



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Структурные особенности и износостойкость слоев, сформированных наплавкой самофлюсующегося никелевого сплава и бора электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу

Татьяна Зимоглядова^{1, a, *}, Евдокия Бушуева^{1, b}, Александр Штерцер^{2, c}, Борис Гринберг^{2, d},
 Наталья Соболева^{3, e}, Ева Коллманнбергер^{4, f}, Иван Чакин^{5, g}, Денис Бибко^{5, h},
 Алексей Леонов^{5, i}, Дарья Сафарова¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, пр. Лаврентьева, 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

⁴ Университет прикладных наук Ландсхута, Ам Лурценхоф, 1, г. Ландсхут, 84036, Германия

⁵ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, проспект Академика М.А. Лаврентьева, 11, г. Новосибирск, 630090, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-1113-9820>,  zimogliadovatatiana@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>,  ducias@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0003-4973-0437>,  asterzer@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-0160-1903>,  b_grinberg@mail.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>,  natashasoboleva@list.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0001-9489-4970>,  s-ekollm@haw-landshut.de,

^g  <https://orcid.org/0000-0003-0529-2017>,  chak_in2003@bk.ru, ^h  <https://orcid.org/0000-0002-3941-7327>,  denbibko@mail.ru,

ⁱ  <https://orcid.org/0000-0001-6692-3121>,  Alexeyleonov2009@yandex.ru, ^j  <https://orcid.org/0000-0002-2811-8292>,  safarova10ab@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.79

История статьи:

Поступила: 16 марта 2020

Рецензирование: 14 апреля 2020

Принята к печати: 02 мая 2020

Доступно онлайн: 15 июня 2020

Ключевые слова:

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка

Ni-Cr-Si-B-сплав

Структура

Твердость

Износостойкость

Нержавеющая сталь

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-43-543011.

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ССМ НГТУ.

АННОТАЦИЯ

Введение. Создание защитных слоев на рабочих поверхностях деталей машин, выполненных из хромоникелевых аустенитных сталей, является эффективным способом повышения их надежности и долговечности. Самофлюсующиеся никелевые сплавы широко применяются для формирования функциональных покрытий, стойких к абразивному воздействию. Возможность повышения комплекса свойств Ni-Cr-Si-B-сплавов путем добавления упрочняющих соединений в их матрицу или синтеза упрочняющих фаз непосредственно в процессе формирования защитного слоя представляет существенный интерес для отечественных и зарубежных специалистов. В литературе не представлены сведения о формировании защитных слоев на поверхности аустенитных сталей с использованием наплавки релятивистскими электронными пучками Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с упрочняющими добавками. **Цель** работы заключалась в повышении триботехнических свойств поверхностных слоев стальных заготовок при наплавке пучком электронов, выведенных в воздушную атмосферу Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с аморфным бором, взятым в различных весовых соотношениях. Доля аморфного бора в порошковой насыпке составляла 5, 10 и 15 вес. %. Особенности строения наплавленных слоев были изучены с использованием следующих **методов исследования**: оптическая металлография, растровая электронная микроскопия, рентгенофазовый и микрорентгеноспектральный анализ. Уровень свойств поверхностно упрочненных материалов определяли при измерении микротвердости и износостойкости при трении о закрепленные абразивные частицы и в условиях гидроабразивного воздействия. **Результаты и обсуждение.** Материал, сформированный при наплавке Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с 15 вес. % бора, характеризуется максимальной микротвердостью (1000 HV) и износостойкостью в различных условиях изнашивания. Основным структурным фактором, обеспечивающим эффективное повышение эксплуатационных характеристик, является формирование боридов Fe₂B, (Cr, Fe)B. Показано, что при наплавке Ni-Cr-Si-B-сплава и 15 вес. % бора выделившиеся упрочняющие соединения характеризуются фазовой неоднородностью. Внутренняя часть двухфазных сложных по строению частиц представляет собой CrB₂, вокруг которого происходит выделение (Fe, Cr)₂B.

Для цитирования: Структурные особенности и износостойкость слоев, сформированных наплавкой самофлюсующегося никелевого сплава и бора электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу / Т.А. Зимоглядова, Е.Г. Бушуева, А.А. Штерцер, Б.Е. Гринберг, Н.Н. Соболева, Е. Коллманнбергер, И.К. Чакин, Д.С. Бибко, А.В. Леонов, Д.Э. Сафарова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 89–103. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-89-103

*Адрес для переписки

Зимоглядова Татьяна Алексеевна, ассистент

Новосибирский государственный технический университет,
 пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: +7-983-322-02-45, e-mail: zimogliadovatatiana@gmail.com

Введение

Хромоникелевые аустенитные стали широко применяются во многих областях промышленности ввиду благоприятного сочетания таких свойств, как технологичность и относительная дешевизна в сочетании с высокой жаростойкостью и коррозионной стойкостью [1]. Однако существенным недостатком сталей данного класса является низкое сопротивление воздействию абразивных частиц в различных условиях изнашивания. Формирование на рабочей поверхности деталей защитных слоев является эффективным и технологичным способом решения данной проблемы [2, 3].

В качестве материалов для формирования твердых слоев, стойких к абразивному изнашиванию, сухому трению и трению в условиях граничной смазки, широкое промышленное применение нашли самофлюсующиеся сплавы на никелевой основе (Ni-Cr-Si-B-сплавы) [4–9]. Самофлюсующиеся сплавы представляют собой хорошо изученный класс материалов, характеризующийся наличием твердых включений различного состава и стехиометрии, распределенных в пластичной матрице сплава. Основная особенность самофлюсующихся сплавов – наличие в их составе кремния и бора, которые защищают расплавленный металл от окислительных процессов, возникающих при формировании наплавленного слоя. Повышение функциональных характеристик этих сплавов возможно за счет введения в состав наплавочных материалов дополнительных упрочняющих компонентов, например, карбидов вольфрама, титана и хрома [10–14]. Известно, что твердость и износостойкость боридов переходных металлов в несколько раз превышают характеристики соответствующих им карбидов. Высокий комплекс свойств боридов объясняется особенностями кристаллического строения, плотностью упаковки и жесткостью элементарной ячейки [15].

В настоящее время активно развиваются технологии поверхностного упрочнения, основанные на применении высококонцентрированных источников энергии, например таких, как лазерное излучение или электронные пучки. Оплавление поверхности обрабатываемой детали и введение в расплав модифицирующего компонента обеспечивает формирование

функциональных слоев с требуемым уровнем свойств [16–19].

Наплавка пучком электронов, выведенных в воздушную атмосферу, является эффективным способом поверхностно-объемного упрочнения деталей. Диапазон энергии электронов 0,8...1,4 МэВ позволяет формировать слои, толщина которых может достигать нескольких миллиметров за один проход. Вывод высококонцентрированного электронного луча за пределы вакуумной среды значительно сокращает время обработки крупногабаритных изделий [19–21].

Известно, что существенное влияние на показатели твердости и износостойкости защитных слоев в условиях абразивного воздействия оказывает доля упрочняющих частиц, расположенных в матрице наплавляемого слоя. В случае, когда объемная доля частиц упрочняющей фазы является недостаточной, значительного улучшения эксплуатационных характеристик может не произойти. В то же время слишком большая доля упрочняющих частиц в покрытии может привести к его охрупчиванию [22]. Таким образом, определение рационального соотношения упрочняющих добавок и базового материала наплавки является важной технологической задачей, позволяющей эффективно повысить эксплуатационные характеристики разрабатываемых поверхностно упрочненных материалов.

Цель настоящей работы заключалась в повышении триботехнических свойств поверхностных слоев заготовок из нержавеющей стали путем создания функциональных защитных слоев с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки самофлюсующегося никелевого сплава в сочетании с бором, взятым в различных весовых соотношениях.

Методика исследований

Наплавка порошковых смесей осуществлялась на пластины из нержавеющей стали 12X18H9T размером 100×50×12 мм. В качестве базового материала для формирования защитных слоев был использован промышленный самофлюсующийся сплав на никелевой основе марки ПН77Х15С3Р2 производства ПАО «Тулачермет» (ТУ 147-1-3758-84) дисперсностью 80...150 мкм. Химический состав основного и наплавляемого материалов представлен в табл. 1.

Химический состав исходных материалов
Chemical composition of raw materials

Исходный материал	Ni	Cr	Si	Fe	C	Mn	S	P	B
12X18H9T (основной металл)	9	17	0,3	Осн.	0,05	1,5	<0,004	<0,05	–
ПР-Н77Х15СЗР2 (наплавляемый материал)	Осн.	15	3	<3	0,5	–	–	–	2

Технологические эксперименты по формированию защитных слоев осуществлялись в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) на ускорителе электронов ЭЛВ-6. Стенд ЭЛВ-6 входит в перечень уникальных установок РФ. Энергия электронов на выходе из ускорителя достигает 1,4 МэВ, что многократно превышает диапазон энергий, типичных для электронно-лучевых пушек, оборудованных вакуумными камерами. Схема технологического оборудования и процесса наплавки представлена на рис. 1 и 2 соответственно. Устройство электромагнитной развертки позволяет управлять пучком электронов и отклонять его от вертикали на угол до 45° (см. рис. 1). Основные параметры обработки материалов были выбраны на основании проведенных ранее исследований [23]. Расстояние от выпускного отверстия до поверхности обрабатываемой детали составляло 90 мм. Ток пучка I составлял 25 мА, скорость перемещения заготовок относительно выпускного отверстия V 15 мм/с. Обрабатываемый образец располагается на подвижном столе под выпускным отверстием и поступательно перемещается в продольном направлении.

Необходимый уровень эксплуатационных свойств материалов с наплавленными слоями обеспечивался введением модифицирующих компонентов. Для получения большей доли упрочняющих соединений в наплавленном слое в состав порошковых смесей дополнительно вводили порошок аморфного бора. Доля модифицирующего компонента в порошковой насыпке составляла 5, 10 и 15 вес. %. Кроме того, с целью сравнения структуры и свойств исследуемых материалов была проведена наплавка самофлюсующегося никелевого сплава без модифицирующего компонента. Образцы обозначались

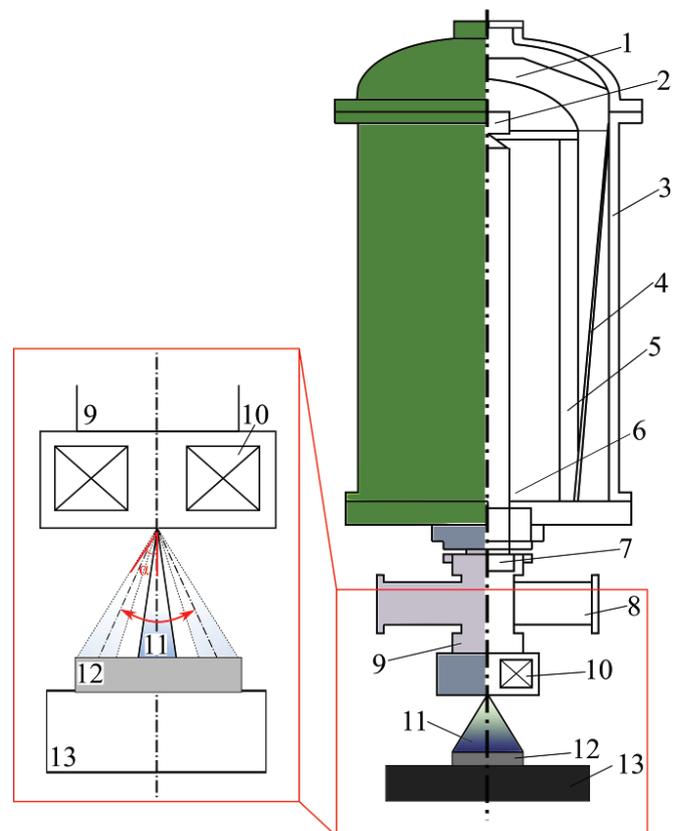


Рис. 1. Промышленный ускоритель электронов ЭЛВ-6:

1 – высоковольтный электрод; 2 – блок управления инжектором; 3 – сосуд; 4 – первичная обмотка; 5 – высоковольтный ускоритель; 6 – ускорительная трубка; 7 – электромагниты развертки; 8 – вакуумная система; 9 – выпускное устройство; 10 – магнитная катушка; 11 – электронный луч; 12 – обрабатываемая деталь; 13 – перемещающийся стол-манипулятор

Fig. 1. Commercial electron beam accelerator ELV-6:

1 – high voltage electrode; 2 – injector control unit; 3 – cylindrical tank; 4 – primary side; 5 – high-voltage accelerator; 6 – accelerating tube; 7 – scanning electromagnets; 8 – vacuum system; 9 – outlet unit; 10 – magnetic coil; 11 – electron beam; 12 – workpiece; 13 – shifted manipulator platen

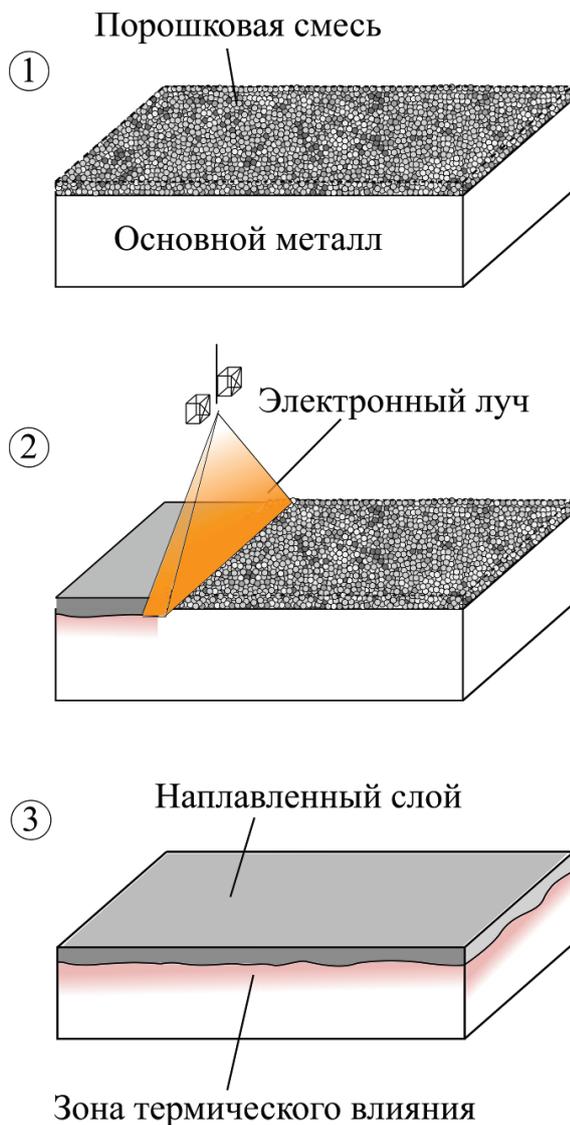


Рис. 2. Схема процесса наплавки электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу

Fig. 2. Scheme of cladding process by an electron beam, revealed in the air atmosphere

следующим образом: «ПН77» – сокращение от марки сплава ПН77Х15С3Р2. Далее указывали количество аморфного бора в весовых процентах.

Металлографические исследования полученных материалов были проведены с использованием оптического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer A1m*. С помощью прессы *Buehler SimpliMet 1000* подготовленные образцы запрессовывали в полимерную смолу. Шлифы были подготовлены по стандартной технологии, включающей в себя операции шлифования и полирования. Для выявления структуры наплавленных слоев использовали химический триви-

тель, состоящий из 10 мл HCl, 0,1 мл HNO₃ и 10 г FeCl₃. Для выявления деталей строения наплавленных слоев на больших увеличениях использовали растровый электронный микроскоп *Carl Zeiss EVO50 XVP* в режиме вторичных и обратно рассеянных электронов. Фазовый состав наплавленных слоев определяли с помощью рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA* с использованием Cu K $\alpha_{1,2}$ -излучения в диапазоне углов $2\theta = 30 \dots 80^\circ$. Дифракционные картины регистрировались в режиме сканирования с шагом $2\theta = 0,05^\circ$ при времени накопления 5 с на одну точку.

Оценку микротвердости поверхностно-упрочненных материалов производили в соответствии с ГОСТ 9450–76 по методу восстановленного отпечатка с применением полуавтоматического микротвердомера *Wolpert Group 402 MVD*. Измерения выполнялись в поперечном сечении образца в направлении от его поверхности к основному металлу (рис. 3, а). Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,981 Н.

В работе были использованы два метода определения износостойкости: в условиях гидроабразивного изнашивания (не регламентируется) и в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц (регламентируется ГОСТ 17367–71). Следует отметить, что были допущены некоторые отклонения от стандарта. Так, вместо технически чистого железа в качестве эталона использовали образцы из стали марки 12Х18Н9Т, выполнявшей функцию основного материала. Исследуемые образцы диаметром 2 мм помещали в специальный держатель и с усилием 4 Н прижимали к диску, вращающемуся со скоростью 100 об/мин, с закрепленной на нем электрокорундовой абразивной шкуркой зернистостью 8. Траектория перемещения образца описывала спираль Архимеда, что обеспечивало постоянный контакт истираемой поверхности образца с новыми абразивными частицами. Схема процесса испытаний представлена на рис. 3, б.

Для реализации испытаний в условиях гидроабразивного изнашивания была использована запатентованная установка, разработанная сотрудниками Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (патент РФ № 2509295). Исследуемые образцы размером 30×50×10 мм были ориентированы относительно водной

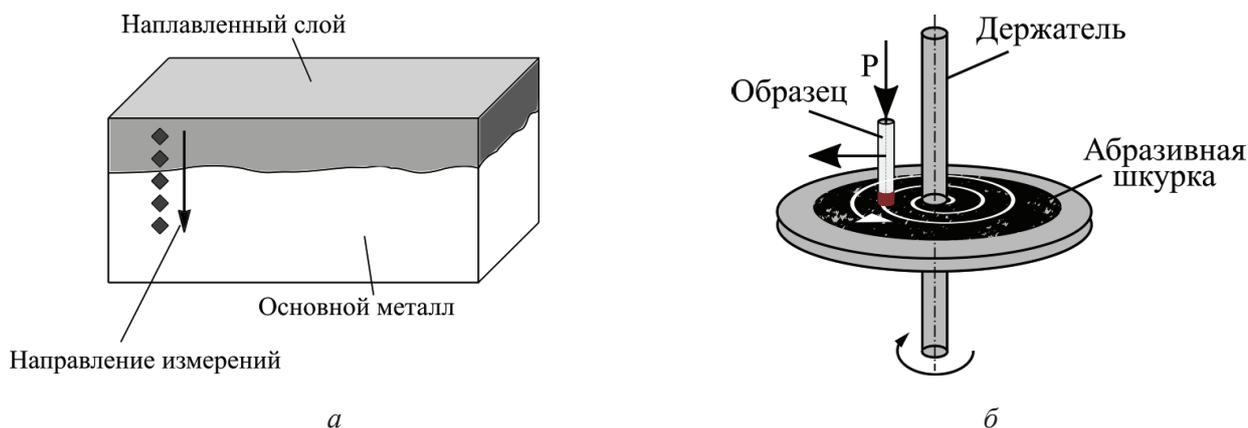


Рис. 3. Схема проведения испытаний на определение:

a – микротвердости наплавленных слоев; *б* – износостойкости в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц

Fig. 3. Scheme of test procedures:

a – microhardness of the cladded layers; *б* – wear-resistance in friction conditions against embedded abragant grain

струи, истекающей из гидроабразивной головки со скоростью 31,3 м/с и содержащей твердые абразивные частицы, под углами 20°, 45° и 90°. В качестве абразивного материала использовали электрокорунд зернистостью № 32. Время воздействия струи на образец составляло 30 мин. Подробно методика испытаний описана в работе [24]. Потерю массы после испытаний определяли с использованием аналитических весов ЛВ 210-А с точностью до 0,0001 мг.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлен общий вид поверхностно-упрочненных материалов, полученных при наплавке пучком электронов, выведенным в воздушную атмосферу, разных по соотношению составов. Толщина слоя, сформированного при наплавке промышленного самофлюсующегося сплава ПР-Н77Х15С3Р2 достигает 2 мм. Наплавленный слой образца «ПН77» однороден по всей

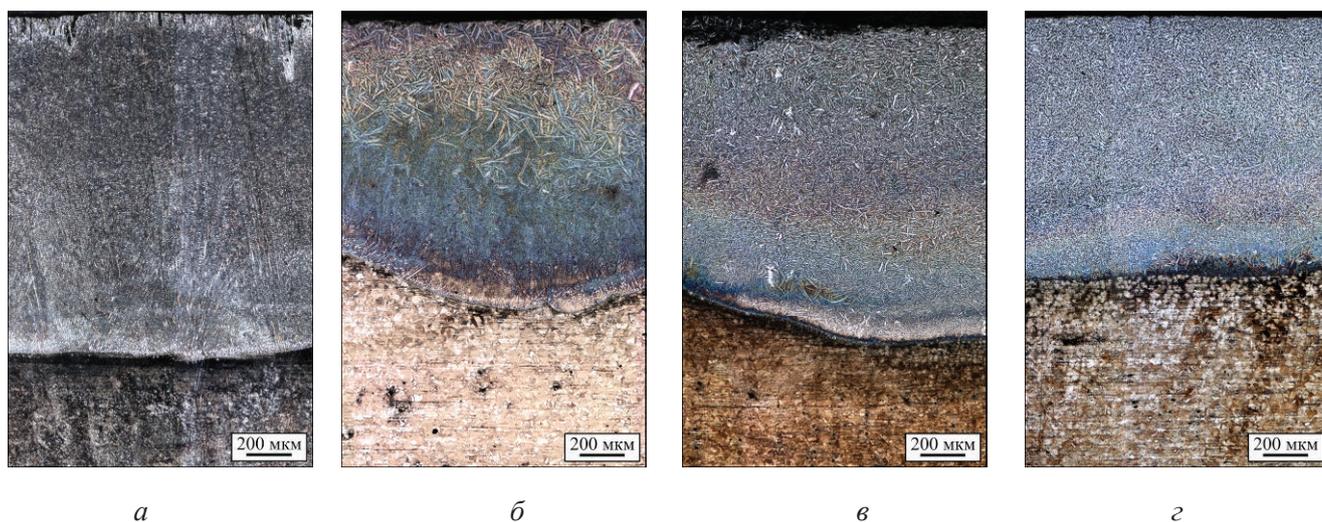


Рис. 4. Поперечное сечение поверхностно-упрочненных материалов, сформированных наплавкой электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу, порошковых композиций, содержащих самофлюсующийся никелевый сплав и бор в различных весовых соотношениях, на стали марки 12Х18Н9Т:

a – ПН77; *б* – ПН77 + 5 % В; *в* – ПН77 + 10 % В; *г* – ПН77 + 15 % В

Fig. 4. Cross-sectional view of surface hardened materials, obtained by revealed in the air electron beam cladding, of powder mixtures contain Ni-base self-fluxing alloy and boron in different weigh relations supported on stainless steel:

a – Ni-Cr-Si-B; *б* – Ni-Cr-Si-B + 5 % В; *в* – Ni-Cr-Si-B + 10 % В; *г* – Ni-Cr-Si-B+15 % В

глубине сечения и характеризуется доэвтектическим типом строения (рис. 4, *a*). Матричная фаза кристаллизуется в виде дендритов, вытянутых в направлении отвода тепла. Длина осей первого порядка дендритных кристаллов соизмерима с толщиной наплавленного слоя. Толщина слоев, полученных при наплавке смесей типа «Ni-Cr-Si-B-сплав + В», варьируется от 1,4 до 1,8 мм (рис. 4, *b-z*).

Существенное влияние на фазовый состав наплавленных слоев оказывает железо, поступившее в расплав из основного металла. Анализ рентгенограмм исследуемых в работе материалов показал, что основной структурной составляющей всех наплавленных слоев является γ -твердый раствор на основе никеля и железа (рис. 5).

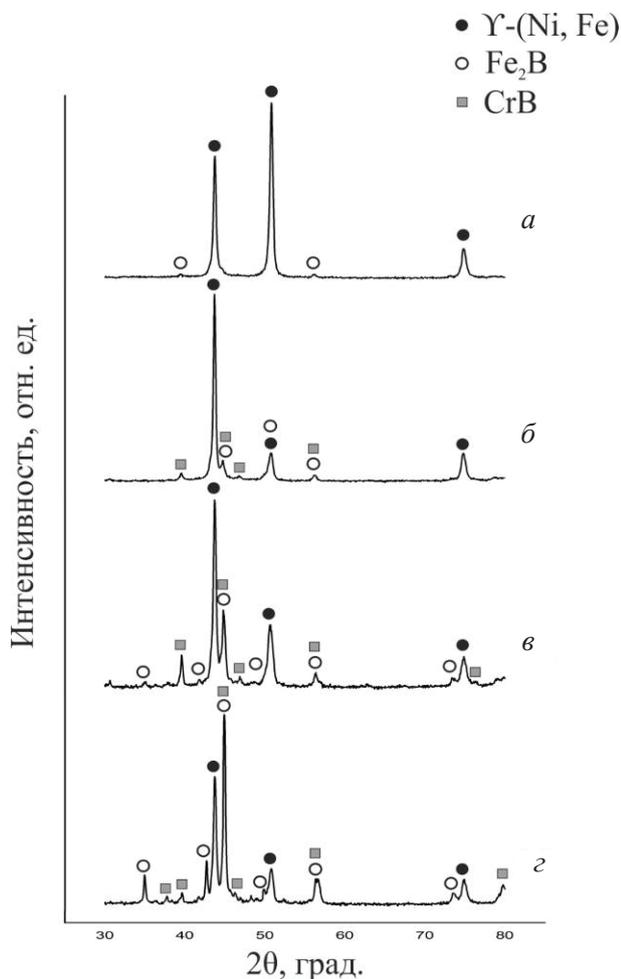


Рис. 5. Рентгенограммы, соответствующие образцам:

a – ПН77; *b* – ПН77 + 5 % В; *в* – ПН77 + 10 % В; *z* – ПН77 + 15 % В

Fig. 5. X-ray patterns, according to samples:

a – Ni-Cr-Si-B; *b* – Ni-Cr-Si-B + 5 % В; *в* – Ni-Cr-Si-B + 10 % В; *z* – Ni-Cr-Si-B + 15 % В

Для образца ПН77 зафиксировано несоответствие интегральной интенсивности рефлексов γ -(Ni-Fe) теоретическим данным кристаллографической базы ICDD (рис. 5, *a*). Данное явление может быть объяснено направленной кристаллизацией зерен твердого раствора. Кроме γ -(Ni-Fe) в структуре материала ПН77 зафиксировано наличие борида железа Fe_2B . Отсутствие упрочняющих соединений на основе хрома может быть объяснено его растворением в решетке твердого раствора и в замещении атомов железа в соединении Fe_2B .

Введение 5...15 вес. % аморфного бора в порошковую насыпку приводит к образованию боридов хрома и железа (CrB и Fe_2B соответственно) в структуре наплавленных слоев. Следует отметить увеличение интенсивностей рефлексов фазы Fe_2B на рентгенограмме, снятой с образца «ПН77 + 15 % В» (рис. 5, *z*).

Более детальные особенности строения наплавленных слоев отражены на рис. 6 и 7. На микрофотографии образца ПН77 + 5 % В в наплавленном слое выделены три характерные области. Область 1 характеризуется заэвтектическим типом строения и присутствием упрочняющих частиц. Методом микрорентгеноспектрального анализа было установлено, что выделившиеся соединения обогащены железом, хромом и бором. С учетом данных рентгенофазового анализа можно сделать вывод, что данные частицы являются боридами хрома, легированными железом (рис. 6, *в*, табл. 2). С продвижением к основному металлу происходит смена типа структуры на эвтектический (область 2, рис. 6, *a*). Более детальное изображение эвтектических колоний показано на рис. 6, *z-d*. С учетом данных рентгенофазового анализа наиболее вероятный фазовый состав эвтектики – γ -(Ni-Fe) + Fe_2B . При продвижении к границе с основным металлом размер и объемная доля дендритных кристаллов γ -(Ni-Fe) резко возрастает (область 3, рис. 6, *a*). Методом микрорентгеноспектрального анализа было подтверждено, что данная фаза содержит некоторое количество хрома, растворенного в ГЦК-решетке (см. спектр 2, табл. 2). Следует отметить, что оси первого порядка γ -(Ni-Fe) в данной области преимущественно вытянуты в направлении к основному металлу. Детали строения данной области объясняются высокими скоростями процессов теплоотведения и кри-

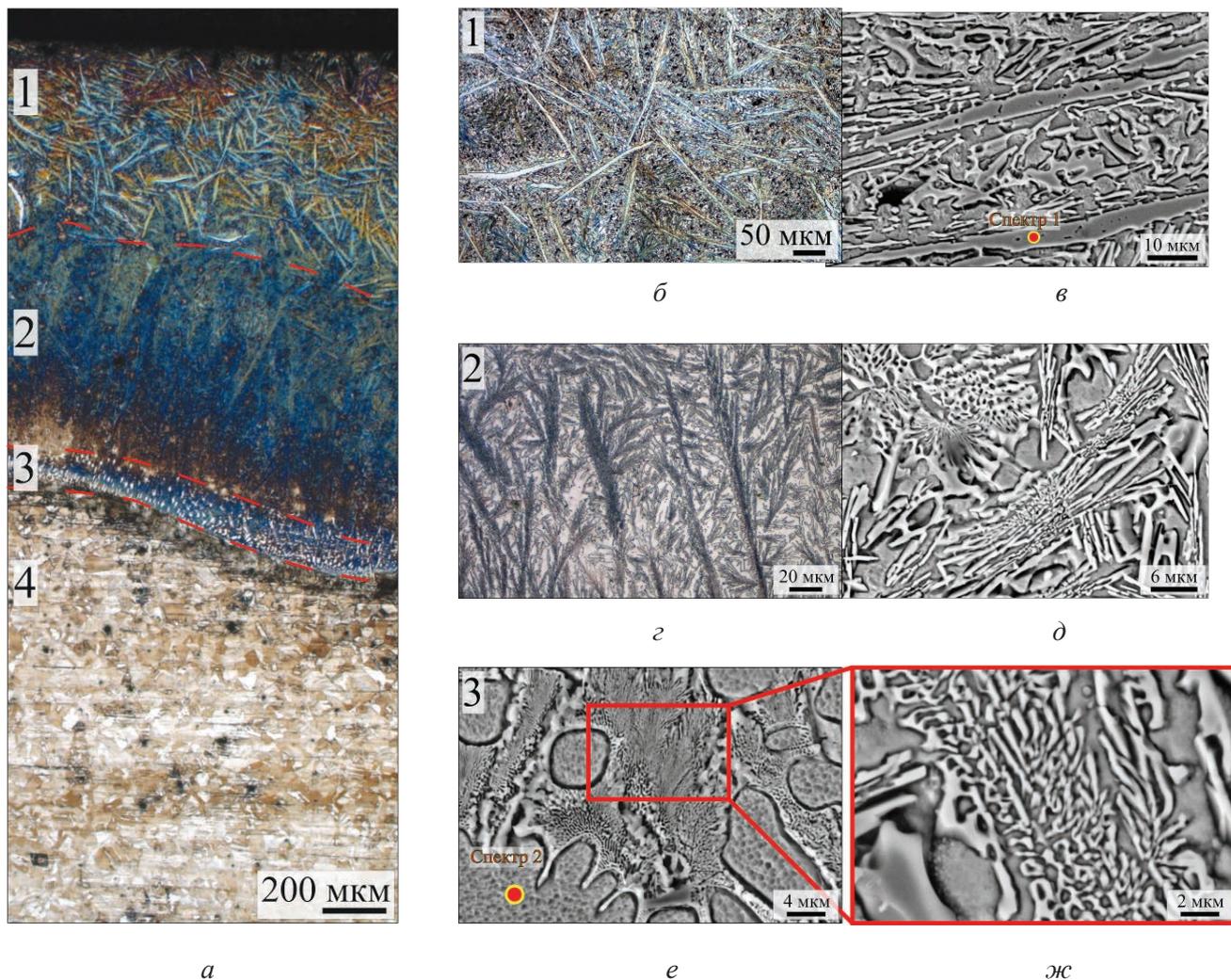


Рис. 6. Особенности строения наплавленного слоя, сформированного наплавкой Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с 5 вес. % бора:

a – структура поверхностно-упрочненного материала в поперечном сечении; *б, в* – упрочняющие соединения, выделившиеся в поверхностной части наплавленного слоя; *г, д* – детальное строение эвтектических колоний; *е, ж* – структура на границе сплавления

Fig. 6. Structure feature of cladded layer, produced by electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy combined with 5 wt. % of boron:

a – cross-sectional structure; *б, в* – hardface particles, precipitated in a surface part of clad layer; *г, д* – detail structure of eutectic colonies; *е, ж* – structure on a fusion boundary

Таблица 2

Table 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (вес. %)

The results of electron microprobe analysis (wt. %)

Область	Ni	Fe	Cr	B	Si	Вероятная фаза
Спектр 1	4,89	32,41	48,09	14,61	–	(Cr, Fe)B
Спектр 2	43,58	42,09	12,44	–	1,88	γ-(Ni-Fe-Cr)
Спектр 3	0,78	13,73	59,32	26,18	–	CrB ₂
Спектр 4	7,63	50,47	29,46	12,45	–	(Fe, Cr) ₂ B

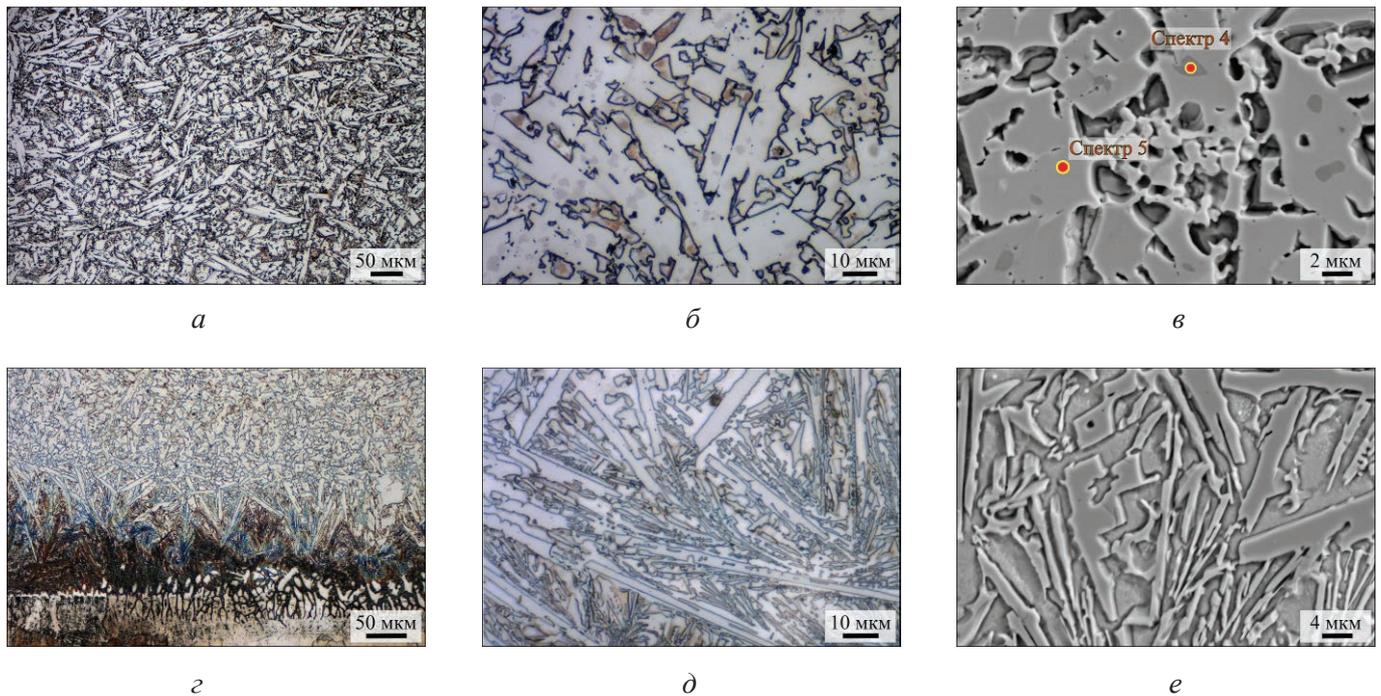


Рис. 7. Особенности строения наплавленного слоя, сформированного наплавкой Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с 15 вес. % бора:

a, б, в – плотный слой боридов железа; *г* – граница с основным металлом; *д, е* – детальное строение эвтектических колоний и боридов различной морфологии

Fig. 7. Structure features of clad layer, produced by electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy combined with 15 wt. % of boron:

a, б, в – dense layer of iron borides; *г* – base metal boundary; *д, е* – detail structure of eutectic colonies and borides with different morphology

сталлизации расплава на границе «наплавленный слой – основной металл».

При наплавке Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с 10 и 15 вес. % бора толщина области 1, выделенной на рис. 6, *a*, соответствует практически всей глубине наплавленного слоя (рис. 7, *г*). Детальные исследования поверхностных слоев образца ПН77 + 15 % В показали, что материал состоит из плотных скоплений боридных кристаллов, имеющих в поперечном сечении форму квадратов, ромбов и треугольников (рис. 7, *a, б*). Проанализировав их строение методом растровой электронной микроскопии, установили наличие областей, отличных по степени травимости (рис. 7, *в*). Методом микрорентгеноспектрального анализа было определено, что данные области характеризуются различным химическим составом (см. спектр 3, 4, табл. 2). Более темные области (спектр 3, рис. 7) представляют собой диборид хрома CrB_2 . Вокруг кристаллов диборида хрома происходит выделение легированного борида железа $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$. С продвиже-

нием к основному металлу морфология боридов изменяется на более вытянутую. Особенности строения боридных кристаллов и эвтектических колоний представлены на рис. 7, *д, е*.

Результаты дюрометрических исследований поверхностно упрочненных материалов, сформированных электронно-лучевой наплавкой саморасплавляющегося никелевого сплава в сочетании с бором, взятым в весовых соотношениях 5, 10 и 15 вес. %, представлены на рис. 8. На диаграммах распределения микротвердости четко различима граница «наплавленный слой – основной металл». Уровень микротвердости слоев в зоне термического влияния соответствует твердости основного материала (180 HV).

Из представленных диаграмм следует, что толщина наплавленных слоев находится в диапазоне от 1,7 до 2 мм. Наибольшим уровнем микротвердости (~ 800 HV) обладают слои, полученные наплавкой Ni-Cr-Si-B-сплава с добавлением 15 % аморфного бора (рис. 8, *г*). Микротвердость материала, сформированного

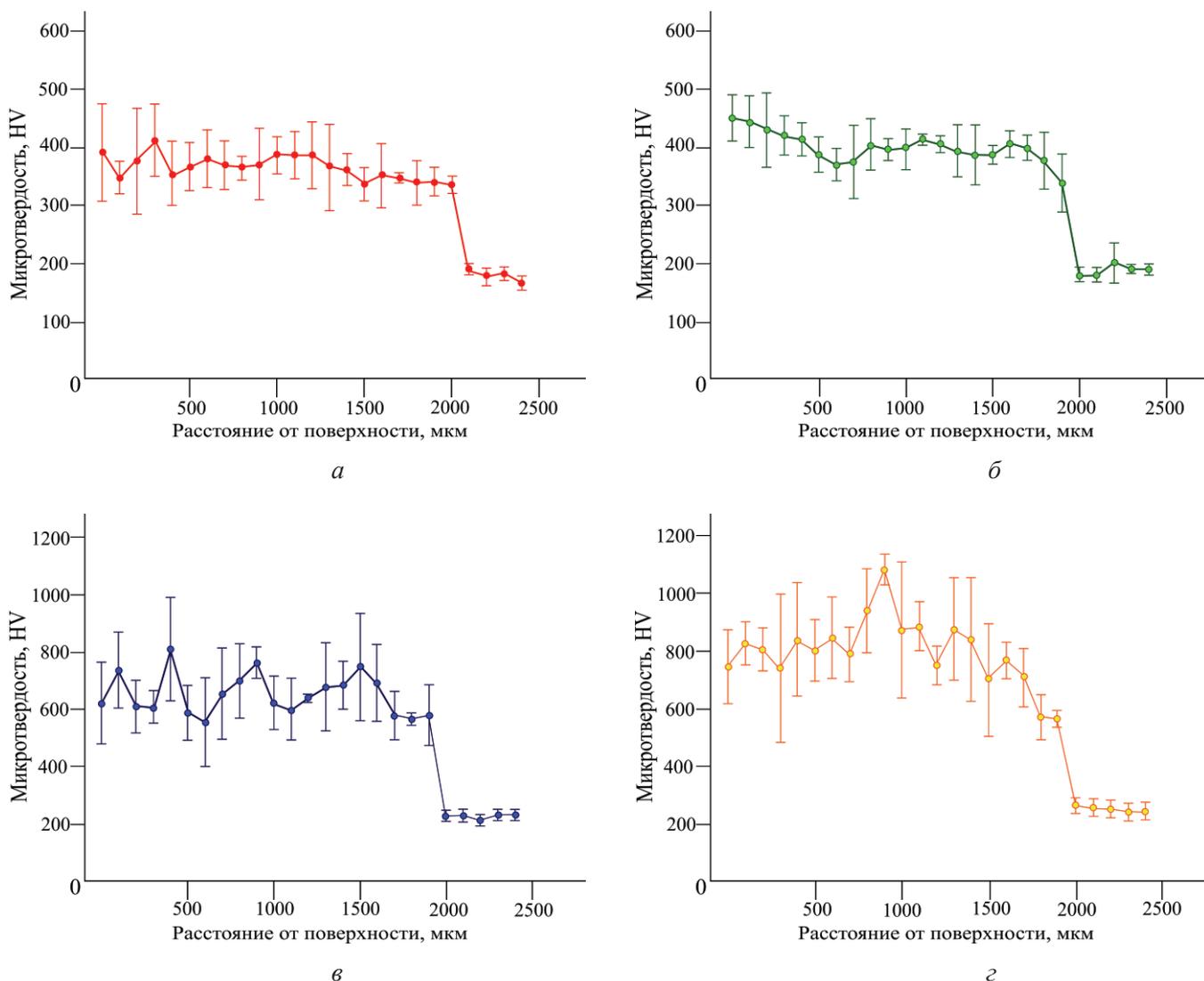


Рис. 8. Диаграмма микротвердости материала:

a – ПН77; *б* – ПН77 + 5 % В; *в* – ПН77 + 10 % В; *г* – ПН77 + 15 % В

Fig. 8. Material's microhardness diagram:

a – Ni-Cr-Si-B; *б* – Ni-Cr-Si-B+5 % В; *в* – Ni-Cr-Si-B+10 % В; *г* – Ni-Cr-Si-B+15 % В

наплавкой самофлюсующегося сплава без добавок, достигала 400 HV (рис. 8, *a*), легированного 5 вес. % В – 450 HV (рис. 8, *б*), 10 вес. % В – 700 HV (рис. 8, *в*). На диаграмме, соответствующей материалу «ПН77+ 5 % В», наблюдается плавное снижение микротвердости в поверхностной части наплавленного слоя (0...500 мкм). Это объясняется наличием первичных кристаллов (Cr, Fe)B, зафиксированных в данной области (область 1, рис. 6, *a*), объемная доля которых в данном диапазоне постепенно снижается.

По результатам испытаний на износостойкость в условиях воздействия закрепленных частиц абразива было установлено, что максимальным уровнем относительной износостойкости обладает материал, сформированный наплавкой

порошковой смеси самофлюсующегося никелевого сплава и 15 % аморфного бора (рис. 9). Стойкость данного материала практически в 2 раза превышает значение стойкости эталонного образца. Структура наплавленного слоя, сочетающая в себе высокопрочные бориды и эвтектическую матрицу, прочно их удерживающую, препятствует внедрению абразивных частиц. Уровень износостойкости образца «ПН77 + 10 % В» незначительно уступает материалу типа «ПН77 + 15 % В». Износостойкость образца, легированного 5 % аморфного бора, а также образца, полученного по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки самофлюсующегося никелевого сплава без легирования, практически не отличается от

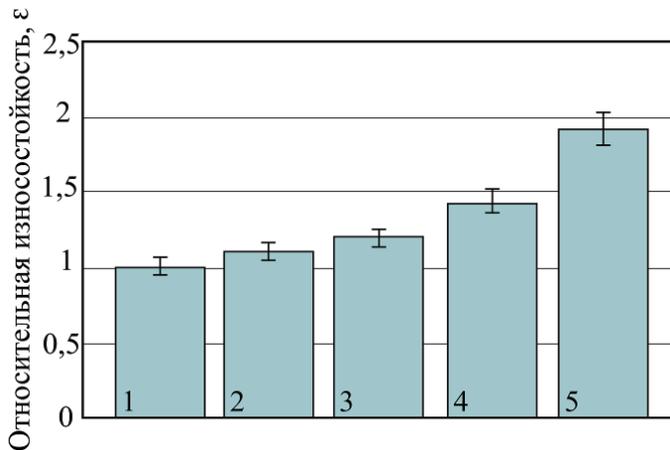


Рис. 9. Относительная износостойкость материалов в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц:

1 – эталон (сталь 12Х18Н9Т); 2 – «ПН77»; 3 – «ПН77 + 5 % В»; 4 – «ПН77 + 10 % В»; 5 – «ПН77 + 15 % В»

Fig. 9. Relative wear-resistance of materials exposed to fixed abrasive particles:

1 – reference material (stainless steel, working as a base metal); 2 – Ni-Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Si-B + 5 % B; 4 – Ni-Cr-Si-B + 10 % B; 5 – Ni-Cr-Si-B + 15 % B

износостойкости эталонного материала. Низкие показатели износостойкости материалов «ПН77» и «ПН77+5 % В» объясняются высокой объемной долей пластичной γ -Ni-Fe-фазы в наплавленном слое и недостаточной долей упрочняющих соединений.

На рис. 10 представлены результаты триботехнических испытаний исследуемых материалов в условиях гидроабразивного воздействия. Максимальное увеличение износостойкости (~ в 4 раза) зафиксировано для образцов с наплавленным слоем на основе порошковой смеси ПН77Х15СЗР2 и 15 вес. % бора при угле атаки 20°. При малых углах атаки (15°...30°) вследствие преобладания тангенциальной компоненты скорости удара основным процессом разрушения поверхностных слоев является тангенциальное смещение микрообъемов материала в направлении внедрения, т. е. микрорезание. При увеличении твердости поверхности введением в порошковую насыпку бора в количестве 15 вес. % происходит минимизация износа при скользящем ударе абразивной струи. В процессе трения абразивные частицы проскальзывают по изнашиваемой поверхности и значительная часть энергии затрачивается на отскок.

При увеличении угла атаки до 45° и 90° наблюдается существенное увеличение интен-

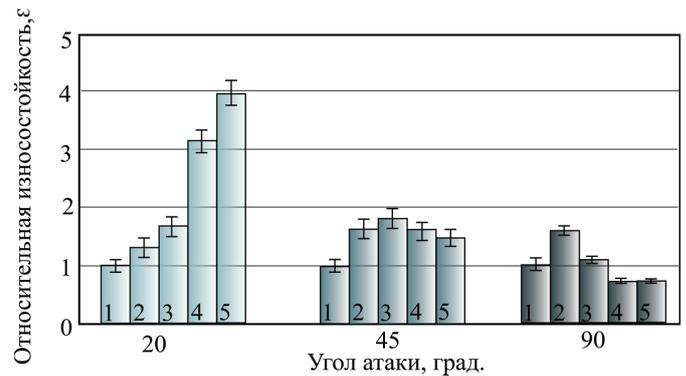


Рис. 10. Относительная износостойкость материалов в условиях гидроабразивного изнашивания:

1 – эталон (сталь 12Х18Н9Т); 2 – «ПН77-100 %»; 3 – «ПН77 + 5 % В»; 4 – «ПН77 + 10 % В»; 5 – «ПН77 + 15 % В»

Fig. 10. Relative wear-resistance of materials exposed to hydroabrasive wear:

1 – reference material (stainless steel, working as a base metal); 2 – Ni-Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Si-B + 5 % B; 4 – Ni-Cr-Si-B + 10 % B; 5 – Ni-Cr-Si-B + 15 % B

сивности изнашивания сформированных материалов. Износостойкость материалов типа «ПН77 + 10 % В» и «ПН77 + 15% В» уступает образцу «ПН77 + 5 % В». При угле атаки 90° наибольшей износостойкостью отличается материал, полученный наплавкой самофлюсующегося никелевого сплава без добавок («ПН77»), а материалы «ПН77 + 10 % В» и «ПН77 + 15% В» характеризуются большей интенсивностью изнашивания, чем эталонный материал.

Увеличение интенсивности изнашивания при фронтальном воздействии струи объясняется изменением механизма изнашивания – параллельно с процессами микрорезания происходит ударное воздействие гидроабразивного потока. Под действием ударов абразивных частиц в поверхностных слоях происходит зарождение и рост усталостных микротрещин [25]. Увеличение интенсивности изнашивания в этих условиях для материалов, легированных бором в количестве 10 и 15 вес. %, объясняется высокой объемной долей хрупких боридов. При продолжительном воздействии происходит выкрашивание отдельных крупных блоков материала. Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации разрабатываемого материала (узлы телеметрических систем, втулки, детали запорной арма-

туры нефтепроводов и т. п.) наиболее вероятно воздействие гидроабразивного потока в диапазоне углов малого размера.

Таким образом, по результатам двух типов испытаний в условиях абразивного воздействия наиболее стойким к выбранным условиям изнашивания является поверхностно упрочненный материал, сформированный наплавкой Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с 15 вес. % бора. Структура наплавленного слоя, сочетающая в себе высокопрочные бориды и эвтектическую матрицу, прочно их удерживающую, препятствует внедрению абразивных частиц.

Выводы

Установлена возможность формирования защитных слоев толщиной до 1,8 мм на заготовках из хромоникелевой аустенитной стали с использованием метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей на основе самофлюсующегося никелевого сплава в сочетании с аморфным бором, взятым в различных весовых соотношениях. Максимальный уровень микротвердости наплавленных слоев (1000 HV) характерен для материала, полученного наплавкой Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с 15 вес. % аморфного бора. Данный материал демонстрирует износостойкость в 2 и 4 раза выше по сравнению с хромоникелевой аустенитной сталью в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц и гидроабразивного изнашивания (при угле атаки 20°). Основным структурным фактором, обеспечивающим прирост твердости и износостойкости поверхностно-упрочненных материалов в выбранных условиях, является формирование упрочняющих соединений Fe₂B, (Cr, Fe)B. Детальные структурные исследования поверхностного слоя, сформированного наплавкой Ni-Cr-Si-B-сплава в сочетании с 15 вес. % аморфного бора, показали, что выделившиеся упрочняющие соединения характеризуются фазовой неоднородностью. Внутренняя часть двухфазных сложных по строению частиц представляет собой диборид хрома CrB₂, вокруг которого происходит выделение боридов железа (Fe, Cr)₂B.

Список литературы

1. Gardner L. Stability and design of stainless steel structures – review and outlook // *Thin-Walled Structures*. – 2019. – Vol. 141. – P. 208–216. – DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.019.

2. Восстановление деталей машин / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов. – М: Машиностроение, 2003. – 672 с. – ISBN 5-217-03188-3.

3. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – М: Мир, 2004. – 384 с. – ISBN 5-03-003572-9.

4. Kesavan D., Kamaraj M. The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 204, iss. 24. – P. 4034–4043. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.022.

5. Effect of the substrate dilution on the room and high temperature tribological behaviour of Ni-based coatings deposited by PTA on grey cast iron / F. Fernandes, T. Polcar, A. Loureiro, A. Cavaleiro // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 281. – P. 11–19. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.09.034.

6. Shevchenko O.I., Trekin G.E., Farber V.M. Distribution of chemical elements in structural components of a facing of a self-fluxing nickel alloy // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1997. – Vol. 39, iss. 6. – P. 233–235. – DOI: 10.1007/BF02467225.

7. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel / C. Sudha, P. Shankar, Subba R.V. Rao, R. Thirumurugesan, M. Vijayalakshmi, B. Raj // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202, iss. 10. – P. 2103–2112. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063.

8. Reinaldo P.R., D'Oliveira A.S.C.M. NiCrSiB coatings deposited by plasma transferred arc on different steel substrates // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2013. – Vol. 22, iss. 2. – P. 590–597. – DOI: 10.1007/s11665-012-0271-7.

9. Microstructural characterisation of NiWCrBSiC alloy coating produced by HVOF thermal spraying / L. Gil, M.H. Staia, R. Guevara, E.S. Puchi-Cabrera, D.B. Lewis // *Surface Engineering*. – 2006. – Vol. 22, iss. 4. – P. 304–313. – DOI: 10.1179/174329406X122900.

10. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Y. Role of the strengthening phases in abrasive wear resistance of laser-clad NiCrBSi coatings // *Journal of Friction and Wear*. – 2017. – Vol. 38, N 4. – P. 272–278. – DOI: 10.3103/S1068366617040080.

11. Microstructure, magnetic properties and empirical electron theory calculations of laser cladding FeNi-Cr/60% WC composite coatings with Mo additions / J. Yang, X. Miao, X. Wang, H. Chen, F. Yang // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2016. – Vol. 54. – P. 216–222. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.034.

12. Effect of WC addition on microstructures of laser melted Ni-based alloy powder / Y.M. Zhang, M. Hida, A. Sakakibara, Y. Takemoto // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 169–170. – P. 384–387. – DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00058-6.
13. Nurminen J., Näkki J., Vuoristo P. Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2009. – Vol. 27, iss. 2. – P. 472–478. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.10.008.
14. The study of properties of Ni–W₂C and Co–W₂C powders thermal sprayed deposits / A. Klimpel, L.A. Dobrzański, A. Lisiecki, D. Janicki // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 164–165. – P. 1068–1073. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.198.
15. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
16. Microstructure and phase formation in a rapidly solidified laser-deposited Ni–Cr–B–Si–C hardfacing alloy / I. Hemmati, V. Ocelík, K. Csach, J.Th.M. de Hosson // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2014. – Vol. 45, iss. 2. – P. 878–892. – DOI: 10.1007/s11661-013-2004-4.
17. Formation of a Cr₃C₂/Ni–Cr alloy layer by an electron beam cladding method and evaluation of the layer properties / J. Morimoto, N. Abe, F. Kuriyama, M. Tomie // *Vacuum*. – 2001. – Vol. 62, iss. 2–3. – P. 203–210. – DOI: 10.1016/S0042-207X(00)00439-5.
18. Laser surfacing of nickel-based composite wear-resisting coatings reinforced with tungsten / A.G. Grigoryants, A.Y. Stavertiy, K.O. Bazaleeva, T.Y. Yudina, N.A. Smirnova, R.S. Tretyakov, A.I. Misyurov // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31, iss. 1. – P. 52–57. – DOI: 10.1080/09507116.2016.1213039.
19. Голковский М.Г. Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. Технологические возможности метода. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 325 с. – ISBN 978-3-659-31094-2.
20. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum / M.G. Golkovski, I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kusanov, V.A. Bataev // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 578. – P. 310–317. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.103.
21. Euh K., Lee J., Lee S. Microstructural modification and property improvement of boride/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2001. – Vol. 32, N 10. – P. 2499–2508. – DOI: 10.1007/s11661-001-0039-4.
22. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings / B. Cai, Y.-F. Tan, L. He, H. Tan, L. Gao // *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. – 2013. – Vol. 23, iss. 6. – P. 1681–1688.
23. Structure and properties of functional self-fluxing nickel-containing coatings obtained by non-vacuum electron-beam cladding / T.A. Zimoglyadova, H. Saage, V.A. Pasichnik, A.S. Egorova, O. Matts // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2019. – Vol. 60, iss. 9–10. – P. 633–640. – DOI: 10.1007/s11041-019-00330-4.
24. Shtertser A.A., Gringerg B.E. Impact of a hydroabrasive jet on material: hydroabrasive wear // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2013. – Vol. 54, N 3. – P. 508–516. – DOI: 10.1134/S002189441303022X.
25. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 222 с. – ISBN 5-217-00836-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Structure Features and Wear Resistance of Layers, formed by Ni-based Self-fluxing Alloy combined with Boron by Electron Beam, revealed in the Air Atmosphere

Tatiana Zimoglyadova^{1, a, *}, Evdokia Bushueva^{1, b}, Alexandr Shtertser^{2, c}, Boris Grinberg^{2, d},
 Natalia Soboleva^{3, e}, Eva Kollmannsberger^{4, f}, Ivan Chakin^{5, g}, Denis Bibko^{5, h},
 Alexey Leonov^{5, i}, Daria Safarova^{1, j}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., 620049, Ekaterinburg, Russian Federation

⁴ University of Applied Sciences Landshut, 1 Am Lurzenhof, Landshut, 84036, Germany

⁵ Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 11 Acad. Lavrentieva Pr., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-1113-9820>, zimoglyadovatatiana@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7608-734X>, dusias@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4973-0437>, asterzer@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-0160-1903>, b_grinberg@mail.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>, natashasoboleva@list.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0001-9489-4970>, s-ekollm@haw-landshut.de,

^g <https://orcid.org/0000-0003-0529-2017>, chak_in2003@bk.ru, ^h <https://orcid.org/0000-0002-3941-7327>, denbibko@mail.ru,

ⁱ <https://orcid.org/0000-0001-6692-3121>, Alexeyleonov2009@yandex.ru, ^j <https://orcid.org/0000-0002-2811-8292>, safarova10ab@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16 March 2020

Revised: 14 April 2020

Accepted: 02 May 2020

Available online: 15 June 2020

Keywords:

Non-vacuum electron beam cladding

Ni-Cr-Si-B-alloy

Structure

Hardness

Wear-resistance

Stainless steel

Funding

The reported study was funded by RFBR and government of the Novosibirsk region according to the research project No. 19-43-543011.

Acknowledgements

The studies were performed using the equipment of the Common Use Center "Structure, mechanical and physical properties of materials" NSTU.

ABSTRACT

Introduction. The formation of protective layers on working surfaces of machine parts comprised of chromium-nickel austenitic steels is an effective way to increase its reliability and durability. Ni-base self-fluxing alloys are widely used in order to create wear resistant coatings. The possibility of increasing the set of properties of Ni-Cr-Si-B alloys by adding reinforcing compounds to its matrix or by synthesizing reinforcing phases directly in the process of forming a protective layer is a significant interest of domestic and foreign scientists. The literature does not provide the information on the formation of protective layers on the surface of austenitic steels using cladding by relativistic electron beams of a Ni-Cr-Si-B alloy in combination with hardening additives. **Aim** of the current work is to increase the tribotechnical properties of the surface layers of steel workpieces via air-revealed electron beam cladding of a Ni-Cr-Si-B alloy in combination with amorphous boron taken in different weight ratios. The proportion of amorphous boron in the powder mixture is 5, 10, and 15 wt. % respectively. The structural features of the cladded layers are investigated by using the following research methods: optical metallography (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and electron microprobe analysis (EMPA). The properties of the surface hardened materials are determined by microhardness investigations and wear resistance during friction against fixed abrasive particles and under conditions of hydroabrasive treatment. **Results and discussion.** The material produced during cladding of a Ni-Cr-Si-B alloy in combination with 15 wt. % boron is characterized by the maximum microhardness (1000 HV) and wear resistance under various wear conditions. The main structural factor providing an effective increase in the operational characteristics is the formation Fe₂B, (Cr, Fe)B borides. It is shown that during Ni-Cr-Si-B alloy +15 wt. % boron cladding precipitation compounds are characterized by phase heterogeneity. The inner part of the two-phase complex particles is Cr₂B around which (Fe, Cr)₂B is released.

For citation: Zimoglyadova T.A., Bushueva E.G., Shtertser A.A., Grinberg B.E., Soboleva N.N., Kollmannsberger E., Chakin I.K., Bibko D.S., Leonov A.V., Safarova D.E. Structure features and wear resistance of layers, formed by Ni-based self-fluxing alloy combined with boron by electron beam, revealed in the air atmosphere. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 89–103. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-89-103. (In Russian).

* Corresponding author

Zimoglyadova Tatiana A., Assistant

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: +7-983-322-02-45, e-mail: zimoglyadovatatiana@gmail.com

References

1. Gardner L. Stability and design of stainless steel structures – review and outlook. *Thin Walled Structures*, 2019, vol. 141, pp. 208–216. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.019.
2. Panteleenko F.I., Lyalyakin V.P., Ivanov V.P., Konstantinov V.M. *Vosstanovlenie detalei mashin* [Recovery of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 672 p. ISBN 5-217-03188-3.
3. Tushinskii L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovaniya materialov: struktura, svoystva i protsessy naneseniya neorganicheskikh pokrytii* [Methods of materials investigation: structure, properties and processes of forming inorganic coatings]. Moscow, Mir Publ., 2004. 384 p. ISBN 5-03-003572-9.
4. Kesavan D., Kamaraj M. The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating. *Surface and coatings technology*, 2010, vol. 204, iss. 24, pp. 4034–4043. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.05.022.
5. Fernandes F., Polcar T., Loureiro A., Cavaleiro A. Effect of the substrate dilution on the room and high temperature tribological behaviour of Ni-based coatings deposited by PTA on grey cast iron. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 281, pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.09.034.
6. Shevchenko O.I., Trekin G.E., Farber V.M. Distribution of chemical elements in structural components of a facing of a self-fluxing nickel alloy. *Metal Science and Heat Treatment*, 1997, vol. 39, iss. 6, pp. 233–235. DOI: 10.1007/BF02467225.
7. Sudha C., Shankar P., Subba Rao R.V., Thirumurugesan R., Vijayalakshmi M., Raj B. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, iss. 10, pp. 2103–2112. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063.
8. Reinaldo P.R., D'Oliveira A.S.C.M. NiCrSiB coatings deposited by plasma transferred arc on different steel substrates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, vol. 22, iss. 2, pp. 590–597. DOI: 10.1007/s11665-012-0271-7.
9. Gil L., Staia M.H., Guevara R., Puchi-Cabrera E.S., Lewis D.B. Microstructural characterisation of NiWCrB-SiC alloy coating produced by HVOF thermal spraying. *Surface Engineering*, 2006, vol. 22, iss. 4, pp. 304–313. DOI: 10.1179/174329406X122900.
10. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Y. Role of the strengthening phases in abrasive wear resistance of laser-clad NiCrBSi coatings. *Journal of Friction and Wear*, 2017, vol. 38, no. 4, pp. 272–278. DOI: 10.3103/S1068366617040080.
11. Yang J., Miao X., Wang X., Chen H., Yang F. Microstructure, magnetic properties and empirical electron theory calculations of laser cladding FeNiCr/60% WC composite coatings with Mo additions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 54, pp. 216–222. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.034.
12. Zhang Y.M., Hida M., Sakakibara A., Takemoto Y. Effect of WC addition on microstructures of laser melted Ni-based alloy powder. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 169–170, pp. 384–387. DOI: 10.1016/S0257-8972(03)00058-6.
13. Nurminen J., Näkki J., Vuoristo P. Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, vol. 27, iss. 2, pp. 472–478. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.10.008.
14. Klimpel A., Dobrzański L.A., Lisiecki A., Janicki D. The study of properties of Ni-W₂C and Co-W₂C powders thermal sprayed deposits. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 164–165, pp. 1068–1073. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.198.
15. Samsonov G.V., Serebrjakova T.I., Neronov V.A. *Boridy* [Borides]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 376 p.
16. Hemmati I., Ocelík V., Csach K., Hosson J.Th.M. de. Microstructure and phase formation in a rapidly solidified laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 45, iss. 2, pp. 878–892. DOI: 10.1007/s11661-013-2004-4.
17. Morimoto J., Abe N., Kuriyama F., Tomie M. Formation of a Cr₃C₂/Ni-Cr alloy layer by an electron beam cladding method and evaluation of the layer properties. *Vacuum*, 2001, vol. 62, iss. 2–3, pp. 203–210. DOI: 10.1016/S0042-207X(00)00439-5.
18. Grigoryants A.G., Stavertiy A.Y., Bazaleeva K.O., Yudina T.Y., Smirnova N.A., Tretyakov R.S., Misyurov A.I. Laser surfacing of nickel-based composite war-resisting coatings reinforced with tungsten. *Welding International*, 2017, vol. 31, iss. 1, pp. 52–57. DOI: 10.1080/09507116.2016.1213039.
19. Golkovskii M.G. *Zakalka i naplavka relyativistskim elektronnyim puchkom vne vakuuma. Tekhnologicheskie vozmozhnosti metoda* [Quenching and cladding by a relativistic electron beam outside a vacuum. Technological capabilities of the method]. Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 325 p. ISBN 978-3-659-31094-2.

20. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 578, pp. 310–317. DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.103.

21. Euh K., Lee J., Lee S. Microstructural modification and property improvement of boride/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, vol. 32, no. 10, pp. 2499–2508. DOI: 10.1007/s11661-001-0039-4.

22. Cai B., Tan Y.-F., He L., Tan H., Gao L. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, vol. 23, iss. 6, pp. 1681–1688.

23. Zimoglyadova T.A., Saage H., Pasichnik V.A., Egorova A.S., Matts O. Structure and properties of functional self-fluxing nickel-containing coatings obtained by non-vacuum electron-beam cladding. *Metal Science and Heat Treatment*, 2019, vol. 60, iss. 9–10, pp. 633–640. DOI: 10.1007/s11041-019-00330-4.

24. Shtertser A.A., Gringerg B.E. Impact of a hydroabrasive jet on material: hydroabrasive wear. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, vol. 54, no. 3, pp. 508–516. DOI: 10.1134/S002189441303022X.

25. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 222 p. ISBN 5-217-00836-9.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).