Физика горения и взрыва

2

1972 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 532.5

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ

Н. С. Козин

(Москва)

Бронебойные снаряды, использующие эффект кумуляции — эффект увеличения пробивной силы зарядов взрывчатых веществ при наличии в них конической выемки, покрытой тонкой металлической оболочкой, получили широкое применение. В нашей стране теория кумуляции была разработана М. А. Лаврентьевым и опубликована в 1957 г. в обзорной статье [1], через 10 лет после ее создания. Независимо, за рубежом, эти же вопросы были изучены группой ученых во главе с Тейлором и опубликованы в открытой печати в 1948 г. [2].

В качестве предпосылок теории первого приближения были приняты следующие гипотезы:

1) детонация взрывчатого вещества происходит мгновенно, а действие его на оболочку сводится к импульсу, направленному перпендикулярно поверхности конуса;

2) материя оболочки принимается за идеальную несжигаемую жидкость.

Эти предпосылки позволили объяснить образование кумулятивной струи, процесс пробивания, а также получить формулы для определения параметров струи и глубины пробития. Однако имеются некоторые экспериментальные факторы, которые до сих пор не объяснены:

а) необходимость достаточно точно (до сотых долей милиметра) обрабатывать коническую оболочку зарядов;

б) наличие фокусного расстояния (резкое падение пробивного действия при удалении заряда от преграды);

в) невозможность использования кумулятивных зарядов, вращающихся с большой скоростью вокруг оси конуса.

С точки зрения этих вопросов представляет интерес изучение кумулятивной струи в полете, ее устойчивости и роста возмущений на ее поверхности.

1. Согласно теории первого приближения кумулятивная струя представляет собой цилиндрический столб жидкости радиуса r, летящий в направлении своей оси со скоростью U (ось струи совпадает с осью z). Реальный кумулятивный заряд, описанный в [1], имеет высоту $H=15$ *см*, толщину стальной пелены $R=0{,}15$ *см*, угол раствора конуса $2\alpha=30°$, а средняя скорость полета струи $U=5$ *км/сек*. Характерное время τ, за которое частица жидкости пролетает расстояние H со скоростью U:

$$\tau=\frac{H}{U}=3\cdot 10^{-5}\ \textit{сек}. \tag{1}$$

Если на струю действуют возмущающие силы, то на ее поверхности будут наблюдаться линейно растущие по t возмущения, приводящие с течением времени к распадению струи на капли.

Исследуем малые возмущения такой струи. В подвижной системе координат, связанной со струей, уравнения на возмущения имеют вид (сжимаемостью жидкости пренебрегаем)

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial t}+\rho^{-1}\operatorname{grad}p'=0,\ \operatorname{div}\vec{w}'=0. \tag{2}$$

Здесь $\vec{w}'$ — возмущение скорости; p' — возмущение давления; ρ — постоянная плотность жидкости. Из (2) следует, что

p' — гармоническая функция. Но поскольку на свободной поверхности давление постоянно ($p'=0$), то всюду в струе $p'\equiv 0$, а

$$\vec{w}' = \vec{w}'(x,\ y,\ z-Ut).$$

Если обозначить через w'_r скорость, направленную по нормали к оси струи, а через ζ — смещение свободной границы по нормали к оси, то

$$\zeta = \zeta_0(x,\ y,\ z-Ut) + tw'_r(x,\ y,\ z-Ut), \tag{3}$$

где $x^2+y^2=r^2$. Из (3) следует, что при $w'_r \neq 0$ за конечное время произойдет перехлест границы струи, что соответствует распадению струи на капли. Именно для того, чтобы за время порядка τ, $|\zeta|$ стал порядка 2r, необходимо, чтобы $|w'_r| \sim \frac{2r}{\tau}$. Согласно [1] $r \approx \sqrt{2R}\sin\frac{\alpha}{2} \approx 0{,}07$ *см*, тогда $\frac{|w'_r|}{U} \approx 0{,}01 = 1\%$, т. е. для разрушения струи ширины $2r$ на капли время τ необходимо, чтобы возмущения скорости достигали 1% скорости струи.

Можно оценить, каким образом зависит величина возмущений скорости от чистоты обработки образующей конуса. Если обозначить через $\vec{V}$ скорость движения конической пелены по направлению к своей поверхности, то предположение о применимости принципа квазистационарного расчета состоит в том, что $\vec{V} = \text{const}$. При малых углах α имеет место соотношение

$$U = |\vec{V}|\,\frac{\sqrt{2R}}{r}. \tag{4}$$

Проварьируем (8) ($\vec{V} = \text{const}$). Тогда

$$\frac{\delta U}{U} = \frac{\delta R}{R} - \frac{\delta r}{r}.$$

Поскольку ежесекундный расход в каждом сечении струи остается постоянным, а жидкость считается несжимаемой, то

$$\frac{\delta U}{U} \sim \frac{|w'_r|}{U} \quad \text{и} \quad \frac{\delta R}{R} \sim \frac{\delta r}{r} + \frac{|w'_r|}{U}.$$

Из (4) следует, что возмущение поверхности струи на устойчивость не влияет, поэтому членом $\frac{\delta r}{r}$ можно пренебречь. Задаваясь $|w'_r|/U = 1\%$, находим, что чистота обработки

$$\delta R \sim 0{,}01R = 0{,}015 \text{ мм}.$$

Такой порядок точности обработки является известным экспериментальным фактом.

2. Описанное выше достаточно медленное (линейное) нарастание амплитуды возмущений свободной поверхности может объяснить наличие фокусного расстояния заряда. Именно при подлете к броне струя находится близко от порога распадения на капли. При удалении заряда от брони струя, разлетаясь на мелкие капли, резко теряет пробивную силу.

С другой стороны, всякое усиление механизма неустойчивости может привести к выходу из характерных времен порядка $3 \cdot 10^{-5}$ *сек*. Таким усилением неустойчивости может стать, например, вращение с большой угловой скоростью.

3. Пусть вращение кумулятивного заряда происходит с угловой скоростью $\omega = 2000$ *сек*$^{-1}$. Струя, закручиваясь вместе со снарядом, испытывает действие на свободную поверхность центробежного ускорения, равного $\omega^2 r$. Такое ускорение эквивалентно действию искусственной гравитации на свободную поверхность, что порождает тейлоровскую неустойчивость последней, т. е. экспоненциальный рост возмущений тем более быстрый, чем выше частота возмущений. (Это означает, что задача не является корректно поставленной.)

Декремент роста возмущений σ имеет вид

$$\sigma = \sqrt{2\pi}\,\omega\sqrt{\frac{r}{\lambda}}.$$

Здесь λ — длина волны возмущений. Если задаться длиной волны λ, равной δR, то

$$\sigma = 4\cdot 10^4\ сек^{-1}.$$

Отсюда следует, что $\sigma\tau = 1, 2$, т. е. за время τ колебания длины δR успевают достаточно вырасти, чтобы струю разрушить.

Автор приносит глубокую благодарность М. А. Лаврентьеву и А. А. Дерибасу за обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию
5/I 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Лаврентьев. УМН, 1957, **XII**, 4.
2. G. Birkhoff, D. MacDougall a. o. J. Appl. Phys. 1948, 19, 6.

УДК 536.24

О ВЛИЯНИИ ПОТОКА КИСЛОРОДА НА ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

В. А. Гуляев, Б. А. Иванов, С. Е. Наркунский,
А. П. Никонов, В. Ф. Плешаков

(Москва)

В настоящей работе изучается влияние потока кислорода на пределы и скорости распространения горения по металлическим образцам в чистом газообразном кислороде.

Эксперименты проводились с цилиндрическими образцами диаметром 3 *мм* из проволоки СВО8А (малоуглеродистая сталь с содержанием углерода менее 0,1%) и СВО4Х19Н9 (Cr — 19%, Ni — 9%, C<0,04%), а также с точеными образцами из стали 2Х13 (Cr — 13%, C — 0,2—0,3%). Установка позволяла создавать скорости потока до 1,5 *м/сек*. Поджигание образцов, ориентированных горизонтально, производилось с одного конца от запальной спирали. Направление потока кислорода совпадало с направлением распространения горения. Начальная температура кислорода была равной 18° С.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1 и 2.

Как видно на рис. 1, предельные давления, при которых горение распространяется по образцу $p_п$, резко уменьшаются уже при малых скоростях потока U и в области $U = 0{,}03$—$0{,}1$ *м/сек* могут быть описаны соотношением $p_п = 0{,}8\,U^{-1}$ ($p_п$ в *атм*, U в *м/сек*). При $U > 0{,}1$ *м/сек* наблюдаются значительные отклонения от этой зависи-

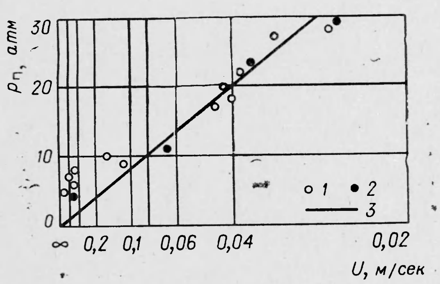

Рис. 1. Зависимость предельных давлений распространения горения $p_п$ от скорости потока кислорода U.
1 — СВО4Х19Н9; *2* — 2Х13; *3* — соответствует формуле $p_п = 0{,}8\ U^{-1}$.

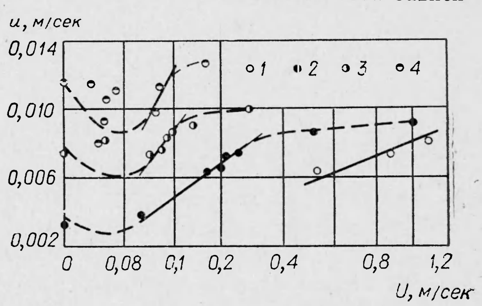

Рис. 2. Зависимость скорости распространения горения от скорости потока кислорода.
1 — СВО4Х19Н9 (p=6 *атм*), сплошная прямая соответствует формуле $u = 8\cdot 10^{-3}U^{0,5}$, *2, 3, 4* — СВО8А (давление 6,21 и 41 *атм* соответственно), сплошные прямые соответствуют формуле $u = 0{,}61\cdot 10^{-2}(Up)^{0,5}$.