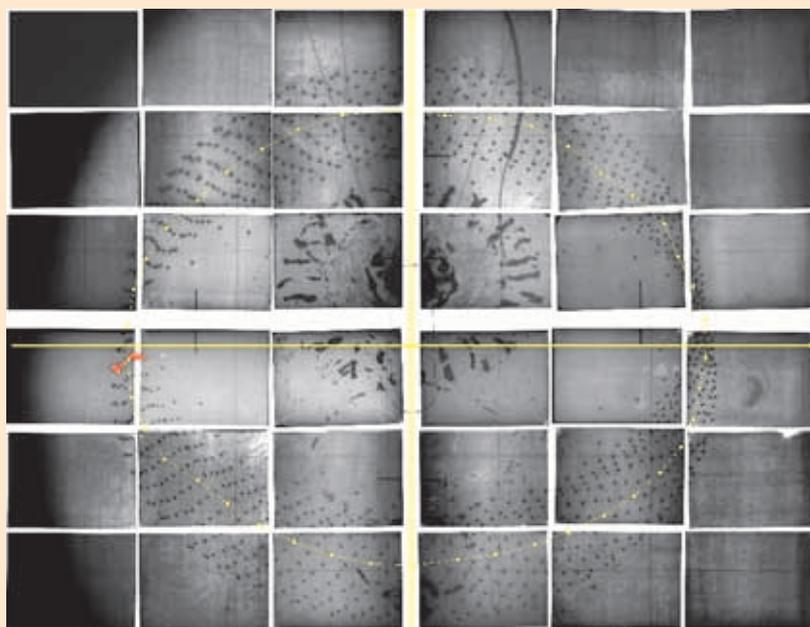
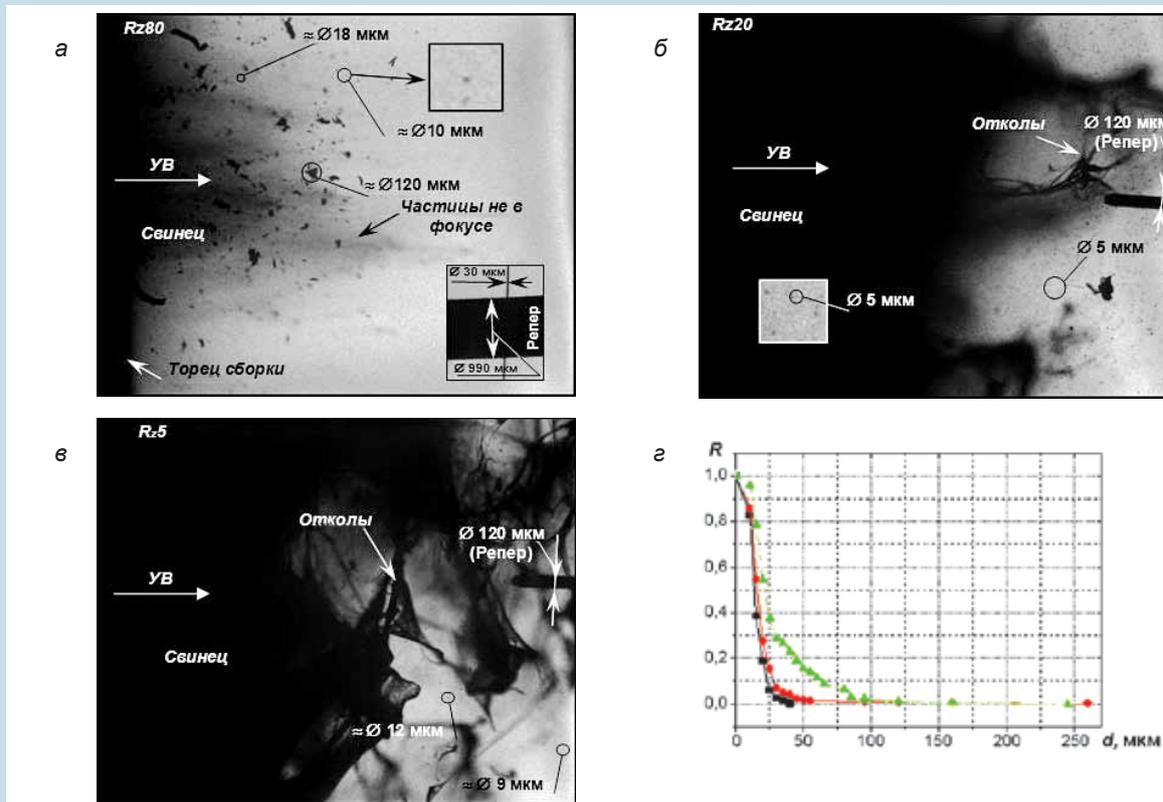


ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ И ФИЗИКИ ВЗРЫВА (ИФВ)

В сложных гидродинамических экспериментах требуется регистрировать большое количество импульсов, приходящих от многочисленных датчиков, расположенных в зоне измерения. С целью уменьшения числа измерительных магистралей разработана новая методика 16-кратного «уплотнения» потока сигналов, идущих с датчиков. В основу метода положен принцип упаковки сдвинутых во времени сигналов срабатывания датчиков в единый выходной информационный кадр, преобразованный в сигнал оптического излучения. Погрешность измерения интервалов времени между срабатыванием отдельных датчиков не превышает ± 30 нс. Разработан способ и аттестована методика «Измерение характеристик пространственного распределенного осколочного поля по рентге-



Характерное рентгеновское изображение осколочного поля



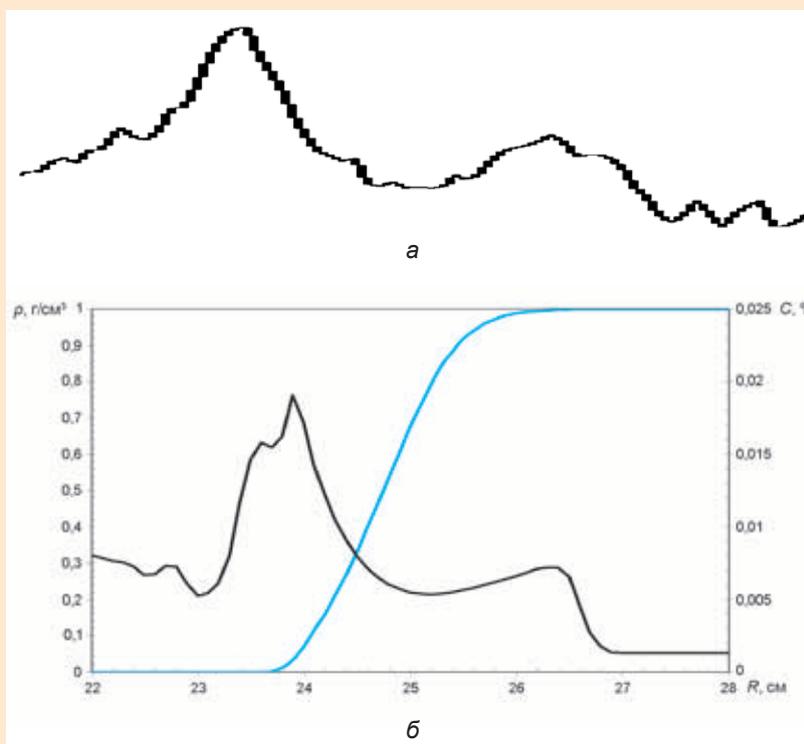
Видеокадры частиц свинца (а – в) и относительное распределение выброшенных частиц по размерам (г): ■ – Rz5; ● – Rz20; ▲ – Rz80

новскому изображению». Методика позволяет получать полное изображение осколочного поля общей площадью 5 м² и более, по которому выполняется измерение начальных средних скоростей и направлений перемещений всех осколочных элементов.

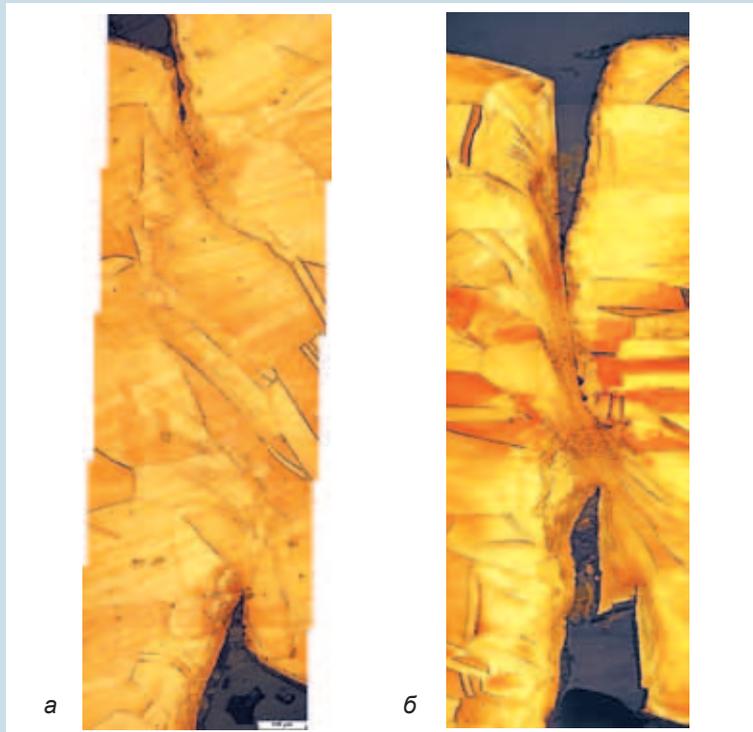
Выброс частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного металла является достаточно сложным и малоизученным процессом. Размер выброшенных частиц – от единиц до сотен микрометров, скорость – километры в секунду. Для изучения этого процесса применяются различные методы: рентгенографический, голографический, метод индикаторных фольг и т. д. Но ни один из этих методов не позволяет напрямую визуализировать частицы. В ИФВ разработан метод микроскопической электронно-оптической регистрации таких частиц. Этим методом удалось впервые зарегистрировать микрометровые частицы металла и построить их спектр $R(d)$ для поверхностей с различной шероховатостью.

С помощью метода импульсной рентгенографии зарегистрирована зона турбулентного перемешивания продуктов детонации сферического заряда с воздухом. Профиль плотности в зоне перемешивания близок к расчетному, полученному по программе ЭГИДА.

Одной из труднейших задач моделирования динамических процессов является расчет формирования и развития полос локализованного сдвига. С помощью метода Гопкинсона зарегистрированы различия в стадиях зарождения и развития полос локализованного сдвига в меди и сталях 09ГС2, ЭП543. В экспериментах зарегистрированы зависимости напряжения от времени в процессе развития полосы сдвига. Полученные данные будут использоваться для калибровки трехмерной методики расчета динамических процессов в металлах.



Профиль плотности продуктов детонации и воздуха в зоне перемешивания: а – экспериментальный; б – расчетный (— — концентрация воздуха; — — плотность)



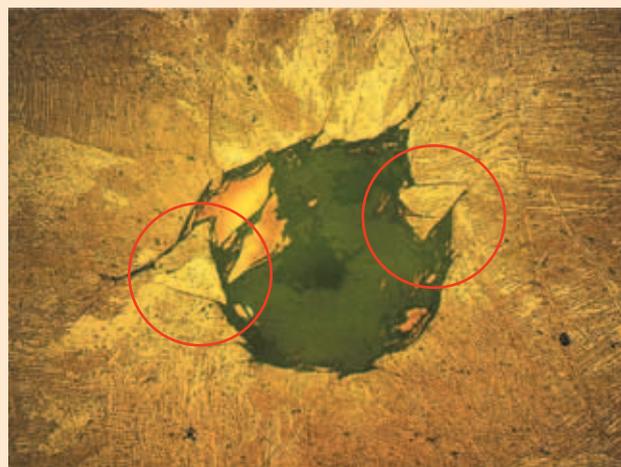
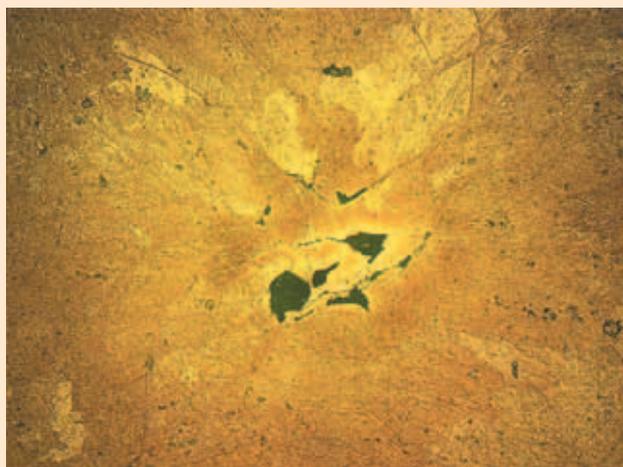
Развитие микроструктуры локализованной деформации сдвига, полученной при разных длительностях нагружения: а – 72 мкс (начальная стадия, зерна начинают вытягиваться вдоль направления деформации); б – 140 мкс (развитая полоса сдвига)

Построение широкодиапазонных феноменологических моделей сопротивления поврежденной среды сжатию и растяжению находится в настоящее время на начальном этапе в силу ряда сложностей, связанных с отсутствием экспериментальных методов, позволяющих надежно регистрировать параметры протекающих процессов. В ИФВ разработан метод исследования особенностей деформирования металлов на микро- и мезомасштабных уровнях при скорости деформации 10^5 – 10^7 с⁻¹. Метод основан на регистрации изменения геометрических параметров цилиндрических каналов, выполненных в образце из исследуемого металла, при прохождении ударной волны контролируемой амплитуды и длительности. Задание каналов на контролируемом расстоянии друг от друга позволяет исследовать групповые эффекты при компактировании поврежденности. В 2009 году проведены эксперименты по нагружению слабыми ударными волнами плоских образцов природного урана, расположенных на различных расстояниях друг от друга. Образцы содержат цилиндрические каналы с начальным диаметром 1 мм, ось которых параллельна фронту ударной волны. Представляемый метод по-

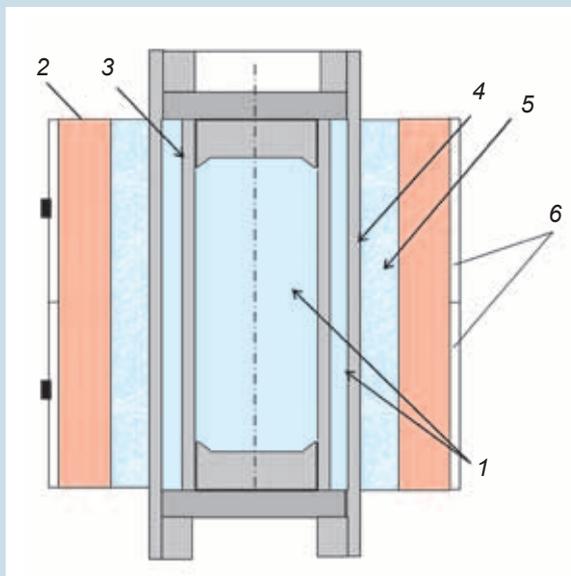
казал свою перспективность при исследовании компактирования поврежденной среды. В экспериментах получена новая информация о процессах высокоскоростного деформирования и компактирования в природном уране, не известная ранее в мировой научно-технической литературе и указывающая на необходимость дальнейшего исследования рассматриваемого вопроса. В частности, зарегистрирован процесс разрушения урана при осесимметричном сжатии в результате развития сдвиговых деформаций. Разрушение происходит за счет развития трещин, направленных под углом $\sim 45^\circ$ к внутренней поверхности, т. е. вдоль поверхностей максимального напряжения сдвига. Полученные данные будут использованы для развития методов расчета гидродинамических процессов с учетом сдвиговой прочности разрушения и компактирования поврежденной среды.

Завершен этап экспериментальных исследований сжимаемости гелия до давлений 150–400 ГПа. Для получения экспериментальных данных использовались цилиндрические двухкаскадные камеры высокого давления. Гелий закачивался в центральную полость и в область между силовой и обжимающей центральную по-

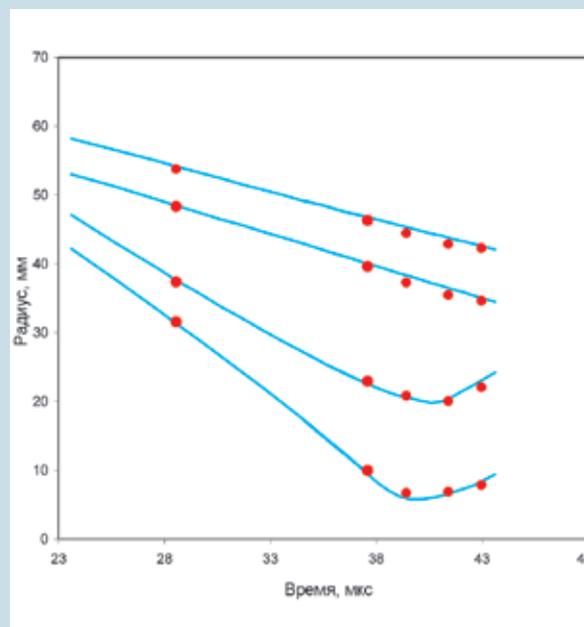
лость оболочками до давления 125 атм. Наружная стальная оболочка камеры нагружалась взрывом заряда ВВ, инициируемого синхронно по поверхности. В экспериментах с помощью импульсной рентгенографии регистрировались границы оболочек в различные моменты времени, в основном близкие к моменту максимального сжатия газа в центральной полости. Сравнение экспериментально зафиксированных границ оболочек с полученными в численных расчетах позволяет сделать вывод об адекватности используемого в расчетах уравнения состояния гелия. Проведены эксперименты на четырех типах камер, в которых для варьирования максимального давления в гелии изменялись радиусы обжимающих оболочек и толщина полиэтиленовых проставок между силовой оболочкой и зарядом ВВ. Оказалось, что с помощью двумерных расчетов по комплексу программ МКД разработки ВНИИЭФ удается в единой манере удовлетворительно описать результаты всех экспериментов. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что использованное в расчетах уравнение состояния гелия достаточно адекватно описывает сжимаемость гелия в области состояний, реализованных в экспериментах.



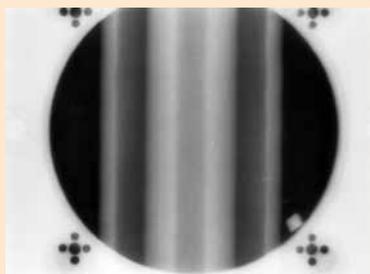
Микроструктура урана в зоне скомпактированных каналов



Экспериментальное устройство для исследования сжимаемости газообразного гелия: 1 – газообразный гелий; 2 – ВВ; 3 – внутренняя стальная оболочка; 4 – внешняя герметизирующая стальная оболочка; 5 – полиэтилен; 6 – система инициирования



Сравнение расчетных (—) и экспериментальных (●) данных о движении оболочек



Рентгенограмма опыта в момент максимального сжатия газа

С помощью лазерного доплеровского измерителя скорости проведены эксперименты по исследованию скорости звука в ударно-сжатом уране. С помощью программных кодов, в которые внедрена современная широкодиапазонная модель высокоскоростного деформирования урана РИНГ, выполнен расчетно-теоретический анализ экспериментов. Найдено, что определяющее уравнение состояния модели РИНГ описывает совокупность экспериментальных данных, полученных с помощью лазерного интерферо-

метра, в диапазоне давлений 40–130 ГПа. В модели РИНГ полагается, что процесс плавления урана происходит в диапазоне давлений ударного сжатия 160–180 ГПа.

Обнаружено нарушение масштабного эффекта в меди, связанное с образованием полос сдвига двойниковой природы. Масштабный эффект при откольном разрушении известен давно. Он заключается в том, что при уменьшении размеров системы, в которой реализуются растягивающие импульсные напряжения, поврежденность уменьшается, а откольное напряжение возрастает. Эффект связан с тем, что при уменьшении размеров и сохранении геометрического подобия растягивающие напряжения изменяются незначительно, а время их действия уменьшается. Поскольку развитие откольного разрушения – процесс, развивающийся во времени, то уменьшение масштаба (размеров) системы приводит к снижению поврежденности. Однако дру-

гой эффект – временное снижение прочности после воздействия ударной волны – может привести к обратной зависимости откольной прочности от масштаба системы, т. е. к нарушению масштабного эффекта. В исследованных образцах уменьшали интервал времени прихода импульса растягивающих напряжений t_{SR} после ударной волны с помощью изменения масштаба 1:2:4:8. Интенсивность нагружения в экспериментах сохранялась на уровне ~ 35 и ~ 20 ГПа. При таких условиях нагружения в одном случае образуется большое количество полос сдвига, в другом случае их нет. Сохраненные после опытов образцы разрезали и измеряли поврежденность. Анализ экспериментов показал, что поврежденность при уменьшении масштаба (всех размеров) системы увеличилась, что противоречит результатам расчетов по существующей наиболее обоснованной методике расчета откольного разрушения NAG.

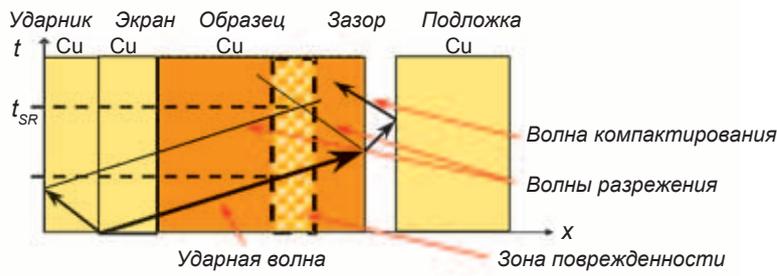
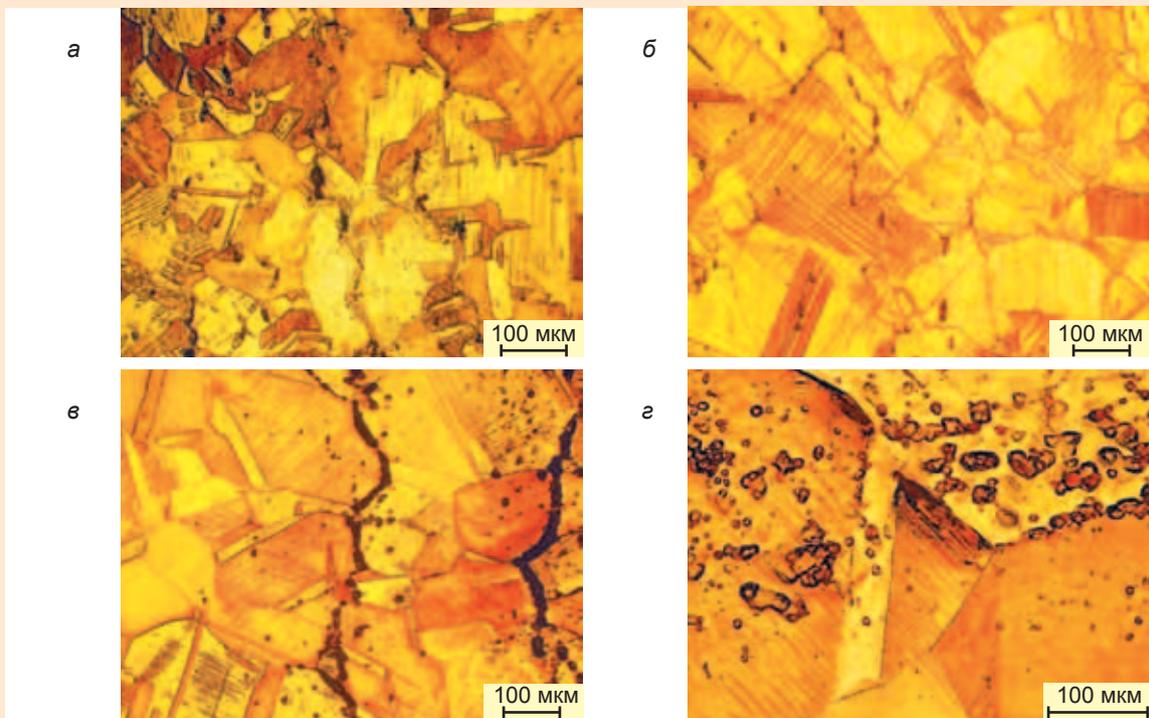
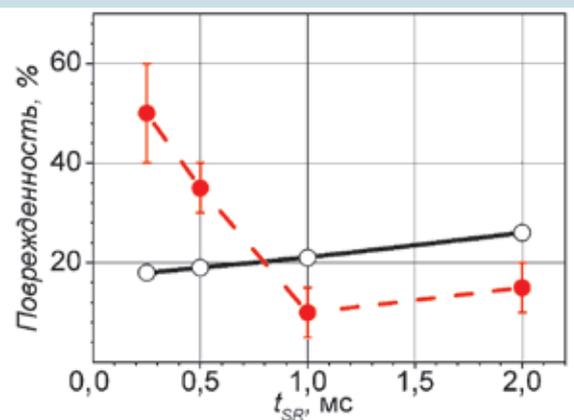


Схема эксперимента по определению поврежденности

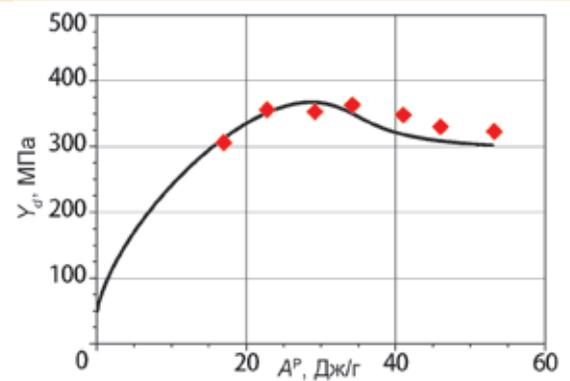
На основании гипотезы Бейли о связи деформационного упрочнения с упругой энергией дефектов кристаллической решетки предложена энергетическая модель сдвиговой прочности, учитывающая величину и скорость пластической деформации, а также разупрочнение, связанное с температурным отжигом и аннигиляцией дислокаций. Показано, что деформа-



Микроструктура образцов после эксперимента по определению поврежденности. Масштаб: а – 1:1; б – 1:2; в – 1:4; г – 1:8



Зависимость максимальной поврежденности от времени прихода отскольного импульса нагружения ~35 ГПа: ○ – расчет NAG; ● – эксперимент

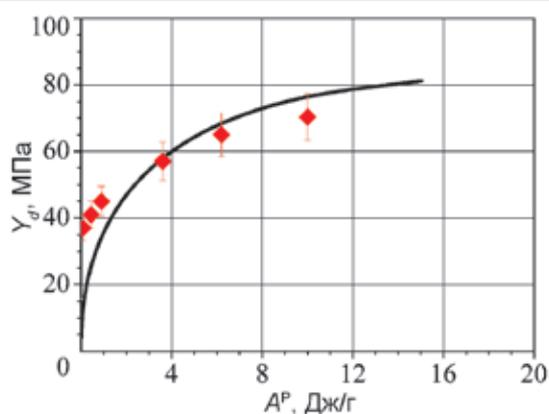


Расчетная (—) и экспериментальная (◆) зависимости предела текучести от работы ударно-волнового пластического деформирования меди до давлений $P = 70$ ГПа

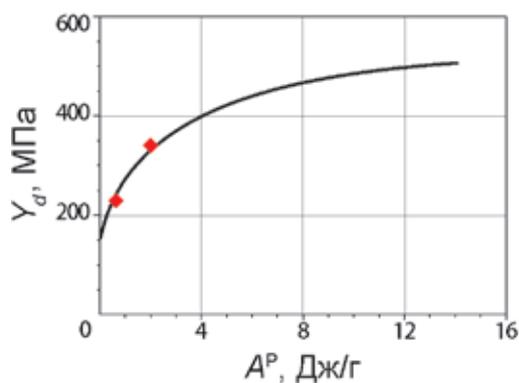
ционное упрочнение металлов определяется только упругой энергией деформирования, которая связана с энергией накопившихся дефектов. Предполагается, что накопление упругой энергии дефектов определяется пластической работой. Предложенная модель вполне адекватно согласуется с имеющи-

мися экспериментальными данными для меди до $P = 70$ ГПа, алюминия до $P = 10$ ГПа, тантала до $P = 20$ ГПа. В рамках предложенной модели находит естественное объяснение эффект упрочнения ряда металлов при увеличении скорости деформации. Скорость деформации определяет интенсивность

напряжения за счет вязкого трения. При увеличении скорости деформации, в частности при ударно-волновом нагружении, интенсивность напряжения может стать очень большой и соответственно скорость пластического деформирования также увеличится. Это приведет к увеличению скорости упрочнения.



Зависимость предела текучести алюминия от работы пластического деформирования при статическом (—) и ударно-волновом (◆) деформировании



Зависимость предела текучести тантала от работы пластического деформирования при статическом (—) и ударно-волновом (◆) деформировании

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

На протяжении более 10 лет (начиная с 1997 года) РФЯЦ-ВНИИЭФ в составе широкой международной коллаборации участвует в работах по созданию фотонного спектрометра PHOS для эксперимента ALICE по изучению кварк-глюонной плазмы. Работы проводятся в рамках ряда международных соглашений в проекте Большого адронного коллайдера (БАК). В течение этого времени проделан огромный объем работ по определению технического облика спектрометра PHOS, включая макетирование и испытание опытных образцов и прототипов спектрометра на пучках ускорителей PS и SPS в CERN. Разработана и изготовлена конструкция полномасштабного спектро-

метра, его систем и программного обеспечения.

В сентябре 2009 года завершен важный этап проекта PHOS – сборка и установка в шахту на место проведения эксперимента ALICE на кольцо ускорителя БАК (глубина 53 м) полномасштабного трехмодульного спектрометра. Масса матрицы кристаллов $PbWO_4$ трехмодульного спектрометра более 7,7 т. В 2009 году завершена разработка программного обеспечения для удаленного управления системой охлаждения матрицы кристаллов. Спектрометр подключен ко всем системам жизнеобеспечения (охлаждения матрицы кристаллов и электроники, подачи азота, температурной ста-

билизации, медленного контроля, управления), произведена его интеграция во внешнюю инфраструктуру эксперимента. Матрица кристаллов охлаждена до рабочей температуры -25 °С при обеспечении ее стабилизации в течение длительного времени (несколько месяцев) с точностью $\pm 0,1$ °.

23 октября 2009 года в первых экспериментах на БАК спектрометром зарегистрированы частицы, рожденные при взаимодействии с мишенью пучка ионов (ядра свинца). Прохождение пучков было четко зарегистрировано прецизионным фотонным спектрометром PHOS, разработанным и созданным с участием специалистов РФЯЦ-ВНИИЭФ. 27 октя-