

УДК 623.4.082.6

## О ВЛИЯНИИ НАЧАЛЬНОГО НАГРЕВА ОБЛИЦОВКИ НА ПРОБИВНОЕ ДЕЙСТВИЕ КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА

Г. Е. Маркелов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 107005 Москва

Экспериментально обнаружено увеличение пробивной способности лабораторного кумулятивного заряда при начальном нагреве, т. е. при нагреве материала облицовки к моменту инициирования заряда взрывчатого вещества. Полученные результаты подтверждают теоретический вывод о возможности увеличения предельного удлинения элементов пластически разрушающейся высокоградиентной кумулятивной струи с ростом начальной температуры струеобразующего слоя облицовки.

Обычный вариант кумулятивного заряда (КЗ) содержит заряд бризантного взрывчатого вещества (ВВ) с кумулятивной выемкой на одном из его торцов, в которой расположена относительно тонкая металлическая облицовка, называемая кумулятивной облицовкой. Пусть в начальный момент заряд ВВ инициируется со стороны, противоположной кумулятивной выемке. Образующиеся при этом продукты детонации воздействуют на кумулятивную облицовку, что приводит к ее схлопыванию и формированию струи из внутреннего (струеобразующего) слоя облицовки [1, 2]. При определенных условиях возможно формирование пластически разрушающейся высокоградиентной металлической струи [3].

Пластически разрушающиеся высокоградиентные кумулятивные струи (КС) удлиняются в свободном полете под действием созданного при их формировании градиента скорости. На начальной стадии их существования происходит равномерное растяжение без заметной сосредоточенной деформации. Затем деформация локализуется в областях образования шеек. В итоге происходит пластическое разрушение КС, т. е. распад на определенное количество отдельных элементов, длина которых в дальнейшем не меняется. Такой вид разрушения характерен для КС из меди, никеля, ниобия (рис. 1). Для характеристики удлинения без разрыва элементов таких КС используют так называемый коэффициент предельного удлинения, определяемый отношением общей длины элемента струи после разрыва к его начальной длине.

В работе [3] для пластически разрушающейся струи проведено теоретическое исследование влияния начальной температуры нагрева струеобразующего слоя облицовки КЗ на предельное удлинение элементов струи и получена формула для определения коэффициента предельного удлинения

$$n(T_i) = (A + BR \operatorname{grad} V) [1 - (T_i - T_0)/(T_m - T_s)]^{-0,39}, \quad 0 < (T_i - T_0)/(T_m - T_s) < 1, \quad (1)$$

где  $T_i$  — температура начального нагрева материала струеобразующего слоя облицовки;  $T_m$  и  $T_s$  — температура плавления и остаточная температура ударного сжатия материала струеобразующего слоя;  $T_0 = 300$  К;  $A$  и  $B$  — константы материала, определяемые экспериментально при температуре  $T_i$ , равной  $T_0$ ;  $R$  и  $\operatorname{grad} V$  — начальные значения радиуса и градиента скорости вдоль КС.

Из приведенной зависимости (1) следует, что с ростом начальной температуры материала струеобразующего слоя облицовки увеличивается коэффициент предельного удлинения, что позволяет использовать нагрев материала облицовки к моменту инициирования

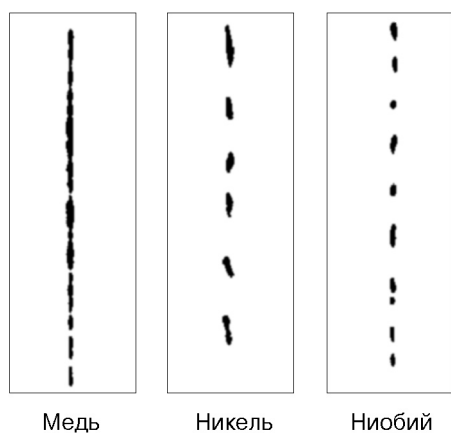


Рис. 1

Рис. 1. Пластическое разрушение кумулятивных струй из различных материалов

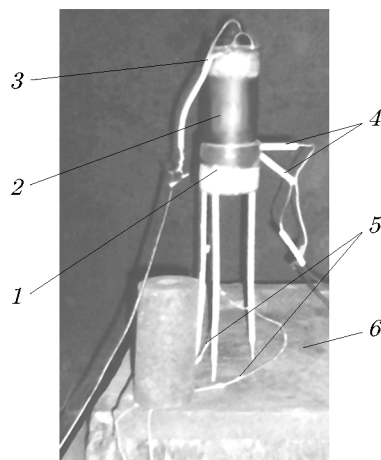


Рис. 2

Рис. 2. Экспериментальная установка:

1 — устройство для нагрева кумулятивной облицовки; 2 — макет КЗ; 3 — провода от установленных в облицовке термопар; 4 — провода от автотрансформатора; 5 — провода от контрольной термопары; 6 — бронепакет

заряда ВВ для достижения элементами КЗ большего удлинения и, следовательно, большей пробивной способности пластически разрушающейся высокоградиентной струи.

В настоящей работе экспериментально исследовалось влияние начального нагрева струеобразующего слоя облицовки на пробивное действие КЗ. Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 2. Устройство для нагрева кумулятивной облицовки состоит из тепловода, стыкуемого с торцевой поверхностью кумулятивной облицовки, электронагревательной обмотки и корпуса, установленного на опорах для обеспечения требуемого расстояния от основания КЗ до бронепакета. Разработанное устройство предназначено для лабораторных КЗ. В экспериментах использовались заряды диаметром 50 мм, снаряженные флегматизированным гексогеном и укомплектованные медными облицовками с углом раствора  $50^\circ$  толщиной 1 и 1,4 мм при вершине и основании соответственно. В качестве тепловода в рассматриваемом устройстве используется медная втулка, толщина стенки которой в части, контактирующей с торцевой поверхностью облицовки, составляет 1 мм. Внутренний диаметр втулки равен внутреннему диаметру основания кумулятивной облицовки. На внешней поверхности тепловода находится электронагревательная обмотка. Тепловод и электронагревательная обмотка размещаются в корпусе. Нагрев кумулятивной облицовки осуществляется тепловодом при пропускании через его обмотку электрического тока.

Для безопасного исследования процесса теплопроводности в кумулятивном узле использовался представленный на рис. 2 макет КЗ, который имеет геометрические параметры лабораторного заряда и состоит из кумулятивной облицовки и инертного заменителя ВВ. В основании и вершине кумулятивной облицовки расположены хромель-копелевые термопары с целью определения температуры равномерного нагрева материала облицовки. Для контроля температуры в устройстве нагрева установлена хромель-копелевая термопара в той части тепловода, которая контактирует с торцевой поверхностью кумулятивной облицовки. Измерение напряжения на концах термопары производилось с помощью цифрового запоминающего осциллографа. Относительная погрешность измерения температу-

ры в интервале 100–200 °С составляла примерно 10%. Требуемый уровень температуры в облицовке к моменту подрыва достигался изменением напряжения  $U$  на концах электронагревательной обмотки или времени нагрева. В проведенных опытах напряжение  $U$  варьировалось с помощью автотрансформатора в интервале от 50 до 60 В, вследствие чего время нагрева материала облицовки до температуры 100–200 °С составляло 100–350 с. При таких условиях нагрева в материале облицовки достигается распределение температуры, которое незначительно отличается от равномерного.

При одинаковых значениях напряжения  $U$  и времени нагрева имела место повторяемость результатов измерения температуры равномерного нагрева материала облицовки  $T_i$  только для одного и того же электронагревательного устройства. Поэтому для каждого устройства при постоянных значениях напряжения  $U$  устанавливалась зависимость начальной температуры облицовки  $T_i$  от времени нагрева  $t$ , одновременно в месте установки контрольной термопары определялась зависимость температуры  $T_*$  от времени  $t$ . Это позволило для каждого электронагревательного устройства построить свою зависимость  $T_i = T_i(T_*(t))$  при постоянных значениях  $U$ .

Перед испытанием лабораторных КЗ с начальным нагревом материала облицовки был проведен эксперимент без нагрева с целью определения фокусного расстояния, на котором достигается наибольшая глубина пробития КЗ, используемого совместно с электронагревательным устройством. Результаты эксперимента показали, что наибольшая глубина пробития  $L$  при доверительной вероятности 0,95 составляет  $(244 \pm 9)$  мм на фокусном расстоянии 250 мм (выборочное среднеквадратичное отклонение равно 5,6 мм). В дальнейшем на этом фокусном расстоянии проводился эксперимент с лабораторными КЗ при тепловом воздействии на кумулятивный узел. Все прочие условия экспериментов, как при начальном нагреве материала кумулятивной облицовки, так и без него, были одинаковыми.

Эксперимент по определению зависимости глубины пробития КЗ от начальной температуры материала облицовки проводился следующим образом. Макет КЗ, представленный на рис. 2, замещался лабораторным зарядом, затем на электронагревательную обмотку подавалось напряжение. Во время нагрева облицовки в месте установки контрольной термопары определялась температурная зависимость от времени, которая отличалась от зависимости  $T_*(t)$ , полученной при использовании макета, только смещением по времени в результате несовпадения моментов начала нагрева. При достижении значения температуры  $T_*$ , соответствующего требуемой температуре нагрева материала облицовки  $T_i = T_i(T_*)$ , осуществлялся подрыв КЗ.

При проведении таких опытов начальная температура материала облицовки изменялась в пределах от 27 до 200 °С. Однако при температуре свыше 180–190 °С, т. е. близкой к температуре плавления ВВ, имело место частичное изменение геометрических параметров заряда, которое наиболее сильно проявлялось у его основания, что приводило к потере осесимметричности заряда и как следствие к резкому снижению глубины пробития, а в некоторых опытах и к отсутствию пробивного действия.

Значения глубины пробития, полученные в эксперименте при начальной температуре 27, 130 и 180 °С, представлены на рис. 3. Эти данные позволили построить линейную регрессионную модель для предсказания глубины пробития в зависимости от начальной температуры нагрева в пределах от 27 до 180 °С. Обработка экспериментальных данных включала следующие этапы [4]: проверка воспроизводимости эксперимента, оценка дисперсии шума, вычисление точечных оценок неизвестных коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов, проверка значимости оценок коэффициентов регрессии, проверка адекватности и работоспособности уравнения регрессии. Проверка статистических гипотез осуществлялась на уровне значимости, равном 0,05. Полученная эмпирическая зависимость относительной глубины пробития КЗ от начальной температуры нагрева имеет

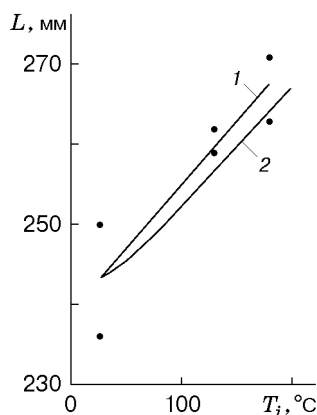


Рис. 3. Зависимость глубины пробития КЗ от температуры начального нагрева материала облицовки: 1 — расчет по эмпирическому уравнению регрессии (точки — экспериментальные данные); 2 — расчет по инженерной методике

следующий вид:

$$L/d = 4,87 + 3,38(T_i - T_0)/(T_m - T_0), \quad 0 < (T_i - T_0)/(T_m - T_0) < 0,145, \quad (2)$$

где  $L$  — глубина пробития КЗ;  $d = 50$  мм — диаметр лабораторного КЗ.

Из регрессионного уравнения (2) следует, что с ростом начальной температуры материала облицовки увеличивается пробивная способность КЗ.

Наряду с экспериментальным определением пробивной способности лабораторных КЗ проводился расчет глубины пробития с помощью инженерной методики, изложенной в работе [5]. Используемая инженерная методика, в которой применялась зависимость (1), позволила получить заведомо заниженные значения глубины пробития.

Наряду с экспериментальными данными на рис. 3 представлены зависимости глубины пробития КЗ от температуры начального нагрева материала облицовки, полученные в результате расчета по инженерной методике и эмпирическому уравнению (2). Сопоставление полученных зависимостей показывает их удовлетворительное соответствие.

Анализ с целью выявления других возможных причин, приводящих к повышению пробивного действия лабораторных зарядов при начальном нагреве материала кумулятивной облицовки, показал, что удлинение элементов пластически разрушающейся высокоградиентной КС является единственным существенным фактором, повышающим пробивную способность КЗ.

Полученные результаты подтверждают теоретический вывод о возможности увеличения предельного удлинения элементов пластически разрушающейся высокоградиентной кумулятивной струи с ростом начальной температуры струеобразующего слоя облицовки. Это позволяет, с одной стороны, сформировать новые представления о явлении, связанном с кумулятивным эффектом, с другой — предложить новый способ повышения пробивного действия КЗ [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи мат. наук. 1957. Т. 12, вып. 4. С. 41–56.
2. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
3. Маркелов Г. Е. О влиянии начального нагрева струеобразующего слоя облицовки кумулятивного заряда на предельное удлинение элементов струи // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 2. С. 32–36.
4. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1982.

- 
5. **Маринин В. М., Бабкин А. В., Колпаков В. И.** Методика расчета функционирования кумулятивных зарядов // Оборон. техника. 1995. № 4. С. 34–49.
  6. **Пат. 2100761 РФ, МПК<sup>6</sup> F 42 В 12/10.** Способ повышения пробивного действия кумулятивного заряда / А. В. Бабкин, В. И. Колпаков, Г. Е. Маркелов и др. (РФ) // Изобрет. 1997. № 36. С. 393.

*Поступила в редакцию 22/VI 1999 г.,  
в окончательном варианте — 21/X 1999 г.*

---