

УДК 623.4.082.6

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУИ И ПРОНИКАЮЩИЕ СВОЙСТВА МИКРОКУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С ПОЛИМЕРНЫМИ ОБЛИЦОВКАМИ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

D.-J. Zhang¹, J.-Q. Wu², Z.-G. Liang³, R. Yu¹, Y.-H. Hou¹, R. Guo², H. Zhou⁴

¹Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China, 1715516202@qq.com

²School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

³School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110158, China, 1007272651@qq.com

⁴National Special Superfine Powder Engineering Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Проведены эксперименты и численное моделирование процесса формирования струи и характеристик пробивания мишени микрокумулятивными зарядами с полимерными облицовками. Проанализировано влияние материала облицовки, расстояния от заряда до мишени и его структуры на работу кумулятивного заряда. Результаты показывают, что по сравнению с медной струей глубина проникания полимерной струи уменьшилась, а диаметр кратера при пробивании увеличился.

Ключевые слова: микрокумулятивный заряд, полимерная облицовка, образование струи, пробивание.

DOI 10.15372/FGV2024.9470

EDN SRBLVA

ВВЕДЕНИЕ

Кумулятивный заряд (КЗ) является эффективным устройством для сильного повреждения толстых мишеней при ограниченном количестве взрывчатого вещества (ВВ). Материал облицовки оказывает значительное влияние на эффективность КЗ [1]. Типичным материалом облицовки КЗ является медь [2]. Чтобы увеличить глубину проникания струи КЗ, для облицовки использовались также и другие материалы: никель, вольфрам, тантал [3], аморфный сплав [4, 5], сплав вольфрама и меди [6], реагирующие материалы [7, 8] и др.

В настоящее время большинство кумулятивных боеголовок применяется в боеприпасах среднего или большого калибра для поражения толстых бронированных мишеней. Однако в современной войне всё более важную роль начинают играть беспилотные летательные аппараты (БПЛА), соответственно увеличивается спрос на миниатюрные боеприпасы, используемые на них. В связи с этим в последние десятилетия растёт число исследований по КЗ малого калибра. Например, в работе [9] предложен микрокумулятивный заряд диаметром 7.67 мм, формирование и проникание его струи изучалось с помощью численного моделирования и экспериментально. В работе [10] исследовали свойства КЗ диаметром 10 мм, было проанализировано влияние таких параметров, как внутренний/внешний угол и толщина облицовки. Исследования показали, что КЗ малого калибра подходит для уничтожения легкой бронетехники и критически важного оборудования на поле боя.

С быстрым развитием соответствующих технологий всё больше будет возрастать интерес к миниатюризации БПЛА, чтобы уменьшить возможность их обнаружения, а это, в свою очередь, требует снижения веса боевой нагрузки, переносимой ими. Поэтому есть смысл разрабатывать микромасштабные КЗ с вкладышами из полимерных материалов низкой плотности, которые можно адаптировать к платформе миниатюрного БПЛА. В работе [11] с помощью теоретических, экспериментальных и численных методов проанализированы характеристики и проникающая способность кумулятивной струи, сформированной облицовкой из полиэтилентерефталата (PETE). В [12] численно исследован процесс воздействия струи из тефлона, нейлона и плексигласа на ВВ с оболочкой. Сравнение характеристик струй, сформированных материалами низкой плотности — нейлон, тефлон и магниевый сплав AZ31B, проведено в [13].

В работе [14] представлен анализ реакции ВВ типа сэндвич, пробитого струей, сформированной нейлоновой облицовкой. Численное моделирование воздействия струи частиц PTFE/Cu на ВВ в оболочке выполнено в [15]. В [16] с помощью численного моделирования и экспериментов исследованы динамические свойства композитных материалов PTFE/Cu, а также проникающая способность струй из них.

В данной статье проведены эксперименты и численное моделирование процесса формирования струи микрокумулятивным зарядом с полимерной облицовкой. Основные выводы по проникающей способности и размерам кратера могут содержать информацию, важную для оптимизации микрокумулятивного заряда с полимерной облицовкой, и способствовать его применению в БПЛА.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Микрокумулятивные заряды с полимерными облицовками

Структура микрокумулятивного заряда с полимерной облицовкой представлена на рис. 1,а. КЗ и облицовки из различных материалов показаны на рис. 1,б и рис. 1,в соответственно. Заряд диаметром 19 мм изготовлен из ВВ на основе октогена (JH-2).

Облицовки изготавливали по технологии 3D-печати из разных полимерных материалов низкой плотности: политетрафторэтилен (PTFE), полиамид (РА), полиэфир-эфиркетон (PEEK), полимолочная кислота (PLA) и полимолочная кислота, армированная углеродным волокном (CFR-PLA). Экспериментальная установка показана на рис. 2, она состоит из детонатора, КЗ, устройства измерения скорости и трубы для установки расстояния от КЗ до стальной мишени (зазор h). Глубину проникания струи в мишень измеряли после эксперимента.

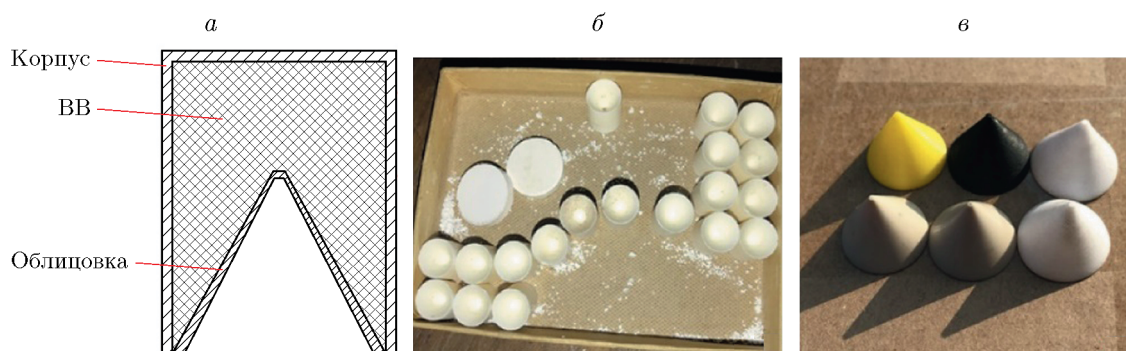


Рис. 1. Микрокумулятивный заряд с полимерной облицовкой:
а — структура, б — кумулятивный заряд, в — полимерные облицовки

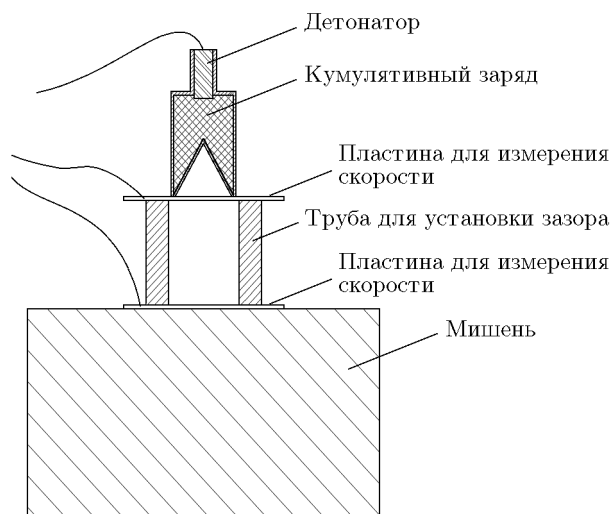


Рис. 2

Рис. 2. Экспериментальная установка

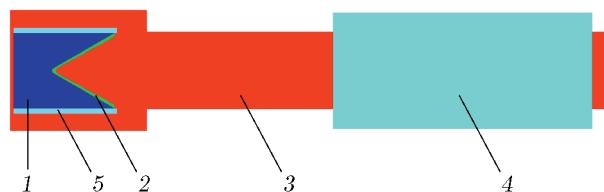


Рис. 3

Рис. 3. Схема моделирования:

1 — кумулятивный заряд, 2 — облицовка, 3 — область, занятая воздухом, 4 — стальная мишень, 5 — оболочка заряда

Процесс формирования струи и проникания в мишень моделировали с использованием программы ANSYS/AUTODYN. Численная модель, состоящая из кумулятивного заряда, облицовки, области, занятой воздухом, стальной мишени и оболочки заряда, представлена на рис. 3. Из-за большой деформации материалов, участвующих во взрыве КЗ и коллапсе облицовки, в численной модели использовался метод сопряжения жидкости и структуры. Формирование и проникание струи моделировались с помощью произвольного алгоритма Лагранжа — Эйлера (ALE): заряд, облицовка и воздушная область — с помощью эйлеровой сетки, а мишень — лагранжевой сетки. Для уменьшения отражения волны на краях воздушной области применялось граничное условие вытекания. Мишень была закреплена на нижней поверхности.

1.2. Материалы

Для описания поведения полимерных материалов использовалась модель Джонсона — Кука:

$$\sigma_y = (A_1 + B_1 \varepsilon_p^n)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T_H^m), \quad (1)$$

где σ_y — предел текучести материала; A_1 , B_1 , C_1 , n , m — параметры материала; ε_p — эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^*$ — эквивалентная скорость деформации; T_H^m — относительная температура.

Для описания реакции взрывчатого вещества JH-2 использовалось уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли (EOS_JWL):

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega e_0}{V}, \quad (2)$$

где A , B , R_1 , R_2 , ω — константы материала; V — начальный относительный объем; e_0 — начальная удельная внутренняя энергия; p — давление детонации. Параметры ВВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ВВ ЖН-2

ВВ	ρ , г/см ³	A , ГПа	B , ГПа	R_1	R_2	ω	p_{CJ} , ГПа	D_{CJ} , м/с
ЖН-2	1.787	581.4	6.801	4.1	1.0	0.35	34	8 390

Таблица 2

Параметры воздуха

Материал	ρ , кг/м ³	γ	c_p , кДж/(кг · К)	c_v , кДж/(кг · К)	T , К	E_0 , кДж/кг
Воздух	1.225	1.4	1.005	0.718	288.2	$2.068 \cdot 10^5$

Для описания стальной мишени использовалась модель Джонсона — Кука. Параметры стали выбирали из базы данных материалов AUTODYN.

Для воздуха использовалось УРС идеального газа:

$$p_{air} = \rho(\gamma - 1)E, \quad \gamma = c_p/c_v, \quad E = c_v/T, \quad (3)$$

где p_{air} , ρ и γ — давление, плотность и показатель политропы воздуха соответственно; c_p , c_v — удельная теплоемкость соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме; T — температура; E — внутренняя энергия воздуха. Параметры воздуха приведены в табл. 2.

2. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проникание струй, образованных облицовками из различных полимерных материалов, иллюстрирует рис. 4. Как видно, глубина проникания струи, образованной облицовкой из РТФЕ, является максимальной, за ней следует облицовка из РЕЕК, а у струй, образованных облицовками из PLA и CFR-PLA, проникающая способность слабее.

Экспериментальные и численные результаты по прониканию струи, сформированной облицовкой из РТФЕ, показаны на рис. 5. Видно, что морфология кратеров и максимальная глубина проникания, полученные в ходе эксперимента и моделирования, хорошо

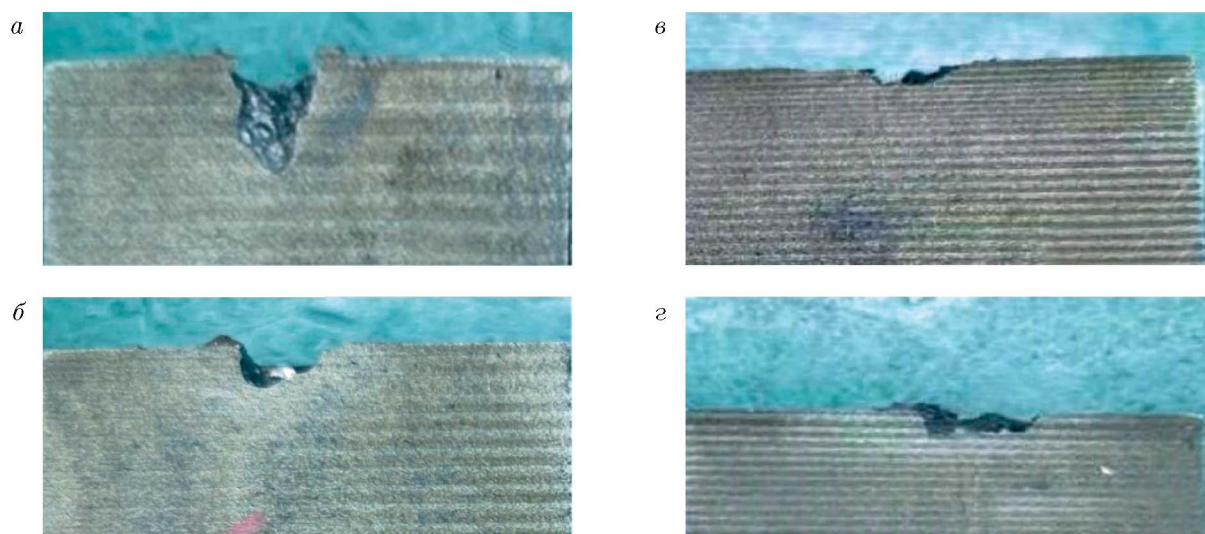


Рис. 4. Проникание струй, образованных облицовками из различных материалов



Эксперимент

Моделирование

Рис. 5. Сравнение результатов эксперимента и моделирования проникания струи PTFE в мишень

Таблица 3

Результаты экспериментов с однослойными зарядами при различных зазорах

Облицовка	h , мм	v , м/с			D , мм			H , мм		
		эксперимент	модель	ошибка, %	эксперимент	модель	ошибка, %	эксперимент	модель	ошибка, %
РА	40	8 726	9 273	−6.3	10.1	9.3	+7.9	7.9	8.6	−8.9
	50	8 537	8 985	−5.2	10.5	10	+4.8	7.5	7.7	−2.7
	60	8 035	8 642	−7.6	10.9	10.4	+4.6	6.6	6.7	−1.5
PTFE	40	7 398	7 867	−6.3	7.6	8.2	+7.9	13.2	12.2	+7.6
	50	7 285	7 628	−4.7	7.9	8.5	−7.6	12.5	11.8	+5.6
	60	6 938	7 418	−6.9	8.0	8.7	−8.8	10.6	11.6	−9.4
Сu	60	5 024	5 237	−4.2	4.2	3.9	+7.7	47.5	49.0	−3.2

согласуются, численный метод достаточно точно описывает процесс образования и проникания струи.

Для обеспечения достоверности результатов выполнено по два эксперимента для каждого условия. В статье приводятся средние значения двух экспериментальных результатов. В табл. 3 представлены средние скорости «головы» струи v и параметров проникания — диаметра кратера D и глубины проникания H на различных расстояниях h от однослойных КЗ до мишени, а в табл. 4 приведены аналогичные данные для слоевых КЗ. Анализ данных в табл. 3 и 4 показывает, что экспериментальные средние скорости v в случае как однослойных, так и слоевых зарядов меньше результатов численного моделирования. Это расхождение более выражено в случае струи из полимерного материала по сравнению с медной струей. Несоответствие между экспериментальными и численными результатами обусловлено использованием в эксперименте пластин для измерения скорости, которые были изготовлены из печатной платы толщиной ≈ 1.5 мм. Струя слегка замедлялась, когда ее «голова» проходила через пластины для измерения скорости. В численной модели такие пластины не рассматривались, поэтому результаты моделирования оказались выше.

Для анализа свойств КЗ с вкладышами из РЕЕК и с двумя 3D-печатными полимерными (PLA и CFR-PLA) вкладышами были использованы два типа структуры КЗ: однослойный заряд (см. рис. 1, а) и слоевой заряд (рис. 6). Внутренний слой заряда радиусом 11.8 мм состоял из JH-2, внешний слой — из октогена. Расстояние от КЗ до мишени равно удвоенному диаметру, т. е. 40 мм. Экспериментальные результаты представлены в табл. 5.

Таблица 4

Экспериментальные и расчетные результаты для слоевых зарядов при различных зазорах

Облицовка	h , мм	v , м/с			D , мм			H , мм		
		эксперимент	модель	ошибка, %	эксперимент	модель	ошибка, %	эксперимент	модель	ошибка, %
РА	40	8 925	9 477	−6.2	10.5	9.8	+6.7	8.1	8.7	−7.4
	50	8 577	9 138	−6.5	11.2	10.1	+9.8	7.5	7.9	−5.3
	60	—	8 929	—	12.1	11.0	+9.1	7.1	6.8	+4.2
PTFE	40	7 621	7 965	−4.5	7.8	8.2	−5.1	14.0	12.4	+11.4
	50	7 354	7 603	−3.4	8.1	8.6	−6.2	12.6	12.1	+4.0
	60	7 077	7 324	−3.5	8.1	8.8	−8.6	11.2	12.1	−8.0
Сu	60	5 258	5 521	−5.0	4.4	4.0	+9.1	50.5	52.3	−3.6

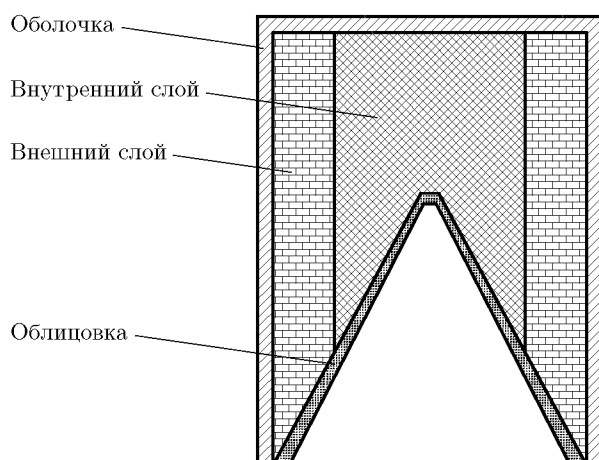


Рис. 6. Слоевая структура заряда

Таблица 5

Результаты экспериментов с зарядами с разными облицовками

Облицовка	Зазор, мм	Структура заряда	v , м/с	D , мм	H , мм
PEEK	40	Однослойный	8 279	12.6	6.4
		Слоевой	8 366	13.2	6.5
PLA		Однослойный	8 007	11.5	3.3
		Слоевой	8 128	11.6	3.5
CFR-PLA		Однослойный	7 987	13.6	5.5
		Слоевой	8 175	13.9	6.2

2.1. Влияние материала облицовки на формирование струи

Для анализа влияния материала облицовки на формирование и проникание струи выбраны два часто используемых полимера — РТФЕ и РА. В качестве контрольной группы в численном моделировании была взята облицовка из меди, что позволило изучить различия между полимерными и обычными металлическими материалами в формировании и проникании струи. Параметры модели прочности Джонсона — Кука полимерных материалов и параметры уравнения состояния приведены в табл. 6.

Процессы формирования струй из различных материалов облицовки однослойного КЗ с взрывчатым веществом ЖН-2 показаны на рис. 7. Видно четкое различие в длине струй в заданный момент времени, а именно: $РА > РТФЕ > Cu$. При этом наблюдается почти линейный рост по времени длины струй из различных материалов. Кроме того, по сравнению со струей из меди длина струй из полимерных материалов увеличивается быстрее.

На рис. 7 видно, что в процессе растяжения струй РТФЕ и РА образуются многочисленные пустоты на передних кромках, при этом «голова» струи РТФЕ фрагментирована, в то время как медная струя остается неизменно компактной. В отличие от медной струи, у струй РТФЕ и РА свойства формообразования хуже. При анализе причин считается, что различия в диаметре расширения и целостности головных частей между двумя полимерными струями могут быть связаны с изменением свойств материала, тогда как диаметр «головы» струи меди уменьшается по мере растяжения струи. По сравнению с металлическими, струи из РА и РТФЕ испытывают повышенную скорость радиального расширения после прохождения через зону высокого давления, что приводит к непрерывному увеличению их диаметра.

Изучение распределения плотности струйных потоков показывает, что, в отличие от головных частей струй, распределения плотности у песта всех трех струй удивительно похожи, что позволяет предположить, что различие в материалах облицовки в первую очередь влияет на морфологию формирования струй и минимально воздействует на пест.

Зависимости скорости головной части струй, образованных различными материалами облицовки, от времени представлены на рис. 8. Видно, что эти зависимости для трех материалов схожи: начальный рост, за ним следует постепенное уменьшение роста и в конечном итоге стабилизация. Скорость струи в основном зависит от плотности и объемной скорости звука материала облицовки. Согласно принципам, управляющим образованием струи, скорость струи увеличивается с ростом объемной скорости звука и уменьшением плотности материала. Хотя объемная скорость звука в РА и РТФЕ меньше, чем в меди, скорости генерируемых облицовками РА и РТФЕ струй были выше из-за значительно меньшей плотности, чем у медной облицовки.

Максимальные скорости головных частей струй составляют 5 781, 9 409 и 8 095 м/с у меди, РА и РТФЕ соответственно. После стабилизации струи самая высокая скорость головной части у струи РА, а самая низкая — у струи меди.

Таблица 6
Параметры модели прочности и уравнения состояния полимера

Материал	Модель прочности					Уравнение состояния			
	G , ГПа	A , МПа	B , МПа	C	n	ρ , г/см ³	γ_0	S_1	C_0 , м/с
РА	3.68	10.5	32.5	0.257	0.73	1.14	0.87	1.63	2 290
РТФЕ	2.33	15	38	0.085	0.33	2.16	0.9	1.93	1 340

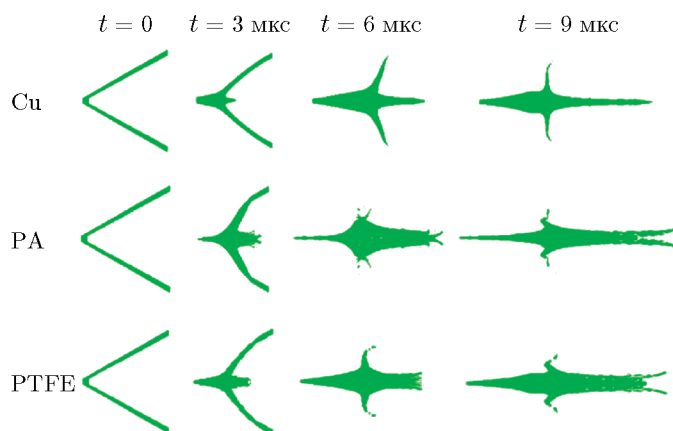


Рис. 7

Рис. 7. Процесс формирования струй из различных материалов облицовки

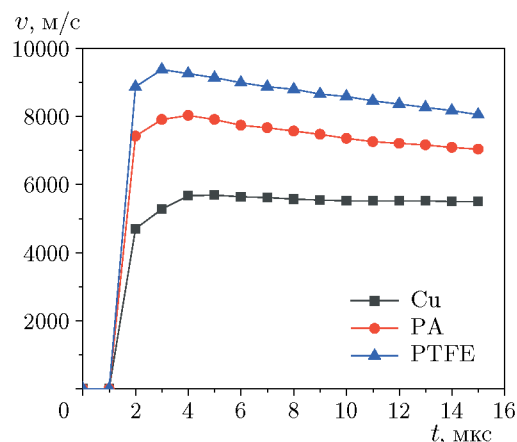


Рис. 8

Рис. 8. Скорость «головы» струй из различных материалов облицовки

2.2. Влияние зазора на формирование струи

Проведено численное моделирование процесса проникания струй PA и PTFE в мишень из Стали 45. Результаты представлены в табл. 7 — длина L , скорость «головы» v и средний диаметр D струй, сформированных при зазорах $h = 40, 50$ и 60 мм однослойным зарядом JH-2 в момент достижения мишени струей.

Процесс проникания двух полимерных струй в мишень из Стали 45 при зазоре 60 мм показан на рис. 9. Глубина проникания затруднена тем, что полимерный материал разбросан в результате разрыва и рассеивания полых кончиков двух струй. В то время как основная часть струи достигает цели, разбросанный материал создает только небольшие ямки вокруг ударного кратера. Отсутствие сплошности струи отрицательно влияет на глубину проникания. Рост зазора приводит к увеличению площади разбросанного полимерного материала струи, что усугубляет отрицательное влияние на глубину проникания. Результаты проникания струй PA и PTFE от однослойного заряда JH-2 в мишень из Стали 45 на расстояниях заряда $h = 40, 50$ и 60 мм показаны на рис. 10, а основные измеренные

Таблица 7

Материал	h , мм	L , мм	v , м/с	D , мм
PA	40	30.8	8 497	3.2
	50	37.5	8 328	3.3
	60	43.2	8 224	3.4
PTFE	40	32.7	7 525	4.6
	50	38.6	7 351	4.6
	60	45.3	7 256	4.7

Табл. 7. Характеристики струи однослойных зарядов при разных зазорах

Таблица 8

Материал	h , мм	D , мм	H , мм
PA	40	9.3	8.6
	50	10.0	7.7
	60	10.4	6.7
PTFE	40	8.2	12.2
	50	8.5	11.8
	60	8.7	11.6

Табл. 8. Результаты удара струи однослойных зарядов при разных зазорах

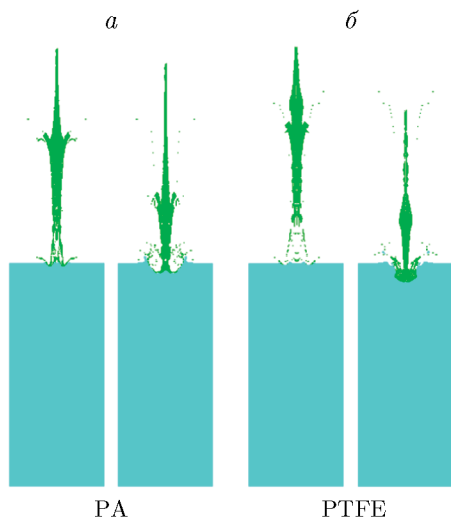


Рис. 9

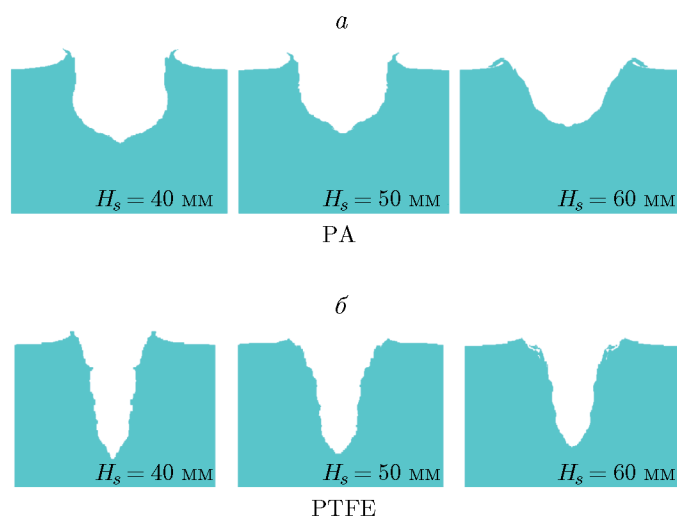


Рис. 10

Рис. 9. Процесс проникания полимерной струи в Сталь 45 при зазоре 60 мм

Рис. 10. Влияние зазора на проникание струй из PA (а) и PTFE (б)

параметры проникания полимерных струй — в табл. 8. Как видно из таблицы, данные для полимерных струй отличаются от результатов для медных струй. С ростом зазора от значения, равного удвоенному диаметру заряда, до величины утроенного диаметра глубина проникания полимерных струй уменьшается, а диаметр кратера увеличивается, что контрастирует с результатами для медных струй.

Диаметр кратеров, образуемых медными струями, как правило, наименьший, в то время как диаметр кратеров, образуемых струями PA, наибольший. При ударе в основание полости происходит радиальное рассеивание полимерных струй, в результате чего образуется кратер на плоскости удара. При формировании струи полимерный материал испытывает расширение, что приводит к изначально большему диаметру по сравнению с металлическими струями. Во время конечной фазы проникания эта характеристика расширения струи ведет к большему диаметру кратера на мишени.

2.3. Влияние структуры заряда на проникание струи

Численное моделирование проводилось для двух зарядов: базового однослойного с взрывчатым веществом JH-2 (см. рис. 1, а) и заряда из двух слоев ВВ (см. рис. 6). Кумулятивный заряд был расположен на высоте, эквивалентной 1.3 его диаметра (26 мм), и инициировался в центральной точке верхней части ВВ.

Моделирование, учитывающее слоевую структуру заряда и величину зазора (40, 50, 60 мм), проведено для исследования характеристик струй, образованных материалами PA или PTFE, а также их проникания в мишень из Стали 45. Длина L , скорость v и средний диаметр D этих струй при достижении мишени представлены в табл. 9.

Данные из табл. 8, 9 показывают, что слоевая структура КЗ с облицовками из PA и PTFE приводит к среднему увеличению длины струи соответственно на 3.7 и 3.6 %, а скорости «головы» струи — на 1.5 и 1.8 % по сравнению с однослойным зарядом.

В табл. 10 приведены результаты действия струй из различных материалов с учетом структуры заряда при трех значениях зазора. Видно, что, подобно медной струе, слоевая структура ВВ в кумулятивном заряде с полимерной облицовкой умеренно улучшает его

Таблица 9
Параметры струи слоёвых зарядов при различных зазорах

Материал	h , мм	L , мм	v , м/с	D , мм
РА	40	31.2	8 679	3.0
	50	39.1	8 421	3.1
	60	45.3	8 313	3.3
PTFE	40	34.0	7 701	4.2
	50	39.9	7 483	4.3
	60	46.7	7 354	4.4

Таблица 10
Параметры проникания струи в Сталь 45

h , мм	Материал	H , мм		D , мм	
		однослойный	слоевой	однослойный	слоевой
40	РА	8.6	8.7	9.3	9.8
	PTFE	12.2	12.4	8.2	8.2
	Cu	42.2	45.3	4.0	4.5
50	РА	7.7	7.9	10.0	10.1
	PTFE	11.8	12.1	8.5	8.6
	Cu	46.1	51.5	3.8	4.4
60	РА	6.7	6.8	10.4	11.0
	PTFE	11.6	12.1	8.7	8.8
	Cu	49.0	52.3	3.8	4.0

проникающие способности. В частности, наблюдается среднее увеличение глубины проникания приблизительно на 1.7 % для струи РА, 2.8 % для струи PTFE и 6.7 % для медной струи, а среднее увеличение диаметра каверны соответственно равно 4.0, 0.8 и 5.1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глубина проникания полимерной струи уменьшалась с увеличением зазора, в то время как диаметр кратера увеличивался.

По сравнению с медной струей полимерные струи создают на стальных мишенях кратер большего диаметра, но при этом намного меньше глубина их проникания, что свидетельствует о том, что полимерные струи больше подходят для поражения мишеней с тонкостенной защитой.

Слоевая структура кумулятивного заряда может повысить скорость и проникающую способность полимерных струй при оптимизации структуры для улучшения характеристик микрокумулятивного заряда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данное исследование выполнено по инициативе авторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Liu J. F., Long Y., Ji C., Zhong M., Liu Q.** The influence of liner material on the dynamic response of the finite steel target subjected to high velocity impact by explosively formed projectile // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — V. 109. — P. 264–275. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.07.002.
2. **Elshenawy T., Elbeih A., Li Q. M.** Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets // *Int. J. Mech. Sci.* — 2018. — V. 136. — P. 234–242. — DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.10.041.
3. **Wang Y. F., Wang Z. J., Xu Y. J., Jin Z.** The effect of cylindrical liner material on the jet formation and penetration capability of cylinder-cone-shaped charge // *Materials.* — 2022. — V. 15, N 10. — 3511. — DOI: 10.3390/ma15103511.
4. **Cui P., Wang D. S., Shi D. M., Gao X. B., Xu J. Q., Zhen J. W.** Investigation of penetration performance of Zr-based amorphous alloy liner compared with copper // *Materials.* — 2020. — V. 13, N 4. — 912. — DOI: 10.3390/ma13040912.
5. **Han J. L., Chen X., Du Z. H., Fu H. M., Jing Y. D., Yuan T., Cheng C., Du C. X., Xu L. Z.** Application of W/Zr amorphous alloy for shaped charge liner // *Mater. Res. Express.* — 2019. — V. 6. — 115209. — DOI: 10.1088/2053-1591/ab47d7.
6. **Zhao Z. Y., Liu J. X., Guo W. Q., Li S. K., Wang G. H.** Effect of Zn and Ni added in W–Cu alloy on penetration performance and penetration mechanism of shaped charge liner // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* — 2016. — V. 54. — P. 90–97. — DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.022.
7. **Guo H. G., Zheng Y. F., Yu Q. B., Ge C., Wang H.** Penetration behavior of reactive liner shaped charge jet impacting thick steel plates // *Int. J. Impact Eng.* — 2019. — V. 126. — P. 76–84. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.12.005.
8. **Wang Y. Z., Yu Q. B., Zheng Y. F., Wang H. F.** Formation and penetration of jets by shaped charges with reactive material liners // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2016. — V. 41, N 4. — P. 618–622. — DOI: 10.1002/prep.201500298.
9. **Stewart D. S., Glumac N., Najjar F. M., Szuck M. J.** Hydrodynamics computation of jet formation and penetration for micro-shaped charges // *Procedia Eng.* — 2013. — V. 58. — P. 39–47. — DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.007.
10. **Wu C., Jin Y., Zhou L., et al.** Experimental study on the mini-shaped charge penetration power // *J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance.* — 2002. — S1. — P. 153–155.
11. **Yi J. Y., Wang Z. J., Yin J. P., Chang B. H.** Numerical simulation of steel target penetration by shaped charge distended jet with high-polymer liner // *Strength Mater.* — 2017. — V. 1. — P. 27–36. — DOI: 10.1007/s11223-017-9838-8.
12. **Dong F. D., Wang Z. J., Yin J. P., Gao S. P.** Numerical simulation on initiating value of low-density jet impacting explosive with shell // *Ordnance Mater. Sci. Eng.* — 2013. — V. 36, N 4. — P. 49–51. — DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2013.04.021.
13. **Liu T. X., Yin J. P., Wang Z. J., Yi J. Y.** Numerical analysis of formation process of low-density jet // *Acta Armamentarii.* — 2014. — V. 35, S2. — P. 96–99.
14. **Cui B., Wang Z. J., Dong F. D., Chen L.** Numerical simulation on nylon jet impacting sandwich explosive // *Ordnance Mater. Sci. Eng.* — 2014. — V. 37, N 6. — P. 86–88. — DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2014.06.031.

15. **Chen J., Yin J. P., Zhang C.** Simulation study on PTFE/Cu material particle jet impacting the shelled explosive // J. Ordnance Equip. Eng. — 2018. — V. 2. — P. 52–55.
16. **Chang B. H., Yin J. P., Cui Z. Q., Liu T. X.** Numerical simulation of modified low-density jet penetrating shell charge // Int. J. Simul. Model. — 2015. — V. 14, N 3. — P. 426–437. — DOI: 10.2507/IJSIMM14(3)5.295.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

После доработки 21.05.2024.

Принята к публикации 21.08.2024.
