

УДК 53.082.13

**РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ, МЕТРОЛОГИИ И ХИМИИ
УДАРНЫХ ВОЛН ВО ВНИИФТРИ****С.С. Бацанов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

Batsanov@vniiftri.ru

В работе даётся обзор основных результатов исследований ВНИИФТРИ в области физики, метрологии и химии ударных волн, прослеживаются этапы становления и динамики лаборатории высоких динамических давлений института, внедрения в научную и хозяйственную практику.

Ключевые слова: высокие динамические давления, метрология взрыва, ударные волны, физика и химия ударного сжатия.

В мае 1970 г. во ВНИИФТРИ был издан приказ о создании Лаборатории высоких динамических давлений (ЛВДД) и о назначении её руководителем автора данной статьи. Создание полноценной лаборатории потребовало время, которое оказалось минимальным благодаря поддержке и содействию авторитетных учёных и чиновников, заинтересованных в развитии физики взрыва. За годы существования лаборатории её сотрудники опубликовали ряд книг, сотни научных статей в академических и международных журналах, получили десятки изобретений, патентов. Поэтому в данном обзоре, учитывая огромный объём такой научной информации, будут рассмотрены только самые принципиальные работы в области физики, метрологии и химии взрыва.

Создание лаборатории

Инициатором создания новой лаборатории был академик С.А. Христианович, с которым ранее я работал в Новосибирском академгородке, где он был директором Института теоретической и прикладной механики, а я возглавлял Отдел физико-химии импульсных давлений (ВХИД) Института Теплофизики (ИТФ) в ранге заместителя директора института. Мы часто обсуждали научные проблемы, поэтому Сергей Алексеевич был в курсе наших работ. Отдел ВХИД был организован с целью физико-химического дополнения исследованиям Института гидродинамики (ИГД) по взрывному воздействию на твёрдые тела (сварка металлов взрывом, высоко-скоростной удар по мишеням разных материалов и т.п.). Первоначально работы ИТФ и ИГД шли совместно, но постепенно разработки нашего Отдела вышли за рамки взрывной металлообработки, был получен ряд интересных результатов по резкому увеличению эффективности катализаторов, по фазовым и электронным переходам, по химическим превращениям в ударных волнах. Всё это привело к формированию нового научного направления, химии ударного сжатия, сначала в нашей стране, а потом и за

Альманах современной метрологии, 2015, №5

рубежом (США, ФРГ, Япония), и Отдел из дополнения к ИГД превратился в его конкурента. В 1970 г. М.А. Лаврентьев (Председатель СО АН СССР и директор ИГД) предложил мне перейти с Отделом к себе в ИГД, чтобы «избежать ненужного параллелизма и повышения уровня исследований». После моего отказа у нас возникли трудности с получением и хранением взрывчатых веществ, спецтранспортом и т.д. Обсудив эту ситуацию с Христиановичем, мы пришли к выводу, что новое научное направление надо сохранить, и Сергей Алексеевич предложил мне восстановить подобную тематику во ВНИИФТРИ, где в это время он стал научным руководителем, поставив три задачи: разработку новых методов генерации, измерения и применения ударных волн для решения научных и прикладных задач. Я согласился, трудоустроил взрывников Отдела ФХИД в прикладные институты Поволжья и Подмоскovie, специалистов физико-химического профиля перевёл в Институт катализа СОАН, а сам с тремя сотрудниками – Г.С. Дорониным, А.И. Лапшиным и Е.Д. Ручкиным возвратился в Москву и приступил к созданию лаборатории во ВНИИФТРИ.

Директор Института катализа академик Г.К. Боресков, с которым я выполнил ряд исследований по взрывной активации катализаторов, в целях быстрого возобновления исследований по химии ударного сжатия безвозмездно передал ВНИИФТРИ такое оборудование, как ИК- и УФ- спектрометры, рентгеновские аппараты, пресса, печи, насосы, а также кварцевую посуду, коллекцию реактивов и монокристаллов. Всё это прибыло в ВНИИФТРИ в 1971 г., где находится и поныне. Активное оснащение ЛВДД продолжилось в 1972-1974 гг., когда я стал членом Учёного совета ВПК при Совмине СССР. Его руководители, в особенности адмирал Б.А. Киясов, для форсирования работ по оборонной тематике обеспечили нас станочным парком и, самое главное, дали поручение Ижорскому заводу Ленинграда изготовить для ВНИИФТРИ сварные взрывные камеры, объёмом 10 м^3 , которые затем мы оснастили специальными люками, спроектированными А.Н. Кузнецовым и изготовленными на Опытном заводе ВНИИФТРИ, что позволило проводить в них взрывы в вакууме или любой атмосфере с зарядами до 10 кг ВВ. Позднее одна из камер была дооборудована окном для оптических исследований и магнитной импульсной установкой, чтобы выполнять взрывы в магнитном поле с целью продления действия высокого динамического давления. Эти камеры до сих пор не имеют аналогов в мире.

Взрывные камеры были размещены на границе промплощадки ВНИИФТРИ, в кратчайшие сроки разработан проект экспериментального корпуса (корпус «Д»), и коллектив лаборатории приступил к его созданию методом народной стройки. Всей работой руководил профессиональный строитель, который получал мою зарплату профессора - совместителя в Университете (250 руб/мес), а рабочими были все мы. Большую помощь в создании казе-

мата (так стали называть корпус «Д») нам оказал главный инженер ВНИИФТРИ К.И. Казаков, предоставивший транспорт и автокран. В камерном зале каземата были сооружены разрезные фундаменты, спроектированы и изготовлены на Опытном заводе стальные платформы, на которые на амортизаторах, поглощающих колебания, установлены 10-тонные камеры, доставленные во ВНИИФТРИ мощным транспортёром по распоряжению начальника курсов «Выстрел» генерала Д.А. Драгунского. После установки камер были возведены стены корпуса, на которые положена крыша. Тем было закончено создание экспериментального корпуса для проведения взрывных работ. В этом корпусе был создан механический участок с токарным, фрезерным и сверлильным станками, а в отдельных боксах установлены гидравлические пресса на 300 и 500 тонн, вакуумная печь для нагрева до 2500°C, лабораторные камеры для детонационного синтеза и электровзрыва металлов в вакууме с регулируемой температурой, оборудован расходный склад ВМ, который в 1980 г. был аттестован разрешительной системой, и с этого времени наши взрывные эксперименты стали полностью автономными. Так во ВНИИФТРИ был создан уникальный комплекс для осуществления всех видов работ в области физики и техники взрыва.

Исследования в области физики ударных волн

Известно, что высокие динамические давления развиваются при взрыве химических или ядерных боеприпасов, высокоскоростном ударе твёрдых тел, при импульсном испарении веществ под действием лазерного облучения, при мощных электрических разрядах. Во всех этих случаях образуется ударная волна (УВ) – узкая зона сжатого вещества, которая перемещается со сверхзвуковой скоростью. Давление (P) УВ определяется соотношением

$$P = \rho D U, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества, D – скорость движения фронта УВ и U – скорость движения массы за этим фронтом. При значениях $\rho = 10 \pm 5 \text{ г/см}^3$, $D = 6 \pm 2 \text{ км/с}$ и $U = 3 \pm 1 \text{ км/с}$ из уравнения (1) следует, что $P = 180 \pm 90 \text{ ГПа}$. При увеличении скорости УВ и плотности вещества вдвое давления повышаются от 3.6 до 7.2 Мбар, которых достаточно для осуществления атомных и электронных переходов в твёрдых телах. Эти огромные динамические давления без каких-либо запретов на габариты объектов сжатия и являются мотивацией развития данного раздела физики высоких давлений, т.к. в статических прессах рост давления ограничен материалом самого пресса и всегда сопровождается уменьшением рабочего объёма ячейки. На уровне мегабар этот объём падает до нескольких кубических микрон, т.е. результатом действия сверхвысоких статических давлений является не новый материал, а только новая информация.

Применение УВ в физике твёрдого тела и материаловедении началось в 1956 г., когда на кривой ударного сжатия железа был обнаружен излом при 13 ГПа, соответствующий $\alpha \rightarrow \epsilon$ фазовому переходу [1]. Перемещение атомов на расстояния порядка длин связей, необходимое для изменения структуры тела за характерное время действия УВ (10^{-7} – 10^{-6} с), представлялось маловероятным, учитывая незначительную скорость диффузии атомов в твердом теле, тем более под давлением. Однако вскоре последовали многочисленные экспериментальные подтверждения таких фазовых переходов в других веществах, что привело к важным практическим и научным результатам, которые будут рассмотрены ниже. Ещё более неожиданным оказался излом на кривой ударного сжатия смеси олова и серы, установленный в нашей работе [2], который означал синтез SnS, тогда как по теории [3] для твёрдофазного синтеза нужно время на 6 порядков больше длительности УВ. Для объяснения данного противоречия мной была предложена модель вынужденной диффузии атомов в смеси твёрдых тел, учитывающая различие массовых скоростей компонентов смеси (U_1 и U_2) [4,5]. Например, если $\Delta U = U_1 - U_2 = 1$ км/с, тогда частицы одного компонента будут двигаться быстрее частиц другого компонента на 1 мкм/мкс. Поскольку размеры частиц в образцах, используемых в УВ-экспериментах, имеют микронные размеры, частица 1-го сорта успеет за микросекунду пройти сквозь частицу 2-го сорта. Таким образом, ΔU есть скорость диффузии атомов в сжатых твёрдых телах со скоростью порядка мкм/мкс, которая, в отличие от условий статического сжатия, будет расти при увеличении давления [4]. Данная модель позволила оценить количественные возможности и выявить особенности твёрдофазного синтеза в УВ [6].

Эффект действия взрыва на вещество зависит от величины динамического давления, максимум которого можно достичь при столкновении ударных волн. Образующаяся при этом маховская конфигурация будет двигаться со скоростью, обратно пропорциональной синусу угла столкновения плоских УВ. В нашей работе [7] было реализовано образование такой конфигурации при схлопывании волн под углом в 22° , что позволило метнуть компактный ($1/3$ плотности монолита) порошок алюминия со скоростью 22 км/с в атмосферу и 50 км/с в вакуум; это до сих пор является рекордными значениями. Энергия при лобовом столкновении таких потоков оказалась столь большой, что вызвала испарение металлического вольфрама, в котором был просверлен узкий цилиндрический канал для движения струй. Оценки В.П. Ступникова показали, что при соударении, например, плотных порошков гидрида лития возможен микротермоядерный взрыв. Развитие и применение этого метода в одном из прикладных НИИ привело к очень важным результатам.

В работе с А.И. Мартыновым, доложенной на конференции

Американского физического общества, был развит гидродинамический метод оценки параметров маховской волны в цилиндре в зависимости от разности давлений по его оси и на стенках, создаваемых взрывом [8]. Детальное экспериментальное исследование возникновения и развития маховской УВ в цилиндрических ампулах в работе с Г.С. Дорониным, Б.И. Заславским и др. [9] привело к важному метрологическому результату – скорость УВ в цилиндре, заполненном любым материалом, через 1-2 калибра становится равной скорости детонации окружающего этот цилиндр ВВ. Поскольку D для всех ВВ известны, сразу получаем важную информацию об уравнении состояния любого вещества с известной плотностью.

Экспериментальное изучение развития маховского диска в цилиндрической ячейке показало изменение его размера и скорости при движении вдоль оси цилиндра в инертной или реагирующей порошкообразной среде. Этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе данной статьи.

Как видно из уравнения (1), давление можно повысить не только за счёт скорости УВ, но и плотности исследуемого материала, для чего его обычно «утяжеляют» добавками веществ с большей плотностью, например, вольфрама. Другой способ увеличения скорости ВВ был реализован И.Н. Темницким, который «поджал» менее скоростное ВВ (аммонит) высокоскоростным ВВ (гексогеном) и тем вызвал «пересжатую детонацию» с ростом скорости УВ на 25-30%, которую удалось поддерживать постоянной на расстоянии 10 см. Ещё одним способом увеличения плотности ВВ явилось сжатие магнитным полем сферического заряда ПВВ, помещённого внутри соленоида, повысившим импульсное давление, по оценке А.Д. Сахарова, до 100 Мбар. Описание этого ударно-магнитного метода сжатия передано в один из прикладных НИИ для применения в лабораторных и натурных экспериментах.

Следующим шагом в развитии техники высокоскоростного удара в ЛВДД явилось увеличение скорости метания ударников на баллистической установке (легкогазовой пушке). В нашей стране имелась система «Прогресс», которая метала твёрдые тела со скоростью до 3.5 км/с, тогда как в США была достигнута скорость в 7 км/с, а с помощью рельсотронов – до 14 км/с. Об этом результате как выдающемся научном достижении объявил президент США в послании к нации. Получить такую скорость движения ударников на рельсах с помощью движения магнитного поля оказалось возможным при шлифовке поверхности разгонного участка длиной 3 м с точностью в 1 мкм для снижения потери энергии за счёт трения, тогда как наши станки такое качество шлифовки давали только на длине до 1 м. Продажа в СССР (а потом и в РФ) американских станков с такой точностью шлифовки запрещена, а учитывая квадратичную зависимость давления от скорости УВ, легко представить, насколько наши «партнёры» вырвались вперёд.

Учитывая технические трудности в использовании рельсотронов, мы решили пойти другим путём, используя баллистическую установку. Возбудить движение твёрдого тела сразу со скоростью $U > 10$ км/с нельзя, т.к. энергия, которая нужна для этого, превышает суммарную прочность химических связей в любом твердом теле, т.е. тело просто испарится. Поэтому создать высокую скорость метания мы планировали путём постепенного разгона, используя обычную легкогазовую пушку, способную метнуть ударник со скоростью в 1.5-2 км/с, поставив по пути его движения заряды ВВ определённой формы, пересекая которые ударник вызывает взрыв и получает дополнительный импульс. Здесь важно вовремя взорвать такой заряд, чтобы он подтолкнул, а не замедлил скорость метания. Расчёт показал, что добавить 0.5 км/с к скорости тела можно с помощью таких зарядов ВВ, которые вполне безопасны для сохранности установки. Тогда трасса с 6-8 взрывными ускорителями может дать в итоге скорость метания тела в 6-7 км/с. Эта идея в 1985 г. была доложена Президенту АН СССР А.П. Александрову, получила его одобрение, а затем и финансирование. Кроме меня, на этом совещании были и доклады с другими проектами, и каждый раз Анатолий Петрович спрашивая, когда будет закончена работа, и получив ответ, говорил: помножим на «пи». Я был уверен, что утроение сроков нам не грозит, т.к. в нашем проекте участвовало КБМ во главе с выдающимся учёным и организатором С.П. Непобедимым. Однако Президент Академии наук оказался прав – через год началась перестройка, противники стали «партнёрами» и поддержка этих работ вообще прекратилась.

Поскольку волновая и массовая скорости для большинства веществ связаны линейным уравнением (ударной адиабатой)

$$D = a + b U, \quad (2)$$

где a – скорость звука, b зависит от энергии связей и обычно $= 1.5 \pm 0.2$, для оценок ударных адиабат важно знать значения скоростей звука в исследуемых материалах. Метод измерения a в пористых образцах разработан во ВНИИФТРИ С.С. Секояном и В.Р.Шлегелем (см. [10]), а теоретическое вычисление – автором этой статьи [11]. Анализ мировой литературы, вместе с собственными данными, позволил создать подробную картотеку ударных адиабат конденсированных веществ [12] для определения динамических давлений тел в разных агрегатных состояниях, зная лишь одну из скоростей УВ согласно уравнениям (1, 2).

С 1970 до 1972 гг. взрывные эксперименты проводились только автором этой статьи на полигонах ряда НИИ Подмосковья и Тверской области, т.к. автор имел права руководителя взрывных работ (№ 3 в АН СССР), а цена штатных ВВ была столь низкой (до 70 коп/кг), что их свободно предоставляла принимающая сторона. После 1972 г. в состав лаборатории вошли А.И. Мартынов и И.Н. Темницкий, затем С.Л. Фомин, А.С. Шмаков, Д.Л. Гурьев

и С.М. Гаврилкин, которые сдали экзамены на право проведения взрывных работ, получили книжки взрывников и активно включились в экспериментальные работы. В это же время мы выполнили ряд экспериментов и на полигоне Харьковского авиационного института. Однако поскольку определять ударные адиабаты на полигонах невозможно, такие задачи решались в совместных работах с ВНИИЭФ [13,14].

Наиболее важным достижением ЛВДД в области физики взрыва, по общему мнению специалистов, является создание нового метода – динамико-статического сжатия вещества, в котором высокое динамическое давление переходит в статическое в ходе разгрузки УВ [15]. Это достигается путём помещения в ампулу сохранения, кроме объекта сжатия, рабочего тела, испытывающего обратимое фазовое превращение 1-го рода при высоком давлении или температуре. Вода была первым таким телом, которое после спада УВ за счёт высокой остаточной температуры превращалось в пар, а ампула – в автоклав, где возникало высокое газовое давление [16,17]. Однако бризантность такой сборки оказалась очень высокой, работа с ней опасной, и в статье [18] было предложено использовать в качестве молекулярного пресса твердое тело – спрессованный порошок KBr, в котором происходит фазовый переход с 18% уменьшением объёма при $P \geq 20$ кбар. Это вещество на спаде УВ при 20 кбар должно вернуться в исходное состояние с восстановлением объёма, но жёсткая ампула не позволяет ему расшириться, и внутри ампулы создаётся напряжение с давлением ≈ 20 кбар.

Несмотря на простоту схемы, в её реализации есть большие технические трудности, оптимизация которых потребовала много времени. Форма ампулы, состав металла оболочки, толщина стенок и условия их термической обработки должны обеспечить такую «мягкость» ампулы, чтобы она передала давление в рабочее тело в процессе нагружения, но после взрывной обработки оболочка должна стать такой жёсткой, чтобы удержать внутри её высокое статическое давление. Результаты применения метода динамико-статического сжатия (ДСС) для прессования жёстких порошков алмаза, бора, вольфрама и т.п. до монокристаллического состояния, а самое главное – фазовый переход графит $\rightarrow$ алмаз на примере нитрида бора со 100% выходом в виде монокристаллического тела с хорошими механическими свойствами без технологических подробностей были опубликованы в [19, 20]. Важную роль в изготовлении и испытании ампул ДСС сыграли В.П. Сёмин, Г.Г. Долгушин, В.А. Туманов, В.К. Коробов, В.В. Куманин, С.М. Гаврилкин, а развитие УВ внутри такой ампулы и физико-механические следствия ДСС в h-BN были изучены в совместной работе интернациональной группы учёных [21]. Весьма важно, что прессование порошков методом ДСС происходит без сплавления частиц с увеличением их размеров, что открывает перспективы формирования монокристаллических нано-материалов. Этот метод перспективен и

для моделирования подземных экспериментов, такое предложение (совместно с Е.П.Велиховым) было направлено в Госкомитет по атомной энергии.

Другое сочетание импульсного и статического давлений было осуществлено при электрическом разряде в металлическом порошке, зажато наковальнями Бриджмена при $P \leq 100$ кбар, что позволило в импульсном режиме достичь $P = 1$ Мбар, а затем поддерживать длительное время статическое давление на уровне десятков кбар [22-24]. Изучение свойств металлов в этих условиях показало, что температура в десятки тысяч градусов (из-за электрического разряда) [24] при сохранении объёма металла практически не влияет на его электропроводность [25], что было совершенно неожиданным, т.к. по общепринятому мнению, при росте температуры электросопротивление металлов должно расти. Значит, проводимость металла при нагревании определяется только его объёмом.

Принципиально новое направление в физике взрыва возникло в ЛВДД в 2005 г., когда вице-президент АН академик В.Е. Фортов и директор ИС-МАНа профессор Ю.А. Гордополов предложили нам экспериментально установить возможность образования УВ в результате не разложения, а синтеза химических веществ. Физически эта задача сводится к нахождению условий, при которых УВ-синтез АВ из компонентов А и В произойдёт с увеличением объёма. Этому условию, с моей точки зрения, отвечают соединения типа $A^{III}B^V$, например, ZnS и $ZnTe$, если их синтез произойдёт при повышенном давлении в УВ. В работах с Д.Л. Гурьевым было установлено, что действительно, образование $ZnTe$ в подогретой смеси порошков $Zn+Te$ происходит в УВ [26], а в случае ZnS [27] синтез идёт и без предварительного нагревания с увеличением скорости волны. Это явление было названо твёрдофазной детонацией, и в статьях [28, 29] дана теория данного эффекта. Канадские учёные [30] воспроизвели нашу работу, получили близкие значения скоростей движения волны, возникшей при ударном сжатии смеси $Zn+S$, но утверждали, что обнаруженное ими движение механического возмущения не является УВ, т.к. по их оценке скорость звука в этой системе больше скорости волны, возникшей в реагирующей смеси. Однако прямое измерение скорости звука в прессованном образце из порошков $Zn+S$ в нашей работе [10] показало, что ударный синтез ZnS действительно генерирует волну со сверхзвуковой скоростью. К сожалению, наш институт лишился лицензии на проведение работ с применением ВВ, и мы не смогли развить дальше исследования этого нового физического явления. Теоретически здесь возможно периодическое изменение скоростей УВ, т.к. с ростом скорости и увеличением динамического давления может произойти фазовый переход типа $B3 \rightarrow B1$ в ZnS с повышением плотности и, тем самым, ликвидируется объёмный «поршень» – движущаяся сила процесса детонации. Как только при затухании УВ и снижении давления начнётся обратный переход ZnS в

структуру ВЗ с понижением плотности, процесс ускорения УВ возобновится [31].

В последнее время была выполнена теоретическая оценка предельного сжатия металлов на основе законов сохранения известных ударных адиабат [32].

Из законов сохранения массы и импульса на ударном фронте следует, что

$$V/V_0 = 1 - D/U, \quad (3)$$

где V_0 и V — исходный и конечный объёмы. Комбинируя уравнения (2) и (3), получаем для $D \rightarrow \infty$

$$V_{\min}/V_0 = 1 - 1/b, \quad (4)$$

Где в случае металлов $V_{\min}$ металлов отвечает ультраплотной упаковке, при которой «выжимаются» валентные электроны и сокращаются расстояния до контакта катионов. Зная объём тела, можно определить расстояние между катионами, а значит, и сами их радиусы, которые до сих пор вычислялись косвенными методами. Привлечение данных по статическому сжатию позволило впервые экспериментально создать полную экспериментальную систему радиусов катионов в разных валентных состояниях [33].

Структура предельно сжатых металлов представляет собой сетку контактирующих катионов, в ячейках которой локализованы валентные электроны, что снижает проводимость металлов вплоть до уровня полупроводников. Измеренные величины давлений переходов Na [34] и Li [35] в диэлектрики оказались близки к нашим оценкам. В случае поливалентных металлов достигших их минимальных объёмов, дальнейшее сжатие приведет к электронным переходам с повышением зарядов, что ещё предстоит проверить на опыте, как и предсказанные значения давлений фазовых переходов металл $\rightarrow$ диэлектрик для 35 других металлов.

Метрология высоких динамических давлений

Метрологические исследования можно условно разделить на два типа — на фундаментальные, которые помогают открывать новые явления природы, и на прикладные, которые играют важную роль в создании эталонов, позволяющих оценить точность и достоверность экспериментальных данных, корректность технических решений. К первому типу можно отнести измерение лордом Рэлеем в 1892 г. плотности азота, выделенного из воздуха, превысившей в 3-м десятичном знаке плотность азота, полученного при разложении химических веществ, что привело к открытию новых элементов Периодической системы — инертных газов. Не претендуя на подобный уровень значимости, укажем на важность открытия изломов на кривых ударной сжимаемости веществ из-за фазовых переходов [1] или твердофазных химических превращений (см. [2]). Если такие события в твёрдых телах происходят в области высоких динамических давлений, значит, с помощью взрыва можно получать такие фазы, как алмаз и боразон, о чём пойдёт речь *Альманах современной метрологии, 2015, №5*

в следующем разделе настоящей статьи.

Создание шкалы для динамических давлений началось после обнаружения в УВ фазовых превращений сперва в железе, а затем и в других веществах, которые показали близость давлений фазовых переходов в статическом и динамическом режимах (см. обзор в [36]). Мы в ЛВДД основное внимание уделили отклонениям от этого правила, т.к. в практически важных веществах – графите и нитриде бора именно наличие дефектов резко изменяло давление фазового перехода, вплоть до его полного запрета при высокой концентрации дефектов. Причина состоит в том, что микротрещины и атомные вакансии в структуре вещества являются «ловушками», которые захватывают атомы при их движении, необходимом для создания новой структуры, и тем затрудняют или прекращают вовсе фазовый переход. Изучение реальной структуры твёрдых тел после ударного сжатия или размола в шаровых мельницах позволило установить предельные концентрации дефектов, выше которых невозможны фазовые переходы под действием УВ [33-39]. Термические условия и структурное состояние вещества, необходимое для осуществления фазовых превращений в УВ, будут описаны в следующем разделе этой статьи.

Если методики определения динамического давления путём измерения скоростей УВ разработаны очень хорошо, созданы совершенная аппаратура и разнообразные измерительные комплексы, то точное измерение температуры ударного сжатия до сих пор является проблемой, в решении которой наша группа сыграла пионерскую роль, а в дальнейшем продолжила работу совместно со специалистами Института химической физики РАН.

Измерения термодинамической температуры веществ в УВ затруднено спецификой процесса, в котором объекты исследования движутся с огромными скоростями. За рубежом (в Бельгии) оценки температуры делались по откликам датчиков в стенках взрывной камеры на удар тела, с пересчётом кинетической энергии на температуру. Точность таких оценок была очень низкой, поэтому мы решили измерять температуру вещества в ампуле, закреплённой на массивной плите («якоре»), в основании которой сделано отверстие для ввода в ампулу термопары [40]. Этот метод позволил с помощью тонких термопар определять температуру сначала через 10^{-2} с, а затем и через 10^{-3} – 10^{-5} с после взрыва [41].

Нами был разработан и калориметрический метод измерения температуры. Ампулу с веществом после подрыва извлекали из взрывной камеры через строго фиксируемое время (от десятков секунд до 1-2 минут) и помещали в водяной калориметр. После окончания тепловыделения вычисляли температуру ампулы (1-ое приближение), которую затем извлекали из калориметра, нагревали в печи до более высокой температуры и снова помещали во взрывную камеру, чтобы охлаждение шло в тех же условиях, как и после

взрывного воздействия. Кривую охлаждения ампулы записывали с помощью термопары. Зная температуру через точно известное время после взрыва, по этой кривой определялась температура в нуль времени, т.е. в момент взрыва. Расхождение между этими термодинамическими процедурами определения температуры составило несколько процентов [11].

Строго говоря, полученные указанными методами значения температуры характеризуют тело после разгрузки, т.н. «остаточную температуру». Конечно, за микросекунду тело не может значительно охладиться, тем не менее, интересно было измерить температуру в сам момент взрыва с помощью оптических методов. В работах совместно с лабораторией М.Ф. Гогули из ИХФ РАН [42,43] оптическим пирометром были измерены ударные температуры как инертных тел, так и реагирующих смесей Sn+S и Sn+Te. Опыт показал, что твёрдофазное химическое превращение завершается через 10^{-7} с после взрыва, причём «оптическая температура» была на $\sim 10\%$ выше остаточной термодинамической температуры. Это расхождение вызвано не столько охлаждением тела за промежуток времени от 10^{-7} до 10^{-5} с, сколько чисто методическими причинами, т.к. в оптической пирометрии яркость свечения переводят в температуру по модели абсолютно чёрного тела, а самые яркие участки поверхности разогретого тела принимают за характеристику всего образца, что приводит к завышенным оценкам.

В рамках традиционной метрологии А.И. Мартыновым, П.В. Пороховым и С.Л. Фоминым в 1992-1994 гг. разработаны, а на Опытном заводе института изготовлены две ударных трубы для измерений динамических давлений до 1.6 ГПа, которые затем были аттестованы в качестве УВТ; одна для РФ, другая для КНДР (по договору с ЮНИДО).

В последнее время мной было предложено Службе стандартных справочных данных вводить в виде дополнения к составу и свойствам материалов их размеры в качестве 3-й характеристики. Это важно потому, что физические свойства тонко дисперсных и, тем более наноматериалов, могут изменяться на десятки и даже сотни процентов. Для обоснования предложения мной был осуществлён простой эксперимент: двум студентам из МИЭТа, проходившим дипломную практику в ЛВДД, дали одинаковые образцы кристаллов LiF и предложили растереть их в ступке одному в течение 5, другому в течение 20 минут, после чего измерить диэлектрические константы этих образцов. Результаты оказались такими: у «5-минутного» образца $\epsilon = 9.5$, у «20-минутного» $\epsilon = 160$, тогда у монокристалла $\epsilon = 9.0$. О каком единстве измерений можно говорить при такой зависимости ϵ от дисперсности объектов измерения? Однако наш проект не был поддержан Росстандартом. Плохо, если такой же подход появится за рубежом, и тогда нам можно будет догонять и сличать.

Исследования в области химии ударных волн

Термин «химия ударных волн» (“shock chemistry”) означает механическое сохранение объекта ударного сжатия и изучение его физико-химических свойств обычными методами при нормальных термодинамических условиях. Эксперименты с сохранением были начаты в ИХФ АН СССР в 1956 г. Ю.Н. Рябининым [44], который попытался превратить графит в алмаз под действием высоких динамических давлений в толстостенных цилиндрических ампулах сохранения. Фазовый переход не был обнаружен им при сжатии самых разных углеродсодержащих материалов, что он объяснил «нехваткой времени» для перестройки атомов при фазовом превращении. Нами в 1962-1963 гг. были разработаны простые системы сохранения продуктов УВ-сжатия, после чего мы приступили к систематическим исследованиям, в ходе которых обнаружили новые химические превращения и образование атомных и электронных дефектов при действии взрыва на вещество. В частности, в ударно-сжатых веществах выявлены дефекты радиационного типа и дано объяснение этому явлению. Поскольку при сверхвысоком давлении любое тело приобретает металлические свойства и в нём появляются свободные электроны, то при движении УВ сверху вниз в сжимаемом цилиндре происходит перемещение металлической зоны в том же направлении. Следовательно, в цилиндрической ампуле за фронтом УВ с огромной скоростью будет двигаться поток электронов, который при ударе об основание ампулы может создать тормозное излучение рентгеновского типа. Действительно, опыт показал, что облучение NaNO_3 дозой в 10^3 рентген приводит к таким же дефектам, как и взрывное сжатие этого материала. При ударном сжатии были осуществлены уникальные фазовые переходы с понижением плотности в UF_4 , Nd_2O_3 и BN , которые в принципе не могут произойти при статическом сжатии или нагревании. Эти результаты были доложены на Сессии Отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР в марте 1966 г. и опубликованы в статье [45].

Представленные данные Сессия определила как появление нового научного направления – химии ударного сжатия, что стимулировало дальнейшие работы, и уже в следующем году было обнаружено и изучено образование маховской УВ в цилиндрических ампулах, где наиболее интенсивно происходят превращения, а также впервые сохранены после взрывного воздействия монокристаллы, изучены их реальные структуры и механические свойства [46].

С 1970 г. это направление работ было продолжено во ВНИИФТРИ. Учитывая специфику нашего института и практическую важность сверхтвёрдых материалов (алмаза и BN), образующихся при высоком давлении, мы приняли измерение времени протекания фазовых превращений по изучению структуры и температуры продуктов УВ-сжатия. Именно измерения остаточной температуры в сохранённых телах позволили понять причину огром-
Альманах современной метрологии, 2015, №5

ной разницы в степени перехода графита в алмаз: 100% по данным кинематических измерений и всего несколько процентов в экспериментах с сохранением. Оказалось, что это противоречие обусловлено термической стабильностью алмазной фазы, т.к. для фазового перехода нужно сверхвысокое давление, но после спада УВ остаточная температура в ампуле сохранения достигает 900-1000°C, что переводит в графит образовавшийся алмаз. Для предотвращения отжига алмаза в ИХФ вводили в состав исходной фазы «холодильники» – тела с высокой теплоёмкостью, в частности воду. Для устранения отжига алмаза я пошёл другим путём, а именно заполнил весь свободный объём ампулы водой, которая после разгрузки УВ из-за высокой температуры превращалась в пар, а ампула становилась автоклавом, где создавалось высокое давление, при котором и происходило охлаждение алмаза. Как сказано выше, из-за большой брызгантности такой сборки мы в дальнейшем перешли на использование в качестве «молекулярного пресса» спрессованного порошка KBr. Наиболее подробно было изучено превращение графитной фазы в алмазную форму на примере BN (см. [15]).

Более простые прочные ампулы сохранения, выдерживающие внутреннее давление до 4 кбар, были использованы для УВ-получения твёрдых пен. Для этого в ампулу помещался порошок исследуемого материала (SiO_2 , GeO_2 , SnO_2), перемешанный с определённым количеством ВВ (гексогена), которая нагружалась с помощью аммонита. Ударное сжатие такой ампулы приводило к внутреннему взрыву и формированию пенообразного материала [47]. Плотность такой пены определяется долей ВВ в обжимаемой смеси. Таким методом можно получать твёрдые пены высокотемпературных материалов любой заданной плотности, что перспективно для промышленного применения, например, для каталитического дожигания выхлопных газов автомобилей и других аналогичных задач, где требуется большая поверхность катализаторов.

Наряду с известными модификациями, в первой же работе по взрывному сжатию гексагональной фазы BN с повышенной концентрацией дефектов нами было обнаружено образование в небольших количествах новой фазы с уникальными свойствами, названной Е-фазой (от слова «explosion» – взрыв) [48]. Эта фаза была воспроизведена затем в десятках работ разными методами – от динамических до гидростатических, её свойства хорошо изучены, и результаты исследований Е-BN обобщены в [49]; последние работы по синтезу довольно крупных кристаллов Е-фазы и изучению свойств этого материала опубликованы китайскими учёными [50, 51]. Самое интересное состоит в том, что Е-фаза является промежуточной стадией в процессе перехода от графитной структуры к алмазной, однако её структура до сих пор строго не определена. Однако параметры элементарной ячейки Е-фазы близки к таковым у фуллерена, что позволило нам предположить: Е-BN –

это фуллерен [52], а украинским учёным впоследствии удалось создать модель её строения на этой основе [53]. Таким образом, с помощью взрыва фуллерен из BN был открыт за 20 лет до открытия углеродного фуллерена, за что три товарища получили Нобелевскую премию!

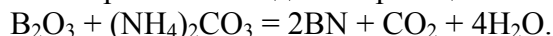
Если образование E-фазы BN происходит при ударном сжатии дефектной графитной фазы с пониженной плотностью (турбостратный, t-BN) [47], то обычный фазовый переход h-BN $\rightarrow$ w-BN совершается при таком же воздействии только тогда плотность исходного образца $\rho \geq 2.0 \text{ г/см}^3$, что достигается нагреванием t-BN до $T \geq 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ [54]. Следовательно, неудача Ю.Н. Рябикина со взрывным переходом графита в алмаз вызвана не нехваткой времени, а низкой кристалличностью использованных объектов сжатия. Это стало понятным из результатов действия сильнооточного релятивистского электронного пучка (на установке «Кальмар» Курчатовского НЦ) на вещества, помещённые в миниатюрные ампулы. Такой пучок в фокальном пятне даёт давление в 2.5 Мбар в течение 10^{-7} с, что хватило для переходов h-BN $\rightarrow$ w-BN, графита в гексагональный алмаз и для синтеза карбидов меди и железа [55].

Динамические давления и температуры достигают наивысшего значения в осевой части цилиндрической ампулы, где развивается маховская волна и где, главным образом, происходят химические превращения. Наше исследование [56] показало, что в случае УВ-сжатия реагирующей смеси сохранённая ампула сжалась меньше, чем при аналогичном нагружении инертного вещества того же состава. Это обусловлено расширением тела из-за выделения тепла в ходе экзотермической реакции, что ведёт к уменьшению массовой скорости и, в соответствии с моделью Мартынова-Бацанова [9], к росту диаметра головной УВ. Этот эффект проявился в изменении размеров откольной тарелки от дна ампулы, где при сжатии инертного материала образуется кратер диаметром 1 и глубиной 0.5 мм, а в реагирующей смеси – 2.5 и 1.5 мм соответственно. Таким образом, механические изменения в ампулах сохранения после ударного сжатия – это ещё один критерий оценки времени химических превращений в УВ.

При ударном сжатии инертных тел с низкой температурой плавления (T_m) в цилиндрической ампуле периодически изменяется диаметр маховского шнура: как только ударная температура достигает T_m , тело плавится, поглощается теплота и диаметр сужается, при дальнейшем развитии головной волны процесс ударного плавления и изменение диаметра маховского шнура может повториться. Более подробное изложение результатов работ по физико-химии ударного сжатия дано в моих обзорах [57, 12] и книге [58], где основное внимание уделено явлениям, которые протекают только в импульсном режиме, например, фазовым переходам в кристаллах с разрежением атомной структуры, что может произойти только под действием УВ. Эти аномальные превращения в своё время стали предметом интенсивной диску-
Альманах современной метрологии, 2015, №5

ссии в стране и за рубежом. В прошлом году моя книга “*Effects of Explosion on Materials*” Издательством Шпрингера была в электронной форме переиздана в США, т.е. за 20 лет полученные в нашей лаборатории результаты не потеряли научного значения.

В работах с В.П. Бокаревым и И.Н. Темницким был установлен параллелизм в действии УВ и давления со сдвигом на активирование катализаторов [59] и фазовые переходы [60]. Позднее был осуществлён механохимический переход h-BN в w-BN в планетарной мельнице [61], а затем [62] синтез таким же методом w-BN с хорошим выходом по реакции



По имеющейся у меня информации, этот процесс рассматривается в ФРГ на предмет его промышленного применения.

В последние годы фундаментальные исследования сотрудников ЛВДД были сосредоточены на детонационном синтезе наноалмазов и их электрофизическом изучении. Образование наноалмазов при детонации смеси графита и мощного ВВ или смеси штатных взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом для предотвращения окисления углерода стало понятным из результатов предыдущих кинематических и термодинамических исследований ударного сжатия твердых тел. При взрыве исходного образца в свободном объёме мгновенный разлёт продуктов детонации быстро охлаждает образовавшийся алмаз. Дополнительное охлаждение, усиливающее закалку алмаза, достигается водяной (ледяной) оболочкой взрывной сборки. Выход алмаза при такой технологии доходит до 80%, а использование вакуумной камеры, осуществлённое С.М. Гаврилкиным, снизило загрязнение алмаза из-за воздействия УВ на стенки стальной взрывной камеры до долей процента. Хотя синтез детонационного алмаза сейчас в нашей и других странах осуществляется в полупромышленных масштабах, такой синтез c-BN не был осуществлён до недавнего времени. Причина в том, что вода, имеющаяся в продуктах взрыва, гидролизует BN, и фазовый переход фиксируется на уровне следов. Применение такого ВВ как бензотриоксофураксан ($\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$), не имеющий в продуктах детонации воду, сразу повысил выход c-BN до 80% [63].

Детонационный алмаз сейчас является единственным наноматериалом, производимым в промышленных масштабах с низкой стоимостью, т.к. для синтеза используются ВВ после окончания сроков гарантийного хранения, следовательно, экономятся значительные средства, которые ранее тратились на их утилизацию. Первоначально детонационный наноалмаз (ДНА) применялся как абразивный материал, вводился в качестве добавок в различные композиционные составы, например в гальванические покрытия и материал шин для автомобилей, но позднее открылись новые направления его применения в микроэлектронике и особенно в медицине, где частицы ДНА благодаря их малому размеру (~ 5 нм) действуют как транспортёры ле-
Альманах современной метрологии, 2015, №5

карственных средств, а способность изменять цвет люминесценции в зависимости от температуры позволяет её измерять в живом организме. Сейчас биомедицинское применение ДНА развивается очень интенсивно в США, Японии, Китае, Германии и Франции с использованием самой совершенной аппаратуры, часто объединёнными усилиями учёных разных стран. У нас синтез и изучение ДНА проводится в РАН, МГУ, НИИ С-Петербурга, Бийска, Сарова, Красноярска (см. [64, 65]). Однако, если пионерские работы по синтезу ДНА были выполнены в нашей стране, то в изучении физико-химических свойств и в их применении мы существенно уступаем зарубежным коллегам.

Сотрудники ЛВДД в 2008 г. начали цикл исследований электрофизических свойств ДНА с чисто метрологических позиций, т.к. в этих свойствах наиболее ярко проявляется размерный эффект. Основные результаты нашей работы на сегодняшний день могут быть сформулированы таким образом: 1) ничтожные концентрации ДНА в воде (0.01-0.1%) коренным образом изменяют её электро-физические свойства [66, 67]; 2) диэлектрическая константа (ϵ) ДНА на 6 порядков больше монокристалльного значения ϵ , а в многоводных гидратах ϵ повышается до 10^{15} – 10^{23} [68]; 3) ДНА в коллоидных растворах стимулируют формирование сложных биологических объектов, что необходимо учитывать при медицинских применениях этого материала и представляет интерес для методологических вопросов возникновения живых объектов из неорганических источников.

Физико-химические и структурные исследования ДНА и их применение в различных областях науки, техники, биологии и медицины описаны в сотнях статей, интенсивно обсуждаются на международных конференциях, но весьма важный вопрос о механизме образования алмазных кластеров, имеющих размер ~ 5 нм, остаётся ещё открытым для дискуссии. Вначале причину малого размера ДНА объясняли недостатком времени высокого давления в процессе детонации, но когда в работе [69] вес заряда (а значит и время) был увеличен в 1000 раз, а размер ДНА не изменился, возникло предположение, что алмазный кластер образуется в химпике, следовательно, дальнейшее действие динамического давления уже не влияет на его размер. Однако изучение процесса формирования кластера методом синхротронного просвечивания в режиме реального времени показало, что его рост реально продолжается в течение двух микросекунд [70]. Следовательно, процесс роста происходит вне зоны химической реакции, и его ограничение регулируется каким-то другим механизмом. В моей работе [71] предложен вероятностный подход к формированию частиц ДНА. Дело в том, что продуктами детонации сплава гексогена и тротила, т.е. обычных ВВ, используемых для синтеза ДНА, являются, кроме углерода, 5-6 атомов или молекул других сортов в наибольшей концентрации и ещё 3-4 другие молекулы в меньшей доле. Если ограничиться только минимальным числом компонентов,

Альманах современной метрологии, 2015, №5

то ясно, что вероятность столкновения атома углерода с таким же атомом из 5 возможных компонент детонационного облака равна $1/5$, столкновение C_2 с третьим атомом С вероятно на $1/25$ и т.д. Таким образом, образование кластера даже из 10 атомов углерода является невероятным, тогда как реально образуются частицы с $\sim 10^4$ атомов. В нашей работе термодинамическим методом показано, что детонационное облако неоднородно, оно состоит из слоёв атомов разного сорта, в том числе обогащенных углеродом, что снимает вероятностный запрет на образование и рост частиц ДНА. К выводу о стратификации детонационного облака пришёл и автор [72] при анализе ударных адиабат продуктов детонации. С.М. Гаврилкин предложил наглядную картину детонационного облака: поскольку кинетическая энергия ($E = mv^2/2$) определяется температурой, единой для всех продуктов детонации, разные атомы будут двигаться с разными скоростями в зависимости от $\sqrt{m}$, что и ведёт к расслоению детонационного облака. Исходя из вероятностного механизма, мы синтезировали ДНА из бензотриоксофуросана, где нет водорода и потому число продуктов детонации уменьшено в несколько раз и размер кластера оказался равным ~ 40 нм [73].

Такой ДНА не содержит в своём составе водорода и потому представляет интерес для ядерной физики и технологии. К нам обратились представители Французского и Шведского ядерных центров с просьбой поставлять им этот материал в килограммовых количествах «для чисто исследовательских целей» за хорошие деньги, но поскольку безводородный ДНА, на самом деле, является хорошим источником тепловых нейтронов и может иметь двойное применение, мы отказались. Наше обращение в Росатом с предложением о поставках БВДНА российским организациям, к сожалению, осталось без ответа.

В диссертационной работе С.М. Гаврилкина был использован физический фактор усиления стратификации детонационного облака, а именно детонация ВВ в магнитном поле. Идея эксперимента в том, что продуктами детонации являются как парамагнитные, так и диамагнитные частицы и, следовательно, в магнитном поле произойдёт дополнительное пространственное перераспределение атомов и радикалов, имеющих диа- или пара-магнитные свойства. При одновременном инициировании взрыва магнитного импульса влияние последнего не является максимальным, т.к. его длительность на 3 порядка больше, чем у взрыва, тем не менее, даже при такой простейшей постановке опыта размер частиц ДНА изменился – вместо 5 нм наблюдались частицы размером 3 и 10 нм. Очевидно, что при согласовании пиков импульсного давления и магнитного поля эффект может быть усилен, но принципиально важно, что изменение концентраций диа- и парамагнитных частиц в зонах детонационного облака изменяет их однородность, что сказывается на раз мерах частиц ДНА по вероятностным причинам. Конечно, меха-

низм роста частиц при детонации в магнитном поле требует специального исследования.

Заключение

Приведенные выше научные результаты послужили для моих сотрудников и аспирантов основой для защиты 5 диссертаций на степень кандидата физико-математических наук (Г.С. Доронин, А.И. Мартынов, А.В. Паршуков, Д.Л. Гурьев, С.М. Гаврилкин) и ещё столько же на степень кандидата химических наук (А.И. Лапшин, Л.И. Копанева, В.П. Бокарев, К.А. Тлеулиева, Е.В. Лазарева).

В этот период времени наша лаборатория консолидировала работы РФ в области физики, метрологии и химии УВ, организовав в п. Менделеево серию Всесоюзных симпозиумов по импульсным давлениям (1-й в 1974 г., 2-й в 1976, 3-й в 1979 г.), в которых участвовали работники вузов, академических и прикладных НИИ. По итогам симпозиумов были изданы тезисы, а в ряде случаев и полные тексты докладов. В 1984 г. ЛВДД инициировала советско-американский семинар по физике УВ [74], в котором приняли участие сотрудники Ливерморской, Лос-Аламосской и Сандиа лабораторий США и сотрудники ВНИИФТРИ, ИХФ, ИГФ РАН и ВНИИЭФ.

Данный обзор развития физики, метрологии и химии ударного сжатия во ВНИИФТРИ подводит итоги работ фундаментального характера в ЛВДД, как отдельной структурной единицы, в связи с объединением исследований в двух режимах высокого давления в одной лаборатории. Надеюсь, что представленные в этой статье данные могут оказаться полезными в будущем, когда государство увеличит финансирование фундаментальных исследований. Сейчас положение дел в нашей физике УВ удручающее, например, на Международной конференции по физике взрыва в 2015 г. российский вклад в мировую науку по числу докладов составил 1%, а в развитии экспериментальных методов исследования вообще равен нулю, т.к. наши «партнёры» из США, Японии, Китая и Европы освоили диапазон ТПа, а используя радио-рентгеновскую технику, способны изучать структуры и фазовые переходы при взрыве за времена 10^{-10} с, что позволяет выявлять промежуточные стадии структурных превращений под действием УВ и определять уравнения состояния твёрдых тел в огромном диапазоне термодинамических параметров.

Следует напомнить, что фундаментальные научные исследования всегда, рано или поздно, находят практическое применение. Так было с термодинамикой, электричеством, распространением радиоволн, высокими давлениями, изучением ядра, лазерами, полу- и сверхпроводниками. В ЛВДД мы также столкнулись с превращением чисто научных данных в промышленно важный результат. Так, измерения времени превращений при УВ-сжатии показали, что твердофазные химические реакции проходят в области высо-
Альманах современной метрологии, 2015, №5

ких динамических давлений, что позволило при взрывном разложении органических соединений получать алмаз. Метод ДСС позволил создавать фильеры из w-фазы BN с хорошим каналом при минимальной стоимости, т.к. отверстие в сверхтвёрдом материале готовилось в процессе фазового перехода $h \rightarrow w$ путём размещения иголки по оси исходного образца, которую потом растворяли в кислоте. Практическим применением твердофазной детонации может быть создание ВВ локального действия, что представляет интерес для специальных операций, а открытие размерного эффекта в диэлектриках – это путь к созданию суперконденсаторов.

Широкое применение в промышленности нашло упрочнение металлов взрывом, что приводило к увеличению прочности, например, стали-3, на 15-20%. Однако дальнейшее упрочнение металла при повторном взрыве не происходило, а после третьего подряд взрыва металлическое изделие просто разваливалось на куски. Причина в том, что упрочнение обусловлено появлением определённых дефектов в реальной структуре металла, но повторный взрыв приводит к такому росту концентрации дефектов, что они не только компенсируют упрочнение, но и могут разрушить тело. Отсюда возникла идея прогреть ударно-обжатый металл для удаления «лишних» дефектов. Высокотемпературное рентгеновский анализ показал, что в стали-3 это происходит при $T = 350^\circ\text{C}$ [75], после чего повторное взрывное воздействие может ещё упрочнить сталь. Если после каждого взрыва прогревать металл при этой температуре, то такая ударно-термическая обработка повышает прочность на 80%, причём одновременно увеличивается пластичность стали. Аналогичный метод был затем с успехом применён к стали-10 и стали-45 [76]; по-видимому, именно таким путём дамасские мастера изготавливали свою знаменитую сталь. Интересно, что УТ-упрочнение даёт положительный эффект только для сталей, т.е. для твёрдых растворов углерода в железе, в которых нагрев при $T = 350^\circ\text{C}$ приводит к удалению «разрушительных дефектов», тогда как на чистое железо УТ-упрочнение не действует.

Упрочнение взрывом наиболее эффективно при воздействии на образцы правильной геометрической формы, а такие изделия, как пружины, спирали, лопатки турбин, медицинские скальпели и т.п. требовали изготовления матриц под каждое изделие, что удорожало технологию. Мы создали «универсальную матрицу», когда изделие любой формы помещалось в контейнер и заполнялось сплавом Вуда, который после взрыва удалялся при слабом нагревании и мог быть использован в следующий раз. Простейшим вариантом такой матрицы являлся лёд, в который вмораживались сложные изделия, а после взрыва «матрица» просто выливалась. Эти технологии были применены ВНИИФТРИ для УТ-упрочнения лемехов плугов в подшефном совхозе, что привело к трёхкратному увеличению срока их службы при низкой стоимости их обработки благодаря из-за низкой стоимости ВВ и матрицы многократного действия. Этот и другой, имеющийся в распоряже-
Альманах современной метрологии, 2015, №5

нии ЛВДД, технологический задел, может быть сразу использован в случае запросов народного хозяйства.

Работы ЛВДД по взрывной тематике неоднократно обсуждались научным сообществом на самых разных уровнях в нашей стране и за рубежом, причём одобрение и поддержку получили такие обнаруженные нами эффекты, которые либо не были известны, либо их вообще нельзя было получить никаким другим методом, кроме взрыва. За эти работы руководитель исследований в 1981 г. избран в Американское физическое общество. В 1990 г. я был избран в Американское общество инженеров-механиков, в 1993 г. получил премию Капицы Английского Королевского Общества, в 1994 г. награждён Медалью 22-й Всемирной выставки-конкурса изобретений и открытий в Женеве, в 1996 г. стал визит-профессором Калифорнийского университета в США и Дарэмского университета в Великобритании.

Отделение общей физики и астрономии АН СССР 5-го марта 1986 г. под председательством академика А.М. Прохорова заслушало моё сообщение «Особенности фазовых превращений при ударном сжатии» и постановило: учитывая перспективность метода ударного сжатия для фундаментальных и прикладных задач физики твёрдого тела, считать целесообразным дальнейшее развитие этих исследований, в частности во ВНИИФТРИ.

Однако у действовавшего тогда руководства ВНИИФТРИ было другое мнение и приказом от 12.09.1995 г. ЛВДД была ликвидирована (тогда именовавшаяся Центром ВДД) из-за временной задолженности поступлений денег от заказчиков. Вице-президент РАН академик Е.П. Велихов 05.02.1996 г. обратился с письмом к Председателю Правительства России В.С. Черномырдину, в котором пишет, что «доказана возможность получения монокристаллических образцов алмаза и алмазо-подобных материалов большого размера и любой формы с характеристиками, превышающими зарубежные аналоги. Достигнутые результаты позволяют надеяться на создание промышленного производства синтетических алмазов и алмазо-подобных материалов на основе метода ДСС. По нашему мнению и по мнению ведущих специалистов страны, необходимо в кратчайший срок принять кардинальные меры по восстановлению деятельности ЦВДД». 22.02.1996 г. Правительство РФ (ВЧ-П80-5474) поручило Госстандарту России восстановить деятельность ЛВДД во ВНИИФТРИ, что и было сделано.

В последние годы, как уже было сказано выше, основное научное внимание ЛВДД было обращено на изучение размерного эффекта в электрофизических свойствах материалов, в том числе наноалмазов, синтезированных методом детонации. Основные результаты были опубликованы в цитированных выше работах, а сейчас приведём оценки этих исследований со стороны крупнейших учёных нашей страны. На заседании Президиума Академии инженерных наук имени Прохорова 11.02.2010 г. был заслушан мой доклад на тему «Размерные эффекты в физике диэлектриков». Как отметил *Альманах современной метрологии, 2015, №5*

Президент АИН, член Президиума РАН академик Ю.В. Гуляев в письме к Председателю Росстандарта Г.И. Элькину: «Обсуждение установленных во ВНИИФТРИ фактов и их интерпретации в МГУ, в Ногинском и Троицком научных центрах, в институтах РАН установило приоритетный характер данного исследования, которое имеет также чёткий метрологический аспект, показывая необходимость учёта в ГСССД нового, размерного параметра, необходимого современному материаловедению. Помимо фундаментального интереса, данная работа имеет большие технологические перспективы для создания суперконденсаторов и новых радиопоглощающих покрытий в авиации. Президиум АИН просит Вас всячески поддержать эти исследования, опередившие мировой уровень в данной области нанотехнологий».

Три года спустя, на основе обсуждений в Объединённом институте высоких температур РАН наших исследований академик В.Е. Фортов дал им такую оценку: «Проведенные С.С. Бацановым и его сотрудниками исследования привели к выдающимся результатам, не имеющим аналогов в мировой науке. По моему мнению, эти работы заслуживают дальнейшего развития, имея в виду не только их фундаментальную ценность, но и серьёзные перспективы практического применения. Прошу поддержать данное направление исследований в области химии ударных волн».

Эти мнения выдающихся учёных нашей страны и стимулируют дальнейшую деятельность нашего коллектива в области физики, метрологии и химии ударного сжатия.

Литература

1. Bancroft D., Peterson E.L., Minshall S.J., Appl J. Phys., 27, 281 (1956).
2. Бацанов С.С., Доронин Г.С., Клочков С.В., Теут А.И.// Физ. горения и взрыва, 22, № 6, 135 (1986).
3. Alder B. In Solids under Pressure, McGraw-Hill, New York, 1963, p. 385.
4. Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 32, № 1, 115 (1996).
5. Batsanov S.S. Mater.Sci.Engen. A210, 57 (1996).
6. Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 42, № 2, 128 (2006).
7. Бацанов С.С., Доронин Г.С., Нерченко А.А., Романьков В.В., Стреляев А.Е., Ступников В.П. Инж.-физ. журн., 24, 354 (1973).
8. Martynov A.I., Batsanov S.S. In Shock Waves in Condensed Matter, Ed. Y. Gupta, NewYork-Lindin, Plenum Press, 1986, p.677.
9. Доронин Г.С., Ступников В.П., Романьков В.В., Беленький В.Я., Заславский Б.И., Бацанов С.С. Журн. техн. физ., 43, 1059 (1973).
10. Секоян С.С., Шлегель В.Р., Бацанов С.С., Гаврилкин С.М., Поярков К.Б., Гурков А.А., Дуров А.А. ПМТФ, 50, № 4, 121 (2009).
11. Бацанов С.С. Неорган.матер., 43, 1195 (2007).
12. Бацанов С.С. Усп. хим., 75, 669 (2006).

13. Бацанов С.С., Максимов И.И., Симаков Г.В., Федоров А.В. Физ. горения и взрыва, 30, № 1, 122 (1994).
14. Симаков Г.В., Максимов И.И., Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 31, № 4, 77 (1995).
15. Бацанов С.С. Физ. горения взрыва, 30, № 1, 125 (1994).
16. Бацанов С.С., Лазарева Е.В., Копанева Л.И. Химия высоких энергий, 26, 184 (1982).
17. Бацанов С.С., Лазарева Е.В., Копанева Л.И. Хим. физика, 3, 905 (1984).
18. Бацанов С.С., Болховитинов Л.Г., Мартынов А.И. Письма в ЖТФ, 16, № 2, 53 (1990).
19. Бацанов С.С., Вазюлин В.А., Копанева Л.И., Максимов И.И., Морозов В.А., Фомин С.Л., Шмаков А.С. Физ. горения и взрыва, 27, №4, 139 (1991).
20. Бацанов С.С., Василевский С.В., Гурьев Д.Л., Дидюков А.И., Исаев В.Н., Копанева Л.И., Лазарева Е.В., Максимов И.И., Туманов В.А., Шмаков А.С., Фомин С.Л. Хим. физика, 10, 286 (1991).
21. Batsanov S.S., Gavrilkina S.M., Kopaneva L.I., Maximov I.I., Meyers M.A., Chen H.C., Prümmer R., Seiko E.E., Vazyulin V.A., Mater J. Sci. Letters, 16, 1625 (1997).
22. Паршуков А.В., Бацанов С.С. Физ. твердого тела, 26, 3438 (1984).
23. Паршуков А.В., Бацанов С.С. Теплофиз. выс. темпер., 23, 393 (1985).
24. Айвазян Ю.М., Сейку В.В., Исаев В.Н., Бацанов С.С. Журн. прикл. спектр., 50, 1017 (1989).
25. Паршуков А.В., Исаев В.Н. Физ. металлов металловед., 59, 621 (1985).
26. Гурьев Д.Л., Гордополов Ю.А., Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 42, № 1, 130 (2006).
27. Guriev D.L., Gordoplov Yu.A., Batsanov S.S., Merzhanov A.G., Fortov E.F. Appl. Phys. Lett., 88, 024102 (2006).
28. Болховитинов Л.Г., Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 43, № 2, 108 (2007).
29. Бацанов С.С., Гордополов Ю.А. Физ. горения и взрыва, 43, № 5, 104 (2007).
30. Джетте Ф.-Х., Горошин С., Хиггинс А.Дж., Ли Дж.Дж. Физ. горения и взрыва, 45, № 2, 116 (2009).
31. Бацанов С.С., Гордополов Ю.А. Журн. физ. хим., 83, 1199 (2009).
32. Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 49, № 4, 120 (2013).
33. Batsanov S.S. Acta Cryst., B 69, 563 (2013).
34. Ma Y., Eremets M., Oganov A.R., Xie Y., Trojan I., Medvedev S., Lyakhov A.O., Valle M., M. Prakapenka M. Nature, 458, 182 (2009).
35. Matsuoka T., Shimizu K. Nature, 458, 186 (2009).
36. Бацанов С.С. Хим. физика, 2, 669 (1983).

37. Бацанов С.С. Хим. физика, 5, 1041 (1986).
38. Бацанов С.С. Физ.горения и взрыва, 23, № 1, 86 (1987).
39. Batsanov S.S. NATO Series, II, 140, 353 (2004).
40. Бацанов С.С., Доронин Г.С., Кошевой В.П., Ступников В.П. Физ. горения и взрыва, 4, № 1, 108 (1968).
41. Гурьев Д.Л., Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 22, № 4, 111 (1986).
42. Бацанов С.С., Гогоуля М.Ф., Бражников М.А., Лазарева Е.В., Доронин Г.С., Ключков С.В., Банщикова М.В., Федоров А.Ф., Симаков Г.В. Хим. физика, 10, 1699 (1991).
43. Бацанов С.С., Гогоуля М.Ф., Бражников М.А., Симаков Г.В., Максимов И.И. Физ. горения и взрыва, 30, № 3, 107 (1994).
44. Рябинин Ю.Н. Журн. техн. физики, 26, 2661 (1956).
45. Бацанов С.С. Инж.-физ. журнал, 12, 104 (1967).
46. Бацанов С.С. Изв. СО АН СССР, серия хим. наук, № 14, вып.6, 22 (1967).
47. Бацанов С.С., Бокарев В.П., Максимов И.И., Туманов В.А. Физ. горения и взрыва, 29, № 5, 102 (1993).
48. Бацанов С.С., Блохина Г.Е., Дерибас А.А.. Журн. структ. хим., 6, 227 (1965).
49. Batsanov S.S. Diamond Relat. Mater., 20, 660 (2011).
50. Wang J., Gu Yu., Li Z., Wang W., Fu Z. Diamond Relat. Mater., 31, 15 (2013).
51. Wang J., Gu Yu., Li Z., Wang W., Fu Z. Cryst. Growth Design, 13, 599 (2013).
52. Бацанов С.С. Физ.горения и взрыва, 34, № 1, 117 (1998).
53. Покропивный В.В., Смоляр А.С., Овсянникова Л.И., Покропивный А.В., Куц В.А., Ляшенко В.И., Нестеренко Ю.В. Физ. твердого тела, 55, 806 (2013).
54. Бацанов С.С., Бацанова Л.Р., Доронин Г.С., Кутателадзе С.С., Мороз Э.М., Эренбург Р.С.. Журн. структ. хим., 9, 1024 (1968).
55. Бацанов С.С., Демидов Б.А., Рудаков Л.И. Письма в ЖЭТФ, 30, 611 (1979).
56. Бацанов С.С., Андриянова Е.Е., Лазарева Е.В. Хим. физика, 8, 1435 (1989).
57. Бацанов С.С. Усп. хим., 55, 579 (1986).
58. Batsanov S.S. Effects of Explosion on Materials, NY, Springer, 1994.
59. Бацанов С.С., Бокарев И.П., Бокарева О.М., Бондарев Ю.М., Мардашев Ю.С., Семин В.П. Хим. физика, 2, 1440 (1983).
60. Бокарев В.П., Бокарева О.М., Темницкий И.Н., Бацанов С.С. Физ. тв. тела, 28, 813 (1986).
61. Бацанов С.С., Гаврилкин С.М., Бездуганов С.В., Романов П.Н. Неорг. матер., 44, 1332 (2008).

62. Гаврилкин С.М., Гордополов Ю.А., Бацанов С.С. Доклады РАН, 437, 350 (2013).
63. Gavrilkin S.M., Batsanov S.S., Gordopolov Yu.A., Smirnov A.S. Propellants Explosives Pyrotechnics, 34, 469 (2009)
64. Даниленко В.В. Синтез и спекание алмаза взрывом. М.: Энергоатомиздат, 2003 г.
65. Долматов В.Ю. Усп.хим., 76, 375 (2007)
66. Бацанов С.С., Поярков К.Б., Гаврилкин С.М. Письма в ЖЭТФ, 88, 686 (2008).
67. Бацанов С.С., Поярков К.Б., Гаврилкин С.М., Лесников Е.В., Шлегель В.Р. Журн.физ.хим., 85, 794 (2011).
68. Batsanov S.S., Gavrilkin S.M., Batsanov A.S., Poyarkov K.B., Kulakova I.I., Johnson D.W., Mendis B.G., Mater J. Chem., 22, 11166 (2012).
69. Выскубенко Б.А., Даниленко В.В., Лин Э.Э., Мазанов В.А., Серова Т.В., Сухаренко В.И., Толочко А.П. Физ. горения и взрыва, 28, № 2, 108 (1992).
70. Алешаев А.Н., Зубков П.И., Кулипанов Г.Н., Лукьянчиков Л.А., Ляхов Н.З., Мишнев С.И., Тен К.А., Титов В.М., Толочко Б.П., Федотов М.Г., Шеромов М.А. Физ. горения и взрыва, 37, № 5, 104 (2001).
71. Бацанов С.С. Журн.физ.хим., 83, 1591 (2009).
72. Ree F.N. J. Chem. Phys., 84, 5845 (1986).
73. Batsanov S.S., Osavchuk A.N., Naumov S.P., Efimov A.E., Mendis B.G., Apperley D.C., Batsanov A.S. Propellants Explosives Pyrotechnics, 40, 39 (2015).
74. Хроника: Советско-американский семинар по физике ударных волн. Физ. горения и взрыва, 20, № 1, 134 (1984).
75. Мартынов А.И., Сазонов В.Ф., Коробов В.К., Бацанов С.С. Физ. горения и взрыва, 23, № 4, 136 (1987).
76. Batsanov S.S., Sazonov V.F., Sekoyan S.S., Shmakov A.S.. Propellants Explosives Pyrotechnics, 14, 238 (1989)