

УДК 539.3.534.1

## ПРОНИКНОВЕНИЕ В МИШЕНЬ СТРУИ КОЛЬЦЕВОГО КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ РЕЗКИ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ТОЧЕК ИНИЦИИРОВАНИЯ

Sh.-Zh. Wu, X.-A. Fang, Y.-Ch. Li, Zh.-R. Gao, Q.-A. Liu, J.-Q. Liu, J.-L. Xu,  
W.-B. Gu

Военно-инженерный университет Национально-освободительной армии Китая, Нанкин 210007, Китай  
guwenbin1@aliyun.com

Исследуется разрушение сплошного стального цилиндра (сталь 45, диаметр 120 мм) кольцевым кумулятивным зарядом при резке, направленной внутрь цилиндра. Процесс проникновения струи моделировался трехмерной моделью, выполняемой в программе ANSYS LS-DYNA. Проведено сравнение результатов расчета и испытаний в реальных условиях. Расчет процесса проникновения струи в мишень позволил установить форму детонационных волн, время появления струй в поперечных сечениях, проходящих через точки инициирования, и точки столкновения детонационных волн. Исследованы различные эффекты проникновения струй при 2-, 4- или 8-точечном симметричном синхронном инициировании. При 2-точечном инициировании кольцевой кумулятивный заряд в принципе мог разрезать стальной сплошной цилиндр, но инициирование в 4 и 8 точках было более эффективным. Увеличение числа точек инициирования обеспечивает больше точек столкновения детонационных волн, повышается скорость струи, реализуется ранний контакт струи с мишенью, увеличивается глубина проникновения, при этом возрастает скорость резки мишени.

Ключевые слова: кольцевой кумулятивный заряд для резки, глубина проникновения, форма детонационной волны, трехмерное численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20190618

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время недостаточно исследованы характеристики процессов формирования и проникновения в мишень струй, создаваемых кольцевым кумулятивным зарядом (КЗ). Ранее в основном проводились эксперименты по изучению конкретных приложений. В [1] была усовершенствована технология потенциального применения взрывной резки при выводе ядерных установок из эксплуатации. Разработка и испытание кольцевого КЗ проведены для четырех стандартов труб. В [2] рассмотрено несколько специальных взрывных технологий, используемых в нефтяных и газовых скважинах, и принципы их действия, включая струйное перфорирование, профильную резку, взрывную формовку, взрывную сварку и разрыв пласта с применением высокоэнергетиче-

ского газа. В [3] экспериментально исследовалось выключение твердотопливных ракетных двигателей методом кумулятивной резки. В работе [4] экспериментально и с помощью численного моделирования изучалось влияние торцевого эффекта на формирование струй линейного КЗ, а также был исследован процесс образования струй в кольцевом КЗ, предназначенном для взрывной резки. Результаты показали, что число точек инициирования и синхронность срабатывания оказывают большое влияние на процесс взрывной резки. При симметричном синхронном инициировании в 2, 4 и 8 точках огибающие струи расположены соответственно в следующих областях: внутри дорожки разбега и вне эллипса; как внутри, так и снаружи приблизительного квадрата; внутри окружности и вне приблизительного восьмиугольника. С увеличением числа точек инициирования качество формирования струй постепенно улучшается, а форма фронта детонации приближается к окружности. Закон изменения

© Wu Sh.-Zh., Fang X.-A., Li Y.-Ch., Gao Zh.-R., Liu Q.-A., Liu J.-Q., Xu J.-L., Gu W.-B., 2019.

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China.

скорости струи со временем в поперечном сечении точки инициирования имеет почти такую же тенденцию изменения. Вторичное столкновение головной части струи происходит на оси круговой симметрии и существенно изменяет направление вновь образованной струи: струя движется вдоль оси круга. Время вторичного столкновения струи сильно зависит от формы фронта детонации. Оно наступает раньше при увеличении числа точек инициирования. Кроме того, значительно возрастает изменчивость скорости струи [5].

В [6] приведен обзор некоторых проблем, возникающих при разработке линейного КЗ, описаны ранние разработки и их современный дизайн. Вследствие быстрого развития вычислительной техники моделирование кумулятивных зарядов становится доступнее и дешевле, а сами заряды — более эффективными и менее дорогостоящими [6]. В работе [7] разрушение струи кумулятивного заряда исследовалось с помощью комбинированного численно-аналитического анализа. Показано, что характеристики фрагментации зависят от размера зерна в лайнере. В [8] изучались причины, вследствие которых часть линейных КЗ не прошли квалификационных испытаний для космических применений. Эксперименты проводились с использованием импульсного рентгена и двумерных численных эйлеровых расчетов с плотностью сетки 400 ячеек/мм<sup>2</sup>. В [9] авторы оценивали передачу детонации в конечном соединении сборок линейного КЗ в системах аварийного прекращения полета с использованием компьютерного кода физики ударных волн, впервые внедренного в Сандийских национальных лабораториях (Sandia national laboratories). Приведены данные о входной геометрии, размерах ячейки, свойствах материала и пространственном распределении пикового давления/температуры в ударной волне. Кратко описаны функции и особенности устройства, а также обсуждаются результаты численного расчета, которые можно было бы улучшить. В [10] выполнены численное моделирование и эксперименты по изучению линейного КЗ с V-образными лайнерами, которые потенциально полезны в устройствах для вентиляции боеголовок. Эта новая технология может применяться для артиллерийского и ракетного снаряжения, особенно в случае крупномасштабных боеприпасов. В [11] предложен аналитический метод описания движения лайнера линей-

ного КЗ при детонации, получено стационарное аналитическое уравнение его движения на основе угла поворота Тейлора с использованием модифицированной теории Биркгофа. Сравнение с результатами численного моделирования показало, что аналитическая модель в целом точна, выявленные различия незначительны и получены благоприятные результаты в некотором ограниченном диапазоне. В [12] численно моделировались свойства струи линейного КЗ с использованием программного продукта AUTODYN. Для обоснования настройки модели проведено сравнение результатов расчетов с данными тестовых опытов. На основе проверенных моделей проанализирована взаимосвязь между характеристиками проникновения, шириной струи, компонентами скорости струи и величиной зазора. Эффективность проникновения достигала минимума при величине зазора выше некоторого порогового значения. В [13] исследовали формирование струи линейного КЗ методом сглаженных частиц. При проведении модельных экспериментов с металлическими лайнерами, которые ускорялись продуктами взрыва, использовались различные модели текучести материала и зажигания взрывчатого вещества (ВВ). Показано, что метод сглаженных частиц может стать альтернативным при решении задач о формировании струй. Некоторые трудности при вычислении этим методом возникают в случае сильного рассогласования динамических импедансов металла и продуктов взрыва, а также при гетерогенном распределении частиц [13].

Исследование характеристик процесса проникновения струи кольцевого КЗ в мишень чисто теоретическими методами затруднено тем, что этот процесс связан с многими факторами, включая структуру заряда, материал и методы его обработки и др. Существует также множество ограничений на эксперимент, которые связаны с подготовкой зарядов, выбором площадок для испытаний, отладкой оборудования, согласованием работы персонала. Кроме того, эксперименты обычно дают только конечный результат и не предоставляют информацию о процессе. В настоящее время отсутствуют эффективные методы и средства для детального изучения проникновения струи в мишень. Еще труднее проводить эксперименты при высоких нагрузках, хотя именно они дают базовые данные для численного моделирования. В последние годы в связи с быстрым

развитием компьютерных технологий методы численного моделирования приобрели важное значение во многих областях. Численное моделирование позволяет сэкономить время и ускорить ход исследований, повысить эффективность и значительно снизить объем работы, стоимость и риски более сложных экспериментальных исследований [4–16]. Наконец, точность и надежность результатов, полученных при численном моделировании, могут быть проверены экспериментально.

В данной работе посредством трехмерного численного моделирования и натурных испытаний изучались характеристики процесса проникновения струй, создаваемых кольцевым КЗ, в мишень.

## 1. СТРУКТУРА ЗАРЯДА И МОДЕЛЬ КОЛЬЦЕВОЙ РЕЗКИ

Для внутренней резки использовался кольцевой КЗ, состоящий в основном из заряда ВВ и профилированного лайнера. Кольцевой заряд имел клинообразную форму, внешний контур верхней его части представлял собой дугу. Ширина основания заряда 38 мм, высота заряда 26 мм. Толщина стенки кумулятивного лайнера 2.0 мм. Ширина основания кумулятивной выемки лайнера 34 мм. В качестве материала кумулятивного лайнера использовалось широко распространенное промышленное чистое железо, характеризуемое высокой плотностью, хорошей пластичностью, большой ударной вязкостью, низкой сжимаемостью, высокой температурой испарения, хорошими характеристиками при формировании и проникновении струи, мягкой текстурой, легкостью обработки, хорошими эксплуатационными качествами и низкой стоимостью. В качестве ВВ использовался широко распространенный состав В — литое ВВ на основе ТНТ с низкой температурой плавления. Из него изготавливался профилированный заряд методом литья в форму при низкой температуре. Такая технология упрощает механическую обработку, экономит энергию, легко адаптируется и безопасна. Толщина слоя ВВ в горизонтальном направлении нижней кромки кумулятивного лайнера равнялась 2 мм. Размеры поперечного сечения (1/2) кольцевого КЗ для внутренней резки показаны на рис. 1. Внутренний радиус вращения нижней кромки кумулятивного лайнера составлял 90 мм.

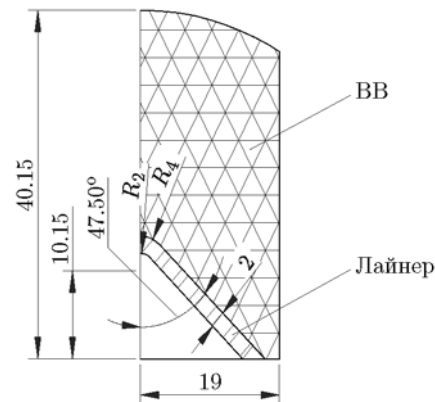


Рис. 1. Поперечное сечение кольцевого КЗ для внутренней резки:

размеры указаны в миллиметрах

Мишенью для резки служил сплошной цилиндр из стали марки 45 диаметром 120 мм.

Метод трехмерного моделирования выбран по той причине, что позволяет согласовывать расчет с реальной ситуацией. В этом методе рассматривалась воздушная среда, содержащая заряд и окружающую область (включая обе стороны заряда), что обеспечивало достаточное пространство для течения продуктов взрыва и материала профилированного лайнера. Модель численного расчета определена в соответствии со структурными параметрами кольцевого КЗ. Поперечное сечение КЗ и мишень характеризовались плоской симметрией, а КЗ имел также и аксиальную симметрию. Поэтому по окружным направлениям используется только одна четвертая часть модели, в поперечном сечении — половина модели, а в целом рассматривается одна восьмая часть модели. Все узлы на поверхности симметрии были ограничены. Модель строили начиная с элемента нижнего уровня диаграммы. Первоначально были определены ключевые точки, затем соответствующие линии и плоскости, и наконец была сформирована трехмерная модель (система единиц — см, г, мкс). Рассматривались три режима инициирования — двухточечное, четырехточечное и восьмиточечное симметричные синхронные инициирования по всему кругу.

При расчете сначала разбивалась на точки линия модели, затем строилась сетка на массиве модели. В работе построена трехмерная модель твердого материала. В вычислительной сетке использовалась гексаэдрическая ячейка. Для моделирования ВВ, профилированного лайнера и воздуха применялась эйлеро-



Рис. 2. Конечная модель кольцевого КЗ и стального цилиндра в качестве мишени

Таблица 1  
Материалы и уравнения состояния  
для численного моделирования

Расчетная область	Материал	Модель	Уравнение состояния
ВВ	Состав В	Горение ВВ	JWL
Лайнер	Железо	Джонсон — Кук	Грюнайзен
Воздух	Воздух	Нулевая	Грюнайзен
Мишень (стальной цилиндр)	Сталь 45	Джонсон — Кук	Грюнайзен

ва сетка, для мишени в виде стального цилиндра — лагранжева сетка. Для многокомпонентного материала использован лагранжево-эйлеров алгоритм. Между стальным сплошным цилиндром и ВВ, а также между профилированным лайнером и воздухом принят алгоритм связи жидкость — твердое тело, поскольку он не требует определения сложных контактных соотношений между отдельными частями и, кроме того, имеет хорошую вычислительную устойчивость. Внешняя поверхность воздуха определялась как неотражающая граница, т. е. рассматривалась как граница пропускания, что препятствовало отражению волны напряжения от этой поверхности. Конечная модель кольцевого КЗ и стальной мишени представлена на рис. 2.

Уравнения состояния ВВ, лайнера, воздуха и стальной мишени приведены в табл. 1 [3, 14, 17].

### 1.1. Взрывчатое вещество

Взрывчатое вещество описывалось моделью горения ВВ и уравнением состояния Джонса — Уилкинса — Ли (JWL), которое описы-

вает давление, объем и энергию высокотемпературных и газообразных продуктов, образующихся при взрыве заряда. Скорость детонации  $D$  считалась постоянной. Давление детонации определялось из уравнения

$$p = F p_{eos}(V, E_1). \quad (1)$$

Здесь  $F$  — параметр сгорания ВВ, характеризующий высвобождение химической энергии в процессе детонации;  $p_{eos}$  — давление продуктов, возникающих при устойчивой детонации ВВ согласно уравнению состояния JWL, ГПа;  $V$  — удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $E_1$  — плотность внутренней энергии на единицу начального объема ВВ, Дж/м<sup>3</sup>. Выражение для давления продуктов детонации можно записать следующим образом:

$$p_{eos} = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E_1}{V}, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  — входные параметры.

При численном моделировании в качестве ВВ использовался состав В (гексоген/ТНТ 60/40). Его параметры [15]:  $\rho = 1710$  кг/м<sup>3</sup>,  $D = 7790$  м/с,  $p_{сд} = 28.3$  ГПа,  $E_1 = 8.31 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>,  $A = 524.3$  ГПа,  $B = 7.67$  ГПа,  $R_1 = 4.2$ ,  $R_2 = 1.1$ ,  $\omega = 0.34$ .

### 1.2. Лайнер

Материал профилированного лайнера описывался моделью Джонсона — Кука и уравнением состояния Грюнайзена, которые точно описывают характеристики динамического отклика материала лайнера при высоком давлении продуктов детонации и высокой скорости деформации ( $>10^5$  с<sup>-1</sup>).

Таблица 2

Параметры уравнения состояния железа и стали 45

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E_2$ , ГПа	$\mu$	$A$ , МПа	$B$ , МПа	$C$	$n$	$m$	$S$	$\gamma_0$
Железо									
7 870	150	0.25	175	380	0.06	0.32	0.55	1.49	1.85
Сталь 45									
7 830	210	0.22	507	320	0.064	0.28	1.06	1.489	2.17

В качестве материала лайнера взято чистое промышленное железо. Его параметры приведены в табл. 2 [18].

Предел текучести материала зависит от деформации, скорости деформации и температуры:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\varepsilon}^p) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}^*}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}). \quad (3)$$

Здесь  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $m$  — входные константы материала, определяемые, как правило, из экспериментальных данных;  $\bar{\varepsilon}^p$  — эффективная пластическая деформация;  $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$  — безразмерная температура,  $T_m$  — температура плавления,  $T_0$  — комнатная температура.

Давление при сжатии материала определялось из выражения

$$p = \left\{ \rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right] \right\} \times \\ \times \left[ 1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]^{-2} + \\ + (\gamma_0 + \alpha\mu)E_2, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  — скорость звука, которая определяется отрезком на оси ординат, отсекаемым кривой, описывающей зависимость скорости ударной волны  $D$  от массовой скорости  $u$ , м/с;  $\gamma_0$  — коэффициент Грюнайзена;  $\alpha$  — объемная поправка первого порядка для  $\gamma_0$ ;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  — коэффициенты зависимости  $D(u)$ ;  $E_2$  — модуль упругости материала, ГПа. Состояние сжатия определялось относительным объемом  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ .

Соотношение между скоростью ударной волны  $D$  и массовой скоростью  $u$  имеет вид

$$D = C + S_1 u + S_2 \left( \frac{u}{D} \right)^2 u + S_3 \left( \frac{u}{D} \right)^3 u. \quad (5)$$

Давление в материале при растяжении описывалось выражением

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha\mu)E_2. \quad (6)$$

### 1.3. Мишень — стальной сплошной цилиндр

Сплошной стальной цилиндр описывался моделью Джонсона — Кука и уравнением состояния Грюнайзена, которые позволяют точно описывать характеристики динамического отклика стальной мишени, подвергнутой высокоскоростному воздействию металлической струи.

Используемые при численном моделировании параметры стали 45 приведены в табл. 2 [17].

Деформация материала мишени при разрушении является функцией среднего напряжения, скорости деформации и температуры:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \times \\ \times (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*), \quad (7)$$

где  $\sigma^* = p/\bar{\sigma}$ ,  $p$  — давление,  $\bar{\sigma} = (1.5s_{ij}s_{ji})^{0.5}$  — эквивалентное напряжение;  $s$  — девиаторная компонента напряжения, Па;  $D_1 = 0.8$ ,  $D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = 0$  — параметры разрушения. Материал разрушается, если  $D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon^f} = 1$ .

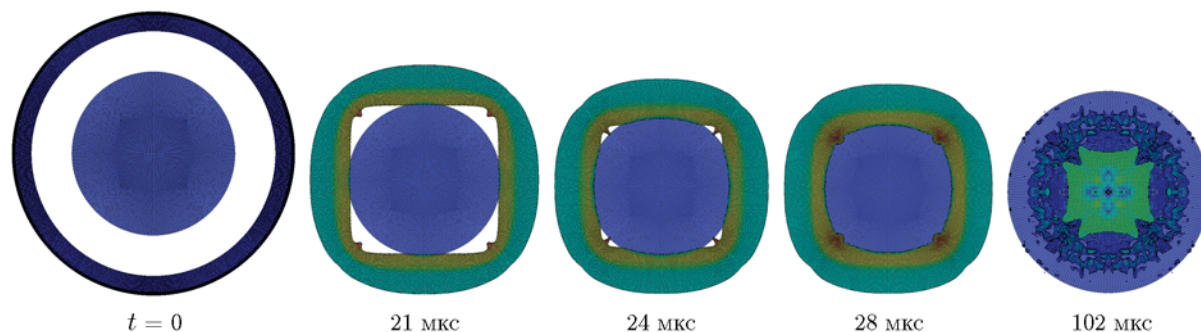


Рис. 3. Процесс проникновения струи в стальной цилиндр при 4-точечном симметричном синхронном инициировании (1/2 модели)

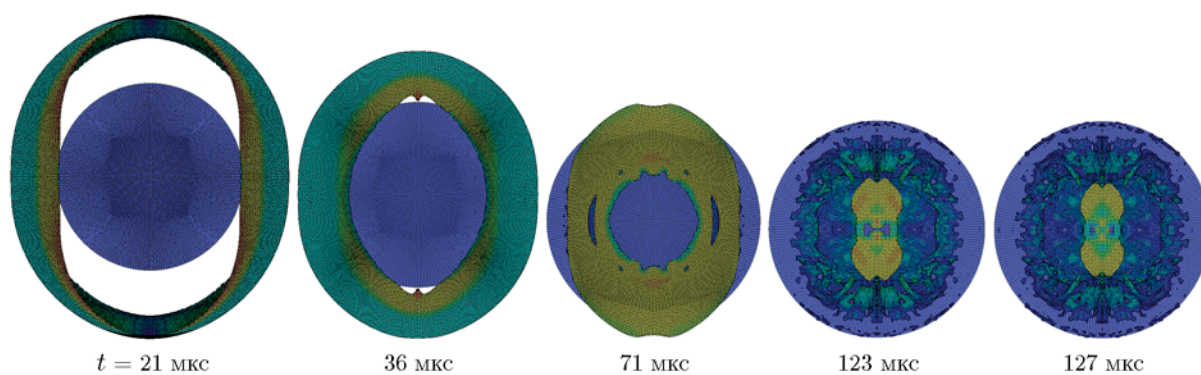


Рис. 4. Процесс проникновения струи в стальной цилиндр при 2-точечном симметричном синхронном инициировании (1/2 модели)

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗ

### 2.1. Проникновение кольцевой струи в стальную мишень

Процесс проникновения кольцевой струи при 4-точечном симметричном синхронном инициировании в мишень — стальной сплошной цилиндр диаметром 120 мм показан на рис. 3. Моментом инициирования ВВ выбрано время  $t = 0$ . В поперечном сечении, проведенном через точку инициирования, струя начинает проникать в стальной цилиндр в момент времени 21 мкс. В поперечном сечении, проведенном через точку столкновения детонационных волн, это происходит при  $t = 24$  мкс. При  $t = 28$  мкс глубина проникновения в сечении столкновения детонационных волн превышала глубину в сечении инициирования, и в дальнейшем также всегда была больше. Первой прорезала стальной цилиндр струя в сечении столкновения детонационных волн в момент времени  $t = 102$  мкс.

Резкое увеличение давления в точке столкновения детонационных волн передавалось на металлический лайнер и приводило к тому, что скорость струи вблизи точки столкновения волн была выше, чем в других секторах кольцевого КЗ, — так называемая вмятина на струе, появляющаяся при  $t = 24$  мкс.

На рис. 4 и 5 показаны процессы проникновения струи через стальной цилиндр при 2- и 8-точечном симметричном синхронном инициировании. Оба случая подобны процессу при 4-точечном инициировании. На рис. 4 видно, что струя в сечении 2-точечного инициирования начинает проникать в стальной цилиндр в момент времени  $t = 21$  мкс, а в сечении столкновения детонационных волн это происходит при  $t = 36$  мкс. При  $t > 36$  мкс глубина проникновения в сечении, проведенном через точки столкновения волн, постепенно догоняла и превышала глубину проникновения в сечении точек инициирования. Первой прорезала стальной цилиндр струя в сечении столкновения волн в момент времени  $t = 123$  мкс, затем



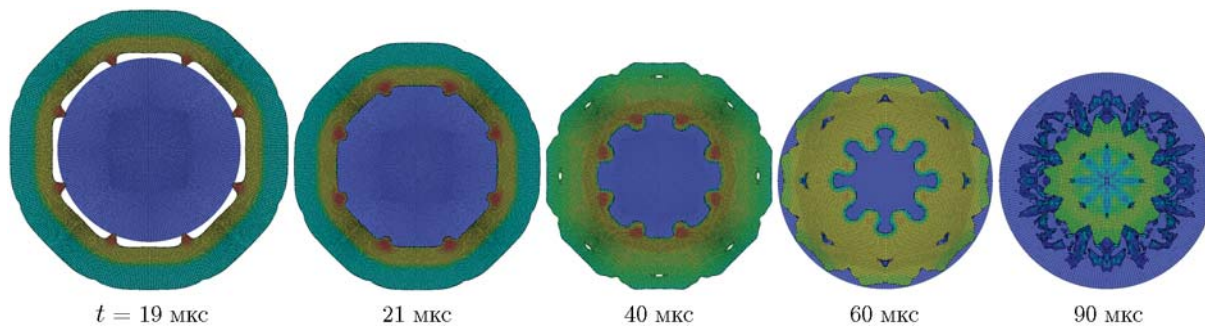


Рис. 5. Процесс проникновения струи в стальной цилиндр при 8-точечном симметричном синхронном инициировании (1/2 модели)

в сечении инициирования — при  $t = 127$  мкс. Из рис. 5 следует, что в случае 8-точечного инициирования струя в сечении столкновения волн первой проникала в стальной цилиндр в момент времени  $t = 19$  мкс, а в сечении инициирования — в момент времени  $t = 21$  мкс. С самого начала процесса глубина проникновения струи в сечении столкновения детонационных волн была больше, чем в сечении инициирования. Струя в сечении столкновения волн прорезала стальной цилиндр к моменту времени  $t = 90$  мкс.

Из результатов численного моделирования для трех типичных вариантов инициирования следует, что голова струи формировалась почти по прямой линии по обеим сторонам от точек инициирования в момент времени 21 мкс. Основная причина этого заключалась в следующем. Струя в точке инициирования формировалась первой и по времени была впереди струи, сформированной по обе стороны от точки инициирования. Но из-за круговой формы заряда исходное положение лайнера по обе стороны от точки инициирования было впереди исходного положения лайнера в точке инициирования. Чем дальше от точки инициирования, тем больше была выдвинута вперед исходная позиция лайнера. В результате все точки в голове струи выходят на прямую линию почти одновременно.

## 2.2. Характеристики кольцевой кумулятивной струи

На рис. 6 приведены зависимости глубины проникновения струи от времени в сечении точек инициирования и в сечении точек столкновения детонационных волн при симметричном синхронном инициировании в 2, 4 и 8 точ-

ках. Для сглаживания расчетных точек были использованы многочлены 4-й степени.

Из рис. 6 видно, что струя начинает проникать в мишень в сечении точки инициирования в момент времени 21 мкс. В поперечном сечении столкновения детонационных волн проникновение происходит позже — в моменты времени 36, 24 и 19 мкс при инициировании в 2, 4 и 8 точках соответственно. Из-за резкого увеличения давления, вызванного столкновением детонационных волн, скорость струи в сечении столкновения волн значительно возрастает, поэтому здесь выше и скорость проникновения струи. При 2- и 4-точечном инициировании глубина проникновения в сечении столкновения детонационных волн была больше, чем в сечении инициирования, в течение  $0 \div 71$  мкс и  $0 \div 28$  мкс соответственно, а глубина проникновения струи в сечении инициирования превышала глубину в сечении столкновения детонационных волн после 71 и 28 мкс соответственно. Кольцевая кумулятивная струя могла на значительную глубину прорезать стальной цилиндр при 2-точечном инициировании и прорезать его полностью при 4-точечном инициировании. При этом при 4-точечном инициировании времени на разрезание затрачивалось меньше, чем при 2-точечном инициировании. Интервал времени до столкновения детонационных волн при 8-точечном инициировании был намного короче, чем при 2- и 4-точечном инициировании. В целом глубина проникновения струи в поперечном сечении столкновения детонационных волн всегда была больше, чем в сечении инициирования. При 8-точечном симметричном синхронном инициировании мишень разрезалась быстрее, чем при 2- и 4-точечном инициировании.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И АНАЛИЗ РАБОТЫ КОЛЬЦЕВОГО КЗ ПРИ РАЗРЕЗАНИИ

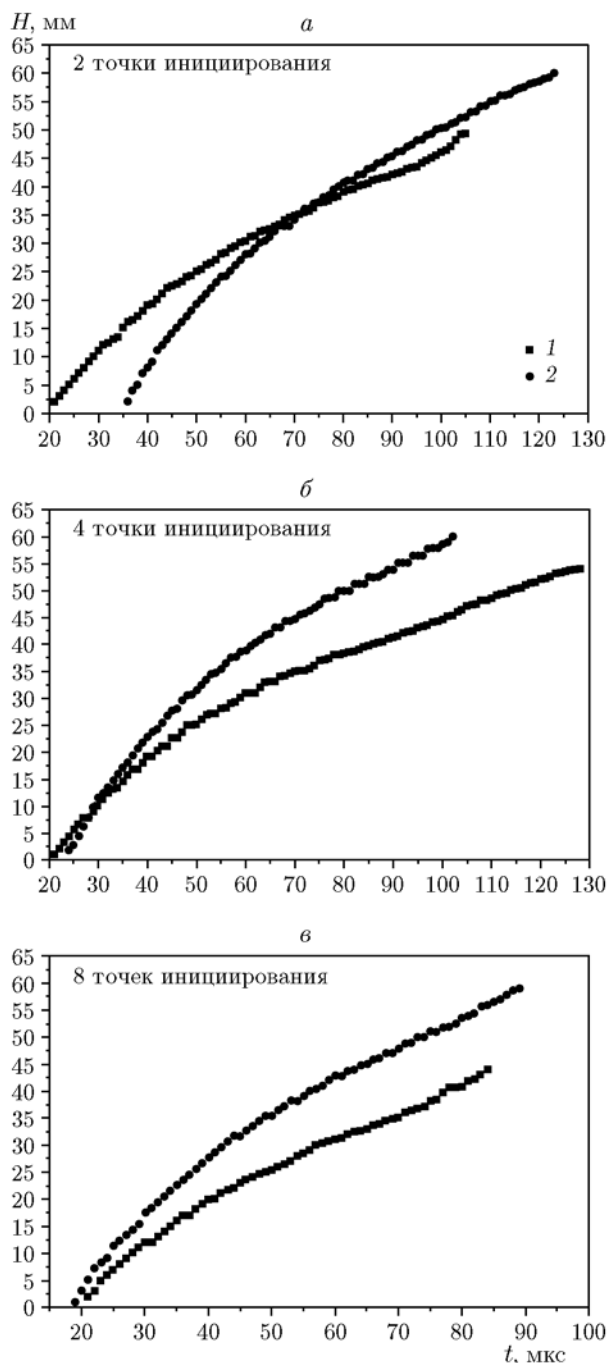


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения от времени в поперечном сечении, проходящем через точки инициирования (1), и в сечении, проходящем через точки столкновения детонационных волн (2)

4-точечное симметричное синхронное инициирование считалось лучшим для испытаний исходя из результатов численного моделирования, сложности изготовления и настройки устройства инициирования, а также требований по синхронизации инициирования. Этот способ отвечает требованиям задач по резке, а производственные трудности, связанные с таким способом инициирования, достаточно умеренные. Устройство для проведения испытаний показано на рис. 7, результат разрезания стального цилиндра — на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что в случае 4-точечного симметричного синхронного инициирования стальной цилиндр (сталь 45, диаметр 120 мм) был полностью разрезан кольцевым КЗ, и результат разрезания был идеальным. Глубина резки достигала 60 мм, что в 1.58 раза превышало ширину основания кумулятивной выемки, равную 38 мм, и в 1.77 раза превышало ширину выемки, равную 34 мм. В то же время глубина резки линейным КЗ такого же профиля такой же мишени из стали превышала ширину основания кумулятивной выемки, равную 38 и 34 мм, только в 0.64 и в 0.66 раза [18]. Другими словами, при заданных структурных параметрах кольцевого КЗ и материала мишени глубина резки была почти в 2.4 (либо в  $\approx 2.6$ ) раза больше, чем при использовании линейного КЗ. Основная причина этого явления заключается в том, что кумулятивная струя, сформированная кольцевым КЗ, была кольцевой и постепенно сходилась к оси симметрии. Ее скорость и масса имели больший прирост по сравнению со скоростью и массой линейного КЗ того же размера, что способствовало более глубокому проникновению струи в мишень.

На рис. 8 видно, что кольцевая кумулятивная струя оставила отчетливые метки на разрезе мишени. Следы металлической струи остались на обеих сторонах разреза мишени. В поперечном сечении столкновения детонационных волн кумулятивная струя была более заметна с обеих сторон разреза мишени, имела большую толщину и проникала глубже, чем в других частях мишени. Это означает, что выше были ее скорость и глубина проникновения. Морфология реального разреза в основном соответствовала результатам численного моделирования, что свидетельствует о его надеж-





Рис. 7. Устройство для проведения испытаний по резке

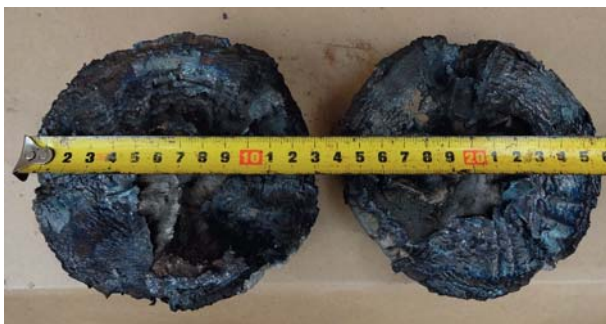


Рис. 8. Результат разрезания стального цилиндра

ности. Модели материалов и соответствующие параметры также оказались адекватными поставленной задаче.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В реальном эксперименте исследовалась способность кумулятивной струи разрезать сплошной стальной цилиндр. Проведено численное моделирование резки цилиндра (сталь 45, диаметр 120 мм) при симметричном синхронном инициировании в 2, 4 и 8 точках. Во всех случаях струя в поперечном сечении инициирования начинала проникать в мишень в момент времени 21 мкс, а в поперечном сечении столкновения детонационных волн — в моменты 36, 24 и 19 мкс. Глубина проникновения струи в поперечном сечении столкновения детонационных волн была выше, чем в сечении инициирования. Глубина проникновения была одинаковой в моменты времени 71

и 28 мкс при 2- и 4-точечном инициировании соответственно. При 8-точечном инициировании во всех испытаниях глубина проникновения струи в поперечном сечении столкновения детонационных волн всегда была больше, чем в сечении инициирования.

2. Столкновение детонационных волн приводит к резкому росту давления. Поэтому скорость струи в сечении столкновения детонационных волн значительно увеличивается, следовательно, здесь выше и скорость проникновения струи. С увеличением числа точек инициирования время до столкновения детонационных волн уменьшается, что приводит к значительному уменьшению времени, которое затрачивается кумулятивной струей на разрезание стальной колонны.

3. Для одних и тех же заряда и цилиндра при одинаковом расстоянии между цилиндром и лайнером кольцевая кумулятивная струя в принципе могла прорезать мишень при 2-точечном симметричном синхронном инициировании, однако с намного меньшим эффектом, чем при 4- и 8-точечном инициировании. С увеличением количества точек инициирования появляется больше точек столкновения детонационных волн, что приводит к улучшению формы струи, более раннему столкновению волн, более раннему касанию струи с мишенью и большему проникновению. Однако чем больше число точек инициирования, тем выше требования к устройству инициирования и его синхронизации. Четырехточечное инициирование — хороший компромисс между качеством оборудова-

ния и требованиями к резке. Изготовить такое детонационное устройство достаточно просто.

4. Для заданных структурных параметров кумулятивного заряда и материала мишени глубина резки кольцевым зарядом была более чем в 2.3 раза больше, чем линейным зарядом, независимо от ширины основания кумулятивной выемки заряда или лайнера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Kong J. S., Liu S. T., Zhang S. J., Yin H. S., Qu S. K.** Development of ringed-blast-cutter and its application in decommission of nuclear installation // Nucl. Power Eng. — 2001. — V. 22, N 3. — P. 276–280.
2. **Jing Z. Y., Zhang S. J.** Special blasting technologies for oil-gas well // Eng. Blasting. — 2003. — V. 9, N 1. — P. 32–37.
3. **Liu P. J., He G. Q., Li J., Chen J.** Experimental investigation on thrust termination realized by the explosive incision method // J. Solid Rocket Technol. — 2006. — V. 29, N 2. — P. 107–109.
4. **Wu S. Z., Gu W. B.** Experimental and three-dimensional numerical simulation for influence of end constraint on jet formation of cuneiform cover cutter // Chin. J. Energ. Mater. — 2013. — V. 21, N 6. — P. 806–811.
5. **Wu S. Z., Gu W. B., Li Y. C., Gao Z. R., Liu Q., Liu J. Q., Xu J. L.** Jet formation performance of circular shaped charge of cutting inward // Chin. J. Energ. Mater. — 2017. — V. 25, N 11. — P. 896–902.
6. **Novotney D., Mallery M.** Historical development of linear shaped charge // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, AIAA, 2007 (8–11 July). — P. 5141.
7. **Petit J., Jeanclaude V., Fressengeas C.** Breakup of copper shaped-charge jets: Experiment, numerical simulations, and analytical modeling // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98, N 12. — P. 563–572.
8. **Rondot F.** Tracking the «poorness» of a linear shaped charge // 23rd Int. Symp. on Ballistics, Tarragona, Spain 16–20 April 2007. — P. 169–176.
9. **Yang L. C., Do Ian P.H.** Titan IVB linear shaped charge assembly explosive train transfer reliability // 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Salt Lake City, Utah, OH, AIAA, 2001 (8–11 July). — P. 3220.
10. **Kim H. S., Madsen T., Pincay J., Al-Shehab N., Baker E. L.** Application of linear shaped charge for warhead venting // 23rd Int. Symp. on Ballistics, Tarragona, Spain 16–20 April 2007. — P. 231–238.
11. **Lim S.** Steady state equation of motion of a linear shaped charges liner // Int. J. Impact Eng. — 2012. — V. 44, N 3. — P. 10–16.
12. **Johnston M., Lim S.** Numerical observation of the jet flight patterns of linear shaped charges // Appl. Sci. — 2012. — V. 2. — P. 629–640.
13. **Yang G., Han X., Hu D. A.** Computer simulation of two-dimensional linear-shaped charge jet using smoothed particle hydrodynamics // Eng. Comput. — 2011. — V. 28, N 1. — P. 58–75.
14. **Wu S. Z., Gu W. B., Liu J. Q., Li X. F.** Test and three-dimensional numerical simulation of penetrating steel ingot by linear shaped charge with oval liner // Chin. J. Energ. Mater. — 2014. — V. 22, N 5. — P. 600–606.
15. **Ci M. S., Gu Y. Q.** The constitutive model and data of metal under the conditions of great transmutation, high strain rate and high temperature // Technol. Projectiles and Rockets. — 1998. — V. 3. — P. 32–44.
16. **Chen G., Chen Z. F., Xu W. F., Chen Y. M., Huang X. C.** Investigation on the J-C ductile fracture parameters of 45 steel // Explos. Shock Waves. — 2007. — V. 27, N 2. — P. 131–135.
17. **Wu S. Z., Gu W. B., Li X. F.** Penetration of steel ingot by linear shaped charge with cuniform cover // Explos. Shock Waves. — 2016. — V. 36, N 3. — P. 353–358.
18. **Li C. B., Pei M. J., Shen Z. W.** Three-dimensional numerical simulation of the high velocity rod-shaped projectile // Chin. J. High Pressure Phys. — 2007. — V. 21, N 2. — P. 165–172.

*Поступила в редакцию 11.07.2018.*

*После доработки 13.09.2018.*

*Принята к публикации 24.10.2018.*