

ИЗУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ВЗРЫВА

А. Л. МИХАЙЛОВ

С сороковых годов XX века основным источником информации о фундаментальных свойствах вещества в экстремальных состояниях при давлениях до сотен миллионов атмосфер стали ударноволновые методы, использующие энергию химических взрывчатых веществ (ВВ).

1. Уравнения состояния (УРС)

Нешуточная интрига разыгралась среди «ограниченного круга информированных ученых» после публикации в 1990-х гг. XX века учеными Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (ЛЛНЛ) США информации, полученной в экспериментах на лазерной установке «Nova» об аномально сильной сжимаемости в ударных волнах амплитудой около 10 млн. атмосфер жидкого («криогенного») дейтерия.

Несколько лет напряженной работы — и сотрудники ИФВ и НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ (группы Р. Ф. Трунина и А. И. Быкова, рис. 1) опровергли результаты ученых ЛЛНЛ в экспериментах на взрывных системах, используя гораздо большие количества изначально жидкого и твердого дейтерия (и водорода). Параллельно результаты аналогичные нашим получили ученые Сандийских национальных лабораторий (СНЛ) США на электрофизической установке PVFA-Z (группа М. Д. Кнудсон и др.), также работавшие с большими, чем в ЛЛНЛ, количествами дейтерия.

Позднее еще одна наша группа (М. В. Жерноклетов и М. А. Мочалов с сотрудниками) подтвердила эти опровержения, используя также взрывные системы, но с мишенями уже из газообразного дейтерия высокой начальной плотности, приближавшейся к плотности жидкого дейтерия.

Ударная волна — вырожденное (уникальное) состояние волны сжатия, характеризующее-

ся ростом энтропии вещества, однозначно определяющимся свойствами (уравнением состояния) вещества и амплитудой волны. Для построения УРС не менее информативны квазиизэнтропические волны, расширяющие область обследованных состояний. Приращение энтропии вещества при таком сжатии (меньшее, чем в ударной волне) зависит от темпа сжатия. Уникальные результаты по квазиизэнтропической сжимаемости изотопов водорода, благородных и других газов, широко распространенных во Вселенной (гелий, аргон, ксенон, азот), при давлениях в миллионы атмосфер, получены специалистами ВНИИЭФ с использованием имплозийных («имплозия» — взрыв вовнутрь) систем цилиндрической геометрии. В этих системах газ, находившийся при начальном давлении в десятки атмосфер в цилиндрическом герметичном сосуде, сжимался в шнур с помощью заряда химического ВВ (группы М. В. Жерноклетова, М. А. Мочалова, Ю. М. Макарова).

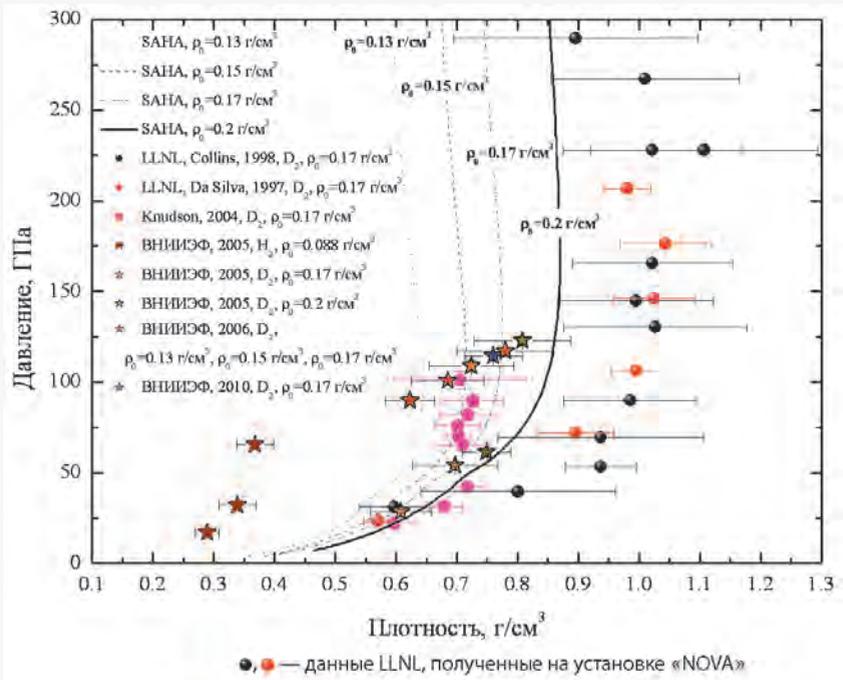
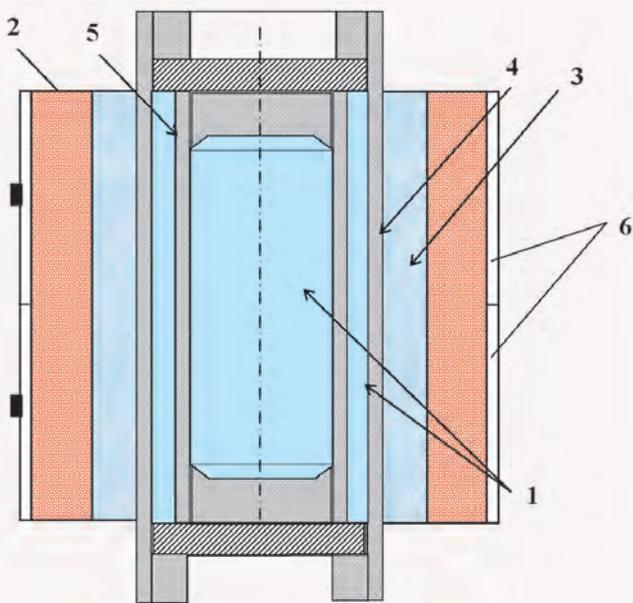
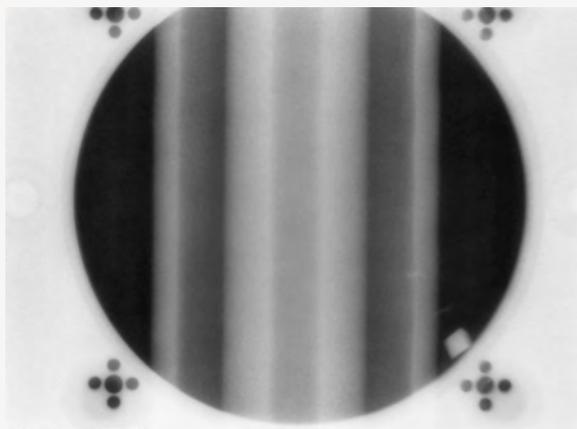


Рис. 1. Ударноволновая сжимаемость изотопов водорода



а



б

Рис. 2. Рентгенографические эксперименты, проводимые на комплексе, основанном на трех бетатронах: а — геометрия экспериментального устройства (1 — газообразный гелий; 2 — ВВ; 3 — полиэтилен; 4 — внешняя герметизирующая стальная оболочка; 5 — внутренняя стальная оболочка; 6 — система иницирования); б — рентгенограмма в момент максимального сжатия гелия

Основной способ диагностики в этих экспериментах — покадровое многоракурсное импульсное рентгенографирование процесса формирования газового (плазменного) шнура. Инструмент диагностики — созданный сотрудниками НТЦФ и ИФВ уже в этом веке уникальный рентгенографический комплекс на основе трех синхронно работающих циклических ускорителей электронов-бетатронов (рис. 2). В этих экспериментах были достигнуты рекордные значения

давления (до 5 млн. атмосфер) и плотности исследуемых газов.

2. Структурные превращения

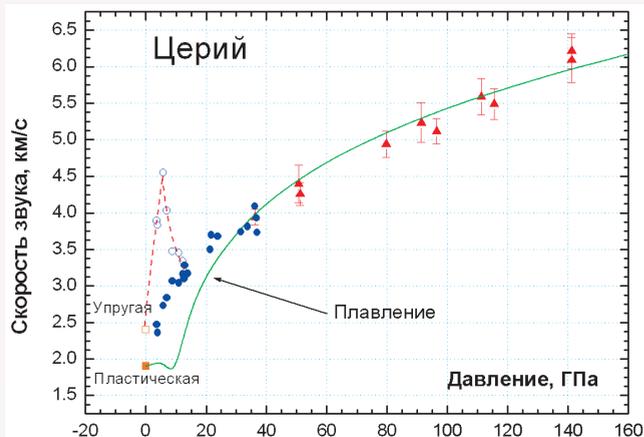
При исследовании ударно-волновой сжимаемости веществ основной результат экспериментов — «ударная адиабата», представляющая собой связь между термодинамическими параметрами вещества, либо (обычно первоначально получаемые величины) между фазовой скоростью волны и массовой скоростью вещества за ее фронтом. Если вещество испытывает при сжатии фазовый переход, то это обычно отражается на виде ударной адиабаты (излом зависимости, скачок термодинамического параметра). Выявление фазовых (структурных) превращений в экстремальных состояниях, существующих чрезвычайно короткое время (~1 мкс) — предмет постоянного внимания ученых. Цель та же — адекватное описание фундаментальных свойств материи. В последние годы наряду с традиционным методом построения общего вида ударной адиабаты, большое внимание уделялось методам измерения конкретных термодинамических параметров вещества: температуры (пирометрия), скорости звука и т. п.

Например, в основу одного из методов определения плавления металла за фронтом ударной волны положено измерение скорости звука в нем. Эти измерения проводятся за времена порядка 0,1 мкс. Отсюда ясны требования к точности и быстродействию (временному разрешению) экспериментальных методик.

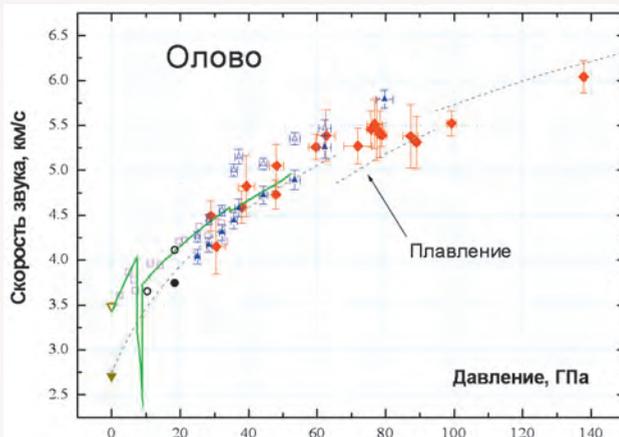
Метод основан на следующих соображениях. При плавлении металла теряется такое его свойство, как прочность. А скорость упругих (звуковых) волн в прочном материале в определенном интервале давлений выше скорости пластических волн или волн объемного сжатия. Следовательно, при плавлении в металле должны исчезать упругие волны — скорость звука за фронтом ударной волны должна падать с ростом давления (т. е. не расти).

Для иллюстрации на рис. 3 (а, б) приведены полученные нашими учеными зависимости от давления скорости звука за фронтом в цери и олове (метод свечения индикаторных жидкостей) и в природном уране (лазерная доплеровская диагностика).

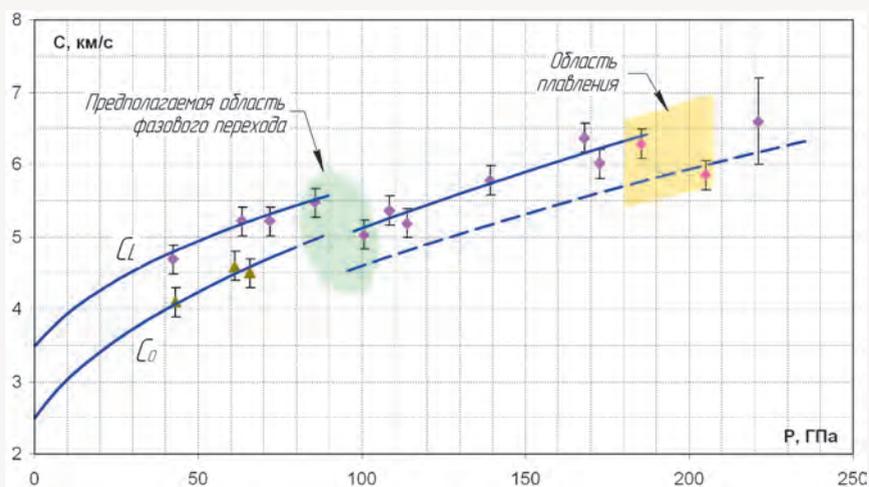
Эти же данные по упругой и объемной скоростям звука используются для разработки так называемых «определяющих уравнений» для материалов — уравнений, описывающих прочность материала, как многопараметрическую зависимость (см. ниже, раздел 3).



Скорость звука в церии: — расчет по УРС ВНИИЭФ; ▲ — объемная скорость звука (оптический метод); ●, ○ — объемная и упругая (продольная) скорости звука (манганин); □ — упругая (продольная) скорость звука (ультразвуковой метод, ВНИИЭФ); ■ — объемная скорость звука из «Справочника по редким металлам», 1965 г.



Скорость звука в олове: ▽ — упругая (продольная) скорость звука (ультразвуковой метод, ВНИИЭФ); ▼ — объемная скорость звука из «Справочника по редким металлам», 1965 г.; □ — лазерный интерферометр [Martinez E. и др.]; — расчет по УРС [ИТЭС]; ----- — расчет по УРС [Cox G. A.]; ◆ — скорость звука (оптический метод); ●, ○ — скорость звука (манганин); ▲, △ — VISAR [Jianbo Hu и др.]



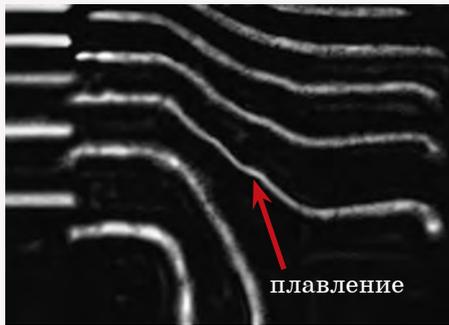
Измерение скорости звука в уране за фронтом ударной волны с помощью лазерного интерферометра Фабри—Перо с целью корректировки определяющих уравнений и точки плавления

Рис. 3. Зависимости скорости звука за фронтом ударной волны в церии, олове и природном уране от давления ударного сжатия

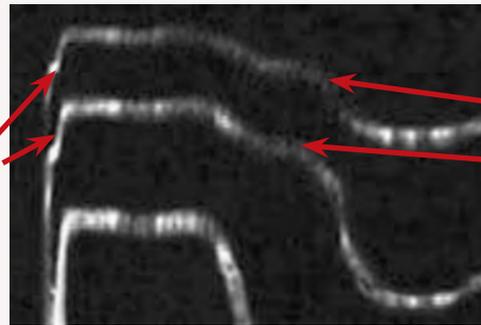
К сожалению, реальная кинетика плавления, связанная и с микроструктурой вещества, дефектностью решетки, наличием включений и т. п., должна «замазывать» этот эффект, и выявляемого падения скорости звука может и не быть. Не исключено, что здесь желательнее работать с высокочистыми металлами субмикронной структуры.

Путь решения этой проблемы может лежать в прямых измерениях профилей ударных волн, скажем, прецизионных измерениях профиля распределения массовой скорости вещества за фронтом волны во времени по допле-

ровскому смещению частоты зондирующего излучения. Фазовый переход, характеризующийся определенными изменениями термодинамики вещества, если он опять же не усреднен по пятну лазерного зондирования, может быть выявлен по аномалии на профиле ударной волны. Подобным образом нашими сотрудниками (группа А. В. Федорова) определены параметры фазовых переходов в олове (рис. 4). Но и здесь, по видимому, эффекты фазовых переходов должны четче выявляться на высокочистых образцах субмикронной поликристаллической структуры или в монокристаллах.



прямой фазовый переход β - γ в ударной волне



обратный фазовый переход γ - β на волне разгрузки

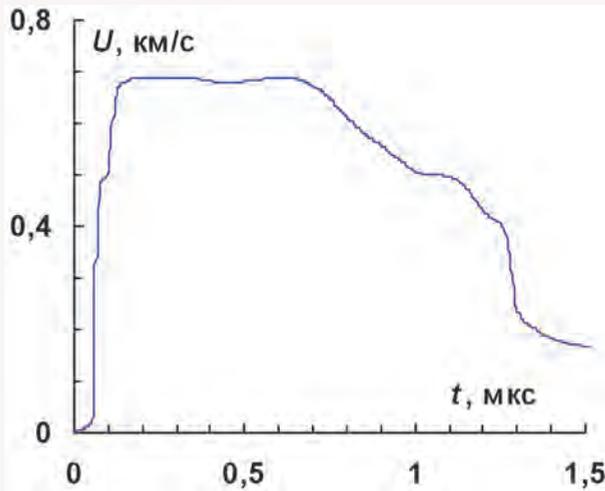


Рис. 4. Регистрация фазовых переходов и плавления в олове в ударной волне и волне разгрузки

3. Динамическая прочность и реология

Прочность — не фундаментальная константа вещества, равно как и его пластичность. Они зависят и от свойств материала, и от внешних условий — температуры, давления, величины деформации, скорости деформирования. (На этом, например, основаны все процессы кузнечного дела, прокатки и т. п.)

Представление о деформируемом теле, как о сплошной среде, существующее в классической механике, недостаточно или даже неверно. Пример этому — регистрация тем же лазерным доплеровским методом по схеме Фабри-Перо (А. В. Федоров с сотрудниками) формы и амплитуды упругой волны (см. выше), предшествующей основной ударной волне пластического де-

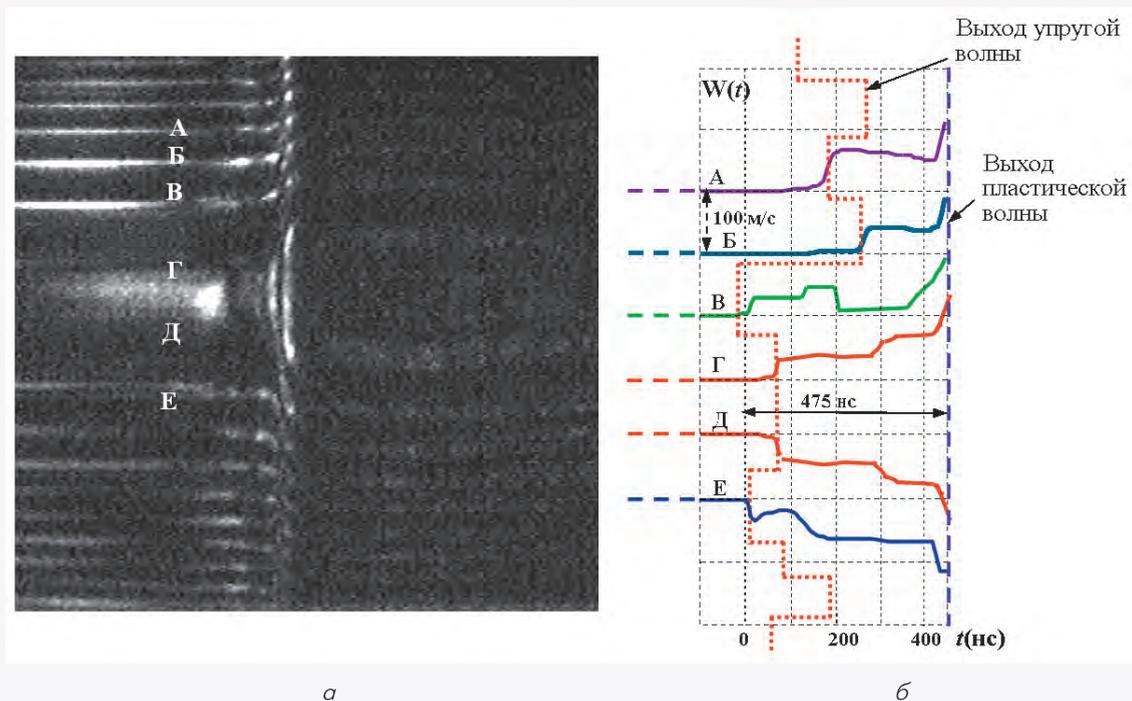


Рис. 5. Дисперсия упругого предвестника в уране: а — интерферограмма опыта; б — одновременность выхода и характерные профили упругой волны, зарегистрированные в опыте на разных интерференционных линиях

формирования (упругий предвестник) рис. 5. В пятне зондирования диаметром ~ 100 мкм регистрируются как разные формы профиля и $U(t)$ упругого предвестника ударной волны в природном уране, так и дисперсия его скорости.

Причина этой дисперсии как гетерогенность структуры самого вещества (поликристаллическое строение), так и гетерогенность его деформирования на внутризеренном уровне (мезоуровне).

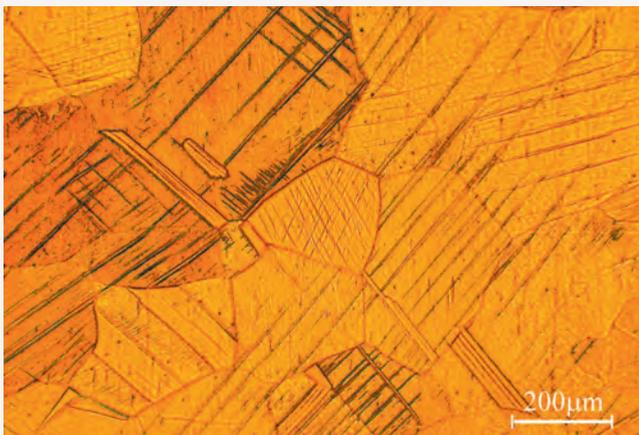
Из фотографий микрошлифов (рис. 6) видно, что деформирование металла на внутризеренном уровне идет по плоскостям скольжения (локализованные плоскости сдвига в виде двойников шириной $0,1-0,2$ мкм, следующих с периодом ~ 10 мкм, зависящим от интенсивности деформирования).

По-видимому, этот эффект — кратковременное скольжение металла в узких полосах сдвига с последующей столь же быстрой «потерей памяти» о скольжении — несет ответственность за обнаруженное нашими учеными «мгновенное разупрочнение металлов за фронтом ударной волны с последующим быстрым (~ 1 мкс) восстановлением прочности.

Эффект мгновенного разупрочнения, не описывающийся существовавшими до сих пор моделями прочности в рамках «сплошной среды», был обнаружен в экспериментах по исследованию развития начальных возмущений на поверхности лайнера, ускоряемого продуктами взрыва химического ВВ. «Метод возмущений» развит в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ (В. А. Раевский, А. И. Лебедев с сотрудниками) и широко используется и за рубежом — ЛАНЛ, ЛЛНЛ (США), SEA Gramat (Франция); см. рис. 7.

С помощью этого метода и других более «классических» методов в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся масштабные исследования параметров и собственно создание широкодиапазонных физических моделей прочности, работоспособных в интервале давлений до миллионов атмосфер и скоростей деформирования от 10^3 до 10^8 с $^{-1}$.

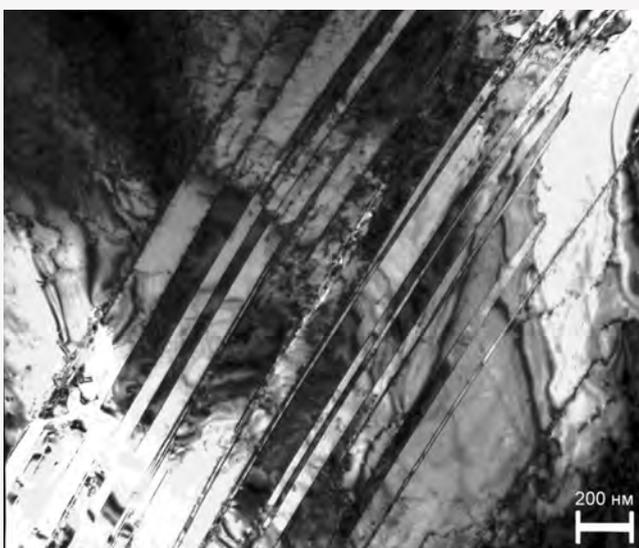
Этим методом, в частности, получены пока не подтвержденные другими методами данные по сдвиговой прочности природного урана при давлении около 6 млн. атмосфер. Эксперименты приведены на устройствах цилиндрической геометрии, подобных описанным выше (квазиизэнтропическая сжимаемость газов), с исследованием развития заданных возмущений на поверхности цилиндрической сходящейся вовнутрь оболочки (рис. 8).



Фотография микроструктуры после нагружения образцов меди

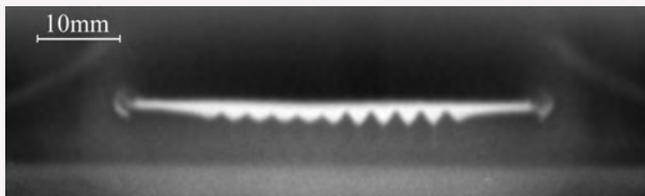


а

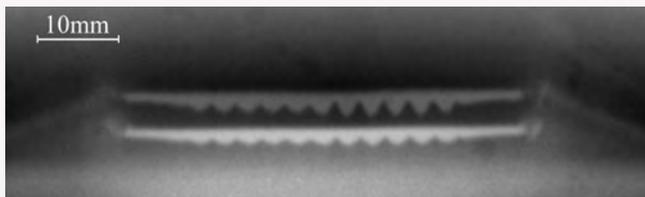


б

Рис. 6. Гетерогенность деформирования металлов в ударных волнах: а, б — полосы сдвига, видимые на просвечивающем электронном микроскопе



а



б

Рис. 7. Метод возмущений как средство изучения динамической сдвиговой прочности материалов. Ванадий. Квазиизэнтропическое нагружение. $P \approx 55$ ГПа: а — однокадровый режим рентгенографирования; б — двухкадровый режим рентгенографирования

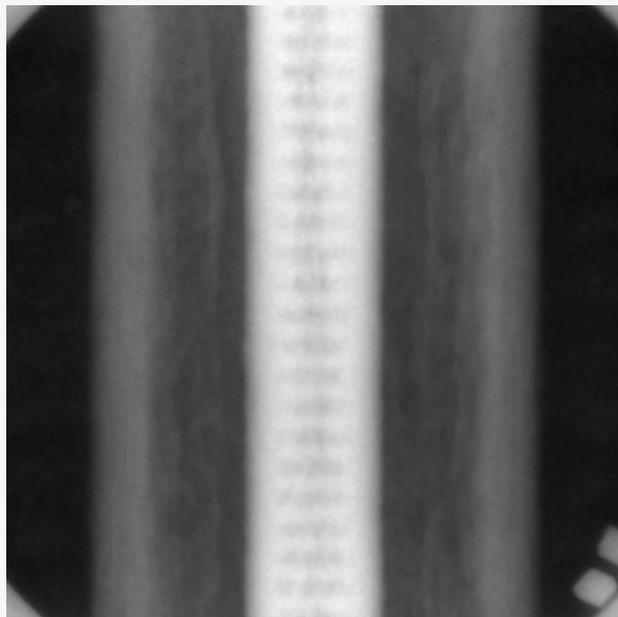


Рис. 8. Метод возмущений в цилиндрической имплозийной системе. Типичный рентгено снимок оболочек экспериментального устройства с развившимися возмущениями большой амплитуды

Для численного описания полученных в этих экспериментах результатов пришлось в расчеты завести сдвиговую прочность урана в 600 раз большую, чем его прочность в нормальных условиях.

Этот уникальный результат еще ждет своего подтверждения и обоснования (или опровержения).

4. Физика детонации

Детонация — волновой сверхзвуковой процесс взрывчатого превращения. Существует много моделей детонации, из них общепризнана классическая гидродинамическая ударноволновая модель ЗНД — Зельдовича, фон Неймана, Деринга, — опускающая из своего поля зрения механизмы и кинетику инициирования и взрывчатого превращения ВВ вследствие чрезвычайной сложности и многообразия путей возникновения очагов и протекания химических реакций.

Современные лазерные доплеровские методы позволили нашим ученым продемонстрировать дискутировавшуюся многие годы гетерогенность течения за фронтом детонационной волны в конденсированных ВВ, демонстрирующую турбулентность процесса (рис. 9), что так же не учитывается моделью ЗНД.

Еще более сложны процессы возбуждения и развития детонации. Здесь в последние годы получены многообещающие результаты с применением невозмущающих методов импульсной рентгенографии, многокадровой протонной радиографии и микроволновой доплеровской диагностики, позволяющих «заглянуть» внутрь вещества без влияния на исследуемый процесс, с временным разрешением ~ 100 наносекунд (рентген), ~ 20 наносекунд (протоны), ~ 1 наносекунда (микроволны).

Для иллюстрации на рис. 10 приведена типичная микроволновая интерферограмма возбуждения детонации в заряде ВВ на основе пластифицированного триаминотринитробензола (ТАТБ) ударной волной, входящей в ВВ из металлического экрана (пластины) (В. М. Бельский, А. В. Родионов с сотрудниками).

Здесь в момент времени t_1 начинается движение границы раздела «экран-ВВ», что фиксируется по низкочастотной модуляции разностного интерференционного сигнала. На ее фоне видна более высокочастотная модуляция сигнала за счет частичного отражения зондирующего излучения от фронта опережающей экран ударной волны в ВВ. В момент времени t_2 низкочастотный сигнал, формируемый за счет отражения радиоволн от металлического экрана, пропадает — излучение не проходит через сжатое ВВ между фронтом УВ и экраном — в сжатом ВВ «что-то стало происходить». В момент времени t_3 начинается рост амплитуды отраженного сигнала от фронта инициирующей ударной волны — происходит формирование детонационной волны, гораздо лучше отражающей зондирующее радиоизлучение, чем ударная волна, вследствие ионизации продуктов

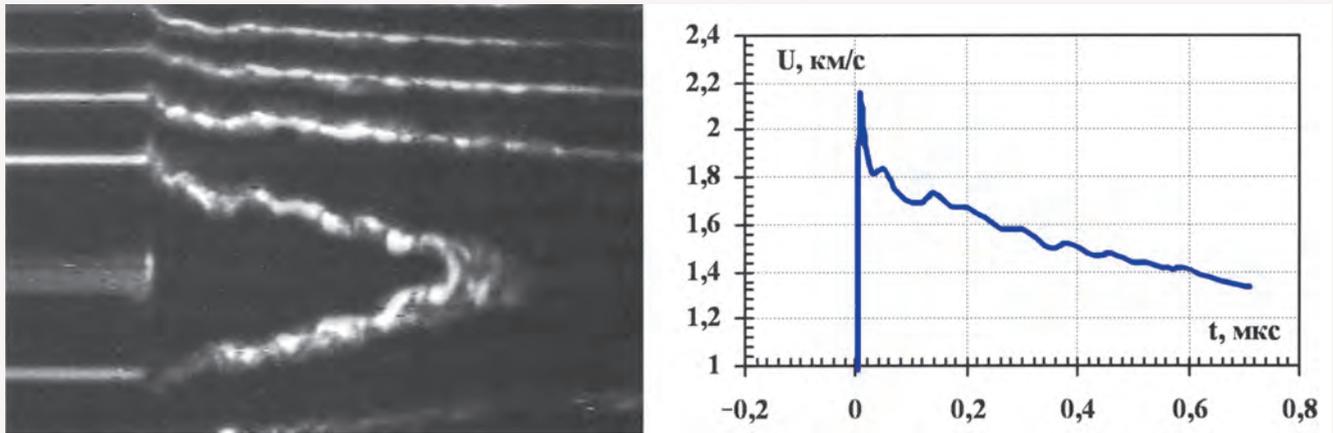


Рис. 9. Турбулентное течение за фронтом детонации. Характерная интерферограмма и график скорости границы раздела ТНТ-LiF

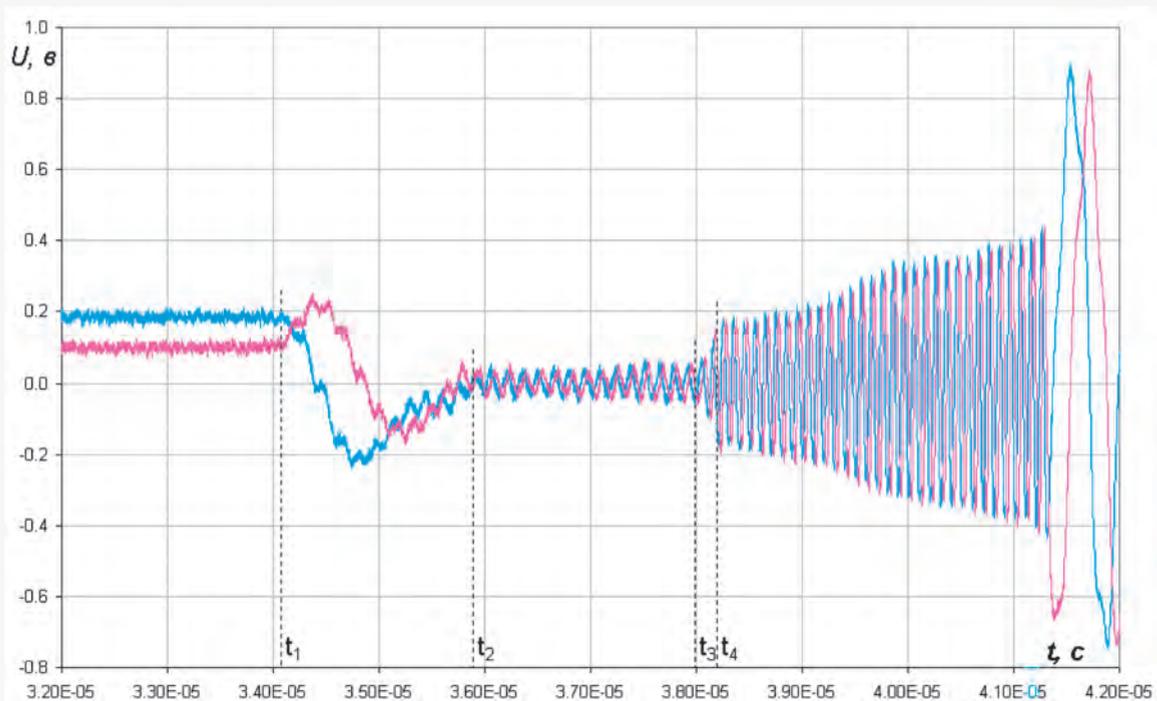


Рис. 10. Интерферограмма инициирования детонации в пластифицированном ТАТБ ударной волной

взрыва. В момент времени t_4 окончательно сформировался детонационный фронт, с устойчивой амплитудой отраженного сигнала.

Что происходит с сигналом ВВ в интервале (t_2-t_3)? Образуются множественные «горячие точки», распределенные в объеме между экраном и фронтом ударной волны? Появились радиопоглощающие продукты взрыва?.. Все это чрезвычайно интересно и ждет своего пионера. И такие пионеры, кажется, есть.

Мне, кажется, что сочетание микроволновой диагностики на разных длинах волн, включая

инфракрасную спектроскопию в реальном времени, с протонной радиографией высокого разрешения (протонная микроскопия) помогут нам пролить свет на эти вопросы.

МИХАЙЛОВ Анатолий Леонидович – директор ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор технических наук, лауреат Государственной премии РФ и премии Правительства РФ