

УДК 539.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОГО ОБЖАТИЯ МЕДНОЙ АМПУЛЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЕЕ ДЕТОНАЦИЕЙ СЛОЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ВВ

В. А. Аринин¹, В. В. Бурцев¹, А. Л. Михайлов^{1,2}, А. М. Подурец^{1,2},
А. В. Руднев¹, М. А. Сырунин^{1,2}, И. А. Терешкина^{1,2}, Б. И. Ткаченко¹,
М. И. Ткаченко¹, И. Р. Трунин^{1,2}, А. П. Цой¹, И. В. Шиберин¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, 607186 Саров, TIRSarov@yandex.ru

Представлены результаты эксперимента по обжатию сферической медной ампулы при нагружении ее детонацией слоя пластического взрывчатого вещества. На ускорителе У-70 проведена радиографическая регистрация процесса схождения оболочки к центру, выполнен металлографический анализ сохраненной после опыта медной ампулы. Результаты протонографической многокадровой регистрации процесса схождения внутренней границы медной оболочки к центру сопоставлены с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: оболочка, квазисферически-симметричное нагружение, протонографическая регистрация, микроструктура, откольное разрушение.

DOI 10.15372/FGV20150513

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментально-расчетное исследование процессов ударно-волнового обжатия толстостенных сферических оболочек представляет практический интерес для изучения механизмов зарождения и развития отколов и последующего компактирования, а также для тестирования моделей сдвиговой и откольной прочности материалов [1–4].

При проведении таких исследований обжатие осуществляется с помощью синхронного подрыва тонкого слоя взрывчатого вещества (ВВ), размещенного на внешней поверхности толстостенной оболочки. При взрывном нагружении в оболочке образуются множественные откольные разрушения, обусловленные взаимодействием, как минимум, двух групп волн разрежения. Первые возникают при выходе ударной волны на свободную (внутреннюю) поверхность оболочки, вторые распространяются от наружной поверхности оболочки со стороны разлетающихся продуктов взрыва. В результате интерференции этих волн разрежения в обо-

лочке, вблизи ее внутренней поверхности, возникают растягивающие напряжения, амплитуда и длительность которых вполне достаточны для образования и отделения внутреннего откольного слоя. После отделения от основной массы материала откольный слой начинает сферическое схождение к центру. При этом от основной массы оболочки в зоне действия растягивающих напряжений продолжают откалываться фрагменты материала, и между сходящимся к центру первым отколом и оболочкой растет зона поврежденного материала. В какой-то момент отколовшийся слой сжимается до предельного, минимального радиуса остановки. Затем вектор его движения меняется на противоположный, и начинается обратное поступательное движение с последующим компактированием раздробленной части с основной массой материала оболочки.

С использованием ранее полученных результатов в экспериментах со сферическим схождением ударных волн (см., например, [5–7]) исследовался механизм обжатия медной оболочки диаметром 42 мм.

Многокадровая регистрация процесса схождения оболочки с помощью протонографического комплекса, созданного на базе ускорителя У-70 Института физики высоких

© Аринин В. А., Бурцев В. В., Михайлов А. Л., Подурец А. М., Руднев А. В., Сырунин М. А., Терешкина И. А., Ткаченко Б. И., Ткаченко М. И., Трунин И. Р., Цой А. П., Шиберин И. В., 2015.

энергий в г. Протвино [8], позволила получить подробную информацию об изменении формы и размеров внутренней и наружной границ оболочки в различные моменты времени [9, 10] при ее сжатии и последующем разлете. Проводился также постопытный микроструктурный анализ диаметального среза оболочки.

Полученные протонографические данные и результаты металлографического анализа были сопоставлены с данными численного моделирования.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент по обжатию толстостенной медной оболочки проводился на ускорителе У-70 ИФВЭ с взрывным макетом, эскиз которого дан на рис. 1. Медная оболочка представляет собой две соединенные без применения сварки полусферы. Совмещенные полусферы помещаются внутрь двойного конверта, состоящего из хорошо подогнанных стальных оболочек, которые обеспечивают сохранение целостности медной оболочки в эксперименте. Внутренняя полость медной оболочки заполнена разреженным воздухом ($p \approx 0.1$ атм). Внешняя стальная оболочка является сварной и обеспечивает герметичность и целостность внутренних оболочек. Ударно-волновое нагружение создается одновременной детонацией слоя пластического

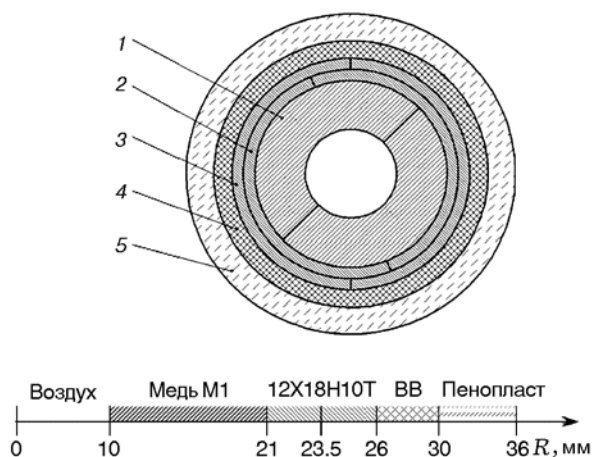


Рис. 1. Схема и геометрические размеры взрывного макета:

масштаб 1 : 1 относительно исследуемого объекта; 1 — две медные полусферы, 2 — две стальные полусферы, 3 — две сваренные стальные полусферы, 4 — слой пластического ВВ, 5 — пенопластовый распределитель

ВВ толщиной 4 мм, размещенного на внешней стальной оболочке. Синхронное инициирование ВВ проводилось в 200 точках, симметрично расположенных на поверхности заряда ВВ.

Получено 13 протонографических изображений взрывного макета, которые охватывают временной интервал около 5 мкс. Представленные на рис. 2 изображения, прошедшие специальную обработку, заключающуюся в корректировке неравномерности экспозиции с использованием данных мониторинга пучка, в трассировке границ и оценке распределения плотности через преобразование Абеля, демонстрируют динамику сжатия оболочки. На рис. 3 приведены результаты трассировки следующих границ: наружные границы стальных оболочек ($R_{\text{НГО, Fe}}$) и меди ($R_{\text{НГО, Cu}}$), внутренние границы первого (R_3) и второго (R_4) отколов в меди, внешняя граница плотного центрального ядра (R_2), отраженная ударная волна в центральном ядре (R_5), граница центральной полости (R_1).

В результате выделения границ раздела сред выявлены следующие особенности процесса сжатия медной оболочки:

- частицы меди первого откольного слоя, двигаясь к центру, образуют там практически сплошное ядро;
- в момент времени $t = 8.83$ мкс вокруг первого откольного слоя образуется второй откол, при этом рост радиуса откольной полости прекращается;
- с момента $t = 9.32$ мкс в плотном центральном ядре фиксируется отраженная ударная волна, радиус воздушной полости в центре ядра практически перестает меняться.

На рис. 4 представлена динамика процесса по эквивалентным радиусам границ.

МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛА ДИАМЕТРАЛЬНОГО СРЕЗА МЕДНОЙ ОБОЛОЧКИ

Для металлографического исследования медная оболочка была разрезана в диаметальной плоскости по линии соединения двух полусфер. Общий вид шлифа представлен на рис. 5.

Микроструктура данного образца, нагруженного квазисферически сходящейся ударной волной, заметно отличается от микроструктуры образцов, претерпевших деформацию под

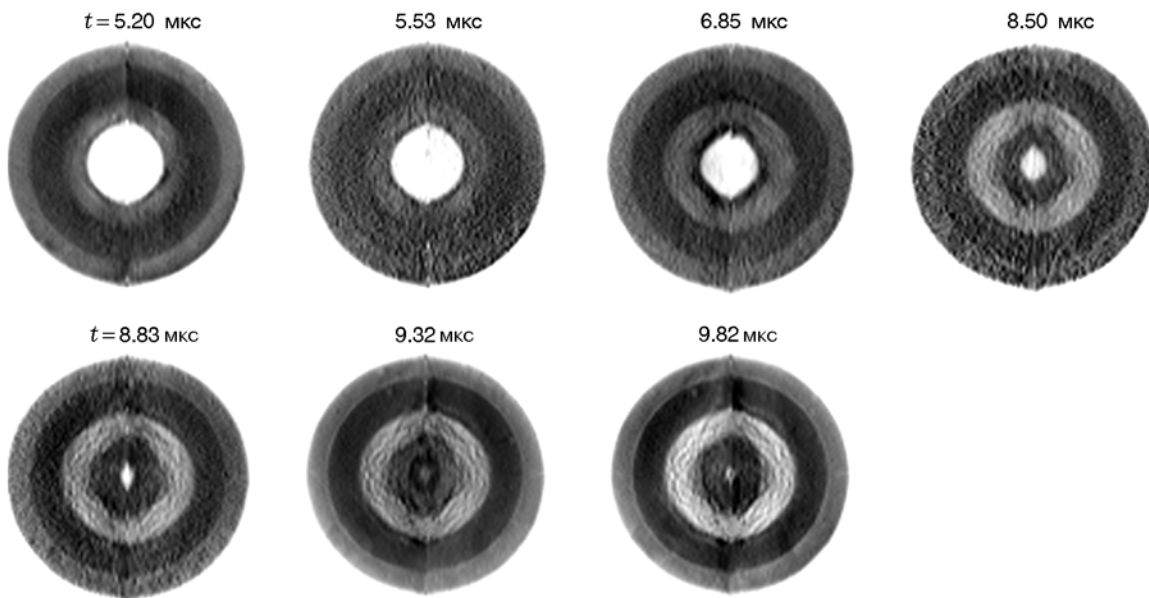


Рис. 2. Динамика схождения оболочки:

масштаб 0.5 : 1 относительно исследуемого объекта, время отсчитывается от начала подрыва ВВ

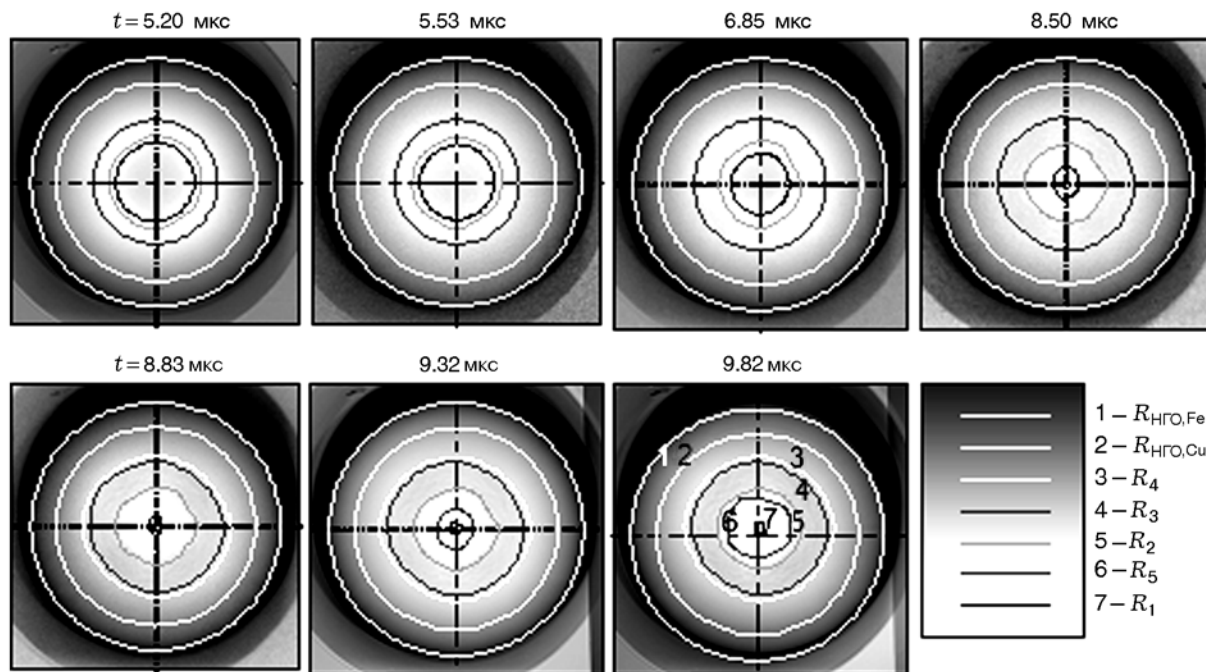


Рис. 3. Обработанные протонографические изображения с результатами трассировок границ:

масштаб 0.6 : 1 относительно исследуемого объекта

действием плоских волн такой же амплитуды и длительности.

В наружных слоях образца обнаружены двойниковые полосы локализованной деформации (ПЛД), но, в отличие от плоского нагруже-

ния, ПЛД возникают в ограниченных объемах (рис. 6).

Локализацию полос в сравнительно небольших объемах внутри зёрен можно объяснить неравномерной деформацией зёрен

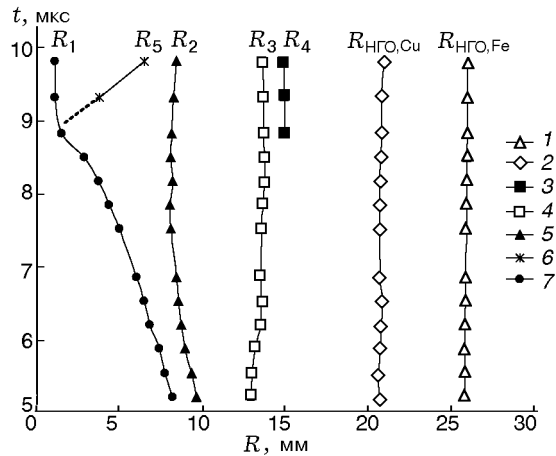


Рис. 4. Динамика обжатия медной оболочки во временном интервале ≈ 5 мкс:

1 — $R_{\text{НГО,Fe}}$, наружная граница стальной оболочки, 2 — $R_{\text{НГО,Cu}}$, наружная граница медной оболочки, 3 — R_4 , внутренняя граница вторичной откольной полости, 4 — R_3 , внутренняя граница первичной откольной полости, 5 — R_2 , внешняя граница центрального плотного ядра, 6 — R_5 , отраженная ударная волна в центральном плотном ядре, 7 — R_1 , внутренняя граница полости

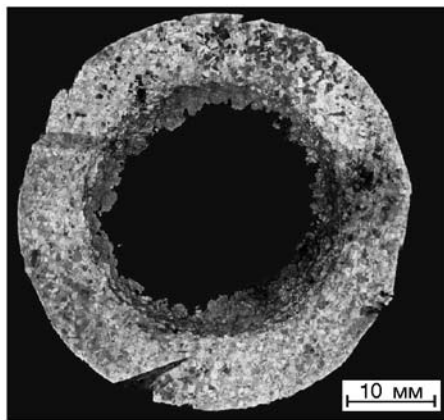


Рис. 5. Общий вид шлифа медной оболочки

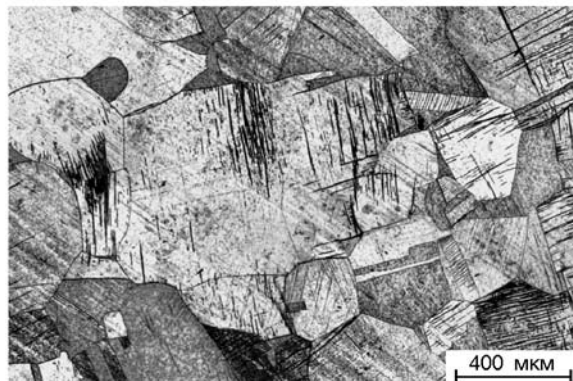


Рис. 6. Полосы локализованной деформации

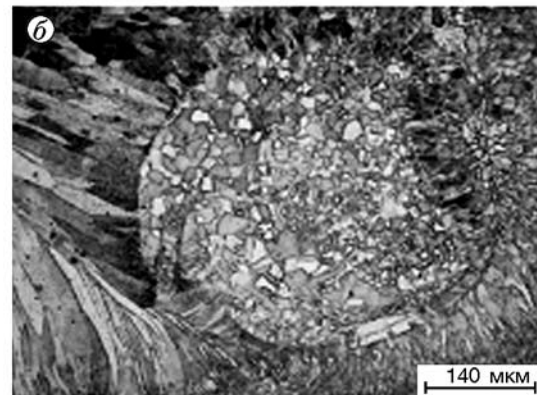
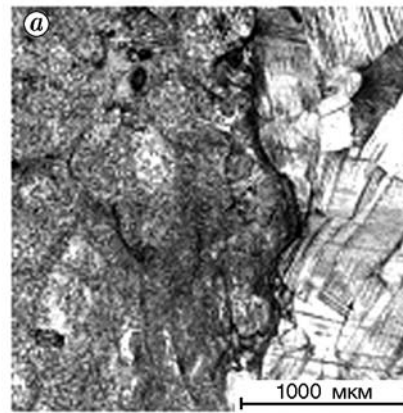


Рис. 7. Граница перекристаллизованной (расплавленной) зоны и нерасплавленной зоны (а). Область мелкозернистой структуры (б)

и их большим размером — ≈ 200 мкм и более. В случае такого крупного зерна важное значение приобретает кристаллографическая ориентировка относительно направления деформирования, причем даже не конкретного кристаллита, а его части.

Внутренний слой образца (зона, прилегающая к полости) претерпел рекристаллизацию и имеет признаки локального плавления. На рис. 5 эта зона вокруг полости более темная. В области рекристаллизации крупное исходное зерно (средний размер ≈ 200 мкм) перекристаллизовалось в мелкозернистую структуру (≈ 10 мкм) (рис. 7).

В пользу локального плавления свидетельствует тот факт, что в структуре присутствуют участки с явно выраженным направлением роста зерен. На рис. 8 видно направление отвода тепла перпендикулярно линиям, которые, вероятно, в какой-то момент времени были границами раздела (откольными трещинами). Впоследствии трещины закрылись, а зёрненная структура сохранилась.

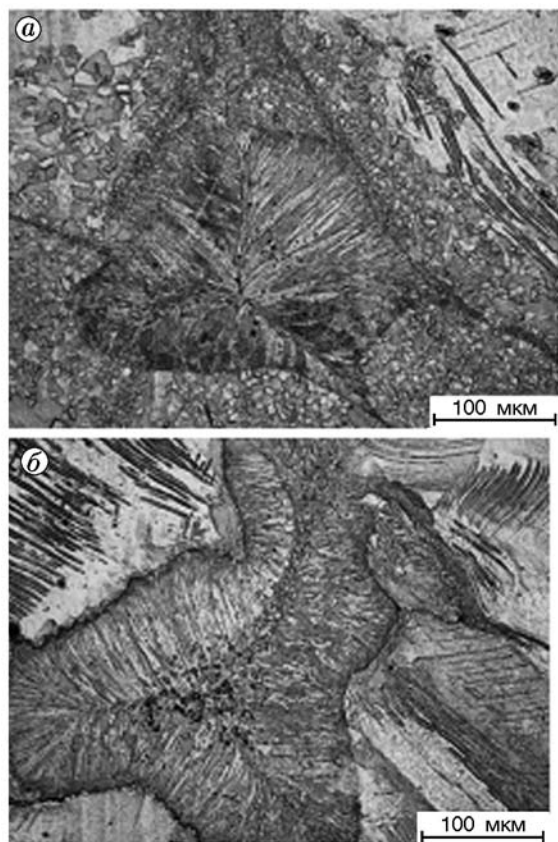


Рис. 8. Следы направленной кристаллизации (а) и застывания расплава вокруг поры (б)

Характерной особенностью микроструктуры ударно-нагруженной меди являются полосы локализованной деформации внутри зёрен. В плоской геометрии нагружения эти полосы формируются при $p > 20$ ГПа и скорости деформации больше 10^6 с^{-1} [11]. Измерение концентрации ПЛД (отношение числа зёрен, содержащих ПЛД, к общему числу зерен) показало рост этой концентрации от внешнего радиуса оболочки к внутреннему с некоторым спадом в средней области.

**РЕЗУЛЬТАТЫ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

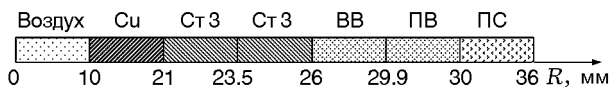


Рис. 9. Схема модельного расчета:
ПВ — продукты взрыва, ПС — пенопласт

Расчет движения модельной системы, разрез которой представлен на рис. 9, проводился в сферической геометрии по одномерной программе [12].

В расчетной схеме данной задачи система основных газодинамических уравнений замыкается уравнением состояния (УРС) в форме Ми — Грюнайзена $p = \rho_0 c_0^2 (\delta^n - 1)/n + \Gamma \rho c_v (T - T_0)$ (для меди и стали). Здесь ρ — плотность вещества, ρ_0 — начальная плотность вещества (алюминий), $\delta = \rho/\rho_0$ — сжимаемость, n — подгоночный параметр, $\Gamma = 2/(h - 1)$ — параметр Грюнайзена, T, T_0 — текущая и начальная температура, c_0 — объемная скорость звука при нормальных условиях, c_v — теплоемкость при постоянном объеме, h — предельное сжатие.

Деформирование медной оболочки в процессе ее схождения описывается уравнением Малверна — Дувалла для сдвигового напряжения [13]: $\dot{S} = (4/3)\mu(\dot{e}^t - 2\dot{\gamma}^p)$, которое определяет девиаторную составляющую тензора напряжения: $\sigma_x = P + S$. Здесь μ — модуль сдвига, \dot{e}^t — скорость полной деформации, $\dot{\gamma}^p$ — скорость пластического сдвига. Для определения $\dot{\gamma}^p$ используется соотношение Орована для скорости элементарной пластической деформации: $\dot{\gamma}^p = bNv$, где b — вектор Бюргера для средней дислокации, $v = v_\infty \exp(-\tau_0/\tau)$ — скорость перемещения дислокаций, $N = (N_0 + \alpha\gamma^p) \exp(-e\gamma/\tau)$ — плотность подвижных дислокаций, e — константа, характеризующая упрочнение, N_0 — начальная плотность дислокаций, α — константа размножения дислокаций, v_∞ — скорость волны сдвига (конечная скорость дислокаций), τ_0 — характеристическое напряжение торможения.

При движении оболочки к центру системы происходит ее разрушение. Для расчетного описания откольного разрушения использовалась модель NAG — вариант вязкой модели [14], согласно которой конечное выражение для скорости развития поврежденности имеет вид

$$\dot{\omega} = 8\pi R_0^3 \dot{N}_0 \exp\left(\frac{\sigma_x - \sigma_{n0}}{\sigma_1}\right) \Theta(\sigma_x - \sigma_{n0}) + 3\omega \left(\frac{\sigma_x - \sigma_{g0}}{4\eta}\right) \Theta(\sigma_x - \sigma_{g0}),$$

$$\rho = \rho_s(1 - \omega),$$

где σ_{n0}, σ_{g0} — пороговые напряжения образования и роста дефектов, R_0 — характер-

ный размер дефекта, \dot{N}_0 — скорость зарождения дефектов, σ_1 и η — параметры разрушения (η имеет размерность вязкости), ρ_s — плотность сплошной среды (без дефектов), $\Theta(\sigma_x - \sigma_{n0})$ — единичная функция Хевисайда.

Ниже представлены результаты численного моделирования.

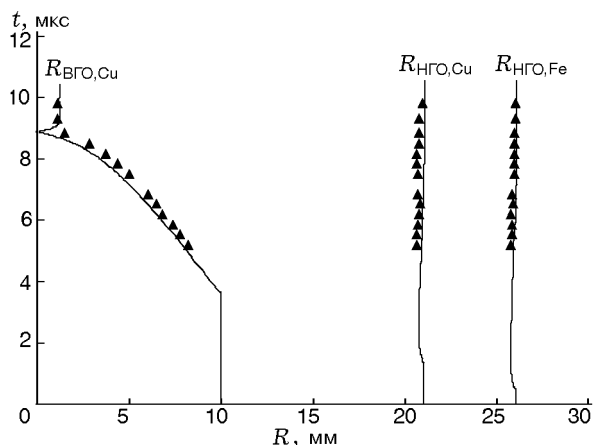


Рис. 10. $R-t$ -диаграмма процесса: ВГО — внутренняя граница оболочки, НГО — наружная; линии — расчет, точки — эксперимент

На рис. 10 приведена расчетная $R-t$ -диаграмма процесса схождения к центру внутренней границы медной оболочки и двух стальных оболочек, представлены также данные, полученные в эксперименте с протонографической регистрацией.

Согласно расчетной $R-t$ -диаграмме движение внутренней границы медной оболочки начинается через ≈ 3.64 мкс после подрыва заряда ВВ (позиция 4 на рис. 1). Через ≈ 5.26 мкс после начала движения внутренняя граница оболочки сходит к центру системы, полностью «схлопывая» полость. Одновременно с процессом схождения вблизи свободной поверхности оболочки возникают растягивающие напряжения, и оболочка раскалывается, т. е. к центру оболочка «движется» в разрушенном состоянии. В расчете образование откольных слоев внутри медной оболочки характеризуется падением средней плотности в сечениях оболочки, где возникают откольные слои. Расчетные распределения плотности по толщине медной оболочки в различные моменты времени, которые соответствуют временам протонографической регистрации, показаны на рис. 11, 12.

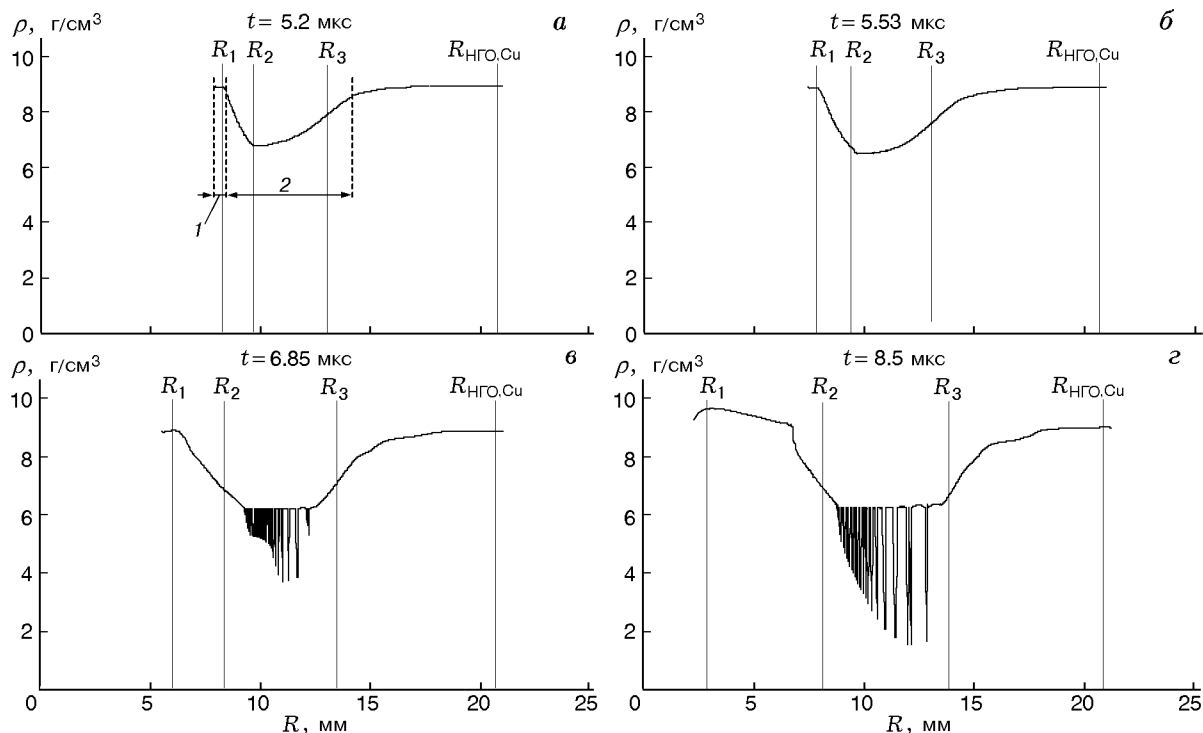


Рис. 11. Распределение плотности по толщине медной оболочки в различные моменты протонографирования:

1 — откольный слой, 2 — зона разрушенного материала

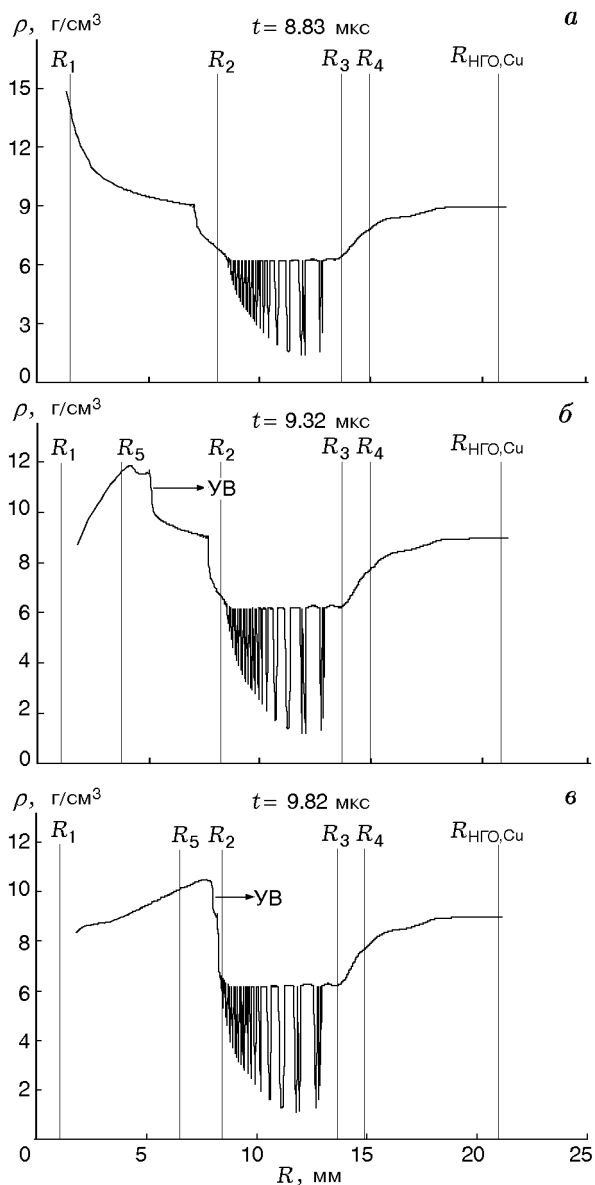


Рис. 12. Распределение плотности по толщине медной оболочки в различные моменты протонографирования

Помимо этого, на каждом рисунке приведены результаты трассировки наружной границы меди ($R_{\text{НГО,Cu}}$), границы между центральной полостью и внутренней границей медной оболочки (R_1), границы области откола в меди (R_2, R_3); вертикальными прямыми отмечены границы зарегистрированных областей.

Согласно расчетам в момент времени 5.2 мкс (время первой регистрации) в медной оболочке образуются откольный слой толщиной ≈ 0.45 мм (в качестве такового принимается интервал 1 (см. рис. 11,а), где $\rho \approx \rho_0$) и зона

разрушенного материала (интервал 2) протяженностью ≈ 5.6 мм ($\rho < \rho_0$). Положение внутренней границы медной оболочки (левая граница откольного слоя) удовлетворительно согласуется с границей полости, зарегистрированной в эксперименте (R_1). За откольным слоем следует зона поврежденности оболочки, причем максимальная поврежденность возникает в сечениях между экспериментально зарегистрированными границами R_2 и R_3 — этому соответствует диапазон минимальных значений плотности.

На рис. 11,б–г показаны распределения плотности по толщине медной оболочки в последующие моменты протонографической регистрации из интервала 5.53 ÷ 8.5 мкс, когда оболочка сходится к центру. Из этих рисунков следует, что откольный слой (граница R_1) стремится к центру системы, зона поврежденности расширяется (при $t = 5.2$ мкс она составляла ≈ 5.6 мм, при $t = 8.5$ мкс — ≈ 10 мм), при этом координаты границ R_2 и R_3 , зарегистрированные в эксперименте, практически не меняются, а толщина откольного слоя увеличивается от ≈ 0.45 мм при $t = 5.2$ мкс до ≈ 4.5 мм при $t = 8.5$ мкс. Увеличение толщины откольного слоя при сжатии оболочки возможно связано с «оседанием» частиц меди, движущихся к центру из зоны разрушения, на тонком первичном откольном слое, что приводит, согласно полученным изображениям, к образованию практически сплошного ядра (между R_1 и R_2).

Итак, на основании результатов численного моделирования и обработки изображений, полученных в эксперименте, показано, что к

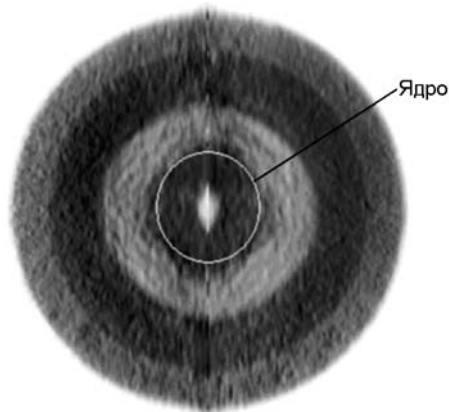


Рис. 13. Изображение ампулы в момент времени $t = 8.83$ мкс, близкий к полному схлопыванию

моменту полного схлопывания ($t \approx 8.9$ мкс) медная оболочка была разрушена, но в процессе схождения в центральном сечении ампулы образовалось практически сплошное ядро (рис. 13).

Дальнейший после схлопывания оболочки процесс распространения волн и формирования границ областей (см. рис. 12) характеризуется образованием отраженной от центра ударной волны R_5 (выделено на рис. 12, б, в) и еще одной границей R_4 , близкой к границе R_3 , которая в расчетах никак не проявилась. Поскольку ударная волна определяется, например, скачком плотности, то, как видно из рис. 12, б, в, фронт УВ, отраженный от центра, близко располагается к выделенной при обработке изображений границе R_5 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В опыте на ускорителе У-70 ИФВЭ проведена регистрация (13 снимков) динамики схождения к центру медной оболочки, равномерно нагруженной одновременной детонацией слоя пластического ВВ.

Выполнен металлографический анализ сохраненной после опыта медной ампулы, результаты которого выявили протекание рекристаллизации сильно деформированного и разогретого материала с уменьшением размера зерна с 200 до 10 мкм, а также — образование локального плавления в областях залечивания откольных повреждений.

В результате сопоставления экспериментальных данных и численного моделирования получено, что при схождении оболочка разрушается, образуя внутри ампулы плотное ядро. Образование ядра является результатом откольного разрушения оболочки и последующего «оседания» фрагментов разрушения на отколовшемся слое.

Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам Института физики высоких энергий за предоставленную возможность проведения эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Е. А., Бричков С. А., Вильданов В. Г. и др. Откольные и сдвиговые разрушения в сферически сходящихся оболочках из железа и сталей. Измерения энергий и остаточных деформаций // Деформация и разрушение материалов. — 2008. — № 11. — С. 2–18.
2. Козлов Е. А., Бричков С. А., Боярников С. А. и др. Особенности динамики схождения стальных оболочек при их взрывном нагружении по результатам лазерно-интерферометрических измерений // Физика металлов и металловедение. — 2011. — Т. 112, № 4. — С. 412–428.
3. Козлов Е. А., Бричков С. А., Кучко Д. П. и др. Локальные сдвиговые и откольные повреждения стальных оболочек при квазисферическом взрывном нагружении // Тр. междунар. конф. «Ударные волны в конденсированном веществе», Киев, Украина, 16–21 сентября 2012 г. — С. 158–167.
4. Аношин М. А., Габзетдинова Л. Я., Козлов Е. А. и др. Численное моделирование процессов разрушения в экспериментах с обжимаемыми оболочками // Деформация и разрушение материалов. — 2011. — № 3. — С. 23–27.
5. Войнов Б. А., Надыкто Б. А., Новиков С. А., Симицына Л. М., Ткаченко И. А., Юкина Н. А. Исследование структурных изменений в образцах различных материалов, сохраненных после воздействия высоких импульсных давлений // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 4. — С. 109–116.
6. Kozlov E. A., Litvinov V. V., Sapozhnikov A. T., et al. Acquisition and investigation of submicrocrystal structure materials in experiments on loading of metal spheres by spherically converging shock waves // Shock Compression of Condensed Matter — 1991. — P. 535–537.
7. Добромислов А. В., Талуц Н. И., Козлов Е. А. и др. Деформационное поведение меди в условиях нагружения сферически сходящимися ударными волнами. Низкоинтенсивный режим нагружения // Физика металлов и металловедение. — 2013. — Т. 114, № 4. — С. 391–400.
8. Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Бурцев В. В. и др. Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ // ПТЭ. — 2010. — № 3. — С. 5–12.
9. Шиберин И. В., Батьков Ю. В., Бурцев В. В. и др. Исследование развития полости в медном шаре при квазисферическом взрывном нагружении // Тр. междунар. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 304–309.
10. Аринин В. А., Бурцев В. В., Домничев В. В. и др. Исследование динамики развития полости в сплошном алюминиевом шаре при его квазисферическом взрывном нагружении // Тр. междунар. конф. «XIII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. — С. 636–642.
11. Подурец А. М., Раевский В. А., Ханжин В. Г., Лебедев А. И., Априлков О. Н., Иго-

- нин В. В., Кондрохина И. Н., Баландина А. Н., Ткаченко М. И., Пети Ж. М., Зохер М. Э. Двойниковые структуры в меди после ударного и безударного высокоскоростного нагружения // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 5. — С. 123–131.
12. **Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И. и др.** Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. — 1982. — Вып. 3. — С. 11–14.
13. **Гилман Дж.** Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии // Механика. — 1970. — Т. 120, № 2. — С. 96–124.
14. **Seaman L., Curran D., Shockey A.** Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. — 1976. — V. 47, N 11. — P. 4814–4826.

Поступила в редакцию 15/IV 2014 г.
