

Влияние добавки карбида бора на структуру и твердость никелевого покрытия

© 2021

Старикова Ульяна Сергеевна^{*1,4}, младший научный сотрудник
Соболева Наталья Николаевна^{1,2,5}, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Макаров Алексей Викторович^{1,6}, член-корреспондент РАН, доктор технических наук,
заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств
Харанжевский Евгений Викторович^{3,7}, доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

²Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

³Удмуртский государственный университет, Ижевск (Россия)

*E-mail: ulstar97@mail.ru

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6960-0619>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1525-2169>

Аннотация: Лазерная наплавка все чаще применяется в различных отраслях машиностроения, так как по сравнению с традиционными методами создания покрытий она обладает такими преимуществами, как высокие скорости нагрева и охлаждения, минимальное перемешивание основного и наплавляемого материала. Нанесенные лазером покрытия обычно характеризуются мелкозернистой структурой и минимальной зоной термического влияния. Применение покрытий, сформированных из порошков системы Ni–Cr–B–Si, также очень распространено в промышленности, так как эти покрытия обладают хорошей стойкостью к износу, коррозии, эрозии и т. д. К указанной группе порошков для улучшения свойств наплавляемого покрытия добавляются различные упрочняющие частицы. В качестве таких частиц могут выступать карбиды бора, обладающие высокой твердостью и термодинамической устойчивостью, а также высокими показателями сопротивления изнашиванию. В работе исследовано влияние добавки 7 масс. % карбида бора В₄С на структуру и твердость NiCrBSi покрытия, сформированного лазерной наплавкой из порошка марки ПГ-СР2 на поверхности стали 30ХРА. В работе проведены микроскопические исследования структуры NiCrBSi и NiCrBSi–В₄С покрытий с использованием растрового электронного микроскопа, приведены результаты рентгеноспектрального микроанализа. Показано, что структура обоих покрытий в наплавленном состоянии характеризуется однородностью и мелкозернистостью. Выявлено, что образцы с NiCrBSi и NiCrBSi–В₄С покрытиями имеют узкую переходную зону от покрытия к основному металлу. Приведены результаты измерения микротвердости покрытий, свидетельствующие о снижении микротвердости сформированных лазером никелевых покрытий при добавке карбида бора.

Ключевые слова: лазерная наплавка; карбид бора В₄С; порошок ПГ-СР2; NiCrBSi покрытие; NiCrBSi–В₄С покрытие; микротвердость; растровая электронная микроскопия.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственных заданий ИФМ УрО РАН по темам № 121102900049-1 и № АААА-А18-118020190116-6 и ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

Для цитирования: Старикова У.С., Соболева Н.Н., Макаров А.В., Харанжевский Е.В. Влияние добавки карбида бора на структуру и твердость никелевого покрытия // Frontier Materials & Technologies. 2021. № 4. С. 89–97. DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-89-97.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная наплавка – один из популярных и востребованных способов нанесения покрытий на сегодняшний день. Лазерная наплавка применяется в аэрокосмической, автомобильной, энергетической, горнодобывающей, металлообрабатывающей и других отраслях промышленности, где используемые машины и механизмы подвергаются воздействию агрессивных сред и поверхностному износу. В связи с высокой себестоимостью процесса наиболее целесообразно использовать

лазерную наплавку для ремонта дорогостоящих изделий, при восстановлении сравнительно небольших дефектных участков.

Лазерная наплавка обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами. Так, она характеризуется высокими скоростями нагрева и охлаждения, минимальным перемешиванием основного и наплавляемого материала. Это позволяет формировать покрытия с минимальной зоной термического влияния и прочной металлургической связью между наплавленным слоем и основой [1; 2]. При данном методе нанесения

покрытий формируются равноосные мелкокристаллические структуры наплавленного металла [1].

NiCrBSi покрытия, сформированные лазерной наплавкой, могут быть применены для предотвращения износа, коррозии, эрозии и окисления поверхности деталей при высоких температурах [3–5]. В литературе отмечается положительное влияние бора в составе NiCrBSi покрытий в связи с формированием боридов в структуре покрытий, в результате чего повышается твердость покрытий, а также их стойкость к окислению и коррозии при повышенных температурах [6; 7].

При формировании покрытий для улучшения эксплуатационных характеристик к хромоникелевым порошкам могут быть добавлены различные упрочняющие частицы, например карбиды WC [8], Cr₃C₂ [9], TiC [10], SiC [11], оксиды Al₂O₃ [12] и др. Карбиды бора В₄С могут быть добавлены в виде упрочняющих частиц в состав порошков при наплавке, так как они обладают рядом положительных свойств: высокой твердостью, термодинамической устойчивостью, высокими показателями износостойкости и др. [13]. Боросодержащие покрытия применяются для упрочнения деталей машин, эксплуатирующихся в условиях интенсивного абразивного изнашивания [14].

В литературе имеются сведения о добавлении карбидов бора В₄С к NiCrBSi порошкам при формировании покрытий лазерным излучением. Например, в работе [15] на сталь марки 12Х18Н10Т были наплавлены NiCrBSi–В₄С (5 и 12 об. %) покрытия методом селективного лазерного плавления. В структуре покрытий отмечается образование карбидов и боридов хрома Cr₇C₃ и CrB. Средняя величина микротвердости NiCrBSi покрытия достигает значения 485 HV 0,3, в NiCrBSi покрытиях с 5 % В₄С она снижается до 437 HV 0,3, а при добавке 12 % В₄С повышается и достигает значения 519 HV 0,3.

В работах [16–18] имеются сведения о влиянии добавки В₄С (2, 5 и 10 масс. %) на структуру и твердость хромоникелевого покрытия, нанесенного на основу Ti–6Al–4V лазерной наплавкой. Отмечается, что при добавлении 2 % карбида бора В₄С значение микротвердости достигает 1200–1400 HV, в то время как значение микротвердости в зоне основного металла достигает 330–340 HV [16]. При добавлении 5 % В₄С значение микротвердости составляет 1300 HV [17]. В NiCrBSi–В₄С покрытиях происходит формирование упрочняющих фаз CrB, TiB₂, TiC, что связано с нанесением покрытия на титановую основу [16; 18].

Благодаря лазерной наплавке появляется возможность использовать недорогие и недефицитные марки сталей и сплавов, при этом создавая износостойкие слои на поверхности изделий [19]. Однако материал подложки влияет на свойства формируемого на ней покрытия. Ранее были упомянуты работы, где в качестве материала основы применялись нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т [15] и титановый сплав Ti–6Al–4V [16–18]. В данной работе материалом основы выступает сталь 30ХРА. Такая сталь может быть применена для изготовления осей, рычагов, болтов, гаек и др.

Цель работы – исследование влияния добавки 7 масс. % В₄С на структуру и твердость NiCrBSi покрытия, сформированного лазерным излучением на поверхности стали 30ХРА.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала, на котором проводилась лазерная наплавка, выбрана сталь 30ХРА. Для проведения эксперимента были подготовлены образцы толщиной 3 мм.

В качестве материала покрытия был использован самофлюсующийся порошок системы NiCrBSi марки ПГ-CP2 (химический состав порошка: Cr – 14,8 масс. %, В – 2,1 масс. %, Si – 2,9 масс. %, С – 0,48 масс. %, Fe – 2,6 масс. %, Ni – остальное), а также порошок карбида бора В₄С. Размер порошка ПГ-CP2 составлял 40–160 мкм, а порошка В₄С – до 40 мкм. На рис. 1 показаны микрофотографии порошков ПГ-CP2 и В₄С, полученные с использованием растровой электронной микроскопии.

Из порошка ПГ-CP2 и смеси порошков ПГ-CP2 и 7 % В₄С приготавливалась суспензия, содержащая 1%-ный спиртовой раствор камфоры. Суспензия наносилась на поверхность стальной основы, лазерная обработка проводилась после высыхания связующего. Толщина слоя до оплавления составляла 200 мкм.

Лазерная наплавка была проведена при напряжении на лампах накачки 320 В, энергии одного импульса 6 Дж, частоте импульсов 15 Гц, длительности импульса 15 мс, диаметре луча на поверхности образца 1 мм. Расстояние между дорожками составляло 0,8 мм.

Микроструктура покрытий и распределение элементов по поперечному сечению образцов с покрытиями были изучены с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN VEGA II XMU с вольфрамовым катодом, оборудованного энергодисперсионным (INCA Energy 450 XT) микроанализатором, позволяющим проводить рентгеноспектральный микроанализ.

Микротвердость по методу восстановленного отпечатка была определена на микротвердомере Shimadzu HMV-G21DT согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» при нагрузке 0,245 Н, скорости нагружения пирамидкой Виккерса 40 мкм/с и выдержке под нагрузкой 15 с как среднее арифметическое из 10 измерений. Погрешность измерения микротвердости оценивали по величине среднеквадратичного отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 показаны электронные изображения микроструктуры NiCrBSi и NiCrBSi–В₄С покрытий, сформированных лазерной наплавкой. Толщина NiCrBSi покрытия составляет 140–190 мкм, а толщина NiCrBSi–В₄С покрытия – 120–150 мкм.

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты количественного рентгеноспектрального микроанализа NiCrBSi и NiCrBSi–В₄С покрытий соответственно. В никелевом покрытии (рис. 3) содержание Ni составляет примерно от 30 до 60 масс. %, Cr – от 7 до 12 масс. %, В – до 7 масс. %, Si – от 2 до 9 масс. %, С – до 5 масс. %, Fe – от 20 до 60 масс. %. В никелевом покрытии с добавлением карбида бора NiCrBSi–В₄С (рис. 4) содержание Ni составляет примерно от 20 до 60 масс. %, Cr – от 5 до 13 масс. %, В – до 4,5 масс. %, Si – от 2 до 4 масс. %, С – до 1,2 масс. %, Fe – от 15 до 70 масс. %.

На рис. 3 и 4 видно резкое снижение количества Ni в поперечном сечении образцов с NiCrBSi и NiCrBSi–

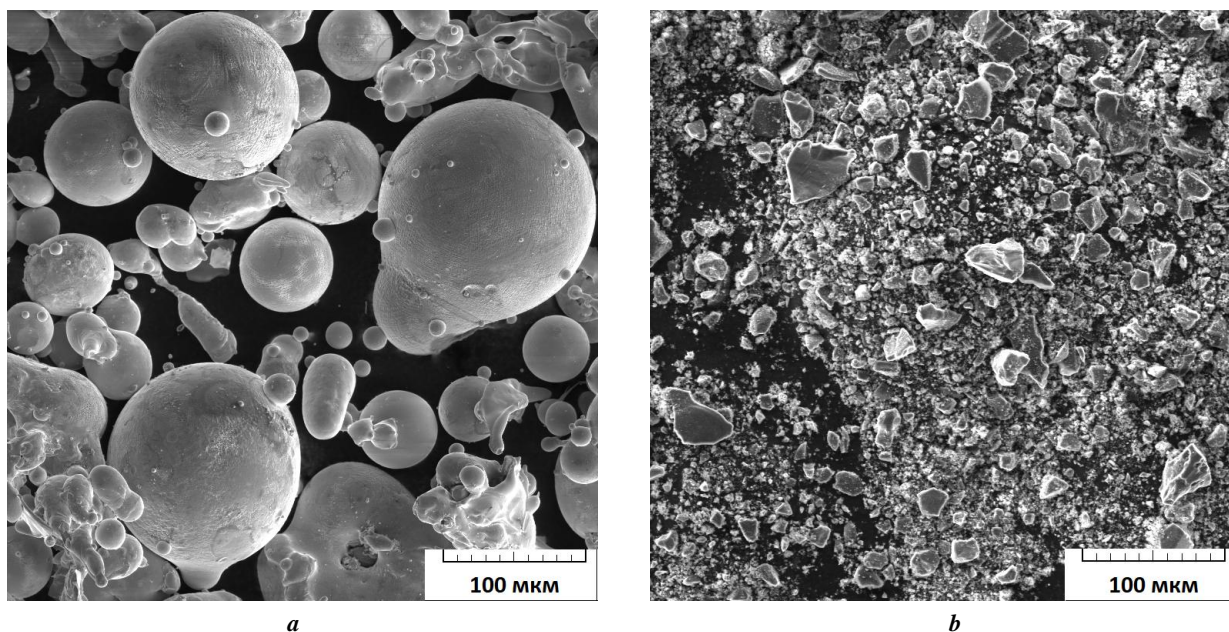


Рис. 1. Микрофотографии порошков ПГ-СР2 (а) и B_4C (б)
Fig. 1. Microphotographs of the PG-SR2 (a) and B_4C (b) powders

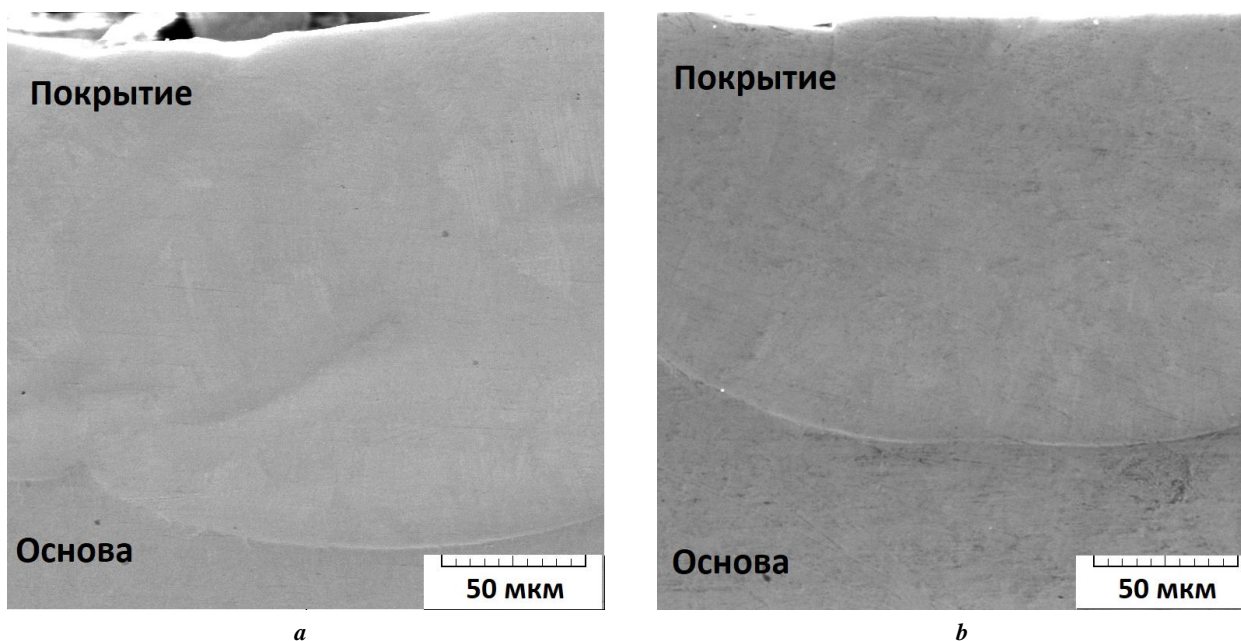


Рис. 2. Поперечное сечение покрытий: а – NiCrBSi; б – NiCrBSi- B_4C
Fig. 2. Cross-sectional views of coatings: а – NiCrBSi; б – NiCrBSi- B_4C

B_4C покрытиями, наплавленными лазером, на глубине примерно 140 мкм и 150 мкм от поверхности соответственно, и повышение содержания Fe.

На рис. 5 показана микроструктура покрытий NiCrBSi и NiCrBSi- B_4C , полученная растровой электронной микроскопией.

Среднее значение микротвердости NiCrBSi покрытия, сформированного лазерной наплавкой, составляет 620 HV 0,025 (таблица 1). При добавлении 7 масс. % порошка B_4C среднее значение микротвердости сформированного лазером покрытия снижается до 530 HV 0,025.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На микрофотографиях (рис. 2) видно, что покрытия однородные, характеризуются отсутствием макропор и включений, в том числе в переходной зоне.

Количественный рентгеноспектральный микроанализ показал, что исследуемые покрытия по всей толщине характеризуются достаточно равномерным распределением элементов в структуре покрытий, что следует из рис. 3 и рис. 4. При этом следует отметить, что содержание Fe в покрытии с карбидом бора больше (в среднем по поперечному сечению покрытия 51 масс. %), чем

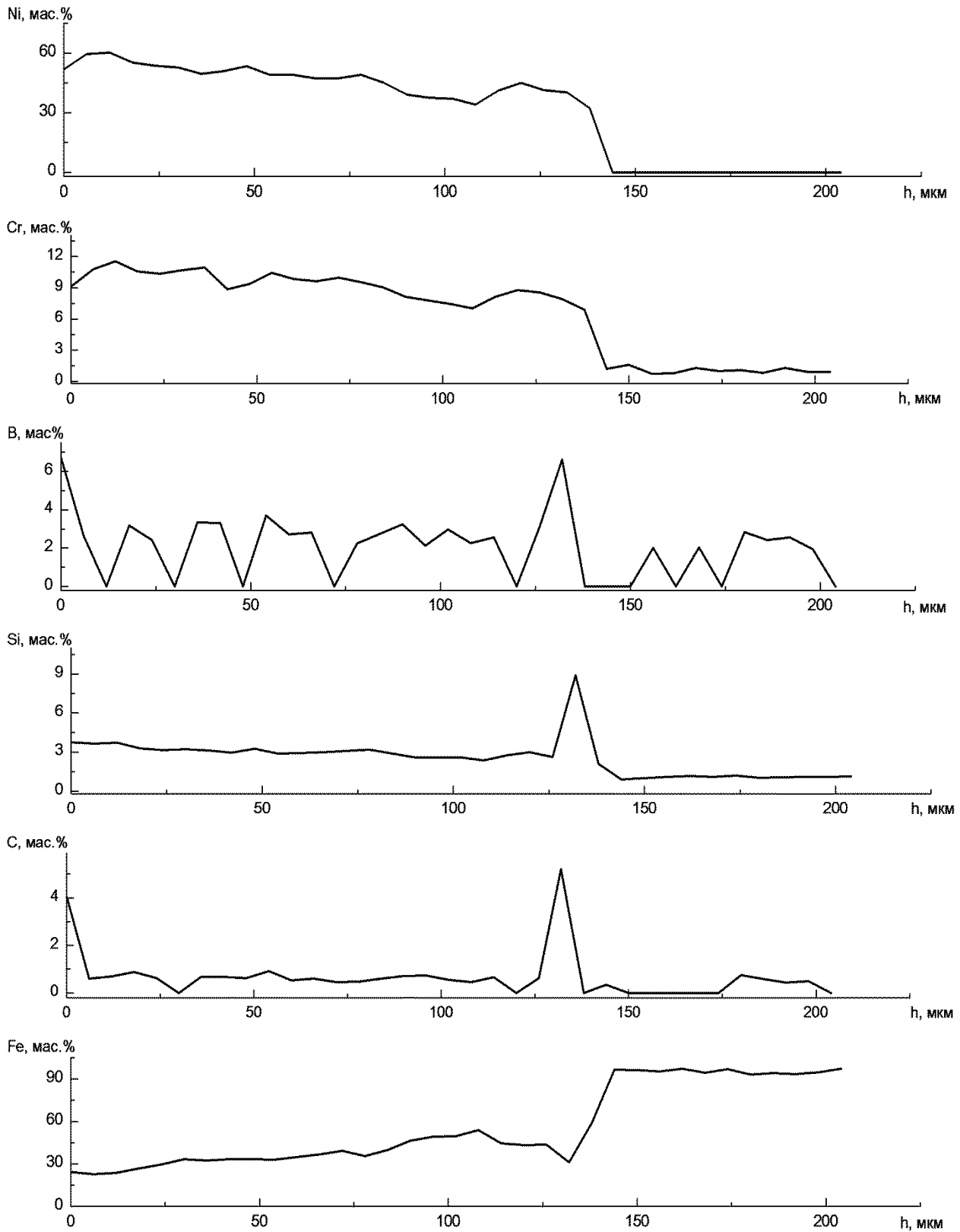


Рис. 3. Распределение элементов в поперечном сечении образцов с NiCrBSi покрытием в наплавленном состоянии
Fig. 3. Elements distribution in the cross section of samples with the NiCrBSi clad coating

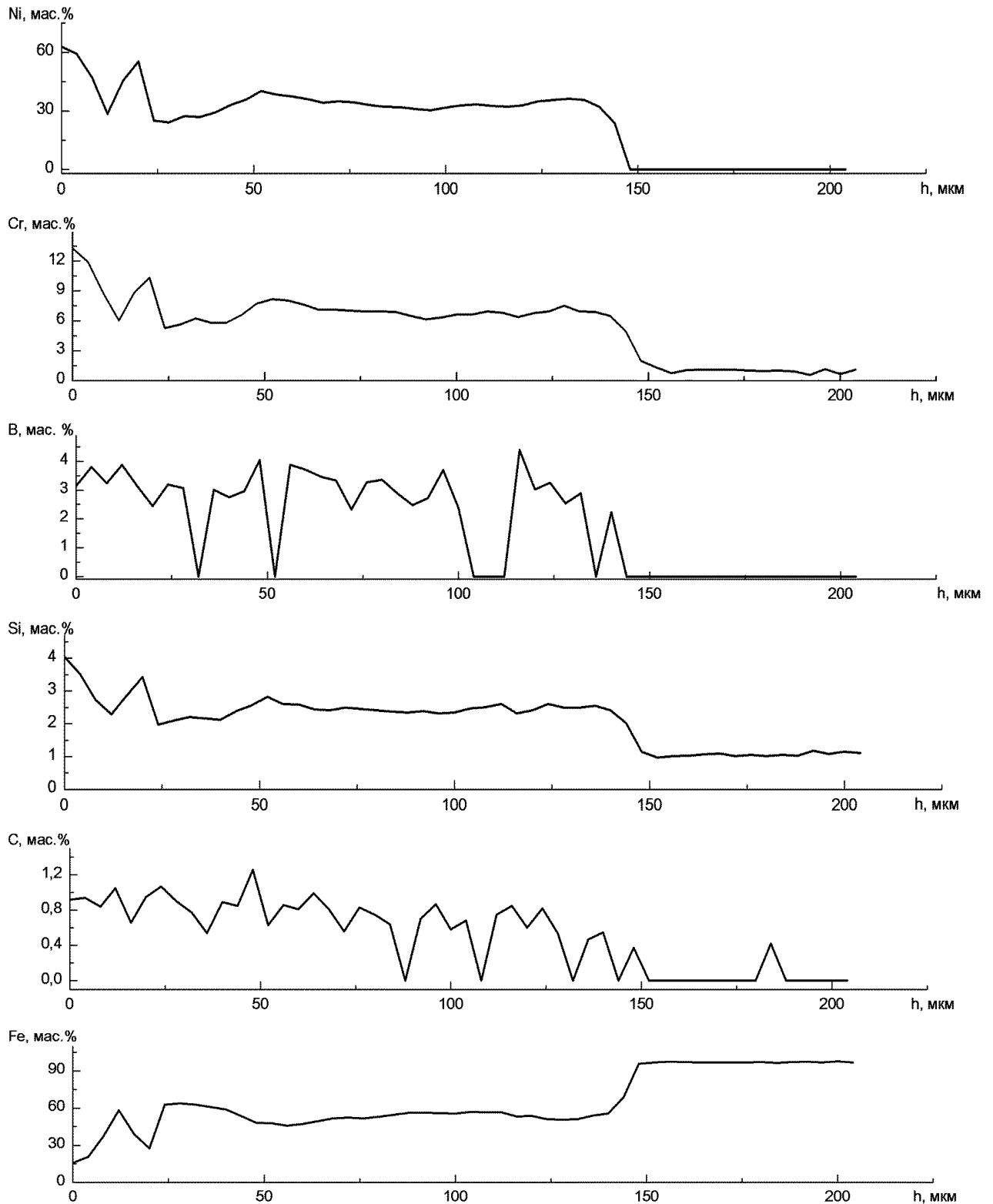


Рис. 4. Распределение элементов в поперечном сечении образцов с NiCrBSi-B₄C покрытием в наплавленном состоянии
Fig. 4. Elements distribution in the cross section of samples with the NiCrBSi-B₄C clad coating

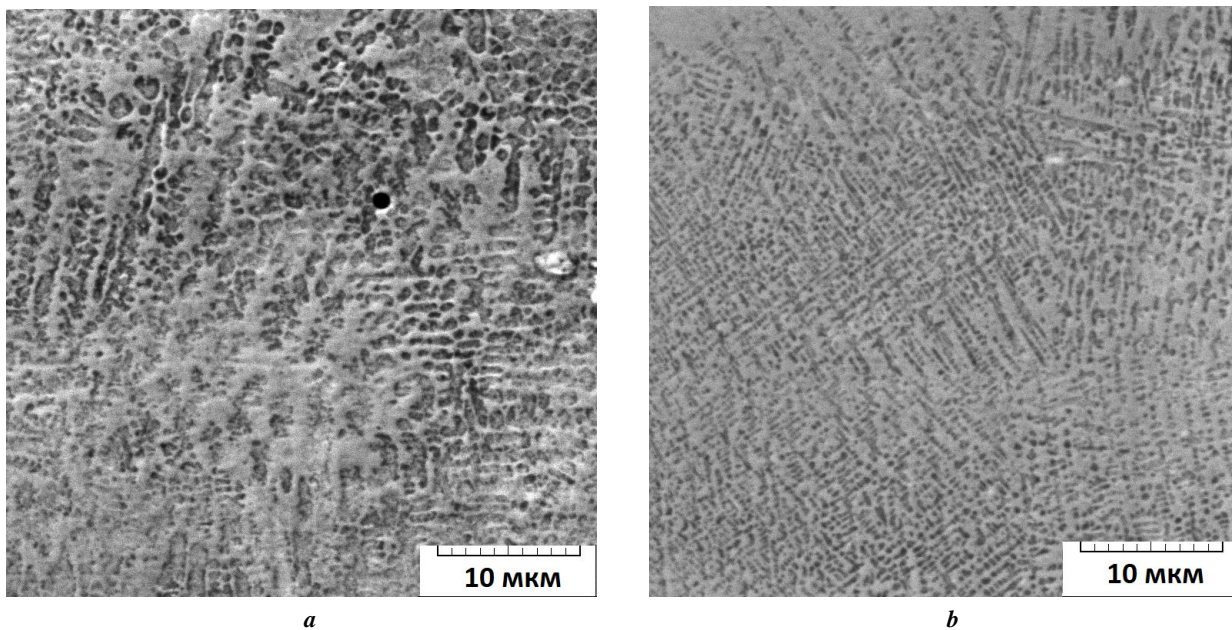


Рис. 5. Микроструктура (РЭМ) покрытий: *a* – NiCrBSi; *b* – NiCrBSi–B₄C
 Fig. 5. Microstructure (SEM) of coatings: *a* – NiCrBSi; *b* – NiCrBSi–B₄C

Таблица 1. Микротвердость NiCrBSi и NiCrBSi–B₄C покрытий
 Table 1. Microhardness of NiCrBSi and NiCrBSi–B₄C coatings

| Покрытие | HV 0,025 |
|--------------------------|----------|
| NiCrBSi | 620±100 |
| NiCrBSi–B ₄ C | 530±140 |

в никелевом покрытии (38 масс. %). Известно, что частицы B₄C взаимодействуют с железом. Бор свободно диффундирует в железе в связи с его малым атомным радиусом (0,091 нм). Кроме того, при повышении температуры бор взаимодействует с большинством химических элементов с образованием боридов, в то время как в обычных условиях для бора характерна слабая химическая активность. Такое взаимодействие способствует формированию боридов железа FeB и Fe₂B в структуре покрытий в процессе наплавки, что описано в работах [14; 20]. Очевидно, что такое взаимодействие является причиной повышенного содержания железа в структуре NiCrBSi–B₄C покрытия.

Резкие изменения количества элементов (снижение количества Ni и повышение содержания Fe) в поперечном сечении образцов с NiCrBSi и NiCrBSi–B₄C покрытиями (рис. 3 и рис. 4) свидетельствуют о наличии в образцах узкой переходной зоны от покрытия к основному металлу. Переходная зона NiCrBSi покрытия примерно составляет 10 мкм, а NiCrBSi–B₄C покрытия – примерно 4 мкм.

Из рис. 5 следует, что в обоих случаях микроструктура характеризуется однородностью и мелкозернистостью. При этом у покрытия с карбидом бора (рис. 5 b) размер структурных составляющих мельче. Измельче-

ние структурных составляющих в покрытии с карбидом бора (рис. 5 b), очевидно, связано с тем, что мелкие частицы карбида бора выступают в качестве модификатора при наплавке. Подобный эффект наблюдался в работе [21], в которой рассмотрена структура металла, наплавленного порошковой проволокой с алюминиевой оболочкой. При введении в состав шихты порошковой проволоки K₂TiF₆ и K₂ZrF₆ происходило модифицирование наплавленного металла, вследствие чего он характеризовался мелкозернистой структурой и равномерным распределением избыточных фаз, что позволило повысить износостойкость покрытия. Кроме того, в работе [22] в результате электрошлаковой сварки введение наноструктурированных компонентов в виде порошка карбонитрида титана в сварочную ванну способствовало измельчению зерна в структуре зоны термического влияния, а также улучшению свойств металла шва [22; 23].

Снижение значения микротвердости покрытия при добавлении 7 масс. % порошка B₄C (таблица 1) объясняется большим содержанием железа в структуре NiCrBSi–B₄C покрытия (51 масс. %), чем в структуре NiCrBSi покрытия (38 масс. %). Отмеченный выше результат снижения микротвердости согласуется с результатом работы [15], где было показано снижение микротвердости

NiCrBSi покрытия после добавления 5 об. % B_4C . В [15] сделан вывод, что в процессе селективного лазерного сплавления материал основы (в основном это железо) смешивается с материалом покрытия. Это приводит к снижению микротвердости при приближении к переходной зоне «покрытие – основа».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сформированные лазерным излучением NiCrBSi и NiCrBSi- B_4C покрытия характеризуются отсутствием макропор, включений, однородной и мелкозернистой структурой, при этом размер структурных составляющих NiCrBSi- B_4C покрытия мельче.

Переходная зона покрытий узкая: у NiCrBSi покрытия составляет примерно 10 мкм, а NiCrBSi- B_4C покрытия – около 4 мкм при общей толщине наплавленных слоев 140–190 и 120–150 мкм соответственно.

Добавление B_4C в порошок ПГ-CP2 при лазерной наплавке приводит к снижению значений средней микротвердости покрытия (до 530 HV 0,025) по сравнению со значениями средней микротвердости NiCrBSi покрытия (620 HV 0,025), что связано с повышенным содержанием железа в NiCrBSi- B_4C покрытии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земляков Е., Бабкин К., Корсмик Р., Скляр М., Кузнецов М. Перспективы использования технологий лазерной наплавки для восстановления лопаток компрессоров газотурбинных деталей // Фотоника. 2016. № 4. С. 10–25. DOI: [10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22](https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22).
2. Голубовский Е.Н., Паркин А.А., Жаткин С.С. Ремонт трещин на секторах лопаток газотурбинного двигателя методом разделки и лазерной импульсной наплавки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 2. С. 107–112.
3. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Технологические аспекты фрикционной обработки покрытия ПГ-CP2, сформированного лазерной наплавкой // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2019. № 3. С. 47–53. DOI: [10.18323/2073-5073-2019-3-47-53](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2019-3-47-53).
4. Гибзун М.С., Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Повышение фрикционной теплостойкости хромоникелевого покрытия комбинированной лазерно-термической обработкой // Master's journal. 2017. № 1. С. 11–16.
5. Shi B.W., Li T., Wang D., Zhang X.R., Zhang H.C. Investigation on crack behavior of Ni60A alloy coating produced by coaxial laser cladding // Journal of Materials Science. 2021. Vol. 56. № 23. P. 13323–13336. DOI: [10.1007/s10853-021-06108-5](https://doi.org/10.1007/s10853-021-06108-5).
6. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes // Tribology International. 2003. Vol. 36. № 3. P. 181–187. DOI: [10.1016/S0301-679X\(02\)00144-5](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00144-5).
7. Niranatumpom P., Koiprasert H. Phase transformation of NiCrBSi-WC and NiBSi-WC arc sprayed coatings // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 206. № 2-3. P. 440–445. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2011.07.057](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.057).
8. Sha J., Chen L.-Y., Liu Y.-T., Yao Z.-J., Lu S., Wang Z.-X., Zang Q.-H., Mao S.-H., Zhang L.-C. Phase transformation-induced improvement in hardness and high-temperature wear resistance of plasma-sprayed and remelted NiCrBSi/WC coatings // Metals. 2020. Vol. 10. № 12. Article number 1688. DOI: [10.3390/met10121688](https://doi.org/10.3390/met10121688).
9. Соболева Н.Н., Николаева Е.П., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Влияние добавки карбида хрома на структуру и абразивную износостойкость NiCrBSi покрытия, сформированного лазерной наплавкой // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 1. С. 68–76. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-1-68-76](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-1-68-76).
10. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi-TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 11. С. 38–44.
11. Fals H.C., Aguiar D., Fanton L., Belém M.J.X., Lima C.R.C. A new approach of abrasive wear performance of flame sprayed NiCrSiBFeC/SiC composite coating // Wear. 2021. Vol. 477. № SI. Article number 203887. DOI: [10.1016/j.wear.2021.203887](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203887).
12. Senapati P., Sutar H. Surface erosion behaviour over NiCrBSi- Al_2O_3 composite coatings // Materials Research Express. 2020. Vol. 7. № 7. Article number 076512. DOI: [10.1088/2053-1591/aba396](https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba396).
13. Li H.J., He Y., Luo P.Y., Fan Y., Yu H., Wang Y.Q., He T., Li Z.J., Zhang H.L. Influence of pulse frequency on corrosion resistance and mechanical properties of Ni-W/ B_4C composite coatings // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 629. Article number 127436. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2021.127436](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127436).
14. Кривиженко Д.С., Дробяз Е.А., Зимоглядова Т.А. Особенности структурообразования боросодержащих покрытий, полученных в процессе высокоскоростной обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 489–492.
15. Golshev A.A., Filippov A.A. Comparative investigation of nickel-based metal-ceramic structures with ceramic particles of tungsten and carbides made by the selective laser melting method // Nanoscience and Technology. 2020. Vol. 11. № 3. P. 247–257. DOI: [10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033784](https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033784).
16. Fan X.H., Geng L., Xu B., Li J. Laser Cladding NiCrBSi+2% B_4C Coating on Ti-6Al-4V // Advanced Materials Research. 2009. Vol. 79-82. P. 473–476. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.473](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.473).
17. Meng Q.W., Geng L., Zhang B.Y. Laser cladding of Ni-base composite coatings onto Ti-6Al-4V substrates with pre-placed B_4C +NiCrBSi powders // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200. № 16-17. P. 4923–4928. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2005.04.059](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.04.059).
18. Geng L., Meng Q.W., Chen Y.B. In-situ Synthesis of Metal Matrix Composite Coating with Laser Melting-Solidifying Processes // Composite materials IV. Key Engineering Materials. 2006. Vol. 313. P. 139–144. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.313.139](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.313.139).
19. Голубев В.С., Вегера И.И., Чернашеюс О., Чаевский В.В. Лазерная обработка материалов с изменением

- химического состава поверхностного слоя // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2019. № 7. С. 34–42.
20. Дробяз Е.А., Кривизhenko Д.С., Поляков И.А., Нагавкин С.Ю., Иванцевский В.В. Структура и свойства боросодержащих покрытий, наплавленных электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 4. С. 83–85.
 21. Зусин В.Я. Исследование модифицирования металла, наплавленного порошковой проволокой с алюминиевой оболочкой // Вестник Приазовского государственного университета. Серия: Технические науки. 2011. № 23. С. 180–183.
 22. Еремин Е.Н. Применение наночастиц тугоплавких соединений для повышения качества сварных соединений из жаропрочных сплавов // Омский научный вестник. 2009. № 3. С. 63–67.
 23. Зернин Е.А., Кузнецов М.А. Способы модифицирование наплавленного металла наноструктурированными порошками для увеличения механических свойств сварных соединений // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 206–212.
- ## REFERENCES
1. Zemlyakov E., Babkin K., Korsmik R., Sklyar M., Kuznetsov M. Prospects of use of laser cladding technology for restoration of compressor blades of gas turbine engines. *Fotonika*, 2016, no. 4, pp. 10–25. DOI: [10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22](https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22).
 2. Golubovskiy E.N., Parkin A.A., Zhatkin S.S. Repair of cracks on sectors of gas-turbine engine shovels by method of cutting and laser pulse cladding. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 107–112.
 3. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu. Technological aspects of friction treatment of PG-SR2 coating formed by laser cladding. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 47–53. DOI: [10.18323/2073-5073-2019-3-47-53](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2019-3-47-53).
 4. Gibzun M.S., Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu. Increasing frictional thermal resistance of Ni-Cr coating using combined laser-heat treatment. *Master's journal*, 2017, no. 1, pp. 11–16.
 5. Shi B.W., Li T., Wang D., Zhang X.R., Zhang H.C. Investigation on crack behavior of Ni60A alloy coating produced by coaxial laser cladding. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, no. 23, pp. 13323–13336. DOI: [10.1007/s10853-021-06108-5](https://doi.org/10.1007/s10853-021-06108-5).
 6. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. *Tribology International*, 2003, vol. 36, no. 3, pp. 181–187. DOI: [10.1016/S0301-679X\(02\)00144-5](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00144-5).
 7. Niranatlumpong P., Koiprasert H. Phase transformation of NiCrBSi–WC and NiBSi–WC arc sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, no. 2-3, pp. 440–445. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2011.07.057](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.057).
 8. Sha J., Chen L.-Y., Liu Y.-T., Yao Z.-J., Lu S., Wang Z.-X., Zang Q.-H., Mao S.-H., Zhang L.-C. Phase transformation-induced improvement in hardness and high-temperature wear resistance of plasma-sprayed and remelted NiCrBSi/WC coatings. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 12, article number 1688. DOI: [10.3390/met10121688](https://doi.org/10.3390/met10121688).
 9. Soboleva N.N., Nikolaeva E.P., Makarov A.V., Malygina I.Yu. The influence of chromium carbide additive on the structure and abrasive wear resistance of the NiCrBSi coating formed by laser cladding. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 68–76. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-1-68-76](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-1-68-76).
 10. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. The formation of NiCrBSi–TiC composite coating with increased abrasive wear resistance by gas powder laser cladding. *Uprochnyayushchii tekhnologii i pokrytiya*, 2013, no. 11, pp. 38–44.
 11. Fals H.C., Aguiar D., Fanton L., Belém M.J.X., Lima C.R.C. A new approach of abrasive wear performance of flame sprayed NiCrSiBFeC/SiC composite coating. *Wear*, 2021, vol. 477, no. SI, article number 203887. DOI: [10.1016/j.wear.2021.203887](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203887).
 12. Senapati P., Sutar H. Surface erosion behaviour over NiCrBSi–Al₂O₃ composite coatings. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7, no. 7, article number 076512. DOI: [10.1088/2053-1591/aba396](https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba396).
 13. Li H.J., He Y., Luo P.Y., Fan Y., Yu H., Wang Y.Q., He T., Li Z.J., Zhang H.L. Influence of pulse frequency on corrosion resistance and mechanical properties of Ni–W/B₄C composite coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, vol. 629, article number 127436. DOI: [10.1016/j.colsurfa.2021.127436](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127436).
 14. Krivizhenko D.S., Drobyaz E.A., Zimoglyadova T.A. Structure formation features of boron-containing coatings obtained by highspeed treatment. *Aktualnye problemy v mashinostroenii*, 2014, no. 1, pp. 489–492.
 15. Golyshev A.A., Filippov A.A. Comparative investigation of nickel-based metal-ceramic structures with ceramic particles of tungsten and carbides made by the selective laser melting method. *Nanoscience and Technology*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 247–257. DOI: [10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033784](https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020033784).
 16. Fan X.H., Geng L., Xu B., Li J. Laser Cladding NiCrBSi+2%B₄C Coating on Ti-6Al-4V. *Advanced Materials Research*, 2009, vol. 79-82, pp. 473–476. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.473](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.473).
 17. Meng Q.W., Geng L., Zhang B.Y. Laser cladding of Ni-base composite coatings onto Ti-6Al-4V substrates with pre-placed B₄C+NiCrBSi powders. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, no. 16-17, pp. 4923–4928. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2005.04.059](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.04.059).
 18. Geng L., Meng Q.W., Chen Y.B. In-situ Synthesis of Metal Matrix Composite Coating with Laser Melting-Solidifying Processes. *Composite materials IV. Key Engineering Materials*, 2006, vol. 313, pp. 139–144. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.313.139](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.313.139).
 19. Golubev V.S., Vegera I.I., Chernasheyus O., Chaevskiy V.V. Laser treatment of materials with change of chemical composition of the surface layer. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 7, pp. 34–42.
 20. Drobyaz E.A., Krivizhenko D.S., Polyakov I.A., Nagavkin S.Yu., Ivantsivskiy V.V. Structure and properties of boron-containing coatings, deposited by non-vacuum electron beam. *Obrabotka metallov*

- (*tehnologiya, oborudovanie, instrumenty*), 2012, no. 4, pp. 83–85.
21. Zusin V.Ya. Investigation of metal modification, deposited with powder wire with aluminum shell. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 23, pp. 180–183.
22. Eremin E.N. Application of nanoparticles of refractory compounds for improving the quality of welding joints made of heat-resistant alloys. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2009, no. 3, pp. 63–67.
23. Zernin E.A., Kuznetsov M.A. Method of modifying the weld metal nanostructured powders for increasing the mechanical properties of welded joints. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 5, pp. 206–212.

The influence of boron carbide additive on the structure and hardness of a nickel-based coating

© 2021

Uliana S. Starikova*^{1,4}, junior researcher

Natalia N. Soboleva^{1,2,5}, PhD (Engineering), senior researcher

Aleksey V. Makarov^{1,6}, Corresponding member of RAS, Doctor of Sciences (Engineering)

Head of Department of Materials Science and the Laboratory of Mechanical Properties,

Evgeny V. Kharanzhevsky^{3,7}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Laboratory

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)

²Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)

³Udmurt State University, Izhevsk (Russia)

*E-mail: ulstar97@mail.ru

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6960-0619>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1525-2169>

Abstract: Laser cladding is increasingly frequently used in various branches of mechanical engineering since it has such advantages over traditional methods of depositing coatings as high heating and cooling rates and minimal mixing of base and melting materials. Laser-clad coatings are usually characterized by a fine-grained structure and a minimal heat-affected zone. Coatings formed from the Ni–Cr–B–Si powders are also very common in industrial applications, as they have good resistance to wear, corrosion, erosion, etc. Various strengthening particles can be added to this group of powders to improve the properties of the deposited coating. Boron carbides can act as such particles since they have high hardness, thermodynamic stability, and wear resistance. In this regard, the paper investigated the influence of the 7 wt. % of boron carbide B₄C addition on the structure and hardness of the NiCrBSi coating formed by laser cladding of PG-SR2 powder on the surface of 30KhRA steel. Using the scanning electron microscope, the authors carried out microscopic studies of the structure of NiCrBSi and NiCrBSi–B₄C coatings and presented the results of X-ray spectral microanalysis. The study shows that the structures of both coatings in the deposited state are characterized by uniformity and fine-grain structure. The investigation revealed that the samples with NiCrBSi and NiCrBSi–B₄C coatings have a narrow transition zone from the deposit to the base metal. The paper presents the results of measuring the microhardness of coatings indicating a decrease in the microhardness of laser-clad nickel-based coatings with the boron carbide addition.

Keywords: laser cladding; NiCrBSi coating; NiCrBSi–B₄C coating; microhardness; scanning electron microscopy.

Acknowledgments: The work was carried out within the government assignment to the Institute of Metal Physics of the UB of RAS on the topics No. 121102900049-1 and No. AAAA-A18-118020190116-6 and the Institute of Engineering Science, RAS (Ural Branch) on the topic No. AAAA-A18-118020790147-4. The experimental studies were performed on the equipment of the “Plastometry” Core Facility Center of the IES UB RAS.

The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

For citation: Starikova U.S., Soboleva N.N., Makarov A.V., Kharanzhevsky E.V. The influence of boron carbide additive on the structure and hardness of a nickel-based coating. *Frontier Materials & Technologies*, 2021, no. 4, pp. 89–97. DOI: 10.18323/2782-4039-2021-4-89-97.