

05.1

Исследование высокоскоростного взаимодействия образцов из карбидовольфрамового сплава с многокомпонентной связкой со стальной преградой

© А.Н. Ищенко¹, В.В. Буркин¹, А.С. Дьячковский¹, Л.С. Марцунова², К.С. Рогаев¹, А.Ю. Саммель^{1,†}, А.Д. Сидоров¹, А.Б. Скосырский², Е.Ю. Степанов¹, А.В. Чупашев¹

¹ Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия

² Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия

† E-mail: anton_sammel@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 29 марта 2021 г.

Принято к публикации 9 апреля 2021 г.

Методом высокотемпературного спекания изготовлены образцы на основе карбидовольфрамового сплава, обладающие комплексом улучшенных функциональных свойств. Исследована проникающая способность данных ударников в стальную преграду при скорости взаимодействия 1300 м/с в сравнении с проникающей способностью массогабаритного аналога, изготовленного из сплава ВНЖ-90.

Ключевые слова: карбидовольфрамовый сплав, высокоскоростное взаимодействие, проникающая способность.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.14.51179.18678

Разработка материалов с комплексом усовершенствованных физико-механических и функциональных свойств является актуальным и практически важным направлением исследований, ориентированным на решение задачи повышения проникающей способности кинетических ударников в различные преграды, обладающие максимальными прочностными характеристиками [1]. В работе [2] было выявлено аномально глубокое проникание в стальную преграду равных по массе и диаметру ударников из прессованных опилок по сравнению со случаем монолитного стального ударника.

Исследование проникания кинетических ударников из композиционных материалов с высокопрочными наполнителями при скоростях взаимодействия выше 2500 м/с представлено в работе [3]. Показано устойчивое увеличение глубины проникания данных материалов на 32–34% по сравнению с глубиной проникания в случае сплава ВНЖ-90 (вольфрам + никель + железо с содержанием вольфрама 90%). Кроме того, было высказано предположение, что такой эффект возникает при скоростях взаимодействия выше 2500 м/с и реализуется вследствие нескольких факторов. Одним из них является низкая средняя плотность относительно монолитного сплава ВНЖ-90 и, как следствие, большая длина образца. Образцы на основе данных сплавов из-за наличия пористости имеют более низкую скорость звука, чем в случае монолитного сплава из ВНЖ-90. Вызванные ударом возмущения слабее распространяются вверх по ударнику, при этом затухание скорости при проникании происходит медленнее. В месте контакта образца с

материалом преграды из-за содержания частиц карбида проявляется абразивный эффект.

Для более детального изучения механизма разрушения ударника из композиционного материала данного класса проведено исследование высокоскоростного взаимодействия при скоростях порядка 1300 м/с.

Целью настоящей работы является сравнение проникающей способности образцов ударников из композиционных материалов на основе карбидовольфрамового сплава с проникающей способностью ударников, изготовленных из базового сплава ВНЖ-90, при высокоскоростном взаимодействии с металлическими преградами.

Сами по себе пористые материалы недостаточно прочные. Одним из вариантов повышения их прочности является легирование сплава ВНЖК (вольфрам + никель + железо + кобальт) высокопрочными компонентами типа карбидов вольфрама. Методом высокотемпературного спекания была изготовлена партия образцов ударников на основе карбидовольфрамового сплава ВНЖК, легированного карбидом вольфрама с кобальтом ВК8 при содержании последнего 75 wt.% (ВНЖК + 75 wt.% ВК8), для исследования проникающей способности ударников в стальные преграды. Исследуемые ударники из материала ВНЖК + 75 wt.% ВК8 и образец из сплава ВНЖ-90 имели одинаковый диаметр d_0 и одинаковую массу m . Их внешний вид представлен на рис. 1, *a, b*. Плотность образцов из материала ВНЖК + 75 wt.% ВК8 меньше, чем у сплава ВНЖ-90, поэтому их длины l были разными.

Для сохранения целостности образцов на основе карбидовольфрамового сплава во время ведения по каналу

Результаты экспериментов

Материал (номер образца)	Масса m , g	Плотность ρ , g/cm ³	Скорость V , m/s	Глубина кратера h , mm	Δ , %
ВНЖ-90	30.54	17.06	1283	23.80	—
ВНЖК + 75 wt.% ВК8 (№ 06-20)	30.38	12.06	1260	27.68	16.30
ВНЖК + 75 wt.% ВК8 (№ 09-20)	29.80	11.97	1273	25.54	7.31
ВНЖК + 75 wt.% ВК8 (№ 08-20)	30.24	12.10	1278	28.11	18.10

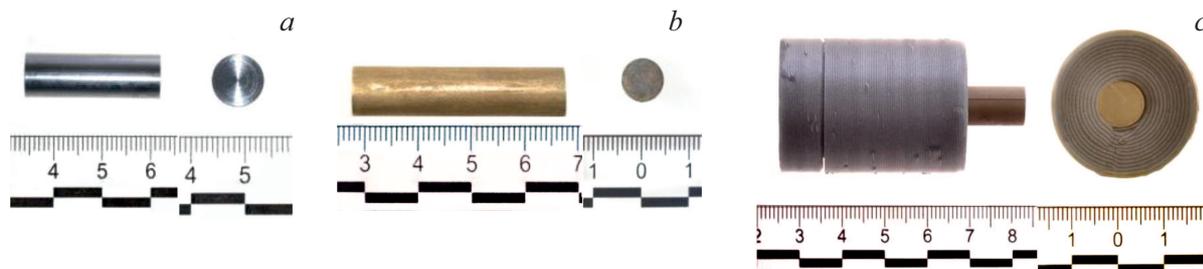


Рис. 1. Внешний вид ударника из сплава ВНЖ-90 (а), ударника из сплава ВНЖК + 75 wt.% ВК8 (b) и метаемой сборки (с).

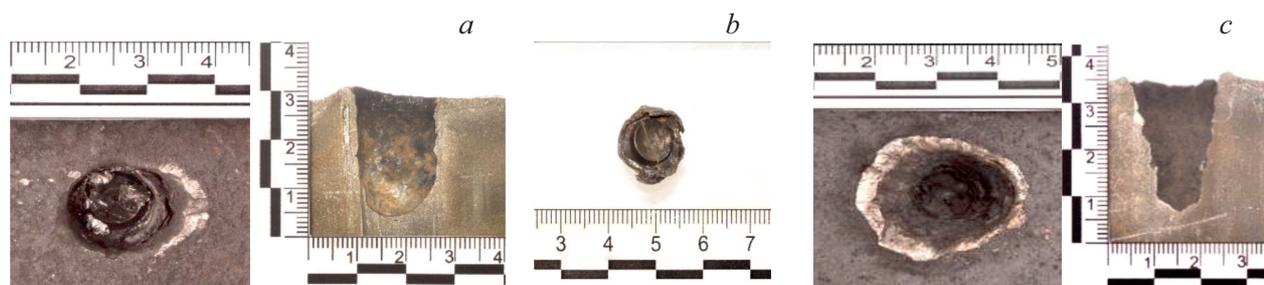


Рис. 2. а — вид кратера сверху и в разрезе в случае ВНЖ-90; б — вид остатка ударника из сплава ВНЖ-90; с — вид кратера сверху и в разрезе в случае ВНЖК + 75 wt.% ВК8.

ствола до взаимодействия со стальной преградой использовалось оригинальное ведущее устройство (рис. 1, с).

Данное ведущее устройство изготавливалось с использованием 3D-принтера по технологии печати FDM. В качестве материала для печати использовался пластик SBS. Он имеет оптимальные характеристики, такие как низкая усадка и высокая прочность. Ведущее устройство, изготовленное на 3D-принтере, позволяет довести исследуемые образцы до стальной преграды целыми.

Исследования проникающей способности ударников ВНЖК + 75 wt.% ВК8 в сравнении с ударниками из сплава ВНЖ-90 проводились на баллистической установке калибром 30 mm [4]. Исследуемые образцы ударников взаимодействовали со стальной преградой толщиной 45 mm в диапазоне скоростей 1260–1283 m/s.

После взаимодействия испытываемых образцов со стальными преградами образовывался кратер, глубина которого в дальнейшем измерялась с помощью электронного штангенциркуля в подставке.

В таблице представлены результаты проведенных экспериментов, в том числе измеренные глубины образо-

вавшихся кратеров. Сравнение проникающей способности исследуемых образцов ВНЖК + 75 wt.% ВК8 и базового сплава из ВНЖ-90 проводилось по относительной разнице глубин образовавшихся кратеров Δ .

Образовавшийся в стальной преграде кратер при использовании образца из сплава ВНЖ-90 показан на рис. 2, а. Ударник из ВНЖ-90 не сработался полностью и остался в преграде. На рис. 2, б представлена оставшаяся часть ударника, масса которой составила 14.02 g. Отчетливо видно, что форма головной части ударника стала похожа на „грибок“.

Результаты испытаний образцов ударников на основе карбидовольфрамового сплава ВНЖК + 75 wt.% ВК8 сравнивались с результатами испытаний ударников из базового сплава ВНЖ-90 при близких скоростях, равных массах и диаметрах. На рис. 2, с показаны кратеры в стальной преграде после взаимодействия с исследуемыми образцами из сплава ВНЖК + 75 wt.% ВК8.

В результате изучения поперечного сечения кратеров было обнаружено, что в них нет оставшейся части ударника из материала ВНЖК + 75 wt.% ВК8 в отличие от

образца из базового сплава ВНЖ-90. Также установлены различия в форме образовавшегося кратера. В случае образца из ВНЖ-90 кратер имеет цилиндрическую форму по всей глубине. В нижней части кратера из-за того, что ударник приобретает вид грибка, наблюдается полукруглая форма основания кратера. Для исследуемых образцов из материала ВНЖК + 75 wt.% ВК8 поверхность стенок кратера имеет неровный вид, что указывает на интенсивный вынос материала ударника при кратерообразовании. Форма кратера имеет явный вид конуса.

На основе полученных результатов можно предположить, что при высокоскоростном взаимодействии образцов ударников из карбидовольфрамового сплава ВНЖК + 75 wt.% ВК8 при скорости порядка 1300 м/с со стальной преградой реализуется механизм их разрушения, описанный в работе [3] при скоростях взаимодействия порядка 2500 м/с, который обеспечивает их „самозатачивание“. Реализация процесса „самозатачивания“ ударника по первым результатам, полученным в настоящей работе, приводит к повышению его проникающей способности от 7.31 до 18.10%. Можно предположить, что при существенном снижении скорости удара механизм взаимодействия ударника с преградой изменяться не будет.

Таким образом, проведено сравнительное экспериментальное исследование высокоскоростного взаимодействия образцов из карбидовольфрамового сплава ВНЖК + 75 wt.% ВК8 и сплава ВНЖ-90 со стальной преградой при скорости порядка 1300 м/с. Предварительный сравнительный анализ показал прирост проникающей способности образцов из сплава ВНЖК + 75 wt.% ВК8 от 7.31 до 18.10% (в сравнении с образцами ударников из ВНЖ-90). На основании полученных данных сделан предварительный вывод, что при скорости взаимодействия карбидовольфрамового сплава ВНЖК + 75 wt.% ВК8 со стальной преградой порядка 1300 м/с механизм взаимодействия аналогичен представленному в работе [3].

Финансирование работы

В работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Л Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Б.В. Румянцев, Письма в ЖТФ, **42** (17), 87 (2016).
- [2] С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, К.И. Козорезов, А.Н. Табаченко, М.В. Хабибуллин, Н.Т. Югов, ДАН, **355** (2), 192 (1997).

- [3] А.Н. Ищенко, С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, В.В. Буркин, К.С. Рогаев, А.Ю. Саммель, А.Б. Скосырский, А.Н. Табаченко, Н.Т. Югов, Письма в ЖТФ, **43** (17), 41 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44945.16755
- [4] В.А. Бураков, В.В. Буркин, А.С. Дьячковский, А.Н. Ищенко, Л.В. Корольков, И.В. Майстренко, К.С. Рогаев, А.Ю. Саммель, А.Д. Сидоров, Е.Ю. Степанов, В.М. Фуфачев, А.В. Чупашев, *Баллистический ударный стенд*. Патент на изобретение № 180958 (02.07. 2018).