

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 621.791.92:621.727:620.178

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.002

### ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ «ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ-ПОДЛОЖКА»

Ирина Викторовна Баклушина<sup>1\*</sup>, Виктор Евгеньевич Громов<sup>2</sup>, Юрий Федорович Иванов<sup>3</sup>,  
Игорь Юрьевич Литовченко<sup>4</sup>, Татьяна Павловна Гусева<sup>5</sup>, Сергей Андреевич Невский<sup>6</sup>

<sup>1,2,5,6</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия,

<sup>3</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

<sup>4</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, 634055, Томск, Россия

<sup>1</sup> baklushina\_iv@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4487-3260>

<sup>2</sup> gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

<sup>3</sup> yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

<sup>4</sup> litovchenko@spti.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5892-3719>

<sup>5</sup> guseva\_tp@sibsiu.ru,

<sup>6</sup> nevskiy sergei@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7032-9029>

**Аннотация.** Одной из важных проблем практического использования высокопрочных плазменных покрытий быстрорежущими сталями в среде азота является анализ структурно-фазовых состояний и свойств переходной зоны системы «покрытие-подложка», поскольку они во многом определяют преждевременное зарождение хрупких микротрещин в зоне контакта. Покрытия молибденовой и вольфрам-молибденовой стали находят в последнее время широкое применение вместо хорошо известных вольфрамовых (P18, P9) и вольфрам-молибденовых сталей с повышенным содержанием вольфрама (P6M5, P6Ф2К8М6 и другие). Это связано с необходимостью замены дорогого и дефицитного вольфрама на молибден, который оказывает подобное влияние на структуру и свойства быстрорежущих сталей. Проведены исследования структурно-фазовых состояний, морфологии, свойств и элементного состава переходной зоны контакта систем наплавленная быстрорежущая сталь марки М9 и P2M9 – подложка (сталь марки 30ХГСА) в исходном состоянии. Для системы «покрытие (быстрорежущая сталь P2M9) – подложка (сталь 30ХГСА)» в исходном состоянии переходная зона имеет мартенситную структуру с прослойками остаточного аустенита по границам пластин мартенсита. Выявлены частицы второй фазы наноразмерного (2 – 60 нм) диапазона: карбиды ванадия, молибдена, вольфрама и железа, локализованные на дислокациях, на границах и объеме пластин мартенсита. Для системы «покрытие (быстрорежущая сталь М9) – подложка (сталь 30ХГСА)» установлено, что формирование покрытия сопровождается созданием протяженного переходного слоя, который содержит  $\alpha$ -фазу,  $\gamma$ -фазу, карбиды сложного состава.

**Ключевые слова:** электронная микроскопия, покрытие, быстрорежущие стали марки М9 и P2M9, зона контакта, подложка, переходная зона

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>

**Для цитирования:** Баклушина И.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Литовченко И.Ю., Гусева Т.П., Невский С.А. Электронно-микроскопический анализ структуры и свойств переходного слоя «плазменное покрытие быстрорежущей стали-подложка» // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 1. С. 24–32. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.002.

Original article

## ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE INTERFACE "PLASMA COATING OF HIGH-SPEED STEEL - SUBSTRATE"

Irina V. Baklushina<sup>1</sup>, Victor E. Gromov<sup>2</sup>, Yuri F. Ivanov<sup>3</sup>, Igor Yu. Litovchenko<sup>4</sup>,  
Tatyana P. Guseva<sup>5</sup>, Sergey A. Nevskii<sup>6</sup>

<sup>1,2,5,6</sup> Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

<sup>3</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

<sup>4</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS Academicheskii Pr., 2/4, Tomsk, 634055, Russia

<sup>1</sup> baklushina\_iv@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4487-3260>

<sup>2</sup>gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

<sup>3</sup>yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

<sup>4</sup>litovchenko@spti.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5892-3719>

<sup>5</sup>guseva\_tp@sibsiu.ru,

<sup>6</sup>nevskiy.sergei@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7032-9029>

**Abstract.** One of the important problems of practical use of high-strength plasma coatings of high-speed steels in a nitrogen environment is the analysis of the structural-phase states and properties of the transition zone in the «coating-substrate» system, since it is these properties that largely determine the premature formation of brittle microcracks in the contact zone. Molybdenum and tungsten-molybdenum steel coatings have recently found wide application instead of the well-known tungsten (P18, P9) and tungsten-molybdenum steels with increased tungsten content (P6M5, P6F2K8M6 and others). This is due to the need to replace expensive and scarce tungsten with molybdenum, which has a similar effect on the structure and properties of high-speed steels. The studies of the structural-phase states, morphology, properties and elemental composition of the transition zone of contact of the systems of deposited high-speed steel grades M9 and P2M9 - substrate (steel grade 30KhGSA) in the initial state were carried out. For the system “coating (high-speed steel P2M9) – substrate (steel 30KhGSA)” in the initial state, the transition zone has a martensitic structure with layers of residual austenite along the boundaries of the martensite plates. Particles of the second phase in the nanoscale (2–60 nm) range were identified: vanadium, molybdenum, tungsten and iron carbides localized at dislocations, at the boundaries and in the volume of martensite plates. For the system “coating (high-speed steel M9) – substrate (steel 30KhGSA)”, it was established that the formation of the coating is accompanied by the creation of an extended transition layer, which contains the  $\alpha$ -phase,  $\gamma$ -phase, and carbides of complex composition.

**Keywords:** electron microscopy, coating, high-speed steel grades M9 and P2M9, contact zone, substrate, transition zone

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Science Foundation grant 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., Guseva T.P., Nevsky S.A. (2026). Electron microscopic analysis of the structure and properties of the transition layer "plasma coating of high-speed steel - substrate". *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(1), 24–32. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.002.

### Введение

Анализ повреждаемости деталей машин показывает, что их преждевременный выход из строя обусловлен главным образом процессами, протекающими на поверхности в зоне трения. При этом многие части деталей машин и оборудования выбраковываются вследствие небольшого износа рабочей поверхности. В связи с этим, актуальной является задача повышения эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей до более высокого

уровня, прежде всего способности сопротивляться различным видам изнашивания [1,2].

Восстановление изношенного при эксплуатации оборудования и придание специальных свойств поверхностям новых изделий достигается использованием технологии наплавки в защитной среде азота [3-8]. Покрытия, сформированные плазменным методом, имеют преимущества перед другими способами нанесения покрытий, поскольку наиболее полно

отвечают предъявляемым промышленностью требованиям как по экономической эффективности, так и по уровню достигнутых свойств.

При нанесении покрытий актуальной проблемой остается переходная зона 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 исследования структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры переходной зоны. Однако на сегодняшний день в зарубежной и отечественной научной литературе имеется крайне небольшое число публикаций по данной тематике, что ограничивает перспективы практического применения наплавляемых покрытий.

За последнее столетие с момента создания первой быстрорежущей вольфрамовой стали были разработаны другие различные вольфрамовые и вольфраммолибденовые стали для конкретных задач машиностроительной, металлургической, горнодобывающей и других отраслей промышленности, вошедшие в каталоги и справочники промышленно развитых стран [11]. Созданные в последнее время молибденовые быстрорежущие стали привлекательны с экономической точки зрения (вольфрам более дорогой и дефицитный материал) и с более высокими функциональными свойствами при меньшем содержании легирующих элементов по сравнению с вольфрамовыми и вольфраммолибденовыми быстрорежущими сталями [12-15]. Целью настоящей работы являлось исследование структуры и свойств интерфейса систем «наплавка (стали P2M9 и M9) / (сталь 30XГСА) подложка», сформированной плазменным методом.

### Материал и методы исследования

Образцы для исследований были изготовлены плазменной наплавкой в среде азота нетокующей проволокой ПП-P2M9 на сталь марки 30XГСА. Химический состав стали 30XГСА: 0,3 % C; 0,9 % Cr; 0,8 % Mn; 0,9 % Si. Химический состав стали P2M9: 0,86 % C; 4,8 % Cr; 2,5 % W; 9,4 % Mo; 0,5 % V; 0,85 % Al;

0,08 % N; остальное железо. Для покрытия быстрорежущей молибденовой стали химический состав наплавленного слоя соответствует стали M9 по SAE-AISI M9 (T11309) Molybdenum High-Speed Steel (вес. %): C - (1-1,1); Mo-8,85; Cr-3,57; Co-2,12; V-0,05; Si-1,12; Mn-0,56, Al-1,05, остальное – Fe. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон высшего сорта (ГОСТ 10157-79) с расходом 6-8 л/мин; в качестве защитного газа использовали технически чистый азот (ГОСТ 9293-74) с расходом 20-22 л/мин. Режимы плазменной наплавки на установке УД-417 не отличались от описанных в работах [9,10].

Фазовый состав систем «покрытие - подложка» изучали методами рентгеноструктурного анализа. Использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-8Н, оснащенный параболическим зеркалом на первичном пучке и позиционно-чувствительным детектором Mythen 2R 1D. Структуру и элементный состав систем «покрытие - подложка» изучали методами сканирующей электронной микроскопии (прибор КУКУ-ЕМ6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом и приставкой для микрорентгеноспектрального анализа элементного состава).

Исследования структуры и фазового состава наплавленного слоя и зоны контакта осуществляли методами сканирующей (прибор КУКУ-ЕМ6900, оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа Aztec Live Lite Xplore 30 EDS) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM2100) электронной микроскопии [16 – 18].

Метод микродифракционного анализа с привлечением темнопольной методики использовали для анализа фазового состава материала.

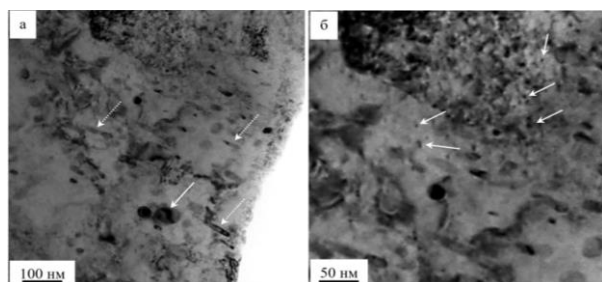
### Результаты и их обсуждение

При электронно-микроскопическом исследовании травленого шлифа наплавленного слоя стали P2M9 выявили структуру каркасного типа, характеризующуюся наличием протяженных прослоек второй фазы, расположенных по границам зерен. В зоне контакта наплавленного слоя и подложки структура каркасного типа не формируется, что может свидетельствовать о взаимной диффузии элементов подложки и наплаваемого слоя. Выполненный микрорентгеноспектральный анализ элементного состава переходной зоны выявил обогащение подложки химическими элементами наплаваемого слоя.

Его результаты свидетельствуют об обогащении прилегающего слоя подложки атомами молибдена, а прилегающего слоя наплавки атомами кремния.

Выполненные исследования методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, используя методы темнопольного анализа и индирования микроэлектроннограмм показали, что переходная зона имеет мартенситную структуру. По границам пластин мартенсита располагаются протяженные прослойки остаточного аустенита.

Структура переходной зоны содержит частицы второй фазы (рис. 1), которые характеризуются разнообразными формами (пластинки, глобулы, сферы), размерами (от 2 до 60 нм и средним значением  $(25 \pm 5)$  нм, местом расположения (дислокации, границы зерен, кристаллов мартенсита и прослоек остаточного аустенита).



**Рисунок 1.** Электронно-микроскопическое изображение частиц второй фазы, присутствующих в структуре переходной зоны в состоянии после наплавки (исходное состояние). Стрелками указаны на (а) частицы глобулярной формы (сплошные стрелки) и частицы пластинчатой формы (прерывистые стрелки); на (б) – частицы сферической формы

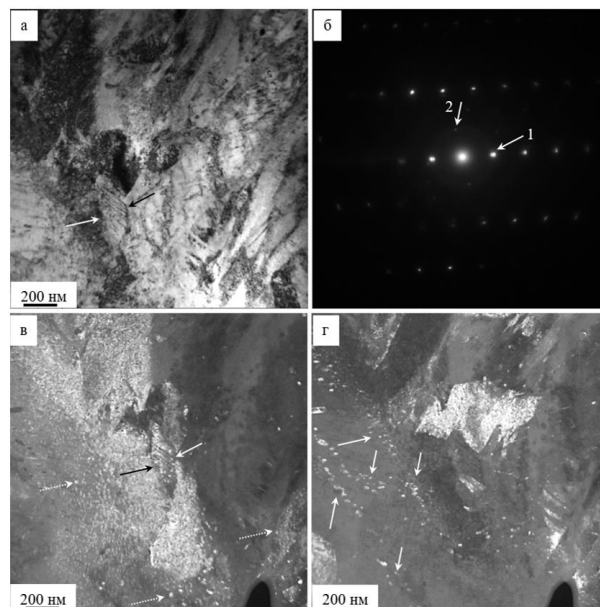
**Figure 1.** Electron microscopic image of the second phase particles present in the structure of the transition zone in the state after surfacing (initial state). The arrows indicate (a) globular-shaped particles (solid arrows) and plate-shaped particles (dashed arrows); (b) – spherical particles

Методами темнопольного анализа с последующим индированием микроэлектроннограмм установлено, что наноразмерные частицы, формирующиеся на дислокациях, представлены карбидом ванадия (рис. 2, в, частицы указаны штриховыми стрелками); частицы, расположенные на границах пластин мартенсита, являются карбидами молибдена и вольфра-

ма (рис. 2, г, частицы указаны стрелками). Следует отметить присутствие в структуре переходной зоны зерен остаточного аустенита (рис. 2, а, в, зерно остаточного аустенита указано стрелками). В объеме зерен аустенита практически всегда наблюдается двойниковая структура, что свидетельствует о низкой величине энергии дефекта упаковки  $\gamma$ -фазы.

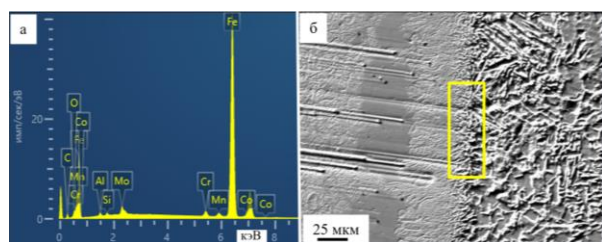
Результаты анализа структуры переходной зоны позволяют утверждать, что частицы пластинчатой формы, расположенные в объеме кристаллов мартенсита, являются карбидом железа (цементитом).

Характерное изображение энергетических спектров, полученных с интерфейса системы «покрытия (сталь М9)/(сталь 30ХГСА) подложка», приведено на рис. 3.



**Рисунок 2.** Электронно-микроскопическое изображение структуры переходной зоны в состоянии после наплавки (исходное состояние); а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах  $[110]\alpha\text{-Fe} + [002]\gamma\text{-Fe} + [012]\text{V}_2\text{C}$  (в) и  $[110]\alpha\text{-Fe} + [103]\text{MoC} + [101]\text{W}_2\text{C}$  (г); на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в); 2 – для (г)

**Figure 2.** Electron microscopic image of the structure of the transition zone in the as-deposited state (initial state); a – bright field; b – microelectron diffraction pattern; c, d – dark fields obtained in the reflections  $[110]\alpha\text{-Fe} + [002]\gamma\text{-Fe} + [012]\text{V}_2\text{C}$  (c) and  $[110]\alpha\text{-Fe} + [103]\text{MoC} + [101]\text{W}_2\text{C}$  (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which the dark fields were obtained: 1 – for (c); 2 – for (d)



**Рисунок 3.** Энергетические спектры (а), полученные методами микрорентгеноспектрального анализа переходного слоя (участок шлифа, выделенный на (б) прямоугольником) стали М9, наплавленной на сталь 30ХГСА.

**Figure 3.** Energy spectra (a) obtained by micro-X-ray spectral analysis of the transition layer (section of the section marked with a rectangle in (b)) of M9 steel deposited on 30KhGSA steel.

**Таблица 1.** Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытия М9.

**Table 1.** Results of micro-X-ray spectral analysis of the M9 coating.

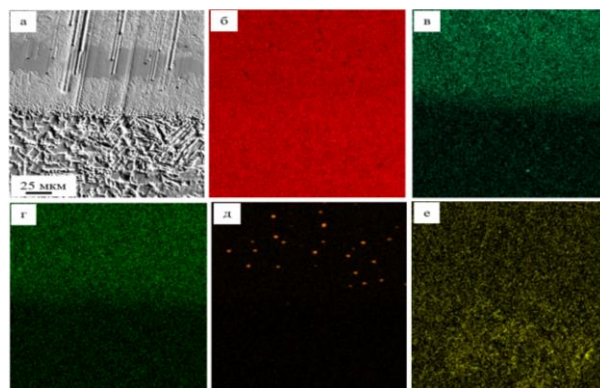
Элемент	Покрывтия		Интерфейс (рис. 3, б) со стороны подложки		Интерфейс (рис. 3, б) со стороны покрытия	
	Вес.%	Ат.%	Вес.%	Ат.%	Вес.%	Ат.%
C	7,09	26,44	7,37	26,37	7,12	25,62
O	0,0	0,0	1,22	3,28	1,2	3,23
Al	1,28	2,13	0,58	0,93	0,28	0,45
Si	0,19	0,3	0,33	0,51	0,34	0,52
Cr	3,26	2,81	1,19	0,98	0,65	0,54
Mn	0,51	0,41	1,02	0,8	1,08	0,85
Fe	79,46	63,85	85,24	65,61	88,3	68,32
Co	1,09	0,83	0,58	0,43	0,0	0,0
Mo	7,12	3,22	2,47	1,11	1,03	0,46

Отчетливо видно (табл. 1), что кроме химических элементов проволоки, использованной при формировании наплавки, в переходном слое системы «наплавка/подложка» присутствуют атомы кислорода, что, по всей видимости, указывает на присутствие атомов кислорода на поверхности (в поверхностном слое) подложки (сталь 30ХГСА). Сопоставляя результаты, представленные в табл. 1, можно отметить снижение относительного содержания легирующих элементов (Al, Cr, Co, Mo) и увеличение содержания Si и Mn по мере приближения к переходному слою со стороны покрытия.

Визуализация распределения элементного состава системы «наплавка (М9) / (сталь 30ХГСА) подложка» приведена на рис. 4. Отчетливо видно, что атомы молибдена и хрома

сосредоточены, преимущественно, в наплавке, переходный слой обогащен атомами алюминия и кислорода, формирующих, по всей видимости, оксиды алюминия; слой стали 30ХГСА, прилегающий к переходному слою, обогащен атомами кислорода

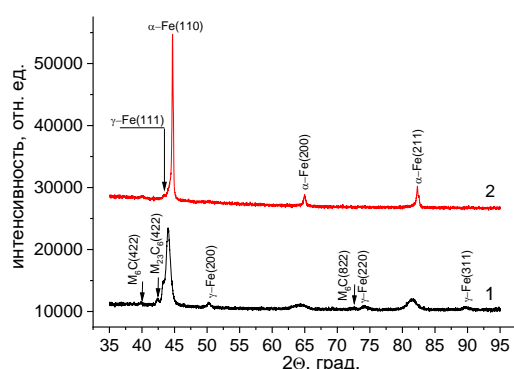
Фазовый состав наплавки и переходного слоя изучали методами рентгенофазового анализа (рис. 5; табл. 2). Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о формировании в наплавленном слое многофазной структуры, представленной  $\alpha$ -фазой (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа),  $\gamma$ -фазой (твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки железа), карбидами сложного состава  $Me_{23}C_6$  и  $Me_6C$  и карбидом железа состава  $Fe_2C$ . Как и следовало ожидать, основной фазой является твердый раствор на основе  $\alpha$ -Fe (65 мас. %); в существенно меньшем количестве присутствует твердый раствор на основе  $\gamma$ -Fe (12 мас. %); относительное содержание карбидных фаз достигает 23 мас. %, при этом преобладающими являются карбиды сложного состава  $Me_{23}C_6$  и  $Me_6C$ . Следует отметить, что параметры кристаллических решеток  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз (табл. 2) значительно превышают табличные значения параметров кристаллических решеток  $\alpha$ - и  $\gamma$ -Fe. (таблица 2).



**Рисунок 4.** Карты распределения химических элементов переходного слоя; а – электронное изображение участка переходного слоя системы «наплавка / подложка»; б-е – изображения данного участка наплавки, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов Fe (б), Mo (в), Cr (г), Al (д), O (е).

**Figure 4.** Maps of the distribution of chemical elements of the transition layer; a – electron image of the transition layer section of the “surface/substrate” system; b-e – images of this section of the surfacing obtained in the characteristic X-ray radiation of Fe (b), Mo (c), Cr (d), Al (d), O (e) atoms.

Следует отметить, что параметры кристаллических решеток  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз (табл. 2) значительно превышают табличные значения параметров кристаллических решеток  $\alpha$ - и  $\gamma$ -Fe. Это указывает на формирование в наплавленном слое твердых растворов замещения и внедрения на основе железа. Основной фазой переходного слоя является, как и ожидалось,  $\alpha$ -фаза (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа), в небольшом количестве присутствует  $\gamma$ -фаза (твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки железа) и карбид сложного состава  $Me_6C$  (таблица 2).



**Рисунок 5.** Фрагменты рентгенограмм покрытия М9 (1) и интерфейса системы «покрытие (М9)/(сталь 30ХГСА) подложка» (2).

**Figure 5.** Fragments of radiographs of the M9 coating (1) and the interface of the “coating (M9)/(30KhGSA steel) substrate” system (2).

**Таблица 2.** Расчетные данные, полученные из дифрактограмм, представленных на рисунке 5.

**Table 2.** Calculated data obtained from the diffraction patterns presented in Figure 5.

Фаза	Доля фазы, мас. %	Параметры решетки, Å	Размеры ОКР, нм
наплавка			
$\alpha$ -Fe	65	$a = 2.887$	52
$\gamma$ -Fe	12	$a = 3.598$	34
$Me_{23}C_6$	11	$a = 10.466$	23
$Me_6C$	7	$a = 11.002$	28
$Fe_2C$	5	$a = 2.701$	
система «наплавка (М9Ю)/(сталь 30ХГСА) подложка»			
$\alpha$ -Fe	92	$a = 2.870$	43
$\gamma$ -Fe	5	$a = 3.600$	-
$Me_6C$	3	-	-

Для покрытия стали М9 установлено, что структура подложки сформирована зернами перлита и зернами феррита (твердый раствор на основе  $\alpha$ -железа). Перлит имеет пластинчатую морфологию и сформирован чередующимися пластинками цементита и  $\alpha$ -железа.

В зернах переходного слоя наблюдается пластинчатая структура, что может свидетельствовать о мартенситной природе формирования структуры  $\alpha$ -фазы. По границам зерен наблюдаются протяженные прослойки, имеющие строение, характерное для эвтектического превращения, т.е. по границам зерен располагаются эвтектика пластинчатого типа.

Как отмечалось выше, переходный слой имеет пластинчатую структуру (рис. 6) Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что пластины сформированы сдвиговым механизмом и по морфологическому признаку могут быть идентифицированы как пластинчатый и пакетный мартенсит (рис. 6). По границам пластин и границам пакетов располагаются наноразмерные (15-32 нм) частицы карбида железа – цементит (рис. 6, в, частицы цементита указаны стрелками). Одновременно с этим вдоль границ кристаллов мартенсита располагаются протяженные прослойки остаточного аустенита (рис. 6, г).

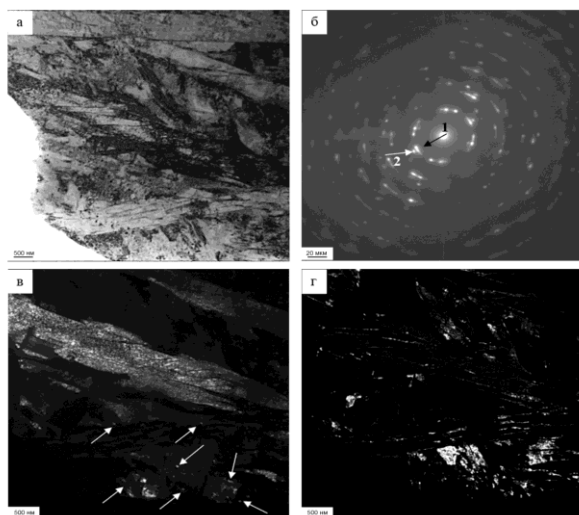
Таким образом, в процессе формирования наплавки в переходном слое формируется многофазная структура, представленная мартенситом, остаточным аустенитом и карбидами железа

## Заключение

Проведены электронно-микроскопические исследования структуры и фазового состава зоны контакта плазменной наплавки быстрорежущей стали марки Р2М9 на среднеуглеродистую сталь марки 30 ХГСА в исходном состоянии. В исходном состоянии выявлена мартенситная структура переходной зоны с прослойками остаточного аустенита, которая содержит наноразмерные карбиды ванадия, молибдена, вольфрама и железа глобулярной, пластинчатой и сферической форм.

Установлено, что формирование покрытия из стали М9 сопровождается созданием переходного слоя толщиной до 100 мкм. Показано, что основной фазой переходного слоя является  $\alpha$ -фаза (твердый раствор на основе ОЦК кри-

сталлической решетки железа), в небольшом количестве присутствует  $\gamma$ -фаза (твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки железа) и карбиды сложного состава  $Me_6C$  и  $Me_{23}C_6$ , а также  $MoC$  и цементит. Установлено, что зона контакта наплавки и стали 30ХГСА не содержит микротрещин и микропор. Показано, что в зоне контакта структура стали 30ХГСА сохраняет феррито-перлитное состояние, однако наблюдается существенное (до 1,5-2,3 мкм) снижение размеров зерен феррита. Установлено, что переходный слой имеет закалочную структуру, представленную пластинами и пакетами мартенсита, прослойками остаточного аустенита и наноразмерными частицами цементита. Переходный слой, непосредственно примыкающий к наплавке, содержит протяженные прослойки эвтектики, сформированной  $\alpha$ -фазой и карбидами состава  $M_{23}C_6$  и  $MoC$ .



**Рисунок 6.** Электронно-микроскопическое изображение структуры интерфейса системы «наплавка (M9)/(сталь 30ХГСА) подложка»; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах  $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$  (в) и  $[111]\gamma\text{-Fe}$  (г); на (б) стрелками указаны рефлекссы, в которых получены темные поля: 1 – для (в); 2 – (г); на (в) стрелками указаны частицы цементита.

**Figure 6.** Electron microscopic image of the interface structure of the “surfacing (M9)/(30KhGSA steel) substrate” system; a – bright field; b – microelectron diffraction pattern; c, d – dark fields obtained in reflections  $[110]\alpha\text{-Fe} + [121]\text{Fe}_3\text{C}$  (c) and  $[111]\gamma\text{-Fe}$  (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which the dark fields were obtained: 1 – for (c); 2 – (d); in (c) the arrows indicate the cementite particles.

## Список литературы

1. Nefedev 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. T.870. С. 141-148
2. Плазменное упрочнение поверхности: монография / Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. – Старый Оскол: ТНТ, 2021, 156с.
3. Darmawan W., Quesada J., Marchal R. Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance // *Surf. Eng.* 2007. V. 23. No. 2. P. 112 – 119.
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. V. 27 №2. PP. 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). С. 33-45. DOI: 10.17816/byusu20210233-45
6. Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. Наплавка быстрорежущей стали / Омск. Изд-во «ОмГТУ», 2016. 200с.
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. V.66. №7., November. PP. 731-739 DOI: 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. V. 3(91). PP. 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 - P2M9) – подложка (сталь 30ХГСА) // *Вестник СибГИУ*, 2025. № 2(52). С. 3-8
10. Potekaev A.I., Gromov V.E., Yuriev A.B., Ivanov Yu.F., Kononov 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. V. 67. №8. PP. 1107-1113

11. Kremnev L.S. From High-Speed Tungsten Steel to High-Temperature Molybdenum Steel: A Century of High-Speed Steel. // Steel in Translation. 2009. V.39. №12 PP. 1111-1118

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) С. 13-19. EDN: KZSBKP

13. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов // МнТОМ. 2008. №11. С. 18-28. EDN: KVXKKF

14. Купалова И.К. Фазовый анализ и фазовый состав быстрорежущих сталей (обзор) // Заводская лаборатория. 1983. №1. С. 27-40

15. Вострецов Г.Н. Деформационная способность наплавленного теплостойкого металла типа P2M8 при мартенситном превращении // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2012. №1. С. 7-10

16. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. - Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.

17. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.

Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. – Basel: Springer International Publishing, 2016. – 196 p.

### Информация об авторах

*И. В. Баклушина – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, заместитель директора Института открытого образования Сибирского государственного индустриального университета.*

*В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.*

*Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.*

*И.Ю. Литовченко – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией материаловедения сплавов с памятью*

*формы, руководитель ЦКП «НАНОТЕХ» Института физики прочности и материаловедения СО РАН.*

*Т. П. Гусева соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.*

*С. А. Невский – доктор технических наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.*

### References

1. Nefedev, S.P., Vdovin, K.N., Emelyushin, A.N. (2016). Peculiarities of forming the wear-resistant cast iron coating structure on steel 45 upon plasma-powder surfacing. Materials Science Forum, 870, 141–148.

2. Nefedev, S.P., Emelyushin, A.N. (2021). Plasma Surface Hardening: Monograph. Stary Oskol: TNT, 156 p.

3. Darmawan, W., Quesada, J., Marchal, R. (2007). Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance. Surface Engineering, 23(2), 112–119.

4. Emelyushin, A.N., Petrochenko, E.V., Nefedev, S.P. (2013). Investigation of the structure and impact-abrasive resistance of coatings of the Fe-C-Cr-Mn-Si system, additionally alloyed with nitrogen. Welding International, 27(2), 150–153.

5. Nefedev, S.P., Emelyushin, A.N. (2021). Influence of nitrogen on the formation of structure and properties of plasma coatings type 10P6M5. Bulletin of Yugra State University, 3(62), 33–45. DOI: 10.17816/byusu20210233-45.

6. Mozgovoy, I.V., Shneider, E.A. (2016). Surfacing of High-Speed Steel. Omsk: Publishing House "OmskSTU", 200 p.

7. Ivanov, Yu.F., Gromov, V.E., Potekaev, A.I., Guseva, T.P., Chapaikin, A.S., Vashchuk, E.S., Romanov, D.A. (2023). Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering. Russian Physics Journal, 66(7), 731–739. DOI: 10.1007/s11182-023-02999-w.

8. Rakhadilov, B.K., Zhureroва, L.G., Scheffler, M., Khassenov, A.K. (2018). Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding. Bulletin of Karaganda University, Physics Series, 3(91), 59–65. EDN: KJWHYN.

9. Gromov, V.E., Yuryev, A.B., Ivanov, Yu.F., Minenko, S.S., Konovalov, S.V. (2025). Electron microscopy study of the contact zone between surfacing (high-speed steel R2M9) and substrate (steel 30KhGSA). *Bulletin of SibGIU*, 2(52), 3–8.
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. (2024). Transition zone structure in the fast-cutting surfaced layer–substrate system. *Russian Physics Journal*, 67(8), 1107–1113.
11. Kremnev, L.S. (2009). From high-speed tungsten steel to high-temperature molybdenum steel: a century of high-speed steel. *Steel in Translation*, 39(12), 1111–1118.
12. Kremnev, L.S., Onegina, A.K., Vinogradova, L.A. (2009). Features of transformations, structure, and properties of molybdenum high-speed steels. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov (Metal Science and Heat Treatment)*, 12(654), 13–19. EDN: KZSBKP.
13. Kremnev, L.S. (2008). Alloying theory and development of heat-resistant tool steels and alloys based on it. *MiTOM*, 11, 18–28. EDN: KVXKKF.
14. Kupalova, I.K. (1983). Phase analysis and phase composition of high-speed steels (review). *Zavodskaya Laboratoriya (Factory Laboratory)*, 1, 27–40.
15. Vostretsov, G.N. (2012). Deformation ability of deposited heat-resistant metal of type R2M8 under martensitic transformation. *Bulletin of Siberian State Industrial University*, 1, 7–10.
16. Carter, C.B., Williams, D.B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 518 p.
17. Kumar, C.S.S.R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 717 p.
18. Egerton, F.R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 196 p.

### ***Information about the authors***

*I. V. Baklushina – postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after prof. V. M. Finkel, deputy director of the Institute of Open Education of the Siberian State Industrial University.*

*V. E. Gromov – doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the Department of Natural Sciences named after prof. V. M. Finkel of the Siberian State Industrial University.*

*Yu. F. Ivanov – doctor of physical and mathematical sciences, professor, chief researcher of the Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

*I. Yu. Litovchenko – doctor of physical and mathematical sciences, head of the laboratory of materials science of shape memory alloys, head of the NANOTECH Shared Use Center of the Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

*T. P. Guseva applicant of the Department of Natural Sciences named after prof. V. M. Finkel of the Siberian State Industrial University.*

*S. A. Nevsky – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after Professor V. M. Finkel of the Siberian State Industrial University.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 23.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

The article was received by the editorial board on 26 Aug. 2025; approved after reviewing 23 Feb. 2026; accepted for publication 02 Mar. 2026.