УДК 621.7.044.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-23-27

*Е. В. Петров, канд. техн. наук, В. С. Трофимов, д-р физ.-мат. наук, В. О. Копытский, м. н. с.***ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ПРЕГРАДЫ ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРОШКОВ W И TiC***ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, petrov@ism.ac.ru*

Исследован поверхностный слой преграды из стали У8 после высокоскоростного воздействия потоком частиц порошков вольфрама и карбида титана. После анализа кадров скоростной фотосъемки установлены средние скорости движения частиц порошков вольфрама и карбида титана. Показано, что ударно-волновое нагружение материала преграды и воздействие частиц, разогнанных энергией взрыва, обеспечивают изменение физико-механических свойств поверхности и объема материала стальной преграды.

Ключевые слова: ударная волна, соударение, преграда, поток частиц, скорость движения, упрочнение

*E. V. Petrov, V. S. Trofimov, V. O. Kopytskiy***STUDY OF STEEL BARRIER SURFACE AFTER HIGH-SPEED EXPOSURE OF W AND TiC POWDERS***Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, petrov@ism.ac.ru*

The surface layer of an obstacle made of U8 steel is investigated after high-speed exposure to a flow of powder particles. After analyzing the frames of high-speed photography, the average velocities of movement of particles of tungsten and titanium carbide powders were determined. It is shown that the shock-wave loading of the barrier material and the effect of particles accelerated by the explosion energy provide a change in the physical and mechanical properties of the surface and the volume of the steel barrier material.

Keywords: shock wave, impact, barrier, particle flow, travel speed, hardening

Ударные волны являются уникальным средством создания сверхвысоких давлений, которые позволяют воспроизвести состояние вещества в экстремальных условиях и получить новые свойства материалов. С помощью ударной волны осуществляется передача механической энергии вблизи источника импульсного нагружения [1]. Одним из наиболее распространенных способов возбуждения ударных волн является использование взрывчатых веществ [2]. Преимуществом взрывного нагружения материала является достижение давлений за короткий промежуток времени и возможности получения ударных волн с большим диапазоном параметров.

В настоящее время особый интерес представляют исследования с совмещением ударно-волнового нагружения порошковых

систем [3] и введение легирующих добавок в объем обрабатываемого материала [4]. Одним из таких способов является обработка металлов потоком высокоскоростных частиц в режиме сверхглубокого проникания частиц [5, 6], при котором происходит образование покрытия на поверхности, внедрение частиц в поверхностный слой, упрочнение поверхностного слоя и изменение свойств в объеме преграды. Изменения структуры в материале, после высокоскоростного воздействия потока частиц, складываются из действия ударных волн при соударении с поверхностью преграды [7, 8] и воздействия частиц порошка с поверхностным слоем преграды [9, 10].

В настоящей работе представлено исследование свойств поверхностного слоя преграды из инструментальной стали У8 после

высокоскоростного соударения потока частиц вольфрама и карбида титана.

Стальная преграда представляла собой цилиндрический образец диаметром 25 мм и высотой 30 мм, которая подвергалась обработке потоком частиц вольфрама ($d = 10-16$ мкм) и карбида титана ($d = 40-60$ мкм). Размер частиц порошков определялся на лазерном анализаторе частиц «Micro Sizer 201».

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. Исследуемый образец помещался в направляющий канал из плексигласа, сверху которого располагалось фиксирующее кольцо с порошком насыпной плотностью массой 5 г.

На кольцо устанавливалась пластина-отсекатель, для того чтобы продукты детонации снаружи направляющего канала не закрывали обзор для четырехканальной электронно-оптической камеры Наногейт-4БП. Сверху пластины устанавливался заряд взрывчатого вещества, в качестве которого использовался гексоген насыпной плотности.

Между порошком и зарядом взрывчатого вещества оставалась воздушная полость, наличие которой позволяет получить плоский фронт и обеспечить длительное нагружение порошка ударной волной прямоугольного профиля, сообщаящей частицам порошка необходимый импульс [11].

Рис. 1. Схема эксперимента по воздействию частиц порошков на стальную преграду

Рис. 2. Движение частиц:

W: а – 1-й кадр; б – 2-й кадр; в – 3-й кадр; TiC: г – 2-й кадр; д – 3-й кадр, разогнанных взрывчатое веществом, внутри направляющего канала; ПД – продукты детонации

При детонации ударная волна и поток продуктов детонации проходят через частицы порошка, разгоняют их и вместе с ними воздействуют на исследуемый образец. Полный импульс газодинамического потока перед частицами порошка значительно увеличивается за счет фокусировки ударных волн. При оценке параметров взаимодействия частиц потока со стальной преградой их взаимодействие рассматривалось с использованием уравнения сохранения импульса $P = \rho_0 Du$, и линейного уравнения ударной адиабаты материала частиц $D = a + bu$. При соударении потока частиц с поверхностью расчетное давление составило: для порошка вольфрама $P = 78,7$ ГПа; для порошка карбида титана $P = 46,2$ ГПа.

Электронно-оптическая камера позволяет снимать четыре кадра за один проведенный эксперимент. Фотографии скоростной съемки движения частиц вольфрама и карбида титана приведены на рис. 2.

Время задержки начала съемки первого кадра (рис. 2, а) после начала детонации взрывчатого вещества, которое необходимо для того чтобы, продукты детонации достигли частиц порошка, находящихся в фиксирующем кольце, составило 7 мкс. Время

задержки между кадрами фотосъемки составило 5 мкс. После анализа кадров фотосъемки (рис. 2, а, б, в) определено, что частицы вольфрама начинают движение примерно со скоростью 2,6 км/с. Затем продукты детонации взрывчатого вещества начинают обгонять частицы порошка и облако с продуктами детонации и частицами вольфрама растягивается. Было получено, что поток частиц вольфрама движется в среднем со скоростью 2,4 км/с, что коррелирует с ранее полученными результатами. Анализ кадров скоростной фотосъемки (рис. 2, г, д) показал, что частицы карбида титана начинают движение примерно со скоростью 5,2 км/с и средняя скорость их движения составила 4,9 км/с.

Для проведения исследований, полученные после экспериментов образцы, разрезались по оси вдоль направления нагружения потоком частиц порошков. Исследование микроструктуры образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения «Zeiss Ultra plus». Твердость образцов в исходном состоянии и после обработки высокоскоростным потоком частиц измеряли на твердомере ПМТ-3 под нагрузкой 100 г.

а

б

Рис. 3. Структура полученных покрытий на поверхности стали У8 после соударения с порошком:

а – вольфрама; б – карбида титана

В результате воздействия высокоскоростного потока частиц на преграду наибольшая часть частиц остается в приповерхностной зоне, формируя неравномерные по толщине покрытия. Из рис. 3 видно, что покрытия состоят из частиц размер, которых меньше исходного размера частиц порошков.

При СЭМ исследовании с помощью электронного микроскопа приповерхностной зоны (рис. 3, а) видно, что покрытие имеет толщину от 10 до 50 мкм по ширине образца и в его объеме наблюдаются микропоры и частицы вольфрама. Между получившимся покрытием из частиц порошка вольфрама и стальной преградой формируется переходный слой толщиной 2-3 мкм, который состоит из интерметаллидного соединения $Fe-W$. Покрытие, полученное после соударения с порошком карбида титана (рис. 3, б), получается волнообразным, и толщина по-

крытия варьируется от 10 до 30 мкм. Из рисунка 3 видно, что на образование покрытия на поверхности образца оказывает влияние физические свойства метаемых порошков.

Исследование распределения микротвердости по глубине образцов после высокоскоростного соударения с частицами порошков показало, что микротвердость максимально увеличивается в приповерхностном слое на глубине 2-6 мм по сравнению с исходной микротвердостью преграды (рис. 4). Затем значения микротвердости снижаются по мере удаления от поверхности, и примерно на глубине 20 мм микротвердость равна микротвердости исходных образцов. Такое распределение микротвердости по глубине преграды связано с уменьшением воздействия ударной волны, продуктов детонации и частиц порошков по глубине на свойства исследуемого материала.

Результаты измерения микротвердости в приповерхностном слое преграды стали У8

Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине образцов стали У8 после соударения с частицами порошков W и TiC

Значения микротвердости по глубине преграды стали У8 после соударения с частицами вольфрама и карбида титана

	Твердость по Виккерсу (HV)			
	2 мм	4 мм	6 мм	8 мм
TiC	345-350 ↑66%	270-275 ↑30%	340-345 ↑64%	255-260 ↑22%
W	295-300 ↑41%	320-325 ↑53%	260-265 ↑25%	285-290 ↑37%
сталь У8	205-210			

после высокоскоростного воздействия потока исследуемых частиц представлены в таблице.

Максимальное упрочнение поверхностного слоя преграды после соударения: с частицами карбида титана происходит на глубине 2 мм и увеличивается на 66 %; с частиц вольфрама происходит на глубине 4 мм и увеличивается на 53 % по сравнению с микротвердостью исходной преграды.

Заключение

Исследование поверхностного слоя стальной преграды после высокоскоростного воздействия потоками частиц порошков вольфрама и карбида титана показало, что использование порошков с различными физическими свойствами (плотность, размер частиц и т.д.) при одинаковых условиях проведения экспериментов приводит к существенному отличию характера образования покрытия на поверхности преграды. Исследование упрочнения по глубине образцов после соударения с частицами порошков показало, что твердость увеличивается в приповерхностном слое на глубине 2–6 мм, а затем снижается по мере удаления от поверхности, и стремится к исходной твердости стальной преграды. Такое распределение твердости по глубине преграды связано с уменьшением воздействия ударной волны, продуктов детонации и частиц порошков по глубине на свойства исследуемого материала. Ударно-волновое нагружение материала и воздействие высокоскоростных частиц обеспечивают изменение физико-механических свойств поверхности и объема материала стальной преграды.

Библиографический список

1. Андреев, С. Г. Физика взрыва и удара / С. Г. Андреев, А. В. Бабкин, Ф. А. Баум и др.; под. ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд. – М.: Физматлит, – 2006. – 304 с.
2. Эпштейн, Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом / Г. Н. Эпштейн. – М.: Металлургия, – 1988. – 280 с.
3. Saikov, I. V. Investigation of shock-wave initiation in metal-teflon powder mixtures / I. V. Saikov, M. I. Alymov, S. G. Vadchenko, I. D. Kovalev // Letters on materials. – 2017. – Vol. 7. – №4. – P. 465-468.
4. Марукович, Е. И. Преобразование литой углеродистой стали в композиционный материал / Е. И. Марукович, С. М. Ушеренко, Д. Яздани-Черати, Ю. С. Ушеренко // Литые и металлургия. – 2019. – №4. – С. 100-106.
5. Usherenko, Yu. High-Energy Method of Transformation of Casting Metals and Alloys to the Composite Materials / Yu. Usherenko, S. Usherenko, J. Yazdani // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 721. – P. 290-294.
6. Роман, О. В. Эффект сверхглубокого проникновения. Современное состояние и перспективы / О. В. Роман, С. К. Андиленко, С. С. Карпенко, Г. С. Романов, В. А. Шилкин // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 4. – С. 187-199.
7. Зельдович, В. И. Структурные изменения в железоникелевых сплавах, вызванные действием высокоскоростного потока порошковых частиц. 1. Эффекты ударноволнового нагружения / В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, И. В. Хомская, А. Э. Хейфец, С. М. Ушеренко, О. А. Дыбов // Физика металлов и металловедение. – 2001. – Т. 91. – № 6. – С. 72-79.
8. Кирсанов, Р. Г. Особенности распределения твердости инструментальных сталей по объему в зависимости от угла падения потока частиц / Р. Г. Кирсанов, Е. В. Петров, А. Л. Кривченко // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 6. – С. 43-46.
9. Зельдович, В. И. Структурные изменения в железоникелевых сплавах, вызванные действием высокоскоростного потока порошковых частиц. 2. Эффекты сверхглубокого проникновения / В. И. Зельдович, И. В. Хомская, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, С. М. Ушеренко, О. А. Дыбов // Физика металлов и металловедение. – 2002. – Т. 93. – № 5. – С. 86-94.
10. Зильбербранд, Е. Л. Микроструктура стальных преград, обработанных высокоскоростным потоком частиц / Е. Л. Зильбербранд, Б. В. Румянцев, М. Д. Толкачев, С. М. Ушеренко // Письма в журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – № 4. – С. 89-94.
11. Алексенцева, С. Е. Исследование особенностей обработки металлов и сплавов высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва канальных зарядов, и другими динамическими методами / С. Е. Алексенцева, А. Л. Кривченко // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2013. – № 2 (38). – С. 71-78.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00553 а