

УДК 669.018.25.017

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-2-70-78

Использование нагружения взрывом для получения покрытий из смесей порошков карбида хрома и титана в режиме наплавки

© 2022 г. А.В. Крохалев, В.О. Харламов, Д.Р. Черников, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ), Россия

Статья поступила в редакцию 01.03.22 г., доработана 27.04.22 г., подписана в печать 10.05.22 г.

Аннотация: Представлены результаты исследований микроструктуры, химического и фазового составов покрытий, наплавленных на стальную подложку с использованием скользящего взрывного нагружения смесей порошков карбида хрома (Cr_3C_2) и титана. Равновесный фазовый состав покрытий рассчитывали путем численного термодинамического моделирования с использованием программного комплекса Thermo-Calc. Исследование структуры и элементного состава проводили с помощью растрового электронного микроскопа FEI Versa 3D с интегрированной системой микрорентгено-спектрального энергодисперсионного анализа EDAX Apollo X. Для проведения рентгеноструктурного фазового анализа использовали дифрактометр Bruker D8 Advance. Показано, что при нагружении порошкового слоя скользящей детонационной волной может быть реализован его сдвиг по поверхности подложки за счет горизонтальной составляющей массовой скорости частиц спрессованного материала. Сдвиг приводит к оплавлению внутреннего слоя спрессованного порошка и поверхностного слоя подложки в результате трения. Наличие жидкой фазы препятствует торможению спрессованного порошкового слоя, в результате чего большая его часть выносится с поверхности подложки. Оставшаяся на поверхности жидкая фаза претерпевает быструю закалку за счет теплоотвода в подложку и образует наплавленное покрытие, содержащее в своем составе компоненты как исходной порошковой смеси, так и покрываемой подложки. Установлено, что структура наплавленного слоя отличается крайне высокой дисперсностью (размер зерна не превышает 250 нм), а его фазовый состав оказывается близким к термодинамически равновесному. При использовании порошковых смесей карбида хрома с 40 % титана формируется покрытие, состоящее из карбида титана с металлической связкой на основе твердых растворов железа и титана в хроме.

Ключевые слова: карбид хрома, титан, карбид титана, хром, взрывное прессование, наплавка взрывом.

Крохалев А.В. – докт. техн. наук, декан факультета технологии конструкционных материалов, ВолгГТУ (400005, Волгоград, пр-т Ленина, 28). E-mail: kroch58@yandex.ru.

Харламов В.О. – канд. техн. наук, вед. инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования», ВолгГТУ. E-mail: harlamov_vo@mail.ru.

Черников Д.Р. – аспирант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» (ОТСП), ВолгГТУ. E-mail: chernikovdr@yandex.ru.

Кузьмин С.В. – докт. техн. наук, профессор кафедры ОТСП, проректор ВолгГТУ. E-mail: weld@vstu.ru.

Лысак В.И. – докт. техн. наук, академик РАН, проф., зав. кафедрой ОТСП, науч. руководитель ВолгГТУ. E-mail: lysak@vstu.ru.

Для цитирования: Крохалев А.В., Харламов В.О., Черников Д.Р., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Использование нагружения взрывом для получения покрытий из смесей порошков карбида хрома и титана в режиме наплавки. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. Т. 16. № 2. С. 70–78.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-2-70-78.

Using explosion loading to obtain coatings of chromium carbide and titanium mixtures in deposition mode

A.V. Krokhaliev, V.O. Kharlamov, D.R. Chernikov, S.V. Kuz'min, V.I. Lysak

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Received 01.03.2022, revised 27.04.2022, accepted for publication 10.05.2022

Abstract: The paper presents the results of studies into the microstructure, chemical and phase composition of coatings deposited on a steel substrate using the sliding explosive loading of Cr_3C_2 chromium carbide and titanium powder mixtures. The equilib-

rium phase composition of coatings was calculated by computational thermodynamic modeling using the Thermo-Calc software package. The structure and elemental composition were studied using a FEI Versa 3D scanning electron microscope with an integrated EDAX Apollo X system for energy dispersive X-ray microprobe analysis. A Bruker D8 Advance diffractometer was used for X-ray phase analysis. It was shown that when the powder layer is loaded by a sliding detonation wave, it can be shifted along the substrate surface due to the horizontal mass velocity component of compacted material particles. This shift causes the inner layer of the compacted powder and the surface layer of the substrate to melt as a result of friction. The presence of a liquid phase prevents the compacted powder layer deceleration so that the major part of it is removed from the substrate surface. The liquid phase remaining on the surface undergoes rapid quenching due to heat removal into the substrate and forms a deposited coating containing both the components of the initial powder mixture and the components of the substrate to be coated. It was established that the deposited layer structure features by extremely high dispersion (grain size does not exceed 250 nm), and its phase composition turns out to be close to a thermodynamically equilibrium one. When using powder mixtures of chromium carbide with 40% titanium, a coating is formed consisting of titanium carbide with a metal binder based on solid solutions of iron and titanium in chromium.

Keywords: chromium carbide, titanium, titanium carbide, chromium, explosive pressing, coating by explosion.

Krokhalev A.V. – Dr. Sci. (Eng.). Dean of the Faculty of technology of structural materials, Volgograd State Technical University (VSTU) (400005, Russia, Volgograd, Lenina ave., 28). E-mail: kroch58@yandex.ru.

Kharlamov V.O. – Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the Center for collective use «Physico-chemical methods research», VSTU. E-mail: harlamov_vo@mail.ru.

Chernikov D.R. – Postgraduate student, Department «Equipment and technology of welding production» (ETWP), VSTU. E-mail: chernikovdr@yandex.ru.

Kuz'min S.V. – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of ETWP, Vice-rector of VSTU. E-mail: weld@vstu.ru.

Lysak V.I. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Acad. of RAS, Head of the Department of ETWP, Scientific adviser of VSTU. E-mail: lysak@vstu.ru.

For citation: Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Chernikov D.R., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Using explosion loading to obtain coatings of chromium carbide and titanium mixtures in deposition mode. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 2. P. 70–78 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-2-70-78.

Введение

В настоящее время в промышленности достаточно широко применяются износостойкие порошковые покрытия, получаемые из смесей порошков карбидов тугоплавких металлов (WC , TiC , Cr_3C_2 и т.п.) с металлической связкой (Co , Ni , $нихром$ и др.) [1–6]. При этом используются различные технологии их нанесения, в числе которых особое место занимает метод получения порошковых покрытий взрывом [7]. Он позволяет реализовать экстремально высокий уровень давлений и добиться уплотнения порошковых смесей карбидов с металлами до практически беспористого состояния на стадии прессования [8–13] без использования последующего спекания [14–17].

При нанесении порошковых покрытий взрывным методом наиболее часто применяется и в наибольшей степени исследована схема взрывной обработки, предусматривающая размещение исходной порошковой смеси непосредственно на поверхности плакируемой заготовки и ее нагружение плоской нормально падающей детонационной волной через промежуточную прокладку, отделяющую продукты взрыва от порошка (рис. 1, а).

При использовании этой схемы обрабатываемый порошковый слой остается неподвижным относительно покрываемой поверхности, разогревается за счет адиабатического сжатия, консолидируется и соединяется с поверхностью заготовки по механизму сварки давлением в твердой фазе [7, 9, 13]. При этом необходимым условием образования прочных границ между структурными составляющими покрытия является достижение температурой разогрева порошка значений, превышающих 0,35–0,40 абсолютной температуры плавления основного карбида материала покрытия, что сравнительно легко [7] реализуется на практике в случае применения Cr_3C_2 , но может вызвать большие трудности при использовании более тугоплавких карбидов (например, TiC) вследствие необходимости применения более мощных зарядов взрывчатого вещества, способных вызвать эффект аномального сжатия и появления пенообразных структур [7, 18].

Одним из путей решения указанной проблемы может быть переход к скользящему нагружению (см. рис. 1, б), широко применяющемуся в прак-

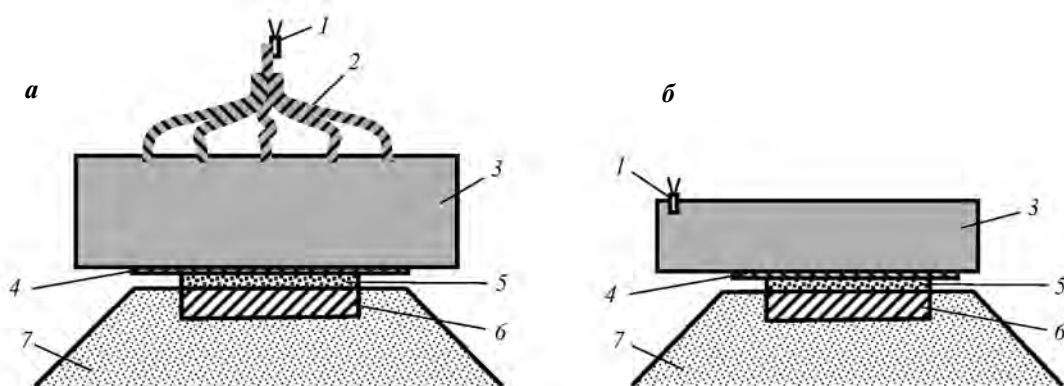


Рис. 1. Схема нагружения порошка плоской нормально падающей (*а*) и скользящей (*б*) детонационной волной
 1 – электродетонатор, 2 – детонирующий шнур, 3 – заряд ВВ, 4 – промежуточная прокладка, 5 – порошок, 6 – стальное основание, 7 – песчаная подушка

Fig. 1. Scheme of powder loading by a plane normally incident (*a*) and sliding (*b*) detonation wave

1 – electric detonator, 2 – detonating cord, 3 – explosive charge, 4 – intermediate gasket, 5 – powder, 6 – steel base, 7 – sand cushion

тике сварки взрывом [28], а также при высокотемпературном ударном синтезе [29]. В этом случае за счет горизонтальной составляющей массовой скорости за фронтомдвигающейся по порошку ударной волны при сравнительно небольших высотах заряда взрывчатого вещества (ВВ) возможен сдвиг порошкового слоя по поверхности подложки, который ведет к дополнительному разогреву за счет трения и появлению жидкой фазы на поверхности их раздела. В этих условиях будет реализован режим наплавки порошкового покрытия [19–22].

Образование жидкости приведет к изменению фазового состава материала, а интенсивный теплоотвод в подложку обеспечит высокую скорость охлаждения и, как следствие, формирование мелкодисперсной структуры полученного покрытия. Последнее предположение требует, однако, экспериментальной проверки, что и явилось основной целью данного исследования.

Материалы и методика исследований

При проведении исследований использовали смеси порошков карбида хрома и титана. Порошок Cr_3C_2 состоял из частиц округлой формы со средним размером 3,5 мкм (рис. 2, *а, в*). Частицы Ti имели неправильную губчатую форму и максимальный размер до 70 мкм (рис. 2, *б, г*).

Подобный выбор химического и granulометрического составов исходной порошковой смеси был связан с имеющимися данными [7] о возможности протекания в ней при взрывном прессовании хи-

мического взаимодействия между компонентами, приводящего к появлению новых фаз.

Для выбора содержания титана в исходной смеси с использованием пакета термодинамического моделирования фазовых равновесий Thermo-Calc был построен квазибинарный политемический разрез системы $\text{Cr}-\text{C}-\text{Ti}$, соответствующий различным соотношениям Cr_3C_2 и Ti (рис. 3). Его анализ показал, что полное исчезновение исходных фаз в результате химического реагирования компонентов в рассматриваемой системе возможно при содержании Ti > 16÷17 мас.%. При этом термодинамически равновесными продуктами взаимодействия являются кабид титана (TiC) и обедненные углеродом карбиды хрома (Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6). Начиная с содержания Ti в пределах 25–27 мас.% среди равновесных фаз в системе появляется Cr (точнее — твердый раствор титана в хrome). Исходя из этого, количество титана в исходной смеси порошков было выбрано равным 40 мас.%, что должно было создать предпосылки для получения двухфазной структуры TiC—Cr и формирования покрытия из соответствующего твердого сплава, подобного получаемым с тем или иным успехом другими методами [23–24].

Взрывную обработку проводили с использованием схемы ударно-волнового прессования, приведенной на рис. 1, *б*. В качестве ВВ применяли традиционные для сварки взрывом смесевые аммиачно-селитренные вещества на основе аммонита № 6ЖВ со скоростью детонации от 1,7 до 4,0 км/с. Высота заряда составляла 40 мм, толщина

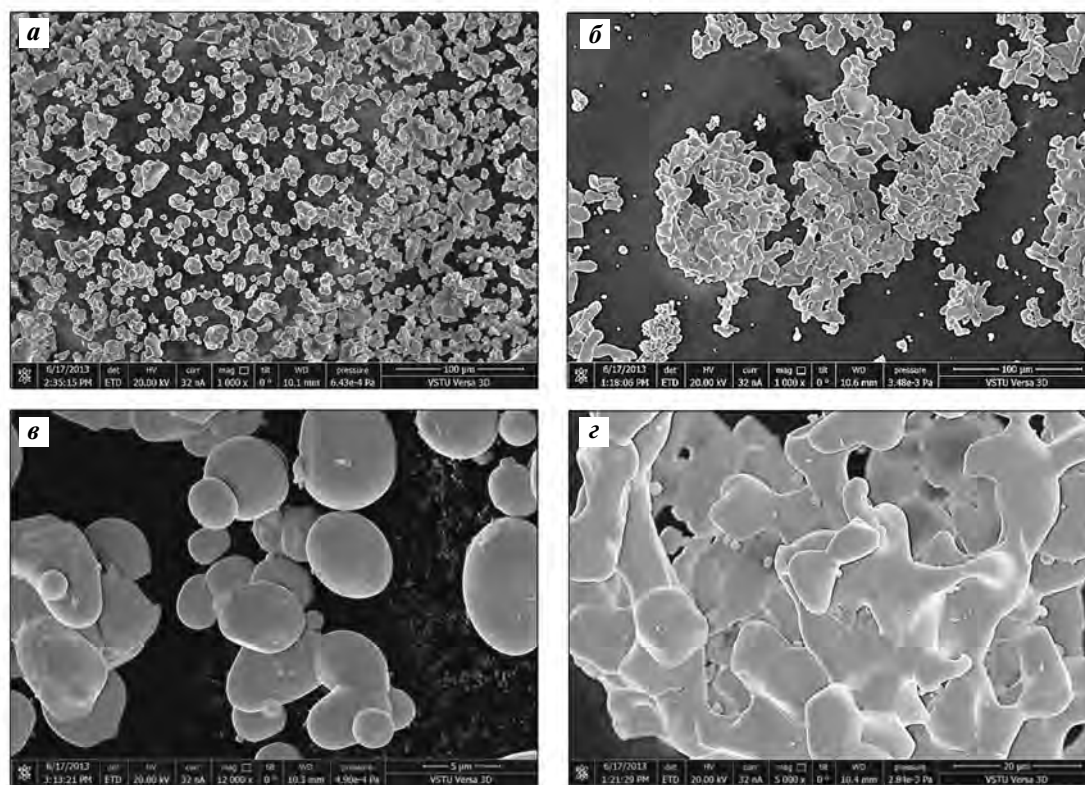


Рис. 2. Размер и форма частиц используемых порошков Cr_3C_2 (а, в) и Ti (б, г)

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) Versa 3D, FEI, Чехия

Fig. 2. Size and shape of the particles of the powders used Cr_3C_2 (a, в) and Ti (б, г)

Scanning electron microscope (SEM) Versa 3D, FEI, Czech Republic

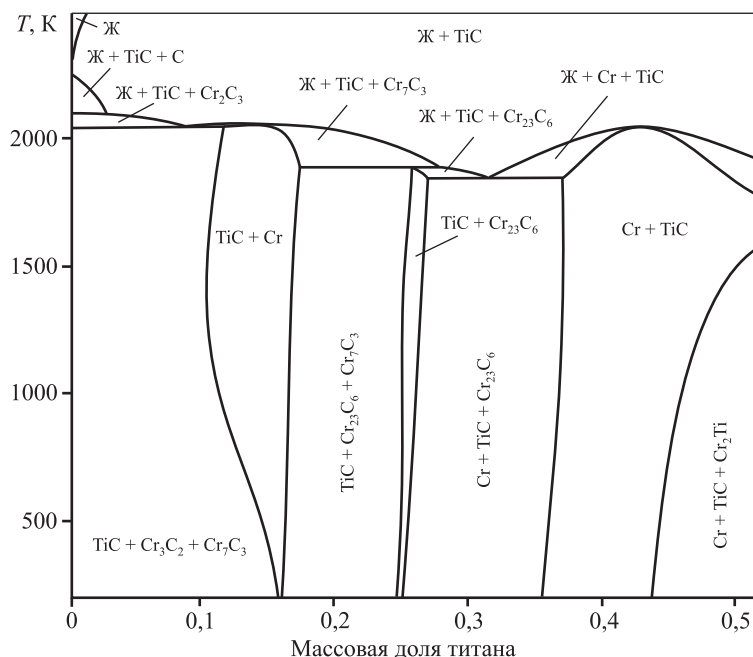


Рис. 3. Квазибинарное сечение Cr_3C_2 –Ti системы Cr–C–Ti

Fig. 3. Quasi-binary section Cr_3C_2 –Ti of the Cr–C–Ti system

исходного слоя порошка — 7 мм, а стальной промежуточной прокладки между ВВ и порошком — 0,75 мм. Расчет реализуемых в процессе прессования параметров сжатия осуществляли путем компьютерного анализа ударно-волновых взаимодействий между элементами схемы нагружения методом (p, u) -диаграмм. Температуру разогрева порошка в падающей ударной волне определяли исходя из найденного по значениям массовой скорости частиц порошка приращения его внутренней энергии [25].

Исследование структуры и химического состава фаз исходных порошковых смесей и полученных в результате ударно-волнового нагружения консолидированных материалов проводили с помощью многофункционального растрового электронного микроскопа Versa 3D (FEI, Чехия) с интегрированной системой фокусированного ионного пучка для изготовления фольги и системой микрорентгеноспектрального энергодисперсионного анали-

за Apollo X (EDAX, США). Для проведения рентгеноструктурного фазового анализа использовали дифрактометр D8 Advance («Bruker», Германия).

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты опытов показали, что реализация режима наплавки при скользящем взрывном нагружении порошковой смеси выбранного состава возможна только при использовании в качестве взрывчатого вещества аммонита № 6ЖВ без добавок аммиачной селитры (см. таблицу).

Достижимая при этом массовая скорость частиц порошка за фронтом падающей ударной волны обеспечивает разогрев порошкового материала за счет адиабатического сжатия на 509 °С, что явно недостаточно для его оплавления. Это указывает на тот факт, что формирование наплавленного слоя в рассматриваемых условиях действительно происхо-



Рис. 4. Проявление сдвига и выноса спрессованного порошкового слоя Cr_3C_2 —Ti при скользящем нагружении
a — общий вид образцов, *б* — сохранение порошкового слоя на начальном участке

Fig. 4. Manifestation of shear and removal of the compressed Cr_3C_2 —Ti powder layer under sliding loading
a — general view of the samples, *b* — preservation of the powder layer in the initial section

Влияние используемого взрывчатого вещества на параметры ударно-волнового нагружения и режим формирования покрытия

Effect of the explosive used on shock-wave loading parameters and coating formation conditions

Состав ВВ (аммонит/ аммиачная селитра), %	Параметры ударно-волнового сжатия			Режим формирования покрытия
	Скорость перемещения ударной волны вдоль подложки, км/с	Массовая скорость за фронтом падающей ударной волны, км/с	Температура разогрева порошка в ударной волне, °С	
6ЖВ	4,0	0,867	509	Наплавка
50/50	2,7	0,583	230	Напрессовка
33/66	2,3	0,496	166	Напрессовка
25/75	1,7	0,365	90	Напрессовка

дит в процессе сдвига спрессованного порошкового слоя по поверхности подложки. Внешний вид заготовки с покрытием (рис. 4) также свидетельствует о справедливости данного предположения.

Толщина наплавленного слоя составляет порядка 75 мкм (рис. 5, а), а его фазовый состав (рис. 5, в) близок к предсказанному термодина-

мически равновесному для сплава $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{—Ti}$ с выбранным 40 %-ным содержанием титана (см. рис. 3) с тем отличием, что в нем кроме TiC и Cr присутствует фаза $\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$, имеющая кубическую решетку и образующаяся обычно в сплавах, содержащих Cr и Fe в присутствии азота [26, 27]. Все фазовые составляющие отчетливо различимы

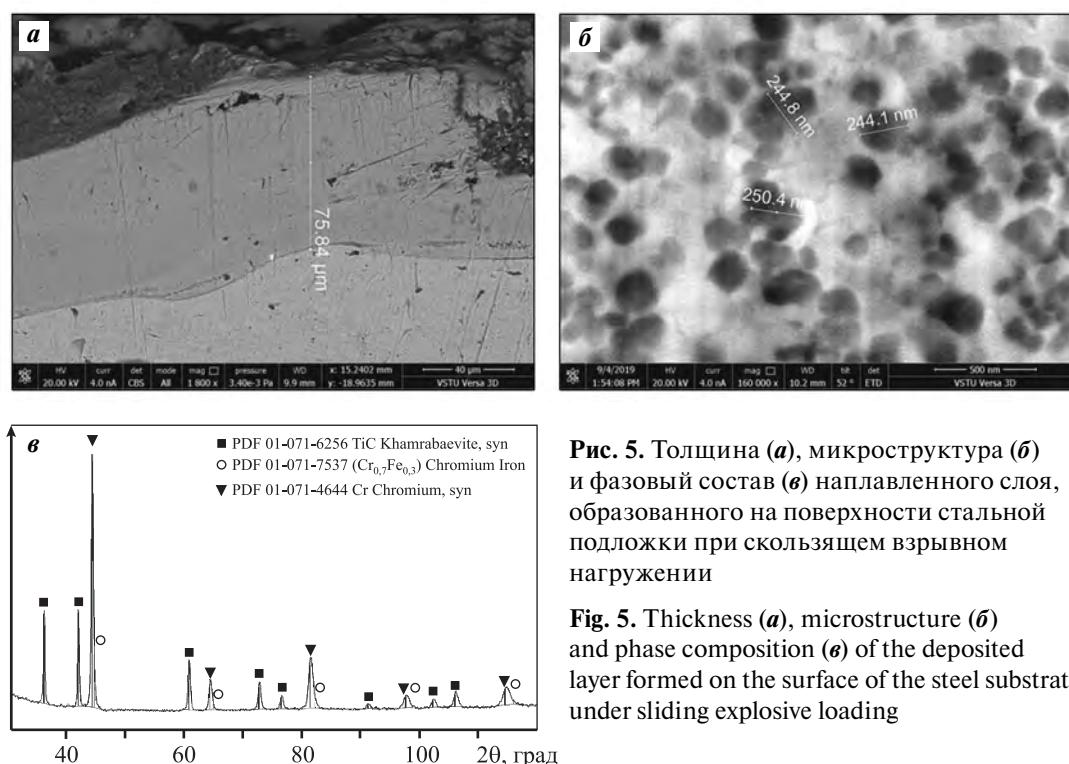


Рис. 5. Толщина (а), микроструктура (б) и фазовый состав (в) наплавленного слоя, образованного на поверхности стальной подложки при скользящем взрывном нагружении

Fig. 5. Thickness (a), microstructure (b) and phase composition (v) of the deposited layer formed on the surface of the steel substrate under sliding explosive loading

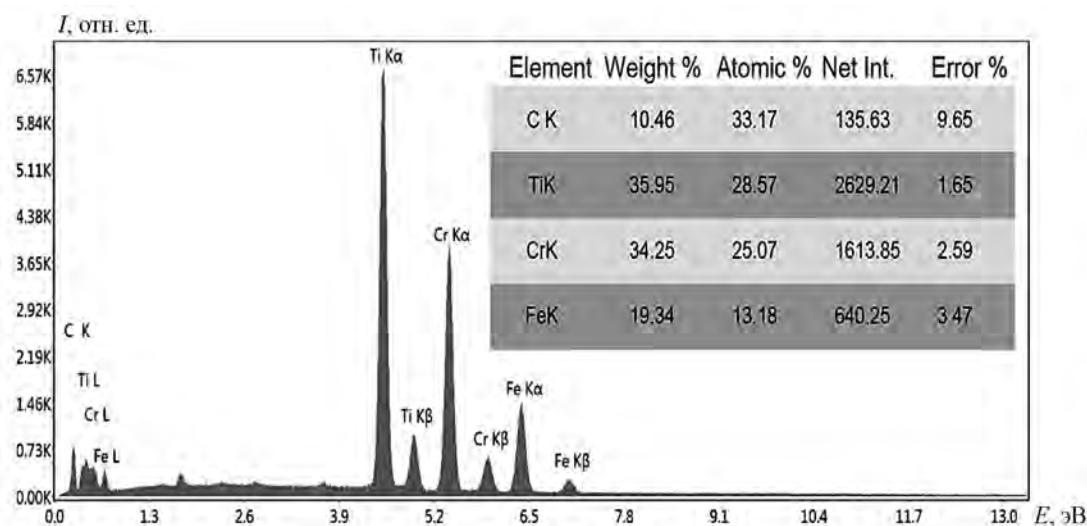


Рис. 6. Химический состав слоя, образовавшегося на поверхности стальной подложки в результате наплавки взрывом

Fig. 6. Chemical composition of the layer formed on the surface of the steel substrate as a result of surfacing by explosion

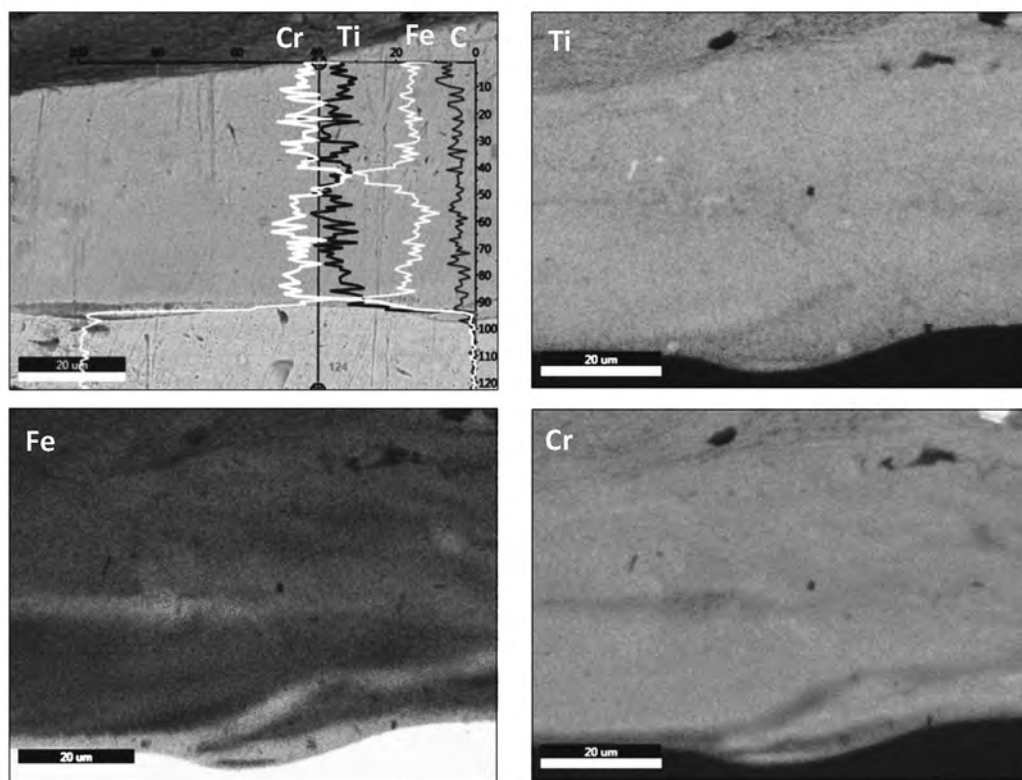


Рис. 7. Распределение элементов по толщине наплавленного слоя

Fig. 7. Distribution of elements by the thickness of the deposited layer

в структуре слоя (рис. 5, б) и отличаются высокой дисперсностью (0,15–0,25 мкм), что, в свою очередь, свидетельствует о больших скоростях охлаждения расплава за счет интенсивного отвода тепла в подложку.

Исследование химического состава наплавленного слоя подтвердило, что он действительно содержит не только элементы исходной порошковой смеси (Ti, Cr, C), но и Fe (рис. 6). Распределение элементов по толщине слоя отличается выраженной неоднородностью (рис. 7), что исключает возможность использования (для объяснения присутствия в нем железа) гипотезы о диффузионном взаимодействии компонентов порошковой пресовки и стального основания и свидетельствует об оплавлении материала подложки и его механическом перемешивании с оплавленной частью порошкового слоя.

Выводы

1. На примере смесей порошков карбида хрома и титана показано, что при нагружении порошкового слоя скользящей детонационной волной мо-

жет быть реализован его сдвиг по поверхности подложки за счет горизонтальной составляющей массовой скорости частиц спрессованного материала.

2. Сдвиг приводит к оплавлению внутреннего слоя спрессованного порошка и поверхностного слоя подложки в результате трения. Наличие жидкой фазы препятствует торможению спрессованного порошкового слоя, в результате чего большая его часть выносится с поверхности подложки.

3. Оставшаяся на поверхности жидкая фаза претерпевает быструю закалку за счет теплоотвода в подложку и образует наплавленное покрытие, содержащее компоненты как исходной порошковой смеси, так и покрываемой подложки.

4. Структура наплавленного слоя отличается крайне высокой дисперсностью (размер зерна не превышает 250 нм), а его фазовый состав оказывается близким к термодинамически равновесному. При использовании порошковых смесей карбида хрома с 40 мас.% титана формируется покрытие, состоящее из карбида титана с металлической связкой на основе твердых растворов железа и титана в хrome.

Литература/References

- Kear B.H., Skandan G., Sadangi R.K. Factors controlling decarburization in HVOF sprayed nano-WC/Co hard coatings. *Scripta Mater.* 2001. Vol. 44. No. 8-9. P. 1703–1707.
- Калита В.И., Радюк А.А., Комлев Д.И., Иванников А.Ю., Благовещенский Ю.В., Григорович К.В., Шибаева Т.В., Умнова Н.В., Молоканов В.В., Умнов П.П., Мельник Ю.И. Плазменные покрытия WC—Co из механически легированного порошка. *Физика и химия обработки материалов*. 2014. No. 5. С. 22–29.
Kalita V.I., Radyuk A.A., Komlev D.I., Ivannikov A.Yu., Blagoveshchenskii Yu.V., Grigorovich K.V., Shibaeva T.V., Umnova N.V., Molokanov V.V., Umnov P.P., Mel'nik Yu.I. Mechanically Alloy Powder Plasma WC—Co Coatings. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2014. No. 5. P. 22–29 (In Russ.).
- Mrdak M.R. Mechanical properties and microstructure of vacuum plasma sprayed Cr₃C₂-25 (Ni₂₀Cr) coatings. *Vojnotehnički glasnik*. 2015. Vol. 63. No. 2. P. 47–63.
- Bogatov Y.V., Shcherbakov V.A. TiC—20% Cr(Ni) Composites by forced SHS compaction: Influence of mechanical activation mode. *Int. J. SHS*. 2021. No. 30(1). P. 58–59
- Kalita V.I., Radyuk A.A., Komlev D.I., Ivannikov A.Yu., Mikhailova A.B., Alpatov A.V. Cermet plasma coating TiC—Cr₃C₂—NiCr—MoC. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. No. 1121(1). Art. 012015.
- Yang X., Pang H., Zhang H., Wang Q., Zhao C., Li Z., Zheng H. Microstructure and oxidation of Mo alloys by spark plasma sintering. *Mater. Sci. Forum*. 2018. 936 MSF. P. 164–170.
- Крохалев А.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Основы технологии получения износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой взрывным прессованием. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2018. No. 3. С. 68–83.
Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Foundations of the fabrication technology of wear-resistant coatings made of mixtures of chromium carbide powders with a metallic binder by explosive pressing. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2018. Vol. 59. Iss. 4. P. 419–432.
- Prummer R. Explosive compaction of powders and composites. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- Крохалев А.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И., Пай В.В. Уплотнение смесей порошков карбида хрома и металлической связки при взрывном прессовании. *Физика горения и взрыва*. 2019 Т. 55 No. 4. С. 129–137.
Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I., Pai V.V. Explosive compaction of chromium carbide powders with a metallic binder. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2019. Vol. 55. No. 4. P. 491–499.
- Lee S.H., Hokamoto K. WC/Co coating on a mild steel substrate through underwater shock compaction using a self combustible material layer (WC/Co coating through underwater shock compaction). *Mater. Trans.* 2007. Vol. 48. No. 1. P. 80–83.
- Яковлев И.В., Оголихин В.М., Шемелин С.Д. Взрывное изготовление металлокерамических защитных контейнеров. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2012. Т. 14. С. 55–60.
Yakovlev I.V., Ogolikhin V.M., Shemelin S.D. Explosive manufacturing of ceramic-metal protective containers. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye*. 2012. Vol. 14. P. 55–60 (In Russ.).
- Buzurkin A.E., Kraus E.I., Lukyanov Y.L. Explosive compaction of WC + Co mixture by axisymmetric scheme. *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. Vol. 653. No. 1. Art. 012036.
- Крохалев А.В., Харламов В.О., Тупицын М.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. О возможности получения твердых сплавов из смесей порошков карбидов с металлами взрывным прессованием без спекания. *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2017. No. 2. С. 22–30.
Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Tupitsin M.A., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Revisiting the possibility of formation of hard alloys from powder mixtures of carbides with metals by explosive compacting without sintering. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2018. Vol. 59. No. 5. P. 550–556.
- Агеев Е.В., Латыпов Р.А., Агеева Е.В. Исследование свойств электроэрозионных порошков и твердого сплава, полученного из них изостатическим прессованием и спеканием. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2014. No. 6. С. 51–55.
Ageev E.V., Latypov R.A., Ageeva E.V. Investigation into the properties of electroerosion powders and hard alloy fabricated from them by isostatic pressing and sintering. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2014. No. 6. P. 51–55 (In Russ.).
- Панов В.С., Зайцев А.А. Тенденции развития технологии ультрадисперсных и наноразмерных твердых сплавов WC—Co. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2014. No. 3. С. 38–48.
Panov V.S., Zaitsev A.A. Development trends of technology of ultrafine and nanosized hard alloys WC—Co. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*. 2014. No. 3. P. 38–48 (In Russ.).
- Pirso J., Viljus M. Structure formation of Cr₃C₂-based cermets during sintering. *Proceedings of Powder Metal-*

- lurgy World Congress. Kyoto, Japan. 2000. P. 1265—1268.
17. Duran C., Eroglu S. Liquid-phase sintering and properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ cermets. *J. Mater. Process. Technol.* 1998. Vol. 74. No. 1-3. P. 69—73.
18. Rogozin B.D. Взрывная обработка порошковых материалов. Волгоград: Политехник, 2002.
Rogozin V.D. Explosive treatment of powder materials. Volgograd: Politekhnik, 2002 (In Russ.).
19. Каунов А.М., Шамрей А.В. О механизме формирования металлизационных слоев при высокоскоростном метании порошков на металлические подложки. *Физика и техника высоких давлений*. 1982. No. 8. С. 38—41.
Kaunov A.M., Shamrey A.V. On the mechanism of formation of metallization layers during high-speed throwing of powders on metallic substrates. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*. 1982. No. 8. P. 38—41 (In Russ.).
20. Каунов А.М. О роли макропластических течений в формировании металлизационных слоев при высокоскоростном соударении порошка с металлической подложкой. *Физика и химия обработки материалов*. 1984. No. 12. С. 28—34.
Kaunov A.M. On the role of macroplastic flows in the formation of metallization layers during high-speed collision of a powder with a metallic substrate. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1984. No. 12. С. 28—34 (In Russ.).
21. Kaunov A.M., Burminskaya L.N., Bukin V.M., Ryadinskaya I.M. Formation of the structure of powder-metallurgy coatings obtained by the impact wave method. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1986. Vol. 25 (5). P. 402—405.
22. Kaunov A.M., Bukin V.M. Explosive application of coatings. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1984. Vol. 23 (1). P. 42—45.
23. Jing Wang, Wen-Zhi Li, Heng-De Li. Mechanical properties of TiC/metal multilayers synthesized by ion beam sputtering technique. *J. Vacuum Sci. Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement and Phenomena*. 2001. Vol. 9. P. 250—254. DOI: 10.1116/1.1343098.
24. Shi K., Hu S., Liang L. Effect of tempering treatment on microstructure and fatigue life of TiC—Cr overlay, produced by plasma transferred arc alloying. *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47. P. 720—729. DOI: 10.1007/s10853-011-5845-5.
25. Харламов В.О., Крохалев А.В., Тупицин М.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Методика расчетной оценки физических условий сжатия при взрывном прессовании порошкового материала на стальном основании. *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. 2015. No. 5. С. 57—61.
Kharlamov V.O., Krokhalev A.V., Tupitsin M.A., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Methodology for estimating the physical conditions of observation in explosive compression of powder material on a steel base. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroyenii*. 2015. No. 5. С. 57—61 (In Russ.).
26. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А., Пономарев И.А., Маталасова А.Е. Влияние старения на структуру и свойства металла 30Н8Х6М3СТЮ, полученного наплавкой. В сб. Проблемы машиноведения: *Матер. III Междунар. науч.-техн. конф.* (Омск, 23—24 апреля 2019 г.). С. 29—35. eLIBRARY ID: 37541796.
Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A., Ponomarev I.A., Matalasova A.E. The Influence of aging on the structure and properties of metal 30N8Kh6M3STYu obtained by surfacing. In: *Problems of machine science: Proc. of the III Inter. Sci. Tech. Conf.* (Omsk, Russia, April 23—24, 2019). P. 29—35. eLIBRARY. ID: 37541796.
27. Fukunaga T., Ishikawa E., Mizutani U. Structural observations during amorphization process of the $(\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.3})\text{—N}$ system by MA. *Mater. Sci. J. Japan Soc. of Powder and Powder Metallurgy. Publ.* 25 Sept. 1991. DOI: 10.2497/JJSPM.38.940.
28. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение-1, 2005.
Lysak V.I., Kuz'min S.V. Explosion welding. Moscow: Mashinostroyenie-1, 2005. (In Russ.).
29. Гурьев Д.Л., Гордолопов Ю.А., Запунов Н.Г., Кабилов Р.Р. Ударный синтез и микроструктура сплава Ti—Al. *Физика горения и взрыва*. 2009. Т. 45. No. 1. С. 117—124.
Gur'ev D.L., Gordoplov Y.A., Zaripov N.G., Kabirov R.R. Shock synthesis and microstructure of Ti—Al alloy. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2009. Vol. 45(1). P. 104—110.