

УДК 623.4.082.6

ГЕНЕРАЦИЯ ГИПЕРСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗРЫВНОМ ОБЖАТИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ТРУБОК

И. А. Балаганский¹, Л. А. Мержиевский^{1,2}, В. Ю. Ульяницкий^{1,2},
И. А. Батаев¹, А. А. Батаев¹, А. Д. Матросов², И. А. Стадниченко²,
И. С. Батраев², А. В. Виноградов¹

¹Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск
balaganskij@corp.nstu.ru

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально и численно исследованы особенности обжати керамических (корундовых) трубок продуктами детонации взрывчатых веществ. Изучено формирование кумулятивного потока керамических частиц и его воздействие на стальные мишени-свидетели. Для изготовления трубок использовали метод детонационного напыления. Керамические частицы напылялись на подложки — медные трубки, которые далее растворялись в растворе хлорного железа. В экспериментах зафиксировано значительное проникающее действие потока керамических частиц. Металлографический анализ показал, что в процессе взаимодействия потока с мишенью материал мишени частично испарялся. Численный анализ процесса демонстрирует особенности формирования дискретной кумулятивной струи, максимальная скорость лидирующей части которой близка к 23 км/с, скорость основной части струи около 14 км/с.

Ключевые слова: дисперсные кумулятивные струи, гиперскоростное метание, высокомодульная керамика.

DOI 10.15372/FGV20180117

ВВЕДЕНИЕ

Устройства для гиперзвукового ускорения ударников широко используются при исследовании и разработке противометеоритной защиты космических аппаратов. Как правило, работа этих устройств основана на явлении кумуляции — сосредоточении энергии взрыва в заданном направлении, что приводит к значительному локальному увеличению разрушительного действия, которое обычно осуществляется кумулятивной струей, формируемой при обжатии кумулятивной облицовки взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ). Как правило, в качестве материалов кумулятивных облицовок используются пластичные металлы типа меди, которые образуют сплошные струи, обеспечивающие высокое проникающее действие.

По-видимому, первой публикацией, посвя-

щенной исследованию возможностей получения гиперзвуковых кумулятивных струй на основе кумуляции, была работа [1], в которой использовались кумулятивные облицовки из бериллия. Бериллий характеризуется высокой скоростью звука, а максимальная скорость кумулятивной струи v_j , способной пробивать преграды значительной толщины, как известно, не может превышать величину [2, 3]

$$v_j \leq 2.41c_b,$$

где c_b — объемная скорость звука в материале облицовки. Этот предел справедлив для струй, способных поражать преграду, однако он не обязательно будет реализовываться в конкретном кумулятивном заряде.

В зарядах с облицовкой из бериллия образовывались газообразные струи с гораздо более высокой скоростью, однако их плотность настолько мала, что они наблюдаются лишь в вакууме. Максимальная скорость таких струй для бериллия составляла ≈ 90 км/с, заметного поражающего действия они не производят.

Одним из видов кумулятивных ускорителей является газокумулятивный ускоритель,

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00068).

© Балаганский И. А., Мержиевский Л. А., Ульяницкий В. Ю., Батаев И. А., Батаев А. А., Матросов А. Д., Стадниченко И. А., Батраев И. С., Виноградов А. В., 2018.

описанный в работе [4]. В этом случае заряд ВВ представляет собой трубку, внутри которой формируется кумулятивная струя продуктов детонации, распространяющаяся по трубке со скоростью, существенно превышающей скорость детонации. Струя может ускорить тело (обычно шар) до скоростей нижнего космического диапазона $8 \div 14$ км/с.

Известно [5–7], что формирование кумулятивных струй происходит, если точка соударения при обжати кумулятивной облицовки движется со скоростью v_k , не превышающей объемной скорости звука в материале облицовки:

$$v_k \leq c_b.$$

Для повышения скорости кумулятивных струй возможно их формирование из цилиндрических облицовок (трубок) [6, 7]. Поскольку для цилиндрической кумулятивной облицовки скорость точки соударения равна скорости детонации D в заряде ВВ,

$$v_k = D,$$

для формирования струи из цилиндрической облицовки необходимо выполнение условия

$$c_b \geq D.$$

Таким образом, в качестве материала цилиндрических облицовок могут быть использованы высокоимпульсные керамики, имеющие скорость звука, превышающую скорость детонации ВВ. Однако такие материалы не образуют сплошных струй.

В исследованиях [8, 9] при теоретическом пределе скорости струи 19 км/с была получена максимальная скорость дискретной керамической струи, сформированной из корундовой трубки, 12.4 км/с. Проникающее действие такой струи не оценивалось.

Целью данной работы являлась оценка проникающего действия дискретной керамической струи.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В экспериментах исследовалось действие потока керамических частиц, формируемых при взрывном обжати корундовых трубок, на стальные преграды. Была предложена собственная методика получения керамических трубок из порошка корунда. Трубки были изготовлены в Институте гидродинамики СО РАН

методом детонационного напыления на установке ССДС2000 [10].

Напылялся порошок электрокорунда фракции $20 \div 28$ мкм. В процессе напыления частицы порошка разогреваются до полурасплавленного состояния и метаются на подложку со скоростью $600 \div 700$ м/с [11]. При взаимодействии отдельных частиц на подложке формируется плотный монолитный слой корунда с прочностью связи частиц около 50 МПа. За один проход на подложке формируется слой толщиной около 10 мкм, и полная толщина наращивается перемещением по спирали. В качестве подложки для напыления использовались медные трубки, которые в дальнейшем растворялись в растворе хлорного железа. Получены трубки внутреннего диаметра 15 мм, длиной 100 мм с толщиной стенки $\delta = 0.5, 1.0, 1.5$ мм. Внешний диаметр зависел от толщины стенки трубок.

Пористость керамических трубок, определяемая методом гидростатического взвешивания, составляла $\approx 4\%$. Трубки на половину толщины были пропитаны хлоридом железа, которым вытравливали медь. Степень влияния пористости и остаточного хлорного железа на результаты экспериментов нами не оценивалась.

Экспериментальные сборки снаряжались ВВ ТГ-50 методом литья. Масса каждого заря-

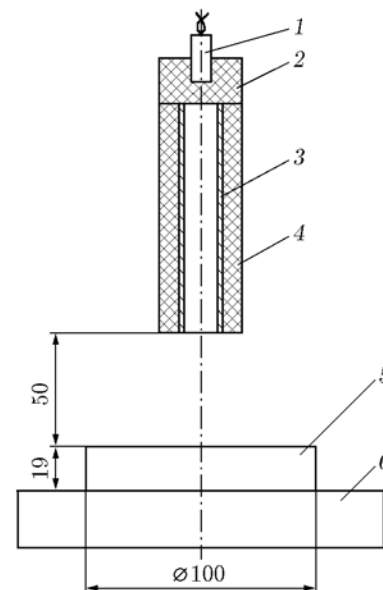


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

- 1 — электродетонатор, 2 — инициирующий заряд, 3 — керамическая трубка, 4 — основной заряд, 5 — мишень, 6 — основание



Рис. 2. Лицевая (а) и тыльная (б) стороны образцов-свидетелей, подвергнутых воздействию кумулятивных струй, сформированных из керамических трубок с толщиной стенки $\delta = 0.5$ (1), 1.0 (2), 1.5 мм (3)

да ВВ 200 г. Внешний диаметр заряда 36 мм, длина 100 мм. При выполнении экспериментов с трубками с толщиной стенки 1.5 мм заряды помещались в оболочку из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 5 мм. Схема экспериментальной сборки представлена на рис. 1 (оболочка не показана).

Для сравнения был выполнен эксперимент с зарядом в дюралюминиевой оболочке с осевым каналом, но без трубки. Оценивалось действие газовой кумулятивной струи. Заряды устанавливались на расстоянии 50 мм от мишени — дисков из стали У7А диаметром 100 мм и толщиной 19 мм. Все эксперименты были выполнены в Институте гидродинамики

СО РАН.

На рис. 2 приведены фотографии лицевой и тыльной сторон стальных образцов-свидетелей после воздействия на них кумулятивной струи.

Характерной особенностью мишеней, на которые воздействовал поток керамических частиц, являлись аномально большие размеры (диаметр и глубина) возникших каверн. На лицевой стороне образцов диаметр углублений равнялся $20 \div 25$ мм. Глубина каверн возрастала с увеличением толщины стенки керамической трубки. При толщине $\delta = 1.5$ мм наблюдалось сквозное пробитие образца и в основании мишени также имелась каверна. При этом об-

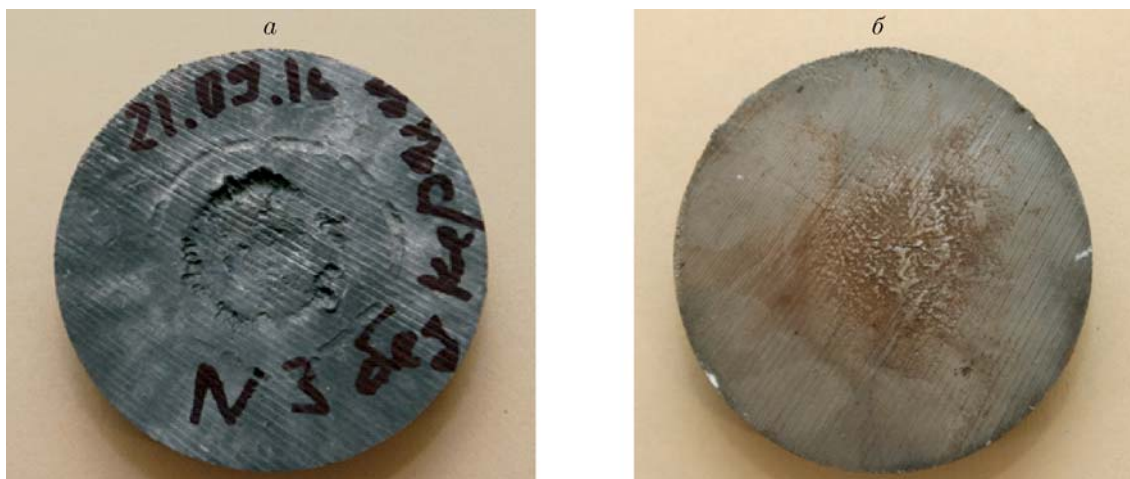


Рис. 3. Лицевая (а) и тыльная (б) стороны образца-свидетеля, подвергнутого нагружению газовой кумулятивной струей

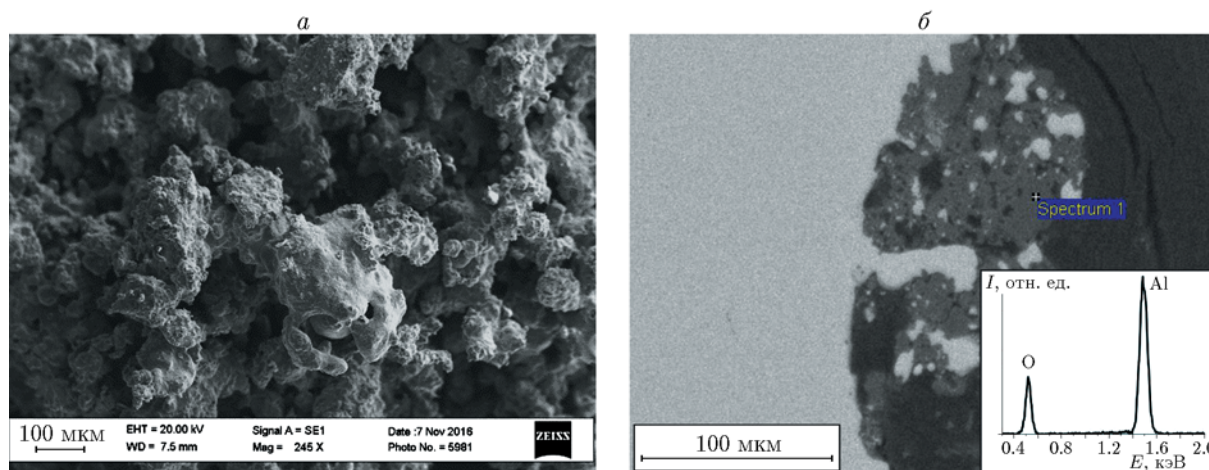


Рис. 4. Оксидные частицы, обнаруженные на стенках полости в образце-свидетеле (а), и их элементный анализ (б)

щая глубина пробития составляла 30 мм. Сам образец был разрушен с образованием сквозных радиальных трещин.

В случае воздействия на стальной образец газовой струи, возникшей при детонации заряда ВВ без керамической трубки, дефекты на лицевой стороне были несоизмеримо меньше (рис. 3).

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Образец, деформированный струей, возникшей при взрывном обжатии трубки с толщиной стенки 0,5 мм (диски 1 на рис. 2, а, б), был исследован методом световой микроскопии. В центральной части образца находится глубокая полость, стенки которой покрыты части-

цами (рис. 4, а, б). В состав частиц входят как оксиды железа, так и оксиды алюминия.

Для анализа структурных преобразований, обусловленных ударным нагружением, был подготовлен поперечный микрошлиф. Металлографический анализ, выполненный методами растровой электронной микроскопии, показал, что температура в материале мишени вблизи стенок трещин была аномально высокой. В частности, образование пор сферической формы свидетельствует о достижении материалом температуры кипения. Известно, что температура кипения чистого железа составляет около 2750 °С, однако при добавлении легирующих элементов, типичных для стали, температура кипения сплава может снижаться. Тем

не менее, представленные данные свидетельствуют о том, что рост трещин, образующихся на поверхности полости, происходил с чрезвычайно высокой скоростью в условиях, близких к адиабатическим.

Кипение материала мишени свидетельствует о том, что скорость соударения частиц с мишенью превышала пороговую. Пороговая скорость характеризуется «тепловым взрывом». Происходит плавление и испарение вещества в волне разгрузки в некоторых объемах вблизи точки соударения. Определяющими становятся теплофизические свойства материала в области мегабарных давлений.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для объяснения результатов экспериментов по воздействию керамических струй на стальные мишени было выполнено численное моделирование процесса взрывного нагружения трех корундовых трубок с различной толщиной стенок. Заданные при решении задач геометрические параметры полностью соответствовали экспериментальным. Для численного моделирования использовалось программное обеспечение ANSYS AUTODYN x64 v17.2 (+BetaOptions) Double Precision [12].

На первом этапе с целью правильного воспроизведения физических процессов, происходящих при взрывном обжати керамической трубки и взаимодействии кумулятивной струи с мишенью, проводилась верификация расчетных параметров путем сравнения результатов моделирования с данными экспериментов [8, 9]. На основании сравнительного анализа выбраны параметры определяющих соотношений для описания поведения керамики при взрывном обжати, при которых получено хорошее соответствие при расчете скорости струи и скорости проникания струи в воду. Параметры ударной адиабаты для корунда взяты из справочника [13] для давлений до 300 ГПа.

Моделирование проводилось в двумерной осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Нижняя граница расчетной области являлась осью симметрии. Пространственное разрешение составляло 20 ячеек сетки на 1 мм. Инициирование детонации осуществлялось с левого торца заряда ВВ. Параметры моделей, использованных в расчетах тел в терминологии AUTODYN, представлены в табл. 1. Параметры определяющих соотношений для корунда, необходимые для моделиро-

Таблица 1

Параметры моделей, использованных в расчетах

Material Name	Equation of State	Strength	Failure
Comp B	JWL	None	None
Al ₂ O ₃	Shock	von Mises	Hydro (Pmin)
Steel 1006	Shock	Johnson Cook	None
Al 2024	Shock	None	None

Таблица 2

Параметры определяющих соотношений для корунда

Уравнение состояния	Ударная адиабата $D = a + \lambda u$
Начальная плотность	3.92 г/см ³
Коэффициент Грюнайзена	0.5
Параметр a	0.871 см/мкс
Параметр λ	0.713
Напряжения	Мизес
Модуль сдвига	1.0 Мбар
Предел текучести	0.08 Мбар
Разрушение	Гидродинамическое
Критическое растягивающее напряжение	-0.0075 Мбар

вания процесса взрывного обжати, приведены в табл. 2.

На стационарной стадии процесса струеобразования все три варианта моделирования экспериментальныхборок с трубками различной толщины характеризуются близкими значениями давления в точке контакта и скорости кумулятивной струи. С учетом отмеченного обстоятельства ниже подробно рассмотрены результаты моделирования на примере одной экспериментальной сборки с толщиной стенки керамической трубки 1.5 мм.

Геометрия сборки в начальном состоянии

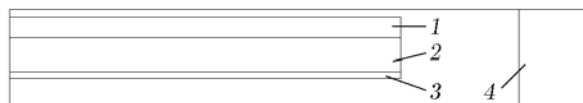


Рис. 5. Начальная постановка задачи с керамической трубкой с толщиной стенки 1.5 мм:

1 — дюралюминиевая оболочка, 2 — заряд ВВ, 3 — керамическая трубка, 4 — стальная мишень

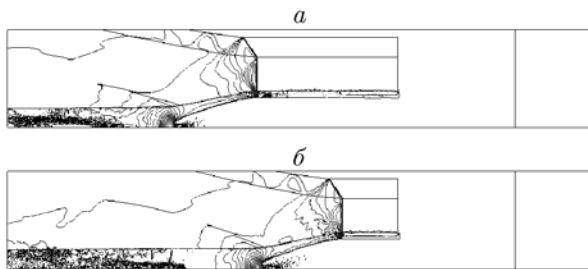


Рис. 6. Поля течений и изолинии давления на стационарной стадии в моменты времени $t = 8$ мкс (*a*) и $t = 10.75$ мкс (*б*)

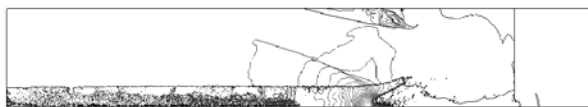


Рис. 7. Начало проникания струи в мишень в момент времени $t = 14.25$ мкс

представлена на рис. 5. Отметим наличие оболочки у заряда ВВ.

На рис. 6, 7 даны поля течений материалов и изолинии давления в характерные моменты времени.

Давление в точке контакта на стационарной стадии составляло $\approx 0.9 \div 1.0$ Мбар, максимальная скорость лидирующей части струи ≈ 23 км/с, скорость основной струи 14 км/с. Расчетная температура в зоне проникания превышала 31 000 К.

Во всех анализируемых случаях в момент взаимодействия струи с мишенью параметры соударения выходят далеко за пределы применимости уравнения состояния материала стальной мишени, что приводит к аномальным значениям давления и температуры в зоне соударения. По-видимому, для объяснения полученных результатов необходимо использовать широкодиапазонное уравнение состояния, учитывающее плавление и испарение в волне разрежения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка проникающего действия дискретной керамической струи, возникающей при взрывном обжатии керамических трубок. Характерной особенностью мишеней, на которые воздействовал поток керамических частиц, являлись аномально большие размеры (диаметр и глубина) возникших каверн.

Методами структурных исследований зафиксированы процессы плавления и кипения материала мишени. Кипение материала мишени свидетельствует о том, что скорость соударения частиц с мишенью превышала пороговую скорость, которая характеризуется «тепловым взрывом».

Результаты численного моделирования соответствуют результатам структурных исследований. Максимальная скорость лидирующей части струи составляет ≈ 23 км/с, скорость основной струи 14 км/с. Результаты моделирования косвенно подтверждают экспериментальные данные, свидетельствующие о чрезвычайно высоких значениях температуры и давления в области взаимодействия струи с мишенью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koski W. S., Lucy F. A., Shreffler R. G., Willig E. J. Fast jets from collapsing cylinders // J. Appl. Phys. — 1952. — V. 23. — P. 1300–1305. (См. также: Механика. — М.: Изд-во иностр. лит., 1954. — Вып. 1.)
2. Кинеловский С. А., Тришин Ю. А. Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 26–40.
3. Walters W. P., Zukas J. A. Fundamentals of Shaped Charges. — A Wiley-Interscience Publication, 1989.
4. Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Титова Н. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом // Докл. АН СССР. — 1968. — Т. 180, № 5. — С. 1051–1052.
5. Shell R. Detonation Physics // High-Speed Physics. — 1967. — Pt 2. — P. 276–349.
6. Тришин Ю. А. О некоторых физических проблемах кумуляции // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 5. — С. 10–26.
7. Тришин Ю. А. Физика кумулятивных процессов. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2005.
8. Balagansky I. A., Agureikin V. A., Kobilkin I. F., Nosenko N. I., Naumov V. V., Vinogradov A. V., Balagansky A. I. Acceleration device based on high explosive charge which contains high modular ceramic tube // Inter. J. Impact Eng. — 1999. — V. 22. — P. 813–823.
9. Балаганский И. А., Виноградов А. В., Агурейкин В. А., Кобылкин И. Ф., Носенко Н. И. Взрывные системы на основе зарядов ВВ, включающих трубки из высокомодульной керамики // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: тр. III Харитоновских тематических научных чтений. — Саров, 2002. — С. 289–294.

10. **Shtertser A., Ulianitsky V., Zlobin S., Muders C., Jang Xi, Veselov S.** Computer controlled detonation spraying of WC/Co coatings containing MoS₂ solid lubricant // Surf. Coatings Technol. — 2012. — V. 206. — P. 4763–4770.
11. **Ulianitsky V., Shtertser A., Sadykov V., Smurov I.** Development of catalytic converters using detonation spraying // Mater. Manuf. Processes. — 2016. — V. 31, iss. 11. — P. 1433–1438.
12. **ANSYS** Explicit Dynamics Analysis Guide. — ANSYS, Inc. Release Southpointe, 2016.
13. **Trunin R. F., Gudarenko L. F., Zhernokletov M. V., Simakov G. V.** Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter. — Sarov: RFNC-VNIIEF, 2001.

*Поступила в редакцию 6/III 2017 г.,
в окончательном варианте — 27/VI 2017 г.*
