б. Кормера. К 100-летию со дня рождения <i>М.А. Мочалов</i>	5
-----------------------------------------------------------------------------------------	---

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

FUNDAMENTAL RESEARCH

Модель расширения вселенной в общей теории относительности (ОТО) с разлётом в пустоту горячей начальной сингулярности <i>А.Н. Крайко</i>	6
A Model of Universe Expansion in General Relativity with Spread of a Hot Start Singularity to Empty Space <i>A.N. Kraiko</i>	8

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ФИЗИКА ДЕТОНАЦИИ

ENERGETIC MATERIALS AND PHYSICS OF DETONATION

Исследование детонационной способности пластичных и эластичных взрывчатых составов на основе термостойких индивидуальных взрывчатых веществ <i>А.С. Гладков, Г.П. Куценко, Л.Г. Сухова, В.Я. Базотов</i>	11
Investigation of the Detonation Ability of Plastic and Elastic Explosive Compounds Based on Heat-Resistant Individual Explosives <i>A.S. Gladkov, G.P. Kutsenko, L.G. Sukhova, V.Ya. Bazotov</i>	11
Изучение ударно-волнового инициирования эмульсионного взрывчатого вещества <i>А.С. Юношев, М.П. Девушкин, А.В. Пластинин, А.А. Плуман</i>	12
Investigation of Shock-Wave Initiation of Emulsion Explosives <i>A.S. Yunoshev, M.P. Devushkin, A.V. Plastinin, A.A. Pluman</i>	13
Тонкая кристаллическая структура, спектральные свойства и микроморфология плёнок энергоёмких соединений, полученных методом кристаллизации из газовой фазы на различных подложках <i>А.В. Станкевич, А.В. Соболевская, А.Н. Грецова, М.С. Стрельцова, О.А. Фролова</i>	14

Fine Crystal Structure, Spectral Properties and Micromorphology of Films of Energy- Intensive Compounds Obtained by Crystallization from the Gas Phase on Various Substrates	
<i>A.V. Stankevich, A.V. Sobolevskaya, A.N. Gretsova, M.S. Streltsova, O.A. Frolova</i>	15
Влияние добавки углерода различной аллотропии на процесс горения смесевых ракетных топлив	
<i>С.Ю. Нарыжский, В.Ю. Долматов, А.С. Козлов, В.В. Фоменко, Г.В. Семашкин, В.А. Марчуков, С.В. Десятов, А.С. Кузаков</i>	16
Комплексная оценка перспектив применения малочувствительных взрывчатых составов в осколочно-фугасных боеприпасах среднего калибра	
<i>К.С. Колобов, И.А. Кузнецов, А.С. Смирнов</i>	16
Исследование процесса окисления алюминиевой добавки при детонации взрывчатых составов с применением синхротронного излучения	
<i>И.А. Рубцов, К.А. Тен, А.О. Кашкаров, А.С. Юношев, А.В. Пластинин, С.М. Караханов, А.А. Студенников, В.П. Халеменчук, А.Е. Курепин, Л.В. Маланчева, И.А. Кузнецов</i>	17
Investigation of the Oxidation Process of an Aluminum Additive During Detonation of High Explosive Using Synchrotron Radiation	
<i>I.A. Rubtsov, K.A. Ten, A.O. Kashkarov, A.S. Yunoshev, A.V. Plastinin, S.M. Karakhanov, A.A. Studennikov, V.P. Khalemenchuk, A.E. Kurepin, L.V. Malancheva, I.A. Kuznetsov</i>	18
Иницирование детонации в ВВ на основе октогена ударными волнами прямоугольного профиля с амплитудой давления до 5 ГПа	
<i>Е.Н. Богданов, Е.В. Рычагов, И.А. Спирин, В.Н. Князев, Р.А. Воронков, Г.А. Козлов, В.В. Барабин, Д.В. Крючков, Д.Н. Замотаев, А.М. Ивин</i>	18
Initiation of Detonation in Explosives Based on HMX by Rectangular Shock Waves with a Pressure Amplitude of up to 5 GPa	
<i>E.N. Bogdanov, E.V. Rychagov, I.A. Spirin, V.N. Knyazev, R.A. Voronkov, G.A. Kozlov, V.V. Barabin, D.V. Kryuchkov, D.N. Zamotaev, A.M. Ivin</i>	19
О возможном влиянии пор и других структурных дефектов на температуру полиморфного превращения октогена	
<i>А.М. Злобин, П.С. Белухина, С.В. Бондарева, С.А. Вахмистров, С.Э. Гребенникова, Т.Е. Кирсанова, Н.А. Мирошниченко, А.В. Сквирская, А.А. Старостина, Ю.В. Шейков</i>	20
On Possible Influence of Pores and Other Structural Defects Upon Temperature of Polymorphic Transformation Of HMX	
<i>A.M. Zlobin, P.S. Belukhina, S.V. Bondareva, S.A. Vakhmistrov, S.E. Grebennikova, T.E. Kirsanova, N.A. Miroshnichenko, A.V. Skvirskaya, A.A. Starostina, Yu.V. Sheikov</i>	21
Влияние высоких температур на критический диаметр детонации пластичных и эластичных взрывчатых составов	
<i>Л.Г. Сухова, Г.П. Куценко, А.С. Гладков, В.Я. Базотов</i>	21
The Effect of High Temperatures on the Critical Detonation Diameter of Plastic and Elastic Explosive Compounds	
<i>L.G. Sukhova, G.P. Kutsenko, A.S. Gladkov, V.Ya. Bazotov</i>	22
Параметры зависимости между критическим диаметром детонации и критическим сечением детонации, определенным методом клина и методом пирамиды для пластичных ВВ	
<i>А.В. Бессонова, Д.А. Пронин, Ю.В. Шейков, О.В. Шевлягин</i>	23

Parameters of Dependence Between Critical Diameter of Detonation and Critical Cross-Section of Detonation Determined Wedge Method and Pyramid Method for Plastic HE <i>A.V. Bessonova, D.A. Pronin, Yu.V. Sheikov, O.V. Shevlyagin</i>	24
Получение высокодисперсных вв и алюминизированных композитов на их основе с применением ультразвука <i>Н.С. Толоконникова, С.М. Батъянов, В.А. Бурнашов, Е.В. Карлина, О.М. Луковкин, Д.В. Мильченко, [Н.А. Понькин], А.В. Руднев, Ю.В. Шейков</i>	24
Влияние добавки алюминиевого порошка на детонационные характеристики эмульсионного взрывчатого вещества <i>А.С. Юношев, С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, А.В. Пластинин</i>	25
Effect of the Additive of Aluminum Powder on Detonating Characteristics of the Emulsion Explosive <i>A.S. Yunoshev, S.A. Bordzilovsky, S.M. Karakhanov, A.V. Plastinin</i>	27
Регистрация сферически сходящейся детонационной волны в пластифицированном ТАТБ с использованием совмещённых лазерно-интерферометрических методик <i>В.И. Таржанов, Д.П. Кучко, А.В. Воробьёв, М.А. Ральников, Д.С. Боярников, Ю.А. Аминов, Ю.Р. Никитенко</i>	29
Registration of Spherically Converging Detonation Wave in Plasticized TATB Using Combined Laser-Interferometry Procedures <i>V.I. Tarzhanov, D.P. Kuchko, A.V. Vorobiev, M.A. Ralnikov, D.S. Boyarnikov, Yu.A. Aminov, Yu.R. Nikitenko</i>	29
Влияние термомеханического воздействия, возникающего в процессе развития горения ВВ на основе октогена и ТАТБ, на их структурные изменения <i>Е.В. Халдеев, С.Н. Баранов, Е.Н. Борисков, С.Г. Иеошина, И.И. Никифоров, Д.А. Пронин, О.В. Шевлягин, А.В. Шкураков</i>	30
Исследование свойств перспективного термостойкого взрывчатого вещества – 2,6-бис(пикриламино)-3,5-динитропиридина <i>А.С. Козлов, С.М. Путис, А.Ю. Мершин, Д.В. Бармашова, П.Г. Буковский, О.В. Базанов, Г.В. Семашкин, А.А. Котомин, С.А. Душенюк</i>	31
Получение и кристаллизация термостойкого взрывчатого вещества РУХ <i>С.М. Путис, А.Ю. Мершин, Д.В. Бармашова, А.С. Козлов, Г.В. Семашкин, А.А. Котомин, С.А. Душенюк</i>	32
Детонационная способность суспензий взрывчатых веществ в нитрометане <i>А.А. Котомин, С.А. Душенюк, А.С. Козлов</i>	33
Моделирование структуры детонации в бинарных газовых смесях углеводородов с водородом <i>А.В. Троцюк, П.А. Фомин, И.В. Тетервова</i>	35
Modeling of Detonation Structure in Binary Gaseous Mixtures of Hydrocarbons with Hydrogen <i>A.V. Trotsyuk, P.A. Fomin, I.V. Tetervova</i>	35

Прогнозная оценка влияния выхода детонационных наноалмазов в зависимости от элементного состава ВВ	
<i>В.Ю. Долматов, А.Н. Озерин, Е.Д. Эйдельман, А.О. Дорохов</i>	36
Данные по скоростям химических реакций в базе ТЕФИС	
<i>А.А. Белов, О.И. Топор, Л.В. Бородачев</i>	38
Data on Chemical Reaction Rates in the TEFIS Database	
<i>A.A. Belov, O.I. Topor, L.V. Borodachev</i>	39
Предполагаемый механизм образования детонационных наноалмазов	
<i>В.Ю. Долматов, А.Н. Озерин, А.С. Козлов, А.О. Дорохов</i>	41
Влияние дисперсности сферондального октогена на горение смесевых ракетных топлив	
<i>С.Ю. Нарыжный, В.В. Фоменко, М.В. Ахтырский, А.С. Кузаков, С.В. Десятов, С.М. Путис, О.Д. Пуцин, С.А. Душенюк, А.А. Котомин, А.С. Козлов</i>	41
Торможение продуктов взрыва пластифицированного октогена во фторид лития	
<i>А.А. Становов, Е.Н. Богданов, В.И. Буренин, Л.И. Канунова, А.О. Ягвокин, Л.К. Антонюк, Т.А. Говорунова, А.Е. Сафронов</i>	42
Расчетно-экспериментальные исследования распространения детонации в цилиндрических зарядах из ТАТБ	
<i>А.В. Ерастов, В.В. Змушко, Т.И. Змушко, К.Н. Панов</i>	43
Numerical-Experimental Investigations of Detonation Propagation in Cylindrical TATB Charges	
<i>A.V. Erastov, V.V. Zmushko, T.I. Zmushko, K.N. Panov</i>	44
Изучение взрывчатых веществ при динамическом нагружении методом оставного стержня Гопкинсона	
<i>В.А. Пушков</i>	44
Определение фугасного и метательного действия зарядов взрывчатых веществ с использованием методов математического моделирования	
<i>С.П. Зоткин, А.А. Селезнев, А.В. Скляр</i>	45
Determination of Explosive Charges Performance Using Numerical Simulation Methods	
<i>S.P. Zotkin, A.A. Selezenev, A.V. Sklyarov</i>	46
Оценка фугасности смесевых ВВ на основе термодинамических критериев работоспособности продуктов детонации	
<i>А.А. Селезнев, А.Ю. Алейников, П.А. Устимкин, С.П. Зоткин</i>	48
Estimation of Composite Explosives Performance Using the Thermodynamic Criteria	
<i>A.A. Selezenev, A.Yu. Aleynikov, P.A. Ustimkin, S.P. Zotkin</i>	49
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ	
EQUATIONS OF STATE AND PHASE TRANSITIONS	
Особенности сжимаемости церия при ударно-волновом нагружении до 25 ГПа в экспериментах с фотохронографической лазерно-гетеродинамической диагностикой	
<i>В.И. Гаржанов, <u>Е.А. Козлов</u>, Д.Г. Панкратов</i>	51

Features of Cerium Compressibility under Shock-Wave Loading up to 25 GPa in Experiments Using Photochronographic and Laser-Heterodyne Diagnostics <i>V.I. Tarzhanov, E.A. Kozlov, D.G. Pankratov</i>	52
Реакция церия на ударно-волновое нагружение в области (γ-α) фазового превращения <i>В.А. Борисенко, В.Г. Симаков, В.А. Брагунец, М.В. Жерноклетов, Е.Е. Шестаков, А.М. Подурец, М.И. Ткаченко</i>	54
Cerium Reaction to Shock-Wave Loading in the Region of (γ-α) phase transformation <i>V.A. Borisenok, V.G. Simakov, V.A. Bragunets, M.V. Zhernokletov, E.E. Shestakov, A.M. Podurets, M.I. Tkachenko</i>	55
Аномальная термодинамика энтропийных фазовых переходов в веществе экстремальных параметров <i>И.Л. Иосилевский, В.К. Грязнов, Д.Н. Николаев, А.В. Шутков</i>	56
Anomalous Thermodynamics of Entropic Phase Transitions in Matter of Extreme State <i>I.L. Iosilevskiy, V.K. Gryaznov, D.N. Nikolaev, A.V. Shutov</i>	57
Ударно волновое сжатие газообразного азота в диапазоне давлений 140 - 250 ГПа <i>М.В. Жерноклетов, А.Е. Ковалев, М.Г. Новиков, В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский, А.В. Шутков</i>	58
Shock-Wave Compression of Gaseous Nitrogen in the Range of Pressures from 140 GPa to 250 GPa <i>M.V. Zhernokletov, A.E. Kovalev, M.G. Novikov, V.K. Gryaznov, I.L. Iosilevskiy, A.V. Shutov</i>	59
Термодинамические свойства ударно-сжатого азота в широком диапазоне давлений <i>В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский, А.В. Шутков</i>	59
Thermodynamic Properties of Shock-Compressed Nitrogen in a Wide Pressure Range <i>V.K. Gryaznov, I.L. Iosilevskiy, A.V. Shutov</i>	60
Квазиизэнтропическое сжатие газообразных гелия и дейтерия в сферических конструкциях при терапаскальных давлениях <i>М.В. Жерноклетов, С.Ф. Маначкин, В.А. Раевский, Н.Б. Давыдов, А.О. Бликов, С.Ю. Согрин, А.В. Рыжков, В.А. Аринин, Б.И. Ткаченко, А.И. Логвинов, А.В. Дегтярев, В.А. Комраков, А.И. Давыдов, Н.Н. Анашкин, В.В. Хрусталеv</i>	61
Quasi-Isentropic Compression of Gaseous Helium and Deuterium in Spherical Structures at Terrapascal Pressures <i>M.V. Zhernokletov, S.F. Manachkin, V.A. Raevskiy, N.B. Davydov, A.O. Blikov, S.Yu. Sogrin, A.V. Ryzhkov, V.A. Arinin, B.I. Tkachenko, A.I. Logvinov, A.V. Degtyarev, V.A. Komrakov, A.I. Davydov, N.N. Anashkin, V.V. Khrustalev</i>	62
Квазиизэнтропическое сжатие неидеальной плазмы гелия в области давлений до 600 ГПа <i>Г.С. Яндубаев, А.О. Бликов, М.А. Мочалов, В.А. Огородников, В.В. Ерастов, А.А. Турков, В.А. Аринин, А.В. Рыжков, С.Е. Елфимов, Е.П. Волков</i>	62
Quasi-Isentropic Compression of a Nonideal Helium Plasma at Pressure up To 600 GPa <i>G.S. Yandubaev, A.O. Blikov, M.A. Mochalov, V.A. Ogorodnikov, V.V. Erastov, A.A. Turkov, V.A. Arinin, A.V. Rzhkov, S.E. Elfimov, E.P. Volkov</i>	63
Ударное сжатие гидридов металлов <i>Л.Ф. Гударенко, М.В. Жерноклетов, А.А. Каякин</i>	63

Уравнение состояния продуктов взрыва ВВ в форме JWL на основе экспериментов по схеме Cylinder-Test с синхротронной диагностикой <i>Е.Б. Смирнов, Д.В. Петров, А.Ю. Гармашев, А.К. Музыря, К.М. Просвирнин, С.В. Шахмаев, Э.Р. Прууэл, К.А. Тен, А.О. Кашкаров</i>	64
Jones-Wilkins-Lee Equation of State for HE Detonation Products Based on Cylinder-Test Experiments Using Synchrotron Diagnostics <i>E.B. Smirnov, D.V. Petrov, A.Yu. Garmashev, A.K. Muzyrya, K.M. Prosvirnin, S.V. Shakhmaev, E.R. Prueel, K.A. Ten, A.O. Kashkarov</i>	65
Определение параметров УРС JWL для промышленного ВВ 6ЖВ на основе данных цилиндр – теста <i>А.А. Селезнев, А.М. Исаков, П.А. Устимкин, С.П. Зоткин</i>	65
Determination of the JWL Equation of State Parameters on the Basis of the Cylinder - Test Data for 6GV Industrial Explosive <i>A.A. Selezenev, A.M. Isakov, P.A. Ustimkin, S.P. Zotkin</i>	67
Методы расчета изэнтропии продуктов детонации по данным цилиндр-теста: анализ и сравнение <i>А.И. Ахметзянов, В.А. Вирченко, А.А. Казак, С.В. Шахмаев</i>	69
Структурные и динамические характеристики металл-графеновых композитов в ударных волнах <i>Е.В. Шорохов, И.Г. Бродова, И.В. Хомская, С.В. Разоренов, Л.А. Елишина</i>	70
Structural and Dynamic Characteristics of Metal-Graphene Composites in Shock Waves <i>E.V. Shorokhov, I.G. Brodova, I.V. Khomskaya, S.V. Razorenov, L.A. Yolshina</i>	72
Уточненная фазовая диаграмма углерода и фазовые переходы в алмазе при взаимодействии с импульсным лазерным излучением <i>М.Ю. Попов, В.Д. Чуркин, Б.А. Кульницкий, В.Д. Бланк</i>	73
Refined Carbon Phase Diagram and Phase Transitions in Diamond when Interacting with Pulsed Laser Radiation <i>M.Yu. Popov, V.D. Churkin, B.A. Kulnitskiy, V.D. Blank</i>	74
Ударная сжимаемость пенобора и пенодифлона в диапазоне давлений 7-25 ГПа <i>Ф.И. Тарасов, А.Ю. Николаев, Р.Н. Канунников, А.С. Лобачёв, В.Е. Симонов, Я.М. Горопашный</i>	75
Shock Compressibility of Foam Boron and Foam Diflon within the Pressure Range of 7 to 25 GPa <i>F.I. Tarasov, A.Yu. Nikolaev, R.N. Kanunnikov, A.S. Lobachyov, V.E. Simonov, Ya.M. Goropashnyi</i>	75
Регистрация фазового перехода в сталях Ст3ПС, 12Х18Н10Т и АК-33 при давлении ударного сжатия до 25 ГПа <i>А.П. Куруленко, Д.Н. Замотаев, А.М. Ивин, Д.В. Крючков, И.А. Терешкина, И.Р. Трунин, Д.А. Баженов, А.Е. Сафронов, Т.О.Скляднева, А.Н. Баландина</i>	76
Phase Transition Recording In St3PS, 12H18N10T and AK-33 steels at shock compression pressure up to 25GPa <i>A.P. Kurulenko, D.N. Zamotaev, D.V. Kryuchkov, I.A. Tereshkina, I.R. Trunin, D.A. Bazhenov, A.E. Safromov, T.O. Sklyadneva, A.N. Balandina</i>	77
Описание ударного сжатия некоторых молекулярных кристаллов <i>М.А. Бирюкова, Д.В. Петров, Ю.М. Ковалев, Е.Б. Смирнов</i>	78
Description of Shock Compression of Certain Molecular Crystals <i>M.A. Biryukova, D.V. Petrov, Yu.M. Kovalev, E.B. Smirnov</i>	80

Изотерма металла, построенная на основе обобщенного уравнения для коэффициента Грюнайзена <i>С.Д. Гилев</i>	81
Ударное сжатие пористого наноразмерного никеля <i>А.Ю. Долгобородов, С.Ю. Ананьев, В.В. Якушев, Т.А. Ростилов, В.С. Зиборов, М.Л. Кусков</i>	82
Shock Compression of Porous Nanosized Nickel <i>A.Yu. Dolgoborodov, S.Yu. Anan'ev, V.V. Yakushev, T.A. Rostilov, V.S. Ziborov, M.L. Kuskov</i>	83
Математическое моделирование результатов экспериментов по двукратному сжатию полиметилметакрилата с использованием синхротронной диагностики <i>Н.Л. Клиначева, Е.С. Шестаковская, А.П. Яловец</i>	84
Mathematical Simulation of the Results of Experiments on the Two-Fold Compression of Polymethyl Methacrylate by Using Synchrotron Diagnostic <i>N.L. Klinacheva, E.S. Shestakovskaya, A.P. Yalovets</i>	85
Сравнительный анализ поведения кристаллов бериллия и магния при ультравысоких давлениях <i>Н.А. Смирнов</i>	86
Comparative Analysis for the Behavior of Beryllium and Magnesium Crystals at Ultrahigh Pressures <i>N.A. Smirnov</i>	87
Уравнение состояния молибдена около критической точки фазового перехода жидкость–пар при изэнтропическом расширении после ударного сжатия <i>К.А. Боярских, К.В. Хищенко</i>	87
Equation of State for Molybdenum Near the Critical Point of the Liquid–Vapor Phase Transition During Isentropic Expansion after Shock Compression <i>K.A. Boyarskikh, K.V. Khishchenko</i>	88
Энергия взаимодействия асимметричной комплексной плазмы с учетом эффекта нелинейного экранирования в приближении корреляционной полости <i>И.А. Мартынова, И.Л. Иосилевский</i>	89
Interaction Energy of Asymmetric Complex Plasma with Account of the Non-Linear Screening Effect in the Correlation Hole Approximation <i>I.A. Martynova, I.L. Iosilevskiy</i>	90
Доплеровская и пирометрическая диагностика ударно-сжатой плазмы плотного ксенона <i>Г.А. Козлов, Е.Н. Богданов, А.Е. Ковалев, М.Г. Новиков, А.Н. Малышев, Д.В. Козлов, В.И. Буренин, А.А. Становов</i>	90
Doppler and Pyrometric Diagnosis of Shock-Compressed Dense Xenon Plasma <i>G.A. Kozlov, E.N. Bogdanov, A.E. Kovalev, M.G. Novikov, A.N. Malyshev, D.V. Kozlov, V.I. Burenin, A.A. Stanovov</i>	92
Ударно-волновая сжимаемость продуктов взрыва пластифицированного октогена в диапазоне давлений 40-70 ГПа <i>А.А. Становов, Е.Н. Богданов, Е.А. Чудаков, В.И. Буренин, Л.И. Канунова, Г.А. Козлов, А.А. Седов, Т.А. Говорунова, А.М. Тарасов, Е.С. Митин</i>	93

Результаты экспериментов по изэнтропическому сжатию тантала до сверхвысоких давлений	
<i>Г.В. Борисков, А.И. Быков, Н.И. Егоров, А.С. Коршунов, И.В. Макаров, В.Н. Павлов, П.Б. Репин, И.С. Стрелков, О.М. Сурдин, С.И. Белов, Н.А. Беляева, В.А. Аринин, С.Е. Елфимов, А.В. Рыжков</i>	93
Experimental Results of Isentropic Tantalum Compression up to Ultra-High Pressures	
<i>G.V. Boriskov, A.I. Bykov, N.I. Egorov, A.S. Korshunov, I.V. Makarov, V.N. Pavlov, P.B. Repin, I.S. Strelkov, O.M. Surdin, S.I. Belov, N.A. Belyaeva, V.A. Arinin, S.E. Elfimov, A.V. Ryzhkov</i>	94
Апробация моделей микрополя по спектрам лазерной плазмы	
<i>А.А. Белов</i>	94
Validation of Microfield Models by Laser Plasma Spectra	
<i>A.A. Belov</i>	95
Квантово-статистический расчет ударных адиабат тугоплавких металлов в широком диапазоне давлений	
<i>М.А. Кадатский, К.В. Хищенко</i>	97
Quantum-Statistical Calculation of Shock Adiabats of Refractory Metals in a Wide Pressure Range	
<i>M.A. Kadatskiy, K.V. Khishchenko</i>	98
Уравнение состояния рения при высоких температурах и давлениях	
<i>К.В. Хищенко</i>	99
Equation of State for Rhenium at High Temperatures and Pressures	
<i>K.V. Khishchenko</i>	99
Расчет ударных адиабат сплавов ниобия с танталом при высоких давлениях	
<i>Н.Н. Середкин, К. В. Хищенко</i>	99
Calculation of Shock Adiabats of Niobium–Tantalum Alloys at High Pressures	
<i>N.N. Seredkin, K.V. Khishchenko</i>	100
Параметры квазичастицы давления рогнон для золота и платины	
<i>В.А. Карпов, П.В. Лебедев</i>	101
Исследование теплофизических свойств металлов в жидком и околокритическом состоянии: первопринципный расчет и эксперимент	
<i>Д.В. Минаков, М.А. Парамонов, В.Б. Фокин, И.С. Гальцов, П.Р. Левашов, А.В. Дороватовский, М.А. Шейндлин</i>	103
Investigation of Thermophysical Properties of Metals in Liquid and Near-Critical States: First-Principle Calculations and Experiment	
<i>D.V. Minakov, M.A. Paramonov, V.B. Fokin, I.S. Galtsov, P.R. Levashov, A.V. Dorovatovskiy, M.A. Sheindlin</i>	103
ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РЕОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ, ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ	
DYNAMIC STRENGTH AND RHEOLOGY OF MATERIALS, DYNAMICS OF CONSTRUCTIONS	
Влияние технологии изготовления и термообработки на динамическую прочность жаропрочного сплава инконель 718	
<i>С.В. Разоренов, Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, С.А. Атрошенко</i>	105

Effect of Manufacturing Technology and Heat Treatment on the Dynamic Strength of the Heat-Resistant Inconel 718 Superalloy <i>S.V. Razorenov, G.V. Garkushin, A.S. Savinykh, S.A. Atroshenko</i>	106
Структура и динамические свойства алюминиевого сплава АК6, полученного селективным лазерным сплавлением <i>А.И. Кленов, А.Н. Петрова, И.Г. Ширинкина, И.Г. Бродова, В.В. Астафьев, Т.И. Яблонских, Е.Б. Смирнов</i>	107
Structure and Dynamic Properties of AK6 Aluminum Alloy Produced by Selective Laser Melting <i>A.I. Klenov, A.N. Petrova, I.G. Shirinkina, I.G. Brodova, V.V. Astafiev, T.I. Yablonskih, E.B. Smirnov</i>	108
Откольное разрушение образцов из стали 12X18H10T, изготовленных методом селективного лазерного плавления <i>Т.О. Складнева, М.С. Адигамов, В.А. Брагунец, И.С. Гнutow, И.В. Пикулин, А.М. Подурец, В.Г. Симаков, И.А. Терешкина, М.И. Ткаченко, И.Р. Трунин, Е.Е. Шестаков</i>	109
Spall Fracture of Specimens of Steel 12Cr18Ni10Ti Manufactured Using Selective Laser Melting <i>T.O. Sklyadneva, M.S. Adigamov, V.A. Bragunets, I.S. Gnutow, I.V. Pikulin, A.M. Podurets, V.G. Simakov, I.A. Tereshkina, M.I. Tkachenko, I.R. Trunin, E.E. Shestakov</i>	110
Автомодельная волна разрежения в упругопластическом материале <i>В.Н. Ногин</i>	111
Self-Similar Rarefaction Wave in Elastoplastic Material <i>V.N. Nogin</i>	112
О точности определения величины откольной прочности по данным измерений на контактной поверхности <i>А.В. Красильников, В.Н. Ногин</i>	112
The Accuracy of Spall Strength Evaluation from Contact Surface Measurements <i>A.V. Krasilnikov, V.N. Nogin</i>	112
О критическом поведении металлов, актинидов и металлического плутония при высокоинтенсивном внешнем воздействии <i>Н.И. Сельченкова, И.Р. Трунин, А.Я. Учаев</i>	113
On Critical Behavior of Metals, Actinides and Plutonium Metal on High-Intensity Exposure <i>N.I. Sel'chenkova, I.R. Trunin, A.Ya. Uchaev</i>	114
Автомодельные закономерности деформирования и разрушения материалов при интенсивных воздействиях <i>О.Б. Наймарк</i>	115
Self-Similar Regularities of Deformation and Failure under Intensive Loading <i>O.B. Naimark</i>	117
Исследование динамических свойств материалов в сотрудничестве с институтами РАН <i>Г.И. Канель, С.В.Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Мочалова, Д.М. Шалковский, А.В. Петровцев, Д.А. Варфоломеев, В.В. Дремов, Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, Д.Т. Юсупов, С.С. Мокрушин, Д.Н.Казаков, С.И. Балабин, Д.А. Беляев, С.Н. Малюгина, Н.И. Талуц, А.В. Добромыслов, В.В. Сагарадзе, Н.В. Катаева, А.Е. Шестаков, А.В. Седов, А.В. Павленко</i>	118

Studying Dynamic Properties of Materials in Cooperation with the RAS Institutes

<i>G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin, V.E. Mochalova, D.M. Shalkovsky, A.V. Petrovtsev, D.A. Varfolomeev, V.V. Dremov, E.A. Kozlov, V.I. Tarzhanov, D.T. Yusupov, S.S. Mokrushin, D.N. Kazakov, S.I. Balabin, D.A. Belyaev, S.N. Malyugina, N.I. Taluts, A.V. Dobromyslov, V.V. Sagaradze, N.V. Kataeva, A.E. Shestakov, A.V. Sedov, A.V. Pavlenko</i>	118
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Статическая, динамическая и ударно-волновая прочность трубной стали марок 17Г1С, 09Г2С, 10Г2ФБЮ и класса прочности K60

<i>V.A. Ogorodnikov, M.A. Сырунин, К.В. Ерофеев, Е.В. Кулаков, А.С. Пупков, Е.В. Кошатова, Ф.Ф. Галиев, А.М. Подурец, М.И. Ткаченко, Т.О. Складнева</i>	119
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Исследование деформирования и разрушения оболочек из низколегированной стали при внутреннем взрывном нагружении

<i>К.В. Ерофеев, М.А. Сырунин, В.А. Огородников, Д.В. Ханин</i>	120
-----------------------------------------------------------------------	-----

Research of Deformation and Destruction of Covers from the Low-Alloyed Steel at Internal Explosive Loading

<i>K.V. Erofeyev, M.A. Syrunin, V.A. Ogorodnikov D.V. Khanin</i>	120
------------------------------------------------------------------------	-----

Исследование прочностных характеристик образцов из обедненного урана при ударно-волновом нагружении

<i>A.B. Ольховский, А.Е. Ковалев, А.И. Иванушкин, Д.П. Кучко, Д.Г. Панкратов</i>	121
----------------------------------------------------------------------------------------	-----

Strength Properties of the Shock-Loaded Depleted Uranium Samples

<i>A.V. Olkhovsky, A.E. Kovalev, A.I. Ivanushkin, D.P. Kuchko, D.G. Pankratov</i>	122
-----------------------------------------------------------------------------------------	-----

Влияние на динамические механические свойства урана размера зерна и легирования молибденом

<i>E.B. Кошатова, Д.Н. Замотаев, Ф.Ф. Галиев</i>	123
--------------------------------------------------------	-----

Influence of Grain Size and Alloying of Uranium by Molybdenum on Dynamical Mechanical Properties of Uranium

<i>E.V. Koshatova, D.N. Zamotaev, F.F. Galiev</i>	124
---------------------------------------------------------	-----

Динамическая прочность меди и сплавов меди с субмикроструктурной структурой, полученной высокоскоростным прессованием

<i>И.В. Хомская, Д.Н. Абдуллина, С.В. Разоренов, Е.В. Шорохов, Л.А. Елишина</i>	125
---------------------------------------------------------------------------------------	-----

The Dynamic Strength of Copper and Copper Alloys with A Submicrocrystalline Structure Obtained by High-Speed Pressing

<i>I.V. Khomskaya, D.N. Abdullina, S.V. Razorenov, E.V. Shorokhov, L.A. Elshina</i>	126
-------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Экспериментальное исследование реологических и прочностных свойств жидкостей при интенсивных воздействиях

<i>И.А. Банникова, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк, Ю.В. Баяндин</i>	128
----------------------------------------------------------------------	-----

Experimental Study of Rheological and Strength Properties of Liquids under Intense Loading

<i>I.A. Bannikova, S.V. Uvarov, O.B. Naimark, Yu.V. Bayandin</i>	129
------------------------------------------------------------------------	-----

Численное моделирование поведения металлов и сплавов при лазерной ударной проковке

<i>Д.Р. Ледон, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк</i>	129
-----------------------------------------------------	-----

Numerical Simulation of the Behavior of Metals and Alloys During Laser Shock Peening

<i>D.R. Ledon, Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark</i>	130
-------------------------------------------------------	-----

Экспериментальное исследование влияния интенсивного нагружения, инициированного лазером, на внутреннюю структуру металлических мишеней <i>А.Н. Балахнин, С.В. Уваров, И.А. Банникова, А.Н. Вишников, А.Е. Прохоров, О.Б. Наймарк</i>	131
Experimental Study of the Effect of Intense Loading Initiated by a Laser on the Internal Structure of Metal Targets <i>A.N. Balakhnin, S.V. Uvarov, I.A. Bannikova, A.N. Vshivkov, A.E. Prohorov, O.B. Naimark</i>	132
Разрушение свинца, находящегося в твердом и жидком состояниях, под воздействием ударной волны спадающего профиля <i>А.Н. Мальшев, О.Н. Игнатова, В.А. Раевский, В.И. Скоков, А.Н. Катыков, Д.В. Крючков, Д.Н. Замотаев, И.В. Шиберин, А.Б. Георгиевская</i>	132
Fracture of Solid and Liquid Lead by the Action of a Shock Wave with a Falling Profile <i>A.N. Malyshev, O.N. Ignatova, V.A. Raevskiy, V.I. Skokov, A.N. Katykov, D.V. Kryuchkov, D.N. Zamotaev, I.V. Shiberin, A.B. Georgievskaya</i>	133
Динамические свойства алюминиево-магниево-литиевого сплава 1420 <i>Д.Н. Замотаев, Е.В. Кошатова, В.А. Пушков, А.Г. Иолев, В.И. Скоков, А.Н. Мальшев, В.Г. Симаков, Е.Е. Шестаков, И.С. Гнутов, Т.А. Говорунова, В.А. Брагунец, М.А. Мусатова, Н.А. Логинов</i>	134
Dynamic Properties of Aluminum-Magnesium-Lithium Alloy 1420 <i>D.N. Zamotaev, E.V. Koshatova, V.A. Pushkov, A.G. Ioilev, V.I. Skokov, A.N. Malyshev, V.G. Simakov, E.E. Shestakov, I.S. Gnutov, T.A. Govorunova, V.A. Bragunets, M.A. Musatova, N.A. Loginov</i>	135
Экспериментально-расчетное исследование деформирования меди марки М1, сплавов ВНЖ и свинец-сурьма в диапазоне скоростей деформации 10^2-10^3 с⁻¹ <i>Ю.А. Кузнецова, Е.В. Кошатова, А.В. Кальманов, Ф.Ф. Галиев, А.П. Куруленко</i>	136
Experimental-Calculated Study of Straining of M1 Copper, Alloys of WNiFe and Pb- Sb in the Range of Strain Rates of 10^2-10^3 s⁻¹ <i>Yu.A. Kuznetsova, E.V. Koshatova, A.V. Kal'manov, F.F. Galiev, A.P. Kurulenko</i>	137
ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ МЕТАНИЕ И СОУДАРЕНИЕ. ЯВЛЕНИЯ КУМУЛЯЦИИ	
HIGH-VELOCITY LAUNCHING AND IMPACTS. CUMULATION PHENOMENA	
Природа Тунгусского взрыва и сопутствующих геофизических явлений <i>П.А. Фомин</i>	139
Nature of Tunguska Explosion and Associated Geophysical Phenomena <i>P.A. Fomin</i>	140
Скорость взрывного метания оболочек и фрагментов <i>М.М. Бойко, Е.Ф. Грязнов, И.А. Перевалов</i>	141
Численное моделирование формирования кумулятивной струи из вращающегося кумулятивного заряда <i>С.С. Рассоха</i>	141
Numerical Simulation of Jet Formation from Rotating Shaped Charge <i>S.S. Rassokha</i>	143

Причины прекращения проникания кумулятивной струи <i>М.А. Власова, О.В. Свирский</i>	145
О влиянии зазоров на динамику разгона двухслойной пластины <i>А.В. Красильников, В.Н. Ногин, А.Е. Ковалев, А.В. Ольховский</i>	145
The Gap Effect for Dynamics of Acceleration Two-Layer Plate <i>A.V. Krasilnikov, V.N. Nogin, A.E. Kovalev, A.V. Olkhovskiy</i>	146
Усиление аксиального магнитного поля в осесимметричных конических течениях <i>С.В. Станкевич</i>	146
Amplification of the Axial Magnetic Field in Axisymmetric Conical Flows <i>S.V. Stankevich</i>	147
Ускорение плоских ударников с использованием спирального магнитокумулятивного генератора <i>Д.А. Тепаев, А.А. Агапов, А.С. Борискин, Ю.В. Власов, С.И. Володченко, В.А. Демидов, С.А. Казаков, П.Б. Репин, А.В. Филиппов, А.М. Тарасов</i>	148
Acceleration of Flat Strikers with the Use of Helical Magneto-Cumulative Generator <i>D.A. Tepaev, A.A. Agapov, A.S. Boriskin, YU.V. Vlasov, S.I. Volodchenkov, V.A. Demidov, S.A. Kazakov, P.B. Repin, A.V. Filippov, A.M. Tarasov</i>	148

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

HYDRODYNAMIC INSTABILITIES

Прямое численное моделирование турбулентного перемешивания с учетом истории процесса <i>Ю.В. Янилкин, А.Р. Гужова, Л.И. Дегтяренко, В.Ю. Колобянин, В.А. Шмелёв</i>	149
Экспериментальное исследование неустойчивости Рихтмайера-Мешкова при числе Маха падающей ударной волны $M \approx 5$ <i>А.А. Тяктев, Ю.А. Пискунов, И.Л. Бугаенко, Н.Б. Аникин</i>	150
Experimental Study of Richtmyer-Meshkov Instability at the Incident Shock-Wave Mach Number $M \approx 5$ <i>A.A. Tyaktev, Yu.A. Piskunov, I.L. Bugaenko, N.B. Anikin</i>	151
Результаты расчетно-экспериментальных исследований турбулентного перемешивания на контактной границе газ-жидкость под действием косой ударной волны <i>Н.В. Невмержицкий, А.Н. Разин, В.В. Змушко, А.Э. Большакова, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, Е.В. Бодров, О.Л. Кривонос, К.В. Анисифоров, Е.В. Левкина, С.В. Фролов, А.С. Соколова, И.Р. Фарин</i>	152
Results of Numerical and Experimental Study of Turbulent Mixing at Tilted Interfaces under Inclined Shock Wave <i>N.V. Nevmerzhitskiy, A.N. Razin, V.V. Zmushko, A.E. Bolshakova, E.D. Senkovskiy, E.A. Sotсков, E.V. Bodrov, O.L. Krivonos, K.V. Anisiforov, E.V. Levkina, S.V. Frolov, A.S. Sokolova, I.R. Farin</i>	152
Экспериментальные данные по величинам пульсаций скорости жидкости в зоне турбулентного перемешивания на границе газ-жидкость при неустойчивости Рэля-Тейлора <i>Н.В. Невмержицкий, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, Е.В. Бодров, О.Л. Кривонос, К.В. Анисифоров, С.В. Фролов, И.Р. Фарин, Д.О. Кочетков</i>	153

Experimental Data of Liquid Velocity Pulsations in Turbulent Mixing Zone at Gas-Liquid Interface under Releigh-Taylor Instability <i>N.V. Nevmerzhitskiy, E.D. Senkovskiy, E.A. Sotskov, E.V. Bodrov, O.L. Krivonos, K.V. Anisiforov, S.V. Frolov, I.R. Farin, D.O. Kochetkov</i>	153
Диспергирование капли жидкости под действием воздушной ударной волны <i>Н.В. Невмержицкий, А.Б. Георгиевская, Е.Д. Сеньковский, Е.В. Левкина, Е.А. Сотсков, О.Л. Кривонос, К.В. Анисифоров, С.В. Фролов</i>	154
Dispersion of Liquid Drop under Effect of Air Shock Wave <i>N.V. Nevmerzhitskiy, A.B. Georgievskaya, E.D. Senkovskiy, E.V. Levkina, E.A. Sotskov, O.L. Krivonos, K.V. Anisiforov, S.V. Frolov</i>	154
Численное моделирование экспериментов по взаимодействию мощных УФ лазерных импульсов с конденсированными мишенями <i>И.Г. Лебо</i>	155
Numerical Modeling of the Experiments of the Power UV Laser Pulse Interaction with the Condense Targets <i>I.G. Lebo</i>	156
Модификации к-ε модели для двумерных ударноволновых течений <i>Ю.В. Третьяченко А.Р. Гужова, В.П. Стаценко, Ю.В. Янликун</i>	157
Применение модели источника ударно-волнового пыления металлов, основанной на физике неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, для расчёта спектра размеров частиц олова и свинца <i>А.Б. Георгиевская</i>	157
Методики исследования «пыления» и их сравнение с синхротронной радиографией <i>К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, И.А. Рубцов, А.О. Кашкаров, А.А. Студенников, Л.И. Шехтман, Б.П. Толочко, А.Ю. Гармашев, Д.В. Петров, Е.Б. Смирнов, К.В. Новоселов</i>	158
Определение интегральных характеристик потока частиц, выбрасываемых со свободной поверхности свинцовых образцов, в условиях их двухволнового нагружения <i>А.П. Явтушенко, Е.А. Чудаков, А.В. Федоров, А.О. Яговкин, А.Л. Гамов, М.П. Калинин</i>	159
Determination of the Integral Characteristics of the Flow of Particles Ejected from the Free Surface of Lead Samples under Their Two-Wave Loading <i>A.P. Yavtushenko, E.A. Chudakov, A.V. Fedorov, A.O. Yagovkin, A.L. Gamov, M.P. Kalinin</i>	160
Результаты исследований диспергирования свинца при ударно-волновом нагружении и изоэнтропической разгрузке <i>Н.В. Невмержицкий, Е.Д. Сеньковский, Е.А. Сотсков, А.Б. Георгиевская, В.А. Раевский, А.Н. Малышев, Е.В. Бодров, О.Л. Кривонос, Е.В. Левкина, В.И. Скоков, К.В. Анисифоров, С.В. Фролов, Д.В. Козлов, И.Р. Фарин</i>	161
Results of Investigatations of Lead Dispersion Under Shock Loading and Isoentropic Unloading <i>N.V. Nevmerzhitskiy, E.D. Senkovskiy, E.A. Sotskov, A.B. Georgievskaya, V.A. Raevskiy, A.N. Malyshev, E.V. Bodrov, O.L. Krivonos, E.V. Levkina, V.I. Skokov, K.V. Anisiforov, S.V. Frolov, D.V. Kozlov, I.R. Farin</i>	161

Характеристики ударно-индуцированных пылевых потоков с поверхности образцов из свинца и меди при их нагружении одной или двумя последовательными ударными волнами	
<i>А.Л. Михайлов, В.А. Огородников, С.В. Ерунов, С.А. Финюшин, Д.Е. Зотов, Е.В. Кулаков, М.А. Сырунин, М.В. Антипов, Н.В. Невмержицкий, К.Н. Панов, Е.А. Чудаков, А.С. Пупков, А.В. Мишанов, А.Б. Георгиевская, И.В. Юртов, Д.Н. Замыслов, Е.В. Бодров, И.А. Калашник, А.О. Яговкин, А.В. Чапаев</i>	162
Characteristics of Shock-Induced Dispersive flow From Surfaces of Samples Made of Lead and Copper at their Loading with one or two Sequential Shock Waves	
<i>A.L.Mikhaylov, V.A.Ogorodnikov, S.V.Erunov, S.A.Finyushin, D.E.Zotov, E.V.Kulakov, M.A.Syrunin, M.V.Antipov, N.V.Nevmerzhtskiy, K.N.Panov, E.A.Chudakov, A.S.Pupkov, A.V.Mishanov, A.B.Georgievskaya, I.V.Yurtov, D.N.Zamyslov, E.V.Bodrov, I.A.Kalashnik, A.O.Yagovkin, A.V.Chapaev</i>	162
Особенности выброса пылевых частиц и фрагментов со свободной поверхности ударно-нагруженных медных образцов	
<i>А.В. Федоров, С.А. Финюшин, Е.А. Чудаков, А.П. Явтушенко, А.Г. Халаев</i>	163
Peculiarities of Ejection of Particles and Fragments from the Free Surface of Shock Loaded Copper Samples	
<i>A.V.Fedorov, S.A.Finyushin, E.A.Chudakov, A.P.Yavtushenko, A.G.Khalaev</i>	164
МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	
TEST TECHNIQUES AND EXPLOSIVE TECHNOLOGIES. SIMULATION OF DYNAMICAL PROCESSES	
Порошковый состав, содержащий детонационные наноалмазы (ДНА) - эффективная добавка в электролит износостойкого хромирования	
<i>В.Ю. Долматов, С.П. Богданов, В.А. Марчуков, А.С. Козлов</i>	165
Развитие технологий изготовления малоплотных пористых сред, расчётно-теоретические и экспериментальные исследования их применения для управления параметрами ударных волн	
<i>И.А. Белов, С.А. Бельков, С.В. Бондаренко, А.Ю. Воронин, В.Н. Деркач, А.В. Илюшечкина, А.А. Кузина, И.В. Кузьмин, А.Е. Мюсова, А.Н. Рукавишников, Е.Ю. Соломатина, К.В. Стародубцев, П.В. Стародубцев, О.О. Шаров</i>	166
Development of Manufacturing Technologies of Low-Density Porous Media, Design-Theoretical and Experimental Studies of their Application for Shockwave Parameters Control	
<i>I.A.Belov, S.A.Belkov, S.V.Bondarenko, A.Yu.Voronin, V.N.Derkach, A.V.Ilyushechkina, A.A.Kuzina, I.V.Kuzmin, A.E.Myusova, A.N.Rukavishnikov, E.Yu.Solomatina, K.V.Starodubtsev, P.V.Starodubtsev, O.O.Sharov</i>	168
Сварка взрывом труб	
<i>О.Б. Дреннов, И.А. Терешкина</i>	169
Исследования сетчатых аддитивных структур, предназначенных для ослабления ударных волн	
<i>А.Ю. Гармашев, Е.Б. Смирнов, Д.В. Петров, А.И. Клёнов, Д.Т. Юсупов, Д.П. Кучко</i>	169
Перспектива развития микроволновой диагностики быстропотекающих процессов в широком классе ствольных систем	
<i>Ю.И. Орехов, А.Л. Михайлов, В.Н. Хворостин, Е.С. Митин</i>	170

Development Prospect of Microwave Dianostics of Fast Processes for Wide Class of Barrel Systems <i>Yu. I. Orekhov, A.L. Mikhaylov, V.N. Khvorostin, E.S. Mitin</i>	171
Повышение точности метода гетеродин-интерферометра при газодинамических исследованиях с использованием ствольных нагружающих установок <i>Е.А. Чудаков, С.А. Финюшин, А.Е. Сафронов, А.М. Тарасов, Л.В. Чернов, Е.А. Разумков, Т.О. Складнева, Д.В. Крючков, Д.Н. Замотаев, А.П. Курулenco, В.В. Барабин</i>	172
Heterodyne Velocimeter Accuracy Increasing in Investigations Involving Ballistics Loading <i>E.A. Chudakov, S.A. Finyushin, A.E. Safronov, A.M. Tarasov, L.V. Chernov, E.A. Razumkov, T.O. Sklyadneva, D.V. Kryuchkov, D.N. Zamotaev, A.P. Kurulenco, V.V. Barabin</i>	173
Применение метода квадратурного дополнения для времяразрешенного восстановления частоты сигнала <i>Н.Б. Аникин</i>	173
Application of the Quadrature Complement Method for Time-Resolved Signal Frequency Reconstruction <i>N.B. Anikin</i>	174
Численное моделирование динамики ударно-волнового нагружения ВВ быстролетающими тонкими пластинами <i>Е.И. Липенкова, А.А. Селезнев, М.В. Епифановский, А.В. Склярoв</i>	176
Numerical Simulation of Dynamics of Shockwave Loading of Explosives by High Velocity Thin Plates <i>E.I. Lipenkova, A.A. Selezenev, M.V. Epifanovskiy, A.V. Sklyarov</i>	177
Источник тормозного излучения на базе линейного индукционного ускорителя <i>И.А. Журавлев, И.В. Пензин, О.А. Никитин, С.Д. Хренков, А.Р. Ахметов</i>	179
Система диагностики фокусного пятна линейного индукционного ускорителя в направлении обратном движению электронов <i>П.А. Колесников, В.Ю. Политов, С.А. Колесников, А.Р. Ахметов, А.В. Каплунoв, В.Ю. Эвeрт, О.А. Черница, О.А. Никитин, Ю.А. Трунев, Д.И. Скoворoдин, М.Г. Атлуханoв, А.В. Бурдаков, В.В. Данилов, В.В. Куркучекoв, С.С. Попoв, К.И. Живанкoв</i>	179
The Pinhole Diagnostic System of Linear Induction Accelerator in a Direction Opposite to the Beam Motion <i>A. Kolesnikov, V.Yu. Politov, S.A. Kolesnikov, A.R. Akhmetov, A.V. Kaplunov, V.Yu. Evert, O.A. Chernitsa, O.A. Nikitin, Yu.A. Trunev, D.I. Skovorodin, M.G. Atlukhanov, A.V. Burdakov, V.V. Danilov, V.V. Kurkuchekov, S.S. Popov, K.I. Zhivankov</i>	180
Детектирующая станция системы регистрации линейного индукционного ускорителя <i>Д.В. Сысков, В.Ю. Эвeрт, Д.Н. Шепелев, П.А. Колесников, А.П. Клевцов, Г.В. Ставриецкий</i>	180
Detecting Station in the Recording System of Linear-Induction Accelerator <i>D.V. Syskov, V.Yu. Evert, D.N. Shepelev, P.A. Kolesnikov, A.P. Klevtsov, G.V. Stavrietskii</i>	181
Модернизированный генератор гамма-импульсов на базе бетатрона типа БИМ <i>К.В. Савченко, Ю.П. Куропаткин, В.И. Нижегородцев, В.Д. Селемир, В.А. Фомичёв, А.А. Чинин, О.А. Шамро</i>	182

Upgraded Gamma-Radiation Generator Based on Ironless Pulsed Betatron <i>K.V. Savchenko, A.A. Chinin, V.A. Fomichev, Yu.P. Kuropatkin, V.I. Nizhegorodtsev, I.N. Romanov, V.D. Selemir, O.A. Shamro, E.V. Urlin</i>	182
Электронно-оптическая камера для регистрации изображений в наносекундной области времени с линейным динамическим диапазоном свет/сигнал более 1000 <i>М.И. Крутик</i>	183
Подавление пространственного шума матричных фотоприемников <i>М.С. Семин</i>	184
Spatial Noise Suppression of Matrix Photodetectors <i>M.S. Semin</i>	185
Фотонейтронный источник на базе линейного индукционного ускорителя <i>И.В. Пензин, Д.В. Петров, О.А. Никитин, А.Р. Ахметов, С.Д. Хренков, Р.В. Протас, Е.И. Чухаев, К.С. Волосенко, Д.Н. Шепелев</i>	185
Photoneutron Source Based on Linear Induction Accelerator <i>I.V. Penzin, D.V. Petrov, O.A. Nikitin, A.R. Akhmetov, S.D. Khrenkov, R.V. Protas, E.I. Chukhaev, K.S. Volosenko, D.N. Shepelev</i>	186
Радиография нейтронными потоками, генерируемыми протонами высоких энергий при облучении вольфрамовой мишени <i>Ю.Б. Базаров, М.А. Карпов, В.В. Мармышев, С.В. Белов, А.А. Демидов, А.А. Христенко</i>	186
Radiography by Neutron Fluxes Generated from High Energy Protons During Neutron Exposure of Tungsten Target <i>YU.B. Azarov, B, M.A.Karpov, V.V.Marmyshev, S.V.Belov, A.A.Demidov, A.A.Khristenko</i>	187
Применение синхротронного излучения для исследования ударно-индуцированного пыления <i>М.В. Антипов, А.Б. Георгиевская, В.А. Огородников, А.Л. Михайлов, И.А. Спириин, Д.А. Калашиников, А.А. Утенков, И.В. Юртов, О.Б. Согрин, А.В. Федосеев, К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, А.О. Каишкар² И.А. Рубцов</i>	188
Определение методом МД-моделирования характеристик изотермического сжатия молекулярных кристаллов энергетических материалов <i>В.Ю. Королев, Е.В. Гусарова, А.А. Селезнев, В.Б. Титова</i>	188
Determination of Isothermal Compression Characteristics of Energetic Materials Molecular Crystals by the Methods of MD-Modeling <i>V.Yu. Korolev. E.V. Gusarova, A.A. Selezenev, V.B Titova</i>	190
Реализация модели Князева для кинетики горения ВВ монотонным методом дробных частиц на неподвижных сетках <i>И.Е. Чередниченко, Ю.В. Янилкин, В.А. Шмелёв, В.Н. Князев</i>	191
Реализация модели МК для кинетики горения ВВ в методике ЭГАК <i>С.С. Львова, Ю.Д. Чернышев, В.Б. Титова</i>	192
Реализация двумерной унифицированной модели НИК в методике ЭГАК <i>Ю.В. Третьяченко, В.И. Козлов, Ю.В. Янилкин</i>	192
Моделирование теплопереноса в турбулентных струях с фазовым переходом в сопле ЖРД <i>П.В. Лебедев</i>	193

3D комплекс для моделирования высокоскоростных динамических процессов в сплошных средах на основе многосеточных алгоритмов и схемы Годунова повышенной точности в Эйлеровых переменных <i>М.Х. Абузяров, Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, С.В. Крылов</i>	195
3D Complex for Simulation of High-Speed Dynamic Processes in Continuous Media on the Basis of Multi-Grid Algorithms and the Godunov Scheme of Increased Accuracy in Euler Variables <i>M.Kh. Abuziarov, E.G. Glazova, A.V. Kochetkov, S.V. Krylov</i>	196
Гидродинамические двойники нагружающих устройств для квазинизэнтропического сжатия <i>Г.С. Яндубаев, А.О. Бликов, М.А. Мочалов, С.В. Ерунов, В.А. Огородников, В.В. Ерастов</i>	198
Hydrodynamic Twins of Loading Devices for Quasi-Isentropic Compression <i>G.S. Yandubaev, A.O. Blikov, M.A. Mochalov, S.V. Erunov, V.A. Ogorodnikov, V.V. Erastov</i>	198
Планы по модернизации линейного индукционного ускорителя с граничной энергией электронов до 2 МэВ <i>А.О. Черница, И.А. Карачинский, П.А. Колесников, О.А. Никитин</i>	199
Plans on Upgrading the Linear-Induction Accelerator with the Electron Boundary Energy of up to 2 MeV <i>A.O. Chernitsa, I.A. Karachinsky, P.A. Kolesnikov, O.A. Nikitin</i>	199
Генераторные датчики для измерения параметров газодинамических процессов <i>И.В. Юртов, А.А. Утенков, М.В. Антипов, А.В. Федосеев, В.А. Огородников</i>	200
Взрывозащитная камера для двухракурсной рентгенографии с несущей способностью до 1 кг ТЭ» <i>Д.В. Ханин, М.А. Сырунин, М.П. Калинин, В.И. Романов, Е.Е. Маслов, Д.А. Варавин, Ю.А. Калинина</i>	200
The Containment Chamber with Bearing Capacity up to 1 kg of TNT for Dual Axes X-RAY Analysis <i>D.V. Khanin, M.A. Syrunin, M.P. Kalinin, V.I. Romanov, E.E. Maslov, D.A. Varavin, Yu.A. Kalinina</i>	201
Применение метода осевой голографии Фраунгофера для регистрации потоков частиц <i>А.В. Федосеев, М.В. Антипов, А.Н. Подувалов, В.А. Огородников, А.А. Утенков, О.Б. Согрина, Д.А. Полшков</i>	202
Регистрация пролета метаемых объектов с помощью комбинированного индукционно-оптического датчика <i>И.В. Тропынин, Д.З. Давлетчин, В.Ю. Фадеев, Д.В. Назаров, И.В. Ошкин, С.В. Жарков, В.Г. Симаков, В.А. Брагунец, А.А. Окинчиц, Е.Е. Шестаков</i>	202
Мобильная система питания электромагнита генератора гамма – импульсов на базе бетатрона типа БИМ <i>А.А. Чинин, Ю.П. Куропаткин, В.И. Нижегородцев, К.В. Савченко, В.Д. Селемир, О.А. Шамро, В.А. Фомичев</i>	203
Mobile Power Supply System of Electromagnet for Gamma-Pulse Generator Based on Cyclic Accelerator <i>A.A. Chinin, Yu.P. Kuropatkin, V.I. Nizhegorodtsev, K.V. Savchenko, V.D. Selemir, O.A. Shamro</i>	204

**Рентгенографические измерения в экспериментах по построению УРС
веществ с большими атомными номерами***Н.И. Егоров, Г.В. Борисков, А.И. Быков, П.Б. Репин, В.Н. Павлов,**И.С. Стрелков, О.М. Сурдин, Д.А. Маслов 204***Radiographic Measurements in the Experiments of Equation
of States with Large Atomic Numbers***N.I. Egorov, G.V. Boriskov, A.I. Bykov, P.B. Repin,**V.N. Pavlov, I.S. Strelkov, O.M. Surdin, D.A. Maslov..... 204*

Научное издание

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
XXIII ХАРИТОНОВСКИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

03–07 октября 2022 года

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА.
ДЕТОНАЦИЯ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

EXTREME STATES OF SUBSTANCE. DETONATION.
SHOCK WAVES

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Печатается с оригинальных текстов авторов

Подписано в печать 29.09.2022. Формат 70×108/16.
Усл. печ. л. 19,6. Уч.-изд. л. ~ 19. Тираж 250 экз.
Зак. тип. 1436-2022

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23