

# Материаловедение

УДК 621.762

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОТОКОМ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТИЦ, РАЗОГНАННЫХ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА КАНАЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ, И ДРУГИМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

*С.Е. Алексеенцева, А.Л. Кривченко*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Исследованы различные ударно-волновые схемы динамической обработки металлов высокоскоростным потоком дискретных частиц. Исследована микроструктура и прочностные характеристики матрицы. Сделана оценка проникающей способности частиц при различных динамических режимах нагружения металлов и сплавов. Выявлено влияние значений параметров динамического нагружения и ударно-волновых схем на возможность аномально глубокого проникания в материалы порошковых частиц, метаемых за счет энергии взрыва. Даны сравнительные оценки однородности обработки материалов частицами при различных схемах динамического нагружения.*

**Ключевые слова:** *поток дискретных частиц, динамическое микролегирование, высокоскоростное метание, давление соударения, ударные волны, деформация.*

Одним из перспективных инновационных направлений является аномально глубокое проникание в материалы дискретных частиц, приобретающих энергетический импульс за счет воздействия плазмы, ударной волны, электрических и магнитных полей и др. [1]. Среди данных методов эффект сверхглубокого проникания частиц (СГПч), разогнанных ударной волной, дает максимально большие глубины проникания частиц – до 1000 диаметров ударников при условии, что обработка ведется потоком частиц, а максимально глубокое проникание обеспечивается в интервале дисперсности частиц от десятка до сотен микрометров и скоростей метания от ~1 до 3 км/с при давлении соударения около 15 ГПа [2].

Эффект СГПч реализуется путем метания частиц по двум основным ударно-волновым схемам: расположение порошковой навески частиц в кумулятивной выемке заряда взрывчатого вещества (ВВ) [2] и торцевое метание частиц [3].

В данной работе авторами выявлено также аномально глубокое проникание дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва канальных зарядов ВВ, и другие особенности методов обработки металлов и сплавов высокоскоростным потоком частиц.

---

*Светлана Евгеньевна Алексеенцева (к.ф.-м.н.), доцент кафедры «Технология твердых химических веществ».*

*Александр Львович Кривченко (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Защита в чрезвычайных ситуациях».*

## Методика исследования

Изучение структуры и свойств материалов, подвергнутых ударно-волновой обработке высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных канальным зарядом ВВ, проводилось на модельном материале – техническом железе.

В качестве материала частиц использованы порошки высокопрочных соединений и элементов  $TiB_2$ ,  $TiC+Ni$  средней дисперсностью от 10 до 160 мкм, позволяющих внести упрочняющий эффект для исходной матрицы.

Концентрация проникающих частиц была определена на рентгеновском микроанализаторе Superprobe JСХА – 733, чувствительность которого достигает 0.0001 % концентрации элементов по массе, что позволяет определять частицы дисперсностью до 0.5 мкм.

Элементный химический состав участков матрицы железа осуществлялся методом микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390А с приставкой Jeol JED-2200. Концентрацию компонентов определяли как среднее значение из 4 ÷ 5 локальных измерений на различных участках матрицы послойно.

Микротвердость матрицы железа после обработки и в исходном состоянии определялась на микротвердомере ПМТ-3.

Подготовка шлифов матрицы для исследований включает операции шлифования и полирования, обеспечивая микротвердость  $Ra \leq 0.32$  мкм. Для выявления микроструктуры матрицы проведено травление шлифов в 3%-м водном растворе  $HNO_3$ . Исследование микроструктуры проведено с использованием оптического микроскопа.

## Результаты исследований

Метод упрочняющей обработки металлов и сплавов потоком порошковых частиц, разогнанных энергией взрыва канальных зарядов ВВ, с целью упрочнения и повышения износостойкости поверхности изделий достаточно известен. В данной работе проведены исследования проникающей способности частиц и объемного микролегирования матрицы, ее микроструктуры и свойств.

Схема установки, реализующей данный метод, показана на рис. 1.

Заряд ВВ имеет канальную конструкцию с соотношением диаметра канала к диаметру заряда порядка 0.3. Обеспечивает скорость потока 3 – 3.5 км/с при давлении соударения 28 – 30 ГПа.

Для упрочнения были использованы образцы арможелеза толщиной 6 и 7 мм диаметром 24 мм. Отжиг исходного образца не проводился, так как неоднородные структуры матрицы благоприятствуют anomalно глубокому прониканию частиц [2]. Частицы, метаемые по данной схеме, порошкообразные  $TiC$ , плакированный  $Ni$ , и  $TiB_2$  дисперсностью соответственно 160 и 10 мкм.

Проникание частиц в объеме матрицы при обработке  $TiC+Ni$  очень незначительно, отдельные следы наблюдаются с концентрацией до 0.01 %  $Ti$  на глубине 3-4 мм.

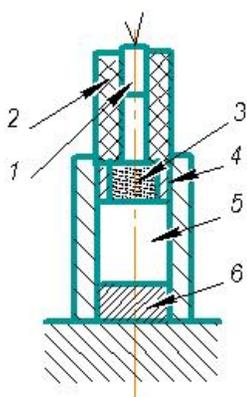


Рис. 1. Схема установки обработки материалов высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва канальных зарядов ВВ:

1 – детонатор; 2 – канальный заряд; 3 – навеска порошковых частиц; 4 – капсула-демпфер навески частиц; 5 – ограничивающий канал; 6 – металлическая матрица

Исследование проникающей способности  $TiB_2$  показало наличие данных элементов на глубине 4-6 мм с концентрацией 0.05 - 0.1 % Ti. На поверхности образца концентрация титана составляет 10-18 %.

После обработки потоком частиц наблюдается значительное измельчение ферритовых зерен с исходного 50-100 мкм до 30-40 мкм в верхних слоях (на глубине 1-2 мм). В направлении от поверхности к тыльной стороне образцов идет уменьшение размеров зерна в среднем на 5 мкм (рис. 2).

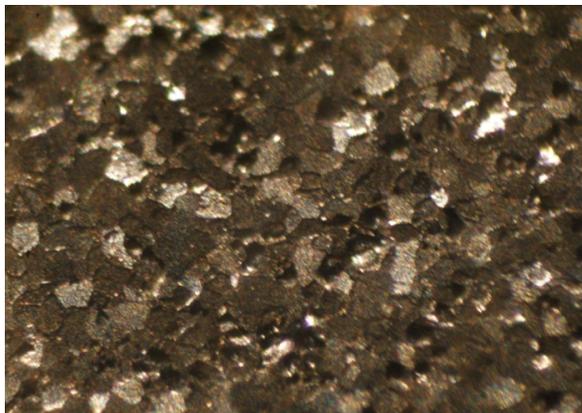


Рис. 2. Микроструктура технического железа, обработанного потоком частиц  $TiB_2$ , которые разогнаны энергией взрыва канальных зарядов ВВ

Прочностные характеристики при данном методе обработки в 3 и более раз увеличивают свои значения по сравнению с исходным состоянием, как видно из рис. 3. Так, микротвердость в приповерхностных слоях составляет 630 МПа и увеличивается на глубине от 4 мм и далее к тыльной поверхности образца.

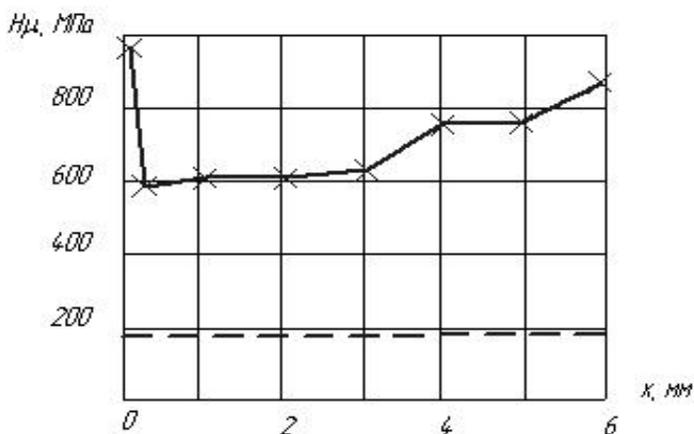


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине образца технического железа, обработанного потоком частиц диборида титана, которые разогнаны энергией взрыва канальных зарядов ВВ

Как видно из рис. 3, показатели микротвердости хорошо коррелируют с данными о наличии проникающих частиц в области повышенной микротвердости. Распространение же только ударной волны в материалах показывает лишь монотонное ос-

лабление действия ударной волны от поверхности вглубь материала и как следствие снижение упрочняющего действия, степени измельчения зерна, значений твердости и прочности [5].

Проведены эксперименты по обработке материалов высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва канальных зарядов ВВ, по двум вариантам: с одинарной и удвоенной массой навески порошков  $TiC+Ni$  и  $TiB_2$ . Обработка по 1-му варианту обеспечивает более высокую равномерность плотности распределения микрократеров по поверхности образца, что косвенно характеризует однородность микролегирования (рис. 4, 5).

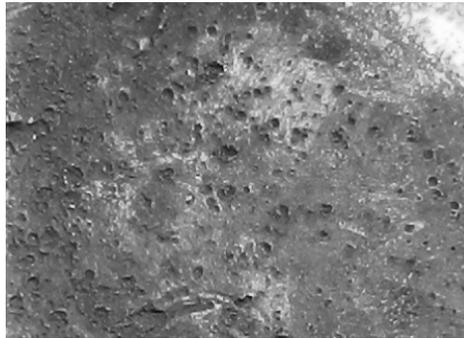


Рис. 4. Поверхность образца технического железа, обработанного потоком частиц диборида титана, которые разогнаны энергией взрыва канальных зарядов ВВ

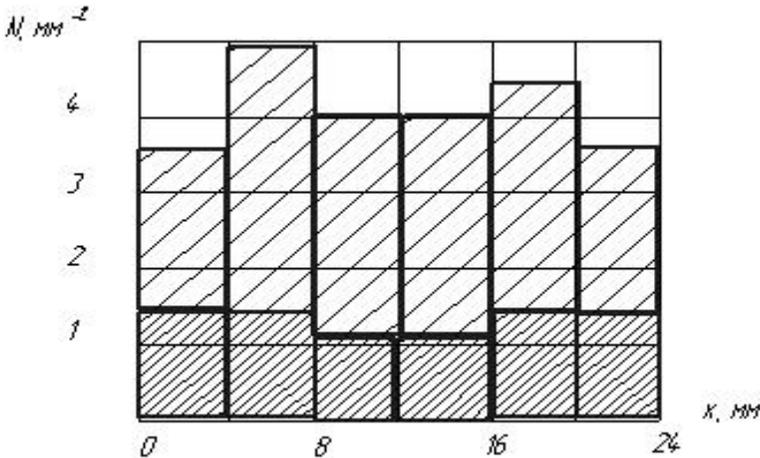


Рис. 5. Распределение микрократеров на поверхности образца железа, обработанного потоком частиц диборида титана, которые разогнаны энергией взрыва канальных зарядов ВВ:

 кратеры размером ~100 мкм; 
  кратеры размером ~200-300 мкм

Таким образом, обработка материалов высокоскоростным потоком порошковых частиц, разогнанных энергией канальных ВВ, обеспечивает anomalously глубокое проникание частиц и может быть использована для разработки композиционных дисперсноупрочненных материалов.

Кроме того, распределение микрократеров на поверхности материалов, обработанных высокоскоростным потоком частиц, мало изучено в других динамических схемах, хотя значительно влияет на качество обработки. Так, имеется сверхглубокое проникание частиц по ударно-волновой схеме торцевого метания частиц через воздушный зазор [3]. Данная схема реализуется в рамках указанных выше режимов СГПч (рис. 6).

Проведены исследования возможности реализации эффекта аномально глубокого проникания частиц под различными углами обстрела дискретными частицами углеродистой стали (0.8 % С). Углы обстрела – это направление обстрела соосно оси образца ( $0^\circ$ ) и под углом между направлением обстрела и осью образца  $30^\circ$  и  $45^\circ$  [4].

Произведено метание частиц вольфрама дисперсностью около 10 мкм и нитридом титана средней дисперсностью 40 мкм. Проникающая способность частиц вольфрама составляет около 17 мм при всех углах обстрела, а нитрида титана – 15 мм.

Основное отличие в микроструктуре и свойствах, которые наблюдаются при различных углах обстрела, – это наличие значительных максимумов микротвердости в центральной части образцов для углов метания  $0^\circ$  и  $30^\circ$  и выравнивание значений микротвердости по всей площади поперечного сечения матрицы при углах метания  $45^\circ$ . Максимальный размах в увеличении микротвердости в центре наблюдается на глубине 4 мм (табл. 1).

Данные изменения объясняются жестким ударным взаимодействием высокоскоростных элементов при нормальном соударении (или небольших углах обстрела) и формировании боковых отраженных волн разрежения, которые снижают эффект упрочнения у боковой поверхности.

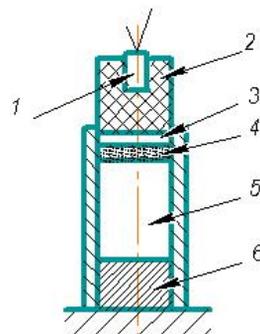


Рис. 6. Схема установки обработки материалов высокоскоростным потоком дискретных частиц, метаемых торцевой поверхностью заряда ВВ через воздушный зазор: 1 – детонатор; 2 – заряд; 3 – воздушный зазор; 4 – навеска порошковых частиц; 5 – ограничивающий канал; 6 – металлическая матрица

Таблица 1

**Изменение микротвердости стальной матрицы в зависимости от угла метания высокоскоростным потоком дискретных частиц**

Углы метания частиц	Метание частиц вольфрама			Метание частиц нитрида титана		
	max $H_{\mu}$ , МПа, в центре среза	min $H_{\mu}$ , МПа, у боковой поверхности	$\Delta H_{\mu}$ , МПа	max $H_{\mu}$ , МПа, в центре среза	min $H_{\mu}$ , МПа, у боковой поверхности	$\Delta H_{\mu}$ , МПа
$0^\circ$	2300	2150	150	2500	1950	550
$30^\circ$	2400	2250	150	2950	2000	950
$45^\circ$	2350	2250	100	2600	2250	350

\*Исходная микротвердость составляет  $H_{\mu} = 1800$  МПа.

При метании с большими углами обстрела реализуется удар по касательной, который при значениях более  $45^\circ$  может приводить даже к рикошету, скольжению отдельных частиц по поверхности. При больших углах метания частиц имеет место также сглаживающее действие интерференции падающей ударной волны и боковой отраженной волны, которое выравнивает прочностные свойства материала по всему

поперечному сечению образцов.

Объемное микролегирование металлов и сплавов по ударно-волновой схеме торцевого метания частиц через воздушный промежуток [3] реализует эффект СГПч и обеспечивает достаточно однородное поле кратерообразования, особенно мелких кратеров (рис. 7), которое характеризует поле распределения проникающих частиц при метании по нормали.

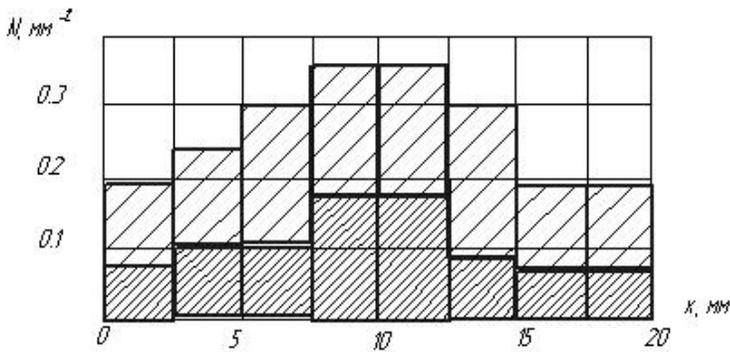


Рис. 7. Распределение микрократеров на поверхности образцов железа, обработанного путем торцевого метания через воздушный промежуток потока частиц вольфрама:

кратеры размером ~200 мкм; 
 кратеры размером ~500 мкм

Не изучалось распределение микрократеров при метании порошковых частиц в металлические матрицы по первой схеме СГПч-зарядом взрывчатого вещества, в нижнем срезе которого располагается навеска порошка в кумулятивной выемке [2]. Но изучен процесс формирования кумулятивной струи в ускорителе порошковых частиц, изначально используемый С.М. Ушеренко с сотрудниками (рис. 8).

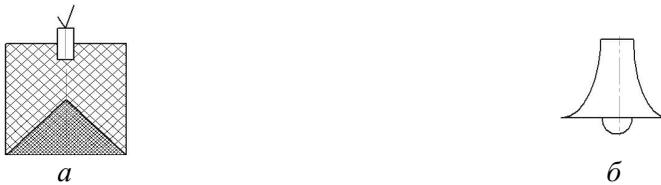


Рис. 8. Ускоритель порошковых частиц для реализации эффекта СГПч:  
 а – конструкция ускорителя, б – формирование потока частиц

Экспериментально рентгеноимпульсной фотосъемкой определено развитие потока частиц [6]. Через 30 мкс после инициирования заряда ВВ четко видно формирование всех составляющих кумулятивной струи – это струя, пест и основная масса частиц (воронка). При этом скорость струи ~1600 м/с, скорость основной массы ~800 м/с. В данном временном диапазоне 10-30 мкс проводится обработка металлов и сплавов для достижения СГПч.

В целом разработка технологий динамического объемного микролегирования металлов и сплавов за счет аномально глубокого проникания дискретных порошковых частиц опирается на возможности различных ударно-волновых схем по режимам метания частиц, давлению и времени соударения частиц с матрицей, равномерной плотности распределения частиц при взаимодействии с поверхностью матрицы (кратерообразования) и распределении концентрации проникших частиц. Обработка материалов с использованием канальных зарядов находит свое место среди данных методов (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что действительно активное проникание материала метаемых в потоке порошковых частиц идет в интервале скоростей 1-3 км/с и давлений соударения 10-15 ГПа. В верхней скоростной границе имеем небольшую концентрацию проникших частиц, но хороший эффект упрочнения (см. рис. 3).

Таблица 2

**Характеристики ударно-волновых схем обработки матрицы технического железа высокоскоростным потоком порошковых частиц**

Ударно-волновая схема нагружения матрицы	Скорость частиц, км/с	Давление соударения потока частиц с матрицей, ГПа	Скорость деформирования матрицы, с <sup>-1</sup>	Концентрация проникающих частиц, % масс.	Коэффициент увеличения микротвердости матрицы
Метание частиц кумулятивной струей (СППч)	1 – 3	10 – 15	10 <sup>6</sup>	1.3 – 1.7*	1.2 – 1.4
Торцевое метание через воздушный зазор	1 – 2.5	10 – 12	10 <sup>6</sup>	0.8 – 0.9	1.2 – 1.3
Метание частиц канальными зарядами ВВ	3 – 3.5	28 – 30	10 <sup>7</sup>	0.05 – 0.1	3 – 4

\*Максимальные значения по данным [2].

Данный интервал динамических режимов нагружения материалов около 10 – 30 ГПа обоснованно выделяется в большом объеме исследовательских работ, проводимых разными авторами по высокоскоростному динамическому нагружению металлов. Так, зафиксировано, что давление ударной волны порядка 30 ГПа и более является некоторой границей – это максимум микротвердости или незначительное уменьшение для ряда металлов [7]. Воздействие ударной волны на металлы в интервале 30 – 50 ГПа для многих металлов уже не повышает упрочнения. В данном интервале давлений также идет «замораживание» коэффициента массопереноса [7].

Таким образом, целостная задача дисперсионного упрочнения материалов может решаться формированием оптимальных условий по совокупности необходимой доли объемного микролегирования материалов и в целом упрочнения за счет использования той или иной динамической схемы нагружения.

**Выводы по работе**

1. Выявлено аномально глубокое проникание порошковых частиц на глубину 400 – 600 диаметров частиц при обработке технического железа потоком дискретных частиц TiB<sub>2</sub> при скорости метания 3 – 3.5 км/с, давлении соударения ~30 ГПа путем метания частиц энергией взрыва канальных зарядов ВВ.

2. Исследования микроструктуры и прочностных свойств технического железа показали увеличение микротвердости в 3 и более раз от исходного значения, измельчение зерна до – 10 – 20 мкм.

3. Проведена оценка ударно-волновых систем обработки металлов и сплавов потоком порошковых дискретных частиц, показывающая проникающую способность частиц в данных схемах обработки и некоторые технологические преимущества по однородности воздействия потока на матрицы.

1. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. II. Явление взаимного проникания частиц разнородных твердых тел без нарушения сплошности под воздействием концентрированных потоков энергии / В.Е. Панин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко, А.Д. Шаляпин, Ю.С. Авраамов, В.И. Кошкин // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – № 4.
2. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов / С.М. Ушеренко. – Минск: НИИ импульсных процессов, 1998. – 210 с.
3. Aleksentseva S.E., Krivchenko A.L. Materials for the biomedicine, received by processing metals the high-speed stream of the discrete the particles, generated by the shock wave // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. – Kiev, Ukraine, 16-21 September, 2012, p. 435-438.
4. Петров Е.В., Кривченко А.Л., Курсанов Р.Г. Особенности взаимодействия потока частиц с металлической преградой при различных углах падения // XI Харитоновские тематические научные чтения: тез. докл. межд. конф. «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», 16-20 марта, Саров, 2009. – С. 272-275.
5. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
6. Роман О.В., Андилевко С.К., Дыбов О.А. Осесимметричный взрывной ускоритель с конической выемкой, заполненной порошком // Инженерно-физический журнал. – 2000. – Т. 73. – № 4.
7. Бекренёв А.Н., Эпштейн Г.Н. Последеформационные процессы высокоскоростного нагружения. – М.: Металлургия, 1992. – 159 с.

*Статья поступила в редакцию 2 марта 2013 г.*

## **ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF METALS AND ALLOYS PROCESSING WITH THE HIGH-SPEED STREAM OF DISCRETE PARTICLES DISPERSED BY EXPLOSION ENERGY OF THE CHANNEL CHARGES AND OTHER DYNAMIC METHODS**

***S.E. Aleksentseva, A.L. Krivchenko***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The paper deals with the problems related to various shock-wave schemes of dynamic processing of metals with a high-speed stream of discrete particles. The microstructure and durability of a matrix has been investigated. The estimation of penetrating ability of particles has been made at various dynamic modes of metals and alloys processing. The study shows the influence of parameters of dynamic loading and shock-wave schemes on possibility of anomalously deep penetration of powdered particles dispersed by explosion energy. The paper also gives comparative estimations of uniformity of materials processing with particles at various dynamic schemes.*

**Keywords:** *Stream of discrete particles, dynamic processing, high-speed throwing, pressure of impact, shock waves, deformation*

---

*Svetlana E. Aleksentseva (Ph.D. (Phys.& Math.)), Associate professor.  
Alexander L. Krivchenko (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*