

МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ С ПЛАСТИНАМИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

И.Ф. Кобылкин¹, Н.С. Дорохов²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: kobylikin_ivan@mail.ru

ОАО “НИИ Стали”, Москва, Россия

Рассмотрены механизмы стационарного и нестационарного взаимодействий металлической кумулятивной струи с лицевой (движущейся навстречу) и тыльной (движущейся вдогон) пластинами динамической защиты. Определен диапазон параметров взаимодействия, при которых реализуются эти механизмы. Показано, что взаимодействие кумулятивной струи с лицевой пластиной имеет в основном стационарный характер и приводит к срабатыванию струи в поперечном направлении и отклонению ее на небольшой угол. Взаимодействие кумулятивной струи с тыльной пластиной имеет в основном нестационарный дискретный характер и формирует в струе односторонние поперечные возмущения, которые, развиваясь, приводят к ее искривлению и последующему разрушению.

Ключевые слова: кумулятивная струя, динамическая защита, непрерывное и дискретное взаимодействие, срабатывание и отклонение струи, поперечные возмущения струи.

MECHANISMS OF INTERACTION OF SHAPED CHARGE JET WITH EXPLOSIVE REACTIVE ARMOR PLATES

I.F. Kobylikin¹, N.S. Dorokhov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: kobylikin_ivan@mail.ru

²OAO “NII Stali”, Moscow, Russia

Mechanisms of stationary and nonstationary interactions of a metal shaped charge jet with the frontal (moving backward) and back (moving forward) plates of the explosive reactive armor are considered. A range of interaction parameters, at which these mechanisms are implemented, is defined. It is shown that interaction of the jet with the frontal plate is stationary in general and leads to the jet erosion in the transverse direction (i.e., reduction in diameter) and its deflection by a small angle. The interaction between the jet and the back plate is mainly of nonstationary discrete nature and produces the one-sided transverse perturbations in the jet, which, while evolving, lead to curving and the subsequent destruction of the jet.

Keywords: shaped charge jet, explosive reactive armor, continuous and discrete interaction, erosion and deflection of the jet, transversal perturbations of the jet.

Научная история динамической защиты (ДЗ) бронетехники от воздействия кумулятивных средств поражения началась более 50 лет назад, когда Б.В. Войцеховский, В.Л. Истомин (МФТИ), А.И. Платов (НИИ Стали) и другие под руководством М.А. Лаврентьева провели первые эксперименты по исследованию динамической противокумулятивной защиты [1, 2]. В настоящее время уже нет альтернативы ис-

пользованию ДЗ для защиты бронетехники от действия бронебойных и кумулятивных средств поражения.

Основой взрывной ДЗ являются плоские элементы, состоящие из двух металлических пластин и заключенного между ними слоя ВВ. Возбуждение детонации в слое ВВ осуществляется при воздействии кумулятивной струи (КС). Образующиеся продукты детонации ускоряют пластины, которые воздействуют на КС под углом. Это воздействие приводит к отклонению, разрушению или срабатыванию КС, вследствие чего существенно уменьшается глубина пробития основной части преграды, расположенной за устройством ДЗ. Несмотря на простоту конструкции большинства устройств ДЗ, физика ее функционирования весьма сложна и до настоящего времени не все процессы, определяющие ее защищающую способность, изучены полностью. Настоящая статья посвящена изучению динамики соударения КС с лицевой (летающей навстречу КС) и тыльной (летающей вдогон КС) пластинами ДЗ.

В работе [2] при анализе процесса функционирования ДЗ предполагалось стационарное непрерывное взаимодействие КС с пластинами ДЗ в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости. Несмотря на то, что построенная в [2] расчетная модель процесса адекватно отражала результаты экспериментов, заложенный в ее основу механизм взаимодействия КС с пластинами ДЗ не в полной мере соответствует действительности. В настоящее время в качестве основного механизма взаимодействия КС с пластинами ДЗ рассматривается нестационарный механизм, в основе которого лежит периодическое взаимодействие КС с относительно тонкими (толщиной несколько миллиметров) металлическими пластинами ДЗ [1–5]. Удар высокоскоростного головного элемента КС создает в пластине отверстие, диаметр которого превосходит диаметр КС, и определяется скоростью КС, прочностью материала пластины и ее толщиной. Движение пластины под углом к КС навстречу или вдогон КС вновь приводит к ударному контакту края отверстия в пластине с боковой поверхностью следующего элемента КС, в результате чего элемент КС частично (или полностью) срабатывается, получает боковой импульс и смещается в поперечном направлении, а в пластине вновь формируется эллиптическое отверстие с большим, чем КС, диаметром. В последующие моменты времени процесс повторяется, в результате чего КС получает периодические, нарастающие со временем поперечные возмущения.

Описанный процесс подтверждается рентгенограммами процесса взаимодействия КС с ДЗ. На рис. 1 приведены рентгенограммы процессов взаимодействия КС с элементами ДЗ, расположенными под углом 30° к направлению воздействия КС. Элементы ДЗ состояли из

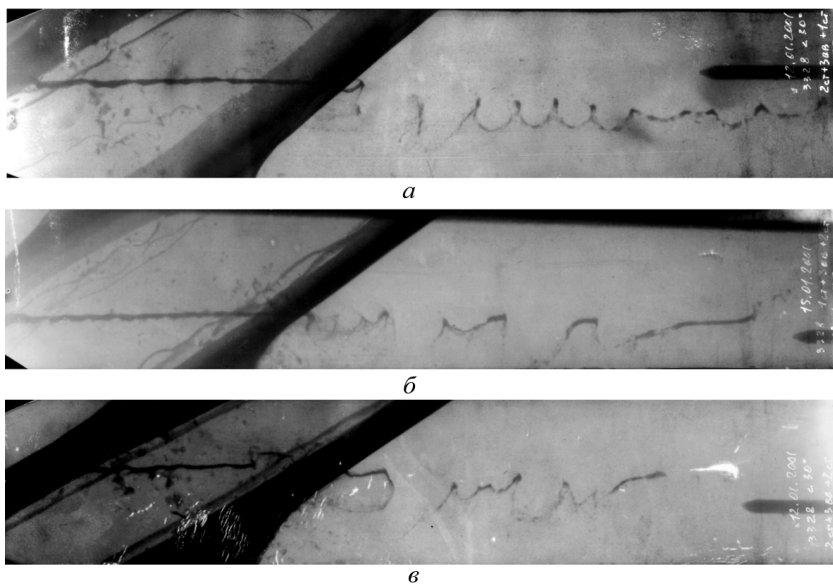


Рис. 1. Рентгенограммы взаимодействия медных КС с элементами ДЗ:

а — толщина лицевой пластины 2 мм, тыльной — 1 мм, репер установлен на расстоянии 190 мм от элемента ДЗ; *б* — толщина лицевой пластины 1 мм, тыльной — 2 мм, репер установлен на расстоянии 220 мм от элемента; *в* — толщина лицевой и тыльной пластин 2 мм, репер установлен на расстоянии 180 мм от элемента; толщина слоя ВВ 3 мм; угол между КС и элементом ДЗ 30°

двух стальных пластин из малоуглеродистой стали, между которыми размещался слой ВВ из эластичного взрывчатого состава на основе ТЭНа толщиной 3 мм. Толщина пластин в разных опытах составляла 1 и 2 мм. В качестве кумулятивных зарядов использовались лабораторные заряды из флегматизированного гексогена плотностью $1,65 \text{ г/см}^3$ диаметром 56 мм с медной конической облицовкой с углом раствора конуса 50° . Глубина пробития преграды из однородной броневой стали этими кумулятивными зарядами при их установке на расстоянии 150 мм от преграды составляла $238 \pm 13 \text{ мм}$, скорость головных элементов КС равнялась $8000 \pm 250 \text{ м/с}$, диаметр головных элементов полностью вытянутой КС составлял $1,9 \pm 0,1 \text{ мм}$. Как следует из рентгенограмм, состояние КС после прохождения элемента ДЗ зависит от толщины пластин и порядка их расположения и свидетельствует о периодическом взаимодействии КС с пластинами.

Исходя из того, что пластины ДЗ разлетаются в противоположных направлениях, можно было ожидать, что их воздействие будет создавать в КС поперечные возмущения в противоположных направлениях. Однако большинство рентгенограмм процесса взаимодействия КС с ДЗ показывают, что после прохождения ДЗ в КС имеются возмущения лишь от действия тыльной пластины (см. рис. 1).

М. Хельд объяснял этот эффект своеобразным фильтрующим действием тыльной пластины [6]. Его объяснение становится понятным

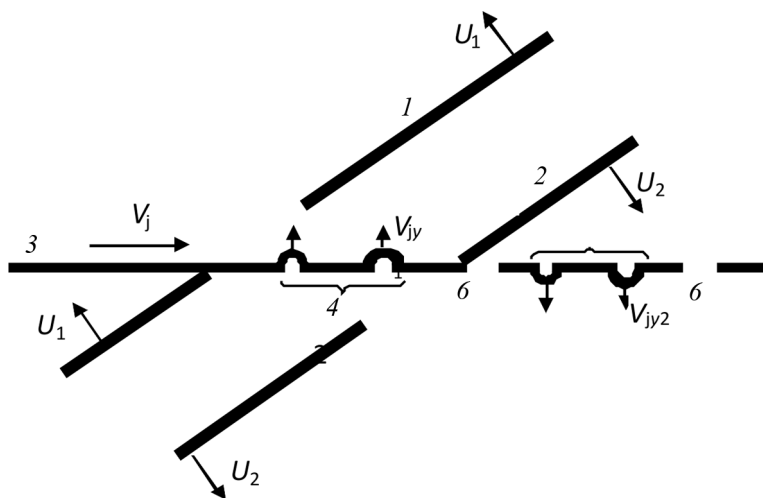


Рис. 2. Прохождение кумулятивной струи через разлетающиеся пластины ДЗ по Хельду [6]:

1, 2 — лицевая и тыльная пластины ДЗ; 3 — КС; 4 — поперечные возмущения в КС, образовавшиеся в результате воздействия лицевой пластины; 5 — поперечные возмущения в КС, образовавшиеся в результате воздействия тыльной пластины; 6 — разрывы КС, образовавшиеся в результате срезания тыльной пластиной возмущений в КС от воздействия лицевой пластины

из рис. 2. Поперечные возмущения КС, образованные в процессе взаимодействия с лицевой пластиной, срезаются при пересечении тыльной пластины, и на выходе из устройства ДЗ остаются только поперечные возмущения одного направления, образованные в результате взаимодействия КС с тыльной пластиной. Если это так, то воздействие на КС лицевой пластины частично уменьшает эффективность действия тыльной пластины, поскольку приводит к дополнительному расходованию ее материала на срезание поперечных возмущений в КС от воздействия лицевой пластины.

Однако при внимательном анализе рентгенограмм предложенный М. Хельдом механизм фильтрующего действия тыльной пластины не находит подтверждения, поскольку при прохождении высокоскоростной части КС через лицевую пластину в КС не обнаруживается развитых поперечных возмущений не только на наших рентгенограммах (см. рис. 1), но и на рентгенограмме, приведенной в его статье [6], и на протонограмме, приведенной в работе [7]. Чтобы понять этот эффект, необходимо проанализировать динамику взаимодействия КС с лицевой и тыльной пластинами ДЗ. Будем исходить из того, что при взаимодействии КС с пластинами ей передаются только перпендикулярные к КС составляющие импульса тех участков пластин, которые претерпели взаимодействие с КС.

Пусть на элемент КС, имеющий диаметр d_j и скорость v_j , оказывает действие пластина ДЗ, имеющая толщину δ_i (i — номер пластины,

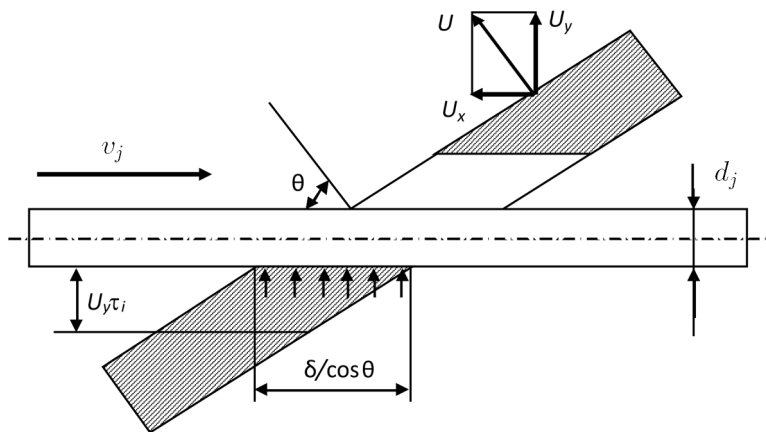


Рис. 3. Схема взаимодействия элемента КС с лицевой пластиной ДЗ

$i = 1$ — лицевая пластина, $i = 2$ — тыльная пластина). Обозначим через θ угол между КС и нормалью к поверхности пластины. Будем также считать, что вектор скорости пластины U направлен по нормали к поверхности пластины. Возможная схема взаимодействия КС с пластиной приведена на рис. 3.

Направим ось X вдоль, а ось Y перпендикулярно КС. Тогда составляющие скорости пластины вдоль КС U_x и перпендикулярная ей U_y по модулю будут равны: $U_x = U \cos \theta$, $U_y = U \sin \theta$. Обозначим через τ характерное время взаимодействия элемента КС с пластиной. В качестве τ можно принять, например, время двойного пробега волны сжатия по поперечному сечению КС $\tau = 2d_j/c_j$ (c_j — скорость звука в материале КС) или же время нахождения элемента КС в контакте с пластиной

$$\tau_i = \frac{\delta}{v_{ji} \cos \theta},$$

где $v_{ji} = v_j - (-1)^i \frac{U}{\cos \theta}$ — фазовая скорость перемещения вдоль КС поверхности контакта КС с пластиной. За время τ_i в поперечном направлении со струей вступит во взаимодействие участок пластины (см. рис. 3) высотой $U_y \tau_i$, длиной $\delta / \cos \theta$ и шириной κd_j , где κ — коэффициент, учитывающий увеличение диаметра КС в процессе взаимодействия. Перпендикулярная к КС составляющая импульса I_{yi} этого участка пластины может быть определена с помощью соотношения

$$I_{yi} = \rho_{\text{пл}} \kappa d_j \frac{\delta}{\cos \theta} U_y \tau_i U_y,$$

где $\rho_{\text{пл}}$ — плотность материала пластины. Следует отметить, что для симметричного элемента динамической защиты ($U_1 = U_2$) поперечные импульсы, передаваемые КС лицевой и тыльной пластинами, равны по модулю $I_{y1} = I_{y2}$ и противоположны по направлению. Но массы

элементов КС m_{ji} , воспринимающие этот импульс, зависят от того, какая пластина ДЗ — лицевая или тыльная воздействует на КС. Действительно, для m_{ji} имеем следующее соотношение:

$$m_{ji} = \rho_j \frac{\pi d_j^2}{4} v_{ji} \tau_i,$$

где ρ_j — плотность материала КС. Поскольку $v_{j1} > v_{j2}$, то с лицевой пластиной взаимодействует элемент КС большей массы, а следовательно, и большей длины, чем с тыльной, т.е. $m_{j1} > m_{j2}$.

В результате поглощения импульса I_{yi} элемент КС приобретет поперечную скорость v_{jyi} , равную

$$v_{jyi} = \frac{I_{yi}}{m_{ji}} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_j} \frac{\kappa \delta_i}{d_j \cos \theta} \frac{U_{yi}^2}{V_{ji}}.$$

Поскольку $m_{j1} > m_{j2}$, то при взаимодействии с симметричным элементом ДЗ $I_{y1} = I_{y2}$ поперечная скорость v_{jy1} , приобретаемая элементом КС при взаимодействии с лицевой пластиной, будет меньше поперечной скорости v_{jy2} , приобретаемой элементом КС при взаимодействии с тыльной пластиной. Чтобы сделать вывод о характере взаимодействия КС с пластинами ДЗ, необходимо сравнить поперечные скорости элементов КС v_{jyi} с нормальными к КС составляющими скоростей пластин U_{yi} . Если $U_{yi} \geq v_{jyi}$, то реализуется непрерывное взаимодействие пластины с КС. Если же $v_{jyi} > U_{yi}$, то в КС будут формироваться периодические поперечные возмущения, приводящие к потере контакта КС с пластиной, вследствие чего само взаимодействие будет иметь также периодический характер.

Такие же выводы можно сделать, анализируя отношение скоростей:

$$\omega_i = \frac{v_{jyi}}{U_{yi}} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_j} \frac{\kappa \delta_i}{d_j \cos \theta} \frac{U_{yi}}{V_{ji}} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_j} \frac{\kappa \delta}{d_j} \frac{U_i}{v_{ji}} \operatorname{tg} \theta.$$

Если $\omega_i > 1$, то элемент КС отскакивает от пластины и в КС образуется характерный поперечный волнообразный изгиб. При $\omega_i \leq 1$, наоборот, реализуется непрерывное взаимодействие КС с пластиной со срабатыванием и отклонением КС. Равенству $\omega_i = 1$ соответствует следующее соотношение между скоростью КС v_j , скоростью пластины U_i и характеристиками элемента КС и ДЗ и углом θ :

$$\frac{v_j}{U_i} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_j} \frac{\kappa \delta_i}{d_j} \operatorname{tg} \theta + \frac{(-1)^i}{\cos \theta}.$$

Представляет интерес количественный анализ этого соотношения для следующих значений входящих в него постоянных: $\rho_{\text{пл}} = 7,8 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\rho_j = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\theta = 60^\circ$; $\kappa = 1,2$. При этих значениях постоянных соотношение принимает вид следующих линейных зависимостей:

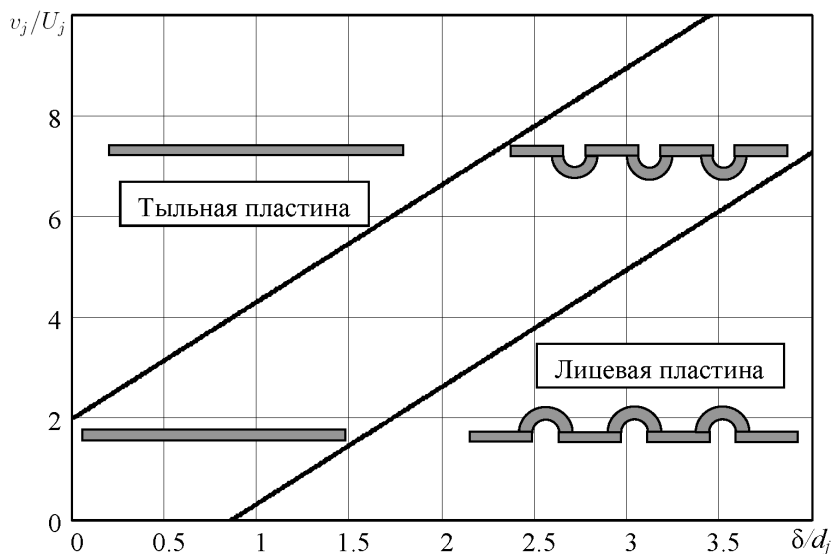


Рис. 4. Области параметров, при которых проникание КС через пластины ДЗ происходит в стационарном и нестационарном режимах

$$\frac{v_j}{U_i} = 2,32 \frac{\delta_i}{d_j} \pm 2,$$

где знак “+” берется для тыльной пластины, а знак “—” — для лицевой пластины. Соответствующие графические зависимости приведены на рис. 4. Области над прямыми соответствуют стационарным режимам проникания КС через пластины ДЗ, а области под прямыми — нестационарным. Видно, что через лицевые пластины толщиной $\delta_1 = (1,5-2)d_j$ КС практически полностью проникают в стационарном режиме, в то время, как через тыльные пластины ДЗ такой же толщины в непрерывном режиме проникает только высокоскоростная часть КС.

Таким образом, схема прохождения основной части КС через разлетающиеся пластины ДЗ принимает вид, представленный на рис. 5. Взаимодействие основной части КС с лицевой пластиной имеет непрерывный характер и приводит к некоторому уменьшению ее диаметра (срабатыванию в поперечном направлении) и отклонению на небольшой угол α . Взаимодействие КС с тыльной пластиной имеет нестационарный дискретный характер и формирует в КС поперечные возмущения, которые, развиваясь, приводят к ее искривлению и последующему разрушению.

Соотношения для определения угла отклонения КС α и уменьшения диаметра КС можно найти в работе [1]. Если предположить, что в процессе взаимодействия КС с лицевой пластиной изменяется толь-

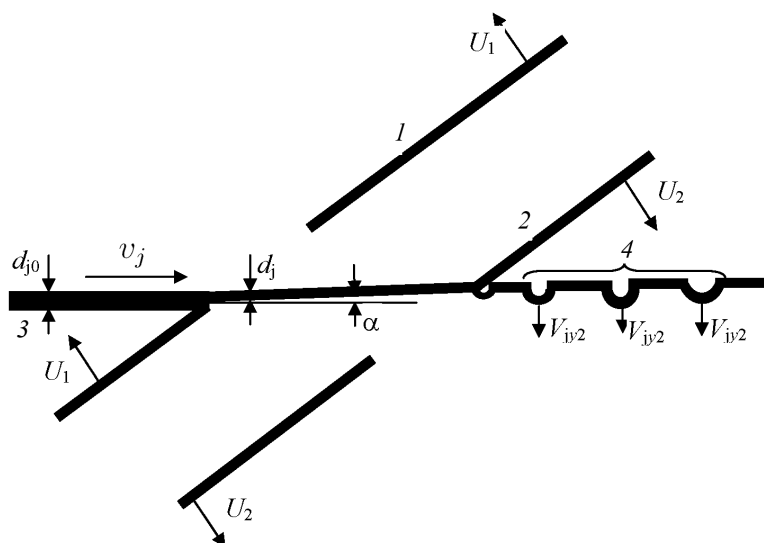


Рис. 5. Схема прохождения КС через разлетающиеся пластины ДЗ:
1, 2 — лицевая и тыльная пластины ДЗ; 3 — КС; 4 — поперечные возмущения в КС, образовавшиеся в результате воздействия тыльной пластины

ко поперечная составляющая импульса КС, то для оценки угла α не представляет труда получить следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_{y1}}{m_{j1} v_j} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_j} \frac{\kappa \delta_1 \sin^2 \theta}{d_j \cos \theta} \left[\frac{v_j}{U_1} \left(\frac{v_j}{U_1} + \frac{1}{\cos \theta} \right) \right]^{-1}.$$

Количественный анализ этой зависимости (рис. 6, а) показывает, что в типовых условиях взаимодействия КС с лицевой пластиной угол α изменяется в диапазоне $1 \dots 6^\circ$.

Интересно отметить, что зависимость угла отклонения КС α от угла наклона элемента ДЗ θ не является монотонной (рис. 6, б). При выбранных параметрах взаимодействия α достигает максимума при α , град

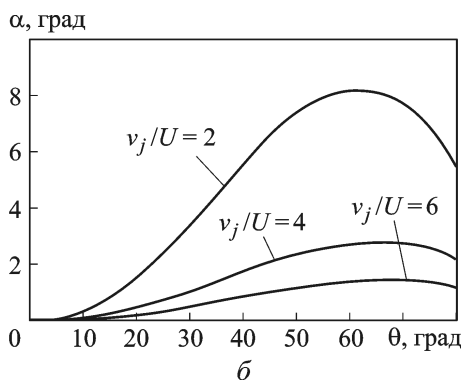
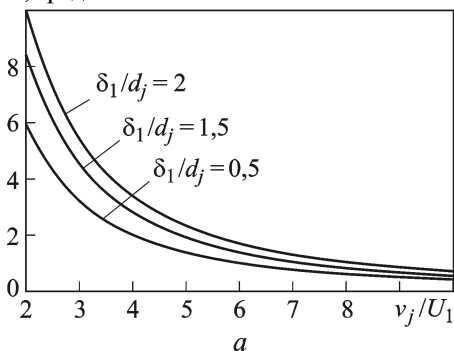


Рис. 6. Зависимость угла отклонения медной КС лицевой стальной пластиной ДЗ от условий взаимодействия при $\theta = 60^\circ$ (а) и при $\delta/d_j = 1$ от угла наклона θ элемента ДЗ к КС (б)

$\theta = 60^\circ \dots 70^\circ$. Такой характер поведения зависимости $\alpha(\theta)$ обусловлен тем, что при увеличении θ возрастает не только импульс пластины, передаваемый элементу КС, но и масса этого элемента КС.

При нестационарном взаимодействии КС с тыльной пластиной ДЗ в КС формируются поперечные волны. Для описания эволюции этих волн необходимо задаться механической моделью КС. Будем считать КС струной, находящейся в пластическом состоянии, т.е. растянутой постоянной силой $T = \sigma_{\text{тд}} s$, где $\sigma_{\text{тд}}$ — динамический предел текучести материала КС, s — площадь поперечного сечения КС. В КС возможно распространение двух типов волн: продольных со скоростью $c = \sqrt{\frac{1}{\rho_j} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}}$ и поперечных со скоростью $b = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{тд}}}{\rho_j(1 + \varepsilon)}}$ (ε — продольная деформация КС перед фронтом поперечной волны) [8, 9]. При хорошо выраженной площадке текучести $d\sigma/d\varepsilon \rightarrow 0$, что характерно, например, для меди, и скорость продольных волн в КС может быть мала. Оценка скорости поперечных волн дает величину $b \approx 100$ м/с. Поэтому возникающие в КС поперечные волны локализованы, а их развитие приводит к быстрому разрушению деформированных участков КС.

Выводы. 1. На основе анализа процесса взаимодействия КС с движущимися пластинами ДЗ оценено значение бокового импульса, передаваемого КС смещающимися под углом пластинами. Основной особенностью взаимодействия КС с ДЗ является то, что за один и тот же промежуток времени с лицевой пластиной взаимодействует элемент КС большей длины, чем с тыльной.

2. Поскольку поперечная скорость, сообщаемая КС при взаимодействии с лицевой пластиной, меньше перпендикулярной к КС составляющей скорости пластины, то взаимодействие основной части КС с лицевой пластиной имеет непрерывный характер и приводит к срабатыванию КС в поперечном направлении (уменьшению диаметра КС) и отклонению на небольшой угол α .

3. При взаимодействии КС с тыльной пластиной приобретаемая КС поперечная скорость превосходит перпендикулярную к КС составляющую скорости пластины, вследствие чего КС периодически отскакивает от пластины и взаимодействие КС с тыльной пластиной имеет нестационарный дискретный характер и формирует в КС поперечные возмущения, которые, развиваясь, приводят к ее искривлению и последующему разрушению.

4. Возникающие в КС поперечные возмущения можно рассматривать как поперечные волны в струне, находящейся в пластическом состоянии. В связи с невысокой скоростью их распространения

(~ 100 м/с) эти волны локализованы, а их развитие приводит к быстрому разрушению деформированных участков КС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Частные* вопросы конечной баллистики / В.А. Григорян, Н.С. Дорохов, И.Ф. Кобылкин и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 592 с.
2. *Войцеховский Б.В., Истомин В.Л.* Динамическая антикумулятивная защита // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 87–90.
3. *Mayseless M., Erlich Y., Falcovitz Y., Weihs D., Rosenberg G.* Interaction of shaped charge jets with reactive armor // Proc. of The 8th Int. Symp. on Ballistics. Orlando, Florida. 1984, pp. 5–20.
4. *Кобылкин И.Ф., Григорян В.А., Дорохов Н.С., Ротоматов Д.А.* Проникание кумулятивных струй через взрывную динамическую защиту // Оборонная техника. 2002. № 11. С. 35–45.
5. *Физика взрыва: в 2 т.* / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др.; ред. Орленко Л.П. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
6. *Held M.* Defeating mechanisms of reactive armour sandwiches // Proc. 22nd Intern. Bal. Symp. Vancouver, Canada, 2005.
7. *Исследование* кумулятивных зарядов методом импульсной протонографии / О.В. Свирский, В.В. Бурцев, М.А. Власова и др. // Труды междунар. конф. “ХП Харитоновские научные чтения. Экстремальное состояние вещества. Деформация. Ударные волны”. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011. С. 624–636.
8. *Сагомонян А.Я.* Волны напряжения в сплошных средах. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1985. 416 с.
9. *Прочность* и разрушение при кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматуллин, Е.И. Шемякин, Ю.А. Демьянов, А.В. Звягин. М.: Университетская книга; Логос. 2008. 624 с.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012