

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЛАСТИНЫ НА ЕЕ ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПРИ СОУДАРЕНИИ С ДЛИННЫМ СТЕРЖНЕМ ПОД УГЛОМ

Хенхо Шин, Йо Хан Ю

Центр разработки наземных систем. Агентство оборонных исследований, П.Я. 35-1, Тэджон, 305-600, Республика Корея, yuh1@add.re.kr

Численно исследуется влияние скорости на защитные свойства стальной пластины при ее соударении с длинным стержнем из тяжелого вольфрамового сплава под углом 60° . Использована программа NET3D. Скорость пластины менялась в диапазоне $-0,5 \div 0,5$ км/с; отрицательное значение скорости соответствует ее полету в направлении движения ударника. Эффективность защиты, оцениваемая как остаточная кинетическая энергия ударника после пробития, возрастает по мере перехода от положительного к отрицательному значению скорости пластины как при обычной артиллерийской (1,5 км/с), так и при высокой (2,5 км/с) скорости удара. В рассмотренном диапазоне скоростей пластины защитные свойства наклонной пластины усиливаются при росте скорости удара. Исследованы механизмы взаимодействия ударника и пластины, определяющие данный результат. Полученные данные обсуждаются в связи с проблемами функционирования сенсорно-активируемой и активной брони.

Ключевые слова: летящая пластина, длинный стержень, косое соударение, программа NET3D.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и расчете многих типов брони большое внимание уделяется защитным свойствам наклонно летящей пластины с точки зрения ее воздействия на проникающий ударник. Физические явления, рассматриваемые при внедрении длинного стержня в неподвижную пластину под углом, включают рикошет, эрозию (разрушение), деформацию и поворот ударника. Проблема рикошета — пробивания изучалась экспериментально [1, 2], аналитически [3] и численно [2]. При этом установлено, что предельный угол рикошетирования, определяемый как угол между нормалью к пластине и траекторией ударника, увеличивается с ростом скорости удара. Было показано, что неподвижная наклонная пластина разрушает ударник сильнее при более высокой скорости удара, хотя проникающий остаток ударника разрушается при этом меньше [4]. Экспериментально подтверждено [5] вращение неразрушенной части ударника после пробивания. Все эти явления приводят к увеличению защитного эффекта наклонной пластины по сравнению с пробиваемой по нормали [6, 7]. Для

описания защитных свойств наклонной пластины разработан ряд аналитических моделей [8, 9].

Взаимодействие ударника с движущейся наклонной пластиной исследовалось значительно реже, хотя все перечисленные выше явления могут наблюдаться и в этом случае. В [10] численно изучался удар длинного стержня по наклонной пластине, движущейся по нормали к поверхности в сторону ударника. Результаты показывают, что увеличение скорости пластины не всегда приводит к росту бокового воздействия на остаток ударника. Случай, когда скорость пластины отрицательная, т. е. пластина движется в ту же сторону, что и ударник, в доступной литературе не рассматривался, хотя такой режим характерен для динамической защиты, при которой две пластины движутся в противоположных направлениях [11, 12].

С практической точки зрения для создания методики расчета наиболее эффективной системы защиты необходимо знать проникающую способность остатка ударника. Наиболее надежные данные дают эксперименты, но они дороги и не обеспечивают детальной информацией о процессе проникания. Численный расчет может дать то понимание явления, которое трудно получить из эксперимента. Цель данной работы — численное определение эффективной пробивающей способности остатка

Hyunho Shin, Yo-Han Yoo, Ground Systems Development Centre, Agency for Defence Development, P.O. Box 35-1, Yuseong, Daejeon, 305-600, Republic of Korea.

ударника по глубине кратера в массивной преграде, помещенной за пластиной, и анализ влияния скорости пластины. Рассмотрен диапазон скоростей пластины $-0,5 \div 0,5$ км/с при обычной артиллерийской (1,5 км/с) и высокой (2,5 км/с) скорости удара.

1. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Для расчетов применялась программа NET3D, использующая метод конечных элементов. Возможности кода описаны в [13, 14], его основные особенности обсуждаются ниже. При стандартной реализации метода для тетраэдральных конечных элементов использована предложенная в [15] смешанная формулировка основных соотношений в терминах «скорость — давление», в которой давление полагалось независимой переменной. В предположении постоянства модуля объемного сжатия определяющие уравнения принимают вид

$$\rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

где τ_{ij} — девиатор тензора напряжений, v_i — компоненты вектора скорости, ρ_0 — плотность, p — давление, c — объемная скорость звука.

Промежуточная скорость вычислялась по уравнению (1), из которого исключалось третье слагаемое, содержащее давление. Давление определялось из уравнения (2) с использованием промежуточной скорости, а окончательное значение скорости находили из (1) по рассчитанному давлению и промежуточной скорости [15, 16]. Скорость изменения напряжения рассчитывалась по Грину — Нагхди [17]. Полярное разложение и корректировка напряжения проводились по методу Тейлора — Фленнагана [18]. Использовались также алгоритмы [19] для определения пар контактирующих элементов и алгоритмы [20] для расчета сил контактного взаимодействия.

2. РАСЧЕТ

Так как в активной защите пластина ускоряется взрывом, то, вообще говоря, с ударником взаимодействует поворачивающаяся пластина. В данной работе рассматривается простейший случай невращающейся пластины, повернутой под углом 60° к траектории ударника, изготовленного из тяжелого вольфрамового

Таблица 1
Параметры расчетов

Серии расчетов	Варианты расчетов	V_{pn}^0 , км/с	V_{pl} , км/с
А	1	1,5	0,5
	2		0,2
	3		0
	4		-0,2
	5		-0,5
В	6	2,5	0,5
	7		0
	8		-0,5

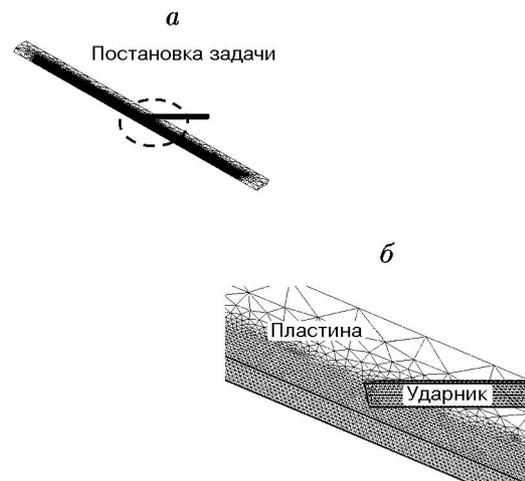


Рис. 1. Геометрия расчетной области (а) и разбиение на элементы (б)

сплава диаметром 5 мм и длиной 75 мм. Размеры стальной пластины: ширина 50, длина 300 и толщина 5 мм. В силу симметрии рассчитывалась половина области (рис. 1). Рассматривался удар как с нормальной артиллерийской скоростью $V_{pn}^0 = 1,5$ км/с, так и с высокой скоростью $V_{pn}^0 = 2,5$ км/с. В варианте $V_{pn}^0 = 1,5$ км/с (группа А) скорости пластины V_{pl} полагались равными $-0,5; -0,2; 0; 0,2$ и $0,5$ км/с, в варианте $V_{pn}^0 = 2,5$ км/с (группа В) $V_{pl} = -0,5; 0$ и $0,5$ км/с. Условия соударения представлены в табл. 1.

Для учета деформационно-скоростного упрочнения и термического разупрочнения использовалась модель Джонсона — Кука [21]:

Таблица 2

Параметры материалов для расчета по модели Джонсона — Кука

Элементы модельного эксперимента	Плотность, кг/м ³	A, ГПа	B, ГПа	n	C	m	T _{ref} , К	T _{melt} , К
Пластина	7870	0,75	1,15	0,49	0,014	1,0	293	1700
Ударник	17600	1,05	0,177	0,12	0,0275	1,0	293	1723

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right]. \quad (3)$$

Здесь σ — напряжение течения, A — статический предел текучести, B — параметр деформационного упрочнения, ε — эквивалентная пластическая деформация, n — показатель степени в законе упрочнения, C — параметр скоростного упрочнения, $\dot{\varepsilon}$ — эквивалентная скорость пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_0$ — постоянная, T — температура, T_{melt} — температура плавления, T_{ref} — постоянная, m — показатель степени. Постоянные A , B , C , n , m и T_{melt} определяются свойствами материала.

В работе не используется критерий разрушения при растяжении, а предполагается разрушение конечного элемента при достижении эквивалентной пластической деформации значения $\varepsilon = 1,5$. Параметры материалов взяты из [10] и приведены в табл. 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 показаны формы деформированных остатков ударников и пластин в момент времени $t = 100$ мкс для двух серий расчетов ($V_{pn}^0 = 1,5$ и $2,5$ км/с). Штриховые линии показывают начальное положение пластины, стрелки — направление их движения. Во всех случаях ударник движется справа налево. При $V_{pl} = -0,5$ км/с, $V_{pn}^0 = 1,5$ км/с пластина не пробивается, в остальных случаях — пробивается. Деформации остатков ударников различны и зависят от значений V_{pl} . При $V_{pn}^0 = 2,5$ км/с влияние скорости пластины на деформирование остатка становится более заметным (рис. 2, б). На рис. 3 показано изменение скорости головной части ударника для двух рассматриваемых серий расчетов. При $t \approx 18$ мкс (слабое отличие от этого значения для разных случаев связано с различием скоростей пластины) происходит падение скорости из-за начала

взаимодействия с пластиной. Пик падения соответствует моменту пробития. На рис. 4 показана деформация пластин в момент времени $t = 150$ мкс. Хорошо видны пробитые отверстия и участки деформированной поверхности. Изменение размера повреждения (отмечено H на рисунке) зависит от условий удара.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Деформация остатков ударника

Сравнение представленных на рис. 2 форм остатков ударника в случае пробивания пластин показывает, что уменьшение скорости пластины в сторону отрицательных значений приводит к увеличению искривления головной части. На рис. 5 детально сопоставляются деформации в двух крайних случаях (варианты № 1 и 4). Видно, что эрозия головной части ударника происходит сверху или снизу, в зависимости от направления вектора скорости пластины, так как при движении в положительном направлении пластина воздействует на нижнюю часть ударника (см. рис. 5, а), а в отрицательном — на верхнюю (см. рис. 5, б). Если исключить головную часть ударника, то эрозия в нижней части ударника больше, чем в верхней, так как относительная скорость соударения выше для пластины, движущейся в положительном направлении и воздействующей на нижнюю часть. Как видно на рис. 5, а, при движении в положительном направлении существенная эрозия (в нижней части ударника) начинается на некотором расстоянии от вершины, т. е. только после того, как ударник пробьет пластину и продвинется еще на некоторое расстояние вперед. Причина такого поведения в следующем. Когда головная часть ударника выходит из пробитого отверстия, эффективная толщина пластины в вертикальном направлении со стороны верхней части ударника существенно больше, чем со стороны нижней части, вследствие чего деформация нижней

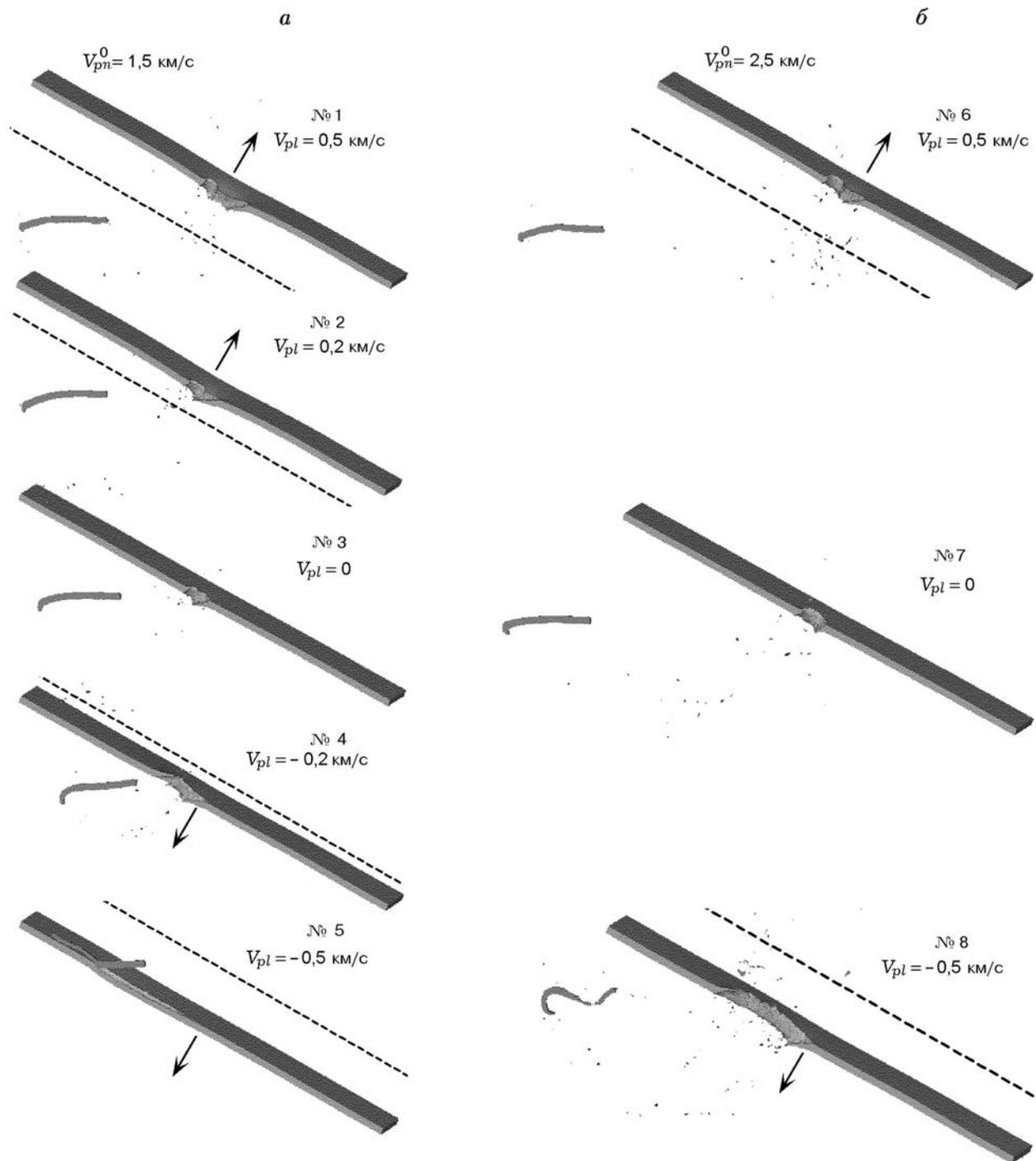


Рис. 2. Остатки ударников и пробитые пластины

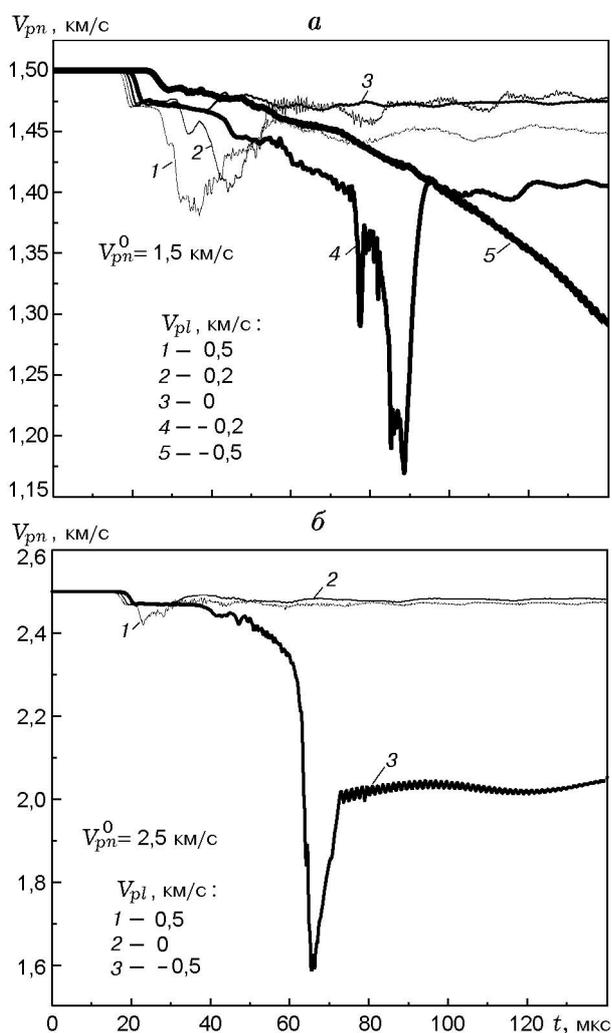


Рис. 3. Зависимости скорости головной части ударника от времени

части формирующегося отверстия больше, чем верхней. Это приводит к асимметрии в распределении материала на границе отверстия. Следовательно, пластина, движущаяся в положительном направлении, должна пролететь некоторое расстояние, прежде чем вступить в контакт с движущимся ударником, поэтому эрозия возникает на некотором расстоянии от передней кромки ударника (см. рис. 5, а). Напротив, при движении в отрицательном направлении пластина вызывает эрозию головной части (см. рис. 5, б), а это означает, что она начинается в момент пробития пластины. Этим же объясняется сильное искривление головной части, приводящее к уменьшению эффективной длины остатка ударника.

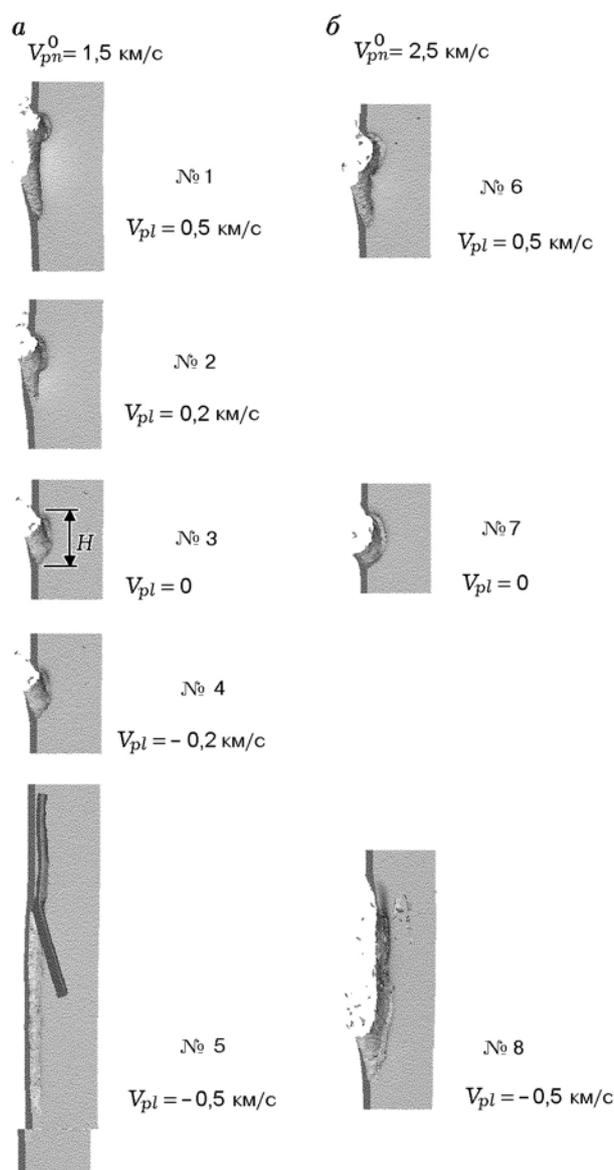


Рис. 4. Пробитые пластины

Дополнительная причина существенного различия в деформациях головной части ударника, зависящей от знака скорости пластины, заключается в следующем. При неподвижной наклонной пластине головная часть ударника имеет тенденцию к повороту против часовой стрелки из-за асимметричного распределения материала пластины (ситуация становится обратной, если ударник будет внедряться с противоположной пластины). Возникновение такого углового момента у остатка ударника после пробития для неподвижной пластины

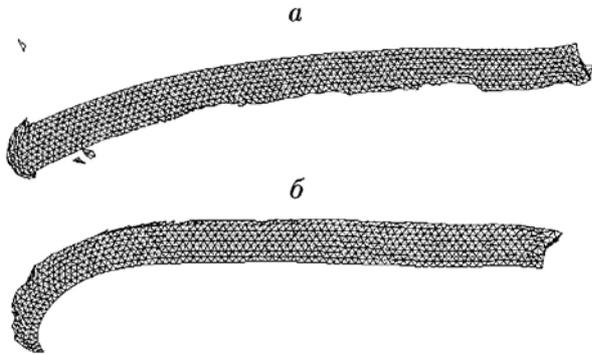


Рис. 5. Остатки ударников:

a — вариант № 1 ($V_{pn}^0 = 1,5$ км/с, $V_{pl} = 0,5$ км/с), *б* — вариант № 4 ($V_{pn}^0 = 1,5$ км/с, $V_{pl} = -0,2$ км/с)

подтверждено экспериментально [5]. Передние части остатков ударников на рис. 2 искривлены книзу (исключая вариант № 5, когда пробивания не происходит) при любом направлении скорости пластины, что означает наличие во всех случаях углового момента.

При движении пластины в отрицательном направлении угловой момент, возникающий из-за несимметричности нагрузки, усиливается движением пластины, действующей на головную часть ударника. Усиление нагрузки приводит к более сильному искривлению ударника и разрушению верхней части головы ударника, как видно на рис. 5, *б*.

С другой стороны, при движении пластины в положительном направлении меняется механизм воздействия в момент выхода головной части ударника из отверстия: верхняя часть не нагружается пластиной, вектор скорости которой направлен вверх. Кроме того, хотя головная часть не подвергается воздействию пластины сразу после пробивания из-за большого зазора между ударником и пластиной, в процессе (перед окончанием) пробивания движущаяся пластина может погасить часть вращающего момента, что приводит к уменьшению искривления передней части ударника (см. рис. 5, *а*). При $V_{pl} = -0,5$ км/с (см. рис. 2, *а*) пластина не пробивается, а ударник искривляется таким образом, что его головная часть скользит параллельно поверхности пластины, в то время как хвостовая часть продолжает движение в первоначальном направлении (формируется пластический шарнир). На более поздних стадиях, не показанных на рис. 2, *а*, задняя часть стержня проходит через точку пере-

гиба, а сама точка перегиба (шарнир) перемещается вдоль поверхности пластины. Из сравнения с результатами расчета варианта № 4 ($V_{pl} = -0,2$ км/с) следует, что увеличение обратной скорости пластины приводит к рикошету, который определяется как отскок ударника или частичное проникновение по изогнутой траектории с возвратом и удалением от поверхности, по которой наносился удар, с соответствующим изменением скорости [22]. При рикошете от неподвижной пластины точка поворота (шарнир) фиксирована в пространстве. В рассматриваемом случае перемещение шарнира обусловлено движением пластины в направлении удара. Перемещение шарнира и уменьшение относительной скорости соударения из-за отрицательной скорости пластины, возможно, стали причиной рикошета при меньшем, чем в случае неподвижной пластины [3, 23], угле 60° .

Сравним эрозию и деформацию ударника при скорости $V_{pn}^0 = 2,5$ км/с с соответствующими результатами при $V_{pn}^0 = 1,5$ км/с. В варианте расчета № 8 четко выражены разрушение и деформация ударника. Так как критический угол рикошета возрастает с ростом скорости [3, 23], то, в отличие от варианта № 5, рикошета не происходит.

4.2. Остаточная проникающая способность

Длина, скорость и эффективная кинетическая энергия остатка ударника, необходимые для количественного анализа остаточной проникающей способности после пробития пластины, определялись следующим образом. С точки зрения оценки эффективности защиты по глубине каверны в массивной мишени, помещенной за пластиной, важен только размер ударника в направлении полета. Так, если головная часть ударника искривляется, как, например, в вариантах № 2 и 8 (см. рис. 2), глубину каверны будет определять не полная длина, а приведенная длина L , определяемая как длина проекции ударника на направление полета. По данным рис. 2 были вычислены приведенные длины каждого остатка. Результаты в виде зависимостей L/L_0 от скорости пластины показаны на рис. 6. Там же приведены значения скорости передней части ударника V в момент времени $t = 150$ мкс из данных рис. 3 и соответствующая зависимость отношения кинетической энергии E к ее начальному значе-

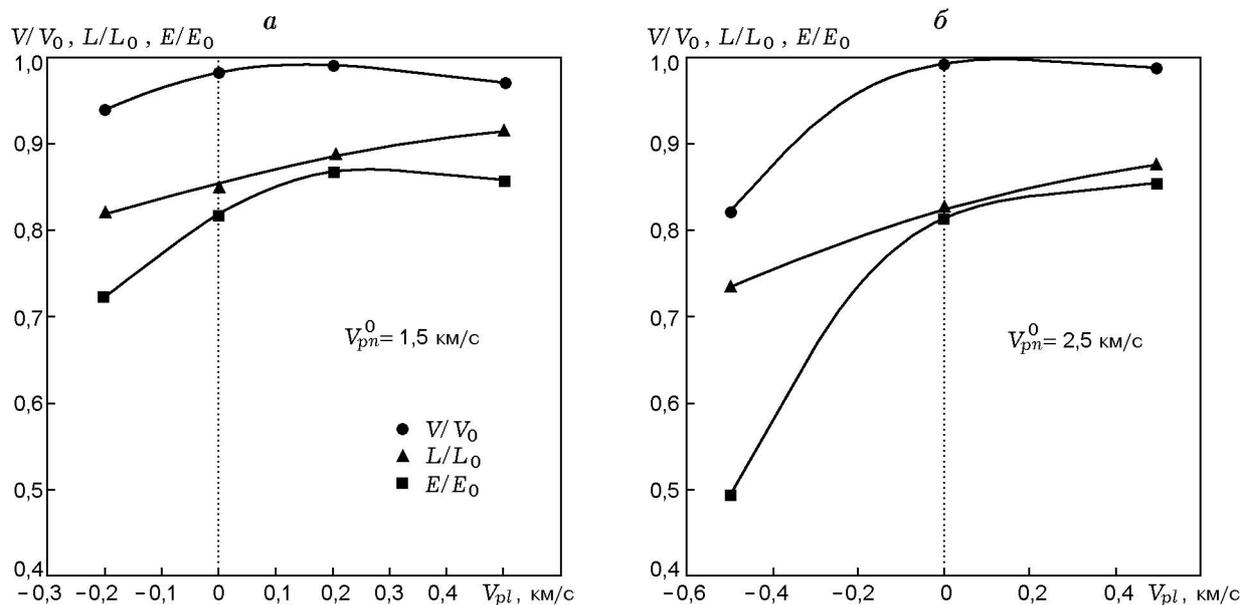


Рис. 6. Зависимости эффективной длины, остаточной скорости и кинетической энергии от скорости пластины

нию E_0 от скорости пластины, рассчитанного по формуле

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{L}{L_0}\right) \left(\frac{V}{V_0}\right)^2, \quad (4)$$

где L_0 — начальная длина ударника, V_0 — его начальная скорость. Отметим, что глубина каверны также будет зависеть от целостности ударника, но здесь сравнение проводится только по приведенной длине и скорости. Как следует из рис. 6, а, для варианта $V_{pn}^0 = 1,5$ км/с остаточная скорость максимальна при $V_{pl} = 0,2$ км/с, в то время как остаточная эффективная длина монотонно убывает с уменьшением скорости. Заметим, что, когда пластина летит в положительном направлении, эффективная длина возрастает вместе со скоростью по сравнению со случаем неподвижной пластины. Остаточная эффективность пробивания, определенная как остаточная кинетическая энергия, максимальна при малой положительной скорости ($\approx 0,2$ км/с). Следовательно, пластина, летящая в положительном направлении, вряд ли будет более эффективной защитой, чем неподвижная пластина при скоростях до 0,5 км/с, в то время как уменьшение кинетической энергии при движении пластины в отрицательном направлении весьма существенно. Данные рис. 3 показывают, что по мере

уменьшения скорости до отрицательных значений увеличивается время взаимодействия, характеризуемое минимумом на зависимостях, соответствующим моменту пробивания пластины. Отсюда следует, что рост времени взаимодействия для пластины, движущейся в отрицательном направлении, обеспечивает, как правило, более эффективное деформирование и разрушение ударника, а также снижение скорости остатка ударника.

Отметим, что остаточные скорости для $V_{pn}^0 = 2,5$ км/с (см. рис. 6, б) при $V_{pl} = 0$ и 0,5 км/с больше, чем в соответствующих случаях на рис. 6, а. Вероятно, это связано с уменьшением времени взаимодействия ударника и пластины при возрастании скорости удара. Для $V_{pl} = -0,5$ км/с при высокоскоростном ударе наблюдается большее уменьшение скорости, чем при обычной артиллерийской скорости удара, что объясняется особенностями взаимодействия ударника с пластиной (см. рис. 2, б, вариант № 8). Остаточная длина ударника при высокоскоростном ударе также уменьшается во всем рассмотренном диапазоне скоростей V_{pl} , и соответственно уменьшается проникающая способность ударника вследствие большего изгибного деформирования или эрозии головной части ударника. Это означает, что система наклонных пластин (летящих или неподвижных) более эффективна для за-

щиты от высокоскоростного ударника, чем от ударника, летящего с обычной артиллерийской скоростью.

Общая тенденция изменения параметров при варьировании скорости пластины на рис. 6, б аналогична изменениям при $V_{pn}^0 = 1,5$ км/с. В частности, подтверждается, что защитные свойства пластины, летящей в положительном направлении, ниже, чем у неподвижной пластины. Таким образом, в случае сенсорно-активируемой защиты пластина, летящая навстречу ударнику, не должна двигаться со слишком большой скоростью.

При $V_{pn}^0 = 2,5$ км/с пластина, летящая в отрицательном направлении, также обладает более эффективными защитными свойствами, чем летящая в положительном направлении. Из этого следует, что в активной защите в случае двух пластин, движущихся в противоположные стороны, пластина, летящая в отрицательном направлении, вероятно, будет эффективнее воздействовать на длинный стержень (ударник) [24]. В работе [25] также сообщалось о важной роли задней пластины при защите от кумулятивной струи с помощью тонких (≈ 2 мм) металлических пластин. Несмотря на это роль передней пластины также представляется важной ввиду существования синергетического эффекта в механизмах защиты удара стержнем с помощью пары разлетающихся в противоположные стороны пластин [7]. Для оценки роли задней пластины в суммарном защитном эффекте необходим детальный анализ влияния расстояния между пластинами на защитные свойства. Результаты исследования этого вопроса публикуются в другом издании.

4.3. Характеристики повреждений пластины

На рис. 7 показано изменение размера H области повреждения пластины (см. рис. 4), включающей пробитое отверстие и зону повреждений, в зависимости от скорости пластины для обеих скоростей удара. Как следует из рисунка, зависимости качественно подобны и характеризуются наличием минимума при $V_{pl} = 0$. Хотя значения H при положительных скоростях V_{pl} больше, чем в случае неподвижной пластины, это не приводит к эффективному воздействию на ударник и улучшению защитных свойств пластины. Отсюда следует, что размер области повреждений не коррели-

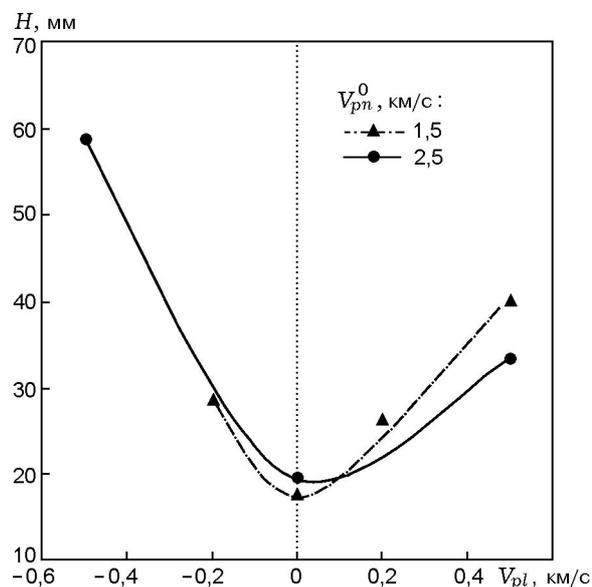


Рис. 7. Зависимости размеров повреждений пластин от скорости пластин

рует однозначно с защитными свойствами системы пластин. Отчасти это связано с тем, что защитные свойства определялись на основе эффективной длины ударника, а не суммарного эффекта его деформации и разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью программы NET3D численно исследованы защитные свойства тонкой стальной пластины, соударяющейся под углом 60° с ударником (длинным стержнем) из тяжелого вольфрамового сплава, в зависимости от скорости пластины, изменявшейся в диапазоне $-0,5 \div 0,5$ км/с, при обычной артиллерийской (1,5 км/с) и высокой (2,5 км/с) скоростях ударника.

На основе анализа деформации ударника сделано заключение о существовании (не зависящего от вектора скорости пластины) углового момента, направленного против часовой стрелки. При отрицательной скорости пластины вызывающая угловой момент сила, направленная в менее стесненную стенками каверны сторону, увеличивается за счет движения пластины, нагружающей верхнюю боковую зону головной части ударника. Возросшая сила вызывает увеличение изгибной деформации и эрозии ударника, концентрирующейся в зоне взаимодействия с пластиной, что далее приводит к большим изгибным деформациям остат-

Таблица 3

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов по программам AUTODYN3D [10] и NET3D

V_{pn}^0 , км/с	L/L_0			V/V_0			ω , 10^3 град/с		
	Эксперимент	AUTO-DYN3D	NET3D	Эксперимент	AUTO-DYN3D	NET3D	Эксперимент	AUTO-DYN3D	NET3D
1,5	0,85	0,88	0,85	0,97	0,98	0,98	80	40	68
2,5	—	0,86	0,83	—	0,99	0,99	—	47	75

Примечание. ω — угловая скорость.

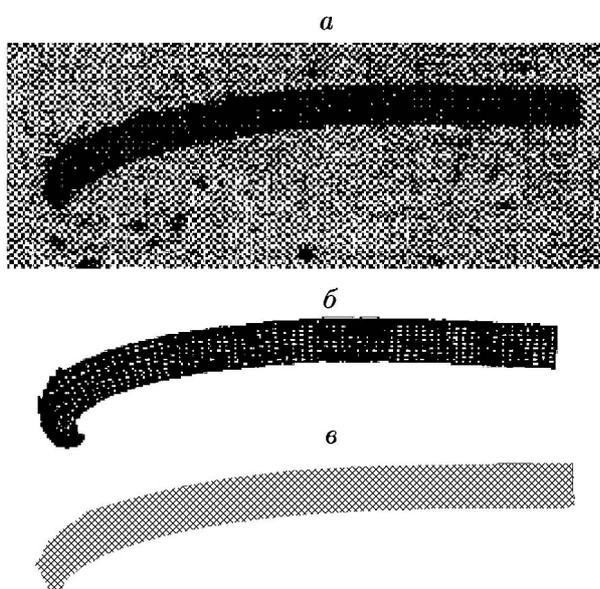


Рис. 8. Сравнение остатков ударников после пробития неподвижной пластины:

a — эксперимент [10], *б* — расчет по AUTODYN3D [10], *в* — расчет по NET3D

ка ударника, уменьшающим его эффективную длину. При движении пластины в положительном направлении вращающая сила уменьшается, так как в процессе пробития (перед окончанием) пластина толкает головную часть ударника в противоположном направлении.

Проникающая способность, оцениваемая по эффективной остаточной кинетической энергии ударника после пробития пластины, обратно пропорциональна скорости пластины как при высокоскоростном ударе (2,5 км/с), так и при ударе с обычной артиллерийской скоростью (1,5 км/с). В рассмотренном диапазоне скоростей пластины защитная эффектив-

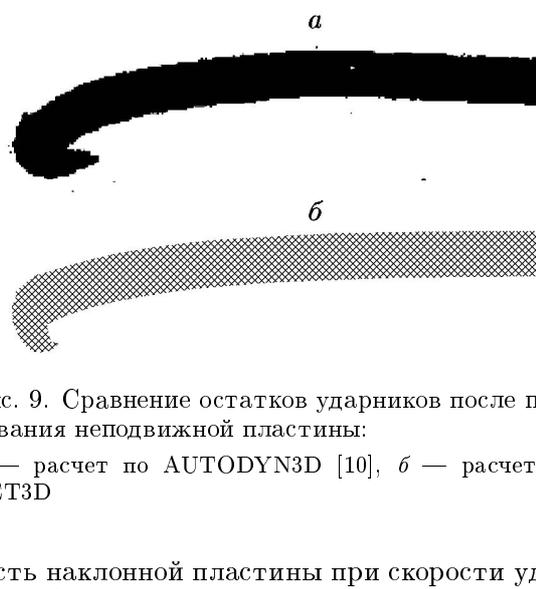


Рис. 9. Сравнение остатков ударников после пробития неподвижной пластины:

a — расчет по AUTODYN3D [10], *б* — расчет по NET3D

ность наклонной пластины при скорости удара 2,5 км/с выше, чем при скорости 1,5 км/с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Верификация расчетов по программе NET3D

Для верификации полученных численных результатов были проведены расчеты при условиях, повторяющих условия работы [10], в которой экспериментально (с помощью рентгеновской съемки) и численно (программа AUTODYN3D) исследовался удар длинного стержня из тяжелого вольфрамового сплава по неподвижной, наклонно расположенной стальной пластине. На рис. 8 показана форма ударника через 150 мкс после пробития пластины толщиной 5 мм со скоростью удара 1,5 км/с. Расчет по программе NET3D достаточно точно описывает данные опыта. Результаты решения идентичных задач по программам AUTODYN3D и NET3D при скорости уда-

ра 2,5 км/с представлены на рис. 9. Приведенные на рис. 8 и 9 рассчитанные формы деформированных ударников различаются незначительно. Расчетные и экспериментальные значения остаточной скорости, остаточной длины и угловой скорости приведены в табл. 3. Видно, что в рассмотренных случаях результаты, полученные с помощью программы NET3D, ближе к экспериментальным, чем рассчитанные по AUTODYN3D. Имеются, однако, особенности, не позволяющие считать сравнение результатов расчетов полностью корректным, поэтому установленная тенденция не может считаться общей*. На основе вышесказанного представляется, что результаты расчетов по программе NET3D не слишком далеки от реальных физических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Johnson W., Sengupta A. K., Ghosh S. K.** Plasticine modelled high velocity oblique impact and ricochet of long-rods // Intern. J. Mech. Sci. 1982. V. 24. P. 437–455.
2. **Senf H., Rothenhausler H.** Experimental and numerical investigation of the ricocheting of projectiles from metallic surfaces // Proc. 6th Intern. Symp. on Ballistics, Orlando (USA), 1981. P. 549–560.
3. **Rosenberg Z., Yeshurun Y., Mayselless M.** On the ricochet of long rod projectiles // Proc. 11th Intern. Symp. on Ballistics, Brussels (Belgium), 1989. P. 501–506.
4. **Holmberg L., Lundberg P., Westerling L.** An experimental investigation of WHA long rods penetrating oblique steel plates // Proc. 14th Intern. Symp. on Ballistics, Quebec City (Canada), 1993. P. 515–524.
5. **Charters A. C., Menna T. L., Piekutowski A. J.** Penetration dynamics of rods from direct ballistic tests of advanced armor components at 2–3 km/s // Intern. J. Impact Engng. 1990. V. 10. P. 93–106.
6. **Yaziv D., Mayselless M., Reifen Y.** The penetration process of long rods into thin metallic targets at high obliquity // Proc. 19th Intern. Symp. on Ballistics, Interlaken (Switzerland), 2001. P. 1249–1255.
7. **Gee D. J.** Oblique plate perforation by slender rod projectiles // Ibid. P. 1123–1132.
8. **Yaziv D., Cox P. A., Riegel III J. P.** Modified integral theory of impact to model long rod penetration at normal and oblique incidence // Shock Compression of Condensed Matter-1991 / S. C. Schmidt, R. D. Dick, J. W. Forbes (Eds). Elsevier Science Publishers B.V., 1992. P. 963–966.
9. **Jeanquartier R., Odermatt R.** Post-perforation length and velocity of KE projectiles with single oblique targets // Proc. 15th Intern. Symp. on Ballistics, Jerusalem (Israel), 1995. P. 245–252.
10. **Liden E., Ottosson J., Holmberg L.** WHA long rods penetrating stationary and moving oblique steel plates // Proc. 16th Intern. Symp. on Ballistics, San Francisco (USA), 1996. P. 711–719.
11. **Held M.** Disturbance of shaped charge jets by bulging armour // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2001. V. 26. P. 191–195.
12. **Held M., Mayselless M., Rototayev E.** Explosive reactive armour // Proc. 17th Intern. Symp. on Ballistics, Midrand (South Africa), 1998. P. 33–46.
13. **Yoo Y.-H., Chang S.-N., Chung D.-T.** Numerical simulation of high-velocity oblique impact of mild steel spheres against mild steel plates // Trans. KSME. 2002. V. A26. P. 576–585.
14. **Yoo Y.-H., Lee M.** A three dimensional FE analysis of large deformations for impact loadings using tetrahedral elements // Comput. Mech. 2003. V. 30. P. 96–105.
15. **Zienkiewicz O. C., Rojek J., Taylor R. L., Pastor M.** Triangles and tetrahedrals in explicit dynamic codes for solids // Intern. J. Numer. Methods Engng. 1998. V. 43. P. 565–583.
16. **Hwang C.** Three dimensional analysis of dynamic failure in high velocity impact using finite element method: Ph. D. Thesis / Seoul National University. Seoul (Korea), 2002.
17. **Johnson G. C., Bammann D. J.** A discussion of stress rates in finite deformation problems // Intern. J. Solids Structures. 1984. V. 20. P. 725–737.
18. **Talor L. M., Flanagan D. P.** PRONTO2D, a two-dimensional transient solid dynamic problems // Report No. SAND86-0594. Sandia National Laboratories. Albuquerque (New Mexico, USA), 1987.
19. **Oldenburg M., Nilsson L.** The position code algorithm for contact searching // Intern. J. Numer. Methods Engng. 1994. V. 37. P. 359–386.
20. **Zhong Z. H.** Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems. London: Oxford Univ. Press, 1993.
21. **Johnson G. R., Cook W. H.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures // Proc. 7th Intern. Symp. on Ballistics, The Hague (Netherlands), 1983. P. 541–547.
22. **Zukas J. A., Gaskill B.** Ricochet of deforming projectiles // Intern. J. Impact Engng. 1996. V. 18. P. 601–610.

*При расчетах по программе AUTODYN3D кроме условия разрушения элементов был задан критерий разрушения материалов пластины. Тип и размеры в сравниваемых расчетах также могли различаться.

23. **Tate A.** A simple estimate of the minimum target obliquity required for the ricochet of a high speed long rod projectile // J. Phys. D: Appl. Phys. 1979. V. 12. P. 1825–1829.
24. **Ottosson J.** A numerical study of rear plate effects, and of the influence of projectile strength and geometry for a reactive armour // FOA memo 99-5523/S (In Swedish). 1999.
25. **Ratner E.** Elements for an add-on reactive armour for land vehicles: U.S. patent 4741244. 1988.

Поступила в редакцию 6/IX 2002 г.
