УДК 623.5

ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХСЛОЙНОЙ МИШЕНИ, ПОЛУЧЕННОЙ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ И ПРОБИВАЕМОЙ СФЕРИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ СОУДАРЕНИЯ

Н. Чжоу*,**,***, Д. Лю*, Ц. Нянь****, К. Тан*, Ц. Ван*, Ю. Фан***

* Нанкинский университет наук и технологий, 210094 Нанкин, Китай

**** Десятый отдел Железнодорожной строительной компании Китая, 230601 Хэфэй, Китай E-mails: nudge@163.com, liudabin@njust.edu.cn, nianqingming@163.com, tkui2014@sina.com, wjx@njust.edu.cn, 529384137@qq.com

Проведено исследование защитных характеристик композитной трехслойной мишени, состоящей из алюминиевых и стальных пластин и изготовленной с использованием сварки взрывом. Представлены результаты баллистических экспериментов и численного моделирования. Исследован механизм разрушения мишени при ударе по ней сферических частиц.

Ключевые слова: динамика удара, сварка, пластина, угол соударения, защитные характеристики, разрушение.

DOI: 10.15372/PMTF20220504

Введение. В настоящее время однородные металлические мишени часто заменяются многослойными композитными мишенями [1–4]. Проведены многочисленные исследования защитных свойств композитных пластин и факторов, влияющих на их разрушение. Результаты баллистических испытаний снарядов различной формы при пробивании стальных пластин представлены, например, в работах [5, 6]. Защитные характеристики мишеней изучались в работе [7]. В [8] приведены результаты экспериментальных и численных исследований разрушения многослойных композитных стальных мишеней при пробивании их снарядом. В работе [9] с использованием метода сглаженных частиц исследованы защитные характеристики композитных мишеней, сваренных из титановых и стальных пластин, а также влияние на эти характеристики свойств сварного шва и его

^{**} Нанкинский колледж лесной полиции, 210023 Нанкин, Китай

^{***} Аньхойская компания по производству плакированных материалов, 242000 Сюаньчэн, Китай

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований центральных университетов Китая (грант № LGZD202005), Открытого фонда Министерства общественной безопасности (грант № 2020FMKFKT05), Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11602113), Фонда естественных наук провинции Цзянсу (грант № ВК20161055), Фонда научно-технических инновационных исследований провинции Цзянсу (грант № 2019-29).

[©] Чжоу Н., Лю Д., Нянь Ц., Тан К., Ван Ц., Фан Ю., 2022



Рис. 1. Микроструктура сварных швов в многослойной мишени Al1,5–S2–Al1,5

m		~					-1
Т	а	0	л	и	п	a	1
					_		

Номер	Комбинация		h, мм			h, мм	$\bar{ ho},$	
мишени	слоев	S	Al	S	Al	S	Al	$\kappa\Gamma/M^2$
1	S1-Al3-S1	1,0	3,0	1,0				23,79
2	S1,5-Al2-S1,5	1,5	2,0	1,5				28,93
3	S2-Al1-S2	2,0	1,0	2,0				34,06
4	Al1–S3–Al1				1,0	$_{3,0}$	1,0	$28,\!93$
5	Al1,5–S2–Al1,5				1,5	2,0	1,5	23,79
6	Al2–S1–Al2				2,0	1,0	2,0	$18,\!65$

Структура композитных пластин

микроструктуры. Механизмы деформирования и энергопотребления одно-, двух- и многослойных пластин, а также влияние конструкции мишени на ее защитные характеристики изучались в работах [10–12].

Существует небольшое количество работ, посвященных исследованию влияния прочности межслойных связей, в частности сварных швов, на защитные характеристики композитных мишеней [9]. В [13] показано, что защитные характеристики многослойных пластин лучше защитных характеристик монолитной пластины с той же плотностью материала. В данной работе исследуются защитные характеристики трехслойных композитных пластин, изготовленных с использованием сварки взрывом.

1. Баллистический эксперимент. Трехслойные композитные мишени (сталь — алюминий — сталь и алюминий — сталь — алюминий) были изготовлены из стальных (сталь марки 304L) и алюминиевых (алюминий марки LY12) пластин с использованием сварки взрывом. Микроструктура сварных швов в многослойной мишени Al1,5–S2–Al1,5 (Al — слой алюминия, S — слой стали) показана на рис. 1.

В многослойных мишенях, полученных сваркой взрыва, в отличие от других многослойных мишеней, межслойные связи являются более прочными. Общая толщина исследуемой композитной пластины (мишени) составляла 5 мм, комбинации слоев и их толщина hприведены в табл. 1 ($\bar{\rho}$ — плотность на единицу площади).

Для исследования механизма разрушения и защитных характеристик композитной пластины, изготовленной с использованием сварки взрывом, были проведены баллистические испытания для различных комбинаций слоев пластины и различных углов соударения частиц и мишени. Для запуска стальной сферической частицы диаметром 6 мм использовалась винтовка калибром 14,5 мм. Механические характеристики материалов пластин и частицы приведены в табл. 2 (ρ — плотность, σ_b — предел текучести, HV — твердость по Виккерсу, C_0 — скорость звука, λ — коэффициент линейного расширения, T_{em} — температура плавления, C_p — удельная теплоемкость, K — теплопроводность).

Таблица 2

Механические свойства материалов пластин и частицы

Материал пластины	$ ho, \\ \Gamma/\mathrm{CM}^3$	$σ_b,$ ΜΠα	HV, MПа	<i>С</i> ₀ , м/с	λ	$\begin{array}{c} T_{em},\\ \mathbf{K} \end{array}$	$C_p,$ Дж/(кг · K)	$\begin{array}{c} K, \\ B_{\rm T}/({\rm M} \cdot {\rm K}) \end{array}$
Сталь марки 304L Алюминий марки LY12	$7,88 \\ 2,79$	$530 \\ 345$	$1700 \\ 1098$	$4569 \\ 5328$	$0,454 \\ 1,338$	$1699 \\ 933$	490 940	$\begin{array}{c} 21 \\ 237 \end{array}$

Таблица З

Номер эксперимента	S1–Al3–S1		S1,5–Al2–S1,5		S2–Al1–S2		Al1–S3–Al1		Al1,5–S2–Al1,5		Al2–S1–Al2	
	$V_0, _{ m M/c}$	$V_r,$ м/с	<i>V</i> ₀ , м/с	$V_r,$ M/c	$V_0, _{ m M/c}$	$V_r,$ м/с	$V_0, _{ m M/c}$	$V_r,$ м/с	$V_0, _{ m M/c}$	$V_r,$ м/с	$V_0, _{ m M/c}$	$V_r,$ M/c
1	440,6	0	484,8	0	473,5	0	384,6	0	376,0	0	395,7	0
2	$475,\! 6$	0	488,8	0	483,2	0	479,8	0	379,0	0	408,8	0
3	$493,\!8$	0	526,3	0	530,2	0	495,9	68	448,5	28	419,7	0
4	$526,\!8$	П	542,2	0	560,7	0	513,9	98	489,5	138	431,3	0
5	$531,\!9$	125	560,2	103	628,2	П	525,4	П	$506,\!5$	162	500,8	Π
6	600,9	Π	649,8	218	$637,\!9$	137	526,3	Π	513,7	172	550,3	213
7	$639,\!6$	251	815,9	П	683,7	210			535,7	П		

Значения начальной и остаточной скоростей частицы

 Π римечание. Символ "П" означает, что мишень была пробита, но конечная скорость не была измерена.

Начальная скорость частицы определялась величиной заряда. С одной и той же пластиной проводилось пять-семь экспериментов. После запуска частицы заряд извлекался. Устройства для измерения начальной и остаточной скоростей размещались перед мишенью и за ней. Значения начальной V_0 и остаточной V_r скоростей приведены в табл. 3.

2. Численное моделирование. При численном моделировании использовались программа LS-DYNA и метод конечных элементов. Механизм разрушения и защитные характеристики мишени исследовались при углах соударения частиц с мишенью $\varphi = 0, 30, 45,$ 60° . В силу симметрии модели расчет проводился только для ее половины. На плоскости симметрии ставились условия симметрии. Граница мишени считалась жестко защемленной, и на ней задавались неотражающие граничные условия.

Для материала частиц и пластины использовались определяющие соотношения Джонсона — Кука и уравнение состояния Грюнайзена. При моделировании контакта частицы и мишени использовался алгоритм ERODING_SURFACE_TO_SURFACE, при моделировании контакта различных слоев пластины — алгоритм TIE-BREAK_SURFACE_TO_SURFACE. Для частицы и мишени использовались конечные элементы 3D SOLID 164. Диаметр частицы составлял 6 мм, длина и ширина пластины — 50 мм. Значения параметров материалов, использованных в численных расчетах, приведены в работе [14].

3. Результаты исследования и их обсуждение. Ниже приведены результаты исследования влияния свойств материалов слоев пластины, их комбинации, формы частиц, их начальной скорости и угла соударения на разрушение композитной пластины, полученной с использованием сварки взрывом.

3.1. Разрушение мишени при вертикальном и косом ударах частиц. Экспериментальные данные и результаты численного моделирования разрушения пластины при вертикальном ударе частицы представлены в работах [15, 16]. Анализ результатов численного моделирования и экспериментальных данных о разрыве межслойных связей, величине деформации и характере повреждения показывает, что они хорошо согласуются.



Рис. 2. Зависимость остаточной скорости V_r от начальной скорости V_0 : линии — результаты численного моделирования, точки — экспериментальные данные; 1 — S1–Al3–S1, 2 — Al1,5–S2–Al1,5, 3 — S1,5–Al2–S1,5, 4 — Al1–S3–Al1

В изготовленной с использованием сварки взрывом трехслойной (алюминий сталь — алюминий) пластине, в случае когда границы раздела ее слоев являются прочными, разрушение происходит с образованием пробки вследствие концентрации сдвиговых деформаций. В тыльной алюминиевой пластине вследствие отсутствия препятствий образуется отверстие. В области соприкосновения частицы с материалом пластины разрушение происходит вследствие сдвига. В трехслойной (сталь — алюминий — сталь) пластине, в случае когда лицевая стальная пластина пробита, наблюдается экструзия материала с образованием кромки и формируется пробка вследствие концентрации деформаций сдвига. В средней алюминиевой пластине разрушение происходит с образованием пробки, при этом разрушение вдоль границы со стальной пластиной отсутствует. По мере проникания частицы вследствие увеличения растягивающих напряжений граница между средней алюминиевой и тыльной стальной пластинами разрушается, в тыльной пластине образуется отверстие. Некоторые экспериментальные данные и результаты численного моделирования представлены на рис. 2, 3.

На характер разрушения композитной пластины, в частности границы между ее слоями, влияет также начальная скорость частицы. Если скорость частицы меньше предельной баллистической скорости V_{50} , то мишень не пробивается насквозь, но в ней возникают большие пластические деформации. При скорости частицы, большей скорости V_{50} , мишень пробивается насквозь, а границы между слоями разрушаются с образованием пробки (вследствие деформаций сдвига) либо отверстия (вследствие пластических деформаций).

Характер разрушения границы между слоями влияет на характер разрушения слоев и существенно зависит от характеристик процесса сварки взрывом, физических и механических свойств материала пластин.

Исследовалось разрушение мишени при ударе по ней частиц при углах соударения $\varphi = 30, 45, 60^{\circ}$ и при скоростях частиц, превышающих критическую баллистическую скорость V_{50} . Характер разрушения мишеней S1–Al3–S1 и Al1,5–S2–Al1,5, определенный в результате численного моделирования, показан на рис. 4, 5. Для этих двух мишеней при увеличении угла соударения с 30 до 60° степень повреждения мишени увеличивается, в частности, вследствие увеличения пластических деформаций увеличивается размер отверстия в тыльной пластине. Происходит также разрушение границ между слоями. Наи-



Рис. 3. Формы разрушения различных мишеней:

a-e — экспериментальные данные,
 z-e — результаты численного моделирования;
 a,~z — Al1,5–S2–Al1,5 (V_0 = 750 м/с),
 б, d — S1–Al3–S1 (V_0 = 640 м/с),
 e — Al1–S3–Al1 (V_0 = 496 м/с)





линии — результаты численного моделирования, точки — экспериментальные данные; 1 — S1–Al3–S1, 2 — S1,5–Al2–S1,5, 3 — S2–Al1–S2, 4 — Al1–S3–Al1, 5 — Al1,5–S2–Al1,5, 6 — Al2–S1–Al2

более существенные разрушения наблюдаются на границе между средней и тыльной пластинами, что приводит к увеличению размера отверстия в тыльной пластине. При этом в лицевой и средней пластинах происходит разрушение в результате больших деформаций сдвига, а граница между ними остается неразрушенной.

С увеличением угла падения частицы характер разрушения пластины существенно меняется. При косом ударе кинетическая энергия частицы, затрачиваемая на деформирование композитной пластины, больше, чем при вертикальном ударе, особенно в том случае, когда угол соударения превышает 30°.

3.2. Анализ защитных характеристик мишени. Установлено, что для пластин с одной и той же плотностью материала минимальная скорость, необходимая для полного пробития мишени S–Al–S, больше минимальной скорости, необходимой для полного про-



Рис. 5. Формы разрушения мишени при различных углах соударения с частицей:

 $a-e - \text{S1-Al3-S1}, \ e-e - \text{Al1,5-S2-Al1,5}; \ a, \ e-\varphi = 30^{\circ}, \ b, \ d-\varphi = 45^{\circ}, \ e, \ e-\varphi = 60^{\circ}$



Рис. 6. Зависимость кинетической энергии частицы E от времени в случае мишени, плотность материала которой равна $\bar{\rho} = 23,79 \text{ kr/m}^2$: 1–3 — в отсутствие сварки (1 — S1–Al3–S1, 2 — Al1,5–S2–Al1,5, 3 — S3), 4, 5 — при наличии сварки (4 — S1–Al3–S1, 5 — Al1,5–S2–Al1,5)

бития мишени Al–S–Al, т. е. защитные характеристики мишени S–Al–S лучше (см. табл. 3, рис. 2). В случае композитной мишени с одной и той же комбинацией слоев на защитные характеристики мишени влияет толщина слоев.

Исследовалось также влияние комбинации слоев на поглощение мишенью кинетической энергии частиц. Численно определялось количество поглощаемой мишенью кинетической энергии частицы при ее столкновении со скоростью 600 м/с с мишенями с различным расположением слоев. Масса сферической частицы равна 2,07 г, ее кинетическая энергия составляет 372,6 Дж. Энергией, затраченной на деформирование частицы, можно пренебречь, поскольку при прохождении через мишень частица деформируется незначительно. На рис. 6, 7 приведены зависимости кинетической энергии частицы от времени.

Кинетическая энергия частицы, необходимая для полного пробития мишеней S1–Al3– S1 и Al1,5–S2–Al1,5, составляет 363,6 и 311,5 Дж соответственно. Следовательно, защитные характеристики мишени S1–Al3–S1 лучше. Кинетическая энергия, поглощаемая мишенью S1,5–Al2–S1,5, составляет 371,8 Дж. Эта энергия больше кинетической энергии (329,1 Дж), необходимой для пробития мишени Al1–S3–Al1 (см. рис. 7). Таким образом, защитные характеристики мишени S1,5–Al2–S1,5 лучше защитных характеристик мишени Al1–S3–Al1. Кинетическая энергия, поглощаемая композитными мишенями, полученными



Рис. 7. Зависимость кинетической энергии частицы E от времени в случае мишени, плотность материала которой равна $\bar{\rho} = 28,93 \text{ кг/m}^2$: 1–3 — в отсутствие сварки (1 — S1,5–Al2–S1,5, 2 — Al1–S3–Al1, 3 — S3,7), 4, 5 — при

1–3 — в отсутствие сварки (1 — S1,5–Al2–S1,5, 2 — Al1–S3–Al1, 3 — S3,7), 4, 5 — при наличии сварки (4 — S1,5–Al2–S1,5, 5 — Al1–S3–Al1)



Рис. 8. Коэффициент увеличения скорост
и V_{50} при различных углах соударения частицы с мишенью:

 $1-\varphi=30^\circ,\,2-\varphi=45^\circ,\,3-\varphi=60^\circ$

с использованием сварки, в среднем на 6,04 % больше кинетической энергии, поглощаемой композитными пластинами, слои которых соединены без использования сварки.

При исследовании влияния угла соударения на защитные характеристики мишени использовалась критическая баллистическая скорость V_{50} (см. рис. 4, 5). Для мишеней с различными комбинациями слоев при увеличении угла соударения критическая скорость V_{50} непрерывно увеличивается. Коэффициент увеличения ψ скорости V_{50} для различных мишеней, пробиваемых при различных углах соударения с частицей, приведен на рис. 8 (N номер мишени (см. табл. 1)).

При увеличении значения угла соударения от 0 до 30° критическая скорость V_{50} увеличивается приблизительно на 10,7 %, при увеличении значения угла соударения от 0 до 45° — на 37,0 %, при увеличении значения угла соударения от 0 до 60° — на 104,3 %. Например, для мишени Al1–S3–Al1 при увеличении значения угла соударения от 0 до 30° значение скорости V_{50} увеличилось почти на 15,2 %, при увеличении значения угла соударения от 0 до 45° — на 41,3 %, при увеличении значения угла соударения от 0 до 60° — на 106,5 %. С увеличением угла соударения увеличивается расстояние, на которое проникает частица, поэтому кинетическая энергия частицы, затрачиваемая на пробивание мишени, увеличивается.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что при проектировании композитной конструкции, обладающей лучшими защитными характеристиками, ее нужно оптимизировать таким образом, чтобы ударник воздействовал на мишень под большим углом соударения и кинетическая энергия ударника, поглощаемая мишенью, была больше. При проникании ударника в композитную мишень кинетическая энергия ударника затрачивается на выбивание пробки, образование отверстия, а также на разрыв связей между слоями.

Заключение. На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Разрушение межслойных связей является основным фактором, вызывающим разрушение композитной мишени. В случае если межслойные связи не разрушены, основной формой разрушения лицевой и тыльной пластин является образование пробки вследствие деформации сдвига. В случае если при наличии растягивающих напряжений происходит разрыв межслойной связи, в тыльной пластине образуется отверстие вследствие наличия больших пластических деформаций. Такой характер разрушения имеет место при больших углах соударения ударника с мишенью.

Кинетическая энергия сферической частицы диаметром 6 мм, поглощаемая трехслойной композитной мишенью S–Al–S при ударе с начальной скоростью в интервале 300 ÷ 750 м/с, больше энергии, поглощаемой мишенью Al–S–Al. Таким образом, защитные характеристики сварной пластины S–Al–S лучше защитных характеристик сварной пластины Al–S–Al.

С увеличением угла соударения частицы с мишенью кинетическая энергия частицы, необходимая для пробивания мишени, непрерывно увеличивается. При увеличении угла соударения от 0 до 30° критическая баллистическая скорость V_{50} увеличивается незначительно. Если угол соударения превышает 45°, баллистическая скорость V_{50} увеличивается приблизительно на 50,7 %. Поэтому для улучшения защитных характеристик мишени угол соударения должен быть больше 45°.

ЛИТЕРАТУРА

- Skaggs S. R. A brief history of ceramic armor development // Ceram. Engng Sci. Proc. 2003. V. 65. P. 337–349.
- Corran R. S. J., Shadbolt P. J., Ruiz C. Impact loading of plates-an experimental investigation // Intern. J. Impact Engng. 1983. V. 1. P. 3–22.
- Kobylkin I. F., Gorbatenko A. A. Penetration of double-layer targets with an outer ceramic layer and optimization of their structure // Combust. Explos. Shock Waves. 2017. V. 53, N 4. P. 483–489.
- Goel M. D., Altenhofer P., Matsagar V. A. Interaction of a shock wave with a closed cell aluminum metal foam // Combust. Explos. Shock Waves. 2015. V. 51, N 3. P. 373–380.
- Dey S., Borvik T., Hopperstad O. S. On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates // Intern. J. Impact Engng. 2007. V. 34. P. 464–486.

- Borvik T., Clausen A. H., Hopperstad O. S. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles-experimental study // Intern. J. Impact Engng. 2004. V. 30. P. 367–384.
- Solberg J. K., Leinum J. R., Embury J. D. Localised shear banding in Weldox steel plates impacted by projectiles // Mech. Materials. 2007. V. 39. P. 865–880.
- Dey S., Borvik T., Hopperstad O. S. On the influence of constitutive criterion in projectile impact of steel plates // Comput. Materials Sci. 2006. V. 38. P. 176–191.
- Joshi V. S., Camey T. C. Modeling of bullet penetration in explosively welded composite armor plate // AIP Conf. Proc. 2006. V. 845. P. 1387–1390.
- Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Effect of air gaps on the ballistic resistance of ductile shields perforated by nonconical impactors // J. Mech. Materials Structures. 2006. V. 1. P. 279–299.
- Manes A., Lumassi D., Giuduci L. An experimental-numerical investigation on aluminum tubes subjected to ballistic impact with soft core 7.62 ball projectiles // Thin-Walled Structures. 2013. V. 73. P. 68–80.
- Gupta N. K., Iqbal M. A., Sekhon G. S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on the deformation behavior of layered plates // Intern. J. Impact Engng. 2008. V. 35. P. 37–60.
- 13. Wang J. X., Zhou N., Peng C. C., et al. Influence of different combinations of explosively welded plates with the same areal density on their anti-penetration performance // Mech. Composite Materials. 2014. V. 50. P. 623–632.
- Zhou N., Wang J. X., Yang R., et al. Study on the anti-penetration performance of two-layer explosively welded plates impacted by a spherical projectile // Combust. Explos. Shock Waves. 2013. V. 49, N 3. P. 374–381.
- Zhou N., Wang J. X., Yang R., et al. Damage mechanism and anti-penetration performance of multi-layered explosively welded plates impacted by spherical projectile // Theor. Appl. Fracture. Mech. 2012. V. 60. P. 23–30.
- Zhou N., Wang J. X., Tang S. Z., et al. Study on the failure and energy absorption mechanism of multilayer explosively welded plates impacted by spherical fragments // Mech. Composite Materials. 2018. V. 53. P. 809–820.

Поступила в редакцию 21/IX 2021 г., после доработки — 21/I 2022 г. Принята к публикации 28/II 2022 г.