

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ
НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ NiCrBSiC-WC

**А.Е. Затока¹, Д.В. Дробот², С.П. Мерчев³, С.В. Невежин⁴, А.С. Герасимов⁵,
Д.А. Ронжин^{2,@}**

¹ООО «Технологический центр «Техникорд», Москва 140000, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

³ООО «Технологические системы защитных покрытий», Москва 108852, Россия

⁴ООО «Технологии модификации поверхности», Астрахань 414000, Россия

⁵Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва 119991, Россия

@Автор для переписки, e-mail: kynavino@bk.ru

В работе исследовано влияние технологических параметров лазерной наплавки на толщину твердосплавных композитных покрытий со схожей по составу и свойствам матрицей NiCrBSiC и разным типам упрочняющих включений (сферические карбиды вольфрама WC и карбиды вольфрама из отходов твердосплавного производства). Особое внимание обращено на физико-механические и служебные свойства композитов, в частности, твердость и стойкость к абразивному износу. Установлено, что толщина твердосплавных композитных покрытий возрастает с увеличением мощности лазера и расхода транспортирующего газа, а также с уменьшением скорости и шага наплавки. Выявлено, что при добавлении 50% масс. WC-матрица имеет меньшие значения твердости: 540–560 HV, что позволяет получать структуру твердосплавных композитных покрытий без трещин, тогда как при добавлении 80% масс. WC твердость матрицы твердосплавных композитных покрытий повышается до 670 HV и структура покрытий без трещин не обеспечивается. Износостойкость композитов NiCrBSiC-WC, как и склонность к трещинообразованию, увеличивается с ростом процентного содержания карбида вольфрама. Отмечено, что износостойкость покрытия, полученного из порошка Техникорд 655-СЛ с упрочнением карбидом вольфрама из отходов твердосплавного производства, сопоставима с таковой для покрытий с добавлением сферического карбида вольфрама Текмат WC-125. Покрытия из композитов NiCrBSiC-WC, полученные методом лазерной наплавки, позволяют повысить ресурс оборудования телеметрических систем. Удастся предотвратить истирание и обеспечить срок службы контактных площадок резистивиметра до 500 ч.

Ключевые слова: лазерная наплавка, композитное покрытие, твердость и износостойкость покрытия.

DOI: 10.32362/2410-6593-2018-13-4-58-66

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF LASER SURFACING
ON THE PROPERTIES OF NiCrBSiC-WC COMPOSITES

**A.E. Zatoka¹, D.V. Drobot², S.P. Merchev³, S.V. Nevezhin⁴, A.S. Gerasimov⁵,
D.A. Ronzhin^{2,@}**

¹Technology Center “Tekhnikord” Ltd., Moscow 140000, Russia

²MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

³“Technological Systems of Protective Coatings” Ltd., Moscow 108852, Russia

⁴“Technologies of Surface Modification” Ltd., Astrakhan 414000, Russia

⁵National University of Science and Technology “MISiS”, Moscow 119991, Russia

@Corresponding author e-mail: kynavino@bk.ru

It was investigated the influence of technological parameters of laser cladding on the thickness of the carbide composite coatings with similar composition and properties of matrix and different types of reinforcing inclusions (spherical tungsten carbides (WC) and recycled carbides). Special attention is paid to physical-mechanical and service properties of the composites such as hardness and resistance to abrasive wear. It is established that the thickness of the carbide composite coatings increases with increasing laser power and flow rate of the carrier gas, and with decreasing speed of the laser and the step of cladding. The study showed that at the addition of 50 wt.% WC matrix has smaller hardness values 540-560 HV, which allows to obtain the structure of the carbide composite coatings without cracks. At the same time, at addition of 80 wt.% WC matrix has higher hardness 670 HV, which does not provide the structure without cracks. Resistance of composites NiCrBSiC-WC to cracking, as well as their wear resistance, increases with increasing content of tungsten carbide. The wear resistance of the coatings received from powder Technicord 655-SL, with a reinforcement by recycled carbide, comparable to that for coatings from spherical tungsten carbide Tekmat WC-125. Coatings NiCrBSiC-WC, obtained by laser cladding, are used to increase the service life of the equipment telemetering systems, in particular, it is possible to prevent of abrasion and provide of increasing the service life of the contact pads of the equipment for measurement while drilling.

Keywords: laser cladding, composite coatings, hardness and wear resistance of the coating.

Введение

Технология лазерной наплавки применяется для нанесения твердосплавных композитных покрытий на изнашиваемые части узлов оборудования ответственного назначения, например, оборудования телеметрических систем, предназначенного для геофизических исследований скважин и контроля забойных параметров процессов бурения с целью обеспечения требуемого срока их службы.

В настоящее время для защиты от износа широкое применение нашли самофлюсующиеся материалы NiCrBSiC¹: хром обеспечивает стойкость к окислению и коррозии при повышенных температурах; бор и углерод, в свою очередь, понижают температуру плавления и способствуют формированию карбоборидов, повышая твердость и износостойкость покрытий; кремний добавляют для увеличения смачиваемости основы жидким металлом [1]. В результате легирования бором и кремнием в процессе наплавки также происходит самофлюсование: при высоких температурах образуется стекловидное шлаковое покрытие, защищающее металл наплавки от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха [2]. Сплавы NiCrBSiC имеют низкую температуру плавления, что способствует уменьшению термического воздействия на деталь в процессе наплавки, за счет чего уровень остаточных деформаций и напряжений в основе значительно снижается [3–5].

Лазерная наплавка композитных твердосплавных покрытий NiCrBSiC+WC является одним из наиболее эффективных методов, применяемых для защиты от износа, среди таких альтернативных методов нанесения покрытий, как газотермическое напыление и плазменная наплавка покрытий, упрочненных соединениями WC/W₂C, Cr₃C₂, SiC, TaC,

¹ГОСТ 21448-75. Порошки из сплавов для наплавки. Технические условия.

TiB₂, и использования износостойких сталей типа Hardox 400 [6–10]. В настоящее время опубликовано большое количество работ [11–14], в которых сопоставляются методы нанесения композитных твердосплавных покрытий NiCrBSiC с различным содержанием упрочняющих включений. При этом сравнение характеристик композитных твердосплавных покрытий с разными типами упрочняющих включений приведены лишь в отдельных публикациях, что не позволяет оценить эффективность применения твердосплавных покрытий NiCrBSiC+WC для повышения ресурса оборудования, подверженного комплексу разрушающих факторов [15].

Цель настоящей работы – установить зависимость толщины композитного покрытия от параметров лазерной наплавки, а также проследить влияние типа упрочняющих включений на его твердость и износостойкость.

Методическая часть

При нанесении покрытий использовали порошок Техникорд 655 СЛ (Технологический центр «Техникорд», Россия) с упрочнением карбидами вольфрама из отходов твердосплавного производства. Помимо этого, для лазерной наплавки в качестве матрицы композитных покрытий брали самофлюсующийся сплав Höganäs 1035-40 (Компания Höganäs, Швеция), в качестве упрочняющих включений – порошки сферических карбидов вольфрама Tekmat WC-125 (Компания Текна, Италия). Химический состав данных порошков представлен в табл. 1.

Подложкой служила низкоуглеродистая сталь Ст20, размер образцов 25×45×10 мм.

С целью установления влияния режимов лазерной наплавки на толщину композитного покрытия из порошка Техникорд 655-СЛ использовали четырехфакторный эксперимент для линейной модели в виде

полуребрики 2⁺¹ по критериям ортогональности и ротатабельности. Функцией отклика являлась толщина наносимого покрытия. Факторы и интервалы их варьирования, приведенные в табл. 2, соответствуют типовым значениям для лазерной наплавки. Отработанные режимы использовали для нанесения композитных покрытий NiCrBSiC+WC, упрочненных сферическим карбидом вольфрама. Условия проведения экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 1. Химический состав исследуемых материалов

Порошки	Химический состав, % масс.
Техникорд 655-СЛ	Ni – осн.; Cr – 12.8; В – 1.00; Si – 1.48; W – 24.7; С – 0.24; Fe – 3.25
Höganäs 1035-40	Ni – осн.; Cr – 6.67; В – 1.22; Si – 0.45; С – 0.30; Fe – 3.37
Tekmat WC-125	W – осн.; С – 4.10; Fe – 0.53; Ni – 0.51; Cr – 0.44

Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью инструмента Design of experiments и Multiple Regression программного пакета STATISTICA 10².

Покрытия наносили при помощи комплекса лазерной наплавки LDF 6000-100 (Компания Trumpf, Германия; лазерная голова Process Optic) по методике [16].

С целью исследования микроструктуры образцов заранее готовили микрошлифы, для чего наплавленное покрытие резали, прессовали, шлифовали и полировали. Резку образцов осуществляли на прецизионном отрезном станке типа BRILLANT 220 (АТМ, Германия). Использовали также корундовые отрезные диски Ø 150×0.45×12.7 мм. Подготовку поверхности «таблетки» выполняли на шлифовально-полировальной машине Saphir 520 (АТМ, Германия). Запрессовку образцов проводили на ги-

Таблица 2. Факторы и интервалы их варьирования

Фактор	Наименование	Обозначение	Уровни			Интервал
			нижний	основной	верхний	
X1	Мощность лазера, кВт	P	1	1.25	1.5	0.25
X2	Скорость наплавки, м/мин	V	0.004	0.006	0.008	0.002
X3	Шаг наплавки, мм	L	1.2	1.4	1.6	0.2
X4	Расход транспортир.газа, л/мин	G	12	18	24	4

Таблица 3. Условия проведения эксперимента

№ эксперимента	Факторы эксперимента				Критерий оптимизации
	X1, кВт	X2, м/мин	X3, мм	X4, л/мин	
1	1	0.004	1.2	12	2.8
2	1.5	0.004	1.6	12	2.5
3	1	0.004	1.6	24	2.3
4	1	0.008	1.2	24	1.4
5	1.5	0.008	1.2	12	1.7
6	1.5	0.004	1.2	24	3.5
7	1	0.008	1.6	12	1.2
8	1.5	0.008	1.6	24	2.8

дравлическом прессе Opal 460 (АТМ, Германия), оснащенной системой нагрева и водяного охлаждения

Для полученных образцов исследовали структуру и измеряли микротвердость по Викерсу с помощью автоматического микротвердомера ZHVμ-AF (Zwick/Roell, Германия) с программным обеспечением для обработки результатов. Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» при нагрузке 200 гс. Толщину покрытия измеряли с помощью оптического микроскопа Axiovert 40 MAT (Carl Zeiss, Германия). Износостойкость покрытий определяли, согласно стандарту ASTM G65-04 «Standard Test Method for Measuring Abrasion Using

the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus» по схеме сухой песок – обрезаемый диск. Абразивным материалом служил гранулированный кварцевый песок, величина зерна варьировалась от 150 до 425 мкм. Для обеспечения нужного размера зерна песок перед испытанием просеивали с помощью просеивающей машины «HAVER EML 200 Digital Plus T» (Компания HAVER & BOECKER, Германия). Содержание влаги в песке не превышало 0.5% от общей массы. При этом песок предварительно высушивали, нагревая до 100 °С и выдерживая при этой температуре в течение 90 мин.

²STATISTICA: Руководство пользователя. Copyright Stat Soft, 2011.

Испытания проводили по следующим режимам:

- длительность испытаний – 10 мин;
- нагрузка – 130 Н;
- скорость вращения диска – 200 об/мин.

Коэффициент износостойкости рассчитывали, исходя из объема, потерянного во время испытаний покрытия. Износ определяли путем взвешивания исследуемого образца до и после проведения испытаний. Взвешивание образцов осуществлялось на аналитических весах типа ES 520A Precisa (Швейцария) с точностью 0.0001 г.

Результаты и их обсуждение

Результаты регрессионного анализа экспериментальных данных по влиянию параметров лазерной наплавки на толщину композитного твердосплавного покрытия из порошка Техникорд 655-СЛ приведены в табл. 4, 5. Линейное уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным по критерию Фишера для ss -числа степеней свободы и заданного p -уровня значимости. Все коэффициенты уравнения регрессии статистически значимы по t -критерию Стьюдента для заданного p -уровня значимости.

Таблица 4. Оценка адекватности линейной модели

Фактор	Суммы квадратов (SS)	сс	Средние квадраты (MS)	F	p
(1) P, кВт	0.980000	1	0.980000	3.178378	0.017263
(2) V, м/мин	2.000000	1	2.000000	6.486486	0.008417
(3) L, мм	0.045000	1	0.045000	0.145946	0.072789
(4) G, л/мин	0.405000	1	0.405000	1.313514	0.0334890
Ошибка	0.925000	3	0.308333		
Ошибка SS	4.355000	7			

Таблица 5. Оценка статистической значимости регрессионных коэффициентов*

Фактор	1	2	3	4	5	6
Св. член			1.875	1.89324	0.99036	0.039500
P, кВт	0.474372	0.266082	1.400	0.78528	1.78280	0.017263
V, м/мин	-0.677674	0.266082	-250.000	98.16016	-2.54686	0.008417
L, мм	-0.101651	0.266082	-0.375	0.98160	-0.38203	0.072789
G, л/мин	0.304953	0.266082	0.038	0.03272	1.14609	0.033489

*Примечание: 1 – стандартизованные регрессионные коэффициенты Бета; 2 – стандартные ошибки Бета; 3 – обычные регрессионные коэффициенты B; 4 – стандартные ошибки B; 5 – $t(3)$; 6 – p -уровень.

Согласно результатам регрессионного анализа (табл. 5), зависимость толщины покрытия от параметров лазерной наплавки может быть оценена по уравнению регрессии:

$$S = 0.474 \times P - 0.678 \times V - 0.102 \times L + 0.305 \times G$$

Интерпретация приведенного уравнения показывает, что толщина твердосплавных композитных покрытий возрастает с увеличением мощности лазера и расхода транспортирующего газа, а также с уменьшением скорости лазера и шага наплавки.

Полученные в настоящей работе закономерности не противоречат литературным данным. Так, в [17] показано, что при лазерной наплавке толщина покрытия увеличивается с увеличением расхода транспортирующего газа (аргона) и мощности лазера. Нами выявлено, что увеличение мощности лазера на 0.25 кВт приводит к увеличению толщины наплавки в 1.8 раз, а увеличение расхода транспортирующего газа на 4 л/мин – к увеличению толщины в 1.5 раза. Менее значимым фактором является шаг наплавки:

уменьшение шага наплавки на 0.2 мм сопровождается увеличением толщины на треть. В то же время уменьшение скорости наплавки на 0.002 м/мин приводит к увеличению толщины наплавки в 2.5 раза.

С учетом результатов регрессионного анализа выбраны следующие режимы нанесения покрытий NiCrBSiC+WC:

- мощность лазера – 1350 Вт;
- скорость наплавки – 0.007 м/с;
- шаг наплавки – 1.6 мм;
- расход защитного газа аргона – 14 л/мин.

Регулировку расхода транспортирующего газа изменяли в зависимости от требуемого объемного содержания упрочняющих включений в композитных твердосплавных покрытиях.

Металлографические исследования композитных твердосплавных покрытий с различными типами упрочняющих включений (Техникорд 655-СЛ; Höganäs 1035 + 50% Tekmat WC-125; Höganäs 1035 + 80% Tekmat WC-125), показали, что имеются различия по твердости матрицы и упрочняющих включений (табл. 6).

Таблица 6. Твердость композитного твердосплавного покрытия

Название композитного твердосплавного покрытия	Твердость матрицы, HV _{0,2}	Твердость упрочняющих включений, HV _{0,2}
Höganäs 1035 + 50% Tekmat WC-125	561	2720
Höganäs 1035 + 80% Tekmat WC-125	674	2590
Техникорд 655-СЛ	620	1580

Очевидно, что при добавлении 50% масс. Tekmat WC-125 матрица покрытия обладает более низкими значениями твердости в сравнении с паспортными данными, и удастся получить структуру без трещин. При этом твердость упрочняющих включений карбидов соответствует паспортным данным. В то же время при добавлении 80% масс. Tekmat WC-125 в композитные

твердосплавные покрытия увеличивается твердость матрицы и снижается твердость упрочняющих включений в сравнении с паспортными данными, что приводит к образованию трещин (рис. 1), вероятно, вследствие декарбидизации первичного карбида вольфрама (WC) до вторичного W₂C и повышения содержания углерода в матричном сплаве NiCrBSiC [18].

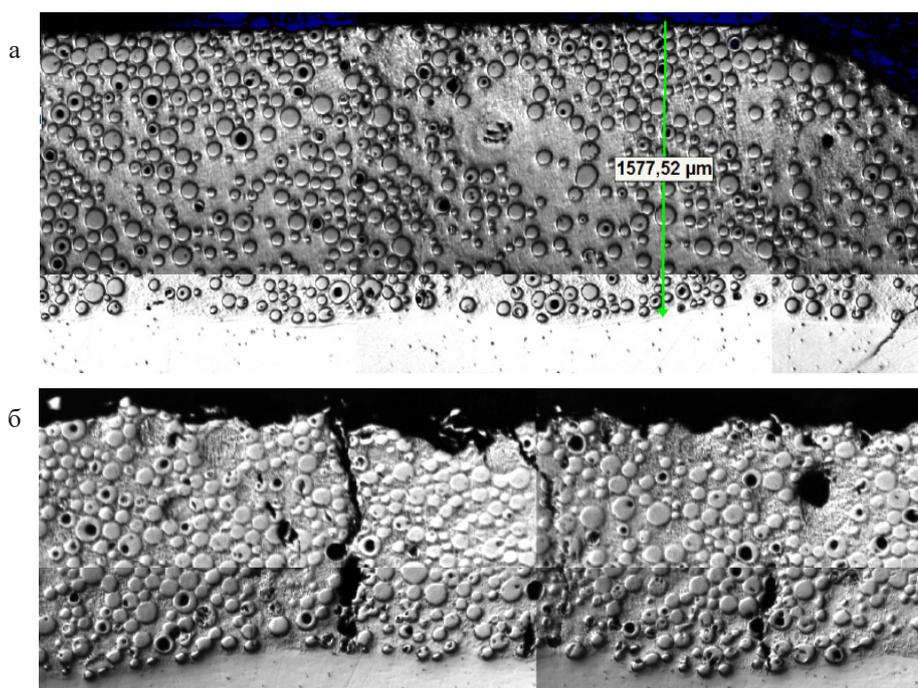


Рис. 1. Структура композитных покрытий при увеличении 500 мкм: Höganäs 1035 + 50% Tekmat WC-125 (а); Höganäs 1035 + 80% Tekmat WC-125 (б).

При нанесении покрытий из порошка Техникорд 655-СЛ нет необходимости в использовании механических смесей, поэтому удастся обеспечить равномерность распределения упрочняющих включений, предотвратить их растворение в металлической матрице, снизить количество трещин и пор в покрытии (рис. 2). В композитном твердосплавном покрытии из порошка Техни-

корд 655-СЛ матрица имеет схожие значения твердости с покрытием Höganäs 1035 + 50% Tekmat WC-125. Здесь упрочняющие включения карбидов из отходов твердосплавного производства имеют более низкие значения твердости по сравнению со сферическими карбидами вольфрама, обусловленные, по-видимому, типом исходного сырья, используемого для их производства.

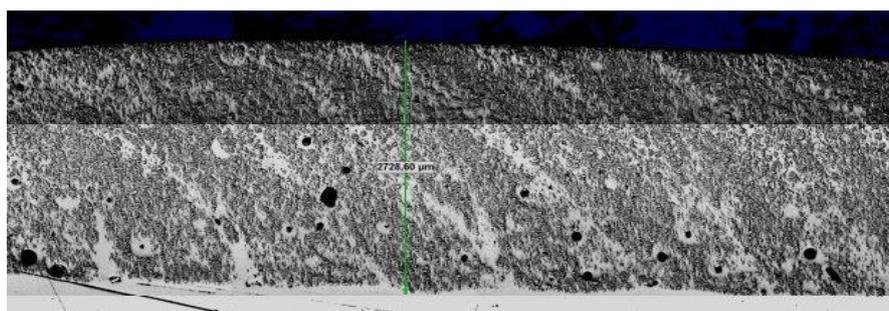


Рис. 2. Структура композитного покрытия Техникорд 655-СЛ при увеличении 1000 мкм.

Износостойкость покрытий

Роль упрочняющих фаз в композитах определяется их поведением при встрече с абразивом. Обычно они имеют более высокие механические свойства и характеризуются большей энергией разрушения, чем абразивы. Поэтому в процессе абразивного изнашивания столкновение с упрочняющей фазой приводит к частичному или полному разрушению абразивной частицы и к прекращению единичного акта изнашивания или уменьшению размеров повреждения [19]. Локальное поле напряжений, существующее вокруг частиц упрочняющих фаз, затрудняет движение дислокаций при пластической деформации, предшествующей разрушению металлической связки, тем самым затрудняя ее изнашивание. Функции барьеров на пути абразивных частиц упрочняющие фазы выполняют лучше в компактной форме: тонкие и длинные пластины упрочняющих фаз не в состоянии противостоять абразиву [20]. Этим объясняется большая эффективность упрочнения сплавов NiCrBSiC компактными карбидами вольфрама, которые образуют комплексы из частиц округлого сечения в сравнении с первичными фазами, выделяющимися при кристаллизации сплавов преимущественно в виде прямоугольников вытянутой формы.

Результаты испытаний износостойкости твердосплавных покрытий в соответствии с ASTM G65 показывают незначительную разницу в стойкости композитов с аналогичным содержанием карбидов различных типов (рис. 3).

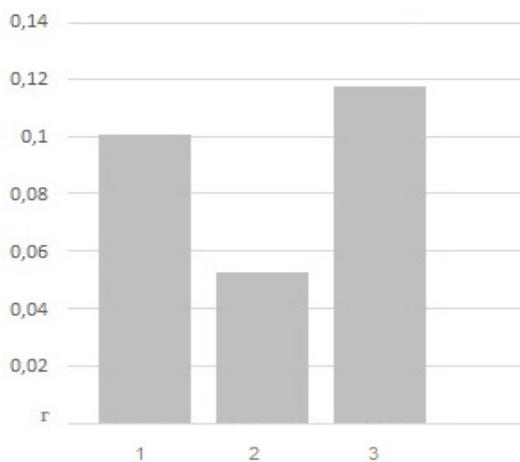


Рис. 3. Износостойкость покрытий:

- 1 – Höganäs 1035 + 50% Tekmat WC-125;
- 2 – Höganäs 1035 + 80% Tekmat WC-125;
- 3 – Техникорд 655-СЛ.

Износостойкость покрытия из порошка Техникорд 655-СЛ с упрочнением карбидами вольфрама из отходов твердосплавного производства сопоставима с таковой для покрытий с добавлением сферического карбида вольфрама Tekmat WC-125 при меньшей стоимости материала.

Полученные результаты согласуются с данными [15], где обсуждается стойкость к изнашиванию незакрепленным абразивом сплавов NiCrBSiC с различными видами карбидов в качестве упрочняющих фаз. Так, массовый износ композита NiCrBSiC + 50% WC в 2.5 раза ниже, чем у композитов NiCrBSiC + 50% TiC и NiCrBSiC + 50% VC.

Исследование стойкости композитов с карбидами TiC, NbC и WC при трении о закрепленные абразивные частицы показало [21], что в карбиде вольфрама высокая твердость сочетается с достаточной прочностью и пластичностью, вследствие чего абразивные частицы скользят по карбиду WC, не изнашивая его, в отличие от более твердых и хрупких карбидов TiC и NbC.

Из полученных данных следует, что покрытия из NiCrBSiC+WC, полученные методом лазерной наплавки, позволяют восстанавливать детали оборудования ответственного назначения.

В ходе эксплуатационных испытаний установлено, что для композитных твердосплавных покрытий, полученных плазменной наплавкой, истирание контактных площадок резистивиметра наступает после наработки в 350 ч. Композитные твердосплавные покрытия NiCrBSiC+WC, полученные по отработанной нами технологии лазерной наплавкой, продлевают срок службы резистивиметра до 500 ч (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид покрытий, полученных плазменной наплавкой (а) и лазерной наплавкой (б).

Выводы

В ходе проделанной работы нами установлено, что толщина твердосплавных композитных покрытий возрастает с увеличением мощности лазера и расхода транспортирующего газа, а также с уменьшением скорости и шага наплавки, наиболее значимым фактором является скорость наплавки. Склонность композитов NiCrBSiC+WC, полученных методом лазерной наплавки, к трещинообразованию, как и их износостойкость, увеличивается с ростом процентного содержания карбида вольфрама: матрица, содержащая 80% масс. карбидов, провоцирует образование трещин предположительно за счет растворения упрочняющих включений в матрице с изначально высокой твердостью и формирования хрупкой эвтектики путем декарбидизации первичного карбида.

да вольфрама WC до вторичного W₂C. Матрица с добавлением 50% масс. карбида позволяет обеспечить наименьшее смешение слоя с подложкой и растворение карбида, соответственно, предотвратить микропорезание матрицы абразивными частицами и выкрашивание из нее упрочняющих включений.

Износостойкость покрытия из порошка Техникорд 655-СЛ с упрочнением карбидом вольфрама из отходов твердосплавного производства сопоставима

с таковой для покрытий с добавлением сферического карбида вольфрама Tekmat WC-125. При этом стоимость производства порошка Техникорд 655-СЛ в 1.5-2 раза ниже из-за низкой стоимости исходного сырья.

В ходе эксплуатационных испытаний узлов оборудования телеметрических систем показано, что композитные покрытия, полученные лазерной наплавкой, продлевают срок службы оборудования до 500 ч.

Список литературы:

1. Mrdak M., Vencel A., Cosic M. Microstructure and mechanical properties of the Mo-NiCrBSi coating deposited by atmospheric plasma spraying // *FME Trans.* 2009. V. 37. P. 27–32.
2. Yang J., Liu F., Miao X., Yang F. Influence of laser cladding process on the magnetic properties of WC-FeNiCr metal-matrix composite coatings // *J. Mater. Process. Technol.* 2012. V. 212. P. 1862–1868.
3. Макаров А.В., Саврай Р.А., Осинцева А.Л., Малыгина И.Ю. Влияние химического состава на трибологические свойства хромоникелевых покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки // *Известия Челябинского научного центра.* 2009. № 2 (44). С. 28–33.
4. Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л., Поздеева Н.А. Влияние микроструктуры и фазового состава на трибологические свойства NiCrBSi лазерных покрытий // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 869–873.
5. Cai B., Tan Y.-F., He L., Tan H., Gao L. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings // *Trans. Nonferr. Metal. Soc. China.* 2013. V. 13. P. 1681–1688.
6. Niranatlumpong P., Koiprasert H. Phase transformation of NiCrBSi-WC and NiBSi-WC arc sprayed coatings // *Surf. Coat. Tech.* 2011. V. 206. P. 440–445.
7. Guo Ch., Chen J., Zhou J., Zhao J., Wang L., Yu Y., Zhou H. Effects of WC–Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating // *Surf. Coat. Tech.* 2012. V. 206. P. 2064–2071.
8. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P. Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries // *Wear.* 2012. V. 274-275. P. 345–354.
9. Si S.-H., Yuan X.-M., Liu Y.-L., He Y.-Z., Keesam Sh. Effect of laser power on microstructure and wear resistance of WCP/Ni cermet coating // *J. Iron Steel Res. Int.* 2006. V. 13. Iss. 3. P. 74–78.
10. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadi H., Gol A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays // *J.*

References:

1. Mrdak M., Vencel A., Cosic M. Microstructure and mechanical properties of the Mo-NiCrBSi coating deposited by atmospheric plasma spraying. *FME Trans.* 2009; 37: 27-32.
2. Yang J., Liu F., Miao X., Yang F. Influence of laser cladding process on the magnetic properties of WC-FeNiCr metal-matrix composite coatings. *J. Mater. Process. Technol.* 2012; 212: 1862-1868.
3. Makarov A.V., Savray R.A., Osintseva A.L., Malygina I.Yu. The influence of the chemical composition on the tribological properties of chromium-nickel coatings obtained by the method of gas-powder laser welding. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra* (Bull. of Chelyabinsk Scientific Center). 2009; 2(44): 28-33. (in Russ.)
4. Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L., Pozdeeva N.A. Effect of microstructure and phase composition on the tribological properties of NiCrBSi laser coatings. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* (Bull. of Samara Scientific Center RAS). 2011; 13(4(3)): 869-873 (in Russ.)
5. Cai B., Tan Y.-F., He L., Tan H., Gao L. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings. *Trans. Nonferr. Metal. Soc. China.* 2013; 13: 1681-1688.
6. Niranatlumpong P., Koiprasert H. Phase transformation of NiCrBSi-WC and NiBSi-WC arc sprayed coatings. *Surf. Coat. Tech.* 2011; 206: 440-445.
7. Guo Ch., Chen J., Zhou J., Zhao J., Wang L., Yu Y., Zhou H. Effects of WC–Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating. *Surf. Coat. Tech.* 2012; 206: 2064-2071.
8. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A. P. Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries. *Wear.* 2012; 274-275: 345-354.
9. Si S.-H., Yuan X.-M., Liu Y.-L., He Y.-Z., Keesam Sh. Effect of laser power on microstructure and wear resistance of WCP/Ni cermet coating. *J. Iron Steel Res. Int.* 2006; 13(3): 74-78.
10. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadi H., Gol A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays. *J. Manuf.*

Manuf. Process. 2014. V. 16. P. 4–25.

11. Zikin A., Antonov M., Hussainova I., Katona L., Gavrilovic' A. High temperature wear of cermet particle reinforced NiCrBSi hardfacings // *Tribol. Int.* 2013. V. 98. P. 45–55.

12. Li Q., Song G.M., Zhang Y.Z., Lei T.C., Chen W.Z. Microstructure and dry sliding wear behavior of laser clad Ni-based alloy coating with the addition of SiC // *Wear.* 2003. V. 254. Iss. 3-4. P. 222–229.

13. Chao M.-J., Wang W.-L., Liang E.-J., Ouyang D. Microstructure and wear resistance of TaC reinforced Ni-based coating by laser cladding // *Surf. Coat. Tech.* 2008. V. 202. P. 1918–1922.

14. Yan H., Zhang P., Yu Zh., Lu Q., Yang Sh., Li Ch. Microstructure and tribological properties of laser-clad Ni-Cr/TiB₂ composite coatings on copper with the addition of CaF₂ // *Surf. Coat. Tech.* 2012. V. 206. P. 4046–4053.

15. Nurminen J., Näkki J., Vuoristo P. Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding // *Int. J. Refract. Metal. Hard Mater.* 2009. V. 27. № 2. P. 472–478.

16. Мисюров А.И., Федоров Б.М., Шиганов И.Н. Технология лазерной наплавки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 40 с.

17. Морозов Е.А. Исследование свойств покрытия из легированной стали, полученного лазерной наплавкой // *Современные проблемы науки и образования.* 2015. № 2(1). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20536>

18. Егунов А.И., Артеменко Ю.А., Путинцева М.Н., Чирков А.Е. Коаксиальная лазерная газопорошковая наплавка композиционного сплава системы WC+NiCrBSi: Влияние фазовых и структурных превращений на параметры качества покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2013. № 5. С. 22–26.

19. Shengfeng Z., Jiando L., Xiaoqin D., Jindo G., Zhengie G., Hongdo P. A comparative study of the structure and wear resistance of NiCrBSi/50 wt.% WC composite coatings by laser cladding and laser induction hybrid cladding // *Int. J. Refract. Metal. Hard Mater.* 2016. V. 60. P. 17–27.

20. Крагельский И.В. Трение и износ. Беларусь: Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, 2008. 224 с.

21. Филиппов М.А., Бараз В.Р., Гервасьев М.А., Розенбаум М.М. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении. Т. 1. Стали и чугуны. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 232 с.

Process. 2014; 16: 4-25.

11. Zikin A., Antonov M., Hussainova I., Katona L., Gavrilovic' A. High temperature wear of cermet particle reinforced NiCrBSi hardfacings. *Tribol. Int.* 2013; 98: 45-55.

12. Li Q., Song G.M., Zhang Y.Z., Lei T.C., Chen W.Z. Microstructure and dry sliding wear behavior of laser clad Ni-based alloy coating with the addition of SiC. *Wear.* 2003; 254(3-4): 222-229.

13. Chao M.-J., Wang W.-L., Liang E.-J., Ouyang D. Microstructure and wear resistance of TaC reinforced Ni-based coating by laser cladding. *Surf. Coat. Tech.* 2008; 202: 1918-1922.

14. Yan H., Zhang P., Yu Zh., Lu Q., Yang Sh., Li Ch. Microstructure and tribological properties of laser-clad Ni-Cr/TiB₂ composite coatings on copper with the addition of CaF₂. *Surf. Coat. Tech.* 2012; 206: 4046-4053.

15. Nurminen J., Näkki J., Vuoristo P. Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding. *Int. J. Refract. Metal. Hard Mater.* 2009; 27(2): 472-478.

16. Misyurov A.I., Fedorov B.M., Shiganov I.N. The technology of laser surfacing. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2004. 40 p. (in Russ.)

17. Morozov E.A. Investigation of the properties of a coating of alloyed slab obtained by laser surfacing. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* (Modern Problems of Science and Education). 2015; 2(1). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20536> (in Russ.).

18. Egunov A.I., Artemenko Yu.A., Putintseva M.N., Chirkov A.E. Coaxial laser gas-powder overlaying of composite alloy of WC + NiCrBSi system: Influence of phase and structural transformations on parameters of coating quality. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya* (Hardening Technologies and Coatings). 2013; (5): 22-26. (in Russ.)

19. Shengfeng Z., Jiando L., Xiaoqin D., Jindo G., Zhengie G., Hongdo P. A comparative study of the structure and wear resistance of NiCrBSi/50 wt.% WC composite coatings by laser cladding and laser induction hybrid cladding. *Int. J. Refract. Metal. Hard Mater.* 2016; 60: 17-27.

20. Kragel'skiy I.V. Friction and wear. Belarus: V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems Publ., 2008. 224 p. (in Russ.).

21. Filippov M.A., Baraz V.R., Gervasiev M.A., Rosenbaum M.M. Methodology of selection of metal alloys and hardening technologies in mechanical engineering. V. 1. Steel and cast iron. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2013. 232 p. (in Russ.)

Об авторах:

Затока Анатолий Ефимович, кандидат технических наук, директор ООО «Технологический Центр “Техникорд”» (140000, Россия, г. Люберцы, Октябрьский проспект, д. 259-а).

Дробот Дмитрий Васильевич, доктор химических наук, профессор кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов им. К.А. Большакова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: dvdrobot@mail.ru

Мерчев Сергей Петрович, заместитель генерального директора ООО «Технологические системы защитных покрытий» (108851, Россия, Москва, Щербинка, Симферопольское ш., д. 19). E-mail: s.merchev@tspc.ru

Невежин Станислав Владимирович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора ООО «Технологии модификации поверхности» (414000, Россия, Астрахань, ул. 1-я Вишневая, д. 3). E-mail: nsv@otempo.ru

Герасимов Андрей Сергеевич, научный сотрудник, ФГАОУ НИТУ «Московский институт сталей и сплавов» (19991, Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: Gera1_23@mail.ru

Ронжин Дмитрий Александрович, магистрант кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов им. К.А. Большакова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: kynavino@bk.ru

About the authors:

Anatoly E. Zatoka, Ph.D. (Eng.), Director, Technology Center “Tekhnikord” Ltd. (259-a, Oktyabr'skiy Pr., Lyubertsy 140000, Russia).

Dmitry V. Drobot, D.Sc. (Chem.), Professor, K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanoscale and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia). E-mail: dvdrobot@mail.ru

Sergey P. Merchev, Deputy General Director, “Technological Systems of Protective Coatings” Ltd. (19, Simferopol shosse, Shcherbinka, Moscow 108851, Russia). E-mail: s.merchev@tspc.ru

Stanislav V. Nevezhin, Ph.D. (Eng.), Deputy General Director, “Technologies of Surface Modification” Ltd. (3, 1st Vishnevaya st., Astrakhan 414000, Russia). E-mail: nsv@otempo.ru

Andrey S. Gerasimov, Research Scientist, National University of Science and Technology MISiS (4, Leninsky Pr., Moscow 19991, Russia). E-mail: Gera1_23@mail.ru

Dmitry A. Ronzhin, Graduate Student, K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanoscale and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia). E-mail: kynavino@bk.ru

Для цитирования: Затока А.Е., Дробот Д.В., Мерчев С.П., Невежин С.В., Герасимов А.С., Ронжин Д.А. Влияние технологических параметров лазерной наплавки на свойства композитов NiCrBSiC-WC // Тонкие химические технологии / Fine Chemical Technologies. 2018. Т. 13. № 4. С. 58–66.

For citation: Zatoka A.E., Drobot D.V., Merchev S.P., Nevezhin S.V., Gerasimov A.S., Ronzhin D.A. The influence of technological parameters of laser surfacing on the properties of NiCrBSiC-WC composites. *Tonkie khimicheskie tekhnologii / Fine Chemical Technologies*. 2018; 13(4): 58-66. (in Russ.)