

УДК 623.4.082.6

СОХРАНЕНИЕ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ФАЗЕ РАЗРУШЕНИЯ

Ц.-Ц. Чжу, Вэнь-Б. Ли, С.-М. Ван, Вэй-Б. Ли

Нанкинский научно-технологический университет, 210094 Нанкин, Китай, njstlwb@163.com

При помощи специального устройства сохранены расширяющиеся под действием продуктов детонации металлические цилиндрические оболочки в промежуточной фазе, когда трещины проникают на всю толщину стенки. Для определения необходимого внутреннего диаметра устройства сохранения процессы расширения и разрушения оболочек из стали 40CrMnSiB регистрировались высокоскоростной камерой. Численное моделирование взаимодействия расширяющейся оболочки и устройства сохранения, а также влияния толщины стенки этого устройства проведено при помощи программы Autodyn-3D. Диаметр оболочки, сохраненной в промежуточной фазе разрушения, увеличился в 1.77 раза по сравнению с исходным, в то время как радиальная деформация составляла 5 мм. Установлено, что распределение трещин, расстояние между проникающими трещинами и число окружных разделений изменяются вдоль оси оболочки.

Ключевые слова: расширение, разрушение, разрушение в промежуточной фазе, максимальная радиальная деформация, проникание трещины.

DOI 10.15372/FGV20180214

ВВЕДЕНИЕ

Процесс динамического расширения и разрушения металлической цилиндрической оболочки при высокой скорости нагружения долгое время находился в центре внимания исследователей. Расширение при высокой скорости деформации, инициирование трещин и их распространение, деформация и механизм разрушения оболочек боеголовок при взрывной нагрузке тесно связаны с распределением фрагментов по массе и их разбросом по скорости и углу и, таким образом, напрямую влияют на разрушительную силу боеголовок. В 1940-х годах Мотт [1] и Тейлор [2] предложили физические механизмы напряженного состояния и образования трещин в цилиндрической оболочке с использованием теории статистической физики и волн напряжения. В работе [3] при исследовании физико-механического механизма разрушения металлической цилиндрической оболочки обнаружено, что с ростом давления происходит переход от разрушения типа растяжение со сдвигом к разрушению путем сдвига. В работе [4] анализ фрагментов цилиндри-

ческих оболочек, разрушенных при взрывной нагрузке, выполненный с помощью сканирующей электронной микроскопии, показал, что радиальные трещины первоначально формировались в середине оболочки вблизи внешней поверхности, а затем распространялись на внутреннюю и внешнюю поверхности с растягивающим напряжением в направлении кольца.

Изучать динамическую деформацию металлической оболочки при взрывной нагрузке очень трудно, и физический механизм динамического разрушения остается до сих пор неясным. Основываясь на работе [1], авторы [5, 6] всесторонне исследовали статистическое распределение фрагментов, образовавшихся после разрушения цилиндрической оболочки, и получили соотношение между скоростью деформации при взрывной нагрузке и размером осколков. Их работа дала эмпирическую модель фрагментации, основанную на физическом процессе образования осколков, но эта модель не позволяет эффективно анализировать процессы динамического расширения и разрушения цилиндрической оболочки при высокой скорости деформирования. Однако усовершенствование экспериментальных методов и технологий моделирования предоставило исследователям новые возможности. В работах [7, 8] с помощью высокоскоростных фотокамер наблюда-

© Zhu J.-J., Li Wei-B., Wang X.-M., Li Wen-B., Zheng Y., 2018.

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China.

ли эволюцию металлической цилиндрической оболочки, включая расширение, образование трещин и истечение продуктов детонации, что позволило изучить в динамике процессы генерации, эволюции и распространения трещин на ранних этапах.

В [9] методами численного моделирования было исследовано влияние взрывной нагрузки и начальных геометрических дефектов оболочки на формирование локализаций сдвига и повреждения, а также рассмотрены характеристики повреждений и факторы, влияющие на расширение и разрушение металлических цилиндрических оболочек. Кроме того, было обнаружено, что из-за того, что от точки инициирования распространяется сферическая детонационная волна, давления в осевом направлении различаются. В результате возникает осевое распределение скоростей нагрузки на металлическую цилиндрическую оболочку.

Авторы [10, 11] с помощью рентгенографии показали, что осевое распределение скоростей фрагментов цилиндрической оболочки при взрыве отличается от соответствующих характеристик разрушения. Однако физические механизмы так и остались недостаточно понятными, и создать на основе результатов экспериментов или моделирования макроскопическую физическую модель этих сложных процессов разрушения не удалось.

Попытки связать процессы разрушения с высокими скоростями деформации при детонационной нагрузке, со структурой цилиндрической оболочки и с микродефектами в материалах требуют дальнейшего изучения эволюционных процессов зарождения трещин и разрушения, а также механизма осевого разрушения на ранней стадии взрывного нагружения.

В данной работе на основе идеи сохранения оболочки, предложенной В. А. Кузнецовым [12], разработан метод проектирования устройства сохранения промежуточной стадии металлической цилиндрической оболочки, подвергающейся расширению и разрушению (в [12] это устройство называется цилиндр-остановщик). Основные параметры — внутренний диаметр и толщина стенки устройства сохранения — определяли с помощью высокоскоростной фотосъемки и численного моделирования по программе Autodyn-3D. В результате стало возможным сохранить и изучить структуру оболочки в стадии проникания трещины на всю толщину стенки оболочки.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

1.1. Структура и материалы боеголовки

В качестве объекта исследования выбрана цилиндрическая часть малокалиберного снаряда. Цилиндрическая оболочка изготовлена из стали 40CrMnSiB, закаленной при 860 °С и затем отпущенной при 500 °С. Размеры оболочки: внутренний диаметр 50 мм, длина 80 мм, толщина стенки 6 мм. Торцевые крышки сборки толщиной 10 мм изготовлены из стали 45 и размещены на обоих концах корпуса. Крышки соединялись с оболочкой резьбовым соединением длиной 5 мм. Внутри оболочки находилось прессованное композитное взрывчатое вещество (ВВ) на основе СЛ-20, а точка инициирования детонации располагалась в центре одного конца заряда. Для точной установки детонатора использовалась дополнительная обойма над торцевой крышкой.

Полная длина сборки $L_0 = 100$ мм, ее внешний диаметр $d_0 = 62$ мм. Основные механические характеристики стали 40CrMnSiB после отпуска: плотность 7.87 г/см³, предел прочности на растяжение 1409 МПа, предел текучести 1324 МПа, трещиностойкость 86 МПа·м^{1/2}. Характеристики ВВ на основе СЛ-20: плотность 1.94 г/см³, скорость детонации 9061 м/с, давление детонации 38.3 ГПа, удельная энергия $1.02 \cdot 10^7$ кДж/м³.

1.2. Экспериментальная схема

Компоновка устройства, используемого для сохранения промежуточной фазы при расширении и разрушении металлической цилиндрической оболочки, показана на рис. 1. Оболочка помещалась в фиксированном положении внутри устройства сохранения диаметром 400 и высотой 500 мм, которое позволяло сохранить структуру оболочки в состоянии, когда трещины проникали на всю толщину стенки. Для разгрузки продуктов детонации в осевом направлении и уменьшения ударных эффектов использовался слой пенопласта.

Устройство сохранения представляет собой цилиндр с внутренним диаметром D_0 в верхней части. Внешняя высота устройства H_0 , толщина стенки в верхней части δ_0 . На глубине H_1 от верхней части устройства диаметр внутренней полости уменьшается до D_1 , а еще ниже на глубине H_2 — до D_2 .

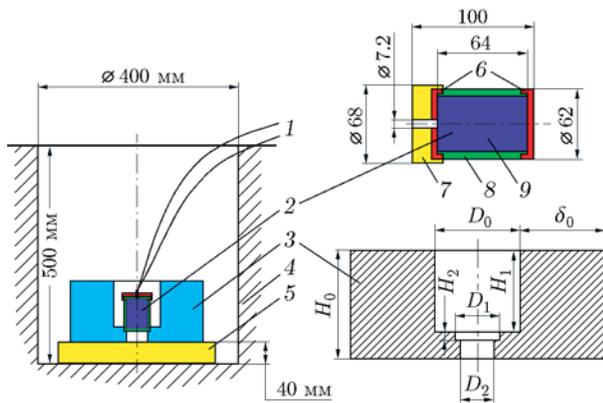


Рис. 1. Схема эксперимента и структура сборки:

1 — выводы детонатора, 2 — метаемая оболочка, 3 — обойма сохранения, 4 — основание, 5 — пенопласт, 6 — концевые крышки, 7 — фиксатор детонатора, 8 — оболочка, 9 — ВВ

Таким образом, внутри устройства образуется площадка, на которой размещается оболочка коаксиально с внутренней полостью устройства. Отметим, что глубина H_2 должна составлять меньше половины толщины концевой крышки, а диаметр D_1 , который используется для фиксации и установки сборки, должен быть немного больше ее наружного диаметра d_0 .

Прокладное отверстие на дне устройства диаметром $D_2 = 0.8d_0$ служит для разгрузки продуктов детонации и уменьшения ударного эффекта от них, а глубина сквозного отверстия $H_0 = H_1 + H_2$ должна быть больше всей длины оболочки L_0 .

Согласно вышеприведенному анализу, некоторые размеры устройства сохранения были определены по параметрам снаряда из стали 40CrMnSiB, выбранного в качестве объекта исследования: $D_1 = 62.2$ мм, $H_2 = 5$ мм, $D_2 = 50$ мм. Учитывая условие $H_1 + H_2 > L_0$, мы выбрали $H_1 = 100$ мм ($1.0L_0$), а высота всего устройства составляла $H_0 = 130$ мм ($1.3L_0$).

Внутренний диаметр D_0 устройства сохранения должен соответствовать радиусу стального корпуса a_f в фазе промежуточного разрушения, т. е. $D_0 = 2a_f$, и может варьироваться в зависимости от конкретной фазы процесса расширения и разрыва оболочки.

Для остановки расширения оболочки необходимо определить толщину стенки δ_0 . Если толщина δ_0 слишком мала, корпус продол-

жит расширяться и будет невозможно получить требуемую структуру разрушенной оболочки.

1.3. Расчет внутреннего диаметра устройства сохранения

Согласно теории Тейлора [2], при взрывной нагрузке в оболочке существуют две зоны. Одна представляет собой фазу смешанного напряжения вблизи внешней поверхности оболочки, вторая — фазу сжимающего напряжения вблизи ее внутренней поверхности. Граница между двумя зонами смещается к внутренней поверхности, по мере того как оболочка расширяется под нагрузкой. Предполагается, что при возникновении разрушения внешняя зона (фаза смешанного напряжения) распространяется на всю толщину стенки оболочки, где окружное напряжение от внутренней поверхности равно нулю, и радиус разрыва оболочки a_f может быть рассчитан по формуле

$$a_f = a_0 \left(\frac{\sqrt{3}p_H}{4\sigma_s} \right)^{1/2k}, \quad (1)$$

где a_0 — исходный внешний радиус стальной оболочки, $a_0 = 31$ мм; k — показатель адиабаты, $k = 3$; p_H — давление Чепмена — Жуге, $p_H = 38.3 \cdot 10^3$ МПа; σ_s — предел текучести оболочки, $\sigma_s = 1324$ МПа. Согласно уравнению (1) радиус разрушения равен $a_f = 47$ мм для условий данной работы, а диаметр соответственно 94 мм (т. е. $1.52d_0$).

Радиус разрушения оболочки дополнительно контролировали путем регистрации процесса расширения высокоскоростной фотокамерой. Схема экспериментальной установки с высокоскоростной камерой показана на рис. 2. Максимальная частота съемки составляла $6 \cdot 10^6$ кадр/с, время экспозиции 5 мкс, интервал между кадрами 1 мкс. Размеры изображения 5120×1920 пикселей (т. е. всего до 10 млн пикселей). В процессе калибровки камеры установлено, что минимальное разрешение может составлять 4 пиксельных точки, а реальное расстояние, соответствующее одному пикселю, — 0.05 мм, поэтому системная ошибка калибровки не превышает 0.20 мм, что дает необходимую точность.

В условиях естественного освещения и низкой контрастности стали по отношению к экспериментальной обстановке, а также из-за

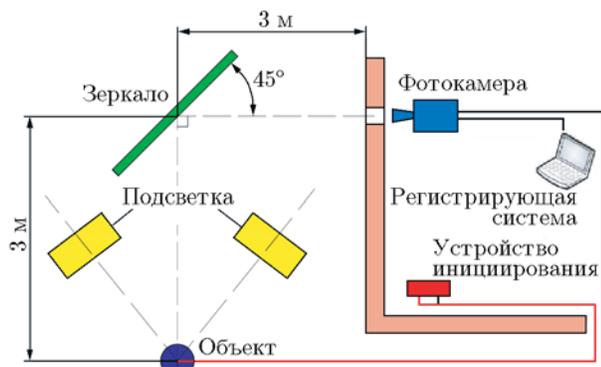


Рис. 2. Схема эксперимента для регистрации расширения и разрушения оболочки

короткого времени экспозиции фотографии получались очень темными. Поэтому для освещения оболочки использовалась подсветка двумя лампами мощностью по 2000 Вт, расположенными на небольшом расстоянии от оболочки, а ее поверхность была окрашена, чтобы увеличить контрастность и яркость регистрируемого изображения. Для защиты регистрирующей системы от высокоскоростных осколков на расстоянии 6 м от оболочки устанавливали стальной щит толщиной 20 мм с пуленепробиваемым стеклянным отверстием толщиной 25 мм.

На рис. 3 приведены фотографии, полученные через $10 \div 30$ мкс после начала взрыва. Для обработки фотографий использовалось программное обеспечение Hornil-StylePix.

Поскольку детонация инициируется на одном конце оболочки, то из-за волны разрежения, идущей от этого конца, скорости движения частей цилиндрической оболочки вдоль

оси оказываются разными. На основе анализа экспериментальных данных и действия волны разрежения [13] можно утверждать, что давление детонации достигает максимума на расстоянии около 70 % от длины цилиндрического корпуса. Поэтому в данной работе именно это положение выбрано в качестве точки наблюдения за процессом разрушения.

Через 20 мкс после инициирования детонации диаметр расширенной оболочки составлял $1.53d_0$ (где $d_0 = 62$ мм), но трещины еще не появились на поверхности корпуса. Через 25 мкс после инициирования диаметр оболочки увеличился до $1.83d_0$ и уже были видны трещины, при этом с поверхности корпуса просачивались продукты детонации. Следовательно, разрушение происходило в интервале времени $20 \div 25$ мкс после инициирования.

Исходя из того, что в промежутке времени $20 \div 25$ мкс диаметр расширяющейся оболочки изменялся от $1.53d_0$ до $1.83d_0$, получена оценка скорости деформации оболочки $6.8 \cdot 10^4$ с⁻¹. На основании экспериментальных результатов предполагается, что диаметр оболочки в фазе, в которой трещины проникают во всю толщину стенки, находится в пределах $(1.53 \div 1.83)d_0$. Это значение больше, чем найденное выше $1.52d_0$ с использованием уравнения (1). Относительное отклонение экспериментального значения от расчетного составляет $0.65 \div 16.9$ %. Для оболочки из стали 40CrMnSiB разрывы могут быть вызваны разрушением путем сдвига из-за высоких скоростей деформации, которые действуют на нее в результате детонации высокоэнергетического ВВ на основе Cl-20.

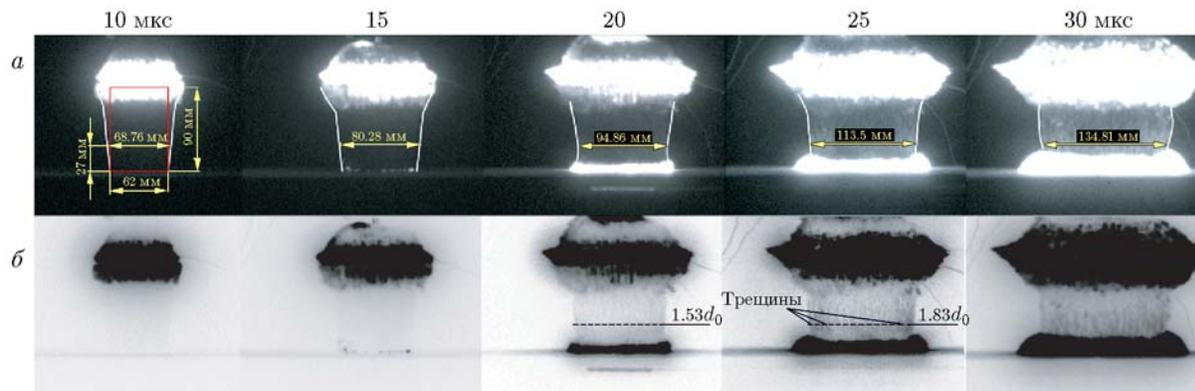


Рис. 3. Покадровые фотоснимки расширения и разрушения оболочки:

a — позитивное изображение, *б* — негативное, съемка слева направо после инициирования взрывчатого вещества

В то же время режим разрушения, используемый в теории Тейлора, представляет собой разрушение при растяжении, это приводит к тому, что расчетный диаметр оболочки в фазе, в которой трещины проникают на всю толщину стенки, меньше экспериментального. Поэтому внутренний диаметр устройства сохранения должен находиться в пределах $D_0 = (1.53 \div 1.83)d_0$, и в данной работе $D_0 = 1.612d_0$ (100 мм).

1.4. Расчет толщины стенки устройства

В реальности устройство сохранения не является абсолютно жестким телом, и поэтому радиальное расширение цилиндрического корпуса неизбежно, когда его внутренняя поверхность начинает контактировать с поверхностью расширяющейся исследуемой оболочки. Поэтому необходимо определить подходящую толщину стенки устройства сохранения δ_0 , которая будет гарантированно останавливать оболочку в желаемой фазе разрушения.

Для моделирования процессов, происходящих при контакте оболочки с устройством сохранения, и расчета толщины стенки использовалось программное обеспечение Autodyn-3D. Чтобы уменьшить время вычислений, использовалась стандартная модель в 1/4 цилиндра со структурой такой же, как у оболочки в эксперименте (см. рис. 1). Влияние торцевой крышки не учитывалось (рис. 4).

Для части модели, заполненной ВВ и воздухом, использовалась эйлерова сетка. Воздух моделировался уравнением состояния идеального газа [14]:

$$p = (\gamma - 1)\rho\varepsilon,$$

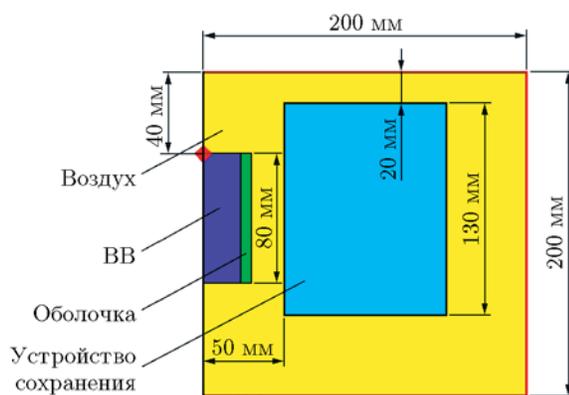


Рис. 4. Поперечное сечение 1/2 части расчетной модели

где ρ — плотность воздуха, p — давление, ε — внутренняя энергия на единицу массы, γ — показатель адиабаты воздуха, значения параметров взяты из библиотеки Autodyn [14]. Для ВВ на основе CL-20 использовалось уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли:

$$p_s = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}} \right) \exp(-R_1 \bar{V}) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}} \right) \exp(-R_2 \bar{V}) + \frac{\omega E}{\bar{V}},$$

где p_s — давление продуктов детонации, \bar{V} — относительный удельный объем продуктов детонации, E — удельная внутренняя энергия продуктов детонации. Коэффициенты $A = 875$ ГПа, $B = 30$ ГПа, $R_1 = 4.73$, $R_2 = 1.39$, $\omega = 0.26$ заимствованы из [15, 16].

Размеры сетки Эйлера должны быть достаточно большими, чтобы обеспечить ожидаемое расширение цилиндрической оболочки, поэтому была выбрана сетка размером $\varnothing 400 \times 200$ мм. Для оболочки и устройства сохранения использовалась лагранжева сетка. Диаметр, длина и толщина стенки корпуса составляли 50, 80 и 6 мм соответственно, а точка иницирования детонации располагалась в центре одного конца заряда. Высота устройства составляла 130 мм, а толщина стенки — 20, 40, 50, 70, 80, 100, 120 и 140 мм.

Для устройства сохранения выбрана высокопрочная легированная сталь 60Mn2Si. Исследуемая оболочка и устройство сохранения моделировались линейным уравнением состояния. Прочность описывалась моделью Джонсона — Кука:

$$\sigma = (A_1 + B_1 \bar{\varepsilon}^p)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}).$$

Здесь A_1 — предел текучести; B_1 — коэффициент деформационного упрочнения; C — коэффициент корреляции скорости деформации; n — показатель деформационного упрочнения, n и m — постоянные; $\bar{\varepsilon}^p$ — эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^* = \bar{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_0$ — безразмерное соотношение пластичности, где $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$; $T^* = (T - T_{\text{room}}) / (T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})$ — относительная температура, где T_{room} — комнатная температура, T_{melt} — температура плавления.

Для определения зависимостей напряжений — деформации при различных скоростях деформации для стали марок 40CrMnSiB

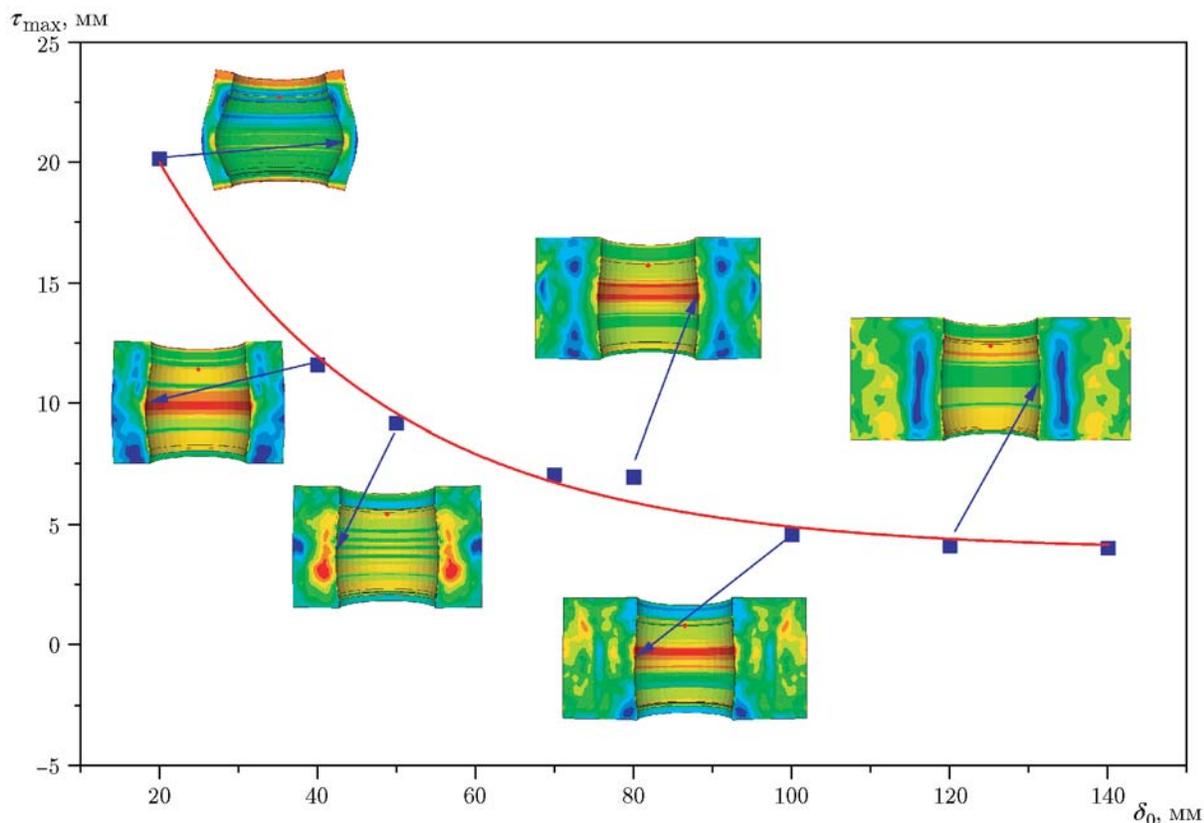


Рис. 5. Изменение максимального радиального прогиба внутренней стенки и деформация всего устройства в зависимости от толщины стенки устройства

и 60Mn2Si использовали методику разрезного стержня Гопкинсона. Образцы обеих сталей представляли собой цилиндры диаметром 4 мм и длиной 4 мм. Определяющее уравнение для стали 40CrMnSiB может быть выражено следующим образом:

$$\sigma = [1324 + 308(\varepsilon_e^p)^{0.282}] \times [1 + 0.0175 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*0.53}],$$

а для стали 60Mn2Si —

$$\sigma = [1047 + 262(\varepsilon_e^p)^{0.028}] \times [1 + 0.018 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*0.63}].$$

На рис. 5 показано изменение максимальной радиальной деформации внутренней стенки устройства сохранения τ_{\max} , а также его деформация в целом в зависимости от толщины стенки δ_0 через 80 мкс после подрыва. С увеличением толщины стенки максимальная радиальная деформация τ_{\max} и степень расширения устройства уменьшаются. Как видно, τ_{\max}

слабо меняется при $\delta_0 > 80$ мм, поэтому выбрана толщина стенки устройства $\delta_0 = 100$ мм ($1.62d_0$), что гарантирует сохранение структуры оболочки в фазе, когда трещины проникают на всю толщину стенки.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оболочка, сохраненная в промежуточной фазе разрушения, показана на рис. 6. В этой фазе трещины проникали на всю толщину стенки, и многие из них видны на поверхности оболочки, хотя значительной утечки продуктов детонации из трещин не наблюдалось. Измерения, за исключением области резьбового соединения, показывают, что осевая длина оболочки составляет около 70 мм, т. е. имеется лишь небольшая осевая деформация, вызванная процессом разрыва, и оболочка полностью сохранена.

На рис. 6 представлено также окончательное состояние устройства сохранения, где видно, что трещина появляется в конце устройства, но устройство сохраняет свою це-

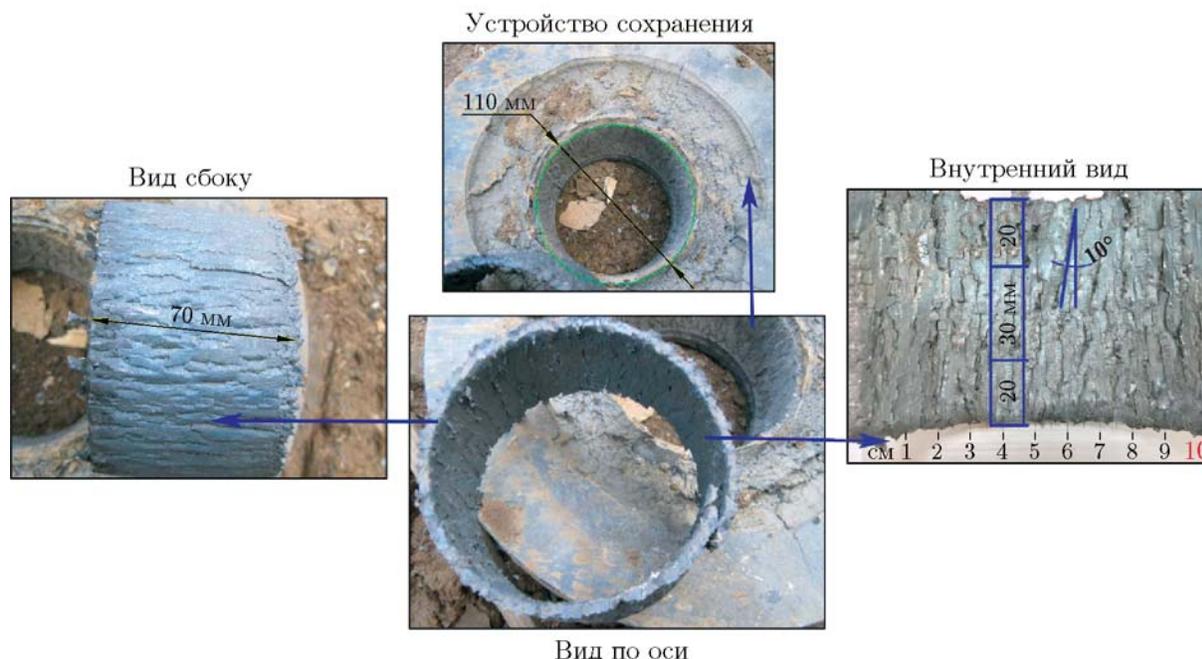


Рис. 6. Фотографии оболочки и устройства сохранения после эксперимента:

внутренний вид оболочки: 20 мм (сверху) — часть, где находился детонатор, 30 мм — средняя часть, 20 мм (снизу) — конец оболочки, наиболее удаленный от детонатора

лостность. Кроме того, внутренний диаметр устройства сохранения увеличился до 110 мм, а радиальная деформация составила 5 мм. Таким образом, в результате эксперимента структура оболочки в фазе, в которой трещины проникают на всю толщину стенки, успешно зафиксирована, при этом внешний диаметр оболочки, равный $1.77d_0$, находится в пределах вышеприведенной оценки $(1.53 \div 1.83)d_0$. Обнаружено, что основным режимом разрушения оболочки является проникающее сдвиговое разрушение, при котором направление распространения полос сдвига в основном согласуется с направлением максимального напряжения сдвига. Полосы сдвига направлены под углом 45° к окружности цилиндрической оболочки, как показано на рис. 7,а. На рисунке приведено также распределение трещин по всей окружности оболочки. На рис. 7,б просматривается ступенчатая структура разрушения оболочки в осевом направлении. Кроме того, видно, что количество трещин на внутренней стенке больше, чем на внешней поверхности (см. рис. 6). Это связано с тем, что темп роста некоторых сдвиговых трещин медленный и они не могут распространиться на всю толщину стенки оболочки.

Анализ внутренней и внешней поверхностей оболочки показывает, что распределение образовавшихся в ней трещин является относительно однородным, а расстояния между соседними сдвиговыми трещинами в окружном направлении различаются мало.

На рис. 6 (внутренний вид) видно, что трещины распределяются неравномерно вдоль оси цилиндрической оболочки. Их количество на обоих концах оболочки отличается. Распределение трещин в окружном направлении посередине оболочки и в нижней ее части (по распространению детонации) плотнее, чем в секции, где инициировалась детонация. Это различие обусловлено влиянием волны разрежения, движущейся вдоль оси, и слабым ограничением со стороны торцевой крышки в секции инициирования детонации. В результате поперечное действие продуктов детонации в этой части слабее и нагрузка на оболочку меньше, чем в других частях. Расстояние между соседними проникающими трещинами сдвига и количество трещин показаны в таблице. В дополнение отметим, что направление распространения трещин на начальном конце оболочки не параллельно ее оси (см. рис. 6), а смещено на небольшой угол $\approx 10 \pm 3^\circ$ от направления оси.

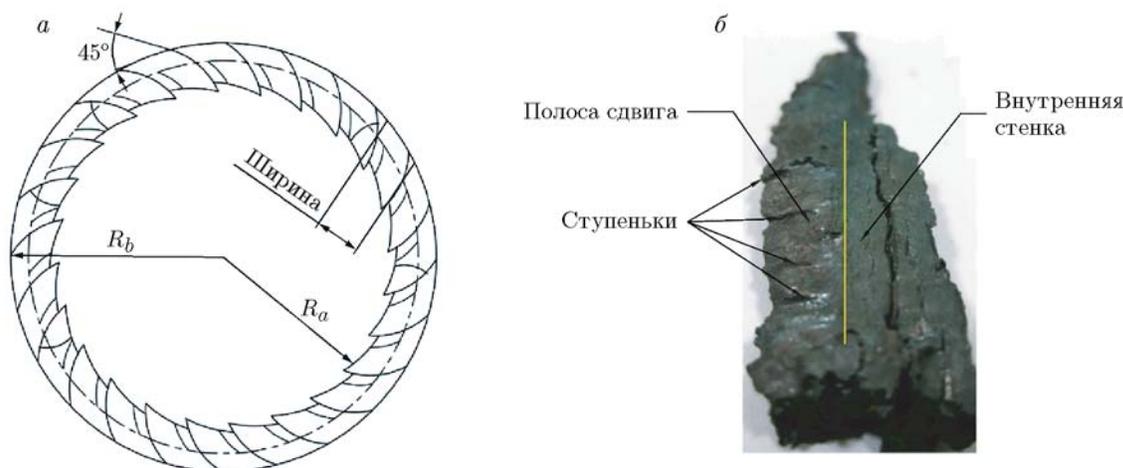


Рис. 7. Схематическое распределение сдвиговых разрушений на поперечном сечении оболочки (а), фрагмент сдвигового разрушения оболочки (б), демонстрирующий выделенные участки на фрагменте

Относительные размеры оболочки и устройства сохранения, полученные экспериментально и в результате моделирования

Осевое расстояние от места инициирования, мм	Количество трещин по окружности	Ширина смежных трещин на внешней стенке, мм ($P = 0.95$)	Расстояние между соседними проникающими трещинами, мм ($P = 0.95$)	Средняя толщина оболочки, мм ($P = 0.95$)	Средняя деформация	Средний диаметр устройства сохранения, мм ($P = 0.95$)	
						эксперимент	моделирование
0 ÷ 20	61	4.40±1.02	3.12±0.73	3.21 ± 0.21	0.465	107.24 ± 1.77	104.98 ± 1.34
21 ÷ 50	70	4.06±0.80	2.88±0.47	3.12 ± 0.13	0.480	108.02 ± 2.10	106.24 ± 1.65
51 ÷ 70	76	3.55±0.63	2.50±0.53	3.01 ± 0.17	0.498	109.78 ± 1.83	108.06 ± 1.79

* P — доверительная вероятность.

Для того чтобы не учитывать влияние сжимаемости на результаты измерения толщины, металлическая оболочка предполагалась несжимаемой. Средняя деформация в различных осевых положениях оболочки получена из степени уменьшения ее толщины $\varepsilon_f = (\Delta_0 - \Delta)/\Delta_0$, где Δ — толщина оболочки после взрыва, Δ_0 — ее начальная толщина, $\Delta_0 = 6$ мм. Результаты показаны в таблице. Деформация оболочки увеличивается по мере движения от конца оболочки со стороны инициирования детонации к противоположному концу оболочки, что связано с различным вдоль оси давлением продуктов детонации на ее стенку, как уже отмечалось выше. При этом результаты экспериментов и моделирования согласуются между собой, максимальное отклонение между ними менее 5 % (см. таблицу).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных экспериментах сохранена структура оболочки из стали 40CrMnSiB, расширяющейся под действием взрыва заряда CL-20 в фазе распространения трещины на всю толщину стенки. Экспериментально и путем численного моделирования определены параметры устройства сохранения оболочки при ее расширении — внутренний диаметр и толщина стенки. На основании расчетной зависимости максимальной радиальной деформации внутренней стенки устройства сохранения от ее толщины определено значение толщины стенки 100 мм, которое гарантирует сохранение структуры оболочки в стадии, когда трещина распространяется на всю толщину стенки.

Показано, что распределение трещин в окружном направлении различно вдоль оси оболочки в направлении от секции инициирования к нижней части оболочки. Кроме того, расстояние между соседними проникающими сдвиговыми трещинами вблизи секции инициирования больше, а количество окружных делений меньше, чем в других частях оболочки (в средней и нижней). Направление распространения трещин на начальном конце оболочки не параллельно ее оси, а смещено на небольшой угол $\approx 10 \pm 3^\circ$ от направления оси.

Результаты исследования структуры оболочек, сохраненных в различных фазах расширения, могут быть использованы для изучения законов, регулирующих эволюцию трещин, и механизмов разрушения цилиндрических конструкций. Кроме того, они могут поддержать будущие исследования взаимосвязи макроскопических свойств и эволюции микроструктуры в процессах расширения и разрушения.

Работа выполнена при поддержке Фонда естественных наук (проект N 11202103) и Qing Lan Project.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mott N. F.** Fragmentation of Shell Cases. — Mathematical and Physical Science, 1947.
2. **Taylor G. I.** Analysis of the Explosion of a Long Cylindrical Bomb Detonated at One End. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1963.
3. **Hoggatt C. R., Recht R. F.** Fracture behavior of tubular bombs // J. Appl. Phys. — 1968. — V. 3, iss. 3. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1656442>.
4. **Beetle J. C., Rinnovatore J. V., Corrie J. D.** Scanning electron microscopy // Proc. of the Fourth Annu. SEM Symp. III. Illinois Research Institute Chicago, 1971. — P. 137–144.
5. **Grady D. E.** Fragmentation of Rings and Shells. — N. Y.: Springer Verlag, 2006.
6. **Grady D. E., Olsen M. L.** Statistics and energy based theory of dynamic fragmentation // Intern. J. Impact Eng. — 2003. — V. 29. — P. 293–306.
7. **Hiroe T., Fujiwara K., Hata H.** Deformation and fragmentation behavior of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations // Intern. J. Impact Eng. — 2008. — V. 35. — P. 1578–1586.
8. **Zhang H., Ravi C. K.** On the dynamics of localization and fragmentation-IV, expansion of Al 6061—O tubes // Intern. J. Fracture. — 2010. — V. 163. — P. 41–65.
9. **Yu X. L.** Numerical simulation study on fracture mechanism of cylindrical shells subjected to explosive loading // Acta Armamentarii. — 2014. — V. 35, N 2. — P. 267–262.
10. **Huang G. Y.** Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing under explosive loading // Intern. J. Impact Eng. — 2015. — V. 76. — P. 20–27.
11. **Li W., Huang G. Y., Fen S. S.** Effect of eccentric edge initiation on the fragment velocity distribution of a cylindrical casing filled with charge // Intern. J. Impact Eng. — 2015. — V. 80. — P. 107–115.
12. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
13. **Ning J. G.** Explosion and Impact Dynamics. — National Defense Industry Press, 2010.
14. **ANSYS AUTODYN 14.0.** Theory manual ANSYS Inc. — Pittsburgh, 2013.
15. **Nan Y. X., Jiang J. W.** JWL equation of state of detonation product for CL-20 based pressed composite explosive // Chin. J. Energ. Mater. — 2014. — V. 23, N 6. — P. 516–521.
16. **Zhu J. J., Li W. B.** Effect of tempering temperature on the forming properties of fragments of 50SiMnVB steel shell // Acta Armamentarii. — 2015. — V. 36, N 11. — P. 2080–2086.

*Поступила в редакцию 3/III 2017 г.,
в окончательном варианте — 21/VII 2017 г.*