

Метод исследования микроструктуры индукционно наплавленных слоев карбидосталей на основе применения металлографических реактивов

С. А. Климов,
Ф. М. Носков,
О. А. Масанский

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»
Российская Федерация, Красноярский край, г. Красноярск

Аннотация. Работа посвящена подбору составов металлографических реактивов для исследования структурных составляющих наплавленного слоя композиционного материала на основе порошковой быстрорежущей стали 10P6M5 с добавлением карбидов титана (*TiC*) и карбидов вольфрама (*WC*), полученного методом индукционной наплавки. Метод индукционной наплавки позволяет получить тонкие слои карбидостали на поверхности заготовки. Подбирая компоненты шихты, можно получить заданные свойства, такие как твердость, износостойкость. Для исследования металлографических реактивов был выбран образец с 10 процентным содержанием карбида вольфрама, полученный методом индукционной наплавки. В работе подобраны составы металлографических реактивов, определена технология обработки, в том числе время выдержки и температура реактивов. Результаты применения металлографических реактивов на образцах подтверждают металлографические исследования при помощи оптической микроскопии. Показано четыре металлографических реактива, каждый из которых направлен на выявление определенных фаз, которые по результатам исследований способны отделить карбидные фазы от твердого раствора. Различные по составу металлографические реактивы в течение разного времени обработки, способны разделить карбидные фазы по преобладающим в них металлам. Разделение происходит по градиенту цветов, при этом определенному цвету соответствует своя морфология карбидной фазы. В результате была доказана возможность применения металлографических реактивов для исследования карбидостали с ее специфическим распределением карбидов разной морфологии и состава.

Ключевые слова: индукционная наплавка, структура, быстрорежущая сталь, металлографические реактивы, карбидные фазы.

Method for Studying the Microstructure of Induction Deposited Layers of Carbide Steel Based on the Use of Metallographic Reagents

Stepan A. Klimov,
Fedor M. Noskov,
Oleg A. Masansky

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"Siberian Federal University", Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract. The paper is devoted to selection of compositions of metallographic reagents for investigation of structural components of deposited layer of composite material on the basis of powder high-speed steel 10R6M5 with addition of titanium carbides (*TiC*) and tungsten carbides (*WC*), obtained by method of induction deposition. Method of induction surfacing makes it possible to obtain thin layers of carbide steel on billet surface. By selecting the components of the batch, it is possible to obtain the desired properties, such as hardness, wear resistance. For metallographic reagents, a sample with a 10 percent tungsten carbide content obtained by induction surfacing was selected. Compositions of metallographic reagents were selected in the work, the processing technology was determined, including the exposure time and temperature of the reagents. The results of using metallographic

reagents on samples confirm metallographic studies using optical microscopy. Four metallographic reagents are shown, each of which is aimed at identifying certain phases that, according to the results of research, are able to separate carbide phases from a solid solution. Metallographic reagents of different composition during different processing times are able to separate carbide phases by the metals prevailing in them. The separation takes place along a gradient of colors, while a certain color corresponds to its own morphology of the carbide phase. As a result, the possibility of using metallographic reagents for the study of carbide steel with its specific distribution of carbides of different morphology and composition was proved.

Keywords: induction surfacing, structure, high-speed steel, metallographic reagents, carbide phases.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все острее встает вопрос разработки новых, как конструкционных, так и инструментальных материалов характеризующимися повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Актуальность этой задачи обусловлена исчерпанием возможности для совершенствования свойств известных материалов: износостойких и инструментальных сталей (в том числе быстрорежущих), твердых сплавов и т. д.

Одной из альтернатив новых материалов с перспективными свойствами являются карбидостали. Современные композиционные материалы на основе стали с добавками тугоплавких карбидов типа WC , TiC и др. Карбидостали перспективны для режущих инструментов и деталей, подвергающихся различным видам высокотемпературного износа [1].

Чаще всего карбидостали получают технологиями порошковой металлургии: спеканием пресовок исходных материалов, пропиткой сталью карбидного каркаса, горячим прессованием порошков, или горячей экструзией [1]. Это процессы состоят из большого числа достаточно сложных технологических операций, что сужает возможности широкого практического использования карбидосталей. Существуют и иные технологические решения, например, получение карбидосталей методом плазменной наплавки, однако при этой технологии существует опасность распыления компонентов плазменной струей, расход дорогостоящего газа и т. п. Главным фактором, сдерживающим широкое распространение карбидосталей, является технология их получения традиционными способами, требующая сложного оборудования и длительный технологический цикл производства.

Индукционная наплавка позволяет получать карбидостали различных составов с минимальным проплавлением металла – основы. Благодаря этому состав наплавляемой композиции сохраняется после наплавки практически в неизменном виде.

Основной структурной составляющей, обеспечивающей особые свойства карбидосталей является разнообразные карбидные фазы. В случае применения в качестве металла – основы быстрорежущей стали, состав карбидных композиций, формирую-

щихся в структуре становится особенно сложным, так как помимо карбидов, внесенных в состав карбидостали сама быстрорежущая сталь характеризуется наличием ряда карбидов в своей структуре [2].

Эти обстоятельства вынуждают обратить повышенное внимание к анализу карбидной составляющей наплавленных слоев, что с наибольшей эффективностью может быть обеспечено применением различных металлографических реактивов, предназначенных для выявления тех или иных карбидных фаз [3].

Известно, что карбидосталь содержит в структуре карбиды типа MC , M_6C преимущественно содержащие в себе вольфрам (W) и молибден (Mo). Представленные в структуре в виде угловатых карбидных включений, эвтектик. В меньшем количестве наблюдаются карбиды типа M_3C , $M_{23}C_6$ в составе, которых присутствуют хром (Cr) и ванадий (V) [4–5].

Таким образом, цель работы: исследовать возможность применения металлографических реактивов для выявления структурных составляющих карбидосталей, полученных методом индукционной наплавки.

Задачи работы:

1. Подобрать составы металлографических реактивов направленных на выделение различных карбидных фаз.
2. Применить подобранные составы на имеющихся образцах карбидостали полученных методом индукционной наплавки.
3. Исследовать микроструктуру после применения металлографических реактивов.

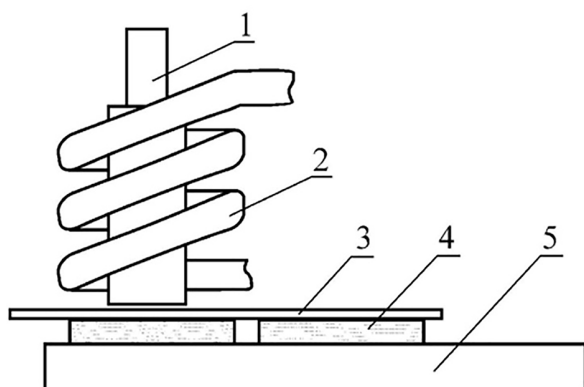
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования возможности применения металлографических реактивов для карбидосталей был взят образец с 10 % содержанием карбида вольфрама (WC). Образец получен методом индукционной наплавки. Шихта состояла из 90 % порошковой стали 10P6M5 с добавлением 10 % порошка карбида вольфрама.

Важную роль при индукционной наплавке играет флюс, защищающий наплавляемый металл и поверхность стальной подложки от окисления кислородом воздуха. В качестве флюса использовалась

смесь натриятетраборнокислого безводного (буры), борной кислоты и добавок оксида кремния, магния, кальция и натрия. При подборе флюса учитывался фактор влияния магнитного поля, возникающего в зоне наплавки на шихту. Одной из проблем получения карбидостали на основе быстрорежущей стали является ферромагнетизм порошковой стали, которая на начальном этапе нагрева (до перехода в парамагнитное состояние) активно взаимодействует с магнитным полем. Для предотвращения перемещения порошковой шихты ее прессовали в брикеты. Кроме того, существенную роль играет флюс, выступая в определенном температурном диапазоне своеобразным «связующим» между частицами шихты – в тот момент, когда флюс уже расплавился, а нагретая металлическая часть шихты еще нет.

В качестве подложки для индукционной наплавки карбидостали была выбрана сталь 45. Наплавка пластин, схема которой представлена на рисунке 1, осуществлялась при помощи высокочастотной индукционной установки типа УВГ 2-25, с генератором ГНОМ-25М1 с мощностью до 20 кВт и рабочей частотой генератора от 44 кГц до 66 кГц. Использовался витковый индуктор с ферритным водоохлаждаемым сердечником.



1 – ферритный сердечник; 2 – витковый индуктор;
3 – асбестовая прокладка;
4 – наплавляемый брикет;
5 – металлическая подложка в форме пластины

1 – ferrite core; 2 – coil inductor; 3 – asbestos gasket;
4 – welded briquette;
5 – metal substrate in the form of a plate

Рисунок 1 – Схема индукционной наплавки

Figure 1 – Induction build-up diagram

После получения наплавленных слоев карбидостали на подложке, стал актуальным вопрос исследования микроструктуры образцов с помощью оптической микроскопии. Для понимания распре-

ления внесенных карбидов в шихту после наплавки, исследования границы наплавка-подложка на предмет взаимодействия и взаимного перемешивания во время наплавки и в процессе твердофазных превращений и т. д. В связи с этим в работе было использовано 4 состава металлографических реактивов, направленных на выявления структурных составляющих в особенности карбидных фаз, которые являются важнейшей частью карбидосталей. В таблице 1 приведен состав металлографических реактивов, использованных в эксперименте.

Таблица 1 – Составы металлографических реактивов

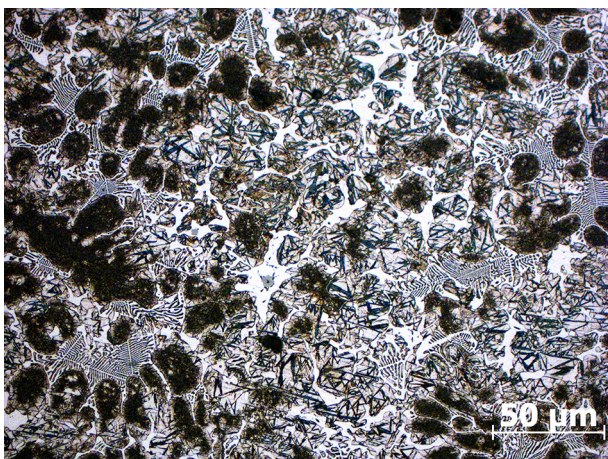
Table 1 – Metallographic reagent compositions

№	Компоненты металлографического реактива	Количество
1	– Азотная кислота, мл – Спирт, мл	4 96
2	– Красная кровяная соль, г – Калий гидроокись, г – Вода дистиллированная, мл	10 10 100
3	– Едкий натр, г – Вода дистиллированная, мл	10 100
4	– Азотная кислота, мл – Плавиковая кислота, мл – Вода дистиллированная, мл	5 5 90

В качестве универсального металлографического реактива для выявления структурных составляющих был выбран 4 % раствор азотной кислоты в спирте. Обработка в течение 1–2 минут при комнатной температуре, позволяет выявить структурные составляющие образца. Во время обработки, визуально можно наблюдать проявление структуры, тем самым контролируя степень травления.

Данный реактив следует применять на начальном этапе исследования, дабы выявить все структурные составляющие, размер и форму зерна, распределение карбидов и их морфологию. Пример травления данным реактивом представлен на рисунке 2.

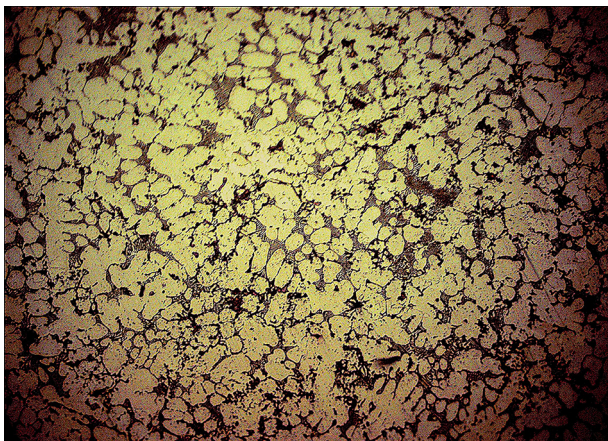
На рисунке наблюдается распределение карбидных фаз, преимущественно белого цвета с различной морфологией. Так же равномерно по наплавленному слою распределена ледебуритная эвтектика скелетной морфологии. В свою очередь в твердом растворе отчетливо наблюдается мартенсит. Состав № 1 единственный из представленных металлографических реактивов взаимодействует и проявляет твердый раствор.



**Рисунок 2 – Микроструктура ракарбидостали
(90 % – Сталь 10P6M5; 10 % – WC)
после травления составом № 1**

**Figure 2 – Carbide steel microstructure
(90 % – Steel 10R6M5; 10 % – WC)
after etching with compound No. 1**

Для выявления карбидов WC в литературе рекомендуют травление в водном растворе красной кровяной соли и едкого калия. Раствор в горячем виде в течение нескольких минут выделяет в структуре карбиды WC, M_6C . На рисунке 3 представлена микроструктура образца после 4 минут обработки составом № 2. Результат показал, что данным металлографический реактив направлен на выделения карбидных фаз.



**Рисунок 3 – Микроструктура карбидостали
проявленная травителем № 2
после 4 минуты обработки**

**Figure 3 – Carbide steel microstructure developed
by etchant No. 2 after 4 minutes of treatment**

На рисунке 3 наблюдаются не тронутые травлением зерна твердого раствора. Вокруг них отчетливо видна карбидная сетка. Также наблюдается цветное распределение карбидов, а именно выделение ряда карбидов одинаковой морфологии (Пластинчато-угловатые) по всему образцу ярко красным цветом. Данные карбиды в составе содержат преимущественно вольфрам.

Увеличивая время обработки травителем до 9 минут, мы видим выделение карбидов в большей степени. Результат оптического исследования показан на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Микроструктура карбидостали
проявленная травителем № 2
после 9 минуты обработки**

**Figure 4 – Carbide steel microstructure developed
by etchant No. 2 after 9 minutes of treatment**

С увеличением времени обработки наблюдается проявление новых карбидных фаз, которые выделяются отдельными цветами. Помимо карбидов красного цвета наблюдается появление карбидов розового цвета с похожей морфологией. Но мы наблюдаем также появление карбидов с градиентом цветов от оливкового до ярко-зелёного. Карбиды зеленого цвета имеют иную морфологию в сравнение с красными карбидами. Менее пластинчатые и имеющие большую площадь. Предположительно карбиды, содержащие ванадий-хром. Отдельные карбиды имеют градиентные переходы цветов и вкрапление противоположного цвета. Например, карбиды с градиентом от желтого до ярко-зеленого цвета. Внутри которых могут присутствовать вкрапления красных и оранжевых карбидов с четкими границами. Все это говорит о том, что помимо карбидов с преобладанием в составе одного металла, например, вольфрама, мы наблюдаем карбиды сложных составов, в которых в равной степени могут содержаться, например,

вольфрам и хром. Ледебуритная эвтектика скелетной морфологии, также хорошо выделяется при помощи травителя № 2. С увеличением времени обработки твердый раствор также не поддается травлению, что дает преимущество для исследования карбидных фаз.

Применение водного раствора едкого натра в течение 5–10 минут помогает выделить карбиды цементитного типа Fe_3C . На рисунке 5 представлена микроструктура образца карбидостали после травления составом № 3. После 7 минут обработки наблюдается выделение карбидов типа M_6C , содержащих в себе вольфрам в виде отдельных карбидов черного цвета. При первоначальном исследовании черные включения напоминают дефекты в виде пор, но при более высоком увеличении видно, что черных включение не круглые. Их морфология схожа с карбидными включениями представленными на рисунке 2 в виде белых пятен. Так же по истечению 7 минут обработки отчетливо выделяется ледебуритная эвтектика скелетной морфологии. Черный цвет показывает содержание вольфрама как в отдельных карбидах, так и эвтектике.

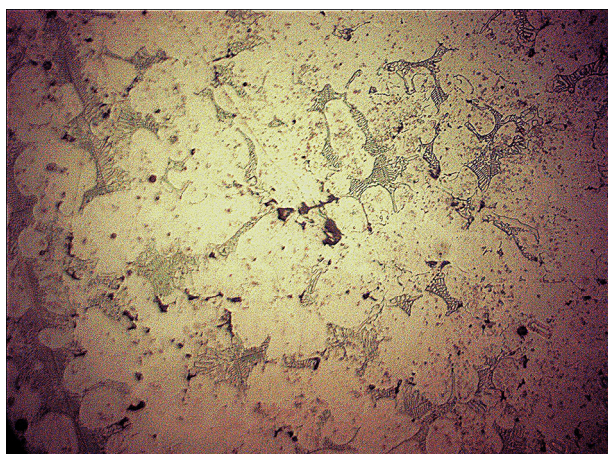


Рисунок 5 – Микроструктура карбидостали проявленная травителем № 3 после 7 минуты обработки

Figure 5 – Carbide steel microstructure developed by etchant No. 3 after 7 minutes of treatment

После 17 минут обработки наблюдается выделение карбидов типа MC содержащих в себе ванадий и окрашенных в белый цвет с четкой черной границей. Микроструктура карбидостали после 17 минут обработки составом № 3 представлена на рисунке 6. Данные включения равномерно распределены по образцу. Также сравнивая рисунки 5, 6 видно, что на рисунке 6 ледебуритная эвтектика не выделилась четко и имеет тусклые едва заметные границы. Это свидетельствует о том, что действительно травитель

при разном времени обработки выделяет различные карбиды фазы. Так как ледебуритная эвтектика не может содержать должного количества ванадия в своем составе, чтобы четко проявит границы при травлении.

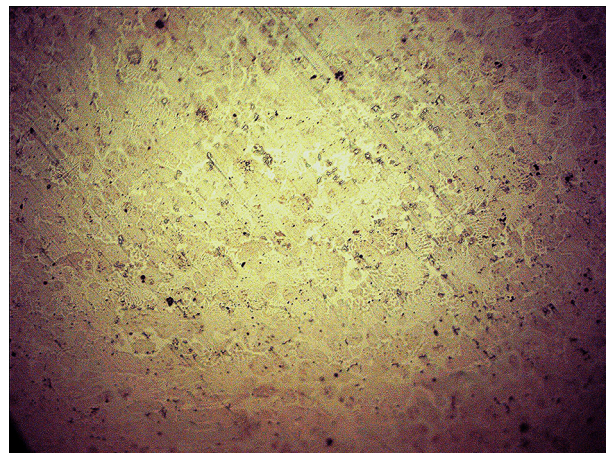


Рисунок 6 – Микроструктура карбидостали проявленная травителем № 3 после 17 минуты обработки

Figure 6 – Carbide steel microstructure developed by etchant No. 3 after 17 minutes of treatment

При увеличении времени обработки реактивом № 3 до 20 минут выявляются карбиды типа $M_{23}C_6$ содержащие в себе хром. При этом не происходит сильного травления твердого раствора и эвтектики, что позволяет четко наблюдать выделенные карбиды.

Смесь водного раствора плавиковой и азотной кислоты используют широко при травлении различных сплавов, также сварных швов из нержавеющей стали. Металлографический реактив № 4 используют в карбидосталих для выявления природы различных карбидов. Травление при комнатной температуре в течение 20 минут используют для выявления карбидов типа MC содержащих ванадий и вольфрам, а также отделить все карбидосодержащие фазы от твердого раствора [6]. Результат применения металлографического реактива № 4 на основе плавиковой и азотной кислоты представлен на рисунке 7.

Наблюдается четкое выделение всех карбидных фаз. Твердый раствор излишне вытравливается, обнажая границы карбидных фаз с разным составом и эвтектики. Также видно, что карбидные фазы распределены по интенсивности белого цвета, что говорит о разном содержании легирующих элементов в карбидных фазах. Самые интенсивно белые пятна на рисунке 7 содержат в составе большее количество вольфрама.

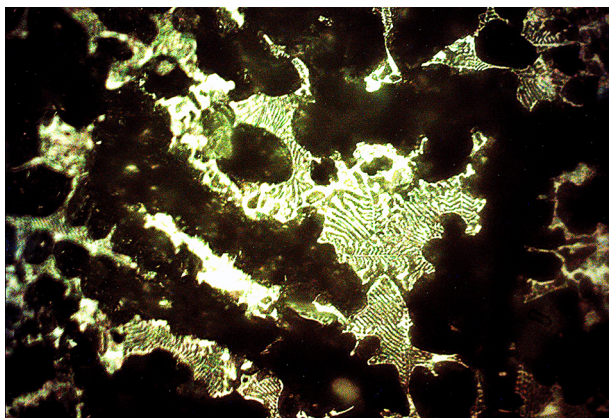


Рисунок 7 – Микроструктура карбидостали после травления составом № 4 в течение 20 минут

Figure 7 – Carbide steel microstructure after etching with compound No. 4 for 20 minutes

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практические эксперименты с указанными составами металлографических реактивов показали их высокую эффективность в выявлении соответствующих карбидных фаз. Таким образом, в работе показано, что применение специальных металлографических реактивов для выявления распределения, количества, формы выделений и других характеристик карбидных фаз карбидосталей полученных индукционной наплавкой позволяет эффективно исследовать структуру таких материалов, судить о процессах, происходящих как непосредственной при наплавке, так и в процессе твердофазных превращений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнусов, С. Ф. Карбидостали на основе карбидов титана и вольфрама : научное издание / С. Н. Кульков, С. Ф. Гнусов. – Томск : Издательство научно-технической литературы, 2006. – 239 с.
2. Liu, Y. Precipitation Behaviors of Carbides in High Speed Steel during ESR and Heat Treatment [Electronic resource] / Y. Liu, J. Li, W. Liang, J. Gao, Y. Qi // *Metals*. – 2021. – 11(11). – 1781. Available from: <https://doi.org/10.3390/met11111781>. Accessed: 18 April 2025. DOI: 10.3390/MET11111781
3. Коваленко, В. С. Металлографические реактивы : справочник. 3-е изд. / В. С. Коваленко. – Москва : Металлургия, 1981. – 121 с.
4. Wang, Y. Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, micro-structural evolution, and engineering performance / Y. Wang, B. Mao, S. Chu, S. Chen, H. Xing, H. Zhao, S. Wang, Y. Wang, J. Zhang, B. Sun // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 24. – Pp. 8198–8240. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.04.269
5. Chen, Y. Effect of Alloying and Microalloying Elements on Carbides of High-Speed Steel: An Overview. [Electronic resource] / Y. Chen, C. Ye, X. Chen, Q. Zhai, H. Hu // *Metals*. – 2024. – 14 (2). – 175. Available from: <https://doi.org/10.3390/met14020175>. Accessed: 18 April 2025. DOI: 10.3390/met14020175
6. Иванов, С. Г. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, С. А. Земляков, М. А. Гурьев // *Ползуновский вестник*. – 2020. – №3. – С. 102–105. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.018
7. Rudnev, V. I. Induction Hardening: Technology, Process Design, and Computer Modeling / V. I. Rudnev and D. Loveless // *Comprehensive Materials Processing*. – 2014. – Vol. 12. – Pp. 489–580. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01217-6
8. Боль, А. А. Индукционная наплавка, технология, материалы, оборудование / А. А. Боль, В. В. Иванайский, С. П. Лесков, В. П. Тимошенко. – Барнаул : Алтайское краевое научно-техническое общество машиностроителей, 1991. – 147с.
9. Mishra, A. S. Induction heating in sustainable technologies of production and processing of materials – A review of modern literature / A. Mishra, S. Bag, S. Pal // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. – 2020. – Vol. 1. – Pp. 343–357. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11559-0
10. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – Москва : Металлургия, 1975. – 584 с.

REFERENCES

1. Gnyusov SF. Karbidostali na osnove karbidov titana i vol'frama : nauchnoe izdanie = Carbido-stali based on titanium and tungsten carbides: scientific publication. Tomsk: Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoy literatury; 2006:239. (In Russ.)
2. Liu Y, Li J, Liang W, Gao J, Qi Y, Shang

C. Precipitation Behaviors of Carbides in High Speed Steel during ESR and Heat Treatment. *Metals*. 2021;11(11):1781. DOI: 10.3390/met11111781. Available from: <https://doi.org/10.3390/met11111781> [Accessed 18 April 2025]. DOI: 10.3390/MET11111781

3. Kovalenko VS. Metallograficheskie reaktivы : spravochnik. 3-e izd. = Metallographic reagents: reference book. – 3rd ed. Moscow: Metallurgiya; 1981:121. (In Russ.)

4. Wang Y, Mao B, Chu S, Chen S, Xing H, Zhao H, Wang S, Wang Y, Zhang J, Sun B. Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, micro-structural evolution, and engineering performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;(24):8198–8240. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.04.269

5. Chen Y, Ye C, Chen X, Zhai Q, Hu H. Effect of Alloying and Microalloying Elements on Carbides of High-Speed Steel: An Overview. *Metals*. 2024;14(2):175. Available from: <https://doi.org/10.3390/met14020175> [Accessed 18 April 2025]. DOI: 10.3390/met14020175

6. Ivanov SG, Guryev AM, Zemlyakov SA, Guryev MA. Procedure for Sample Preparation of

Samples of High-Alloy Steels for Automatic Analysis of the Carbide Phase. *Polzunovskiy Vestnik*. 2020;3: 102–105. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.018. (In Russ.)

7. Rudnev VI, Loveless D. Induction Hardening. *Comprehensive Materials Processing*. 2014;12:489–580. DOI: 10.1016/b978-0-08-096532-1.01217-6.

8. Bol' AA, Ivanaysky VV, Leskov SP, Timoshenko VP. Indukcionnaya naplavka, tekhnologiya, materialy, oborudovanie = Induction surfacing, technology, materials, equipment. Barnaul: Altayskoe kraevoe nauchno-tekhnicheskoe obshchestvo mashinostroiteley; 1991:147. (In Russ.)

9. Mishra A, Bag S, Pal S. Induction heating in sustainable technologies of production and processing of materials - A review of modern literature. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2020;1:343–357. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11559-0

10. Geller Yu A. Instrumental'nye stali = Instrumental steels. Moscow: Metallurgiya; 1975:584. (In Russ.)

Сведения об авторах

Климов Степан Андреевич

Аспирант каф. МиТОМ, ассистент кафедры МиТОМ учреждения образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

E-mail: stepaklimov@yandex.ru

ORCID:

Носков Федор Михайлович

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры МиТОМ учреждения образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

E-mail: fnoskov@sfu-kras.ru

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-3985-8947>

Масанский Олег Александрович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой МиТОМ учреждения образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

E-mail: omasansky@sfu-kras.ru

ORCID:

Information about the authors

Stepan A. Klimov

Graduate student of MiTOM Department, Assistant of MiTOM Department of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

E-mail: stepaklimov@yandex.ru

ORCID:

Fedor M. Noskov

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of MiTOM Department of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

E-mail: fnoskov@sfu-kras.ru

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-3985-8947>

Oleg A. Masansky

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of MiTOM Department of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

E-mail: omasansky@sfu-kras.ru

ORCID:

Статья поступила в редакцию 04.06.2025.