

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Огородников, А. Г. Иванов, Н. И. Крюков

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены и обсуждены результаты экспериментальных исследований ударно-волнового диспергирования цилиндрических оболочек из свинца, стали и природного урана-238, связанного с наличием в них различных макроскопических дефектов, конструктивных элементов и присоединенных масс.

Процесс динамического диспергирования конструкционных материалов под действием ударно-волновой нагрузки представляет большой практический интерес, например, с точки зрения оценки образования и распыления мелкой фракции осколков ядерно-активных материалов в гипотетических аварийных ситуациях на атомных электростанциях. Однако в литературе его рассмотрению не уделено должного внимания, кроме, может быть, случаев широко известных явлений: множественного откола, образования струи в кумулятивном заряде и ее последующем распаде за счет возникновения градиента скоростей по длине, дробления оболочек или компактных тел за счет накопленного запаса упругой энергии или инерционных сил.

Частично восполнению этого пробела посвящена работа [1], в которой выброс частиц (пыление) со свободной поверхности (СП) образцов из железа, меди и свинца при выходе на нее ударной волны (УВ) интенсивностью ≈ 70 ГПа рассмотрен в качестве одного из возможных механизмов ударно-волнового диспергирования конструкционных материалов. Было показано, что выброс частиц металла обусловлен неоднородностью структуры СП, связанной с шероховатостью или чистотой ее обработки, и имеет микрокумулятивный характер. В зависимости от чистоты обработки СП и интенсивности УВ выбрасываемые частицы металла имеют размеры $1 \div 100$ мкм и опережают СП, при этом их скорость на $20 \div 50\%$ больше, чем скорость СП. Кроме того, там же было отмечено, что диспергирование ударно-нагруженного материала образца может быть связано и с другими причинами, например с наличием в нем дефектов, конструктивных элементов или, как следует из [2, 3], присоединенных масс. В дан-

ной работе, являющейся продолжением [1], эти явления рассмотрены более подробно.

В ряде практически важных случаев ударно-нагружаемый объект или образец конструкционного материала выполняется из нескольких частей, между которыми возможны стыковые зазоры. Нагружаемый объект может быть выполнен в виде двухслойного образца с локальными полостями между слоями. В процессе эксплуатации объектов конструкционные материалы подвергаются коррозии, при этом возможно появление локальных коррозионных дефектов различной величины вблизи свободной и нагружаемой поверхности образца или сквозных коррозионных дефектов. Кроме того, при движении образец, разогнанный ударно-волновым способом, может взаимодействовать с различными присоединенными массами [2, 3]. Во всех этих и ряде других случаев наличие в образце дефектов, конструктивных элементов или присоединенных масс может быть источником выброса частиц металла или причиной ударно-волнового диспергирования материала в образце.

Чтобы выявить качественную картину выброса частиц в перечисленных выше случаях и определить количество выбрасываемого материала в зависимости от размеров дефектов, конструктивных элементов, материала образца, в настоящей работе проведены специальные опыты с использованием цилиндрической модели заряда и рентгенографической методики регистрации, описанных в [1, 4]. Заметим, что в этих опытах по сравнению с [4] в три раза увеличено количество точек возбуждения детонации по поверхности цилиндрического заряда ВВ. Это обеспечивало выход более плавного фронта детонационной волны на поверхность

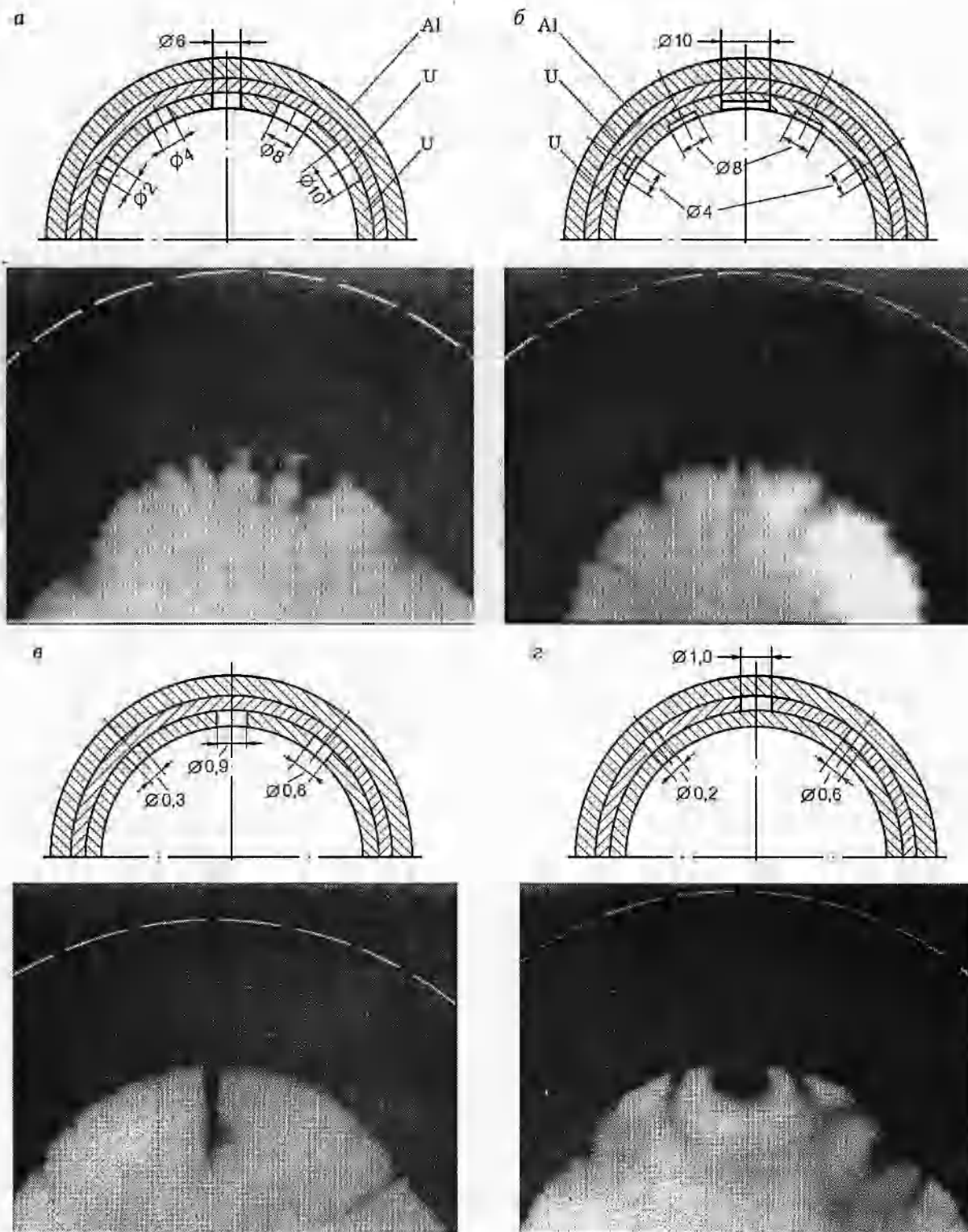


Рис. 1 (начало). Схемы задания источников диспергирования и рентгенограммы соответствующих опытов:

а — сквозные дефекты, *б* — дефекты вблизи внутренней поверхности оболочки, *в* — стыковые зазоры на нижней оболочке, *г* — стыковые зазоры на второй оболочке

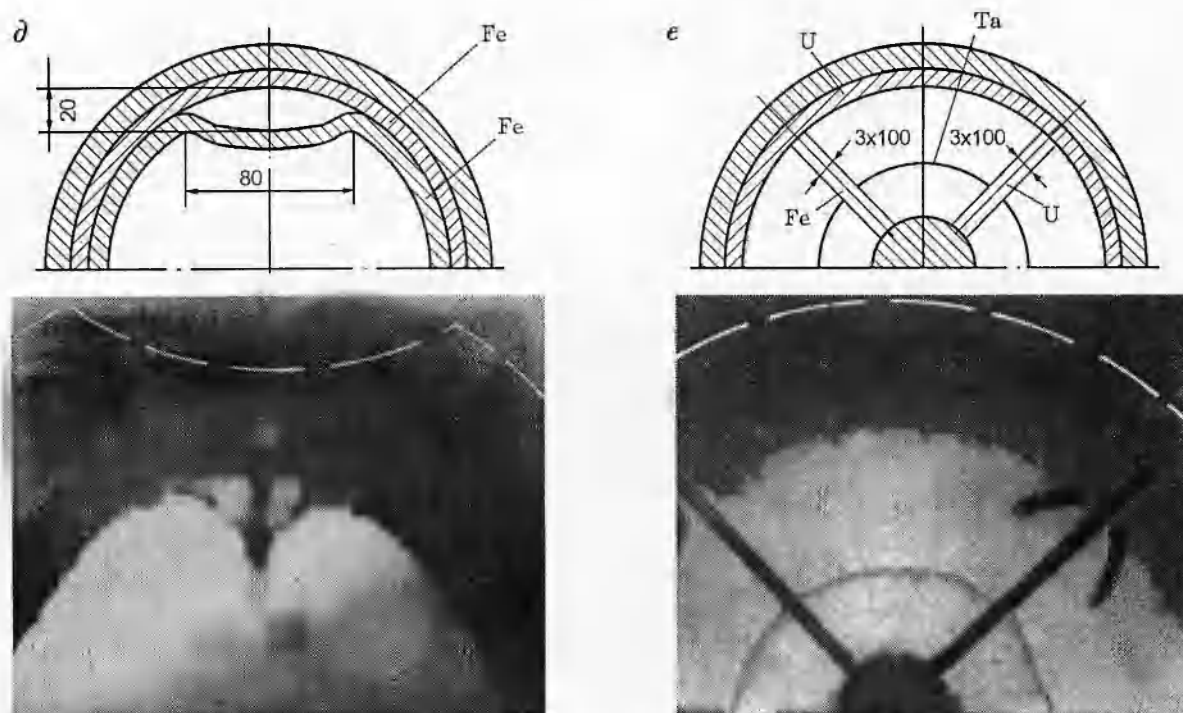


Рис. 1 (продолжение). Схемы задания источников диспергирования и рентгенограммы соответствующих опытов:

d — локальная полость между оболочками, *e* — присоединенные массы в виде пластин

цилиндрических оболочек и позволяло уменьшить влияние системы инициирования заряда ВВ на исследуемые явления. Для этих же целей служила оболочка из алюминия, которая имела те же размеры, что и в [1, 4], и располагалась между зарядом ВВ и исследуемыми образцами. В качестве последних использовали однослойные или двухслойные цилиндрические оболочки из материалов с заметно отличающимися физико-механическими характеристиками: стали, свинца или природного урана-238. Это сделано для того, чтобы детально проследить возможное влияние прочности материала образца на исследуемые процессы. На рис. 1 приведены характерные типы и размеры (в миллиметрах) исследуемых конструктивных элементов или дефектов в оболочках, а также рентгенограммы опытов. В момент рентгенографирования внутренняя граница оболочек сходилась к относительному радиусу $r \approx 0,3R_{ВВ}$ ($R_{ВВ} = 150$ мм — наружный радиус ВВ), ее начальное положение отмечено на рисунке штриховой линией.

Анализ этих и других опытов с аналогичными конструктивными элементами или де-

фектами в оболочках из различных материалов, проведенных в разные моменты рентгенографирования, позволил выявить некоторые закономерности, связанные с ударно-волновым диспергированием материала оболочек. Наличие сквозных или коррозионных дефектов на внутренней границе нижних оболочек из свинца и урана глубиной, равной половине толщины оболочки, диаметром от 2 до 10 мм приводит к выбросу материала (см. 1, *a, б*), который носит кумулятивный характер. Масса выбрасываемого материала зависит в основном от объема дефекта и плотности материала оболочки. Так, для оболочек из урана при наличии сквозных дефектов объемом $3 \div 80$ мм³ и дефектов на внутренней поверхности оболочки объемом $1,5 \div 40$ мм³ количество материала, выбрасываемого из них, составляет $0,5 \div 8,0$ и $0,1 \div 3,0$ г соответственно. Частично материал частиц подхватывается оболочкой по мере ее схождения. Однако частицы достигают оси симметрии оболочки при ее подлете к радиусу $\approx 0,1R_{ВВ}$. Наличие аналогичных по размерам дефектов на наружной границе оболочки не приводит к выбросу частиц.

Геометрия преграды	Размеры преграды, мм	Материал преграды	ΔL , мм	Радиус измерения ($r/R_{ВВ}$)
Пластина	5 × 40	Уран	13,5	0,15
	5 × 100	Уран	13,9	0,27
	5 × 40	Ст.3	22,0	0,15
	5 × 40	АМг-6	38,3	0,15
	3 × 10	АМг-6	37,3	0,15
Стержень	∅5	Уран	11,7	0,15
	∅3	Уран	11,7	0,27
	∅5	Ст.3	19,2	0,15
	∅5	АМг-6	33,4	0,15
	∅3	АМг-6	29,0	0,27

Наличие стыковых зазоров у внутренней оболочки шириной $0,2 \div 1,0$ мм приводит к формированию кумулятивных струй металла (см. рис. 1,б) с удельной массой $m = (1 \div 6) \cdot 10^{-2}$ г/см, которые достигают оси симметрии оболочки при ее полете к радиусу $\approx 0,3R_{ВВ}$. Наличие стыковых зазоров у наружной оболочки шириной $0,2 \div 1,0$ мм приводит к более сложному механизму формирования струй металла (см. рис. 1,г). Он связан с растяжением и диспергированием участка нижней оболочки, расположенной под стыком наружной оболочки, и последующим выбросом струи металла из стыка, количество выбрасываемого металла составляет $m_{уд} = 0,1 \div 0,7$ г/см. Эти частицы достигают оси симметрии оболочки при ее полете к радиусу $\sim 0,1R_{ВВ}$.

Еще более сложный, но также струйный характер выброса имеет место при наличии локальной полости в двухслойной оболочке (см. рис. 1,д). При этом качественные картины для стальной и свинцовой оболочек практически совпадают. Интересно отметить, что и во всех рассмотренных выше случаях с оболочками из урана и свинца, несмотря на различную исходную прочность материалов картина кумулятивного выброса частиц металла в области расположения дефектов или стыков практически не меняется. При этом масса частиц металла в струях при использовании оболочек из свинца в 1,5–2 раза меньше, чем при использовании оболочек из урана, что примерно соответствует соотношению их плотностей. Заметим, что при определении области применимости гидродинамической модели среды к процессам соуда-

рения и струеобразования обычно оценивается нижняя граница скоростей контактных поверхностей W_n , при которых влиянием прочности среды можно пренебречь [5]. С учетом прочности материала среды величина указанных скоростей определяется выражением $W_n \approx 2(H/\rho_0)^{1/2}$, где H — динамическая твердость материала, близкая по величине к динамическому пределу текучести, ρ_0 — плотность. Для свинца и урана, например, $W_n = 0,2$ и $0,9$ км/с, что заметно меньше начальных скоростей движения оболочек W_0 , равных соответственно 2,1 и 1,8 км/с. Эти значения можно принять за минимальные скорости движения контактных поверхностей, участвующих в процессе струеобразования. Видно, что как для свинца, так и для стали и урана $W_0 > W_n$, поэтому прочность материала оболочек и не должна заметно влиять на процесс струеобразования.

Случай струеобразования при взаимодействии ударно-нагружаемого объекта с присоединенными массами [2, 3] представляет отдельный интерес, поэтому рассмотрим его на примере взаимодействия оболочки из урана толщиной 3 мм с преградами в виде стержня диаметром 3 и 5 мм или пластины толщиной 3 и 5 мм (ширина пластин изменялась от 10 до 100 мм), выполненных из стали (Ст.3), алюминия (АМг-6) и природного урана (см. рис. 1,е).

Результаты рентгенографических исследований свидетельствуют о том, что процессы проникания пластины или стержня в оболочку заметно не отличаются и происходят с образованием кратера в оболочке и выбрасыванием из него струи, состоящей на $\approx 80\%$ из

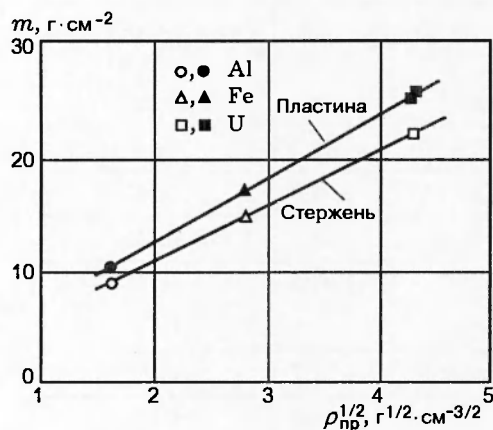


Рис. 2. Зависимость удельной массы металла в струе от плотности материала присоединенной массы

материала пластины (стержня) и частично из материала оболочки. Вытесненный оболочкой материал пластины (стержня) распределяется между оболочкой и пластиной (стержнем) с образованием полости между ними. Начальный угол разлета струй при проникании пластин (стержней) в оболочку увеличивается с уменьшением плотности их материала. Значения этих углов составляют $\varphi = 13 \div 17^\circ$ для урана, $\varphi = 17 \div 22^\circ$ для стали и $\varphi = 25 \div 40^\circ$ для алюминия. Измеренные в специальных опытах значения расхода материала пластин (стержней) или уменьшения их начальной длины $\Delta L = L_0 - L$ приведены в таблице. Ее анализ показывает, что расход материала пластин (стержней) слабо зависит от их толщины, радиуса измерения и определяется в основном плотностью материала преграды, зависимость от которой может быть представлена в виде $\Delta L = \text{const} / (\rho_{\text{пр}})^{1/2}$. Это качественно не противоречит гидродинамическому приближению, согласно которому при внедрении пластины (стержня) в оболочку толщиной $\delta_{\text{об}}$ и плотностью $\rho_{\text{об}}$ их длина должна уменьшиться на величину $\Delta L = \delta_{\text{об}} (\rho_{\text{об}} / \rho_{\text{пр}})^{1/2}$. На рис. 2 приведены зависимости удельной массы металла, рассчитанной на 1 см² сечения пластины или стержня, образующейся в процессе струеобразования ($m = \rho_{\text{пр}} \Delta L$), от плотности материала пластин (стержней). Видно, что эта масса металла слабо зависит от геометрии преграды и при заданной плотности материала оболочки определяется плотностью материала преграды.

Интересно отметить, что в опыте, рентгенограмма которого приведена на рис. 1,е, на относительном радиусе $0,2R_{\text{ВВ}}$ была установлена индикаторная оболочка из тантала толщиной 0,05 мм, состояние которой в опыте свидетельствует о ее нагружении частицами металла, выбрасываемыми с поверхности ударно-нагруженной оболочки [1].

Из проведенного рассмотрения следует, что при ударно-волновом нагружении объектов существует большой набор механизмов фрагментации и диспергирования конструкционных материалов, который необходимо учитывать при создании более реалистичных моделей образования и распыления мелкой фракции осколков конструкционных материалов. Полученные качественные и количественные результаты могут быть использованы для разработки и тестирования численных методов многомерной газодинамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.
2. Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Огородников В. А., Тюнькин Е. С. Особенности разгона пластин скользящей детонационной волной при наличии присоединенных или сосредоточенных масс // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 127–129.
3. Буйко А. М., Иванов А. Г., Лавровский Ю. Д. и др. Струеобразование при высокоскоростном соударении тонкой оболочки с разными преградами // Тезисы докл. III Забавихинские чтения. Челябинск-70, 1992.
4. Иванов А. Г., Лавровский Ю. Д., Огородников В. А. Некоторые случаи развития детерминированных возмущений на сходящихся оболочках // ПМТФ. 1992. № 5. С. 116–118.
5. Златин Н. А., Кожушко А. А. Гидродинамические модельные представления в теории высокоскоростного взаимодействия твердых тел и границы их применимости // Журн. теор. физики. 1982. Т. 52, вып. 2. С. 330–333.

Поступила в редакцию 6/VII 1998 г.