

Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 21–27.

Izvestiya of Altai State University. 2025. No 1 (141). P. 21–27.

Научная статья

УДК 538.95, 669.14.018.252

DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-02

Структура и свойства наплавки высокоэнтروпийной быстрорежущей стали

Виктор Евгеньевич Громов¹, Юрий Федорович Иванов²,
Сергей Сергеевич Миненко³, Александр Сергеевич Чапайкин⁴,
Анастасия Николаевна Гостевская⁵

¹Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия, yufi55@mail.ru

³Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, mss121278@mail.ru

⁴Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, thapajkin.as@yandex.ru

⁵Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, gostevskaya_an@mail.ru

Original article

Structure and Properties of Hard-Faced High-Entropy High-Speed Steel Layer

Victor E. Gromov¹, Yuri F. Ivanov², Sergey S. Minenko³,
Alexander S. Chapaikin⁴, Anastasia N. Gostevskaya⁵

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia, yufi55@mail.ru

³Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, mss121278@mail.ru

⁴Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, thapajkin.as@yandex.ru

⁵Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gostevskaya_an@mail.ru

Аннотация. Методами современного физического материаловедения исследована структура, элементный состав и микротвердость слоев плазменной наплавки быстрорежущей молибденовой стали, сформированной на среднеуглеродистой стали в среде азота. Выявлена сформированная поликристаллическая структура дендритного типа, в которой обнаружена локализация ряда химических элементов: Mo, Cr, Al, Si, O₂, и N₂. Методом микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» показано, что области наплавки, обогащенные атомами Al, содержат атомы углерода, кислорода и азота. Показано, что Al формирует оксикарбонитриды субмикронных размеров, хаотически расположенные в структуре. Выявлена существенная зависимость микротвердости наплавленного слоя от расстояния до подложки. Поверхностный слой толщиной 1 мм обладает наибольшей микротвердостью 5,60 ГПа, которая почти в 1,8 раза превышает

Abstract. This paper studies the structure, elemental composition, and microhardness of plasma faced high-speed molybdenum steel layer formed on medium-carbon steel base plate in a nitrogen environment. The study is conducted using modern physical materials science methods. The formed polycrystalline dendritic type structure is revealed to be containing localized chemical elements, such as Mo, Cr, Al, Si, O₂, and N₂. The point-by-point X-ray microanalysis shows that hard-faced layer areas enriched with Al atoms contain carbon, oxygen, and nitrogen atoms, as well. It is demonstrated that Al forms submicron-sized oxycarbonitrides randomly located in the structure. Also, it is revealed that the microhardness of the hard-faced layer depends significantly on the distance to the steel base plate. The 1 mm thick hard-faced layer has the highest microhardness of 5.60 GPa, which is almost 1.8 times higher than the microhardness of the steel base plate. The microhardness of the hard-faced

микротвердость подложки. Микротвердость наплавки монотонно уменьшается при удалении от поверхности, приближаясь к микротвердости подложки.

Ключевые слова: плазменная наплавка, молибденовая быстрорежущая сталь, структура, элементный состав, микротвердость

Для цитирования: Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Миненко С.С., Чапайкин А.С., Гостевская А.Н. Структура и свойства наплавки высокоэнтروпийной быстрорежущей стали // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 1 (141). С. 21–27. DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-02

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

Введение

Дальнейшее направление в создание новых марок быстрорежущих сталей связано с заменой дефицитного и дорогого вольфрама на молибден. Обоснованность такой замены обусловлена тем, что Мо и W расположены в одной группе и соседних периодах Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева, что предполагает достаточно близкое их влияние на структуру и свойства быстрорежущих сталей [1].

Известно, что твердость быстрорежущих сталей в основном зависит от твердости мартенситной матрицы, типа и количества карбидов, их размеров и когерентности с матрицей [2, 3]. С учетом этого молибденовые быстрорежущие стали могут заметно отличаться от вольфрамовых и вольфрам-молибденовых [4]. Эвтектика молибденовых сталей должна быть тоньше, а ее нерастворимые карбиды мельче, чем у вольфрамовых сталей [4, 5]. Распределение карбидов в молибденовых быстрорежущих сталях более равномерно, поскольку формирующиеся при затвердевании эвтектики карбиды Me_2C при дальнейшей термообработке распадаются на карбиды Me_6C и MC [4, 5].

В последние годы активно проводятся научные исследования и практические разработки в области ресурсосберегающей и энергоэффективной технологии плазменной наплавки высокой твердости быстрорежущими сталями [6,7]. Использование при этом азота в качестве легирующего элемента позволяет существенно повысить износостойкость, прочность, коррозионную и ударостойкость, что обеспечивается повышением микротвердости структурных составляющих покрытий за счет формирования карбонитридов.

В последние годы внимание исследователей и практиков в области физического материаловедения привлечено к идее создания быстрорежущих сталей с высокой твердостью, термической стойкостью

и ударной вязкостью на основе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) и среднеэнтропийных сплавов (СЭС) сложного состава [8].

Keywords: plasma hard facing, molybdenum high-speed steel, structure, elemental composition, microhardness

For citation: Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Minenko S.S., Chapaykin A.S., Gostevskaya A.N. Structure and Properties of Hard-Faced High-Entropy High-Speed Steel Layer. *Izvestiya of Altai State University*. 2025. No 1 (141). P. 21–27. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2025)1-02

Funding: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>.

и ударной вязкостью на основе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) и среднеэнтропийных сплавов (СЭС) сложного состава [8].

Направление исследований ВЭС и СЭС при создании быстрорежущих сталей является перспективным и с точки зрения стоимости недорогих элементов (в данном случае Fe). Имея при этом в сплаве 3 и более других элементов в эквивалентном соотношении, конфигурационная энтропия увеличивается. Для СЭС она составляет порядка 1,0–1,5 R [9]. В работе [10] методом лазерной наплавки получено покрытие СЭС быстрорежущей стали состава $Fe_{68}(Al,Co,Cr,Cu,Mo,Ni,V,W)_{32}$ ат. %. Введение Al и Cu улучшает прочность и усиливает вторичное упрочнение [11, 12], а Cu может образовывать наноразмерные карбиды для достижения желаемого результата сочетания прочности и ударной вязкости [13]. Именно добавки Cr, Co, Al и других антиоксидантных элементов [10, 14] обеспечивают более низкие значения термического износа по сравнению с наплавкой традиционным быстрорезом P6M5, при этом микроструктура СЭС покрытия не отличается от традиционного быстрорежущего: мартенситная матрица и карбидный каркас.

Оптимизированное распределение карбидов путем легирования и термообработки и высокая твердость делают быстрорежущие СЭС и ВЭС перспективными для промышленного применения. В зарубежной и отечественной литературе имеется крайне ограниченное число исследований методами современного физического материаловедения, посвященных установлению природы формирования повышенных функциональных свойств наплавки быстрорежущих сталей типа M10, что препятствует их широкому практическому использованию.

Целью настоящей работы является изучение структурно-фазовых состояний и свойств плазменной наплавки из высокоэнтропийной быстрорежущей стали на базе M10.

Материал и методы исследования

Образцы для исследований получали плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой на сталь 30ХГСА. Химический состав стали 30ХГСА, (вес %): С — 0,3; Cr — 0,9; Mn — 0,8; Si — 0,9. Химический состав наплавки М10 (вес %): Мо — 8,85; Cr — 3,57; Со — 2,12; V — 0,05; Si — 1,12; Mn — 0,56; Al — 1,05. Режимы плазменной наплавки не отличались от описанных в [6, 7].

Наплавку проводили в четыре слоя общей толщиной 9 мм. При подготовке материала исследования образцы после электроискровой резки механически выравнивали на мелкой наждачной бумаге и алмазной пасте и после этого электролитическим способом стравливали деформированный слой и выравнивали поверхность.

Исследования структуры и элементного состава наплавленного слоя осуществляли на сканирующем электронном микроскопе КУКУ-ЕМ6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом и приставкой для микрорентгеноспектрального анализа элементного состава. Исследования микротвердости проводили методом Виккерса на приборе HVS-1000. Индентором

служила четырехгранная алмазная пирамида, нагрузка на которую составляла 1 Н.

Результаты исследования и обсуждение

Кристаллизация слоя, полученного плазменной наплавкой на сталь 30ХГСА в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой М10, приводит к формированию поликристаллической структуры дендритного типа.

Представленные на рисунке 1 результаты построения профиля микротвердости выявили существенную зависимость микротвердости наплавленного слоя от расстояния до подложки. Наибольшей микротвердостью, среднее значение которой 5,60 ГПа (при вариации значений от 5,51 ГПа до 5,66 ГПа), обладает поверхностный слой толщиной ≈ 1 мм (рис. 1, вставка). При большем удалении от поверхности микротвердость резко снижается, приближаясь к микротвердости подложки. Среднее значение микротвердости наплавленного слоя, выявленное на поверхности наплавки, составляет 5,55 ГПа (при вариации значений от 5,05 ГПа до 5,73 ГПа).

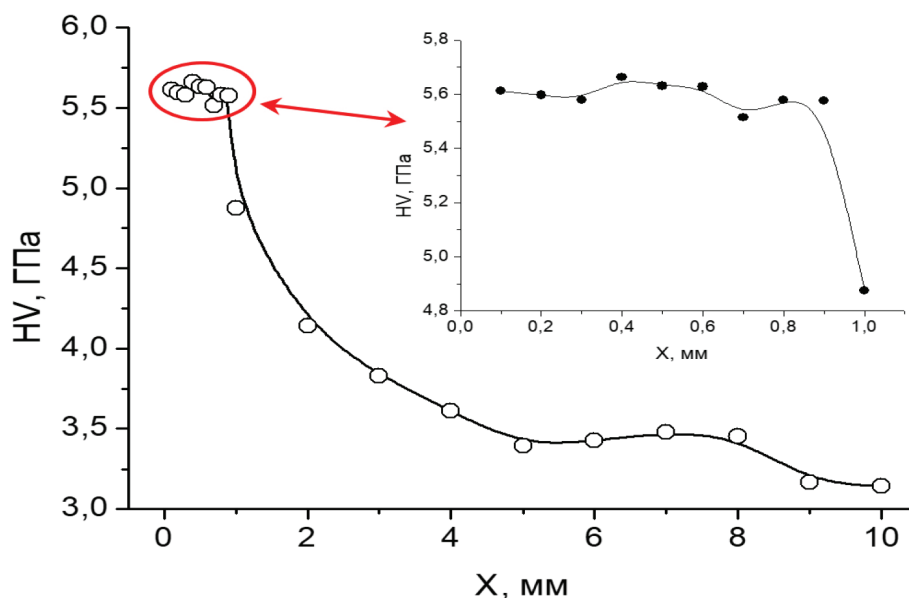


Рис. 1. Профиль микротвердости системы «наплавка (быстрорежущая сталь на базе М10) / (сталь 30ХГСА) подложка»

Очевидно, что результаты, полученные при определении микротвердости, свидетельствуют о зависимости структурно-фазового состояния системы «наплавка / подложка» от расстояния до подложки, определяемого в том числе элементным составом

материала. Элементный состав поверхностного слоя наплавки, выявленный методами микрорентгеноспектрального анализа (табл. 1), показал наличие химических элементов, соответствующих паспортному составу данного сплава.

Таблица 1

Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава участка наплавленного слоя

Суммарный спектр карты				
Элемент	Тип линии	Вес, %	Сигма вес, %	Атом., %
C	K-серия	5,32	0,20	20,90
Al	K-серия	1,73	0,03	3,02
Si	K-серия	0,15	0,02	0,24
Cr	K-серия	3,37	0,03	3,06
Mn	K-серия	0,31	0,03	0,26
Fe	K-серия	80,43	0,19	67,89
Co	K-серия	1,17	0,05	0,94
Mo	L-серия	7,52	0,07	3,69
Всего		100,00		100,00

Однородность распределения химических элементов, формирующих поверхностный слой наплавленного материала, анализировали методами картирования. Выполненные исследования, результаты которых

представлены на рисунке 2, свидетельствуют о локализации ряда химических элементов, а именно, молибдена, хрома, алюминия и кремния.

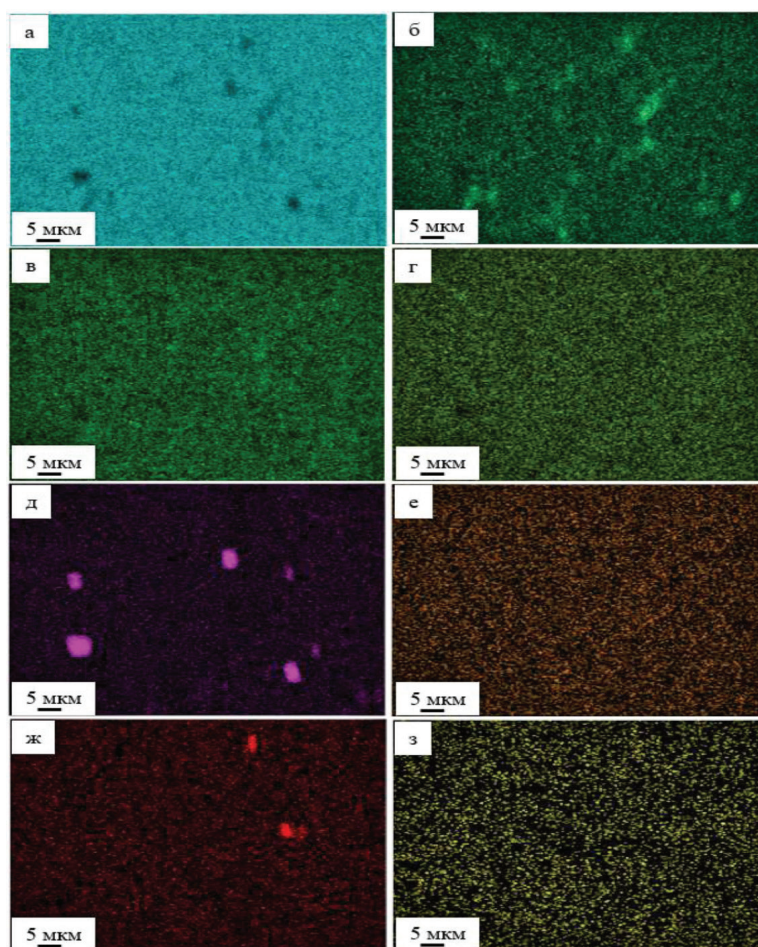


Рис. 2. Распределение химических элементов наплавленного слоя, выявленное методами картирования: Fe (а), Mo (б), Cr (в), Co (г), Al (д), Mn (е), Si (ж), C (з)

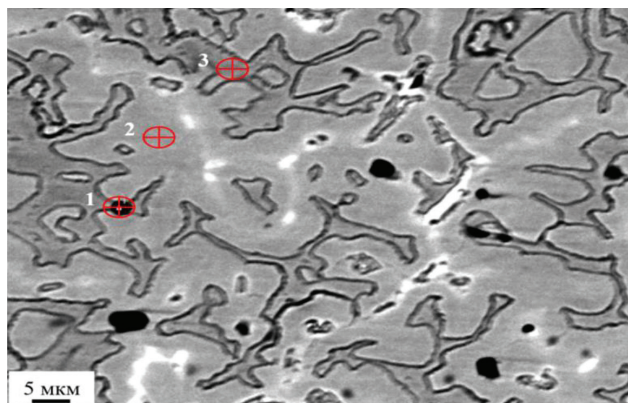


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности наплавленного материала; цифрами и значками обозначены области микрорентгеноспектрального анализа, результаты которого приведены в табл. 2

Таблица 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава участков наплавленного слоя, обозначенных цифрами и значками на рисунке 3

Элемент	Состав, вес, %		
	Участок 1	Участок 2	Участок 3
C	6,53	4,83	6,06
N	19,78	0,0	0,0
O	2,7	0,0	0,0
Al	48,74	1,33	1,36
Si	0,0	0,0	0,18
Cr	1,59	3,49	3,47
Mn	0,53	0,0	0,0
Fe	16,48	83,90	82,05
Mo	3,65	6,45	6,88

Исследования элементного состава методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» позволили уточнить распределение химических элементов поверхностного слоя наплавленного материала. Результаты исследований, представленные в таблицах 2, 3 и на рисунке 3, подтверждают неоднородное распределение химических элементов в наплавленном слое, выявленное методами картирования (рис. 2). Вместе с тем метод микрорентгено-

спектрального анализа «по точкам» показал, что области материала, обогащенные атомами алюминия, содержат атомы углерода, азота и кислорода (рис. 3, обл. 1, табл. 2). Это позволяет утверждать, что алюминий в таких участках наплавки формирует оксикарбонитриды. Отметим, что два других участка наплавленного материала, подвергнутых микрорентгеноспектральному анализу (рис. 3, обл. 2 и обл. 3), атомов азота и кислорода не содержат (табл. 2).

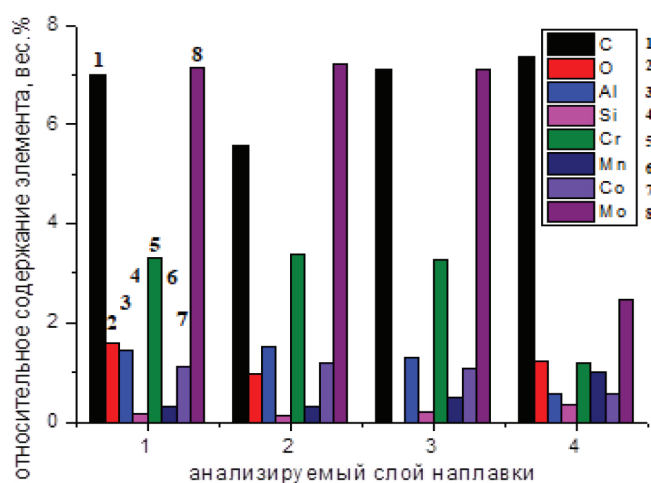


Рис. 4. Относительное содержание химических элементов в слоях, расположенных на различном расстоянии от поверхности наплавки: 1 — поверхностный слой толщиной 350 мкм; 2 — слой, расположенный на глубине 1 мм; 3 — на глубине 3 мм; 4 — в зоне контакта с подложкой

Таблица 3

Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава слоев наплавленного металла, расположенных на различном расстоянии от поверхности наплавки

Элемент	Состав, вес, %			
	Поверхностный слой толщиной 350 мкм	Слой на глубине 1 мм	Слой на глубине 3 мм	Слой контакта с подложкой
C	7,01	5,56	7,09	7,37
O	1,6	0,97	0,0	1,22
Al	1,45	1,5	1,28	0,58
Si	0,16	0,12	0,19	0,33
Cr	3,32	3,37	3,26	1,19
Mn	0,3	0,32	0,51	1,02
Fe	77,88	79,73	79,46	85,24
Co	1,12	1,2	1,09	0,58
Mo	7,16	7,22	7,12	2,47

Исследование структуры поперечного сечения наплавленного слоя позволило провести анализ изменения элементного состава и дефектной субструктуры материала по глубине. Представленные в таблице 3 и на рисунке 4 результаты свидетельствуют о том, что, исключая железо, основными химическими элементами наплавленного материала являются углерод, молибден и хром. Относительное содержание всех элементов, исключая углерод, кислород и марганец, снижается по мере приближения к зоне контакта наплавленного материала и подложки.

Заключение

Таким образом, выполненные исследования слоя металла, полученного плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой М10 на стали 30ХГСА, выявили формирование структу-

ры дендритного типа. Обнаружена локализация ряда химических элементов, а именно, молибдена, хрома, алюминия и кремния, кислорода и азота в структуре наплавленного слоя. Показано, что алюминий в наплавленном слое формирует оксикарбонитриды субмикронных размеров, расположенные в структуре хаотически. Установлено, что наибольшей микротвердостью, среднее значение которой 5,60 ГПа (при вариации значений от 5,51 ГПа до 5,66 ГПа), обладает поверхностный слой толщиной ≈ 1 мм. При большем удалении от поверхности микротвердость резко снижается, приближаясь к микротвердости подложки. Среднее значение микротвердости наплавленного слоя, выявленное на поверхности наплавки, составляет 5,55 ГПа (при вариации значений от 5,05 ГПа до 5,73 ГПа), что превышает в 1,8 раза микротвердость подложки (сталь 30ХГСА).

Библиографический список

1. 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.
2. Купалова И.К. Фазовый анализ и фазовый состав быстрорежущих сталей (обзор) // *Заводская лаборатория*. 1983. № 1. С. 27–40.
3. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М: Металлургия, 1983. 525 с.
4. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов // *МирТом*. 2008. № 11. С. 18–28.
5. Dou B., Zhang H., Tao Y, et al. Effect of Fe on Type and Distribution of Carbides in Medium-Entropy High-Speed Steels // *Tungsten*. 2023. Vol. 5. P. 189–197.
6. Громов В.Е., Чапайкин А.С., Невский С.А. Структура, свойства и модели быстрорежущей стали после отпуска и электронно-пучковой обработки. Новокузнецк: Полиграфист, 2024. 171с.
7. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekhaev A.I., Guseva T.P., Chapaykin A.S., Vashchuk E.S., Romanov D.A. Structure and Pro-

perties of R18U Surfacing of High-Speed Steel After its High Tempering // *Russian Physics Journal*. 2023. Vol. 66. № 7. November. P. 731–739. DOI: 10.1007/s11182-023-02999-w

8. Yang T., Zhao Y.L., Tong Y., et al. Multicomponent Intermetallic Nanoparticles and Superb Mechanical Behaviors of Complex Alloys // *Science*. 2018. Vol. 362. P. 933–937.

9. Huang H., Wang J., Yang H., et al. Strengthening CoCrNi Medium-Entropy Alloy by Tuning Lattice Defects // *Scripta Materialia*. 2020. Vol.188. P. 216–221.

10. Zhang H., Dou B., Tang H., et al. Secondary Hardening in Laser Rapidly Solidified $\text{Fe}_{68}(\text{MoWCrVCoNiAlCu})_{32}$ Mediumentropy High-Speed Steel Coatings // *Materials & Design*. 2018. Vol. 159. P. 224–231.

11. Ma S., Pan W., Xing J., et al. Microstructure and Hardening Behavior of Al-Modified Fe-1.5 wt%B-0.4 wt%C High-Speed Steel During Heat Treatment // *Materials Characterization*. 2017. Vol. 132. P. 1–9.

12. Moon H.K., Lee K.B., Kwon H. Influences of Co Addition and Austenitizing Temperature on Secondary Hardening and Impact Fracture Behavior in P/M High Speed Steels of W-Mo-Cr-V(-Co) System // *Materials Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 474 (1–2). P. 328–334.

13. Long B.Z., Zhang Y., Guo C.H., et al. Enhanced Dynamic Mechanical Properties and Resistance to the Formation of Adiabatic Shear Band by Cu-Rich Nano-Precipitates in High-Strength Steels // *International Journal of Plasticity*. 2021. Vol. 138. P. 102924.

14. Tang H., Zhang H., Cheng L., et al. Novel Laser Rapidly Solidified Medium-Entropy High Speed Steel Coatings With Enhanced Hot Wear Resistance // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 772. P. 719–727.

References

1. Kremnev L.S., Onegina A.K., Vinogradova L.A. Features of Transformations, Structure and Properties of Molybdenum High-Speed Steels. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*. 2009. No 12 (654). P. 13–19. (In Russ.).
2. Kupalova I.K. Phase Analysis and Phase Composition of High-Speed Steels (Review). *Plant Laboratory*. 1983. No 1. P. 27–40. (In Russ.).
3. Geller Yu.A. *Tool Steels*. Moscow: Metallurgy. 1983. 525 p. (In Russ.).
4. Kremnev L.S. Alloying Theory and Creation of Heat-Resistant Tool Steels and Alloys on its Basis. *MiTOM*. 2008. No 11. P. 18–28. (In Russ.).
5. Dou B., Zhang H., Tao Y., et al. Effect of Fe on Type and Distribution of Carbides in Medium-Entropy High-Speed Steels. *Tungsten*. 2023. Vol. 5. P. 189–197.
6. Gromov V.E., Chapaikin A.S., Nevsky S.A. *Structure, Properties, and Models of High-Speed Steel after Tempering and Electron Beam Processing*. Novokuznetsk: Polygraphist, 2024. 171 p. (In Russ.).
7. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., et al. Structure and Properties of R18U Surfacing of High-Speed Steel After its High Tempering. *Russian Physics Journal*. 2023. Vol. 66. No 7. P. 731–739. DOI: 10.1007/s11182-023-02999-w
8. Yang T., Zhao Y.L., Tong Y., et al. Multicomponent Inter-metallic Nanoparticles and Superb Mechanical Behaviors of Complex Alloys. *Science*. 2018. Vol. 362. P. 933–937.

9. Huang H., Wang J., Yang H., et al. Strengthening CoCrNi Medium-Entropy Alloy by Tuning Lattice Defects. *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 216–221.
10. Zhang H., Dou B., Tang H., et al. Secondary Hardening in Laser Rapidly Solidified Fe₆₈(MoWCrVCoNiAlCu)₃₂ Medium-Entropy High-Speed Steel Coatings *Materials & Design*. 2018. Vol. 159. P. 224–231.
11. Ma S., Pan W., Xing J., et al. Microstructure and Hardening Behavior of Al-Modified Fe-1.5 wt%B-0.4 wt%C High-Speed Steel During Heat Treatment. *Materials Characterization*. 2017. Vol. 132. P. 1–9.
12. Moon H.K., Lee K.B., Kwon H. Influences of Co Addition and Austenitizing Temperature on Secondary Hardening and Impact Fracture Behavior in P/M High Speed Steels of W-Mo-Cr-V(-Co) System. *Materials Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 474 (1–2). P. 328–334.
13. Long B.Z., Zhang Y., Guo C.H., et al. Enhanced Dynamic Mechanical Properties and Resistance to the Formation of Adiabatic Shear Band by Cu-Rich Nano-Precipitates in High-Strength Steels. *International Journal of Plasticity*. 2021. Vol. 138. P. 102924.
14. Tang H., Zhang H., Cheng L., et al. Novel Laser Rapidly Solidified Medium-Entropy High Speed Steel Coatings With Enhanced Hot Wear Resistance. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 772. P. 719–727.

Информация об авторах

В.Е. Громов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

Ю.Ф. Иванов, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия;

С.С. Миненко, соискатель кафедры естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

А.С. Чапайкин, аспирант кафедры естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

А.Н. Гостевская, младший научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.

Information about the authors

V.E. Gromov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

Yu.F. Ivanov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia;

S.S. Minenko, Postgraduate Student of the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

A.S. Chapaykin, Postgraduate Student of the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia;

A.N. Gostevskaya, Junior Researcher, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.