

Влияние добавки карбида хрома на структуру и абразивную износостойкость NiCrBSi покрытия, сформированного лазерной наплавкой

© 2020

Соболева Наталья Николаевна^{*1,3}, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения
Николаева Екатерина Павловна^{2,4}, младший научный сотрудник лаборатории лазерной и плазменной обработки
Макаров Алексей Викторович^{2,1,5}, доктор технических наук, заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств
Малыгина Ирина Юрьевна^{1,6}, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения

¹Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

*E-mail: natashasoboleva@list.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9522-4167>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9463-1473>

Аннотация: Лазерная наплавка применяется в различных отраслях машиностроения для получения упрочняющих и восстановительных покрытий. В качестве износостойких сплавов для наплавки хорошо зарекомендовали себя самофлюсующиеся сплавы системы Ni-Cr-B-Si. Относительно низкая температура плавления NiCrBSi порошков позволяет добавлять твердые включения в материал матрицы и создавать тем самым композиционные покрытия с не растворившимися при наплавке частицами. В качестве упрочняющих карбидных частиц при создании композиционных покрытий на основе NiCrBSi используются добавки WC/W₂C, Cr₃C₂, SiC, TaC, NiC, VC, TiC. Особый научный и практический интерес представляет изучение закономерностей изнашивания композиционного покрытия NiCrBSi-Cr₃C₂, характеризующегося повышенной стойкостью к коррозии и окислению при высоких температурах. В работе осуществлялась добавка 15 мас. % порошка Cr₃C₂ гранулометрического состава 50–150 мкм в порошок ПГ-CP2 (химический состав, мас. %: 0,48 C; 14,8 Cr; 2,6 Fe; 2,9 Si; 2,1 B; остальное Ni) гранулометрического состава 40–160 мкм при газопорошковой лазерной наплавке. С помощью растровой электронной микроскопии установлено, что указанная добавка карбида хрома в NiCrBSi порошок привела к формированию при лазерной наплавке композиционного покрытия, так как в структуре присутствуют исходные нерастворившиеся карбиды хрома Cr₃C₂. NiCrBSi-Cr₃C₂ покрытие характеризуется повышенной микротвердостью. Проведены испытания на абразивное изнашивание по закрепленному абразиву – корунду, определены интенсивность абразивного изнашивания, коэффициент трения и удельная работа изнашивания, а также исследованы поверхности изнашивания NiCrBSi и NiCrBSi-Cr₃C₂ покрытий. Установлен существенный рост абразивной износостойкости композиционного покрытия вследствие смены основного механизма изнашивания (с микрорезания у покрытия NiCrBSi на царапание у покрытия NiCrBSi-Cr₃C₂).

Ключевые слова: газопорошковая лазерная наплавка; NiCrBSi покрытие; NiCrBSi-Cr₃C₂ покрытие; композиционное покрытие; структура, абразивное изнашивание.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ МК-391.2019.8 и в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по темам № АААА-А18-118020190116-6 и «Лазер». Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Статья подготовлена по материалам докладов участников IX Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2019) с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 9–13 сентября 2019 года.

Для цитирования: 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.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная наплавка широко применяется в различных отраслях машиностроения, так как позволяет получать упрочняющие и восстановительные покрытия и уменьшать вероятность возникновения разрушений в поверхностных слоях. Кроме того, среди большого разнообра-

зия методов нанесения покрытий лазерная наплавка выделяется минимальной зоной термического влияния и формированием наплавленных слоев с повышенными свойствами [1].

Самофлюсующиеся сплавы на никелевой основе системы Ni-Cr-B-Si хорошо зарекомендовали себя в качестве материала для покрытий, формируемых

лазерной наплавкой, благодаря их высокой износостойкости и коррозионной стойкости [2–4]. Относительно низкая температура плавления порошков NiCrBSi делает возможным добавление твердых включений в материал матрицы и тем самым создание композиционных покрытий с не растворившимися при наплавке частицами [5; 6].

Композиционные материалы «карбид – металлическая матрица» демонстрируют высокую и стабильную износостойкость в широком диапазоне условий абразивного воздействия [7], поэтому являются одними из наиболее перспективных износостойких материалов [8]. Твердые карбидные частицы обеспечивают упрочнение материала, а пластичная матрица – необходимый уровень вязкости. Такое сочетание свойств позволяет использовать эти материалы при умеренных ударных нагрузках [8]. В частности, лазерная наплавка композиционных порошковых материалов, содержащих мягкую матрицу и твердые карбидные включения, применяется для нанесения покрытий на изделия горнодобывающей промышленности, бурового инструмента [9].

В качестве упрочняющих карбидных частиц при создании композиционных покрытий на основе NiCrBSi используются добавки WC/W₂C, SiC, TaC, NiC, VC, TiC [10–12]. Особый интерес вызывают композиционные NiCrBSi–Cr₃C₂ покрытия, которые, вследствие высокой износостойкости и стойкости к коррозии и окислению при высоких температурах, широко используются в авиационной промышленности [13; 14]. Кроме того, температурный коэффициент линейного расширения карбидов хрома близок к коэффициенту стали. Это приводит к снижению механических напряжений в переходном слое при нанесении покрытий на стальную основу [13].

При изучении композиционных покрытий важно учитывать, что недостаточное количество добавок карбидов может не обеспечить формирование композиционной структуры [15], в то время как избыток их содержания может вызывать значительный рост хрупкости покрытия [16].

Цель работы – исследование влияния добавки 15 % Cr₃C₂ в порошок ПГ-СР2 при лазерной наплавке на структуру, твердость и абразивную износостойкость покрытия при испытании по закрепленному абразиву – корунду.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами для нанесения покрытий являлись порошок сплава системы Ni-Cr-B-Si гранулометрического состава 40–160 мкм марки ПГ-СР2 (таблица 1) и смесь двух порошков, состоящая из 85 % порошка ПГ-СР2

и 15 % Cr₃C₂, гранулометрический состав Cr₃C₂ 50–150 мкм.

Покрытия были сформированы двухслойной наплавкой с помощью СО₂-лазера непрерывного действия на пластины из стали Ст3. Наплавку выполняли при следующих режимах: мощность излучения 1,4–1,6 кВт; скорость 160–200 мм/мин; расход порошка 2,9–3,8 г/мин; размер лазерного пятна на поверхности 2×6 мм; сдвиг 4–4,5 мм. Транспортировка порошковой смеси в зону наплавки осуществлялась инертным газом (аргоном) при давлении 0,5 атм. Толщина покрытий после лазерной наплавки не превышала 2,8 мм.

Далее для устранения волнистости производили шлифование поверхности с наплавленным покрытием на круглошлифовальном станке с интенсивным охлаждением. После шлифования толщина покрытия ПГ-СР2 составляла 0,7–0,8 мм, покрытия ПГ-СР2+Cr₃C₂ – 0,7–1,1 мм.

Трибологические испытания образцов с рабочей поверхностью размером 7×7 мм проводили при возвратно-поступательном движении образцов по закрепленному абразиву – корунду Al₂O₃ твердостью ~2000 HV, зернистостью ~160 мкм при нагрузке $N=49$ Н, средней скорости скольжения $V=0,175$ м/с, длине пути трения $L=18$ м, длине рабочего хода $l=100$ мм, величине поперечного смещения шлифовальной шкурки за один двойной ход 1,2 мм. При этом интенсивность изнашивания каждого отдельного испытания определяли по формуле (1) [17]:

$$I_h = \frac{Q}{\rho SL}, \quad (1)$$

где Q – потеря массы образца, г;
 ρ – плотность материала, г/см³;
 S – геометрическая площадь контакта, см²;
 L – путь трения, см.

В процессе нагружения фиксировали изменения силы трения с помощью упругого элемента (кольца) с наклеенными на него тензодатчиками сопротивления. Для этого использовалась оригинальная компьютеризированная система записи и обработки сигналов с тензодатчиков. Погрешность определения силы трения не превышала 10 %. Коэффициент трения f рассчитывали по формуле (2):

$$f = \frac{F}{N}, \quad (2)$$

где F – сила трения (Н);
 N – нормальная нагрузка (Н).

Таблица 1. Химический состав наплавляемого NiCrBSi порошка
 Table 1. Chemical composition of the fusion-bonded NiCrBSi powder

Порошок	Содержание химических элементов, мас. %					
	Ni	Cr	B	Si	C	Fe
ПГ-СР2	основа	14,8	2,1	2,9	0,48	2,6

Удельная работа абразивного изнашивания вычислялась по формуле (3) [18]:

$$W = \frac{fNL\rho}{Q} \quad (3)$$

Микротвердость по методу восстановленного отпечатка измеряли с использованием микротвердомера Shumadzu HNV-G21DT при нагрузке 0,98 Н.

Микроструктуру, фазовый состав, поверхности трения изучали с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) Tescan VEGA II XMU, оборудованного волнодисперсионным (Inca Wave 700) и энергодисперсионным (INCA Energy 450 XT) микроанализаторами. Фазовый состав определяли также по результатам рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (в CrK α -излучении).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микрофотография структуры наплавленного слоя (рис. 1), полученная на поперечном шлифе с помощью РЭМ, показывает, что при добавлении при наплавке в состав порошка ПГ-СР2 15 мас. % карбида хрома видны исходные не растворившиеся при наплавке включения Cr₃C₂. Исходя из этого, можно утверждать, что данное покрытие является композиционным.

На рис. 2 приведены результаты количественного рентгеноспектрального микроанализа, выполненного на поперечном шлифе по всей толщине покрытия по линии, изображенной на рис. 1.

На концентрационных линиях в структуре покрытия выделяются участки, соответствующие крупным нерастворившимся карбидам хрома, где содержание хрома

и углерода превышает 80 и 10 мас. % соответственно, а концентрации остальных элементов снижаются практически до нуля (см. рис. 2). В местах отсутствия крупных карбидов наблюдается достаточно равномерное распределение структурных составляющих. В переходной зоне толщиной около 20 мкм происходит перемешивание металла покрытия и основы; этот слой характеризуется уменьшением содержания никеля, хрома, бора, кремния и возрастанием содержания железа.

Металлическую основу NiCrBSi покрытия из порошка ПГ-СР2 составляет γ -твердый раствор на основе Ni с фазами Cr₂₃C₆ и Ni₃B (рис. 3 а). При добавлении 15 мас. % Cr₃C₂ в наплавляемый порошок ПГ-СР2 в структуре наблюдаются те же фазы, а также дополнительно карбиды Cr₃C₂ (рис. 3 б). Однако при наплавке композиционного покрытия происходит частичное растворение исходных частиц Cr₃C₂. Согласно данным локального микрорентгеноспектрального анализа, это приводит к формированию большего количества вторичных карбидов хрома Cr₂₃C₆ по сравнению с их наличием в структуре NiCrBSi покрытия (см. рис. 3 а). В работе [19] продолговатые (игольчатого вида) частицы, расположенные вблизи крупных карбидов Cr₃C₂, идентифицированы как карбиды Cr₂₃C₆ методом дифракции обратно рассеянных электронов.

В таблице 2 приведены трибологические характеристики NiCrBSi и NiCrBSi–Cr₃C₂ покрытий при скольжении по закрепленному абразиву – корунду, а также реализуемые при этом основные механизмы изнашивания. Средняя микротвердость NiCrBSi покрытия составляет 520±10 HV_{0,1} (таблица 2). Формирование композиционного покрытия с наличием твердых первичных (не растворившихся при наплавке) частиц Cr₃C₂ и большого количества вторичных карбидов Cr₂₃C₆ приводит к повышению средней микротвердости покрытия

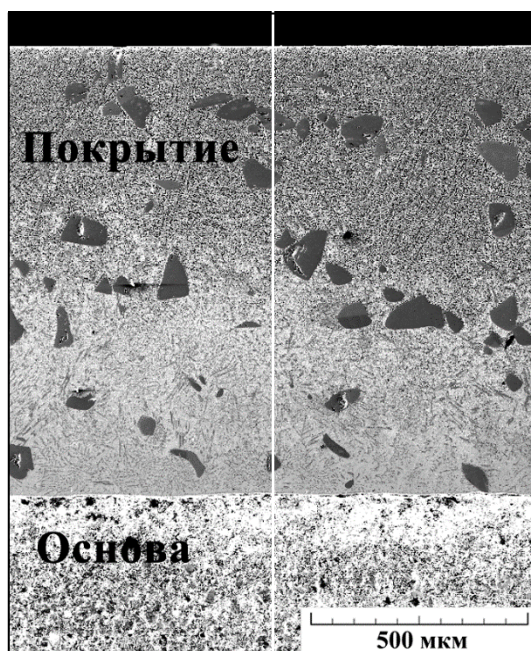


Рис. 1. Общий вид покрытия (РЭМ) NiCrBSi–Cr₃C₂, сформированного лазерной наплавкой, поперечный шлиф
Fig. 1. General view of the NiCrBSi–Cr₃C₂ coating (SEM) formed by laser cladding, cross-section

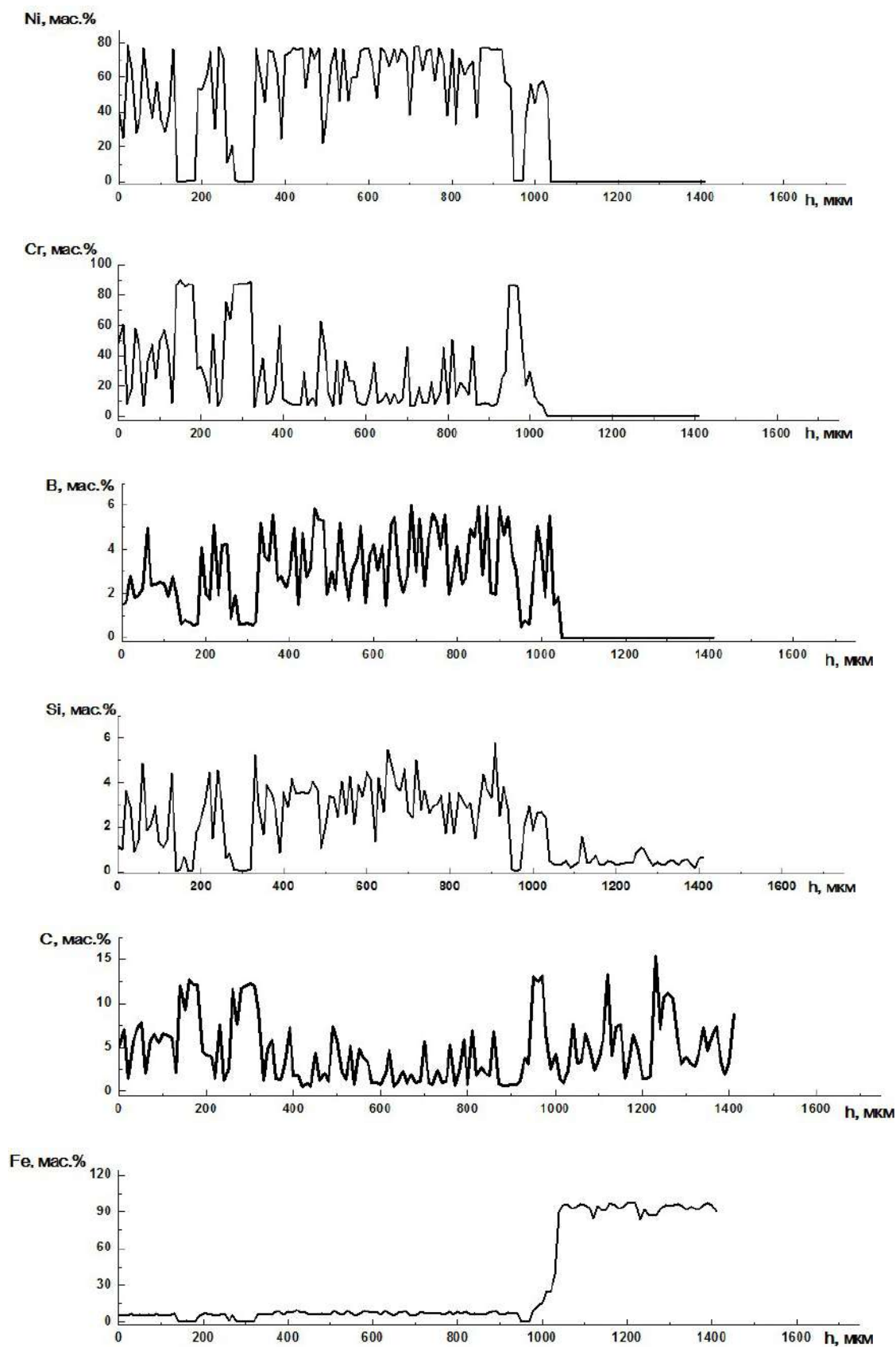


Рис. 2. Распределение химических элементов по глубине наплавленного лазером покрытия NiCrBSi–Cr₃C₂
Fig. 2. Chemical elements depth distribution in the NiCrBSi–Cr₃C₂ laser-cladded coating

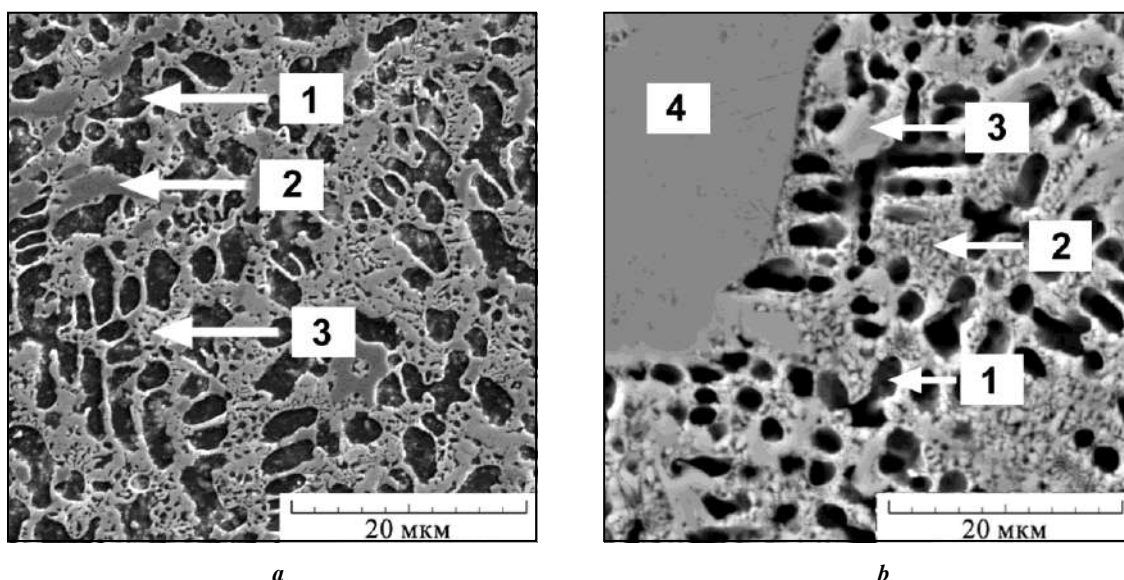


Рис. 3. Микроструктура (РЭМ) покрытий после лазерной наплавки:
a – NiCrBSi; *b* – NiCrBSi–Cr₃C₂ (1 – γ ; 2 – γ +Ni₃B; 3 – Cr₂₃C₆; 4 – Cr₃C₂)
Fig. 3. Microstructure (SEM) of coatings after laser cladding:
a – NiCrBSi; *b* – NiCrBSi–Cr₃C₂ (1 – γ ; 2 – γ +Ni₃B; 3 – Cr₂₃C₆; 4 – Cr₃C₂)

Таблица 2. Микротвердость HV0,1, интенсивность изнашивания I_h , коэффициент трения f , удельная работа изнашивания W и механизмы изнашивания покрытий при испытании по закрепленному абразиву – корунду
Table 2. Micro-hardness HV0.1, wear rate I_h , friction ratio f , wear specific work W and wear mechanisms of coatings when testing by fixed abrasive – corundum

Состав наплавляемого порошка, мас. %	HV0,1	$I_h, 10^{-5}$	f	$W, \text{кДж/см}^3$	Механизм изнашивания
ПГ-CP2	520±10	1,6	0,61	38	Микрорезание
85 % ПГ-CP2 + 15 % Cr ₃ C ₂	1080±110	0,6	0,41	74	Царапание

до 1080±110 HV0,1. Наличие в структуре крупных частиц Cr₃C₂ с микротвердостью 1860–2220 HV0,1 обуславливает значительно больший разброс значений и большую погрешность измерения микротвердости у композиционного покрытия.

Видно, что введение в состав покрытия карбидов Cr₃C₂ приводит к снижению интенсивности изнашивания в 2,7 и коэффициента трения – в 1,5 раза, а также к росту практически в 2 раза удельной работы абразивного изнашивания (работы, которую необходимо затратить на разрушение покрытия). Следовательно, композиционное покрытие NiCrBSi–Cr₃C₂ существенно (не менее чем в 2 раза) превосходит NiCrBSi покрытие в износостойкости при воздействии абразивом – корундом.

Исследование на РЭМ поверхностей изнашивания показало (рис. 4), что при испытании NiCrBSi покрытия по корунду основной механизм изнашивания – микрорезание. Признаком микрорезания являются борозды на поверхности изнашивания, ориентированные в направлении движения абразивных зерен (рис. 4 а). Микрорезание является результатом того, что твердость корунда

(~2000 HV) значительно превышает не только среднюю твердость наплавленного покрытия (см. таблицу 2), но и твердость всех упрочняющих фаз, включая наиболее твердый карбид Cr₂₃C₆ (твердостью 1000–1150 HV).

На рис. 4 б показано, что на поверхности NiCrBSi–Cr₃C₂ покрытия после испытания по корунду присутствуют выглаженные участки пластического отгеснения, а также указанные стрелками очаги разрушения по механизму малоциклового фрикционной усталости [17]. Это свидетельствует о реализации другого механизма изнашивания – царапания, при котором разрушение происходит не за счет отделения микростружек при одноактном воздействии абразивных зерен (механизм микрорезания), а в результате многократного передеформирования материала, которое приводит к полидеформационному изнашиванию [20]. При полидеформационном (усталостном) изнашивании разрушение материала происходит за счет постепенного возникновения усталостных микротрещин, развитие которых приводит к отделению продуктов абразивного изнашивания не в виде микростружек, а в виде чешуек [21]. Присутствующие

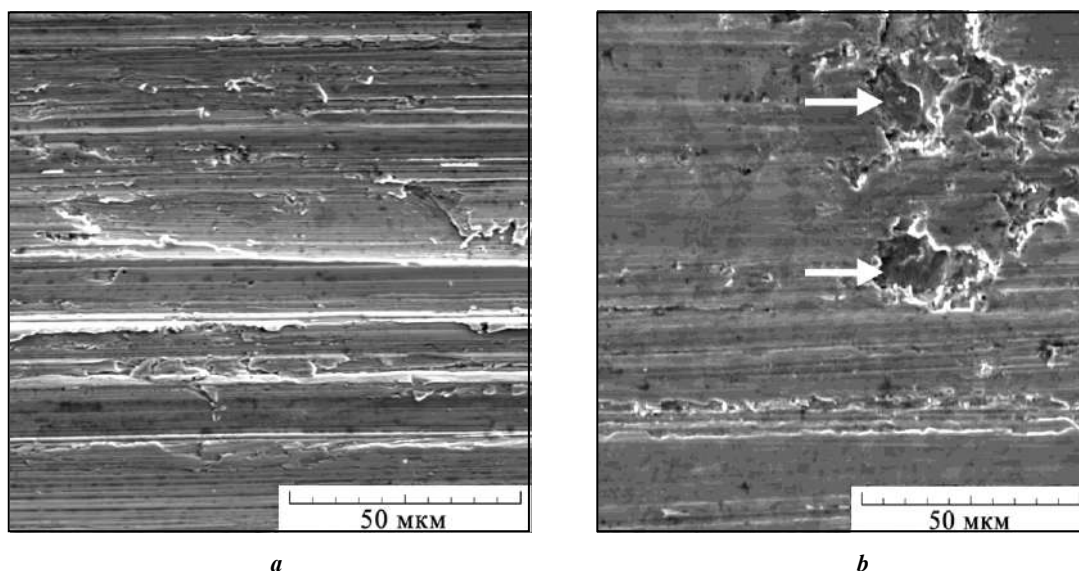


Рис. 4. Поверхности абразивного изнашивания (РЭМ) после испытаний по корунду покрытий:
 а – ПГ-СР2; б – ПГ-СР2+Cr₃C₂

Fig. 4. Abrasive wear surfaces (SEM) of coatings after testing by corundum:
 а – PG-SR2; б – PG-SR2+Cr₃C₂

в покрытиях карбида хрома Cr₃C₂ с высокой микро-твердостью 1860–2220 HV, которая близка твердости корунда, ограничивают развитие микрорезания на поверхности композиционного покрытия. Известно [22], что микрорезание надежно развивается лишь в том случае, если показатели твердости абразива выше показателей твердости испытываемого материала более чем в 1,3–1,4 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Установлено формирование композиционного (с наличием твердых первичных карбидов хрома) покрытия NiCrBSi–Cr₃C₂ в результате проведения лазерной наплавки с добавлением в наплавляемый порошок ПГ-СР2 порошка карбида хрома Cr₃C₂ в количестве 15 мас. %.

Присутствие в структуре композиционных покрытий не растворившихся при наплавке крупных частиц карбида хрома Cr₃C₂, а также повышенного количества карбидов Cr₂₃C₆ (по сравнению с исходным NiCrBSi покрытием) способствует повышению средней микро-твердости от 520 HV_{0,1} до 1080 HV_{0,1} и росту абразивной износостойкости при испытаниях по абразиву – корунду. При добавке карбида Cr₃C₂ интенсивность изнашивания и коэффициент трения снижаются в 2,7 и 1,5 раза соответственно, а удельная работа изнашивания покрытия возрастает в 2 раза. Это связано с изменением основного механизма изнашивания: микрорезание, характерное для NiCrBSi покрытия, сменяется царапанием, характерным для NiCrBSi–Cr₃C₂ покрытия, что обусловлено высокой твердостью не растворившихся при наплавке карбидов хрома Cr₃C₂ (1860–2220 HV), близкой к твердости корунда Al₂O₃.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
2. Афанасьева Л.Е. Микроструктура покрытия NiCrBSi после лазерной наплавки и последующего лазерного плавления // *Металлообработка*. 2018. № 3. С. 34–38.
3. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Влияние фрикционной обработки на микромеханические свойства NiCrBSi покрытия, полученного лазерной наплавкой // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2017. № 4. С. 135–140.
4. Stanciu E.M., Pascu A., Țierean M.H., Voiculescu I., Roatã I.C., Croitoru C., Hulka I. Dual Coating Laser Cladding of NiCrBSi and Inconel 718 // *Materials and Manufacturing Processes*. 2016. Vol. 31. № 12. P. 1556–1564.
5. Yang J., Liu F., Miao X., Yang F. Influence of laser cladding process on the magnetic properties of WC–FeNiCr metal–matrix composite coatings // *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212. № 9. P. 1862–1868.
6. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. The tribological performances of a NiCrBSi – TiC laser-clad composite coating under abrasion and sliding friction // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. № 3. P. 83–97.
7. Прибытков Г.А., Полев И.В., Батаев В.А., Иванов М.Б. Структура и абразивная износостойкость композитов тугоплавкий карбид – металлическая матрица // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № S1-1. С. 419–422.

8. Прибытков Г.А., Храмогин М.Н., Коржакова В.В. СВС композиционные порошки карбид титана – связки из сплавов на основе железа для наплавки износостойких покрытий // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № S1. С. 185–188.
9. Бирюков В.П., Фишков А.А., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В., Быковский Д.П., Петровский В.Н. Влияние режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на абразивную износостойкость покрытий // Фотоника. 2016. № 3. С. 32–45.
10. Голышев А.А., Оришич А.М. Исследование влияния режимов фокусировки лазерного излучения на геометрические и механические свойства металлокерамических треков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21. № 1. С. 82–92.
11. Прибытков Г.А., Фирсина И.А., Коржова В.В., Криницын М.Г., Полянская А.А. Синтез композиционных порошков «TiC – связка из сплава NiCrBSi» для наплавки и напыления износостойких покрытий // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 43–53.
12. Vostřák M., Houdková Š., Bystrianský M., Česánek Z. The influence of process parameters on structure and abrasive wear resistance of laser clad WC-NiCrBSi coatings // Materials Research Express. 2018. Vol. 5. № 9. P. 096522.
13. Zikin A., Hussainova I., Katsich C., Badisch E., Tomastik C. Advanced chromium carbide-based hardfacings // Surface and Coatings Technology. 2012. Vol. 206. № 19-20. P. 4270–4279.
14. Karaoglanli A.C., Oge M., Doleker K.M., Hotamis M. Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 318. P. 299–308.
15. 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.
16. Степанова И.В., Панин С.В., Дураков В.Г., Корчагин М.А. Модификация структуры порошковых покрытий на никелевой и хром-никелевой основах введением наночастиц диборида титана при электронно-лучевой наплавке // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 1. С. 68–74.
17. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
18. Трение, изнашивание и смазка. Кн. 1 / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.
19. Savraï R.A., Makarov A.V., Gorkunov E.S., Soboleva N.N., Kogan L.Kh., Malygina I.Yu., Osintseva A.L., Davydova N.A. Eddy-Current Testing of the Fatigue Degradation of a Gas Powder Laser Clad NiCrBSi–Cr₃C₂ Composite Coating under Contact Fatigue Loading // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1915. P. 040049.
20. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.
21. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 4. С. 311–318.
22. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.

REFERENCES

1. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Laser Processing Technology]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2008. 664 p.
2. Afanasyeva L.E. Microstructure of NiCrBSi coating after laser cladding and laser remelting. *Metalloobrabotka*, 2018, no. 3, pp. 34–38.
3. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu. The influence of frictional treatment on the micromechanical properties of NiCrBSi coating produced by laser cladding. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 4, pp. 135–140.
4. Stanciu E.M., Pascu A., Ţierean M.H., Voiculescu I., Roată I.C., Croitoru C., Hulka I. Dual Coating Laser Cladding of NiCrBSi and Inconel 718. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, vol. 31, no. 12, pp. 1556–1564.
5. Yang J., Liu F., Miao X., Yang F. Influence of laser cladding process on the magnetic properties of WC–FeNiCr metal–matrix composite coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, no. 9, pp. 1862–1868.
6. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. The tribological performances of a NiCrBSi – TiC laser-clad composite coating under abrasion and sliding friction. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, no. 3, pp. 83–97.
7. Pribytkov G.A., Polev I.V., Bataev V.A., Ivanov M.B. Structure and abrasive wear resistance of refractory carbide – metal matrix composites. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2004, vol. 7, no. S1-1, pp. 419–422.
8. Pribytkov G.A., Khramogin M.N., Korzhakova V.V. SHS composite powders TiC – Fe-based binder for wear-resistant hardfacing. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2006, vol. 9, no. S1, pp. 185–188.
9. Biryukov V.P., Fishkov A.A., Tatarkin D.Yu., Khriptovich E.V., Bykovsky D.P., Petrovsky V.N. Influence of modes of laser cladding and composition of powder materials on abrasion resistance of the coatings. *Fotonika*, 2016, no. 3, pp. 32–45.
10. Golyshev A.A., Orishich A.M. Study of the laser radiation focusing modes effect on geometrical and mechanical properties of meta-ceramic tracks. *Obrabotka metallov – Metal working and material science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 82–92.
11. Pribytkov G.A., Firsina I.A., Korzhova V.V., Krinitsyn M.G., Polyanskaya A.A. Synthesis of composite powders “TiC – NiCrBSi alloy binder” for cladding and deposition of wear-resistant coatings. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*, 2018, no. 2, pp. 43–53.
12. Vostřák M., Houdková Š., Bystrianský M., Česánek Z. The influence of process parameters on structure and

- abrasive wear resistance of laser clad WC-NiCrBSi coatings. *Materials Research Express*, 2018, vol. 5, no. 9, pp. 096522.
13. Zikin A., Hussainova I., Katsich C., Badisch E., Tomastik C. Advanced chromium carbide-based hardfacings. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, no. 19-20, pp. 4270–4279.
 14. Karaoglanli A.C., Oge M., Doleker K.M., Hotamis M. Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 318, pp. 299–308.
 15. 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. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2013, no. 11, pp. 38–44.
 16. Stepanova I.V., Panin S.V., Durakov V.G., Korchagina M.A. Modification of structure of powder coatings on nickel and chromium-nickel bases by introduction of titanium diboride nanoparticles during electron-arc weld deposition. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*, 2011, no. 1, pp. 68–74.
 17. Kragelsky I.V., Dobyichin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basics of friction and wear calculations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p.
 18. Kragelsky I.V., Alisin V.V., eds. *Trenie, iznashivanie i smazka* [Friction, Wear and Lubrication]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. Book 1, 400 p.
 19. Savrai R.A., Makarov A.V., Gorkunov E.S., Soboleva N.N., Kogan L.Kh., Malygina I.Yu., Osintseva A.L., Davydova N.A. Eddy-Current Testing of the Fatigue Degradation of a Gas Powder Laser Clad NiCrBSi–Cr₃C₂ Composite Coating under Contact Fatigue Loading. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, p. 040049.
 20. Tenenbaum M.M. *Soprotivlenie abrazivnomy iznashivaniyu* [Abrasion resistance]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 271 p.
 21. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu. 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.
 22. Khreshchov M.M., Babichev M.A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 252 p.

The influence of chromium carbide additive on the structure and abrasive wear resistance of the NiCrBSi coating formed by laser cladding

© 2020

Natalia N. Soboleva^{*1,3}, PhD (Engineering), researcher of the Laboratory of Constructional Material Science

Ekaterina P. Nikolaeva^{2,4}, junior researcher of the Laboratory of Laser and Plasma Processing

Aleksey V. Makarov^{2,1,5}, Doctor of Sciences (Engineering),

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

Irina Yu. Malygina^{1,6}, PhD (Engineering), senior researcher of the Laboratory of Constructional Material Science

¹*Institute of Engineering Science of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*

²*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*

*E-mail: natashasoboleva@list.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9522-4167>⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9463-1473>

Abstract: Laser cladding allows obtaining hardening and restorative coatings and is widely used in various branches of engineering. Self-fluxing Ni-Cr-B-Si alloys proved to be wear-resistant alloys for deposition. The relatively low melting point of NiCrBSi powders allows adding hard particles in the matrix material and, thereby, creating composite coatings with particles not dissolved during the deposition. WC/W₂C, Cr₃C₂, SiC, TaC, NiC, VC, and TiC additives are used as reinforcing carbide particles when creating composite coatings based on NiCrBSi. The study of wear patterns of the NiCrBSi–Cr₃C₂ composite coating characterized by the increased resistance to corrosion and oxidation at high temperatures is of particular scientific and practical interest. When studying, the authors added 15 wt. % of Cr₃C₂ powder with the particle size of 50–150 μm to PG-SR2 powder (chemical composition, wt. %: 0.48 % C; 14.8 % Cr; 2.6 % Fe; 2.9 % Si; 2.1 % B; the rest is Ni) with the particle size of 40–160 μm during gas powder laser cladding. Using scanning electron microscopy, the authors identified that such addition of chromium carbide to NiCrBSi powder caused the formation of a composite coating during laser cladding since the structure contains the initial nondissolved Cr₃C₂ chromium carbides. NiCrBSi – Cr₃C₂ coating has improved microhardness. The authors carried out abrasion tests for fixed abrasive material – corundum, determined abrasive wear intensity, friction coefficient, and specific work of abrasive wear, and studied the wear surfaces of NiCrBSi and NiCrBSi–Cr₃C₂ coatings. The study identified a significant increase in abrasive wear resistance of the composite coating in response to the change of the main wear mechanism (from micro-cutting for NiCrBSi coating to scratching for NiCrBSi–Cr₃C₂ coating).

Keywords: gas powder laser cladding; NiCrBSi coating; NiCrBSi–Cr₃C₂ coating; composite coating; structure; abrasive wear.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Grant of the President of the Russian Federation МК-391.2019.8 within the state assignments of the Institute of Engineering Science, RAS (Ural Branch) on the topic No. АААА-А18-118020790147-4, the Institute of Physics and Mathematics, RAS (Ural Branch) on topics No. АААА-А18-118020190116-6 and the “Laser”. 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 IX International School of Physical Materials Science (SPM-2019) with elements of a scientific school for young adults, Togliatti, September 9–13, 2019.

For citation: 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.