



УДК 621.791.92:621.727:620.178

DOI 10.17073/0368-0797-2024-5-563-566



Краткое сообщение

Short Report

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ НАПЛАВКИ ПОСЛЕ ОТПУСКА И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

В. Е. Громов[✉], А. С. Чапайкин, Л. П. Башченко

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

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Аннотация. В работе авторы методами современного физического материаловедения исследовали структуру, дефектную субструктуру, фазовый состав, трибологические и механические свойства наплавки, подвергнутой высокотемпературному отпуску при 580 °С и последующей электронно-пучковой обработке. Наплавленные слои толщиной до 10 мм формируются плазменной наплавкой порошковой проволокой ПП-18Ю в среде азота. По фазовому составу наплавленные слои состоят из α -Fe и карбидов состава Me_6C . После отпуска поликристаллическая структура наплавленного слоя содержит зерна размером 7,0 – 22,5 мкм с прослойками второй фазы по границам и в стыках зерен составов V_4C_3 , Cr_7C_3 , Fe_3C , $Cr_{23}C_6$, WC_{1-x} . Электронно-пучковая обработка формирует тонкий поверхностный слой (30 – 50 мкм) с зернами ячеистой (зеренной) структуры высокоскоростной кристаллизации субмикронного (100 – 250 нм) размера. В объеме зерен и по границам выявлены частицы второй фазы наноразмерного диапазона глобулярной и ограненной форм.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, структура, фазовый состав, электронная микроскопия, механические и трибологические свойства

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

Выражаем признательность д.ф.-м.н. профессору И.Ю. Литовченко за помощь в проведении электронно-микроскопических исследований и д.т.н. доценту Н.Н. Малушину за предоставленные образцы.

Для цитирования: Громов В.Е., Чапайкин А.С., Башченко Л.П. Структурно-фазовые состояния и свойства быстрорежущей наплавки после отпуска и электронно-пучковой обработки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(5):563–566.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-563-566>

STRUCTURAL-PHASE STATES AND PROPERTIES OF HIGH-SPEED SURFACING AFTER TEMPERING AND ELECTRON BEAM PROCESSING

V. E. Gromov[✉], A. S. Chapaikin, L. P. Bashchenko

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

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Abstract. In this work, the authors used the methods of modern physical materials science to investigate the structure, defective substructure, phase composition, tribological and mechanical properties of the surfacing subjected to high-temperature tempering at 580 °C and subsequent electron beam processing. The deposited layers up to 10 mm thick are formed by plasma surfacing with PP-18YU powder wire in a nitrogen medium. According to the phase composition, the deposited layers consist of α -Fe and carbides of Me_6C composition. After tempering, the polycrystalline structure of the deposited layer contains grains of 7.0 – 22.5 μ m in size with layers of the second phase along the boundaries and at the joints of grains with composition V_4C_3 , Cr_7C_3 , Fe_3C , $Cr_{23}C_6$, WC_{1-x} . Electron beam processing forms a thin surface layer (30 – 50 μ m) with grains of cellular (columnar) structure of high-speed crystallization of submicron (100 – 250 nm) size. Particles of the second phase of the nanoscale range of globular and faceted shapes were detected in the volume of grains and along the boundaries.

Keywords: high-speed steel, structure, phase composition, electron microscopy, mechanical and tribological properties

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

Authors express their gratitude to Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. I.Y. Litovchenko for his assistance in conducting electron microscopic studies and Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof. N.N. Malushin for the samples provided.

For citation: Gromov V.E., Chapaikin A.S., Bashchenko L.P. Structural-phase states and properties of high-speed surfacing after tempering and electron beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(5):563–566. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-563-566>

ВВЕДЕНИЕ

В горнодобывающей, металлургической и строительной отраслях промышленности для защиты изделий от различных видов износа, коррозии, статических и динамических нагрузок применяется наплавка, которая обеспечивает высокие функциональные свойства [1; 2].

В последнее время активно развиваются научные исследования и практические разработки в области плазменной наплавки высокой твердости (Р18, Р6М5, Р2М9 и другие) с применением азота в качестве легирующего элемента [1]. При выборе материала наплавки, соответствующего условиям его эксплуатации, необходимо проведение тщательных исследований структуры, фазового состава, механических и трибологических свойств и их эволюции при последующей термообработке [3].

Важно отметить, что особую роль выполняют поверхностные слои, образование микродефектов в которых способно привести к макроразрушению. В этой связи актуальной становится разработка высокоэффективных способов формирования поверхностных слоев с высокими эксплуатационными характеристиками на рабочих поверхностях. Проблема может быть решена традиционными способами упрочнения (химико-термические, механические, физические и др.) [3], однако в ряде случаев эти способы не обеспечивают хорошей адгезии с матрицей. С этой точки зрения эффективной является электронно-пучковая обработка (ЭПО), при применении которой значительно повышаются механические свойства всего материала за счет оптимизации структурно-фазовых состояний поверхностных слоев [4]. Применение ЭПО значительно эффективнее традиционных видов обработки материалов.

Целью настоящей работы является исследование структурно-фазовых состояний и свойств сформированной в защитно-легирующей среде азота наплавки из быстрорежущей стали Р18Ю при последующих высокотемпературном отпуске и ЭПО.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования являлись образцы стали 30ХГСА с наплавленным слоем стали Р18Ю. Наплавленный слой получали плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой ПП-Р18Ю. Химический состав стали марки Р18Ю (мас. %): С 0,87; Cr 4,41; W 17,00; Mo 0,10; V 1,50; Ti 0,35; Al 1,15; N 0,06; остальное – железо. При плазменной наплавке расход защитного газа (азота) $Q_{\text{защ}}$ составлял 20 – 22 л/мин; расход плазмообразующего

газа (аргона) $Q_{\text{плазм}}$ – 6 – 8 л/мин. Методика плазменной наплавки и обоснование выбора режима приведены в работах [1; 2]. Исследования проводили в состоянии после наплавки, высокотемпературного отпуска при температуре нагрева 580 °С (время выдержки 1 ч, количество отпусков 4) и ЭПО. Облучение осуществляли при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см². Длительность импульса составляла 50 мкс, количество импульсов облучения – 5, частота следования импульсов – 0,3 с⁻¹.

Исследования структуры, дефектной субструктуры, фазового и элементного составов осуществляли методами сканирующей (прибор КУКУ-ЕМ 6900) и просвечивающей (прибор JEM-2100 JEOL) электронной микроскопии [5 – 7]. Микротвердость измерялась методом Виккерса (прибор HVS-1000) при нагрузке на индентор 1 Н, трибологические свойства – на трибометре Pin on Disc and Oscillating Tribotester.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

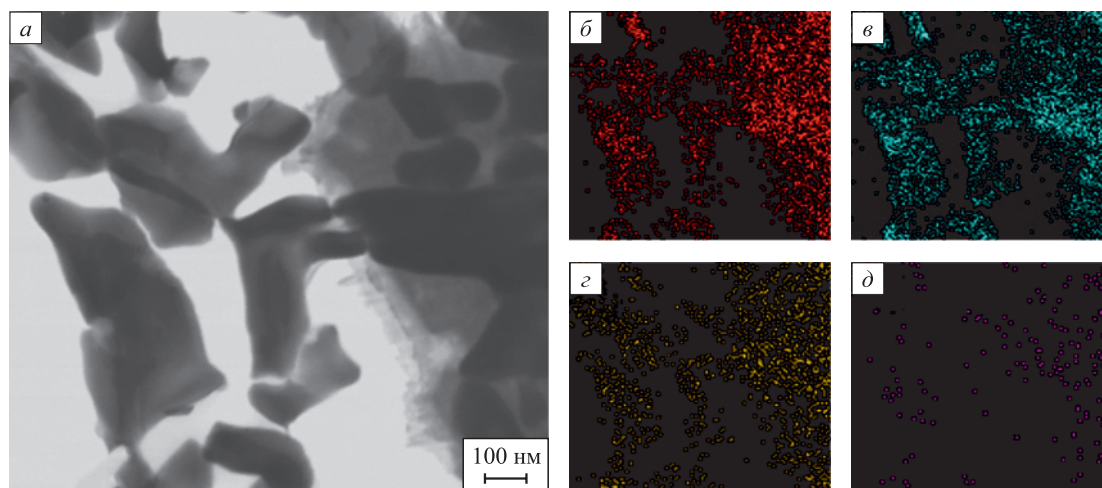
Плазменная наплавка формирует слой, основными фазами которого являются α -Fe и карбиды состава Me_6C , формирующие карбидную сетку и являющиеся основной упрочняющей фазой. В процессе образования наплавки в объеме зерен формируются наноразмерные частицы карбидной фазы. Значения микротвердости H_{μ} , параметра износа V и коэффициента трения k приведены в таблице.

После высокотемпературного отпуска размер зерен составляет 7,0 – 22,5 мкм. Результаты изучения элементного состава, выполненного методами картирования каркасной сетки наплавленного слоя, свидетельствуют о том, что зерна сетки обогащены атомами вольфрама, железа, хрома (см. рисунок). Анализ микроэлектроннограмм позволяет установить, что каркас образован карбидами сложного состава Fe_3W_3C (Fe_2W_4C). Размеры зерен карбидной фазы изменяются в пределах 80 – 350 нм. Для зерен твердого раствора на основе α -Fe методом картирования показано наличие

Микротвердость и трибологические параметры наплавленного слоя

Microhardness and tribological parameters of the deposited layer

Состояние	H_{μ} , ГПа	$V \cdot 10^6$, мм ³ /(Н·м)	k
Наплавка	4,7	8,9	0,70
Наплавка + отпуск	5,3	9,9	0,65
Наплавка + отпуск + ЭПО	5,3	3,3	0,58



Электронно-микроскопическое изображение участка каркасной сетки наплавленного слоя:
а – светлое поле; б – д – изображения данного участка фольги, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов W (б), Fe (в), Cr (г), C (д)

Electron microscopic image of a frame mesh section of the deposited layer:
а – light field; б – д – images of the foil section obtained in characteristic X-ray radiation of atoms W (б), Fe (в), Cr (г), C (д)

атомов вольфрама, хрома, ванадия, железа и углерода, что позволяет предположить наличие наноразмерных частиц карбидной фазы сложного состава. Эти частицы имеют округлую или ограниченную формы, размеры составляют 10 – 18 нм.

Анализ соответствующих микроэлектроннограмм показывает, что частицы глобулярной формы, расположенные хаотически в объеме зерен α -Fe, являются карбидами составов V_4C_3 или Cr_7C_3 . Частицы ограниченной формы являются карбидами составов $Cr_{23}C_6$ ($Me_{23}C_6$), Fe_3C или WC_{1-x} .

После отпуска микротвердость увеличивается на 13 % и достигает 5,3 ГПа, параметр износа увеличивается на 12,3 %, коэффициент трения снижается на 7 % (см. таблицу).

Электронно-пучковая обработка отпущенного наплавленного слоя формирует тонкий (30 – 50 мкм) поверхностный слой с ячеистой (зеренной) структурой высокоскоростной кристаллизации субмикронного размера (100 – 250 нм). По границам ячеек кристаллизации располагаются частицы второй фазы с поперечными размерами 10 – 15 нм. В отдельных случаях на границах и в объеме ячеек выявляются частицы ограниченной или глобулярной формы, размеры которых достигают 45 нм. Частицы второй фазы наблюдаются также и в объеме ячеек, размеры таких частиц составляют 5 – 10 нм. Анализ микроэлектроннограмм показал, что это карбиды сложного состава Me_6C , $Me_{23}C_6$, Me_3C , Me_7C_3 (здесь Me обозначены химические элементы хром, железо, вольфрам). Электронно-пучковая обработка сопровождается кратным (в три и более раз) повышением износостойкости материала, снижением коэффициента трения при неизменной микротвердости.

Выводы

Методами современного физического материаловедения проведены исследования структуры, элементного и фазового составов, состояния дефектной субструктуры, механических и трибологических свойств слоя наплавки быстрорежущей стали P18Ю в защитно-легирующей среде азота, подвергнутого высокотемпературному отпуску и дополнительному облучению импульсным электронным пучком в режиме высокоскоростного плавления тонкого поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Упрочнение теплостойких сплавов плазмой в среде азота / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Башченко. Новокузнецк: Полиграфист; 2022:232.
2. Износостойкие наплавки на сталь: структура, фазовый состав и свойства: монография / С.В. Райков, В.Е. Кормышев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ; 2017:318.
3. Chaus A.S., Murgas M., Latyshev I.V., Tot R. Heat treatment of cast carburising high-speed steel alloyed with Ti, Nb and V. *Metal Science and Heat treatment*. 2001;43:220–223. <http://doi.org/10.1023/A:1012317911735>
4. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под общ. ред. Н.Н. Ковалю и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ; 2016:304.
5. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing; 2016:196.
6. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer; 2014:717. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-38934-4>
7. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing; 2016:518. <http://doi.org/10.1017/S1431927618000296>

Сведения об авторах

Information about the Authors

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

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Александр Сергеевич Чапайкин, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: thapajkin.as@yandex.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

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

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Aleksandr S. Chapajkin, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: thapajkin.as@yandex.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

В. Е. Громов – концепция работы, научное руководство, написание текста.

А. С. Чапайкин – обзор литературы, проведение механических испытаний, подготовка образцов для ПЭМ.

Л. П. Бащенко – обсуждение результатов, редактирование текста.

V. E. Gromov – work conceptualization, scientific guidance, writing the text.

A. S. Chapajkin – literary review, conducting mechanical tests, preparing samples for TEM.

L. P. Baschenko – discussion of the results, editing the text.

Поступила в редакцию 12.10.2023

После доработки 20.05.2024

Принята к публикации 21.08.2024

Received 12.10.2023

Revised 20.05.2024

Accepted 21.08.2024