

СОПРОТИВЛЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРОНИКАНИЮ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ЗАРЯДОМ С ТАНТАЛОВОЙ ОБЛИЦОВКОЙ

У. Уолтерс, У. Гуч, М. Беркинс

Исследовательская лаборатория армии США, 21005-5066 Абердин
walters@arl.mil

Титановые сплавы, особенно Ti-6Al-4V, известны тем, что обеспечивают высокую массовую эффективность при воздействии кинетических ударников. Однако эффективность титана прониканию кумулятивных струй исследована еще недостаточно детально. Эксперименты проводились с толстыми цилиндрическими мишенями из сплава Ti-6Al-4V, с которыми соударялись кумулятивные струи, сформированные взрывом из 100-миллиметровых конических танталовых лайнеров с углом при вершине 42°. Эта работа является первым исследованием проникания высокоскоростной высокоплотной струи в титановые сплавы.

ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы широко используются в аэрокосмической технике при создании легких корпусов, а также деталей реактивных двигателей. Однако исторически сложилось так, что высокая стоимость титана не позволяла применять его при создании наземных военно-транспортных средств. В последние годы стоимость титана упала и он стал конкурентоспособным с композитами и керамикой в качестве защитной брони. В настоящее время использование титана для защитной брони вполне обосновано, особенно в случае большой защищаемой поверхности.

Еще в 1950 г. Питер и Хёрлич [1] отмечали, что титановые сплавы являются многообещающими материалами в качестве защиты против легкого стрелкового оружия. В начале 1960-х гг. Слини [2] представил баллистические характеристики* сплава Ti-6Al-4V, которые демонстрировали значительное уменьшение массы такой защиты по сравнению с однородной катаной стальной броней (РНА) против воздействия легкого стрелкового оружия. Малое число экспериментов с более мощным оружием было обусловлено исключительно высокой ценой титана в то время. До 1993 г. рассмотрению титана в качестве защиты препятствовало также отсутствие баллистических

характеристик титана при воздействии современных ударников. Начиная с 1993 г. сотрудники Исследовательской лаборатории армии (ARL) Соединенных Штатов опубликовали серию статей, в которых приведены сравнительные характеристики титана при воздействии современных кинетических ударников вместе с самыми полными баллистическими данными, полученными в совместных исследованиях с Франко-германским исследовательским институтом в Сент-Луисе (Франция) [3-5]. Значительные исследовательские работы и баллистические испытания продолжаются и сейчас с целью создания недорогих титановых сплавов [6, 7]. До настоящего времени было доступно только ограниченное количество данных баллистических опытов с кумулятивными зарядами. Немногочисленные испытания показали, что титан обеспечивает массовую эффективность примерно в 1,6 раза выше, чем сталь РНА, что приблизительно эквивалентно баллистическим показателям при соударении кинетических ударников из вольфрамового сплава с полубесконечной титановой мишенью.

Эта статья** содержит первое систематическое экспериментальное изучение защит на основе сплава Ti-6Al-4V, с которыми соударялись кумулятивные струи, сформированные из 100-миллиметровых конических танталовых лайнеров с углом при вершине 42°. В первых опытах, проведенных с целью калибровки, кумулятивными зарядами с танталовой облицов-

* От редакции: в данной работе под термином «баллистические характеристики» автор подразумевает стойкость того или иного материала при воздействии на него кумулятивной струи или ударника.

** Статья одобрена для публичной печати.

кой обстреливали полубесконечные мишени из стали RHA и из сплава Ti-6Al-4V при фиксированной установке заряда на расстоянии трех калибров от мишени. Далее при той же установке заряда были проведены эксперименты с тремя толстыми цилиндрическими мишенями (болванками) из сплава Ti-6Al-4V длиной 100, 200 и 300 мм, каждая из которых была закрыта сверху пластиной из стали RHA толщиной 50,8 мм, а с тыльной стороны подпиралась полубесконечной преградой из этой же стали. Затем болванки из сплава Ti-6Al-4V испытывали без верхней пластины из RHA при том же заряде, той же толщине болванки и аналогичной установке заряда, что и в предыдущих тестах. Ограниченное число кумулятивных зарядов не позволяло проводить многократные опыты с мишенями, но струя, получаемая из облицовок кумулятивных зарядов, была высокого качества, а ранее проведенные опыты показывали незначительный разброс от эксперимента к эксперименту. На основании результатов опытов были вычислены пространственная и массовая эффективности защиты из титанового сплава, которые представлены в данной работе вместе с общими глубинами проникания и с профилями отверстий. В работе иллюстрируется эффективность использования сплава Ti-6Al-4V в качестве броневой защиты, обсуждаются потенциальные преимущества толстой брони из титанового сплава и оптимальное размещение титанового сплава в сэндвиче со сталью RHA.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Титан может существовать в двух кристаллических структурах: гексагональной плотноупакованной (α -фаза) и кубической объемно-центрированной (β -фаза). Наиболее широко используемый титановый сплав Ti-6Al-4V содержит смесь α - и β -фаз. Алюминий стабилизирует α -фазу до высоких

температур, а ванадий стабилизирует β -фазу до низких температур. Для применения в качестве брони α - и β -сплавы (такие, как Ti-6Al-4V) представляют большой интерес, поскольку они хорошо свариваются, могут подвергаться температурной обработке и нормализуются до высоких значений прочности [8]. Сплав Ti-6Al-4V может быть заказан в соответствии с различными, широко распространенными коммерческими и военными спецификациями. Титановые мишени, используемые в настоящих опытах, были изготовлены согласно спецификации MIL-T-9046J, которая определяет диапазон химического состава сплава, технологию обработки, минимум механических свойств, методы контроля, но не определяет баллистические характеристики. Механические свойства указаны в табл. 1. Величины твердости измерены на тестируемых болванках (твердость не задается спецификацией MIL-T-9046J).

В качестве стандарта при сравнении баллистических характеристик использовалась сталь марки U.S. RHA MIL-A-12560. Ее механические свойства для пластин толщиной $38 \div 152$ мм также приведены в табл. 1. Механические свойства стали RHA зависят от толщины пластины из-за разницы в термомеханической обработке. Так, например, 38-миллиметровая пластина из стали RHA имеет более высокие значения прочности и твердости, чем 152-миллиметровая пластина. Несмотря на то, что у титана плохая закаляемость в случае образцов с широким поперечным сечением и его нельзя быстро закалить, отличных механических свойств титана можно достичь путем термомеханической обработки (прокатки). Механические свойства титана очень однородны по толщине пластины, что увеличивает его относительные баллистические эксплуатационные качества по сравнению с пластиной такой же толщины, изготовленной из стали RHA, в том числе и для случая широких поперечных сечений образцов.

Таблица 1

Механические свойства титана и стали RHA

Материал	Плотность, г/см ³	Прочность на разрыв, МПа	Твердость H_B , 10 ⁷ Н/м ²	Удлинение, %
Ti-6Al-4V	4,43	> 896	302 ÷ 364	> 10
RHA	7,85	794 ÷ 951	241 ÷ 331	11 ÷ 21

БОЕГОЛОВКИ С КУМУЛЯТИВНЫМ ЗАРЯДОМ С ТАНТАЛОВОЙ ОБЛИЦОВКОЙ

В предыдущих испытаниях было выполнено лишь несколько выстрелов по полубесконечным преградам из титанового сплава небольшими кумулятивными зарядами (диаметром ≈ 60 мм) с коническим медным лайнером. В настоящей работе использовались кумулятивные заряды с танталовым лайнером. Лайнер представлял собой конус с углом при вершине 42° и внешним диаметром 100 мм. В качестве взрывчатого вещества использовался октол 75/25. Этот заряд представляет собой масштабно уменьшенный заряд с внешним диаметром лайнера 152,4 мм. Оказалось, что такой заряд является эффективным ударником, его характеристики приведены в [9, 10]. Измерение характеристик струи проводилось на экспериментальном стенде ARL 16, номер опыта 4042. На всех трех пленках, полученных методом импульсного рентгенографирования струи в свободном полете, наблюдалась фрагментация струи с суммарным количеством фрагментов, равным 60. Скорость головной части струи 8,2 км/с, измеренная скорость последнего фрагмента в струе 2,14 км/с. Средняя длина струи 18,77 мм, средний радиус 1,85 мм, осредненное отношение длины фрагмента к диаметру $l/D \approx 5,04$. Средняя разность скоростей частиц составила 0,108 км/с, среднее время разрушения струи 168,7 мкс. Кумулятивный узел располагался внутри лайнера на расстоянии 53,6 мм от его основания. Струя заряда была очень ровной, и ее характеристики отлично повторялись. Десять таких зарядов еще остались после экспериментальной программы, описанной в [10], и именно они использовались при проведении испытаний броневой защиты из титанового сплава.

БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Баллистические показатели защитной брони или элементов брони характеризуются безразмерными величинами, которые сравнивают удельную массу (масса/площадь) и толщину материала с показателями стандартного материала, в качестве которого была выбрана сталь RHA. Существует много критериев, однако Франк разработал и описал в [11] краткий набор критериев массовой и пространственной эффективности, соглашение об использовании которых принято в ARL.

Опыты для кумулятивных зарядов в этой статье аналогичны стандартным тестам на глубину проникания, и поэтому могут быть определены показатели титана при проникании стержневого ударника в полубесконечную мишень, соответствующие аналогичным показателям стали RHA. Баллистические характеристики можно определить через массовую эффективность (e_m), пространственную эффективность (e_s) и фактор качества брони (q^2):

$$e_s = \frac{P_{RHA} - P_R}{L_{Ti}},$$

$$e_m = \frac{(P_{RHA} - P_R)\rho_{RHA}}{L_{Ti}\rho_{Ti}} = e_s \frac{\rho_{RHA}}{\rho_{Ti}},$$

$$q^2 = e_m e_s.$$

Литера e указывает на то, что величины, обозначенные ею, носят скорее одиночный (элементарный) характер, а не характеризуют эффективность системы в целом. Член $(P_{RHA} - P_R)$ устанавливает связь между прониканием стержня в мишень только из стали RHA и остаточным прониканием в сталь RHA в случае, когда мишень состоит из титана и стали, и показывает, какая глубина проникания в стандартную сталь устраняется слоем титана толщиной L_{Ti} при той же самой скорости соударения. Массовая эффективность титана связана с пространственной через плотность титана (ρ_{Ti}) и плотность стали RHA (ρ_{RHA}). Для RHA $e_m, e_s = 1,0$, а большие значения этих индексов указывают на лучшие баллистические показатели. Фактор качества важен для конструкторов броневой защиты, так как он связывает массовую и пространственную эффективность; его значения выше 1,0 относятся к броневым защитам или материалам, которые тоньше и/или легче, чем стандартная броня из стали RHA. Высокие значения этого фактора указывают на превосходство брони или материала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОГРАММА

В первых опытах изучалось проникание струи в стопу блоков из стали RHA размером $152,4 \times 152,4$ мм и толщиной каждого блока 76,2 мм, заряд устанавливали на фиксированном расстоянии, равном трем калибрам или

Таблица 2

Диаметры профиля отверстия в стали RHA. Опыт 148

Блок RHA	Входное отверстие, мм	Выходное отверстие, мм	Комментарии
1	55,75 × 55,75	26,80 × 20,84	Присутствует материал песта
2	20,13 × 18,25	14,94 × 13,55	— // —
3	14,61 × 17,00	13,92 × 13,90	— // —
4	14,70 × 15,67	10,43 × 9,94	Отсутствует материал песта
5	9,42 × 10,40	8,93 × 9,58	— // —
6	11,7 × 11,43	10,52 × 11,97	Присутствует материал песта
7	12,36 × 12,18	10,05 × 10,52	— // —
8	17,74 × 16,99	9,14 × 9,53	Отсутствует материал песта
9	15,60 × 14,45	—	— // —
Суммарное проникание 659 мм			

Таблица 3

Диаметры профиля отверстия в стали RHA. Опыт 149

Блок RHA	Входное отверстие, мм	Выходное отверстие, мм	Комментарии
1	60,20 × 53,56	23,47 × 21,20	Отсутствует материал песта
2	20,85 × 17,88	14,46 × 13,28	Присутствует материал песта
3	15,14 × 15,00	13,52 × 13,13	— // —
4	14,32 × 14,32	11,23 × 10,97	Отсутствует материал песта
5	12,59 × 12,46	10,01 × 10,01	— // —
6	11,18 × 10,97	10,55 × 10,17	— // —
7	11,43 × 11,08	10,49 × 11,08	Присутствует материал песта
8	11,06 × 11,17	18,15 × 17,06	— // —
9	18,08 × 16,80	—	— // —
Суммарное проникание 640 мм			

300 мм. С такой мишенью проведено два опыта в одинаковых условиях — № 148 и № 149. Полная глубина проникания в опыте № 148 составила 659 мм, а в опыте № 149 — 640 мм. Профили отверстий представлены в табл. 2 и 3; диаметры входных и выходных отверстий были измерены в каждом пробитом блоке стали RHA. Материал песта струи был замечен на верхней и тыльной сторонах стопы из стали RHA.

Следующие два опыта были проведены с цилиндрическими болванками из сплава Ti-6Al-4V диаметром 203,2 мм при установке заряда на расстоянии 300 мм. Полное про-

никание в болванку составляло 655 мм в опыте № 150 и 697 мм в опыте № 151. Диаметры входного отверстия (неправильной формы) в болванках были соответственно 60,06 × 57,63 мм и 57,19 × 57,75 мм.

Блоки из стали RHA и болванки из титанового сплава разрезали, и были получены точные профили отверстий в опытах № 149 и № 151.

На рис. 1 изображен канал в стали RHA в опыте № 149 (минимальное проникание в сталь RHA), а рис. 2 — канал проникания в сплав Ti-6Al-4V в опыте № 151 (максимальное проникание в сплав Ti-6Al-4V). Сравнение

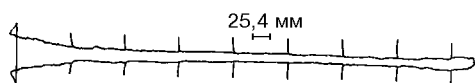


Рис. 1. Канал в стали RHA (опыт № 149)

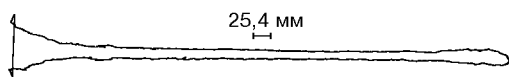


Рис. 2. Канал в сплаве Ti-6Al-4V (опыт № 151)

этих опытов дает значения $e_m = 1,6$ и $e_s = 0,9$ для болванок из сплава Ti-6Al-4V. В опытах № 148 и № 150 получены почти равные глубины проникания как в преграду из сплава Ti-6Al-4V, так и в преграду из стали RHA; это означает, что $e_m = 1,7$.

Следуя таким «калибровочным» опытом, были сконструированы слоистые (сталь/титановый сплав) мишени, схема которых приведена на рис. 3. Было рассмотрено две мишени. Первая состояла из пластины из стали RHA толщиной 50,8 мм, за которой находился цилиндр из сплава Ti-6Al-4V диаметром 203,2 мм, длиной 100, 200 или 300 мм, за ним, в свою очередь, располагалась полубесконечная стопа из стали RHA. Набор пластин во второй мишени был аналогичен первому, за исключением того, что была убрана передняя 50,8-миллиметровая плита из стали RHA. Во всех шести опытах расстояние, на котором устанавливался заряд, сохранялось постоянным и равнялось трем калибрам или 300 мм. Результаты баллистических испытаний представлены в табл. 4. Проникание в сталь RHA является суммой толщины пластины (50,8 мм) и глубины проникания в полубесконечный слой. Массовая эффективность титана также представлена в табл. 4. Она показывает увеличение рабочих характеристик титановой мишени по сравнению со сталью RHA.

Пробитые титановые пластины были исследованы на большой промышленной рентгеновской установке Армейского испытательного центра в Абердине (штат Мэриленд) и рентгенографировались в течение длительного периода времени. На экспонированной рентгеновской пленке наблюдаются полости. На рис. 4 показаны два характерных сечения полостей, полученных в опытах № 4808 и № 4811 соответственно. На каждой рентгенограмме виден пест

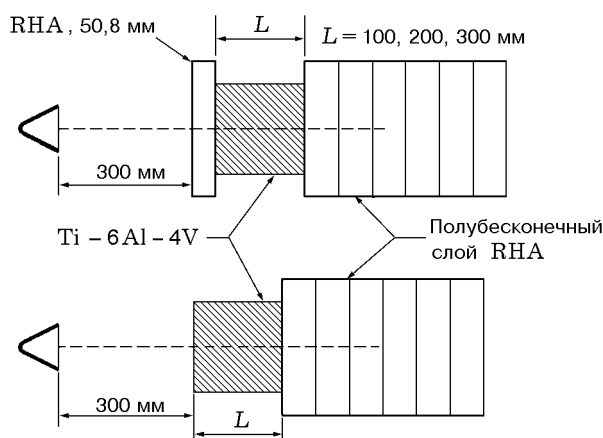


Рис. 3. Схема слоистой мишени (сталь / титановый сплав)

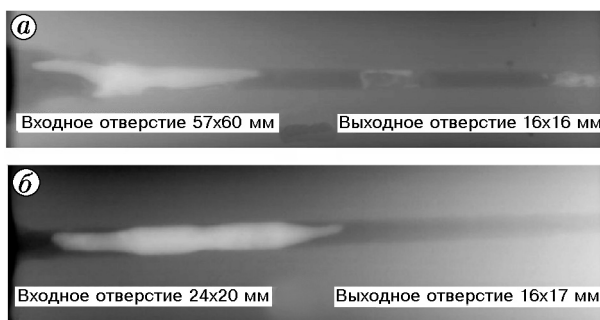


Рис. 4. Рентгенограммы сечения полостей в титане:

а — опыт № 4808; б — опыт № 4811

струи и остаток струи. Основное различие этих двух опытов состоит в большом диаметре входного отверстия в титане при прямом ударе по нему по сравнению с меньшим диаметром входного отверстия в случае, когда использовалась 50,8-миллиметровая пластина из стали RHA, закрывающая титан. Если же титан располагался между пластинами из стали RHA, диаметры входного и выходного отверстий были близки друг другу.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты и возможные выводы на основе проведенных опытов носят ограниченный характер ввиду того, что было произведено только по одному эксперименту с каждой слоистой мишенью титан/RHA определенной конфигурации. Наибольшие различия наблюдались между опытами № 4807 и № 4810, в которых использовались болванки длиной 200 мм.

Таблица 4

Рабочие показатели проникания танталовой кумулятивной струи

Номер опыта	Материал	Глубина проникания, мм	Номер опыта	Материал	Глубина проникания, мм	
Опыт № 4806	RHA	50,8	Опыт № 4809	Титан	100	
	Титан	100		RHA (7 пластин)	76,2 (каждая пластина)	
	RHA (6 пластин)	76,2 (каждая пластина)			RHA	36,0
	RHA	62,0				Суммарное проникание в RHA 570 мм, титан $e_m = 1,24$
Суммарное проникание в RHA 570 мм, титан $e_m = 1,24$			Суммарное проникание в RHA 569 мм, титан $e_m = 1,25$			
Опыт № 4807	RHA	50,8	Опыт № 4810	Титан	200	
	Титан	200		RHA (7 пластин)	76,2 (каждая пластина)	
	RHA (5 пластин)	76,2 (каждая пластина)			RHA	38,0
	RHA	38,0				Суммарное проникание в RHA 470 мм, титан $e_m = 1,51$
Суммарное проникание в RHA 470 мм, титан $e_m = 1,51$			Суммарное проникание в RHA 526 мм, титан $e_m = 1,01$			
Опыт № 4808	RHA	50,8	Опыт № 4811	Титан	300	
	Титан	300		RHA (6 пластин)	76,2 (каждая пластина)	
	RHA (5 пластин)	76,2 (каждая пластина)			RHA	25
	RHA	3				Суммарное проникание в RHA 435 мм, титан $e_m = 1,21$
Суммарное проникание в RHA 435 мм, титан $e_m = 1,21$			Суммарное проникание в RHA 406 мм, титан $e_m = 1,38$			

Разница в 56 мм в глубинах проникания между опытами № 4807 и № 4810 сравнима с 42-миллиметровым разбросом глубин проникания в полубесконечную преграду из монолитного титана. Без дополнительных испытаний невозможно определить, является ли разброс от опыта к опыту полностью ответственным за разницу глубин проникания в опытах № 4807 и № 4810. Массовая эффективность, осредненная по результатам опытов с шестью слоистыми мишенями титан/RHA, равна 1,27. Важно отметить, что массовая эффективность, полученная для таких мишеней, существенно ниже значений $e_m = 1,6 \div 1,7$, полученных в опытах с монолитным титаном в качестве полубесконечной преграды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование является первым анализом проникания высокоскоростной

высокоплотной струи в титановый сплав Ti-6Al-4V. Этот сплав обладает примерно такой же прочностью, как и сталь RHA, однако его плотность примерно на 40% ниже, чем у стали. Сравнение проникания (при установке заряда на расстоянии трех калибров) в полубесконечные преграды из стали RHA и титана дало значения массовой эффективности $1,6 \div 1,7$ для сплава Ti-6Al-4V. Этот уровень рабочих показателей сравним с ранними ограниченными данными по прониканию в полубесконечные преграды струй от небольших кумулятивных зарядов с медной облицовкой и от вольфрамовых кинетических ударников. Предполагалось, что основанная на анализе плотностей массовая эффективность равна только 1,32.

При обстреле слоистых мишеней титан/RHA зарядами с танталовой облицовкой, установленными на расстоянии трех калибров от мишени, значение массовой эффективности

менялось от 1,0 до 1,5; эти крайние значения были получены с мишенями, в которые входили болванки длиной 200 мм. Этот уровень значений ϵ_m намного ниже, чем в случае с монолитными титановыми мишенями. По видимому, это показывает, что оптимальная толщина титана должна быть больше 300 мм для слоистых мишеней титан/RНА. Осредненные массовой эффективности по результатам шести опытов со слоистыми мишенями титан/RНА дало значение 1,27. Без дополнительных экспериментов невозможно определить, является ли разброс от опыта к опыту полностью ответственным за разницу глубин проникания в опытах с болванками длиной 200 мм.

Ограниченное количество проведенных тестов не позволило определить оптимальную толщину титана или оптимальное расположение слоев в слоистой мишени титан/RНА. Работа в этом направлении будет продолжаться. Предполагается также разрезать болванки из титанового сплава с тем, чтобы провести дальнейшие исследования механизмов разрушения титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pitler R., Hurlich A.** Some Mechanical and Ballistic Properties of Titanium and Titanium Alloys // Report N 401/17, Watertown Arsenal Laboratory, March 1950.
2. **Sliney J.** Status and potential of titanium armor // Proc. of the Metallurgical Advisory Committee on Rolled Armor, AMRA MS64-04, U. S. Army AMMRC, January 1964.
3. **Gooch W., Burkins M. S., Ernst H.-J., Wolf T.** Ballistic performance of titanium against laboratory penetrators with aspect-ratios of 10 or greater // Proc. of the 15th Intern. Ballistics Symp., 1995.
4. **Gooch W., Burkins M. S., Ernst H.-J., Wolf T.** Ballistic penetration of titanium alloy Ti-6Al-4V // Proc. of the Lightweight Armour Systems Symp., The Royal Military College of Science, Shrivenham, Swindon, England, 1995.
5. **Burkins M. S., Paige J. I., Hansen J. S.** A Ballistic Evaluation of Ti-6Al-4V vs. Long Rod Penetrators // Technical Report ARL-TR-1146, U. S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, July 1996.
6. **Burkins M. S., Love W. W., Wood J. R.** Effect of Annealing Temperature on the Ballistic Limit Velocity of Ti-6Al-4V ELI // Memorandum Report ARL-MR-359, U. S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, August 1997.
7. **Burkins M., Hansen J., Page J., Turner P.** Effect of thermomechanical processing on the ballistic performance of titanium // Proc. of the Non-Aerospace Applications of Titanium Symp., Minerals, Metals and Materials Society, San Antonio, TX, 1998.
8. **Donachie M.** Titanium: A Technical Guide. ASM International, Metals Park, OH, 1989.
9. **Walters W. P., Summers R. L.** Jet Characteristics and Performance of Advanced Shaped Charge Warheads // Technical Report BRL-TR-3252, U. S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, August 1991, Classified Secret.
10. **Walters W. P., Summers R. L., Walker E. H., et al.** A Command-to-Line-of-Sight Tandem Warhead Demonstration // Technical Report BRL-TR-3136, August 1990, U. S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, Classified Secret.
11. **Frank K.** Armor-Penetrator Performance Measures // ARBRL Report MR-03097, 1981, U. S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.

Поступила в редакцию 5/VI 2000 г.