

УДК 532.517.4;621.791.13;623.4.082.6

ВЛИЯНИЕ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ КОНИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ

Я. Л. Лукьянов, В. В. Пай

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
lukyanov@hydro.nsc.ru

Исследовано влияние контролируемых возмущений на процесс потери устойчивости конических облицовок при их взрывном обжати. При этом на внутренней поверхности облицовок возникают складки, ориентированные вдоль образующей конуса. Установлено, что с увеличением числа Рейнольдса при сохранении геометрических размеров экспериментальныхборок количество складок растет. Показано, что нанесение рисок на внутреннюю поверхность облицовки позволяет управлять процессом потери ее устойчивости.

Ключевые слова: кумулятивный процесс, неустойчивость облицовки, контролируемые возмущения.

DOI 10.15372/FGV20210615

В работах [1, 2] экспериментально показано, что в процессе обжатия медной конической облицовки продуктами детонации гексогена при формировании кумулятивной струи происходит потеря устойчивости облицовки, выражающаяся в образовании складок, ориентированных вдоль ее образующей. Аналогичное явление наблюдалось в [3] при сжатии цилиндрических оболочек продуктами детонации и в [4] при сжатии магнитным полем. Вопросы, связанным с развитием возмущений при высокоскоростном деформировании пластин и облицовок различной формы в условиях, близких к вышеописанным, посвящен ряд теоретических и численных исследований [5, 6].

В работах [3, 4] скорость сжатия и количество складок оказались меньше, чем в [1]. Для проверки предположения о зависимости масштаба неустойчивости от числа Рейнольдса были проведены эксперименты с коническими биметаллическими облицовками, имеющими одинаковые формы и размеры, но сжимаемыми продуктами детонации разных взрывчатых веществ (ВВ): аммонитом 6ЖВ (плотность 0.9 г/см^3 , скорость детонации 4.0 км/с), гексогеном (плотность 1.0 г/см^3 , скорость детонации 6.0 км/с). Оценим параметры, харак-

теризующие течение металла облицовки в вышеописанных экспериментах. Диаметр конуса в его средней части составлял $d = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, радиальная скорость облицовки при нагружении аммонитом $u \approx 1.0 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, гексогеном — $u \approx 1.5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ при скоростях деформирования $\dot{\epsilon} \approx 10^5 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$, кинематическая вязкость меди $\nu \approx 0.7 \div 2.0 \text{ м}^2/\text{с}$, следовательно, число Рейнольдса $R \approx 10 \div 30$.

Биметаллические облицовки изготавливали следующим образом. Сначала константановую фольгу толщиной 0.2 мм наносили на медную пластину толщиной 1 мм с помощью сварки взрывом, затем из полученной пластины вырезали развертку конуса и подвергали ее термообработке в вакууме при температуре $850 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч . Затем развертку вставляли в сплошную медную воронку с толщиной стенки 1.5 мм и запрессовывали на гидравлическом прессе с усилием 20 т . Толщина биметаллических облицовок составляла 2.7 мм (медь — 2.5 мм , константан — 0.2 мм), толщина заряда ВВ — 20 мм , угол раствора конуса — 45° , высота конуса — 40 мм . Макрошлифы поперечных разрезов пестов биметаллических медь-константановых облицовок после их обжатия аммонитом 6ЖВ и гексогеном показаны на рис. 1. Видно, что с увеличением скорости метания облицовки, а следовательно, и числа Рейнольдса количество складок растет в полном соответствии с выводами работы [1] о

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-01-00166).

© Лукьянов Я. Л., Пай В. В., 2021.

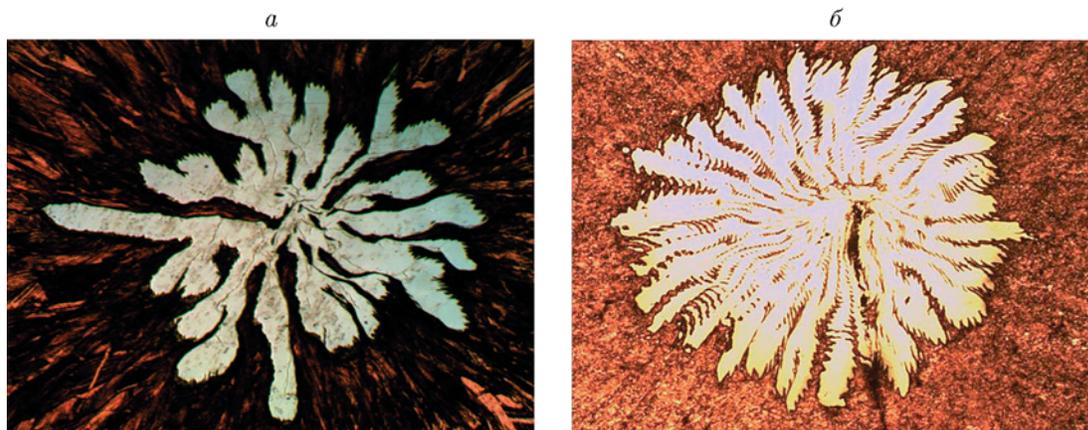


Рис. 1. Макрошлифы поперечных сечений пестов биметаллических медь-константановых облицовок при обжати аммонитом 6ЖВ (*a*) и гексогеном насыпной плотности (*б*)

корреляции размеров возникающих неоднородностей с внутренним масштабом турбулентности. При обжати облицовки зарядом аммонита 6ЖВ струя не образуется.

Спонтанно образующиеся складки вносят нестабильность в процесс формирования кумулятивных струй, а следовательно, и в процесс взаимодействия струй с преградой. Как следует из результатов работ [1, 2], размеры складок, возникающих при потере устойчивости облицовки в процессе ее сжатия, могут превышать все геометрические и структурные отклонения от симметрии облицовки и заряда ВВ, а следовательно, оказывать большее влияние на устойчивость сформированной кумулятивной струи. Поэтому необходимо, управляя процессом потери устойчивости облицовки при ее взрывном сжатии, достигать минимума возмущений в сформированной высокоскоростной струе.

С целью управления процессом возникновения неустойчивости на внутреннюю поверхность облицовки в верхней ее части на длину $1/3$ образующей наносили риски глубиной 0.3 мм в количестве 30 штук, что примерно соответствует количеству спонтанно образующихся складок при нагружении насыпным гексогеном (рис. 1, *б*). Исходная облицовка с нанесенными рисками показана на рис. 2.

После взрывного обжати зарядом гексогена образуется кумулятивная струя, рентгенограмма которой приведена на рис. 3. Как следует из рисунка, струя из облицовки с рисками не имеет визуальных отличий от струи, сформированной из гладкой конической облицовки тех же размеров и формы.

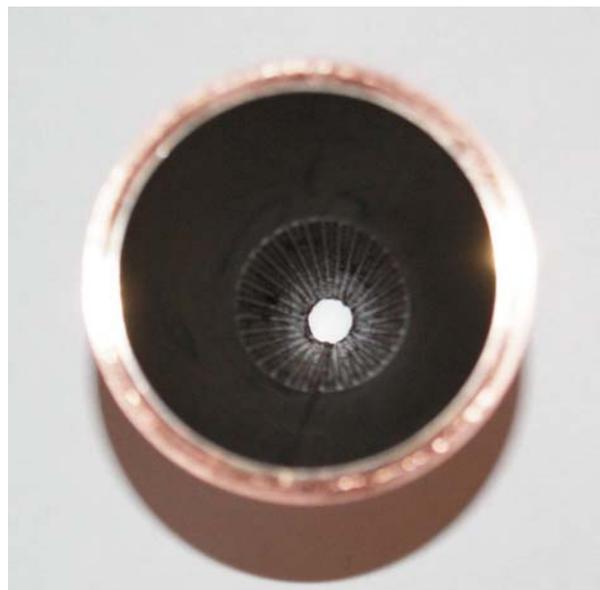


Рис. 2. Фотография исходной облицовки с нанесенными рисками

На рис. 4 представлен макрошлиф песта с 30 нанесенными рисками, на котором видна регулярная структура, показывающая потерю устойчивости облицовки, близкая к осевой симметрии 30-го порядка.

При нанесении 15 рисков на внутреннюю поверхность медь-константановой облицовки в начале процесса сжатия образуется 15 складок (рис. 5, *a*), в дальнейшем их число растет (рис. 5, *б, в*), пока не достигает количества, соответствующего данному режиму сжатия.

Следовательно, задание начального возмущения путем нанесения рисков вдоль образу-

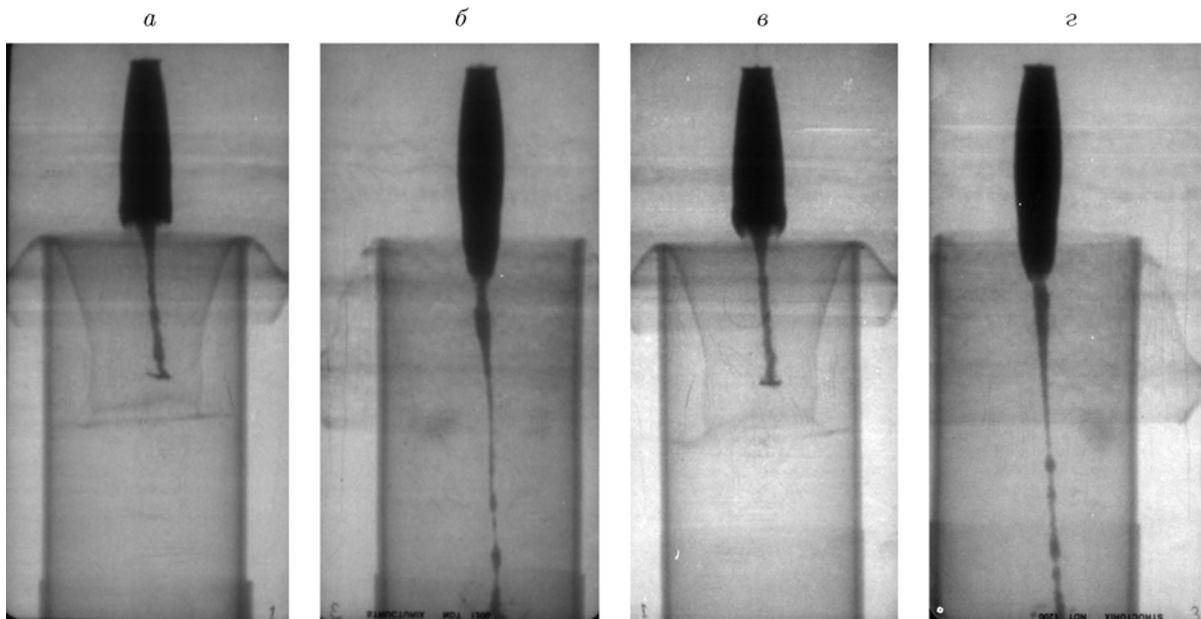


Рис. 3. Рентгенограмма кумулятивной струи:
а, б — струя из гладкой облицовки, *в, г* — струя из облицовки с предварительно нанесенными рисками

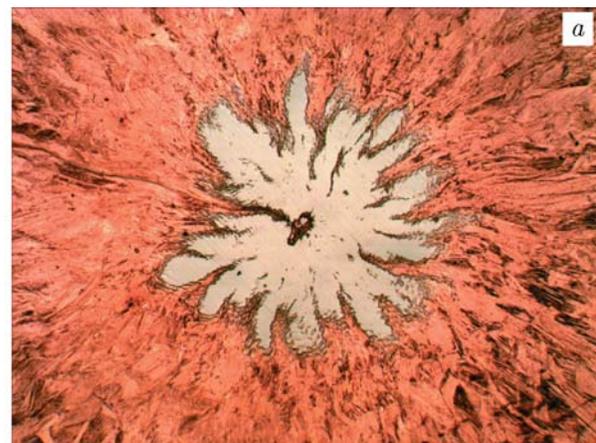
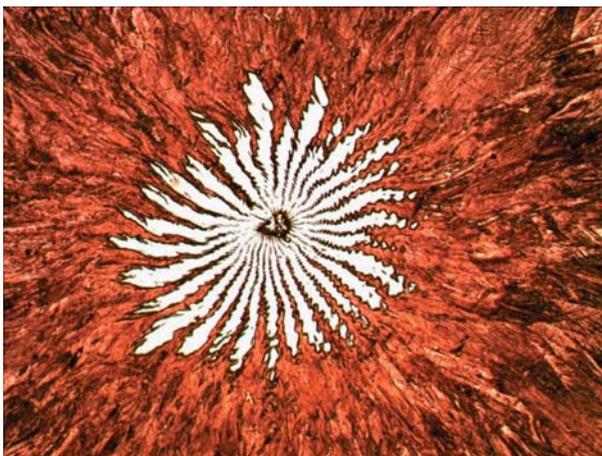


Рис. 4. Макрошлиф медь-константанового песта с 30 нанесенными рисками

щих конической облицовки на ее внутренней поверхности в количестве n , соответствующем режиму обжатия, позволяет получить регулярную структуру течения металла, близкую к

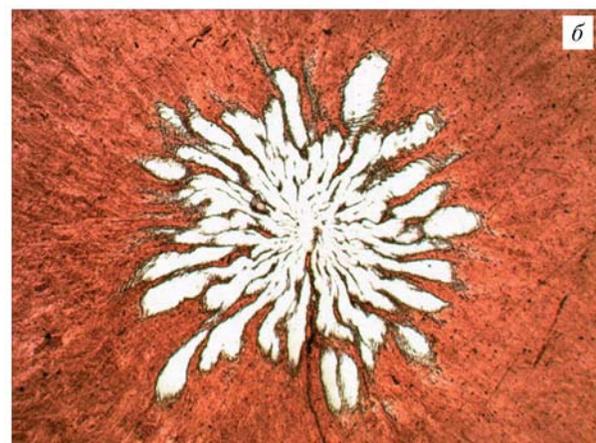


Рис. 5. Макрошлиф медь-константанового песта с 15 нанесенными рисками:

а — микрошлиф среза в начале песта, *б* — макрошлиф среза в средней части песта

осевой симметрии n -го порядка, что обеспечивает повторяемость результатов. Такое течение должно быть более стабильным, чем сформированное при обжатию гладкой облицовки со стохастическим образованием складок при потере ею устойчивости.

Результаты проведенных исследований подтверждают, что картина потери устойчивости при взрывном обжатию конических облицовок зависит от скорости их метания, а следовательно, от числа Рейнольдса. Показано, что существует возможность контролировать процесс потери устойчивости путем нанесения рисок на внутреннюю поверхность облицовки.

Авторы выражают благодарность А. В. Пластинину за помощь при проведении рентгенографических экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пай В. В., Титов В. М., Лукьянов Я. Л., Пластинин А. В.** Исследование неустойчивости конической облицовки в процессе формирования кумулятивной струи // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 69–73. — DOI: 10.15372/FGV20190409.
2. **Пай В. В., Титов В. М., Лукьянов Я. Л., Зубашевский К. М.** Измерение температуры кумулятивной струи из конической облицовки // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 3. — С. 123–126. — DOI: 10.15372/FGV20200313.
3. **Зельдович В. И., Фролова Н. Ю., Хейфец А. Э., Хомская И. В., Дегтярев А. А., Шорохов Е. В., Смирнов Е. Б., Долгих С. М., Коваль А. В.** Деформационные явления при схождении металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 92–102. — DOI: 10.15372/FGV20190412.
4. **Прищепенко А. Б.** Шипение снарядов. — М.: Моркнига, 2010.
5. **Зоненко С. И., Черный Г. Г.** Новый вид кумуляции энергии и импульса метаемых взрывом пластин и оболочек // Докл. РАН. — 2003. — Т. 390, № 1. — С. 46–50.
6. **Голубятников А. Н., Зоненко С. И., Черный Г. Г.** Образование и рост возмущений при метании слабоупругой оболочки // Докл. РАН. — 2004. — Т. 399, № 3. — С. 342–346.

Поступила в редакцию 17.02.2021.

После доработки 19.03.2021.

Принята к публикации 21.04.2021.