

Оригинальная статья

УДК 621.791.92:621.727:620.178

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-4(54)-17-26

**ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ
СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ – ПОДЛОЖКА**

© 2025 г. И. В. Баклушина¹, В. Е. Громов¹, Ю. Ф. Иванов², И. Ю. Литовченко³,
Р. Е. Крюков¹, А. Б. Юрьев¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

²Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

Аннотация. Используя технологию плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота, сформировано покрытие толщиной примерно 9 – 10 мм на стали марки 30ХГСА порошковой проволокой системы Мо – Сг – Со – С. Методами современного физического материаловедения проведены исследования структурно-фазового состояния и элементного состава переходной зоны контакта системы плазменное покрытие (быстрорежущая молибденовая сталь) – подложка (среднеуглеродистая сталь)», подвергнутой электронно-пучковой обработке. Плотность энергии пучка электронов составляла 30 Дж/см², длительность импульсов пучка электронов 50 мкс, количество импульсов облучения 10, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹. Установлено, что формирование покрытия сопровождается созданием протяженного переходного слоя примерно 100 мкм, который содержит α-фазу, γ-фазу, карбиды сложного состава. Установлено, что переходный слой после облучения содержит микрократеры и микротрещины, фрагментирующие его на области различных размеров. После облучения в объеме переходного слоя выявлена пластинчатая структура, содержащая частицы цементита карбида Me₆C. Методами рентгеноструктурного анализа установлено, что зона контакта, непосредственно примыкающая к покрытию, содержит зерна остаточного аустенита, упрочненные наноразмерными карбидами Me₆C.

Ключевые слова: быстрорежущая молибденовая сталь, плазменный метод, импульсный электронный пучок, облучение, система покрытие – подложка, интерфейс, структура, фазовый состав

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>

Для цитирования: Баклушина И.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Литовченко И.Ю., Крюков Р.Е., Юрьев А.Б. Электронно-микроскопический анализ переходной зоны системы плазменное покрытие – подложка. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2025;4(54):17–26. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-17-26](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-17-26)

Original article

ELECTRON MICROSCOPIC ANALYSIS OF THE TRANSITION ZONE OF THE PLASMA COATING – SUBSTRATE SYSTEM

© 2025 I. V. Baklushina¹, V. E. Gromov¹, Yu. F. Ivanov², I. Yu. Litovchenko³, R. E. Kryukov¹, A. B. Yur'ev¹¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)²Institute of High-Current Electronics SB RAS (2/3 Akademicheskoy ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)³Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskoy ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. Using plasma surfacing technology in a protective nitrogen alloy environment, a coating of approximately 9 – 10 mm thick was applied to 30HGSA steel with a Mo – Cr – Co – C powder wire. The structural and phase state and elemental composition of the contact transition zone of a plasma coating system (high-speed molybdenum steel) "substrate (medium carbon steel)" subjected to electron beam treatment have been studied by methods of modern physical materials science. The energy density of the electron beam is 30 J/cm², the pulse duration of the electron beam is 50 μs, the number of irradiation pulses is 10, and the pulse repetition rate is 0.3 s⁻¹ (specify the units of measurement). It has been established that the formation of the coating is accompanied by the creation of an extended transition layer with a thickness of about 100 μm, which contains an α-phase, a γ-phase, and carbides of complex composition. It has been established that the transition layer after irradiation contains microcraters and microcracks, crushing it into sections of various sizes. After irradiation, a lamellar structure containing Me₆C carbide cementite particles was revealed in the volume of the transition layer. X-ray diffraction analysis showed that the contact zone directly adjacent to the coating contains grains of residual austenite reinforced with nanoscale Me₆C carbides.

Keywords: high-speed molybdenum steel, plasma method, pulsed electron beam, irradiation, coating–substrate system, interface, structure, phase composition

Financing. The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>

For citation: Baklushina I.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Litovchenko I.Yu., Kryukov R.E., Yur'ev A.B. Electron microscopic analysis of the transition zone of the plasma coating – substrate system. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;4(54):17–26. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(54\)-17-26](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(54)-17-26)

Введение

Анализ повреждаемости деталей машин показывает, что их преждевременный выход из строя обусловлен главным образом процессами, происходящими на поверхности в зоне трения. При этом многие части деталей машин и оборудования выбраковываются вследствие небольшого износа рабочей поверхности.

Получение покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими повышение надежности и долговечности работы изделий в экстремальных условиях, характеризующихся повышенными механическими нагрузками, износом, коррозией, наличием агрессивных сред и циклическим воздействием, является фундаментальной задачей [1; 2].

Восстановление изношенного при эксплуатации оборудования и придание специальных свойств поверхностям новых изделий достигается

использованием технологии наплавки в легирующей среде азота [3 – 5]. Плазменно сформированные покрытия [6 – 8], имеющие преимущества перед другими способами нанесения покрытий, наиболее полно отвечают предъявляемым промышленностью требованиям как по экономической эффективности, так и по уровню достигнутых свойств [9; 10].

Молибденовые быстрорежущие стали [11 – 12] все чаще используются в качестве покрытий, обеспечивая высокие эксплуатационные свойства [13 – 15], которые могут быть улучшены целенаправленной модификацией структурно-фазовых состояний поверхностного слоя энергетической обработкой. Одним из перспективных методов является электронно-пучковая обработка (ЭПО), обладающая большими возможностями для контроля количества подводимой энергии, создания большой площади воздействия

концентрированного потока энергии на обрабатываемый материал, малыми коэффициентами отражения и высокой концентрацией энергии в единице объема материала [16; 17]. Отсутствие выраженной поверхности раздела между модифицированным слоем и объемом материала определяет хорошие демпфирующие свойства при механических и температурных внешних воздействиях, предотвращая преждевременное зарождение и распространение на поверхности в основной объем материала хрупких микротрещин, приводящих к разрушению [18; 19].

При нанесении покрытий актуальной проблемой остается интерфейс системы покрытие – подложка. Состояние переходной зоны является предметом тщательных исследований методом современного физического материаловедения [9; 10], поскольку адгезионные и демпфирующие свойства этой зоны определяют сроки надежной эксплуатации изделия с наплавленным слоем. Информация о природе формирования демпфирующих и адгезионных свойств зоны контакта покрытие – подложка может быть получена из результатов электронно-микроскопического исследования структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры этой зоны.

Целью настоящей работы является исследование структуры и свойств интерфейса системы покрытие (быстрорежущая молибденовая сталь) – (среднеуглеродистая сталь) подложка, облученного низкоэнергетическим импульсным электронным пучком.

Материал и методики исследований

Образцы для исследований получали плазменной наплавкой в среде азота на сталь марки 30ХГСА. Режим формирования наплавленного слоя описан в работах [7; 9; 10].

Химический состав стали марки 30ХГСА следующий: 0,3 (здесь и далее мас. %) C; 0,9 % Cr; 0,8 % Mn; 0,9 % Si; остальное Fe. Химический состав наплавленного слоя соответствует стали марки М9 по SAE-AISI М9 (Т11309) Molybdenum High-Speed Steel: 8,85 % Mo; 1,00 % C; 3,57 % Cr; 2,12 % Co; 0,05 % V; 1,12 % Si; 0,56 % Mn; 1,05 % Al; остальное Fe.

Облучение системы покрытие – подложка осуществляли на установке СОЛО (Институт сильноточной электроники СО РАН) при следующих параметрах: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см²; длительность импульсов пучка электронов 50 мкс; количество импульсов облучения 10; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; давление остаточного газа (аргона) в камере установки 0,02 Па.

Фазовый состав системы покрытие – подложка изучали методами рентгеноструктурного анализа. Использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-8Н. Идентификация фазового состава, качественный и количественный фазовый анализ, а также уточнение параметров структуры выполнены при помощи программного комплекса КДА (кристаллография и дифракционный анализ) со встроенной картотекой порошковых стандартов (АО ИЦ «Буревестник», версия 2023-01-24-144022.8dec10c0f).

Структуру и элементный состав системы покрытие – подложка изучали методами сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп КУКУ-ЕМ6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом и приставкой для микрорентгеноспектрального анализа элементного состава). Дефектную субструктуру, элементный и фазовый состав системы покрытие – подложка исследовали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг в режимах на просвет и сканирования (прибор JEOL JEM-2100, Япония) [20 – 22].

Результаты и обсуждение

Электронно-пучковая обработка (ЭПО) переходного слоя заметным образом меняет его структуру: появляются микрократеры и микротрещины, причины появления которых связаны с наличием легкоплавких включений (сульфидов железа и марганца) [23] и формированием растягивающих упругих напряжений. Фазовый состав интерфейса системы покрытие – подложка облучения импульсным электронным пучком представлен двумя фазами (α - и γ -фазами). Высокое относительное содержание в поверхностном слое интерфейса остаточного аустенита свидетельствует, во-первых, о высокой скорости охлаждения материала после облучения импульсным электронным пучком, во-вторых, о формировании стабилизирующего γ -фазу твердого раствора на основе ГЦК кристаллической решетки железа и, в-третьих, о стабилизации кристаллической решетки γ -фазы упругими остаточными напряжениями.

Методами ПЭМ было установлено, что переходный слой, примыкающий к наплавленному слою, представлен зернами остаточного аустенита субмикронных размеров. По границам и в объеме зерен остаточного аустенита располагаются частицы карбида Me_6C . При удалении от границы контакта переходного слоя с наплавленным слоем выявляется структура поликристаллического типа, представленная зернами α -фазы (рис. 1, а, б), в объеме и по границам которых

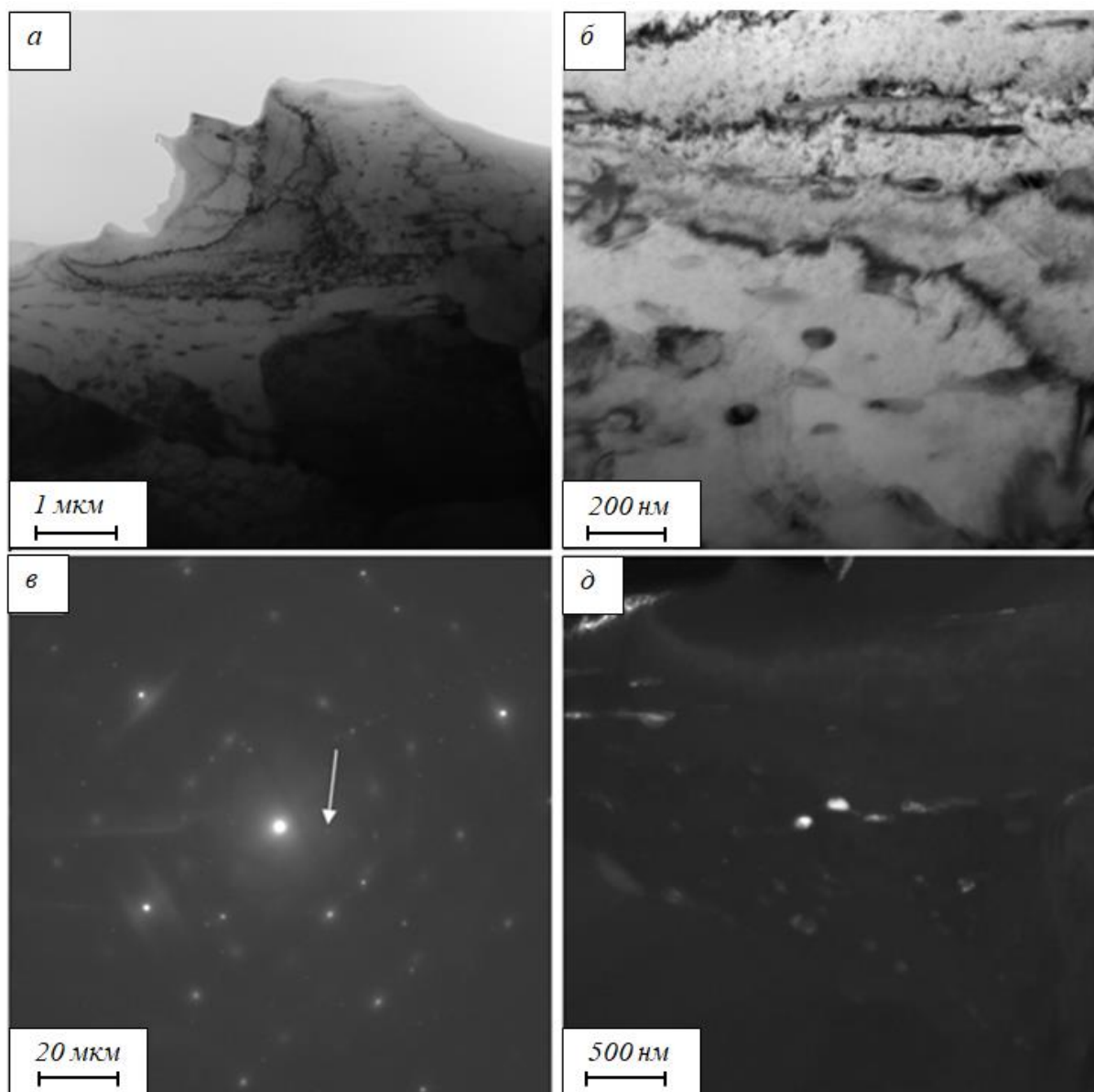


Рис. 1. ПЭМ-изображение структуры интерфейса системы покрытие – подложка после электронно-пучковой обработки: *a, б* – светлые поля при различном увеличении; *в* – микроэлектроннограмма; *г* – темное поле, полученное в рефлексе [133] Me_6C ; на поз. *в* стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле

Fig. 1. TEM is an image of the structure of the interface of the coating – substrate system after electron beam processing: *a, б* – are light fields at different magnifications; *в* – is a microelectronogram; *г* – is a dark field obtained in the [133] Me_6C reflex; in pos. *в* the arrow indicates the reflex in which the dark field is received

присутствуют наноразмерные частицы карбида Me_6C , имеющие округлую форму (рис. 1, *г*).

При значительном удалении от границы контакта переходного слоя с наплавленным выявляется структура зерен феррита, имеющая пластинчатую субструктуру (рис. 2, *а*). По границам таких пластин располагаются частицы карбида железа (цементит) (рис. 2, *б*), в объеме пластин наблюдаются частицы карбида Me_6C округлой формы (рис. 2, *г*).

Переходный слой, примыкающий к подложке (сталь марки 30ХГСА), представлен зернами с пластинчатой структурой (рис. 3).

Анализ микроэлектроннограмм (рис. 4, *б*) показал присутствие по границам пластин просло-

ек γ -фазы (рис. 4, *в*). В объеме пластин наблюдаются частицы игольчатой формы (рис. 4, *а, г*). Индексирование микроэлектроннограммы (рис. 4, *б*) свидетельствует о том, что рассматриваемые частицы являются карбидом железа (цементитом). Судя по морфологии частиц цементита, в рассматриваемом слое интерфейса формируется структура верхнего бейнита [24]. Цементит в таких пластинах располагается в объеме только по одному кристаллографическому направлению [20 – 22; 25]. Отметим, что в структуре отпущенного мартенсита частицы цементита располагаются по трем кристаллографически эквивалентным направлениям [20 – 22; 24; 25].

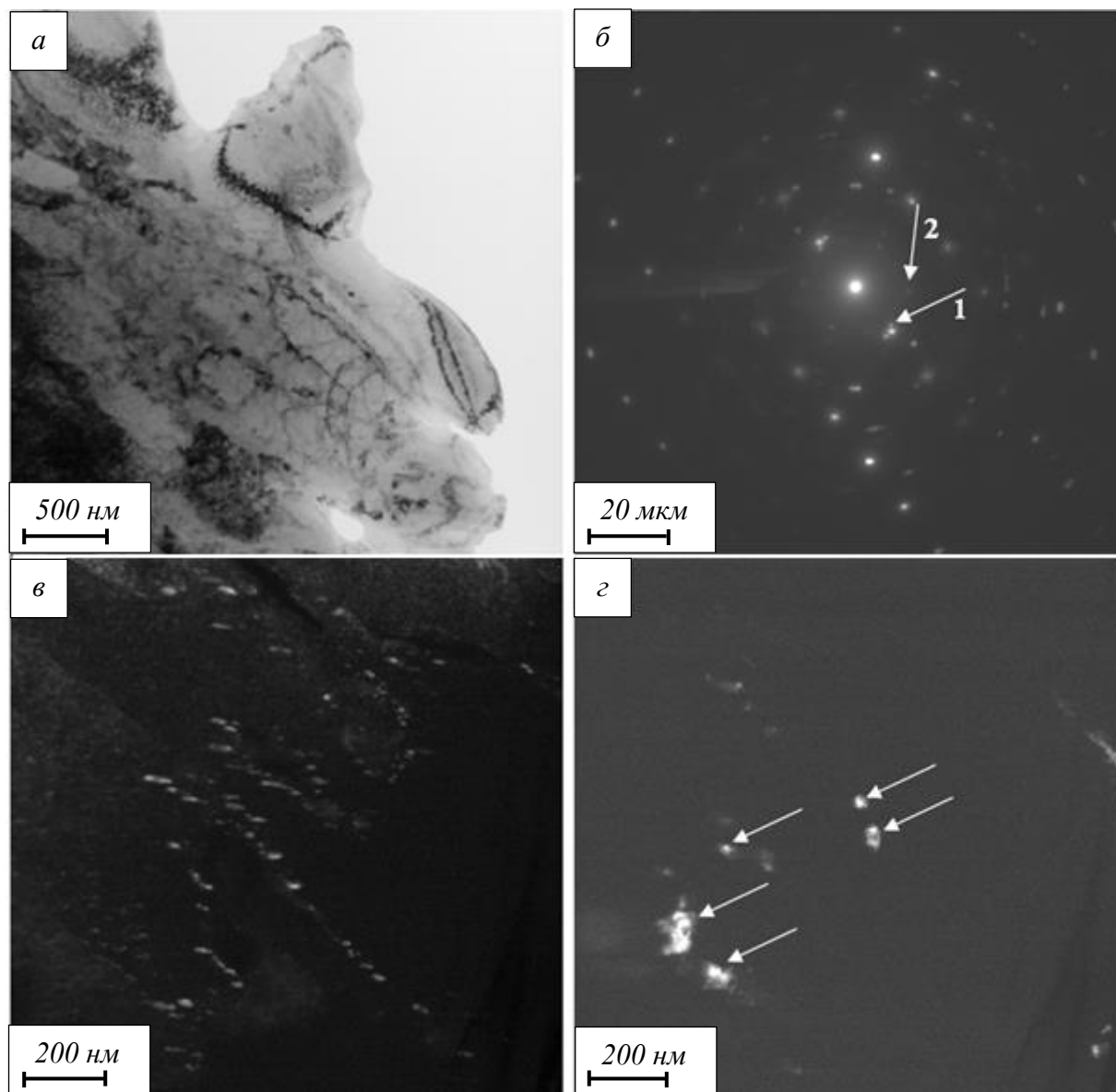


Рис. 2. ПЭМ-изображение структуры интерфейса системы покрытие – подложка после электронно-пучковой обработки:
 а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в и г – темные поля, полученные в рефлексах $[121]\text{Fe}_3\text{C}$ и $[024]\text{Me}_6\text{C}$;
 на поз. б стрелками указаны рефлексy, в которых получены темные поля 1 и 2 для поз. в и г; на поз. г стрелками указаны
 частицы карбидной фазы Me_6C , расположенные в объеме пластин феррита

Fig. 2. TEM image of the structure of the interface of the coating-substrate system after electron beam processing:
 а – light field; б – microelectronogram; в and г – dark fields obtained in reflexes $[121]\text{Fe}_3\text{C}$ and $[024]\text{Me}_6\text{C}$; in pos. б the arrows
 indicate reflexes in which dark fields 1 and 2 are obtained for pos. в and г; on pos. г the arrows indicate the particles of the carbide
 phase Me_6C located in the volume of the ferrite plates

Выводы

Технологией плазменной наплавки в среде азота на стали марки 30ХГСА порошковой проволокой системы $\text{Mo} - \text{Cr} - \text{Co} - \text{C}$ диаметром 4 мм сформирован наплавленный слой толщиной примерно 9 – 10 мм. В качестве плазмообразующего газа использован аргон высшего сорта. Установлено, что формирование покрытия сопровождается созданием протяженного переходного слоя. Осуществлено облучение переходного слоя системы покрытие – подложка импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Методами рентгеноструктурного анализа установлено, что основными фазами переходного

слоя после облучения являются α - и γ -фазы, частицы карбидной фазы не обнаружены, что может указывать на их малое количество. Установлено, что облучение переходного слоя приводит к образованию сетки микротрещин в наплавленном слое, примыкающем к переходному слою и размытию границы контакта переходного слоя и подложки. Показано, что в зоне контакта структура подложки сформирована зернами со структурой верхнего бейнита. В объеме переходного слоя наблюдается пластинчатая структура, содержащая частицы цементита и карбида Me_6C . Переходный слой,

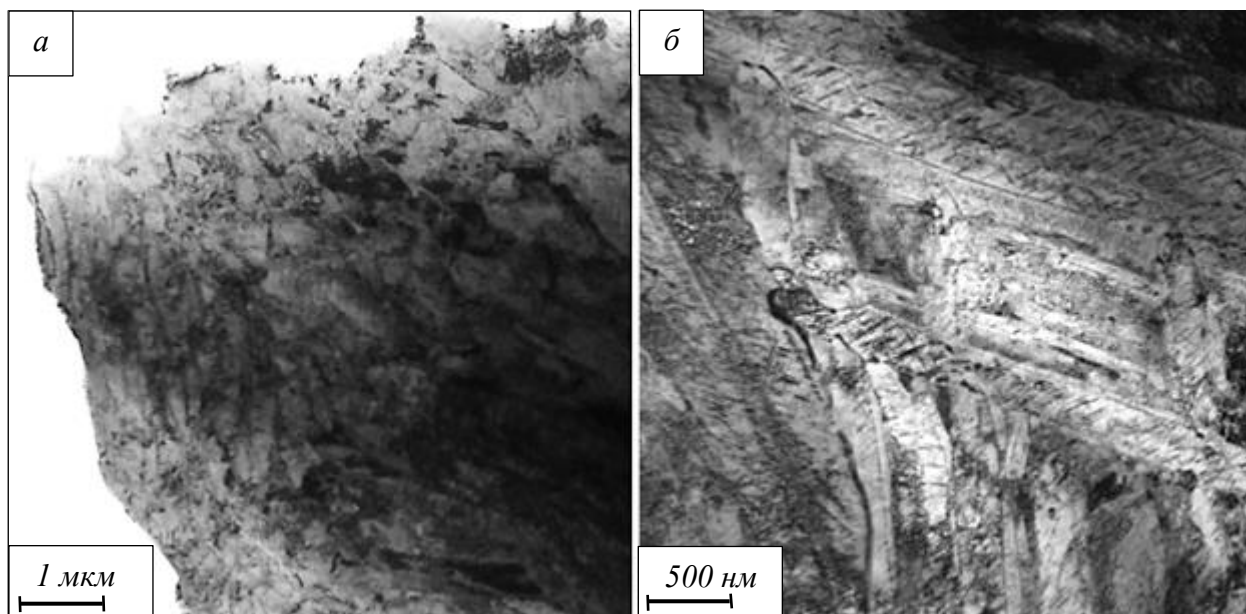


Рис. 3. ПЭМ-изображение структуры подложки в зоне контакта с наплавленным металлом:

а – зерна феррита микронных размеров; *б* – пластинчатая структура в объеме зерен

Fig. 3. TEM image of the substrate structure in the contact zone with the deposited metal:

a – micron-sized ferrite grains; *b* – lamellar structure in the volume of grains

непосредственно примыкающий к наплавке, зерна остаточного аустенита, упрочненные включениями карбидов Me_6C нано- и субмикронных размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nefedyev S.P., Vdovin K.N., Emelyushin A.N. Peculiarities of forming of the wear-resistant cast iron coating structure on steel 45 upon plasma-powder surfacing. *Materials Science Forum*. 2016;870:141–148. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.141>
2. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. *Плазменное упрочнение поверхности*. Старый Оскол: ТНТ. 2021:156.
3. Darmawan W., Quesada J., Marchal R. Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance. *Surface Engineering*. 2007;23(2):112–119. <https://doi.org/10.1179/174329407X169502>
4. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Investigation of the structure and impact-abrasive resistance of coatings of the Fe–C–Cr–Mn–Si system, additionally alloyed with nitrogen. *Welding International*. 2013;27(2):150–153.
5. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5. *Вестник Югорского государственного университета*. 2021;3(62):33–45. <https://doi.org/10.17816/byusu20210233-45>
6. Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. *Наплавка быстрорежущей стали*. Омск: Изд-во «ОмГТУ», 2016:200.
7. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Guseva T.P., Chapaikin A.S., Vashchuk E.S., Romanov D.A. Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering. *Russian Physics Journal*. 2023;66(7):731–739. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02999-w>
8. Rakhadilov B.K., Zhurerova L.G., Scheffler M., Khassenov A.K. Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2018;3(91):59–65. EDN: KJWHYN.
9. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Иванов Ю.Ф., Миненко С.С., Коновалов С.В. Электронно-микроскопическое исследование зоны контакта наплавка (быстрорежущая сталь Р2М9) – подложка (сталь 30ХГСА). *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):9–16. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-9-16](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-9-16)
10. Potekaev A.I., Gromov V.E., Yuriev A.B., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Minenko S.S., Semin A.P., Chapaikin A.S., Litovchenko I.Yu. Transition zone structure in the fast-cutting surfaced layer – substrate system. *Russian Physics Journal*. 2024;67(8):1107–1113. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03222-0>
11. Kremnev L.S. From High-Speed Tungsten Steel to High-Temperature Molybdenum Steel:

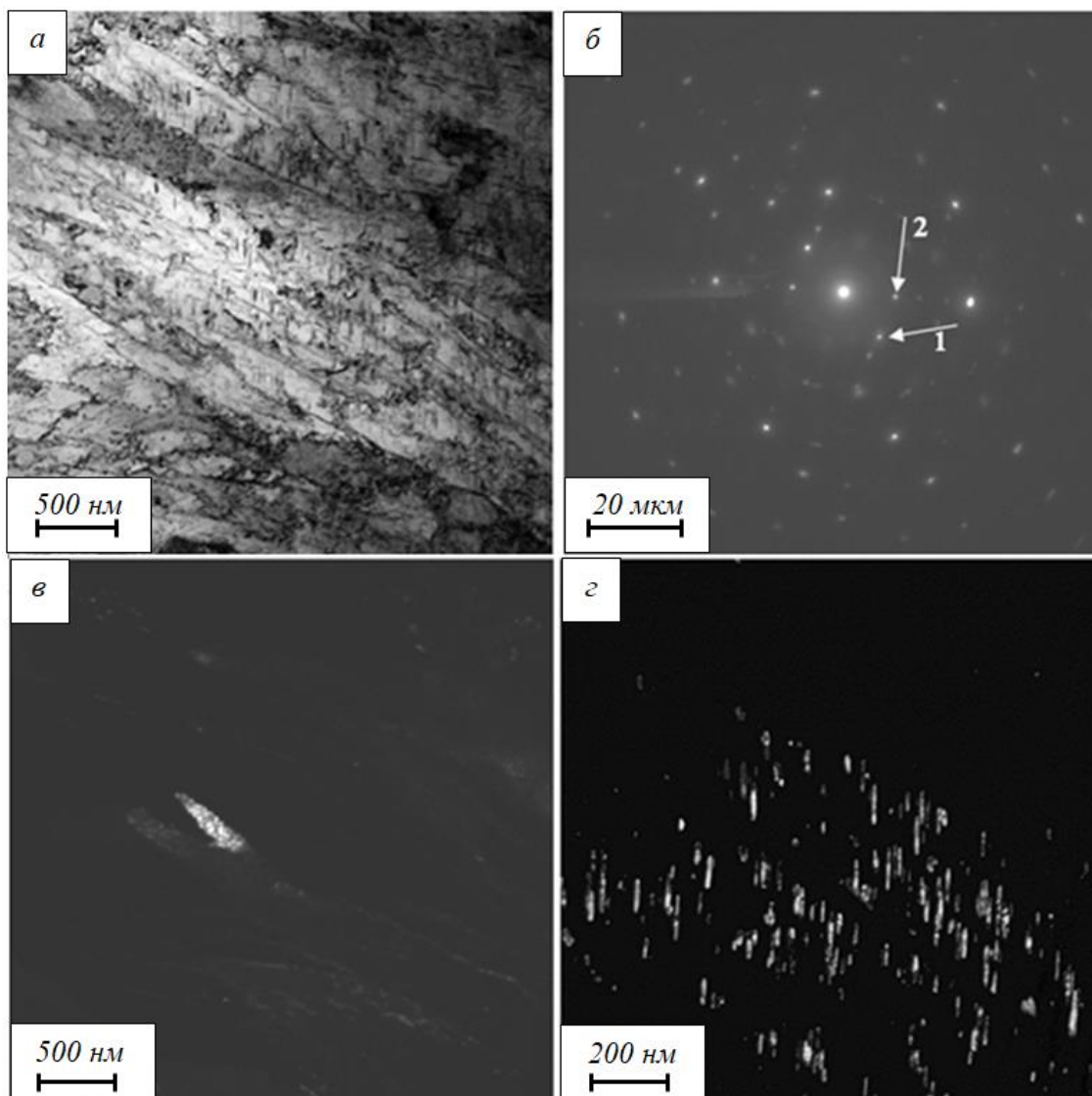


Рис. 4. ПЭМ-изображение структуры интерфейса системы покрытие – подложка в области контакта со сталью марки 30ХГСА:

а – светлое поле; *б* – микроэлектронограмма; *в* и *г* – темные поля, полученные в рефлексах $[111]\gamma\text{-Fe}$ и $[210]\text{Fe}_3\text{C}$; на поз. *б* стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля 1 и 2 для поз. *в* и *г*

Fig. 4. TEM image of the interface structure of the coating – substrate system in the area of contact with 30KHGSA steel: *a* – light field; *b* – microelectronogram; *в* and *г* – dark fields obtained in reflexes $[111]\gamma\text{-Fe}$ and $[210]\text{Fe}_3\text{C}$; in pos. *б* the arrows indicate reflexes in which dark fields 1 and 2 are obtained for pos. *в* and *г*

A Century of High-Speed Steel. *Steel in Translation*. 2009;39(12):1111–1118.
<https://doi.org/10.3103/S0967091209120195>

12. Кремнев Л.С., Онегина А.К., Виноградова Л.А. Особенности превращений, структуры и свойств молибденовых быстрорежущих сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009;12(654):13–19. EDN: KZSBKP.
13. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008;1(641):18–27. EDN: KVXKKF.
14. Купалова И.К. Фазовый анализ и фазовый состав быстрорежущих сталей (обзор). *Заводская лаборатория*. 1983;1:27–40.
15. Вострецов Г.Н. Деформационная способность наплавленного теплостойкого металла типа Р2М8 при мартенситном превращении. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2012;1:7–10.
16. Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф. *Модификация поверхности металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками*. Новосибирск: Изд-во СО РАН Наука. 2019:348.
17. *Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-*

- плазменной обработке / Под ред. Н.Н. Ковалёва, Ю.Ф. Иванова. Томск: НТЛ. 2016:298.
18. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. Поута, Г. Фоти, Д. Джекобсона. Москва: Машиностроение, 1987:424.
 19. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Белов А.Б., Львов А.Ф., Энгелько В.И., Овчинников Д.В. Модификация поверхности деталей из жаропрочных сталей сильноточными импульсными электронными пучками. *Физика и химия обработки материалов*. 2005;2:61–70. EDN: HSGMVF.
 20. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.
 21. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. 2014:717.
 22. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. 2016:196.
 23. Пайкин А.Г., Шулов В.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Львов А.Ф., Теряев А.Д., Крайников А.В. Кратерообразование на поверхности деталей из жаропрочной стали 15X16K5H2MBΦAB-III при облучении сильноточными импульсными электронными пучками. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2006;10(22):9–14.
 24. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. *Превращения в железе и стали*. Москва: Наука. 1977:236.
 25. Утевский Л.М. *Дифракционная электронная микроскопия в металловедении*. Москва: Металлургия. 1973:584.
- ### REFERENCES
1. Nefed'ev S.P., Vdovin K.N., Emelyushin A.N. Peculiarities of forming of the wear-resistant cast iron coating structure on steel 45 upon plasma-powder surfacing. *Materials Science Forum*. 2016;870:141–148. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.141>
 2. Nefed'ev S.P., Emelyushin A.N. *Plasma Surface Hardening*. Staryi Oskol: TNT. 2021:156. (In Russ.).
 3. Darmawan W., Quesada J., Marchal R. Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance. *Surface Engineering*. 2007;23(2):112–119. <https://doi.org/10.1179/174329407X169502>
 4. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Investigation of the structure and impact-abrasive resistance of coatings of the Fe-C-Cr-Mn-Si system, additionally alloyed with nitrogen. *Welding International*. 2013; 27(2):150–153.
 5. Nefed'ev S.P., Emelyushin A.N. The influence of nitrogen on the formation of the structure and properties of plasma coatings of type 10P6M5. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021;3(62):33–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/byusu20210233-45>
 6. Mozgovoi I.V., Shneider E.A. *Surfacing of high-speed steel*. Omsk: Izd-vo OmGTU. 2016:200. (In Russ.)
 7. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Guseva T.P., Chapaikin A.S., Vashchuk E.S., Romanov D.A. Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering. *Russian Physics Journal*. 2023;66(7):731–739. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02999-w>
 8. Rakhadilov B.K., Zhurero L.G., Scheffler M., Khassenov A.K. Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2018;3(91):59–65. EDN: KJWHYN.
 9. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Ivanov Yu.F., Minenko S.S., Konovalov S.V. Electron microscopic examination of the contact zone between the weld (high-speed steel P2M9) and the substrate (steel 30KhGSA). *Vestnik SibGIU*. 2025;2(52):9–16. (In Russ.) [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-9-16](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-9-16)
 10. Potekaev A.I., Gromov V.E., Yuriev A.B., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Minenko S.S., Semin A.P., Chapaikin A.S., Litovchenko I.Yu. Transition zone structure in the fast-cutting surfaced layer – substrate system. *Russian Physics Journal*. 2024;67(8):1107–1113. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03222-0>
 11. Kremnev L.S. From High-Speed Tungsten Steel to High-Temperature Molybdenum Steel: A Century of High-Speed Steel. *Steel in Translation*. 2009;39(12):1111–1118. <https://doi.org/10.3103/S0967091209120195>
 12. Kremnev L.S., Onegina A.K., Vinogradova L.A. Features of transformations, structure and properties of molybdenum high-speed steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2009;12(654):13–19. EDN: KZSBKP. (In Russ.).
 13. Kremnev L.S. Theory of alloying and the creation of heat-resistant tool steels and alloys based on it. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2008;11(641):18–27. EDN: KVXKKF. (In Russ.).
 14. Kupalova I.K. Phase analysis and phase composition of high-speed steels (review). *Za-*

- vodskaya laboratoriya. 1983;1:27–40. (In Russ.)
15. Vostretsov G.N. Deformation capacity of deposited heat-resistant metal type P2M8 during martensitic transformation. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2012;1:7–10. (In Russ.).
 16. Rotshtein V.P., Proskurovskii D.I., Ozur G.E., Ivanov Yu.F. *Surface modification of metallic materials with low-energy high-current electron beams*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN Nauka. 2019:348. (In Russ.)
 17. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. ed. *Evolution of the surface layer structure of steel subjected to electron-ion-plasma treatment*. Tomsk: NTL. 2016:298. (In Russ.).
 18. Pout Dzh., Foti G., Dzhekbson D. ed. *Surface modification and alloying with laser, ion and electron beams*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:424. (In Russ.).
 19. Shulov V.A., Paikin A.G., Belov A.B., L'vov A.F., Engel'ko V.I., Ovchinnikov D.V. Surface modification of heat-resistant steel parts using high-current pulsed electron beams. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2005;2:61–70. EDN: HSGMVF. (In Russ.).
 20. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.
 21. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. 2014:717.
 22. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. 2016:196.
 23. Paikin A.G., Shulov V.A., Engelko V.I., Tkachenko K.I., Lvov A.F., Teryaev A.D., Krainikov A.V. Cratering on the surface of parts made of heat-resistant steel 15X16K5N2MVFAV-Sh under irradiation with high-current pulsed electron beams. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2006;10(22):9–14. (In Russ.).
 24. Kurdyumov V.G., Utevskii L.M., Entin R.I. *Transformations in iron and steel*. Moscow: Nauka. 1977:236. (In Russ.).
 25. Utevskii L.M. *Diffraction electron microscopy in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya. 1973:584. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Ирина Викторовна Баклушина, заместитель директора Института открытого образования, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: baklushina_iv@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4487-3260

SPIN-код: 9087-6310

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

SPIN-код: 2834-4090

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

Игорь Юрьевич Литовченко, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры физики металлов, старший научный сотрудник лаборатории физики структурных превращений, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: litovchenko@spti.tsu.ru

ORCID: 0000-0002-5892-3719

SPIN-код: 5506-1478

Роман Евгеньевич Крюков, д.т.н., доцент, профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

SPIN-код: 7328-3134

Алексей Борисович Юрьев, д.т.н., профессор, ректор, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rector@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9932-4755

SPIN-код: 1104-0168

Information about the authors:

Irina V. Baklushina, Deputy Director of the Institute of Open Education, Siberian State Industrial University

E-mail: baklushina_iv@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4487-3260

SPIN-код: 9087-6310

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Head of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

SPIN-код: 2834-4090

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Leading Researcher, Institute of High-Current Electronics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

Igor' Yu. Litovchenko, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Professor of the Department of Physics of Metals, Senior Researcher of the Laboratory of Phys-

ics of Structural Transformations, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: litovchenko@spti.tsu.ru

ORCID: 0000-0002-5892-3719

SPIN-код: 5506-1478

ORCID: 0000-0002-9932-4755

SPIN-код: 1104-0168

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Roman E. Kryukov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

SPIN-код: 7328-3134

Поступила в редакцию 09.07.2025

После доработки 04.08.2025

Принята к публикации 12.08.2025

Received 09.07.2025

Revised 04.08.2025

Accepted 12.08.2025

Aleksei B. Yur'ev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Siberian State Industrial University

E-mail: rector@sibsiu.ru