

## ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА NiCrBSi ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

© 2017

**Н.Н. Соболева**, кандидат технических наук,  
научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения  
*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)*  
*Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия)*

**А.В. Макаров**, доктор технических наук,  
заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств  
*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева*  
*Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)*  
*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)*  
*Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия)*

**И.Ю. Малыгина**, кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения  
*Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)*

**Ключевые слова:** лазерная наплавка; NiCrBSi покрытия; ПГ-CP2; фрикционная обработка; микротвердость; микроиндентирование.

**Аннотация:** NiCrBSi покрытия находят широкое применение в различных отраслях промышленности как при восстановлении изношенных деталей, так и для улучшения качества поверхности новых изделий, подверженных в условиях эксплуатации воздействию высоких контактных нагрузок, температур и агрессивных сред. Возможно использование фрикционной обработки таких покрытий в качестве финишной операции. Это позволяет обеспечить одновременно дополнительное повышение прочностных и трибологических свойств, формирование благоприятных сжимающих напряжений, а также низкую шероховатость поверхности. В настоящей работе для оценки механических характеристик покрытия ПГ-CP2 (0,48 % C; 14,8 % Cr; 2,6 % Fe; 2,9 % Si; 2,1 % В; остальное – Ni) с фрикционно обработанным поверхностным слоем применялось микроиндентирование, позволяющее записывать диаграммы нагружения и разгрузки индентора, и измерения микротвердости при разных нагрузках (0,098–9,81 Н), обеспечивающие различную глубину внедрения индентора.

Сравнение данных микротвердости и микроиндентирования поверхности покрытия ПГ-CP2 в различном состоянии показало, что фрикционная обработка индентором из природного алмаза в аргоне, индентором из мелкодисперсного нитрида бора DBN на воздухе, индентором из твердого сплава ВК8 в аргоне при нагрузке 350 Н способствовала повышению микромеханических характеристик по сравнению с электрополированным состоянием. При этом наиболее эффективное упрочнение поверхностного слоя NiCrBSi покрытия достигается при обработке индентором из мелкодисперсного нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н. Механическое шлифование на станке обеспечивает существенно меньшие уровни микромеханических характеристик, чем фрикционная обработка по такому режиму. Результаты микроиндентирования могут быть соотнесены с развитием различных механизмов изнашивания при абразивном воздействии и трении скольжения.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое применение для восстановления изношенных поверхностей разнообразных изделий находят NiCrBSi покрытия [1; 2]. При этом сформированные лазерной наплавкой NiCrBSi покрытия вследствие повышенной скорости охлаждения могут иметь преимущества в прочностных и трибологических свойствах по сравнению с покрытиями, сформированными плазменными [3; 4] и газоплазменными [5; 6] методами.

Ранее авторами для покрытия ПГ-CP2, сформированного газопорошковой лазерной наплавкой, была показана перспективность применения фрикционной обработки в качестве финишной поверхностно-деформационной обработки NiCrBSi покрытий [7–9]. Указанная обработка привела к формированию низкой шероховатости поверхности ( $Ra=25-80$  нм), а также обеспечила эффективное упрочнение и повышение износостойкости в условиях трения скольжения по стальной пластине [7; 8]. В последние годы для оценки механических характеристик хромоникелевых покрытий все шире

используются современные методы микроиндентирования, позволяющие записывать диаграммы нагружения и разгрузки индентора [6; 9–12].

Цель работы – определение микромеханических свойств поверхностных слоев NiCrBSi покрытий с фрикционно обработанным поверхностным слоем.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для покрытий служил порошок марки ПГ-CP2 (0,48 % C; 14,8 % Cr; 2,6 % Fe; 2,9 % Si; 2,1 % В; остальное – Ni). Наплавку покрытия на пластину из низкоуглеродистой стали Ст3 осуществляли в два прохода CO<sub>2</sub>-лазером непрерывного действия с мощностью излучения 1,4–1,6 кВт при скорости 160 мм/мин, расходе порошка 2,9–3,8 г/мин, размере лазерного пятна на поверхности 6×1,5 мм. Фрикционную обработку плоских наплавленных образцов с электрополированной поверхностью выполняли полусферическими инденторами из мелкодисперсного кубического нитрида бора, твердого сплава ВК8 и природного алмаза при нагрузке 350 Н на воздухе и в аргоне при пятикратном сканиро-

вании со средней скоростью 0,013 м/с, длине хода 18 мм, смещении индентора 0,1 мм на двойной ход.

Микротвердость по методу восстановленного отпечатка измеряли на микротвердомере Wilson & Wolpert 402 MVD при нагрузках 0,098–9,81 Н на индентор Виккерса. Инструментированное микроиндентирование с записью диаграммы нагружения проводили на измерительной системе Fischerscope HM2000 XYm с использованием индентора Виккерса и программного обеспечения WIN-HCU при максимальной нагрузке 0,245 Н согласно стандарту ISO 14577 [13]. Погрешность характеристик микротвердости и микроиндентирования по 10 измерениям определяли по величине среднеквадратичного отклонения с доверительной вероятностью  $p=0,95$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

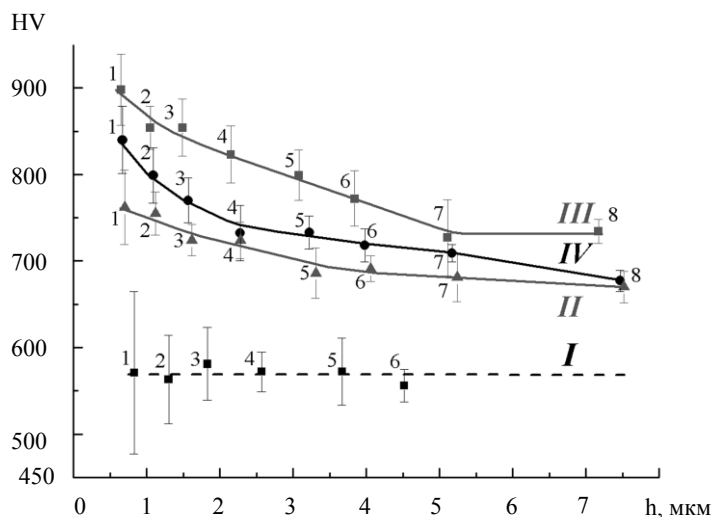
Фрикционная обработка скользящими полусферическими инденторами из различных твердых материалов (мелкодисперсный кубический нитрид бора, твердый сплав ВК8, алмаз) при определенных технологических режимах и выборе смазочно-охлаждающей технологической среды обеспечивает по сравнению с электрополированным состоянием и шлифовкой на станке более качественные поверхности с параметром шероховатости  $Ra=25-80$  нм и рост микротвердости покрытия (до 855 HV 0,025) [7]. Показано, что фрикционная обработка покрытия ПГ-СР2 индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н формирует сильно смешанную нано- и субмикрорекристаллическую структуру в тонком поверхностном слое толщиной 5–7 мкм при общей толщине упрочненного слоя до 100 мкм [8].

На рисунке 1 приведены распределения микротвердости по глубине поверхностных слоев наплавленного

лазером покрытия ПГ-СР2 после фрикционной обработки по трем перспективным режимам (индентором из природного алмаза в аргоне при нагрузке 350 Н; индентором из мелкодисперсного нитрида бора DBN на воздухе при нагрузке 350 Н; индентором из твердого сплава ВК8 в аргоне при нагрузке 350 Н), которые одновременно обеспечивают упрочнение и высокое качество обработанной поверхности [7]. Из рисунка 1 следует, что при всех рассмотренных режимах фрикционная обработка создает на поверхности рассматриваемого наплавленного покрытия упрочненный градиентный слой с максимальной микротвердостью (и, следовательно, наибольшей степенью деформации) непосредственно на поверхности образцов, при этом обработка индентором из DBN на воздухе при нагрузке 350 Н обеспечивает наиболее эффективное упрочнение по сравнению с двумя другими рассматриваемыми режимами фрикционной обработки не только на поверхности покрытия, но и в подповерхностных слоях.

На рисунке 2 приведены диаграммы непрерывного вдавливания при максимальной нагрузке на индентор Виккерса 0,245 Н, полученные микроиндентированием поверхностей покрытия ПГ-СР2 в электрополированном состоянии и после фрикционной обработки. Используя кривые нагружения (пологие кривые слева на диаграмме,  $a \rightarrow b$ ) и кривые разгрузки (более крутые кривые справа на диаграмме,  $b \rightarrow c$ ) по методу Оливера и Фарра [14] определялись представленные в таблице 1 характеристики, отражающие особенности механического поведения рассматриваемых покрытий при упруго-пластическом деформировании.

Приведенные в таблице 1 данные кинетического микроиндентирования показывают, что фрикционная



**Рис. 1.** Зависимости микротвердости HV поверхности покрытия ПГ-СР2 от глубины внедрения  $h$  наконечника Виккерса:

*a* – покрытие после электрополировки (I) и фрикционной обработки при нагрузке  $P=350$  Н инденторами из различных материалов в различных смазочно-охлаждающих технологических средах (II–IV):

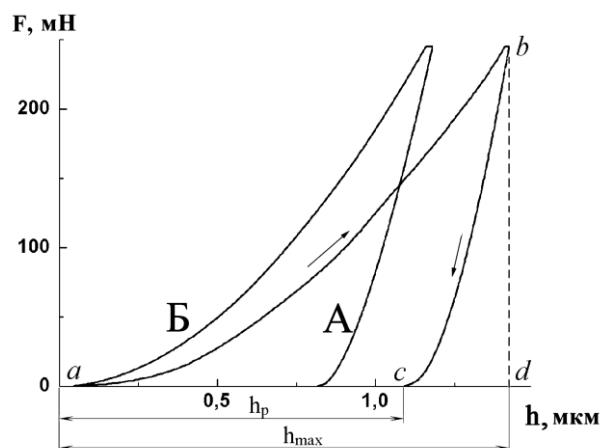
II – индентором из природного алмаза в аргоне;

III – индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора DBN на воздухе;

IV – индентором из твердого сплава ВК8 в аргоне.

Цифры 1–8 на графиках соответствуют нагрузкам на индентор:

1 – 0,098 Н; 2 – 0,245 Н; 3 – 0,49 Н; 4 – 0,98 Н; 5 – 1,96 Н; 6 – 2,94 Н; 7 – 4,95 Н; 8 – 9,81 Н



**Рис. 2.** Примеры экспериментальных кривых «нагрузка  $F$  – перемещение индентора  $h$ » при микроиндентировании поверхностей образцов с покрытиями ПГ-СР2 после электрополировки (А) и фрикционной обработки при нагрузке 350 Н индентором из мелкодисперсного нитрида бора DBN на воздухе (Б) при максимальной нагрузке на индентор Виккерса 0,245 Н

**Таблица 1.** Результаты микроиндентирования при нагрузке на индентор 0,245 Н поверхностей образцов с покрытием ПГ-СР2 после электрополировки, шлифовки на станке и фрикционной обработки (ФО) при нагрузке 350 Н

Состояние образца	$h_{max}$ , мкм	$h_p$ , мкм	НМ, ГПа	$H_{IT}$ , ГПа	$E^*$ , ГПа	$W_e$ , нДж	$W_t$ , нДж	$R_e$ , %	$H_{IT}/E^*$	$H_{IT}^3/E^{*2}$ , ГПа
Электрополировка	1,46±0,02	1,10±0,12	4,5±0,2	5,9±0,2	189±2	30±1	112±4	24,5	0,032	0,006
Шлифовка на станке	1,25±0,26	0,93±0,08	6,1±0,3	8,4±0,4	224±7	29±1	103±3	25,6	0,038	0,012
ФО индентором из природного алмаза в аргоне	1,24±0,01	0,90±0,06	6,2±0,1	8,8±0,2	208±2	32±1	102±2	27,3	0,043	0,016
ФО индентором из мелкодисперсного нитрида бора DBN на воздухе	1,19±0,02	0,82±0,06	6,8±0,2	10,1±0,3	202±5	35±1	98±2	30,8	0,050	0,025
ФО индентором из твердого сплава ВК8 в аргоне	1,24±0,01	0,89±0,07	6,2±0,1	8,9±0,2	201±2	33±1	103±1	28,5	0,044	0,017

обработка поверхности покрытия ПГ-СР2 по всем трем рассматриваемым режимам по сравнению с недеформированным электрополированным состоянием поверхности приводит к снижению значений максимальной и остаточной глубины вдавливания индентора  $h_{max}$  и  $h_p$  (на рисунке 2 приведены для покрытия после электрополировки), а также росту значений твердости вдавливания при максимальной нагрузке  $H_{IT}$  и твердости по Мартенсу НМ, учитывающей не только пластическую, но и упругую деформации. Контактный модуль упругости поверхности покрытия  $E^*$  в результате фрикционной обработки изменяется незначительно (в пределах 9 %).

Повышается также работа обратной упругой деформации вдавливания  $W_e$ , которая определяется площадью под кривой разгрузки (на рисунке 2 для недеформированного покрытия это площадь фигуры  $cbd$ ). Величина

работы сил упругого последствия  $W_e$  зависит от отношения твердости к модулю упругости материала: вследствие роста этого отношения более значительная работа затрачивается на упругую деформацию и, следовательно, большая энергия упругой деформации высвобождается при снятии измерительной нагрузки [14].

Напротив, общая механическая работа вдавливания  $W_t$ , состоящая из работы пластической деформации и работы упругого восстановления и определяемая всей площадью под кривой нагружения (на рис. 2 для электрополированного покрытия это площадь фигуры  $abd$ ), для покрытий после обработки снижается (см. таблицу 1), так как более прочные и менее пластичные покрытия меньше деформируются под индентором.

Видно также, что после фрикционной обработки электрополированной поверхности в 1,1–1,6 раза возрастают значения упругого восстановления  $R = ((h_{max} - h_p)/h_{max}) \times 100\%$

[15–17] и отношения  $H_{IT}/E^*$  (удельная контактная твердость) [18]. Согласно [16; 19], это указывает на возросшую долю упругой деформации в общей деформации и, соответственно, на повышенную способность обработанного покрытия сопротивляться механическому воздействию до начала пластического деформирования. О повышенной способности хромоникелевых покрытий после фрикционной обработки деформироваться в упругой области свидетельствует [19] также рост работы обратной упругой деформации вдавливания  $W_e$  (см. таблицу 1).

Еще значительнее (до 4,2 раза) в результате фрикционной обработки возрастает отношение  $H^3/E^{*2}$  (см. таблицу 1), которому пропорционально напряжение течения  $P_y$  материала [20]. Это свидетельствует о повышенном сопротивлении пластическому деформированию (деформированию после начала пластического течения) материала покрытия, подвергнутого фрикционной обработке. Важно отметить, что из трех рассматриваемых режимов фрикционной обработки максимальные значения твердостей, упругого восстановления, отношений  $H_{IT}/E^*$  и  $H^3/E^{*2}$  при этом методе исследований отмечаются для образцов, обработанных индентором из DBN на воздухе при нагрузке 350 Н (см. таблицу 1).

Таким образом, и по данным измерений микротвердости с использованием метода восстановленного отпечатка (см. рисунок 1), и по данным кинетического микроиндентирования с записью диаграмм нагружения и разгрузки индентора (см. таблицу 1), наиболее эффективное упрочнение поверхностного слоя наплавленного лазером покрытия ПГ-СР2 достигается фрикционной обработкой индентором из мелкодисперсного нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н.

Из данных таблицы 1 следует также, что механическое шлифование на станке обеспечивает меньшие уровни прочностных микромеханических характеристик, чем фрикционная обработка по указанному наиболее эффективному режиму.

Результаты микроиндентирования могут быть соотнесены с развитием различных механизмов изнашивания при абразивном воздействии и трении скольжения, что впервые было показано для сталей в работе [21]. В работе [9] для покрытия ПГ-СР2 установлено, что повышение износостойкости при трении скольжения, обусловленное сменой механизмов изнашивания, является следствием повышенной способности обработанного индентором поверхностного слоя деформироваться в упругой области без остаточного формоизменения, а также эффективнее сопротивляться пластическому деформированию после начала течения металла, на что указывают данные кинетического микроиндентирования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Фрикционная обработка во всех рассмотренных случаях (индентором из природного алмаза в аргоне, индентором из мелкодисперсного нитрида бора DBN на воздухе, индентором из твердого сплава ВК8 в аргоне при нагрузке 350 Н) привела к повышению микромеханических характеристик поверхностных слоев покрытия ПГ-СР2 по сравнению с электрополированным состоянием. Максимальная микротвердость достигается на поверхности деформированных покрытий, при этом

наибольшее упрочнение обеспечивается применением фрикционной обработки индентором из мелкодисперсного нитрида бора DBN на воздухе. Это согласуется с данными кинетического микроиндентирования, которые свидетельствуют о повышенной способности обработанного по такому режиму поверхностного слоя деформироваться в упругой области без остаточного формоизменения, а также эффективнее сопротивляться пластическому деформированию после начала течения материала. Результаты микроиндентирования могут быть полезны для оценки влияния фрикционной обработки на сопротивление различным видам изнашивания NiCrBSi покрытий.

*Работа выполнена в соответствии с планом ФНИ Государственных академий наук на 2013–2020 годы по теме № 01201375904, в рамках государственного задания ФАНО России по темам «Структура» № 01201463331 (проект № 15-9-12-45), при частичной поддержке гранта РФФИ №16-38-00452\_мол\_а. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.*

*Статья подготовлена по материалам докладов участников VIII Международной школы «Физическое материаловедение» с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 3–12 сентября 2017 г.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Navas C., Colaco R., De Damborenea J., Vilar R. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. № 24. P. 6854–6862.
2. Fernández E., Cadenas M., González R., Navas C., Fernández R., Damborenea J.D. Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating // *Wear*. 2005. Vol. 259. № 7-12. P. 870–875.
3. Xu G., Kutsuna M., Liu Z., Zhang H. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes // *Materials Science and Engineering A*. 2006. Vol. 417. № 1-2. P. 63–72.
4. Xu G., Kutsuna M., Liu Z. CO<sub>2</sub> laser cladding and plasma cladding of Ni-based alloy powder on the SUS316LN stainless steel // *JSME International Journal C*. 2006. Vol. 49. № 2. P. 370–378.
5. González R., Cadenas M., Fernández R., Cortizo J.L., Rodríguez E. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser // *Wear*. 2007. Vol. 262. № 3-4. P. 301–307.
6. Gómez-del Río T., Garrido M.A., Fernández J.E., Cadenas M., Rodríguez J. Influence of the deposition techniques on the mechanical properties and microstructure of NiCrBSi coatings // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 204. № 1-3. P. 304–312.
7. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Упрочняющая фрикционная обработка NiCrBSi лазерного покрытия // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2013. № 4. С. 79–85.
8. Soboлева N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu., Savrai R.A. Wear Resistance of a Laser-Clad NiCrBSi Coating Hardened by Frictional Finishing // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1785. № 030028.
9. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Саврай Р.А., Малыгина И.Ю. Повышение микромеханических свойств и износостойкости хромоникелевого лазерного

- покрытия финишной фрикционной обработкой // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 4. С. 60–67.
10. Xuan H.-F., Wang Q.-Y., Bai S.-L., Liu Z.-D., Sun H.-G., Yan P.-C. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 244. P. 203–209.
  11. Serres N., Portha N., Machi F. Influence of salt fog aging tests on mechanical resistance of laser clad-coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 205. P. 5330–5337.
  12. Houdková Š., Smazalová E., Vostřák M., Schubert J. Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 253. P. 14–26.
  13. ISO 14577-1:2002. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method. 31 p.
  14. Oliver W.C., Pharr J.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Journal of Materials Research*. 1992. Vol. 7. № 6. P. 1564–1583.
  15. Page T.F., Hainsworth S.V. Using nanoindentation techniques for the characterization of coated systems: a critique // *Surface and Coatings Technology*. 1993. Vol. 61. № 1–3. P. 201–208.
  16. Петржик М.И., Левашов Е.А. Современные методы изучения функциональных поверхностей перспективных материалов в условиях механического контакта // *Кристаллография*. 2007. Т. 52. № 6. С. 1002–1010.
  17. Петржик М.И., Филонов М.Р., Печёркин К.А., Левашов Е.А., Олесова В.Н., Поздеев А.И. Износостойкость и механические свойства сплавов медицинского назначения // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. 2005. № 6. С. 62–69.
  18. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Печковский Э.П. Новые методологические возможности определения механических свойств современных материалов методом автоматического индентирования // *Наука та інновації*. 2010. Т. 6. № 5. С. 7–18.
  19. Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation // *Applied Physics Letters*. 1998. Vol. 73. № 5. P. 614–618.
  20. Mauryhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 174–175. P. 725–731.
  21. Макаров А.В., Поздеева Н.А., Саврай Р.А., Юровских А.С., Малыгина И.Ю. Повышение износостойкости закаленной конструкционной стали наноструктурирующей фрикционной обработкой // *Трение и износ*. 2012. Т. 33. № 6. С. 587–598.
  22. clad NiCrBSi coating. *Wear*, 2005, vol. 259, no. 7-12, pp. 870–875.
  23. Xu G., Kutsuna M., Liu Z., Zhang H. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes. *Materials Science and Engineering A*, 2006, vol. 417, no. 1-2, pp. 63–72.
  24. Xu G., Kutsuna M., Liu Z. CO<sub>2</sub> laser cladding and plasma cladding of Ni-based alloy powder on the SUS316LN stainless steel. *JSME International Journal C*, 2006, vol. 49, no. 2, pp. 370–378.
  25. González R., Cadenas M., Fernández R., Cortizo J.L., Rodriguez E. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser. *Wear*, 2007, vol. 262, no. 3-4, pp. 301–307.
  26. Gómez-del Río T., Garrido M.A., Fernández J.E., Cadenas M., Rodriguez J. Influence of the deposition techniques on the mechanical properties and microstructure of NiCrBSi coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 204, no. 1-3, pp. 304–312.
  27. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu. Hardening frictional treatment of NiCrBSi laser clad coating. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2013, no. 4, pp. 79–85.
  28. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu., Savrai R.A. Wear Resistance of a Laser-Clad NiCrBSi Coating Hardened by Frictional Finishing. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1785, no. 030028.
  29. Makarov A.V., Soboleva N.N., Savrai R.A., Malygina I.Yu. The improvement of micromechanical properties and wear resistance of chrome-nickel laser coating using the finishing friction treatment. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 60–67.
  30. Xuan H.-F., Wang Q.-Y., Bai S.-L., Liu Z.-D., Sun H.-G., Yan P.-C. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 244, pp. 203–209.
  31. Serres N., Portha N., Machi F. Influence of salt fog aging tests on mechanical resistance of laser clad-coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. 5330–5337.
  32. Houdková Š., Smazalová E., Vostřák M., Schubert J. Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 253, pp. 14–26.
  33. ISO 14577-1:2002. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method. 31 p.
  34. Oliver W.C., Pharr J.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583.
  35. Page T.F., Hainsworth S.V. Using nanoindentation techniques for the characterization of coated systems: a critique. *Surface and Coatings Technology*, 1993, vol. 61, no. 1–3, pp. 201–208.
  36. Petrzhik M.I., Levashov E.A. Modern methods for investigating functional surfaces of advanced materials by mechanical contact testing. *Crystallography Reports*, 2007, vol. 52, no. 6, pp. 966–974.

## REFERENCES

1. Navas C., Colaco R., De Damborenea J., Vilar R. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, no. 24, pp. 6854–6862.
2. Fernández E., Cadenas M., González R., Navas C., Fernández R., Damborenea J.D. Wear behaviour of laser

17. Petrzhik M.I., Filonov M.R., Pecherkin K.A., Levashov E.A., Olesova V.N., Pozdeev A.I. Wear resistance and mechanical properties of medical alloys. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2005, no. 6, pp. 62–69.
18. Firstov S.A., Gorban V.F., Pechkovsky E.P. New methodological opportunities of modern materials mechanical properties definition by the automatic indentation method. *Nauka ta innovatsii*, 2010, vol. 6, no. 5, pp. 7–18.
19. Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 73, no. 5, pp. 614–618.
20. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 174–175, pp. 725–731.
21. Makarov A.V., Pozdeeva N.A., Savray R.A., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu. Improvement of wear resistance of quenched structural steel by nanostructuring frictional treatment. *Journal of friction and wear*, 2012, vol. 33, no. 6, pp. 433–442.

#### THE INFLUENCE OF FRICTIONAL TREATMENT ON THE MICROMECHANICAL PROPERTIES OF NiCrBSi COATING PRODUCED BY LASER CLADDING

© 2017

**N.N. Soboleva**, PhD (Engineering), researcher of Laboratory of Constructional Material Science  
*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (Russia)*

**A.V. Makarov**, Doctor of Sciences (Engineering),

Head of Department of Materials Science and Laboratory of Mechanical Properties

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
*M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg (Russia)*

**I.Yu. Malygina**, PhD (Engineering), senior researcher of Laboratory of Constructional Material Science  
*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*

*Keywords:* laser cladding; NiCrBSi coatings; PG-SR2; frictional treatment; microhardness; microindentation.

*Abstract:* The NiCrBSi coatings are widely used in various industries, both when retailoring the worn parts, and when improving the surface quality of new products exposed to the high contact stresses, temperatures and corrosive environments under the operating conditions. It is possible to use the frictional treatment of such coatings as a finishing operation. It allows providing the additional increase in strength and tribological properties, the formation of favorable compressive stresses, and the low surface roughness as well. In this paper, to evaluate the mechanical characteristics of the PG-CP2 coating (0.48 % C; 14.8 % Cr; 2.6 % Fe; 2.9 % Si; 2.1 % B; the rest is Ni) with the frictionally treated surface layer, the authors used the microindentation allowing the recording of the indenter loading and unloading diagrams, and the measuring of microhardness at different loads (0.098–9.81 N) ensuring various depths of indenter penetration. The comparison of data of the PG-CP2 coating surface microhardness and microindentation in various states showed that the frictional treatment with the natural diamond indenter in argon, the dispersed boron nitride (DBN) indenter in air, and the hard alloy (BK8) indenter in argon at the load of 350 N promoted the increase in the micromechanical characteristics in comparison with the electropolished state. The most effective hardening of the NiCrBSi coating surface layer is achieved when treated with the dispersed boron nitride indenter in the air at the load of 350 N. The mechanical on-machine grinding provides the significantly lower levels of micromechanical characteristics than the frictional treatment under this mode. The microindentation results can be correlated with the development of various wear mechanisms during the abrasive action and sliding friction.