

УДК 532.517.4;621.791.13;623.4.082.6

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОНИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКИ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ

В. В. Пай, В. М. Титов, Я. Л. Лукьянов, А. В. Пластинин

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

Проведено исследование потери устойчивости конической облицовки в процессе формирования кумулятивной струи. Для установления характера течения металла при образовании кумулятивной струи были изготовлены трехслойные медь-медь-константановые облицовки, состоящие из сплошной медной конической воронки с углом при вершине 45° , толщиной стенки 1.5 мм и впрессованной в нее воронки, свернутой из медного листа толщиной 1.0 мм, плакированного сваркой взрывом с внутренней стороны константаном толщиной 0.2 мм. Обжатие облицовки осуществлялось зарядом гексогена толщиной 20 мм. Процесс образования струи регистрировался рентгеноимпульсным методом, а характер течения металла определялся по микрошлифам сохраненных пестов. Так как граница сваренных взрывом металлов хорошо различима на шлифах, то по остаточной деформации в разных сечениях песта было установлено, что облицовка в процессе сжатия теряет устойчивость, что проявляется в виде складок, ориентированных вдоль образующей конуса. При этом общая картина течения, описанная в рамках теории идеальной несжимаемой жидкости, не нарушается, что следует из рентгенограмм процесса кумуляции.

Ключевые слова: кумулятивный процесс, неустойчивость облицовки, сварка взрывом.

DOI 10.15372/FGV20190409

Первыми открытыми публикациями по основам теории кумуляции с металлической облицовкой были работы [1, 2]. Процесс кумуляции рассматривался в них в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости, что позволило получить адекватное представление о механизмах формирования струи и ее взаимодействии с преградой. Большая, в сравнении с размерами конической облицовки, глубина пробивания объяснялась нестационарностью процесса формирования струи, вследствие чего кумулятивная струя удлинялась при инерционном растяжении в свободном полете. В работе [3] с помощью импульсной рентгенографии, путем введения свинцовых меток, было показано, что при нестационарном течении струи из конической воронки, вследствие градиента скорости вдоль струи, некоторые ее участки до момента разрыва удлиняются более чем в 5 раз. В дальнейшем в исследованиях [4–6] было установлено, что некоторые части струи могут удлиняться более чем в 20 раз, хотя при взрывной раздаче труб с аналогичными скоростями деформации $\dot{\epsilon} \approx 10^5 \div 10^7 \text{ с}^{-1}$ разрушение наступает при относительных удлинениях, на порядок меньших. Адекватного объяснения этому факту к

настоящему времени нет.

Для объяснения того факта, что при малых углах раствора конуса струя не образуется, потребовался учет реальных свойств материала облицовки. В работе [7] был сформулирован критерий струеобразования, основанный на учете сжимаемости материала облицовки.

Изучению влияния реальных свойств материала облицовки на процесс кумуляции посвящены статьи [8, 9]. В работе [8] показано, что с уменьшением числа Рейнольдса скорость плоских струй становится ниже предсказанных в теории идеальной несжимаемой жидкости. В [9] экспериментально исследовалась устойчивость течения металла при соударении двух плоских металлических струй в широком диапазоне скоростей течения в системе отсчета точки контакта. Установлено, что переход от ламинарного течения к волнообразному осуществляется в полном соответствии со сценарием Л. Д. Ландау, описывающим начальную стадию возникновения турбулентности в вязкой жидкости с отрицательным значением постоянной Ландау $-\alpha$ [10, 11].

К настоящему времени опубликован ряд работ (подробный перечень см. в [12]), посвященных влиянию различных факторов на пробивание преграды кумулятивной струей. Ос-

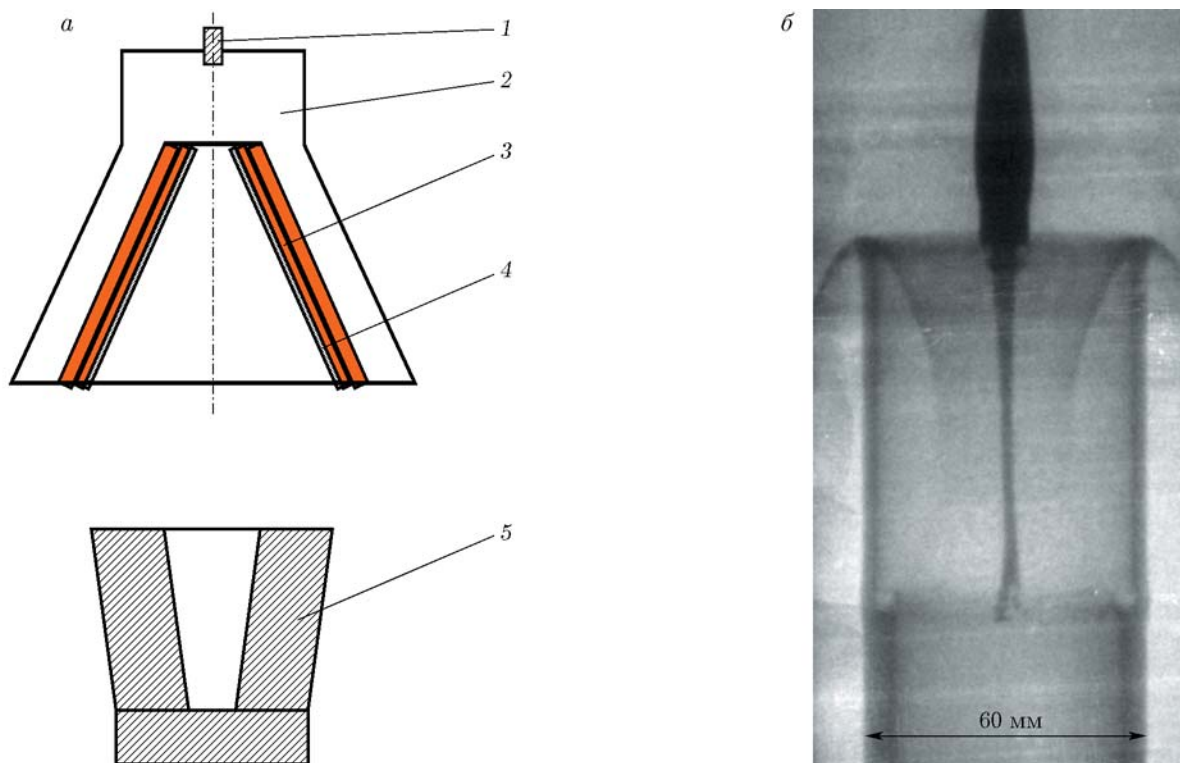


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и импульсная рентгенограмма (б):

1 — детонатор, 2 — заряд ВВ, 3 — медная воронка, 4 — медь-константановая вставка, 5 — ловушка

новное внимание в них уделялось вопросам, связанным с поперечной (изгибные колебания) и продольной (образование перетяжек, распад на фрагменты) неустойчивостью кумулятивной струи. Однако важные для образования струи процессы потери устойчивости облицовки при ее сжатии не рассматривались.

В данном исследовании определялся характер потери устойчивости конической облицовки, с тем чтобы в перспективе, управляя этим процессом, достигать оптимума при образовании высокоскоростной струи. Для установления характера течения металла при образовании кумулятивной струи были изготовлены трехслойные медь-медь-константановые конические облицовки высотой 40 мм, состоящие из сплошной медной воронки с углом при вершине 45° , с толщиной стенки 1.5 мм и из впрессованной в нее с усилием 20 т биметаллической воронки, свернутой из медного листа толщиной 1.0 мм, плакированного сваркой взрывом с внутренней стороны константаном толщиной 0.2 мм. Обжатие конуса осуществлялось насыпным зарядом гексогена плотностью 1.0 г/см^3 , толщиной 20 мм, со скоростью де-

тонации $6.0 \pm 0.1 \text{ км/с}$. Выбор константана в качестве плакирующего слоя обусловлен тем, что плотности меди и константана различаются менее чем на 0.6 %, граница соединения меди с константаном визуальна контрастна. Процесс образования струи регистрировался рентгеноимпульсным методом, а характер течения металла определялся по микрошлифам сохраненных пестов. Схема эксперимента и рентгенограмма процесса кумуляции приведены на рис. 1. Скорость струи оказалась равной $4.0 \pm 0.1 \text{ км/с}$, ее непрерывная длина $l \approx 120 \text{ мм}$. Так как граница сваренных взрывом металлов хорошо различима на шлифах, то наблюдения за ее остаточной деформацией в разных сечениях песта позволили установить, что облицовка в процессе сжатия теряет устойчивость, проявляющуюся в виде складок, ориентированных вдоль образующей конуса.

К моменту формирования кумулятивной струи складки смыкаются, соединяясь в процессе, аналогичном сварке взрывом, при этом поверхностный слой металла в виде пелены частиц выносятся в пространство внутри конуса. Кумулятивная струя формируется из цен-

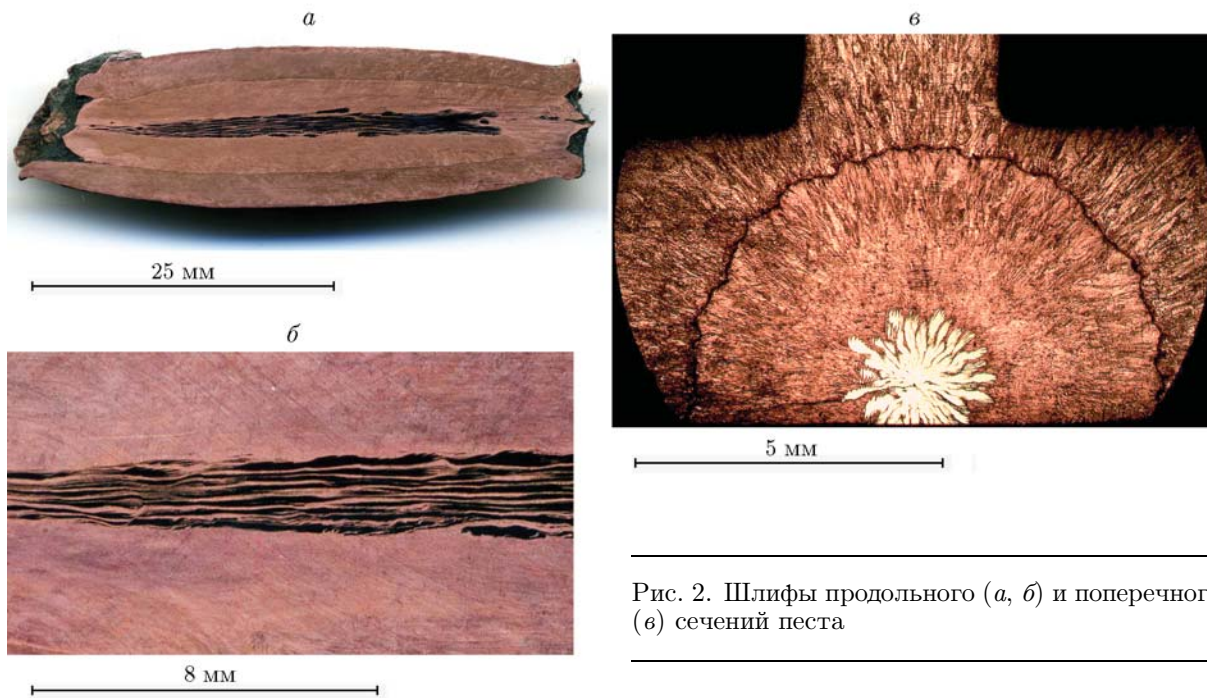


Рис. 2. Шлифы продольного (*а, б*) и поперечного (*в*) сечений песта

тральной зоны, в основном состоящей из материала складок, в данном случае из константана и частично из меди. На рис. 2 приведены микрошлифы продольного сечения песта и его увеличенные фрагменты, а также микрошлифы поперечного сечения.

Как видно на рис. 2, *в*, возникновение неустойчивости — процесс спонтанный, стартовый практически одновременно по разным радиальным направлениям, каждая образовавшаяся складка распространяется вдоль всей образующей конической облицовки (рис. 2, *а, б*). Место стыка внутреннего биметаллического конуса не оказывает существенного влияния на возникновение неустойчивости. Такая картина течения металла облицовки означает, что первоначально осесимметричное ламинарное течение абсолютно неустойчиво для реализованного в данных экспериментах значения числа Рейнольдса.

С целью проверки влияния константана, имеющего большую вязкость, чем медь, на устойчивость течения был проведен эксперимент, аналогичный вышеописанному, в котором вместо константанового слоя использовался медный толщиной 0.15 мм, также приваренный взрывом к внутреннему медному конусу.

Как видно на рис. 3, граница сварки медь — медь менее контрастна, чем грани-

ца медь — константан, но вполне различима. Мелкие зубчики вдоль границ контакта медь — константан и медь — медь — это деформированные волны, образовавшиеся при изготовлении сваркой взрывом биметалла внутреннего конуса. Из сравнения микрошлифов поперечных сечений медь-медь-константанового и медь-медь-медного пестов следует, что константановый слой также не оказывает существенного влияния на возникновение неустойчивости.

На рис. 2, *в*, 3, *а* границы (константан — константан) соединившихся складок трудно различимы, поэтому для детального выявления их формы был проведен эксперимент с медь-константан-медной облицовкой (рис. 4, *а*). Внутренний слой меди имел толщину 0.15 мм, константановый — 0.2 мм. На микрошлифе поперечного среза песта видны складки из константана, заполненные медью внутреннего слоя облицовки.

Необходимо отметить, что неустойчивость, возникающая на стадии сжатия облицовки еще до момента ее схлопывания, не приводит к существенному нарушению условий формирования кумулятивной струи, так как к этому времени образовавшиеся складки соединяются, вновь образуя конус с достаточно гладкой внутренней поверхностью. При этом

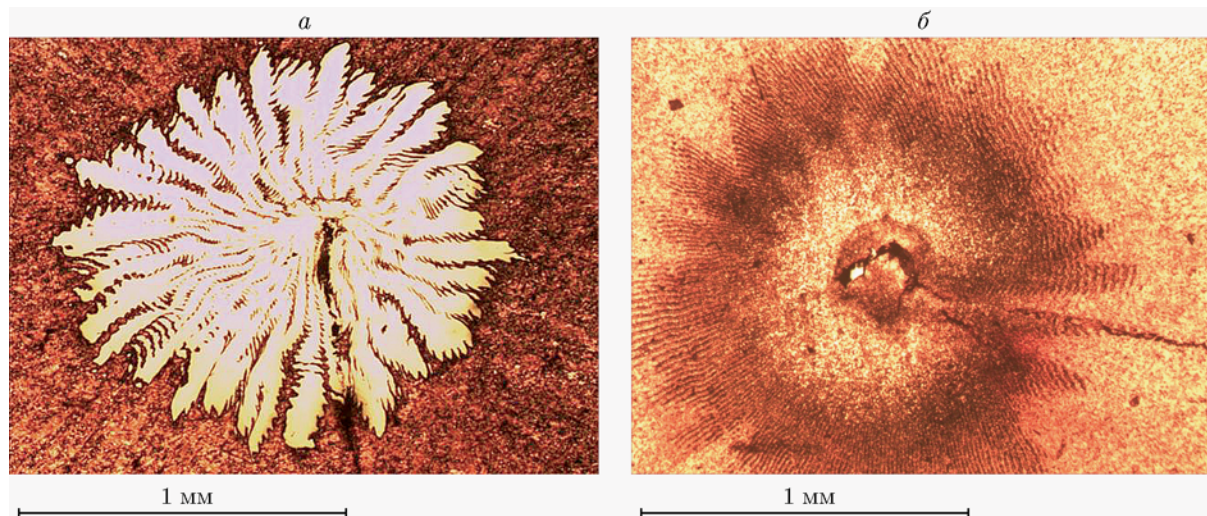


Рис. 3. Сравнение микрошлифов поперечного сечения биметаллических медь-константанового (а) и медь-медного (б) пестов

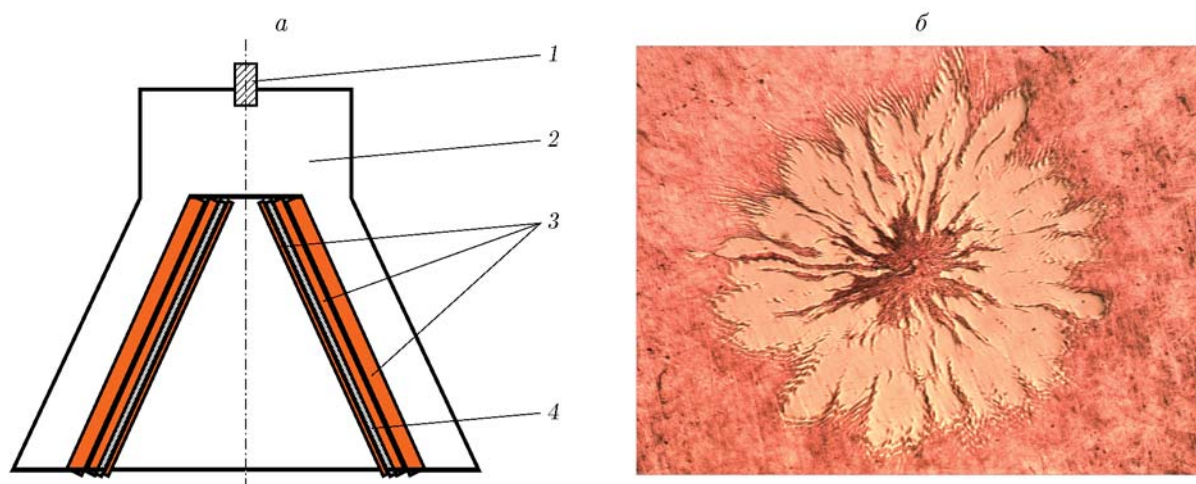


Рис. 4. Схема экспериментальной сборки (а) и микрошлиф поперечного сечения песта медь — константан — медь (б):

1 — детонатор, 2 — заряд ВВ, 3 — медь, 4 — константан

общая картина течения, наблюдаемая при импульсной рентгенографии процесса кумуляции, незначительно отличается от описанной в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости. Однако сформировавшаяся кумулятивная струя не обладает осевой симметрией как в геометрической форме, так и в распределении температуры по поперечному сечению.

На рис. 5 приведено схематическое изображение поперечного среза биметаллической медь-константановой кумулятивной струи, однозначно следующее из структуры приведенных на рис. 2, б и 3, а микрошлифов поперечных срезов пестов биметаллических конических об-

лицовок. Форма поперечного сечения струи не является круговой, так как складки возникают спонтанно, а области металла (в данном случае — константана) вдоль границ соединения складок, вследствие процесса, аналогичного сварке взрывом, имеют более высокую температуру, чем окружающий их металл. Заметим, что константан служит лишь средством визуализации деформационных процессов при кумулятивном течении металла, аналогичная картина течения реализуется и в монометаллических облицовках.

Сделаем некоторые оценки величин, характеризующих течение металла облицовки в

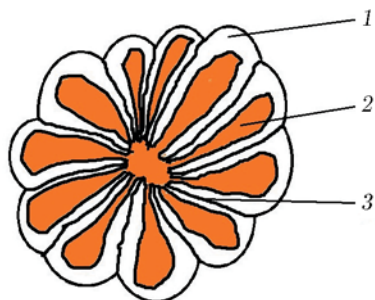


Рис. 5. Схематическое изображение поперечного сечения биметаллической медь-константановой кумулятивной струи:

1 — константан, 2 — медь, 3 — граница соединения константан — константан

вышеописанных экспериментах. Диаметр конуса в его средней части $d \approx 1.5 \cdot 10^{-2}$ м, радиальная скорость облицовки $u \approx 1.5 \cdot 10^3$ м/с, при скоростях деформирования $\dot{\epsilon} \approx 10^5 \div 10^7$ с $^{-1}$ кинематическая вязкость меди $\nu \approx 0.7 \div 2.0$ м 2 /с [8, 13]. Следовательно, число Рейнольдса $R \approx 10 \div 30$. Количество складок на микрошлифах (см. рис. 2–4) $n \approx 28 \div 33$, значит, в момент зарождения их размер составлял $\lambda \approx 1$ мм, что близко к внутреннему масштабу турбулентности $\lambda_0 \approx d/R^{3/4}$. При увеличении скорости сжатия конуса, вызванного, например, применением более мощного взрывчатого вещества, возрастут скорость струи и число Рейнольдса, следовательно, течение металла на этапе сжатия облицовки и в таких режимах будет абсолютно неустойчивым, сопровождающимся образованием складок на ее внутренней поверхности. С ростом числа Рейнольдса размер складок уменьшится, а их число будет расти.

Обнаруженное явление потери устойчивости конической облицовки при ее взрывном сжатии в процессе формирования кумулятивной струи приводит к появлению сложной внутренней структуры как струи, так и песта, что делает необходимым уточнение классической картины течения металла, рассматриваемой в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Birkhoff G., MacDugall D. P., Pugh E. M., Taylor G. J. Explosives with lined cavities // J. Appl. Phys. — 1948. — V. 19, N 6. — P. 563–582.
2. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи мат. наук. — 1957. — Т. 12, вып. 4 (76). — С. 41–56.
3. Titov V. M. Ultimate elongation of metallic shaped-charge jets // 16th Int. Symp. on Ballistics, San Francisco, CA, 23–28 September, 1996. — V. 2. — P. 527–534.
4. Бабкин А. В., Ладов С. М., Маринин В. М., Федоров С. В. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете // ПМТФ. — 1997. — Т. 38, № 2. — С. 10–18.
5. Маринин В. М., Бабкин А. В., Колпаков В. И. Методика расчета параметров функционирования кумулятивного заряда // Оборон. техника. — 1995. — № 4. — С. 34–39.
6. Бабкин А. В., Ладов С. М., Маринин В. М., Федоров С. В. Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете // ПМТФ. — 1997. — Т. 38, № 2. — С. 3–9.
7. Walsh J. M., Shreffler R. G., Willig F. G. Limiting condition for jet formation in high velocity collisions // J. Appl. Phys. — 1953. — V. 24, N 3. — P. 349–359.
8. Годунов С. К., Дерibas А. А., Мали В. И. О влиянии вязкости материала на процесс образования струй при соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 1. — С. 3–18.
9. Пай В. В., Лукьянов Я. Л., Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Волнообразование при высокоскоростном симметричном соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 132–137.
10. Ландау Л. Д. К проблеме турбулентности // Докл. АН СССР. — 1944. — Т. 44, № 8. — С. 339–342.
11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6: Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.
12. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 2.
13. Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. О некоторых эффектах, возникающих при взрывном обжатии вязкой цилиндрической оболочки // ПМТФ. — 1978. — № 3. — С. 99–112.

Поступила в редакцию 04.10.2018.

Принята к публикации 20.02.2019.