

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Оригинальная статья

УДК 669.14.018.252

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-9-13

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ МОЛИБДЕНОВОЙ СТАЛИ

© 2025 г. И. В. Баклухина¹, А. Н. Гостевская¹, В. Е. Громов¹, Ю. Ф. Иванов²,
А. С. Чапайкин¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654006, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

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

Аннотация. Методами современного физического материаловедения изучена структура и свойства поверхности плазменного наплавленного слоя в среде азота быстрорежущей молибденовой сталью на подложку из среднеуглеродистой стали марки 30ХГСА. Наплавленный слой облучался импульсными электронными лучами со следующими параметрами: плотность энергии 30 Дж/см²; длительность одного воздействия 50 мкс; частота 0,3 Гц; число импульсов 10. В исходном состоянии поверхностные слои содержат поликристаллическую структуру дендритного типа с неоднородным распределением молибдена, хрома, алюминия, азота и кислорода, окруженную развитой сеткой ледебуритной эвтектики. Относительное содержание элементов (кроме марганца, углерода и кислорода) снижается по мере приближения к подложке. Микротвердость наплавленного слоя составляет 5,6 МПа, которая при однократном высокотемпературном отпуске возрастает до 6,2 МПа, а при двукратном – до 7,2 МПа. Электронно-лучевое импульсное воздействие, выполненное после двукратного высокотемпературного отпуска, модифицирует структуру и свойства. Выявлено квазиоднородное распределение легирующих элементов, формирование мелкозернистой структуры с размером зерен 4 – 6 мкм, в объеме которых обнаружен мартенсит пластинчатого типа. Ранее сформированная структура дендритной кристаллизации не наблюдалась. Микротвердость наплавленного слоя после электронно-лучевой обработки возрастает и достигает 8,7 МПа, что почти в 2 раза превышает микротвердость подложки. Выявленные закономерности изменения нанотвердости и модуля Юнга от расстояния до поверхности облучения подтверждают развивающиеся представления о природе упрочнения плазменного наплавленного слоя быстрорежущей молибденовой сталью.

Ключевые слова: молибденовая быстрорежущая сталь, высокотемпературный отпуск, электронная микроскопия, структура, нанотвердость

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

Для цитирования: Баклухина И.В., Гостевская А.Н., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Чапайкин А.С. Влияние электронно-лучевой обработки на структуру и свойства плазменного покрытия быстрорежущей молибденовой стали. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):9–13. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-9-13](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-9-13)

EFFECT OF ELECTRON BEAM TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA COATING OF HIGH-SPEED MOLYBDENUM STEEL

© 2025 I. V. Baklushina¹, A. N. Gostevskaya¹, V. E. Gromov¹, Yu. F. Ivanov²,
A. S. Chapaikin¹

¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²Institute of High-Current Electronics SB RAS (2/3 Akademichesky Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. The structure and properties of the surface of a plasma-deposited layer in a nitrogen environment of high-speed molybdenum steel on a substrate of medium-carbon steel grade 30KhGSA were studied using modern physical materials science methods. The deposited layer was irradiated with pulsed electron beams with the following parameters: energy density of 30 J/cm², duration of one exposure of 50 μs, frequency of 0.3 Hz, number of pulses of 10. In the initial state, the surface layers contain a polycrystalline structure of the dendritic type with a non-uniform distribution of molybdenum, chromium, aluminum, nitrogen and oxygen, surrounded by a developed network of ledeburite eutectic. The relative content of elements (except for Mn, C and O₂) decreases as it approaches the substrate. The microhardness of the deposited layer is 5.6 MPa, which increases to 6.2 MPa after a single high-temperature tempering, and to 7.2 MPa after a double tempering. Electron-beam pulsed action performed after a double high-temperature tempering modifies the structure and properties. A quasi-homogeneous distribution of alloying elements, the formation of a fine-grained structure with a grain size of 4 – 6 μm, in the volume of which lamellar martensite was found, were revealed. The previously formed structure of dendritic crystallization is not observed. The microhardness of the deposited layer after electron-beam treatment increases and reaches 8.7 MPa, which is almost 2 times higher than the microhardness of the substrate. The revealed patterns of change in nanohardness and Young's modulus from the distance to the irradiation surface confirm the developed ideas about the nature of hardening of the plasma deposited layer of high-speed molybdenum steel.

Keywords: molybdenum high-speed steel, high-temperature tempering, electron microscopy, structure, nanohardness

Financing. 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., Gostevskaya A.N., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Chapaikin A.S. The effect of electron beam treatment on the structure and properties of the plasma coating of high-speed molybdenum steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):9–16. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-9-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-9-16)

Введение

После создания первой быстрорежущей стали марки Р18, содержащей 18 % W, прошло уже более 100 лет. За это время разработаны новые марки стали оптимального состава для конкретных потребностей машиностроительной, металлургической, горнодобывающей и других отраслей промышленности. Для обеспечения высокого уровня эксплуатационных и технологических свойств были созданы стали оптимального состава (Р6М5, Р6М5Ф3, Р6М4К5 и др.), изменяющегося в зависимости от свойств обрабатываемых материалов, технологии производства инструмента, стоимости легирующих составляющих и т.п. [1 – 4].

В настоящее время отмечается более широкое применение быстрорежущих сталей с содержанием молибдена 8 – 10 %. Замена вольфрама на молибден обусловлена целым рядом причин. Вольфрам, являющийся стратегическим элемен-

том, широко используется при производстве бронебойных снарядов, является более дорогим и дефицитным элементом. Молибден и вольфрам, расположенные в одной группе и соседних периодах Периодической таблицы элементов, оказывают подобное влияние на формирование структурно-фазового состояния и свойств быстрорежущих сталей [1 – 4]. Однако характер протекающих превращений в молибденовых сталях, а также их свойства могут значительно отличаться от вольфрамовых и вольфрамомолибденовых сплавов [5].

Одной из фундаментальных задач современного физического материаловедения, имеющих важное практическое значение, является получение наплавок быстрорежущими сталями с высокими эксплуатационными свойствами, обеспечивающими защиту изделий от износа, коррозии, динамических нагрузок и других видов внешних воздействий. Использование азота в качестве легирующего элемента при формиро-

вании наплавочных покрытий, приводящее к росту микротвердости структурных составляющих, значительно повышает эксплуатационные свойства [6 – 9]. В последние годы активно проводятся научные исследования и практические разработки в области энерго- и ресурсосберегающих технологий плазменной наплавки быстрорежущими сталью, имеющими значительные преимущества перед другими способами нанесения покрытий [10 – 15].

Дополнительное улучшение свойств поверхностных слоев, сформированных плазменной наплавкой быстрорежущими сталью, достигается за счет использования внешних энергетических воздействий плазмой, лазерным облучением, ионными пучками, модифицирующих поверхность. Среди них особое место занимает обработка импульсными электронными лучами, обеспечивающая сверхвысокие (примерно 10^6 К/с) скорости нагрева и охлаждения. За время импульса (20 – 50 мкс) материал толщиной 20 – 50 мкм успевает претерпеть сложные преобразования при нагреве, испарении, распространении термоупругих волн, кристаллизации, приводящие к формированию неравновесных микро- и нанокристаллических структурно-фазовых состояний, что обеспечивает получение повышенных эксплуатационных характеристик [16 – 21].

Целью настоящей работы является исследование тонкой структуры и свойств поверхностного слоя, сформированного плазменной наплавкой быстрорежущей молибденовой сталью на подложку из среднеуглеродистой стали.

Материал и методы исследований

Использовали порошковую проволоку системы MoCrCoC диаметром 4 мм. Образцы для исследований получали плазменной наплавкой в среде азота на сталь марки 30ХГСА по следующему режиму: сварочный ток 145 – 150 А; напряжение на дуге 50 – 55 В; скорость наплавки 18 м/ч; скорость подачи проволоки 60 м/ч; длина дуги 20 мм. Химический состав стали марки 30ХГСА следующий: 0,3 % С; 0,9 % Cr; 0,8 % Mn; 0,9 % Si; остальное Fe. Химический состав наплавки соответствует стали марки М9 по SAE-AISI M9 (T11309) Molybdenum High-Speed Steel: 8,85 % Mo; 3,57 % Cr; 2,12 % Co; 0,05 % V; 1,12 % Si; 0,56 % Mn; 1,05 % Al; остальное Fe. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон (ГОСТ 10157 – 79) с расходом 6 – 8 л/мин, а защитного – технический азот (ГОСТ 9293 – 74) с расходом 20 – 22 л/мин. Режимы плазменной наплавки на установке УД-417 не отличались от описанных в работе [11].

Наплавку проводили в четыре слоя общей толщиной примерно 10 мм. Двукратный отпуск

стали с наплавленным слоем осуществляли при температуре 560 – 580 °С в течение 1 ч. Дополнительную обработку наплавленного слоя импульсным электронным пучком осуществляли на установке СОЛО (ИСЭ СО РАН) [16 – 18]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см²; длительность импульсов воздействия 50 мкс; количество импульсов 10; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; облучение проводили в среде аргона при остаточном давлении 0,02 Па.

Исследования структуры и элементного состава наплавленного слоя осуществляли на сканирующем электронном микроскопе KYKY-EМ6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом и приставкой для микрорентгеноспектрального анализа элементного состава. Исследования микротвердости проводили методом Виккерса на приборе HVS-1000. Нанотвердость и модуль Юнга измеряли прибором Наноскан 4D.

Результаты и их обсуждение

Наплавленное покрытие имеет первичную ячеистую поликристаллическую структуру литьых быстрорежущих сталей [10 – 12], карбидная сетка которого окружает мартенсито-аустенитные кристаллы. Характерными элементами такой структуры являются прослойки второй фазы, локализованные на границах зерен. Микротвердость поверхности значительно снижается (от 5,6 МПа) до значений подложки с ростом расстояния. Это может быть связано с элементным составом поверхностного слоя. Выполненные методом рентгеноспектрального анализа «по точкам» исследования показали локализацию ряда химических элементов (Mo, Cr, Al и Si) (рис. 1). В области с повышенным содержанием алюминия выявлены атомы углерода, азота и кислорода, что позволяет констатировать присутствие в этих областях оксикарбонитридов.

Анализ изменения элементного состава по глубине наплавленного слоя (см. таблицу) свидетельствует о том, что кроме железа основными элементами в нем являются углерод, молибден и хром. Кроме марганца, углерода и кислорода относительное содержание всех элементов снижается по мере приближения к зоне контакта наплавленный слой – подложка.

Последующий двукратный высокотемпературный отпуск не разрушает зернограницевые прослойки второй фазы. Микротвердость увеличивается до 6,2 МПа после первого отпуска, до 7,2 МПа после второго.

Электронно-лучевое импульсное воздействие приводит к значительным изменениям в структуре поверхностного слоя. Характерной для исходного состояния наплавленного слоя структу-

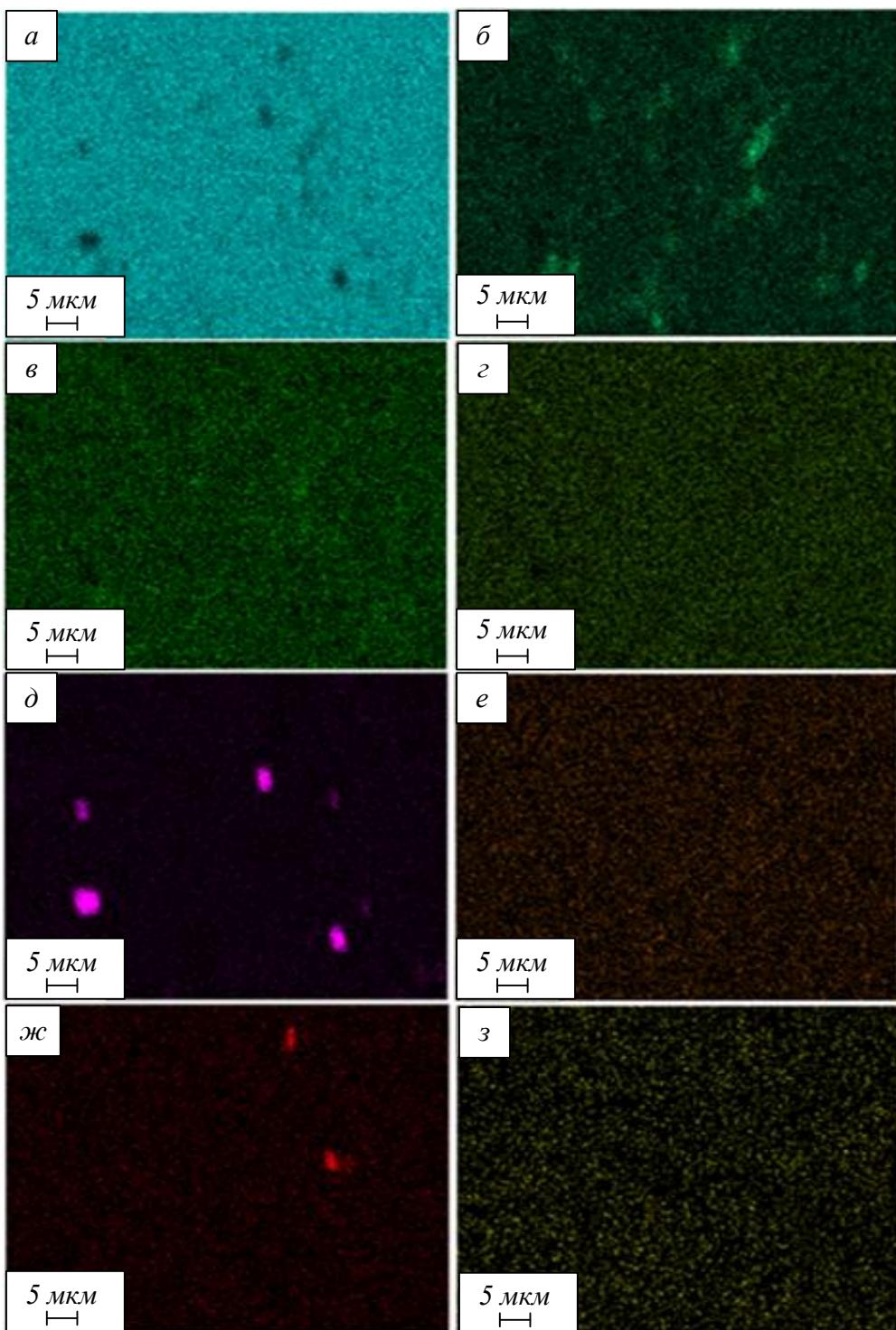


Рис. 1. Распределение химических элементов (Fe (a), Mo (б), Cr (с), Co (з), Al (д), Mn (е), Si (ж), C (з)) наплавленного слоя
Fig. 1. Distribution of chemical elements (Fe (a), Mo (б), Cr (с), Co (з), Al (д), Mn (е), Si (ж), C (з)) of the deposited layer

ры дендритной кристаллизации уже не наблюдается. Благодаря сверхвысокой скорости кристаллизации [16 – 18] формируется мелкозернистая закалочная структура (размер зерна 4 – 6 мкм). В объеме таких зерен формируется субструктура пластинчатого типа, которая характерна для мартенсита. Выполненный микрорентгеноспектральный анализ свидетельствует о формировании химически квазиоднородного поверхностного слоя, основным ликвидирующим элементом

которого является алюминий. Микротвердость поверхностного слоя после облучения выросла до 8,7 МПа. Кроме вышеизложенных факторов упрочнения поверхностного слоя за счет формирования мелкозернистой структуры с мартенситной субструктурой, необходимо отметить возможное образование остаточных сжимающих напряжений, дополнительно упрочняющих поверхность.

Микрорентгеноспектральный анализ элементного состава наплавленного металла**Microrentgenospectral analysis of the elemental composition of the deposited metal**

Элемент	Содержание элемента, %, в слое			
	поверхностном (350 мкм)	на глубине 1 мм	на глубине 3 мм	контакта с подложкой
C	7,01	5,56	7,09	7,37
O	1,60	0,97	—	1,22
Al	1,45	1,50	1,28	0,58
Si	0,16	0,12	0,19	0,33
Cr	3,32	3,37	3,26	1,19
Mn	0,30	0,32	0,51	1,02
Fe	77,88	79,73	79,46	85,24
Co	1,12	1,20	1,09	0,58
Mo	7,16	7,22	7,12	2,47

На рис. 2 представлена зависимость нанотвердости и модуля упругости от расстояния до поверхности облучения. Определение этих параметров осуществляли на поперечных шлифах по дорожкам, расположенным параллельно поверх-

ности наплавки (расстояние между уколами 1 мм, нагрузка на индентор 500 мН). Из полученных результатов видна однородность механических свойств наплавленного слоя.

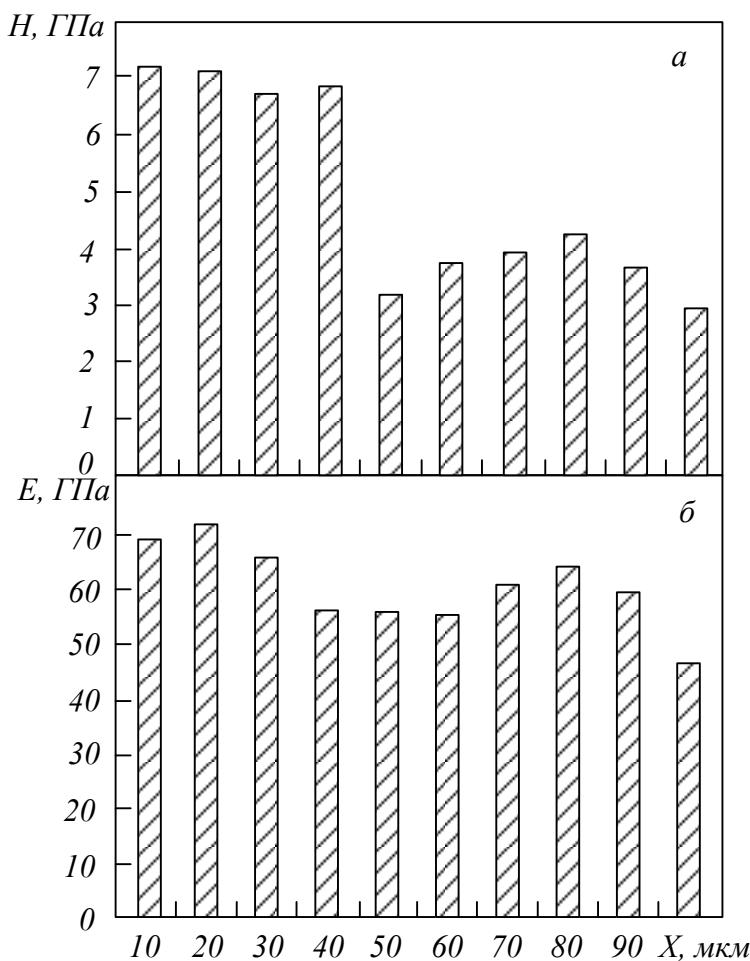


Рис. 2. Гистограммы распределения нанотвердости (a) и модуля Юнга (б) на различных расстояниях от поверхности
Fig. 2. Histograms of the distribution of nanohardness (a) and Young's modulus (б) at different distances from the surface

Выводы

В исходном состоянии наплавленный молибденовой быстрорежущей сталью поверхностный слой имеет поликристаллическую структуру дендритного типа с неоднородным распределением молибдена, хрома, алюминия и кремния. Кроме углерода, кислорода и марганца относительное содержание всех элементов наплавленного слоя снижается по мере удаления от поверхности облучения. Микротвердость наплавленного слоя увеличивается при отпуске от 5,6 до 7,2 МПа после второго отпуска.

Электронно-лучевая импульсная обработка поверхности плазменной наплавки быстрорежущей молибденовой сталью приводит к значительному преобразованию структуры исходного состояния, заключающемуся в формировании квазиднородного поверхностного слоя с мелкозернистой структурой (размер зерен 4 – 6 мкм), в объеме которой выявляется пластинчатый мартенсит. Микротвердость наплавленного слоя после облучения значительно превышает микротвердость исходного состояния и состояния после отпуска. Выявленные зависимости нанотвердости и модуля Юнга от расстояния до поверхности облучения коррелируют с изменениями микротвердости и структуры наплавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов. *MiToM*. 2008;11:18–28.
- Chaus A.S., Pokorný P., Čaplovič L., Sitkevich M.V., Peterka J. Complex fine-scale diffusion coating formed at low temperature on high-speed steel substrate. *Appl. Surf. Sci.* 2018;437:257–270.
- Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear*. 2008;264:885–892.
- Купалова И.К. Фазовый анализ и фазовый состав быстрорежущих сталей (обзор). *Заводская лаборатория*. 1983;1:27–40.
- 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.
- Нефедьев С.П., Емельюшин А.Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10Р6М5. *Вестник Югорского государственного университета*. 2021;3(62):33–45.
- Емельюшин А.Н., Петроценко Е.В., Нефедьев С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe – C – Cr – Mn – Si, дополнительно легированных азотом. *Сварочное производство*. 2011;10:18–22.
- Нефедьев С.П., Емельюшин А.Н. *Плазменное упрочнение поверхности*. Старый Оскол: ТНТ, 2021:156.
- Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. *Наплавка быстрорежущей стали*. Омск: Изд-во «ОмГТУ», 2016:200.
- 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>
- 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.
- Aleksandrovich B.L., Geller Yu.A., Kremnev L.S. New high-hardness high-speed steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 1968;1:2–7.
- Барчуков Д.А., Цыгвинцев А.В., Афанасьева Л.Е. Особенности формирования структуры и свойств быстрорежущей стали при импульсно-дуговой наплавке. *Вестник Тверского государственного университета*. 2019;4(4):16–22.
- Barchukov D.A., Ilyashenko S.E., Lavrent'ev A.Yu., Zubkov N.S. Improvement of the structural state of high-speed steel to enhance hardening efficiency during heat treatment. *Metal Science and Heat Treatment*. 2013;17:6–9.
- Иванов Ю.Ф. Структурные и фазовые превращения в ряде сталей при статическом и динамическом режимах термической обработки: автореф. диссертации д.ф.-м.н. Москва, 2002:41.
- Mishigdorzhbyn U., Semenov A., Ulakhanov N. et al. Microstructure and Wear Resistance of Hot-Work Tool Steels after Electron Beam Surface Alloying with B4C and Al. *Lubricants*. 2022;10(5).
<https://doi.org/10.3390/lubricants10050090>; EDN: XTTOFB.
- Chen X., Konovalov S., Gromov V., Ivanov Yu. Modifying of Structure-Phase States and Properties of Metals by Concentrated Energy Flows. In: *Surface Processing of Light Alloys*

- Subject to Concentrated Energy Flows.* 2021:1–52.
19. Rotshtein V.P., Proskurovsky D.I., Ozur G., Ivanov Yu., Markov A. Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams. *Surface and Coatings Technology.* 2004;180:377–381. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.085>
 20. Khaidarova A.A., Silantiev S.A. Laser Treatment on the Coating Surface Having Been Performed by Means of Plasma Surfacing With Powder Made of M2 Steel. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: electronic edition.* Yurga: IOP Publishing Ltd, 2016:12062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012062>
 21. Samotugin S.S., Butsukin V.V. Increasing of the Service Life of Massive Tools Using Combined Restoration and Hardening Technologies. *Russian Engineering Research.* 2024;44(8):1154–1160. <https://doi.org/10.3103/S1068798X24701934>

REFERENCES

1. Kremnev L.S., Onegin A.K., Vinogradova L.A. Features of transformations, structures and properties of molybdenum high-speed steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov.* 2009;12(654):13–19. (In Russ.).
2. Kremnev L.S. The theory of alloying and the creation of heat-resistant tool steels and alloys based on it. *MiTOM.* 2008;11:18–28. (In Russ.).
3. Chaus A.S., Pokorný P., Čaplovič L., Sitkevich M.V., Peterka J. Complex fine-scale diffusion coating formed at low temperature on high-speed steel substrate. *Appl. Surf. Sci.* 2018;437:257–270.
4. Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear.* 2008;264:885–892.
5. Kupalova I.K. Phase analysis and phase composition of high-speed steels (review). *Zavodskaya laboratoriya.* 1983;1:27–40. (In Russ.).
6. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Investigation of the structure and impact-abrasive resistance of coatings of the Fe-Cr-Mn-Si system, additionally alloyed with nitrogen. *Welding International.* 2013;27(2):150–153.
7. Nefed'ev S.P., Emelyushin A.N. The effect 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.).
8. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Investigation of the structure and impact-abrasive wear resistance of Fe – C – Cr – Mn – Si system coatings additionally doped with nitrogen. *Svarochnoe proizvodstvo.* 2011;10:18–22. (In Russ.).
9. Nefed'ev S.P., Emelyushin A.N. *Plasma surface hardening.* Staryi Oskol: TNT, 2021:156. (In Russ.).
10. Mozgovoi I.V., Shneider E.A. *Welding of high-speed steel.* Omsk: Izd-vo «OmGTU», 2016:200. (In Russ.).
11. 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>
12. 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.
13. Aleksandrovich B.L., Geller Yu.A., Kremnev L.S. New high-hardness high-speed steels. *Metal Science and Heat Treatment.* 1968;1:2–7.
14. Barchukov D.A., Tsygvintsev A.V., Afanaseva L.E. Features of the formation of the structure and properties of high-speed steel during pulsed arc welding. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2019;4(4):16–22. (In Russ.).
15. Barchukov D.A., Ilyashenko S.E., Lavrent'ev A.Yu., Zubkov N.S. Improvement of the structural state of high-speed steel to enhance hardening efficiency during heat treatment. *Metal Science and Heat Treatment.* 2013;17:6–9.
16. Ivanov Yu.F. *Structural and phase transformations in a number of steels under static and dynamic modes of heat treatment:* abstract. dissertations, Ph.D. Moscow, 2002:41. (In Russ.).
17. Mishigdorzhiiyn U., Semenov A., Ulakhanov N. et al. Microstructure and Wear Resistance of Hot-Work Tool Steels after Electron Beam Surface Alloying with B4 C and Al. *Lubricants.* 2022;10(5). <https://doi.org/10.3390/lubricants10050090>; EDN: XTTOFB.
18. Chen X., Konovalov S., Gromov V., Ivanov Yu. Modifying of Structure-Phase States and Properties of Metals by Concentrated Energy Flows. In: *Surface Processing of Light Alloys Subject to Concentrated Energy Flows.* 2021:1–52.
19. Rotshtein V.P., Proskurovsky D.I., Ozur G., Ivanov Yu., Markov A. Surface modification and alloying of metallic materials with low-energy high-current electron beams. *Surface and Coatings Technology.* 2004;180:377–381. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.085>

20. Khaidarova A.A., Silantiev S.A. Laser Treatment on the Coating Surface Having Been Performed by Means of Plasma Surfacing With Powder Made of M2 Steel. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: electronic edition*. Yurga: IOP Publishing Ltd, 2016:12062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012062>

21. Samotugin S.S., Butsukin V.V. Increasing of the Service Life of Massive Tools Using Combined Restoration and Hardening Technologies. *Russian Engineering Research.* 2024;44(8):1154–1160.

<https://doi.org/10.3103/S1068798X24701934>

Сведения об авторе:

Ирина Викторовна Баклушкина, старший преподаватель, заместитель директора Института открытого образования, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: baklushina_iv@sbsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4487-3260

SPIN-код: 9087-6310

Анастасия Николаевна Гостевская, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gostevskaya_an@sbsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7328-5444

SPIN-код: 2230-2454

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.sbsiu.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

Александр Сергеевич Чапайкин, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: thapajkin.s@yandex.ru
ORCID: 0009-0009-8160-7827
SPIN-код: 4488-3030

Information about the authors:

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

E-mail: baklushina_iv@sbsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4487-3260

SPIN-код: 9087-6310

Anastasia N. Gostevskaya, Researcher, Laboratory of EMIOI, Lecturer, Siberian State Industrial University

E-mail: gostevskaya_an@sbsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7328-5444

SPIN-код: 2230-2454

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: gromov@physics.sbsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

SPIN-код: 2834-4090

Yuri F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0271-5504

SPIN-код: 7576-4810

Aleksandr S. Chapaykin, Postgraduate Student, Siberian State Industrial University

E-mail: thapajkin.s@yandex.ru

ORCID: 0009-0009-8160-7827

SPIN-код: 4488-3030

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

Поступила в редакцию 05.05.2025

После доработки 10.06.2025

Принята к публикации 23.06.2025

Received 05.05.2025

Revised 10.06.2025

Accepted 23.06.2025