

УДК 539.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ И КОМПАКТИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

В. А. Брагунец¹, И. Н. Кондрохина¹, А. М. Подурец^{1,2}, В. Г. Симаков¹,
И. А. Терешкина^{1,2}, М. И. Ткаченко¹, И. Р. Трунин^{1,2}

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

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

На примере алюминия рассмотрены варианты постановки экспериментов, в которых предварительно разрушенные образцы (в опытах на откольное разрушение) в дальнейшем компактируются при повторном ударном нагружении. По результатам экспериментально-расчетного исследования и металлографического анализа сохраненных в опытах образцов определено давление компактирования алюминия ≈ 2 ГПа.

Ключевые слова: откольное разрушение, компактирование, металлографический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всё большую актуальность приобретает изучение движения раздробленных сред. При этом раздробленность может быть разной природы, например, заданной заранее (изначально пористая среда) либо возникающей в процессе движения первоначально сплошной среды. В последнем случае особенно важен вопрос о восстановлении сплошности (компактировании) в процессе повторного нагружения разрушенного образца.

Изучение механизмов разрушения и компактирования и их математическое моделирование являются сложной задачей, для решения которой требуются большой объем экспериментальной информации и разработка численных моделей. Следует отметить, что исследованию откольного разрушения различных материалов посвящено множество публикаций (см., например, работу [1] и библиографию в ней), тогда как информация о процессе компактирования носит ограниченный несистематизированный характер.

В данной работе на примере алюминия марки АД-1 рассмотрены варианты постановки экспериментов, в которых предварительно разрушенные образцы (опыты на откольное разрушение) в дальнейшем компактируются

(«залечиваются») при повторном ударном нагружении.

При выборе вариантов постановки экспериментов, на взгляд авторов, необходимо выполнение следующих требований:

- 1) во всех экспериментах должно быть использовано одинаковое нагружающее устройство;
- 2) в опытах на откольное разрушение поврежденность образцов должна быть незначительной (внутренней), т. е. образец не должен разрушаться на отдельные фрагменты;
- 3) образцы должны быть сохранены для дальнейшего металлографического анализа и последующего использования при исследовании процесса компактирования.

Согласно этим требованиям эксперименты проходили в два этапа. На первом этапе в образцах из алюминия создавали внутреннюю откольную поврежденность. На втором этапе сохраненные образцы с внутренней поврежденностью повторно нагружали ударной волной, чтобы скомпактировать их («залечить» внутренние повреждения).

Численное моделирование постановки данных экспериментов проводилось по одномерным и двумерным программам с использованием кинетической модели откольного разрушения [2], применяемой авторами для описания разрушения различных материалов [3, 4], и модели компактирования [5].

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

Схема постановки первого этапа опытов приведена на рис. 1 (материал ударника, экрана и кольца — алюминий, подложка — фторопласт; все размеры сборки указаны на рисунке).

Схему эксперимента выбирали на основании результатов численного двумерного моделирования (рис. 2), согласно которым образец в процессе нагружения не изменяет своей первоначальной формы и в срединном сечении образца возникают растягивающие напряжения, что может привести к его откольному разрушению.

Разгон ударника осуществлялся в стволе легкогазовой пушки калибра 37 мм. Скорость

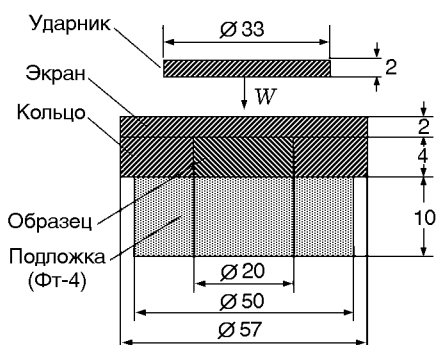


Рис. 1. Схема эксперимента

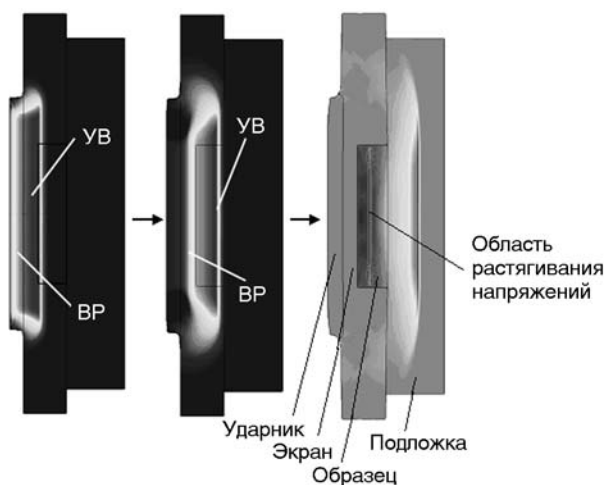


Рис. 2. Результаты двумерного расчета: распространение ударной волны (УВ) и волн разрыва (ВР), образование области растягивающих напряжений в сборке, приведенной на рис. 1

подлета ударника к мишени определялась с помощью специального лазерного устройства с относительной погрешностью $\approx 1\%$ в диапазоне $200 \div 500$ м/с.

Скорость ударника W варьировалась от 250 до 350 м/с. В этом интервале скоростей нагружения, согласно предварительным расчетам, возникает незначительное откольное разрушение образца: это либо отдельные дефекты — поры, либо цепочка пор, объединенных во внутреннюю магистральную трещину. При таком уровне нагружения образец сохраняет внешнюю целостность и может быть использован при повторном нагружении.

После каждого ударно-волнового эксперимента с зарегистрированной скоростью нагружения сохраненный образец разрезали по диаметру и исследовали шлиф его поперечного среза, определяли степень и характер поврежденности. На рис. 3 приведены фотографии шлифов сохраненных алюминиевых образцов из трех опытов. Как видно из рис. 3, с увеличением скорости нагружения W возрастает степень поврежденности алюминиевого образца. При этом во всех опытах образцы сохранили свою первоначальную форму, поэтому практически без доработки могли быть использованы при повторном нагружении.

Характер разрушения образцов — вязкий, с характерным дефектом, имеющим форму поры (см. рис. 4, где показан фрагмент структуры образца 3).

Расчетное сопровождение экспериментов проводилось по одномерной программе. Шаровая составляющая тензора нормальных напряжений $\sigma_x = -P + S_x$ задавалась уравнением состояния Ми — Грюнайзена

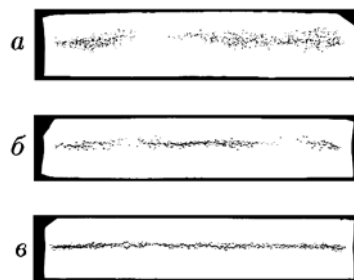


Рис. 3. Картина шлифов алюминиевых образцов (увеличение $\times 50$):

a — образец 1, $W = 279$ м/с, b — образец 2, $W = 316$ м/с, $в$ — образец 3, $W = 340$ м/с

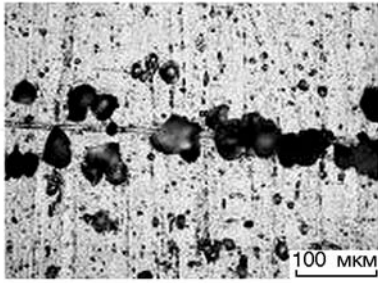


Рис. 4. Поврежденность образца 3 (увеличение $\times 200$)

$$P = \rho_0 c_0^2 (\delta^n - 1)/n + \Gamma \rho c_v (T - T_0),$$

девиаторная составляющая [6, 7] — уравнением

$$\dot{S}_x = \frac{4}{3} \mu \left[e^T - 2bc_t N_0 \left(1 + \frac{M}{N_0} \gamma^P \right) \exp \frac{-B - H\gamma^P}{\tau} \right].$$

Здесь ρ — плотность вещества, ρ_0 — начальная плотность вещества (алюминий), $\delta = \rho/\rho_0$ — сжимаемость, n — подгоночный параметр, Γ — параметр Грюнайзена, T, T_0 — текущая и начальная температура, c_0 — объемная скорость звука при нормальных условиях, c_t — поперечная скорость звука, c_v — теплоемкость, μ — модуль сдвига, b — вектор Бюргерса, N_0 — начальная плотность подвижных дислокаций, M — коэффициент размножения подвижных дислокаций, H — коэффициент деформационного упрочнения, B — характеристическое напряжение торможения, γ^P — сдвиговая пластическая деформация, τ — сдвиговое напряжение.

Моделирование откольного разрушения алюминия проводилось по кинетической модели вязкого разрушения [2, 3]:

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

где R_0 — начальный радиус дефекта (поры), \dot{N}_0 — параметр модели разрушения (начальная скорость образования дефектов), $\dot{N}_0 = \text{const}$, $\Theta(\sigma_x - \sigma_{n0})$ — единичная функция Хевисайда, η — параметр модели разрушения, характеризующий вязкость материала, $\eta = \text{const}$, σ_{n0} —

пороговое напряжение образования дефектов, σ_{g0} — пороговое напряжение роста дефектов, σ_1 — параметр модели разрушения, $\sigma_1 = \text{const}$.

На рис. 5 представлены расчетные распределения поврежденности ω по толщине образца x и сравнение результатов расчетов с результатами металлографического анализа сохранных после опытов образцов. Как видно из приведенных рисунков, с увеличением скоро-

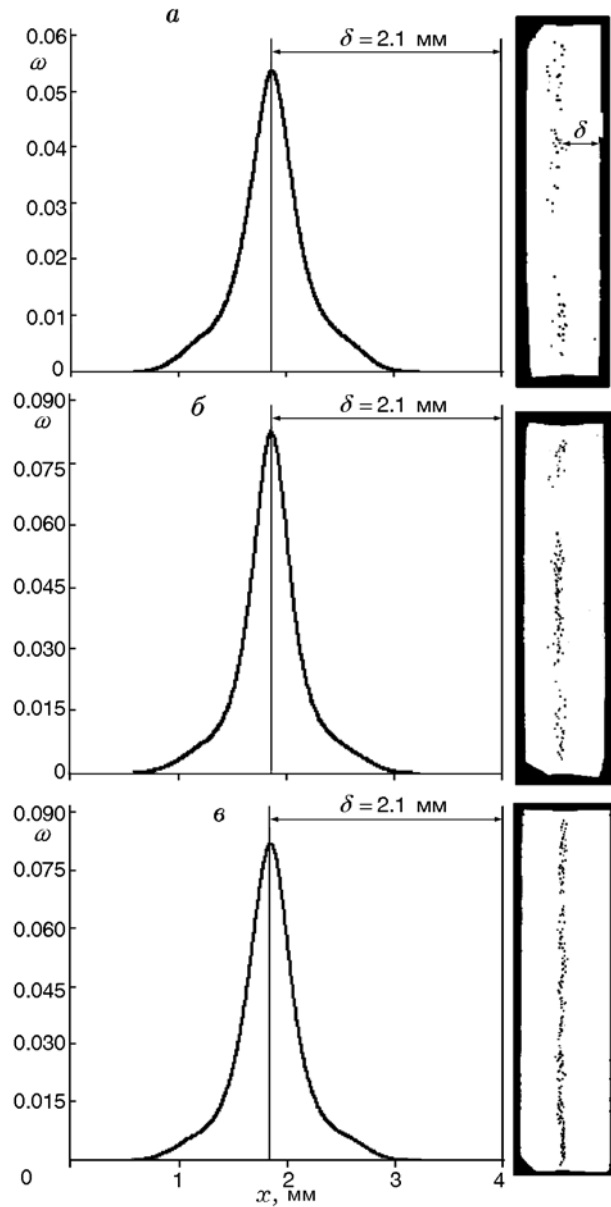


Рис. 5. Распределение поврежденности по толщине образца и результат металлографического анализа:

a — образец 1, $W = 279$ м/с, *б* — образец 2, $W = 316$ м/с, *в* — образец 3, $W = 340$ м/с

сти соударения максимальная поврежденность образцов незначительно растет и колеблется в пределах $0.05 \div 0.08$, что соответствует уровню начальной поврежденности материала. Зона разрушения находится в срединной области образцов (ее ширина, например, для образца 3 ($W = 340$ м/с) равна $250 \div 500$ мкм), и толщина откольных слоев во всех образцах, полученная как в расчетах, так и при измерениях по фотографиям поперечных срезов, составляет $\delta \approx 2$ мм.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАКТИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

В опытах на откольное разрушение при нагружении ударником со скоростью $W = 340 \pm 5$ м/с было подготовлено четыре образца, имеющих внутреннюю поврежденность, как у образца 3 (см. рис. 4). Эти сохраненные образцы нагружали алюминиевым ударником, как и в постановке опытов первого этапа, с одним лишь отличием: фторопластовая подложка на втором этапе опытов была заменена на алюминиевую толщиной 10 мм, что позволило исключить образование волны разрежения на границе раздела образец — подложка и, следовательно, повторное образование откольного разрушения. Таким образом, предварительно разрушенный образец должен компактироваться проходящей ударной волной.

Варьируя скорость повторного нагружения поврежденных образцов в диапазоне $250 \div 450$ м/с, а соответственно и амплитуду действующей на образец ударной волны, определяли уровень нагружения, при котором происходит компактирование поврежденного образца. Отсутствие или наличие внутренней поврежденности устанавливали путем металлографического исследования.

На рис. 6 приведены результаты металлографического анализа пестопытных образцов после компактирования и образца-свидетеля с внутренней поврежденностью. В опытах, где поврежденные образцы нагружались ударником со скоростью $W \approx 250 \div 450$ м/с, поры схлопывались, оставляя в зоне поврежденности след в виде узкой полоски («ручеек»). Ширина полосы, согласно измерениям, в несколько раз меньше среднего размера поры. На рис. 6, б хорошо видно, как поры «сливаются» в общую трещину. Можно предположить, что это начальная стадия компактирования и давление, соответствующее данному уровню нагру-

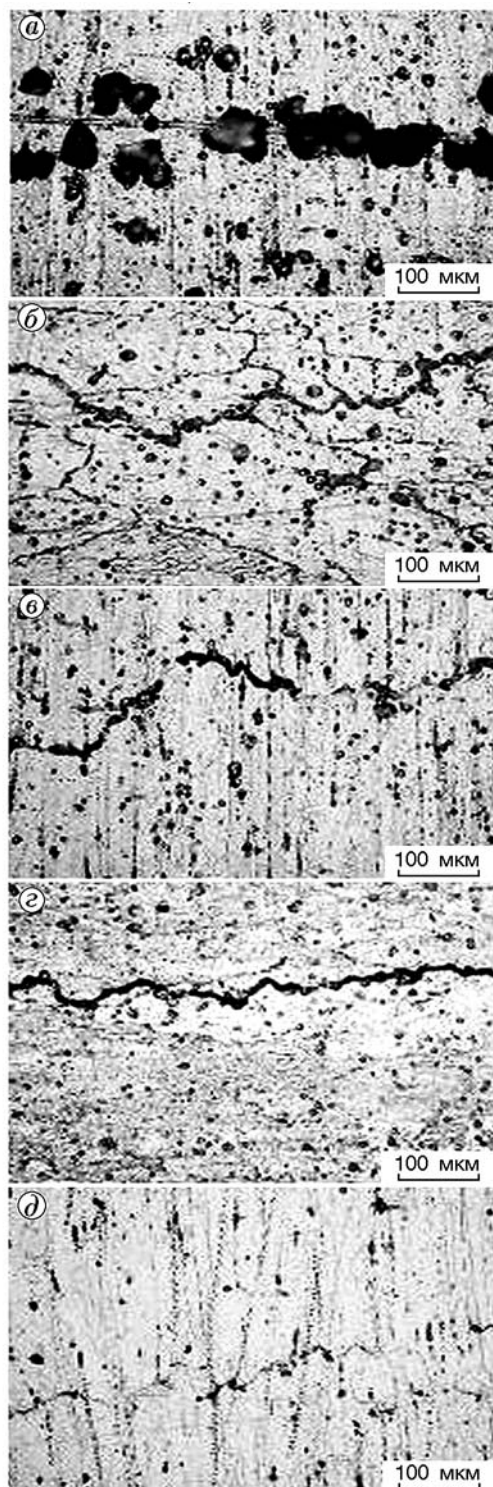


Рис. 6. Результаты металлографического анализа (увеличение $\times 200$):

a — поврежденность образца после опыта на откольное разрушение, $W = 340$ м/с; *б-г* — поврежденность после опыта на компактирование, $W = 255$ (*б*), 341 (*в*), 352 (*г*), 448 м/с (*д*)

Номер опыта	W , м/с	P , ГПа
1	255	1.85
2	341	2.50
3	352	2.60
4	448	3.30

жения, определяет нижнее граничное значение давления компактирования.

В таблице для каждого опыта по компактированию алюминия приведены расчетные значения амплитуды ударной волны, соответствующие скоростям нагружения. Согласно полученным результатам начальная стадия компактирования алюминия наблюдается при амплитуде ≈ 1.85 ГПа. С увеличением скорости нагружения образца изменяются структура и размеры зоны его поврежденности — поры сливаются в полосу шириной меньше среднего размера поры. При $W = 448$ м/с в отдельных зонах образца отсутствует характерная полоса, что свидетельствует о полном «залечивании» повреждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методически отработаны варианты постановки экспериментов, в которых предварительно разрушенные образцы из алюминия компактируются при повторном ударном нагружении.

Предлагаемые эксперименты позволяют более детально рассмотреть процессы разрушения и компактирования ударно-нагруженных веществ и возможности моделиро-

вания этих процессов. Исследование компактирования — принципиальный момент, так как процесс «залечивания» материалов, имеющих внутреннюю поврежденность, недостаточно изучен.

Полученные в работе результаты, кроме новых экспериментальных данных, дают также информацию о применимости используемых теоретических моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kanel G. I.** Spall fracture: methodological aspects, mechanisms and governing factors // Intern. J. Fracture. — 2010. — V. 163. — P. 173–191.
2. **Seaman L., Curran D., Shockey A.** Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. — 1976. — V. 47, N 11. — P. 4814–4826.
3. **Глушак Б. Л., Трунин И. Р. и др.** Численное моделирование откольного разрушения металлов // Фракталы в прикладной физике. — Саров: ВНИИЭФ, 1995.
4. **Трунин И. Р., Терешкина И. А.** Некоторые вопросы теории, эксперимента и численного моделирования откольного разрушения металлов. — Саров, 2013. — (Препр./ВНИИЭФ; № 113).
5. **Подурец М. А.** Термодинамическая модель пористого тела // Мат. моделирование. — 1996. — Т. 8, № 2. — С. 29.
6. **Malvern L. E.** Plastic wave propagation in bar of material exhibiting a strain rate effect // Quart. Appl. Math. — 1951. — V. 8, N 4. — P. 50–54.
7. **Гилман Д. Д.** Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии // Механика: пер. с англ. — 1970. — Т. 120, № 2. — С. 96–124.

Поступила в редакцию 22/XII 2013 г.