

УДК 623.4.082.6

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ КУМУЛЯЦИЮ

© 2024 г. С. Н. Буравова^{1,*}, А. Ф. Беликова¹, Н. И. Мухина¹, В. О. Копытский¹,
Е. В. Петров¹, член-корреспондент РАН М. И. Алымов¹

Поступило 24.10.2023 г.

После доработки 24.10.2023 г.

Принято к публикации 12.02.2024 г.

Сужение потока в цилиндрических образцах является причиной неустойчивости движения, проявляющегося в образовании окружного напряжения сжатия, в результате которого на фронте ударной волны возникают возмущения в виде маховских трехударных конфигураций (выступов). Площадь фронта возмущенной ударной волны растет за счет выступов, которые усиливаются в результате поглощения более мелких возмущений, постоянно генерируемых на фронте ударной волны. Резкий рост площади фронта на завершающей стадии сопровождается образованием нескольких крупных выступов, которые делят фронт ударной волны на отдельные сектора, где совершают колебательные движения. При столкновении встречных конфигураций возникающая зона высокого давления “выносит” часть сжатого материала из-под фронта вперед. Процесс кумуляции завершается, когда высота выступов становится равной расстоянию фронта до оси. Околоосевое пространство занимает выступами фронта, а возникшая при этом отраженная ударная волна тормозит набегающий поток.

Ключевые слова: цилиндрическая кумуляция, неустойчивость, маховская ударная конфигурация, ударная волна, полосы локализованного сдвига, волна разгрузки

DOI: 10.31857/S2686740024020017, **EDN:** KIDOPS

Решение автомодельной задачи о схождении сферических и цилиндрических ударных волн в работах [1, 2] показывает неограниченный рост скорости и давления при фокусировке ударных волн. Учет сжимаемости материала [3] результата не изменил. Анализ теоретических работ [4] показал, что диссипация энергии (вязкость, теплопроводность) не приводит к ограничению кумуляции. Однако экспериментальное изучение кумулятивных процессов показало, что достичь бесконечно больших величин энергии не удастся. Как отмечает автор работы [4], в процессе кумуляции возникают физические процессы, которые ограничивают рост давления, и неясно, как протекает

дальнейший процесс кумуляции в режиме неустойчивости. В работе [5] приведен обзор экспериментальных исследований и показано, что реакция материала на действия импульсной нагрузки при потере устойчивости движения проявляется в образовании на поверхностях цилиндрических образцов волнистого рельефа с наличием выступов и впадин. Установлено также, что упругопластическая модель поведения материала, не учитывающая вязкость, не может отразить все особенности реакции материала. Невыполнение закона подобия для инерционного движения оболочек обнаружено в работе [6]. Потеря устойчивости конической облицовки в процессе формирования кумулятивной струи приводит к появлению сложной внутренней структуры как струи, так и песта, что делает необходимым уточнение картины течения металла в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости [7].

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
Российской академии наук,
Черноголовка, Московская обл., Россия
*E-mail: svburavova@yandex.ru

Анализ литературных данных свидетельствует, что, несмотря на высокий уровень экспериментальных исследований, процессы, происходящие в непосредственной близости от оси симметрии цилиндрического образца, в литературе не освещены и остаются неясными, область около центра образца из рассмотрения исключается. В данной работе предпринята попытка оценить давление на оси симметрии и показать физические процессы, которые ограничивают рост давления.

ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ КУМУЛЯЦИЯ

В работе рассматривается одномерное осесимметричное движение, массовая скорость которого подчиняется закону

$$u = u_0 \sqrt{\frac{R_0}{R}},$$

где R_0 — начальный радиус цилиндрического образца, R — положение фронта ударной волны. Факт потери устойчивости движения принято определять по образованию складок на поверхности твердого тела. Цилиндрический образец имеет одну поверхность, но на ней размещается слой взрывчатого вещества (аммонит 6ЖВ, гексоген насыпной плотности), скользящая детонация которого создает ударную волну в образце. На рис. 1 представлен шлиф толстостенного стального цилиндра (диаметр 20 мм) с внутренней полостью (диаметр 6 мм), поверхность которой может отслеживать форму ударной волны после ее выхода на поверхность. Наличие складок и впадин свидетельствует, что ударная волна при сходимости к оси потеряла устойчивость — на ее фронте появились возмущения в виде выступов.

Как следует из рис. 1, выход возмущенной ударной волны на свободную поверхность сопровождается повреждаемостью поверхностного слоя. При формировании складок рельефа они являются источниками волн разгрузки. Интерференция волн разгрузки с двух ближайших складок рельефа приводит к образованию откольных трещин, которые перерастают в полосы локализованной деформации, когда растягивающие напряжения становятся меньше откольной прочности. Рисунок является доказательством откольной природы образования

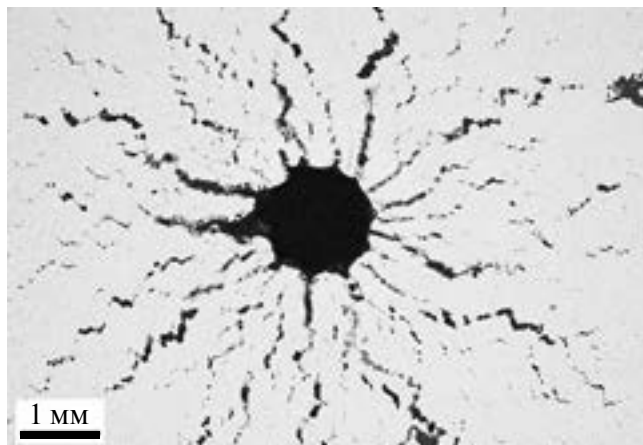


Рис. 1. Макроструктура поперечного сечения поллого цилиндра после обжатия детонационной волной.

полос локализованной деформации [8, 9]. Заметим, что макроструктура на рис. 1 не зависит от материала образца и характерна для всех его видов. Медь и фторопласт образуют схожую систему трещин вблизи центральной части образца [10].

В литературе нет общепризнанного названия «выпучивания» на поверхности твердого тела как признака потери устойчивости движения — это морщины, волны в окружном направлении, складки, изгибные формы деформации, характерные структурные элементы деформации, волны и просто выступы. В данном сообщении возмущение поверхности образца будем называть «складками». Что представляют собой возмущения на фронте ударной волны, которые формируют складки при выходе волны на свободную поверхность? В этом помогут разобраться возмущения на ударном фронте детонационной волны с неоднородной структурой.

Первое взрывчатое вещество с такой структурой детонационного фронта — это смеси нитрометана с ацетоном [11]. Эксперименты по созданию искусственного возмущения на ударном фронте показали, что возмущение представляет собой маховскую (тройную ударную) конфигурацию: косая ударная волна — она же маховская волна; продольная ударной волны — продолжение косой волны в сжатом веществе и сам фронт ударной волны, по которому распространяется возмущение. Следует обратить внимание на неразрывную взаимосвязь возмущения с ударно сжатым веществом: продольная ударная волна является «корнем» маховской конфигурации.

Именно продольная волна переводит плоское движение потока в радиальное движение.

Сложность описания кумуляции состоит в определении параметров возмущенной ударной волны. Считаем, что на каждом небольшом интервале радиуса возмущенная волна движется с постоянным давлением p_i (как за плоским фронтом). Однако за фронтом осесимметричной ударной волны законы сохранения требуют рост давления P_i . Разность давлений $\Delta P_i = P_i - p_i$ на i -м интервале характеризует возмущение ударной волны из-за принудительного сужения потока, которое является причиной потери устойчивости. Возникновение окружного напряжения сжатия при сужении потока приводит к образованию маховских ударных конфигураций. Эта разность давлений состоит из двух составляющих — давления, которое характеризует маховскую ударную волну, и увеличения давления возмущенной ударной волны за счет сужения потока. Обнаруженная устойчивость движения оболочек больших размеров в начальный момент [6] означает, что существует окружное напряжение сжатия, которое справляется с сужением потока, поджимает ударно-сжатый материал, сохраняя фронт ударной волны гладким. Поскольку величина порогового окружного напряжения неизвестна и учесть его не представляется возможным, предполагаем, что половина разности DP идет на увеличение давления за фронтом возмущенной ударной волны, а другая половина — на создание маховских конфигураций.

Тогда $p_i = \frac{P_i + P_{i-1}}{2}$ — давление возмущенной ударной волны, $\sigma_i = \frac{\Delta_i}{2} = \frac{P_i - P_{i-1}}{2}$ — окружное напряжение сжатия.

Наличие выступов на фронте ударной волны увеличивает его площадь. Чтобы найти истинную площадь фронта возмущенной ударной волны, следует его «расправить», для этого необходимо определить массовую скорость гладкой ударной волны U_i , давление которой равно давлению возмущенной p_i :

$$U_i^2 + \frac{c_0}{b} U_i - \frac{p_i}{\rho_0 b} = 0,$$

где ρ_0 — плотность, c_0 и b — параметры адиабаты металла. Подстановка U_i в уравнение

$$\frac{r_i}{R_0} = \left(\frac{u_0}{U_i} \right)^2$$

определяет положение гладкой ударной волны r_i с давлением p_i . Разность $2\pi(r_i - R_i)$ характеризует увеличение площади поверхности фронта на i -м интервале, а общая площадь всех выступов на фронте ударной волны равна

$$S_i = 2\pi \sum_1^i (r_i - R_i).$$

Высота тройных ударных конфигураций зависит от числа сформовавшихся крупных выступов. На приведенном рис. 1 количество выступов составляет $N = 9$. Предполагая, что форма гофрированного возмущения — полуцилиндр с площадью поверхности $s_i = \pi h_i$, средняя высота выступов на фронте h_i определяется выражением:

$$h_i = 2 \sum_1^i \frac{(r_i - R_i)}{N}.$$

Начальная стадия кумулятивного процесса характеризуется множеством выступов на фронте ударной волны, их рост идет за счет поглощения более мелких маховских конфигураций, постоянно возникающих за счет сужения потока.

При приближении фронта ударной волны к оси происходит резкий рост его площади и высоты выступов, происходит смена механизма взаимодействия возмущений с фронтом ударной волны. На завершающейся стадии кумуляции формируются несколько крупных выступов, которые делят фронт ударной волны на отдельные сектора, где они совершают колебательные движения. При столкновении тройных ударных конфигураций ее продольные волны дополнительно поджимают под фронтом ударно сжатый материал, а высокое давление в зоне столкновения «забрасывает» часть ударно сжатого материала вперед, перед фронтом ударной волны. Однако ударная волна не может пройти до оси симметрии. Как только высота ее выступов становится равной оставшемуся расстоянию до оси, околоосевое пространство занимает ее собственными выступами. Отраженная волна, возникающая от соударения выступов, останавливает набегающий поток. На этом процесс кумуляции завершается.

В заключение следует отметить, что в рамках предложенной модели цилиндрической кумуляции не удастся теоретически определить число маховских конфигураций на конечном этапе. Кумулятивные процессы относятся к задачам параметрического резонанса и требуют нового подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guderley G.V.* Starke kugelige und zylindrische Verdichtungsstöße in der Nähe des Kugelmittelpunktes bzw. der Zylinderachse // *Luftfahrt-forschung*. 1942. V. 19. Iss. 9. P. 302–312.
2. *Станюкович К.П.* Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Госиздат технико-теоретической литературы, 1955. 804 с.
3. *Брушлинский К.В., Каждан Я.М.* Об автомодельных решениях некоторых задач газовой динамики // *УМН*. 1963. Т. 18. № 2. С. 3–22.
4. *Забабахин Е.И.* Явления неограниченной кумуляции // *Сб. Механика в СССР за 50 лет. Т. 2. Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1970. 880 с.
5. *Огородников В.А.* Вязкость и ее роль в динамических процессах. Монография. Саров: ФГУП “РФЯЦ – ВНИИЭФ”, 2012. 239 с.
6. *Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Хомская И.В., Дегтярев А.А., Шорохов У.В., Смирнов У.Б., Долгих С.М., Коваль А.В.* Деформационные явления при схождении металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости // *ФГВ*. 2019. Т. 55. № 4. С. 92102. <https://doi.org/10.15372/FGV20190412>
7. *Пай В.В., Титов В.М., Лукьянов Я.Л., Пластинин А.В.* Исследование неустойчивости конической оболочки в процессе формирования кумулятивной струи // *ФГВ*. 2019. Т. 55. № 4. С. 69–73. <https://doi.org/10.15372/FGV20190409>
8. *Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гордополов Ю.А.* Локализация деформации и связь ее с деформированным состоянием материала // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. № 2. С. 153–155.
9. *Буравова С.Н.* Этюды на тему локализации динамической деформации. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 140 с.
10. *Нестеренко В.Ф., Бондарь М.П.* Локализация деформации при схлопывании толстостенного цилиндра // *ФГВ*. 1994. Т. 36. № 4. С. 99–111.
11. *Буравова С.Н.* Исследование структуры фронта детонационной волны в смеси нитрометана с ацетоном // *ПМТФ*. 2012. Т. 53. № 5. С. 312.

ANALYSIS OF PROCESSES ACCOMPANYING CYLINDRICAL CUMULATION

**S. N. Buravova^a, A. F. Belikova^a, N. I. Mukhina^a, V. O. Kopytskiy^a, E. V. Petrov^a,
Corresponding Member of the RAS M. I. Alymov^a**

^a*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russia*

Flow contraction within cylindrical samples causes instability in motion, leading to the formation of circumferential compression stress. This then results in perturbations in the form of Mach three-shock configurations (protrusions) at the shock front. The area at the front of the perturbed shock wave increases due to these protrusions. Furthermore, the protrusions are amplified as a consequence of the absorption of smaller perturbations, which are continuously generated at the shock front. The shock front undergoes sharp growth at the final stage, giving rise to several large protrusions that divide it into separate sectors. These sectors undergo oscillatory movements. As the counter configurations collide, a high-pressure zone is generated, which propels some of the compressed material forward. The protrusions reach their maximum height when they become equal to the distance of the front to the axis. The near-axis region is taken up by the frontal protrusions, and the consequent rarefaction shock wave decelerates the incoming flow.

Keywords: cylindrical cumulation, instability, Mach shock configuration, shock wave, localized shear bands, unloading wave