

## МЕХАНИКА

УДК: 531.66; 539.3

**В.А. Горельский, В.Ф. Толкачев, А.А. Ящук**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НУТАЦИИ НА ПРОНИКАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ<sup>1</sup>**

В работе представлены результаты, доложенные на научном семинаре, посвященном 100-летию со дня рождения П.П. Куфарова. Результаты получены в ходе экспериментального исследования и численного моделирования высокоскоростного взаимодействия стержневых ударников с преградами при различных углах нутации. Эксперименты проводились на баллистических стендах при скоростях метания ударников до 2 км/с. При численном моделировании процессов ударного взаимодействия использована физико-математическая модель, которая описывается сжимаемой упругопластической средой с учетом развития и эволюции микроповреждений при динамических нагрузках

**Ключевые слова:** ударник, преграда, высокоскоростное соударение, деформация, разрушение, физический эксперимент, математическое моделирование.

Для обеспечения нормального подхода ударника к преграде, когда его ось совпадает с вектором скорости, применяются различные устройства стабилизации, которые на практике должны обеспечивать отклонение вектора скорости от продольной оси, не превышающее величину  $3 - 5^\circ$ . Однако существует ряд практических задач, например, защита технических средств от поражения различными ударно-взрывными устройствами, в том числе средствами, формирующими поток высокоскоростных ударников направленного действия, а также защита космических и летательных аппаратов от метеорных тел и техногенного мусора в условиях, когда ударники подлетают к объекту хаотично. Важную роль в этих условиях приобретают исследования, направленные на установление влияния угла нутации (угла между вектором скорости и продольной осью ударника) на интегральные параметры проникания и предельную толщину пробития комбинированных преград, необходимые для прогнозирования последствий воздействия ударников на конкретные конструкции.

Трудности исследования процессов высокоскоростного взаимодействия ударников с преградами при широком варьировании углов нутации заключаются в сложности регистрации динамики и эволюции процесса и в анализе результатов физического эксперимента применительно к смене механизмов разрушения преград. Компьютерное моделирование таких сложных явлений должно проводиться в трехмерной пространственной постановке, а это создает значительные трудно-

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом РФФИ (07-08-00759-а).

сти вычислительного характера. Кроме того, данная проблема связана с явлениями потери динамической устойчивости стержневых ударников в процессе проникания, которая особенно ярко проявляется в условиях соударения стержней с преградами при углах нутации.

Как показывает анализ экспериментальных данных, при торцевом ударе глубина проникания характеризуется скоростью взаимодействия и длиной ударника, а при боковом ударе (удар плашмя) степень разрушения преграды определяется ударно-волновыми параметрами и в большей степени – откольными разрушениями. Проникающая способность ударников при промежуточных углах нутации должна находиться между этими двумя предельными состояниями, поэтому необходимо учитывать одновременное протекание нескольких механизмов разрушения и их взаимодействие.

Физическое моделирование взаимодействия ударников с преградами при различных углах нутации проводилось по отработанным методикам метания ударников на баллистическом стенде при несимметричном отделении сегментов поддона специальной конструкции, которые обеспечивали варьирование углов нутации при подлете к преграде от  $0^\circ$  (торцевой удар) до  $90^\circ$  (удар плашмя). Угол нутации ударника у преграды регистрировался методом ортогональной рентгеноимпульсной съемки и рассчитывался по разработанным методикам. Характерные рентгенограммы пространственного положения ударника у преграды в начальный момент соударения приведены на рис. 1. В опытах регистрировались глубина кратеров, размеры зоны деформации и разрушения в преградах, размеры и форма остатков ударников после взаимодействия, углы и координаты сколов ударника и другие параметры. В эксперименте использовались цилиндрические стержни из сплавов алюминия, стали 60С2А и сплава ВНЖ-90 (вольфрам – никель – железо). Преграды – диски либо пластины из различных сплавов алюминия и стали.

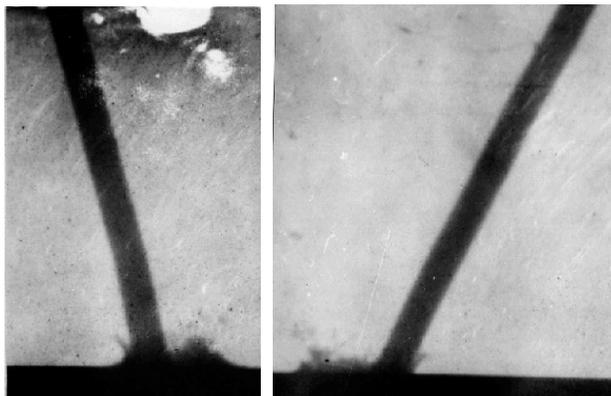


Рис. 1. Рентгенограммы регистрации угла нутации в двух ортогональных плоскостях при подходе стержня к преграде

Анализ экспериментальных данных проведенных исследований показывает, что с изменением параметров ударника, расстояния между пластинами (разнесения) и очередности расположения пластин в слоисто-разнесенной конструкции существенно меняются механизмы разрушения. Итоговое повреждение отдельной преграды определяется комбинацией нескольких механизмов разрушения, растянутых в пространстве и во времени. Смена механизмов разрушения прослежива-

ется в алюминиевой пластине толщиной 20 мм при ударе алюминиевым ударником диаметром 16 мм и высотой 38 мм с постоянной скоростью  $V_0 = 970$  м/с под разными углами нутации. В случае торцевого удара ( $\alpha = 0^\circ$ ) наблюдается сквозное пробитие пластины. Об этом свидетельствует приведенная на рис. 2 (вверху) рентгенограмма динамики отделения диска от пластины, а также уловленные в эксперименте за пластиной деформированный в головной части ударник и отделившийся от тыльной поверхности пластины диск, рис. 2 (внизу). Из результатов физического эксперимента скорость ударника и диска за пластиной составила около 200 м/с. С повышением скорости взаимодействия картина разрушения преград осложняется лицевыми и тыльными отколами. В настоящее время при моделировании явления разрушения пластин под действием ударника при торцевом ударе полагают, что механизм перфорации пластин заключается в распространении кольцевой зоны адиабатического сдвига от лицевой поверхности к тыльной, приводящей к потере прочности материала по периметру ударника по всей толщине пластины и к последующему отделению диска с тыльной стороны пластины [1].

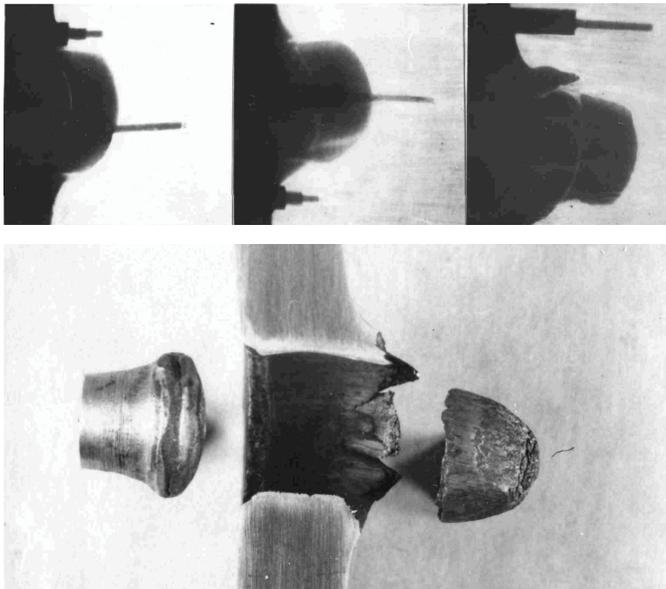


Рис. 2. Рентгенограммы динамики отделения диска от преграды при ударно-волновом взаимодействии (вверху) и уловленный ударник, разрез пластины и образованный диск вследствие перфорации пластины (внизу)

В случае удара с промежуточным углом нутации повреждения вблизи тыльной поверхности пластины характеризуется различной степенью развития, проявляющейся либо в сквозном пробитии преграды либо в отсутствии пробоя. Так, при угле нутации  $\alpha_n = 40^\circ$  сквозное пробитие пластины отсутствует, ударник впрессован в нее (рис. 3, а). На тыльной поверхности пластины формируется сдвиговая полукруговая трещина под деформированной головной частью ударника. При ударе под углом  $\alpha_n = 90^\circ$  (удар плашмя) процесс пластического деформирования материалов протекает на лицевой поверхности пластины, формируется кратер

овальной формы глубиной 7 – 8 мм (рис. 3, б), а на тыльной поверхности преграды наблюдается лишь слабое выпучивание.

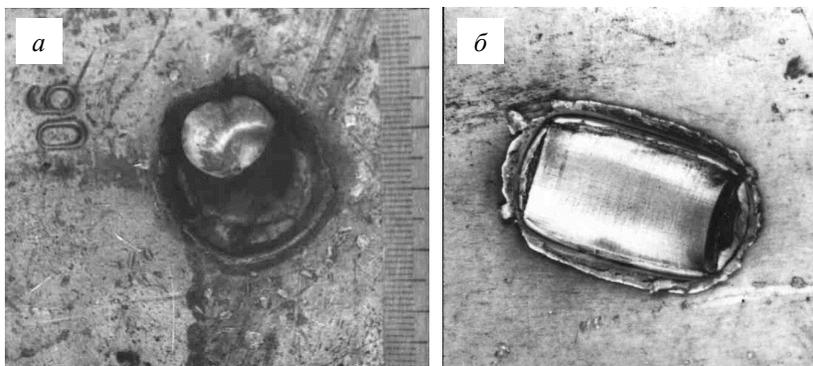


Рис. 3. Внедрение ударника в плиту под углом нутации  $40^\circ$  (а) и под углом нутации  $90^\circ$  (б)

Проведены параметрические исследования и установлены зависимости глубины проникания в толстые стальные преграды различной твердости ударников из стали 60С2А диаметром 6,7 мм и длиной 134 мм, закаленных до твердости HRC 53...55. Результаты исследований представлены на рис. 4 в виде зависимости относительной глубины кратера от угла нутации при скоростях удара  $V_0 = 780$  м/с – кривая 1, и  $V_0 = 1040$  м/с – кривая 2. При малых скоростях удара характерно линейное уменьшение глубины проникания с увеличением угла нутации и нелинейный прирост с увеличением скорости удара. Зависимости относительной глубины кратера в преградах из высокопрочной стали (НВ 300...320) от угла нутации для ударников из стали 60С2А ( $l_0 = 85$  мм,  $d_0 = 6,7$  мм) и из сплава ВНЖ-90 ( $l_0 = 60$  мм,  $d_0 = 6$  мм) при скоростях удара  $V_0 = 1950 \pm 50$  м/с, представленные на рисунке кривыми 3 и 4 соответственно, отражают характерное резкое уменьшение глубины кратеров при углах нутации от 0 до  $50^\circ$  от нормали и слабое изменение при больших углах нутации.

Резкое уменьшение глубины кратера с увеличением угла нутации обусловлено потерей динамической устойчивости стержней. В опытах, судя по кратерам в преграде и уловленным осколкам ударников, наблюдается потеря их динамической устойчивости в процессе проникания, что приводит к разрушению ударника по типу среза (скола) в нескольких сечениях в плоскости вектора скорости, рис. 5, а. Такое разрушение характерно для стержней из материалов с высокой

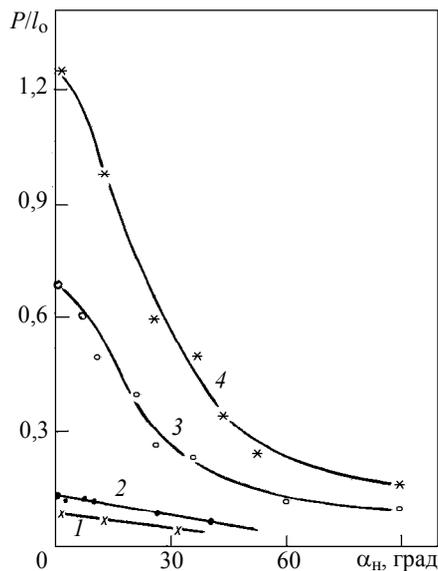


Рис. 4. Зависимости глубины проникания ударников в стальные преграды от угла нутации

прочностью, для стали с твердостью HRC 55...60. При ударе осколков стержня по преграде образуется серия дополнительных кратеров, глубина которых может быть сравнима с глубиной основного кратера. Процесс разрушения стержней характерен для углов нутации 30...60° и при скоростях встречи порядка 1000 м/с. Для стержней из более пластичных материалов (сталь HRC 26...28) потеря устойчивости проявляется в интенсивном изгибе, характерный вид которого иллюстрирует фотография, приведенная на рис. 5, б. Результаты измерений линейных размеров кратера в плоскости лицевой поверхности свидетельствует о росте продольного размера с увеличением угла нутации и в первом приближении его можно аппроксимировать зависимостью  $l_{кр} = l_0 \cos \alpha$ , в то время как поперечный размер кратера изменяется незначительно, в пределах 1...2 диаметров ударника.

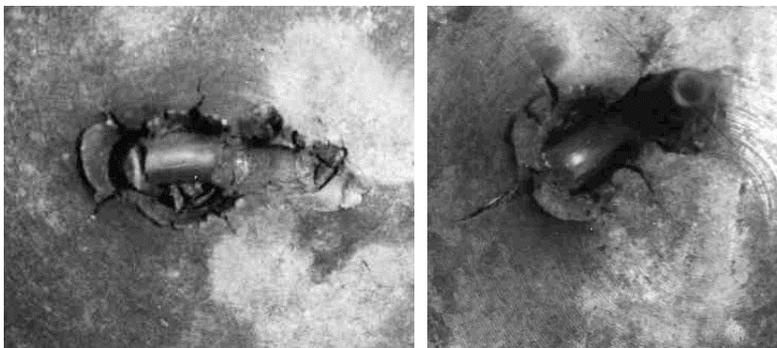


Рис. 5. Фотографии, характерные при сколе (а) и изгибе (б) стержней в процессе взаимодействия со стальной преградой при подходе с различным углом нутации

Проведено математическое моделирование высокоскоростного взаимодействия нутящих удлинённых ударников с преградами в трехмерной постановке. В расчетах ударного взаимодействия использована модель повреждаемой среды, характеризующаяся наличием микрополостей (пор, трещин) [2]. Общий объем среды  $W$  составляют неповрежденная часть среды, занимающая объем  $W_c$  и характеризующаяся плотностью  $\rho_c$ , и микрополости, занимающие объем  $W_f$ , в которых плотность полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением  $\rho = \rho_c (W_c/W)$ . Система уравнений, описывающая как при упругом, так и при пластическом деформировании нестационарные адиабатические движения сжимаемой среды с учетом развития и накопления микроповреждений, состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии и изменения удельного объема трещин:

$$\partial \rho / \partial t + \text{div}(\rho v) = 0; \tag{1}$$

$$\rho dv_i / dt = \sigma_{ij,j}; \tag{2}$$

$$dE / dt = (1/\rho) \sigma_{ij} \epsilon_{ij}; \tag{3}$$

$$\frac{dV_T}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{при } |P_c| \leq P^* \text{ или } P_c > P^* \text{ и } V_T = 0 \\ -\text{sgn}(P_c) K_4 (|P_c| - P^*) (V_2 + V_T) & \\ \text{при } P_c < -P^* \text{ или } P_c > P^* \text{ и } V_T > 0, & \end{cases} \tag{4}$$

где  $p^* = p_k V_1 / (V_1 + V_T)$ ,  $\rho$  – плотность,  $v_i$  – компоненты вектора скорости,  $E$  – удельная внутренняя энергия,  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций,  $\sigma_{ij} = -(P + Q)\delta_{ij} + S_{ij}$  – компоненты тензора напряжений,  $S_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений,  $P_c$  – давление в сплошной компоненте вещества,  $P = P_c(\rho/\rho_c)$  – среднее давление,  $Q$  – искусственная вязкость,  $V_1, V_2, P_k, K_4$  – экспериментально определяемые константы материала. В формулах для произведения тензоров, записанных в индексной форме, предполагается суммирование по повторяющимся индексам.

Моделирование разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа, определяющей рост микротрещин, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений. Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема, удельной внутренней энергии, удельного объема трещин и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми – Грюнайзена по формуле

$$P_- = \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0/2 + 2(b-1)] \mu^2 + \rho_0 a^2 [2(1 - \gamma_0/2)(b-1) + 3(b-1)^2] \mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E, \quad (5)$$

$$\mu = V_0 / (V - V_T) - 1,$$

где  $\gamma_0$  – коэффициент Грюнайзена,  $V_0$  и  $V$  – начальный и текущий удельные объемы,  $a$  и  $b$  – константы из адиабаты Гюгонио, описываемой линейным соотношением  $D = a + b u_m$ , где  $D$  – скорость ударной волны,  $u_m$  – массовая скорость вещества за фронтом ударной волны.

Девиаторные составляющие тензора напряжений находятся из соотношения

$$2G \left( \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) = \frac{dS_{ij}^0}{dt} + \lambda S_{ij}, \quad (6)$$

где  $dS_{ij}^0/dt$  – производная по Яуманну, определяемая формулой:

$$\frac{dS_{ij}^0}{dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik} W_{jk} - S_{jk} W_{ik}, \quad (7)$$

причем  $2W_{ij} = \partial v_i / \partial x_j - \partial v_j / \partial x_i$ .

Параметр  $\lambda$  тождественно равен 0 при упругой деформации, а при наличии пластической – определяется с помощью условия текучести Мизеса:

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma^2. \quad (8)$$

В приведенных выше формулах  $G$  – модуль сдвига,  $\sigma$  – динамический предел текучести, которые определяются через константы согласно экспериментальным данным. Численное решение трехмерных задач проводилось методом конечных элементов [3, 4].

Для выявления особенностей разрушения и температурных эффектов при ударе нутирующими ударниками численно моделировалось взаимодействие стального цилиндра диаметром 5,7 мм и высотой 85 мм со стальной пластиной толщиной 60 мм. Преграда из стали имела параметры:  $\rho_0 = 7750$  кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma_0 = 1,01$  ГПа,  $G_0 = 81,8$  ГПа, а материал ударника характеризовался следующими параметрами:  $\rho_0 = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma_0 = 2,1$  ГПа,  $G_0 = 79$  ГПа. Вычисления выполнены

для углов нутации в диапазоне до  $30^\circ$ . На рис. 6 представлены конфигурации взаимодействующих тел при начальной скорости удара 1950 м/с при угле нутации  $30^\circ$  в различные моменты времени.

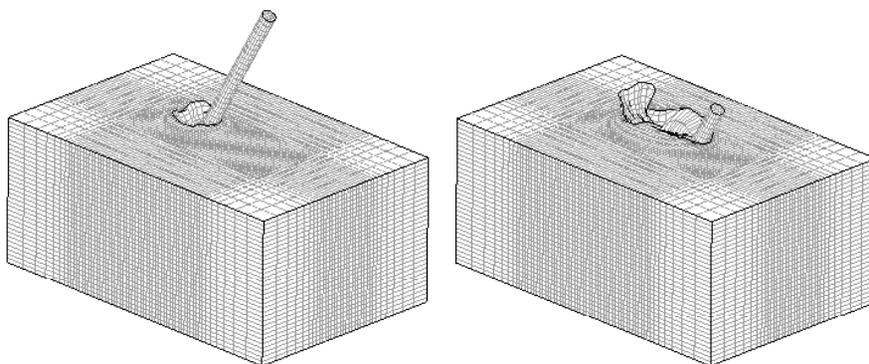


Рис. 6. Хронограммы процесса соударения в моменты времени 10 и 30 мкс при скорости удара 1950 м/с и нутации  $30^\circ$

Зависимости изменения относительной глубины проникания от времени приведены на рис. 7, а и иллюстрируют волновой характер процесса взаимодействия. Из расчетов следует, что на первой стадии значения средней скорости ударников при различных углах нутации падают примерно одинаково. Затем вызванное увеличением площади контактной поверхности дополнительное сопротивление внедрению при углах нутации  $15^\circ$  и  $30^\circ$  приводит к более быстрому падению средней скорости проникания ударников на второй стадии процесса, особенно при угле нутации  $30^\circ$ . Расчетная зависимость относительной глубины проникания от угла нутации представлена на рис. 7, б). Сравнение расчётных результатов с экспериментом показали удовлетворительное совпадение по глубине проникания для различных углов нутации.

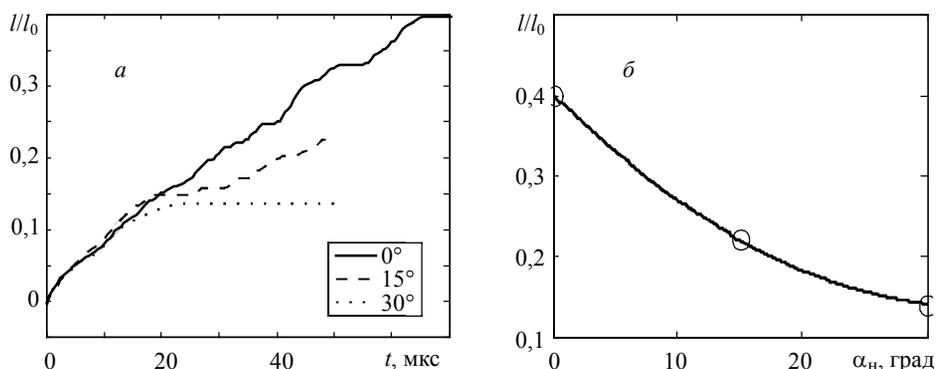


Рис. 7. Зависимость глубины проникания от времени для различных углов нутации (а) и от угла нутации (б)

Определенный интерес представляют исследования процесса разрушения преграды при больших углах нутации, особенно при ударе «плашмя», когда формируется цилиндрическая ударная волна, которая может вызвать мощное отколь-

ное разрушение как на лицевой, так и на тыльной поверхности преграды конечной толщины. На рис. 8 приведены фотографии разрушений на лицевой и тыльной поверхностях стальной плиты (НБ 320) толщиной 22 мм при ударе со скоростью  $V_0 = 1815$  м/с стальным стержнем диаметром  $d_0 = 7,9$  мм и длиной  $l_0 = 95$  мм.

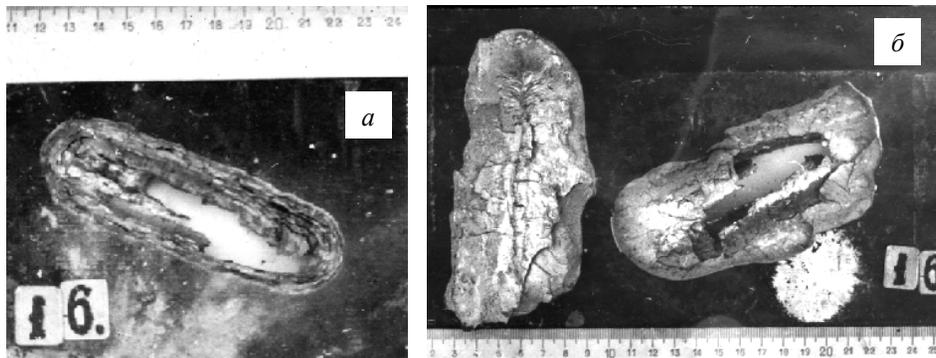


Рис. 8. Вид лицевой (а) и тыльной (б) поверхности стальной плиты толщиной 22 мм после удара стальным стержнем со скоростью  $V_0 = 1815$  м/с

Зона разрушения на лицевой поверхности плиты образуется за счет формирования неглубоких слоев лицевых отколов и представляет форму овала шириной 34 мм и длиной 108 мм (рис. 8, а). Откольное разрушение тыльной поверхности преграды завершается отделением откольного слоя шириной 55 мм, длиной 135 мм и толщиной 6...10 мм. Вид откольной тарелки представлен в левой стороне рис. 8, б. Данный эксперимент характерен предельными условиями разрушения: откольная тарелка после отделения от преграды имела минимальную скорость полета и при внедрении в алюминиевую пластину толщиной 6 мм она осталась в ней.

Проведено численное моделирование повреждаемости преград и построены распределения изолиний температуры и удельного объема трещин в плоскости симметрии преграды. В качестве ударника был взят медный цилиндр диаметром 0,55 см и высотой 0,75 см, преграда – стальная пластина толщиной 0,4 см. Особенности разрушения преграды и формирования в ней температурных полей иллюстрируют на рис. 9 распределения изолиний удельного объема трещин, измеренные в  $\text{см}^3/\text{кг}$ , удельной энергии сдвиговых деформаций в  $\text{кДж}/\text{кг}$  и температур  $T$  (К). для скорости удара 1000 м/с и соответствуют моментам времени 4, 8 и 10 мкс после начала взаимодействия. В момент времени 4 мкс наиболее значительные повреждения в преграде наблюдаются на ее тыльной поверхности напротив точки касания ударника с преградой, обусловленные как ударно-волновым фактором, так и деформационным воздействием ударника. В этот же момент времени на лицевой поверхности преграды разрушения наблюдаются только позади ударника, так как разрушения в других областях подавляются непосредственно внедряющимся ударником. В дальнейшем тыльный очаг разрушения увеличивается в размерах в направлении вектора движения и через некоторое время достигает срединных слоев материала преграды. Лицевой очаг разрушения позади ударника расширяется, смещается против направления движения и увеличивается в размерах, соединяясь с тыльным очагом. Для скорости удара 1000 м/с разрушения в других областях преграды незначительны во всем исследованном временном интервале процесса. Влияние деформационного фактора на характер разру-

нения преграды иллюстрируют изолинии удельной энергии сдвиговой деформации (рис. 9, б). Наиболее значительные деформации наблюдаются в узком интервале по толщине преграды. Распределения температуры практически повторяют распределения удельной энергии сдвиговых деформаций.

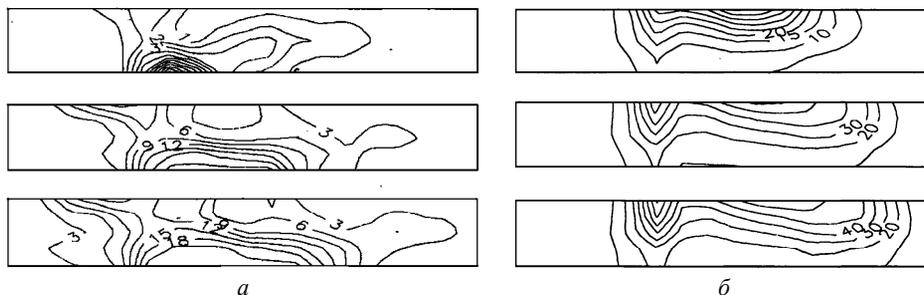


Рис. 9. Изолинии удельного объема трещин (а), удельной энергии сдвиговых деформаций (б) для сечения преграды в плоскости симметрии в моменты времени 4, 8 и 10 мкс

На рис. 10 температура представлена распределением на лицевой поверхности преграды в момент времени 8 мкс. Максимальные значения температуры наблюдаются в области контакта тел, в преграде максимальное значение температуры не превышает 600 К, а в ударнике из-за больших пластических деформаций значение температуры достигает 1200 К. Рост температуры ведет к падению прочностных характеристик материала, что в совокупности с вышеописанными явлениями на рис. 9 позволяет предсказать локализацию сквозного разрушения преграды в области, расположенной позади ударника.

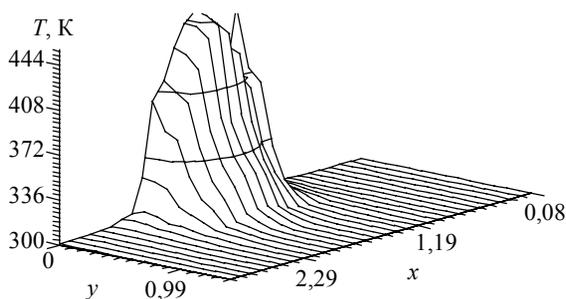


Рис. 10. Распределение температуры на лицевой поверхности преграды в момент времени 8 мкс (в),  $v_0 = 1000$  м/с

При более высокой скорости удара существенную роль в формировании зон разрушения в преграде играют ударно-волновые процессы. Вблизи тыльной поверхности преграды формируется обширная область откольного разрушения, а на лицевой поверхности возникают очаги разрушения – в момент контакта ударника с преградой и в последующие времена взаимодействия. Полученные численные результаты точно описывают особенности разрушения преград, наблюдавшиеся в эксперименте. Размерами тыльного откола при этом несколько больше лицевого. Особенностью рассматриваемого процесса является формирование очага повреждений в срединных слоях преграды, обусловленного интерференцией волн разре-

жения, возникающих вследствие ограниченных размеров преграды и ударника. Формирующиеся области высоких температур свидетельствуют об интенсивном деформировании лицевых слоев преграды и выступают основным фактором разогревания. Что же касается ударника, то расчеты показывают, что интенсивное пластическое деформирование и частичное разрушение свидетельствуют о том, что при высоких скоростях встречи большое влияние на характер разрушения оказывает фактор высоких температур, значительно ослабляющий прочностные характеристики материалов. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что и температурные эффекты и разрушения в ударнике и преграде ярко выражены при скоростях встречи 2000 м/с и выше и более выражены для угла нутации  $30^\circ$ .

Таким образом, в исследованиях установлено, что угол нутации ударника оказывает существенное влияние на его проникающую и пробивную эффективность, причем это влияние усиливается с увеличением угла нутации и скорости соударения. Глубина проникания стержневых ударников резко уменьшается с увеличением угла нутации в диапазоне  $0 \dots 50^\circ$  и характеризуется слабым изменением при увеличении углов нутации свыше  $50^\circ$ . При превышении предельных условий соударения, характерных при пробитии преград конечной толщины и вызывающих в них разрушения, формируются мощные лицевые и тыльные отколы, по массе значительно превосходящие массу ударника.

В результате численного моделирования выявлено, что и температурные эффекты и разрушения в ударнике и преграде ярко выражены при скоростях встречи выше 2000 м/с. Полученные результаты показали, что температурные эффекты в ударнике более выражены для угла нутации  $30^\circ$ . Зависимости глубин внедрения от времени показывают, что различия в характере этих кривых, вызванные нутацией, являются значительными при скорости 2000 м/с в исследованном диапазоне условий взаимодействия

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горельский В.А., Радченко А.В., Толкачев В.Ф., Хорев И.Е. Кинетические механизмы перфорации пластин // Проблемы прочности. 1988. № 11. С.77 – 80.
2. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Смолин А.Ю. Исследование влияния дискретизации при расчете методом конечных элементов трехмерных задач высокоскоростного удара // Журн. вычислит. математики и математической физики. 1997. Т. 37. № 6. С. 742 – 750.
3. Горельский В.А., Хорев И.Е. О применении метода конечных элементов для расчета больших деформаций и разрушения твердых тел // Труды I Всес. школы-семинара по многомерным задачам механики сплошных сред. ВИНИТИ: № 4623-83. 1989. 23 с.
4. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф. Исследование пробития преград при несимметричном высокоскоростном ударе с учетом разрушения и тепловых эффектов // Изв. РАН. МТТ. 1994. № 5. С. 121 – 130.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**ГОРЕЛЬСКИЙ Василий Алексеевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: vassili@niipmm.tsu.ru

**ТОЛКАЧЕВ Владимир Фомич** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: vtolk@niipmm.tsu.ru

**ЯЦУК Алексей Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: rainbow@niipmm.tsu.ru

Статья принята в печать 27.05.2009г.