

УДК 669-1; 539.89; 539.219.3

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-11-282-47-51

*С. Н. Буравова, д-р физ.-мат. наук, А. Ф. Беликова, с. н. с., Н. И. Мухина, инженер,
В. О. Копытский, м. н. с., Е. В. Петров, канд. техн. наук*

**ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В ПРОЦЕССЕ
ЕЕ ИНЕРЦИОННОГО СХОЖДЕНИЯ**

ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, svburavova@yandex.ru

В работе проведен анализ процессов, приводящих к повреждаемости цилиндрических оболочек в процессе их инерционного схождения. При исследовании повреждаемости твердого тела в условиях роста давления и температур при инерционном схождении на внешней поверхности оболочки формируется характерный волнистый рельеф, который состоит из чередующихся выступов и вмятин. Форма выступов свидетельствует об их гидродинамическом происхождении. На заключительной стадии схождения характер поведения оболочек близок к цилиндрической кумуляции сплошных цилиндрических образцов.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, инерционное схождение, повреждаемость, волны разгрузки, возмущения

S. N. Buravova, A. F. Belikova, N. I. Mukhina, V. O. Kopytskiy, E. V. Petrov

INERTIAL CONVERGENCE DAMAGE TO THE CYLINDRICAL SHELL

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, svburavova@yandex.ru*

The mechanisms behind damage to cylindrical shells during inertial convergence are investigated in this article. As solids are subjected to increasing pressures and temperatures during this convergence, they develop a distinct wavy texture on the outer surface, consisting of raised and indented areas. The shape of the protrusions confirms its hydrodynamic origin. The behaviour of the shells is similar to that of cylindrical solid samples in the final stage of convergence.

Keywords: cylindrical shell, inertial convergence, damage, unloading waves, perturbations

Кумуляция, по определению, это явление, при котором объемная плотность энергии самопроизвольно растет и достигает значительной сколь угодно больших величин [1]. В природе кумуляцию можно наблюдать в сильный дождь. Удар дождевой капли по поверхности лужи сопровождается ответной реакцией: из лужи «выпрыгивает» капля, а иногда, если повезет, можно наблюдать каскад таких капелек. Коническая полость, возникающая при ударе дождевой капли, при схлопывании образует область высокого, «космического» давления в носике конуса. Как только массовая скорость в области высокого давления превысит скорость схождения конических поверхностей, возникает струя, которая опережает точку контакта, а в полете распадается на капли. Следует от-

метить, что кумулятивные струи в зарядах взрывчатых веществ (ВВ) образуются по тому же механизму.

Интерес к проблеме кумуляции, посвященный изучению особенностей поведения материала, подверженного всестороннему сжатию, связан с попыткой использовать неограниченный рост давления. Исследования показали, что, несмотря на высокие градиенты потока и сильные сдвиговые деформации, развиваемые вблизи фокусировки, диссипативные процессы: вязкость и теплопроводность, не способны привести к ограничению кумуляции [1]. Однако эксперимент показал, что достичь бесконечно больших величин энергии не удастся. В последние годы активно изучается процесс кумуляция при сходимости цилиндрических

оболочек. Традиционно исходные металлические оболочки окружаются слоем бризантного ВВ, который инициируется с помощью кольцевой системы. Время отбора энергии от взрывчатого вещества незначительно, основное время приходится на свободный «полет», инерционное схождение оболочки. При строго радиальном сжатии оболочки ее поверхность имеет форму окружности. Реакция цилиндрических оболочек на действия импульсной нагрузки проявляется в образовании на поверхностях волнистого рельефа с наличием выступов и впадин, как результат потери устойчивости движения. Имеется критическое значение относительных толщин, меньше которых схождение оболочек неустойчиво. Показано, что во всех опытах, где толщина слоя ВВ меньше толщины оболочки, образуется откол [2].

Устойчивость сжатия оболочки в процессе инерционного движения нарушается вследствие формирования в образце характерных структурных элементов (складок), размер которых слабо зависит от свойств материала и условий эксперимента [3]. Авторы показали, что масштабный эффект на инерционной стадии сжатия оболочки не работает, а зависит от абсолютных размеров оболочки. На внутренней поверхности оболочки при сходимости оболочки выступы образуются всегда, независимо от размера оболочек и их материала.

В работе [4] на основе экспериментальных данных показано, что «выпучивание» (так в некоторых статьях называют складки, образующихся на поверхностях оболочек) на стадии пластической реакции контролируется как интенсивностью нагрузки, так их начальной геометрией. Рост начальной скорости увеличивает число возмущений в окружном направлении, наибольшая ампли-

туда выступов может достигать 3% толщины оболочки. Удовлетворительное соответствие между экспериментально определенным количеством выступов и теоретически рассчитанным числом возмущений не обнаружено [5–7].

В данной работе проведен анализ процессов, приводящих к повреждаемости цилиндрических оболочек в процессе их сжатия. Исследование повреждаемости твердого тела в условиях роста давления и температур, которые реализуются при инерционном сжатии (схлопывании), оболочки представляет несомненный интерес для физического материаловедения и понимания физики процессов, протекающих в материале при высокоскоростном деформировании.

Каждая цилиндрическая оболочка имеет две свободные грани, два источника волн разгрузки. Взаимодействие волн между собой и с гранями образца сопровождается осцилляцией в режиме *стоячей волны*. Стоячая волна характеризуется двумя параметрами: узел – место, где массовая скорость равна нулю. В узле волны сталкиваются и расходятся, вызывая деформирование материала путем сжатия-растяжения. Второй параметр – пучность – грани оболочки, где напряжение равно нулю. Особенностью стоячей волны является образование *энергетических "отсеков"* (между пучностью и узлом), в которых энергия сохраняется и не обменивается с соседними участками, в результате чего осцилляция продолжается без действия внешних сил, пока диссипативные потери не приведут к затуханию колебаний [8].

Из геометрического представления законов сохранения [9] следует, что энергия, переходящая в тепло, на P – V диаграмме равна площади, ограниченной прямой Михельсона и изэнтропой разгрузки. Для идеальной

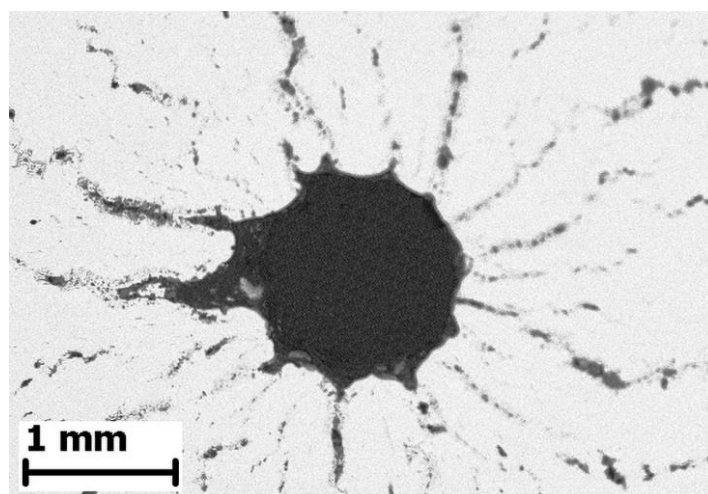
упругопластической среды (модуль упрочнения равен нулю) удельная потеря энергии e зависит от динамического предела текучести σ_y [10], и равна $e = \frac{2\sigma_y(\varepsilon - \varepsilon_g)}{3\rho_0}$, где ε - степень деформации, ρ_0 - плотность металла.

Коэффициент затухания характеризуется долей энергии, которая поглощается в единицу времени. Учитывая, что удельная энергия ударно-сжатого вещества пропорциональна квадрату массовой скорости, а локализация деформации возникает при напряжениях чуть ниже откольной прочности материала σ_{spall} , можно амплитудный коэффициент затухания α представить в виде: $\alpha \approx \frac{2\sigma_y(\sigma_{spall} - \sigma_g)}{3\sigma_{spall}^2}$, здесь σ_g - динамический предел упругости Гюгонио.

Полагая, что в небольшом диапазоне напряжений от σ_{spall} до σ_y экспоненциальный закон затухания справедлив, можно оценить время, необходимое волне, чтобы перестроиться в упругую волну $t = \frac{2 \ln(\sigma_{spall} - \sigma_g)}{\alpha}$. Дальнейшее затухание амплитуды стоячей волны проходит в режиме упругого колебания волн, и коэффициент затухания существенно снижается.

Проведем оценку длительности затухания амплитуды стоячей волны. Для алюминиевого сплава $\sigma_{spall} = 1.15$ ГПа, $\sigma_g = 0.38$ ГПа, $\sigma_y = 0.18$ ГПа, $c_o = 6.4$ км/сек [11] в экспериментах - $d = 7$ мм. Коэффициент затухания в области упругопластического перехода оказался равным $\alpha = 0.07$ 1/ μ s, период стоячей волны $T = 2.2$ μ s, и частота колебаний $\gamma = 45$ КГц. Полное затухание амплитуды стоячей волны составит 132 μ s, за это время она совершит 60 колебаний [12]. При длительности начального импульса, равного отношению удвоенной толщины пластины - ударник к скорости звука, время затухания амплитуды стоячей волны в 330 раз превышает длительность начального импульса, которое считается характеристикой процесса ударного нагружения. Заметим, что в области упругого затухания ультразвуковых волн коэффициенты затухания на порядок меньше рассмотренного. Время реверберации откольной тарелочки, например, превышает длительность начального импульса на два-три порядка [13].

Другая особенность стоячей волны - образование новых собственных колебаний - обертонов (гармоник), в узлах которых (в процессе деформирования сжатие-



Поперечный шлиф сечения образца после обжатия детонационной волной

растяжение) возникают трещины и (или) полос локализованного сдвига в форме соосных кольцевых формообразований – это есть окружная откольная повреждаемость. Следовательно, центральная часть оболочки имеет тенденцию расслаиваться.

Под действием окружающих сжимающих напряжений, на фронте волн сжатия и разгрузки, циркулирующих между внешней и внутренней поверхностями оболочки, возникают возмущения, в виде выступов (рисунок).

При выходе возмущенных волн на свободные поверхности оболочек каждый выступ формирует складку, изменяя рельеф поверхности. Складка становится источником волны разгрузки, а зона интерференции волн разгрузки, возникающая от двух соседних складок, приводит к образованию зоны интерференции волн разгрузки, где образуются полосы локализованной деформации, когда растягивающие напряжения не превышают окольную прочность, и материал сохраняет сплошность. Следовательно, поверхностная повреждаемость оболочки характеризуется системой полос локализованной деформации, возникающих между складками рельефа поверхности (радиальная откольная повреждаемость). При распространении полос вглубь оболочки, их взаимодействие с окружной откольной повреждаемостью, приводит к созданию своеобразной «перемолотой» структуры.

Интересно сравнить экспериментально наблюдаемую повреждаемость цилиндрической оболочки в процессе инерционного схождения. Авторы работы [3] показали, что на внешней поверхности оболочки формируется характерный волнистый рельеф, состоящий из чередующихся выпуклостей и вмятин, где визуально определяются 12÷14 таких волн. Под действием сдвиговых

напряжений происходит локализация деформации в виде полос, исходящих из вмятин (между выступами). В центральной зоне локализованная деформация, по мнению авторов, преимущественно хаотическая, поскольку откольные поры и трещины возникают хаотически. На внутренней поверхности оболочки на завершающих стадиях схождения формируется порядка десяти выступов. Форма выступов свидетельствует об их гидродинамическом происхождении, и для них подходит определение «пластические струи». В процессе дальнейшего схождения выступы сближаются, в результате их слияния в середине схлопнутой оболочки образуется симметричная фигура в виде цветка. При соприкосновении выступов («лепестков цветка») в микроструктуре сохраняются их боковые границы, похожие на трещины.

Заметим, что на заключительной стадии схождения, характер поведения оболочек близок к цилиндрической кумуляции сплошных цилиндрических образцов [14]. При приближении ударной волны к оси симметрии, на фронте образуются несколько крупных выступов (маховских конфигураций), при этом фронт ударной волны разделяется на отдельные сектора, где они совершают колебательные движения. Столкновение мощных ударных конфигураций осуществляет выброс сжатого материала из-под фронта вперед перед фронтом ударной волны. Когда высота выступов становится равной расстоянию фронта ударной волны до оси, околоосевое пространство занимают выступы, останавливая движение фронта.

Библиографический список

1. Забабахин, Е. И. Кумуляция и неустойчивость. Сборник научных статей / Е. И. Забабахин – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. – 112 с.

2. Огородников, В. А. Вязкость и ее роль в динамических процессах. Монография / В. А. Огородников – Саратов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012. – 239 с.
3. Зельдович, В. И. Деформационные явления при сжатии металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости / В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, И. В. Хомская, А. А. Дегтярев, У. В. Шорохов, У. Б. Смирнов, С. М. Долгих, А. В. Коваль // Физика горения и взрыва. – 2019. Т. 55. – № 4. – С. 92-102.
4. Иванов А. Г. Поведение оболочек под действием импульсной нагрузки. Малые возмущения / А. Г. Иванов, В. А. Огородников, Е. С. Тюнькин // Прикладная механика и техническая физика. – 1992. – № 6. – С. 112-115.
5. Goodier, J. N. The elastic cylindrical shell under nearly uniform radial impulse / J. N. Goodier, I. K. McIvor // Journal Applied Mechanics. – 1964. – Vol. 31. – No 2. – P. 259-266.
6. Lindberg, H. E. Buckling of a very thin cylindrical shell due to an impulsive pressure / H. E. Lindberg // Journal Applied Mechanics. – 1964. – Vol. 31. – No 2. – P. 267-272.
7. Stuver, W. On the buckling of rings subject to impulsive pressure / W. Stuver // Journal Applied Mechanics. – 1965. – Vol. 32. – No 3. – P. 511-518.
8. Горелик, Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Г. С. Горелик. – М.: Физматлит, 1959. – 572 с.
9. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер – М.: Физматгиз, 1963. – 632 с.
10. Степанов, Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок / Г. В. Степанов. – Киев: Наукова думка, 1979. – 268 с.
11. Канель, Г. И. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов – М.: Янус-К», 1996. – 408 с.
12. Буравова, С. Н. Ускорение массопереноса при динамическом ускорении / С. Н. Буравова, Е. В. Петров // Химическая физика. – 2018. – Т.37. – №.2. – С. 47-55.
13. Буравова, С. Н. Микроструктура металла в откольных пластинах / С. Н. Буравова, Е. В. Петров // Химическая физика. – 2020. – Т. 39. – № 9. – С. 63-70.
14. Буравова, С. Н. Модель цилиндрической кумуляции / С. Н. Буравова // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения». – Новосибирск. – 2023. – С. 18-19.