

УДК 532.517.4;621.791.13;623.4.082.6

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ ИЗ КОНИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКИ

В. В. Пай, **В. М. Титов**, Я. Л. Лукьянов, К. М. Зубашевский

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

Для измерения температуры кумулятивной струи были изготовлены трехслойные медь-медь-константановые облицовки, состоящие из сплошной медной конической воронки с углом при вершине  $45^\circ$ , толщиной стенки 1.5 мм и впрессованной в него воронки, свернутой из медного листа толщиной 1.0 мм, плакированного сваркой взрывом с внутренней стороны константаном толщиной 0.5 мм. Затем константановый слой частично удалялся так, чтобы облицованной константаном оставалась только верхняя треть внутренней поверхности воронок. Толщина константанового слоя выбиралась такой, чтобы носовая часть кумулятивной струи состояла только из константана, а хвостовая — из меди, что устанавливалось по микрошлифу сохраненного песта. В результате образовывалась медь-константановая термопара. В момент соударения биметаллической струи с мишенью осциллографом измерялся сигнал термоЭДС. Полученное значение термоЭДС соответствует температуре  $800 \pm 80$  °С.

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

DOI 10.15372/FGV20200313

### ВВЕДЕНИЕ

Поведению кумулятивных струй в свободном полете посвящено большое количество работ [1–5]. В работе [1] 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. Дальнейшие исследования других авторов [2–5] показали, что некоторые части струи могут удлиняться более чем в 20 раз, хотя при взрывной раздаче (раздутии) труб из тех же металлов, из которых были изготовлены кумулятивные облицовки, с аналогичными скоростями деформации ( $\dot{\epsilon} \approx 10^5 \div 10^6$  с<sup>-1</sup>) разрушение наступает при относительных удлинениях, на порядок меньших. Адекватного объяснения этому факту к настоящему времени нет.

В связи с этим особый интерес представляет вопрос о термодинамическом состоянии кумулятивной струи, так как для понимания механизма ее разрушения важно знать, в твердой или жидкой фазе находится материал струи. Впервые измерения температуры струи были

выполнены в работе [6], в которой по свечению струи, движущейся в вакуумированном объеме, была определена ее поверхностная температура в диапазоне  $400 \div 7000$  °С. Удовлетворительного объяснения авторов такому разбросу результатов измерений в работе не приведено.

Следующей была работа [7], в которой термодинамическим методом измерялась температура струи из полусферической выемки. При скорости движения струи 2.4 км/с средняя по сечению температура оказалась равной  $\approx 600 \pm 60$  °С.

Целью данной работы было измерение температуры кумулятивной струи, сформированной при взрывном обжатии конической облицовки.

Для измерения температуры кумулятивной струи была проведена серия экспериментов. Вначале были изготовлены трехслойные медь-медь-константановые конические облицовки высотой 40 мм, состоящие из сплошной медной воронки с углом при вершине  $45^\circ$ , толщиной стенки 1.5 мм и 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 0.5 мм (рис. 1). Далее константановый слой частично удалялся так, чтобы облицованной константаном оставалась только верхняя треть внутрен-

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

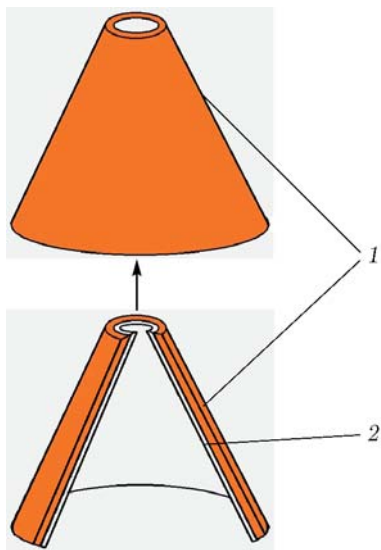


Рис. 1. Схема сборки медь-медь-константановой облицовки:

1 — медь, 2 — константан

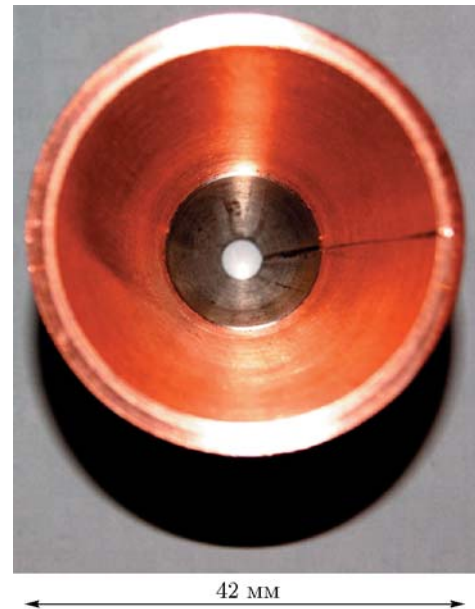


Рис. 2. Биметаллическая медь-константановая облицовка

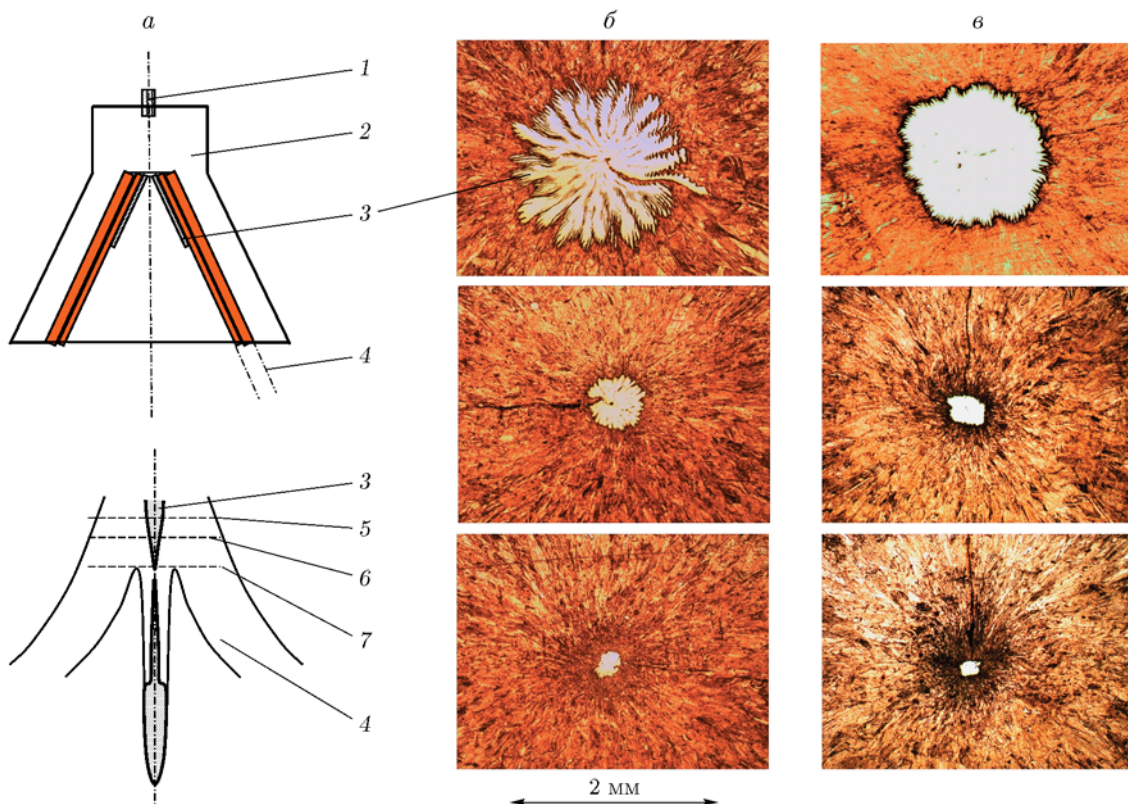


Рис. 3. Схема течения биметаллической струи (а), микрошлифы поперечных сечений биметаллического песта со слоем константана толщиной 200 (б) и 500 мкм (в):

1 — детонатор, 2 — заряд ВВ, 3 — константан, 4 — медь, 5–7 — поперечные сечения песта

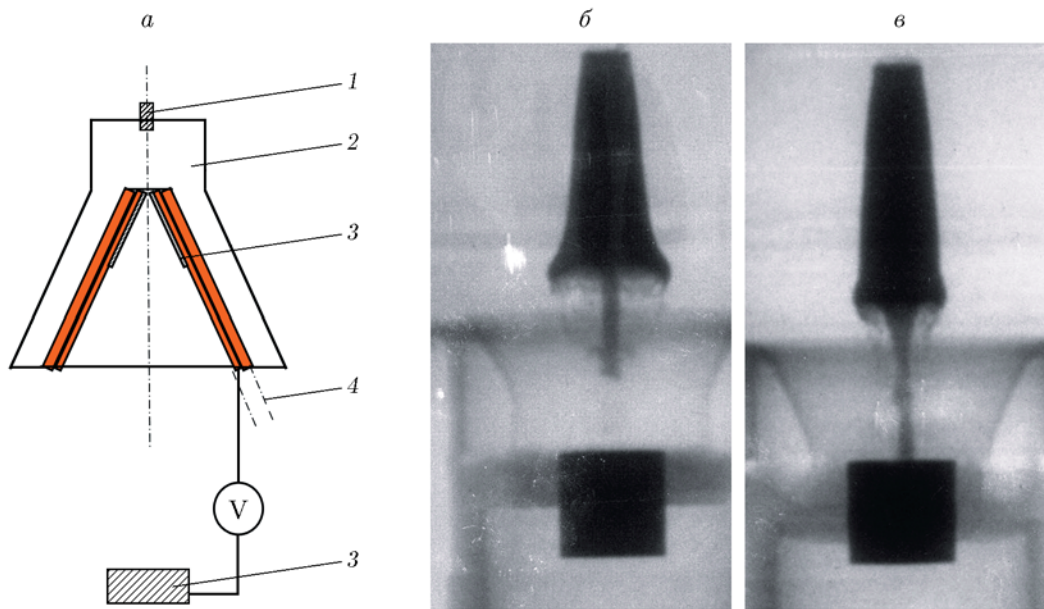


Рис. 4. Схема эксперимента (а) и рентгенограммы на 30-й (б) и 35-й (в) микросекундах: 1 — детонатор, 2 — заряд взрывчатого вещества (гексоген), 3 — константан, 4 — медь

ней поверхности воронок (рис. 2).

При выборе надлежащей толщины константанового слоя носовая часть кумулятивной струи будет состоять только из константана, а хвостовая — из меди, образуя медь-константановую термопару. На рис. 3 приведены схематическое изображение течения металла облицовки и микрошлифы поперечных сечений песта, выполненных на различных расстояниях от вершины конической облицовки при различных толщинах константанового слоя. Как видно на рис. 3, б, в, размер сечения константана уменьшается с увеличением расстояния от начала процесса кумуляции, в полном соответствии со схемой, изображенной на рис. 3, а. На еще большем расстоянии от вершины конической облицовки константан в песте не обнаруживается. В отличие от классической схемы течения, из-за потери устойчивости облицовки в процессе ее сжатия носовая часть струи при толщине константанового слоя 200 мкм, состоящая в основном из константана, имеет включения из меди [8], а при толщинах константанового слоя 400 ÷ 500 мкм состоит только из константана (рис. 3, б, в).

Обжатие облицовки осуществлялось продуктами детонации заряда гексогена толщиной 20 мм. На расстоянии 0.6 диаметра конуса от его основания размещалась мишень из константана. При соударении струи с константановой

мишенью образуется термопара, горячим спаем которой является граница медь — константан, а холодный спай находится при комнатной температуре. Сигнал термоЭДС с такой термопары будет соответствовать некоторой средней по сечению струи температуре [7]. Схема эксперимента и рентгенограмма процесса кумуляции представлены на рис. 4.

Путем измерения с помощью осциллографа разности потенциалов между хвостовой и головной частями струи определялась ее температура. На рис. 5 представлена осциллограмма, полученная в вышеописанном

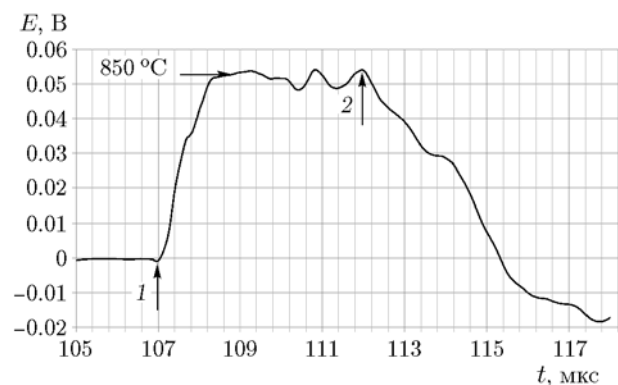


Рис. 5. Осциллограмма:

1 — момент соударения струи с константановой мишенью, 2 — момент пробивания мишени струей

эксперименте.

Значение измеренной термоЭДС однозначно связано с температурой границы контакта меди и константана в струе. При совместной деформации биметаллической струи, как это показано в [7], температура границы медь — константан равна  $T_\gamma = 0.75T_{Cu} + 0.25T_c$ , где  $T_{Cu}$ ,  $T_c$  — температура соответственно меди и константана в прилегающих к границе слоям металлов толщиной  $\approx 5 \div 10$  мкм. Поскольку  $T_{Cu} \leq T_c \leq 1240$  °С, то измеренное значение термоЭДС соответствует температуре меди  $800 \pm 80$  °С.

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Бабкин А. В., Ладов С. В., 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.
3. **Маринин В. М., Бабкин А. В., Колпаков В. И.** Методика расчета параметров функционирования кумулятивного заряда // Оборон. техника. — 1995. — № 4. — С. 34–39.
4. **Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В.** Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете // ПМТФ. — 1997. — Т. 38, № 2. — С. 3–9.
5. **Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М.** Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй // ПМТФ. — 1999. — Т. 40, № 4. — С. 25–35.
6. **Von Holle W. G., Trimble J. J.** Temperature measurement of shocked copper plates and shaped charge jets by two-color ir radiometry // J. Appl. Phys. — 1976. — V. 47, N 6. — P. 2391–2394.
7. **Пай В. В., Кузьмин Г. Е.** Экспериментальное определение температуры металлической струи // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 3. — С. 92–95.
8. **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.

*Поступила в редакцию 30.09.2019.  
Принята к публикации 06.11.2019.*