ISSN 2304-4497
eISSN 2307-1710

СибГИУ
Первый вуз Кузбасса

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК Сибирского государственного индустриального университета

№ 2 (48), 2024

Издается с июня 2012 года
Выходит 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Scientific journal

BULLETIN of the Siberian State Industrial University

No. 2 (48), 2024

Published since June 2012
It is published 4 times a year

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2020 г.
Адрес редакции:
Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 433 М, тел. 8-3843-74-86-28
http: www.sibsiu.ru
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru
Адрес издателя:
Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 336 Г, тел. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru
Адрес типографии:
Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 280 Г, тел. 8-3843-46-44-02
Подписные индексы:
Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Founder
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State Industrial University»

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)
Certificate of registration:
PI No. FS77-77872 dated 03.03.2020
Editorial office address:
42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University
office 433 M, tel. 8-3843-74-86-28
http: www.sibsiu.ru
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Publisher's address:
42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University
office 336 G, tel. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Printing house address:
42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University
office 280 G, tel. 8-3843-46-44-02

Subscription indexes:
United catalog «Press of Russia» – 41270

Подписано в печать
30.06.2024 г.
Выход в свет
30.06.2024 г.
Формат бумаги 60×88 1/8.
Бумага писчая.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,2.
Уч.-изд. л. 5,6.
Тираж 300 экз.
Заказ № 137.
Цена свободная

Signed to the press
30.06.2024
Coming out
30.06.2024
The paper size is 60×88 1/8.
Writing paper.
Offset printing.
Usl. pech. l. 5,2.
Uch.-ed. l. 5,6.
The circulation is 300 copies.
Order no. 137.
The price is free

Кириенко Анна Павловна, д.э.н., профессор, директор Байкальского института БРИКС, Иркутскийнациональныйисследовательскийтехническийуниверситет, г. Иркутск, профессор кафедры финансового и налогового менеджмента, Уральскийфедеральныйуниверситетим. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Климков Алексей Григорьевич, к.э.н., начальник научно-исследовательского отдела ЗАО «Структурные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Колубаев Евгений Александрович, д.т.н., профессор Российской академии наук, директор, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

Копеин Валерий Валентинович, д.э.н., доцент, профессор кафедры бухгалтерского учета, налогообложения и финансов, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Коган Антон Борисович, д.э.н., доцент, профессор кафедры экономики предпринимательской деятельности и логистики, Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ», г. Новосибирск, Россия

Нехорошева Людмила Николаевна, д.э.н., профессор, заведующий кафедрой экономики промышленных предприятий, Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Namrata Gangil, PhD, доцент кафедры машиностроения, Инженерный колледж Аджая Кумара Гарга, г. Газиабад, Индия

Осколкова Татьяна Николаевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Пантелеев Василий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Петрова Татьяна Викторовна, д.э.н., профессор, профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Ramachandra Arvind Singh, PhD, профессор, Технологический институт MLR (MLRI), г. Хайдарабад, Индия

Rongshan Qin, профессор перспективного материаловедения факультета инженерии и инноваций, Открытый университет Уолтон Хол, г. Милтон Кейнс, Великобритания

Рыбенко Инна Анатольевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Симченко Наталья Александровна, д.э.н., профессор, профессор кафедры экономической теории и истории экономической мысли, Санкт-Петербурский государственный университет, г. Сант-Петербург, Россия

Siddiquee Arshad Noor, PhD, профессор кафедры машиностроения Джамия Миллия Исламия, Центральный университет, г. Нью-Дели, Индия

Смагин Валерий Иванович, д.т.н., профессор, профессор кафедры прикладной математики института прикладной математики и компьютерных наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Стрижак Павел Александрович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией тепломассопереноса, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Султангузин Ильдар Айдарович, д.т.н., профессор, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

Solotareff Stefan, PhD, доктор теоретической физики, профессор психологии-математики, Государственный университет Уджда, Марокко

Темлянцев Михаил Викторович, д.т.н., профессор, проректор по реализации стратегического проекта, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Members of the editorial board

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

INFORMATION TECHNOLOGY

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Оригинальная статья

УДК 539.2;669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-43-52

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© 2024 г. Т. В. Володин, С. А. Невский, В. Е. Громов, Л. П. Бащенко, Д. В. Шамсутдинова

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

Аннотация. Методами современного физического материаловедения проведен сравнительный анализ структуры, фазового состава и механических свойств (микротвердости) быстрорежущей стали марки Р18 после магнитно-импульсной и электронно-пучковой обработок. Магнитно-импульсная обработка образцов стали в отожженном состоянии проводилась на установке МИУ 10/30 при значении энергии магнитного поля индуктора 40 кДж, количество импульсов 6, длительность импульса 200 мкс, частота следования 20 кГц. Электронно-пучковой обработке подвергали образцы, полученные плазменно-дуговой наплавкой и подвергнутые четырехкратному высокотемпературному отпуску. Режим электронно-пучковой обработки: плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см^2, длительность импульса пучка электронов 50 мкс, количество импульсов облучения 5 имп., частота следования импульсов 0,3 с$^{-1}$. При воздействии импульсного магнитного поля в поверхностном слое стали толщиной примерно 100 мкм наблюдалось измельчение карбидов с 13,2 до 2,9 мкм и формирование мелкоигольчатого мартенсита размерами от 200 до 1 нм, объемная доля которого составляет 0,54. Это обуславливает высокие значения микротвердости: до 5,7 ГПа. Электронно-пучковая обработка отпущенных образцов также приводит к дроблению карбидов в поверхностном слое 50 мкм до размеров 10 – 45 нм и формированию ячеистой субмикроструктуры размерами 100 – 250 нм. Установлено, что основными механизмами упрочнения являются упрочнение мартенситной структурой в случае магнитно-импульсной обработки и ячеистой субструктурой при обработке электронным пучком. Полученные результаты могут быть использованы для разработки комбинированных видов обработки, которые сочетают импульсное магнитное поле и электронных пучок.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, магнитно-импульсная обработка, электронно-пучковая обработка

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, https://rscf.ru/project/23-19-00186

Для цитирования: Володин Т.В., Невский С.А., Громов В.Е., Бащенко Л.П., Шамсутдинова Д.В. Структурно-фазовые состояния и свойства быстрорежущей стали после импульсных энергетических воздействий. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):43–52. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-43-52*

Original article

STRUCTURAL-PHASE STATES AND PROPERTIES OF HIGH-SPEED STEEL AFTER PULSED ENERGY EFFECTS

© 2024 T. V. Volodin, S. A. Nevskii, V. E. Gromov, L. P. Bashchenko, D. V. Shamsutdinova

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

Abstract. Using the methods of modern physical materials science, a comparative analysis of the structure, phase composition and mechanical properties (micro-confirmation) of high-speed steel P18 after magnetic pulse and

electron beam treatments was carried out. Magnetic pulse treatment was carried out for annealed steel samples at the MIU 10/30 installation at the value of the magnetic field energy of the inductor 40 kJ and the number of pulses 6, pulse duration 200 microseconds, repetition frequency 20 kHz. Electron beam processing was carried out on samples obtained by plasma arc surfacing and subjected to fourfold high temperature tempering. Electron beam processing mode: electron beam energy density 30 J/cm2, electron beam pulse duration 50 microseconds, number of irradiation pulses 5 pulses, pulse repetition rate 0.3 s^{-1}. Under the action of a pulsed magnetic field in a surface layer of steel with a thickness of ~ 100 microns, the grinding of carbides from 13.2 microns to 2.9 microns and the formation of small-needle martensite with sizes from 200 to 1 nm, the volume fraction of which is 0.54, was observed. This causes high microhardness values up to 5.7 GPa. Electron beam processing of the released samples also leads to fragmentation of the carbides in the surface layer of 50 microns to the size of 10 – 45 nm and the formation of a cellular submicrostructure with dimensions of 100 – 250 nm. It has been established that the main mechanisms of hardening are the hardening of the martensitic structure in the case of magnetic pulse treatment and the cellular substructure during electron beam treatment. The obtained results can be used to develop combined types of processing that combine a pulsed magnetic field and an electron beam.

Keywords: high speed steel, pulsed magnetic treatment, electron beam processing

Funding: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-19-00186, https://rscf.ru/project/23-19-00186

For citation: Volodin T.V., Nevskii S.A., Gromov V.E., Bashchenko L.P., Shamsutdinova D.V. Structural-phase states and properties of high-speed steels after pulsed energy effects. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):43–52. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-43-52*

Введение

В настоящее время задачи, решаемые современным физическим материаловедением и физикой конденсированного состояния, тесно связаны с проблемами повышения надежности и долговечности изделий. Особенно это касается режущего инструмента, где очень высоки требования к прочностным и трибологическим свойствам материалов [1]. Для выполнения этих требований необходимы разработка новых и модернизация существующих технологий получения и обработки материалов – быстрорежущих сталей. Одним из наиболее интересных типов обработки является магнитно-импульсная, при применении которой за относительно короткое время формируются поверхностные слои, обладающие высокими физико-механическими свойствами [2], что позволяет увеличить износостойкость изделий [3]. В работах [4; 5] показано, что воздействие импульсных магнитных полей на сталь марки 20Cr2Ni4A, подвергнутую контактной усталости, приводит к увеличению ее ресурса на 42 %. По мнению авторов работ [4; 5], причиной этого является увеличение остаточных сжимающих напряжений, что вызвано стимулированием движения дислокаций и магнитострикцией. В работе [6] показано, что воздействие импульсного магнитного поля на сталь марки Cr4Mo4V приводит к образованию более однородной микроструктуры и обеспечивает более прочный барьер для дислокаций, регулируя характер распределения границ зерен. Действительно, оценки влияния импульсного магнитного поля на стали типа Р9 и Р18, проведенные в работах [7 – 9], показали, что отдельные участки зерен феррита нагреваются до температур, близких к температуре Кюри, при которой происходит магнитное превращение стали, связанное с переходом из ферромагнитного в парамагнитное состояние. В итоге происходит уменьшение размеров ферромагнитных доменов и возникновение неоднородной структуры [8]. Домены в этой структуре окружены парамагнитными областями. При наличии сильных магнитных полей в области обработки вследствие магнитострикции происходит существенная деформация ферромагнитных участков, которые сдвигаются относительно областей с малой магнитной проницаемостью. Такие смещения способствуют разрыву связей между атомами на границе областей с различными магнитными свойствами и образованию межзеренной границы [8] и, как следствие, ведут к уменьшению размеров зерен. Оценки давления магнитного поля на поверхности обрабатываемой стали показали, что оно составляет примерно 100 ГПа [7], что создает условия для деформации феррита. Дислокации в направлении, параллельном приложенной нагрузке, вытесняются на границы зерен, а в перпендикулярном направлении возникают дополнительные (остаточные) механические напряжения. Эти напряжения препятствуют дальнейшей миграции дислокаций и создают условия для образования мелкодисперсной структуры вблизи границ зерен феррита. При этом может происходить также дробление карбидных включений. В работе

[9] указано, что одним из наиболее вероятных механизмов улучшения механических свойств является размножение дислокаций под действием магнитного давления. В работе [10] установлено, что магнитно-импульсная обработка быстрорежущей стали приводит к увеличению твердости на 50 HV, что также обусловлено ростом плотности дислокаций. Если магнитно-импульсная обработка проводится в режиме оплавления, то к вышеперечисленным процессам движения дислокаций и магнитострикции добавляются процессы высокоскоростной кристаллизации [11], что приводит к образованию мартенсита игольчатой морфологии. Расчет этих режимов и глубины зоны оплавления проведен в работе [12] путем решения распределения вихревых токов в образце и вычисления температуры, что позволило не только найти толщину жидкого слоя, но и время его существования. Таким образом, магнитно-импульсная обработка способствует изменению микроструктуры материала и улучшению его механических свойств.

Другим, не менее интересным методом улучшения механических свойств металлических материалов, является электронно-пучковая обработка [13, 14]. Воздействие сильноточных электронных пучков на металлы и сплавы представляет собой сложный комплекс явлений, который включает в себя нагрев, распространение термоупругих волн, плавление, конвективные течения в жидком слое, испарение вещества и последующую кристаллизацию [15]. Данные явления будут определять, какая структура, фазовый состав и механические свойства сформируются в поверхностных слоях материалов.

Остановимся подробнее на инструментальных сталях. В работе [16] установлено, что после облучения микротвердость поверхности образцов из стали Т10 увеличивается с 252 HV до 839 HV, при этом толщина модифицированного слоя составляет 340 мкм. Микроструктура поверхностных слоев этой стали имеет градиентный характер. В зоне оплавления наблюдаются δ-феррит и игольчатый мартенсит, а в зоне термического влияния – мартенсит и цементит. Структура подложки представлена ферритом и перлитом. Такое структурно-фазовое состояние объясняет увеличение микротвердости и износостойкости стали Т10. В работе [17] исследовано совместное воздействие электронно-пучковой обработки (ЭПО) и плазменного азотирования (ПА) на структуру инструментальной стали W320. Установлено, что твердость после электронно-лучевой обработки и плазменного азотирования достигает 7600 МПа, в то время как твердость образца, обработанного по схеме ЭПО + ПА + ЭПО, составляет 7180 МПа. Теоретические расчеты глубины модифицированного слоя показали, что глубина составляет 100 мкм, что соответствует экспериментальным данным (h_{exp} = 117 мкм). В работе [18] методом селективного электронно-лучевого плавления с предварительным подогревом порошка была получена быстрорежущая сталь М2 без трещин. Ее структура состоит из зерен матрицы α-Fe размером менее 7 мкм, а также мелкодисперсного карбида, образование которых вызвано высокой скоростью охлаждения ванны расплава, что объясняет высокую твердость (~70 HRC) и превосходные трибологические свойства. Степень износа стали М2 составляет 13,7 %, что ниже, чем у закаленных и отпущенных кованых объемных аналогов.

Таким образом, следует заключить, что магнитно-импульсная и электронно-пучковая обработки способствуют существенному преобразованию структуры и свойств инструментальных сталей. Однако сравнительный анализ воздействия магнитно-импульсной и электронно-пучковой обработок на структурно-фазовые состояния и свойства быстрорежущих сталей практически не проводился. Это обусловлено малым количеством работ по влиянию низкоэнергетических электронных пучков на такие стали.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа структурно-фазо-вых состояний и механических свойств на примере быстрорежущей стали марки Р18 после магнитно-импульсной и электронно-пучковой обработок.

Материал и методика исследования

В качестве объекта исследования была выбрана быстрорежущая сталь марки Р18 следующего химического состава, % (по массе): C 0,87; Cr 4,41; W 17,00; Mo 0,1; V 1,5; Ti 0,35; Al 1,15; N 0,06; остальное – железо.

В работе проводили магнитно-импульсную обработку (МИО) образцов стали в отожженном состоянии на установке МИУ 10/30 при значении энергии магнитного поля индуктора 40 кДж и количестве импульсов 6, длительность импульса составляла 200 мкс, частота следования 20 кГц. Индуктор имел форму соленоида длиной 20 см, диаметром 5 см, количество витков 14, диаметр проволоки, из которой он был изготовлен, составлял 1,4 см [11].

Электронно-пучковую обработку на установке «СОЛО» проводили по следующему режиму: плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см^2, длительность импульса пучка электронов 50 мкс, количество импульсов облучения 5 имп., частота следования импульсов 0,3 с$^{-1}$, давление остаточной атмосферы (аргон) в рабочей камере установки 0,02 Па. Образцы быстрорежущей стали,

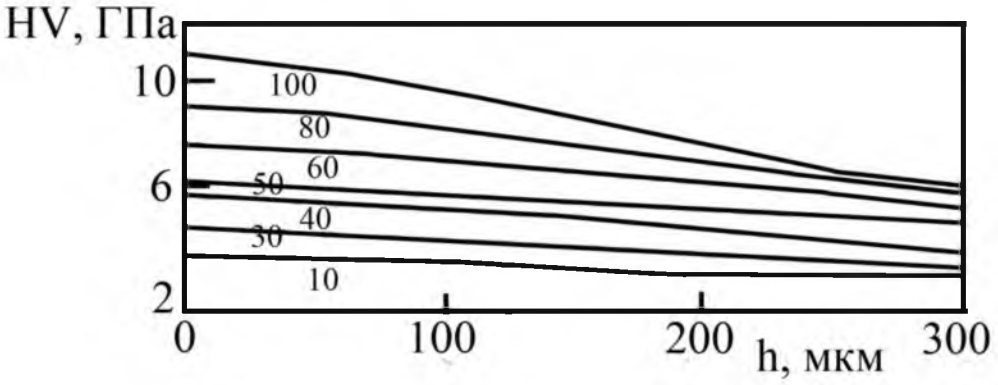

Рис. 1. Зависимость микротвердости стали марки Р18 от толщины упрочненного слоя при магнитно-импульсной обработке при энергии магнитного поля индуктора 10, 30, 40, 50, 60, 80 и 100 кДж
Fig. 1. The dependence of the microhardness of steel P18 on the thickness of the hardened layer during magnetic pulse processing at the energy of the magnetic field of the inductor 10, 30, 40, 50, 60, 80 and 100 kJ

полученные электродуговой наплавкой [19], перед обработкой электронным пучком подвергали четырехкратному высокотемпературному отпуску при температуре нагрева 580 °С и времени выдержки 1 ч [19].

Металлографический анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе KYKY-EM6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом при заданных параметрах: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток эмиссии 150 мкА; ток накала точки насыщения 2,4 А; рабочее расстояние между образцом и объективной линзой 15 мм [20]. Оптическую микроскопию осуществляли с помощью приборов OLYMPUS GX-51 и NEOPHOT-21. Фазовый состав определяли методами рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD 600.

Испытания на микротвердость проводили методом Виккерса на приборах HVS-1000 и Micromet. Размеры структурных элементов определяли методом случайных секущих, а их объемную долю – планиметрическим методом [21].

Результаты и их обсуждение

В отожженном состоянии структура стали марки Р18 представлена сорбитообразным перлитом и карбидами. Значение микротвердости составляет от 2,5 до 2,7 ГПа. Средний диаметр карбидных включений составляет от 13,2 до 26,5 мкм. Такой разброс значений этой характеристики свидетельствует о значительной неоднородности структуры стали по карбидам [22]. Оценка объемной доли карбидов по формуле $P_V = \frac{\pi}{6}\left(\frac{d}{l}\right)$ (где d – средний размер включений карбида; l – межкарбидное расстояние) [23] показала, что при $16{,}0 < l < 17{,}5$ мкм значения P_V составляют от 0,43 до 0,79. Магнитно-импульсная обработка приводит к формированию упрочненного слоя, структура которого включает мелкоигольчатый мартенсит (средний размер игл 200 – 1 нм), остаточный аустенит (объемная доля 0,04) и мелкодисперсные карбиды типа Me_6C, MeC, $Me_{23}C_6$ (в Me входят различные карбидообразующие элементы Cr, Mo, V, W, Fe, Mn) размерами 2,9 – 3,3 мкм. Объемная доля карбидных фаз составляет от 0,42 до 0,44 при значении межкарбидного расстояния 3,6 – 3,9 мкм. Наличие остаточного аустенита объясняется весьма высокими скоростями нагрева и охлаждения при магнитно-импульсной обработке. Такие изменения структуры не могут не отразиться на механических свойствах поверхностного слоя стали. На рис. 1 представлена зависимость микротвердости HV от толщины упрочненного слоя при различных (10 – 100 кДж) значениях энергии магнитного поля (l).

При энергии магнитного поля 40 кДж значение HV поверхностного слоя составляет 5,7 ГПа. Глубина модифицированного слоя согласно данным, представленным на рис. 2, для четырех импульсов составляет ~98 мкм. Расчет толщины скин-слоя по формуле $\delta = 503\left(\frac{\rho}{\mu f}\right)^{1/2}$ [24]

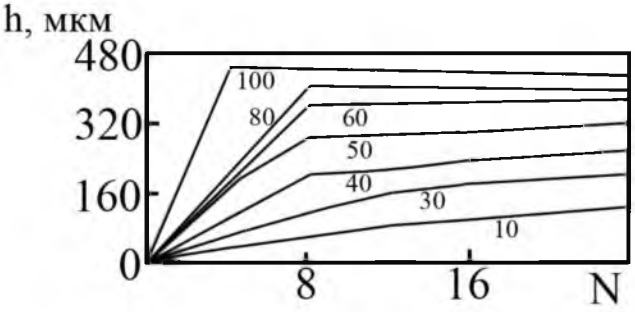

Рис. 2. Зависимость глубины модифицированного слоя стали марки Р18 от количества импульсов при магнитно-импульсной обработке при энергии магнитного поля индуктора 10, 30, 40, 50, 60, 80 и 100 кДж
Fig. 2. The dependence of the depth of the modified layer of steel P18 on the number of pulses during magnetic pulse processing at the energy of the magnetic field of the inductor 10, 30, 40, 50, 60, 80 and 100 kJ

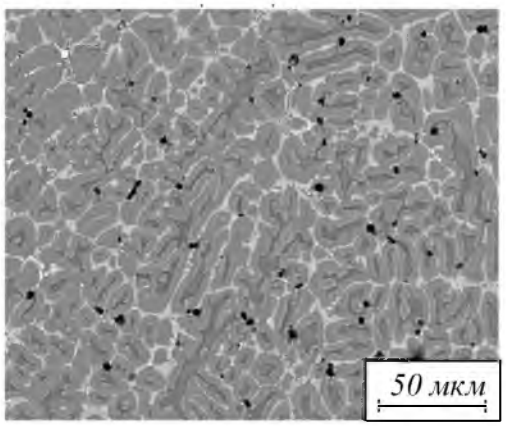

Рис. 3. Структура поверхности стали марки Р18 после наплавки и высокотемпературного отпуска
Fig. 3. Surface structure of P18 steel after surfacing and high temperature tempering

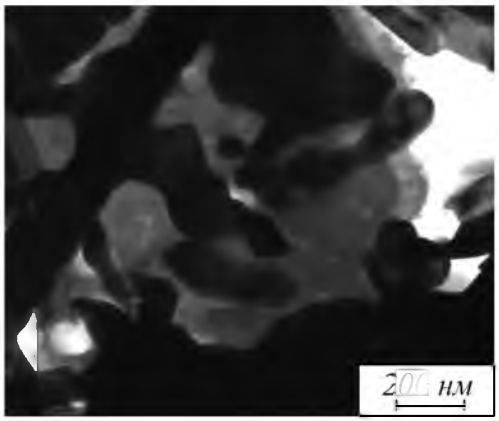

Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение карбидных фаз после высокотемпературного отпуска
Fig. 4. Electron microscopic image of carbide phases after high temperature tempering

(где $\rho = 10^{-6}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление образца; μ – магнитная проницаемость; f – частота следования импульсов) показал, что при $f = 20$ кГц и $\mu = 200$ значение δ составляет 251 мкм. Если учесть тот факт, что при температуре выше Ac_3 сталь теряет свои ферромагнитные свойства ($\mu = 1$), то значение δ составляет 3,56 мм. Это значительно выше экспериментально наблюдаемой толщины модифицированного слоя. С другой стороны, результаты расчета толщины оплавленного слоя в работе [11] указывают на значение, находящееся в пределах от 300 до 500 мкм, что также выше экспериментально наблюдаемой толщины модифицированного слоя. Такое различие теоретических и экспериментальных данных может быть объяснено тем, что при температурах выше температуры ликвидуса значимыми становятся эффекты испарения вещества, которые приводят к потерям энергии и, соответственно, к уменьшению толщины модифицированного слоя [25].

Высокотемпературный отпуск и электронно-пучковая обработка также приводят к существенному изменению структуры и свойств быстрорежущих сталей. Если в состоянии после наплавки, как показали результаты работы [26], в поверхностном слое формируется ячеисто-дендритная структура с размерами ячеек от 4,0 до 13,5 мкм, то высокотемпературный отпуск приводит к увеличению их размеров до 7,0 – 22,5 мкм и более равномерному распределению химических элементов в сплаве (рис. 3).

Внутри ячеек после наплавки наблюдается остаточный аустенит и мартенсит игольчатого типа, размер игл которого составляет 1 – 3 мкм. После высокотемпературного отпуска размер игл увеличивается в два раза (от 2 до 6 мкм). Помимо ячеистой структуры также наблюдаются карбиды типа Me_6C (Me = Fe, W, Cr, Mo, V), объемная доля которых по данным рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии составляет 0,5. После высокотемпературного отпуска объемная доля карбидов уменьшается до 0,44. Существенным отличием структурного состояния поверхностного слоя после отпуска является наличие высокой плотности карбидов наноразмерного диапазона. Размеры карбидных частиц находятся в интервале 80 – 350 нм (рис. 4). Это могут быть вторичные карбиды: как Me_6C, так и MeC.

Последующая обработка электронным пучком образцов стали марки Р18 приводит к значительным преобразованиям структуры и фазового состава поверхностного слоя толщиной до 50 мкм [26]. В этом слое сформировались ячейки высокоскоростной кристаллизации размерами 100 – 250 нм, по границам которых располагаются частицы второй фазы, значения поперечных размеров которых находятся в интервале 10 – 15 нм (рис. 5). Это карбиды типа Me_6C и $Me_{23}C_6$ (здесь Me обозначены химические элементы (Cr, Fe, W), присутствие которых можно ожидать в данных карбидах). Внутри ячеек наблюдается феррит и, в отдельных случаях, частицы ограненной или глобулярной формы, размеры которых достигают 45 нм. Частицы второй фазы наблюдаются также и в объеме ячеек, их размеры составляют 5 – 10 нм.

Проведенный анализ структурных изменений быстрорежущей стали марки Р18 позволяет сделать вывод о том, что поверхностный слой после ЭПО будет обладать высокими механическими свойствами. Значение микротвердости образцов после высокотемпературного отпуска составляет 5,3 ГПа и при последующей электронно-пучко-

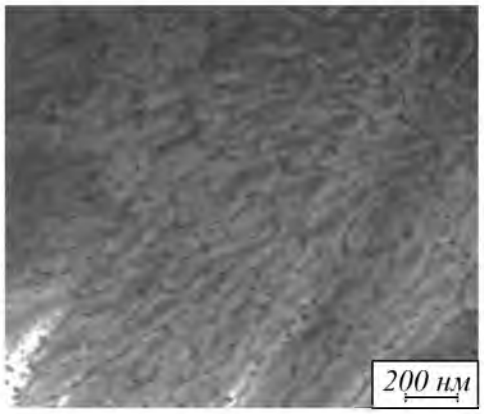

Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение ячеистой структуры стали марки Р18 после высокотемпературного отпуска и электронно-пучковой обработки
Fig. 5. Electron microscopic image of the cellular structure of P18 steel after high-temperature tempering and electron beam processing

вой обработке практически не изменяется. Это в 1,13 раза выше, чем в наплавленном состоянии и в 2,12 раза выше, чем в отожженном.

В табл. 1 приведены характеристики структуры и свойства стали марки Р18 после различных видов обработок.

Перейдем к оценке механизмов упрочения быстрорежущей стали при МИО и ЭПО. Упрочнение большеугловыми границами зерен (пакетами мартенсита, кристаллами мартенсита и бейнита) рассчитывается по соотношению Холла-Петча [27]:

$$\sigma_b = \sigma_0 + k_y D^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_0 – напряжение трения решетки (для сталей σ_0 = 30 ÷ 40 МПа); k_y – коэффициент пропорциональности, характеризующий состояние границ зерен материала (значение изменяется в пределах от 0 до 1581,139·МПа·мкм$^{1/2}$); D – средний размер зерен.

Механизм упрочнения малоугловыми границами рассчитывается по формуле

$$\sigma_{sb} = k'_y l^{-m}, \quad (2)$$

где m = 1 или ½; l – эффективный размер кристаллов мартенсита [23], определяемый эффективной длиной плоскости скольжения в мартенсите.

Установлено, что при m = 1, величина k'_y изменяется от 150 до 100 Н/м; при m = 1/2 значение k'_y изменяется от 63246 до 309903 Н/м$^{3/2}$.

Упрочнение частицами вторых фаз рассчитывается по соотношению Е. Орована:

$$\sigma_{Or} = M \frac{mG_m b}{2\pi|\lambda - d|} \Phi \ln\left(\left|\frac{\lambda - d}{2b}\right|\right), \quad (3)$$

где d – средний размер частиц; m – ориентационный множитель, равный для ОЦК материалов 2,75 [23, 27]; Ф =1 для винтовой и Ф = $(1 - \nu)^{-1}$ для краевой дислокаций; λ – межчастичное расстояние; M – параметр, учитывающий неравномерность распределения частиц в матрице, равный 0,81 – 0,85 [23]; G_m – модуль сдвига матрицы (~80 ГПа); b – вектор Бюргерса.

Упрочнение дислокациями рассчитывается по формуле

$$\sigma_d = \chi m \alpha G b \sqrt{\langle \rho \rangle}, \quad (4)$$

где $\langle \rho \rangle$ – скалярная плотность дислокаций; m – ориентационный множитель; G – модуль сдвига; α = 0,1 ÷ 0,51– безразмерный коэффициент; χ = 0,84 ÷ 0,87.

Твердорастворное упрочнение [23] рассчитывается следующим образом:

$$\sigma_{ss} = \sum_{i=1}^{n} k_i C_i, \quad (5)$$

где k_i – коэффициент упрочнения α-железа при легировании каким-либо элементом в количестве 1 % (по массе) (значения для различных

Таблица 1

Характеристики структуры и свойств поверхностного слоя стали Р18
Table 1. **Characteristics of the structure and properties of the surface layer of steel P18**

Состояние	Характеристика				
	Микротвердость, ГПа	Размер игл мартенсита, мкм	Объемная доля карбидов	Средний размер карбидов, мкм	Средний размер зерен, мкм
Отжиг + МИО	5,7	0,01 – 0,2	0,42	2,90 – 3,30	–
Наплавка + отпуск	5,3	2 – 6	0,44	0,08 – 0,35	7,0 –22,5
Наплавка + отпуск + ЭПО	5,3	–	0,33	0,010 – 0,045	0,10 – 0,25
Примечание. Для ЭПО в последнем столбце приведен средний размер ячеек кристаллизации.					

Таблица 2

Механизмы упрочнения поверхностного слоя стали Р18
Table 2. **Hardening mechanisms of the surface layer of steel P18**

Состояние	Характеристика				
	σ_b, МПа	σ_{sb}, МПа	σ_{Or}, МПа	σ_d, МПа	σ_{ss}, МПа
Отжиг + МИО	–	693	88 – 126	510	467
Наплавка + отпуск	368	127	106 – 152	–	–
Наплавка + отпуск + ЭПО	–	620	186 – 256	–	–

элементов определяются эмпирически [23, 27]); C_i – концентрация элемента, растворенного в α-железе (по массе).

В табл. 2 приведены результаты расчетов механизмов упрочнения поверхностного слоя стали марки Р18 после различных видов обработок.

Сравнивая результаты, приведенные в табл. 1 и 2, можно заключить, что в случае МИО преобладающими механизмами упрочнения являются упрочнение игольчатым мартенситом, дислокационной субструктурой и твердым раствором, что обуславливает высокую твердость поверхностного слоя стали марки Р18 (рис. 1). В состоянии «наплавка + отпуск» основным механизмом является упрочнение границами зерен, а игольчатый мартенсит вносит в 5,46 раз меньший вклад, чем при МИО. Частицы вторых фаз по модели Орована дают меньший вклад, чем иглы мартенсита и границы зерен, что может быть объяснено тем, что при расчете в качестве среднего расстояния между частицами брался размер зерен, что не совсем корректно. Если использовать формулу $\lambda = d\left(\frac{0{,}82}{P_V^{1/3}} - 1\right)$ [27], то соотношение (3) дает значение 149 МПа для винтовой дислокации и 213 МПа для краевой дислокации. Последующая ЭПО перераспределяет вклады механизмов упрочения. Наибольший вклад дают ячейки кристаллизации, вклад которых рассчитан по формуле (2), и частицы карбидной фазы. Если провести расчет по соотношению Холла-Петча, то вклад границ зерен будет составлять ~3,2 ГПа. Корректировка значений σ_{Or} по ранее приведенной формуле межчастичного расстояния из работы [27] дает 220 и 314 МПа. Наличие таких напряжений дает объяснение тому, что микротвердость отпущенной стали марки Р18 после облучения не меняется. Проведение анализа вклада твердорастворного упрочнения и внутренних напряжений в прочность стали осложняется тем, что соответствующие данные для расчетов в состоянии после наплавки, отпуска и ЭПО отсутствуют. Для решения этой задачи необходимы дополнительные исследования.

Выводы

Сравнительный анализ структуры, фазового состава и механических свойств быстрорежущей стали марки Р18 после магнитно-импульсной и электронно-пучковой обработок показал, что данные виды обработки в зависимости от режимов приводят к существенным преобразованиям. Общим для этих обработок является протекание процессов высокоскоростной кристаллизации, измельчение карбидных фаз до микро- и нанометрового диапазонов, а также сравнимые значения микротвердости поверхностных слоев. Отличие между этими видами обработок заключается в том, что в поверхностном слое при электронно-пучковой обработке преобладают наноструктуры и, соответственно, осуществляются разные механизмы упрочнения: если при магнитно-импульсной обработке преобладает упрочнение иглами мартенсита и дислокационной субструктурой, то при электронно-пучковой обработке основной вклад в прочность вносят ячейки кристаллизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, microstructural evolution, and engineering performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:8198–8240. *https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.269*
2. Zhipeng C., Xinquan H. Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic field and pulsed current. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(19-20):6287–6292. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.078*
3. Yang Y., Yang Y., Liao C., Yang G., Qin Y., Li Q., Wu M. Enhancing tribological performance of cemented carbide (WC-12Co) by pulsed magnetic field treatment and magnetofluid. *Tribology International*. 2021;161:107086. *https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107086*
4. Yongfang Zhang, Chongyang Fang, Yanfei Huang, Weiling Guo, Zhiguo Xing, Haidou Wang, Zhinan Zhang. Enhancement of fatigue

performance of 20Cr2Ni4A gear steel treated by pulsed magnetic treatment: influence mechanism of residual stress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;540:168327. *https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168327*

5. Shao Q., Wang G., Wang H., Xing Z., Fang C., Cao Q. Improvement in uniformity of alloy steel by pulsed magnetic field treatment. *Materials Science and Engineering: A.* 2021;799:140143. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140143*
6. Qian C., Li K., Rui S.-S., Hou M., Zhang X., Wu Y., Cai Z. Magnetic induced re-dissolution and microstructure modifications on mechanical properties of Cr4Mo4V steel subjected to pulsed magnetic treatment. *Journal of Alloys and Compounds.* 2021;881:160471. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160471*
7. Алифанов А.В., Попова Ж.А. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле. *Литье и металлургия*. 2012;(4(68)):151–155.
8. Алифанов А.В., Ционенко Д.А., Милюкова А.М., Ционенко Н.М. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2016;(4):31–36.
9. Полетаев В.А., Потемкин Д.А. Энергетический анализ влияния магнитного поля на механические свойства стали. *Вестник ИГЭУ*. 2007;(3):1–4.
10. Ma L., Zhao W., Liang Z., Wang X., Xie L., Jiao L., Zhou T. An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Materials Science and Engineering: A.* 2014;609:16–25. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.100*
11. Формирование структурно-фазовых состояний металлических сплавов при магнитно-импульсной обработке / В.Л. Володин, О.Л. Хасанов, Т.В. Володин, В.Е. Громов, С.В. Коновалов. Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011:221.
12. Гагарин А.Ю., Сарычев В.Д., Черемушкина Е.В., Грановский А.Ю., Громов В.Е. Импульсное магнитное поле для создания на поверхности металлов полей высоких температур. *Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки*. 2016;21(3):926–929.
13. Gao B., Hu L., Li S., Y. Hao, Y. Zhang, Tu G. Study on the nanostructure formation mechanism of hypereutectic Al–17.5 Si alloy induced by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2015;346:147–157.
14. Cao X., Hu J., Huo W., Xi X., Zhao W. Surface microstructure and property modifications in AISI 304 stainless steel induced by pseudospark pulsed electron beam treatments. *Vacuum.* 2021;184:109914. *https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109914*
15. Maier A.E., Yalovets A.P. Mechanical stresses in an irradiated target with a disturbed surface. *Tech. Phys*. 2006;51:459–465.
16. Wang R., Cui H., Huang J., Jiang H. Effect of the continuous electron beam process treatment in the surface modification of T10 steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* 2018;436:29–34. *https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.09.004*
17. Ormanova M., Petrov P., Kovacheva D. Electron beam surface treatment of tool steels. *Vacuum*. 2017;135:7–12. *https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.10.022*
18. Wei Y., Qi S., Wang Y., Chu X., Sun Z., Wang J., Zhang L., Jia W., Yang X., Liu S. Microstructural evolution and tribological properties of M2 high-speed steel fabricated under various selective electron beam melting processing parameters. *Tribology International.* 2023;187:108749. *https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108749*
19. Малушин Н.Н., Романов Д.А., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Бащенко Л.П. Структурно-фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском. *Известия вузов. Физика*. 2019;62(10(742)):106–111.
20. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
21. Saltykov S.A. Stereometric Metallography. *Fort Belvoir: Defense Technical Information Center.* 1976;3:376.
22. Гайдук В.В., Роккель В.Р., Гайдук Д.В., Володин В.Л., Володин Т.В. Поверхностное упрочнение материалов с помощью магнито-импульсной установки. *Сталь*. 2004(7):87–89.
23. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. *Дисперсионное упрочнение стали*. Москва: Металлургия, 1979:208.
24. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. *Индукторы для индукционного нагрева*. Ленинград: Энергия, 1974:264.
25. Samokhin A.A., Il'ichev N.N., Pivovarov P.A., Sidorin A.V. Laser vaporisation of absorbing liquid under transparent cover. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* 2016;43(5):156–159.

26. Иванов Ю.Ф., Чапайкин А.С., Гусева Т.П., Романов Д.А., Громов В.Е. Преобразование структуры и свойств наплавки Р18Ю после высокотемпературного отпуска и электронно-пучковой обработки. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2023;3:62–79.

27. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П., Горная И.Д., Васильев А.Д. *Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов*. Киев: Наукова думка, 1989:256.

REFERENCES

1. 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, microstructural evolution, and engineering performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:8198–8240. *https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.269*

2. Zhipeng C., Xinquan H. Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic field and pulsed current. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(19-20):6287–6292. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.078*

3. Yang Y., Yang Y., Liao C., Yang G., Qin Y., Li Q., Wu M. Enhancing tribological performance of cemented carbide (WC-12Co) by pulsed magnetic field treatment and magnetofluid. *Tribology International*. 2021;161:107086. *https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107086*

4. Yongfang Zhang, Chongyang Fang, Yanfei Huang, Weiling Guo, Zhiguo Xing, Haidou Wang, Zhinan Zhang. Enhancement of fatigue performance of 20Cr2Ni4A gear steel treated by pulsed magnetic treatment: influence mechanism of residual stress. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;540:168327. *https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168327*

5. Shao Q., Wang G., Wang H., Xing Z., Fang C., Cao Q. Improvement in uniformity of alloy steel by pulsed magnetic field treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;799:140143. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140143*

6. Qian C., Li K., Rui S.-S., Hou M., Zhang X., Wu Y., Cai Z. Magnetic induced re-dissolution and microstructure modifications on mechanical properties of Cr4Mo4V steel subjected to pulsed magnetic treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;881:160471. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160471*

7. Alifanov A.V., Popova Zh.A. The mechanism of hardening of alloy steels in a pulsed magnetic field. *Casting and metallurgy*. 2012;(4(68)):151–155. (In Russ.).

8. Alifanov A.V., Zionenko D.A., Milyukova A.M., Tsyganenko N.M. Magnetostrictive mechanism of formation of a fine structure in steel products under magnetic pulse action. *Vesci National Academy of Sciences of Belarus. Gray fizika-tehnichnykh navuk*. 2016;4:31–36. (In Russ.).

9. Poletaev V.A., Potemkin D.A. Energy analysis of the influence of a magnetic field on the mechanical properties of steel. *Vestnik IGEU*. 2007;(3):1–4. (In Russ.).

10. Ma L., Zhao W., Liang Z., Wang X., Xie L., Jiao L., Zhou T. An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2014;609:16–25. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.100*

11. Volodin V.L., Khasanov O.L., Volodin T.V., Gromov V.E., Konovalov S.V. *Formation of structural and phase states of metal alloys during magnetic pulse processing*. Novokuznetsk: Publishing house "Inter-Kuzbass", 2011:221. (In Russ.).

12. Gagarin A.Yu. Sarychev V.D., Cheremushkina E.V., Granovsky A.Yu., Gromov V.E. Pulsed magnetic field for creating high temperature fields on the surface of metals. *Bulletin of the Tambov University. A series of Natural and technical sciences*. 2016;21(3):926–929. (In Russ.).

13. Gao B., Hu L., Li S., Y. Hao, Y. Zhang, Tu G. Study on the nanostructure formation mechanism of hypereutectic Al–17.5 Si alloy induced by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2015;346:147–157.

14. Cao X., Hu J., Huo W., Xi X., Zhao W. Surface microstructure and property modifications in AISI 304 stainless steel induced by pseudospark pulsed electron beam treatments. *Vacuum*. 2021;184:109914. *https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109914*

15. Maier A.E., Yalovets A.P. Mechanical stresses in an irradiated target with a disturbed surface. *Tech. Phys*. 2006;51:459–465.

16. Wang R., Cui H., Huang J., Jiang H. Effect of the continuous electron beam process treatment in the surface modification of T10 steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2018;436:29–34 *https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.09.004*

17. Ormanova M., Petrov P., Kovacheva D. Electron beam surface treatment of tool steels. *Vacuum*. 2017;135:7–12. *https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.10.022*

18. Wei Y., Qi S., Wang Y., Chu X., Sun Z., Wang J., Zhang L., Jia W., Yang X., Liu S. Microstructural evolution and tribological properties of M2 high-speed steel fabricated under various selective electron beam melting processing parameters. *Tribology International*. 2023;187:108749. *https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108749*

19. Malushin N.N., Romanov D.A., Kovalev A.P., Osetkovsky V.L., Bashchenko L.P. Structural and phase state of a heat-resistant alloy of high hardness formed by plasma surfacing in a nitrogen

medium and high-temperature tempering. *Izvestiya vuzov. Physics*. 2019;62(10(742)):106–111.
20. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
21. Saltykov S.A. Stereometric Metallography. *Fort Belvoir: Defense Technical Information Center*. 1976;3:376.
22. Gaiduk V.V., Rokkel V.R., Gaiduk D.V., Volodin V.L., Volodin T.V. Surface hardening of materials using a magnetic pulse installation. *Steel*. 2004;(7):87–89. (In Russ.).
23. Goldstein M.I., Farber V.M. *Dispersion hardening of steel*. Moscow: Metallurgy, 1979:208. (In Russ.).
24. Slushotsky A.E., Ryskin S.E. *Inductors for induction heating*. Leningrad: Energiya, 1974:264. (In Russ.).
25. Samokhin A.A., Il'ichev N.N., Pivovarov P.A., Sidorin A.V. Laser vaporisation of absorbing liquid under transparent cover. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2016;43(5):156–159.
26. Ivanov Yu.F., Chapaykin A.S., Guseva T.P., Romanov D.A., Gromov V.E. Transformation of the structure and properties of R18YU surfacing after high temperature tempering and electron beam processing. *Problems of ferrous metallurgy and materials science*. 2023;(3):62–79. (In Russ.).
27. Trefilov V.I., Moiseev V.F., Pechkovsky E.P., Gornaya I.D., Vasiliev A.D. *Deformation hardening and destruction of polycrystalline materials*. Kiev: Naukova dumka, 1989:256. (In Russ.).

Сведения об авторах

Тарас Витальевич Володин, *начальник Управления научных исследований,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: volodin_tv@mail.ru

Сергей Андреевич Невский, *д.т.н., доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7032-9029
SPIN-код: 1424-5899

Виктор Евгеньевич Громов, *д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090

Людмила Петровна Бащенко, *к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
SPIN-код: 5942-8145

Диана Витальевна Шамсутдинова, *студент Института педагогического образования,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: dianas1009hamsutdinova@gmail.com

Information about the authors:

Taras V Volodin, *Head of Scientific Department,* Siberian State Industrial University
E-mail: volodin_tv@mail.ru

Sergey A. Nevskii, *Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Professor of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel,* Siberian State Industrial University
E-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7032-9029
SPIN-код: 1424-5899

Victor E. Gromov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof, Head of the Department of Science named after V.M. Finkel',* Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Lyudmila P. Bashchenko, *Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department. of Thermal Power Engineering and Ecology,* Siberian State Industrial University
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
SPIN-код: 5942-8145

Diana V. Shamsutdinova, *student of Institute of Pedagogical Education,* Siberian State Industrial University
E-mail: dianas1009hamsutdinova@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.01.2024
После доработки 16.04.2024
Принята к публикации 19.04.2024

Received 10.01.2024
Revised 16.04.2024
Accepted 19.04.2024

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

С 22 июня 2023 г. журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям:

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические; технические);

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические);

2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические);

2.6.17. Материаловедение (технические).

В журнале публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

– *физика конденсированного состояния;*
– *информационные технологии;*
– *металлургия и материаловедение;*
– *региональная и отраслевая экономика.*

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения, экспертное заключение, разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии), авторское согласие.

В редакцию следует направлять материалы статьи в электронном виде и два экземпляра текста статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте по адресу *e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru*. При направлении материалов в редакцию необходимо указывать раздел, в котором статья будет опубликована.

Таблицы, библиографический список и подрисуночный текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75×75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов *.bmp, *.jpg, *.gif,*.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи распространенных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (*.xls, *.vsd и др.).

Шрифтовое оформление физических величин: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон, e-mail, ORCID). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 20.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация объемом 200 – 250 слов, ключевые слова.

В конце статьи необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ, представлены на сайтах https://vestnik.sibsiu.ru/ и https://www.sibsiu.ru в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания (Журнал «Вестник СибГИУ»).

TO THE AUTHORS ATTENTION

On June 22, 2023 the journal, "Bulletin of Siberian State Industrial University" was included in the List of peer-reviewed scientific editions. The journal should publish the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidates and Doctors of Sciences in following specialties:

1.3.8. Condensed matter physics (physical and mathematical; engineering);

2.6.1. Metallurgy and heat treatment of metals and alloys (engineering);

2.6.2. Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering);

2.6.17. Materials science (engineering).

The journal "Bulletin of the Siberian State Industrial University" received K2 category.

The journal publishes original, previously unpublished articles containing the most significant results of scientific and technical experimental research, as well as the results of problematic work in the following areas:

– *Condensed matter physics;*

– *IT;*

– *Metallurgy and materials science;*

– *Regional and sectorial economics.*

The paper should be accompanied by the recommendation of the relevant department of the higher education institution, expert opinion, permission of the rector or vice-rector of the higher education institution (for a non-academic enterprise - the head or his deputy) to publish the results of the work performed in this university (enterprise), author's consent.

The editorial office should receive the materials of the article in electronic form and two copies of the text of the article in hard copy. To speed up the review process, it is recommended to send the electronic version of the article and scanned copies of accompanying documents by e-mail to vestnicsibgiu@sibsiu.ru. You should indicate the section in which the article will be published before sending materials to the editorial office.

Tables, reference list, and captions should be presented on separate pages. You need to make references to tables, figures and references cited in the article.

Illustrations should be presented separately from the text. Explanatory inscriptions in illustrations should be made in Times New Roman Italic font size 9(Greek letters - in Symbol Regular font). Gray-scale images, the size of which should not exceed 75×75 mm (photographs and other images containing shades of black), should be sent as raster graphic files (formats *.bmr, *.jpg, *.gif,*.tif) in the color scale "shades of gray" with a resolution of at least 300 dpi. Stroke drawings (graphs, flowcharts, etc.) should be presented in "black and white" scale with a resolution of at least 600 dpi. You do not need to draw grid lines on the graphs, and to "fill" black experimental or calculation points (markers) without absolute necessity. Stroke drawings created using common programs MS Excel, MS Visio, etc., should be presented in the format of the original application (*.xls, *.vsd, etc.).

Typography of physical quantities: Latin letters in light italic, Russian and Greek letters in light straight type. Numbers and units of measurement are in light-colored straight type. Particular attention should be paid to the correct representation of indexes and degree indicators. Formulas are typed with the help of formula editors' Equatn or Math Ture, the scale of formulas should be 100%. The scale is set in the Format Object dialog box. In the formula editor, use the "Math" style for Latin and Greek letters, and the "Text" style for Russian letters. The size should be "Full", for degrees and indexes – "Subscript / Sub-Subscript". Do not use the "Other" style.

It is necessary to avoid repetition of the same data in tables, graphs and the text of the article. The volume of the article should not exceed 18 – 20 pages of text, printed in font 14 at one and a half intervals.

The manuscript should be carefully checked, signed by the author (if there are several authors, the number of which should not exceed five – by all authors). At the end of the manuscript indicate the full name of the higher education institution (enterprise) and department, the date of submission of the manuscript, as well as complete information about each author (full name, place of work, position, academic degree, title, office and home addresses with postal codes, telephone, e-mail, ORCID). It is necessary to indicate with whom to correspond.

References cited in the article should be given in a general list in the order of mentioning in the article, with the reference in the text indicated by a serial number. The list of literature sources is recommended no less than 20.

The references shall be arranged in accordance with GOST 7.0. 100 – 2018: a) for books – surnames and initials of authors, full title of the book, volume number, place of publication, publisher and year of publication, total number of pages; b) for journal articles - surnames and initials of authors, full title of the journal, title of the article, year of publication, volume number, issue number, pages covered by the article; c) for articles from collections – surnames and initials of authors, title of the collection, title of the article, place of publication, publisher, year of publication, to whom it belongs, number or issue, pages covered by the article.

Foreign names and terms should be given in the text in Russian transcription. In the references, the names of authors, full names of books and journals should be given in their original transcription.

References to unpublished works are not allowed.

The article should be accompanied by an abstract of 200 – 250 words and key words.

The title of the article, full name of the authors, place of their work, abstract and key words should be given in English at the end of the article.

Short reports should have independent scientific value and be characterized by novelty and originality. These are mainly meant for the publication of postgraduate papers. Short reports should not exceed two pages of text, typed in 14-point font at one and a half intervals, including tables and bibliography. It should be indicated in brackets under the title that it is a short paper. You can include one simple figure in a brief message; in this case, the text should be reduced. We do not recommended including both a table and a figure in the same paper.

The number of authors in a short report should not exceed three. The requirements for the submission of manuscripts and required documentation are identical to those for the submission of articles. As a rule, corrections of articles are not forwarded to the authors.

If the article is returned to the author for correction (or in case of reduction), the date of submission is considered to be the day of receiving the final text.

Articles submitted to the editorial office are subject to public review.

The articles of the journal are indexed in the Russian Science and Technology Center (RSCI), presented on the websites https://vestnik.sibsiu.ru/ and https://www.sibsiu.ru in the section Science and Innovations (Periodical Scientific Editions (Journal "Vestnik SibGIU").

Над номером работали

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Гашникова А.О., ведущий редактор

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта