**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ** / **MATERIALS SCIENCE**

**УДК** 536.625:539.25:539.651
**DOI** 10.17073/0368-0797-2024-4-398-400

CC BY

***Краткое сообщение***
***Short report***

# Градиент микротвердости в зоне контакта покрытие (ВЭС CoCrFeNiMn) – подложка (сплав 5083)

**М. О. Ефимов, И. А. Панченко, Ю. А. Шлярова**

**Сибирский государственный индустриальный университет** (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

rubannikova96@mail.ru

***Аннотация***. В настоящей работе методом проволочно-дугового аддитивного производства (WAAM) на подложке из сплава 5083 формируется покрытие из высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn неэквиатомного состава. Авторы исследуют изменение микротвердости в зоне контакта системы покрытие – подложка. С помощью методов современного физического материаловедения проанализированы структурно-фазовое состояние, дефектная структура и элементный состав системы покрытие – подложка. Обнаружены физические механизмы, способствующие повышению твердости в зоне контакта.

***Ключевые слова:*** микротвердость, зона контакта, подложка, покрытие, высокоэнтропийный сплав, структура

***Благодарности:*** Работа выполнена в рамках государственного задания № 0809-2021-0013. Авторы выражают благодарность профессорам Ю.Ф. Иванову и В.Е. Громову за обсуждение результатов.

***Для цитирования:*** Ефимов М.О., Панченко И.А., Шлярова Ю.А. Градиент микротвердости в зоне контакта покрытие (ВЭС CoCrFeNiMn) – подложка (сплав 5083). *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(4):398–400. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-398-400

# Gradient of microhardness in the contact zone coating (HEA CoCrFeNiMn) – substrate (alloy 5083)

**M. O. Efimov, I. A. Panchenko, Yu. A. Shlyarova**

**Siberian State Industrial University** (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

rubannikova96@mail.ru

***Abstract***. In this work, a coating of a high-entropy alloy CoCrFeNiMn of non-atomic composition is formed on a substrate made of alloy 5083 by the method of wire-arc additive manufacturing (WAAM). The authors investigated the change in microhardness in the contact zone of the coating – substrate system. Using the methods of modern physical materials science, the structural and phase state, defect structure and elemental composition of the coating – substrate system were analyzed. The discovered physical mechanisms contribute to an increase in hardness in the contact zone.

***Keywords:*** microhardness, contact zone, substrate, coating, high-entropy alloy, structure

***Acknowledgements:*** The research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 0809-2021-0013. The authors express their gratitude to professors Yu.F. Ivanov and V.E. Gromov for discussing the results.

***For citation:*** Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarova Yu.A. Gradient of microhardness in the contact zone coating (HEA CoCrFeNiMn) – substrate (alloy 5083). *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):398–400. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-398-400

В последние годы исследователи в области физического материаловедения уделяют особое внимание высокоэнтропийным сплавам (ВЭС) [1; 2], которые отличаются аномально высокими значениями энтропии смешения, превышающими характерные для сложнолегированных сплавов. Концепция реализации ВЭС базируется на достижении максимальной энтропии смешения от пяти и более элементов в разных атомных соотношениях. В результате этого формируются однофазные структуры с сильным искажением решетки и затруднением диффузии, что обеспечивает рост прочностных свойств и их стабильность в широком температурном интервале [3 – 5]. Высокоэнтропийные сплавы, которые уже были разработаны, являются перспектив-


© М. О. Ефимов, И. А. Панченко, Ю. А. Шлярова, 2024

ными материалами и обладают свойствами для применения в электронике, атомной энергетике, транспортном машиностроении, ракетно-космической и других отраслях промышленности [6; 7]. Использование ВЭС не ограничится указанными выше областями, а будет расширяться в результате разработки новых составов и исследования их свойств. В настоящее время активно накапливается и осмысливается обширная информация о методах получения ВЭС, их структурно-фазовых состояниях, дефектной подструктуре и свойствах.

В настоящей работе проанализировано изменение микротвердости в зоне контакта системы покрытие (ВЭС CoCrFeNiMn) – подложка (сплав 5083).

В исследовании использовались образцы системы покрытие – подложка, где покрытием являлся ВЭС CoCrFeNiMn неэквиатомного состава, сформированный на подложке из сплава 5083 с использованием метода проволочно-дугового аддитивного производства [3]. Твердость материала определяли методом Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 5 Н. Исследования структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры, элементного состава проводились с применением методов просвечивающей электронной дифракционной микроскопии на приборе JEM2100.

Микротвердость системы покрытие – подложка изменяется от 9,9 ГПа на границе покрытие – зона контакта до 1,5 ГПа на границе зона контакта – подложка. Микротвердость покрытия и подложки составляет 3,0 и 1,0 ГПа (рис. 1).

Значительное изменение микротвердости зоны контакта обусловлено структурно-фазовыми изменениями материала при нанесении покрытия на подложку. Микрорентгеноспектральным анализом была подтверждена химическая однородность покрытия и наличие в нем атомов алюминия, что свидетельствует об их диффузии из подложки.

Анализ электронно-микроскопических изображений зоны контакта показал формирование зеренно-субзеренной структуры с размером кристаллитов от 0,5 до 1,1 мкм (рис. 2, *а*). В объеме зерен такой структуры присутствуют хаотическая и ячеистая дислокационная субструктуры со скалярной плотностью примерно $10^{10}$ см$^{-2}$ (рис. 2, *б*).

В объеме зерен и субзерен, а также на их границах обнаружены частицы второй фазы. Размеры этих частиц в объеме зерен находятся в пределах от 15 до 17 нм, а на их границах – в пределах от 30 до 35 нм. Анализ микроэлектронограмм позволил установить, что химический состав частиц второй фазы $Al_3Ni$.

В зоне контакта со стороны подложки обнаружены образования пластинчатой формы. Анализ темнополь-

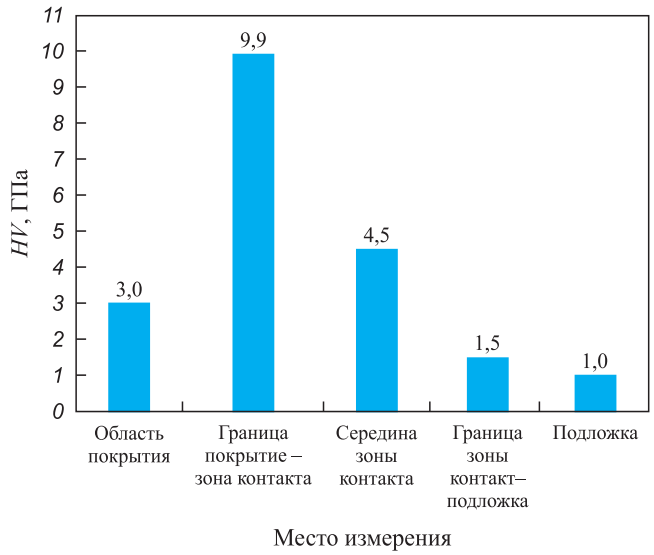


***Рис. 1.*** Изменение микротвердости системы покрытие – подложка

***Fig. 1.*** Change in microhardness of the coating – substrate system

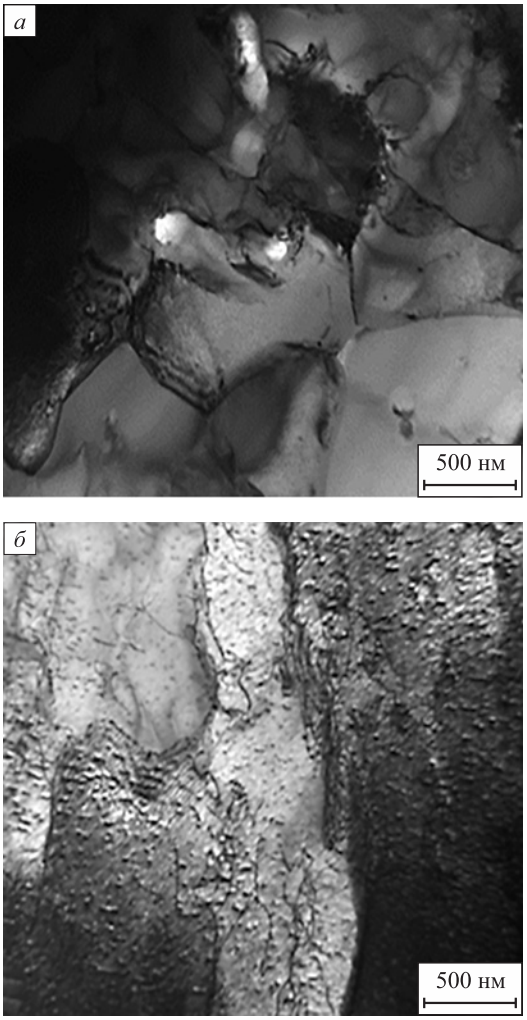


***Рис. 2.*** Электронно-микроскопические изображения зоны контакта системы покрытие – подложка:
*а* – зеренно-субзеренная структура;
*б* – дислокационная субструктура

***Fig. 2.*** Electron microscopic images of contact zone of the coating – substrate system:
*a* – grain-subgrain structure; *б* – dislocation substructure

ных изображений и индицирование соответствующих микроэлектронограмм позволяет заключить, что эти включения являются алюминидом железа состава $Al_3Fe_4$.

## Выводы

Анализ фазового элементного состава и дефектной субструктуры позволяет считать, что повышение микротвердости в зоне контакта системы покрытие – подложка обусловлено образованием субмикронной зеренно-субзеренной структуры, содержащей наноразмерные частицы второй фазы; твердорастворным упрочнением в результате взаимного легирования покрытия и подложки; формированием пластинчатых алюминидов железа. Из-за различий теплофизических характеристик между покрытием и подложкой возможно формирование внутренних полей напряжений в зоне их контакта.

## Список литературы / References

1. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014;61:1–93. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001
2. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841. https://doi.org/10.31857/S0015323020080094
   Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020;121(8):733–764. https://doi.org/10.1134/S0031918X20080098
3. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer; 2021;107:110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8
4. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014;16(9):4749–4768. https://doi.org/10.3390/e16094749
5. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448–511. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081
6. Yeh J.–W. Physical metallurgy of high-entropy alloys. *JOM*. 2015;67(10):2254–2261. http://doi.org/10.1007/s11837-015-1583-5
7. Tsai M.–H., Yeh J.–W. High-entropy alloys: A critical review. *Materials Research Letters*. 2014;2(3):107–123. http://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690

## Сведения об авторах / Information about the Authors

***Михаил Олегович Ефимов,*** *соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID:*** 0000-0002-4890-3730
***E-mail:*** moefimov@mail.ru

***Ирина Алексеевна Панченко,*** *к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID:*** 0000-0002-1631-9644
***E-mail:*** i.r.i.ss@yandex.ru

***Юлия Андреевна Шлярова,*** *аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID:*** 0000-0001-5677-1427
***E-mail:*** rubannikova96@mail.ru

***Mikhail O. Efimov,*** *Candidates for a degree of Cand. Sci.(Eng.) of the Chair of Science named after V.M. Finkel',* Siberian State Industrial University
***ORCID:*** 0000-0002-4890-3730
***E-mail:*** moefimov@mail.ru

***Irina A. Panchenko,*** *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing,* Siberian State Industrial University
***ORCID:*** 0000-0002-1631-9644
***E-mail:*** i.r.i.ss@yandex.ru

***Yuliya A. Shlyarova,*** *Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Researcher of Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing,* Siberian State Industrial University
***ORCID:*** 0000-0001-5677-1427
***E-mail:*** rubannikova96@mail.ru

## Вклад авторов / Contribution of the Authors

***М. О. Ефимов*** – подготовка образцов, измерение микротвердости, обзор литературы.
***И. А. Панченко*** – ПЭМ анализ, формулирование концепции работы.
***Ю. А. Шлярова*** – обсуждение результатов, подготовка окончательного варианта статьи.

***M. O. Efimov*** – sample preparation, microhardness measurement, literary review.
***I. A. Panchenko*** – TEM analysis, formulation of the work concept.
***Yu. A. Shlyarova*** – discussion of results, writing the final version of the article.

Поступила в редакцию 15.12.2023
После доработки 10.01.2024
Принята к публикации 12.02.2024

Received 15.12.2023
Revised 10.01.2024
Accepted 12.02.2024