УДК 621.791.92:620.178

КОНТАКТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ NICrbsi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки*

Р.А. САВРАЙ, канд. техн. наук А.В. МАКАРОВ, доктор техн. наук, с.н.с. Н.Н. СОБОЛЕВА, м.н.с. И.Ю. МАЛЫГИНА, канд. техн. наук А.Л. ОСИНЦЕВА, канд. техн. наук, с.н.с. (ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург)

> Поступила: 02 ноября 2014 Рецензирование: 10 ноября 2014 Принята к печати: 15 ноября 2014

Соболева Н.Н. – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34, Институт машиноведения УрО РАН, e-mail: natashasoboleva@list.ru

Исследована контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки из порошков с различным содержанием хрома, бора, углерода (ПГ-СР2, масс. %: 14,8 Сг – 2,1 В – 0,48 С; ПГ-10Н-01, масс. %: 18,2 Сг – 3,3 В – 0,92 С) и добавкой карбида титана (ПГ-СР2 + 25 масс. % TiC). Средняя микротвердость составила 520 HV у покрытия ПГ-СР2, 720 HV у покрытия ПГ-10H-01 и 770 HV у покрытия TiC – ПГ-СР2. Испытания на контактную усталость проводили на сервогидравлической установке Instron 8801 по схеме пульсирующего неударного контакта «шар-плоскость» с изменением нагрузки в цикле по синусоидальному закону. Установлено, что наибольшей способностью сопротивляться контактному воздействию в условиях повторяющегося упругопластического деформирования при механическом неударном контактном нагружении обладает покрытие ПГ-10H-01 с повышенным содержания хрома, бора и углерода по сравнению с ПГ-СР2, а наименьшей – композиционное покрытие ПГ-СР2 с добавкой 25 масс. % карбида титана TiC. Исследование пятен контакта методом электронной сканирующей микроскопии показало, что основным механизмом разрушения при контактно-усталостном нагружении всех исследованных покрытий является трещинообразование.

Ключевые слова: лазерная наплавка, покрытия NiCrBSi, карбид TiC, структура, микротвердость, контактная усталость.

Введение

Нанесение покрытий методом газопорошковой лазерной наплавки, когда тонкий поверхностный слой основного металла оплавляется лазерным лучом совместно с присадочным материалом [1], является современным способом упрочнения, повышения износостойкости, а также восстановления изношенных поверхностей деталей машин. В этой связи достаточно широкое применение находят покрытия на хромоникелевой основе, в частности, сплавы системы NiCrBSi [2, 3], которые наряду с отличными технологическими свойствами [4] имеют хорошие характеристики износостойкости, коррозионной стойкости и теплостойкости [2, 5, 6]. Кроме того, повышенное содержание углерода, хрома и бора в исходном порошке системы NiCrBSi способ-

^{*} Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований РАН, проект № 12-Т-1-1010 и гранта РФФИ № 13-01-00732_а. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

CM

ствует формированию при наплавке покрытий с большей твердостью и износостойкостью в условиях абразивного и адгезионного изнашивания [7–10].

Известно, что одним из резервов дальнейшего повышения износостойкости NiCrBSi наплавок является создание на их основе композиционных покрытий при введении в состав порошков различных добавок. В качестве упрочняющих фаз таких покрытий может быть использован карбид титана ТіС, обладающий высокими значениями твердости, модуля упругости, температуры плавления, а также термической и химической стабильностью [6, 11–13]. Наши исследования показали возможность формирования композиционных покрытий TiC - NiCrBSi с повышенной твердостью и абразивной износостойкостью, когда в процессе газопорошковой лазерной наплавки в наплавляемый NiCrBSi порошок марки ПГ-СР2 добавляется порошок карбида титана TiC в количестве 15 и 25 мас. % [14].

Наряду с износостойкостью важной характеристикой, определяющей качество многих машиностроительных материалов и покрытий, является способность материала выдерживать контактные нагрузки [15], которую, как правило, оценивают по характеру разрушения после однократного или повторяющегося (циклического) нагружения поверхности инденторами различной формы [15–19]. Однократное нагружение не всегда позволяет адекватно оценить стойкость материала к внешнему контактному воздействию, поскольку не учитывает процессы усталостной деградации [17, 18].

В литературе имеются лишь отдельные сведения о проведении циклического нагружения NiCrBSi покрытий [15] и отсутствуют данные о влиянии химического и фазового состава порошков на контактную усталость таких покрытий. Целью настоящей работы явилось исследование контактной выносливости NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки из порошков с различным содержанием хрома, бора, углерода и добавками карбида титана TiC.

Методика экспериментального исследования

В качестве материалов для покрытий были использованы порошки сплавов системы NiCrBSi гранулометрического состава 40...160 мкм – ПГ-СР2 и ПГ-10Н-01 (см. таблицу). Для исследования покрытия с добавкой карбида титана использовалась порошковая смесь, полученная перемешиванием двух порошков: порошка ПГ-СР2 и порошка ТiC гранулометрического состава 50...100 мкм в количестве 25 масс. %.

Наплавку порошков на пластины из стали Ст.3 проводили непрерывным CO₂-лазером при мощности излучения 1,4...1,6 кВт, скорости 160...200 мм/мин, расходе порошка 2,9... 4,9 г/мин, размере лазерного пятна на поверхности 6×1,5 мм. Порошковая смесь транспортировалась в зону наплавки инертным газом – аргоном при давлении 0,5 атм. Для уменьшения поверхностных напряжений наплавка осуществлялась в два прохода путем наложения одного слоя на другой. Толщина покрытий составила 0,6... 1,7 мм. Для устранения волнистости наплавленная поверхность подвергалась шлифованию с интенсивным охлаждением.

Механические испытания на контактную усталость проводили на сервогидравлической установке Instron 8801 с использованием специальной оснастки оригинальной конструкции по схеме пульсирующего неударного контакта «шар-плоскость» с изменением нагрузки в цикле по периодическому (синусоидальному) закону, диаметром стального шара 12,7 мм, предварительной нагрузкой $P_0 = 0,1$ кН, максимальной нагрузкой $P_{\text{max}} = 8,7$ кН, частотой нагружения f = 35 Гц на базе $N = 10^6$ циклов нагружения (рис. 1).

Марка порошка	Содержание элементов, масс. %						
	С	Cr	Ni	Fe	Si	В	TiC
ПГ-СР2	0,48	14,8	Осн.	2,6	2,9	2,1	_
ПГ-10Н-01	0,92	18,2	Осн.	3,4	4,2	3,3	_
ТiC – ПГ-СР2	0,36	11,1	Осн.	2,0	2,2	1,6	25

Химический состав исследуемых покрытий

Структуру и фазовый состав покрытий, а также поверхности после механических испытаний изучали с применением сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU с системами рентгеновского волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700 и энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450.



Рис. 1. Схема механических испытаний на контактную усталость

Для измерения микротвердости покрытий применяли микротвердомеры Leica VMHT и Wilson & Wolpert 402 MVD при нагрузке на индентор 0,98 H и времени нагружения 15 с. Трехмерные изображения пятен контакта получали с помощью оптического профилометра Wyko NT-1100.

Результаты и обсуждение

Общий вид хромоникелевого покрытия, сформировавшегося на поверхности стальной пластины при газопорошковой лазерной наплавке, приведен на рис. 2. Покрытия по всей толщине характеризуются достаточно равномерным распределением структурных составляющих [8– 10, 14]. По данным рентгеноструктурного [20] и микрорентгеноспектрального методов анализа (рис. 3), металлическую основу всех исследованных покрытий составляет γ-твердый раствор на основе Ni и эвтектика, состоящая из γ и



Рис. 2. Общий вид покрытия ПГ-СР2

C_M

фазы Ni₃B, являющейся результатом взаимодействия между B и Ni в условиях быстрого нагрева и охлаждения [21].

Средняя микротвердость покрытия ПГ-СР2 составляет 520±10 HV. Повышение содержания углерода, бора и хрома приводит к повышению средней микротвердости в покрытии ПГ-10Н-01 до значений 720±30 HV. Добавление частиц карбида титана в количестве 25 % масс. способствует эффективному упрочнению покрытия ПГ-СР2 до уровня 770±60 HV [14]. Упрочняющей фазой покрытия ПГ-СР2 является карбид Cr₂₃C₆ (микротвердостью 1000...1150 HV) (рис. 3, а). Более легированное углеродом, бором и хромом покрытие ПГ-10Н-01 содержит в качестве упрочняющих фаз борид CrB (1950...2400 HV) и карбид Cr₇C₃ (1650...1800 HV) (рис. 3, б). Формирование карбидов с разными стехиометрическими соотношениями объясняется различным количеством хрома и углерода в составе наплавляемых порошков: с увеличением отношения Cr/C карбид Cr₂₃C₆ формируется легче, чем карбид Cr₇C₃ [22]. При добавлении 25 масс. % ТіС в состав порошка ПГ-СР2 при наплавке формируется композиционное покрытие [14], в котором наряду с дисперсными карбоборидами (Cr,Ni)₂₃(C,B)₆ и (Ti,Cr)(C,B) присутствуют крупные включения карбидов титана TiC (микротвердостью 2500... 2900 HV) (рис. 3, в).

Результаты контактно-усталостных испытаний исследованных покрытий представлены на рис. 4 и 5. В качестве критерия для оценки стойкости материалов в условиях циклического воздействия индентора используется изменение размера пятна контакта на поверхности покрытия в зависимости от числа циклов нагружения [15, 19, 23]. Из данных, приведенных на рис. 4, видно, что диаметр пятна контакта после 10⁴ циклов нагружения у покрытия ПГ-СР2 несколько больше, чем у покрытия ПГ-10Н-01. При этом при испытаниях на базе 10⁶ циклов с ростом числа циклов нагружения у покрытия ПГ-СР2 наблюдается более существенное увеличение размера контактных повреждений, чем у покрытия ПГ-10Н-01, где имеет место лишь незначительный рост диаметра пятна контакта (см. рис. 4). По-видимому, это обусловлено более высокой твердостью покрытия ПГ-10Н-01 (720±30 HV) по сравнению с менее легированным покрытием ПГ-СР2 (520±10 HV).



Рис. 3. Микроструктура покрытий после лазерной наплавки:

а – покрытие ПГ-СР2; *б* – покрытие ПГ-10Н-01; *в* – покрытие на основе ПГ-СР2 с добавкой ТіС в количестве 25 масс. %



Рис. 4. Влияние числа циклов нагружения N на изменение диаметра пятна контакта d при контактноусталостных испытаниях исследованных покрытий: 1 – покрытие ПГ-СР2; 2 – покрытие ПГ-10Н-01; 3 – покрытие на основе ПГ-СР2 с добавкой ТіС в количестве 25 масс. %

покрытие ПΓ-СР2 Композиционное с добавкой TiC, обладающее повышенной средней микротвердостью (770±60 HV) по сравнению с покрытиями ПГ-СР2 и ПГ-10Н-01, характеризуется наибольшим диаметром пятна контакта после 10⁴ циклов нагружения и значительным увеличением пятна контакта при 3×10⁵ циклов нагружения (см. рис. 4). Это может быть обусловлено влиянием особенностей разрушения карбидов на характеристики контактной усталости. Известно [17], что химический состав и тип карбидов оказывают сильное влияние на контактную стойкость и трещинообразование материалов с карбидным упрочнением. Кроме того, для повышения контактно-усталостной прочности сталей с покрытиями благоприятным является наличие более дисперсных и плотных карбидов, равномерно распределенных в матрице [24]. Из рис. 3, *в* следует, что карбиды ТіС в композиционном покрытии значительно более крупные, чем карбиды хрома разных стехиометрических составов в покрытиях ПГ-СР2 и ПГ-10H-01. Это приводит к снижению контактной выносливости композиционного покрытия TiC – ПГ-СР2.

Электронно-микроскопическое исследование и профилометрия пятен контакта (рис. 5) показало, что в процессе контактно-усталостного нагружения исследованных покрытий развиваются процессы трещинообразования, характеризующиеся возникновением многочисленных кольцевых и радиальных трещин. Кольцевые трещины (указаны стрелками на рис. 5), возникающие на поверхности покрытия в зоне действия максимальных растягивающих радиальных напряжений, способствуют снятию остаточных напряжений внутри покрытия [19] и когезионному разрушению (скалыванию покрытия у края лунки, рис. 5, б, г). У покрытий ПГ-СР2 и ТіС – ПГ-СР2 образование кольцевых трещин наблюдается уже после 10⁴ циклов нагружения; при числе циклов 3×10⁵ кольцевые трещины уже полностью сформированы и при дальнейшем нагружении наблюдается резкий рост диаметра пятна контакта (см. рис. 4). У покрытия ПГ-10H-01, напротив, при 3×10⁵ циклов нагружения наблюдается только начальная стадия образования кольцевых трещин. Слабое развитие кольцевых трещин у покрытия ПГ-10Н-01

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



Рис. 5. Пятна контакта после контактно-усталостных испытаний с числом циклов нагружения $N = 10^6$ исследованных покрытий:

а – покрытие ПГ-СР2; б – покрытие ПГ-10Н-01; в – покрытие на основе ПГ-СР2 с добавкой ТіС
 в количестве 25 масс. %; г – покрытие ПГ-СР2 (трехмерное изображение); а-в – электронная сканирующая микроскопия; г – оптическая профилометрия

обусловливает незначительный рост диаметра пятна контакта даже при 10⁶ циклов нагружения (см. рис. 4).

Выводы

Исследовано влияние состава NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки, на сопротивление контактно-усталостному разрушению при неударном циклическом нагружении по схеме контакта «шар-плоскость». Установлено, что повышенное содержание хрома, бора и углерода в покрытии ПГ-10H-01 со средним уровнем микротвердости 720 \pm 30 HV обеспечивает рост контактной выносливости по сравнению с менее легированным и твердым покрытием ПГ-СР2 (микротвердость 520 \pm 10 HV). Композиционное покрытие NiCrBSi–TiC, полученное при добавлении 25 масс. % карбида титана TiC в состав порошка ПГ-СР2, несмотря на максимальный средний уровень микротвердости (770 \pm 60 HV), обладает наименьшей стойкостью в условиях контактноусталостного нагружения вследствие наличия в покрытии крупных карбидов TiC, способствующих ускоренному трещинообразованию при пульсирующем механическом контакте. Основным механизмом разрушения всех исследованных покрытий является трещинообразование, характеризующееся возникновением кольцевых и радиальных трещин с последующим когезионным скалыванием покрытия у края лунки.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки: учеб. пособие для вузов. -М.: Высшая школа, 1987. - 191 с.

2. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings / C. Navas, R. Colaco, J. de Damborenea, R. Vilar // Surface and Coatings Technology. - 2006. - Vol. 200, iss. 24. - P. 6854-6862. - doi: 10.1016/j.surfcoat. 2005.10.032.

3. Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating / E. Fernández, M. Cadenas, R. Gonsález, C. Navas, R. Fernández, J. de Damborenea // Wear. - 2005. -Vol. 259, iss. 7-12. – P. 870–875. – doi: 10.1016/j. wear.2005.02.063.

4. Katsich C., Badisch E. Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions // Surface and Coatings Technology. - 2011. - Vol. 206, iss. 6. - P. 1062-1068. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.064.

5. Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy / K. Gurumoorthy, M. Kamaraj, K. Prasad Rao, Rao A. Sambasiva, S. Venugopal // Material Science and Engineering: A. -2007. - Vol. 456, iss. 1-2. - P. 11-19. - doi: 10.1016/j. msea.2.

6. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings / B. Cai, Y.-F. Tan, L. He, H. Tan, L. Gao // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. - 2013. - Vol. 23, iss. 6. - P. 1681-1688. - doi: 10.1016/S1003-6326(13)62648-5.

7. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW) // Surface and Coatings Technology. - 2010. - Vol. 205, iss. 3. - P. 759-765. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095.

8. Влияние химического состава на трибологические свойства хромоникелевых покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, А.Л. Осинцева, И.Ю. Малыгина // Известия Челябинского научного центра. -2009. – № 2 (44). – C. 28–33.

9. Вихретоковый контроль твердости, износостойкости и толщины покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, И.Ю. Малыгина, Л.Х. Коган, Р.А. Саврай, А.Л. Осинцева // Дефектоскопия. - 2009. -№ 11. – C. 68–78.

10. Влияние микроструктуры и фазового состава на трибологические свойства NiCrBSi лазерных покрытий / Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева, Н.А. Поздеева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011. - Т. 13, № 4 (3). – C. 869–873.

11. Characterisation of TiC-NiMo reinforced Nibased hardfacing / A. Zikin, E. Badisch, I. Hussainova, C. Tomastik, H. Danninger // Surface and Coatings Technology. - 2013. - Vol. 236. - P. 36-44. - doi: 10.1016/j. surfcoat.2013.02.027.

12. Microstructure and wear properties of TiC/ FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding / X.H. Wang, M. Zhang, X.M. Liu, S.Y. Qu, Z.D. Zou // Surface and Coatings Technology. -2008. - Vol. 202, iss. 15. - P. 3600-3606. - doi: 10.1016/j. surfcoat.2007.12.039.

13. TiC reinforced composite coating produced by powder feeding laser cladding / S. Yang, W.-J. Liu, M.-L. Zhong, Z.-J. Wang // Materials Letters. - 2004. -Vol. 58, iss. 24. – P. 2958–2962. – doi: 10.1016/j.matlet.2004.03.051.

14. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi - TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки / А.В. Макаров, Н.Н. Соболева, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2013. - № 11 (107). - С. 38-44.

15. Стойкость упрочненных материалов в условиях контактного нагружения / Л.И. Тушинский, В.А. Батаев, В.М. Потапов, А.А. Батаев, А.П. Тимофеев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1988. – № 5. – С. 36–38.

16. Yonezu A., Xu B., Chen X. An experimental methodology for characterizing fracture of hard thin films under cyclic contact loading // Thin Solid Films. - 2010. - Vol. 518, iss. 8. - P. 2082-2089. - doi: 10.1016/j. tsf.2009.07.199.

17. Influence of substrate microstructure on the contact fatigue strength of coated cold-work tool steels / G. Ramírez, A. Mestra, B. Casas, I. Valls, R. Martínez, R. Bueno, A. Góez, A. Mateo, L. Llanes // Surface and Coatings Technology. - 2012. - Vol. 206, iss. 13. -P. 3069–3081. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.12.012.

18. Contact fatigue behavior of PVD-coated steel / G. Ramírez, E. Tarrés, B. Casas, I. Valls, R. Martínez, L. Llanes // Plasma Processes and Polymers. - 2009. - Vol. 6, iss. Supplement 1. - P. S588-S591. doi: 10.1002/ppap.200931501.

19. Contact fatigue behavior of PVD-coated hardmetals / E. Tarrés, G. Ramírez, Y. Gaillard, E. Jiménez-Piqué, L. Llanes // International Journal of

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. – Vol. 27, iss. 2. – P. 323–331. – doi: 10.1016/j.ijrmhm.2008.05.003.

20. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Упрочняющая фрикционная обработка NiCrBSi лазерного покрытия // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 4 (61). – С. 79–85.

21. Dawei Z., Li T., Lei T.C. Laser cladding of Ni– $Cr_3C_2/(Ni+Cr)$ composite coating // Surface and Coatings Technology. – 1988. – Vol. 110, 1-2. – P. 81–85. – doi: 10.1016/S0257-8972(98)00675-6.

22. Comparison of laser-clad and furnace-melted Nibased alloy microstructures / Q. Li, D. Zhang, T. Lei, Ch. Chen, W. Chen // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol. 137, iss. 2-3. – P. 122–135. – doi: 10.1016/ S0257-8972(00)007 32-5.

23. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. – doi: 10.1016/j.apsusc. 2013.07.121.

24. Fatigue susceptibility under contact loading of hardmetals coated with ceramic films / L. Llanes, E. Tarrés, G. Ramírez, C.A. Botero, E. Jiménez-Piqué // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2, iss. 1. – P. 299–308. – doi: 10.1016/j.proeng. 2010.03.033.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE) N 4(65), October – December 2014, Pages 43–51

The contact endurance of NiCrBSi coatings obtained by gas powder laser cladding

Savrai R.A., Ph.D. (Engineering), e-mail: ras@imach.uran.ru
Makarov A.V., D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: avm@imp.uran.ru
Soboleva N.N., Junior Researcher, e-mail: natashasoboleva@list.ru
Malygina I.Yu., Ph.D. (Engineering), e-mail: malygina@imach.uran.ru
Osintseva A.L., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e-mail: osintseva@imach.uran.ru

Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 630049, Russian Federation

Abstract

The contact endurance of NiCrBSi coatings obtained by gas powder laser cladding of the powders with various chrome, carbon and boron content (PG-SR2, wt. %: 14.8 Cr - 2.1 B - 0.48 C; PG-10N-01, wt. %: 18.2 Cr - 3.3 B - 0.92 C) and TiC addition (PG-SR2 + 25 wt. % TiC) is investigated. The average microhardness was 520 HV for PG-SR coating, 720 HV for PG-10N-01 coating and 770 HV for TiC - PG-SR2 coating. Tests on the contact fatigue are carried out using a servohydraulic testing machine (Instron 8801) circuit-wise pulsating non-impact contact «ball-plane» scheme with the load variation during a cycle according to a sinusoidal law. The maximum resistance to a contact impact during repetitive elastic-plastic deformation on mechanical non-impact contact loading is determined for PG-10N-01 coating with increased chrome, carbon and boron content in comparison with PG-SP2, the minimal one was for composite PG-SR2 coating with addition 25 wt. % TiC particles. The examination of the contact spots using scanning electron microscopy shows that the main fracture mechanism of every investigated coating under contact fatigue loading is cracking.

Keywords:

laser cladding, NiCrBSi coatings, TiC titanium carbide, structure, microhardness, contact fatigue.

References

1. Grigor'yants A.G., Safonov A.N. *Lazernaya tekhnika i tekhnologiya. Kn. 3: Metody poverkhnostnoi lazernoi obrabotki* [Laser equipment and technology. Vol. 3: Methods of surface laser treatment]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 191 p.

49

2. Navas C., Colaco R., de Damborenea J., Vilar R. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayedmelted NiCrBSi coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, iss. 24, pp. 6854–6862. doi: 10.1016/j. surfcoat.2005.10.032

3. Fernández E., Cadenas M., Gonsález R., Navas C., Fernández R., de Damborenea J. Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating. *Wear*, 2005, vol. 259, iss. 7-12, pp. 870–875. doi: 10.1016/j.wear.2005.02.063

4. Katsich C., Badisch E. Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, iss. 6, pp. 1062–1068. doi: 10.1016/j. surfcoat.2011.07.064

5. Gurumoorthy K., Kamaraj M., Prasad Rao K., Sambasiva Rao A., Venugopal S. Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy. *Material Science and Engineering: A*, 2007, vol. 456, iss. 1-2, pp. 11–19. doi: 10.1016/j.msea.2006.12.121

6. Cai B., Tan Y.-f., He L., Tan H., Gao L. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, vol. 23, iss. 6, pp. 1681–1688. doi: 10.1016/S1003-6326(13)62648-5

7. Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW). *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, iss. 3, pp. 759–765. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.095

8. Makarov A.V, Savrai R.A., Osintseva A.L., Malygina I.Yu. Vliyanie khimicheskogo sostava na tribologicheskie svoistva khromonikelevykh pokrytii, poluchennykh metodom gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [Effect of chemical composition on the tribological properties of nickel-chromium coatings produced by gas-powder laser cladding]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra – Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center*, 2009, no. 2 (44), pp. 28–33.

9. Makarov A.V., Gorkunov E.S., Malygina I.Yu., Kogan L.Kh., Savrai R.A., Osintseva A.L. Vikhretokovyi kontrol' tverdosti, iznosostoikosti i tolshchiny pokrytii, poluchennykh metodom gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [Eddy-current testing of the hardness, wear resistance, and thickness of coatings prepared by gas-powder laser cladding]. *Defektoskopiya – Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, no. 11, pp. 68–78. (In Russian)

10. Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L., Pozdeeva N.A. Vliyanie mikrostruktury i fazovogo sostava na tribologicheskie svoistva NiCrBSi lazernykh pokrytii [The influence of the microstructure and phase composition on tribological performances of NiCrBSi laser coatings]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii Nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the RAS*, 2011, vol. 13, no. 4 (3), pp. 869–873.

11. Zikin A., Badisch E., Hussainova I., Tomastik C., Danninger H. Characterisation of TiC–NiMo reinforced Nibased hardfacing. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 236, pp. 36–44. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.027

12. Wang X.H., Zhang M., Liu X.M., Qu S.Y., Zou Z.D. Microstructure and wear properties of TiC/FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, iss. 15, pp. 3600–3606. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.12.039

13. Yang S., Liu W.-j., Zhong M.-l., Wang Z.-j. TiC reinforced composite coating produced by powder feeding laser cladding. *Materials Letters*, 2004, vol. 58, iss. 24, pp. 2958–2962. doi: 10.1016/j.matlet.2004.03.051

14. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L. Formirovanie kompozitsionnogo pokrytiya NiCrBSi – TiC s povyshennoi abrazivnoi iznosostoikost'yu metodom gazoporoshkovoi lazernoi naplavki [The formation of NiCrBSi–TiC composite coating with increased abrasive wear resistance by gas powder laser cladding]. *Uprochnyayushchie tekhnologii I pokrytiya – Hardening technology and coatings*, 2013, no. 11 (107), pp. 38–44.

15. Tushinskii L.I., Bataev V.A., Potapov V.M., Bataev A.A., Timofeev A.P. Stoikost' uprochnennykh materialov v usloviyakh kontaktnogo nagruzheniya [Life of hardened materials under the conditions of contact load]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 1988, no. 5, pp. 36–38. (In Russian)

16. Yonezu A., Xu B., Chen X. An experimental methodology for characterizing fracture of hard thin films under cyclic contact loading. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, iss. 8, pp. 2082–2089. doi: 10.1016/j.tsf.2009.07.199

17. Ramírez G., Mestra A., Casas B., Valls I., Martínez R., Bueno R., Góez A., Mateo A., Llanes L. Influence of substrate microstructure on the contact fatigue strength of coated cold-work tool steels. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, iss. 13, pp. 3069–3081. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.12.012

18. Ramírez G., Tarrés E., Casas B., Valls I., Martínez R., Llanes L. Contact Fatigue Behavior of PVD-Coated Steel. *Plasma Processes and Polymers*, 2009, vol. 6, iss. Supplement 1, pp. S588–S591. doi: 10.1002/ppap.200931501

19. Tarrés E., Ramírez G., Gaillard Y., Jiménez-Piqué E., Llanes L. Contact fatigue behavior of PVD-coated hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, vol. 27, iss. 2, pp. 323–331. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2008.05.003

CM

20. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu. Uprochnyayushchaya friktsionnaya obrabotka NiCrBSi lazernogo pokrytiya [Hardening frictional treatment of NiCrBSi laser clad coating]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 4 (61), pp. 79–85.

21. Dawei Z., Li T., Lei T.C. Laser cladding of Ni–Cr₃C₂/(Ni+Cr) composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 1988, vol. 110, iss. 1-2, pp. 81–85. doi: 10.1016/S0257-8972(98)00675-6

22. Li Q., Zhang D., Lei T., Chen Ch., Chen W. Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures. *Surface and Coatings Technology*, 2001, vol. 137, iss. 2-3, pp. 122–135. doi: 10.1016/S0257-8972(00)00732-5

23. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, pp. 472–481. doi: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121

24. Llanes L., Tarrés E., Ramírez G., Botero C.A., Jiménez-Piqué E. Fatigue susceptibility under contact loading of hardmetals coated with ceramic films. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, iss. 1, pp. 299–308. doi: 10.1016/j. proeng.2010.03.033

Funding

The reported study was partly supported by fundamental research RAS project No. 12-T-1-1010 and RFBR, research project No. 13-01-00732_a. Study was carried out on the equipment of the Collective center "Plastometria", Institute of Engineering Science, Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

Received 02 November 2014 Revised 10 November 2014 Accepted 15 November 2014